

FIZYKA

w Szkole z Astronomią

CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI

391 (LXV) indeks 35810X Nr 2 marzec/kwiecień 2024 CENA 45,00 zł (w tym 8% VAT)

MATERIA, SIŁY I RUCH

Znamy już 25 cząstek elementarnych!

ANTYFERROMAGNETYKI

Przyszłość elektroniki?

MEDIA

w popularyzacji fizyki

„KOMÓRKI”

Zostawić je uczniom
na lekcjach fizyki?

ANALOGIE

w dydaktyce fizyki

THOMAS YOUNG

Ostatni człowiek,
który wiedział wszystko

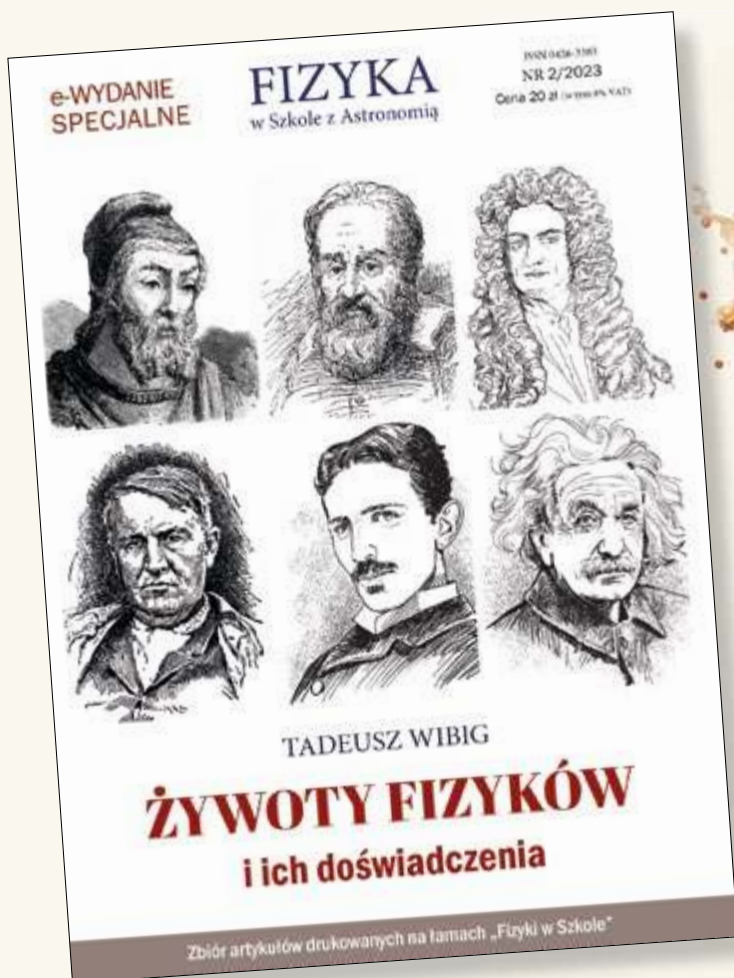
ZDERZENIA

w Układzie Słonecznym

FAKTY I MITY



Wielcy fizycy i ich doświadczenia



- ✓ **Od Archimedesesa po Einsteina**
- ✓ **Najważniejsze odkrycia**
- ✓ **27 wybitnych postaci**

**Cena
20 zł**
(w tym 8% VAT)



**WYDANIE SPECJALNE FIZYKI W SZKOLE
W WERSJI ELEKTRONICZNEJ – PLIK PDF**

Szczegóły i formularz zamówienia na www.aspress.com.pl/wydania-specjalne/

eprasa.pl 918140efd4

Drodzy Czytelnicy!

Zwielką przyjemnością przekazujemy Państwu drugi, zdecydowanie wiosenny numer Fizyki w Szkole. Jak zwykle postaraliśmy się, aby zawartość numeru była jak najbardziej zróżnicowana. Numer otwiera artykuł Macieja Panczykowskiego „Materia Siły i Ruch”. Artykuł ten jest poświęcony najbardziej podstawowym zagadnieniom fizyki, czyli pytaniom o to czym jest materia i jakie są jej najbardziej elementarne składniki. Jak wykazuje autor pojęcie cząstki elementarnej też nie jest do końca jednoznacznie określone i zmieniało się przez wieki.

Innym wartym polecenia artykułem jest artykuł „Antyferromagnetyki – materiały przyszłości dla elektroniki?”. Najważniejszym tematem tego artykułu są możliwości wykorzystania wspomnianych materiałów w pamięciach komputerowych. Obecnie pamięci komputerowe to głównie pamięci ferromagnetyczne, nie jest więc dziwne, że duża część artykułu poświęcona jest dyskusji czy antyferromagnetyki mogą wyprzeć swojego konkurenta.

Ponieważ nasze czasopismo poświęcone jest również zagadnieniom dydaktyki, dlatego też staraliśmy się publikować treści mniej lub bardziej dydaktyczne. Obecnie jednym z bardziej kontrowersyjnych tematów w dydaktyce jest kwestia używania przez młodzież smartfonów. Pojawiają się nawet głosy, aby zabronić uczniom wnoszenia takich urządzeń na lekcje. Z drugiej strony smartfon jest wyposażony w wiele użytecznych czujników i podsystemów w związku z tym, zwłaszcza w okresie zaniku tematycznych pracowni fizycznych, smartfon może stanowić bardzo istotną pomoc dydaktyczną. Tematowi temu poświęcony jest artykuł Pani Arlety Biegańskiej o wymownym tytule „Zostawcie uczniom komórki”.

Ostatnią obowiązkową tematyką w *Fizyce w Szkole* jest tematyka astronomiczna. Nasz Układ Słoneczny powstał w wyniku ewolucji, która zresztą wcale się nie zakończyła. Jednym z elementów tej ewolucji były zderzenia. Procesom tym poświęcony jest artykuł Marcina Wesołowskiego „Zderzenia w Układzie Słonecznym – fakty i mity”.

Tradycyjnie życzę Państwu miłej lektury!
W imieniu redakcji

Redaktor prowadzący
Zbigniew Wiśniewski

Fizyka wczoraj, dziś, jutro

- 4** **Materia, siły i ruch** ■ Maciej Panczykowski
12 **Antyferromagnetyki – materiały przyszłości dla elektroniki?**

■ Michał Grzybowski

Czy materiały magnetyczne inne niż ferromagnetyki także mogą znaleźć zastosowanie?



- 22** **Tranzystor** ■ Andrzej Wasiak
Bez tranzystora niemożliwy byłby rozwój współczesnej elektroniki, która stosowana jest w wielu urządzeniach.
26 **Thomas Young. Ostatni człowiek, który wiedział wszystko**
■ Kazimierz Mikulski
30 **Żywyty fizyków. Oleg Władimirowicz Łosiew** ■ Tadeusz Wibig
36 **Metody wizualizacji 3D i ich biofizyczne podstawy** ■ Stanisław Bednarek

W jaki sposób przedstawić trójwymiarowy obiekt na płaszczyźnie, żeby jego obraz zachował najwięcej informacji o tym obiekcie i jak najwierniej z płaskich obrazów odtworzyć trójwymiarowy obiekt?



Z naszych lekcji

- 17** **Nowoczesna popularyzacja fizyki**
■ Edward Rydygier
32 **Zostawcie uczniom „komórki”**
■ Arleta Biegańska
Odkąd upowszechniły się telefony komórkowe trwa dyskusja na temat ich złego wpływu na dzieci.
42 **Analogie w dydaktyce fizyki. (Miniatura dydaktyczna)** ■ Waldemar Reńda



Astronomia dla każdego

- 45** **Zderzenia w Układzie Słonecznym – fakty i mity. Cz. I** ■ Marcin Wesołowski
Do dziś zderzenia pomiędzy ciałami w Układzie Słonecznym odgrywają istotną rolę w ewolucji powierzchni tych ciał niebieskich.

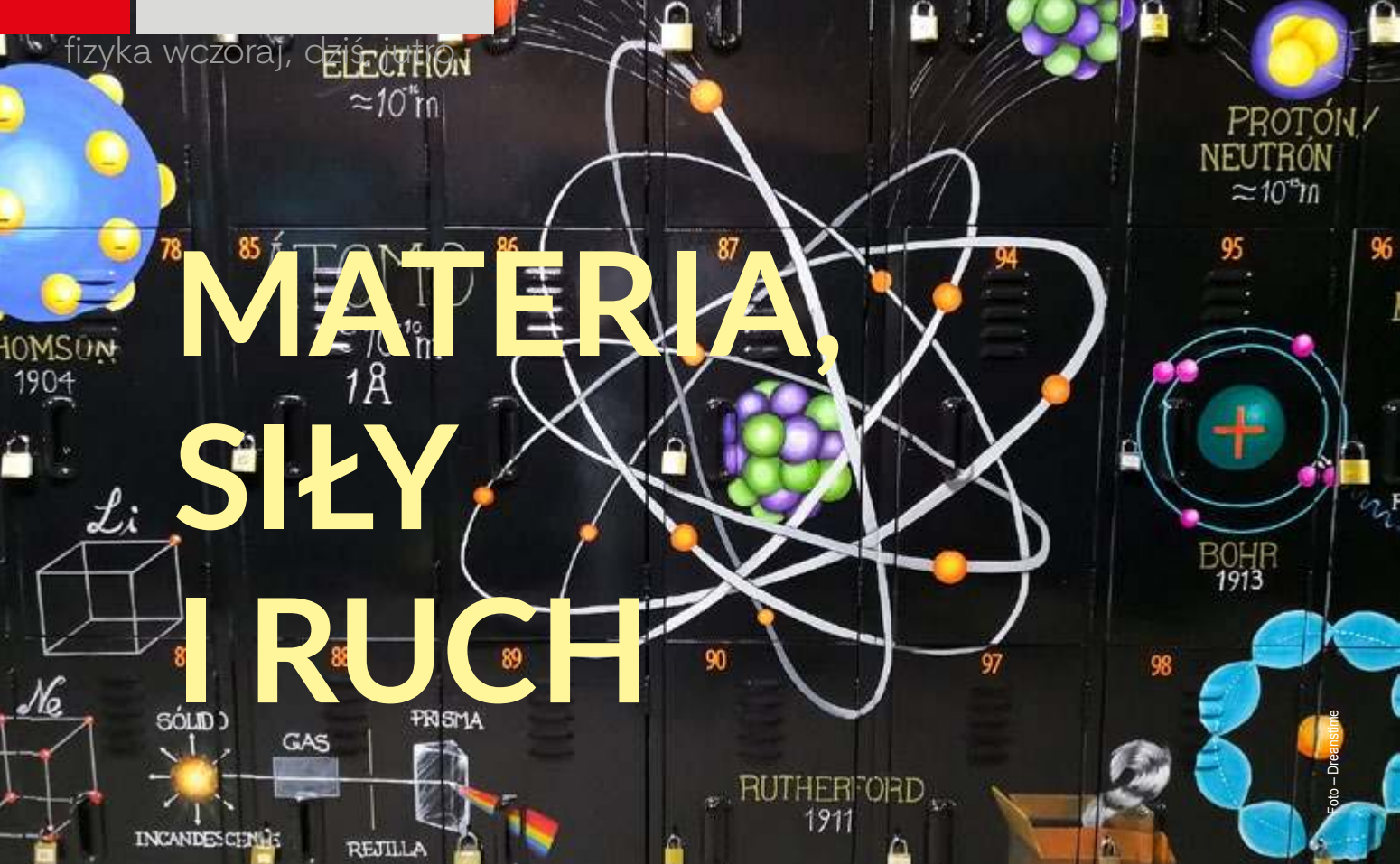
FIZYKA
w Szkole z Astronomią

NUMER 2 MARZEC/KWIECIEŃ 2024
391 (LXV) indeks 35810X ISSN 0426-3383

CENA 45,00 zł
(w tym 8% VAT)

Komitet redakcyjny Krystyna Jabłońska-Lawniczak, 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/, e-mail: szewczyk24@gmail.com, tel. 606 201 244 **Reklama** Jędrzej Chodakowski, jchodakowski1953@gmail.com **Skład i łamanie** ScanSystem.pl Ewa Szelażyńska **Druk i oprawa** Paper & Tinta, ul. Ceglana 34, 05-270 Nadma
Zdjęcie na okładce: Adobe Stock

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



Maciej Panczykowski

Materia

Obecnie wiemy doskonale, że materia ziemska składa się z atomów różnych pierwiastków, np: wodoru, tlenu, krzemu, węgla lub żelaza. Atomy nie są jednak bezstrukturalne i nierozbijalne na części, na co wskazywać mogłaby ich myląca nazwa, wynikająca z dawnych przekonań (gr. *atomos* – niepodzielny). Składają się z jądra atomowego i poruszających się poza nim elektronów. Jądro atomowe ma ładunek dodatni, gdyż w jego skład zawsze wchodzi dodatnio naładowane protony oraz prawie zawsze neutrony, które są obojętne elektrycznie (wyjątkiem jest najlżejszy izotop wodoru – prot, którego jądrem jest tylko jeden proton). Elektrony mają równoważący ładunek ujemny, co sprawia, że atomy są obiektami o zerowym, wypadkowym ładunku.

Jesteśmy obecnie niemal pewni, że elektron jest cząstką elementarną, czyli taką, która nie składa się z mniejszych cząstek i jest rzeczywiście niepodzielna. Protony i neutrony (noszące wspólną nazwę nukleonów) składają się z tajemniczych cząstek, również najprawdopodobniej elementarnych, które noszą nazwę kwarków. To jednak nie jest wszystko. Obecnie znamy 25 cząstek elementarnych. Nie wszystkie są trwałe. Niektóre istnieją przez bardzo krótki czas. Dzielimy je ze względu na wartości czterech własności: masy, ładunku, spinu (własności związanej z wirowaniem wokół własnej osi) i tajemniczego „koloru” nie mającego nic wspólnego z barwą.

Wyróżniamy dwie podstawowe grupy cząstek elementarnych: **fermiony** i **bozony**. Te pierwsze mają spin wyrażony liczbą $\frac{1}{2}$, a te drugie mają spiny wyrażone po prostu

wartością 1 lub 0. Fermiony stabilne są budulcami wszystkich rzeczy i obiektów Wszechświata; funkcja bozonów to pośredniczenie w oddziaływaniach.

Fermiony nienoszące wspomnianego już „koloru” to tzw. leptony, a te, które cechuje jego niezerowa wartość to tzw. kwarki.

LEPTONY:

Zdecydowanie najbardziej znaną i popularną cząstką elementarną jest **elektron**. To ta cząstka, która wchodzi w skład atomów i porusza się poza jądrami atomowymi. Odpowiada za ich właściwości chemiczne. To również cząstka, której ukierunkowany ruch w obrębie przewodnika stanowi prąd elektryczny, bez którego nie można sobie już wyobrazić współczesnej cywilizacji. Wylistujmy teraz jej cechy:

Spin = $\frac{1}{2}$

Ładunek = $-e$ (elementarny ładunek ujemny, najmniejsza porcja wolnego ładunku ujemnego)

Kolor = 0

Średni czas życia – cząstka trwała

Masa = $9,109 \cdot 10^{-31}$ kg (cząstka bardzo lekka, jest 1836 razy „lżejsza” od protonu i 1838 razy „lżejsza” od neutronu).

Powyższa masa to tzw. **masa spoczynkowa**, tj. masa, którą posiada każda cząstka, która nie może poruszać się z prędkością światła (maksymalną osiągalną prędkością we Wszechświecie). Taka cząstka może poruszać się z każdą inną prędkością lub spoczywać i to właśnie w spoczynku wyznaczana jest masa spoczynkowa. Wartość masy mierzona w ruchu jest większa, co jest efektem przewidzianym przez szczególną teorię względności.

Następnym, znanym nauce fermionem jest **mion**. Okazało się, że elektron ma „kuchnię”, który różni się od niego masą spoczynkową i czasem życia. Nie był on przewidywany teoretycznie. Został odkryty zanim ktokolwiek postawił hipotezę o możliwości jego istnienia. To rzadki przykład praktyki przed teorią w fizyce cząstek elementarnych. Lista cech mionu jest następująca:

Spin = $\frac{1}{2}$

Ładunek = $-e$ (elementarny ładunek ujemny, najmniejsza porcja wolnego ładunku ujemnego)

Kolor = 0

Średni czas życia = $2,2 \cdot 10^{-6}$ sekundy

Masa spoczynkowa = około 207 razy większa niż u elektronu.

Nauka odkryła również lepton jeszcze wyższego rzędu. Nazywa się **taon**. Ma ten sam spin i ładunek, co dwa poprzednie, ale żyje jeszcze krócej ($2,9 \cdot 10^{-13}$ sekundy) i ma masę około 3480 razy większą niż elektron.

Istnieją zatem 3 naładowane leptony, z czego tylko jeden – ten „najlżejszy” – jest trwały. Oprócz nich występują we Wszechświecie 3 odpowiadające wymienionym leptonom nienaładowane: **neutrino elektronowe**, **mionowe** i **taonowe**. Potrafią one przechodzić w siebie nawzajem w zjawisku tzw. **oscylacji neutrin**. Ich masa spoczynkowa nie jest dokładnie znana, ale jest różna od zera. Szacuje się, że jest ona rzędu milionowej części masy elektronu. Są to więc cząstki ultralekkie. Wypełniają przestrzeń kosmiczną i bardzo słabo oddziałują z materią.

Podsumowując: leptony mogą mieć różne czasy życia, masy i ładunki. Ich częścią wspólną jest to, że mają spin połówkowy i kolor równy zero.

KWARKI:

Fermionami, które mają spin połówkowy i niezerowe wartości „koloru” są kwarki. To bardzo ciekawe cząstki. Mają ułamkowe wartości ładunku i nigdy nie występują wolno i pojedynczo. Są niezwykle „towarzyskie”. Istnie-

ją trzy możliwe wartości „koloru”: „zielony”, „niebieski” i „czerwony”. Kwarki o tych trzech „kolorach” przyciągają się silnie i tworzą cząstki złożone z takich trójek, zwane **barionami**.

Jedynymi stabilnymi, a ponadto dobrze znanymi i niezmiennie ważnymi barionami są nukleony: proton i neutron (stabilny tylko w obrębie jądra atomowego). Ktoś mógłby powiedzieć: „Te dwie cząstki są do siebie podobne, ale nie są identyczne. Więc czym się różnią?”. Różnią się kombinacjami kwarków, jakie wchodzi w ich skład, a mówiąc ściślej – ich zapachami.

W przyrodzie możliwe jest istnienie 6 zapachów kwarków: u (górny), d (dolny), s (dziwny), c (powabny), b (piękny) i t (prawdziwy). Tylko kwarki o dwóch pierwszych zapachach są stabilne, więc nietrudno domyślić się, że one wchodzi w skład nukleonów. I tak rzeczywiście jest. Proton to kombinacja: uud, a neutron tworzony jest przez kombinację: udd.

Kwarki: d, s oraz b mają ładunek o wartości: $-\frac{1}{3}e$

Kwarki: u, c oraz t mają ładunek o wartości: $+\frac{2}{3}e$

Możemy zatem obliczyć, że kombinacja uud daje w sumie ładunek $+e$ charakterystyczny dla protonu, a kombinacja udd ma wypadkowy ładunek zero i to też się zgadza, gdyż neutron jest elektrycznie obojętny, co ma zresztą odbicie w jego nazwie.

Masy kwarków nie są idealnie znane, tylko w zakresach i mają one tak „rozstrzelone” wartości, że nie sposób dostrzec w tym żadnej prawidłowości.

Oto lista, która przedstawia, ile mniej więcej razy poszczególne kwarki są masywniejsze od elektronu:

Kwark u: 4,5 razy

Kwark d: 9,4 razy

Kwark s: 186 razy

Kwark c: 2530 razy

Kwark b: 8200 razy

Kwark t: 338 000 razy

Co ciekawe, kwark t jest najcięższą, znaną nauce cząstką elementarną. Waży prawie tyle, co atom złota, w skład którego wchodzi 79 protonów i 118 neutronów. To prawdziwy, elementarny gigant.

Fermiony tworzą trzy generacje. Pierwsza generacja, stabilna i tworząca złożone obiekty Wszechświata to: kwark u, kwark d, elektron i neutrino elektronowe. Druga generacja to: kwark c, kwark s, mion i neutrino mionowe. W skład trzeciej generacji wchodzi: kwark t, kwark b, taon i neutrino taonowe. Dwie ostatnie generacje zawierają cząstki niestabilne, o krótkim lub bardzo krótkim czasie życia. Znane są one przede wszystkim jako wynik wysokoenergetycznych zderzeń w akceleratorach cząstek.

Jak dotąd poznaliśmy 12 fermionów. Przejdźmy teraz do omówienia pozostałych 13 cząstek elementarnych z grupy bozonów.

Najbardziej znanym bozonem, dorównującym popularnością elektronowi, jest **foton**. Z fotonów składa się światło (promieniowanie widzialne), a także inne promieniowanie: podczerwone, ultrafioletowe, mikrofalowe, rentgenowskie i radiowe. Ciekawą rzeczą jest fakt, że foton nie ma masy spoczynkowej. Porusza się porusza



Foto – DREAMstime

się w próżni z jedną prędkością – tzw. **prędkością światła**, oznaczaną symbolem „c”. Jej wartość wynosi około 300 000 kilometrów na sekundę i jest to maksymalna prędkość jaką mogą osiągać obiekty Wszechświata. Takie górne ograniczenie prędkości jest fundamentalną cechą szeroko rozumianej przyrody.

Foton ma energię (E), którą można przeliczyć na masę (m) zgodnie ze słynnym w fizyce wzorem:

$$E = mc^2$$

przy czym należy pamiętać, że nie jest to już masa spoczynkowa.

Fotony różnych rodzajów promieniowania różnią się częstotliwością swych drgań. Ich energia jest tym wyższa im wyższa jest częstotliwość (ν). Stałą proporcjonalności jest **stała Plancka** (oznaczana symbolem „h”):

$$E = h \nu$$

I tak na przykład: najniższą częstotliwość ma foton promieniowania radiowego, wyższą – promieniowania mikrofalowego, dalej – podczerwonego, a potem: widzialnego, ultrafioletowego i rentgenowskiego.

Spójrzmy na listę cech charakteryzujących foton:

Spin = 1

Ładunek = 0

Kolor = 0

Średni czas życia – cząstka trwała

Masa spoczynkowa = 0

Następnymi elementarnymi bozonami są tzw. **gluony**. Są to ciekawe, nieobserwowalne w życiu codziennym cząstki, które wchodzą w skład nukleonów, dają duży wkład do ich masy i sprawiają, że kwarki są „towarzystwie” i trzymają się razem. Stąd zresztą bierze się nazwa tych osobliwych bozonów, gdyż słowo „glue” znaczy w języku angielskim: „klej”.

Znamy aż 8 rodzajów gluonów. Oto ich charakterystyka:

Spin = 1

Ładunek = 0

Kolor = różny od zera

Średni czas życia – cząstka trwała

Masa spoczynkowa = 0

Oprócz 9 poznanych bozonów istnieją jeszcze masywne **bozony**: W^+ , W^- i Z^0 oraz słynny **bozon Higgsa**.

Bozony masywne W (cechy):

Spin = 1

Ładunek = -e lub +e (elementarny ładunek, najmniejsza porcja wolnego ładunku)

Kolor = 0

Średni czas życia – $3 \cdot 10^{-25}$ sekundy

Masa spoczynkowa = około 157 600 razy większa niż u elektronu

Bozon masywny Z (cechy):

Spin = 1

Ładunek = 0

Kolor = 0

Średni czas życia – $3,2 \cdot 10^{-25}$ sekundy

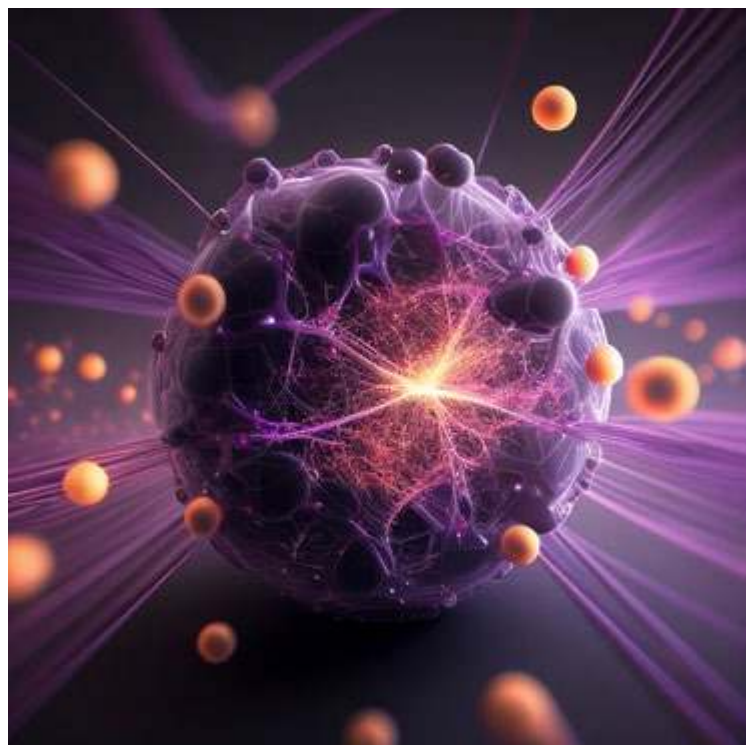


Foto – Dreamstime

Masa spoczynkowa = około 178 800 razy większa niż u elektronu

Bozony te biorą udział w jednym z oddziaływań przyrody, tzw. oddziaływaniu słabym.

Bozon Higgsa został odkryty najpóźniej, bo dopiero w lipcu 2012 roku. Sporo mówiono wtedy o nim w mediach. Jego istnienie było przewidywane teoretycznie od wielu lat, ale potwierdzenie wymagało wiele czasu, cierpliwości i zbudowania nowego akceleratora cząstek (LHC – Large Hadron Collider). Jest to niezwykle ciekawa cząstka. Pozbawiona jest spinu, ładunku i koloru. Ma tylko masę spoczynkową, około 245 000 razy większą niż ma elektron i jest niestabilna. Masywniejszy od niej jest jedynie kwark t. Postuluje się, że pochodzi ona od tzw. pola Higgsa, które gra kluczową rolę w nadawaniu masy spoczynkowej wszystkim cząstkom elementarnym, które ją mają. Pole to miało zerową wartość u początku Wszechświata, przy wysokich temperaturach, a wraz z rozszerzaniem się Wszechświata i obniżaniem się temperatury nabywało niezerowych wartości i wtedy nadawało masy. Można to sobie wyobrazić za pomocą tarczy zegara z ołówkiem. Przy zerowej wartości ołówek jest prostopadły do tarczy i ostrze skierowane ma w jej centrum. Sytuacja jest symetryczna i żadna wartość na tarczy nie jest wskazana. Gdy przestaniemy trzymać ołówek, upadnie on na bok, wskazując którąś z cyfr. Nastąpi tzw. **złamanie symetrii**.

Trzeba tu nadmienić, że oprócz materii wykryto w przyrodzie cząstki antymaterialne. Pierwszą taką cząstką był antyelektron, czyli **pozyton**, którego obecność stwierdzona była po raz pierwszy w promieniowaniu kosmicznym (1932 rok). Fakt ten był potwierdzeniem teoretycznego przewidywania, pochodzącego od tzw. równania Diraca sformułowanego w 1928 roku.

Cząstka elementarna różni się od swojej antycząstki znakiem ładunku i przeciwną wartością „koloru” (jeśli go ma). Różnicy nie ma w spinie, masie spoczynkowej i w czasie życia. Tak zatem, pozyton ma po prostu ładunek $+e$, podobnie jak antymion i antytaon. Antycząstkami kwarków są antykwarki o antykolorach i przeciwnych ładunkach. Bozony W^+ i W^- są dla siebie wzajemnie antycząstkami. Same dla siebie antycząstkami są: fotony, gluony, bozon Higgsa i bozon Z^0 .

Ciekawe są neutrino. Mają one tzw. liczby: elektronową, mionową i taonową (odpowiednio) równe jeden. Te liczby dla odpowiednich antyneutrino wynoszą minus jeden, choć do dziś fizycy nie są pewni czy neutrino i antyneutrino to odrębne cząstki, czy w gruncie rzeczy są one jednym i tym samym. Byłyby to w tym drugim przypadku tzw. neutrino Majorany.

Obecnie wiemy, że Ziemia, Układ Słoneczny i nasza galaktyka – Droga Mleczna są zbudowane wyłącznie z materii. W innym razie obserwowalibyśmy intensywne źródła fotonów pochodzące z **anihilacji**, czyli procesu unicestwiania się materii z antymaterią, a tak się nie dzieje. Procesem odwrotnym do anihilacji jest **kreacja**, kiedy to z wysokoenergetycznego fotonu, w bliskości materii, powstają: cząstka i antycząstka. Anihilacja i kreacja to dwa bardzo ciekawe zjawiska, które wskazują na to, że masa spoczynkowa i ładunek mogą powstawać z fotonów i znikać z wytworzeniem fotonów, pod warunkiem, że bierze w tym udział para odpowiedników, np. elektron i pozyton.

Masa elektronu, fotonów i neutrino jest zanedbywalna w porównaniu z masą protonu i neutronu. Liczba protonów widzialnego Uniwersum jest tego samego rzędu co liczba neutronów, tylko większa. Więc wystarczy przyjąć, że liczba protonów jest rzędu:

$N_p \approx 10^{80}$ (tzw. **liczba Eddingtona**)

i pomnożyć ją przez masę protonu: $1,672 \cdot 10^{-27}$ kg

Otrzymujemy wynik rzędu: 10^{53} kg = 10^{50} ton

Oto masa Wszechświata widzialnego. Trzeba przyznać, że wynik imponujący. Co ciekawe, istnieją liczby bardziej kosmiczne niż liczba Eddingtona. Przykładowo, liczba fotonów Wszechświata szacowana jest na 10^{89} i liczba neutrino też.

Siły

Gdyby cząstki elementarne były wobec siebie obojętne, to przestrzeń Wszechświata wypełniona byłaby nimi w sposób jednorodny mniej więcej tak jak pokój wypełniony jest cząsteczkami powietrza. Taki Wszechświat byłby prosty i nieciekawym. Nie dzieje się tak dlatego, że cząstki elementarne podlegają działaniu sił o charakterze podstawowym, czyli niesprowadzalnym do innych rodzajów oddziaływań. Możliwe jest to z tej przyczyny, że posiadają one pewne własności (takie jak: ładunek, masa, „kolor”), których obecność powoduje ich wzajemne przyciąganie lub odpychanie.

Do dziś fizyka zna cztery podstawowe siły (ściślej: oddziaływania) przyrody: **grawitacyjne**, **elektromagnetyczne**, **silne** i **słabe**.

Oddziaływanie grawitacyjne zostało ujęte ściśle przez samego Izaaka Newtona w II połowie XVII wieku (1687 rok) w postaci **prawa powszechnego ciążenia**. Prawo to mówi, że wszystkie ciała posiadające masę przyciągają się siłą proporcjonalną do iloczynu ich mas i odwrotnie proporcjonalną do kwadratu odległości między nimi.

Oto postać matematyczna tego prawa:

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

Objaśnienia symboli: F – wartość siły, M i m – wartości mas, r – odległość dzieląca masy, G – stała proporcjonalności (tzw. **stała grawitacyjna**).

Dzięki temu równaniu wiemy, że siła jest tym większa im większe są masy, a maleje z odległością do potęgi drugiej, czyli na przykład dla dwa razy większej odległości jest cztery razy mniejsza. Warto zauważyć, że grawitacja jest zawsze przyciągająca i ma nieograniczony zasięg (siła maleje do zera dopiero wtedy, gdy „ r ” zmierza do nieskończoności).

Prawo powszechnego ciążenia jest klasycznym przykładem prawa fizyki, które stanowi ogólny schemat zależności między wartościami wielkości, bez względu na to jakie te wartości są. Innymi słowy, równanie jest jedno bez względu na to czy przyciągają się masy: Ziemi i Marsa, Ziemi i Księżyca, Słońca i Jowisza, itp. To bardzo ważne i ciekawe, że w zjawiskach przyrody można ująć proste zależności, mimo ich różnorodności. To taka fizyczna „miniaturyzacja” bądź „kompaktyfikacja”.

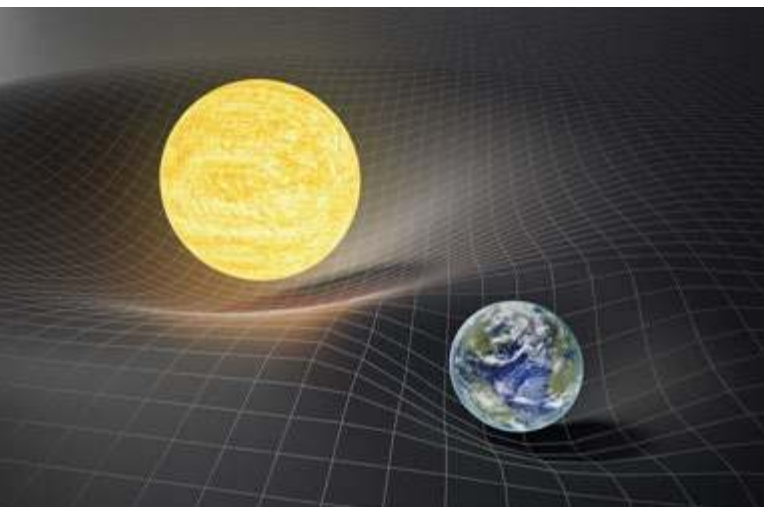
Trzeba nadmienić, że siły są w fizyce przedstawiane jako wektory, czyli odcinki skierowane (strzałki) – obiekty mające długość, kierunek i zwrot. W przypadku oddziaływania grawitacyjnego wektory są zaczepione w środkach mas, mają długość wyznaczaną z powyższego wzoru, a skierowane są wzdłuż linii łączących obie masy, ze zwrotem w kierunku tej drugiej masy.

