





*Wiemy  
jak poruszyć  
wyobraźnię*

**Prenumerata 2020**

Formularz zamówienia na: [www.aspresa.com.pl/prenumerata-2020/](http://www.aspresa.com.pl/prenumerata-2020/)

eprasa.pl 8a1596c611

## Drodzy Czytelnicy!

Zacznę od banalnego stwierdzenia, które zresztą już nie raz padało na łamach „Fizyki w Szkole”, a możliwe, że nie raz już pojawiało się w artykułach wstępnych. Otóż fizyka jest nauką eksperymentalną. Również nauczanie fizyki w dużej części opiera się na eksperymentach. Dobrze przy tym, aby to były eksperymenty efektywne. Które dziedzina fizyki dostarcza najbardziej efektywnych eksperymentów? Moim zdaniem jest to optyka. Na drugim jest nauka o prądzie. Zwłaszcza efektywne są eksperymenty dotyczące wysokich napięć.

Wysokie napięcia i przy okazji wysokie natężenia pojawiają się w naturze spontanicznie. Mamy tu na myśli wyładowania atmosferyczne zwane popularnie błyskawicami. Najbardziej tajemnicza z nich nosi nazwę pioruna kulistego. Są to przepiękne przykłady zjawiska zwanego łukiem elektrycznym. Łukowi elektrycznemu towarzyszy powstawanie plazmy, czyli stanu materii charakteryzującego się dużą ilością zjonizowanych atomów i swobodnych elektronów. Łuk elektryczny ma tę cechę, że bardzo intensywnie świeci. Wiedzą o tym oczywiście spawacze, którzy muszą się przednim chronić zakładając ochronne maski.

Oczywiście uczniowie większości szkół średnich nie mają zajęć ze spawania. Chcąc wytworzyć łuk elektryczny muszą się posłużyć innymi technikami. Na szczęście istnieje wiele generatorów pozwalających otrzymywać wysokie napięcia. Jeśli chcą się Państwo dowiedzieć jakie to konkretnie urządzenia i jakie eksperymenty można przeprowadzać za ich pomocą, to zapraszam do lektury artykułu Andrzeja Kuczkowskiego pt. „Wysokie napięcie: Źródła i efekty z nim związane”.

Może się jednak zdarzyć, że opisane eksperymenty wydadzą się uczniom i studentom mało medialne, co w naszych czasach nie brzmi dobrze. Jak uczynić więc nasz eksperyment bardziej medialny? Otóż należy zaprząść do niego urządzenie, którym 99,9% młodzieży jest zafascynowane. Oczywiście mam na myśli smartfon. Jak przekonuje w swoim artykule Krzysztof Rochowicz ten współczesny gadżet to tak naprawdę kieszonkowe wyrafinowane laboratorium fizyczne. Trzeba tylko znać sposób jak wykorzystać jego możliwości. Kilka rad na ten temat znajdzie Państwo we wspomnianym artykule. Nie pozostaje mi nic innego jak zaprosić do lektury tego i wszystkich pozostałych artykułów.

**W imieniu redakcji**  
**Zbigniew Wiśniewski**



## 24 Wstęp do teledetekcji, czyli optyka w praktyce † Marcin Spiralski

Dyscyplina ta, to jedna z najprężniej rozwijających się dziedzin nauki, zwłaszcza biorąc pod uwagę rozwój technologii bezzałogowych oraz miniaturyzację sensorów optycznych.

## Fizyka wczoraj, dziś, jutro

### 4 Redefinicja SI † Jan Kurzyk

Od 20 maja 2019 roku obowiązują nowe definicje jednostek miar SI sformułowane i zatwierdzone na XXVI Generalnej Konferencji Miar, która odbyła się w dniach 13–16 listopada 2018 roku.

### 10 Co warto wiedzieć o CERN? † Tomasz Kubiak

### 38 Wysokie napięcie: Źródła i niezwykle efekty z nim związane † Andrzej Kuczkowski

Według przyjętej w elektrotechnice konwencji, wysokim napięciem w obwodach prądu przemiennego, nazywa się napięcie większe od 1000 V i płynące przy częstotliwości nie większej od 60 Hz.



### 46 Paradoxy szczególnej teorii względności. Część V † Jan Kurzyk

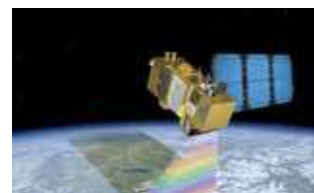
## Z naszych lekcji

### 18 Zastosowanie obrazów satelitarnych na lekcjach szkolnych † Aleksander Jasiak

### 21 Praktyczne poznawanie fizyki, czyli latarka Faradaya i inne urządzenia † Kazimierz Mikulski

### 28 O brzytwie Ockhama i definicji prędkości † Waldemar Reńda

### 36 Smartfon jako pomoc w nauczaniu fizyki † Krzysztof Rochowicz



## Astronomia dla każdego

### 30 Fizyka w liceum. Astronomia w zadaniach fizycznych † Waldemar Reńda

Dawniej astronomia była osobnym przedmiotem w liceach. W wyniku kolejnych reform programowych została ona włączona do fizyki. Dotyczyło to astrofizyki. Z reszty zrezygnowano. Uważam, że na tym „mariażu” astronomia wiele straciła, ale zyskała fizyka.



**FIZYKA**  
w Szkole z Astronomią

NUMER 5 WRZESIEŃ/PAŹDZIERNIK 2019 Nakład 3000 egz. CENA 27,50 zł  
364 (LXII) indeks 35810X ISSN 0426-3383 (w tym 5% VAT)

**Komitet redakcyjny** Krystyna Jabłońska-Ławniczak, Jerzy Kreiner, Andrzej Majhofer (Przewodniczący Komitetu), Zygmunt Mazur, Andrzej Szymacha, Mirosław Trociuk  
**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-2020/, e-mail: szewczyk24@gmail.com, tel. 606 201 244 **Reklama** Jędrzej Chodakowski, jchodakowski1953@gmail.com **Skład i łamanie** Vega design **Druk i oprawa** Paper & Tinta, ul. Ceglana 34, 05-270 Nadma

Zdjęcie na okładce i w spisie treści: Adobe Stock

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



Rysunek 1. Nowa koncepcja SI. Ustalenie wartości 7. stałych podstawowych i powiązanie tych stałych z siedmioma podstawowymi jednostkami miar.

Od 20 maja 2019 roku obowiązują nowe definicje jednostek miar SI sformułowane i zatwierdzone na XXVI Generalnej Konferencji Miar, która odbyła się w dniach 13–16 listopada 2018 roku.

# Redefinicja SI

Jan Kurzyk

Generalna Konferencja Miar<sup>1</sup> jest najwyższym organem Międzynarodowego Biura Miar i Wag<sup>2</sup>, organizacji międzyrządowej powstałej w 1875 roku, za pośrednictwem której państwa członkowskie działają wspólnie w kwestiach związanych z nauką o pomiarach i normami pomiarowymi.

## Stare definicje jednostek podstawowych SI

Do czasu XXVI Generalnej Konferencji Miar istniał podział na jednostki podstawowe: sekunda, metr, kilogram, amper, kelwin, mol i kandela i jednostki pochodne, czyli pozostałe jednostki, które mogą być zapisane jako iloczynny potęg jednostek podstawowych. W nowej definicji SI podział na takie kategorie nie jest już konieczny, gdyż układ oparto nie o siedem jednostek podstawowych, lecz o 7 stałych podstawowych. Ale ze względu na wygodę i powszechność wcześniejszego podziału został on utrzymany. Poniżej przypominam definicje jednostek podstawowych, jakie obowiązywały do 20. maja tego roku wraz z podaniem roku, w którym sformułowano definicję.

**sekunda** (definicja z 1997 roku) – czas równy

9 192 631 770 okresom promieniowania odpowiadającego przejściu między dwoma nadsubtelnymi poziomami stanu podstawowego atomu cezu 133.

**metr** (definicja z 1983 roku) – długość drogi przebytej w próżni przez światło w czasie 1/299 792 458 sekundy.

**kilogram** (definicja z 1889 roku!) – jednostka masy, która jest równa masie międzynarodowego prototypu kilograma przechowywanego w Międzynarodowym Biurze Miar w Sèvres.

**amper** (definicja z 1948 roku) – prąd elektryczny niezmienny się, który, płynąc w dwóch równoległych prostoliniowych, nieskończenie długich przewodach o przekroju kołowym znikomo małym, umieszczonych w próżni w odległości 1 metra od siebie, wywołałby między tymi przewodami siłę  $2 \times 10^{-7}$  niutona na każdy metr długości.

**kelwin** (definicja z 1967 roku) – 1/273,16 część temperatury termodynamicznej punktu potrójnego wody.

**mol** (definicja z 1971 roku) – liczność materii układu zawierającego liczbę cząstek równą liczbie atomów w masie 0,012 kilograma węgla 12; przy stosowaniu moła należy określić rodzaj cząstek, którymi mogą być: atomy, cząsteczki, jony, elektrony, inne cząstki lub określone zespoły takich cząstek.

**kandela** (definicja z 1979 roku) – światłość źródła emi-

<sup>1</sup> ang. The General Conference on Weights and Measures – GCWM, franc. Conférence générale des poids et mesures – CGPM

<sup>2</sup> ang. International Bureau of Weights and Measures – IBWM, franc. Bureau international des poids et mesures – BIPM

tującego w określonym kierunku promieniowanie monochromatyczne o częstotliwości  $540 \times 10^{12}$  herców i o natężeniu promieniowania w tym kierunku równym  $1/683$  wata na steradian.

### Dlaczego zmieniamy SI?

Bardzo wiele aspektów naszego życia zwłaszcza w dziedzinach związanych z nauką, zdrowiem, środowiskiem i techniką wymaga coraz dokładniejszych pomiarów wielkości fizycznych. Najlepiej pod tym względem wypadają pomiary czasu i długości, w przypadku których niepewności względne wynoszą odpowiednio  $3 \cdot 10^{-15}$  i  $1 \cdot 10^{-12}$  [1]. W jednym i drugim przypadku pomiary wykorzystują współczesne możliwości pomiarów bardzo dużych częstotliwości promieniowania elektromagnetycznego oparte o technikę tzw. optycznego grzebieńa częstotliwości. Twórcy tej techniki John L. Hall i Theodor W. Hänsch otrzymali w 2005 roku połowę nagrody Nobla.

Tak dobra dokładność pomiarów długości i czasu przyczyniła się do tego, że pod koniec XX wieku (patrz poprzedni punkt) dokonano zmian definicji metra i sekundy i oparto ich definicje na stałych fizycznych stanowiących podstawę technik pomiarowych obu wielkości fizycznych. Pod tym względem definicje metra i sekundy wyraźnie odbiegały od definicji pozostałych jednostek miar, zwłaszcza archaicznej definicji kilograma.

Każdy kraj musi utrzymywać swoje wzorce jednostek miar. Odpowiednie instytucje tych krajów odpowiedzialne są między innymi za porównywanie wzorców krajowych z wzorcami międzynarodowymi. Oparcie definicji metra i sekundy na uniwersalnych stałych fizycznych ułatwiło realizację wzorców tych jednostek miar i utrzymywanie ich na właściwym poziomie.

Dużo gorzej jest w przypadku pozostałych podstawowych jednostek miar. Dlatego od dłuższego czasu oczekiwano ich redefinicji. XXVI CGPM gruntownie zmieniła definicje: kilograma, ampera, kelwina i mola. Rewolucja dotyczy zwłaszcza definicji kilograma. Dotychczasowa definicja odnosząca się do masy prototypu z 1899 roku w postaci walca platynowo irydowego, przechowywanego w sejfie Międzynarodowego Biura Miar i Wag w Sèvres koło Paryża była bardzo archaiczna, niewygodna, a przede wszystkim niestabilna. Każde państwo dysponowało swoją kopią tego wzorca (Polska kupiła swój wzorec w 1952 roku [1]) i co jakiś czas (średnio co kilkadziesiąt lat) musiało go legalizować przez porównanie jego wagi z wagą wzorca z Sèvres.

Zwróćmy uwagę, że w przypadku dotychczasowej definicji kilograma, jakkolwiek zmiana masy wzorca w Sèvres skutkowałą zmianą wartości jednostki masy na całym świecie. A tego typu wzorec niestety nie ma stałej masy. Wzorec z Sèvres i poszczególne wzorce państwowe ciągle nieznacznie zwiększają swoją wagę wskutek zachodzących na ich powierzchniach procesów chemicznych. Porównywanie wzorców wymagało skomplikowanych procedur czyszczących, które z kolei nieco „odchudzały” wzorce.

Ostatnie porównania wzorców państwowych z wzorcem z Sèvres pokazały, że rozrzut ich mas sięga 50  $\mu$ g

(masa odcisku palca!). Taki rozrzut nie ma oczywiście znaczenia dla zwykłych użytkowników SI, nawet takich, którzy handlują złotem czy diamentami. Ale ma ogromne znaczenie w wielu dziedzinach nauki, gdzie wymagane są bardzo duże dokładności pomiaru masy. Dla przykładu codzienne zapotrzebowanie noworodka na witaminę D wynosi właśnie ok. 50  $\mu$ g [2].

W końcu uznano, że definiowanie jednostki masy na podstawie wzorca, który się zmienia jest nie do zaakceptowania. W dodatku był to jedyny wzorec jednostki w postaci fizycznego obiektu. Oczywiście nowa definicja kilograma została tak sformułowana, aby nowy wzorec kilograma miał dokładnie (ze standardową niepewnością względną rzędu  $10^{-8}$ ) taką samą masę jaką ma stary wzorec dzisiaj.

### Stałe podstawowe użyte do redefinicji SI

Nowy układ jednostek SI jest oparty na siedmiu stałych nazwanych stałymi podstawowymi. Stałymi tymi są:

- |  $\Delta\nu_{Cs}$  – częstotliwość nadsubtelnego przejścia w atomach cezu 133 w niezaburzonym stanie podstawowym,
- |  $c$  – prędkość światła w próżni,
- |  $h$  – stała Plancka,
- |  $e$  – ładunek elementarny,
- |  $k$  – stała Boltzmana,
- |  $N_A$  – stała Avogadra,
- |  $K_{cd}$  – skuteczność świetlna monochromatycznego promieniowania o częstotliwości  $540 \times 10^{12}$  Hz.

Wszystkie stałe podstawowe poza ostatnią są uniwersalnymi stałymi fizycznymi. Stała  $K_{cd}$  ma inny charakter. Jest stałą zdefiniowaną na potrzeby definicji jednostki światłości źródła, kandel. Symbol kandel to cd, stąd indeks cd w oznaczeniu stałej. Sama wielkość fizyczna, której  $K_{cd}$  dotyczy, czyli światłość źródła odnosi się do sfery naszych zmysłów, a dokładnie zmysłu wzroku. To w jaki sposób oko ludzkie odczuwa światłość (jasność) źródła światła jest związane z budową naszego oka i zależy przede wszystkim od długości fali świetlnej. Podana w definicji stałej  $K_{cd}$  częstotliwość promieniowania odpowiada długości fali ok. 555 nm, na którą oko ludzkie jest najbardziej czułe.

Prędkość światła w próżni  $c$  jest specyficzną cechą przyrody i jedną z najważniejszych stałych fizycznych. Jest to największa prędkość, z jaką w próżni może przenosić się energia. Z taką prędkością poruszają się jedynie cząstki o zerowej masie spoczynkowej np. fotony (lub w innym ujęciu fale elektromagnetyczne).

Ładunek elementarny  $e$  jest najmniejszą porcją ładunku elektrycznego. Taki ładunek mają niektóre cząstki elementarne np. proton czy elektron. Jest to niepodzielna porcja ładunku elektrycznego. Istnieją co prawda cząstki elementarne (kwarki) mające ułamkową porcję tego ładunku, jednak mogą one istnieć jedynie w stanie związanym tworząc cząstki o ładunku będącym całkowitą wielokrotnością ładunku elementarnego.

Stała Boltzmana  $k$  (lub  $k_B$ ) jest stałą odkrytą przez austriackiego fizyka i filozofa Ludwiga Boltzmana (1844-1906) podczas badań nad kinetyczną teorią gazów. Wiąże ona średnią energię kinetyczną cząstek gazu z tempe-



Ludwig Eduard Boltzmann

raturą termodynamiczną  $T$  tego gazu  $\langle E_k \rangle = (f/2)k_B T$ , gdzie  $f$  jest liczbą stopni swobody cząsteczki gazu. Stała ta pojawia się również między innymi w termodynamicznych definicjach entropii i wszelkiego rodzaju rozkładach statystycznych opisujących układy wielu cząstek.

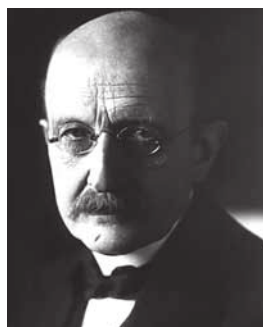
Amadeo Avogadro (1776-1856) był włoskim fizykiem, który zajmował się atomistyczną teorią budowy materii w jej początkach. Zawdzięczamy mu bardzo ważne prawo fizyczne mówiące, że w tych samych warunkach fizycznych tj. w takiej samej temperaturze i pod takim samym ciśnieniem, w równych objętościach różnych gazów znajduje się taka sama liczba cząsteczek. Nazwę *stała Avogadra* wprowadził Jean Perrin



Amadeo Avogadro

(1870-1940) francuski fizyk, laureat nagrody Nobla, który jako pierwszy wyznaczył jej wartość. Należy odróżniać stałą Avogadra od liczby Avogadra. Obie mają te same oznaczenia, lecz stała Avogadra jest wielkością mianowaną, jej jednostką jest  $\text{mol}^{-1}$ , zaś liczba Avogadra jest bezwymiarowa.

Stała Plancka  $h$  jest jedną z najbardziej fundamentalnych stałych w przyrodzie. Pojawia się ona w większości równań mechaniki kwantowej. Wprowadzona została przez niemieckiego fizyka Maxa Plancka (1858-1947) w jego rewolucyjnej pracy wyjaśniającej promieniowanie ciał (dokładnie promieniowanie tzw. ciała doskonale czarnego). Praca ta przyczyniła się do powstania nowego działu fizyki – mechaniki kwantowej.



Max Planck

Wszystkie wcześniejsze próby opisu promieniowania ciała doskonale czarnego oparte o mechanikę klasyczną zawodziły. Planck założył, że energia nie może być wypromieniowywana w dowolnych ilościach, a jedynie w postaci skończonych porcji nazywanych dziś kwantami. Według Plancka energia takiego kwantu przyjmuje wartość  $h\nu$ , gdzie  $\nu$  jest częstotliwością promieniowania związanego z tym kwantem, a  $h$  jest stałą nazwaną na cześć jej odkrywcy stałą Plancka. Pierwszego oszacowania wartości tej stałej dokonał sam Planck. Dziś potrafimy mierzyć wartość stałej Plancka z ogromną dokładnością.

Stała  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  (indeks Cs pochodzi od symbolu chemicznego cezu) wymaga nieco dłuższego opisu. W przeciwieństwie do wymienionych wyżej stałych fizycznych, zwłaszcza stałej Plancka czy prędkości światła w próżni, stała  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  nie ma charakteru fundamentalnej stałej fizycznej. Jest to po prostu częstotliwość fali elektromagnetycznej powstającej w ściśle określonych warunkach. Fala elektromagnetyczna stojąca za stałą  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  znalazła bardzo praktyczne i spektakularne zastosowanie.

Każdy zegar musi być wyposażony w oscylator i licznik potrafiący zliczać oscylacje tego oscylatora. Czym

większa i stabilniejsza jest częstotliwość oscylacji w zegarze, tym dokładniej możemy mierzyć czas. W przypadku oscylatorów mechanicznych, z jakimi mamy do czynienia w zegarkach sprężynowych lub wahadłowych dokładność ta jest niewielka. W zegarach kwarcowych oscylatorem jest drgający kryształ kwarcu. Wykorzystując zjawisko piezoelektryczne możemy ten kryształ wprawić w drgania o częstotliwości ok. 32 kHz co pozwala na osiągnięcie dość dobrej dokładności tego typu zegarów.

Pierwszy zegar atomowy zbudowany w 1945 roku w amerykańskim Narodowym Biurze Standaryzacji wykorzystywał spektralną linię amoniaku o częstotliwości 23870,1 MHz. Mimo to zegar ten osiągał gorszą dokładność od zegarów kwarcowych. Jednak dalsze badania i rozwój tej techniki doprowadziły do powstania bardzo dokładnych zegarów atomowych wykorzystujących atomy cezu w jego odmianie izotopowej 133 (jedynej stabilnej). Ta odmiana cezu charakteryzuje się linią widmową o częstotliwości ok. 9 GHz wykorzystywaną w zegarach cezowych. Częstotliwość tego promieniowania została przyjęta jako jedna z siedmiu stałych, na bazie których zbudowano nowy układ jednostek miar SI.

W definicji stałej  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  jest mowa o przejściu nadsubtelnym w niezaburzonym stanie podstawowym. Co oznacza to sformułowanie? Układy tego typu jak atom nie mogą przyjmować dowolnych energii. Ich energie są skwantowane, co oznacza, że atom może znajdować się tylko w stanach o ściśle określonych energiach. Stany energetyczne atomów są reprezentowane przez kilka tzw. liczb kwantowych. Często zdarza się, że danej energii może odpowiadać kilka zestawów takich liczb kwantowych. Mówimy wówczas, że stany te są zdegenerowane. Degeneracja może zniknąć np. pod wpływem pola magnetycznego. Wówczas stany zdegenerowane rozszczepiają się na dwa lub więcej różnych stanów o zbliżonej do siebie energii.

Do takiej sytuacji dochodzi w atomach wskutek oddziaływania między polem magnetycznym elektronu związanym z jego tzw. orbitalną liczbą kwantową, a polem magnetycznym związanym z jego liczbą spinową. Nazywamy to oddziaływaniem *spinowo-orbitalnym*.

Klasycznie można to sobie wyobrazić jako oddziaływanie między polem magnetycznym powstałym wskutek ruchu orbitalnego jakiegoś naładowanego ładunkiem elektrycznym ciała, a polem magnetycznym związanym z ruchem wirowym tego ciała.

Innym powodem zniknięcia degeneracji i tym samym rozczepienia stanów zdegenerowanych w atomie jest oddziaływanie pola magnetycznego związanego ze spinem elektronu z polem magnetycznym jądra. Pierwsze z tych oddziaływań prowadzi do powstania tzw. subtelnej struktury energetycznej, a drugie do powstania tzw. struktury nadsubtelnej [3].

Nazwy związane są z wielkością rozszczepień stanów energetycznych, które w przypadku struktury nadsubtelnej są dużo mniejsze od rozszczepień struktury subtelnej. W przypadku niektórych atomów ich stan podstawowy (stan o najniższej energii) nie wykazuje rozszczepienia subtelnego, natomiast obecne są dwa stany nadsubtelne. Jest tak właśnie w przypadku cezu 133.

Częstotliwość  $\Delta\nu_{Cs}$  jest częstotliwością fali elektromagnetycznej emitowanej podczas przejścia pomiędzy takimi właśnie nadsubtelnymi stanami energetycznymi powstałymi wskutek rozszczepienia nadsubtelnego stanu podstawowego atomów cezu. Zwróćmy uwagę, że dotyczy to linii nadsubtelnych stanu podstawowego atomów cezu, a zatem aby otrzymać taką linię atomy cezu muszą znajdować się w stanie o najniższej energii co wymaga utrzymywania układu w temperaturze bliskiej 0 K.

Jako ciekawostkę chciałbym dodać, że podobne nadsubtelne rozszczepienie stanu podstawowego występuje w atomach wodoru [4]. Fala elektromagnetyczna odpowiadająca przejściu pomiędzy tymi stanami ma długość ok. 21 cm i jest najbardziej charakterystycznym promieniowaniem, jakie dochodzi do nas z centrum Galaktyki. Dzięki badaniu rozkładu przestrzennego tego promieniowania dowiedzieliśmy się, że nasza Galaktyka jest galaktyką spiralną.

### Koncepcja nowego SI

O nowym SI możemy powiedzieć, że jest to układ jednostek miar, w którym opisane powyżej stałe podstawowe przyjmują dokładnie następujące wartości liczbowe:

- |  $\Delta\nu_{Cs} = 9\,192\,631\,770$  Hz,
- |  $c = 299\,792\,458$  m s<sup>-1</sup>,
- |  $h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$  J s,
- |  $e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$  C,
- |  $k = 1,380\,649 \times 10^{-23}$  J K<sup>-1</sup>,
- |  $N_A = 6,022\,140\,76 \times 10^{23}$  mol<sup>-1</sup>,
- |  $K_{cd} = 683$  lm W<sup>-1</sup>.

Użyte powyżej oznaczenia Hz, J, C, lm i W to odpowiednio herc, dżul, kulomb, lumen i wat. Odnoszą się one do jednostek podstawowych SI sekunda, metr, kilogram, amper, kelwin, mol i kandela o oznaczeniach jednostek odpowiednio s, m, kg, A, K, mol i cd, zgodnie z następującymi zależnościami: Hz = s<sup>-1</sup>, J = m<sup>2</sup> kg s<sup>-2</sup>, C = A s, lm = cd m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup> = cd sr i W = m<sup>2</sup> kg s<sup>-3</sup>.

### Nowe definicje jednostek podstawowych SI

Chociaż XXVI Generalna Konferencja Miar zmieniła idee definicji tylko czterech z siedmiu podstawowych jednostek miar, to ze względu na zachowanie jednolitej budowy tekstów definicji zdecydowano się na redefinicję również pozostałych trzech jednostek, czyli sekundy, metra i kandel.

Powtórzę jeszcze raz, że jednostki podstawowe SI zdefiniowano w taki sposób, aby podane w poprzednim punkcie stałe podstawowe miały w jednostkach miary SI wartości liczbowe dokładnie takie jak podano wyżej. Oczywiście nowe definicje nie zmieniły ilościowo tych jednostek miar. Kilogram pozostał kilogramem, metr metrem itd.

Poniżej podano nowe definicje podstawowych jednostek miar SI obowiązujące od 20 maja 2019 roku [5].

**sekunda**, oznaczenie s, jest to jednostka SI czasu. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej częstotliwości cezowej  $\Delta\nu_{Cs}$ , to jest częstotliwości nadsubtelnego przejścia w atomach cezu 133 w niezaburzonym stanie podstawowym, wynoszącej 9 192 631 770, wyrażonej w jednostce Hz, która jest równa s<sup>-1</sup>.

**metr**, oznaczenie m, jest to jednostka SI długości. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej prędkości światła w próżni  $c$ , wynoszącej 299 792 458, wyrażonej w jednostce m s<sup>-1</sup>, przy czym sekunda zdefiniowana jest za pomocą częstotliwości cezowej  $\Delta\nu_{Cs}$ .

**kilogram**, oznaczenie kg, jest to jednostka SI masy. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej stałej Plancka  $h$ , wynoszącej 6,626 070 15  $\times 10^{-34}$ , wyrażonej w jednostce J s, która jest równa kg m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>, przy czym metr i sekunda zdefiniowane są za pomocą  $c$  i  $\Delta\nu_{Cs}$ .

**amper**, oznaczenie A, jest to jednostka SI prądu elektrycznego. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej ładunku elementarnego  $e$ , wynoszącej 1,602 176 634  $\times 10^{-19}$ , wyrażonej w jednostce C, która jest równa A s, gdzie sekunda zdefiniowana jest za pomocą  $\Delta\nu_{Cs}$ .

**kelwin**, oznaczenie K, jest to jednostka SI temperatury termodynamicznej. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej stałej Boltzmanna  $k$ , wynoszącej 1,380 649  $\times 10^{-23}$ , wyrażonej w jednostce J K<sup>-1</sup>, która jest równa kg m<sup>2</sup> s<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>, gdzie kilogram, metr i sekunda zdefiniowane są za pomocą  $h$ ,  $c$  i  $\Delta\nu_{Cs}$ .

**mol**, oznaczenie mol, jest to jednostka SI ilości substancji. Jeden mol zawiera dokładnie 6,022 140 76  $\times 10^{23}$  obiektów elementarnych. Liczba ta jest ustaloną wartością liczbową stałej Avogadra  $N_A$  wyrażonej w jednostce mol<sup>-1</sup> i jest nazywana liczbą Avogadra. Ilość substancji, symbol  $n$ , układu jest miarą liczby obiektów elementarnych danego rodzaju. Obiektem elementarnym może być atom, cząsteczka, jon, elektron, każda inna cząstka lub danego rodzaju grupa cząstek.

**kandela**, oznaczenie cd, jest to jednostka SI światłości w określonym kierunku. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej skuteczności świetlnej monochromatycznego promieniowania o częstotliwości 540  $\times 10^{12}$  Hz,  $K_{cd}$ , wynoszącej 683, wyrażonej w jednostce lm W<sup>-1</sup>, która jest równa cd sr W<sup>-1</sup> lub cd sr kg<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> s<sup>3</sup>, gdzie kilogram, metr i sekunda są zdefiniowane za pomocą  $h$ ,  $c$  i  $\Delta\nu_{Cs}$ .

Na pierwszy rzut oka nowe definicje wydają się mało czytelne. Jak należy je rozumieć? Po redefinicji SI, dowolna jednostka miary układu SI stanowi iloczyn bezwymiarowego współczynnika i iloczynu potęg odpowiedniej kombinacji stałych podstawowych przyjętych przez SI za podstawę układu. Dla przykładu znajdziemy wartości sekundy, metra i kilograma wyrażone w stałych podstawowych.

W nowej definicji sekundy czytamy, że jest ona oparta o przyjętą wartość stałej podstawowej  $\Delta\nu_{Cs}$

$$\Delta\nu_{Cs} = 9\,192\,631\,770 \text{ Hz} = 9\,192\,631\,770 \text{ s}^{-1}.$$

Stąd dostajemy

$$1 \text{ s} = 9\,192\,631\,770 / \Delta\nu_{Cs} = 9\,192\,631\,770 (\Delta\nu_{Cs})^{-1}.$$

Definicja metra oparta jest na przyjętej wartości stałej podstawowej  $c$

$$c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}.$$

Stąd dostajemy

$$1 \text{ m} = (c/299\,792\,458) \text{ s} \approx 30,663\,319 \text{ c} (\Delta\nu_{Cs})^{-1}.$$

Definicja kilograma oparta jest o przyjętą wartość stałej podstawowej  $h$

$$h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s} = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-1}.$$

Stąd dostajemy

$$1 \text{ kg} = (h/6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}) \text{ s m}^{-2}.$$

Następnie korzystając z definicji sekundy i metra dostajemy

$$1 \text{ kg} \approx 1,475\ 521 \times 10^{40} h \Delta v_{\text{Cs}} c^{-2}.$$

Poniżej podano wartości wszystkich jednostek podstawowych wyrażone w stałych podstawowych.

$$1 \text{ s} = 9\ 192\ 631\ 770 (\Delta v_{\text{Cs}})^{-1}$$

$$1 \text{ m} = (c/299\ 792\ 458) \text{ s} \approx 30,663\ 319 c (\Delta v_{\text{Cs}})^{-1}$$

$$1 \text{ kg} = (h/6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}) \text{ s m}^{-2} \approx 1,475\ 521 \times 10^{40} h \Delta v_{\text{Cs}} c^{-2}$$

$$1 \text{ A} = (e/1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}) \text{ s}^{-1} \approx 6,789\ 687 \times 10^8 \Delta v_{\text{Cs}} e$$

$$1 \text{ K} = (1,380\ 649 \times 10^{-23}/k) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} \approx 2,226\ 665\ 3 \Delta v_{\text{Cs}} h k^{-1}$$

$$1 \text{ mol} = 6,022\ 140\ 76 \times 10^{23} N_{\text{A}}^{-1}$$

$$1 \text{ cd} = (K_{\text{cd}}/683) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ sr}^{-1} \approx 2,614\ 830\ 10^{10} (\Delta v_{\text{Cs}})^2 h K_{\text{cd}}$$

Podobnie możemy zrobić z jednostkami pochodnymi.

Dla przykładu:

$$1 \text{ Hz} = \text{s}^{-1} \approx 1,087\ 827\ 757 \times 10^{-10} \Delta v_{\text{Cs}}$$

$$1 \text{ N} = \text{kg m s}^{-2} \approx 5,354\ 080 \times 10^{21} h c^{-1} (\Delta v_{\text{Cs}})^2.$$

$$1 \text{ J} = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-2} \approx 1,641\ 738\ 525 \times 10^{23} h \Delta v_{\text{Cs}}.$$

Oczywiście na potrzeby dydaktyki definicje podstawowych jednostek miar można by sformułować w bardziej zrozumiałej formie.

W przypadku metra, sekundy i kandeli zmienił się tylko tekst definicji, ale idea pozostała taka sama jak w poprzednich definicjach, co zresztą widać, jeśli przyjrzymy się powyższym wyrażeniom dla tych jednostek. Wobec tego definicje metra, sekundy i kandeli można podać w takim samym brzmieniu jakie podałem na początku artykułu.

Definicję kelwina można by sformułować tak: jeden kelwin jest zmianą temperatury termodynamicznej, która skutkuje zmianą energii cieplnej  $kT$  o  $1,380\ 649 \times 10^{-23}$  J.

Definicję ampera w nowym ujęciu można by sformułować następująco: jeden amper jest natężeniem prądu elektrycznego, który odpowiada przepływowi przez przekrój poprzeczny przewodnika  $1/1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$  elementarnych ładunków elektrycznych w ciągu sekundy.

Nowa definicja mola jest najbardziej czytelna. Najistotniejsze w niej jest, to że jeden mol zawiera dokładnie  $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$  obiektów elementarnych.

Najtrudniej byłoby z definicją kilograma. Moja propozycja jest następująca. Zauważmy, że  $h\Delta v_{\text{Cs}}$  jest energią kwantu promieniowania o częstotliwości równej  $9\ 192\ 631\ 770$  Hz. Z zasady równoważność masy i energii  $E=mc^2$  wynika, że masa odpowiadająca energii tego kwantu jest równa  $h \Delta v_{\text{Cs}} c^{-2}$ . A zatem można by pokusić się o takie sformułowanie: kilogram jest masą równoważną energii ok.  $1,475\ 521 \times 10^{40}$  kwantów promieniowania o częstotliwości równej dokładnie  $9\ 192\ 631\ 770$  Hz.

### Co ma wspólnego kilogram ze stałą Plancka?

Idea powiązania masy ze stałą Plancka zasadza się na metodzie pomiaru stałej Plancka wymyślonej przez amerykańskiego fizyka i metrologa Bryana Kibble'a (1938-2016). Pomiar realizowany jest za pomocą tzw. wagi prądowej nazywanej wagą prądową Kibble'a lub po prostu wagą Kibble'a [1][6].

Wyobraźmy sobie wagę, w której ciężar badanego ciała równoważymy siłą oddziaływania pola magnetycznego nieruchomego magnesu stałego wytwarzającego bardzo silne pole magnetyczne i pola magnetycznego wytwarzanego przez cewkę z prądem elektrycznym sprzężonej z badanym ciałem.

