

FIZYKA

w Szkole z Astronomią

CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI

401 (LXV) indeks 35810X Nr 6 listopad/grudzień 2025 CENA 50,00 zł (w tym 8% VAT)

MIONY

Skąd do nas
przychodzą?

Teorie fizyczne
a życie człowieka

Fizyka
w medycynie
XXI wieku

Spojrzenie na
Czerwoną Planetę

Dlaczego
SKRZYPCE
grają, a nie skrzypią?



WYDANIE SPECJALNE *FIZYKI W SZKOLE*

WERSJA ELEKTRONICZNA – **PLIK PDF**

- ✓ **Jak to się zaczęło?**
- ✓ **Co to są wielkie pęki?**
- ✓ **Promieniowanie kosmiczne a fizyka cząstek elementarnych**
- ✓ **Promieniowanie kosmiczne a życie na Ziemi**
- ✓ **Zapomniani odkrywcy**
- ✓ **W poszukiwaniu Wyspy Stabilności**



**Cena
25 zł**

(w tym 8% VAT)

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

eprasa.pl 9c0e4a11e6

Drodzy Czytelnicy!

Przychodzi taki moment, że trzeba podjąć trudną decyzję. Niewątpliwie do takich należy decyzja o zakończeniu wydawania „Fizyki w Szkole” i innych czasopism. Przekazujemy ten numer jako ostatni w 98 letniej historii czasopisma.

Wiele osób pyta mnie – dlaczego? Odpowiedź jest prosta - wymuszają ją zmiany cywilizacyjne – prasa nie jest już źródłem informacji, tę rolę przejął Internet. Jadąc metrem, autobusem czy pociągiem widać, zwłaszcza młodych ludzi wpatrzonych wyłącznie w ekrany smartfonów. Liczba naszych prenumeratorów malała z roku na rok. Jeśli przyjąć, że szkół podstawowych i ponadpodstawowych jest ponad 20,8 tys. to zaledwie ok. 1% zdecydowało się zamówić „Fizykę w Szkole”. Przygrywaliśmy nie tylko z Internetem, ale i ze środkami czystości, jak pisali nam rozżaleni nauczyciele i szkolni bibliotekarze.

Na sytuację czasopisma miały także wpływ decyzje polityczne. Likwidacja gimnazjów sprawiła, że straciliśmy ok. 30% prenumeratorów. Wycofanie się Ruchu, największego przez lata kolportera prasy, z prowadzenia prenumeraty – to strata kolejnych 30%. Każde zawirowanie globalne jak pandemia czy wojna w Ukrainie odbijały się spadkiem abonamentu.

Czas więc podziękować wszystkim, którzy dotrwali z nami do końca. Przede wszystkim Czytelnikom, którzy kupowali w ostatnich latach coraz droższe czasopismo.

Szczególne słowa podziękowania kieruję do autorów, redaktorów i grafików, którzy godzili się na symboliczne wynagrodzenia, a niektórzy autorzy artykułów rezygnowali z honorariów.

Dziękuję także za lata owocnej współpracy drukarni Paper&Tinta, firmie DMS, osobom współpracującym z firm kolportażowych Garmondu, Kolportera, Poczty Polskiej, EMPIK-u, księgarni internetowych Publio i DW JAR/eprasa.

Miałem szczęście trafić na wspianych ludzi.

**Józef Szewczyk,
wydawca**

Wesółych Świąt i Szczęśliwego Nowego Roku!