Nowocześniejszym, lepszym i dokładniejszym ujęciem grawitacji jest **ogólna teoria względności** (OTW) sformułowana w 1915 roku przez wielkiego fizyka – Alberta Einsteina. W teorii tej nie występuje w ogóle pojęcie siły. Zastępuje je zakrzywienie (czasoprzestrzeni) przez masę, które można zobrazować wklęsnięciem gumowej membrany przez położoną na niej kulkę. Każda masa zakrzywia (czasoprzestrzeń), a masy poruszają się po zakrzywionych torach, które są liniami prostymi w innym niż płaska rodzaju przestrzeni (są to tzw. **geodezyjne**). Oddziaływanie grawitacyjne udało się z sukcesem zgeometryzować. To nie jakaś tajemnicza siła na odległość powoduje, że na przykład orbita Ziemi okala Słońce, ale zakrzywiona przez naszą najbliższą gwiazdę (czasoprzestrzeń) sprawia, że Ziemia wykonuje taki, a nie inny ruch.

Matematyka OTW jest bardzo trudna, zatem tylko dla ciekawości przedstawię tutaj najważniejsze równanie tej teorii i omówię je jakościowo:

$$G_{\mu\nu} = \frac{-8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

G – stała grawitacyjna, c – prędkość światła, $G_{\mu\nu}$ – tensor Einsteina, $T_{\mu\nu}$ – tensor energii-pędu.



Równanie to jest tensorowe, więc przedstawia równość dwóch tensorów. Tensor to wektor wyższego rzędu. W tym przypadku mają one aż 16 składowych ($\mu = 1,2,3,4$ oraz $\nu = 1,2,3,4$, w sumie: $4 \cdot 4 = 16$), czyli znacznie więcej niż znane nam z przestrzeni trójwymiarowej wektory z trzema składowymi, będącymi rzutami wektora na osie: X, Y, Z. Tensory są potrzebne w OTW dlatego, że operuje się w czterowymiarowej czasoprzestrzeni i dlatego, że potrzeba aż tylu składowych, aby niczego nie pominąć.

Z równania wynika, że mając daną stronę prawą (związaną z materią), możemy wyznaczyć tensor Einsteina po stronie lewej, który to jest zależny od tzw. **tensora metrycznego**. Gdy mamy już tensor Einsteina, obliczamy tensor metryczny, a jest on bardzo ważny, gdyż w pełni determinuje zakrzywienie (czasoprzestrzeni). Gdy materii „po prawej” nie ma, to tensor ten wyznacza przestrzeń płaską, czyli niezakrzywioną, w której najkrótszą drogą między dwoma punktami jest łączący je prosty odcinek i którą znamy ze szkoły i z życia codziennego (przybliżenie, idealizacja).

Kolejnym rodzajem oddziaływania, jaki poznamy jest oddziaływanie pomiędzy dwoma ładunkami. Jest ono również nieograniczone w swym zasięgu, proporcjonalne do iloczynu ładunków i słabnące z kwadratem ich odległości od siebie. W tym przypadku jednak może mieć ono charakter przyciągający jak i odpychający, co ma związek z tym, że są dwa podstawowe rodzaje ładunków: dodatni i ujemny. Te dodatnie odpychają się, tak jak ujemne. Ładunek dodatni i ujemny przyciągają się.

Prawo rządzące oddziaływaniem elektrycznym dwóch nieruchomych ładunków to **prawo Coulomba**, sformułowane w 1785 roku i mające strukturę matematyczną analogiczną do tej dla prawa powszechnego ciążenia.

$$F = k \frac{Qq}{r^2}$$

Objaśnienia symboli: F – wartość siły, Q i q – wartości ładunków, r – odległość dzieląca ładunki, k – stała proporcjonalności.

Wyraźnie widać, że masa jest dla grawitacji tym, czym ładunek dla oddziaływań elektrycznych (jest swoistym „ładunkiem grawitacyjnym”).

Ładunek elektryczny to własność cząstek materii, która sprawia, że nie są one sobie obojętne, ale zwracają w swoim kierunku lub „od siebie” tym szybciej im mniejsza odległość je dzieli. Możemy wyobrazić sobie taki obraz: ładunek jest źródłem pola elektrycznego. Matematycznie pole to stanowią wektory E w całej przestrzeni zwrócone od źródła lub do źródła, a realnie – jest to zmieniona przestrzeń, która sprawia, że inny ładunek w jej obrębie nie będzie spoczywał, ale wykona ukierunkowany ruch. Mówiąc jaśniej, jeśli w polu elektronu umieścimy inny elektron, to wykona on ruch „od źródła”, a jeśli pozyton – nastąpi ruch w kierunku źródła.

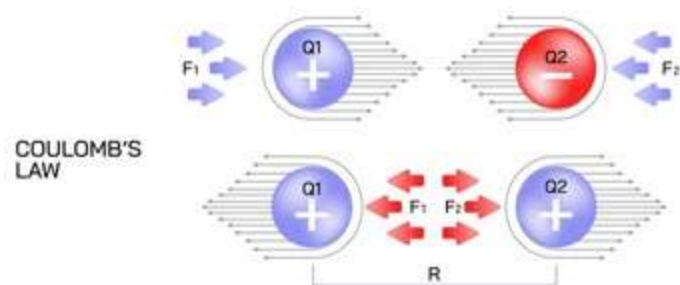
Nieruchomość ładunków jest pewną idealizacją, gdyż ich oddziaływanie sprawia, że od razu przestają one być nieruchome. Dlatego oprócz pola elektrycznego istnieje także pole magnetyczne B, które wytwarzane jest przez ładunki w ruchu i działa na ładunki będące w ruchu. W takiej, bardziej rzeczywistej sytuacji, oddziaływanie ma charakter elektromagnetyczny.

Jak już wiemy, źródłem pola elektrycznego jest ładunek. Jest to treść jednego z czterech **równań Maxwella** – bardzo ważnych dla fizyki równań, sformułowanych w 1864 roku przez Jamesa Clerka Maxwella i będących największym osiągnięciem fizyki XIX wieku.

Drugie równanie Maxwella stwierdza, że pole magnetyczne nie ma źródła, co należy rozumieć tak, że nie istnieje coś takiego jak ładunek magnetyczny. Równania: trzecie i czwarte dotyczą zmian. Zmieniające się pole elektryczne (a także prądy) generują pole magnetyczne, a zmieniające się pole magnetyczne generuje pole elektryczne.

Omówione powyżej dwa rodzaje oddziaływań są nam znane z życia codziennego. Ziemia przyciąga nas, przedmioty spadają na ziemię, piorun to elektrony zbiegające w kierunku dodatnio naładowanej Ziemi, a między naelektryzowaną odzieżą a ciałem czasami przeskakują iskry. Oprócz nich istnieją jeszcze dwa zupełnie inne oddziaływania: słabe i silne. Znane są one tylko fizykom i mają niezmiernie mały zasięg, co sprawia, że nie doświadczamy ich na co dzień.

Oddziaływanie słabe przebiega na odległości rzędu 10^{-18} metra. To niezmiernie krótki dystans, tysiąc razy mniejszy niż średnica protonu. W tym oddziaływaniu mogą brać udział kwarki, leptoni naładowane jak i nienaładowane. Jako jedyne z czterech oddziaływań, może ono doprowadzać do zmiany tożsamości cząstek oddziaływujących. Rodzaj procesu, który to umożliwia to tzw. **prąd ładunkowy**. Biorą w nim udział znane nam już bozony W^+ i W^- . Są one bardzo niestabilne, więc istnieją bardzo



krótko. Jeżeli istnieją krótko, to mogą pokonać niewielki dystans, a jako że są jednymi z nośników oddziaływań słabych – ma ono dlatego niezwykle krótki zasięg.

Przykład oddziaływania słabego (prąd ładunkowy):

Kwark d emituje bozon W i zamienia się w kwark u.

Bozon W natrafia na neutrino elektronowe i zamienia je w elektron.

Sumarycznie: kwark d + neutrino elektronowe = kwark u + elektron.

Inny, przykładowy proces, tym razem z wymianą bozonu W^+ : Neutrino elektronowe emituje bozon W^+ i zamienia się w elektron.

Bozon W^+ natrafia na inny elektron i zamienia go w neutrino elektronowe.

Sumarycznie: neutrino elektronowe + elektron = elektron + neutrino elektronowe.

Oprócz prądu ładunkowego istnieje także **prąd neutralny**, który nie zmienia tożsamości cząstek, a jedynie ich prędkości i kierunku ruchu. Nośnikiem tego procesu jest masywny bozon Z^0 .

Przykładowo:

Neutrino elektronowe emituje bozon Z^0 i pozostaje „sobą”.

Bozon Z^0 natrafia na elektron i zmienia tylko jego ruch.

Sumarycznie: neutrino elektronowe + elektron = neutrino elektronowe + elektron.

Oddziaływanie silne ma zasięg 10^{-15} metra, czyli jest tego rzędu, co średnica protonu. Nic dziwnego, gdyż ono jest odpowiedzialne za towarzyskość kwarków i za spójność nukleonów. Nośnikami tego oddziaływania są poznane wcześniej gluony. Jako że same niosą niezerowy „kolor” (swoisty „ładunek oddziaływań silnych”) potrafią oddziaływać również między sobą, wymieniając inne gluony. Kwarki o tych samych „kolorach” odpychają się, a przyciąganie następuje przy różnych „kolorach” i w przypadku „koloru” i „antykoloru”. Pierwszy przypadek obserwujemy u barionów, a więc także nukleonów, a drugi – u **mezonów**, które zbudowane są z kwarka i antykwarka. Te ostatnie cząstki zapewniają stabilność jąder atomowych.

Oddziaływania: grawitacyjne i elektromagnetyczne słabną z odległością. Oddziaływanie silne jest ciekawe. Rośnie ono mniej więcej proporcjonalnie do odległości „r” (na odcinku 10^{-15} metra):

$$F \sim r$$

Tak więc, dla bliskiego zera „r” oddziaływanie jest tak niewielkie, że kwarki są praktycznie swobodne. Gdy odległość przekroczy 10^{-15} metra, jego natężenie staje się tak duże, że kwarki nie mogą już być od siebie dalej, bo tyle jest energii, że powstają nowe kwarki (tworzą się mezony). Opisane zjawisko nosi nazwę **asymptotycznej swobody**.

Przedstawmy teraz przykład oddziaływania silnego między dwoma kwarkami o różnych „kolorach”:

Kwark „niebieski” → Kwark „zielony” + gluon „niebieski-antyzielony”.

Kwark „zielony” + „gluon niebieski-antyzielony” → Kwark „niebieski”.

W przypadku oddziaływania między kwarkiem i antykwarkiem o „kolorze” i „antykolorze”:

Kwark „czerwony” → Kwark „niebieski” + gluon „czerwony-antyniebieski”.

Kwark „antyczerwony” + gluon „czerwony-antyniebieski” → Kwark „antyniebieski”.

Wedle współczesnych teorii kwantowych, nie tylko poznane, ciężkie bozony i gluony są pośrednikami oddziaływań. Foton uważany jest za cząstkę przenoszącą oddziaływanie elektromagnetyczne. Postuluje się też istnienie grawitonu – pośrednika w grawitacji. Miałby on mieć spin 2 (wyjątek) i zerową masę spoczynkową. Jego istnienie jest jednak w sferze hipotez.

Wymienione cząstki mają w procesach oddziaływań charakter **wirtualny**, co znaczy, że fizycy wierzą, że pojawiają się one pomiędzy przyciągającymi się bądź odpychającymi fermionami, ale istnieją tylko przez skończony czas procesu i nie podlegają obserwacji.

Warto tutaj dodać, że znane są w fizyce siły o charakterze nieelementarnym i przyciągającym. Są to tak zwane **siły jądrowe**. Odpowiadają one za stabilność jąder atomowych, które to, jak już wiemy, prawie zawsze składają się z protonów i neutronów. Jako że protony mają ładunki dodatnie, to ich wzajemne odpychanie zdestabilizowałoby prawie każde jądro. Zapobiegają temu siły jądrowe, które na dystansach rzędu średnicy protonu są od tego odpychania po prostu silniejsze.

Pośrednikami oddziaływania jądrowego są znane nam już mezony, które swoją nazwę biorą od przedrostka „mezo” (z greckiego: „środkowy”). Mają one po prostu masę pośrednią między elektronami a nukleonami. Siły jądrowe dotyczą w prawie takim samym stopniu protonów, neutronów jak i par: proton-neutron. Można je uważać za skomplikowaną wypadkową oddziaływań silnych, które mają miejsce w obrębie nukleonów.

Porównajmy teraz relatywne wartości sił działających między dwoma kwarkami (są to cząstki, które potrafią oddziaływać na każdy z czterech omówionych sposobów). Przyjmujemy wartość siły grawitacji za jeden:

Grawitacyjnie: 1

Słabo: 10^{-25}

Elektromagnetycznie: 10^{36}

Silnie: 10^{38}

Widzimy, że grawitacja jest bardzo słaba. Obserwujemy ją na co dzień dlatego, że zauważalna jest dla ogromnych mas (planety, gwiazdy, galaktyki) i nie przesłania jej wtedy elektromagnetyzm (bo obiekty te są elektrycznie obojętne), ani oddziaływania silne i słabe, które, jak już wiadomo, liczą się tylko w mikroświecie cząstek elementarnych.

Zdecydowany prym wiedzie oddziaływanie silne, więc jego nazwa jest zrozumiała, a oddziaływanie słabe co prawda o 13 rzędów wielkości ustępuje liderowi, ale mimo takiej nazwy jest 10^{25} razy silniejsze od grawitacji.

Wszystko wskazuje na to, że istnieją tylko 4 podstawowe siły przyrody. Nie jest to pewne, więc postuluje się

istnienie innych rodzajów oddziaływań, np. między materią a antymaterią lub w obrębie ciemnej energii. To drugie miałyby być odpychające i odpowiadać za coraz szybsze rozszerzanie się Wszechświata. Postulować to jednak nie to samo co udowodnić istnienie. Zatem poszukiwania trwają.

Ruch

Jak zostało już wspomniane w poprzednim rozdziale, oddziaływania sprawiają, że cząstki materialne przyciągają się lub odpychają, czyli wykonują ruchy. Jako że siły działają zawsze, to materia we Wszechświecie jest w nieustannym ruchu. Ruszają się kwarki w nukleonach, jądra atomowe i elektrony w atomach i cząsteczkach, drgają cząsteczki w ciałach stałych, poruszają się drobiny cieczy i gazu.

Na wysokim poziomie złożoności, na którym działa już tylko grawitacja, można zaobserwować ruch planet, gwiazd i galaktyk. Przykładów nie trzeba szukać daleko. Ruch Ziemi wokół własnej osi odpowiada za następstwo dnia i nocy, a jej ruch wokół Słońca – za następstwo pór roku. Słońce również nie jest statyczne. Porusza się wokół własnej osi i wokół centrum naszej galaktyki – Drogi Mlecznej. Jeden obrót zajmuje mu – bagatela – 225 milionów lat.

Istnieją różne rodzaje ruchów. Większość znamy z życia codziennego. Oto lista przykładów:

- Ruch po linii prostej – przykład: samochód poruszający się po prostej drodze,
- Ruch po krzywej – przykład: samochód poruszający się i robiący zakręty,
- Ruch po okręgu – przykład: dziecko poruszające się na karuzeli,
- Ruch po elipsie – przykład: planeta Neptun okrążająca Słońce,
- Ruch po dowolnej krzywej zamkniętej – przykład: Formuła 1 robiąca pełne okrążenie,
- Ruch po odcinku, oscylujący – przykład: ciężarek oscylujący na sprężynie,
- Ruch po łuku, oscylujący – przykład: ruch wahadła zegara.

Prędkości osiągalne w ruchu nie mogą przekroczyć prędkości światła. To podstawowa cecha Wszechświata. Nic nie porusza się szybciej niż circa 300 tysięcy kilometrów na sekundę. Jak już wiemy, prędkość „c” mają tylko ciała bez masy spoczynkowej (np. fotony), a ciała z masą spoczynkową mogą dowolnie blisko zbliżyć się do „c”, ale nigdy jej wartości nie osiągną.

Dobrym przykładem ruchu jest spadek ciała w polu grawitacyjnym Ziemi. Niedaleko powierzchni Ziemi możemy przyjąć, że działa na nie stałe przyspieszenie ziemskie $a = g = \text{około } 10 \text{ m/s}^2$. Nietrudno obliczyć, że ciało spadające na ziemię z wysokości 80 metrów będzie przechodzić przez następujące stany (pomijamy opór powietrza):

Po 1 sekundzie: $x = 5 \times 1^2 = 5$ metrów (pokona 5 metrów i będzie na wysokości 75 metrów).

Po 2 sekundzie: $x = 5 \times 2^2 = 20$ metrów (będzie na wysokości $80 - 20 = 60$ metrów).

Po 3 sekundzie: $x = 5 \times 3^2 = 45$ metrów (będzie na wysokości $80 - 45 = 35$ metrów).

Po 4 sekundzie: $x = 5 \times 4^2 = 80$ metrów (uderzy w ziemię).



Foto – Adobe Stock

Wyraźnie widać, że w każdej następnej sekundzie ciało będzie pokonywało dłuższe odcinki przestrzeni: 5 m, $20 - 5 = 15$ m, $45 - 20 = 25$ m, $80 - 45 = 35$ m.

Przypadek ciała oscylującego na sprężynie jest o tyle ciekawy, że w tym ruchu przyspieszenie nie jest stałe, ale proporcjonalne do wychylenia.

W każdym ruchu po linii prostej lub jej fragmencie (odcinku) zmianie może ulec jedynie wartość prędkości. Natomiast w ruchach po dowolnej krzywej, otwartej lub zamkniętej, zmianie ulega także jej kierunek. Jest tak dlatego, że prędkość jest wektorem. Przykładowo, w przypadku obrotów na karuzeli w każdej chwili nasza prędkość zmienia kierunek, a w przypadku parkowania samochodu zmieniamy jej kierunek i wartość (skręcamy i hamujemy). Przyspieszenie mające wpływ na kierunek prędkości nosi nazwę **radialnego**.

Pozostaje zasadnicze pytanie: co jest źródłem przyspieszenia? Co sprawia, że prędkość się zmienia? To ciekawe i podstawowe zagadnienie. W fizyce obowiązuje fundamentalna **zasada bezwładności**, która mówi, że każde ciało zachowuje swój stan kinetyczny, to znaczy, że gdy spoczywa to „samo z siebie” będzie spoczywać, a gdy porusza się z jakąś prędkością, to dalej z tą prędkością będzie się poruszać. Wydaje się to mało intuicyjnie, gdyż z życia codziennego wiemy, że ciała wprowadzone raz w ruch po pewnym czasie zatrzymują się. Jest tak jednak tylko dlatego, że w codziennych doświadczeniach działają **siły tarcia**, które nie są elementarne, ale wynikają z nacierania na siebie nierówności (chropowatości) na powierzchniach ciał. Zjawisko niekończącego się ruchu byłoby doskonale widoczne w pustej przestrzeni kosmicznej, w niemal doskonałej próżni. Kamień rzucony w taką przestrzeń poruszałby się stale nawet na odcinku milionów kilometrów.

Zasada bezwładności jest tożsama z **I zasadą dynamiki Newtona**. Wracając jednak do pytania postawionego w poprzednim akapicie, skoro ciała same z siebie nie mogą zmieniać swej prędkości, to musi być jakaś zewnętrzna przyczyna przyspieszeń. Tą przyczyną są siły.

Przyspieszenie ciała jest proporcjonalne do działającej na nie siły i odwrotnie proporcjonalne do jego masy. Przyspieszenie ma kierunek tej siły. Jest to treść **II zasady dynamiki Newtona**. Wyraża się ją matematycznie w następujący sposób:

$$a = \frac{F}{m}$$

Masa jest miarą podatności ciała na zmianę prędkości przy danej sile. Im jest ona większa, tym mniejsze jest przyspieszenie („m” w mianowniku). Czyli tym większy jest „opór” przeciw zmianie prędkości. Mówimy, że masa jest miarą bezwładności ciała.

Istnieje także **III zasada dynamiki Newtona**, która mówi, że siły z jakimi działają na siebie dwa ciała są równe co do wartości i mają przeciwne zwroty. Akcja jest równa reakcji.

Zasada bezwładności jest bardzo głęboką zasadą fizyki. Na tyle głęboką, że nikt nie wie co stanowi jej przyczynę. Dlaczego ciała takie są, że podtrzymują swój stan kinetyczny i potrzeba siły, by go zmienić? Zdaniem znanego fizyka XIX wieku – Ernsta Macha ciała takie są dlatego, że jest ich w kosmosie bardzo wiele. Innymi słowy, według **zasady Macha**, jedno, samotne ciało we Wszechświecie nie byłoby bezwładne. To cechy globalne mają wpływ na właściwości lokalne.

W życiu codziennym pojęcie siły jest bardzo użyteczne i popularne. Mówimy o siłach tarcia, nacisku lub uderzenia. Nie mają one jednak charakteru elementarnego i chociaż wiemy, jak wyznaczać ich wartości musimy wiedzieć, że są to pojęcia abstrakcyjne. Nigdy przecież nie widzimy wektorów sił w postaci strzałek przy ciałach.

Na przykładzie elementarnego oddziaływania grawitacyjnego możemy pokazać, że możliwe jest uzyskanie ścisłego obrazu fizycznego z pominięciem pojęcia siły. Wykorzystamy dwa poznane już wzory (z II zasady dynamiki i prawa powszechnego ciążenia) i połączymy je:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{\frac{GMm}{r^2}}{m} = \frac{GM}{r^2}$$

Teraz widzimy to tak: ciało o masie „m” zawsze doznaje przyspieszenia w kierunku ciała o masie M, które jest proporcjonalne do M i odwrotnie proporcjonalne do kwadratu odległości od masy M. A więc: przyspieszenie to jest tym większe im większa jest masa M i tym mniejsze i większa jest odległość od masy M.

Jeszcze ogólniejszy, nawet bardzo ogólny, obraz jest następujący: ciała przyspieszają w swoim kierunku lub „od siebie” dlatego, że mają pewne właściwości (np. masa, ładunek, „kolor”) i o wartości tych przyspieszeń decydują też odległości między nimi.

Układ, który porusza się prostoliniowo, ze stałą prędkością, to tzw. **układ inercjalny**. Wyobraźmy sobie, że poruszamy się autobusem, po prostej drodze i utrzymywana jest stale ta sama wartość prędkości. Jeżeli zasłoniemy szybę i założymy słuchawki, to nie będziemy w stanie

stwierdzić, czy się poruszamy czy nie, a jeśli się poruszamy, to z jaką prędkością. Żadne zjawisko wewnątrz autobusu nie będzie nam w stanie pomóc w odpowiedzi na to pytanie.

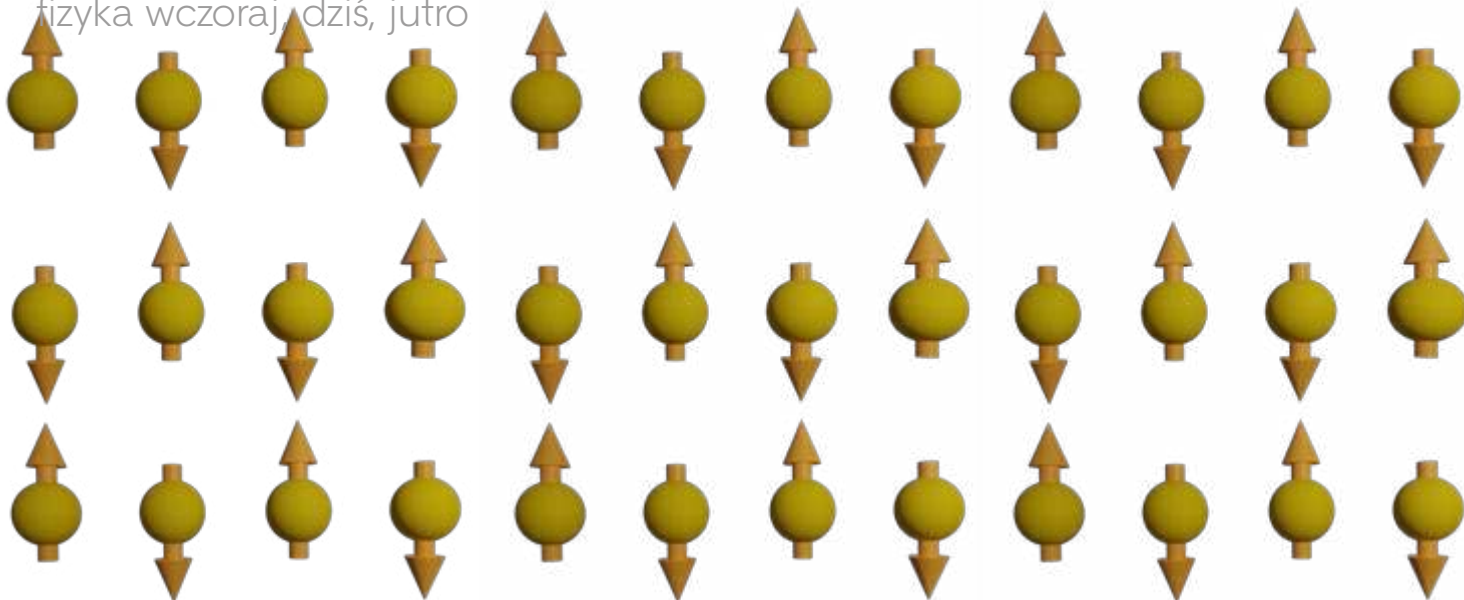
Obserwacja ta jest zgodna z fundamentalną **zasadą względności**, która mówi, że prawa fizyki są takie same, a zjawiska fizyczne przebiegają tak samo w każdym układzie inercjalnym. Aby wiedzieć jaki jest nasz stan ruchu, musielibyśmy odnieść się do świata poza autobusem. Widząc drzewa przy drodze poruszające się „do tyłu” wiedzielibyśmy, że się poruszamy, gdyż można przyjąć, że pobocze jest w spoczynku. Jest to jednak tylko kwestia umowy. W przestrzeni kosmicznej, pasażer „statku inercjalnego” nie byłby pewien tego czy jest w ruchu, widząc przez okno spoczywający, inny statek. Mógłby tylko stwierdzić, że względem tamtego statku jest w spoczynku. Ważny wniosek, jaki wynika z tych rozważań jest taki: ruch ze stałą prędkością, po linii prostej jest **względny**.

Wracając do przykładu autobusu, wyobraźmy sobie, że pojazd ten hamuje. Jakaś tajemnicza siła wyrzuca nas do przodu. Jest to **siła bezwładności w hamowaniu** – przykład **siły pozornej**. Jest ona pozorna dlatego, że tak naprawdę z nami nic się nie dzieje. Poruszaliśmy się i, zgodnie z zasadą bezwładności, przy hamowaniu nadal chcemy poruszać się tak jak poprzednio. To tylko autobus zahamował i dlatego „wpadliśmy” na siedzenie przed nami. Siły pozorne są **bezzródłowe**. Nie jest trudno zrozumieć, dlaczego. W momencie hamowania przed szybą autobusu nie ma żadnego źródła siły, a siły właściwe zawsze mają źródła (takie jak: ładunek, masa, „kolor”). Innym przykładem siły pozornej jest **siła odśrodkowa**, która wyrzuca nas „na bok” podczas skręcania samochodem lub kręcenia się na karuzeli.

Ważny jest też wniosek, który płynie z powyższych rozważań nad ruchem ze zmienną prędkością tzw. **układów nieinercjalnych**. Efekty działania sił pozornych są obserwowane w obrębie tych układów, więc jeśli one występują, to znaczy, że układ jest w ruchu. W tym przypadku możemy stwierdzić, czy jesteśmy w ruchu nie odnosząc się do obserwacji świata zewnętrznego. Mówimy, że ruch z przyspieszeniem różnym od zera jest **bezwzględny**.

W celu lepszego zrozumienia tego zagadnienia, wróćmy do obrazowania za pomocą ruchu autobusu. Kiedy autobus hamuje, osoba na przystanku, która widziana była w „ruchu” w kierunku autobusu również się zatrzymuje. Jeżeli jednak spytamy tą osobę czy doznawała podczas naszego hamowania działania jakichś sił, zaprzeczy temu. Stąd wnioskujemy, że to my poruszaliśmy się naprawdę, a nie osoba na przystanku. Jesteśmy tego pewni.

Inny przykład pochodzi od samego Izaaka Newtona. Gdy widzimy wiadro z wodą, na powierzchni której pojawia się wklęsłość (siła odśrodkowa!), to istnieje tylko jeden słuszny wniosek: wiadro wiruje wewnątrz świata, a nie świat wokół wiadra. Ruch obrotowy to zawsze ruch.



Antyferromagnetyki

– materiały przyszłości dla elektroniki?

Magnesy otaczają nas ze wszystkich stron i można znaleźć je w bardzo wielu miejscach – w samochodach, zabawkach, zamkach do szafek, głośnikach, komputerach, elektrowniach, szpitalach.

Michał Grzybowski

Nieczęsto zwracamy na nie uwagę i przyzwyczailiśmy się do ich obecności oraz do tego, że czynią nasze życie łatwiejszym. Znajdują one szerokie zastosowanie w wielu urządzeniach, z którymi stykamy się w codziennym życiu. Dzięki nim możemy trwale przechowywać nasze dane w postaci elektronicznej, możliwa jest zamiana energii mechanicznej w elektryczną. Magnesy trwale zbudowane są z materiałów ferromagnetycznych takich jak żelazo, kobalt, nikiel, ich związki chemiczne lub niektóre związki manganu. Jest to jednak wąska i tylko jedna z wielu grup materiałów magnetycznych. Czy materiały magnetyczne inne niż ferromagnetyki także mogą znaleźć zastosowanie?

1. Moment magnetyczny

Wszystkie materiały złożone są z atomów. Zaś każdy atom zbudowany jest z jądra i elektronów. Elektrony wykazują duży **moment magnetyczny** (w porównaniu

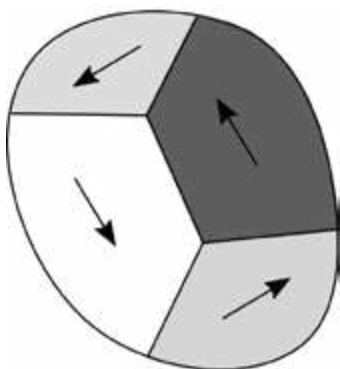
z nukleonami budującymi jądro), który można rozumieć jako pewną małą „porcję” magnetyzmu. Jest to wielkość wektorowa, a więc ma określony kierunek i zwrot w przestrzeni. Moment magnetyczny różnych elektronów w atomie może się sumować zgodnie z regułami dodawania wektorów i zasadami mechaniki kwantowej. Taki całkowity moment możemy przypisać całemu atomowi. I tu dochodzimy do kluczowego momentu. W zależności od tego czy i jak porządkują się momenty magnetyczne atomów względem siebie możemy mówić o różnych typach materiałów bądź o różnych zachowaniach magnetycznych. Warto pamiętać, że w zależności od warunków zewnętrznych (temperatury, ciśnienia itp.) ten sam obiekt może prezentować odmienne zachowania.

2. Ferromagnetyki

Jeśli w danej strukturze krystalicznej atomy są odpowiednio rozmieszczone – a także elektrony w atomach tworzących tę strukturę – możemy mieć do czynienia z sytuacją, w której momenty magnetyczne atomów oddziałują ze



Rys. 1. Schematyczne i uproszczone przedstawienie **ferromagnetyki**. Atomy (symbolizowane przez kule) wykazują moment magnetyczny (symbolizowany przez strzałki). Ich kierunek i zwrot są uporządkowane w wybranym kierunku (tutaj – w górę) bez zewnętrznego pola.



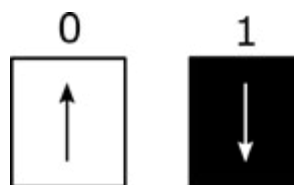
Rys. 2. Schematyczne przedstawienie domen ferromagnetyka. Cała objętość materiału dzieli się na fragmenty, zwane domenami, w których zachowane jest ferromagnetyczne uporządkowanie. Kierunek i zwrot momentów magnetycznych atomu (których liczba jest bardzo duża w każdej domenie) jest zaprezentowany przez strzałki. Różne odcienie szarości symbolizują obraz, który może być zaobserwowany metodami eksperymentalnymi czuły na uporządkowanie domen. Do takich metod należą na przykład techniki wykorzystujące dichroizm magnetyczny.

sobą bardzo silnie („wyczuwają” swoją obecność) porządkując swoje kierunki i zwroty w tę samą stronę w znacznej objętości materiału. Jeśli jest to proces spontaniczny, który przebiega bez zewnętrznego pola magnetycznego mamy do czynienia z ferromagnetykiem (Rys. 1).

To właśnie te materiały nazywamy potocznie magnetycznymi, choć ściśle rzecz biorąc wszystkie substancje wykazują pewne zachowania magnetyczne. W dużej objętości, ferromagnetyki mają tendencję do tworzenia domen, czyli dzielenia się na fragmenty o uporządkowaniu ferromagnetycznym, jednak kierunek i zwrot momentów magnetycznych różni się między domenami (Rys. 2). Nawet bardzo niewielkie zewnętrzne pole magnetyczne może uczynić taki materiał jednorodnym magnetycznym – jednodomenowym. W takim przypadku momenty magnetyczne atomów tworzących kryształ (których jest ogromna liczba) sumują się tworząc jeden „duży” wektor namagnesowania. Takie namagnesowanie może porządkować się zgodnie z polem magnetycznym ziemi tworząc igłę kompasu lub może stanowić element komórki pamięci magnetycznej niezbędnej we współczesnej elektronice.



Rys. 3. Magnetyczny dysk twardy; nad dyskiem, który składa się z wielu niewidocznych okiem komórek pamięci, widoczne jest ramię z głowicą, która porusza się by dokonywać odczytu i zapisu.



Rys. 4. Symboliczna reprezentacja dwóch stanów komórki pamięci, jej namagnesowania i zapisanej informacji.

3. Pamięci magnetyczne

Jak działa komórka pamięci, których całe mnóstwo można znaleźć w magnetycznych dyskach twardych (typu HDD – hard disc drive, Rys. 3) a także centrach danych wykorzystywanych przez największe portale społecznościowe oraz bazy danych? Wszak to tam są zapisane informacje, zdjęcia i dokumenty, o których często mówimy, że są zapisane w „chmurze”.