Pomiar stałej masy (lub stałej Plancka, w odwrotnej wersji) składa się z dwóch faz eksperymentu. W fazie pierwszej, statycznej przez cewkę przepuszczamy stały prąd elektryczny  $I$ . Załóżmy dla uproszczenia, że mamy do czynienia z cewką zawierającą jeden zwój. Prąd  $I$  dobieramy tak aby zrównoważyć obie siły

$$mg = BIL,$$

gdzie  $g$  jest wartością przyspieszenia ziemskiego,  $B$  wartością indukcji magnetycznej pola magnetycznego wytwarzanego magnes stały i  $L$  jest długością zwoju cewki.

Niestety nie potrafimy z potrzebną nam dokładnością zmierzyć wartości indukcji magnetycznej oraz długości zwoju. Na szczęście na wadze możemy przeprowadzić również inny pomiar. Jest to druga, dynamiczna faza eksperymentu. Tym razem nie przepuszczamy przez cewkę prądu elektrycznego, ale wprawiamy ją w ruch jednostajny prostoliniowy (podnosimy lub opuszczamy) z prędkością  $v$ . Ten ruch w polu magnetycznym magnesu trwałego sprawia, że w cewce indukuje się napięcie o wartości

$$U = BLv.$$

W obu przypadkach mamy te same wartości  $B$  i  $L$ , wobec tego dysponujemy dwoma równaniami, z których możemy wyeliminować nieznane wartości  $B$  i  $L$  i otrzymać równanie

$$UI = mgv.$$

Po lewej stronie tego równania mamy moc prądu, a po prawej moc mechaniczną. Jednostką mocy w SI jest wat. To dlatego waga Kibble'a była wcześniej nazywana wagą Watta (ang. *watt balance*). Ale jaki to ma związek ze stałą Plancka?

Wartość przyspieszenia ziemskiego potrafimy zmierzyć z bardzo dużą dokładnością ultraczułymi grawimetrami (z niepewnością względną rzędu  $10^{-9}$  [1]). Również prędkość potrafimy mierzyć bardzo dokładnie. Wykorzystujemy do tego interferometrię laserową do pomiaru odległości i zegary cezowe do pomiaru czasu (patrz niepewności podane wyżej). Pozostaje jeszcze pomiar napięcia i prądu elektrycznego. Z pomocą przychodzi nam zjawiska kwantowe pozwalające na bardzo precyzyjne pomiary obu wielkości fizycznych. I teraz na scenę wkrocza stała Plancka.

Do pomiaru napięcia wykorzystujemy kwantowe zjawisko występujące w tzw. złączu Josephsona. Zostało ono przewidziane przez amerykańskiego fizyka Briana Josephsona (ur. 1940), a potem zaobserwowane doświadczalnie. Złącze Josephsona składa się z dwóch nadprzewodników rozdzielonych cienką warstwą izolatora. Jeśli takie złącze „oświetlimy” promieniowaniem mikrofalowym o częstotliwości  $f$ , to na złączu wytworzy się napięcie równe dokładnie



Rys. 2 Zdjęcie wagi Kibble'a ze strony <https://www.bipm.org/en/bipm/mass/watt-balance>. Po lewej waga otwarta, po prawej waga gotowa do pomiaru.

$$U = \frac{hf}{2e}$$

Jeśli połączymy szeregowo  $n$  takich złącz, to całkowite napięcie wyniesie

$$U = n \frac{hf}{2e}.$$

Waga Kibble'a zawiera stos setek tysięcy złącz Josepsona. W ten sposób możemy z niesłychaną dokładnością mierzyć dowolne napięcie.

Pozostaje jeszcze pomiar prądu elektrycznego. Nie potrafimy zrobić tego wprost z potrzebną tu dokładnością. Ale potrafimy bardzo precyzyjnie mierzyć opór elektryczny i jak pisałem wcześniej napięcie. Następnie korzystając z prawa Ohma możemy wyliczyć prąd elektryczny. Do pomiaru oporu elektrycznego wykorzystujemy inne kwantowe zjawisko, tak zwany kwantowy efekt Halla. Zwykły efekt Halla został odkryty przez amerykańskiego fizyka Edwina Halla (1855-1938). Polega on na pojawieniu się różnicy potencjałów w przewodniku, w którym płynie prąd, jeśli umieścimy go w poprzecznym w stosunku do kierunku prądu polu magnetycznym.



Edwin Herbert Hall

Różnica potencjałów nazywana napięciem Halla występuje na ścianach przewodnika prostopadłych zarówno do kierunku prądu, jak i kierunku indukcji magnetycznej pola magnetycznego. Kwantowy efekt Halla odkryty został przez niemieckiego fizyka Klause von Klitzinga (ur. 1943). Za swoje odkrycie Klitzing został uhonorowany w 1985 roku nagrodą Nobla.

Kwantowy efekt Halla występuje w bardzo niskiej (bliskiej zera bezwzględnego) temperaturze pod wpływem bardzo silnych pól magnetycznych i dotyczy tzw. dwuwymiarowych układów elektronowych, tzn. układów, w których elektrony mają swobodę poruszania się tylko w dwóch kierunkach. Okazuje się, że w tych warunkach opór elektryczny jest skwantowany. Może on przyjmować jedynie ściśle określone wartości opisane wzorem

$$R = \frac{h}{ne^2},$$

gdzie  $n$  jest liczbą naturalną.

Żeby odróżnić obie liczby naturalne, jakie się tu pojawiły, oznaczymy liczbę złączy Josepsona z poprzedniego równania przez  $n_1$ , a liczbę naturalną występującą w powyższym wzorze przez  $n_2$ . Po wylczeniu z prawa Ohma natężenia prądu elektrycznego i wykorzystaniu poprzednich wzorów ostatecznie otrzymujemy równanie pozwalające nam wyznaczyć masę badanego obiektu (lub w drugą stronę stałą Plancka) z ogromną dokładnością

$$m = \frac{n_1 n_2^2 f^2}{4 g v} h.$$

Wykonanie pomiaru wymaga spełnienia ekstremalnych warunków. Waga znajduje się głęboko pod powierzchnią ziemi w celu wyeliminowania wszelkich drgań pochodzących np. od ruchu ulicznego. Podczas pomiaru we wnętrzu wagi utrzymywana jest wysokiej jakości próżnia, a urządzenie jest schładzane do bardzo niskiej (bliskiej zera bezwzględnego) temperatury.

Oparcie nowego międzynarodowego układu jednostek miar SI na stałych podstawowych ma rewolucyjne znaczenie. Jak czytamy w broszurze Głównego Urzędu Miar [7], „*Nauka i technologia nie będzie już dłużej ograniczana zmieniającymi się wzorcami materialnymi. Co więcej, postęp w nauce i technice, pozwalający wykonywać coraz lepsze przyrządy pomiarowe, pozwalający na odtwarzanie jednostek miar z coraz większą dokładnością, nie będzie skutkowało koniecznością wprowadzania kolejnych redefinicji*”.

Osobiście w to nie wierzę. Z pewnością za jakiś czas stała  $\Delta\nu_{Cs}$  zostanie zastąpiona inną, gdyż technika pomiaru czasu rozwija się bardzo szybko. Stała  $\Delta\nu_{Cs}$  to częstotliwość ok. 9 GHz. Zegary optyczne najnowszej generacji wykorzystują częstotliwość rzędu THz. Teoretycznie taki zegar powinien osiągać dokładność rzędu 1 sekundy na 30 miliardów lat. Aktualnie działające zegary optyczne jeszcze tak dokładne nie są, ale wszystko przed nami.

**Jan Kurzyk**

Institut Fizyki Politechniki Krakowskiej

#### LITERATURA

- [1] J. Gluza, A. Grzanka, A. Pleban Ku nowej definicji kilograma. Postępy fizyki t. 58, z. 3, 2007. Wersja elektroniczna <http://uranos.cto.us.edu.pl/~gluza/kg.pdf> [Dostęp 10.06.2019].
- [2] <https://gum.gov.pl/pl/redefinicja-si/co-nowego-w-si/kilogram/3022,Przywitaj-nowy-kilogram.html> [Dostęp 10.06.2019].
- [3] [https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperfine\\_structure](https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperfine_structure) [Dostęp 10.06.2019].
- [4] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Linia\\_wodoru\\_21\\_cm](https://pl.wikipedia.org/wiki/Linia_wodoru_21_cm) [Dostęp 10.06.2019].
- [5] [https://gum.gov.pl/ftp/pdf/Wydawnictwa/SI\\_krotka\\_broszura\\_PL-18\\_02\\_2018.pdf](https://gum.gov.pl/ftp/pdf/Wydawnictwa/SI_krotka_broszura_PL-18_02_2018.pdf) [Dostęp 10.06.2019].
- [6] [https://en.wikipedia.org/wiki/Kibble\\_balance](https://en.wikipedia.org/wiki/Kibble_balance) [Dostęp 10.06.2019].
- [7] [https://www.gum.gov.pl/ftp/pdf/Wydawnictwa/Redefinicja\\_SI\\_broszura\\_3.pdf](https://www.gum.gov.pl/ftp/pdf/Wydawnictwa/Redefinicja_SI_broszura_3.pdf) [Dostęp 10.06.2019].



Od badań podstawowych do edukacji

# Co warto wiedzieć o CERN?

Tomasz Kubiak

Chociaż nazwa CERN oficjalnie stanowi akronim od francuskiego *Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire* (Europejska Organizacja Badań Jądrowych), pracownicy tej instytucji naukowej podkreślają, iż obecnie skrót ten nie odzwierciedla jej charakteru z co najmniej dwóch powodów. Po pierwsze, w tym ogromnym ośrodku zlokalizowanym na granicy szwajcarsko-francuskiej<sup>1</sup> pracują dziś fizycy z całego świata, a nie tylko z naszego kontynentu. Po drugie, badania jąder atomów zostały w dużej mierze zastąpione badaniami struktury materii na poziomie subjądrowym. Proponuje się zatem nowe interpretacje skrótu CERN w związku z jego głównymi zadaniami, tj. rozwojem międzynarodowej współpracy naukowej, szeroko pojętą edukacją, badaniami podstawowymi oraz rozwojem nowych technologii (*Collaboration, Education, Research, New Technology*).

Ogromne znaczenie ma fakt, iż CERN nie prowadzi badań o charakterze militarnym, a wyniki prac są publikowane i ogólnodostępne. Z ciekawostek historycznych warto wspomnieć, że organizacja powstała pod auspicjami UNESCO, a za jej utworzeniem lobbowali tak znani ówczesni fizycy, jak: Isidor Rabi, Pierre Auger czy Edoardo Amaldi.

Rok 1954 oficjalnie przyjmuje się za początek działalności CERN, dlatego obchodzoną w 2019 roku 65. rocznicę tego wydarzenia postanowiono uczcić zorganizowanymi we wrześniu dniami otwartymi instytucji. Co ciekawe, Polska została pełnoprawnym członkiem CERN w 1991 r., ale znacznie wcześniej, bo już od 1964 roku, miała status państwa obserwatora. Oczywiście udział fizyków i inżynierów z naszego kraju w działalności CERN jest bardzo

istotny, m.in. konstruują oni elementy nowych detektorów, partycypują w różnych eksperymentach a także prowadzą prace teoretyczne bądź symulacyjne.

## Akceleratory w CERN

W pierwszych latach działalności w instytucie zainstalowano dwa akceleratory cząstek. W 1957 r. uruchomiono synchrocyklotron (fot. 1), natomiast w 1959 r. synchrotron protonów **PS** (od ang. *Proton Synchrotron*) o obwodzie 628 m. Z czasem powstawały coraz większe urządzenia przyspieszające, m.in. **SPS** (ang. *Super Proton Synchrotron*) o obwodzie około 7 km (w 1976 r.) oraz **LEP** (ang. *Large Electron-Positron Collider*) o obwodzie 27 km (w 1989 r.). Należy nadmienić, iż ten ostatni został zamknięty 2 listopada 2000 r., aby ustąpić miejsca w tunelu nowej maszynie, czyli znanemu wszystkim **LHC** (ang. *Large Hadron Collider*).

Uruchomiony 10 września 2008 r. LHC jest dziś pierwszą rzeczą, z którą kojarzy nam się CERN. Wewnątrz akceleratora, w otoczeniu magnesów nadprzewodzących w dwóch ultra-wysokopróżniowych rurach (fot. 2), krążą w przeciwnych kierunkach wiązki cząstek. Mogą zostać rozpędzone do szybkości bliskiej wartości prędkości światła w próżni (99,9999991%  $c$ ), okrążając 27-kilometrowy pierścień około 11 tys. razy w ciągu sekundy. Dociekliwi zapytają zapewne, dlaczego do tak wysokich energii przyspieszane są akurat protony. Powodów jest kilka, ale warto wspomnieć chociażby o kwestii promieniowania synchrotronowego. W przybliżeniu moc wypromienianą przez naładowane cząstki w postaci promieniowania synchrotronowego<sup>2</sup> możemy obliczyć jako:

$$P \approx \frac{2c \cdot E^4 \cdot r_0}{3R^2 (m_0 \cdot c^2)^3}$$

<sup>1</sup> Główna siedziba CERN znajduje się w Meyrin nieopodal Genewy.

<sup>2</sup> Promieniowanie synchrotronowe może mieć szeroki zakres częstotliwości od światła widzialnego aż po promieniowanie X.

gdzie:  $r_0 = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 m_0 c^2}$  - klasyczny promień cząstki,

$m_0$  – masa cząstki,  $E$  – energia,  $q$  – ładunek cząstki,  $c$  – wartość prędkości światła w próżni,  $\epsilon_0$  – przenikalność elektryczna próżni,  $R$  – promień zakrzywienia toru cząstki.

Podczas każdego okrążenia akceleratora cząstki emitują więc energię, przy czym elektrony w LEP traciły jej znacznie więcej w postaci promieniowania synchrotronowego ( $\approx$  GeV) niż protony w LHC ( $\approx$  keV). Z drugiej strony w przypadku elektronów energia zderzenia jest sumą energii dwóch oddziałujących ze sobą wiązek. Natomiast dla protonów energia jest przenoszona przez ich składniki (kwarki i gluony), zatem w rzeczywistości mamy do czynienia ze zderzeniami wybranych składników protonów z przeciwnymi wiązkami i stąd energia kolizji jest niższa niż energia przyspieszacza.

Przypomnijmy także, że siłę działającą na naładowaną cząstkę poruszającą się w akceleratorze możemy zapisać jako:

$$\vec{F}(t) = q(\vec{E}(t) + \vec{v}(t) \times \vec{B}(t))$$

przy czym pole elektryczne przyspiesza cząstkę, natomiast pole magnetyczne zakrzywia trajektorię jej ruchu. W synchrotronach pole magnetyczne zmienia się w czasie i jest zwiększane, w miarę jak cząstka przyspiesza.

Elektromagnesy, które wytwarzają pole magnetyczne utrzymujące właściwą trajektorię ruchu cząstek, zawierają cewki wykonane z kabli Nb-Ti pracujących w trybie nadprzewodzącym. Aby jednak przewodzenie prądu elektrycznego bez oporu lub utraty energii było możliwe, układ musi zostać schłodzony do temperatury  $-271,3^\circ\text{C}$  z wykorzystaniem ciekłego helu.

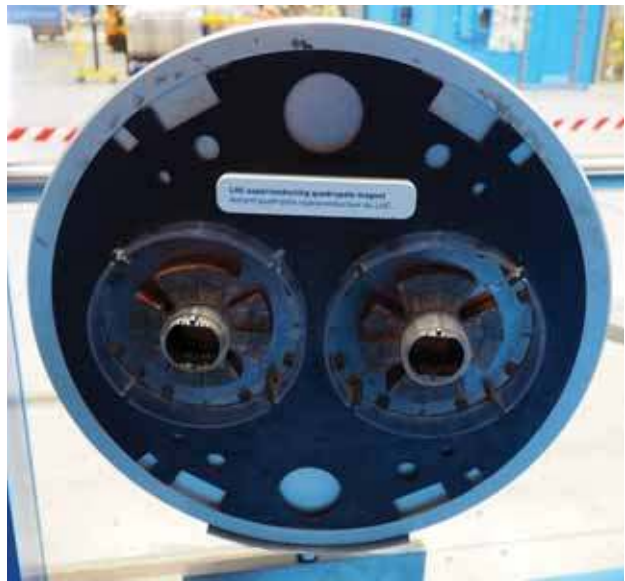
Dla zainteresowanych warto wspomnieć, iż w CERN znajduje się specjalna hala testowania urządzeń kriogenicznych, w której kontroluje się działanie potężnych elektromagnesów i innych urządzeń pracujących w ekstremalnie niskich temperaturach (fot. 3). W przypadku LHC 392 magnesy kwadrupolowe ogniskują wiązkę, natomiast 1232 magnesy dipolowe o długości 15 m każdy zakrzywiają jej tor.

Należy pamiętać, że protony, trafiając do LHC, posiadają już energię 450 GeV, zatem są już wstępnie przyspieszone przez inne urządzenia. CERN obejmuje bowiem cały kompleks akceleratorów oraz eksperymentów towarzyszących (fot. 4). Warto również nadmienić, że za wprowadzanie wiązki z poszczególnych akceleratorów kołowych (realizowane w czasie kilku  $\mu\text{s}$ ) odpowiedzialne są szybkie magnesy dipolowe nazywane slangowo „kickers”.

Dociekliwi zadadzą zapewne pytanie, czy wszystkie synchrotrony służą do przyspieszania cząstek? Odpowiedź może zaskoczyć, gdyż niektóre z nich mają zupełnie odwrotne zadanie. Przykładem mogą być dwa urządzenia zlokalizowane w tzw. fabryce antymaterii. Antiproton Decelerator (AD) (fot. 5) i ELENA (Extra Low ENergy Antiproton) (fot. 6) mają zmniejszyć energię antyprotonów odpowiednio do 5.3 MeV i 100 keV.



Fot. 1. Synchrocyklotron był pierwszym akceleratorem zainstalowanym w CERN. Przyspieszał cząstki do maksymalnej energii 600 MeV, służąc eksperymentom naukowym przez 33 lata.



Fot. 2. Przekrój poprzeczny przez nadprzewodzący magnes kwadrupolowy z LHC, widoczne dwie rury, wewnątrz których poruszają się przeciwniebieżne wiązki protonów.



Fot. 3. Wyposażenie hali testowania urządzeń kriogenicznych.

W tym miejscu należy się kilka słów wyjaśnienia. Gdy bowiem protony z wspomnianego wcześniej akceleratora PS padają na tarczę wykonaną z metalu powstaje wiele cząstek, w tym także antyprotonów. Problem w tym, że poruszają się one w odmiennych kierunkach, posiadają różną energię, która ponadto jest zbyt wysoka, aby móc stworzyć antyatomy. Trzeba zatem spowolnić cząstki za pomocą pola elektrycznego, zmniejszyć rozrzut ich energii i stworzyć wiązkę, co ułatwia również metoda znana jako „cooling”.

## Najważniejsze eksperymenty

Oskierowaniu dwóch przeciwbieżnych wiązek protonów w LHC na kolizyjną trajektorię decyduje się w głównym centrum sterowania (*ang.* CERN Control Centre) (fot. 7), mieszczącym się we francuskim Prévessin-Moëns. Miejsce to określane jest „mózgiem” całego kompleksu, gdyż w obrębie czterech wysp (z góry przypominających nieco swoim kształtem i rozmieszczeniem magnesy kwadrupolowe) ulokowane są pulpity sterownicze LHC, SPS, PS, infrastruktury technicznej i kriogeniki.

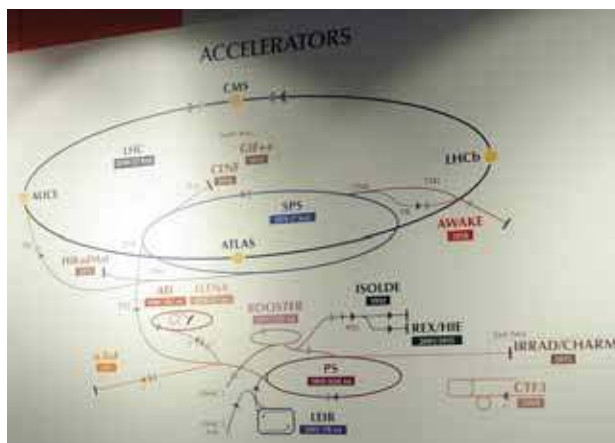
W Wielkim Zderzaczu Hadronów wiązki protonów lub ciężkich jonów mogą spotkać się tylko w obrębie głównych detektorów, zlokalizowanych w czterech miejscach na obwodzie jego pierścienia (patrz ponownie fot. 4). Miejscem eksperymentu ATLAS jest Meyrin w Szwajcarii, natomiast pozostałe trzy usytuowano już na terenie Francji: ALICE w Serwy, CMS w pobliżu Cessy, a LHCb w przygranicznym Ferney-Voltaire (choć nieopodal lotniska w Genewie). Co ciekawe, komory wspomnianych eksperymentów znajdują się na różnej głębokości w stosunku do powierzchni ziemi. Ma to przede wszystkim związek z ukształtowaniem terenu, ale również z faktem, że tunel, wydrążony w kompleksie skał zwanych molasa, posiada nachylenie około 1,4%.

Przyjrzyjmy się bliżej najważniejszym eksperymentom LHC. Zaczniemy od **ALICE**, która, jak mówi się w CERN, może zabrać nas w swoistą „podróż do początków Wszechświata” poprzez badanie plazmy kwarkowo-gluonowej, analogicznej do tej wypełniającej uniwersum tuż po Wielkim Wybuchu.

Jak wskazuje samo rozwinięcie akronimu **ALICE** (*A Large Ion Collider Experiment*) realizuje się to poprzez zderzenia czołowe przyspieszonych w LHC ciężkich jąder ołowiu. Gdy tego typu kolizje zachodzą w wielkiej objętości, przez krótki czas można zaobserwować, co dzieje się z materią, gdy podgrzejemy ją do temperatury 100000 razy większej niż ta spotykana w jądrze Słońca. W tak ekstremalnych warunkach (bardzo wysokie gęstości energii i  $T > 2000$  miliardów stopni) kwarki przestają być związane w nukleonach<sup>3</sup>, tworząc wspomnianą już plazmę kwarkowo-gluonową. Należy pamiętać, że tak wytworzona plazma natychmiast się ochładza i przekształca w zwykłą materię (rekombinuje w piony, kaony, protony itp. poruszające się w różnych kierunkach).

Ogromny, złożony z wielu podukładów detektor ALICE (fot. 8) pozwala właśnie śledzić i identyfikować cząstki wytwarzane w zderzeniach ciężkich jąder zachodzących w jego wnętrzu. Dzięki temu możliwe jest odtworzenie i zbadanie ewolucji układu w przestrzeni i czasie. Celem eksperymentu ALICE jest bowiem sprawdzenie czy kwarki mogą zostać uwolnione z protonów i neutronów oraz określenie, jakie mechanizmy są odpowiedzialne za uwięzienie kwarków i generowanie ich mas.

Następnym eksperymentem, o którym warto wspomnieć jest **LHCb** (*Large Hadron Collider beauty*). Również i w tym przypadku naukowców motywuje chęć



Fot. 4. Plan kompleksu akceleratorów oraz eksperymentów towarzyszących w CERN.



Fot. 5. Antiproton Decelerator (AD) spowalnia antyprotony do energii 5,3 MeV.

zrozumienia wydarzeń z początków istnienia Wszechświata. Tym razem jednak pragną oni uzyskać odpowiedź na pytanie, dlaczego już w sekundę po Wielkim Wybuchu antymateria prawie zupełnie zniknęła, ustępując miejsca zwykłej materii. Innymi słowy, co sprawiło, że w miarę rozszerzania i ochładzania się Wszechświata tak znacząco zaburzyły się proporcje między materią i antymaterią, jeśli pierwotnie miały być one wytworzone w jednakowych ilościach.

Niektórzy czytelnicy zastanawiają się zapewne, jaki związek z tym problemem ma literka „b” w akronimie nazwy, a właściwie angielskie słowo „*beauty*”. Otóż w eksperymencie bada się łamanie tzw. parzystości kombinowanej CP (ładunkowo – przestrzennej) w rozpadach mezonów B, czyli cząstek zawierających kwarki albo antykwarki piękne (zwane również dennymi). Ciekawym wydaje się fakt, że te produkowane w wyniku zderzeń protonów w LHC mezony nie rozprzestrzeniają się we wszystkich kierunkach, tylko w większości pod niewielkim kątem do trajektorii wiązki. Dlatego kolejne elementy detekcyjne w LHCb nie są umieszczone warstwami naokoło miejsca kolizji, tylko ulokowane jeden za drugim na odcinku 20 m wzdłuż jonowodu.

Kolejne dwa ogromne urządzenia: **ATLAS** (*A Toroidal LHC Apparatus*) i **CMS** (*Compact Muon Solenoid*)

<sup>3</sup> Kwarki są związane w protonach i neutronach na skutek oddziaływań silnych (pośrednikami są gluony).



Fot. 6. Znajdująca się w fabryce antymaterii ELENA zmniejsza energię antyprotonów do 100 keV.

to detektory ogólnego przeznaczenia. Mają one pomóc w znalezieniu odpowiedzi na wiele pytań dotyczących natury materii. Wykorzystywane są zatem zarówno do badania fundamentalnych składników otaczającej nas materii, jak i poszukiwania śladów postulowanej ciemnej materii. Wprawdzie cel pracy obu układów eksperymentalnych jest analogiczny, to zastosowano w nich odmienne rozwiązania technologiczne a goszcząc w CERN, da się zauważyć nutkę rywalizacji pomiędzy przedstawicielami obu zespołów.

**ATLAS**, którego model widoczny jest na fot. 9, to największy pod względem rozmiarów detektor w CERN. Posiada kształt cylindra o średnicy 25 m i długości 46 m i składa się z 6 różnych podsystemów zamontowanych koncentrycznie wokół miejsca kolizji. Jego cechą charakterystyczną są ogromne magnesy toroidalne ( $B = 4T$ ), które wraz z wewnętrznym magnesem solenoidalnym ( $B = 2T$ ) zakrzywiają tory cząstek wokół kolejnych warstw detektorów. Wyznaczenie trajektorii, pędu i energii cząstek pozwala na ich identyfikację.

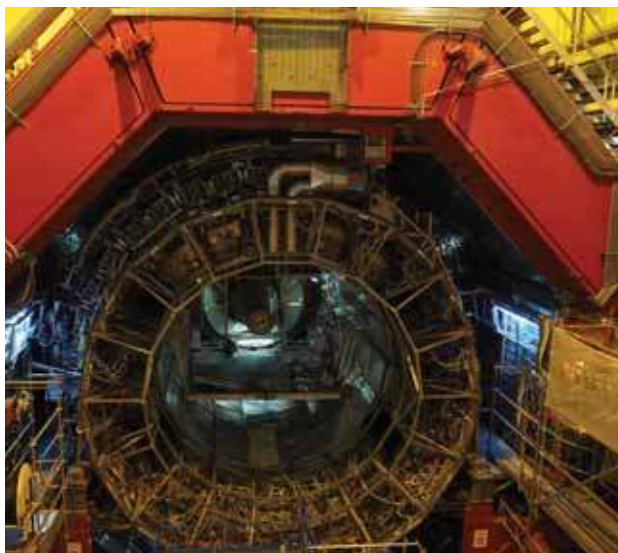
Znacznie mniejsze wymiary (długość 21 m, średnica 15 m), ale za to około dwukrotnie większą masę (14 tys. ton) posiada detektor **CMS** (fot. 10). Zbudowano go wokół nadprzewodzącego (włókna Nb-Ti są chłodzone do ok. 4K) solenoidu, generującego pole o indukcji 4T w wyniku przepływu prądu 18,5 kA.

Czytelnicy zapewne zastanawiają się, do czego wykorzystywane jest tak duże pole magnetyczne. Otóż



Fot. 7. Centrum kontroli CERN, z którego steruje się LHC i kompleksem akceleratorów.

zakrzywia ono trajektorie cząstek lecących od miejsca zderzenia, aby można było określić ich ładunek (tor cząstek naładowanych dodatnio będzie zakrzywiany w przeciwną stronę niż tych naładowanych ujemnie) oraz pęd (większa wartość pędu przekłada się na mniejsze zakrzywienie trajektorii ruchu cząstek). Precyzyjna identyfikacja trajektorii możliwa jest dzięki detektorom krzemowym, natomiast za pomiar energii odpowiadają dwa typy kalorymetrów: elektromagnetyczne (dedykowane elektronom i fotonom) oraz hadronowe. Osobny system detekcyjny przeznaczony jest dla mionów, które posiadają znacznie większą masę niż elektrony i nie są zatrzymywane w kalorymetrach.



Fot. 8. Złożony z wielu podukładów detektor ALICE znajduje się w podziemnej komorze na głębokości 56 m.



Fot. 9. Model detektora ATLAS, widoczne magnesy toroidalne zakrzywiające tory naładowanych cząstek.

Detektory ATLAS i CMS na zawsze zapisały się w historii fizyki, gdyż to właśnie z ich udziałem odkryto słynny bozon Higgsa o masie  $\approx 125 \text{ GeV}/c^2$ . Przypomnijmy, że w myśl teorii pole Higgsa wypełnia cały Wszechświat, a jego oddziaływanie z cząstkami elementarnymi generuje ich masę. Koncepcję tego mechanizmu przedstawiono już w 1964 w trzech niezależnych pracach, których autorami byli odpowiednio: 1) Peter Higgs; 2) François Englert i Robert Brout; 3) Gerald Guralnik, Carl Hagen i Tom Kibble. Historyczna konferencja prasowa, na której ogłoszono eksperymentalne odkrycie bozonu Higgsa odbyła się natomiast w CERN 4 lipca 2012 roku.

Na doświadczalne potwierdzenie przewidywań teoretyków trzeba było zatem czekać wiele lat i zbudować tak zaawansowane urządzenie, jakim jest LHC wraz z jego detektorami. Co ciekawe, praca o wyznaczeniu masy cząstki Higgsa (opublikowana w *Physical Review Letters*<sup>4</sup>) jest wyjątkowa jeszcze z jednego powodu, gdyż na liście autorów pojawiła się rekordowa liczba 5154 nazwisk! Niemniej jednak Nagroda Nobla z fizyki za rok 2013 została przyznana i rozdzielona po połowie dla Petera Higgsa i François Englerta za „teoretyczne odkrycie mechanizmu, który przyczynia się do naszego zrozumienia pochodzenia masy cząstek subatomowych, co ostatnio zostało potwierdzone poprzez odkrycie przewidywanej cząstki elementarnej w eksperymentach ATLAS i CMS w Wielkim Zderzaczu Hadronów w CERN”<sup>5</sup>.

### Nobliści związani z CERN

Warto dodać, że oprócz dwóch wymienionych wcześniej naukowców (François Englerta i Petera Higgsa) w CERN pracowało wielu innych sławnych laureatów

Nagrody Nobla<sup>6</sup>. Wypada wspomnieć chociażby takie postacie, jak: Felix Bloch (pierwszy dyrektor generalny tej instytucji); Carlo Rubbia i Simon van der Meer (współdzielona nagroda w 1984 roku za prace skutkujące odkryciem bozonów W i Z, które pośredniczą w oddziałyvaniach słabych); Jack Steinberger (uhonorowany w 1988 r. jako współodkrywca neutrina mionowego) czy Georges Charpak (wyróżniony w 1992 r. za wynalezienie nowych detektorów cząstek).

Z kolei profesor Samuel Chao Chung Ting (noblista z 1976 za odkrycie mezonu  $J/\psi$ ) zaangażowany jest obecnie w projekt AMS (*ang. Alpha Magnetic Spectrometer*), którego centrum analizy danych POCC (*ang. Payload Operations Control Centre*) zlokalizowane jest właśnie w CERN. Przypomnijmy, że AMS to złożony w CERN detektor promieniowania kosmicznego, który 16 maja 2011 r. został wyniesiony przez prom kosmiczny Endeavour na orbitę i dołączony do jednego z modułów Międzynarodowej Stacji Kosmicznej. Oprócz rejestracji cząstek docierających z kosmosu poszukuje on także śladów ciemnej materii oraz antymaterii na orbicie okołoziemskiej.

### CERN inkubatorem nowych technologii

Powszechnie wiadomo, że nadrzędnym celem działalności CERN są badania podstawowe mające przybliżyć nas do uzyskania odpowiedzi na fundamentalne pytania, jakie od wieków nurtują ludzkość (z czego zbudowana jest materia, jaki był początek Wszechświata i jakie będą jego dalsze losy). Nie należy jednak zapominać, że jest to również miejsce, gdzie tworzy się i rozwija nowe technologie towarzyszące nam później w codziennym życiu.

<sup>4</sup> G. Aad i inni, Combined Measurement of the Higgs Boson Mass in pp Collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV with the ATLAS and CMS Experiments, *Physical Review Letters* 114, (2015), 191803.

<sup>5</sup> Na podstawie informacji „The Nobel Prize in Physics 2013”, NobelPrize.org. Nobel Media AB 2019; <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2013/summary/> (dostęp 31.08.2019).

<sup>6</sup> Szczegółów można dowiedzieć się na stronie: <https://public-archiver.web.cern.ch/en/About/Nobels-en.html> (dostęp z 26.08.2019)



Fot. 10. Detektor CMS zbudowany jest wokół ogromnego magnesu solenoidalnego.

Najlepszym przykładem wydają się ekrany dotykowe, których pomysłodawcą był Bent Stumpe. W CERN powstają też innowacyjne urządzenia znajdujące zastosowanie w medycynie, przede wszystkim w obrazowaniu i leczeniu nowotworów. Warto wspomnieć chociażby kryształy scyntylacyjne wykorzystywane w skanerach pozytonowej tomografii emisyjnej (PET), detektory zliczające fotony (XPAD) do zastosowań w rentgenowskiej tomografii komputerowej<sup>7</sup> czy też systemy używane do terapii hadronowej nowotworów.<sup>8</sup> W tym ostatnim przypadku naukowcy pracują nie tylko nad akceleratorami do przyspieszania protonów czy jonów węgla, ale też nad projektem kompaktowej gantry (GaToroid). Ma ona bazować na układzie cewek nadprzewodzących tworzących toroidalny magnes, który pozwoli nakierować wiązkę hadronów na cel z dowolnej pozycji bez konieczności obrotu całego urządzenia.

Osiągnięcia CERN w zakresie nauk biomedycznych to jednak nie tylko budowa prototypowych urządzeń do diagnostyki i terapii, ale także rozwój systemów analizy danych oraz dokumentacji medycznej a także tworzenie narzędzi symulacyjnych wykorzystywanych np. w biologii obliczeniowej (projekt BioDynaMo). Co ciekawe, naukowcy z CERN byli swoistymi pionierami, jeśli chodzi o tzw. chmury obliczeniowe. Najbardziej znanym opinii publicznej dokonaniem pracownika CERN pozostaje jednak hipertekstowy system informacyjny WWW (World Wide Web). Został on stworzony przez brytyjskiego fizyka Timothy Berners-Lee, co zostało upamiętnione specjalną tablicą w jednym z budynków CERN w Meyrin.

Generalnie informatycy w CERN zajmują się nie tylko zarządzaniem, przechowywaniem i przetwarzaniem danych, ale także rekonstrukcją zdarzeń, jakie zaszły podczas eksperymentów. Należy podkreślić, że w CERN,



Fot. 11. Stanowiący symbol CERN „Glob nauki i innowacji” oraz poświęcona przełomowym osiągnięciom fizyki rzeźba-instalacja projektu Gayle Hermicka.

w szczególności podczas doświadczeń z wykorzystaniem LHC, wytwarza się ogromne ilości danych.