Tak naprawdę, gdzieś na świecie, choćby bardzo daleko istnieje fizyczna reprezentacja tej informacji w postaci zero-jedynkowej zapisanej na komórkach pamięci. Pojedyncza komórka pamięci zbudowana jest z ferromagnetyka w taki sposób by jego namagnesowanie przyjmowało co najwyżej dwie orientacje różniące się o 180 stopni (Rys. 4). Takie dwa stany mogą reprezentować „0” i „1” w systemie dwójkowym, który umożliwia zapisywanie informacji.

W magnetycznym dysku twardym namagnesowanie może zostać zmienione poprzez zewnętrzne pole magnetyczne (wytworzone przez głowicę) – będzie to operacja zapisu danych. Jeśli chcemy dowiedzieć się czy w danej komórce zapisane jest 0 czy 1, możemy użyć prądu elektrycznego. Tym razem komórka może przemagnesować głowicę pracującą w trybie odczytu i na niej zostanie odwzorowane namagnesowanie. Impuls prądu elektrycznego płynącego przez układ referencyjnych warstw magnetycznych w głowicy pozwoli na stwierdzenie stanu komórki pamięci za pomocą zmierzonego oporu elektrycznego. Ten opór dla dwóch możliwych stanów komórki będzie się znacząco różnił. Jest za to odpowiedzialny efekt gigantycznego magnetooporu (gigantyczny, bowiem wartości oporu między dwoma stanami różnić się mogą aż o tysiące procent!), który pozwala na odczytanie danych.

4. Ograniczenia ferromagnetyków

Wśród zalet pamięci zbudowanej z ferromagnetyków należy wymienić przede wszystkim jej trwałość i brak konieczności dostarczania energii do utrzymania zapisanych informacji. Warto jednak uświadomić sobie pewne jej ograniczenia. Po pierwsze, jeśli narazimy nasz magnetyczny dysk twardy na przypadkowe, duże zewnętrzne pole magnetyczne istnieje niebezpieczeństwo utraty zapisanych tam danych. Podobnie jest z magnetycznymi paskami obecnymi na kartach płatniczych i biletach np. parkingowych lub komunikacji miejskiej. Jeśli taki bilet włożymy do kieszeni z magnetycznym zamkiem lub wraz z zabawką z magnesem – jest bardzo prawdopodobne, że bilet podczas kontroli okaże się nieważny lub nie pozwoli nam wyjechać z parkingu.

Na szczęście karty kredytowe lub bankomatowe projektowane są tak by wykazywały większe pole koercji



Rys. 5. Schematyczne i uproszczone przedstawienie **paramagnetyka**. Atomy (symbolizowane przez kule) wykazują moment magnetyczny (symbolizowany przez strzałki), które są ukierunkowane chaotycznie bez zewnętrznego pola magnetycznego.

będąc odpornymi na typowe natężenia pól magnetycznych, które spotykamy w codziennym życiu. Wciąż jednak pozostaje problem dużych pól, które spotykamy rzadziej, ale występują one na przykład w gabinetach badań medycznych metodą rezonansu magnetycznego. Wymazanie informacji zapisanej na nośniku magnetycznym jest spowodowane tym, że ferromagnetyk uporządkuje swoje momenty magnetyczne zgodnie z kierunkiem zewnętrznego pola. Z ciągu zer i jedynek pozostaną same tylko zera lub jedynki.

Informacja magnetyczna jest wymazywana również, gdy temperatura przekroczy pewną krytyczną wartość, zwaną temperaturą Curie (która swą nazwę bierze nie od Marii Skłodowskiej, lecz od jej męża Piotra, który ją badał), inną dla każdego materiału, powyżej której materiał traci swoje uporządkowanie a jego momenty magnetyczne zaczynają chaotycznie dezorganizować się (jest to zachowanie paramagnetyczne – Rys. 5).

Ponadto, w temperaturze pokojowej mamy bardzo ograniczony wybór ferromagnetyków – są to przede wszystkim metale. Próżno szukać tu pożądanych składników półprzewodników. Wreszcie operacja zapisu, czyli zmiany zwrotu namagnesowania zajmuje czas rzędu nanosekund. Może wydawać się, że to szybko, ale biorąc pod uwagę możliwości i potrzeby dzisiejszej elektroniki to wielkość niezbyt imponująca.

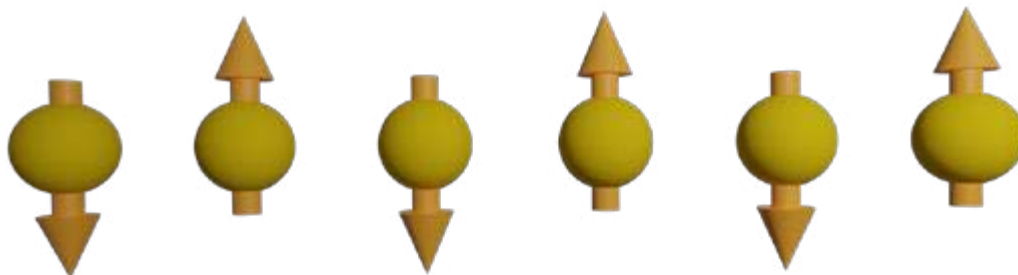
Jest jeszcze jeden ważny fakt. Pojedyncza, namagnesowana komórka pamięci, wytwarza swoje pole magnetyczne. Może ono wpływać na sąsiadujące komórki zaburzając niezależny proces odczytu i zapisu. Im większa miniaturyzacja urządzeń, a więc mniejsze komórki znajdujące się bliżej siebie, to zjawisko gra większą rolę uniemożliwiając ekstremalne zwiększanie gęstości zapisu danych, czyli liczby komórek pamięci na jednostkę objętości.

5. Antyferromagnetyki

Wspomniane wyżej ograniczenia pamięci magnetycznych mogą częściowo rozwiązywać materiały zwane antyferromagnetykami. Są one niewrażliwe nawet na znaczne pola magnetyczne. Są bardzo różnorodną grupą materiałów, które mogą być izolatorami, półprzewodnikami lub metalami, występują one naturalnie w przyrodzie (przykładem jest tlenek niklu lub tlenki kobaltu). Ich dynamika obrotów momentów magnetycznych jest aż tysiącrotnie większa niż ferromagnetyków! Wiele z nich wykazuje wyższe temperatury krytyczne niż ferromagnetyki.

Antyferromagnetyki znane są już od dziesiątek lat, lecz dopiero od niecałej dekady w znacznym stopniu przykuwają uwagę badaczy. Luis Néel, francuski fizyk, który zdobył nagrodę Nobla w 1970 za związane z nimi odkrycia mówił, że choć wydają się one interesujące z badawczego punktu widzenia, wydają się bezużyteczne. Do dziś jedynym ich powszechnym zastosowaniem jest zmiana pola koercji jednej z warstw ferromagnetycznych w głowicach wspomnianych dysków twardych, ale pełnią tam one rolę pomocniczą i zupełnie drugorzędną. Co takiego zmieniło się na przestrzeni prawie 55 lat od pamiętnych słów Néela do dziś, kiedy wydają się jednymi z bardziej intrygujących kryształów w fizyce ciała stałego i wiązane są z nimi nadzieje na zastosowania?

Zanim odpowiemy na to pytanie przyjrzyjmy się przykładowemu antyferromagnetykowi (Rys. 6). Sąsiadujące atomy mają momenty magnetyczne o naprzemiennym zwrocie. Jeśli jeden z nich jest skierowany do góry, jego sąsiedzi będą zwrócenii do dołu. O takim uporządkowaniu mówimy, że jest antyrównoległe. Jeśli zsumujemy moment magnetyczny całej próbki antyferromagnetyka to otrzymamy zero (w przypadku nieparzystej liczby atomów otrzymamy moment jednego atomu, który w skali całego



Rys. 6. Schematyczne i uproszczone przedstawienie **antyferromagnetyka**. Atomy (symbolizowane przez kule) wykazują moment magnetyczny (symbolizowany przez strzałki). Ich zwrot jest naprzemienny, ale ułożony wzdłuż jednego wybranego kierunku, zwanego osią (tutaj – pionowego).

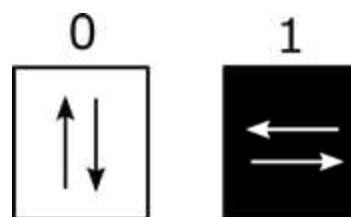
materiału będzie niesłychanie mały, a więc z dobrym przybliżeniem również możemy powiedzieć, że jest zerowy).

Warto zauważyć, że pomimo, iż zwroty są ustawione przeciwnie, wciąż jednak istnieje pewien wyróżniony w przestrzeni kierunek, wzdłuż którego ustawiają się momenty magnetyczne. To kluczowe spostrzeżenie! Okazuje się bowiem, że taki wyróżniony kierunek, który nazwiemy osią antyferromagnetyka, może stanowić o różnicach we własnościach kryształu w różnych jego kierunkach przestrzennych. To znaczy, na przykład, że opór elektryczny dla prądu płynącego wzdłuż momentów będzie nieco inny niż dla takiego płynącego w poprzek. Zjawisko to nazywamy anizotropią magnetooporu oznaczaną skrótem AMR.

Podobnie efekty absorpcji promieniowania – zwłaszcza w zakresie promieni X, ale możliwe także w zakresie widzialnym – mogą zależeć od kąta między polaryzacją liniową padającej wiązki a osią antyferromagnetyka. A zatem istnieją metody, które pozwalają na stwierdzenie jak zorientowana jest oś antyferromagnetyka lub czy zmieniła się ona pod wpływem czynników zewnętrznych. Odpowiada to operacji odczytu w magnetycznym zapisie danych (w przypadku ferromagnetyka trzeba było stwierdzić, w którą stronę zwrócone jest namagnesowanie, dla antyferromagnetyków jaki jest kierunek osi). Czy zatem można zbudować pamięć z antyferromagnetyka?

6. Zapis danych w antyferromagnetyku?

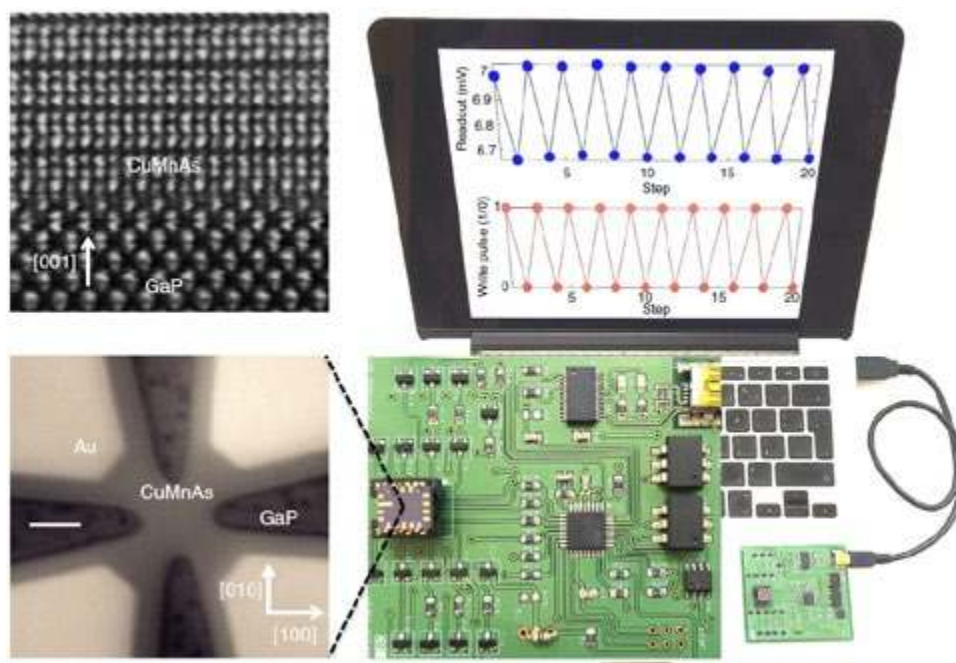
Aby tak było, należy jeszcze mieć dwa odróżnialne od siebie stany i możliwość zmiany jednego stanu w drugi. Obrót wszystkich momentów magnetycznych o 180 stop-



Rys. 7. Symboliczna reprezentacja dwóch stanów prototypowej komórki pamięci antyferromagnetycznej; jej osi i zapisanej informacji.

ni nie zmieni niczego we własnościach antyferromagnetyka. Jego oś pozostanie wtedy w tym samym kierunku. Można jednak wyobrazić sobie obrót wszystkich momentów o 90 stopni tak by oś zmieniła kierunek (np. z pionowego na poziomy) jak to pokazano na Rys. 7. Tylko jak tego dokonać? Antyferromagnetyki jako materiały skompensowane, niemające namagnesowania bardzo słabo oddziałują z zewnętrznym polem magnetycznym. To sprawia, że pamięć skonstruowana z takich elementów byłaby niezwykle trwała i przez to odporna na wymazanie przypadkowym zewnętrznym polem. Jednocześnie, ta sama własność pozbawia nas praktycznej możliwości zapisu przy użyciu pola.

W ostatnich latach silnie rozwijane są metody manipulacji namagnesowaniem, w których kluczową rolę odgrywa prąd elektryczny. To, że prąd elektryczny może spowodować zmianę kierunku namagnesowania (w ferromagnetykach) nie jest obecnie zaskoczeniem. Jednak doniosłe odkrycia ostatnich lat pokazują, że prąd może



Rys. 8. Ilustracja przedstawia prototypowe urządzenie zawierające komórkę pamięci antyferromagnetycznej kompatybilną z laptopem. Prawy panel przedstawia urządzenie podłączone do komputera. Niebieskie punkty na monitorze pokazują dwa rozróżnialne stany oporu (proporcjonalnego do mierzonego napięcia), które odpowiadają dwóm stanom osi, a więc dwóm rodzajom zapisanej informacji – 0 lub 1. Stany te zmieniają się pod wpływem impulsów prądu reprezentowanych przez czerwone punkty poniżej. Lewy górny panel przedstawia obraz z transmisyjnego mikroskopu elektronowego (przekrój poprzeczny), na których widać kolumny atomów kryształu antyferromagnetyka CuMnAs o znakomitej jakości oraz podłoża krystalicznego GaP. Atomy Mn zawarte w CuMnAs mają momenty magnetyczne. Lewy dolny panel jest mikrofotografią komórki pamięci (widok z góry, długość białej kreski to 2 mikrometry). Kluczowym obszarem jest jasnoszary – tam znajdują się momenty magnetyczne. Ciemnoszare wytrawienia (GaP) pełnią funkcję izolacji elektrycznej, zaś złote elektrody (Au) doprowadzają prąd do centralnej części komórki. Ilustracja pochodzi z publikacji [3] (licencja CC-BY 4.0).

wywoływać również zmianę kierunku osi antyferromagnetyka.

Początkowo udało się zaobserwować taki efekt dla wąskiej klasy egzotycznych antyferromagnetyków takich jak CuMnAs [1] lub Mn_2Au [2]. Z czasem pojawiły się koncepcje mechanizmów i przykłady manipulacji osią antyferromagnetyka w różnorodnych kryształach. Cały czas trwa ożywiona dyskusja dotycząca różnych możliwych mechanizmów fizycznych odpowiedzialnych za obrót osi pod wpływem prądu oraz możliwości praktycznego wykorzystania takich efektów do zapisu danych w antyferromagnetykach. Prototypowe urządzenia udowadniają trwałość zapisu i niewrażliwość nawet na znaczne pola magnetyczne (Rys. 8).

7. Wyzwania i trudności

Wciąż pozostają jednak istotne wyzwania. Pierwsze z nich to struktura domenowa antyferromagnetyka, czyli niejednorodność przestrzenna. Podobnie jak w przypadku ferromagnetyków, antyferromagnetyki dzielą się na domeny, różniące się kierunkiem osi (Rys. 9). A zatem zasięg uporządkowania jest mały. W związku z niewrażliwością na zewnętrzne pola magnetyczne ciężko jest „ujednorodnić” taki materiał. Zmiany i obroty osi antyferromagnetycznej zachodzą lokalnie [4], w małych obszarach a nie w całej objętości materiału. Jest to jedną z przyczyn bardzo małych różnic zarówno w oporach jak i absorpcji służących do detekcji zmian osi (czyli odczytu) nieprzekraczających kilku procent. To sprawia, że odczyt bywa operacją trudną a interpretacja wyniku pomiaru może nastroić problemy.

Wreszcie, do zaobserwowania zmian kierunku osi (operacja zapisu) potrzebne są ogromne gęstości prądu rzędu $1\text{MA}/\text{cm}^2$! To ogromna wartość, jednak poprzez tworzenie mikro- i nanostruktur, czyli zmniejszanie przekroju ścieżek prądu jest ona osiągalna. Niestety trudno na obecnym etapie mówić o zysku związanym z oszczędnością mocy potrzebnej do korzystania z urządzeń.

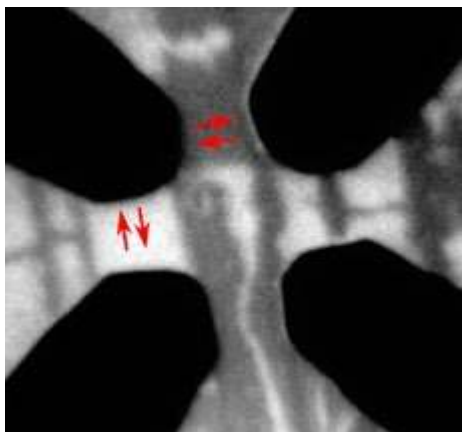


Fig. 9. Domeny antyferromagnetyczne uwidocznione metodą liniowego dichroizmu promieni X. Obraz pojedynczej komórki (innej, ale podobnej do tej na Rys. 8) przedstawia różne domeny (jasno- i ciemnoszare) oraz odpowiadające im kierunki osi (czerwone strzałki). Centralny obszar nie jest jednokolorowy i nie może być uznany tylko za 0 lub 1, stanowi bowiem mieszaninę domen. Obraz wykonany dla CuMnAs o wymiarach ok. $7\text{ }\mu\text{m}^2$.



Fig. 10. Nie istnieją jeszcze komercyjne urządzenia pamięci antyferromagnetycznej choć prototypy istnieją i są testowane. Być może w niedalekiej perspektywie usłyszymy o nowych urządzeniach złożonych z antyferromagnetycznych kryształów.

8. Co nas czeka?

Czy jest możliwe, że w niedalekiej przyszłości będziemy mogli kupić pendrive z antyferromagnetyka? Początkowy entuzjazm naukowców zaczyna powoli zastępować sceptycyzm ze względu na wspomniane wyżej wyzwania, co nie wróży bliskiej perspektywy. A jednak, z drugiej strony już do tej pory badania naukowców rozwinęły się w nieplanowanym dotąd kierunku. Ze względu na istnienie różnych domen, zamiast tylko dwóch stanów pamięci, w realnych prototypowych urządzeniach mogą być realizowane bardzo liczne stany odpowiadające licznym domenom i występującym w nich kierunkom osi.

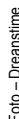
W ten sposób powstały prototypy liczników. Kolejne impulsy prądu pozwalają zmieniać stan kolejnych domen. Zmienia się za każdym razem opór elektryczny. Takie liczniki były testowane pod drogami w Europie, by rejestrować liczbę przejeżdżających pojazdów a nawet klasyfikować je ze względu na wagę. Nacisk wywierany przez przejeżdżający pojazd na kabel piezoelektryczny ułożony pod drogą powoduje powstanie impulsu prądu, który przepływa przez komórkę antyferromagnetyczną będącą licznikiem, zmieniając konfigurację domen i stan oporu. Zapis jest więc realizowany w sposób pasywny dzięki energii przejeżdżającego samochodu, a jedynie do odczytu potrzebna jest niewielkie zasilanie.

Fizyka antyferromagnetyków to dynamicznie rozwijająca się dyscyplina. Obecnie nie są jeszcze na rynku komercyjnym dostępne pamięci antyferromagnetyczne, a do ich powstania potrzebne jest wciąż opracowanie bardziej wydajnych operacji zarówno odczytu jak i zapisu. Z pewnością jednak już do tej pory liczba doniesień naukowych dotyczących tych materiałów jest ogromna i wciąż rośnie. Zwiastuje to kolejne nowe pomysły i potencjalne zastosowania, o których z dużym prawdopodobieństwem będziemy dowiadywać się w najbliższej przyszłości.

Dr Michał Grzybowski
Uniwersytet Warszawski

LITERATURA

- [1] P. Wadley et al., Electrical switching of an antiferromagnet, *Science* 351, 6273 (2016).
- [2] S. Yu. Bodnar et al., Writing and reading antiferromagnetic Mn_2Au by Néel spin-orbit torques and large anisotropic magnetoresistance, *Nature Communications* 9, 348 (2018).
- [3] K. Olejnik et al., Antiferromagnetic CuMnAs multi-level memory cell with microelectronic compatibility, *Nature Communications* 8, 15434 (2017).
- [4] M. J. Grzybowski et al., Imaging Current-Induced Switching of Antiferromagnetic Domains in CuMnAs , *Physical Review Letters* 118, 057701 (2017).



17

świat. Wydawca tak reklamuje książkę autora:

Z wielkim poczuciem humoru i klarownie Chad Orzel wyjaśnia swojemu psu Emmie a przez to czytelnikom, co to jest mechanika kwantowa i jak funkcjonuje oraz dlaczego, pomimo że nie można jej użyć do chwytania wiewiórek i steków, jest ciągle niezwykle ciekawa i ważna dla każdego psa i człowieka. Możemy podążyć za dyskusjami Chada i Emmy o centralnych elementach teorii kwantowej, od cząstek zachowujących się jak fale i zasady nieoznaczoności Heisenberga do splątania kwantowego oraz cząstek wirtualnych.

Forma *science-fiction* w popularyzacji nauki jest używana w książkach popularno-naukowych w różny sposób. Niektórzy popularyzatorzy próbują odwołując się do utworów z obszaru fantastyki naukowej, książek, filmów i seriali (np. znana seria „Star Trek”) wyjaśnić odbiorcom, które rozwiązania techniczne opisane przez autora mają sens naukowy, a które są już czystą fantazją. Uczynił tak Ian Stewart (por. trzy tomy „Nauki Świata Dysku” napisane wspólnie z Terryem Pratchettem i Jackiem Cohenem, Wyd. Prószyński i S-ka, Warszawa 2009).

Natomiast fantastyką naukową opartą na „twardej” nauce i w dodatku rozgrywającą się w środowisku fizyków jest światowy bestseller chińskiego inżyniera elektryka Cixin Liu (ur. 1963 r.) pt. „Problem trzech ciał”, laureata nagrody Hugo dla najlepszej powieści w 2015 r., po raz pierwszy

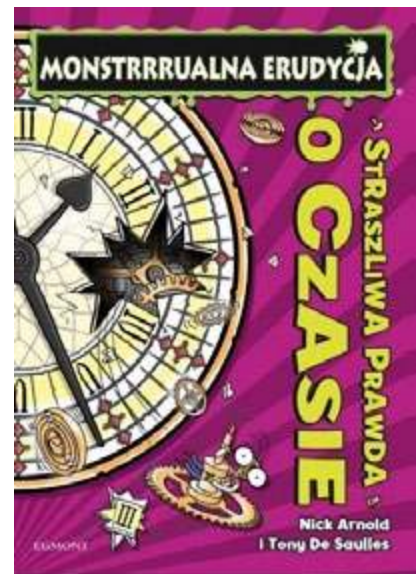
w historii przyznanej tłumaczonemu tekstowi.

Akcja książki (chińskie wydanie w 2006 r.) zaczyna się w czasie rewolucji kulturalnej, a bohaterka powieści Ye Wenje, córka zamordowanego profesora fizyki, zostaje zesłana do tajnej bazy wojskowej, gdzie uczestniczy w programie wysyłania sygnałów w kosmos w poszukiwaniu obcych cywilizacji. Mark Zuckerberg, twórca Facebooka, uznał książkę Cixin Liu za jedną z najbardziej wartych przeczytania książek w 2015 r., natomiast prezydent Barack Obama zabrał ją na urlop na Hawaje.

Książka „Problem trzech ciał” jest pierwszym tomem trylogii „Wspomnienia z przeszłości Ziemi” porównywanej z klasycznymi cyklami s-f, jak „Fundacja” czy „Diuna”. Ukazały się już trzy kolejne tomy trylogii. W polskim tłumaczeniu jest to część II pt. „Ciemny las”, 2017 r. oraz część III pt. „Koniec śmierci. Wspomnienia z przeszłości”, 2018 r. Autor opublikował 20 powieści i antologii z gatunku *hard science-fiction*, ale mimo statusu gwiazdy literackiej nadal pracuje w elektrowni.

Są też autorzy z talentem dydaktycznym, którzy zajmują się popularyzacją dla młodszych czytelników. Takimi popularyzatorami są wspomniani wyżej Nick Arnold i Tony De Saulles, autorzy „Strasznego prawdy o czasie”. Książka zawiera wiele rysunków autorstwa Tony’ego De Saullesa, w tym komiksy, reklamy, afisze, kwestionariusze, ilustrowane podróże w czasie. Autorzy w treści książki stosują quizy, zadają zagadki, tworzą niestniejące listy między uczonymi, konstruują scenariusze podróży w czasie, aby wykazać ich dziwne skutki, ilustrują hipotezy naukowe o budowie wnętrza czarnej dziury i o tunelach czasoprzestrzennych – tematyka często wykorzystywana we współczesnych filmach *science-fiction* rozgrywających się w Kosmosie (por. „Star Trek”, „Gwiezdne Wojny”). Na zakończenie książki autorzy wyjaśniają młodemu czytelnikowi, dlaczego książkę mającą wyjaśnić czym jest czas zatytułowali „Straszną prawdą o czasie”:

Oto ona. Czas stanowi część codziennego życia. Wydaje się nam, że



Rys. 2. N. Arnold, T. De Saulles, „Straszną prawdą o czasie”

wiemy, czym jest, potrafimy śledzić go na zegarkach i mierzyć z niewiarygodną dokładnością za pomocą zegarów atomowych. Potrafimy tworzyć teorie na temat jego początku i istoty. Lecz ostatecznie w ogóle nie pojmujemy czasu! Nie jesteśmy pewni, skąd w ogóle ani dokąd zmierza. Nie umiemy powiedzieć, jak działa ani dlaczego płynie w jednym kierunku. Straszną prawdą o czasie polega na tym, że czas wciąż jest tajemnicą!

Popularyzacja w wykonaniu sławnych fizyków

Popularyzacją zajmują się też sławni fizycy, jak np. profesor Stephen Hawking (1942-2018), słynny brytyjski fizyk teoretyk i kosmolog, w latach 1979-2009 profesor matematyki na Uniwersytecie Cambridge, a następnie dyrektor Centrum Kosmologii Teoretycznej. Hawking znany jest z takich książek popularyzatorskich, jak „Krótka historia czasu”, „Teoria wszystkiego”, „Wszechświat w skorupce orzecha”, które okazały się prawdziwymi bestsellerami.

Wraz z Leonardem Mlodinowem napisał kolejną książkę popularnonaukową pt. „Wielki Projekt” (Wyd. ALBATROS, Warszawa 2019), która rozpoczęła gorące dyskusje w środowisku naukowym, ale też w szerszym wymiarze społecznym wśród osób wierzących i ateistów. „Wielki Projekt” to dzieło wizjonerskie, stanowiące autorski



Rys. 1. Chad Orzel, „Jak nauczyć fizyki swojego psa”

przewodnik po odkryciach, które na nowo kształtują poglądy na istotę życia i mogą podważyć podstawowe założenia wiary. Hawking ujawnił w tej książce swoje poglądy na stworzenie świata. Jak sam stwierdził:

Wszechświata nie stworzył ani Bóg, ani istoty nadprzyrodzone. Wszechświat powstał w sposób spontaniczny w wyniku działania fundamentalnych praw grawitacji. Nie trzeba przywoływać Boga, aby opisać proces stworzenia.

Wydawca uważa, że Hawking daje odpowiedzi, których nie zdołał znaleźć Einstein, gdyż podjął się rozwiązania ostatecznej zagadki życia i Wszechświata. Natomiast wydawnictwo „Publishers Weekly” tak zachwala koncepcję Hawkinga:

Nikt w sposób równie przystępny jak Hawking nie potrafi odpowiedzieć na trzy podstawowe pytania filozofii i nauki: Dlaczego istnieje raczej coś niż nic? Dlaczego istniejemy my? Dlaczego Wszechświatem rządzi właśnie ten konkretny zbiór praw, a nie inny?

Odwołanie się Wydawcy do Einsteina ma na celu przypomnienie znanej w swoim czasie książki popularnonaukowej pt. „Ewolucja fizyki” stanowiącej podsumowanie rozmów Leopolda Infelda (1898-1968) i Alberta Einsteina (1879-1955) prowadzonych podczas wspólnej pracy w Princeton. Książka „Ewolucja fizyki” (Wyd. Prószyński i S-ka, War-

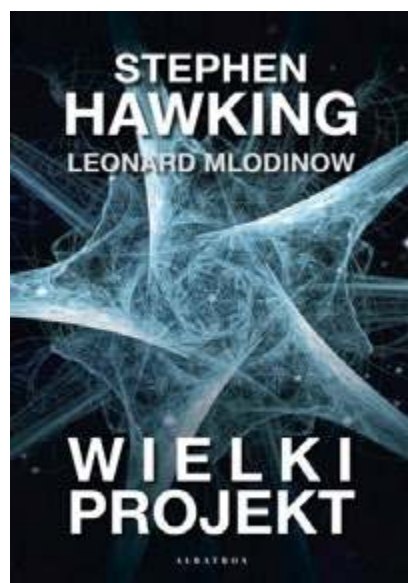


Rys. 4. Thomas Hertog, „O pochodzeniu czasu. Ostateczna teoria Stephena Hawkinga”

szawa 1998) jako pierwsza w historii pozycja popularnonaukowa jeszcze przed „Krótką historią czasu” Stephena Hawkinga gościła wiele tygodni na listach bestsellerów, dochodząc nawet do pierwszego miejsca. Do chwili obecnej ukazało się blisko 200 wydań „Ewolucji fizyki” w niemal wszystkich językach świata.

„Wielki projekt” to nie ostatnia koncepcja naukowa Stephena Hawkinga, gdyż dzięki jego najbliższemu współpracownikowi i przyjacielowi Thomasowi Hertogowi możemy poznać w przystępny sposób „ostateczną” teorię słynnego uczonego na temat Kosmosu, która rewiduje koncepcję przedstawioną w bestsellerze „Krótka historia czasu” (Thomas Hertog, „O pochodzeniu czasu. Ostateczna teoria Stephena Hawkinga”, Wyd. ZYSK i S-K, Poznań 2023). Hertog twierdzi, że Hawking w czasie całego swojego życia próbował odpowiedzieć na pytanie: W jaki sposób Wszechświat mógł stworzyć warunki tak doskonale sprzyjające życiu? Wydawca w barwny sposób charakteryzuje życiową koncepcję Hawkinga zaprezentowaną przez jego długoletniego współpracownika:

W swym azylu na wydziale fizyki teoretycznej w Cambridge Stephen Hawking i jego przyjaciel i współpracownik Thomas Hertog przez dwadzieścia lat pracowali ramię w ramię nad nową kwantową teorią Kosmosu.



Rys. 3. S. Hawking, L. Mlodinow, „Wielki Projekt”

Książka „O pochodzeniu czasu” zabiera czytelnika na poszukiwanie drogi do zrozumienia spraw większych niż Wszechświat. Czerpiąc wiedzę z najnowszych osiągnięć teorii strun, daje nam wgląd w ekstremalną fizykę kwantową czarnych dziur i Wielkiego Wybuchu. W ostatnim okresie swojego życia Stephen Hawking stworzył z Thomasem Hertogiem ostateczną teorię, którą można nazwać radykalnie nową, darwinowską wizją początków naszego uniwersum. W tej wizji prawa fizyki nie są wyryte w kamiennych tablicach, tylko rodzą się i ewoluują, gdy opisywany przez nie Wszechświat nabiera kształtu.

Thomas Hertog okazał się świetnym popularyzatorem, gdyż w przystępny i zrozumiały dla czytelnika sposób przedstawił skomplikowaną obliczeniowo ostatnią koncepcję słynnego uczonego na powstanie Wszechświata i pochodzenie praw fizycznych.

Popularyzacja w formie publicznego pokazu

Popularyzować fizykę można także za pomocą odpowiednio przygotowanego publicznego pokazu popularyzatorskiego. Na ostatnim 48. Zjeździe Fizyków Polskich w Gdańsku we wrześniu 2023 r. w sesji „Popularyzacja fizyki” dr Adama Buczek z Politechniki Poznańskiej przybliżył słuchaczom zasady przygotowania pokazu popularyzatorskiego. Przestrzegając, aby eksperymentatorzy



Rys. 5. 48 ZFP, Sesja „Popularyzacja fizyki”, Adam Buczek (zdjęcie własne)

zwracali uwagę na często pomijane szczegóły, jak np. miejsce przeprowadzenia pokazu, bezpieczeństwo własne i widzów, transport, czas całkowity pokazu obejmujący przywiezienie sprzętu, montaż instalacji i rozbiórkę.

Referent omówił także źródła inspiracji do przeprowadzenia eksperymentu popularyzatorskiego festiwalu nauki, działania Ogólnopolskiego Klubu Demonstratorów Fizyki przy Wydziale Nauk Ścisłych Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach, filmy i programy telewizyjne, sieci społecznościowe, wreszcie wnikliwa obserwacja otoczenia i przyrody. Do przeprowadzenia udanego eksperymentu popularyzatorskiego nie trzeba używać drogich urządzeń, można wykorzystać sprzęt codziennego użytku albo zabawki. Jako ilustrację ciekawego pokazu, Adam Buczek przeprowadził błyskotliwy pokaz z użyciem ... papieru toaletowego.

Fizyka kwantowa w kulturze masowej

Okazuje się, że popularyzacja fizyki, która wydaje się pożytecznym społecznie zajęciem prowadzącym do podniesienia poziomu mentalnego społeczeństwa i przygotowania jednostek do rozumienia zjawisk fizycznych i nowych odkryć naukowych, a także do korzystania z nowoczesnych technologii w życiu codziennym może skutkować negatywnymi efektami z powodu niewłaściwej popularyzacji medialnej.

Przykładowo, medialna popularyzacja fizyki kwantowej nastawiona na szerzenie sensacji w efekcie wywołała u odbiorców chaos w rozumieniu świata. Fizyka kwantowa będąca dość hermetyczną dziedziną fizyki nagle stała się niezwykle popularna w kulturze masowej, gdyż media uznały, że doniesienia o komputerach kwantowych czy kryptologii kwantowej (za które to osiągnięcia zostały przyznane Nagrody Nobla w 2022 r.) są atrakcyjnymi tematami dla widzów i czytelników mającymi bezpośrednie przełożenie na życie codzienne. Przykładem takiego sensacyjnego przekazu o konkretnych korzyściach z fizyki kwantowej jest artykuł redaktor Katarzyny Burdy w *Newsweeku* na podstawie wywiadu jaki autorka

przeprowadziła w Oxfordzie z prof. Arturem Ekertem, odkrywcą kryptologii kwantowej. Red. Burda w taki oto sensacyjny sposób prezentuje czytelnikom komputery kwantowe:

Komputery kwantowe, którymi się zajmuje prof. Ekert jeszcze niedawno były uważane za pomysł z gatunku science fiction. Piekłnie trudny do zrealizowania w realnym świecie, choć w teorii bardzo obiecujący. Dopiero od kilku lat naukowcy coraz skuteczniej potrafią zmuszać najmniejsze cząstki materii do pracy. Daje to szansę na stworzenie komputerów kwantowych, które w porównaniu z dzisiejszymi maszynami będą niczym rakieta obok żółwia. Pierwsze takie komputery już powstają i zaczynają wykonywać skomplikowane zadania, czego dowiodła firma Google (Newsweek z 20.10.2019 r.).

Odbiorcy medialnej popularyzacji fizyki kwantowej opis mikroświata przenieśli do opisu życia wewnętrznego człowieka. Postąpili tak twórcy, w tym warszawska aktorka Julia Wyszynska, która swój monodram zatytułowała „Fizyka kwantowa, czyli rozmowy nigdy nieprzeprowadzone”, gdyż uznała, że taki tytuł spektaklu zaintryguje widzów. Tymczasem postać 8-cio letniego chłopca, w którego wcieliła się aktorka mówi tylko, że nauka szkolna mu nie idzie, a najtrudniejszym przedmiotem jest fizyka.

Spektakl pod patronatem Burmistrza Śródmieścia został wystawiony w dniu 27 marca 2022 r. z okazji Międzynarodowego Dnia Teatru. Miejscem wystawienia sztuki był budynek przy ul. Emilii Plater, który obecnie użytkowany jest przez fundację „Komuna Warszawa”, ale dawniej w tym budynku mieściło się gimnazjum, w którym autor niniejszego artykułu nauczał informatyki na zastępstwo. Obok w bliźniaczym budynku znajdowało się Liceum Hoffmanowej. Obie szkoły opuściły zajmowane budynki, bo ówczesne władze Warszawy postanowiły wyprowadzić szkoły ze Śródmieścia.

Na miejscu budynków szkolnych przy ul. Emilii Plater planowano zbudować apartamentowce. Dzięki protestom mieszkańców budynki ocalały przed rozbiórką. Spektakl „Fizyka kwantowa, czyli rozmowy nigdy nie-



Rys. 6. Plakat reklamujący spektakl „Fizyka kwantowa”

przeprowadzone” miał premierę 4 lutego 2022 r. w „Komunie Warszawa”, natomiast pokazy gościnne spektaklu odbyły się w Teatrze Powszechnym w dniach 11, 12, 13 maja 2022 r. Pomimo tego, że artystka odgrywa postać 8-letniego chłopca, spektakl jest dozwolony dla widzów od 16. roku życia. Po obejrzeniu spektaklu, wiadać, że termin „fizyka kwantowa” nie został użyty tylko jako hasło wabiące widzów. W materiałach reklamujących spektakl można wyczytać:

8-letni Julek zaprasza Widza do swojego niezwykłego świata, gdzie wszystko jest możliwe. Gdzie niczego, ani nikogo się nie boi, nie wstydzi, nie czuje żadnych ograniczeń, nie wie co to kompleksy, widzi Duchy, rozmawia z Roślinami, a MTV kreuje jego rzeczywistość. Po drodze spotykamy Tatę, Mateusza z ławki obok, przedszkolankę Panią Czesię i innych, którym Julek nareszcie ma szansę powiedzieć to, na co nigdy wcześniej nie miał odwagi. Śmiertelnie poważny temat jakim są demony przeszłości, przyglądanie się systemowym nadużyciom i do czego mogą Nas doprowadzić podjęte decyzje, które bardziej są podyktowane pokoleniową traumą niż wolną wolą Serca i Duszy, potraktowany w nieco mniej śmiertelnie poważny sposób.

Aktorka Julia Wyszynska, jednocześnie reżyserka i scenografka spektaklu, zrozumiała z przekazów medialnych, że fizyka kwantowa opisuje świat tajemniczy, magiczny, w którym wszystko jest możliwe,

w którym nie ma ograniczeń, gdzie można spotkać osoby z przeszłości.

Na przykładzie spektaklu „Fizyka kwantowa” można mówić o psychospołecznym odbiorze medialnych informacji o osiągnięciach badaczy w zakresie fizyki. Media posiadają, jak widać większą siłę przebicia w dotarciu do odbiorców ze swoimi sensacyjnymi informacjami na tematy naukowe niż naukowcy ze swoją popularyzacją. W programie 48. Zjazdu Fizyków w Gdańsku był wykład otwarty pt. „Kryptografia kwantowa: Jak złamać szyfry niemożliwe do złamania” prof. Marcina Pawłowskiego z Uniwersytetu Gdańskiego, lecz wysłuchali go tylko zainteresowani odbiorcy z Trójmiasta, jeśli się o nim dowiedzieli z mediów czy plakatów. W pierwszym dniu Zjazdu dużo było redaktorów z mediów lokalnych i ogólnopolskich, lecz nie dotrwali do ostatniego dnia, aby przekazać odbiorcom główne tezy wykładu otwartego.

Media w sensacyjny sposób w bardzo szerokim gronie odbiorców rozpowszechniły wyniki badań z zakresu fizyki kwantowej wsparte nagrodami Nobla, że nawet pojawiły się podręczniki dla małych dzieci wyjaśniające tę trudną dziedzinę fizyki za pomocą ... jajek na twardo (por. Sheddad Kaid-Salah Ferron, Eduard Altarriba „Kwarki, fotony i jajka na twardo, czyli fizyka kwantowa i jej tajemnice”, Wydawnictwo Adamada, Gdańsk 2022, Wyd. III.

Podręcznik ten wpisuje się w szerszy zakres tematyczny nauczania fizyki współczesnej bardzo małych dzieci, gdyż opracowany przez autorów kurs fizyki obejmuje jeszcze takie pozycje, jak „Teoria względności”, „Kosmos”, czy „Elektromagnetyzm”. W podręczniku „Fizyka kwantowa i jej tajemnice” wszystkie pojęcia i zjawiska zostały opisane za pomocą słów, ale na końcu książki zestawiono główne równania fizyki kwantowej w zapisie matematyki wyższej, nawet z pochodnymi cząstkowymi oraz podstawowe stałe fizyczne, takie, jak stała Plancka, przed-



Rys.7. Sheddad Kaid-Salah Ferron, Eduard Altarriba, „Fizyka kwantowa i jej tajemnice”

kość światła czy ładunek elementarny (elektronu) w jednostkach układu SI, o którym nie wspomniano w kursie, ani nie przytoczono nazw jednostek, tylko użyto ich symbole (J , C , m , s).

Nie wiadomo, dlaczego wśród przytaczanych wzorów używanych w mechanice kwantowej znajduje się słynny wzór Einsteina na równoważność masy i energii $E = mc^2$, który został wyprowadzony z zasad szczególnej teorii względności. Autorzy komentują ten wzór zdaniem: „Stąd bierze się energia SŁOŃCA”. Dlaczego w rozszerzonym tytule podręcznika autorzy przytoczyli jajka na twardo? Okazuje się, że na końcu książki znajduje się rozdział o fizyce w codziennym życiu, w którym autorzy zaprezentowali „kwantowe drobiazgi” czyli przykłady wynalazków z dziedziny fizyki kwantowej w domu czytelnika. Są to mikrofalówki, telefony komórkowe, rentgen (w domu?), kuchenka indukcyjna, latarka ledowa, laser (w odtwarzaczach DVD i we wskaźnikach, ale już skalpel to szpital a nie dom). Jeśli chodzi o gotowanie jajek na twardo, to pewnie chodzi o kuchenkę indukcyjną, chociaż nie powiedziano tego wprost. Ale czyżby na kuchenkę indukcyjną nie udało się ugotowanie jajek na miękko?

Zaraz po zastosowaniach odkryć w dziedzinie fizyki kwantowej w życiu codziennym, autorzy zaprezen-

towali zastosowania w przyszłości takie, jak: komputery kwantowe, teleportacja, elastyczne ekrany, nanoroboty, nowe materiały, okulary i soczewki interaktywne. Na samym końcu książki autorzy zasugerowali, że fizyka kwantowa stawia „wiele pytań na temat rzeczywistości, w której żyjemy. Dlatego w kolejnych dekadach naukowcy i filozofowie będą wspólnie pracować nad odpowiedziami na nurtujące nas pytania.” Na zakończenie autorzy przekazują dzieciom pozytywny *message*:

Każdego dnia NAUKA przybliża nas do poznania tej części natury, o której jeszcze do niedawna nie mieliśmy pojęcia. Dzięki odkryciom naukowców możemy robić coraz bardziej niesamowite rzeczy.

Podsumowanie

Czytając książki popularyzatorskie wielkich fizyków wiele się możemy nauczyć o sprawach większych niż nasz Wszechświat. Ale również książki popularyzatorskie nie tak sławnych autorów, lecz poszukujących nowoczesnych form przekazu też są oczywiście cenne dla czytelników pragnących poszerzyć swoją wiedzę o nauce i nowych odkryciach naukowych. Niestety, w obecnym świecie to poprzez media zarówno tradycyjne, jak i nowe, wiedza o fizyce przenika szeroko do kultury masowej, do filmów, spektakli teatralnych, sztuk plastycznych, reklam, afiszy, skąd w sposób zniekształcony oddziałuje na społeczeństwo. Przekaz medialny ma większą siłę przebicia niż popularnonaukowe pozycje książkowe słynnych fizyków, które nawet stają się bestsellerami.

Dr Edward Rydygier

Autor, fizyk jądrowy, dr nauk techn.,
jest aktywistą Sekcji Nauczycielskiej PTF
posiada tytuł Fizyka Europejskiego (EurPhys)
jest także blogerem, działaczem Stowarzyszenia Polskich
Mediów i posiada legitymację prasową

*Artykuł na podstawie plakatu z Sesji
Plakatowej 48 Zjazdu Fizyków
Polskich
w 2023 r. w Bydgoszczy*

Tranzystor

Bez tranzystora niemożliwy byłby rozwój współczesnej elektroniki, która stosowana jest w wielu urządzeniach – na przykład w sprzęcie AGD, w samochodach, w samolotach czy w statkach kosmicznych.

Andrzej Wasiak

Wynalezienie tranzystora przez J. Bardeena i W. Brattaina w 1948 roku zapoczątkowało nowy okres w rozwoju przyrządów półprzewodnikowych. Wynalazek ten umożliwił zastąpienie lampy elektronowej w układach wzmacniających i generujących prądy zmienne, dużo prostszym przyrządem półprzewodnikowym zwanym tranzystorem, którego zaletą jest dużo większa sprawność energetyczna, uzyskana dzięki korzystnym charakterystykom elektrycznym i dzięki temu, że nie posiadają one podgrzewanej katody. Oczywiście, jak w przypadku lampy elektronowej, wymaga się, aby tranzystor cechowała stabilność i trwałość charakterystyk elektrycznych, dzięki czemu umożliwiona jest z jednej strony pewność działania urządzenia, w którym go zastosowano, z drugiej zaś strony – wymienność tranzystora.

Budowa tranzystora

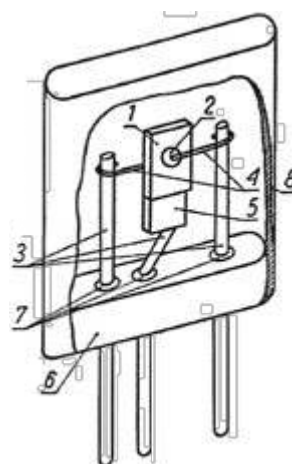
Przykład konstrukcji tranzystora pokazano na rysunku 1. Tranzystor składa się z następujących części: 1 – płytki półprzewodnikowej, 2 – wtopionych po jej przeciwnych stronach czasz indowych, stanowiących elektrody emitera i kolektora, 3 – trzech pręcików wsporczych, 4 – do których przylutowuje się połączenia, 5 – elektrodami emitera i kolektora oraz przymocowuje się niklową płytkę wsporczą bazy. Pręciki wsporcze 6 – są odizolowane od metalowej podstawki, 7 – dzięki próżnioszczelnym przepustom, 8 – metalowa obudowa jest na całym obwodzie przylutowana do podstawki, wskutek czego zapewniona jest hermetyczność wnętrza tranzystora i wyeliminowana wymiana powietrza między wnętrzem i atmosferą otaczającym obudowę.

Cykl produkcyjny tranzystora ma przebieg następujący. Po przygotowaniu płytki o rozmiarach $2 \times 2 \times 0,3$ mm, którą wycina się za pomocą tarczy diamentowej, tną się ją do grubości 0,12 mm (w zależności od typu tranzystora),



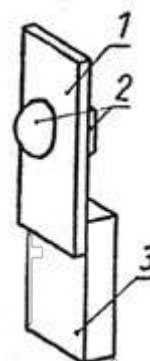
Foto – Dreamstime

umieszcza w odpowiednim adapterze wraz z dwoma kulkami indowymi (o średnicy ok. 1 mm) i płytką połączeniową bazy, a następnie podgrzewa się w piecu wodorowym do temperatury około 540°C . Tak wykonany element (Rys. 2) po trawieniu chemicznym i kontroli własności elektrycznych złącza $p-n$ montuje się za pomocą płytki niklowej 3, tworząc połączenie z bazą na środkowym pręciku wsporczym 3 (pokazanym na rysunku 1) oraz łączy indowe czasze stanowiące elektrodę kolektora i emitera z pozostałymi wspornikami.

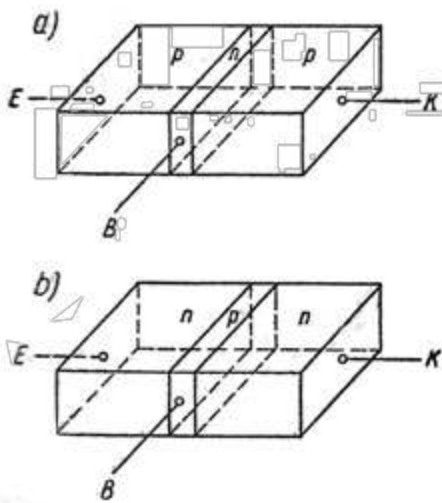


Rys. 1. Przykład konstrukcji warstwowego tranzystora stopowego.

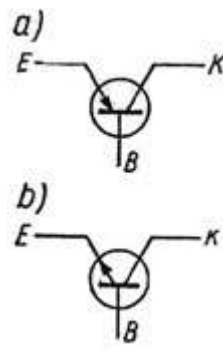
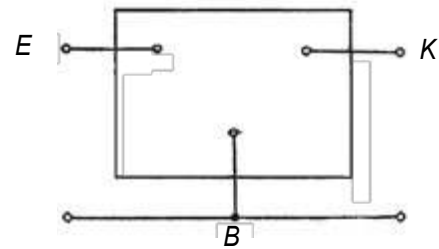
1 – płytka półprzewodnikowa; 2 – elektrody emitera i kolektora; 3 – pręciki wsporcze; 4 – połączenia pręcików wsporczych z elektrodami emitera i kolektora; 5 – niklowa płytka wsporcza bazy; 6 – metalowa podstawka; 7 – przepusty ceramika-metal; 8 – metalowy kubek.



Rys. 2. Płytki tranzystorowa. 1 – płytka germanowa typu n ; 2 – czasze indowe; 3 – płytka niklowa



Rys. 3. Schemat ideowy konstrukcji tranzystora

Rys. 4. Symbole tranzystora.
a) typu p-n-p; b) typu n-p-n

Rys. 5. Symboliczne przedstawienie tranzystora jako czwórnik

Zasadnicze parametry tranzystora i jego układy zastępcze

Tranzystor powstaje wówczas, gdy w płytce półprzewodnikowej wytworzone są trzy obszary o różnych typach przewodnictwa, rozmieszczone w sposób przedstawiony na rysunku 3. Powstają wtedy na granicy o różnych typach przewodnictwa dwa złącza p-n.

Dla każdego z obszarów wykonuje się połączenie o bardzo małej oporności ($\sim 1 \Omega$), której wartość nie zależy od kierunku i natężenia płynącego przez połączenie prądu. Utworzone w ten sposób trzy elektrody nazywane są odpowiednio emiterem E, bazą B i kolektorem K. W zależności od rodzaju przewodnictwa obszarów zewnętrznych tranzystor nazywa się typu p-n-p lub n-p-n (Rys. 4).

Przy rozważaniu zagadnień dotyczących układu tranzystora rozpatruje się jako czwórnik (Rys. 5).

W zależności od zakresu częstotliwości stosuje się uproszczony układ zastępczy typu T (Rys. 6), lub typu p (Rys. 7).

Układ zastępczy typu T stosuje się w zakresie bardzo małych częstotliwości (poniżej 100 kHz). Jest układ bardzo uproszczony wynikający ze zjawisk fizycznych obserwowanych przy odpowiedniej polaryzacji (Rys. 8) złącza p-n w przypadku konstrukcji tranzystora warstwowego.

Przy przyjętej na rysunku 8 polaryzacji tranzystora, prąd nośników większościowych emitera wywołany obniżeniem bariery emiter-baza, wskutek działania baterii U_{e0} zostaje wprowadzony do obszaru bazy, przez którą dyfunduje i dociera do bazy kolektora. Duże pola istniejące w barierze kolektora przyspieszają bieg nośników przesuwając je od obszarów kolektora, dzięki czemu ulega powiększeniu prąd kolektora I_k . To oddziaływanie prądu emitera I_e na prąd kolektora uwzględnia się przez wprowadzenie do układu zastępczego generatora prądowego αI_e (Rys. 6). Współczynnik α , zwany układowym współczynnikiem prądowym, określa stopień oddziaływania prądu emitera na prąd kolektora. W technice tranzystorowej stosuje się najczęściej jeszcze jeden współczynnik α , zwany zwarciovym współczynnikiem prądowym określonym jako

$$\alpha = - \left(\frac{\partial I_k}{\partial I_e} \right)_{U_k = \text{const.}}, \quad (1)$$

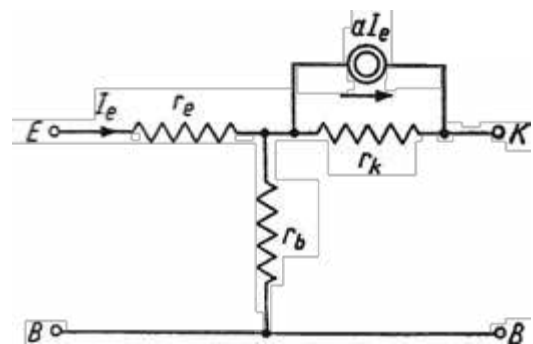
gdzie U_k oznacza napięcie na kolektorze.

Wartość tego współczynnika prawie równa się α gdyż z zależności współczynników α i α

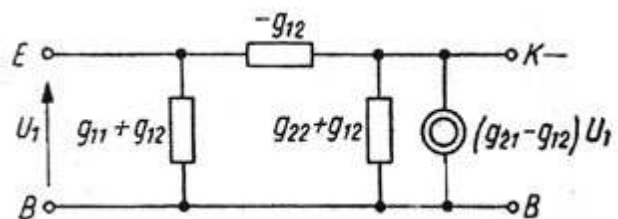
$$\alpha = \frac{a + r_b / r_k}{1 + r_b / r_k},$$

gdzie r_b – oporność bazy, r_k – oporność kolektora.

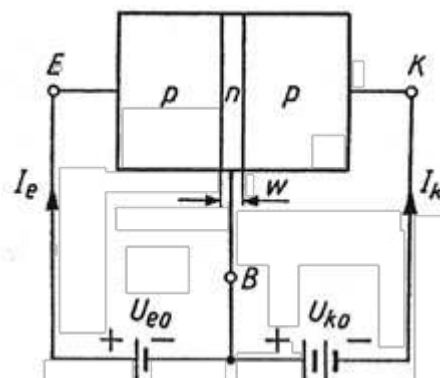
Stosunek r_b / r_k nie przekracza wartości 0,01. Z tego względu w układach zastępczych zamiast generatora αI_e stosuje się generator prądowy αI_e .



Rys. 6. Układ zastępczy tranzystora typu T przy bardzo małych częstotliwościach



Rys. 7. Układ zastępczy tranzystora typu p



Rys. 8. Schemat połączenia źródeł zasilających z tranzystorem

Wartość współczynnika α , jak to wynika z definicji związanych ze wzorem (1) jest mniejsza od jedności ze względu na to, że prąd emitera jest sumą prądów większościowego i mniejszościowego, a tylko prąd nośników większościowych dociera do kolektora, lecz także ze względu na to, że część nośników większościowych zostaje stracona w wyniku rekombinacji w obszarze bazy. Fakty te ujmuje się za pomocą odpowiednich współczynników γ i β określony sposób następujący

$$\gamma = \frac{I_{we}}{I_{we} + I_{me}} = \frac{1}{1 + \frac{I_{me}}{I_{we}}}, \quad (2)$$

$$\beta = \frac{I_{ue} \text{ przy kolektorze}}{I_{we}}, \quad (3)$$

gdzie I_{we} – prąd większościowy wypływający z emitera do bazy,

I_{me} – prąd mniejszościowy,

I_{ue} przy kolektorze – prąd większościowy emitera, który po dyfuzji w obszarze bazy dociera do obszaru kolektora.

Wartości współczynnika γ w większości przypadków wynosi ok. 0,97–0,99, zaś współczynnika β ok. 0,99–0,995. W ten sposób wartość współczynnika α jest mniejsza od jedności i waha się w granicach 0,96–0,98 dla prawidłowo wykonanych tranzystorów.

Powstały parametry układu zastępczego (Rys. 6) mają znaczenie następujące. Oporność r_e jest opornością złącza emiterowego i ma wartość małą – wynoszącą kilkanaście omów, ze względu na polaryzację złącza w kierunku przewodzenia. Oporność ta jest określona zależnością

$$r_e = \frac{25}{I_e} \quad [\Omega], \quad (4)$$

gdzie prąd emitera I_e jest wyrażony w miliamperach.

Oporność kolektora r_k ma wartość dużą, gdyż odpowiada ona nachyleniu (ze względu na polaryzację) wstecznej charakterystyki złącza i wynosi zwykle 0,5–2 M Ω .

Oporność r_b jest wprost proporcjonalna do oporności właściwej materiału obszaru bazy i zależy od wymiaru obszaru bazy, a więc i konfiguracji złącz emitera i kolektora. Oporność tę definiuje się jako

$$r_b = \left(\frac{\partial U_e}{\partial I_k} \right)_{I_e = \text{const.}}, \quad (5)$$

gdzie U_e oznacza napięcie na emiterze.

Wartość oporności dla małej mocy wynosi 200–1500 Ω .

Przy częstotliwościach większych (powyżej 100 kHz) stosuje się układ zastępczy typu p, którego charakterystyczne wielkości otrzymuje się przez rozwiązanie równania dyfuzji nośników w obszarze bazy.

Dla nośników mniejszościowych (np. półprzewodniku typu n nośnikami mniejszości są dziury, a nośnikami większościowymi zaś – elektrony) w obszarze bazy

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{p - p_{\tau_p}}{\tau_p} + D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}, \quad (6)$$

i dla nośników większościowych w obszarze bazy wypływającej emitera

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{n - n_{\tau_n}}{\tau_n} + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}, \quad (7)$$

gdzie n i p – gęstość nośników mniejszościowych emitera i bazy w czasie t .

n_{τ_n} – gęstość nośników mniejszościowych w obszarze emitera w stanie równowagi cieplnej [m^{-3}],

p_{τ_p} – gęstość dziur w obszarze emitera w stanie równowagi cieplnej [m^{-3}],

τ_p – czas życia dziur w obszarze bazy [s],

τ_n – czas życia elektronów w obszarze emitera [s],

D_n i D_p – stałe dyfuzji w obszarze bazy [m^2/s],

x – współrzędna mierzona w obszarze bazy w kierunku ruchu nośników mniejszościowych [m].

Charakterystyczne własności układów tranzystorowych

Tranzystor może być podłączony ze źródłem pobudzającym E_g o oporności R_g i obciążeniu R_o w trojaki sposób, przedstawiony na rysunku 9 a,b,c.

Przydatność układową tranzystora charakteryzuje najlepiej wzmocnienie mocy k_p , którego on dostarcza do obciążenia.

Wzmocnienie mocy niezależnie od sposobu połączenia tranzystora określa w przypadku wzmacniania prądów małej częstotliwości następująca zależność

$$k_p = k_i^2 \frac{R_o}{r_{we}}, \quad (8)$$

gdzie k_p – wzmocnienie mocy układu,

k_i – wzmocnienie prądowe układu,

R_o – oporność obciążenia,

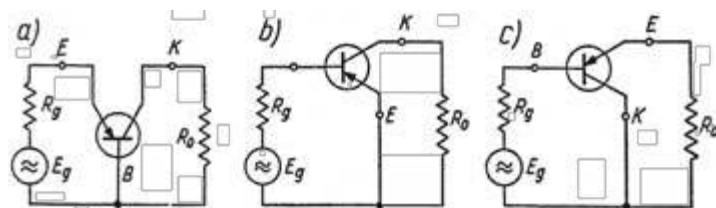
r_{we} – oporność wejściowa na zaciskach tranzystora.

Na podstawie zależności (8) sądzimy, że pożądane jest, aby wartość wzmocnienia prądowego k_i i stosunku R_o do r_{we} była jak największa. Ponieważ maksimum mocy układu osiąga się przy obustronnym dopasowaniu, powinny więc zachodzić jednocześnie równości

$$R_o = r_{wy} \quad \text{i} \quad R_g = r_{we}.$$

Największe wzmocnienie mocy uzyskuje się w układzie WE i z tego względu układ ten jest stosowany najczęściej.

W celu zorientowania czytelnika odnośnie do wartości współczynnika k_{pmax} dla każdego z wymienionych układów w tabelicy 1 podane są wyniki obliczeń i wartości tego współczynnika dla typowego tranzystora o parametrach $\alpha = 0,98$, $r_e = 25 \Omega$, $r_b = 500 \Omega$ i $r_k = 1 \text{ M}\Omega$.



Rys. 9. Układy połączeń tranzystora ze źródłem pobudzającym i obciążeniem. a) o wspólnej bazie WB; b) o wspólnym emiterze WE; c) o wspólnym kolektorze WK

Na podstawie powyższej analizy wynika, że decydujące znaczenie dla wartości wzmocnienia ma wartość współczynnika α .

Tablica 1. Zestawienie wartości wzmocnienia mocy $k_{p\max}$ dla układów WB, WE i WK dla typowego tranzystora

Rodzaj układu	WB	WE	WK
$k_{p\max}$	1114	11400	49
$k_{p\max}$ [dB]	30,5	40,5	17

Im współczynnik α jest bliższy jedności tym większą osiąga się wartość $k_{p\max}$. Jednak zbyt dużym wartościom współczynnika α towarzyszy wzrost oporności bazy r_b i wczesne zakrzywienie charakterystyki $I_k = f(U_k)$ przy $I_b = \text{const.}$ (Rys. 10), wskutek czego ograniczony jest zakres napięć kolektora U_k .

Zbyt duże wartości współczynnika α stwarzają pewną niedogodność w układach WE ze względu na zawężenie pasma przenoszonych częstotliwości. Wynika to stąd, że charakterystyka częstotliwościowa współczynnika α_0 jest bardzo wąska (Rys. 11), zgodnie z zależnością

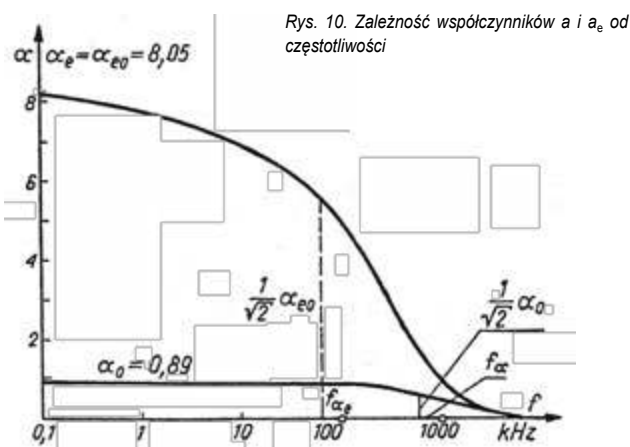
$$f_{\alpha_e} = (1 - \alpha_0) f_a, \quad (9)$$

gdzie f_{α_e} – częstotliwość graniczna, dla której moduł α_e przyjmuje wartość $\frac{1}{\sqrt{2}} \alpha_{e0}$.

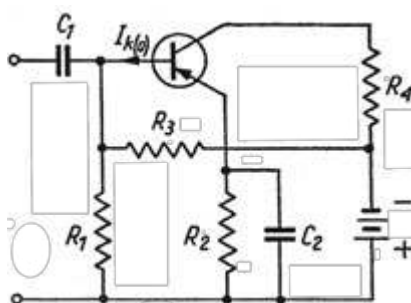
α_0 – współczynnik wzmocnienia prądowego dla małych częstotliwości.

f_a – częstotliwość graniczna, dla której α przyjmuje wartość $\frac{1}{\sqrt{2}} \alpha_{e0}$.

W związku z tym w tranzystorach przeznaczonych do pracy na wielkich częstotliwościach należy dążyć do uzyskania wartości α_0 zawartych między 0,95 i 0,98. Dotyczy to w szczególności tranzystorów przeznaczonych do pracy we wzmacniaczach szerokopasmowych. Obniżenie wartości α_0 uzyskuje się zwykle przez zwiększenie rekombinacji powierzchniowej tranzystora – rekombinacja jest to zjawisko zachodzące w materiałach półprzewodnikowych i polega na łączeniu się dziury z elektronem. Zjawisko to zachodzi przede wszystkim dzięki tzw. centrom rekombinacji znajdujących się w paśmie zabronionym. Rekombinacja



Rys. 10. Zależność współczynników α i α_e od częstotliwości



Rys. 11. Przykład tranzystorowego stopnia wzmocnienia małej częstotliwości

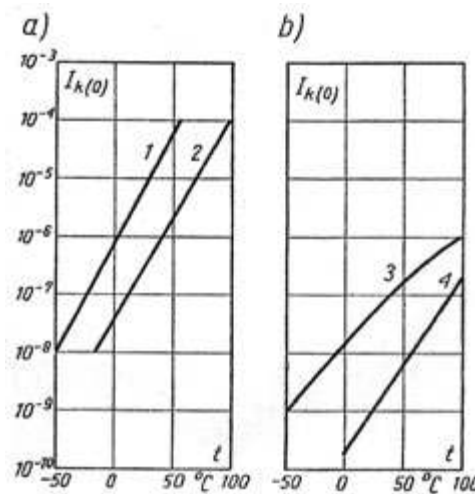
może zachodzić wewnątrz półprzewodnika i wtedy nazywa się rekombinacją objętościową, lub też na powierzchni półprzewodnika i wtedy nazywa się powierzchniową.

Inne charakterystyczne własności tranzystora

Poócz dotychczas rozpatrywanych parametrów tranzystora niemięniejszą rolę w zagadnieniach układowych odgrywa prąd zerowy kolektora $I_{k(0)}$ i współczynnik szumów. Wartość np. prądu zerowego kolektora wywiera bardzo duży wpływ na stabilność punktu pracy tranzystora. Najlepiej można to ocenić rozpatrując przykład jedno-stopniowego wzmacniacza przedstawionego na rysunku 11. Oporniki R_1 i R_3 stanowią tu dzielnik napięcia ustalający różnicę potencjałów emitera i bazy.

Prąd $I_{k(0)}$ płynący przez opornik R_1 tego dzielnika wpływa na potencjał bazy względem emitera. Pożądane jest więc, aby wartość tego prądu była możliwie mała i w niewielkim stopniu była zależna od temperatury.

Niestety – jak wiemy – wartość tego prądu w bardzo znacznym stopniu zależy od temperatury, co ilustruje ry-



Rys. 12. Zależność prądu zerowego $I_{k(0)}$ typowych tranzystorów. a) germanowych; b) krzemowych, małej mocy od temperatury

sunek 12.

Aby ograniczyć wpływ tego prądu, należy uczynić go możliwie małym. Osiąga się to przez ograniczenie rekombinacji powierzchniowej oraz dobór odpowiedniego rodzaju materiału półprzewodnikowego.

Andrzej Wasiak

LITERATURA

- [1] Witold Rosiński., Zasady technologii tranzystorów, Państwowe Wydawnictwo Techniczne, Warszawa 1970.

Thomas Young

Ostatni człowiek, który wiedział wszystko

Nie tylko studenci fizyki, ale i uczniowie szkół średnich, na całym świecie znają eksperyment optyczny ze szczelinami Younga, a także jego definicję sprężystości (wraz z *modułem Younga*). Jednak nie wszyscy mogą być świadomi wielu innych zdumiewających osiągnięć Younga w nauce.