Przykładowo, jeśli w układzie detektorów w ciągu jednej sekundy obserwowanych jest 40 milionów zdarzeń, to w czasie tym generowany jest około petabajt informacji. Oczywiście tak duża ilość danych nie może być przechowywana. W ciągu kilku mikrosekund większość z nich jest zatem automatycznie odrzucana przez urządzenie, gdyż nie spełnia najbardziej podstawowych kryteriów.

Ze 100 tysięcy pozostałych zdarzeń szybkie algorytmy w czasie rzeczywistym eliminują te mało interesujące z punktu widzenia badaczy i ostatecznie informacja tylko o kilkuset zostaje zarchiwizowana (zatem PB/s udaje się zredukować do GB/s). Mimo to w samym tylko 2018 roku w CERN zarejestrowano 88 petabajtów danych. Dane te przechowywane są nie tylko na dyskach, ale przede wszystkim na taśmach magnetycznych, które zapewniają większe bezpieczeństwo.

Warto wspomnieć, iż naukowcy kierują się tzw. zasadą FAIR, co oznacza, że dane nawet po wielu latach muszą być łatwe do znalezienia (*Findable*), dostępne dla wszystkich (*Accessible*), możliwe do połączenia z innymi (*Interoperable*) i ponownego wykorzystania (*Reusable*). Każdy cykl pracy akceleratora związany jest z wytwarzaniem coraz większej ilości danych. Muszą one nie tylko być przechowywane, ale również analizowane. Sieć obliczeniowa CERN, oznaczana skrótem WLCG (*od ang. Worldwide LHC Computing Grid*) tworzona jest zatem przy współpracy ponad 170 centrów superkomputerowych z 42 krajów.

### Edukacja w CERN

Podczas pobytu w CERN zauważyć można ogromne nastawienie na edukację. Szczególną uwagę poświęca się

<sup>7</sup> Rentgenowskiej tomografii komputerowej poświęcono artykuł: T. Kubiak, „Tomografia komputerowa”, *Fizyka w Szkole*, nr 1 (2014), s. 7-10.

<sup>8</sup> O terapii hadronowej można przeczytać w artykule T. Kubiak, „Od konwencjonalnej radioterapii fotonowej do terapii hadronowej, czyli fizyka w leczeniu nowotworów”, *Fizyka w Szkole*, nr 6 (2015), s. 4-7.

tu dydaktykom, którzy będą dalej propagować wiedzę o tej instytucji, budując świadomość społeczną i przybliżając szerokiemu gronu odbiorców najnowsze osiągnięcia nauki. Dlatego organizowane są nie tylko kilkudniowe kursy dla nauczycieli prowadzone w ich językach narodowych, ale również dłuższe programy międzynarodowe. Zaliczyć do nich można „*International Teacher Weeks Programme*”, który w 2019 r. zgromadził 47 dydaktyków fizyki z 38 krajów, w tym także autora niniejszego artykułu.

Aplikanci, którzy zostaną zakwalifikowani do programu i otrzymają stypendia Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych, podczas rekrutacji muszą oczywiście wykazać się nie tylko bogatym CV, doskonałą znajomością języka angielskiego, kreatywnością, ale również przygotować m.in. film prezentujący siebie jako nauczyciela czy wykładowcę. Po powrocie mają pełnić rolę ambasadorów nauk fizycznych w swoich krajach, dzieląc się wiedzą z młodzieżą i ludźmi, którzy nie zawsze uświadamiają sobie, w jaki sposób praca naukowców z CERN zmieniła nasze życie.

Ale edukacja w CERN to nie tylko pogłębianie wiedzy profesjonalistów. Warto wspomnieć również letni program dla studentów uczelni wyższych a przede wszystkim S'Cool LAB, czyli laboratorium, w którym licealiści mogą zgłębiać tajniki fizyki cząstek<sup>9</sup>.

W tym niezwykle miejscu, w towarzystwie prawdziwych pasjonatów fizyki, młodzież wykonuje szereg niezwykle ciekawych eksperymentów z wykorzystaniem kwarkowych układanek, drukowanego w 3D modelu detektora ATLAS, interferometru, komory mgłowej, kwadropolowej pułapki jonowej, samodzielnie wykonanego akceleratora czy diodowego detektora cząstek. Najistotniejszą rzeczą jest fakt, iż prawie wszystkie wspomniane doświadczenia da się powtórzyć w klasie przy stosunkowo niewielkim nakładzie finansowym.

Koniecznym jest jeszcze wspomnieć, że w Meyrin dla wszystkich przyjezdnych dostępne są dwie interaktywne wystawy. Pierwsza z nich „*Universe of Particles*” znajduje się w tzw. „Globe nauki i innowacji” (fot.11). Ta charakterystyczna drewniana budowla o wysokości 27 metrów i zewnętrznej średnicy 40 metrów stanowi symbol CERN i swoisty punkt orientacyjny w terenie. Co ciekawe, konstrukcja ta została podarowana przez Konfederację Szwajcarską i przeniesiona w obecne miejsce w 2004 r. Pierwotnie bowiem, jako tzw. „*Palais de l'Equilibre*”, służyła podczas wystawy krajowej Expo.02 w Neuchâtel w 2002 r. Dziś jest otwarta dla każdego, kto chce przeżyć fascynującą podróż do świata cząstek i cofnąć się w przeszłość naszego Wszechświata.

Miłośników fizyki, ale również sztuki współczesnej zainspiruje również instalacja projektu Gayle Hermicka znajdująca się przed budynkiem. Ma ona formę dwóch wyginających się, splecionych wstęg ze stali nierdzewnej, na których po zewnętrznej stronie wygrawerowano listę przełomowych odkryć w fizyce, natomiast od wewnątrz korespondującej równania.

Druga, również niezwykle ciekawa wystawa to zlokalizowany w pobliżu recepcji CERN, tzw. „*Microcosm*”. Tutaj możemy nie tylko zdobyć informację o najważniejszych eksperymentach i akceleratorach, ale również zaobserwować ślady cząstek w działającej komorze Wilsona czy obejrzeć wystawę plenerową detektorów i urządzeń stosowanych dawniej do badań materii na poziomie subatomowym.

## Przyszłość CERN

Czytelnicy „*Fizyki w Szkole*” na pewno zastanawiają się, czy naukowcy z CERN planują już przyszłe eksperymenty z udziałem zderzacza jeszcze większego od LHC. Odpowiedź brzmi tak i wydaje się oczywista, gdyż takie ogromne przedsięwzięcia trzeba planować z dużym wyprzedzeniem, aby zapewnić stosowne finansowanie i rozwinąć potrzebne technologie. W pierwszej kolejności zostanie jednak zmodernizowany istniejący zderzacz, który od 2026 roku ma pracować jako HL LHC (od ang. *High Luminosity Large Hadron Collider*). Celem jest zwielokrotnienie liczby zderzeń zachodzących w ciągu sekundy, co będzie możliwe dzięki zwiększeniu liczby protonów w paczce przy jednoczesnym zmniejszeniu rozmiaru wiązki w miejscu kolizji.

W dalszej przyszłości planuje się jednak budowę zupełnie nowej maszyny z układem detektorów. Dotychczas pojawiły się m.in. koncepcje liniowego zderzacza CLIC (ang. *Compact Linear Collider*) oraz kołowego o roboczej nazwie FCC (ang. *Future Circular Collider*) i obwodzie około 100 km. Oczywiście czas pokaże, które z tych śmiałych zamierzeń zostanie zrealizowane, a być może fizycy stworzą zupełnie nowe technologie.

Reasumując warto jeszcze raz podkreślić, iż badania prowadzone w CERN nie tylko rozszerzają horyzonty naszego poznania i przyczyniają się do zrozumienia natury Wszechświata, ale również są źródłem wielu innowacyjnych rozwiązań technologicznych, które ułatwiają nam życie oraz przynoszą wiele korzyści zarówno społecznych jak i ekonomicznych.

dr Tomasz Kubiak

Wydział Fizyki UAM

oraz Poznański Park Naukowo-Technologiczny Fundacji UAM

## LITERATURA

- [1] Technology Meets Research. 60 Years of CERN Technology: Selected Highlights, pod. red. C. Fabjan, T. Taylor, D. Treille, H. Wenninger, World Scientific, Singapore, 2017.
- [2] G. J. Wiener, J. Woithe, A. Brown, K. Jende, Introducing the LHC in the classroom: an overview of education resources available, *Physics Education* 51(3) (2016), 035001 (7pp)
- [3] J. Woithe, G. J. Wiener, F. F. Van der Veken, Let's have a coffee with the Standard Model of particle physics, *Physics Education*, 52(3) (2017), 034001 (9pp).
- [4] L. Serio i inni, A New Cryogenic Test Facility for Large and Heavy Superconducting Magnets, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 27(4), (2017), 9500105.
- [5] M. Aguilar i inni, First Result from the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station: Precision Measurement of the Positron Fraction in Primary Cosmic Rays of 0.5-350 GeV, *Physical Review Letters* 110 (2013), 141102.
- [6] Informacje internetowe na stronach CERN: <https://home.cern/science>; <https://atlas.cern>; <http://alice.web.cern.ch>; <http://aliceinfo.cern.ch/Public/Welcome.html>; <http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public>; <https://cms.cern> (dostęp z 31.08.2019).
- [7] CMS Collaboration, Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC, *Physics Letters B*, 716(1) (2012), s. 30-61.
- [8] S. Charley, Inside the CERN Control Centre, *Symmetry Magazine* 3 (2015), (8pp).

<sup>9</sup> Szczegółów można dowiedzieć się na oficjalnej stronie S'Cool Lab: <http://scool.web.cern.ch/>



# ENERGYLANDIA

## ZORGANIZUJ SZKOLNĄ WYCIECZKĘ DO NAJLEPSZEGO PARKU ROZRYWKI W POLSCE!



### Olbrzymi wybór rozmaitych atrakcji

Park Rozrywki Energylandia składa się z pięciu różnych stref tematycznych i odznacza się ogromnym wyborem dostępnych form rozrywki. Wystarczy jeden bilet, by otrzymać wstęp do kilkudziesięciu różnych atrakcji zajmujących aż 30 hektarów!

Systematycznie odbywają się tu pokazy odważnych kaskaderów i wygimnastykowanych akrobatów, edukacyjne spektakle dla najmłodszych oraz musicala. Uświadczysz także projekcje interesujących filmów, a także zabierzesz podopiecznych na edukacyjne i artystyczne warsztaty. Dzieci mogą również wybrać się do Laboratorium szalonego naukowca.



### Oszczędzaj!

**Grupy szkolne**  
mogą liczyć na specjalne ceny już  
od 39 zł/os. oraz posiłek GRATIS!  
Nauczyciele i kierowcy płacą tylko 1 zł za bilet.  
Parking dla autokarów jest bezpłatny!



### Rada

Jeśli poszukujesz miejsca  
na wycieczkę szkolną, podczas której  
żaden uczeń nie będzie się nudził to  
**ENERGYLANDIA**

idealnie się do tego nadaje.

To wszystko czeka na Twoich  
podopiecznych w Zatorze, tylko  
pół godziny od Krakowa!

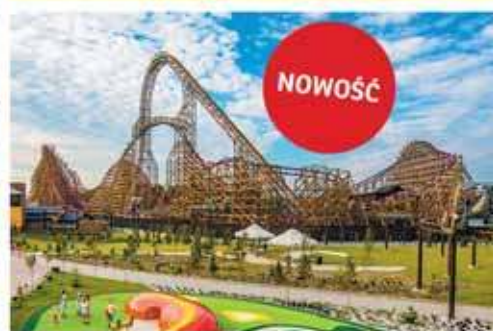


## Energylandia to synonim najwyższego BEZPIECZEŃSTWA

Energylandia cechuje się także najwyższym bezpieczeństwem. A to dlatego, że w każdym Parku Rozrywki kwestie bezpieczeństwa powinny być priorytetowe i tak właśnie jest tutaj. Każde dostępne urządzenie posiada odpowiednie atesty, a cały kompleks otrzymał międzynarodowy certyfikat ISO 9001, który otrzymują organizacje spełniające szczególne kryteria dotyczące zarządzania jakością.

*Ponadto kadra pracująca w obiekcie to doświadczane osoby, które zostały rzetelnie wyszkolone. Ogromną wagę przywiązują do tego, by żadne dziecko nie wyostało się poza obiekt bez opieki dorosłej osoby.*

Dzieci mogą korzystać wyłącznie z atrakcji dostosowanych do ich wieku oraz wzrostu, a w parku wodnym pracuje kilkunastu profesjonalnych ratowników, którzy bez przerwy strzegą bezpieczeństwa Gości.



### Roller coastery, tropiki i ekstremalne emocje

Najmłodszy Goście z pewnością będą przeszczęśliwi, mogą spędzić czas w stworzonej specjalnie dla nich Bajkolandii. Przeżyją niesamowite przygody na roller coasterach dostosowanych do ich wieku. Dla młodzieży i dorosłych idealna będzie strefa ekstremalna, w której emocje zdrowej adrenaliny i radości naprzemiennie się ze sobą mieszają. Mieści się tu największy w Europie Mega Coaster – Hyperion, a także najszybszy na świecie wodny Roller Coaster Speed! Dla spragnionych adrenaliną i radości naprzemiennie się ze sobą mieszają. Mieści się tu największy w Europie Mega Coaster – Hyperion, a także najszybszy na świecie wodny Roller Coaster Speed! Dla spragnionych adrenaliną i radości naprzemiennie się ze sobą mieszają. Mieści się tu największy w Europie Mega Coaster – Hyperion, a także najszybszy na świecie wodny Roller Coaster Speed!

# Zastosowanie obrazów satelitarnych na lekcjach szkolnych

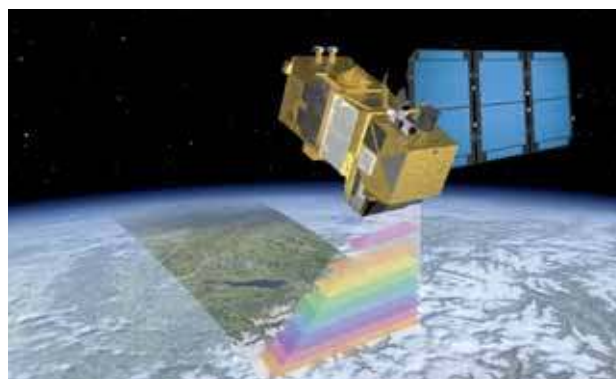
Już od dziesiątek lat satelity obserwacyjne krążą nad naszymi głowami, robiąc zdjęcia. Satelitarne fotografie to świetne pomoce dydaktyczne na lekcjach geografii, to oczywiste. Możliwości jednak jest znacznie więcej. Zdjęcia robione z Kosmosu mogą być przyczynkiem do dyskusji na tematy społeczne, które dotyczą codzienności zarówno osób uczących się jak i nauczających. A niezbędną do tego podstawą jest fizyka.

Aleksander Jasiak

Zdjęcia robione z Kosmosu to ogrom danych o naszej planecie, które możemy wykorzystywać w pracy z uczniami i uczennicami. To nasze okno na świat i **to dosłownie** – nie wychodząc z domu, możemy się przyjrzeć ogromnym połaciom Ziemi, możemy w szczególności analizować zmiany zachodzące w przyrodzie. Wykorzystująca prawa fizyki technologia satelitarna dostarcza nam również informacje umożliwiające m.in. obserwację procesów społecznych. Oto pomost między naukami ścisłymi a zagadnieniami społeczno-ekonomicznymi.

W cyfrowej rzeczywistości, która staje się codziennością polskich szkół, dostęp do danych satelitarnych jest prosty. Użyteczne narzędzie stanowi np. darmowa przeglądarka **EO Browser**, dzięki której możemy korzystać z obrazów przesyłanych z całej puli satelitów. Oprócz obfitości materiałów główną zaletą tej przeglądarki jest bardzo częsta aktualizacja danych, umożliwiającą obserwowanie zmienności interesujących nas procesów w skali nawet pojedynczych dni.

**EO Browser** ma jeszcze jedną zaletę, istotną z perspektywy osoby uczącej przedmiotów ścisłych. Wśród udostępnianych zdjęć są i te wykonane w zakresach spektrum elektromagnetycznego niewidzialnych dla ludzkiego oka. Na przykład do określania kondycji roślinności obserwowanej na zdjęciach satelitarnych wykorzystuje się różnice w odbiciu fal w zakresach czerwieni i bliskiej podczerwieni.



Rys. 1. Satelita Sentinel-2 obrazujący ziemię w zakresie widzialnym oraz podczerwieni (źródło: ESA)

Do analizy zdjęć uczniowie i uczennice będą więc potrzebować wiedzy z fizyki odnośnie interakcji różnych zakresów światła, widzialnego i niewidzialnego, z obiektami na powierzchni Ziemi. W przypadku roślinności absorpcja światła przez pigmenty zawarte w liściach jest głównym czynnikiem kształtującym **krzywą spektralną** (Rys. 2) w obrębie światła widzialnego (400–700 nm). Pigmenty chlorofilu (typu a oraz b) absorbują światło niebieskie (400–500 nm) oraz czerwone (600–700 nm) na potrzeby fotosyntezy.

Absorpcja jest mniejsza w zakresie światła zielonego (500–600 nm) i to właśnie dlatego zdrową roślinność widzimy w kolorze zielonym. Roślinność poddana stresom (sic!), czyli będąca w nieoptymalnych dla siebie warunkach (np. susza bądź choroba), będzie odbijać światło

w sposób inny aniżeli ta w dobrej kondycji. **Dzieje się tak, ponieważ** stres wpływa na pigmenty zawarte w liściach.

Co ciekawe, pigmenty, a także celuloza, są przezroczyste dla fal w bliskiej podczerwieni (700–1300 nm), co prowadzi do niskiej absorpcji tych fal przez liście. Większość fal zostaje odbita (Rys. 2.). Wychodzi więc na to, że zielona roślinność bardziej niż zielona jest... podczerwona.

Jednym ze współczynników wykorzystujących dane o odbiciu fal najczęściej używanym do rozpoznawania kondycji roślinności jest współczynnik NDVI (znormalizowany różnicowy wskaźnik wegetacji):

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R},$$

gdzie R symbolizuje odbicie w paśmie czerwonym, a NIR w bliskiej podczerwieni.

Im w lepszej kondycji jest obserwowana roślinność, tym uzyskany poprzez NDVI obraz jest ciemniejszy. NDVI możemy wykorzystać na przykład do obserwacji cyklu wegetacyjnego lub cyklu upraw rolniczych.

Współczynnik NDVI może być użytecznym narzędziem do wykorzystania na lekcji, kiedy nauki ściśle chcemy wpleść w dyskusję dotyczącą zagadnień codzienności, która bezpośrednio dotyka uczniów i uczennice. Połączenie nauk ścisłych z problemami życia codziennego sprawia, że fizyka czy w ogóle obszar STEM pojawia się tu w szerszym kontekście, który angażuje emocjonalnie i może tworzyć przywiązanie do poznawanych treści, co sprzyja procesowi uczenia się. Ta zależność znajduje zastosowanie m.in. przy wykorzystaniu dialogu jako narzędzia w procesie edukacyjnym (P. Freire, 1970) czy przy stosowaniu metody *problem-based learning*.

Na zdjęciu plantacji palm olejowych (Rys. 3.) dzięki współczynnikowi NDVI możemy zaobserwować kontrast między kwaterami upraw a siatką dróg. Analiza zdjęcia może być przyczynkiem do rozmowy na temat produkcji oleju palmowego w kontekście kryzysu bioróżnorodności, zmian klimatycznych czy przesiedleń i zubażania lokalnych społeczności na korzyść międzynarodowych korporacji. Olej palmowy jest składnikiem nawet połowy dostępnej na rynku żywności oraz innych produktów codziennego użytku. Prognozy przewidują, że w latach 2010–2020, pomimo głośnych deklaracji redukcji szkód, na potrzeby produkcji oleju palmowego zniszczone zostanie 50 mln hektarów lasów tropikalnych, czyli powierzchnia porównywalna z terytorium Hiszpanii.

Wywołane u uczniów i uczennic zainteresowanie, w tym przypadku nawiązaniem do problematyki społecznej, może posłużyć rozwiązaniu postawionego zadania z dziedziny fizyki czy matematyki, np. *omówienie wzoru  $(x-y)/(x+y)$  i szacowanie wyników na jego bazie*. Oczywiście, chcąc nauczyć stosowania wzoru matematycznego, można nie używać żadnego zdjęcia. Jednak to odniesienie do konkretnego problemu dotyczącego każdego i każdej z nas skutkuje emocjonalnym zaangażowaniem uczniów i uczennic w proces edukacyjny, co wpływa na powodzenie całego procesu uczenia się. A że wspomniane tu za-



Rys. 2. Krzywe spektralne dla różnych typów terenu (źródło: P. Kupidura)



Rys. 3. Plantacje palm olejowych na południu wyspy Borneo w dniu 14 sierpnia 2019, zwizualizowane przy pomocy współczynnika NDVI na bazie zdjęć z satelity Sentinel-2A

gadnienia związane z wpływem działalności człowieka na przyrodę są faktycznie ważne dla młodego pokolenia, świadczą inicjatywy takie jak np. Młodzieżowy Strajk Klimatyczny. Jednocześnie to okazja, żeby podkreślić, że wiedza zdobywana w szkole wcale nie jest oderwana od codziennego życia, ale bezpośrednio dotyczy problemów trapiących nas tu i teraz. Oto odpowiedź na znane nauczycielom pytanie: „A do czego mi się to przyda?”. Właśnie do tego!

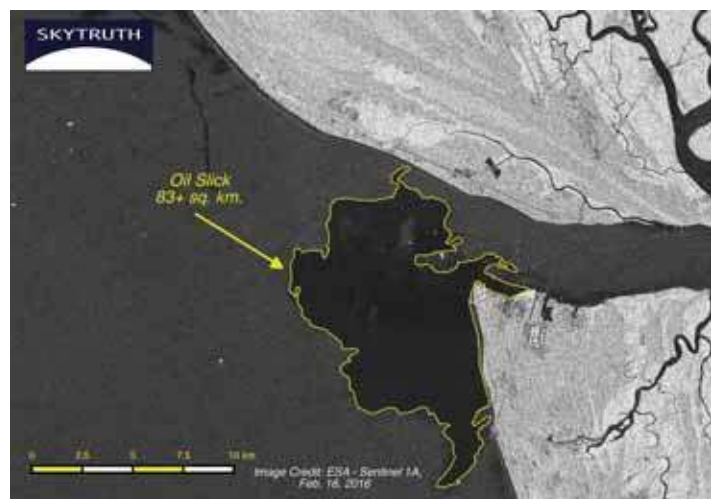


Foto 1. Wyciek ropy, z należącego do koncernu Shell, terminalu Forcados u wybrzeży Nigerii, uchwycony 16 lutego 2016 przez satelitę Sentinel-1A (źródło: skytruth.org)

## O ESERO

W ramach programu ESERO wspieramy proces nauczania przedmiotów ścisłych poprzez ukazanie ich w kontekście tematyki kosmicznej. Lekcje uzupełnione o tę perspektywę zwiększają zainteresowanie uczniów i uczennic nauką, motywują do poszukiwania wiedzy i rozwijania nowych umiejętności. Kontekst kosmiczny zapewniamy przez szereg uzupełniających się działań. Organizujemy warsztaty dla nauczycielek i nauczycieli oraz konkursy astronautyczne dla drużyn uczniowskich.

Na stronie internetowej [esero.kopernik.org.pl](http://esero.kopernik.org.pl) udostępniamy materiały filmowe i scenariusze zajęć lekcyjnych opracowane we współpracy z ekspertami zarówno ze świata astronautyki jak i edukacji. Przekonujemy, że o Kosmosie, kosmicznych wynalazkach i technologiach można mówić nie tylko na lekcji geografii czy fizyki, lecz również matematyki, chemii i informatyki.

Europejskie Biuro Edukacji Kosmicznej ESERO to program edukacyjny Europejskiej Agencji Kosmicznej ESA. Centrum Nauki Kopernik jest jego koordynatorem w Polsce.

Celem programu jest zwiększenie liczby młodych ludzi studiujących nauki techniczne, wspieranie innowacyjnych form edukacji, wzrost kompetencji i kwalifikacji zawodowych nauczycielek i nauczycieli, które służą zarówno rozwojowi nauki, jak i coraz bardziej opartej na jej wynikach gospodarki europejskiej.

Europejski program ESERO angażuje miliony uczniów i tysięcy nauczycieli w swoje działania dzięki sieci krajowych biur ESERO działających w 12 krajach członkowskich Europejskiej Agencji Kosmicznej.



Foto 2. Pióropusze dymu nad lasami w Brazylii, sfotografowane 21 sierpnia 2019 przez satelitę Sentinel-3 (źródło: ESA)

Możliwości mariażu nauk ścisłych z zagadnieniami społecznymi jest wiele. Wykorzystując zdjęcia z satelity Sentinel-1, można zaobserwować, że fale radarowe inaczej odbijają się od wód czystych, a inaczej od tych zanieczyszczonych ropą naftową (zagadnienie z obszaru fizyki), co zainspiruje rozmowę na temat odpowiedzialności koncernów naftowych za degradację planety (ważne zagadnienie z zakresu WOS-u).

Obserwując na satelitarnych fotografiach wylesiane tereny Amazonii, można szacować straty w pojemności węglowej roślinności – matematyczne wyliczenia mogą sprowokować uczniów i uczennice do refleksji nad skutkami przemysłowej hodowli bydła na tych terenach. Analizując obrazy z wieloletnich obserwacji, można zaobserwować zjawisko cofania się lodowców, a przy okazji wyliczyć nadwyżkę energii potrzebną do cofnięcia się lodowca o daną odległość. Wszystko zależy od naszej pomysłowości i kreatywności.

Dotkliwą cezurą są tylko ograniczenia czasowe – lekcja trwa od dzwonka do dzwonka, ale zakres tematów do dyskusji i inspiracji do innych działań z dziedziny biologii, geografii czy WOS-u jest przeogromny. A budowanie świadomości uczniów i uczennic na temat funkcjonowania otaczającego ich świata oraz krzewienie postaw zaangażowanych jest nie do przecenienia. W końcu – jeśli coś widzą, mogą próbować to zmienić!

*Więcej materiałów na temat używania zdjęć satelitarnych w pracy dydaktycznej znajdziesz na stronie [esero.kopernik.org.pl](http://esero.kopernik.org.pl)*

**Aleksander Jasiak**  
Centrum Nauki Kopernik

### LITERATURA

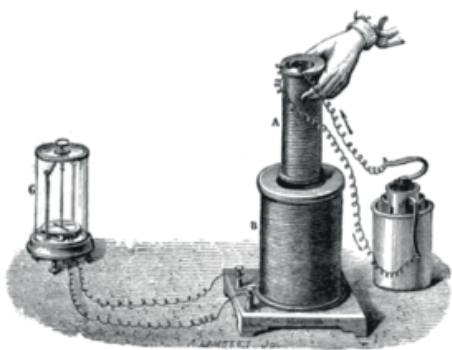
- [1] EO Browser (<https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>)
- [2] Grebner D. et al., *Introduction to Forestry and Natural Resources*, 2013.
- [3] *Palm Oil Fact Sheet*, Rainforest Action Network.
- [4] *Countdown to Extinction*, Greenpeace, 2019.
- [5] Freire Paulo, *Pedagogy of the Oppressed*, 1970.
- [6] Farrell Bernadette, *Dewey, Freire and Student Engagement: A Critique of Tertiary Education Policy in Ireland and New Zealand*, 2018.

# Praktyczne poznawanie praw fizyki, czyli latarka Faraday'a i inne urządzenia

Potrzeba pozyskiwania źródeł energii elektrycznej zgodnie z ideą ochrony środowiska i standardami ekologicznymi wymusza na nas szukanie rozwiązań, które podczas ich eksploatacji będą sprzyjać środowisku naturalnemu. Dlatego też sięgnijmy do rozważań najprostszych urządzeń, będących w zasięgu naszej ręki.

Kazimierz Mikulski

Żyjący w świecie nauki eksperymentalnej **Michael Faraday** (1791-1867), pozostawił wiele odkryć, ale największe znaczenie miały prace Faradaya dotyczące elektryczności, które umożliwiają zbudowanie np. latarki<sup>1</sup>. To on w 1831 r. odkrył zjawisko indukcji elektromagnetycznej, co przyczyniło się do powstania elektrodynamiki.



Rysunek 1. Rysunek Michaela Faradaya z 1831 roku. Eksperyment pokazujący powstawanie indukcji elektromagnetycznej między zwojami drutu, przy użyciu aparatury z XIX wieku. Po prawej stronie znajduje się akumulator dostarczający prąd, który przepływa przez małą zwojnicę drutu (A) wytwarzającą pole magnetyczne. Gdy mała cewka jest nieruchoma, nie jest indukowany prąd. Jednakże, gdy ta cewka jest wsuwana do dużej cewki (B), zmiana strumienia magnetycznego powoduje indukowanie prądu w dużej cewce. Zmiana ta jest wykrywana przez odchylenie igły galwanometru – instrumentu (G), po lewej stronie.

Źródło: [https://en.wikipedia.org/wiki/Michael\\_Faraday](https://en.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday)

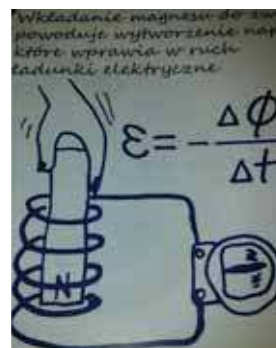
Odkrycia z zakresu elektrodynamiki miały ogromne znaczenie z dwóch powodów:

- 1) prawo Faradaya ma podstawowe znaczenie w teorii elektromagnetyzmu,
- 2) indukcja elektromagnetyczna może być wykorzystana do wytwarzania prądu elektrycznego, co zademonstrował sam Faraday budując pierwszą prądnicę.

Współcześnie funkcjonujące, nowoczesne generatory elektryczne są bardzo złożone, ale wszystkie opierają się na tej samej zasadzie – indukcji elektromagnetycznej.<sup>2</sup>



A



B

Rysunek 2. A - Michael Faraday żył w latach 1791-1867; B - idea odkrycia

Źródło: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9c/Michael\\_Faraday\\_-\\_Project\\_Gutenberg\\_eText\\_13103.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9c/Michael_Faraday_-_Project_Gutenberg_eText_13103.jpg)

Przypomnijmy, że **indukcja elektromagnetyczna** to zjawisko powstawania siły elektromotorycznej w przewodniku na skutek zmian strumienia pola magnetycznego. Z doświadczeń tych Faraday wywnioskował, że w zamkniętym obwodzie znajdującym się w zmiennym polu magnetycznym pojawia się siła elektromotoryczna indukcji równa szybkości zmian strumienia indukcji pola magnetycznego przechodzącego przez powierzchnię rozpiętą na tym obwodzie. Prawo to można wyrazić wzorem podanym poniżej<sup>3</sup>. Zmiana ta może być spowodowana zmianami pola magnetycznego lub względnym ruchem przewodnika i źródła pola magnetycznego (rys. 3). Zjawisko to, jak wspomniano, zostało odkryte w 1831 roku przez angielskiego fizyka Michaela Faradaya.

Zjawisko indukcji opisuje prawo indukcji elektromagnetycznej Faradaya:

$$E = -d\phi/dt$$

gdzie:  $E$  to indukowana siła elektromotoryczna (SEM) w woltach;  $\phi$  to strumień indukcji magnetycznej przepływający przez powierzchnię objętą przewodnikiem.<sup>4</sup>

## Przemiany energii w układzie elektrycznym

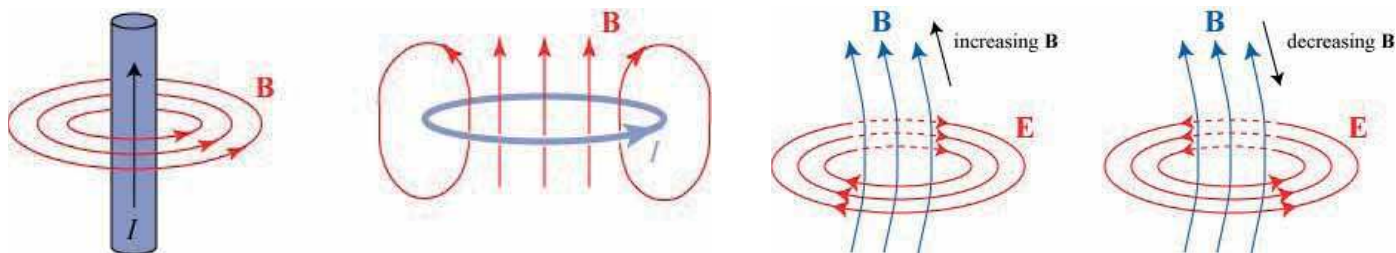
W literaturze przedmiotu czytamy, że z punktu widzenia elektryczności, wykonana praca nad nośnikiem ładunku, zamienia się na energię elektryczną, którą uzyskuje

<sup>1</sup> Latarka elektryczna – rodzaj lampy elektrycznej, emitującej światło punktowe. Źródłem światła w latarce jest zwykle żarówka o niewielkiej mocy, zasilana bateriami. Do skupiania światła używa się reflektora parabolicznego. Wszystkie części latarki, wraz z odpowiednimi obwodami elektrycznymi, są montowane w obudowie o niewielkich rozmiarach i masie, zapewniającej niezbędną ochronę żarówce. [https://pl.wikipedia.org/wiki/Latarka\\_elektryczna](https://pl.wikipedia.org/wiki/Latarka_elektryczna)

<sup>2</sup> Źródło: [https://pl.wikipedia.org/wiki/Michael\\_Faraday](https://pl.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday)

<sup>3</sup> Źródło: [https://pl.wikipedia.org/wiki/Prawo\\_indukcji\\_elektromagnetycznej\\_Faradaya](https://pl.wikipedia.org/wiki/Prawo_indukcji_elektromagnetycznej_Faradaya)

<sup>4</sup> Źródło: [https://pl.wikipedia.org/wiki/Indukcja\\_elektromagnetyczna](https://pl.wikipedia.org/wiki/Indukcja_elektromagnetyczna)



Rysunek 3. Pole magnetyczne  $B$  i prąd elektryczny  $I$  (a), oraz (b) kierunek pola elektrycznego  $E$  w sytuacjach wzrostu (po lewej) lub zmniejszenia (po prawej) wektora indukcji magnetycznej  $B$ .  
Źródło: <https://skullsinthestars.com/2009/03/06/michael-faraday-grand-unified-theorist-1851/>

ładunek. Uzyskiwanie energii odbywa się w wyniku przesuwania ładunku przeciwko siłom pola elektrycznego. Energia elektryczna nośników prądu zamienia się w odbiornikach na inne rodzaje energii. Z punktu widzenia energii, proces zachodzący w źródle napięcia można wyrazić:

$$E_f \xrightarrow{W} E_e \xrightarrow{W} E_g,$$

$$-\Delta E_f = W = \Delta E_e = \Delta E_g.$$

gdzie:  $E_f$  – energia zewnętrzna, zamieniana na energię elektryczną i jej zmiana  $\Delta E_f$ ,

$W$  – praca wykonywana przez źródło nad przeniesieniem ładunku,

$E_e$  – energia elektryczna, jaką uzyskuje ładunek w źródle i jaką oddaje w obwodzie oraz jej zmiana  $\Delta E_e$ ,

$E_g$  – energie, wykonane prace uzyskane z obwodów elektrycznych, a także jej zmiana  $\Delta E_g$ .