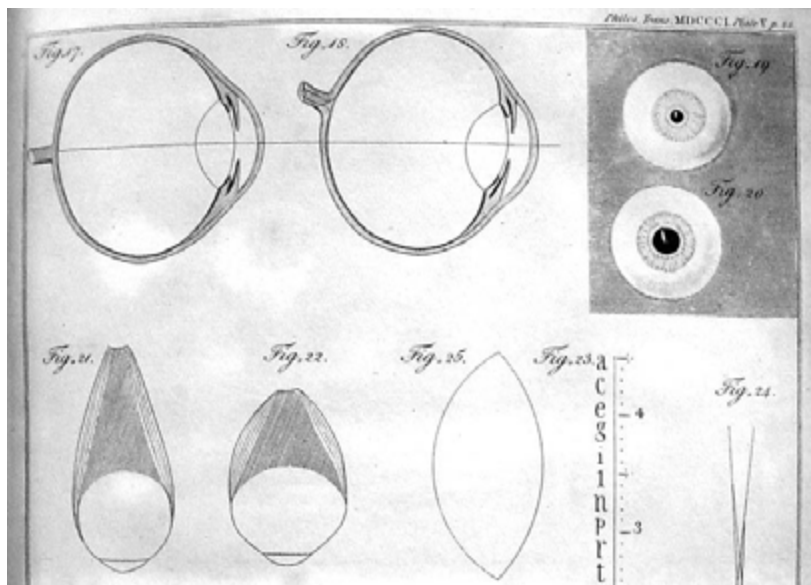
Kazimierz Mikulski

Ten znany angielski lekarz i fizyk, ustalił zasadę interferencji światła, wskrzeszając w ten sposób stuletnią falową teorię światła. Mimo że był z wykształcenia lekarzem i samoukiem lingwistą nie tylko rozumiał wiele języków starożytnych i współczesnych, ale także przeanalizował słownictwo i gramatykę około czterystu języków, a szczególnie jest znany ze swojej roli w rozszyfrowaniu pisma na Kamieniu z Rosetty.

Jednak zanim dokonał swoich badań i odkryć, w 1794 r. Young rozpoczął studia w Edynburgu, na wydziale medycznym. Poszedł tym samym w ślady swego wuja, Richarda Brocklesby'ego, który był jedynym krewnym z wyższym wykształceniem. Oczywiście czytelnik zapyta, dlaczego zdolny nastolatek posiadający mózg, pieniądze i znajomości pojechał do górzystej Szkocji, zamiast ukończyć prestiżowy Oxford lub Cambridge? Rodzina Youngów była członkami Religijnego Towarzystwa Przy-

jaciół, znanymi szerzej jako Dzieci Światła czy Kwakrzy. Trudno powiedzieć, czy młody Young podzielał poglądy najbliższej rodziny, jednak bez względu na to, w Anglii musiałby się mierzyć z dyskryminacją i wieloma innymi nieprzyjemnościami.

Jego działalność zawodowa i naukowa jest bardzo bogata. W 1799 r. Young założył praktykę lekarską w Londynie. Jego głównym zainteresowaniem była percepcja zmysłowa, czyli zdolnością organizmu do odbioru i przetwarzania bodźców zewnętrznych za pomocą zmysłów: wzroku, słuchu, smaku, węchu i dotyku. To podstawowa umiejętność pozwala na interakcję z otaczającym środowiskiem oraz zrozumienie jego złożoności.¹ Jeszcze jako student medycyny odkrył sposób, w jaki soczewka oka zmienia kształt, aby skupiać wzrok na obiektach znajdujących się w różnych odległościach. Jako pierwszy opisał w 1801 r. astygmatyzm, czyli wadę układu optycznego. Występuje, gdy promienie padające w dwóch prostopadłych płaszczyznach są ogniskowane w różnych punktach. Wywołuje ona obraz nieostry i zniekształcony.²



Rysunek 1. Szkice wykonane przez Thomasa Younga z pracy „On the mechanism of the eye”. [za] Adamczyk A., Człowiek, który wiedział wszystko – Thomas Young, <https://www.kwantowo.pl/2017/06/25/czlowiek-ktory-wiedzial-wszystko/>



Rysunek 2. Thomas Young 1773-1829, fizyk i egiptolog, XIX wiek
Źródło: <https://www.meisterdrucke.pl/wydruki-artystyczne/Unbekannt/719653/Thomas-Young-1773-1829%2C-fizyk-i-egiptolog%2C-XIX-wiek.html>

¹ <https://haba-pro.pl/percepcja-zmyslowa/>

² <https://pl.wikipedia.org/wiki/Astygmatyzm>

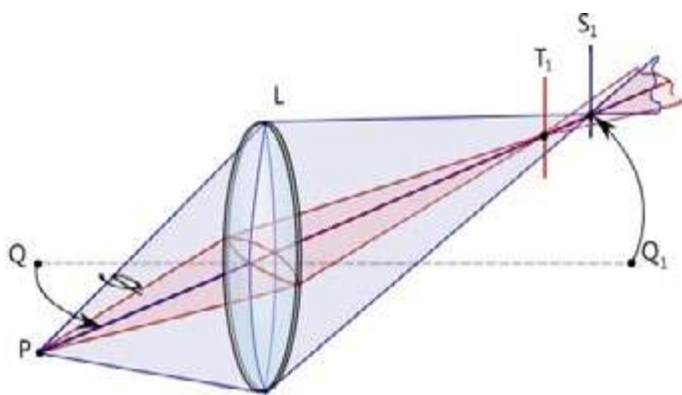
Zanim zainteresował się fizyką, przysłużył się rozwojowi medycyny i fizjologii. Postanowił zrozumieć mechaniczne podstawy funkcjonowania ludzkiego oka, albowiem on sam dostrzegł niezidentyfikowaną wadę własnego wzroku. Proste doświadczenia pozwoliły dostrzec, że jego oko nie jest w stanie równocześnie, z taką samą ostrością widzieć linie poziome i pionowe. Skonstruował optometra. Young połączył trudności ze zogniskowaniem wzroku z nieprawidłowym kształtem soczewki. Swoje spostrzeżenia przedstawił podczas wykładu w 1801 r., inicjując tym samym badania nad astygmatyzmem oraz procesem akomodacji. W tym samym roku zajął się badaniem innych właściwości światła.

„Doświadczenie, które zaraz opowiem... można z łatwością powtórzyć, gdziekolwiek świeci słońce i bez innego aparatu niż ten, który jest dostępny dla każdego”. Tak Young opisał członkom Towarzystwa Królewskiego w listopadzie 1803 r. swój nowo opracowany eksperyment z podwójną szczeliną. Eksperyment ten ujawnił kluczowy aspekt prawdziwej natury światła, które dziś stanowi jeden z głównych filarów mechaniki kwantowej.

Przepuszczając światło przez dwa blisko ustawione otworki, najlepiej w kształcie szczelin, na ekranie, Young odkrył, że wiązki światła rozprzestrzeniają się i nakładają. W obszarze nakładania się pasma jasne światła przeplatają się z pasmami ciemności. Dzięki tej demonstracji interferencji światła Young ostatecznie ustalił falową naturę światła. Przebieg tego doświadczenia, a szczególnie jego efekty szeroko opisał Cyprian Sobczak.³

Natomiast o zdolnościach Younga dokumentowania przebiegu eksperymentu tak wypowiadał się Terry Pratchett:

„Szkiecył tak odruchowo, jak inni drapią się po głowach; geniusz — pewien szczególny typ geniuszu — syłał się z niego niczym lupież.”⁴



Rysunek 3. Astygmatyzm – dwa ogniska dla promieni wybiegających z P i leżących w dwóch wzajemnie prostopadłych płaszczyznach nie skupiają się w jednym miejscu
Źródło: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b3/Astigmatism.svg>



Fotografia 1. Augustin-Jean Fresnel (1788-1827) badania w dziedzinie optyki doprowadziły do niemal jednomyślnego przyjęcia falowej teorii światła.⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/Augustin-Jean_Fresnel

Fotografia 2. François Arago (1786–1853) francuski fizyk, odkrywca zasady wytwarzania magnetyzmu przez obrót niemagnetycznego przewodnika. Wykazał, że przepływ prądu elektrycznego przez cylindryczną spiralę z drutu miedzianego powoduje przyciąganie opilków żelaza niczym magnes. Opilki odpadają, gdy przerwany jest wpływ prądu.⁶ Obmyślił także eksperyment, pozwalające udowodnić falową teorię światła. Zaangażował się w badania, efektem było odkrycie praw polaryzacji światła.
Źródło: https://en.wikipedia.org/wiki/Augustin-Jean_Fresnel#/media/File:Augustin_Fresnel.jpg



W efekcie badań światła w 1817 r. zaproponował, aby fale świetlne były poprzeczne, czyli drgały pod kątem prostym do kierunku ruchu, a nie jak od dawna zakładano podłużne, czyli drgające w kierunku ruchu. Okazało się dobrym podejściem do wyjaśnienia zjawiska polaryzacji, czyli ustawienia fal świetlnych wibrujących w tej samej płaszczyźnie.⁷

Niestety ówczesni angielscy naukowcy umniejszali odkrycia Younga, albowiem jakkolwiek sprzeciw wobec teorii światła podanej przez Newtona był wówczas nie do pomyślenia. Dopiero prace francuskich fizyków Augustina J. Fresnela i François Arago pozwoliły ostatecznie zaakceptować teorię fal Younga w Europie.

Young badał problem percepcji kolorów. Zaproponował rozwiązanie problemu. Założył, że nie ma potrzeby stosowania w oku oddzielnego mechanizmu dla każdego koloru. Zjawisko mieszania kolorów doprowadziło go do postulowania w 1802 r. istnienia trzech fotoreceptorów, z których każdy jest szczególnie wrażliwy na jedną część widma. Uważał, że te fotoreceptory przekazują informacje do mózgu i w zależności od tego, jak silnie zostały pobudzone kolorowym światłem, połączony komunikat zostanie zinterpretowany jako wynikający z rzeczywistego koloru. Stwierdził, że wystarczą trzy, po jednym dla

³ Sobczak C., *Przez szczeliny do światła kwantów*, Fizyka w Szkole z Astronomią, 390 (LXIV) nr 1 styczeń/luty 2024, s. 21-27

⁴ Za <https://www.kwantowo.pl/2017/06/25/czlowiek-ktory-wiedzial-wszystko/>

⁵ Mikulski K., *Bipryzmat Fresnela w szkolnej edukacji*, „Fizyka w Szkole z Astronomią” nr 6, listopad/grudzień 2021, s. 31-33

⁶ W 1824 r. zademonstrował, że obracający się miedziany dysk powoduje obrót zawieszanej nad nim igły magnetycznej. Michael Faraday później udowodnił, że są to zjawiska indukcyjne.

⁷ <https://www.britannica.com/biography/Thomas-Young>

W skrócie o Thomas'ie Youngu

- Thomas Young jest najbardziej znany z wykazania zjawiska interferencji, co skłoniło go do promowania falowej teorii światła w opozycji do dominującej wówczas koncepcji Newtona, że światło składa się z cząstek.
- Young, posiadający umysł polimatyczny, wygłosił w latach 1802–1803 w Instytucie Królewskim błyskotliwą serię wykładów, zawierających spostrzeżenia na temat mechaniki i ciepła, które w pełni doceniono dopiero wiele lat później.
- Był pierwszą osobą, która użyła terminu „energia” we współczesnym, naukowym znaczeniu jako miary zdolności układu do wykonania pracy.
- Young był także pierwszym fizykiem, który oszacował średnicę cząsteczki.
- Połączył nawet ciepło i światło jako jedno zjawisko i zaproponował nowoczesną koncepcję ciągłego widma promieniowania, w którym długość fali rośnie wraz ze spadkiem częstotliwości.
- Oprócz pracy w fizyce Young był znanym fizjologiem, lekarzem i lingwistą, który zainaugurował rozszyfrowanie egipskich hieroglifów.
- Pracował także nad pomiarem wielkości cząsteczek, napięcia powierzchniowego w cieczach i elastycznością. Na jego cześć nazwano moduł Younga, stałą w równaniu matematycznym opisującym elastyczność.

Fotografia 3. Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894) – niemiecki lekarz i naukowiec, fizyk, fizjolog oraz filozof. Sformułował zasadę zachowania energii. Zajmował się mechaniką, akustyką, termodynamiką, światłem, elektrycznością i magnetyzmem. Skonstruował pierwszy oftalmoskop oraz rezonator Helmholtza.
https://pl.wikipedia.org/wiki/Hermann_von_Helmholtz
 Źródło: https://pl.wikipedia.org/wiki/Hermann_von_Helmholtz#/media/Plik:Hermann_von_Helmholtz.jpg



koloru niebieskiego, zielonego i czerwonego. Opracowana później przez niemieckiego fizyka Hermanna LF von Helmholtza, teoria ta jest znana jako teoria trójkoloru Younga-Helmholtza.⁸

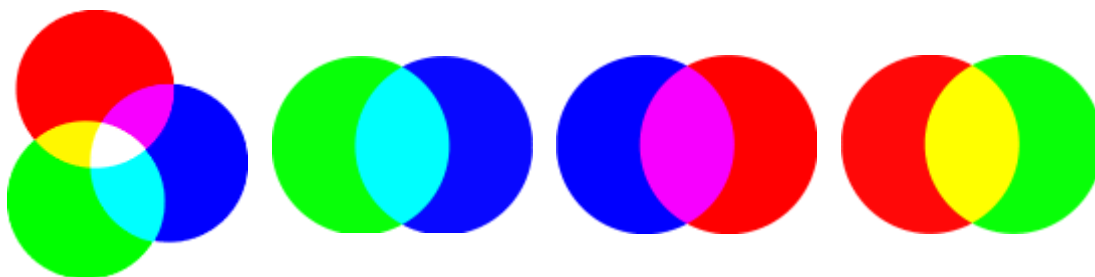
Zainteresowawszy się egiptologią, Young zaczął w 1814 r. studiować teksty na św. Kamieniu z Rosetty. Po uzyskaniu dodatkowych pism hieroglificznych z innych źródeł w ciągu kilku lat udało mu się dostarczyć niemal dokładne tłumaczenie, w ten sposób w znacznym stopniu przyczynił się do rozszyfrowania starożytnego języka egipskiego.

„Fizyk, lekarz i egiptolog” – tak encyklopedie usiłują podsumować Younga. Fizyka i fizjologia były jego mocną stroną, fizyka jego zawodem, egiptologia jego upodo-

baniem. Jednak jego wiedza wykraczała daleko poza te rozległe (nawet w jego czasach) dziedziny wiedzy” – pisze Andrew Robinson we wstępie do swojej książki: „The Last Man Who Knew Everything”⁹ (Ostatni człowiek, który wiedział wszystko.)¹⁰

Był niezwykle już od wczesnego dzieciństwa, które spędził na wiejskich terenach Anglii. W pierwszym rozdziale książki Robinson opisuje, jak Young był wyjątkowo wcześniej uzdolniony w językach i matematyce. Niektórym „dziecięcy geniusz” wypala się w wieku dorosłym, ale nie u Younga. Jego młodzieńcze osiągnięcia były prekursorem błyskotliwości i rozmachu, jaki okazywał przez całe życie, które zakończyło się w 1829 r., gdy miał zaledwie 55 lat.

Towarzystwo Królewskie zachęcało młode talenty do pracy naukowej i Young został wybrany na członka towarzystwa w wieku 21 lat po przedstawieniu artykułu na temat budowy ludzkiego oka i tego, jak „przystosowuje się ono do postrzegania obiektów z różnych odległości”. Tak wczesne przyjęcie członkostwa (i otrzymania stypendium) na podstawie tylko jednego artykułu, nie było wówczas czymś wyjątkowym. Wielu ówczesnych członków było zamożnymi amatorami, nie mającymi większych osiągnięć naukowych. Young był jednym z pierwszych, którzy piastowali tam stanowisko profesora od 1801 r. Choć nie był charyzmatycznym wykładowcą jak Faraday, jego wykłady



Rysunek 4. Sposób otrzymania każdego koloru używając tylko trzech kolorów o właściwym natężeniu. W szczególności dostrzegamy, że jeśli nałoży się na siebie wszystkie trzy kolory podstawowe otrzyma się światło „białe”

Źródło: <https://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki/files/optyka/kolory.html>

⁸ <https://www.britannica.com/science/comparative-psychology>

⁹ <https://www.openbookpublishers.com/books/10.11647/obp.0344>

¹⁰ Wersja tego artykułu została po raz pierwszy opublikowana jako przedmowa do drugiego wydania książki Andrew Robinsona „The Last Man Who Knew Everything” z okazji 250. rocznicy urodzin Thomasa Younga. Publikacja jest publikowana na licencji CC BY 4.0



Fotografia 4. Kamień z Rosetty, bazaltowa płyta z Fort Saint-Julien, Rosetta (Rashid), Egipt, 196 P.N.E. ; w British Muzeum w Londynie
Źródło: <https://cdn.britannica.com/37/116537-050-69BA573B/Rosetta-Stone-basalt-slab-Fort-Saint-Julien-Egypt-196-bce.jpg>

były wszechstronne, a ich opublikowane wersje pozostają ważnym źródłem zrozumienia stanu wiedzy tamtej epoki.

Nie był wystarczająco bogaty, aby przez całe życie być dżentelmenem-naukowcem. Studiował medycynę w Londynie i Edynburgu, a w latach dziewięćdziesiątych XVIII wieku kontynuował studia w Getyndze i Cambridge. Wykształcenie pozwoliło mu utrzymać się jako lekarz. Przez całą swoją pracę medyczną Young utrzymywał kontakt z Towarzystwem Królewskim i został jego skarbnikiem,

a w 1804 r. sekretarzem spraw zagranicznych. W późniejszych latach próbowano go wybrać na stanowisku prezydenta, lecz odmówił, ponieważ nie lubił pracy w komitetach i oficjalnych działalności.

Pochowany i zapomniany

Jak zauważa Robinson w swojej książce, cytując słowa wielkiego XIX-wiecznego fizyka i fizjologa Hermana Helmholtza (z którym Young podziela pośmiertne uznanie za trójbarwną teorię widzenia barw), Young był „jednym z najbystrzejszych ludzi, jaki kiedykolwiek żył, lecz miał nieszczęście wyprzedzić swoich współczesnych. Patrzyli na niego ze zdziwieniem, ale nie mogli nadążyć za jego śmiałyimi spekulacjami, w związku z czym masa jego ważnych myśli pozostała pogrzebana i zapomniana w *Transakcjach Towarzystwa Królewskiego*, dopóki późniejsze pokolenie powoli nie dotarło do ponownego odkrycia jego odkryć i zaczął doceniać siłę jego argumentów i trafność wniosków”.

Spróbujmy to podsumować, jak proponuje Adam Adamczyk. Otóż „jeden człowiek zajmował się medycyną, fizjologią, fizyką, egiptologią, językoznawstwem, na dodatek świetnie jeździł konno, potrafił rysować i władał kilkunastoma, głównie egzotycznymi, językami. Z perspektywy zwykłej, nawet bardzo bystrej i wykształconej osoby, brzmi to wręcz niedorzecznie. Ale co najważniejsze, Thomas Young robił ze swej interdyscyplinarności gigantyczny użytek i w każdej ze zgłębianych dziedzin, pozostawił swój niemały wkład.”¹¹

dr Kazimierz Mikulski
Maksymilianowo

¹¹ Adamczyk A., Człowiek, który wiedział wszystko – Thomas Young, <https://www.kwantowo.pl/2017/06/25/czlowiek-ktory-wiedzial-wszystko/>

Co w fizyce piszczy

Ciemna materia a sześciokwarki

Wśród kandydatów na cząstki, które mogłyby tworzyć ciemną materię, jest pewna neutralna i trudno uchwytana cząstka – hadron S, który jest sześciokwarkiem, mieszczącym się w Modelu Standardowym. Tylko jak tę cząstkę zaobserwować? Pomysł na eksperyment w CERN mają badacze z Politechniki Warszawskiej.

Ciemna materia to – jak można się spodziewać – niewidzialna substancja, która stanowi znaczącą część całkowitej masy we Wszechświecie. Nie emituje, nie absorbuje ani nie odbija światła, przez co jest niewykrywalna przez promieniowanie elektromagnetyczne. Choć nieuchwytna, jej istnienie przejawia się we wpływie grawitacyjnym na materię widzialną, taką jak galaktyki i gromady galaktyk.

Odkrycie natury ciemnej materii stanowi ogromne wyzwanie dla fizyki cząstek elementarnych. „Do roli cząstek ciemnej materii kandydować mogłyby cząstki o masie z zakresu od 10^{-22} eV do 10^{10} eV. Jeden z takich kandydatów, hadron S – będący sześciokwarkiem składającym się z dwóch kwarków górnych, dwóch kwarków dolnych i dwóch kwarków dziwnych, do tej pory nie został jeszcze wykryty w obserwacjach ze względu na swoje unikalne właściwości” – czytamy w komunikacie PW o tych badaniach. Publikacja zespołu dr.

hab. Georgy’ego Kornakova z ukazała się na łamach czasopisma *The European Physical Journal C*.

Przypuszczalne właściwości hadronu S sprawiają, że jest on bardzo nieuchwytny w eksperymentach – powinien być neutralny elektrycznie, długożyciowy i prawie nie oddziałuje za pośrednictwem innych sił niż grawitacja.

Proponowane podejście polega na wykorzystaniu uwięzionych cząstek do pokonania wyzwań związanych z odróżnieniem produkcji cząstek danego typu od innych procesów zachodzących w tle. Pomiar ten można przeprowadzić w ciągu roku za pomocą Spowalniacza Antyprotonów (ang. Antiproton Decelerator) w CERN.

Wyjątkowość proponowanego podejścia polega na tym, że bada ono eksperymentalnie potencjalnego kandydata na ciemną materię, który/a należy do Modelu Standardowego fizyki cząstek elementarnych. Gdyby więc okazało się, że ciemna materia zbudowana jest z hadronów S, nie trzeba byłoby wymyślać nowej teorii wyjaśniającej oddziaływanie między cząstkami, tylko zadowolili się tą starą, świetnie spisującą się teorią.

Źródło informacji – na stronach Wydziału Fizyki PW. (PAP)

Żywoty fizyków

Oleg Władimirowicz Łosiew

Tadeusz Wibig



Oleg Władimirowicz Łosiew (Олѣг Владѣмирович Лосев) (1903-1942) był radzieckim naukowcem, który przepuszczając prąd przez różne nietypowe materiały, ni to przewodniki, ni to izolatory odkrył niesamowite własności niektórych z nich. Dziś materiały te nazywa się półprzewodnikami i to one kształtują oblicze współczesnego świata. Popatrzcie na swój telefon!

Oleg urodził się w Twerze w Rosji, a szkołę ukończył już w Związku Radzieckim w roku 1920. To, że jego ojciec służył jako kapitan w carskiej armii i w ogóle pochodził z wyższej klasy społecznej, nie pomogło mu w zdobyciu wyższego wykształcenia i ogólnie w życiowym awansie. Udało mu się znaleźć zatrudnienie jako technik w *Niżnym Nowogrodzkim Laboratorium Radiowym*. Powstało ono w 1918 roku na osobiste życzenie Lenina i oczywiście otrzymało imię wodza rewolucji. Było to pierwsze i wiodące radzieckie laboratorium zajmujące się rodzącymi się właśnie najnowszymi technologiami komunikacyjnymi.

Łosiew był zasadniczo naukowcem samoukiem. Uczęszczał wprawdzie na kilka kursów uniwersyteckich, ale nigdy formalnie stopnia swojego wykształcenia nie podniósł. Właściwie nie wiadomo, jak to się stało, że będąc ciągle zwykłym technikiem udawało mi się prowadzić zaawansowane badania naukowe. Początkowo koncentrował się on nad doskonaleniem radia kryształkowego, a precyzyjniej nad próbami zrozumienia procesów zachodzących w punkcie styku cienkiego druczika zwanego „kocim wąsem” z kryształkiem.

Łosiew zauważył, że gdy prąd przepływał przez punktowe złącze utworzone przez „koci wąs” na powierzchni węglika krzemu (karborundu), w punkcie styku pojawiała

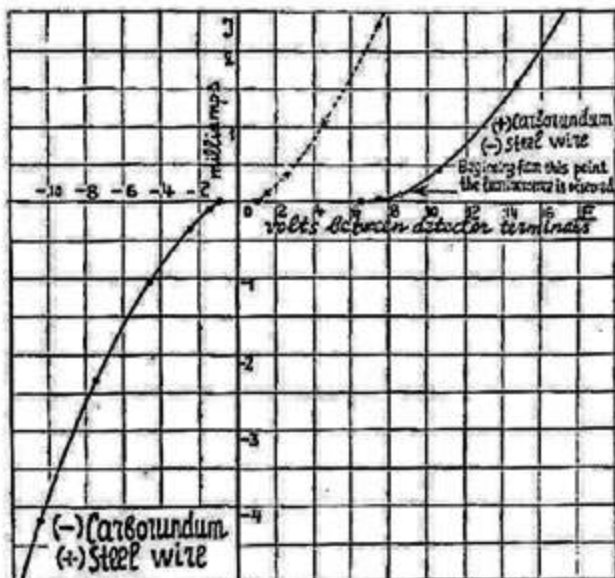
się delikatne zielonkawe świecenie. Wprawdzie efekt ten został zauważony już w 1907 roku przez Kapitana Rounda [Fizyka w Szkole nr 1/2024], to jednak Łosiew jako pierwszy zbadał go dokładniej i zaproponował nawet mechanizm tego świecenia. W 1927 roku opublikował szczegóły w czasopiśmie *Телеграфия и Телефония без Проводов* (Telegrafia i Telefonia Bezprzewodowa). Artykuł ten rok później przedrukowano w *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. W kolejnych latach opublikował więcej artykułów na ten temat także po niemiecku i angielsku i stał się człowiekiem znanym „na Zachodzie”. Mówiono wtedy nawet o świetle Losieva (*Lossev light*, *Lossev Licht*, *Losev-Licht*).

Laboratorium w Niżnym Nowogrodzie zostało zamknięte w roku 1928 i Łosiew wraz z kolegami przeniesiony został do Leningradu (dziś miasto to wróciło do starej nazwy St. Petersburg) do *Instytutu Fizyczno-Teknicznego* kierowanego przez Abrama Fedorowicza Ioffe wybitnego i uznanego fizyka laureata nagrody stalinowskiej, leninowskiej, bohatera pracy socjalistycznej itd.

Dominującą w tamtym czasie koncepcją działania świecących złączy drucik-kryształek było to, że światło emitowane było w mikroskopijnych wyładowaniach elektrycznych i w sumie było efektem termoelektrycznym. Początkowo i Łosiew był zwolennikiem tej teorii, o czym pisał jeszcze w roku 1925 w *Radio News*. Nie wiadomo skąd przyszedł mu do głowy pomysł jej przetestowania. Dla udowodnienia/obalenia hipotezy termicznej wymyślił swoisty *experimentum crucis*: postanowił zmierzyć szybkość parowania benzyny z powierzchni świecącego kryształu. Stwierdził, że była taka sama, niezależnie od tego, czy złącze świeciło, czy też nie.

Obserwowana luminescencja była światłem „zimnym”. Przy braku sensownych i klasycznych wyjaśnień, Łosiew (ciągle pracując w Instytucie jako technik!) zaproponował wyjaśnienie kwantowe odwołujące się do epokowych prac Einsteina z roku 1905. Zimne świecenie miało być efektem odwrotnym od einsteinowskiego efektu fotoelektrycznego, w którym kwanty światła wybijają z materii elektrony. Zdaniem Łosiewa elektrony przechodząc z drutu do kryształu miały pozbywać się energii (tak jakby „pracy wyjścia”) emitując przy tym kwanty światła. Zasadniczo teorii tej niewiele można zarzucić.

Łosiew, zdaniem Ioffego miał napisać o tym list do Einsteina z prośbą o pomoc w zgłębieniu teorii elektroluminescencji, jednak na odpowiedź nigdy się nie doczekał. Badał więc dalej samodzielnie odkryte przez siebie świecenie, sprawdzał charakterystyki prądowo-napięciowe złącza, jego własności temperaturowe, modulował emisję częstotliwościami dochodzącymi do 100 kHz. Wnioskiem z tych prac był między innymi patent, jaki uzyskał za



„przekaznik światła”, czyli po prostu swoją diodę elektroluminescencyjną, w której widział doskonałe źródło światła dla zastosowań, jak sam pisze we wniosku patentowym „dla szybkiej komunikacji telegraficznej i telefonicznej, przesyłania obrazów na odległość i tym podobnych”.

Pracując w Instytucie Ioffego, gdzie w roku 1938 uzyskał doktorat (choć bez formalnej rozprawy) i potem w *Katedrze Fizyki Pierwszego Leningradzkiego Instytutu Medycznego*, zajmował się ciągle półprzewodnikami. Jako pierwszy wykorzystał zjawisko ujemnego oporu do budowy półprzewodnikowych oscylatorów i wzmacniaczy. Bliski był być może zbudowania, jak sam pisał, „półprzewodnikowej analogii trójelektrodowej lampy elektronowej (triody)”. Dziś coś takiego nazywamy po prostu tranzystorem, a za jego zbudowanie w roku 1947 Bardeen i Brattain dostali nagrodę Nobla.

Nie wiemy, jak daleko posunął się w swoich pracach Losiew, bo ostatnia jego praca, którą przygotowywał do



druku w *Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики* (JETP) zaginęła w tragicznych zdarzeniach podczas blokady Leningradu. Zaginęła też pamięć o nim samym. Zmarł z głodu w obłożonym Leningradzie w styczniu 1942 roku w wieku lat 38.

Doświadczenie domowe:

Dioda elektroluminescencyjna i odwrotnie

A. Potrzebne materiały

1. Dowolna dioda elektroluminescencyjna LED
2. Miernik uniwersalny
3. Słońce

B. Narzędzia: zbędne

C. Kolejność czynności

1. Ustawiamy miernik uniwersalny do pracy jako woltomierz na możliwie niskim zakresie.
2. Łączymy wyprowadzenia diody z miernikiem.
3. Wystawiamy diodę na światło słoneczne.
4. Obserwujemy wskazania woltomierza.
5. Zaslaniaamy słońce.
6. Obserwujemy wskazania woltomierza.
7. Powtarzamy czynności od punktu 3. kilka razy.



Co w fizyce piszczy

Jak szukać innych cywilizacji?

Jeśli chcemy znaleźć pozaziemskie cywilizacje, musimy szukać solidnych naukowych dowodów na ich istnienie. Musimy choćby badać obiekty, które przybywają do nas spoza Układu Słonecznego – przekonywał prof. Avi Loeb z Uniwersytetu Harvarda podczas konferencji Nowe Obroty w Toruniu, które odbyły się od 16 do 18 lutego w Toruniu. Były to wydarzenia dotyczące przyszłych rewolucji w nauce, sztuce i społeczeństwie wieńczące obchody Roku Mikołaja Kopernika w Toruniu.

Czy to możliwe, że we Wszechświecie, który liczy kilkanaście miliardów lat, w którym jest niewyobrażalnie wiele galaktyk usianych gwiazdami, jesteśmy pierwszą i jedyną cywilizacją?

Zdaniem badacza nie należy z góry zakładać, że obce cywilizacje nigdy do nas nie dotrą. Zamiast tego warto aktywnie szukać śladów tych cywilizacji. Bo – jak mówi badacz – kto nie szuka, ten nie znajdzie.

Dlatego naukowiec w ramach projektu Galileo za pomocą różnych instrumentów chce monitorować niebo w poszukiwaniu anomalii – obiektów, których nie da się łatwo zinterpretować.

Loeb w czasie wykładu zaznaczył, że jeden z bardziej znanych projektów poszukiwania życia pozaziemskiego – SETI – szuka fal radiowych. Fale jednak szybko przemijają, wystarczy chwila, żeby je przegapić. Prof. Loeb zaś woli szukać „twardych dowodów” – obiektów pochodzenia międzygwiazdowego, bo one trwają, są wykrywane przez grawitację czy to Słońca czy Ziemi.

Badacz opisywał swoją zeszłoroczną wyprawę naukową, podczas której wraz z zespołem poszukiwał na dnie oceanu śladów nietypowego meteoru IM1. Upadek tego obiektu zaobserwowano 10 lat temu i zwrócono wtedy uwagę, że prędkość tego ciała była bardzo duża – na tyle duża, że zapewne nie pochodził on z Układu Słonecznego. A w dodatku był twardszy niż żelazo. Prof. Loeb był bardzo ciekaw, co to mogło być.

Statek badawczy po dnie oceanu ciągnął więc wielki magnes. A zespół sprawdzał, co się na magnesie zbiera. W ten sposób znaleziono m.in. setki metalicznych kuleczek o średnicy mniejszej niż milimetr. Dalsze analizy wykazały, że skład tych kulek (w tym beryl i uran) wskazuje na pochodzenie spoza Układu Słonecznego.



Foto – Adobe Stock

Zostawcie uczniom „komórki”

Arleta Biegańska

Od dłuższego czasu polska szkoła jest w ogniu krytyki. Rodzice oskarżają system oświaty, nauczycieli i polityków o złą organizację nauczania, o przeciążenie uczniów nauką, o złe warunki pobytu w szkołach, programy nauczania itd. Uczniowie skarżą się na złą atmosferę w szkole, na nudę i przemęczenie. Podobno obserwuje się u uczniów „zespół wypalenia edukacyjnego”. Trudno znaleźć obszar wolny od krytyki.

W ślad za krytyką idą różne propozycje naprawy. Od działań podejmowanych na szczeblu rządowym (np. laptop dla nauczyciela, laptop dla ucznia, Cyfrowa Szkoła, odchudzenie programów itd.) do różnych oddolnych działań podejmowanych w szkołach. Na przykład wprowadzenie „innovacji” polegającej na uwolnieniu szkół od dzwonek.

Innym przykładem jest wprowadzenie ćwiczeń gimnastycznych w czasie lekcji, czy wspólnych tańców podczas przerwy. Podobne działania były podejmowane już w przeszłości i niestety nie wytrzymały próby czasu. Tego typu inicjatywy nie mają istotnego wpływu na jakość pracy szkół, są jednak medialne, a podejmujące je szkoły mają poczucie nowatorstwa.

Chcę się jednak odnieść do pojawiających się co jakiś czas propozycji wprowadzenia zakazu używania telefonów komórkowych w szkołach, czy wręcz zakazu wnoszenia przez uczniów telefonów na teren szkoły. Odkąd upowszechniły się telefony komórkowe trwa dyskusja na temat ich złego wpływu na dzieci. Nauczyciele również obawiają się wykorzystania telefonu przeciwko nim m.in.

poprzez nagranie, sfotografowanie i upublicznienie w sieci ewentualnego błędu nauczyciela.

Kiedy pojawiły się pierwsze telefony komórkowe, były one dobrem niemal luksusowym. Telefony te były obiektem marzeń wszystkich uczniów, a model „komórki” był znacznikiem statusu społecznego. Zdarzały się kradzieże telefonu, złośliwe zniszczenia itp. Wtedy też pojawiły się pierwsze głosy dotyczące wprowadzenia zakazu wnoszenia telefonów do szkoły.

Zauważmy, że kwestia korzystania z telefonów komórkowych i innych urządzeń w szkołach jest określona aktem prawnym w randze ustawy. W art. 99 ustawy „Prawo oświatowe” zapisano m. in. „Obowiązki ucznia określa się w statucie szkoły z uwzględnieniem obowiązków w zakresie (...) 4) przestrzegania warunków wnoszenia i korzystania z telefonów komórkowych i innych urządzeń elektronicznych na terenie szkoły;”¹

W tym miejscu pragnę zwrócić uwagę na fakt, że w ustawie mowa nie tylko o telefonach komórkowych, ale również o innych urządzeniach elektronicznych. Przeglądając statuty niektórych szkół zauważyłam, że w tych dokumentach opisane są czasem bardzo szczegółowe zasady korzystania z telefonów komórkowych. W wielu przypadkach wymieniane są inne urządzenia elektroniczne np. PSP, mp3, mp4, tablety, laptopy i inne.

Może trzeba przejrzeć i zaktualizować statuty. Zapisy powinny być adekwatne do rzeczywistości. Jeśli statut zawiera zapisy dotyczące tylko telefonów komórkowych, to można interpretować, że owe zapisy nie dotyczą np. smartwatcha. Z drugiej strony regulacje statutowe nie powinny być zbyt szczegółowe. Na rynku co rusz pojawiają się nowe urządzenia elektroniczne (np. coraz bardziej

¹ ustawa z dnia 14 grudnia 2016 r. Prawo oświatowe (Dz. U. z 2023 r. poz. 900, 1672, 1718 i 2005)

popularne są smartwatche) i w praktyce można nie nadążać za zmianami szkolnej „konstytucji”.

Obecnie powszechnymi stały się nie telefony komórkowe, a raczej smartfony jak również inne elektroniczne gadżety. Z drugiej strony w szkołach coraz częściej korzysta się w trakcie lekcji z różnych urządzeń elektronicznych na przykład laptopów, tabletów, monitorów interaktywnych itp. W te urządzenia szkoły były wyposażane m.in. w ramach programów rządowych takich jak „Aktywna tablica”, „Cyfrowa szkoła” i innych. W tej sytuacji propozycje wprowadzenia zakazu używania telefonów czy smartfonów brzmią trochę archaicznie.

Telefon komórkowy² w szkole

Zawsze byłam przeciwniczką zakazywania wnoszenia czy użytkowania telefonów komórkowych. Po pierwsze jak można wyegzekwować ten zakaz? Kto ma przeprowadzać rewizję plecaków, kieszeni uczniowskich? Jak karać tych, co nie respektują podobnych zakazów?

Telefony komórkowe, a zwłaszcza smartfony uczniów, wpływają na wzrost poczucia bezpieczeństwa uczniów w drodze do i ze szkoły. Rodzice mają możliwość kontrolowania miejsca pobytu dziecka. Jak my dorośli czulibyśmy się, gdyby odebrano nam telefon? Ja osobiście jadąc np. samochodem czuję duży dyskomfort, gdy uświadomię sobie, że telefon został w domu. Nie robmy więc dzieciom tego, co nam dorosłym sprawia przykrość.

Zamiast zakazywać starajmy się przygotować uczniów do właściwego korzystania z telefonu. Ustalmy zasady korzystania z telefonu w szkole. Nauczmy dzieci swobodnego *savoir-vivre*. Zarówno uczniowie jak i personel szkoły, niezależnie od zajmowanego stanowiska, powinni przestrzegać podstawowych zasad. Szczególnie naruszana jest przez dzieci, ale również przez dorosłych, zasada nieprzeszkadzania innym i zasada zachowania dyskrecji.

Starajmy się uświadomić dzieciom, że rozmawiając na cały głos o sprawach prywatnych w obecności osób postronnych upubliczniają dane dotyczące np. miejsca zamieszkania, miejsca pracy rodziców itp. Informacje te mogą być wykorzystane w sposób dla nich niekorzystny.

Zwróćmy uwagę na to, że nagrywanie osób bez ich zgody jest naruszeniem prawa. Nie wolno nam filmować, robić zdjęć innym osobom. Z drugiej strony mamy prawo zaprotestować, gdy ktoś bez naszej zgody robi nam zdjęcie, czy nas nagrywa. Starajmy się, aby dźwięk telefonu i nasze rozmowy nie przeszkadzały innym. Warto zwrócić się do rodziców, aby więcej uwagi poświęcili bezpiecznemu korzystaniu z telefonów.

Na pierwszej lekcji, tzw. organizacyjnej, omawiam w/w zasady korzystania z telefonów. Umawiamy się, że w czasie zajęć telefon jest wyciszony i schowany w plecaku. Z telefonu w czasie lekcji korzystamy za zgodą nauczyciela. Za zgodą nauczyciela można robić zdjęcia, nagrać doświadczenie, sfotografować niektóre zapisy na tablicy.

Jak powinniśmy się zachować, gdy telefon zadzwoni w czasie lekcji? Bądźmy wyrozumiali, nie robmy afery. Wystarczy jak telefon zostanie wyłączony a właściciel (nieważne czy to uczeń, czy nauczyciel) słowem „przepraszam” zamyka sprawę. Niech rzuci kamieniem ten, którego nie zdarzyło się zapomnieć o wyłączeniu telefonu.

Komórka na fizyce sprzymierzeńcem nauczyciela

Nowoczesny telefon komórkowy tzw. smartfon, łączący w sobie funkcję telefonu komórkowego i komputera przenośnego, daje duże możliwości wsparcia nauczyciela, a zwłaszcza nauczyciela fizyki. Większość szkół, zwłaszcza wiejskich, nie może się pochwalić bogato wyposażoną pracownią.

Bogato wyposażona pracownia to nie ta posiadająca nowoczesne pomoce do pokazów, ale pracownia posiadająca odpowiednią ilość podstawowych przyrządów do wykonywania indywidualnych pomiarów i eksperymentów. Mam na myśli odpowiednią liczbę wag elektronicznych, siłomierzy, ciśnieniomierzy itd. Przyrządy te powinny mieć skale o zróżnicowanych zakresach, różnej dokładności czy zróżnicowanych jednostkach. Jeśli szkoła podstawowa funkcjonuje w budynku, w którym wcześniej zlokalizowane było gimnazjum, to dysponuje ona pracownią, która była wyposażana przez lata.

Większość szkół, zwłaszcza wiejskich, funkcjonuje w budynkach po byłej sześcioklasowej szkole podstawowej. W tych szkołach od podstaw trzeba organizować pracownie przedmiotowe do fizyki, chemii czy biologii. Co prawda szkoły te otrzymały wsparcie na wyposażenie w pomoce z tych przedmiotów, ale to nie wystarcza. W 2021 r. MEN przeznaczyło prawie 290 mln zł na wyposażenie w pomoce dydaktyczne, niezbędne do realizacji podstawy programowej z przedmiotów przyrodniczych (biologia, fizyka, chemia i geografia) w szkołach podstawowych.

W 2023 r. realizowano rządowy program rozwijania szkolnej infrastruktury oraz umiejętności podstawowych i przekrojowych dzieci i młodzieży - „Laboratoria przyszłości”³. Wiem z doświadczenia, że te środki nie zaspokoiły wszystkich potrzeb. Dobre pomoce naukowe są drogie.



Foto – Dreanstime

² W dalszej części termin „telefon” – rozumiany również jako smartfon, lub inne urządzenie elektroniczne.

³ Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 27 lipca 2023 r. w sprawie realizacji rządowego programu rozwijania szkolnej infrastruktury oraz umiejętności podstawowych i przekrojowych dzieci i młodzieży - „Laboratoria przyszłości” (Dz. U. poz. 1643)

Ograniczona liczba godzin fizyki w ramowym planie nauczania nie pozwala na przeprowadzanie wielu doświadczeń w trakcie lekcji. W tej sytuacji zachęcam uczniów do robienia doświadczeń z wykorzystaniem sprzętu znajdującego się choćby w domowej kuchni. Uczniowie nagrywają filmy lub robią zdjęcia samodzielnie przeprowadzanych eksperymentów i prezentują je na lekcjach. Prezentacja filmu na forum klasy jest warunkiem uzyskania oceny. Przedstawione zdjęcia, filmy powinny zawierać potwierdzenie autorstwa. Na zdjęciach, filmie powinien być widoczny autor lub jakiś rekwizyt potwierdzający jego autorstwo.

Na przykład jednym z zadań w klasie VIII było sfotografowanie zjawisk optycznych w okolicy. Uczniowie pokazali dużo ładnych zdjęć tęczy, zachodu Słońca itp. Nie

miałam wątpliwości, że są autorami zdjęć (że nie ściągnęli zdjęć z Internetu), bo tłem zdjęć były okoliczne budynki: szkoła, kościół i inne. Ta forma pracy domowej nie jest obowiązkowa. Za samodzielnie wykonane doświadczenia uczniowie zazwyczaj otrzymują wysokie oceny. Z tego powodu z własnej inicjatywy przygotowują relacje z samodzielnie przeprowadzanych obserwacji i doświadczeń korzystając przy tym z urządzeń elektronicznych.

Często uczniowie przygotowują sprawozdania z doświadczeń wykraczających poza program. Inspiracją są m.in. filmy zamieszczane na kanale Youtube. Zdarzyło się, że pod wpływem filmu z sieci uczniowie robili z ołówków i długopisów konstrukcje z wykorzystaniem zasad statyki i stawiali je na swoich stolikach. W ten sposób prowokowali mnie do zainteresowania się ich pracami i sukcesami, że

UNESCO apeluje o zakaz

Rząd Szwecji zdecydował o wprowadzeniu zakazu używania telefonów komórkowych w szkołach podstawowych. Celem tej inicjatywy jest zwiększenie skupienia na nauce i poprawienie wyników edukacyjnych. W praktyce telefony komórkowe będą zabierane od ucznia na początku dnia szkolnego i zwracane pod jego koniec. Zakaz obejmie tylko szkoły podstawowe.

Wcześniej eksperci wskazywali, że nadużywanie smartfonów zwiększa liczbę dzieci z krótkowzrocznością. Innym zjawiskiem jest uzależnianie się od dobrych opinii otrzymywanych w mediach cyfrowych, co stymuluje mózg podobnie do użycia nikotyny, alkoholu lub narkotyków.

W wielu innych krajach obowiązują już zakazy (bądź zapowiedziano ich wprowadzenie w 2024 r.) używania telefonów komórkowych w szkołach. Francja jest pierwszym na świecie krajem, który już w 2018 r. wprowadził taki zakaz. Zakazy wprowadzono lub zaleca się ich stosowanie w Anglii, Francji, Hiszpanii, Holandii, Finlandii, Portugalii, Izraelu, Chinach, Australii (Tasmania), Grecji, Ghanie, Rwandzie i Ugandzie. Także Rosja wprowadziła taki zakaz.

W Niemczech, Belgii, Czechach i Słowacji zakazy są w gestii dyrekcji szkół.

Z informacji Krajowego Centrum Statystyk Edukacyjnych za 2020 rok, z którego wynika, że w 76% amerykańskich szkół wprowadzono już zakazy korzystania z telefonów komórkowych.

Autorzy ubiegłorocznego raportu UNESCO zatytułowanego „Technologia w edukacji”, ostrzegają przed nadużywaniem w szkolnictwie nowoczesnych technologii, takich jak smartfony i komputery. Twierdzą, że korzyści płynące z wykorzystywania takich urządzeń w szkołach znikają, jeśli uczniowie używają ich w nadmiarze lub bez wskazówek nauczyciela. W takim przypadku, jak stwierdza raport, smartfony negatywnie wpływają na wyniki w nauce. UNESCO apeluje, by poszczególne kraje wprowadziły zakaz używania tego typu urządzeń w szkołach.

Opracowanie - Redakcja

<https://skandynawiainfo.pl/szwecja-zamierza-zakazac-uzywania-telefonow-komorkowych-w-szkolach/>

<https://polonia.tvp.pl/65701626/kolejne-panstwa-wprowadzaja-zakaz-korzystania-z-telefonow-komorkowych-w-szkolach>

<https://ehtrust.org/russia-and-sweden-banning-cell-phones-in-school/>

https://forsal.pl/swiat/aktualnosci/artykuly/8648027/szkoly-w-hiszpanii-ograniczaja-uzywanie-telefonow.html#google_vignette



Foto – Dreanstime

się im udało. Zachęcam uczniów, aby również udostępniali swoje filmiki czy zdjęcia w sieci. Niektóre są bardzo udane i warte tego, aby się nimi pochwalić nie tylko w klasie.

Rozwiązując zadania związane z obliczeniem wybranej wielkości fizycznej trzeba wykonywać różne działania matematyczne. Często pozwalam uczniom na skorzystanie z kalkulatorów, które mają m.in. w telefonach. Oprócz znacznej oszczędności czasu pozwala to na doskonalenie umiejętności zaokrąglania wyników i zapisywania ich zgodnie z wymaganą liczbą cyfr znaczących. Kształcimy w ten sposób umiejętność krytycznej oceny wykonanych obliczeń i stosowania wiedzy o niepewnościach pomiarowych. Wyniki powinny być zapisane tylko z jedną cyfrą niepewną.

Stosując kalkulatory do obliczeń uczniowie powinni przestrzegać kolejności wykonywania działań matematycznych, co nie jest mocną stroną również dorosłych. Przydaje się tu umiejętność szacowania wyników obliczeń, która pozwoli szybko zweryfikować otrzymany wynik. Obserwuję, że wielu uczniów nie potrafi korzystać z kalkulatora, popełniają liczne błędy, ale w miarę upływu czasu radzą sobie coraz lepiej.

Do wyznaczenia okresu drgań wahadła matematycznego zapraszam wszystkich uczniów. Dysponuję dużym modelem wahadła. Uczniowie mierzą czas 10 drgań. Wyniki zapisujemy na tablicy. Wśród wyników zdarzają się takie, które bardzo odstają od innych. Uczniowie od razu reagują i wyjaśniają, że kolega za późno włączył stoper. Niektórzy sami zgłaszają zbyt wczesne lub spóźnione włączenie lub wyłączenie stopera. W trakcie zapisywania odrzucamy wyniki zbyt różniące się od pozostałych. W ten sposób w praktyce uczniowie poznają wpływ błędu przypadkowego na wynik pomiaru, uczą się krytycznego podejścia do wyników pomiarów. Ten sposób postępowania angażuje wszystkich uczniów i nie ma miejsca na nudę.

Warunkiem zaangażowania wszystkich uczniów jest posiadanie odpowiedniej ilości stoperów. Na wyposażeniu pracowni jest ich co najwyżej kilka, więc telefony uczniowskie są bardzo przydatne. W dalszej kolejności uczniowie wyznaczają okres drgań własnoręcznie zbudowanych wahadeł. Pracują w małych grupach i samodzielnie przeprowadzają pomiary. Telefon pozwala szybko obliczyć wartość okresu drgań, a nawet sfilmować drgania.

Posiadanie przez uczniów telefonów pozwala na korzystanie z aplikacji umieszczonych na różnych, często darmowych platformach edukacyjnych. Na lekcjach powtórzeniowych często rozwiązujemy zadania, quizy, testy czy gry zamieszczone m.in. na platformie LearningApps⁴. Korzystając z tej platformy możemy sami tworzyć zadania, gry przystosowane do potrzeb naszej klasy. Inne polecane platformy to m.in. Quizizz⁵, Kahoot⁶.

Wydawnictwa podręczników również udostępniają różne materiały interaktywne, które można wykorzystać w procesie dydaktycznym. Można umożliwić uczniom dostęp do



wersji elektronicznych podręczników. Korzystając ze smartfonów takie zajęcia mogą być zrealizowane w sytuacji, gdy uczniowie nie mają dostępu do szkolnych laptopów.

Innym przykładem wykorzystania telefonu na lekcji jest sporządzanie notatek w postaci zdjęcia. Gdy robimy doświadczenia, np. badając ruch ciała z wykorzystaniem czasomierza kropłowego, wyniki zapisujemy na tablicy. W tabeli mamy zapisy około 20 pomiarów lub więcej – zależy to m.in. od liczby uczniów w klasie. Staram się, aby każdy z uczniów dokonał co najmniej jednego odczytu. Sensowne jest zrobienie zdjęcia zapisów tablicowych, aby nie tracić czasu na przepisywanie tabeli do zeszytu. Do wyników tego doświadczenia odwołujemy się na kolejnych lekcjach kinematyki.

W sytuacji braku pracowni przedmiotowych, niewystarczających zasobów pomocy naukowych uczniowskie urządzenia elektroniczne są bardzo przydatne. Mogą sprawić, że lekcje fizyki stają się atrakcyjne. W klasie VII uczniowie po raz pierwszy spotykają się z fizyką i są pełni obaw. O fizyce bowiem krążą mity, że jest trudna, niezrozumiała, tajemnicza⁷. Po kilku lekcjach spytałam uczniów jak im się podobają lekcje fizyki. Odpowiedź mnie zaskoczyła: „jest fajnie, bo można korzystać z komórek”. Między innymi dlatego nie zrezygnuję z wykorzystywania różnych urządzeń elektronicznych na lekcjach.

Dla dzieci wpatrywanie się w ekrany jest sposobem na nudę. Rozwiązaniem problemu nadmiernego korzystania przez uczniów z różnych urządzeń elektronicznych, niezdrowego i długotrwałego wpatrywania się w ekrany są atrakcyjne zajęcia dla dzieci i młodzieży. Dla młodszych dzieci będą to wspólne zabawy z rodzicami, dla starszych atrakcyjne zajęcia zmuszające do aktywności. Na fizyce będą to m.in. samodzielnie wykonywane doświadczenia. Tym argumentom dorośli przeciwstawiają brak czasu. Przyczyna omawianego problemu leży więc po stronie dorosłych. Zostawmy zatem uczniom „komórki”.

Arleta Biegańska
Kawęczyn

⁴ LearningApps.org – interaktywne i multimedialne moduły edukacyjne

⁵ Join a Quizizz activity – Enter code – Join my quiz – Quizizz

⁶ Kahoot! | Gry edukacyjne | Spraw, aby nauka była niesamowita!

⁷ Polecam artykuły Edward Rydgier „Kondycja nauczania fizyki w polskich szkołach. 48 Zjazd Fizyków Polskich oraz Arleta Biegańska „Dwie królowe”, Fizyka w Szkole z Astronomią nr 6/2023

Metody wizualizacji 3D i ich biofizyczne podstawy

W jaki sposób przedstawić trójwymiarowy obiekt na płaszczyźnie, żeby jego obraz zachował najwięcej informacji o tym obiekcie i jak najwierniej z płaskich obrazów odtworzyć trójwymiarowy obiekt? Odpowiedzi na te dwa ważne pytania formułuje poniżej zamieszczony artykuł.

Stanisław Bednarek

Wszystkie zjawiska i obiekty, które są przedmiotem badań fizyki mają miejsce w przestrzeni. W sytuacjach badanych przez fizykę klasyczną jest to trójwymiarowa przestrzeń Euklidesa. Często jednak trzeba dokonać przedstawienia tych obiektów i zjawisk na płaszczyźnie dwuwymiarowej przy użyciu rysunków lub fotografii. Taka redukcja liczby wymiarów powoduje, że niestety część informacji jest tracona, albo dochodzi do zniekształceń. Powszechnie wiadomo z geografii, że odwzorowanie trójwymiarowego fragmentu kuli ziemskiej na płaskiej powierzchni mapy prowadzi do zniekształcenia przynajmniej jednego z takich elementów jak: odległości, kąty lub powierzchnie obiektów znajdujących się w terenie. Wówczas pojawia się problem, w jaki sposób dokonać tych przedstawień, żeby zniekształcenia ograniczyć do minimum lub, żeby udało dwuwymiarowego zapisu uzyskać jak najwięcej informacji o obiektach trójwymiarowych. Sformuło-

wany problem jest rozwiązywany przy użyciu różnych metod wizualizacji trójwymiarowych, powszechnie określanych skrótem 3D (z ang. three-dimensional – trójwymiarowy). Systematyczny przegląd tych metod oraz ich fizycznych i biofizycznych podstaw jest zawarty w dalszych częściach niniejszego artykułu.

Zdolność widzenia przestrzennego

Człowiek ma zdolność widzenia trójwymiarowego, które polega na tym, że zauważa nie tylko odległości między przedmiotami w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku patrzenia, ale również odległości wzdłuż tego kierunku [1]. Widzenie trójwymiarowe, nazywane też stereoskopowym, umożliwia odbieranie pełniejszej informacji o otaczającej rzeczywistości i sprawne poruszanie się w przestrzeni. Zdolność widzenia trójwymiarowego maleje wraz ze wzrostem odległości oglądanych przedmiotów od patrzącego. Jeżeli oglądane przedmioty znajdują się dalej, to wówczas ocena odległości między nimi w kierunku widzenia jest coraz trudniej-

sza i w końcu staje się niemożliwa. W przypadku obiektów zlokalizowanych na płaskim, otwartym terenie w odległości kilku km od patrzącego wydaje się, że te wszystkie obiekty leżą w jednakowej odległości, którą wyznacza linia horyzontu. Jeżeli któryś z tych obiektów będzie się poruszał w kierunku patrzącego, to trudno będzie ten ruch zauważyć nieuzbrojonym okiem aż do wystąpienia wyraźnej zmiany rozmiarów tego obiektu. Ten efekt stanowi dużą trudność w różnych sytuacjach, np. podczas zdalnego sterowania bezzałogowymi statkami powietrznymi, popularnie nazywanymi dronami.

Widzenie trójwymiarowe jest możliwe w wyniku sprawnego współdziałania gałek ocznych i ośrodków wzrokowych, zlokalizowanych w płatach potylicowych kory mózgowej. Gałki oczne człowieka są tak umieszczone, że środki źrenic znajdują się w odległości ok. 70 mm od siebie. Podczas oglądania dowolnego przedmiotu na siatkówce każdej gałki ocznej są tworzone obrazy tego przedmiotu, które nieco różnią się od siebie. Jest to wynikiem różnej lokalizacji każdej

gałki ocznej względem przedmiotu. Dla przykładu, jeżeli oglądany przedmiot znajduje się na wprost nosa, to na siatkówce prawej gałki ocznej obraz bardziej uwidacznia prawą stronę tego przedmiotu, a obraz na siatkówce drugiej gałki ocznej – jego lewą stronę. Te obrazy są przekazywane, za pośrednictwem impulsów elektrycznych przez nerwy wzrokowe do ośrodków w korze mózgowej, gdzie następuje synteza obu obrazów, które wskutek wyuczonych procedur są rozpoznawane, jako obraz trójwymiarowy. To wyjaśnienie widzenia przestrzennego będzie wykorzystane w dalszych częściach artykułu do wyjaśnienia metod wytwarzania obrazów trójwymiarowych.

Ogólnie można powiedzieć, że metody umożliwiające widzenie trójwymiarowe z nielicznymi wyjątkami polegają na zarejestrowaniu na płaszczyźnie, np. na kliszy fotograficznej, dwóch płaskich obrazów danego obiektu widzianego z dwóch punktów oddalonych od siebie na odległość źrenic człowieka. Do uzyskania tych obrazów można użyć, m.in. dwóch aparatów fotograficznych lub dwóch kamer filmowych, których osie optyczne obiektywów są rozsunięte na odległość zbliżoną do tej odległości. Następnie przed każdym okiem jest prezentowany tylko jeden odpowiednio wybrany z zarejestrowanych obrazów. Wybór obrazu odpowiada sytuacji bezpośredniego oglądania obiektu. W wyniku tego w ośrodkach wzrokowych kory mózgowej te obrazy są rozpoznawane, jako jeden trójwymiarowy obraz oglądanego obiektu. Do nielicznych wyjątków od tej zasady należy holografia. Przyrządy optyczne przeznaczone do oglądania obrazów trójwymiarowych są nazywane stereoskopami [2, 3].

Rzutowanie prostokątne i ukośne

Jednym ze sposobów wizualizacji obiektu trójwymiarowego na płaszczyźnie jest jego rzutowanie. W rysunku technicznym bardzo często stosuje się rzutowanie prostokątne (rys. 1.a). Jest to niewątpliwie najprostszy i najłatwiejszy do wykonania rodzaj rzutowania. Rzutowanie prostokątne polega odwzorowaniu

punktów obiektu na wzajemnie prostopadłych płaszczyznach, nazywanych rzutniami [4]. Odwzorowanie odbywa się przy użyciu prostych prostopadłych do tych płaszczyzn, nazywanych prostymi rzutującymi i przechodzącymi przez punkty obiektu. Punkty przecięcia prostych rzutujących z rzutniami dają obrazy odpowiednich punktów obiektu. Z fizycznego punktu widzenia taki sposób rzutowania jest analogiczny do tworzenia cieni obiektu przez wiązki światła padające na ten obiekt z trzech wzajemnie prostopadłych kierunków na trzy prostopadłe do siebie płaszczyzny. Do przedstawienia obiektów o prostszych kształtach wystarczają trzy lub nawet dwa rzuty. Taka sytuacja pojawia się wtedy, gdy wygląd obiektu z dwóch różnych stron jest taki sam. Najprostsze przykłady takich obiektów to sześcian, prostopadłościan, czy walec.

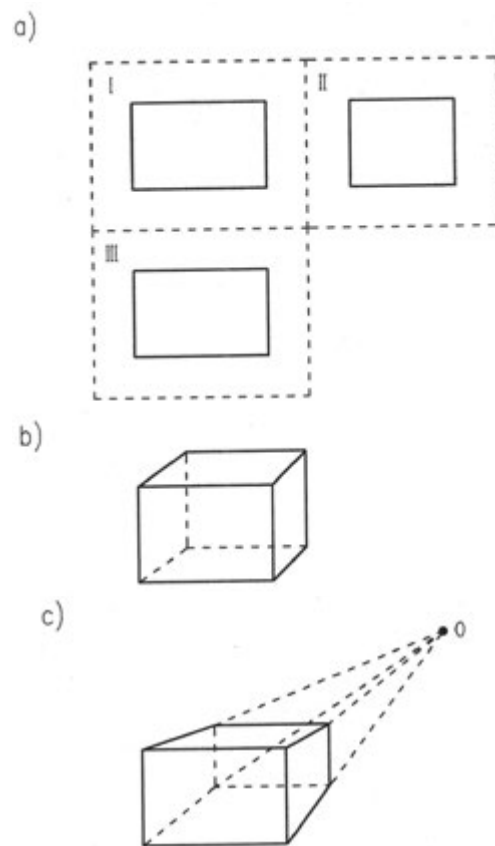
Istotną wadą rzutowania prostokątnego jest to, że odtworzenie rzeczywistego wyglądu trójwymiarowego obiektu następuje w wyobraźni osoby korzystającej z tego rodzaju odwzorowania. Nabycie tej umiejętności wymaga ćwiczeń. W przypadku profesjonalistów, mających odpowiednie przygotowanie – techników, czy inżynierów nie stanowi to problemu. Gorzej jest, gdy osoba nie mająca takiego przygotowania, np. uczeń, czy klient musi na podstawie płaskich obrazów wyobrazić sobie trójwymiarowy układ doświadczalny, przyrząd lub towar, żeby zrozumieć jego działanie lub podjąć decyzję o zakupie.

Łatwiejsze do interpretacji przez osoby nie przygotowane zawodowo są wizualizacje obiektu trójwymiarowego przy użyciu rzutu ukośnego równoległego (rys. 1.b), albo odwzorowania perspektywicznego zbieżnego, stosowanego często w malarstwie (rys. 1.c). Wadą tych obu wizualizacji jest jednak to, że nie dają poczucia pełnej trójwymiarowości, ponieważ wygląd obiektu nie zmienia się wraz ze zmianą pozycji obserwatora, a ponadto na obrazie nie są zachowane rzeczywiste odległości i kąty między elementami obiektu. Pierwszą z tych wad można częściowo usunąć, gdy zobrazowanie będzie tworzone na ekranie monitora komputerowego

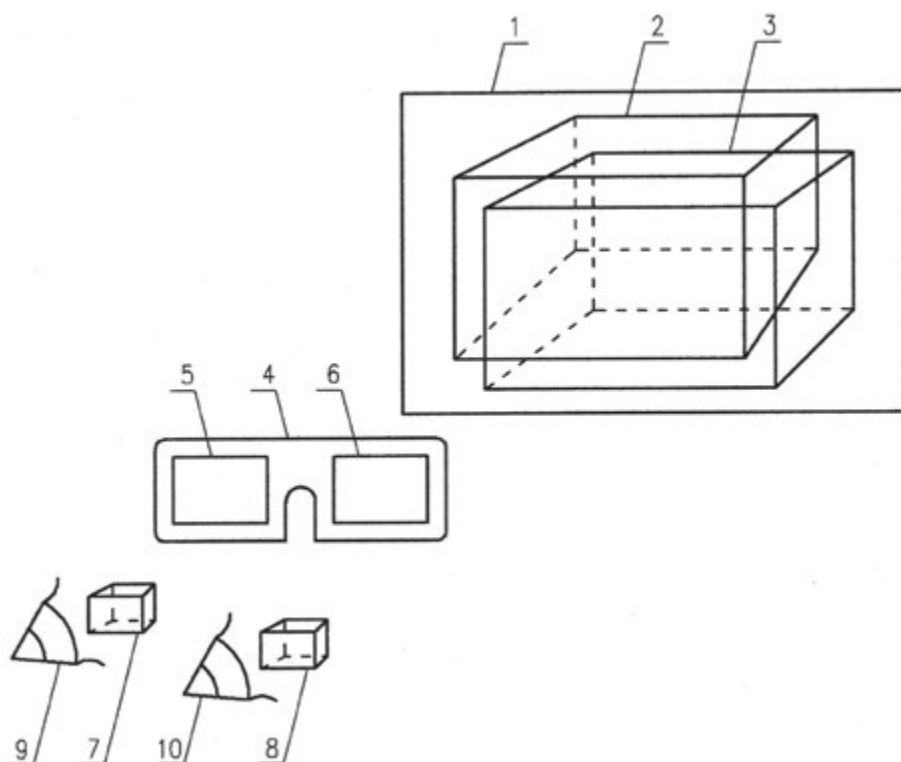
i oglądający będzie miał opcję obrotu oraz przesuwania obrazu. Wtedy zostanie zrealizowana możliwość oglądania obiektu z różnych pozycji.

Metoda anaglifów

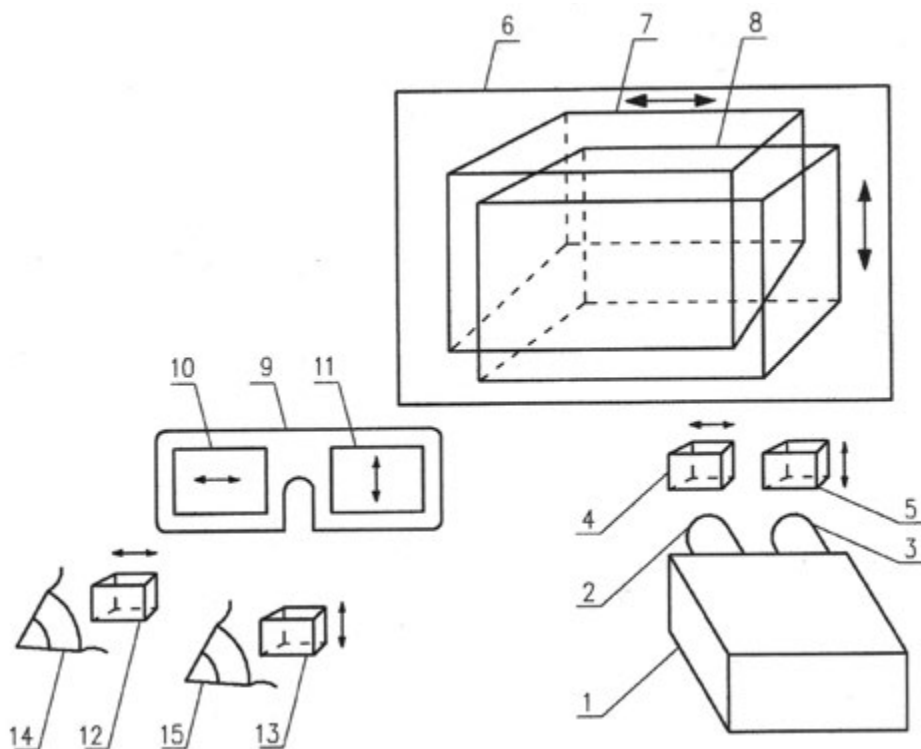
Słowo anaglif pochodzi z języka greckiego i oznacza „przedmiot wyrzeźbiony”. Pierwszy etap tej metody polega na tym, że najpierw wykonuje się na jednej płaszczyźnie dwa rzuty perspektywiczne lub fotografie obiektu, który ma być wizualizowany (rys. 2). Te rzuty przedstawiają obiekt z dwóch punktów widzenia oddalonych od siebie o ok. 70 mm, to jest na odległość równą średniej odległości między źrenicami człowieka. Skutkiem tego rzuty przedstawiają obiekt w taki sposób, w jaki jest oglądany bezpośrednio lewym i prawym okiem. Ponadto jeden z rzutów, np. ten widziany lewym okiem, przedstawia przedmiot w świetle niebieskim a drugi rzut w świetle czerwonym. W przypadku fotografii stosuje się aparat z dwoma obiektywami, których osie optyczne są równoległe do



Rys. 1. Najprostsze sposoby wizualizacji przestrzennej na przykładzie prostopadłościanu; a) rzutowanie prostokątne: I – rzut z przodu, II – rzut z boku, III – rzut z góry; b) rzutowanie ukośne równoległe; c) odwzorowanie perspektywiczne zbieżne.