W związku z opisanymi wyżej przemianami energii w obwodzie prądu elektrycznego, siła elektromotoryczna jest równa:

$$\mathcal{E} = \frac{W}{q} = -\frac{\Delta E_f}{q} = \frac{\Delta E_e}{q} = \frac{\Delta E_g}{q},$$

Praca mechaniczna – ruch latarki powodujący przemieszczanie się magnesu stałego w plastikowym korpusie względem zwojnicy.



Rysunek 4. Schematyczne przedstawienie zasady zachowania energii w „latarce Faraday’a”.  
Źródło: opracowanie własne.

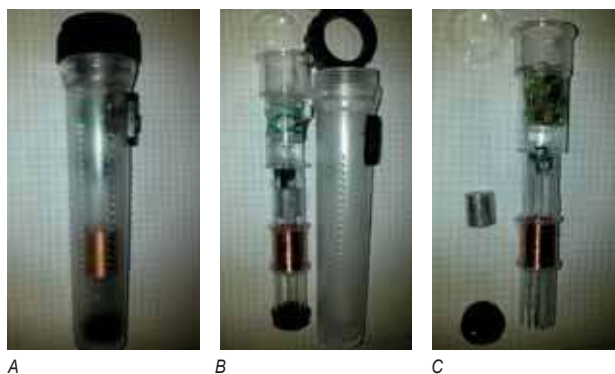
Powstanie SEM zgodnie z prawem podanym przez Faraday’a.

Zamiana energii elektrycznej powstałej w obwodzie elektrycznym na energię świetlną z zastosowaniem elementów świetlnych – diod świecących LED.

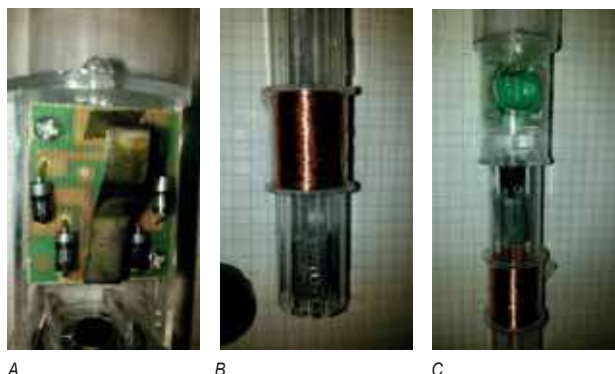
Uwolnienie (kierunkowe) energii świetlnej z zastosowaniem układu składającego się z zwierciadła wklęsłego i soczewki. (patrz fot. 1 i fot. 2)

Jeżeli obwód złożony jest z  $N$  zwojów, to:

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$



Fotografia 1. „Latarka Faraday’a” A – widok ogólny; B, C – demontaż części wewnętrznych, po lewej (C) magnes w kształcie walca przemieszczający się podczas ruchu posuwisto-zwrotnego w rurze plastikowej, na której umieszczona jest cewka.  
Źródło: zdjęcia autora.



Fotografia 2. „Latarka Faraday’a” A – widok układu prostowniczego; B – widok cewki nawiniętej na plastikowy walec; C – widok elementu magazynującego energię (kondensator).  
Źródło: zdjęcia autora.



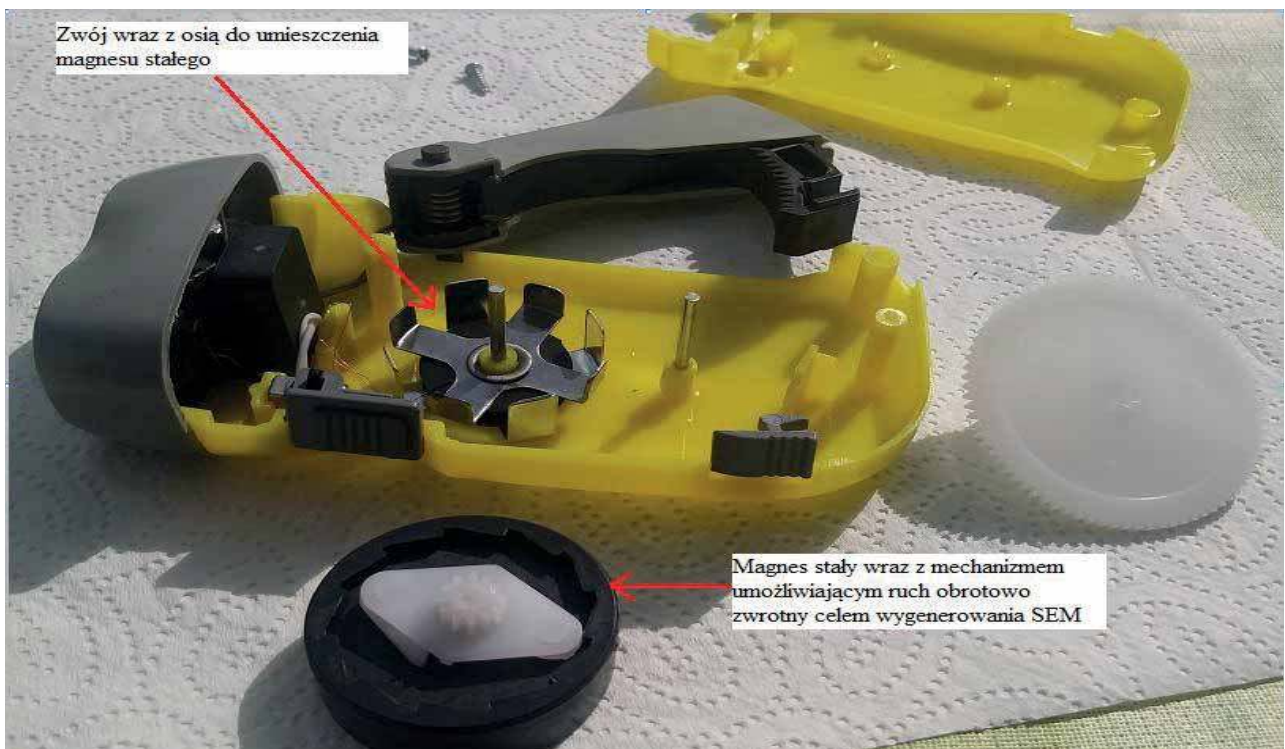
A



B

Fotografia 3. A – Latarka z dwoma wyświetlaczami z wykorzystaniem idei dynama; B – wnętrze tak wykonanej latarki.

Źródło: zdjęcia własne.



Fotografia 4. Budowa wewnętrzna latarki.

Źródło: zdjęcia własne.

Światło z latarki będzie tym silniejsze im szybciej będziemy powodować przemieszczanie się magnesu w polu cewki, a także ważna jest ilość zwojów w zwojnicy<sup>5</sup>.

W świecie Internetu pod adresem <https://www.spryciarze.pl/zobacz/jak-zrobic-latarke-bez-baterii-magnetyczna-latarka> można zobaczyć jak zrobić latarkę bez baterii – magnetyczna latarka i przeprowadzić jej badanie, dlatego opisu tego eksperymentowania tutaj nie przytaczam.

Inne rozwiązanie to latarka działająca w oparciu o ideę dynama<sup>6</sup>.

W tego typu urządzeniu światło z latarki będzie tym silniejsze, im szybciej będziemy naciskać – tutaj na dźwignię, a także ważna jest ilość zwojów w zwojnicy. Zastosowano w tym urządzeniu ruch obrotowy magnesu z odpowiednim mechanizmem sprężynowym umożliwiającym uzyskanie SEM. Warto poeksperymentować, by sprawdzić zasadę zachowania energii i prawa fizyki.

dr Kazimierz Mikulski  
Maksymilianowo

<sup>5</sup> Źródło: [https://pl.wikipedia.org/wiki/Si%C5%82a\\_elektromotoryczna](https://pl.wikipedia.org/wiki/Si%C5%82a_elektromotoryczna)

<sup>6</sup> **Dynamo** (z języka niemieckiego) – dawna nazwa prądnicy, aktualnie rzadko używana. Obecnie jako nazwa urządzenia, nazwa stosowana potocznie tylko dla prądnic rowerowych napędzanych przez obracające się koło rowerowe. [https://pl.wikipedia.org/wiki/Dynamo\\_rowerowe](https://pl.wikipedia.org/wiki/Dynamo_rowerowe)



# Wstęp do teledetekcji, czyli optyka w praktyce

Dyscyplina ta to jedna z najprężniej rozwijających się dziedzin nauki, zwłaszcza biorąc pod uwagę rozwój technologii bezzałogowych oraz miniaturyzację sensorów optycznych.

Marcin Spiralski

Pod tajemniczo brzmiącą nazwą teledetekcja kryje się nic innego, jak pozyskiwanie informacji o obiektach bez kontaktu z nimi. Słowo to zostało utworzone w wyniku połączenia greckiego tele – daleko i łacińskiego detectio – wykrywać, ujawniać. Jest to najkrótsza i najprostsza droga do zwizualizowania sobie definicji grupy metod i technologii związanych z uzyskiwaniem danych na odległość.

Inne definicje kładą nacisk m.in. na konieczność korzystania z promieniowania elektromagnetycznego lub na procesy, które zachodzą w trakcie rejestracji informacji o obiektach, tj. odbicie promieniowania emitowane przez sensor<sup>1</sup> lub przez słońce. Teledetekcja obejmuje pozyskiwanie informacji o środowisku za pomocą urządzeń rejestrujących różne zakresy promieniowania elektromagnetycznego w celu ich przetworzenia w oprogramowaniu komputerowym i wizualizacji. Występuje ona powszechnie dookoła nas, a nawet wewnątrz nas – nasze oczy rejestrują przecież odbicie światła widzialnego na odległość.

Oprócz pojęcia teledetekcja, często komplementarnie używana jest definicja fotogrametria, która z kolei jest nauką o metodach, które umożliwiają wyznaczenie oraz określenie kształtów, wymiarów i wzajemnego położenia

obiektów znajdujących się na zdjęciach względem siebie i jest ściśle powiązana z geodezją.

W zależności od rodzaju promieniowania wyróżniana jest teledetekcja aktywna lub pasywna. W teledetekcji pasywnej rejestrowane jest promieniowanie odbite od obiektów, którego źródłem najczęściej jest Słońce (np. rejestracja przez zwykły aparat cyfrowy tudzież bardziej zaawansowaną kamerę lotniczą).

Z kolei teledetekcja aktywna cechuje się posiadaniem przez urządzenie rejestrujące własnego źródła promieniowania, które po odbiciu od powierzchni terenu, rejestrowane jest przez sensor zawarty w tym urządzeniu (np. skaner laserowy wysyłający i odbierający promień lasera lub radar emitujący i odbierający fale radiowe).

Inny podział następuje ze względu na pułap, z którego następuje rejestracja informacji. Wyróżniamy tu teledetekcję naziemną, lotniczą i satelitarną. Teledetekcja naziemna korzysta z metod takich jak wspomniane wcześniej naziemne skanery laserowe (tzw. TLS), klasyczną fotografię naziemną, a ostatnimi czasy również kamery 360°. Coraz bardziej powszechne jest także korzystanie z metod związanych ze spektroskopią, czyli nauką o widmach emisyjnych i ich powiązaniu z oddziaływaniami promieniowania na materię rozumianą jako zbiorowisko atomów i cząsteczek.

<sup>1</sup> Sensor – mianem tym określa się w teledetekcji części urządzenia, służące do rejestracji danych, np. sensory optyczne lub sensory radarowe

Z kolei do teledetekcji lotniczej zalicza się dane pozyskiwane w trakcie lotów helikopterami, samolotami oraz coraz bardziej popularnymi bezzałogowymi statkami powietrznymi (dronami). Co ciekawe metody te nie są wyłącznie domeną profesjonalistów, wszak możliwe jest pozyskanie zdjęć lotniczych we własnym zakresie w trakcie lotu samolotem pasażerskim przy korzystnych warunkach atmosferycznych. Oprócz tego, ogólnodostępne zdjęcia lotnicze z państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego dostępne są na portalu [geoportal.gov.pl](http://geoportal.gov.pl) (zakładka Ortofotomapy). Ponadto, zdjęcia lotnicze wykorzystywane są przez najpopularniejszy serwis mapowy Google Maps (choćby przy tworzeniu trójwymiarowych modeli miast).

W klasycznym ujęciu nie pojawia się natomiast pułap parasatelitów, gdyż jest to bardzo nowy koncept. Zakłada on użycie sterowców i innych urządzeń, które pozyskiwałyby dane z poziomu stratosfery – pomiędzy pułapem lotniczym a satelitarnym, (np. sterowce lub balony). Rozwój tego typu technologii jest niezwykle ciekawy, a właściwie kwestią czasu jest stworzenie funkcjonalnego systemu teledetekcyjnego tego typu. W Polsce pojedyncze próby już się odbyły, m.in. przy udziale Zakładu Teledetekcji Instytutu Lotnictwa i zakończyły się sukcesem w rejestracji obrazu Ziemi oraz parametrów atmosfery z wysokości ok. 35 km nad powierzchnią terenu.

Pułap satelitarny (powyżej 100 km nad poziomem gruntu) zawiera z kolei satelity rejestrujące obraz Ziemi z różną rozdzielczością przestrzenną. Jej jednostką jest cm/piksel, gdzie wartość centymetrów odpowiada długości boku piksela, który jest kwadratem. Innymi parametrami stosowanymi dla satelitów jest rozdzielczość czasową (podawana w dniach, stanowi ona o tym co, ile dni dany satelita pozyskuje dane nad tym samym punktem), rozdzielczością spektralną (która określa przedziały rejestrowanego promieniowania, np. promieniowanie UV czy podczerwone) oraz rozdzielczością radiometryczną (czyli liczbę rozróżnianych poziomów promieniowania, podawaną przeważnie w bitach). Darmowe dane satelitarne można znaleźć m.in. na stronach internetowych SENTINEL Hub, CREODIAS czy amerykańskiego – EARTH EXPLORER.

Przechodząc dalej, należy wspomnieć o zakresach rejestrowanego promieniowania przez sensory. W zależności od zakresów rejestrowanej przez urządzenia długości fali, występują kamery, rejestrujące promieniowanie ultrafioletowe (służące przeważnie do badania atmosfery i Słońca), te rejestrujące światło widzialne w zakresach RGB (najczęściej wykorzystywane, rejestrujące przestrzeń bez przekształceń) oraz kamery w podczerwieni (bliskiej oraz dalszej, termalnej).

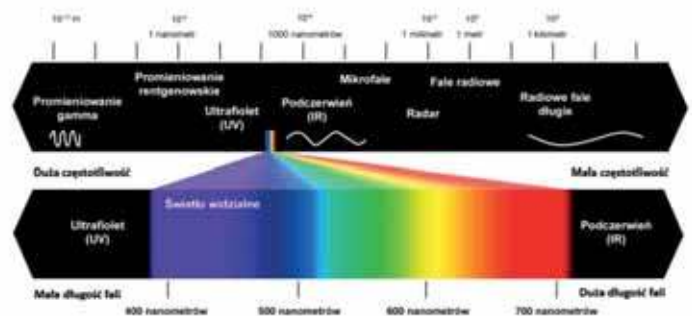
Wizualizacja tego typu zobrazowań możliwa jest dzięki zastąpieniu jednego z kanałów RGB (czyli kanałów czerwonego, zielonego, niebieskiego za pomocą których można przedstawić przestrzeń w zakresie widzialnym), obrazem przestrzeni w podczerwieni. Dzięki temu możliwe jest zobaczenie tego, co niewidoczne dla ludzkiego oka. Także z zakresu podczerwieni korzystają skanery laserowe (LIDAR), a radary (służące np. do określania wysokości terenu) – z mikrofal (dł. fali od 1mm do 30 cm).



Fotografia 1. Start balonu stratosferycznego widziany „okiem” drona, źródło: Zakład Teledetekcji ILOT



Fotografia 2. Zobrazowanie satelitarne z wizualizacją podczerwieni zamiast kanału czerwonego dla fragmentu Warszawy, źródło: SENTINEL Hub



Rycina 1. Widmo promieniowania elektromagnetycznego z rozbiem na składowe światła widzialnego.

Kamery rejestrujące promieniowanie w zdefiniowanych zakresach w większej ilości niż tylko światło widzialne (dł. fali w zakresie 400-700 nm) nazywamy kamerami wielospektralnymi, a kamery rejestrujące ciągły zakres promieniowania elektromagnetycznego nazywamy kamerami hiperspektralnymi. Różni je także ilość zakresów. Sensory wielospektralne zawierają przeważnie kilka, a te hiperspektralne – kilkaset. Sensory te mają pewne, swoiste właściwości – wielospektralne działają przeważnie podobnie jak zwykły aparat, rejestrując dodatkowo zakresy wykraczające poza światło widzialne, sensory hiperspektralne działaniem przypominają zaś skaner, pozyskujący po kolei dane będące w większości liniami (skanowanie odbywa się jakby po kolei, linia



Fotografia 3. Zdjęcie lotnicze w pojedynczym zakresie spektralnym – zakres czerwony (660 nm), źródło: Zakład Teledetekcji ILOT

przy linii – w ten sposób skanowana jest zadana przestrzeń).

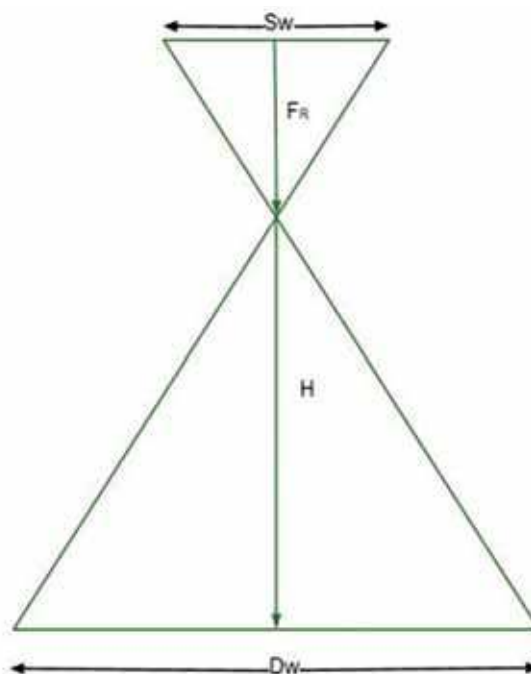
Przy wykonywaniu obrazowań lotniczych niezwykle istotne jest również ustalenie prędkości lotu oraz wysokości nad poziomem gruntu (above ground level, AGL). Ponadto istotną kwestią jest zależność parametrów obrazu od właściwości sensorów optycznych i platformy nośnej dla tych sensorów, przy czym największe znaczenie ma ona dla zdjęć lotniczych, gdyż w teledetekcji naziemnej i satelitarnej zdarza się rzadziej by te właściwości były modyfikowane.

Wracając do prędkości lotu, to uzależniona jest ona od typu wykorzystywanej platformy oraz od maksymalnej szybkości migawki. Im samolot ma większą prędkość względem ziemi, tym szybciej powinny być wykonywane zdjęcia. Przy takiej samej szybkości wykonywania zdjęć, wynikiem zwiększenia prędkości jest zmniejszające się pokrycie zdjęć. Idąc tym tropem, im wolniej samolot leci, tym uzyskiwane pokrycie zdjęć jest większe. Odpowiednie nakładanie się obrazowań jest ważne, gdyż zdjęcia lotnicze wykonuje się w szeregach, uzyskując pojedyncze elementy mozaiki i dopiero w późniejszej obróbce (złączeniu) możliwe jest stworzenie złączonej mapy całego obszaru nalotu. W teledetekcji występuje pojęcie pokrycia podłużnego (zdjęć), oznaczanego literą  $p$  i poprzecznego, oznaczanego literą  $q$ . Pokrycie zdjęć wyrażane jest najczęściej w procentach.

Duży wpływ na jakość fotografii ma optyka aparatu. Wykonując zdjęcia w trakcie lotu musimy dostarczyć matrycy odpowiednią ilość światła w jak najkrótszym czasie. Dobry obiektyw skróci czas naświetlania, zapewni odpowiednią jasność zdjęć minimalizując rozmycia obrazu. Sama rozdzielczość przestrzenna zależy od wielkości fizycznych stosowanej matrycy, ogniskowej zastosowanej optyki, wysokości lotu (nad poziomem gruntu) oraz rozdzielczości matrycy (do wzoru podstawia się właściwie szerokość wykonywanego zdjęcia).

Jeśli zależy nam na jak najwyższej jakości pozyskanych danych, należy wykorzystywać aparaty o możliwie jak największej matrycy (dlatego też pierwsze profesjonalne kamery lotnicze były wielkości lodówki), a także obniżyć pułap lotu, zmniejszając tym samym obszar obrazowania. Parametry matrycy i optyki wpływają także na pole widzenia sensora (wyrażanego w stopniach). Dla uproszczenia, parametry matrycy można zastąpić warto-

ścią pola widzenia (o ile jest znane) przy obliczaniu parametrów wykonywanych zdjęć. Poniżej przedstawiono schemat optyczny wykonywania obrazowań lotniczych.



Rycina 2. Schemat pokazujący wpływ parametrów sensora na rozmiar obrazowanego obszaru

- $S_W$  – szerokość fizyczna matrycy [mm]
- $F_R$  – odległość ogniskowa [mm]
- $H$  – Wysokość lotu [m]
- $D_W$  – szerokość terenu objętego pojedynczym zdjęciem
- $D_H$  – długość terenu objętego pojedynczym zdjęciem
- $imW$  – szerokość zdjęcia [pix]
- $imH$  – wysokość zdjęcia [pix]
- GSD – Ground Sampling Distance (rozmiar piksela w terenie) [cm/pix]

Wzór na obliczenie

$$GSD = \frac{S_W \cdot H \cdot 100}{F_R \cdot imW}$$

Zastosowanie teledetekcji jest bardzo szerokie. Ogromną zaletą metod teledetekcyjnych, zwłaszcza tych satelitarnych jest duży zasięg przestrzenny obserwacji bez konieczności wyjazdu w teren. Teledetekcja sprawdza się więc doskonale do określania zasięgu deforestacji (np. w Amazonii) i pożarów oraz do monitoringu czasowego i przestrzennego upraw (np. przy określaniu obszaru objętego suszą). Z kolei powszechnie stosowanym materiałem źródłowym do opracowań fotogrametrycznych na potrzeby geodezji i kartografii są zdjęcia lotnicze, które umożliwiają wytworzenie m.in. map fotolotniczych, modelu wysokościowego terenu oraz mapy wektorowej.

Teledetekcja naziemna służy natomiast do dokumentacji obiektów wymagających bardzo szczegółowego odwzorowania. Jako przykład można tu podać cykliczną

dokumentację dębu Bartka przy wykorzystaniu technik skanowania laserowego.

Podsumowując, zastosowanie teledetekcji jest bardzo szerokie, a nieodłącznym jej elementem jest optyka. Najczęściej teledetekcja rozumiana jest jako pozyskanie, przetwarzanie i wizualizowanie zdjęć lotniczych i satelitarnych, lecz przy ogromie metod i technik teledetekcyjnych, takie określenie jest zdecydowanie uproszczeniem.

Teledetekcja to jedna z najprężniej rozwijających się dziedzin nauki, zwłaszcza biorąc pod uwagę rozwój technologii bezzałogowych oraz miniaturyzację sensorów optycznych.

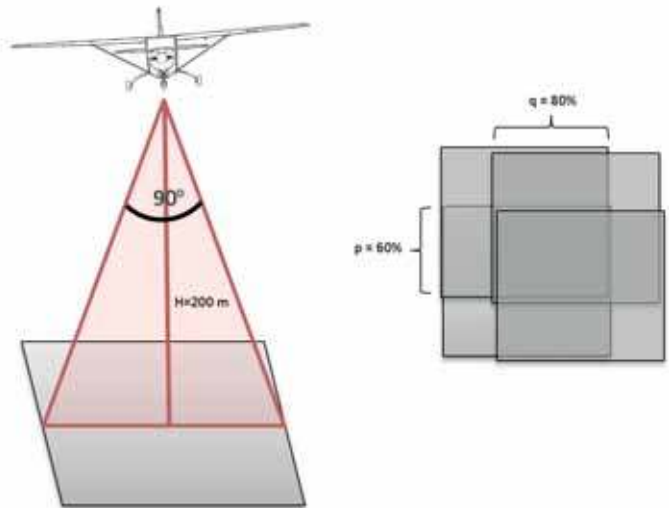
Teledetekcja jest zdecydowanie specjalizacją dla osób o profilu humanisty w rozumieniu klasycznym, w której istnieje potrzeba łączenia informacji z zakresu optyki, fizyki, astronomii, astrofizyki, geografii, geodezji, geologii, planowania przestrzennego, leśnictwa czy biologii. Wszyscy uczniowie o tak szerokich zainteresowaniach w przyszłości będą na pewno mile widziani w szeregach specjalistów z tej branży.

#### Zadanie:

Zostałeś wybrany do zespołu organizującego misję fotolotniczą. Misja będzie realizowana przy użyciu samolotu załogowego Cessna 182 oraz kamery rejestrującej obraz w zakresie widzialnym. Planowana wysokość lotu to 200 m AGL (ponad poziomem gruntu). W kamerze zainstalowano szerokokątny obiektyw o poprzecznym polu widzenia wynoszącym  $90^\circ$  i podłużnym  $74^\circ$ . Wyznacz rozmiar sceny, czyli długości boków w terenie, które obejmuje pojedyncze zdjęcie dla podanych parametrów.

Maksymalnie w jakiej odległości od siebie powinny być rozmieszczone szeregi, po których będzie lecieć samolot, jeżeli pokrycie poprzeczne zdjęć wynosi co najmniej 80%? Jaka może być maksymalna prędkość przelotowa samolotu, jeżeli pokrycie podłużne ustalone zostało na minimum 50%, a zdjęcia wykonywane są z prędkością 1 zdj./s?

Rys. pomocniczy:



**Marcin Spiralski**  
Specjalista ds. GIS/Teledetekcji, Zakład Teledetekcji  
Centrum Technologii Kosmicznych

## Nagroda Nobla z fizyki w 2019 r.

W tym roku nagroda Nobla z fizyki miała zdecydowanie kosmiczny charakter. Przyznano ją bowiem trzem naukowcom za badania kosmosu. Nie podzielono jej jednak po równo.

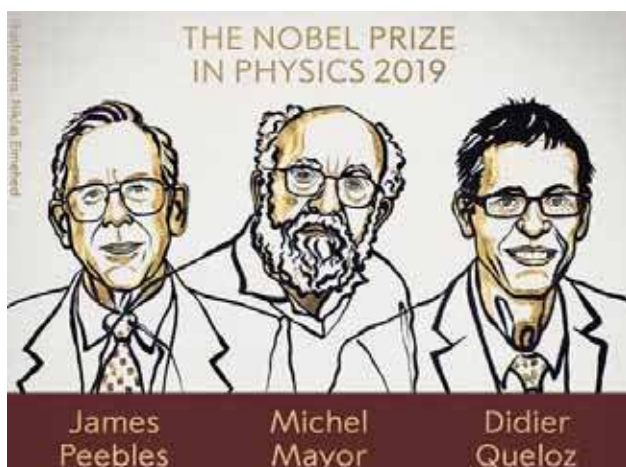
Pierwszym laureatem jest Kanadyjczyk James Peebles. Przyznano mu połowę nagrody za teoretyczne rozważania nad Wielkim Wybuchem i związkiem ekspansji Wszech-

świata z promieniowaniem tła. Druga połowa nagrody została przyznana dwóm szwajcarskim astronomom Mikelowi Mayorowi (ang. Michel Mayor) i Didierowi Queloz za odkrycie egzoplanety krążącej wokół gwiazdy podobnej do naszego Słońca. Odkrycia tego dokonano w 1995 roku. Planeta ta znajduje się 50 lat świetlnych od nas i jest gorącą gazową kulą. Odkrycia tego dokonali używając spektroskopii dopplerowskiej, czyli wykorzystali technikę, której podstawy są uczone w szkole średniej. Nie było to jednak pierwsze odkrycie planety spoza Układu Słonecznego. Dokonał go rok wcześniej polski astronom Aleksander Wolszczan.

Przy okazji należy stwierdzić, że tegoroczna nagroda Nobla wpisuje się w ogólną tendencję dzielenia jej na kawałki. Po raz ostatni przyznano całą nagrodę Nobla jednemu badaczowi Gorgowi Czarpakowi w 1992 r. Była to nagroda za prace nad detektorami cząstek.

Znów nie ma Polaków na liście laureatów, chociaż niektóre źródła typowały profesora Artura Ekerta – naszego człowieka w Oksfordzie. Nic jednak z tego nie wyszło.

Źródło: <https://www.theguardian.com/science/2019/oct/08/nobel-prize-in-physics-awarded-for-research-on-cosmology-and-exoplanets-2019>



# O brzytwie Ockhama i definicji prędkości

## (Miniatura dydaktyczna)

Waldemar Reńda

W nowych, szkolnych podręcznikach fizyki nadal pojawiają się różne odmiany prędkości, jej średnie, a także wielkość zwana szybkością.<sup>1</sup> Czyżby autorzy tych podręczników nie wiedzieli, że w ruchu postępowym punktu materialnego jest tylko jedna wielkość fizyczna zwana **prędkością** i równa stosunkowi wektora przemieszczenia do czasu, w którym to przemieszczenie nastąpiło, gdy czas ten dąży do zera, czyli równa pochodnej wektora położenia po czasie.

Zatem<sup>2</sup>  $\mathbf{v} = \Delta \mathbf{r} / \Delta t$ , gdy  $\Delta t \rightarrow 0$  lub  $\mathbf{v} = d\mathbf{r} / dt$ .

A jak jest w podstawie programowej i w podręcznikach uniwersyteckich?

W podstawie programowej dla klasy VII mowa jest jedynie o obliczaniu **wartości** prędkości w ruchu jednostajnym. Jest więc dobrze. W podstawie programowej dla szkół ponadpodstawowych mówi się o prędkości jako wielkości wektorowej i tyle. Nie ma tam nic o pozostałych wspomnianych wyżej pojęciach.

W encyklopedii fizyki<sup>3</sup> (opiniowanej m.in. przez prof. G. Białkowskiego) czytamy: „Prędkość –  $\mathbf{v}$  – wektorowa wielkość fizyczna określona pochodną wektora położenia punktu materialnego względem czasu  $\mathbf{v} = d\mathbf{r} / dt$ .”

Nie ma tam definicji żadnej prędkości średniej, ani też pojęcia szybkości.

A zobaczymy, co jest na ten temat w „Nowej Encyklopedii Powszechnej”.<sup>4</sup>

„Prędkość, podstawowa, wektorowa wielkość fizyczna charakteryzująca ruch. Przy opisie ruchu postępowego wprowadza się pojęcie prędkości liniowej<sup>5</sup>  $\mathbf{v}$ . Jest ona równa pochodnej wektora położenia  $\mathbf{r}$  względem czasu  $t$ :  $\mathbf{v} = d\mathbf{r} / dt$ , a jej wartość  $v$  równa jest pochodnej drogi  $s$  względem czasu:  $v = ds / dt$ . W ruchu jednostajnym jej wartość równa się stosunkowi drogi  $s$  do czasu, w którym ta droga została przebyta. Prędkość liniowa jest styczna do toru.

W „Fizyce dla politechnik” profesora A. Januszajtisa<sup>6</sup> jest tylko taka definicja:

„Pochodną wektora położenia względem czasu nazywamy *prędkością*. Prędkość jest wektorem  $\mathbf{v} = d\mathbf{r} / dt$ .”

Pojęcie prędkości średniej jako wektora, można natomiast znaleźć w podręczniku R. Resnicka i D. Halliday’a<sup>7</sup> na s. 45, ale – poza definicją prędkości – nigdzie potem owa wielkość się nie pojawia, bo niby po co?

A o pojęciu prędkości autorzy piszą tak: „Prędkość punktu materialnego jest wielkością, która określa, jak szybko zmienia się położenie tego punktu w czasie.” Dalej (s. 46.) mowa jest o prędkości chwilowej,<sup>8</sup> jako prędkości w ruchu zmiennym. Do wprowadzenia tego pojęcia autorzy posługują się wprawdzie pojęciem prędkości średniej (tej wektorowej), ale wydaje mi się to zupełnie zbyteczne, bo na owej stronie (w paragrafach 4. i 5.) piszą tak:

„Jeżeli [wektor]<sup>9</sup>  $\Delta \mathbf{r}$  określa przemieszczenie punktu materialnego w małym przedziale czasu  $\Delta t$  między  $t$  i  $(t + \Delta t)$ , to prędkość tego punktu w chwili  $t$  jest granicą stosunku  $\Delta \mathbf{r} / \Delta t$ , gdy zarówno  $\Delta \mathbf{r}$ , jak i  $\Delta t$  dążą do zera.”<sup>10</sup>

Jeżeli prędkość chwilową oznaczymy przez  $\mathbf{v}$ , to  $\mathbf{v} = \lim \Delta \mathbf{r} / \Delta t$ , gdy  $\Delta t \rightarrow 0$ .

Kierunek [wektora]  $\mathbf{v}$  jest granicznym kierunkiem, jaki przyjmuje [wektor]  $\Delta \mathbf{r}$ , gdy punkt B zbliża się do punktu A (rysunek 3-2) lub gdy  $\Delta t$  dąży do zera. Kierunek ten jest styczny do toru punktu materialnego w punkcie A. [W punkcie, w którym ta prędkość zostaje określona. Przyp. mój.] W matematyce<sup>11</sup> granicę stosunku  $\Delta \mathbf{r} / \Delta t$  przy  $\Delta t$  dążącym do zera oznaczamy symbolem  $d\mathbf{r} / dt$  i nazywamy pochodną wektora [położenia]  $\mathbf{r}$  względem czasu  $t$ . Mamy więc:  $\mathbf{v} = d\mathbf{r} / dt$ . Wartość prędkości chwilowej  $\mathbf{v}$  jest równa po prostu wartości bezwzględnej [wektora]  $\mathbf{v}$ . Znaczący to, że  $v = |\mathbf{v}| = dr / dt$ . Wartość prędkości jest zawsze liczbą dodatnią.”

Dlaczego przytoczyłem tak obszerny fragment tego podręcznika? Otóż dlatego, że – wraz z odpowiednim rysunkiem – jest to niemal gotowy konspekt lekcji, której celem jest wprowadzenie pojęcia prędkości w I klasie

<sup>1</sup> Można np. szybko pisać lub liczyć, ale nie ma potrzeby wprowadzania tego pojęcia do fizyki jako kolejnej wielkości fizycznej opisującej ruch. Te wielkości, które są, w zupełności wystarczą!

<sup>2</sup> Pogrubienie oznacza wielkość wektorową.

<sup>3</sup> *Iustrowana encyklopedia dla wszystkich, Fizyka*, pod red. A. Januszajtisa i J. Langer, WN-T, Warszawa 1987.