Rys. 2. Wyjaśnienie wizualizacji przestrzennej przy użyciu anaglifów; 1 – tablica, 2 – rzut prostopadłościowy widzianego przez lewe oko w kolorze niebieskim, 3 – rzut prostopadłościowy widzianego przez prawe oko w kolorze czerwonym, 4 – oprawka okularów, 5 – filtr optyczny niebieski, 6 – filtr optyczny czerwony, 7 – obraz sześcianu w kolorze niebieskim, 8 – obraz sześcianu w kolorze czerwonym, 9 – lewe oko, 10 – prawe oko.



Rys. 3. Wyjaśnienie wizualizacji przestrzennej przy użyciu światła spolaryzowanego; 1 – projektor, 2 – lewy obiektyw, 3 – prawy obiektyw, 4 – obraz prostopadłościowy widzianego przez lewe oko w świetle spolaryzowanym poziomo, 5 – obraz prostopadłościowy widzianego przez prawe oko w świetle spolaryzowanym pionowo, 6 – ekran, 7 – rzut prostopadłościowy z lewego obiektywu, 8 – rzut prostopadłościowy z prawego obiektywu, 9 – oprawka okularów, 10 – polaryzator mający kierunek polaryzacji skierowany poziomo, 11 – polaryzator mający kierunek polaryzacji skierowany pionowo, 12 – obraz sześcianu w świetle spolaryzowanym poziomo, 13 – obraz sześcianu w świetle spolaryzowanym pionowo, 14 – lewe oko, 15 – prawe oko.

siebie i oddalone o ok. 70 mm oraz przed jednym obiektywem umieszcza się filtr optyczny niebieski, a przed drugim czerwony.

W celu trójwymiarowej wizualizacji obiektu ogląda się taki zestaw rzutów przez okulary, które w jednym z otworów zamiast soczewki mają wmontowane szkło w kolorze niebieskim, a w drugim otworze w kolorze czerwonym. Takie szkła stanowią filtry optyczne, to znaczy każde z nich przepuszcza światło tylko o kolorze zgodnym ze swoim kolorem [5]. W wyniku tego lewe oko widzi tylko rzut obiektu w kolorze niebieskim, a prawego tylko rzut w kolorze czerwonym. W końcowym efekcie ośrodek wzrokowy w korze mózgowej rozpoznaje złożenie tych dwóch rzutów, jako trójwymiarowy obraz obiektu, podobnie jak podczas bezpośredniego oglądania obiektu. Opisana metoda jest technicznie prosta i tania, ale ma też wadę. Ponieważ nie ma idealnych filtrów optycznych, to każdy z nich przepuszcza światło z pewnego zakresu długości fal i to powoduje zmianę rzeczywistych kolorów oglądanego obiektu.

Zastosowanie światła spolaryzowanego

Metoda wizualizacji trójwymiarowej przy użyciu światła spolaryzowanego i układy przeznaczone do jej realizacji są podobne, jak w przypadku anaglifów. Różnica polega na tym, że filtry optyczne niebieski i czerwony zostały zastąpione przez polaryzatory. Jak wiadomo, polaryzatory są to elementy optyczne, mające właściwość przepuszczania fal świetlnych tylko o określonym kierunku drgań. Kierunek drgań jest wyznaczony przez strukturę molekularną tych elementów i nazywa się kierunkiem polaryzacji, a światło po przejściu przez ten element jest światłem spolaryzowanym [6]. Jako polaryzatory o dużej powierzchni są najczęściej wykorzystywane folie wykonane z polimerów o uporządkowanym kierunku orientacji cząsteczek.

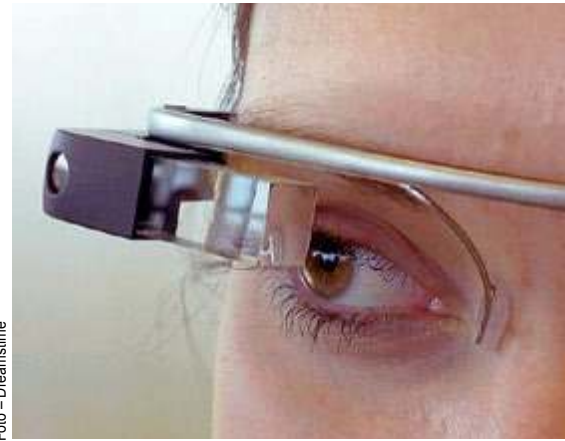
Przykład układu do realizacji tej metody przedstawia rys. 3. Na ekranie są tworzone dwa wcześniej zapisane rzuty tego samego obiektu widziane przez prawe i lewe oko. Do

tego celu są używane dwa projektory, wysyłające wiązki światła spolaryzowane też w kierunkach wzajemnie prostopadłych. Rzuty na ekranie są oglądane przez okulary, w których zostały wmontowane dwa polaryzatory o takich samych kierunkach polaryzacji, jak kierunki polaryzacji wiązek światła. Skutkiem tego każde oko widzi taki rzut, jak przy bezpośrednim patrzeniu na obiekt. Następnie z tych rzutów jest tworzony trójwymiarowy obraz obiektu w ośrodku wzrokowym kory mózgowej. Analogiczna metoda jest wykorzystywana w kinach do wyświetlania filmów trójwymiarowych. Zalety tej metody polegają na możliwości oglądania obrazów dynamicznych w barwach zbliżonych do rzeczywistych, ponieważ filtry polaryzacyjne są niemal przezroczyste.

Przykład innego układu do wizualizacji trójwymiarowej z użyciem światła spolaryzowanego przedstawia rys. 4. W tym układzie rzutniki zostały zastąpione przez dwa monitory komputerowe, z których jeden ma ekran ustawiony w płaszczyźnie pionowej, a drugi w płaszczyźnie poziomej. Ekran monitorów zostały pokryte foliami polaryzacyjnymi i dzięki temu tworzą one rzuty obiektu w świetle spolaryzowanym w kierunkach wzajemnie prostopadłych na zwierciadło półprzepuszczalne, nachylonym pod kątem 45° do poziomu. Rzut tworzony przez monitor

ustawiony pionowo jest kierowany do obserwatora w wyniku przechodzenia przez zwierciadło półprzepuszczalne, a rzut tworzony przez drugi monitor dochodzi do obserwatora skutkiem odbicia od górnej powierzchni tego zwierciadła. Podobnie jak poprzednio, obserwator ogląda obraz trójwymiarowy przy użyciu okularów z polaryzatorami. Taki układ, działający podczas Pikniku Naukowego Centrum Nauki Kopernik oraz Pierwszego Programu Polskiego Radia na Stadionie Narodowym w maju 2023 r. był używany do pokazów trójwymiarowych zdjęć Warszawy wykonanych bezzałogowym statkiem powietrznym (dronem) i wywierał ogromne wrażenie na zwiedzających. Zaletami tego układu są bardzo dobra jakość dynamicznych obrazów i małe rozmiary – cały układ mieścił się na średniej wielkości biurku.

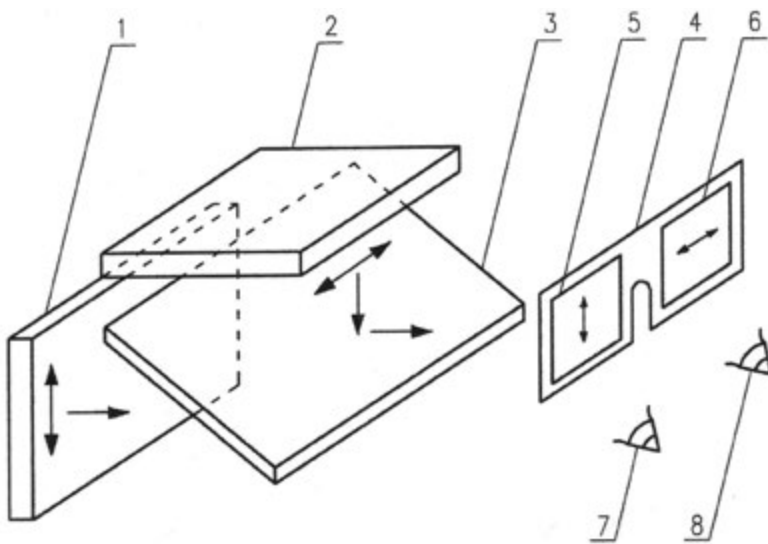
Jeszcze inne rozwiązanie polega na wykorzystaniu specjalnych okularów (np. video okulary Google), przeznaczonych do indywidualnej obserwacji rzeczywistości wirtualnej w trzech wymiarach. Takie okulary oddzielają obserwatora od otoczenia, są wyposażone w dwa niewielkie monitory, umieszczone po jednym przed każdym okiem i współpracują z komputerem. Jednoczesna obserwacja obu monitorów daje wrażenie oglądania statycznych lub dynamicznych obrazów trójwymiarowych. To rozwiąza-



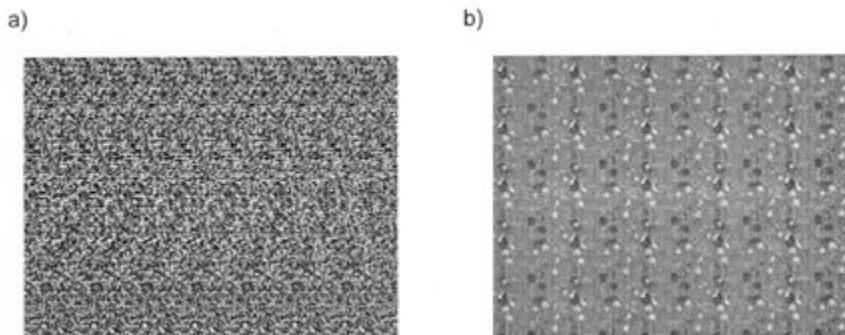
nie działa na podobnej zasadzie jak opisane poprzednio układy, w których wykorzystano światło spolaryzowane. Dzięki współpracy z komputerem, wyposażonym w odpowiednie oprogramowanie, jest możliwe tworzenie trójwymiarowych zobrazowań, łączących aktualny stan obiektów z przyszłym stanem, np. modernizacji budynku lub zbudowaniu terenu. Jest to jedna z możliwości wykorzystania tzw. rzeczywistości rozszerzonej (ang. augmented reality), która okazuje się bardzo przydatna, m.in. podczas tworzenia i oceny projektów przestrzennego zagospodarowania terenu.

Stereogramy punktowe

Obiekt trójwymiarowy może być przedstawiony przy użyciu odpowiedniego programu komputerowego w postaci układu plamek rozmieszczonych przypadkowo na płaszczyźnie (rys. 5). Podczas obserwacji tego układu daje się zauważyć zadziwiający efekt. Przy pewnej odległości od oczu pojawia się trójwymiarowy obraz obiektu. Taki układ plamek jest nazywany stereogramem punktowym, złożonym z przypadkowych kropek – SRDS (skrót pochodzi od angielskiej nazwy single random dots stereogram). Niestety, efekt trójwymiarowości znika przy zbyt dużej oraz zbyt małej odległości od oczu [7]. Oprócz tego zauważenie trójwymiarowego obiektu jest dość trudne i wymaga koncentracji uwagi. Osoby, które korzystają z tej metody po raz pierwszy zwykle muszą wykonać pewną liczbę ćwiczeń, polegającą na umieszczeniu układu kropek początkowo w niewielkiej odległości (ok. 10 cm) przed oczami, patrzeniu



Rys. 4. Układ do wizualizacji przestrzennej przy użyciu światła spolaryzowanego i dwóch monitorów; 1 – monitor dający obraz dla lewego oka w świetle spolaryzowanym pionowo, 2 – monitor dający obraz dla prawego oka w świetle spolaryzowanym poziomo, 3 – zwierciadło półprzepuszczalne, 4 – oprawka okularów, 5 – polaryzator mający kierunek polaryzacji skierowany poziomo, 6 – polaryzator mający kierunek polaryzacji skierowany pionowo, 7 – lewe oko, 8 – prawe oko.



Rys. 5. Przykłady stereogramów utworzonych z pojedynczych, przypadkowo rozmieszczonych punktów. Przy odpowiednim sposobie patrzenia na rys. a) pojawia się przestrzenna spirala, a na rys. b) układ kulek umieszczonych w rzędach.

swobodnie na górną, środkową część układu i jego powolnym oddalaniu od oczu. Niekiedy dla ułatwienia ćwiczeń nad wspomnianą częścią układu umieszcza się dwa kółka o średnicy ok. 0,5 cm i oddalone od siebie o ok. 2 cm. Jest też pewna grupa osób, ok. 4% populacji, której nie udaje się zauważyć tego efektu. Wynika to z wad wzroku, skutkujących barkiem lub ograniczeniem zdolności widzenia przestrzennego. Jedną z tych wad może być astygmatyzm. Mimo, że ta metoda jest rzadko stosowana podczas oglądania rysunków technicznych, to jednak znalazła zastosowanie do innych celów, m.in. do obserwacji struktury przestrzennej złożonych molekuł oraz w okulistyce do badania wzroku [8, 9].

Metoda holograficzna

Nazwa metody pochodzi od greckich słów „holos i „graphos”, z których pierwsze oznacza całość, a drugie obraz. Podstawowe znaczenie w tej metodzie ma interferencja, czyli składanie drgań fal świetlnych, a jej realizacja jest możliwa dzięki wykorzystaniu światła spójnego, tzn. takiego, w którym drgania odbywają się synchronicznie – są w tej samej fazie. Do lat sześćdziesiątych XX w. wytwarzanie wiązek światła spójnego było związane z dużymi problemami technicznymi. Dopiero wynalezienie i upowszechnienie laserów rozwiązało ten problem [10]. Koncepcję holografii podał i pierwsze próby przeprowadził polski fizyk Mieczysław Wolfie, pracujący m.in. w Politechnice Warszawskiej. Jego koncepcję rozwinął i lepszą jakość obrazów uzyskał fizyk węgierski Denis Gabor, któremu za badania nad hologafią przyznano nagrodę Nobla.

Pierwszy etap tej metody polega na wytworzeniu zapisu obiektu trójwymiarowego, nazywanego hologramem (rys. 6). W tym celu zwiększa się średnicę wiązki światła laserowego przy użyciu ekspandera, złożonego z dwóch soczewek skupiających o różnych średnicach i ogniskowych, tworzących tzw. układ konfokalny, czyli układ o wspólnym ognisku. W układzie konfokalnym, poszerzając wiązki średnica soczewki dalszej od źródła światła jest większa, niż średnica soczewki bliższej. Poszerzona wiązka światła jest rozdzielana na dwie wiązki za pomocą bipryzmatu Fresnela, składającego się z dwóch jednakowych pryzmatów połączonych ze sobą podstawami. Jedna z rozdzielonych wiązek oświetla trójwymiarowy obiekt, a druga stanowi wiązkę odniesienia. Następnie obie wiązki są kierowane tak, żeby połączyły się ze sobą na kliszy fotograficznej. Dzięki spójności wiązek dochodzi do ich interferencji oraz wytworzenia układu jasnych i ciemnych prążków, który zawiera informację o kształcie i rozmiarach obiektu [10].

Gdy taki układ prążków, czyli hologram, zostanie oświetlony wiązką

światła laserowego, wtedy pojawiają się dwa przestrzenne obrazy obiektu, z których jeden jest rzeczywisty, a drugi pozorny (rys. 7). Te obrazy są wytwarzane w wyniku interferencji światła spójnego na układzie prążków zapisanych w hologramie [11]. Do tego celu nie jest potrzeby żaden ekran, ponieważ obrazy pojawiają się w przestrzeni i można je oglądać z różnych stron, tak samo, jak trójwymiarowy obiekt. Co niezwykle interesujące, te obrazy można uzyskać również z fragmentu hologramu, ponieważ w każdym z nich jest zapisana cała informacja o obiekcie. (Stąd też pochodzi nazwa „hologram”, utworzona z greckich słów holos – cały i graphos – obraz.) W przypadku wykorzystania fragmentu hologramu uzyskuje się jednak mniejszą jasność obrazu.

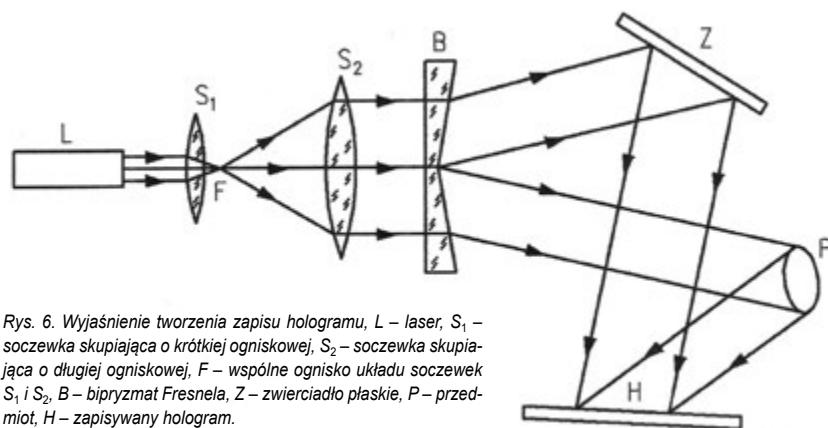
Podsumowanie i wnioski

Spośród przedstawionych metod trójwymiarowej wizualizacji najszerze zastosowanie znajduje obecnie metoda, polegająca na wykorzystaniu światła spolaryzowanego. Ta metoda jest stosowana m.in. podczas projekcji filmów w niektórych kinach i programach telewizyjnych. Czynniki decydujące o upowszechnieniu tej metody są niewątpliwie dobra jakość obrazów i umiarkowane wymagania techniczne, które muszą być spełnione w celu jej otrzymania. Według informacji uzyskanych podczas wspomnianego Pikniku Naukowego, układy do wizualizacji tą metodą są wdrażane m.in. w geoinformatyce. Zaletą tej metody jest elastyczność spełnienia wymagań, polegająca na możliwościach wykorzystaniu różnych urządzeń technologii cyfrowej,

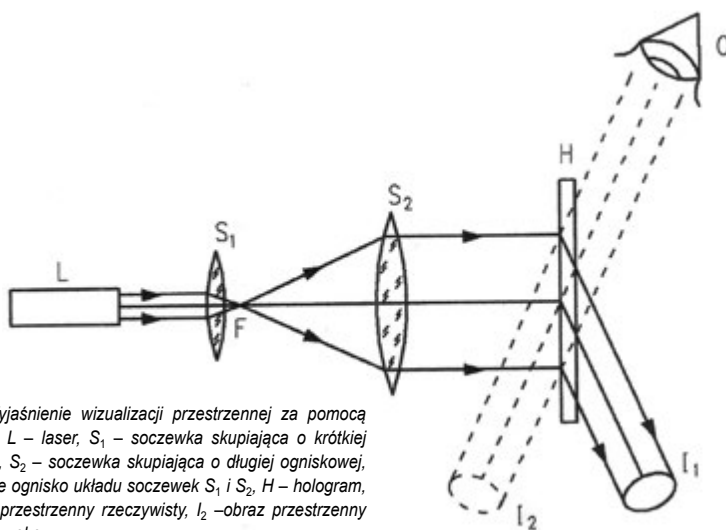


Tab. 1. Zestawienie porównawcze metod wizualizacji 3D.

Lp.	Nazwa metody	Zalety	Wady	Uwagi
1	Rzutowanie prostokątne i ukośne	bardzo prosta realizacja	wymaga przygotowania użytkownika	stosowana w dokumentacji technicznej
2	Metoda anaglifów	prosta realizacja	nierealistyczne kolory obrazów	rzadko stosowana
3	Zastosowanie światła spolaryzowanego	umiarkowane wymagania techniczne, dobra jakość obrazu	niewielkie zmniejszenie jasności obrazu	obecnie najczęściej stosowana, m.in. w kinematografii i telewizji
4	Stereogramy punktowe	umiarkowane wymagania techniczne	trudna obserwacja, wymaga ćwiczeń użytkownika, nie zawsze się udaje	stosowana głównie w celach badawczych
5	Holografia	dość duże wymagania techniczne	łatwa obserwacja, bardzo dobra jakość obrazu	metoda rozwijana i przyszłościowa



Rys. 6. Wyjaśnienie tworzenia zapisu hologramu, L – laser, S_1 – soczewka skupiająca o krótkiej ogniskowej, S_2 – soczewka skupiająca o długiej ogniskowej, F – wspólne ognisko układu soczewek S_1 i S_2 , B – bipryzmat Fresnela, Z – zwierciadło płaskie, P – przedmiot, H – zapisywany hologram.



Rys. 7. Wyjaśnienie wizualizacji przestrzennej za pomocą hologramu, L – laser, S_1 – soczewka skupiająca o krótkiej ogniskowej, S_2 – soczewka skupiająca o długiej ogniskowej, F – wspólne ognisko układu soczewek S_1 i S_2 , H – hologram, I_1 – obraz przestrzenny rzeczywisty, I_2 – obraz przestrzenny pozorny, O – oko.

takich jak monitory komputerowe, rzutniki multimedialne i specjalne okulary z małymi monitorami zamiast soczewek, tzw. video Google. W celu podsumowania i łatwiejszej oceny przedstawionych metod wykonano ich zestawienie podane w tab. 1.

W niedalekiej przyszłości większego znaczenia mogą nabrać metody oparte na holografii w połączeniu z metodami technologii cyfrowej [12]. Istnieją odmiany hologramów, z których obraz jest uwidaczniany bez użycia poszerzonej wiązki światła laserowego. Wystarczy w tym

celu oświetlenie wytwarzane przez powszechnie używane źródła światła lub oświetlenie światłem słonecznym. Obecnie zapis hologramu może być sporządzony nie tylko tradycyjną metodą fotochemiczną na kliszy fotograficznej, która raczej odchodzi do przeszłości. Takiego zapisu dokonuje się postaci cyfrowej z wykorzystaniem technologii informacyjnej w warstwie kryształu o specjalnych właściwościach optycznych. Do tego typu zapisu są wykorzystywane dane z wcześniej przeprowadzonego skaningu trójwymiarowego za pomocą

lasera. Uzyskane w ten sposób dane, tzw. chmurę punktów, poddaje się następnie odpowiedniej konwersji cyfrowej. Dostępne obecnie trójwymiarowe skanery laserowe pozwalają zapisać obrazy obiektów o bardzo szerokim zakresie rozmiarów, począwszy od kilkunastocentymetrowych przedmiotów codziennego użytku, a skończywszy na mierzonych w setkach metrów wnętrzach hal fabrycznych, budynkach i fragmentach terenu. Najprawdopodobniej ten kierunek rozwoju pozwoli uzyskać jeszcze lepszą jakość i większą dostępność wizualizacji trójwymiarowych.

Stanisław Bednarek
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Uniwersytetu Łódzkiego

LITERATURA:

- [1] J. Chlebińska, Anatomia i fizjologia człowieka, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1986, s. 246.
- [2] A. Sojecki, Optyka, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1985, s. 191.
- [3] F. Ratajczyk, Instrumenty optyczne, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002, s. 67.
- [4] T. Dobrzański, Rysunek techniczny maszynowy, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2014, s. 56.
- [5] D. Halliday, R. Resnick, Walker, Fundamentals of Physics, New York: Editor John Wiley & Sons, Inc., New York 2011, s. 67.
- [6] F. Ratajczyk, Dwójłomność i polaryzacja optyczna, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000, s. 37.
- [7] F. H. Adler F.H., Fizjologia oka – zastosowania kliniczne, Państwowe Zakłady Wydawnictw Lekarskich, Warszawa 1986, s. 52.
- [8] T. Fujikado, Use of Dynamic and Colored Stereogram to Measure Stereopsis in Strabismic Patients, Japanese Journal of Ophthalmology, Vol. 42, No. 2, p. 101-107.
- [9] R. Neff, S. Schwartz, D. Stork, Electronics for generating simultaneous random-dot cyclopean and monocular stimuli, Behavior Research Methods, Instruments and Computers, 1985, Vol. 17, No. 3, p. 363-370.
- [10] H. D. Young, R. A. Friedman, A. L. Ford, Sears and Zemansky's, University Physics with Modern Physics, New York: Editor Addison-Wesley Pearson, New York 2012, p. 1114.
- [11] C. Wen-Bo, M. Jian-She, S. Ping, L. Xian-Ting, Binary hologram generation based on discrete wavelet transform, Optik, 2016, Vol. 127, No. 2, p. 558-561.
- [12] L. Correc Ferri, Visualization of 3D information with digital holography using laser printers, Computers and Graphics, 2001, Vol. 25, No. 2, p. 309-321

Analogie w dydaktyce fizyki

(Miniatura dydaktyczna)

Problem analogii w nauczaniu fizyki poruszyłem w art. *O analogiach w fizyce* (Fizyka w Szkole 6/2020). Pisałem wówczas między innymi: „Analogie sprzyjają tworzeniu się struktur pojęciowych dotyczących danej klasy ciał, zjawisk czy procesów, co pomaga w zapamiętywaniu treści nauczania.” Warto zatem je odszukać i omówić z uczniami.

Waldemar Reńda

Zacznijmy od kinematyki punktu materialnego

1. Oto równania opisujące ruch jednostajny:¹

a) postępowy

$$v = s/t \quad \text{jednostka: m/s}$$

$$s = v \cdot t$$

b) po okręgu

$$\omega = \alpha/t \quad \text{jednostka: radian/s}$$

$$\alpha = \omega \cdot t$$

Zależność pomiędzy wartością prędkości liniowej punktu poruszającego się ruchem jednostajnym po okręgu i wartością prędkości kątowej tego ruchu:

$$v = \omega \cdot r$$

Uwaga! W obliczeniach należy używać rad/s jako jednostkę prędkości kątowej, mimo że jej wymiar to 1/s. Niestety uczniowie często mylą tę jednostkę z jednostką częstotliwości obiegów lub obrotów, czyli obrót/s, bo obie mają ten sam wymiar: 1/s. Uważam też, że nie jest korzystne nazywanie tej ostatniej jednostki **hercem**, bo jest on raczej zarezerwowany dla częstotliwości drgań i fal. W praktyce częstotliwość obrotów urządzeń podaje się w obr/min.

2. A oto równania opisujące ruch jednostajnie przyspieszony lub jednostajnie opóźniony:

a) postępowy

$$a = |\Delta v|/\Delta t \quad \text{jednostka: m/s}^2$$

$$v = v_0 \pm a \cdot t$$

$$s = v_0 \cdot t \pm \frac{1}{2} a \cdot t^2$$

b) po okręgu lub obrotowy

$$\varepsilon = |\Delta \omega|/\Delta t \quad \text{jednostka: rad/s}^2$$

$$\omega = \omega_0 \pm \varepsilon \cdot t$$

$$\alpha = \omega_0 \cdot t \pm \frac{1}{2} \varepsilon \cdot t^2$$

Znak „+” – ruch przyspieszony

Znak „-” – ruch opóźniony²

Zależność pomiędzy wartością przyspieszenia liniowego punktu poruszającego się po obwodzie okręgu o promieniu (r) i wartością przyspieszenia kątowego tego ruchu (ε):

$$a = \varepsilon \cdot r$$

Jak widać, podobne są zarówno wzory jak i jednostki wymienionych wielkości fizycznych.

Również podobne są definicje takich pojęć jak prędkość liniowa i kątowa:

$$v = \Delta r / \Delta t, \quad \text{gdy } \Delta t \rightarrow 0$$

$$\omega = \Delta \alpha / \Delta t, \quad \text{gdy } \Delta t \rightarrow 0$$

a także przyspieszenie liniowe i kątowe:

$$a = \Delta v / \Delta t, \quad \text{gdy } \Delta t \rightarrow 0$$

$$\varepsilon = \Delta \omega / \Delta t, \quad \text{gdy } \Delta t \rightarrow 0$$

Podobnie definiujemy też moc chwilową jako szybkość wykonywania pracy:

$$P = \Delta W / \Delta t, \quad \text{gdy } \Delta t \rightarrow 0$$

A teraz porównanie wzorów na moment pędu i energię kinetyczną punktu materialnego w ruchu po okręgu oraz w ruchu obrotowym bryły sztywnej:

– **Moment pędu punktu materialnego w ruchu po okręgu:**

$$L = I \cdot \omega$$

Ten sam wzór dotyczy także momentu pędu obracającej się bryły.

– Energia kinetyczna punktu materialnego w ruchu postępowym lub po okręgu:

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

– Energia kinetyczna obracającej się bryły sztywnej:

$$E_k = \frac{1}{2} I \cdot \omega^2$$

Zauważmy, że w wyżej wymienionych wzorach masa „zamienia się” na moment bezwładności, a prędkość liniowa na kątową.

¹ Są to wzory obliczeniowe dotyczące jedynie wartości wybranych wielkości fizycznych.

² Aby w tym ruchu otrzymać dodatnią wartość Δv , należy napisać: $\Delta v = v_p - v_k$. Wówczas: $a = (v_p - v_k)/t$. Stąd: $v_k = v_p - a \cdot t$.

Zasady dynamiki w ruchu postępowym i obrotowym

I zasada dynamiki dla ruchu postępowego³

Jeżeli: $\mathbf{F} = 0$, to: $\mathbf{v} = 0$ lub $\mathbf{v} = \text{constans}$

Zapis wektorowy: $\mathbf{v} = \text{const}$. oznacza ruch prostoliniowy.

Dla ruchu obrotowego:

Jeżeli: $\mathbf{M}_F = 0$, to: $\boldsymbol{\omega} = \text{constans}$

Zapis (wektorowy) $\boldsymbol{\omega} = \text{const}$. oznacza, że bryła obraca się ze stałą wartością prędkości kątowej (ω) oraz że oś obrotu nie ulega zmianie.

Można też powiedzieć, że wówczas: $\mathbf{L} = \mathbf{I} \cdot \boldsymbol{\omega} = \text{constans}$.

Jest to znana **zasada zachowania momentu pędu** swobodnie obracającej się bryły sztywnej.

II zasada dynamiki

a) w ruchu postępowym

$$\mathbf{a} = \mathbf{F}/m, \quad \text{lub} \quad \mathbf{F} = \Delta \mathbf{p}/\Delta t$$

b) w ruchu obrotowym

$$\boldsymbol{\epsilon} = \mathbf{M}_F/\mathbf{I} \quad \text{lub} \quad \mathbf{M}_F = \Delta \mathbf{L}/\Delta t$$

albo:

a) w ruchu postępowym

$$\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a}$$

b) w ruchu obrotowym

$$\mathbf{M}_F = \mathbf{I} \cdot \boldsymbol{\epsilon}.$$

Zauważmy, że w tym przypadku siła „zamienia się” na moment siły, zmiana pędu na zmianę momentu pędu oraz – tak, jak poprzednio – masa na moment bezwładności.

Porównajmy teraz opisy pól grawitacyjnego i elektrostatycznego

Zacznę od tego, że oba pola to pola fizyczne (realnie istniejące) oraz że oba są polami źródłowymi i centralnymi.⁴

A teraz wzory na:

a) wartości sił oddziaływania pomiędzy:

– masami ciał (prawo Newtona)

$$F = G \cdot M \cdot m/r^2$$

G to stała powszechnej grawitacji równa $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$

– ładunkami elektrycznymi⁵

$$F = k \cdot Q \cdot q/r^2$$

współczynnik k to stała pola elektrycznego równa $9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$.⁶

b) natężenie pola:

– grawitacyjnego

$$\gamma = F/m = G \cdot M/r^2 \quad \text{jednostka: N/kg}$$

– elektrostatycznego

$$E = F/q = k \cdot Q/r^2 \quad \text{jednostka: N/C}$$

c) energii potencjalną:

– ciała o masie m w polu grawitacyjnym ciała o masie M

$$E_p = G \cdot M \cdot m/r \quad \text{jednostka: J}$$

– ładunku q w polu elektrostatycznym ładunku Q

$$E_p = k \cdot Q \cdot q/r \quad \text{jednostka: J}$$

d) potencjał w danym punkcie pola:

– grawitacyjnego

$$V = E_p/m = G \cdot M \cdot m/r \quad \text{jednostka: J/kg}$$

– elektrostatycznego

$$V = E_p/q = k \cdot Q \cdot q/r \quad \text{jednostka: J/C}$$

e) pracę w jednorodnym polu:

– elektrostatycznym $W = q(V_2 - V_1) = q \cdot U$

– grawitacyjnym⁷ $W = m \cdot \gamma \cdot h$

Wydaje się, że jest tu brak analogii, ale przekształćmy ten wzór w sposób następujący:

$$\begin{aligned} W &= m \cdot \gamma (h_2 - h_1) = m(\gamma \cdot h_2 - \gamma \cdot h_1) \\ &= m(\gamma \cdot r_2 - \gamma \cdot r_1) = m(V_2 - V_1) \end{aligned}$$

I mamy pełną analogię. Z tym, że tego wzoru raczej się nie stosuje.

Jak widać, wzory oraz jednostki współczynników mają podobną postać, a jedyną różnicą jest to, że masy się tylko przyciągają, a ładunki mogą się także odpychać.

Wspomniałem wyżej, że powyższe wzory obowiązują w polu jednorodnym. O ile jednak można otrzymać jednorodne pole elektrostatyczne np. wewnątrz kondensatora płaskiego, to pola grawitacyjnego o takiej strukturze otrzymać nie możemy. Mamy więc w tym przypadku zawsze pole niejednorodne. Jednak w niewielkich obszarach tego pola przyjmuje się, że ma ono charakter pola jednorodnego.

Jeżeli mówimy o podobieństwie pól, to warto jeszcze zauważyć podobieństwo pól magnetycznych wytworzonych przez magnes sztabkowy oraz zwojnicę, przez którą płynie prąd elektryczny. Dodam, że oba te pola są polami wirowymi – bezźródłowymi.

Istnieje też podobieństwo w zachowaniu dipola elektrycznego w polu elektrycznym (dielektryki) oraz magnetycznego w polu magnetycznym (ferromagnetyki), a także pomiędzy zjawiskiem indukcji elektrycznej i magnetycznej.

³ Czcionka pogrubiona oznacza wielkość wektorową.