<sup>4</sup> *Nowa Encyklopedia Powszechna*, PWN, t. 5, s. 329, rok wydania 1996.

<sup>5</sup> Przymiotnik „liniowa” jest dodawany, bo jest jeszcze prędkość kątowa, ale o tym uczniowie dowiedzą się nieco później.

<sup>6</sup> J. Januszajtis, *Fizyka dla politechnik*, PWN, Warszawa 1977, s. 44.

<sup>7</sup> R. Resnick, D. Halliday, *Fizyka*, t. 1, ss. 44-46, PWN, Warszawa 1999. (I wyd. angielskie z 1960 r.)

<sup>8</sup> Definicja prędkości dotyczy wyłącznie liniowej prędkości chwilowej. Można więc słowo „chwilowa” pominąć. Natomiast poszczególne rodzaje ruchu postępowego definiujemy, podając, czy i jak ona ulega zmianie. Np., gdy  $v = \text{constans}$  (jej wartość nie ulega zmianie w czasie trwania ruchu), to mamy ruch jednostajny i wówczas  $s = v \cdot t$ , a gdy  $\mathbf{v} = \text{const}$ . (wektor prędkości nie ulega zmianie co do wartości, kierunku i zwrotu), to mamy ruch jednostajny przostoliniowy.

<sup>9</sup> Można to słowo opuścić, ale dodałem je dla lepszej „czytelności” tekstu.

<sup>10</sup> W zasadzie wystarczy:  $\Delta t$  dąży do zera, bo wówczas automatycznie  $\Delta \mathbf{r}$  musi też dążyć do zera.

<sup>11</sup> Tylko w matematyce? Wszak to Izaak Newton (niezależnie od Leibniza) stworzył podstawy rachunku różniczkowego, bo ów rachunek okazał się być mu potrzebny w fizyce.

liceum i technikum.<sup>12</sup> I możemy to zrobić bez odwoływania się do pojęcia średniej prędkości wektorowej. O ile bowiem stosunek drogi ( $s$ ) do czasu ( $t$ ), w którym ta droga została przebyta jest rzeczywiście **średnią arytmetyczną wartości** prędkości liniowej w ruchu postępowym ciała, to nie można powiedzieć, że stosunek wektora przemieszczenia  $\Delta \mathbf{r}$  do czasu trwania ruchu  $\Delta t$  jest prędkością średnią. Nie usprawiedliwia tego nawet fakt, iż istnieje matematyczne podobieństwo obu wzorów. Oto dowód:

Podzielmy czas trwania ruchu na  $n$  tak małych elementów  $\Delta t$ , że wewnątrz tego przedziału można przyjąć  $v = \text{constans}$ . Niech też owe przedziały czasowe będą sobie równe. Wówczas  $v_{\text{sr.}} = (v_1 + v_2 + v_3 + \dots + v_n) : n = (\Delta s_1 / \Delta t + \Delta s_2 / \Delta t + \Delta s_3 / \Delta t + \dots + \Delta s_n / \Delta t) : n = (\Delta s_1 + \Delta s_2 + \Delta s_3 + \dots + \Delta s_n) : n \Delta t = s / t$ .

Niestety, nie da się tego dokonać dla wektorów  $\Delta \mathbf{r}$ .

Jak wyżej pokazałem, dzieląc całkowitą drogę ( $s$ ) przez całkowity czas ( $t$ ), w którym nastąpiło przemieszczenie ciała, otrzymuje się wzór pozwalający obliczyć **średnią wartość prędkości** liniowej tego ruchu. Warto tu dodać, że **wzór ten nie definiuje żadnej wielkości fizycznej**, lecz jedynie pozwala obliczyć w/w wartość.<sup>13</sup>

Powyższego dowodu nie da się przeprowadzić również w przypadku wektorów prędkości i dlatego stosunek  $\Delta \mathbf{v} / \Delta t$  nie można nazwać średnim przyspieszeniem wektorowym ruchu postępowego ciała. Podobnie jest też w przypadku:  $\mathbf{F}_{\text{sr.}} = \Delta \mathbf{p} / \Delta t$ . Bowiemy tak, jak stosunek  $s / t$  nie może być definicją prędkości, tak samo powyższe relacje nie mogą być definicjami wielkości fizycznych. Natomiast powyższe uśrednianie można wykonać w przypadku obliczania średniej wartości przyspieszenia i udowodnić, że  $\Delta v / t = a_{\text{sr.}}$  lub też średniej wartości siły:  $\Delta \mathbf{p} / \Delta t = \mathbf{F}_{\text{sr.}}$ <sup>14</sup>

Dodam, że wzory:  $\mathbf{v} = \Delta \mathbf{r} / \Delta t$ ,  $\mathbf{a} = \Delta \mathbf{v} / \Delta t$  oraz  $\mathbf{F} = \Delta \mathbf{p} / \Delta t$  można przekształcić do postaci:  $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{v} \cdot \Delta t$ ,  $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{a} \cdot \Delta t$ ,  $\Delta \mathbf{p} = \mathbf{F} \cdot \Delta t$  i z nich korzystać w pewnych zadaniach, ale pod warunkiem, że:  $\mathbf{v} = \text{const.}$  (ruch jednostajny prostoliniowy),  $\mathbf{a} = \text{const.}$  oraz  $\mathbf{F} = \text{const.}$  (ruch jednostajnie przyspieszony – prostoliniowy).<sup>15</sup>

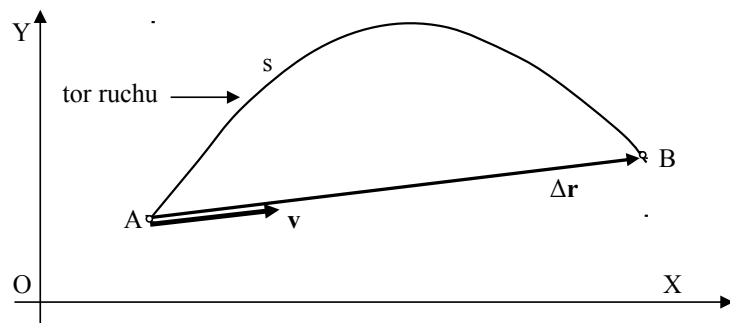
I tu pozwolę sobie powrócić do owej średniej prędkości.

Jak już wspomniałem, część podręczników uniwersyteckich i większość szkolnych wprowadza pojęcie wektorowej prędkości średniej, definiowanej jako stosunek wektora przemieszczenia  $\Delta \mathbf{r}$  do czasu  $\Delta t$ , w którym to przemieszczenie nastąpiło:  $\mathbf{v} = \Delta \mathbf{r} / \Delta t$ . Pisałem już, że to nie jest żadna średnia. A zatem – co?

Jeżeli punkt materialny przemieścił się z punktu A do punktu B toru w czasie  $\Delta t$ , to drogą ( $s$ ) jego ruchu jest długość toru z punktu A do B. Zaś **średnią wartością prędkości** tego ruchu jest stosunek tej drogi do czasu, w którym ta droga została przebyta:  $v_{\text{sr.}} = s / \Delta t$ .

Czym zatem jest stosunek:  $\Delta \mathbf{r} / \Delta t$ ?

Rysunek



Na powyższym rysunku jest to wektor  $\mathbf{v}$ .

Jaki ma on związek ze średnią wartością prędkości  $v_{\text{sr.}}$  na danym fragmencie toru?

Otóż, gdybyśmy poruszali się z prędkością  $\mathbf{v}$  wzdłuż wektora  $\Delta \mathbf{r}$  z tą prędkością, przez czas  $\Delta t$ , to dotarlibyśmy do punktu B w tym samym czasie, w którym odbywał się rzeczywisty ruch po torze AB.

Możemy zatem napisać:  $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{v} \cdot \Delta t$  lub  $|\Delta \mathbf{r}| = |\mathbf{v}| \cdot \Delta t$ . Natomiast:  $s = v_{\text{sr.}} \cdot \Delta t$ .

Ponieważ  $|\Delta \mathbf{r}| < s$ , zatem i wartość wektora  $\Delta \mathbf{r} / \Delta t$  musi być mniejsza od  $v_{\text{sr.}}$

Nie ma więc żadnego związku pomiędzy tymi wartościami, a równanie  $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{v} \cdot \Delta t$  opisuje zupełnie inny ruch, który odbywałby się wprawdzie w tym samym czasie, ale po innym torze i z inną prędkością.

Jak mało ma wspólnego iloraz  $\mathbf{v} = \Delta \mathbf{r} / \Delta t$  z danym ruchem niech świadczy fakt, iż w ruchu jednostajnym po okręgu dla  $\Delta t = nT$ , iloraz ten staje się zerem.

Podsumujmy powyższe rozważania.

Po pierwsze: iloraz  $\Delta \mathbf{r} / \Delta t$  musi pojawić się w definicji prędkości, ale nie przypisujemy mu cech wielkości fizycznej opisującej dany ruch.

Po drugie: autorzy większości podręczników uniwersyteckich doskonale sobie radzą bez wyżej krytykowanych pojęć. Mogliby z nich zrezygnować również panowie R. Resnick i D. Halliday, a także autorzy podręczników szkolnych. Należy bowiem pamiętać, że nie wszystkie rozwiązania są dydaktycznie korzystne. A już na pewno **szkodliwe jest mnożenie bytów ponad potrzebę**.

Tego typu apel skierował do swych kolegów 13-wieczny filozof, William of Ockham (1280-1349). Dziś ów apel nazywany jest powszechnie „brzytwą Ockhama”. I szczególnie w dydaktyce należy o nim pamiętać.

Waldemar Reńda

Olkusz

<sup>12</sup> Oczywiście bez wprowadzania pojęcia pochodnej.

<sup>13</sup> Wzór ten wykorzystuje się w zasadzie jedynie w zadaniach na poziomie podstawowym.

<sup>14</sup> Wartości owych średnich pojawiają się jedynie w niektórych zadaniach, lecz nie mają większego znaczenia fizycznego.

<sup>15</sup> Przedstawionych w tym akapicie równań nie można przedstawiać jako funkcji w postaci wykresów, bo wykresy mogą dotyczyć wyłącznie wielkości skalarnych, a więc np. wartości wektorów.

Fizyka w liceum

# Astronomia w zadaniach fizycznych

Waldemar Reńda

Dawniej astronomia była osobnym przedmiotem w liceach. W wyniku kolejnych reform programowych została ona włączona do fizyki. Dotyczyło to astrofizyki. Z reszty zrezygnowano. Uważam, że na tym „mariażu” astronomia wiele straciła, ale zyskała fizyka. Niestety, w kolejnych programach tematykę astronomiczną traktuje się nieco po macoszemu. A przecież na symbiozie obu tych dziedzin nauk przyrodniczych mogła skorzystać dydaktyka fizyki. Nie traćmy tej możliwości i włączmy tematykę astronomiczną do zadań fizycznych. Apel ten kieruję nie tylko do nauczycieli, ale przede wszystkim do autorów podręczników i zbiorów zadań.

## Dlaczego tematyka astronomiczna jest dydaktycznie ważna?

Wyniki badań astronomicznych są szeroko omawiane w środkach masowego przekazu, dzięki czemu docierają one do szerokich kręgów społecznych. Cieszą się one powszechnym zainteresowaniem. Również duże zainteresowanie budzą one u dzieci i młodzieży. Mam jednak wrażenie, że nauczyciele w niewielkim stopniu wykorzystują to zainteresowanie dla uatrakcyjnienia lekcji fizyki. Tematyka astronomiczna nie tylko bowiem ubarwia lekcje, ale także rozszerza wiedzę o realnym świecie oraz dostarcza treści do ciekawych i opartych na rzeczywistości fizycznej zadań. Wskazuje równocześnie na powszechność praw fizycznych oraz jedność świata przyrody.

Rozwiązywanie zagadek Kosmosu jest nie tylko pasjonującym zajęciem o ogromnych walorach poznawczych, ale także zawiera znaczące wartości ogólnopedagogiczne i wychowawcze; rozbudza pragnienie poszerzania wiedzy, rozwija logiczne myślenie, kształci dociekliwość i krytycyzm, uczy ostrożności i rozwagi w wypowiedaniu sądów i przyjmowaniu hipotez za prawdy naukowe, dając równocześnie pole do niemal niczym nie skrzepowanej

wyobraźni. Jednocześnie uczy potrzeby ciągłej weryfikacji hipotez, a także czynnego i twórczego stosunku do wiedzy. Dostarcza także pozytywnych przeżyć związanych z radością poznania i spotkania z pięknem zawartym w fascynujących obrazach ciał i zjawisk niebieskich. Możliwość sięgania w odległe głębie Wszechświata – tak w wymiarze przestrzeni, jak i czasu – jest wspaniałą intelektualną przygodą. Pozwólmy przeżyć ją swoim uczniom!

Praca ta jest zbiorem problemów teoretycznych i zadaniowych, które możemy z powodzeniem włączyć do lekcji fizyki. Jej celem jest pokazanie, jak można – korelując tematykę astronomiczną z fizyczną – stworzyć jednolitą i wewnętrznie spójną dydaktyczną całość. Tematyka tych zadań ułożona jest zgodnie z tradycyjną kolejnością realizacji materiału, a zadania są tak dobrane, by ich wynik był frapujący oraz dostarczający uczniom rzeczywistej wiedzy o bliskim i dalszym Kosmosie. Rolą nauczyciela powinno być wywołanie pragnienia ich rozwiązania.

## Podstawowe pojęcia w fizyce

Rozpoczynam od podstawowego pojęcia w fizyce, jakim jest *punkt materialny*. Zwykle utożsamia się go z punktem geometrycznym obdarzonym znikomą masą. Bywa jednak, że całe ciało można uważać za punkt materialny, jeżeli jego rozmiary nie mają wpływu na przebieg oraz opis obserwowanego i badanego zjawiska. Tu dobrym przykładem jest obserwowana nieuzbrojonym okiem planeta lub gwiazda.

Inne pojęcie to fizyczny *układ odniesienia*. Jak wiemy, tworzą go wzajemnie nieruchome ciała lub punkty materialne, względem których opisujemy ruch danego ciała. Najczęściej jest nim Ziemia lub ciała trwale z nią związane. Dla opisu ruchu ciał niebieskich tworzymy układ związany ze Słońcem i tak zwaną sferą gwiazd stałych. Mówi się nawet, że odkrycie Mikołaja Kopernika (1473-1543) polegało na przeniesieniu układu odniesienia z Ziemi na Słońce. Odkrycie to pozwoliło potem Keplero-  
rowi (1571-1630) na sformułowanie trzech praw dotyczą-

cych ruchu planet, a Newtonowi (1642-1727) na odkrycie prawa powszechnej grawitacji. Dodam tu, że *układu odniesienia* nie może tworzyć jeden punkt materialny ani też kula. Dlatego też Ziemia będzie układem odniesienia, gdy wyróżnimy jej charakterystyczne elementy – takie jak bieguny, równik i południk zerowy (przechodzi on przez oś teleskopu obserwatorium astronomicznego w Greenwich). *Fizycznym układem odniesienia* służącym do opisu ruchu planet w przestrzeni jest układ związany ze Słońcem i gwiazdami stałymi.<sup>1</sup> Należy związać z nim *układ współrzędnych*.<sup>2</sup> Jednym z jego elementów jest płaszczyzna orbity Ziemi (na sferze odpowiada jej ekliptyka) oraz prostopadła do niej oś przechodząca przez środek Słońca.

### Kilka prostych zadań

W dziale „Kinematyka punktu materialnego” proponuję rozwiązać kilka prostych zadań rachunkowych, które pozwolą zapoznać uczniów z parametrami ruchu planet Układu Słonecznego. Na początek proponuję obliczyć czas potrzebny na przebycie światła ze Słońca na Ziemię (8 $\frac{1}{3}$  min) i Neptuna (250 min). Porównanie tych czasów daje pogląd o rozmiarach naszego Układu Planetarnego. Przy okazji uczniowie dowiedzą się, że średnia odległość Ziemi od Słońca to 149600000 km,<sup>3</sup> co w przybliżeniu możemy zapisać jako  $1,5 \cdot 10^{11}$  m. Przypominamy też, że szybkość światła w próżni to 300000 km/s czyli  $3 \cdot 10^8$  m/s. Jak widać, mamy tu okazję poćwiczyć przeliczanie jednostek wielkości fizycznych oraz działanie na potęgach, co przyda się przy rozwiązywaniu innych zadań.

Dla tego typu ćwiczeń warto obliczyć odległość (w km) odpowiadającą *rokowi świetlnemu*, czyli drodze przebytej przez światło w próżni w czasie jednego roku (365,25 doby). Mamy też okazję obliczyć długość *parseka* (1ps) w km. Przypominam, że jest to odległość,<sup>4</sup> z której jednostkę astronomiczną ( $1,5 \cdot 10^{11}$  m) widać pod kątem 1sekundy (1 $''$ ).<sup>5</sup> Korzystamy tu z faktu, że dla małych kątów  $\text{tg } \alpha = \sin \alpha = \alpha$  w radianach.<sup>6</sup>

Wartość tę łatwo obliczyć z proporcji, wiedząc, że 360 $^\circ$  to 360·60·60 sekund kątowych

Jeżeli więc 1296000 $''$  odpowiada  $2\pi$  radianów, to 1 $''$  odpowiada  $x$  radianów.

Stąd  $x = (2\pi : 1296000)$  radianów =  $4,848 \cdot 10^{-6}$  rad .

Zatem 1ps =  $(1,5 \cdot 10^{11} : 4,848 \cdot 10^{-6})$  m  $\approx 3,1 \cdot 10^{16}$  m, co stanowi 206265 j.a. lub około 3,26 lat świetlnych. Dodam, że najbliższa gwiazda – *Proxima Centaura*<sup>7</sup> –

jest odległa od nas o około 4,3 lata świetlne. Przy okazji proponuję obliczyć paralaksę tej gwiazdy.

Aby uczniom unaocznić, jakie odległości występują w Kosmosie, warto dokonać takiego „zmniejszenia” Układu Planetarnego, by Słońce miało średnicę 1 cm. Wówczas Ziemia miałaby średnicę 1mm i poruszałyby się w odległości 1m od Słońca, Mars – w odległości 1,5 m, Jowisz – 5 m, Saturn – 10 m, Uran – 20 m, Neptun – 30 m, a *Proxima Centaura* byłaby odległa od naszej gwiazdy o 270 km. W tej skali nasza Galaktyka miałaby średnicę ok. 1 mln km. Gdybyśmy zaś Galaktykę zmniejszyli do rozmiarów kartki zeszytu, to odległość między Słońcem a *Proximą Centaura* byłaby równa ok. 4  $\mu$ m. Gdyby z kolei Galaktykę zmniejszyć do 4  $\mu$ m, to wielkość kartki zeszytu byłaby porównywalna z dostępnym naszym badaniami Wszechświatem.

**Zadaniem przyjmowanym z dużym zainteresowaniem jest obliczenie, z jaką szybkością<sup>8</sup> – siedząc w ławce szkolnej – poruszamy się w ruchu dookoła osi Ziemi i dookoła Słońca.** Informujemy przy tym, że obrót Ziemi trwa nie 24 godziny, lecz 23godziny i 56 minut. Wynika to z faktu, że Ziemia, aby zwrócić się tym samym południkiem do Słońca, musi dokonać dodatkowo ok. 1 $^\circ$  obrotu,<sup>9</sup> co trwa ok. 4 minut. Przypominamy, że drogą naszego ruchu jest wówczas długość równoleżnika, na którym mieszkamy. Jego promień ( $r$ ) można obliczyć z odpowiedniego trójkąta narysowanego na osiowym przekroju Ziemi;  $r = R_{\text{Ziemi}} \cdot \cos \varphi$ , gdzie  $\varphi$  jest szerokością geograficzną naszej miejscowości.

Chcąc zaś obliczyć średnią wartość prędkości Ziemi w ruchu orbitalnym, korzystamy ze średniej odległości Ziemi od Słońca ( $1,5 \cdot 10^{11}$  m) oraz czasu obiegu Ziemi wokół Słońca, czyli okresem ( $T$ ) obiegu Ziemi dookoła Słońca, który zwany jest *rokiem gwiazdowym* i ma 365 dni 6 godzin 9 minut i 10 sekund, czyli 31558150 s. Zatem  $v_{\text{sr}} = s/t = 2\pi r/T \approx 30$  km/s.

Warto też obliczyć wartość prędkości Księżyca w ruchu dookoła Ziemi (ok. 1 km/s). Wówczas  $r = 384400$  km oraz  $T = 27,3217$  doby (miesiąc gwiazdowy).<sup>10</sup>

**Zadaniem z zaskakującym wynikiem jest porównanie przyspieszenia dośrodkowego Księżyca w ruchu dookoła Ziemi i Ziemi w ruchu dookoła Słońca.** Ta pierwsza wartość to  $0,0027$  m/s<sup>2</sup>, a drugą łatwo obliczyć ze wzoru:

$$a_z = v^2/r_z \approx (30000 \text{ m/s})^2/1,5 \cdot 10^{11} \text{ m} \approx 0,006 \text{ m/s}^2,$$

<sup>1</sup> Układ ten służy m.in. do projektowania trajektorii statków kosmicznych.

<sup>2</sup> Zwracam uwagę, że *fizyczny układ odniesienia* tworzą ciała fizyczne, z którym wiążemy układ współrzędnych (zwykle prostokątny lub bieżący), będący „konstrukcją” matematyczną.

<sup>3</sup> Odległość tę nazwano *jednostką astronomiczną* (1 j.a.).

<sup>4</sup> Odcinek odpowiadający tej odległości powinien tworzyć kąt prosty z promieniem orbity Ziemi.

<sup>5</sup> Kąt ten nazywamy kątem paralaksy heliocentrycznej lub krócej *paralaksą* danej gwiazdy. Obserwacyjnie jest to kąt o jaki przemieszcza się na sferze bliska nam gwiazda w stosunku do gwiazd odległych.

<sup>6</sup> Zasadę tę stosujemy dla małych (do 5 $^\circ$ ) i bardzo małych kątów. Przyda się ona też w innych zadaniach.

<sup>7</sup> Gwiazda prawdopodobnie fizycznie związana z  $\alpha$  Centaura – gwiazdozbiór widocznego na niebie południowym.

<sup>8</sup> Wartość prędkości.

<sup>9</sup> Dlatego powstała skala kątowa, w której kąt pełny ma 360 $^\circ$ . Odpowiada to w przybliżeniu liczbie dni w roku.

<sup>10</sup> Okres zmian faz Księżyca zwany jest *miesiącem synodycznym* i trwa średnio 29,53 doby. Przyczyna tej różnicy jest podobna do tej, jaka dotyczy doby słonecznej i gwiazdowej.

co jest ponad dwukrotnie większą wartością od pierwszej. Wynika stąd, że Słońce przyciąga Księżyc z większą siłą niż Ziemia, a mimo to Księżyc bezpośrednio „towarzyszy” nie Słońcu, lecz Ziemi! Wynika stąd kolejny wniosek, że orbita Księżyca jest w całości krzywą wypukłą, choć intuicja podpowiada zupełnie coś innego.

Znając wartość przyspieszenia dośrodkowego Księżyca, można sprawdzić słuszność prawa grawitacji I. Newtona. Jeżeli bowiem siła grawitacji maleje z kwadratem odległości, to tak samo musi maleć przyspieszenie grawitacyjne wywołane tą siłą, czyli przyspieszenie dośrodkowe Księżyca.<sup>11</sup> Jeżeli zatem odległość do Księżyca równa jest 60 promieniom Ziemi, to przyspieszenie dośrodkowe Księżyca powinno być  $60^2$  razy mniejsze od przyspieszenia grawitacyjnego na powierzchni Ziemi. Dzieląc zatem 9,81 przez 3600 otrzymamy liczbę 0,0027, co jest w pełni zgodne z rzeczywistą wartością tego przyspieszenia.<sup>12</sup>

Księżyc dostarcza też tematyki do wielu zadań opisowych. Zapytajmy, jak będą przebiegać na Księżycu znane z Ziemi takie zjawiska astronomiczne jak zaćmienie Słońca czy Ziemi? Jak będzie widoczna Ziemia i czy będzie się przemieszczać na nieboskłonie? (Pamiętajmy, że Księżyc zwrócony jest do Ziemi ciągle tą samą stroną.)<sup>13</sup> Czy będą występować fazy Ziemi podobnie jak fazy Księżyca? Jaka będzie jasność Ziemi na zupełnie czarnym księżycowym niebie w porównaniu z jasnością Księżyca na ziemskim niebie? Jaka jest długość dnia i nocy na Księżycu itp. Dochodzenie do odpowiedzi na te pytania będzie dla uczniów dobrym ćwiczeniem wyobraźni i wprawką w opisie zjawisk zachodzących w różnych układach odniesienia.

### Grawitacja i loty kosmiczne

Szczególnie bogaty w treści astronomiczne jest dział „Grawitacja”.

Analizując superpozycję pól grawitacyjnych Ziemi i Księżyca,<sup>14</sup> można pokazać, że najkorzystniejszą trajektorią podróży z Ziemi na Księżyc w układzie związanym z Ziemią i Księżycem jest ósemka przecinająca się w punkcie, dla którego  $r_Z/r_K = 9$ . W punkcie tym wypadkowe natężenie pola grawitacyjnego jest równe zero, a potencjał ma najniższą wartość. Ten punkt jest jakby „przełączną” w przestrzennym rozkładzie potencjału. Trajektoria ta jest więc energetycznie najkorzystniejsza.

Dla tego punktu spełniona jest równość:

$$GM_Z/r_Z^2 = GM_K/r_K^2.$$

Ponieważ  $M_Z = 81M_K$ , więc:  $r_Z^2/r_K^2 = 81$ . Stąd  $r_Z/r_K = 9$

Można też powiedzieć, że ów punkt leży w odległości 1/10 odległości Księżyca od Ziemi – licząc od strony Księżyca.

Gdy już jesteśmy przy lotach kosmicznych, to warto obliczyć wartość tak zwanej *I prędkości kosmicznej*.



Z definicji jest to teoretyczna szybkość satelity tuż nad powierzchnią Ziemi. Można ją obliczyć ze wzoru:  $v_1 = (GM_Z/R_T)^{1/2}$  lub lepiej  $v_1 = (\gamma_T R_T)^{1/2}$ , bo  $G$  i  $M_Z$  są wyznaczone z niewielką dokładnością i są liczbami mało wygodnymi w obliczeniach. Natomiast wartość *natężenia pola grawitacyjnego* ( $\gamma$ ) można obliczyć z dużą dokładnością, znając wartość przyspieszenia ziemskiego ( $g$ ) oraz przyspieszenia dośrodkowego ( $a_d$ ) – np. na równiku. Wówczas  $\gamma_T = g - a_d$ . Dodam, że na równiku  $g = 9,78 \text{ m/s}^2$ , zaś  $a_d = 0,0238 \text{ m/s}^2$ . Wartość tę łatwo obliczyć, znając okres obrotu Ziemi oraz jej promień równikowy równy 6378160 m. Uzyskana wartość prędkości została obliczona tak, jakby Ziemia się nie obracała. W rzeczywistych przypadkach prędkość satelitów zależy od wysokości, na jakiej krążą, przy czym najkorzystniej jest wyrzucać satelitę w kierunku ruchu Ziemi, czyli ku wschodowi. Nadajemy mu wówczas mniejszą szybkość względem powierzchni Ziemi niż w przypadku wystrzelenia w innym kierunku. I tak np. wystrzelenie w kierunku zachodnim wymagałoby szybkości o ok. 1 km/s większej niż w kierunku wschodnim.

Zauważmy, że wzór  $v = (\gamma * r)^{1/2}$  określa wartość prędkości satelity poruszającego się po orbicie kołowej o promieniu  $r$  w centralnym i odosobnionym polu grawitacyjnym o natężeniu  $\gamma$ . Jeżeli więc w odległości  $r$  od środka planety umieścimy satelitę i nadamy mu prędkość  $v$  o kierunku prostopadłym do wektora  $\gamma$  i wartości określonej powyższym wzorem, to satelita ten poruczał się będzie po orbicie kołowej. A co będzie, gdy nadamy mu prędkość o tym samym kierunku, ale o innej wartości?

- A. Jeżeli  $v = 0$ , to otrzymamy swobodny spadek.
- B. Jeżeli  $v = (\gamma * r)^{1/2}$ , to satelita poruszał się będzie po orbicie kołowej o promieniu  $r$ .

<sup>11</sup> Zob. II zasada dynamiki Newtona.

<sup>12</sup> Jest to tzw. *rachunek księżycowy* Newtona. Rachunkiem tym Niuton potwierdził słuszność odkrytego prawa. Z jego opublikowaniem w dziele „*Philosophiae naturalis principia mathematica*” (wyd. 1687) czekał jednak 20 lat, bo wcześniej nie była znana dostatecznie dokładna odległość Księżyca od Ziemi.

<sup>13</sup> Pomijam tu niewielkie zmiany tego ustawienia zwane *libracją*

<sup>14</sup> W klasach realizujących rozszerzony program fizyki.

- C. Jeżeli  $v < (\gamma(r))^{1/2}$ , to satelita poruszał się będzie po elipsie wewnętrznej – wewnątrz orbity kołowej.
- D. Jeżeli  $(\gamma * r)^{1/2} < v < (2\gamma * r)^{1/2}$ , to poruszał się będzie po elipsie zewnętrznej, gdzie wartość prędkości określona wzorem  $(2\gamma * r)^{1/2}$  jest równa wartości II prędkości kosmicznej.
- E. Jeżeli  $v = (2\gamma * r)^{1/2}$ , to satelita – już jako statek kosmiczny – poruszał się będzie po paraboli.
- F. Jeżeli  $v > (2\gamma * r)^{1/2}$ , to statek kosmiczny poruszał się będzie po hiperboli.

Zauważmy, że wszystkie te tory są tak zwanymi *krzywymi stożkowymi*, czyli zbiorami punktów wspólnymi dla powierzchni stożka i płaszczyzny tnącej ten stożek.

Wartość II prędkości kosmicznej obliczamy z warunku:  $E_k = |E_p|$ , czyli  $\frac{1}{2}mv^2 = m*\gamma*r$ , gdzie  $\gamma = GM/r^2$ .

### Ruch obrotowy Ziemi

A oto inny problem związany z ruchem obrotowym Ziemi. Na lekcjach geografii uczniowie dowiadują się, że szerokością geograficzną danego punktu na powierzchni Ziemi jest kąt pomiędzy promieniem Ziemi w tym punkcie a płaszczyzną równika. Otóż ruch Ziemi sprawia, że kierunek działania siły ciężkości (pion) poza równikiem i biegunami nie przechodzi przez środek Ziemi i odchyła się od promienia Ziemi ku równikowi. Wynika to stąd, że siła ciężkości jest wypadkową siły grawitacji i siły odśrodkowej bezwładności (Ziemia jest układem nieinercyjnym). Kąt ten nie jest duży. W pobliżu  $45^\circ$  szer. geogr. ma on wartość ok.  $0,1^\circ$ . Niestety, kąt ten nie jest bezpośrednio mierzalny<sup>15</sup>. Dlatego też szerokością geograficzną nazywamy kąt pomiędzy osią sfery a płaszczyzną poziomą w miejscu obserwacji. Przy czym płaszczyzna pozioma jest to płaszczyzna prostopadła do pionu, czyli kierunku działania siły ciężkości. Ktoś może powiedzieć, że  $0,1^\circ$  to niewiele, ale zmiana położenia na mapie o  $0,1^\circ$  oznacza przesunięcie danej miejscowości na mapie o ok. 10 km, gdy np. GPS określa nasze położenie z dokładnością mniejszą niż 10 m.

W zbiorach zadań spotyka się zadanie o *satelitach stacjonarnych*. Przy obliczeniach parametrów ich ruchu należy uwzględnić fakt, że okres ich obiegu ma być równy  $23^h56^m$ , a nie 24 godziny. Zadanie to wykonujemy z użyciem wektora  $\gamma$ , którego wartość uzyskamy z proporcji  $\gamma_r/\gamma = r^2/R_r^2$ . Zapytajmy też, dlaczego satelita stacjonarny wystrzelony np. z przylądka Canaveral na Florydzie nie będzie „nieruchomy” na sferze, lecz będzie zakreślał zwężoną ósemkę o pionowej<sup>16</sup> osi? Podpowiem, że kątowna wysokość ósemki to podwojona szer. geogr. punktu startu rakiety, a jej szerokość zależy od eliptyczności orbity satelity. Podobną ósemkę zakreśli na sferze Słońce, jeżeli fotografować go będziemy przez cały rok dokładnie o tej samej godzinie tego samego czasu – np. o  $12^{00}$ . Ósemkę tę nazywamy *analemą*.



Podobną ósemkę zakreśla w ciągu roku wierzchołek cienia pręta zegara słonecznego fotografowany zawsze o  $12^{00}$ . Związane jest to m.in. z eliptycznością orbity Ziemi, a więc i zmianą wartości prędkości ruchu Ziemi na orbicie – najmniejszą w *aphelium* (ok. 4 lipca), a największą w *perihelium* (ok. 4 stycznia). Wynika stąd i to, że zegar słoneczny, albo spóźnia się, albo się spieszy,<sup>17</sup> a różnice dochodzą do 15 minut. Eliptyczność orbity Ziemi unaocznia się też choćby w długości pór roku. I tak półrocze wiosenno-letnie trwa na półkuli północnej o 7 (lub 6 dni) dłużej niż jesienno-zimowe.

Tu warto wyprowadzić II i III prawo Keplera. II prawo wyprowadzamy z fundamentalnej zasady zachowania momentu pędu. Dla dwóch różnych chwil ruchu danej planety mamy:

$$m*v_1*r_1 = m*v_2*r_2$$

Eliminując masę i przyjmując, że dla małych

$$\Delta t, v = \Delta s/\Delta t,$$

otrzymamy:  $\Delta s_1*r_1/\Delta t_1 = \Delta s_2*r_2/\Delta t_2$

Dzieląc obustronnie przez 2, otrzymamy:

$$\Delta s_1*r_1/2\Delta t_1 = \Delta s_2*r_2/2\Delta t_2$$

Wyrażenie  $\frac{1}{2} \Delta s_1 r_1$  jest polem zakreślonym przez wektor wodzący planety w czasie  $\Delta t$ , zaś  $\Delta s_1 r_1/2\Delta t_1$  jest *szybkością połową* planety.

Można więc powiedzieć, że *szybkość połowa* ruchu planety ma stałą wartość lub że „pola zakreślone przez promień wodzący planety w równych czasach są równe”, co jest najczęściej cytowaną treścią II prawa Keplera.

III prawo Keplera najprościej wyprowadzić, pisząc dwa równania sił<sup>18</sup> dla dwóch planet:

$$F_{\text{grav.}} = F_{\text{dośr.}}$$

$$GM_S*m_1/r_1^2 = 4\pi^2 r_1 * m_1/T_1^2$$

oraz  $GM_S*m_2/r_2^2 = 4\pi^2 r_2 * m_2/T_2^2$

<sup>15</sup> Znalazłem w literaturze nieco inne wartości tego kąta, ale obliczenia potwierdzają podaną tu wartość.

<sup>16</sup> Dla satelity znajdującego się nad naszym południkiem.

<sup>17</sup> Zob. tzw. „równanie czasu”.