⁴ Szerzej na ten temat pisałem w art.: *Pole prędkości cieczy*, Fizyka w Szkole 6/1988.

⁵ Próbowano również w podobny sposób sformułować prawo dotyczące oddziaływań biegunów magnetycznych. Wprowadzono nawet pojęcie masy magnetycznej, ale zarzucono ten pomysł.

⁶ Zwykle stosuje się tu stałą dielektryczną dla próżni, ale tę wartość łatwiej zapamiętać.

⁷ Przyjmuję, że mamy tu układ inercjalny, zatem: $g = \gamma$.

W bardzo podobny sposób wprowadza się i opisuje pola matematyczne, takie jak pole potencjału czy pole natężenia, a mianowicie: jeżeli każdemu punktowi danej przestrzeni przypiszemy jedną i tylko jedną wartość danej wielkości fizycznej, to otrzymamy pole tej wielkości. Przy czym rozróżniamy pola wielkości skalarnych, np. pole potencjału lub wielkości wektorowej, np. pole wektora γ dla pola grawitacyjnego czy wektora E dla pola elektrostatycznego. Z tym, że w tym drugim przypadku, oprócz określenia wartości tej wielkości, należy podać jej kierunek i zwrot.

I tu podam następną analogię:

Tak jak w polach centralnych siła maleje z kwadratem odległości, tak też maleje natężenie dźwięku oraz natężenie światła pochodzące ze źródeł punktowych.⁸

Również podobne zjawiska towarzyszą powstawaniu i rozchodzeniu fal mechanicznych i elektromagnetycznych. Podobne są także ich opisy.

A oto inne analogie

Rozpocznę od analogii dotyczącej wzorów pochodzących z dwóch różnych działów:

Wydłużenie sprężyste jednorodnego pręta obliczamy ze wzoru:

$$\Delta l = k \cdot l_0 \cdot \Delta \sigma$$

gdzie $\Delta \sigma$ to przyrost wartości naprężenia w pręcie.

Wydłużenie jednorodnego pręta przy zmianie jego temperatury o ΔT obliczamy ze wzoru:

$$\Delta l = \lambda \cdot l_0 \cdot \Delta T$$

gdzie k oraz λ to współczynniki zależne od rodzaju materiału pręta.

Daleko idące podobieństwa występują w opisie obrazów uzyskiwanych przy użyciu soczewek oraz zwierciadeł sferycznych. Nawet równanie soczewkowe jest niemal identyczne z równaniem zwierciadłowym.

N. Bohr, tworząc swój model atomu wodoru, zapewne wzorował się na modelu budowy naszego Układu Słonecznego.⁹ W jego modelu elektrony krążą po ściśle określonych orbitach. Okazuje się, że promienie orbit planet wydają się też podlegać pewnej – dotąd nie wyjaśnionej – prawidłowości. Mówi o tym reguła Tytiusa-Bodego. Wg niej średnie promienie orbit planet podane w jednostkach astronomicznych spełniają następującą zależność: $r = 0,4 + 0,3n$, gdzie: $n = 0, 1, 2, 4, 8, 16, 32$, przy czym

liczbie 8 odpowiada pas planetoid leżący pomiędzy Marsem a Jowiszem.

Pisząc o modelu atomu wodoru oraz o w/w regule, chciałbym zaproponować nauczycielom matematyczne potwierdzenie II prawa Keplera. W przypadku atomu wodoru moment pędu elektronu musi przyjmować określone wartości, będące wielokrotnością stałej Plancka. Nie wiem, czy w przypadku planet występuje podobna zależność, ale na pewno dla danej planety musi być spełniona zasada zachowania momentu pędu.

$$L = m \cdot v \cdot r = m(\Delta s / \Delta t)r = m(\Delta s \cdot r / \Delta t) = m(2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \Delta s \cdot r / \Delta t) = \text{constans}$$

Zauważmy, że dla bardzo małych wartości Δt wyrażenie $\frac{1}{2}\Delta s \cdot r$ jest polem zakreślonym przez promień wodzący planety. Możemy zatem napisać:

$$L = m(2\Delta S / \Delta t) = \text{constans}.$$

A ponieważ masa planety nie ulega zmianie, zatem w równych odstępach czasu promień wodzący planety musi zakreślić równe pola. Jeżeli wyrażenie $\Delta S / \Delta t$ nazwiemy prędkością połową planety v_s , to II prawo Keplera możemy napisać też tak: $v_s = \text{constans}$.¹⁰

Z zasady zachowania momentu pędu wynika jeszcze jedna zależność. Otóż, dla dwóch różnych położen danej planety na orbicie eliptycznej możemy napisać:

$$m \cdot v_1 \cdot r_1 = m \cdot v_2 \cdot r_2$$

Stąd:

$$v_1 \cdot v_2 = r_2 : r_1$$

Zatem prędkość planety jest odwrotnie proporcjonalna do chwilowej wartości promienia wodzącego, co ma m.in. wpływ na momenty górowania słońca.¹¹

Kończąc, zachęcam do przeczytania mojego artykułu, o którym wspomniałem we wstępie, a w którym omówiłem jeszcze inne analogie.

A jak je wykorzystać? Pisałem w tej pracy, że analogie można wykorzystać zarówno w czasie realizacji nowego materiału, jak i w lekcjach utrwalająco-powtórzeniowych. Z tym że radziłbym, by sami uczniowie próbowali je odszukać i odpowiednio zinterpretować. Niech to będzie ich twórcza praca.

Waldemar Reńda
Olkuś

⁸ To ciekawe, że w tych przypadkach nasze zmysły „posługują się” skalą logarytmiczną, a nie liniową.

⁹ Jego syn Age Bohr, wzorując się na tym modelu, opracował powłokowy model jądra atomowego (Nagroda Nobla w roku 1975). Jeszcze innym modelem jest model kropłowy, co także jest pewną analogią.

¹⁰ Dodam, że prędkość połowa jest wektorem osiowym o zwrocie zgodnym z regułą korkociągu.

¹¹ Zob. równanie czasu

Zderzenia w Układzie Słonecznym – fakty i mity

cz. I

Marcin **Wesołowski**

Ciała niebieskie w Układzie Słonecznym powstały w wyniku akrecji i zlepiania się cząstek pierwotnej materii gazu i pyłu międzyplanetarnego. Sam proces akrecji oznacza opadanie rozproszonej materii na powierzchnię macierzystego ciała niebieskiego w wyniku oddziaływania grawitacyjnego. Zjawisko to jest jednym z najbardziej widowiskowych, gdyż może mu towarzyszyć wydzielanie dużych ilości energii w postaci promieniowania elektromagnetycznego.

Proces formowania się ciał w Układzie Słonecznym rozpoczął się około 4.9 mln lat temu. W wyniku akrecji gazu i pyłu w środku masy pierwotnej mgławicy powstało Słońce, a centra pobocznych akrecji dały początek protoplanetom. Z największych protoplanet powstały planety, a z mniejszych małe ciała wchodzące w skład Układu Słonecznego. Oznacza to, że historia astronomii to historia wielkich zderzeń. Do dziś zderzenia pomiędzy ciałami w Układzie Słonecznym odgrywają istotną rolę w ewolucji powierzchni tych ciał niebieskich. Dlatego też w szczególności powierzchnie ciał niebieskich, które nie są spowite atmosferą są usiane licznymi kraterami pochodzącymi między innymi z dawnych kolizji.

Ślady tych kosmicznych kolizji przetrwały do czasów współczesnych na powierzchniach księżyców, asteroidów, jąder kometarnych oraz planet. Również na powierzchni Ziemi możemy znaleźć dowody, które jednoznacznie wskazują na kolizje z ciałem kosmicznym. Jako przykład rozpatrzmy upadek asteroidy w okolicach, gdzie obecnie znajduje się miejscowość Chicxulub w Meksyku, który datowany jest na koniec Kredy około 65 mln lat temu, Krater Barringera w Arizonie powstały około 50 tysięcy lat temu lub Meteoryt Tunguski w 1908 roku. Są to naj-

bardziej znane przykłady kolizji pomiędzy naszą planetą a małymi ciałami niebieskimi.

Warto również zauważyć, że ślady dawnych kosmicznych kolizji znajdują się także na terenie Polski. Przykładem tego jest rezerwat przyrody Morasko utworzony w 1976 roku (obecnie północna część Poznania). W rezerwacie tym znajdują się kratery, które zdaniem większości badaczy powstały w wyniku upadku meteorytu Morasko ok. 5 tys. lat temu. W tym miejscu wyjaśnimy, że Meteoryt Morasko oznacza łączną nazwę dotychczasowych znalezisk pochodzących z meteoroidu, który rozpadł się w atmosferze. Jeden z jego fragmentów *Memorss*, o masie 261 kg znajduje się w Muzeum Ziemi Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu.

Najlepszym przykładem, który jest „realnym świadkiem” zderzeń zachodzących w Układzie Słonecznym jest nasz ziemski Księżyc. Na jego powierzchni widoczne są liczne ślady uderzeń odłamkami skalnymi o różnej wielkości, które mogą pochodzić od asteroidy lub komety.



Foto. 1. Krater Barringera powstały w wyniku uderzenia 50 metrowego żelaznego meteoroidu. Jego średnica wynosi około 1200 m, a głębokość 150 m. Pustynny klimat Arizony sprawia, że bardzo słaba erozja powierzchniowa (rzadkie deszcze i wiatry) przyczyniła się do zachowania tego tworu geologicznego w bardzo dobrym stanie. Jest to najlepiej zachowana struktura krateru zderzeniowego na powierzchni Ziemi.

W wyniku takiej kolizji na powierzchni tworzy się tzw. krater uderzeniowy. Dotychczas na powierzchni naszego srebrnego globu, czyli Księżyca zidentyfikowano około pół miliona kraterów, których średnica wynosi powyżej 1 km. Ponieważ uderzenia odłamków skalnych w przypadku Księżyca zachodzą dość regularnie to na podstawie analizy zagęszczenia kraterów w poszczególnych obszarach można określić wiek danej powierzchni.

Ze względu na to, że Księżyc jest „martwym ciałem” tzn. nie produkuje energii, świeci tylko światłem odbitym od Słońca oraz najbliższych gwiazd oraz brak aktywności tektonicznej sprawia, że wiele kraterów przetrwało na jego powierzchni w stanie pierwotnym. Największym kraterem na powierzchni Księżyca jest basen Bieguna Południowego – Aitken (ang. *South Pole-Aitken basin*), który zlokalizowany jest po niewidocznej stronie Księżyca, pomiędzy biegunem południowym a równikiem. Poniżej przedstawiono kilka fotografii kraterów księżycowych oraz ich zestawienie w Tabeli 1.

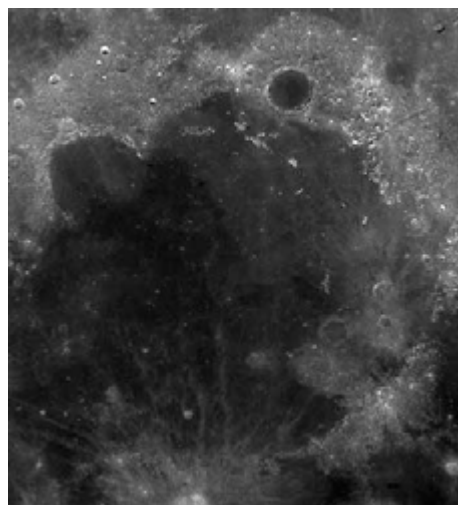


Foto. 4. Mare Imbrium (łac. Morze Deszczów) – drugi co do wielkości po Oceanus Procellarum morze księżycowe i drugi co do wielkości basen uderzeniowy na Księżycu (Foto. NASA).



Foto. 2. Powierzchnia Księżyca usiana licznymi kraterami uderzeniowymi oraz krater Dedalus (Foto. NASA).

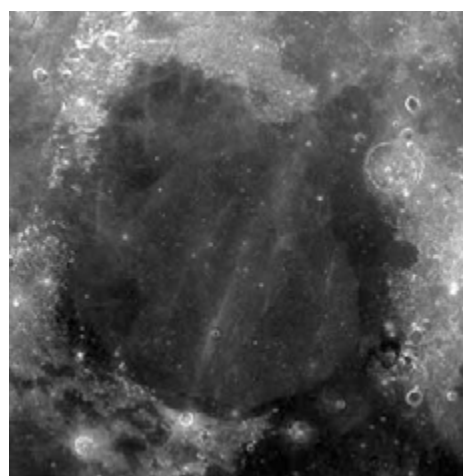


Foto. 4. Mare Serenitatis (łac. Morze Jasności) – morze księżycowe które położone jest po widocznej stronie Księżyca (Foto. NASA).



Foto. 3. Okolice krateru Korolev na powierzchni Księżyca. Oprócz krateru centralnego widoczne są liczne mniejsze krater (Foto. NASA).



Foto.5. Fotografia tarczy Księżyca wykonana przy użyciu cyfrowego aparatu fotograficznego. Nawet z Ziemi możemy sfotografować krater (Foto. Marcin Wesołowski – autor).

Tabela 1. Zestawienie największych kraterów znajdujących się na powierzchni Księżyca.

Nazwa krateru	Średnica krateru [km]	Głębokość krateru [km]
Basen Biegun Południowy – Aitken	2500	13.00
Imbrium	1160	2.90
Orientale	930	6.04
Serenitatis	920	2.14
Australe	880	2.13
Nectaris	860	5.38
Crisium	740	4.57
Smythii	740	5.00
Mutus–Vlacq	700	3.00
Humboldtianum	650	4.20
Mendel–Rydberg	630	5.24
Hertzsprung	570	5.31
Ingenii	560	4.50

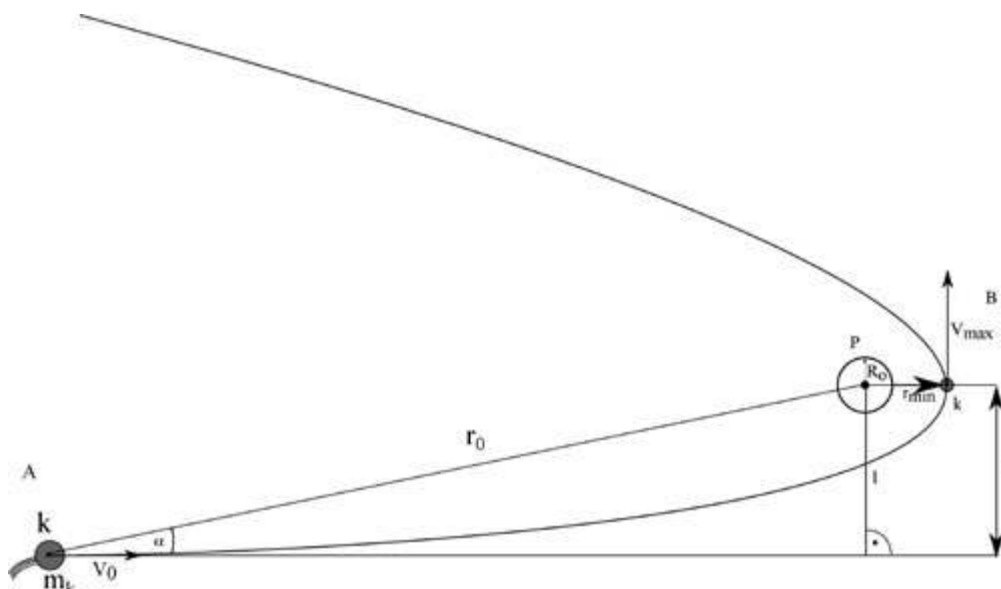
Aby określić prawdopodobieństwo zderzenia np. komety z daną planetą oszacujemy najpierw przekrój czynny na zderzenie. Kluczowym w naszych obliczeniach będzie wyznaczenie parametru na zderzenie (który oznaczamy jako l), czyli odległość pierwotnego niezaburzonego kierunku od centrum danej planety. W tym celu rozważmy następującą sytuację, która została przedstawiona na rysunku 1.

Aby rozwiązać postawiony problem wykorzystajmy w tym miejscu zasadę zachowania energii mechanicznej, z której wynika, że:

$$E_c(A) = E_c(B). \quad (1)$$

Na podstawie równania (1) możemy zapisać, że:

$$\frac{mV_0^2}{2} + 0 = \frac{mV_{\max}^2}{2} + \left(-\frac{GM_p m}{r_{\min}} \right). \quad (2)$$



Rys. 1. Graficzna interpretacja służąca do wyznaczania parametru na zderzenie – parametru l . Poszczególne symbole na rysunku oznaczają: k – kometa o masie m_k , V_0 – średnia prędkość komety względem planet, $V_{\max}$ – prędkość maksymalna komety, R_0 – promień planety P , $r_{\min}$ – najmniejsza odległość na jaką może zbliżyć się kometa do planety, r_0 – odległość pomiędzy środkami komety a środkiem planety.

Podzielmy teraz równanie (2) obustronnie przez m i jednocześnie pomnóżmy go przez 2 wówczas otrzymamy, że:

$$V_0^2 = V_{\max}^2 - \frac{2GM_p}{r_{\min}}. \quad (3)$$

Następnie wykorzystajmy zasadę zachowania pędu, którą możemy wyrazić jako:

$$\mathbf{K} = \mathbf{r}_{\min} \times \mathbf{m} \cdot \mathbf{V}_{\max} = r_{\min} \cdot m \cdot V_{\max} \cdot \sin \alpha, \quad (4)$$

gdzie $\sin \alpha$ możemy obliczyć korzystając z rysunku 1, wówczas mamy:

$$\sin \alpha = \frac{l}{r_0}, \quad (5)$$

lub

$$l = r_0 \cdot \sin \alpha. \quad (6)$$

Dla komety moment pędu K możemy wyrazić jako:

$$K = m V_0 l. \quad (7)$$

Zauważmy, że na podstawie Rys.1 w momencie największego zbliżenia się komety do planety promień $r_{\min}$ jest prostopadły do prędkości $V_{\max}$, wówczas moment pędu dany równaniem (4) jest równy:

$$K = r_{\min} \cdot m \cdot V_{\max} \cdot \sin 90^\circ = r_{\min} \cdot m \cdot V_{\max}. \quad (8)$$

Porównując równania (7) i (8) otrzymujemy:

$$m V_0 l = r_{\min} \cdot m \cdot V_{\max}. \quad (9)$$

Podzielmy teraz obustronnie równanie (9) przez masę komety m i obliczmy prędkość $V_{\max}$:

$$V_{\max} = \frac{V_0 l}{r_{\min}}. \quad (10)$$

Uzyskaną w ten prosty sposób zależność na $V_{\max}$ podstawmy teraz do równania (2) wówczas otrzymujemy, że:

$$\frac{mV_0^2}{2} = \frac{m}{2} \cdot \left(\frac{V_0 l}{r_{\min}} \right)^2 - \frac{GM_p m}{r_{\min}}. \quad (11)$$

Następnie w celu uproszczenia równania (11) pomnóżmy go obustronnie przez 2 oraz podzielmy przez m , wówczas otrzymujemy:

$$V_0^2 = \frac{V_0^2 l^2}{r_{\min}^2} - \frac{2GM_p}{r_{\min}}. \quad (12)$$

Aby uprościć równanie (12) pomnóżmy je obustronnie przez $r_{\min}^2$, wówczas możemy zapisać, że:

$$V_0^2 r_{\min}^2 = V_0^2 l^2 - 2GM_p r_{\min}. \quad (13)$$

Zauważmy, że równanie (13) jest równaniem kwadratowym, które dla porządku przepiszemy w klasycznej postaci, czyli:

$$V_0^2 r_{\min}^2 + 2GM_p r_{\min} - V_0^2 l^2 = 0. \quad (14)$$

Rozwiążmy teraz równanie (14) poprzez wyznaczenie wyróżnika trójmianu kwadratowego, jednocześnie zauważmy, że naszą zmienną w tym przypadku jest parametr $r_{\min}$:

$$\Delta = 4G^2M_p^2 - 4V_0^2(-V_0^2 l^2). \quad (15)$$

Analizując równanie (15) określające wyróżnik trójmianu kwadratowego łatwo możemy zauważyć, że jego wartość jest większa od zera ($\Delta > 0$):

$$\Delta = 4G^2M_p^2 + 4V_0^4 l^2 = 4G^2M_p^2 \left(1 + \frac{V_0^4 l^2}{G^2M_p^2} \right), \quad (16)$$

$$\sqrt{\Delta} = 2GM_p \sqrt{1 + \frac{V_0^4 l^2}{G^2M_p^2}}.$$

Ze względu na to, że wyróżnik trójmianu kwadratowego jest dodatni to należy rozważyć dwa przypadki (inaczej mówiąc mamy obliczyć dwa miejsca zerowe):

$$r_{\min_{1,2}} = \frac{-2GM_p \pm 2GM_p \sqrt{1 + \frac{V_0^4 l^2}{G^2M_p^2}}}{2V_0^2}. \quad (17)$$

Ponieważ rozważamy rzeczywisty przypadek potencjalnej kolizji, dlatego też w dalszej części będziemy brali pod uwagę rozwiązanie dodatnie, wówczas możemy zapisać, że:

$$\begin{aligned} r_{\min} &= \frac{-2GM_p + 2GM_p \sqrt{1 + \frac{V_0^4 l^2}{G^2M_p^2}}}{2V_0^2} \\ &= \frac{-GM_p}{V_0^2} + \frac{GM_p \sqrt{1 + \frac{V_0^4 l^2}{G^2M_p^2}}}{V_0^2}. \end{aligned} \quad (18)$$

Uprośćmy teraz równanie (18) poprzez wyciągnięcie przed nawias czynnika $\frac{GM_p}{V_0^2}$, co daje nam:

$$\begin{aligned} r_{\min} &= \frac{GM_p}{V_0^2} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{V_0^4 l^2}{G^2M_p^2}} \right) \\ &= \frac{GM_p}{V_0^2} \left(\sqrt{1 + \frac{V_0^4 l^2}{G^2M_p^2}} - 1 \right). \end{aligned} \quad (19)$$

Kolizja komety z planetą jest możliwa tylko wtedy, gdy spełniona będzie następująca zależność:

$$r_{\min} \leq R_0. \quad (20)$$

Rozważmy teraz ten warunek, co możemy zapisać jako:

$$R_0 = \frac{GM_p}{V_0^2} \left(\sqrt{1 + \frac{V_0^4 l^2}{G^2M_p^2}} - 1 \right). \quad (21)$$

Aby uprościć równanie (21) wykonajmy mnożenie jego prawej strony co możemy wyrazić jako:

$$R_0 = \frac{GM_p}{V_0^2} \sqrt{1 + \frac{V_0^4 l^2}{G^2M_p^2}} - \frac{GM_p}{V_0^2}. \quad (22)$$

Dodając obustronnie czynnik $\frac{GM_p}{V_0^2}$ w równaniu (22) otrzymujemy:

$$R_0 + \frac{GM_p}{V_0^2} = \frac{GM_p}{V_0^2} \sqrt{1 + \frac{V_0^4 l^2}{G^2M_p^2}}. \quad (23)$$

Aby pozbyć się pierwiastka po prawej stronie równania (23) podnieśmy je obustronnie do kwadratu (jednocześnie pamiętając, że do lewej strony należy zastosować wzór skróconego mnożenia na kwadrat sumy), wówczas otrzymujemy:

$$\begin{aligned} R_0^2 + \frac{2GM_p R_0}{V_0^2} + \frac{G^2M_p^2}{V_0^4} &= \frac{G^2M_p^2}{V_0^4} \left(1 + \frac{V_0^4 l^2}{G^2M_p^2} \right). \end{aligned} \quad (24)$$

Następnie rozpiszmy prawą stronę równania (24) do postaci:

$$\begin{aligned} R_0^2 + \frac{2GM_p R_0}{V_0^2} + \frac{G^2M_p^2}{V_0^4} &= \frac{G^2M_p^2}{V_0^4} + \frac{G^2M_p^2}{V_0^4} \cdot \frac{V_0^4 l^2}{G^2M_p^2}. \end{aligned} \quad (25)$$

Zauważmy, że drugi człon występujący po prawej stronie równania (25) możemy uprościć, wówczas mamy:

$$R_0^2 + \frac{2GM_p R_0}{V_0^2} + \frac{G^2 M_p^2}{V_0^4} = \frac{G^2 M_p^2}{V_0^4} + l^2. \quad (26)$$

Następnie po przeniesieniu czynnika $\frac{G^2 M_p^2}{V_0^4}$ w równaniu (26) na lewą stronę wykonamy redukcję wyrazów podobnych, co daje nam:

$$R_0^2 + \frac{2GM_p R_0}{V_0^2} = l^2. \quad (27)$$

Wyłączmy teraz czynnik R_0^2 przed nawias w równaniu (27):

$$l^2 = R_0^2 \left(1 + \frac{2GM_p}{V_0^2 R_0} \right), \quad (28)$$

lub

$$l = R_0 \sqrt{1 + \frac{2GM_p}{V_0^2 R_0}}. \quad (29)$$

W celu dalszego uproszczenia równania (29), do drugiego członu pod pierwiastkiem wykorzystajmy kwadrat drugiej prędkości kosmicznej, którą możemy wyrazić

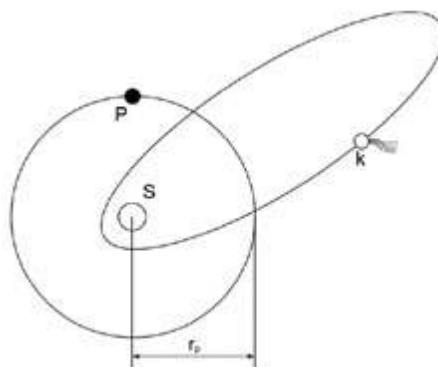
jako: $V_{II}^2 = \frac{2GM_p}{R_0}$. Dodajmy, że wyprowadzenie wzoru na drugą prędkość kosmiczną zostało przedstawione w ramach naszych wcześniejszych rozważań dotyczących mechaniki nieba. Wówczas równanie (29) przyjmuje ostateczną postać:

$$l = R_0 \sqrt{1 + \frac{V_{II}^2}{V_0^2}}. \quad (30)$$

Na podstawie równania (30) możemy zapisać, że:

$$l_{gr} = R_0 \sqrt{1 + \frac{V_{II}^2}{V_0^2}} = R_0 \sqrt{1 + \left(\frac{V_e}{V_0} \right)^2}, \quad (31)$$

gdzie V_e oznacza prędkość ucieczki np. planety. Zauważmy, że jeżeli spełniony będzie warunek $l < l_{gr}$ wówczas kometa zderzy się z planetą. Wówczas przekrój czynny jest równy:



Rys. 2. Wzajemne położenie orbit komety (k) i planety (P) a S oznacza Słońce.

$$\sigma = \pi l_{gr}^2. \quad (32)$$

Wykorzystując równania (31) oraz (32) otrzymujemy, że:

$$\sigma = \pi R_0^2 \left(1 + \left(\frac{V_e}{V_0} \right)^2 \right), \quad (33)$$

co w uproszczeniu możemy zapisać jako:

$$\sigma > \pi R_0^2. \quad (34)$$

Wykorzystując powyższe rozważania określmy prawdopodobieństwo przypadkowego zderzenia komety z planetą. Przyjmujemy, że w przybliżeniu każdy kierunek, z którego może nadlecieć kometa jest jednakowo prawdopodobny. Dlatego prawdopodobieństwo przypadkowego zderzenia się komety z planetą wyraża się równaniem:

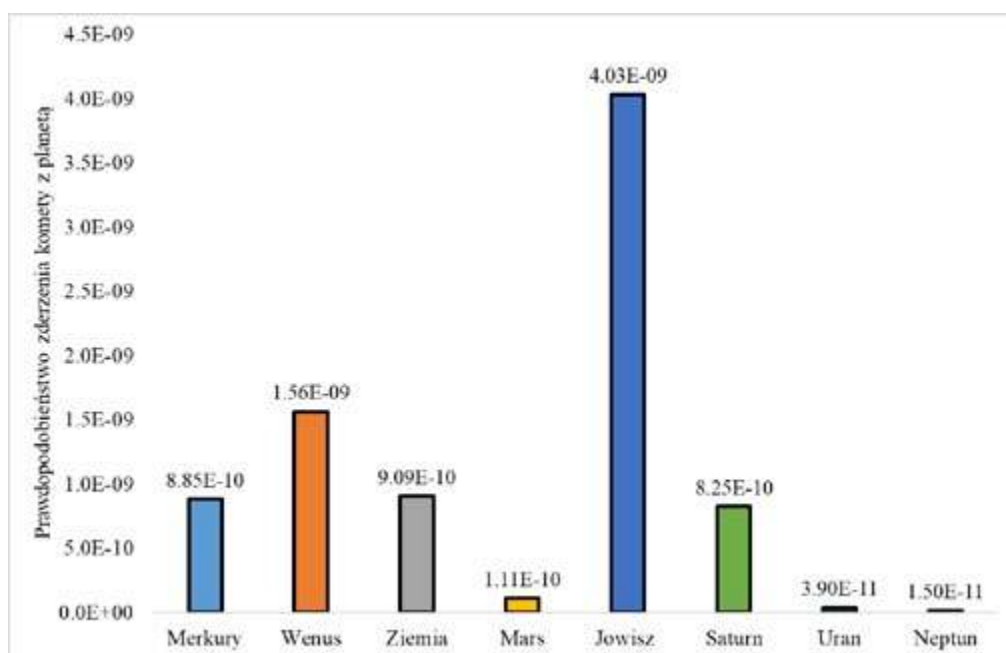
$$p = \frac{2\sigma}{4\pi r_p^2}, \quad (35)$$

gdzie r_p oznacza promień orbity planety, a całe wyrażenie w mianowniku równania (35) oznacza powierzchnię sfery o promieniu równym promieniowi orbity planety.

Czynnik „2” występujący w równaniu (35) wynika z faktu, że kometa w czasie jednego obiegu wokół Słońca ma dwukrotnie szansę zderzenia się z planetą (orbita komety przecina wspomnianą sferę dwa razy; raz w momencie zbliżania się do Słońca, drugi raz w momencie oddalania się od niego, rys. 2). Wykorzystując równania

Tabela 2. Prawdopodobieństwo kolizji komety z planetą.

Planeta	Promień równikowy planety [km]	Promień orbity planety – średnia odległość planety od Słońca [km]	Prawdopodobieństwo kolizji obliczone na podstawie równania (37)
Merkury	2439,7	58000000	$8,85 \cdot 10^{-10}$
Wenus	6051,8	108200000	$1,56 \cdot 10^{-9}$
Ziemia	6378,1	149600000	$9,09 \cdot 10^{-10}$
Mars	3389,5	227900000	$1,11 \cdot 10^{-10}$
Jowisz	69 911	778500000	$4,03 \cdot 10^{-9}$
Saturn	58 232	1434000000	$8,25 \cdot 10^{-10}$
Uran	25 362	2871000000	$3,90 \cdot 10^{-11}$
Neptun	24 622	4495000000	$1,50 \cdot 10^{-11}$



Rys. 3. Rozkład prawdopodobieństwa kolizji komety z paletami w Układzie Słonecznym.

(34) oraz (35) prawdopodobieństwo takiej przypadkowej kolizji jest równe:

$$p = \frac{2\pi R_0^2 \left(1 + \left(\frac{V_e}{V_0}\right)^2\right)}{4\pi r_p^2} = \frac{1}{2} \left(\frac{R_0}{r_p}\right)^2 \cdot \left(1 + \left(\frac{V_e}{V_0}\right)^2\right), \quad (36)$$

lub

$$p = \frac{2\pi R_0^2}{4\pi r_p^2} = \frac{1}{2} \left(\frac{R_0}{r_p}\right)^2. \quad (37)$$

gdzie R_0 oznacza promień planety. Ponadto w równaniu (36) V_0 oznacza średnią prędkość komety względem planety. Wykorzystując równanie (37) obliczmy prawdopodobieństwo przypadkowej kolizji komety długookresowej z planetami wchodzącymi w skład Układu Słonecznego. Wyniki tych obliczeń zostały przedstawione w Tabeli 2 i na Rysunku 3.

Analizując wyniki obliczeń, które zostały przedstawione w tabeli 2 oraz na rysunku 3 łatwo możemy zauważyć, że największe prawdopodobieństwo kolizji zachodzi dla Jowisza, co było zgodne z przewidywaniem. Jako przykład



Foto.6. Fragment Jowisza wraz z śladami po kolizji z fragmentami komety Schoemaker-Levy 9 (Foto. NASA).

rzeczywistej kolizji możemy podać zderzenie fragmentów jądra komety Schoemaker-Levy 9 z Jowiszem w 1994 roku. Była to pierwsza obserwowana kolizja pomiędzy kometa a planetą (Foto.6).

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

LITERATURA

- [1] P. Artymowicz, 1995, Astrofizyka układów planetarnych, PWN, Warszawa.
- [2] L. Mc-Fadden, P. Weissman, T. Johnson (ed.); 2007, Encyclopedia of the Solar System, second edition, ELSEVIER, Amsterdam.
- [3] S. Wierziński, 1973, Mechanika nieba, PWN, Warszawa.

W następnych wydaniach polecamy m.in.

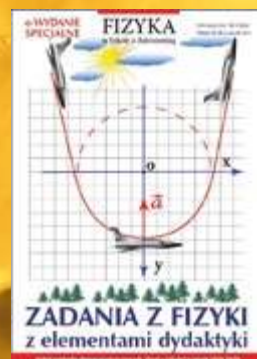
- Fizyka u pulmonologa – dział medycyny ściśle powiązany z fizyką
- Żywy fizyk – cztery twórcy technologii LED
- UFO a fizyka – spojrzenie fizyka teoretycznego
- Rodzinne eksperymentowanie jako element edukacji domowej

Cyfrowe wydania specjalne

Fizyki w Szkole

Tylko w wersji PDF!

Już od 10 zł!
Wysyłamy na adres
mailowy!



Szczegóły i formularz zamówienia na www.aspress.com.pl/wydania-specjalne/

eprasa.pl 918140efd4



Roczniki 2023 z rabatem 50%

Oferta ważna do wyczerpania nakładu!

Szczegóły i formularz zamówienia na www.aspress.com.pl/roczniki/

eprasa.pl 918140efd4