<sup>18</sup> Wykorzystujemy tu fakt, że siła grawitacyjna jest siłą dośrodkową. **Uwaga!** Nie należy mówić, że siła grawitacyjna równa jest sile dośrodkowej, bo nie są to **dwie** siły, lecz **jedna** – wyrażona różnymi wzorami!

Dzieląc stronami, otrzymamy:<sup>19</sup>  $T_1^2 / T_2^2 = r_1^3 / r_2^3$

Proponuję, by uczniowie sprawdzili słuszność tego prawa dla Układu Słonecznego, korzystając z odpowiednich tablic zawierających średnie odległości planet od Słońca oraz ich okresy obiegu.

W dziale „gravitacja” należy koniecznie obliczyć masę Ziemi i Słońca. Zauważmy, że stało się to możliwe dopiero po doświadczalnym wyznaczeniu *stałej grawitacji*,<sup>20</sup> przy czym obliczenie masy ciała centralnego jest możliwe, gdy dane ciało ma satelitę. Natomiast obliczenie np. masy Księżyca jest dużo trudniejsze.

W dziale „termodynamika” warto zapytać – jakie warunki muszą być spełnione, aby planeta mogła utrzymać swą atmosferę. Jednym z nich jest to, by średnia wartość prędkości cząsteczek gazów na peryferiach atmosfery była mniejsza od wartości II prędkości kosmicznej. Przy czym średnia wartość prędkości cząsteczek gazu zależy od temperatury zgodnie ze wzorem  $E_{k\text{śr}} = \frac{3}{2} kT$ .

Z warunku:  $\frac{3}{2} kT \ll m \cdot \gamma \cdot r$ , otrzymamy:  $T \ll 2\gamma \cdot r \cdot m / 3k$ ,

gdzie:  $\gamma$  – natężenie pola grawitacyjnego w danym punkcie atmosfery,

$r$  – odległość danego punktu atmosfery od środka planety,

$m$  – masa cząsteczki gazu,

$k$  – stała Boltzmanna.

Postawiłem warunek, by temperatura była znacznie mniejsza od  $2\gamma \cdot r \cdot m / 3k$ , bo – jak wiemy – wzór  $E_{k\text{śr}} = \frac{3}{2} kT$  dotyczy wartości średniej, a cząsteczki mogą mieć znacznie większą szybkość niż wynika to z tego wzoru. Warunek ten wyjaśnia również fakt, dlaczego reakcja syntezy wodorowej może zachodzić w niższej temperaturze niż wynikałoby to z równości średniej energii kinetycznej łączących się atomów wodoru i ich wzajemnej energii potencjalnej.<sup>21</sup>

### Zasada zachowania energii i momentu pędu

Aby poćwiczyć zastosowanie *zasady zachowania energii i momentu pędu*, warto wykonać zadanie o zmianie orbity satelity. Taką operację często wykonuje się na krążących wokół Ziemi satelitach. Załóżmy, że satelita krąży po orbicie kołowej o promieniu  $r_1$  i chcemy przenieść go na orbitę kołową o promieniu  $r_2 > r_1$ . Jak to zrobić?

W odpowiednim momencie zwiększamy jego prędkość do takiej wartości, by uzyskać orbitę eliptyczną zewnętrzną – styczną do orbity kołowej, po której ma się poruszać. Na pierwszej orbicie miał szybkość  $v_1 = (\gamma_1 \cdot r_1)^{1/2}$ . Na drugiej zaś powinien mieć szybkość  $v_2 = (\gamma_2 \cdot r_2)^{1/2}$  – taką, by  $m_1 \cdot v_1 \cdot r_1 = m_2 \cdot v_2 \cdot r_2$ . Gdy satelita osiągnie odległość  $r_2$ , należy ponownie włączyć silniki, aby satelita osiągnął szybkość  $v_2 = (\gamma_2 \cdot r_2)^{1/2}$ .

Zależność pomiędzy  $\gamma_1$  i  $\gamma_2$  określa proporcja:

$$\gamma_1 / \gamma_2 = r_2^2 / r_1^2.$$

<sup>19</sup> Jest to postać przybliżona, którą otrzymuje się przy założeniu, że masa ciała centralnego jest znacznie większa od masy satelity. Np. Słońce ma masę 333000 razy większą od masy Ziemi równej  $5,975 \cdot 10^{24}$  kg, czyli około 6 kwadrylionów kilogramów.

<sup>20</sup> Pierwszych pomiarów tej stałej dokonał Henry Cavendish (1731-1810).

<sup>21</sup> W przypadku Słońca czynnikiem sprzyjającym reakcji jest ciśnienie.

<sup>22</sup> Analizę tę oraz następne można wykonać w klasach realizujących rozszerzony program fizyki.

<sup>23</sup> Stąd błękitna barwa centralnej części mgławicy Krab i różowa – jej części peryferyjnych.

Energia potrzebna do zmiany orbity satelity o masie  $m$  równa jest różnicy energii całkowitej tego satelity na II i I orbicie.

Jak wiemy  $E_c = E_p + E_k = -m \cdot \gamma \cdot r + \frac{1}{2} m \cdot v^2$ .

Ponieważ energia kinetyczna satelity na danej orbicie kołowej równa jest połowie bezwzględnej wartości energii potencjalnej, zatem  $E_c = -\frac{1}{2} m \gamma r$ .

Natomiast  $\Delta E = E_2 - E_1 = -\frac{1}{2} m \cdot \gamma_2 \cdot r_2 - (-\frac{1}{2} m \cdot \gamma_1 \cdot r_1) = -\frac{1}{2} m (\gamma_2 \cdot r_2 - \gamma_1 \cdot r_1)$ .

Ponieważ  $E_2 > E_1$ , zatem  $\Delta E > 0$ .

Napisałem wyżej, że energia kinetyczna satelity na danej orbicie kołowej równa jest połowie bezwzględnej wartości energii potencjalnej. Łatwo to pokazać w sposób następujący:

Równanie  $GM \cdot m / r^2 = m \cdot v^2 / r$  obustronnie mnożymy przez  $r$  i  $\frac{1}{2}$ .

Otrzymamy wówczas:  $\frac{1}{2} GMm / r = \frac{1}{2} m v^2$ .

Po lewej stronie mamy bezwzględną wartość energii potencjalnej ciała w polu grawitacyjnym, a po prawej jego energię kinetyczną.<sup>22</sup> Zatem  $\frac{1}{2} |E_p| = E_k$ , c.n.d.

W termodynamice możemy jeszcze wspomnieć o adiabaticznym obniżaniu się temperatury mgławic planetarnych powstałych po wybuchu supernowych<sup>23</sup> i wzroście temperatury kondensujących się fragmentów obłoków pyłowo-gazowych, wewnątrz których mogą narodzić się nowe gwiazdy. W procesie tym część energii potencjalnej obłoku zamienia się na energię wewnętrzną, a ta – jeśli nie zostanie wypromieniowana – powoduje wzrost temperatury kondensującej się materii. Wzrost ten może być tak duży, że w centrum osiągnie ona wartość umożliwiającą zapoczątkowanie syntezy jądrowej. Moment ten jest faktycznym momentem narodzin gwiazdy.

Taka gwiazda szybko oczyszcza przestrzeń wokół siebie. Proces ten jest skutkiem *ciśnienia fotonów*. I tu mamy następny problem do rozważań. W procesie tym fotony zachowują się jak cząstki o pędzie  $p = E/c$ , gdzie  $E$  jest energią fotonu, a  $c$  – szybkością światła. Fotony te są zwykle pochłaniane przez cząsteczki gazu i pyłu. W efekcie powstaje ciśnienie o wartości  $\Delta p / S \cdot \Delta t$ . Przy pochłanianiu fotonu zmiana jego pędu równa jest pędowi fotonu, zatem ciśnienie to będzie równe  $E/c \cdot t \cdot S$ . Stosunek  $E/t \cdot S$  nazywamy *stałą słoneczną*. Podaje ona energię fotonów, które w ciągu 1s padają na  $1m^2$  powierzchni ustawionej prostopadle do promieniowania. Oznaczając ją jako  $C$ , otrzymamy wzór na ciśnienie pochłanianych fotonów:  $p = C/c$ . W przypadku całkowitego odbicia światła ciśnienie to jest dwukrotnie większe, gdyż pęd fotonu zmienia się o  $2E/c$ .

Ciśnienie to jest – między innymi – odpowiedzialne za spychanie gazu i pyłu warkocza komety w stronę przeciwną do Słońca. Nad powierzchnią atmosfery Ziemi stała  $C$  jest równa  $1388 J/m^2 \cdot s$ . Ciśnienie fotonów jest więc na powierzchni Ziemi znikomo małe i przy założeniu,



że są one w całości pochłaniane – wynosi  $1388/3 \cdot 10^8$  Pa czyli  $4,63 \cdot 10^{-6}$  Pa. Daje to parcie na całą oświetloną powierzchnię Ziemi o wartość  $6 \cdot 10^8$  N. Przyjmując, że część fotonów jest odbijana<sup>24</sup> przez chmury i oceany, można przyjąć, że jest to parcie rzędu  $10^9$  N.

Znając wartość energii fotonów jaka dociera do Ziemi, można obliczyć temperaturę fotosfery Słońca. W tym przypadku korzystamy z prawa Stefana-Boltzmannia  $\varepsilon = \sigma T^4$ , gdzie  $\varepsilon$  jest zdolnością emisyjną Słońca, czyli energią wypromieniowaną z  $1 \text{ m}^2$  „powierzchni” Słońca w ciągu 1s,  $\sigma$  jest stałą Stefana-Boltzmannia równą  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ J/m}^2\text{sK}^4$  zaś T jest temperaturą fotosfery w kelwinach.

Żeby obliczyć zdolność emisyjną Słońca, mnożymy stałą słoneczną przez powierzchnię sfery, po której porusza się Ziemia i dzielimy przez powierzchnię fotosfery Słońca. Zatem

$$\varepsilon = 4\pi r^2 C / 4\pi R_s^2 = Cr^2 / R_s^2 = \sigma T^4.$$

$$\text{Stąd } T = (Cr^2 / \sigma R_s^2)^{1/4} = 5760 \text{ K. } (R_s = 6,96 \cdot 10^8 \text{ m})$$

Prawo Stefana-Boltzmannia pozwala też na obliczenie temperatury powierzchni Księżyca oświetlonej prostopadle padającymi na nią promieniami Słońca. Przyjmując, że pochłania ona 93% energii słonecznej oraz, że promieniuje jak ciało doskonale czarne, otrzymujemy na tę temperaturę wzór:  $T = (0,93C/\sigma)^{1/4}$  i wartość 388 K czyli  $115^\circ\text{C}$ , co jest wartością zbliżoną do rzeczywistości.

Omawiając *magnetyzm ziemski*, można oszacować natężenie prądu elektrycznego, który – płynąc wzdłuż równika – mógłby wytworzyć ziemskie pole magnetyczne o wartości ok.  $0,3 \cdot 10^{-4} \text{ T}$  przy biegunach. Proste obliczenie daje wartość rzędu  $10^9 \text{ A}$ . Liczba to ogromna, ale zważywszy na ferromagnetyzm jądra i ogromną przestrzeń, wewnątrz której prąd ten mógłby płynąć, to jego ewentualna gęstość byłaby bardzo mała.

## Pole magnetyczne Ziemi

Inny problem, to oddziaływanie ziemskiego pola magnetycznego z cząstkami *wiatru słonecznego*. Jest to głównie strumień jonów wodoru i helu biegnący od Słońca ze średnią szybkością w pobliżu Ziemi ok. 300 km/s. Napotykając na pole magnetyczne Ziemi, ulega on odchyleniu zgodnie ze wzorem Lorentza  $\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ . Siła ta

powoduje, że jony dodatnie odchylają się ku wschodowi, a wykonując ruch okrężny, grzęzną w polu magnetycznym, tworząc pasy wzmożonej radiacji zwane *pasami Van Allena*. Cząstki te mogą służyć po spiralnych torach ku biegunom, wywołując wspaniałe zjawisko zorzy polarnej.

Przejdźmy do gwiazd. Głównym źródłem informacji o tych ciałach niebieskich jest światło, które od nich dociera do nas. Jeżeli uważnie przyjrzymy się barwie gwiazd, to zauważymy, że np. najjaśniejsza gwiazda Oriona – Betelgeuze – jest bardziej czerwona niż pozostałe gwiazdy tego gwiazdozbioru. Nasuwa się przypuszczenie, że jej fotosfera ma niższą temperaturę niż inne gwiazdy. Rzeczywiście, jest to tak zwany *czerwony olbrzym*. A jak zmierzyć temperaturę gwiazdy? Nie można posłużyć się wzorem Stefana-Boltzmannia. Tu w sukurs przychodzi wzór Wiena, zgodnie z którym długość fali światła, w zakresie której jego źródło wysyła maksymalną ilość energii, jest odwrotnie proporcjonalna do temperatury powierzchniowej ciała, czyli  $\lambda_{\text{max}} = C/T$ , gdzie C jest to stała Wiena równa  $2998 \mu\text{mK}$ . Otrzymując widmo gwiazdy i używając odpowiednio czulej fotokomórki, można ustalić, który fragment widma jest najjaśniejszy i w ten sposób ustalić  $\lambda_{\text{max}}$ .

Inny sposób polega na badaniu linii widmowych, których istnienie zależy nie tylko od składu chemicznego gwiazdy, ale i stopnia jonizacji atomów. Znając energię jonizacji poszczególnych pierwiastków, można ustalić temperaturę powierzchniową gwiazdy.

Omawiając widma, warto pokazać *widmo Fraunhofera* Słońca. Wystarczy typowy spektroskop szkolny. Pamiętać należy, by szczelina kolimatora była maksymalnie wąska, aby nie porazić oczu ucznia. Trzeba też nastawić odpowiednio ostrość lunetki, by zobaczyć linie pochłaniania w postaci podobnej do nitki pajęczej.<sup>25</sup> Łatwo wówczas odszukać charakterystyczne linie wodoru.

Światło gwiazdy niesie też informację o tym, czy gwiazda zbliża się do nas czy też oddala. Poznajemy to po przesunięciu linii widmowych spowodowanego efektem Dopplera: jeżeli linie widmowe przesunięte są ku czerwieni, to gwiazda się oddala, a jeśli ku fioletowi, to się zbliża, przy czym wielkość przesunięcia jest proporcjonalna do szybkości gwiazdy. Ten sam efekt dostarcza informacji o tym, czy gwiazda rotuje i jak szybko. Poznajemy to po rozmyciu linii, bo jedna strona gwiazdy zbliża się do nas, a druga – oddala. Wielkość rozmycia związana jest z prędkością punktów na powierzchni gwiazdy. Dodam, że gwiazdy szybko rotujące nie mają układów planetarnych, które przejmują większość momentu pędu całego układu. Stąd też Słońce należy do gwiazd wolno rotujących ( $T \approx 26$  dni).

Efekt Dopplera dostarcza też wielu informacji w przypadku, gdy gwiazda stanowi układ spektralnie podwójny. Wówczas linie widmowe gwiazdy pochodzą od dwóch obiektów i ulegają okresowym przesunięciom. Okres ten to okres obiegu jednej gwiazdy względem drugiej. Okres

<sup>24</sup> Stosunek energii odbitej do padającej nazywamy *albedem* planety. Dla Ziemi albedo ma wartość 0,34, a dla Księżyca ok. 0,07. Dla ciała doskonale czarnego jest ono zerowe, a dla idealnie odbijającego = 1.

<sup>25</sup> Uwaga! Nie wolno patrzeć na Słońce przez lunetkę. Linie te widzimy również w świetle rozproszonym.



obiegu i prędkość liniowa pozwalają na obliczenie odległości pomiędzy gwiazdami a także ich mas.

Jak wiemy, poruszają się nie tylko gwiazdy, ale i galaktyki. Ich „ucieczka” od nas świadczy o rozszerzaniu się Wszechświata. Stwierdzono, że szybkość ucieczki jest proporcjonalna do odległości Galaktyki od nas zgodnie ze wzorem  $v = Hr$ , gdzie  $H$  jest stałą Hubble’a równą 70 km/s na Mps lub  $2,2 \cdot 10^{-18}$  1/s. Łatwo zauważyć, że jeżeli Wszechświat rozszerzał się jednostajnie, to można obliczyć czas rozszerzania:

$$t = r/v = r/Hr = 1/H = 0,4545 \cdot 10^{18} \text{ s} = (0,4545 \cdot 10^{18} / 365,25 \cdot 86400) \text{ lat} \approx 14,4 \text{ mld lat.}^{26}$$

Taki jest więc w przybliżeniu wiek naszego Wszechświata.

Szczególnie ciekawym przypadkiem są gwiazdy neutronowe powstałe z jądra eksplodującej gwiazdy, zwane *pulsarami*. Jądro takie zostaje ściśnięte tak bardzo, że elektrony łączą się z protonami, tworząc jedno wielkie jądro atomowe. Zasada zachowania momentu pędu sprawia, że gwałtownie rośnie ich prędkość kątowa – tak, że okres obiegu maleje nawet do setnej części sekundy. Gwiazda ta wysyła zmienne (pulsujące) pole elektromagnetyczne, które odbierane jest przez radioteleskopy. Stąd też ich nazwa – *pulsary*.

Niewątpliwie najciekawszym zajęciem jest obserwacja nieba przez lunetę lub niewielki teleskop. Już 60-krotne powiększenie pozwala obserwować księżyc Jowisza, pierścień Saturna, fazy Wenus czy kraterzy na Księżycu. Warto spojrzeć na Plejady zanurzone w chmurach pyłowo-gazowych, z których na naszych oczach tworzą się nowe gwiazdy. Można też oglądać najbliższą nam galaktykę w Andromedzie i wiele, wiele ciekawych obiektów i zjawisk. Zachęcam do śledzenia zmian położenia Księżycy na niebie i jego wyglądu. Ciekawe jest też śledzenie przemieszczania się planet. Łatwo je odróżnić od gwiazd, bo są zwykle od nich jaśniejsze i nie „mrużają”. Można też obserwować zachody Słońca i patrzeć, jak codziennie zachodzi ono za inny element horyzontu. Zachęcam również do zbudowania zegara słonecznego i obserwowania *analemy*.

Kończąc, życzę ciekawych spostrzeżeń i wspaniałych wrażeń.

Waldemar Reńda  
Olkuś

<sup>26</sup> Z ostatnich pomiarów wynika, że wartości stałej Hubble’a jest większa i Wszechświat może być młodszy nawet o 1 mld lat.

Krzysztof Rochowicz

Uczeń z kolei, nie tylko w czasie formalnej szkolnej edukacji, ale żyjąc we współczesnym świecie i korzystając z jego narzędzi, konstruuje swą wiedzę i rozwija umiejętności kluczowe przede wszystkim w oparciu o własną aktywność i działania [2].

W tak rozumianym procesie nauczania/uczenia się fizyki bardzo przydatnym narzędziem okazuje się smartfon, przy czym jego wykorzystanie jako narzędzia w edukacji może zachodzić w kilku niezależnych obszarach: jest to bądź co bądź narzędzie komunikacji i również w tej roli bywa przydatne uczniom jako środek ułatwiający wymianę informacji w czasie omawiania wspólnych projektów czy prac domowych; bywa z powodzeniem wykorzystywany do wspólnego rozwiązywania testów, np. w trakcie lekcji powtórzeniowych (kahoot czy quizizz); ale przede wszystkim stwarza ogromny potencjał jako narzędzie pomiarowe dzięki wbudowanym licznym czujnikom.

Można nawet zaryzykować twierdzenie, że przeciętny smartfon posiada więcej czujników i przyrządów badawczych aniżeli niejedna szkoła. Składową takiego urządzenia może być np. magnetometr, termometr, żyroskop, czujnik dźwięku, akcelerometr, kątomierz, barometr, czasomierz, czujnik wilgotności, GPS, kompas, odległościomierz i czujnik światła. Dodatkowo smartfony mają duże możliwości związane z korzystaniem z Internetu i komunikacją oraz wykonywaniem zdjęć i nagrywaniem filmów.

W literaturze znajdziemy bardzo ciekawe pomysły wykorzystania smartfona do realizacji określonych zadań edukacyjnych ([3] i [4]). Są też dostępne dwie obszernie publikacje ORE – [5] i [6]. Ta druga w całości poświęcona jest aplikacji Phypox (fot.1) – jednej z najbardziej rozbudowanych w dziedzinie fizyki. Umożliwia ona dostęp do surowych danych rejestrowanych przez wbudowane w smartfon czujniki oraz pozwala korzystać ze specjalnie przygotowanych eksperymentów, w których dane te są analizowane i mogą być wyeksportowane do dalszej obróbki.

Można także przygotować własny eksperyment i podzielić się nim z innymi użytkownikami na platformie phypox.org. Co bardzo ważne, zarejestrowane w ćwiczeniach rezultaty pomiarów można zapisać oraz wyeksportować do dalszej obróbki np. w arkuszu kalkulacyjnym. Co równie istotne, w prosty sposób możemy powielić ekran smartfona na urządzeniu wyświetlającym (projektorze lub tablicy multimedialnej).

Jeśli interesuje cię, w jakie czujniki został „uzbrojony” twój smartfon, warto skorzystać z którejś z bezpłatnych aplikacji, np. Sensor Box albo Sensory i czujniki – dają one ogólny wgląd w dostępne narzędzia pomiarowe.

Warto porównać liczne dostępne aplikacje, które w różny sposób prezentują mierzone wyniki (np. z czujnikiem dźwięku współpracuje dość efektywny i wyraźnie demonstrujący zebrane wielkości Sound Meter), godną polecenia aplikacją (z szeregiem dodatkowych narzędzi, m.in. oscyloskopem, generatorem dźwięków i kolorów oraz polskim menu) jest m.in. Physics Toolbox. Na prowadzo-

# Smartfon jako pomoc w nauczaniu fizyki

Zgodnie z coraz powszechniej przyjmowanym poglądem na nauczanie, nie powinno ono odbywać się w sposób podawczy, „transmisyjny”, ale aktywny, gdzie nauczyciel koncentruje się na organizacji, wspomaganie i stymulowaniu procesów poznawczych, w mniejszym zakresie sprawując kontrolę [1].

nej przez twórców tej ostatniej aplikacji stronie internetowej (<https://www.vieyrasoftware.net/browse-lessons>) znaleźć można m.in. ponad 50 pomysłów na wykorzystanie smartfonowych czujników w nauczaniu przedmiotów przyrodniczych.

Chciałbym zwrócić jeszcze uwagę na pomysły, rekomendowane przez grono europejskich nauczycieli i edukatorów do użytku szkolnego – wartościowym źródłem jest tu dostępne on-line czasopismo „Science in School”, gdzie w ostatnich latach systematycznie pojawiają się nowe opracowania, np. „Pomiary nieba z użyciem smartfona” czy „Smartfony w laboratorium: jak głęboki jest Twój odcień niebieskiego?” (odkrywanie barwnej chemii przy użyciu smartfonów). Co istotne, większość z nich jest już dostępna w polskich tłumaczeniach.

Warto też sięgnąć do szerszego opracowania „Smartphones in Science Teaching – iStage2”, przygotowanego pod kierunkiem niemieckich partnerów projektu Science on Stage [7]. To przeszło 70-stronicowe wydawnictwo, uzupełnione listą około 50 w znakomitej większości darmowych aplikacji na system Android, zawiera ciekawe pomysły przeprowadzenia prac badawczych przez uczniów. Mogą oni nie tylko wykonać klasyczne badanie poziomu hałasu w szkole i w terenie, ale np. w bardziej „twórczej” wersji zająć się problemem słyszalności śpiewu wróbla domowego w środowisku miejskim. Z kolei aplikacja Sound Spectrum Analyzer umożliwi wykorzystanie w praktyce zjawiska Dopplera i opisującego go wzoru do wyznaczenia prędkości poruszającego się samochodu.

Sporo miejsca w opracowaniach dotyczących wykorzystania smartfonów i ogólnie TIK zajmuje bezpłatny program Tracker (w wyszukiwarce z uzupełnieniem Video



Analysis and Modeling Tool for Physics Education). Jego elementarne zastosowania omawia m.in. krótki poradnik video Grzegorza Wojewody (youtube: Analiza plików video – program Tracker), natomiast dalsze pomysły podaje zarówno wspomniane wyżej opracowanie, jak i jego pierwsza część, przetłumaczona zresztą na język polski [8]. Korzystając z programu Tracker, możemy w sposób ilościowy analizować różnego rodzaju ruchy i zjawiska zarejestrowane również kamerką smartfona.

Pomimo możliwych w tego typu sytuacjach dyskusji i kontrowersji co do korzystania ze smartfonów, gorąco polecamy wypróbowanie i tej formy urozmaicenia lekcji /kształtowania kompetencji/ budowania trwałej wiedzy. Zainteresowanie ze strony uczniów gwarantowane!

**Krzysztof Rochowicz**  
Zakład Dydaktyki Fizyki UMK w Toruniu



Fot. 1. Strona internetowa aplikacji Phyphox, <https://phyphox.org/>

## LITERATURA

- [1] J. Kruk, G. Karwasz, „Jak współcześnie stosować zasadę pogłębienia – dwugłos interdyscyplinarny”, Współczesne odniesienia edukacyjne do pedagogiki Kazimierza Sośnickiego, wyd. A. Marszałek, 2009, w internecie pod adresem [http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Publikacje\\_2009/25.pdf](http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Publikacje_2009/25.pdf)
- [2] Karwasz, G.: „Hyper-konstruktywizm jako odpowiedź na hyper-inflację informacji: trzy implementacje w fizyce”, Edukacja medialna w świecie ponowoczesnym, 2012, 365-386, w internecie pod adresem [http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Publikacje\\_2012/hyper.pdf](http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Publikacje_2012/hyper.pdf)
- [3] Szlagor P.: „Potencjał smartfonów i tabletów w nauczaniu przedmiotowym”, Mazowiecki Kwartalnik Edukacyjny Meritum 4(31) 2013, pod adresem <http://meritum.edu.pl/artikuly/downloadart?id=701>
- [4] Preus R.: „Mobilny świat. Laboratorium smartfona”, Kujawsko-Pomorski Przegląd Oświatowy „UczMy” V-VI 2017, pod adresem [https://www.cen.bydgoszcz.pl/images/Aktualnosci/Rok\\_2018-2019/pa%BCdziennik\\_2018/artikuly%BC%82y/Robert\\_Preus\\_Mobilny\\_%BC%9Bwiat.pdf](https://www.cen.bydgoszcz.pl/images/Aktualnosci/Rok_2018-2019/pa%BCdziennik_2018/artikuly%BC%82y/Robert_Preus_Mobilny_%BC%9Bwiat.pdf)
- [5] Hojnacki L. i inni: „Mobilna edukacja. (R)ewolucja w nauczaniu – poradnik dla edukatorów” 2013, pod adresem <http://www.bc.ore.edu.pl/dlibra/docmetadatar?id=718>
- [6] Greczyło, T.: „Wykorzystanie technologii informacyjno-komunikacyjnych w edukacji fizycznej”, w internecie: <https://www.ore.edu.pl/wp-content/plugins/download-attachments/includes/download.php?id=15644>
- [7] Praca zbiorowa Andrzej M. i inni: „Smartphones in Science Teaching – iStage2” Berlin 2014, w internecie [https://www.science-on-stage.de/download\\_unterrichtsmaterial/IStage\\_2\\_Smartphones\\_in\\_Science\\_Teaching.pdf](https://www.science-on-stage.de/download_unterrichtsmaterial/IStage_2_Smartphones_in_Science_Teaching.pdf)
- [8] Praca zbiorowa „Teaching Science in Europe 4 – iStage – Materiały dydaktyczne wykorzystujące TIK w nauczaniu przedmiotów ścisłych”, [https://www.science-on-stage.de/download\\_unterrichtsmaterial/IStage-Materialy-dydaktyczne-wykorzystujace.pdf](https://www.science-on-stage.de/download_unterrichtsmaterial/IStage-Materialy-dydaktyczne-wykorzystujace.pdf)



## Wysokie napięcie: Źródła i niezwykle efekty z nim związane

Andrzej Kuczkowski

Energia potencjalna ładunku w danym punkcie pola elektrycznego jest równa pracy możliwej do wykonanej przez siłę kulombowską przy przesunięciu tego ładunku z danego punktu pola do nieskończoności.

$$E_p(r) = W_{p\infty}$$

Każdemu punktowi pola elektrycznego można przyporządkować potencjał elektryczny (wielkość skalarną) zdefiniowaną wzorem:

$$V(r) = \frac{E_p}{q_0} = \frac{W_{p\infty}}{q_0}$$

Potencjał elektryczny mierzymy w jednostkach zwanych voltami:  $V=J/C$ .

Ładunek  $q_0$  jest z definicji ładunkiem dodatnim, dlatego potencjał od ładunku dodatniego ma wartość dodatnią, natomiast od ładunku ujemnego wartość ujemną.

Praca  $W_{A,B}$  wykonana przez siły elektryczne przy przemieszczeniu ładunku  $q_0$  z punktu A do B pola elektrycznego równa się różnicy energii potencjalnej tych punktów:

$$W_{A,B} = E_{pA} - E_{pB} = q_0 (V_A - V_B) = q_0 U_{A,B}$$

Różnicę potencjałów między punktami A i B nazywamy napięciem elektrycznym między tymi punktami. Potencjał elektryczny od układu ładunków  $q_1, q_2, \dots, q_n$  równa się sumie algebraicznej potencjałów od poszczególnych ładunków:

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$



Foto 1. Zwarcie linii wysokiego napięcia  
[https://erawa.pl/wp-content/uploads/cache/2012/12/782727\\_22344409/3331477985.jpg](https://erawa.pl/wp-content/uploads/cache/2012/12/782727_22344409/3331477985.jpg)

Według przyjętej w elektrotechnice konwencji, wysokim napięciem w obwodach prądu przemiennego, nazywa się napięcie większe od 1000 V i płynące przy częstotliwości nie większej od 60 Hz. Wysokie napięcia są stosowane przy przesyłach energii elektrycznej na znaczne odległości. Zwiększają bowiem one, efektywność przesyłu energii. Straty mocy w przewodach doprowadzających są proporcjonalne do kwadratu natężenia prądu płynącego w przewodach, a przesyłana moc jest proporcjonalna do natężenia prądu w pierwszej potęgde.

Wartości napięć znamionowych w liniach przesyłowych I kategorii wynoszą 220 kV i więcej, w liniach przesyłowych II kategorii 1 kV i więcej, natomiast w liniach przesyłowych III kategorii o napięciach 1 kV i niższych.

Aby przesyłać energię elektryczną o tych wartościach napięcie, prąd trzeba transformować zarówno na wejściu jak i na wyjściu linii przesyłowej.

### Elektryczność statyczna

Dwa różne materiały zetknięte są ze sobą to elektryzują się: jeden dodatnio, drugi ujemnie. Jest to elektryzowanie przez zetknięcie, zwane również elektryzowaniem przez tarcie, chociaż tarcie nie jest tu istotne. Zwiększa ono, bowiem tylko powierzchnie zetknięcia ciał. W sposób doświadczalny ustalono, że w zdecydowanej większości przypadków, ciało o większej stałej dielektrycznej, elektryzuje się dodatnio, a ciało o mniejszej stałej dielektrycznej elektryzuje się ujemnie. Jednocześnie stopień wzajemnego naelektryzowania będzie wprost proporcjonalny do różnicy ich stałych dielektrycznych.

Kontaktowe elektryzowanie się dwóch metali, dwóch półprzewodników, metalu i półprzewodnika wywołane jest przechodzeniem elektronów przez granicę rozdziału od ciała z mniejszą pracą wyjścia do ciała z większą pracą wyjścia. W przypadku zetknięcia metalu z dielektrykiem elektryzowanie się wywołane jest przechodzeniem elektronów z metalu do dielektryka i jonów dodatnich lub ujemnych z dielektryka do powierzchni metalu. W przypadku kontaktu dwóch dielektryków elektryzowanie się jest wynikiem dyfuzji nośników prądu z jednej substancji do drugiej. Z elektrycznością statyczną i wytworzonymi często wysokimi napięciami związane są następujące zagrożenia elektrostatyczne:[1]

- l możliwość wystąpienia rażenia elektrostatycznego, czyli wyładowania elektrostatycznego bezpośrednio przez ciało człowieka,
- l możliwość spowodowania zapłonu mediów palnych i wybuchowych, i w konsekwencji spowodowanie pożaru lub wybuchu;
- l możliwość uszkodzenia lub zakłócenia pracy elektronicznych urządzeń półprzewodnikowych, wchodzących w skład aparatury kontrolno-pomiarowej nadzorującej bezpieczny przebieg procesów technologicznych, lub aparatury medycznej diagnostycznej, lub podtrzymującej procesy życiowe.

Gdy dwa przedmioty o różnych potencjałach elektrostatycznych znajdują się w pobliżu, wytwarza się między nimi pole elektryczne. Gdy jego wartość przekracza wartość przebiciową atmosfery, pomiędzy tymi ciałami może dojść do wyładowania iskrowego. Energię potencjalną elektrostatycznego wyładowania iskrowego  $W$  wyrażoną w mJ można obliczyć znając pojemność przedmiotu  $C$  wyrażoną w pF, na którym gromadzą się ładunki, oraz potencjał przedmiotu wywołany gromadzeniem się ładunków  $V$  wyrażony w kV korzystając z wzoru:

$$W = \frac{1}{2} C V^2$$

Tak np. człowiek o pojemności 200 pF w wyniku elektryzacji może naładować się do potencjału rzędu 30 kV. W związku z tym istnieje możliwość wyładowania elektrostatycznego, którego energia osiągnie wartość 90 mJ. W następstwie wyładowania elektrostatycznego może nastąpić zapłon atmosfery wybuchowej [2].

Minimalna wartość energii wyładowania elektrostatycznego dla atmosfery wybuchowej zawierającej pył

mąki pszennej wynosi 50 mJ, a dla oparów benzyny już tylko 0,15 mJ.

Naładowanie elektrostatyczne przedmiotów rośnie, gdy wzrasta oporność ścieżki od danego przedmiotu do ziemi. Tak np. buty na podeszwie skórzanej lepiej odprowadzają ładunek niż na podeszwie kauczukowej. Również odzież bawełniana jest mniej rezystywna od odzieży z wełny lub z tworzyw sztucznych. Poruszając się po wykładzinach z tworzyw syntetycznych, zwłaszcza, gdy powietrze w pomieszczeniu jest suche, często doznajemy przykrego wstrząsu związanego z wyładowaniem elektrostatycznym, które osiąga wartość dziesiątków tysięcy woltów. W codziennej domowej rzeczywistości wyładowania elektrostatyczne nie są na ogół niebezpieczne, gdyż moce ich są niewielkie, niemniej jednak są przykre.

Przed wielu laty słyszałem o pewnym zakładzie pracy, w którym zakupione nowe krzesła łądowały się elektrostatycznie tak silnie, że między siedzeniem pracownika a stołkiem następował przeskok kilkucentymetrowej iskry.

### Elektrostatyczne źródła wysokiego napięcia

#### 1. Maszyna elektrostatyczna Wimhursta

Maszyna elektrostatyczna Wimshursta jest przykładem prostego generatora elektrostatycznego, działającego na zasadzie indukcji elektrostatycznej. W procesie indukcji elektrostatycznej następuje rozdział ładunków w przewodniku poprzez zbliżenie do innego ciała naładowanego. Indukowane ładunki te są następnie rozdzielane, przeniesione i zbierane na kondensatorach.

Maszyna elektrostatyczna składa się z dwóch tarcz izolacyjnych, które za pomocą korbki i odpowiedniej przekładni obracają się w przeciwnych kierunkach. (Foto 2) Na zewnętrznych stronach tarcz są nałożone aluminiowe segmenty, na których w wyniku indukcji elektrostatycznej następuje rozdział ładunku. Na osi obrotu tarcz z obu stron są umocowane metalowe pręty, zaopatrzone na końcach w metalowe szczotki, które dotykają segmentów aluminiowych.

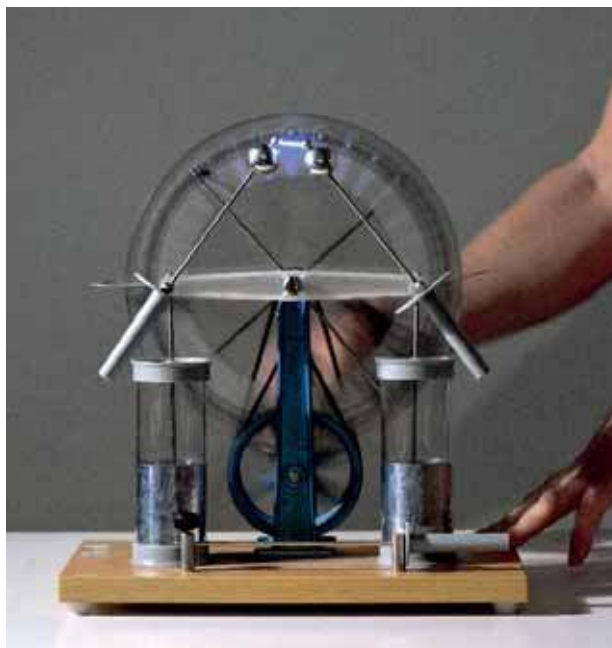


Foto 2. Maszyna elektrostatyczna Wimshursta

Foto: Krzysztof Krzempek

Na wysokości poziomej średnicy tarcz są umocowane pręty, opatrzone ostrzami (tzw. „grzebieniami”), które są zwrócone do obu tarcz, ale nie dotykają ich. Ostrza te zbierają ładunki, które są doprowadzone do iskiernika. Iskiernik stanowią dwie kulki na prętach metalowych opatrzonych ebonitowymi uchwytami. Kulki iskiernika są połączone z dwiema wewnętrznymi okładkami butelki lejdejskiej.

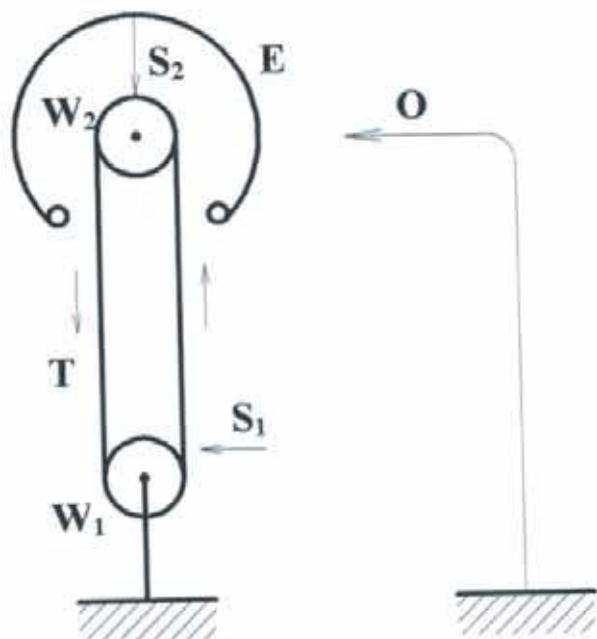
Okładki zewnętrzne tych butelek są połączone prętem poziomym, którym włącza się butelki w obwód. Podczas obracania tarcz powstają ładunki, które są zbierane przez grzebień i między iskiernikami powstaje duża różnica potencjałów, co powoduje przeskok iskry.

## 2. GENERATOR VAN DE GRAAFFA

Działanie generatora Van de Graaffa opiera się na fakcie, że ładunek doprowadzony do wnętrza metalowej czastry E zostaje jej całkowicie przekazany.

Ładunek umieszczony z prawej strony pasa jest przenoszony do wnętrza metalowej sfery kulistej, a następnie jest zbierany przy pomocy grzebienia  $S_2$ . Ładunek na pasie może być generowany z zewnętrznego źródła wysokonapięciowego dzięki zjawisku wyładowania koronowego, lub też generować się skutkiem tarcia pasa o dolny wałek  $W_1$ . W przypadku generatora obcowzbudnego szczotka  $S_1$  w postaci szeregu ostrzy połączona jest z zasilaczem wysokonapięciowym. Z ostrzy sływa na taśmę ładunek elektryczny, który przenoszony jest taśmą T do wnętrza sfery  $S_2$ . Ładunek przeciwnego znaku odprowadzany jest z lewej strony pasa.

Napięcie generatora na elektrodzie E można sterować zbliżając do niej uziemione ostrze O.



Rys 1. Schemat działania generatora Van de Graaffa

Źródło: J.Liwo, B.Porala. I Materiały Pomocnicze z fizyki. materiały wewnętrzne WFTIMS PG



Foto 3. Generator Van de Graaffa zbudowany na WFTIMS Politechniki Gdańskiej przez inż. Jarosława Nowakowskiego Foto: Krzysztof Krzempek

## Elektromagnetyczne źródła wysokiego napięcia Prawo indukcji elektromagnetycznej Faradaya

Zjawisko indukcji elektromagnetycznej polega na indukowaniu się siły elektromotorycznej wskutek zmian strumienia pola magnetycznego.

$$\Phi_B = B \cdot S \cdot \cos(\vec{B}, \vec{S})$$

Strumień pola magnetycznego definiuje się jako iloczynowi indukcji magnetycznej  $B$ , pola powierzchni  $S$ , przez którą on przenika, oraz kąta między  $B$  i  $S$ .

Wartość siły elektromagnetycznej indukcji  $E$  równa się szybkości zmian strumienia pola magnetycznego.

$$E = - \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}$$

Znak minus związany jest z regułą Lenza.

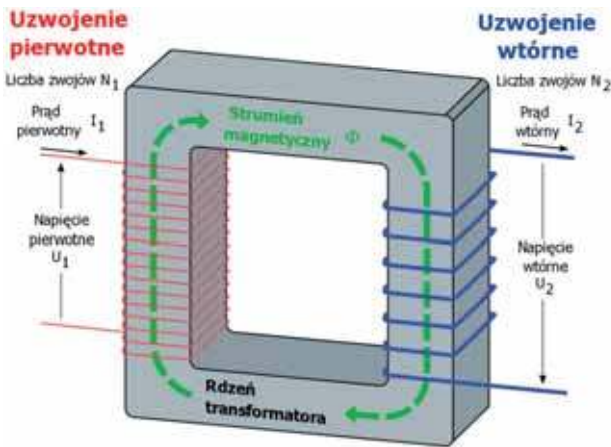
Zmianę strumienia pola magnetycznego można realizować przez zmianę

$B$ ,  $S$  lub kąta między  $B$  i  $S$ .

### 1. TRANSFORMATOR WYSOKONAPIĘCIOWY

Transformator służy do zmiany układu napięć i prądów przemiennych na układ napięć i prądów przemiennych o innych wartościach, lecz o tej samej częstotliwości. Zmiana ta odbywa się za pośrednictwem pola magnetycznego. Strumień pola magnetycznego w obwodzie pierwotnym równa się strumieniowi w obwodzie wtórnym stąd wynika, że stosunek napięcia uzyskanego we wtórnym uzwojeniu do napięcia przyłożonego do uzwojenia pierwotnego jest taki, jak stosunek liczby zwojów uzwojenia wtórnego do liczby zwojów uzwojenia pierwotnego.

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$$



Rys 2. Transformator wysoko napięciowy  
 Źródło: [https://pl.wikipedia.org/wiki/Transformator#/media/File:Transformer3d\\_col3\\_pl.png](https://pl.wikipedia.org/wiki/Transformator#/media/File:Transformer3d_col3_pl.png)

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 = P_2 = U_2 \cdot I_2$$

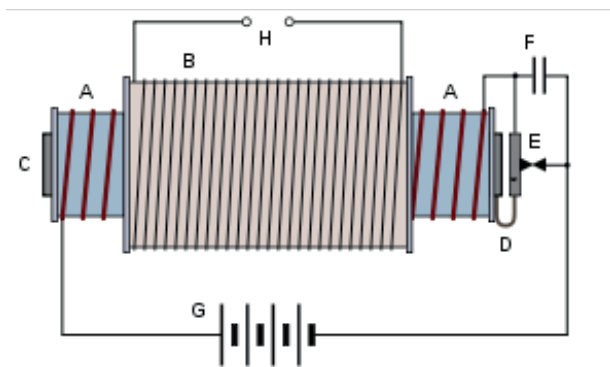
Zasada zachowania energii wymaga, by moc prądu w obwodzie wtórnym  $P_2$  była nie większa, od mocy prądu w obwodzie pierwotnym  $P_1$ , Stąd:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

Znaczy to, że ile razy podwyższymy napięcie w obwodzie wtórnym w porównaniu z napięciem w obwodzie pierwotnym, tyle samo razy zmniejszyliśmy w tym obwodzie natężenie prądu.

## 2. CEWKA RUHKORFFA

Jest to transformator składający się z dwóch uzwojeń – pierwotnego o niewielkiej liczbie zwojów oraz wtórnego o bardzo dużej ich liczbie – umieszczonych na rdzeniu żelaznym. Uzwojenie pierwotne jest zasilane ze źródła prądu stałego połączonego szeregowo z przerywaczem, który przerywa obwód z częstotliwością od kilku do kilku tysięcy Hz. Wytworzone w ten sposób zmiany natężenia prądu powodują powstanie w rdzeniu zmiennego strumienia magnetycznego, który indukuje siłę elektromotoryczną w uzwojeniu wtórnym. Napięcia uzyskiwane w cewce indukcyjnej Ruhmkorffa sięgają nawet kilkaset tysięcy woltów.



Rys 3. Cewka Ruhmkorffa  
 Źródło: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/5d/Ruhmkorff\\_inductor\\_schem.svg/300px-Ruhmkorff\\_inductor\\_schem](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/5d/Ruhmkorff_inductor_schem.svg/300px-Ruhmkorff_inductor_schem)

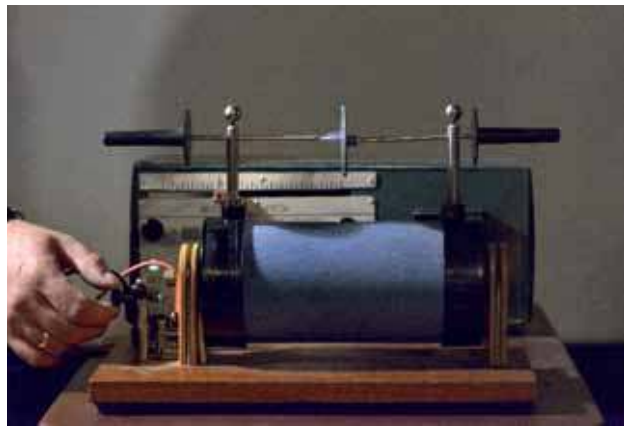
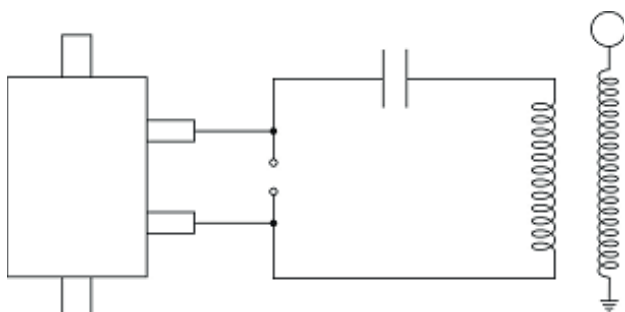


Foto 4. Cewka Ruhmkorffa (ze zbiorów WFTIMS PG)  
 Foto: Krzysztof Krzempek

Po zamknięciu obwodu pierwotnego pole magnetyczne na końcu rdzenia przyciąga kotwy sprężystego stycznika, którego rozłączenie przerywa obwód prądu zasilającego uzwojenie pierwotne. W wyniku przerwania obwodu, zanika pole magnetyczne i stycznik powraca do pierwotnej pozycji, ponownie zamykając obwód. Po zamknięciu obwodu szybkość wzrostu natężenia prądu elektrycznego ogranicza indukcyjność cewki, natomiast po przerwaniu obwodu natężenie prądu spada gwałtownie. W uzwojeniu wtórnym indukuje się siła elektromotoryczna proporcjonalna do szybkości zmian strumienia pola magnetycznego, przez co napięcie uzyskiwane w uzwojeniu wtórnym ma postać krótkiego impulsu wysokiego napięcia

## 3. TRANSFORMATOR TESLI

Transformator Tesli jest układem wykorzystującym rezonans dwu obwodów drgających. Pierwszy układ jest typowym układem drgającym z przerwą iskrową, zasilanym z cewki indukcyjnej lub transformatora wysokonapięciowego. Składa się on z pojemności w postaci butelki lejdejckiej, indukcyjności w postaci cewki o niewielkiej liczbie zwojów wykonanej z grubego drutu oraz przerwy iskrowej. Układ ten jest obwodem pierwotnym transformatora Tesli. Obwodem wtórnym jest układ drgający wykonany w postaci długiej zwojnicy o dużej liczbie zwojów. Pojemnością tego układu jest tylko pojemność międzyzwojowa cewki. Ze względu na dużą przekładnię zwojową, zjawisko rezonansu oraz małą pojemność drugiego obwo-



Rys 4. Schemat transformatora Tesli z przerwą iskrową  
 Źródło: A. Kuczkowski. Materiały pomocnicze z fizyki V. Fizyka współczesna. Materiały wewnętrzne WFTIMS PG



Foto 5. Transformator Tesli zbudowany przez inż. Jarosława Nowakowskiego (ze zbiorów WFTIMS PG)

Foto: Andrzej Kuczowski

du, napięcie szczytowe może osiągać bardzo duże wartości, zaś częstość drgań jest bardzo wysoka.

Transformator z przerwą iskrową ze względu na trząski oraz niestabilne działanie iskiernika jest niewygodny w pracy. Niedogodności tych nie ma udoskonalona wersja transformatora Tesli, w której w obwodzie pierwotnym wytwarzane są drgania za pomocą klasycznego układu generacyjnego. Korzystając z transformatora Tesli można zademonstrować szereg niezwykłych eksperymentów opisanych np. w: A. H. Piekara, Elektryczność i magnetyzm, PWN, Warszawa, czy T. Dryński, Doświadczenia pokazowe z fizyki, PWN, Warszawa.

### Działanie fizjologiczne prądów wysokiej częstości

Prądy wysokiej częstości o wysokim napięciu przy przechodzeniu przez powierzchnię ciała człowieka dzięki efektowi naskórkowemu wywołują tylko nagrzewanie.

Można pokazać, że natężenie prądu przepływającego w tym doświadczeniu przez ciało osiąga wartość kilku dziesiątych ampera. W tym celu żarówką o mocy 15-20 W z nawiniętym na gwintowanym cokole miedzianym drucie o średnicy 2-3 mm dotykamy uzwojenia wtórnego, a drugi koniec trzymamy w ręku. Lampa wówczas zapala się, prąd żarzenia przechodzi przez nią i przez ciało eksperymentatora do ziemi.

### Przechodzenie prądów wysokiej częstości przez dielektryk

Prądy wysokiej częstości przechodzą przez cienki dielektryk jako prądy przesunięcia, nie powodując jego przebicia. Dla demonstracji tego zjawiska uzwojenie wtórne transformatora Tesli nakrywamy cienkościennej zlewką i przybliżamy do niej trzymaną w ręku pręt metalowy. Wyładowanie iskrowe przechodzi przez ścianki zlewki, nie uszkadzając jej.

### Świecenie gazów w polu o wysokiej częstości

Do uzwojenia wtórnego czynnego transformatora zbliżamy rurki z rozrzedzonymi gazami. Już w dużej odległości, wynoszącej w przypadku dużych transformatorów kilka metrów, gaz w rurkach zaczyna intensywnie świecić. Możemy poddawać doświadczeniu kilka rurek z różnymi gazami: neonem, powietrzem, wodorem i innymi, wówczas będziemy mieć świecenie o różnym zabarwieniu. Rurka może być duża, np. świetlówka – nawet o długości metra i średnicy 2-4 cm. Rurki wykazują świecenie do miejsca trzymanego ręką eksperymentatora; pozostała część rurki jest ciemna.

### Wysokonapięciowe przewodnictwo gazów przy obniżonym ciśnieniu. Wyładowanie jarzeniowe

Wyładowaniu w gazach pod wysokim napięciem i pod obniżonym ciśnieniem towarzyszą efekty świetlne, dlatego wyładowania te noszą nazwę wyładowań jarzeniowych.

Przy napięciu międzyelektrodozym rzędu 100 do 1000 V i przy niskim ciśnieniu gazu między elektrodami pojawia się jasne świecenie, lub też między elektrodami pojawiają się na przemian jasne i ciemne obszary w zależności od ciśnienia.

#### Jaki jest mechanizm ich powstawania?

Przy przyłożeniu napięcia  $\sim 1$  kV elektrony wyrwane z katody są przyspieszane i z powodu małego ciśnienia gazu mają średnią drogę swobodną tak dużą, że nabyta energia umożliwia im niesprężyste rozpraszanie na cząsteczkach gazu. Zachodzą wtedy następujące zjawiska:

1. Wzbudzenie atomów.
2. Jonizacja atomów.
3. Świecenie atomów(jarzeniowe) lub cząsteczek gazu przy ich deekscytacji po wzbudzeniu.
4. Przy rozrzedzonym gazie i dużym napięciu przyspieszającym może powstać jonizacja lawinowa.
5. Duża koncentracja ładunku przestrzennego może zmienić rozkład przyłożonego pola zewnętrznego.



Foto 6. Zorza polarna w Norwegii

Foto – Adobe Stock

### Zorza polarna

Zorza polarna jest szczególnym przykładem wyładowania w gazach rozrzedzonych. W górnych warstwach atmosfery w pobliżu biegunów magnetycznych Ziemi strumień naładowanych cząstek emitowanych ze Słońca wzbudza i jonizuje cząsteczki powietrza, co skutkuje ich promieniowaniem zorzowym.

### Wyładowania koronowe

Jest to wyładowanie ciągłe w formie niebieskiej poświaty lub w formie świecących gałązek wychodzących z elektrody. Zachodzi ono pod ciśnieniem atmosferycznym. Elektrody podczas tego wyładowania pozostają chłodne. Przepływające prądy są niewielkie. Wyładowanie koronowe występuje w obszarze silnego niejednorodnego pola elektrycznego np. na ostrzach czy cienkich drutach. Przy wzroście napięcia wyładowanie koronowe przechodzi w wyładowanie iskrowe.

W wyładowaniu koronowym jonizacja gazu i jego świecenie zachodzi tylko w niewielkim obszarze przylegającym do elektrody o małym promieniu krzywizny, nazywanym warstwą koronującą. Obszar przestrzeni międzyelektrodowej leżący poza warstwą koronującą nazywamy zewnętrznym lub ciemnym obszarem wyładowania koronowego. Wzrost napięcia międzyelektrodowego powoduje wzrost prądu wyładowania i wzrost objętości warstwy koronującej. Rozpatrzmy procesy fizyczne zachodzące w przypadku przyłożenia dodatniego lub ujemnego potencjału do elektrody koronującej

Przy zwiększaniu napięcia międzyelektrodowego pole elektryczne w pobliżu elektrody koronującej osiąga wartość, przy której rozpoczyna się jonizacja cząsteczek gazu przez rozpędzone polem elektrony. Ponieważ pole jest silnie niejednorodne, już w niewielkiej odległości od elektrody koronującej ustaje jonizacja i wzbudzenie cząsteczek gazu. W przypadku przyłożenia ujemnego potencjału do elektrody koronującej przyspieszone polem jony dodatnie wytworzone w warstwie koronującej bombardują katodę i wybijają z niej elektrony, które z kolei jonizują gaz w warstwie koronującej. W konse-



Foto 7. Wyładowanie koronowe

Foto – Jarosław Nowakowski



Rys 5. Ognie św. Elma

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8a/Elmo%27s\\_fire-2.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8a/Elmo%27s_fire-2.jpg)

kwencji prowadzi to do wytworzenia się równowagi dynamicznej.

W strefie zewnętrznej wyładowania koronowego pole jest słabe i elektrony, które przechodzą tam, dryfują do anody, nie wywołując już jonizacji zderzeniowej. Występujący w warstwie tej ujemny ładunek przestrzenny ogranicza prąd w obszarze wyładowania. Ponieważ warunki potrzebne do przebicia istnieją tylko w obszarze warstwy koronującej, można uważać, że wyładowanie koronowe stanowi niedokończone, niepełne przebicie warstwy wyładowczej.

W przypadku przyłożenia dodatniego potencjału do elektrody koronującej elektrony wywołujące jonizację gazu w warstwie koronującej generowane są w wyniku fotojonizacji gazu przez promieniowanie UV powstające w tej warstwie. Od dodatniej elektrody koronującej w kierunku przeciwnej elektrody będzie się poruszał strumień jonów dodatnich.

### Ogień św. Elma

Są to wyładowania koronowe pojawiające się na ostrzach np. końcach masztów, linach i ostrych krawędziach. Najczęściej obserwuje się je na morzu i w górach.

Ogień św. Elma nie są groźne, lecz duża ich intensywność świadczy o znacznej różnicy potencjałów ziemią a warstwą chmur. Pojawienie się ognia św. Elma może w związku z tym poprzedzać uderzenie pioruna.

### Wyładowanie iskrowe

Jest to wyładowanie nieciągłe, któremu towarzyszy świecenie i trzaski związane z przepływem prądu o dużym natężeniu przez wąskie, zygzakowate, często rozgałęzione kanały plazmowe wytworzone w gazie. Rozpędzające się elektrony powodują lawinowy wzrost jonizacji i przewodnictwa gazu. W przypadku płaskich elektrod mechanizm przewodnictwa i przebicia gazów opisuje mechanizm Townsenda [3]. Pod wpływem pola elektrycznego wolny elektron nabiera energii kinetycznej i wskutek zderzeń z innymi molekułami może dojść do ich jonizacji, czyli powstania dodatniego jonu i wolnego elektronu. Proces ten rozwija się lawinowo, a liczba wolnych elektronów może być opisana równaniem:



Rys. 6. Piorun kulisty  
[https://pl.wikipedia.org/wiki/Piorun\\_kulisty#/media/File:Ball\\_lightning.png](https://pl.wikipedia.org/wiki/Piorun_kulisty#/media/File:Ball_lightning.png)

$$n(x) = n_0 e^{\alpha x}$$

gdzie:  $n_0$  jest liczbą wolnych elektronów przy katodzie:  $n_0 = n(x=0)$

$\alpha$  – współczynnik jonizacji zderzeniowej Townsenda.

Poniżej progu jonizacji prąd w układzie jest bardzo mały, ponieważ w powietrzu występuje bardzo mała liczba swobodnych nośników ładunku.

Jeżeli jednak przyłożone napięcie przekroczy wartość początkowego napięcia jonizacji  $U_0$ , liczba jonów i elektronów wzrasta, co skutkuje szybkim wzrostem prądu. Dalszy wzrost napięcia powoduje przebicie – gwałtowny wzrost prądu zwarciego do wartości prądu zwarciego źródła.

W polu równomiernym, napięcie początkowe jonizacji  $U_0$  jest równe napięciu przebicia  $U_p$  i jest opisane prawem Pashena. Napięcie początkowe jonizacji  $U_0$  jest funkcją iloczynu ciśnienia gazu  $p$  i odległości między elektrodami  $a$ .

$U_0 = f(p \cdot a)$ . Zależność ta ma minimum dla małych wartości iloczynu ( $p \cdot a$ ).

W razie nagrzania elektrod i wzrostu natężenia prądu wyładowanie iskrowe może przejść w wyładowanie łukowe.

Do wywołania w powietrzu iskrzy elektrycznej o długości 1 cm między elektrodami kulistymi o promieniu 1 cm wymagane jest napięcie około 30 kV. Iskra  $n$  razy dłuższa wymaga w przybliżeniu napięcia  $n$  razy większego.

### Pioruny i błyskawice

Pioruny są to potężne wyładowania iskrowe zachodzące na ogół między chmurami burzowymi a ziemią, choć zdarzają się także wyładowania między chmurami. Podczas formowania się chmur burzowych dolna powierzchnia chmury ładuje się ujemnie i napięcie między chmurą a powierzchnią ziemi może dochodzić do 10 000 000 V. Energia silnego pioruna może dochodzić do  $10^9$  J. Łączny ładunek przepływający w czasie wyładowania wynosi od 3 do 200 C. Szczytowa moc wyładowania może dochodzić  $7 \cdot 10^{14}$  W, natomiast szczytowa wartość natężenia prądu do 500 kA [4].

Piorun kulisty jest to bardzo rzadkie zjawisko wyładowania atmosferycznego. Objawia się ono jako świecąca i poruszająca się w różnych kierunkach kula o promieniu od kilku do kilkudziesięciu centymetrów, czasami wydająca głos podobny do syczenia. Czas jego trwania wynosi

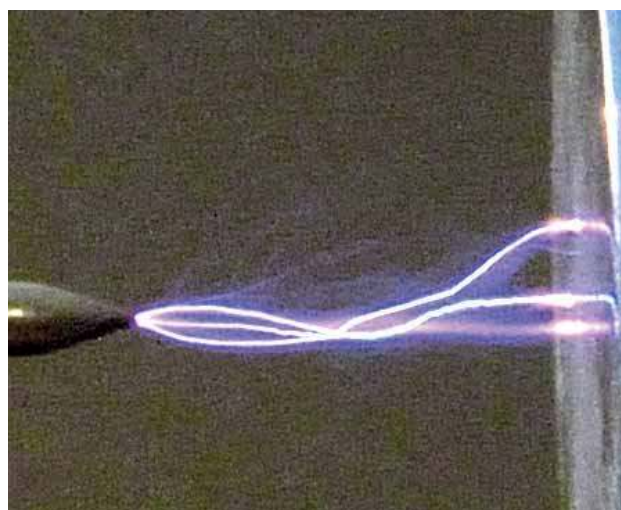


Foto 8. Wyładowanie iskrowe

Foto – Krzysztof Krzempke



Foto 9. Łuk elektryczny wysokonapięciowy

Foto: Krzysztof Krzempek

od kilkunastu do kilkudziesięciu sekund. Obserwowano pioruny kuliste o różnych barwach najczęściej o barwie białej, żółtej lub bładoniebieskiej. Pochodzenie i natura pioruna kulistego budzą jeszcze liczne kontrowersje.

### Wyładowanie łukowe

Zachodzi pod dowolnym ciśnieniem, po ogrzaniu elektrod do temperatury, która umożliwia jonizację gazu. Na ogół realizuje się to przez zetknięcie elektrod i wykorzystaniu wydzielającego się przy tym ciepła. Po zapaleniu łuku elektrody rozsuwa się na niewielką odległość. Do pracy łuku elektrycznego wystarczy napięcie między elektrodami od 10 do 100 V, ale wymagany jest znaczny prąd rzędu 1 A lub większy. Prąd wypływa z małej plamki chaotycznie wędrującej po katodzie.

### Łuk elektryczny wysokonapięciowy

Łuk elektryczny wysokonapięciowy jest to wyładowanie elektryczne w kształcie łuku, w gazie pod normalnym ciśnieniem. Można go wytworzyć przykładając do dwóch drutów lekko oddalających się od siebie wysokie napięcie rzędu od kilkunastu do kilkudziesięciu tysięcy woltów. Emitowane z powierzchni metalowych, dzięki emisji wyso-

kopolowej, elektrony przyspieszone wysokim polem w wyniku zderzenia z cząsteczkami gazu powodują ich jonizację i przepływ prądu. Powstałemu wyładowaniu towarzyszy strumień nagrzanego powietrza, który unosi go wyżej i gdy przestrzeń iskrowa między drutami staje się zbyt duża łuk urywa się, po czym zapala się w dolnej części.

### Wyładowanie bezelektrodowe

W wyładowaniu tym gaz umieszczony jest w dostatecznie silnym zmiennym polu elektrycznym lub magnetycznym. Elektrony rozpędzają się w zmiennym polu i jonizują gaz. Świecenie i jonizacja zachodzi w całej objętości. Zjawiska przyelektrodowe są nieistotne.

Wyładowanie bezelektrodowe realizuje się przez umieszczenie rurki z gazem wewnątrz kondensatora lub cewki w obwodzie rezonansowym wysokiej częstotliwości. Wyładowanie to może też występować w polu fali elektromagnetycznej.

### Podziękowanie

Autor składa podziękowanie Panom: inż. Jarosławowi Nowakowi i mgr inż. Andrzejowi Kozłowskiemu za pomoc w przygotowaniu pokazanych na zdjęciach eksperymentów.

**Andrzej Kuczkowski**

Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej  
Politechnika Gdańska

### LITERATURA

- [1] Z. Garbarczyk. Elektryczność statyczna. Zagrożenia i skutki narażenia. <http://archiwum.ciop.pl/26004.html>
- [2] L. Godawa, S. Gruszka. Elektryczność statyczna. <https://www.grupa-wolff.eu/cp/art/elektryznosc-statyczna/elektryznosc-statyczna.pdf>
- [3] K.L. Chrzan. Ćwiczenia w laboratorium wysokich napięć. Wrocław 2012 Skrypt Politechniki Wrocławskiej
- [4] Tablice fizyczne – matematyczne. Wydawnictwo Adamantan. Warszawa 2002 s.162

## Kto wyżywi Marsjan?

Mars jest obecnie bardzo intensywnie badany. NASA wysłała nawet na jego powierzchnię łazika, który wykonuje pomiary różnych parametrów i przy okazji robi zdjęcia, które to NASA wykorzystuje do budzenia zainteresowania swoją działalnością, czyli do budowy czegoś co nowoczesni biznesmeni nazywają *publicity*. Swego czasu naukowcy podejrzewali, że istnieje tam rozwinięta cywilizacja, zdolna opleść całą planetę siecią kanałów. W pierwszej połowie XX wieku niektórzy Ziemianie drżeli na samą myśl o możliwej inwazji Marsjan. Strach ten był tak potężny, że gdy w USA radio nadało audycję radiową opartą



o powieść „Wojna światów” setki Amerykanów wpadło w panikę i zaczęło uciekać przed siebie. Zdarzenie to zakończyło się śmiercią kilku z nich.

Druąa połowa XX wieku i wiek XXI charakteryzuje się zmianą podejścia. Mniej lub bardziej światłe umysły zastanawiają się w jaki sposób to Ziemianie mieliby przeprowadzić inwazje na Marsa. Analizowane są różne aspekty tego przedsięwzięcia a amerykański prezydent jest je gotów finansować z budżetu federalnego.

Nikt jednak do tej pory nie zanalizował problemu, czy Mars będzie samowystarczalny żywnościowo. Tę lukę postanowili uzupełnić naukowcy ze słonecznej Kalifornii Kevin Cannon i Daniel Britt. Podjęli oni się zadania przeanalizowania tego problemu za pomocą modelowania komputerowego. Wyniki swoich dociekań opublikowali w czasopiśmie *New Space*. Podstawowy rezultat to, że populacja ziemskich osadników potrzebowałaby ok 100 lat do osiągnięcia samowystarczalności żywnościowej. Czyli jeśli teraz wysłalibyśmy pierwszych, to nasze prawnuki mogłyby przestać wysyłać im paczki żywnościowe.

Źródło: Kevin M. Cannon, Daniel T. Britt. Feeding One Million People on Mars. *New Space*, 2019; DOI: 10.1089/space.2019.0018

Foto – NASA

# Paradoksy szczególnej teorii względności

## Część V

Jan Kurzyk

W pierwszych trzech częściach artykułu [1-3] zajmowałem się zjawiskiem kontrakcji długości. Niniejsza część jest kontynuacją czwartej części [4], w której zacząłem omawiać zjawisko dylatacji czasu.

### Zegary wysyłające impulsy radiowe

W poprzedniej części opisałem eksperyment, w którym obserwatorzy O i O' znajdujący się w początkach układów współrzędnych swoich układów odniesienia S i S' w momencie mijania się zaczynają oglądać ten sam film. Po zakończeniu filmu obaj obserwatorzy wysłali sygnał radiowy informujący o fakcie zakończenia się filmu. Na podstawie czasu odebrania sygnału i znajomości odległości, w jakiej był jeden obserwator od drugiego w momencie wysyłania sygnału mogliśmy stwierdzić w jakim momencie czasu sygnał został wysłany według czasu w układzie obserwatora odbierającego sygnał. Wynik tego eksperymentu w pełni potwierdził względność dylatacji czasu będącą konsekwencją zasady względności Galileusza stanowiącą jednocześnie pierwszy postulat szczególnej teorii względności [5]. Obserwator O stwierdził, że O' skończył oglądać film później niż on, a obserwator O' stwierdził, że to on zakończył oglądać film wcześniej niż O.

Wykorzystajmy pomysł tamtego eksperymentu do śledzenia przez jednego obserwatora szybkości z jakim biegnie czas w układzie będącym względem niego w ruchu. Wyobraźmy sobie, że obserwatorzy O i O' umieszczeni w początkach swoich układów współrzędnych dysponują zegarami, które regularnie np. co jedną sekundę ( $\Delta t' = 1$  s) wysyłają impuls radiowy. Zegary uruchamiamy w momencie mijania się obu obserwatorów, czyli w chwili  $t = 0$  i  $t' = 0$ . Zajmijmy się impulsami wysyłanymi przez zegar obserwatora O'. Sygnał o numerze  $k$  zostanie wysłany w chwili  $t'_k = k\Delta t'$ . Zegar O jest wówczas w odległości  $kv\Delta t'$ . Czas jaki potrzebuje światło na dotarcie do obserwatora O wynosi (patrz eksperyment z filmem z poprzedniego artykułu [4])

$$\tau'_k = \frac{kv\Delta t'}{1-v}$$

Sygnał ten dotrze do obserwatora w momencie (czas mierzony w układzie S')

$$t' = k\Delta t' + \frac{kv\Delta t'}{1-v} = \frac{k\Delta t'}{1-v}$$

Obserwator O będzie wówczas znajdował się względem układu S' w punkcie o współrzędnej

$$x' = -vt' = -\frac{kv\Delta t'}{1-v}$$

Jego zegar będzie wskazywał czas

$$t_k = \left( \frac{k\Delta t'}{1-v} + v \frac{-kv\Delta t'}{1-v} \right) \gamma = (1+v)k\Delta t' \gamma.$$

Na ten czas składa się czas  $k\Delta t'$ , po którym zegar O' wysłał  $k$ -ty sygnał i czas lotu  $\tau'_k$  tego sygnału (oba czasy mierzone w układzie S). Podobnie jak w eksperymencie z filmem możemy wyliczyć, że czas lotu sygnału  $k$  wynosi  $\tau'_k = kv\Delta t'$ . A zatem

$$(1+v)k\Delta t' \gamma = k\Delta t + vk\Delta t$$

Stąd dostajemy związek

$$\Delta t = \Delta t' \gamma$$

Czyli odstęp czasu między dwoma tyknięciami zegara O', które w układzie S' trwa  $\Delta t'$  będzie trwał w układzie S  $\gamma$  razy dłużej. Jeśli przyjmiemy, że tyknięcie zegara O' jest równe jedną sekundę ( $\Delta t' = 1$  s), a prędkość O' względem O wynosi  $v = 0,6$  to dla obserwatora O zegar O' będzie tykał co 1,25 s. Oczywiście nie jest to odstęp czasu pomiędzy kolejnymi sygnałami odbieranymi przez O. Ten odstęp czasu wyniesie

$$t_{k+1} - t_k = (1+v)\Delta t' \gamma = \Delta t' \sqrt{\frac{1+v}{1-v}}$$

Jeśli  $\Delta t' = 1$  s i  $v = 0,6$  to obserwator O będzie odbierał sygnały co 2 sekundy. Odstęp czasu między sygnałami dochodzącymi do O jest większy niż czas między tyknięciami zegara O' ze względu na regularnie zwiększającą się odległość zegara O'

$$t_{k+1} - t_k = \Delta t + v\Delta t = 1,25 \text{ s} + 0,6 \cdot 1,25 \text{ s} = 2 \text{ s}.$$

Oczywiście dokładnie takie same wyniki dostaniemy jeśli przeanalizujemy sygnały wysyłane przez zegar O i odbierane przez O'. Teraz O' stwierdzi, że zegar O tyka co 1,25 s, czyli wolniej niż jego zegar, a impulsy będą do niego docierać co 2 s.

Przyjrzyjmy się jeszcze sytuacji, gdy zegar O' zamiast oddalać się od O, będzie się do niego zbliżać. Aby nie zmieniać położenia naszych obserwatorów (przypominam, że umieściliśmy ich w początkach swoich układów współrzędnych) musimy rozpocząć obserwacje w momencie  $t_0 < 0$  i  $t'_0 < 0$ . Niech w tym momencie odległość obserwatora O od obserwatora O' mierzona w układzie S' wynosi  $l'_0$ . Tyle samo wynosi współrzędna na X' obserwatora O w układzie S'. Oczywiście mijanie się obu obserwatorów musi nastąpić w chwili  $t'_0 = 0$ . Wobec tego zachodzi związek

$$v(0 - t'_0) = l'_0$$

Stąd znajdujemy, że w chwili  $t'_0 = l'_0/v$  obserwator O znajduje się w punkcie o współrzędnej  $x'_0 = l'_0$ . Z kolei z równań transformacji Lorentza

$$x_0 = (0 + v(-l'_0/v))\gamma = -l'_0 \gamma$$

$$t_0 = (t_0 - vx_0)\gamma = (t_0 + v l'_0 \gamma)\gamma = (t_0 - v^2 t'_0)\gamma$$

oraz z tożsamości  $1 + v^2 \gamma^2 = \gamma^2$  wynika, że w układzie S' opisana sytuacja ma miejsce, gdy w układzie S obserwator O' znajduje się w punkcie o współrzędnej  $x_0 = -l'_0 \gamma$ , a zegar obserwatora O pokazuje czas  $t'_0 = t'_0 \gamma$ .

Czas  $\tau_k$  lotu  $k$ -tego sygnału wysłanego przez zegar O' możemy wyliczyć z równania

$$\tau_k' = (l_0' - kv\Delta t') - v\tau_k'$$

Stąd

$$\tau_k' = \frac{l_0' - kv\Delta t'}{1+v}$$

Sygnal ten dotrze do obserwatora w momencie (czas mierzony w układzie S')

$$t' = t_0' + k\Delta t' + \frac{l_0' - kv\Delta t'}{1+v} = t_0' + \frac{l_0'}{1+v} + \frac{k\Delta t'}{1+v}$$

Obserwator O będzie wówczas w punkcie o współrzędnej

$$x' = l_0' - v(t' - t_0') = l_0' - \frac{vl_0'}{1+v} - \frac{kv\Delta t'}{1+v}$$

W momencie odebrania  $k$ -tego sygnału przez O jego zegar będzie wskazywał czas

$$t_k = (t' + vx')\gamma$$

Po przekształceniach dostajemy

$$t_k = t_0 + l_0 + (1 - v)k\Delta t'\gamma$$

Na ten czas składa się czas  $t_0 + k\Delta t$ , po którym zegar O' wysłał  $k$ -ty sygnał i czas  $\tau_k$  tu tego sygnału (oba czasy mierzone w układzie S). Czas lotu  $k$ -tego sygnału wynosi  $\tau_k = l_0 - vk\Delta t$ . A zatem

$$t_0 + l_0 + (1 - v)k\Delta t'\gamma = t_0 + k\Delta t + l_0 - vk\Delta t$$

Stąd dostajemy związek

$$\Delta t = \Delta t'\gamma$$

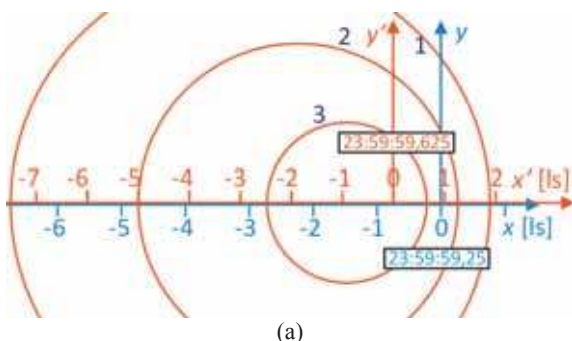
Czyli jak należało się spodziewać dostaliśmy ten sam związek co poprzednio, gdy obserwatorzy oddalali się od siebie. Jednak tym razem odstęp czasu między kolejnymi odbieranymi sygnałami będzie krótszy i wyniesie

$$t_{k+1} - t_k = (1 - v)\Delta t'\gamma = \sqrt{\frac{1-v}{1+v}}$$

Jeśli tak jak poprzednio  $\Delta t' = 1$  s i  $v = 0,6$ , to teraz obserwator O będzie odbierać sygnały co pół sekundy. Odstęp czasu między sygnałami dochodzącymi do O jest mniejszy niż czas między tyknięciami zegara O' ze względu na regularnie zmniejszającą się odległość zegara O'

$$t_{k+1} - t_k = \Delta t - v\Delta t = 1,2 \text{ s} - 0,6 \times 1,25 \text{ s} = 0,5 \text{ s}$$

Opisane sytuacje przedstawiono na rysunku 1.



### Podłużny efekt Dopplera a dylatacja czasu

Załóżmy, że nasze zegary wysyłają w sposób ciągły monochromatyczne fale elektromagnetyczne. Grzbiety tych fal możemy potraktować jak impulsy, które rozważaliśmy w poprzednim punkcie. Wobec tego otrzymane powyżej wzory łączące odstęp czasu pomiędzy odbieranymi sygnałami z odstępami czasu pomiędzy sygnałami wysyłanymi stanowią wzory opisujące tzw. podłużny efekt Dopplera dla światła [6]. Jeśli przez  $T_z$  oznaczymy okres drgań fali wysyłanej przez źródło, to okres  $T$  fali odbieranej przez obserwatora wyniesie

$$T = T_z \sqrt{\frac{1+v}{1-v}}$$

gdy źródło i odbiornik oddalają się od siebie lub

$$T = T_z \sqrt{\frac{1-v}{1+v}}$$

w przypadku zbliżania się. Ponieważ częstotliwość fali  $f$  jest odwrotnością okresu, analogiczne wzory dla częstotliwości mają postać

$$f = f_z \sqrt{\frac{1-v}{1+v}}$$

lub

$$f = f_z \sqrt{\frac{1+v}{1-v}}$$

Z poprzedniego punktu wiemy, że

$$T = \Delta t \pm v\Delta t,$$

gdzie górny znak dotyczy przypadku oddalania się źródła fali, a dolny znak dotyczy zbliżania się.

Wobec tego

$$\Delta t = \frac{T}{1 \pm v}$$

Z kolei

$$\Delta t' = T_z = T \sqrt{\frac{1 \pm v}{1 \mp v}}$$

Jak widzimy zjawisko Dopplera możemy wykorzystać do pomiaru szybkości, z jaką upływa czas w układzie będącym względem nas w ruchu.

### Czas własny i postulat zegara

Wzór opisujący efekt dylatacji czasu

$$\tau = \tau'\gamma = \frac{\tau'}{\sqrt{1-v^2}}$$

Rysunek 1. Zegar umieszczony w początku układu współrzędnych układu S', który porusza się wzdłuż osi X z prędkością wysyła co 1 s impulsy radiowe. Obserwator z układu S, do którego zbliża się zegar (np. obserwator O na rysunku (a)) będzie odbierać impulsy co 0,5 s. Obserwator z układu S, od którego oddala się zegar (np. obserwator O na rysunku (b)) będzie odbierać impulsy co 2 s. Bliższe wyjaśnienia w tekście głównym.



lub

$$\tau' = \tau \sqrt{1 - v^2}$$

pozwała nam wyliczyć czas  $\tau'$ , jaki upłynie w układzie poruszającym się względem nas, gdy w naszym układzie upłynie czas  $\tau$ . Czas ten nazywamy czasem własnym (czasem, jaki upływa we własnym układzie). We wzorze tym występuje kwadrat długości prędkości układu  $S'$  względem nas. Wobec tego można uważać, że wzór pozostanie w mocy, gdy szybkość będzie stała, a zmieniać się będzie kierunek prędkości np. podczas ruchu jednostajnego po okręgu. Oczywiście w takich przypadkach nie mamy już do czynienia z układem inercyjnym, a tylko układami inercyjnymi zajmuje się szczególna teoria względności. Ale fakt, że ten wzór jest poprawny również w przypadku takich ruchów potwierdziły liczne eksperymenty. Jednym z nich był eksperymentem z mionami, nietrwałymi cząstkami elementarnymi o średnim czasie życia wynoszącym ok. 2,2  $\mu\text{s}$ . W 1966 roku grupa fizyków w Europejskim Ośrodku Badań Jądrowych (CERN) rozpędziła te cząstki do prędkości ok. 0,9966 prędkości światła i za pomocą pola magnetycznego utrzymywała w ruchu po okręgu o średnicy ok. 5 m. Rejestrując elektrony powstające podczas rozpadu mionów stwierdzono, że ich średni czas życia wyniósł 26,15  $\mu\text{s}$ , co z dokładnością 2% zgadzało się z przewidywaniami szczególnej teorii względności [7]. W 1972 roku dwaj Amerykanie J. C. Hafele i R. E. Keating umieścili zegary cezowe na pokładzie samolotów pasażerskich i przewieźli je dookoła ziemi, raz w kierunku ze wschodu na zachód, a raz odwrotnie [8]. Również w tym przypadku porównanie wskazań tych zegarów ze wskazaniami zegarów, które pozostały na Ziemi potwierdziło teorię Einsteina. Aktualnie dowodem na potwierdzenie realności efektu dylatacji czasu jest działanie systemów nawigacji satelitarnych, takich jak GPS, Glonass, czy Galileo [9].

Skoro wzór na czas własny obowiązuje w przypadku ruchu ze stałą szybkością a zmiennym kierunku, to można pokusić się o uogólnienie tego wzoru na przypadek do-

wolnie zmieniającej się prędkości. Wówczas czas własny liczylibyśmy za pomocą całki

$$\tau' = \int_0^{\tau} \sqrt{1 - v^2(t)} dt.$$

Przyjmując ten wzór zakładamy jednocześnie, że szybkość upływu czasu zależy jedynie od chwilowej szybkości układu, a nie zależy od jego przyspieszenia. Założenie to nazywamy *postulatem zegara* [10]. Jest to jeden z fundamentalnych postulatów ogólnej teorii względności. Postulat ten nie ma żadnych podstaw teoretycznych, ale został potwierdzony eksperymentalnie aż do przyspieszeń rzędu  $10^{18}$  g [10]. Być może jednak dla jeszcze większych przyspieszeń jest inaczej [11].

### Paradoks bliźniąt

W dotychczasowych rozważaniach pokazałem, że zjawisko dylatacji czasu nie neguje zasady względności Galileusza. Zresztą ta zasada stanowi pierwszy postulat szczególnej teorii względności [5]. Jak widzieliśmy z punktu widzenia obserwatorów z inercyjnego układu  $S$  czas w inercyjnym układzie  $S'$ , który porusza się względem  $S$  biegnie wolniej niż w ich układzie. Ale ze względu na równoważność obu układów prawdziwe jest również stwierdzenie odwrotne. Obserwatorzy z układu  $S'$  stwierdzą, że w układzie  $S$  czas biegnie wolniej niż w ich układzie. Zarówno jedni, jak i drudzy mogą udowodnić prawdziwość swoich twierdzeń na drodze eksperymentalnej. Wyników tych eksperymentów nie będą mogli zakwestionować ani jedni, ani drudzy, podobnie jak to było w przypadku paradoksu *pociągu i tunelu* [2]. A co będzie jeśli nasi obserwatorzy  $O$  i  $O'$  spotkają się ponownie? Jest to, najbardziej znany paradoks szczególnej teorii względności nazywany *paradoksem bliźniąt*. W paradoksie tym wysyłamy jednego z bliźniaków w podróż kosmiczną, z której powróci on po pewnym czasie. I co wówczas zobaczymy? Przecież nie może być tak, że bliźniak-kosmonauta będzie widział, że jego brat jest teraz od niego starszy, a jednocześnie bliźniak, który pozostał na Ziemi będzie widział że to jego brat kosmonauta jest starszy od niego. Oczywiście tak nie może być i do-

### W następnym numerze

## Oceany – Ziemia planeta wyjątkowa

Ziemia oglądana z Kosmosu jest kolorowa z przewagą niebieskiego. Ten kolor wynika z obecności oceanów. Czym są oceany? Oceany możemy uważać za gigantyczny zbiornik na wodę. To co czyni Ziemię wyjątkową to fakt występowania takich zbiorników wypełnionych ciekłą wodą. Mimo rozlicznych poszukiwań, jak do tej pory nie udało się znaleźć innego obiektu w naszym Układzie Słonecznym, gdzie występowałyby na powierzchni zbiorniki z płynną wodą.

Foto – Fotolia



wodem na to, że jest inaczej jest chociażby eksperyment Hafele'a i Keatinga z zegarami atomowymi podróżującymi w samolotach. To dla tych zegarów zaobserwowano efekt dylatacji czasu, a nie dla zegarów, które pozostały na Ziemi. Jak wobec tego ma się to do względności dylatacji czasu, o której tyle tu pisałem? Zauważmy zasadniczą różnicę. Zarówno zegary Hafele'a i Keatinga, jak i bliźniak-kosmonauta nie znajdują się (cały czas) w układzie inercyjnym. Co prawda bliźniak pozostający na Ziemi też nie jest w układzie inercyjnym ze względu na ruch obrotowy Ziemi, ruch orbitalny Ziemi, ruch orbitalny Układu Słonecznego itd. Ale te efekty możemy w zaniedbać w porównaniu z sytuacją bliźniaka-kosmonauty. Musi on przynajmniej w trzech fazach lotu znaleźć się w układzie nieinercyjnym: podczas przyspieszania, do momentu, gdy jego pojazd kosmiczny osiągnie docelową prędkość, następnie podczas zawracania i w końcu podczas hamowania zakończonych lądowaniem na Ziemi. W tych etapach lotu w zasadzie nie możemy stosować szczególnej teorii względności. Należałoby użyć ogólnej teorii względności [10]. Mimo tego spróbujmy w ramach szczególnej teorii względności wyjaśnić co takiego dzieje się w tych etapach lotu i dlaczego ostatecznie okaże się, że to bliźniak-kosmonauta zestarzeje się mniej niż jego brat na Ziemi.

Załóżmy, że bliźniaka-kosmonautę wysyłamy do gwiazdy odległej od Ziemi od  $l_0 = 6$  ly (6 lat świetlnych). Przez większość lotu jego pojazd kosmiczny będzie układem inercyjnym poruszającym się ruchem jednostajnym prostoliniowym z szybkością  $v = 0,6$ . Często w opisie paradoksu bliźniąt przyjmuje się, że pojazd prędkość docelową osiąga natychmiastowo (podobnie jest ze zmianą prędkości na przeciwną podczas powrotu i przy lądowaniu na Ziemi). Na początek zróbmy podobnie i wykorzystajmy wzory, jakie wyprowadziliśmy w punkcie *Zegary wysyłające sygnały radiowe*. Załóżmy, że podróż zaczyna się w dniu urodzin bliźniaków i co roku każdy z nich będzie wysyłał sygnał z życzeniami urodzinowymi. Przy prędkości  $v = 0,6$  obaj bracia odbierają sygnały co dwa lata, gdy rakieta oddala się od Ziemi, a następnie co pół roku podczas powrotu rakiety. W układzie Ziemia-Gwiazda podróż w jedną stronę potrwa  $l_0/v = 10$  lat. Zgodnie z wzorem na dylatację czasu bliźniakowi-kosmonaucie zajmie to 8 lat. Taki wynik dostajemy patrząc na nasz eksperyment z układu Ziemia-Gwiazda. Ale jak to będzie w układzie rakiety? W układzie rakiety będzie dokładnie tyle samo. Zauważmy, że w tym układzie odległość między Ziemią i gwiazdą jest mniejsza wskutek zjawiska kontrakcji długości. Dla bliźniaka-kosmonauty odległość Ziemia-Gwiazda wyniesie

$$l = l_0 \sqrt{1 - v^2} = 4,8 \text{ ly},$$

więc podróż do gwiazdy zajmie  $4,8 \text{ ly} / 0,6 = 8$  lat.

W ciągu tych 8 lat rakieta oddala się od Ziemi. W rakiety sygnały będą odbierane co 2 lata, więc odebrane zostaną 4 sygnały. Przez następne 8 lat powrotu (zakładamy, że powrót następuje natychmiast) bliźniak-kosmonauta będzie odbierał sygnały co 0,5 roku. Sygnałów tych odbierze  $8/0,5 = 16$  (ostatni już w momencie lądowania do Ziemi). W sumie odebranych sygnałów będzie 20, a ponieważ bliźniak na Ziemi wysyłał je co rok, to na Ziemi upłynęło 20 lat,

co zgadza się z czasem lotu mierzonym w układzie Ziemia-Gwiazda, jaki wyliczyliśmy powyżej. Bliźniak w rakiety zdąży podczas swojej podróży wysłać 16 sygnałów. Pierwsze 8 z nich będzie docierać do Ziemi co 2 lata, a następne 8 co pół roku (ostatni w momencie lądowania rakiety na Ziemi). W sumie daje to  $8 \cdot 2 \text{ lata} + 8 \cdot 0,5 \text{ roku} = 20$  lat, czyli taki czas upłynął na Ziemi podczas, podczas gdy bliźniak w rakiety postarzał się o 16 lat.

Ten sposób tłumaczenia paradoksu bliźniąt moim zdaniem nie jest w pełni przekonujący. Przecież z drugiej strony podkreślałem ciągle, że efekt dylatacji czasu jest w pełni symetryczny. A zatem dla bliźniaka-kosmonauty, to jego brat powinien zestarzeć się mniej. Podczas oddalania się rakiety od Ziemi, gdy bliźniak-kosmonauta odbiera sygnały z Ziemi co 2 lata odstępowi czasu pomiędzy sygnałami wysyłanymi z Ziemi  $\Delta t_z = 1$  rok w układzie rakiety odpowiada czas

$$\Delta t_r = \frac{2 \text{ lata}}{1 + 0,6} = 1,25 \text{ lat}.$$

Podobnie podczas powrotu rakiety, gdy sygnały odbierane są co pół roku

$$\Delta t_r = \frac{0,5 \text{ roku}}{1 - 0,6} = 1,25 \text{ lat}.$$

Wobec tego podczas 16. letniej podróży bliźniaka-kosmonauty jego brat powinien zestarzeć się o  $16 \text{ lat} / 1,25 = 12,8$  lat. Skoro wiemy, że tak nie będzie (przypominam eksperyment Hafele'a i Keatinga), to zastanówmy się czym różni się sytuacja obu braci. Zgodnie z zasadą względności Galileusza podczas ruchu jednostajnego prostoliniowego rakiety sytuacja obu braci jest dokładnie symetryczna. Nie jesteśmy w stanie żadnym eksperymentem wykazać, który z nich jest w ruchu. Ale w przypadku bliźniaka-kosmonauty pojawiają się trzy wyjątkowe fazy lotu. Są to: nieskończenie szybkie osiągnięcie szybkości docelowej, nieskończenie szybka zmiana zwrotu prędkości przy gwieździe i nieskończenie szybkie wytracenie prędkości podczas lądowania na Ziemi. W tym momentach symetrii między braćmi już nie ma. Jedyne bliźniak-kosmonauta odczuwa skutki przyspieszenia.

Aby przyjrzeć się co takiego dzieje się w tych trzech sytuacjach rozważmy bardziej realistyczny przypadek. Załóżmy, że każdy z trzech etapów lotu: przyspieszanie, zmiana zwrotu prędkości i końcowe hamowanie nie są nieskończenie szybkimi procesami, jak było poprzednio, ale niech trwają bardzo krótko w porównaniu z całym lotem, np. kilka godzin. Oczywiście pomijam tu wszelkie aspekty techniczne i katastrofalny wpływ tak ogromnych przyspieszeń na organizm człowieka.

W momencie startu, zegary na Ziemi i na Gwieździe wskazują czas  $t = 0$ . Również zegar w rakiety wskazuje czas  $t' = 0$ . Co stanie się w ciągu pierwszych kilku godzin lotu, czyli dochodzenia przez rakiety do docelowej prędkości? Przede wszystkim w układzie rakiety gwałtownie będzie malała odległość do gwiazdy. Nie mam tu na myśli zwykłą zmianę odległości wynikającą z ruchu rakiety w kierunku gwiazdy, ale efekt kontrakcji długości, który będzie narastał w miarę wzrostu prędkości rakiety. W ciągu kilku godzin przyspieszania, gdy rakieta osiągnie już

prędkość  $v = 0,6$ , jej odległość do gwiazdy spadnie z 6. do 4,8 lat świetlnych. Nie należy tego interpretować jako ruch z prędkością nadświetlną. Jest to zmiana wynikająca z własności czasoprzestrzeni. Drugim aspektem tych zmian będzie desynchronizacja zegarów na Ziemi i na gwieździe, jaka nastąpi w układzie rakiety. Z punktu widzenia bliźniaka, który pozostał na Ziemi zegary na Ziemi i na Gwieździe wskazują czas około kilku godzin. W układzie rakiety czas wskazywany przez zegar w rakiecie i zegar na Ziemi nie będą się znacząco różniły, gdyż odległość rakiety od Ziemi jest jeszcze nieduża. Oba zegary będą wskazywać różne czasy, ale w obu przypadkach będzie to czas rzędu kilku godzin. Natomiast z zegarem na gwieździe stało się coś niezwykłego. Po osiągnięciu przez raketę prędkości  $v = 0,6$  w układzie rakiety gwiazda będzie w punkcie o współrzędnej  $x' = 4,8$  ly. Wobec tego zgodnie z transformacją Lorentza zegar na gwieździe pokaże czas

$$t = (t' + vx')\gamma \approx 3,6 \text{ lat.}$$

Zwróćmy uwagę, że stało się to w ciągu kilku godzin lotu przyspieszającej rakiety. Dla bliźniaka-kosmonauty zegary na Ziemi i na gwieździe rozsynchronizowały się i różnica ich wskazań wynosi około 3,6 lat! Od tego momentu, aż do hamowania przy gwieździe układ odniesienia związany z raketą jest tak, jak układ Ziemia-Gwiazda układem inercyjnym. W tym etapie lotu mamy pełną symetrię. W układzie Ziemia-Gwiazda lot do gwiazdy potrwa 10 lat (pomijam drobne różnice wynikające z początkowej fazy lotu), zaś kosmonauta zestarzeje się o  $(10 \text{ lat})/1,25 = 8$  lat. Natomiast dla kosmonauty lot potrwa 8 lat, ale jego brat bliźniak zestarzeje się o  $(8 \text{ lat})/1,25 = 6,4$  lat. Tyle samo czasu upłynie na gwieździe. Wobec tego po dotarciu do gwiazdy, w układzie rakiety, zegar na Ziemi pokaże czas 6,4 lat, a zegar na gwieździe czas 3,6 lat + 6,4 lat = 10 lat. Teraz następuje hamowanie. Podczas tego etapu lotu po pierwsze zmaleje do zera efekt kontrakcji długości. Po wytraceniu prędkości Ziemia będzie od kosmonauty w odległości 6. lat świetlnych. Po drugie kosmonauta znajdzie się w układzie Ziemia-Gwiazda, w którym zegary są zsynchronizowane, więc podczas hamowania desynchronizacja zegarów na Ziemi i na Gwieździe musi zmaleć do zera. Ponieważ

teraz Ziemia jest bardzo daleko, to stanie się to, co w pierwszej fazie stało się z zegarem na gwieździe. Zegar na Ziemi gwałtownie przyspieszy i w ciągu kilku godzin hamowania nadrobi brakujące 3,6 roku pokazując po wyhamowaniu rakiety czas taki jak na gwieździe, czyli 10 lat. Proces powtórzy się podczas powrotu rakiety i ostatecznie po wylądowaniu bliźniaka-kosmonauty na Ziemi jego zegar będzie pokazywał 16 lat, a zegary na Ziemi i na gwieździe 20 lat. A zatem ostatecznie bliźniak-kosmonauta okaże się po powrocie młodszy o 4 lata od swojego brata bliźniaka.

Na zakończenie chciałbym podkreślić, że dokładne wyjaśnienie paradoksu bliźniąt wymaga posłużenia się ogólną teorią względności. Próba wyjaśniania tego paradoksu w oparciu o szczególną teorię względności nie jest w pełni poprawne. Rodzi ona mnóstwo pytań, z którymi szczególna teoria względności nie radzi sobie. Tym nie mniej taka próba daje nam jakieś wyobrażenie na temat tego na czym polega asymetria sytuacji obu bliźniaków.

Na paradoksie bliźniąt kończę omawianie niektórych dziwnych zjawisk związanych ze szczególną teorią względności, zjawisk, które przeczą tak zwanemu zdrowemu rozsądkowi. Nie kończę jednak tego cyklu artykułów. Będę chciał jeszcze pokazać geometryczne wyjaśnienia tych zjawisk korzystając z tak zwanych diagramów Minkowskiego.

Jan Kurzyk

Instytut Fizyki Politechniki Krakowskiej

LITERATURA

- [1] J. Kurzyk, *Paradoksy szczególnej teorii względności. Część I.* Fizyka w Szkole nr 1/2019.
- [2] J. Kurzyk, *Paradoksy szczególnej teorii względności. Część II.* Fizyka w Szkole nr 2/2019.
- [3] J. Kurzyk, *Paradoksy szczególnej teorii względności. Część III.* Fizyka w Szkole nr 3/2019.
- [4] J. Kurzyk, *Paradoksy szczególnej teorii względności. Część IV.* Fizyka w Szkole nr 4/2019.
- [5] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Szczeg%C3%B3lna\\_teor%C4%99dno%C5%9Bci](https://pl.wikipedia.org/wiki/Szczeg%C3%B3lna_teor%C4%99dno%C5%9Bci) [dostęp 29.01.2019].
- [6] C. Kittel, W.D. Knight, M.A. Ruderman, *Mechanika*, PWN 1975.
- [7] A.K. Wróblewski, J.A. Zakrzewski, *Wstęp do fizyki*. tom 1, PWN 1984.
- [8] J.C. Hafele and R.E. Keating, *Science* 177, 166-168 and 168-170 (1972).
- [9] J. Kurzyk, *Dlaczego działa GPS*, Fizyka w Szkole nr 2/2017.
- [10] A. Dragan, *Niezwykłe szczególna teoria względności*, <http://www.fuw.edu.pl/~dragan/Fizyka/Nstw.pdf> [Dostęp 28.10.2018].
- [11] <http://naukawpolsce.pap.pl/aktualnosci/news%2C406855%2Cfizycy-z-uw-perfekcyjnie-dokladne-zegary-nigdy-nie-powstana.html> [dostęp 01.02.2019].

I. PRENUMERATĘ NA 2020 ROK MOŻNA ZAMÓWIĆ BEZPOŚREDNIO U WYDAWCY

- Przez internet: zakładka *Prenumerata 2020* na stronie [www.aspress.com.pl](http://www.aspress.com.pl) i wypełniając formularz zamówienia na podstronie prenumeraty
- e-mail: [szewczyk24@gmail.com](mailto:szewczyk24@gmail.com) ■ telefonicznie: 606 201 244 ■ listownie: Agencja AS Józef Szewczyk, ul. Warchałowskiego 2/58, 02-776 Warszawa

Prenumerata 2020

Cena prenumeraty w 2020 roku

Tytuł	Liczba wydań (I i II półrocze)	Cena egzemplarzowa	Cena prenumeraty rocznej	Cena prenumeraty w II półroczu
<b>Dwumiesięczniki</b>				
Chemia w Szkole	6 (3+3)	27,50	165,00	82,50
Geografia w Szkole	6 (3+3)	27,50	165,00	82,50
Fizyka w Szkole z Astronomią	6 (3+3)	30,00	180,00	90,00
Wiadomości Historyczne z WOS	6 (3+3)	30,00	180,00	90,00

II. PRENUMERATA DOSTARCZANA PRZEZ FIRMY KOLPORTERSKIE:

1. RUCH – zamówienia na prenumeratę w wersji papierowej i na e-wydania można składać bezpośrednio na stronie [www.prenumerata.ruch.com.pl](http://www.prenumerata.ruch.com.pl). Ewentualne pytania prosimy kierować na adres e-mail: [prenumerata@ruch.com.pl](mailto:prenumerata@ruch.com.pl) lub kontaktując się z Centrum Obsługi Klienta „RUCH” pod numerami: 22 693 70 00 lub 801 800 803 – czynne w dni robocze w godzinach 7.00–17.00. Koszt połączenia wg taryfy operatora.
  2. GARMOND PRESS – tel. 22 836 69 21 [prenumerata.warszawa@garmondpress.pl](mailto:prenumerata.warszawa@garmondpress.pl)
  3. KOLPORTER S.A. – prenumeratę instytucjonalną można zamawiać w oddziałach firmy. Informacje: [www.kolporter.com.pl](http://www.kolporter.com.pl).
  4. POCZTA POLSKA – zamówienia we wszystkich urzędach pocztowych lub u listonoszy, drogą elektroniczną: [www.poczta-polska.pl](http://www.poczta-polska.pl). Infolinia w godz. 8.00–22.00: 801 333 444 (dla telefonów stacjonarnych) i 801 333 444 (dla telefonów komórkowych i z zagranicy).
- III. NUMERY ARCHIWALNE DRUKOWANE dostępne są w ograniczonym zakresie. Przed złożeniem zamówienia prosimy o kontakt pod adresem: [szewczyk24@gmail.com](mailto:szewczyk24@gmail.com).

Zamów prenumeratę przez Internet

[www.aspress.com.pl/prenumerata-2020/](http://www.aspress.com.pl/prenumerata-2020/)

# Co, jak i dlaczego?



- ✓ Co wskazuje elektroskop?
- ✓ Jak zagotować wodę, nie podgrzewając jej?
- ✓ Czy energia może zniknąć?
- ✓ Czy satelity stacjonarne są rzeczywiście stacjonarne?
- ✓ Czy można zobaczyć siłę?
- ✓ Jak zmierzyć częstotliwość ruchu skrzydełek pszczoły?
- ✓ Dlaczego opony w samochodach Formuły 1 są szerokie?
- ✓ Jak powstaje deszcz? A jak powstaje burza?
- ✓ Dlaczego w Ziemi jest więcej żelaza niż złota?
- ✓ Czy elektrony stanowiące prąd elektryczny płyną do nas z elektrowni?
- ✓ Jak obliczyć rozmiary atomu?
- ✓ Jak długo zachodzi Słońce?

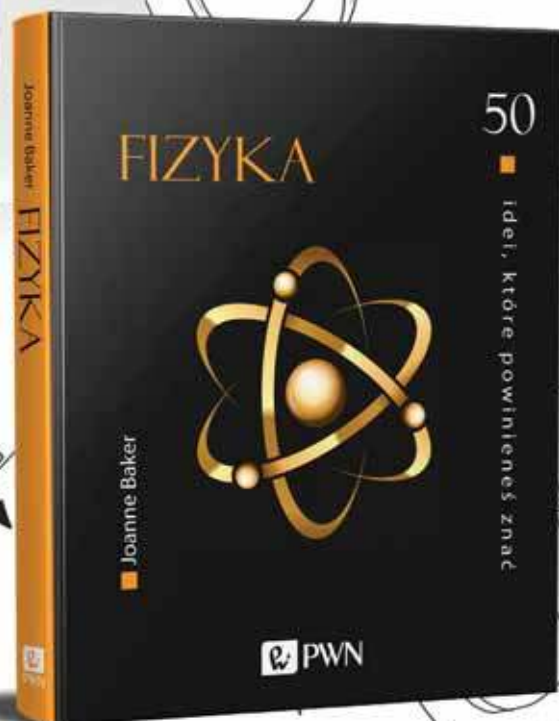
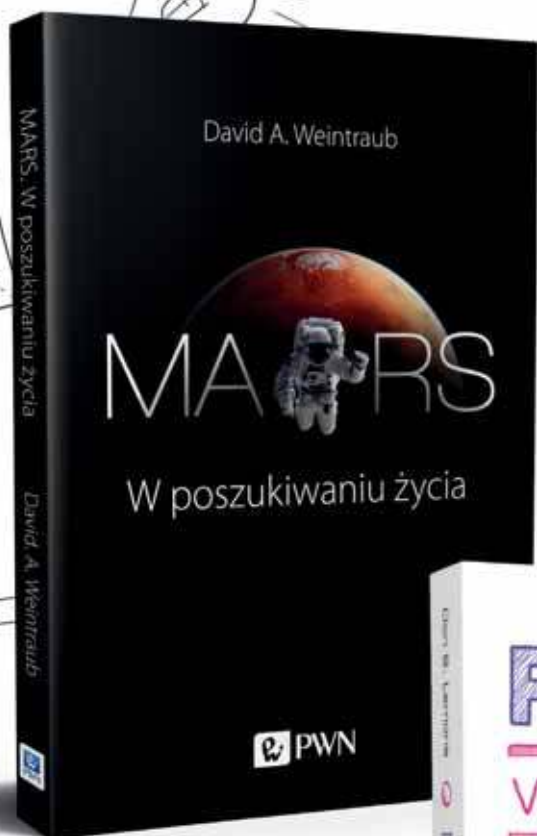
Wydanie specjalne  
w wersji elektronicznej  
(plik PDF)

**Tylko 15 zł!**

Formularz zamówienia na stronie: [www.aspress.com.pl/specjalne/](http://www.aspress.com.pl/specjalne/)

$$E = mc^2$$

# Książki, dzięki którym **POKOCHASZ FIZYKĘ**



 **PWN**  
Moc wiedzy

Sprawdź rabaty na  
[ksiegarnia.pwn.pl](http://ksiegarnia.pwn.pl)