2026

Fizyka wczoraj, dziś, jutro

- 4 Dlaczego skrzypce grają a nie skrzypią?** ■ Grzegorz Karwasz, Michał Kalicki
Właściwy tytuł jest nieco dłuższy: Dlaczego skrzypce grają a nie skrzypią i dlaczego nie lubią grać z fortepianem? Bo skrzypce, jak sama nazwa wskazuje, powinny skrzypieć.
- 9 10 rocznica eksperymentalnego odkrycia fal grawitacyjnych i 110 rocznica istnienia fal grawitacyjnych wynikających z ogólnej teorii względności Alberta Einsteina** ■ Kazimierz Mikulski
- 12 Fizyka w medycynie XXI wieku** ■ Tomasz Kubiak
Medycyna XXI wieku opiera się na skutecznej diagnostyce i terapii. Rozpoznawanie chorób i wykrywanie urazów ciała człowieka nie byłoby jednak możliwe bez metod fizycznych, wykorzystujących różne zakresy promieniowania elektromagnetycznego, począwszy od gamma i rentgenowskiego aż do fal radiowych.
- 19 Żyoty fizyków. J. J. Thomson (1856-1940)** ■ Tadeusz Wibig
- 22 Fotometria i kolorymetria – wybrane pojęcia**
■ Marcin Wesołowski
- 28 Pole magnetyczne** ■ Maciej Panczykowski
- 30 CREDO-Maze: miony – po co komu i dlaczego?** ■ Tadeusz Wibig
O mionach wiemy, że żyją średnio, gdy nie poruszają się (relatywistycznie), bardzo krótko, mniej więcej 2 milionowe części sekundy (2 μs). Nie mogą przychodzić do nas z kosmosu, możemy więc przypuszczać, że są produkowane w atmosferze przez pierwotne promieniowanie kosmiczne, które oddziałuje z jądrami atomów powietrza.



Z naszych lekcji

- 38 Prawo Gaussa** ■ Jerzy Kuczyński
- 40 Teorie fizyczne a życie człowieka. Czy teorie fizyczne mikro- i makroświata mają wpływ na ludzkie życie?** ■ Edward Rydygier
Aktywiści środowiska nauczycielskiego postulują, aby nie ograniczać nauczania fizyki w szkole tylko do realizacji coraz bardziej redukowanej podstawy programowej, ale uzupełniać treści nauczania informacjami o aktualnych nagrodach Nobla z fizyki i przez objaśnianie uczniom najnowszych osiągnięć i wynalazków z zakresu fizyki i techniki.

Astronomia dla każdego

- 45 „Moje spojrzenie na Czerwoną Planetę”**
■ Krzysztof Kowalczyk

Mars to planeta wielkich skrajności i kontrastów, niewątpliwie najlepiej poznana po Ziemi. Ma ślady niegdyś płynącej wody na powierzchni, rzadką atmosferę, największe wulkan w Układzie Słonecznym o rozmiarach setek kilometrów i szczątkowe pole magnetyczne.



FIZYKA
w Szkole z Astronomią

NUMER 6 LISTOPAD/GRUDZIEŃ 2025
401 (LXV) indeks 35810X ISSN 0426-3383

CENA 50,00 zł
(w tym 8% VAT)

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

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

Zapraszamy do odwiedzenia naszej strony w Internecie www.aspress.com.pl

Dlaczego skrzypce grają a nie skrzypią?

Grzegorz Karwasz, Michał Kalicki

Właściwy tytuł jest nieco dłuższy: Dlaczego skrzypce grają a nie skrzypią i dlaczego nie lubią grać z fortepianiem? Bo skrzypce, jak sama nazwa wskazuje, powinny skrzypieć. Po włosku nazywają się *violino*, od imienia rzymskiej bogini radości, o imieniu *Vitula*, ale ta nazwa też może oznaczać mały fiołek (fiołek = *viola*), czyli piękno i radość.

Zagadnieniom akustyki poświęciliśmy kilka tekstów, tak w „Fizyce w Szkole” [1], jak w nie wydawanym już „Fotonie” [2] a nawet w „Matematyce w Szkole” [3]. Bo

temat fal dźwiękowych, głosu i muzyki fascynował ludzkość od zawsze. Sprzed 17 tysięcy lat pochodzą kawałki pustych kości jelenia, z regularnie umieszczonymi otworami – czyli pierwsze flety. Otworów tych było – i we fletach prehistorycznych, i tych namalowanych w grobowcach Etrusków, i w dzisiejszej Korei – zawsze pięć, ryc. 1a-c. Tak jak pięć palców dłoni. Ba! Etruski flecista grał na dwóch fletach naraz. Posłuchanie w Internecie ludowej muzyki koreańskiej (lub chińskiej) na flecie w pięcioma otworami (albo tamtejszymi instrumentami strunowymi) daje wrażenie nie-harmonii, czyli kakofonii. Ale Koreańczykom się podoba. Coś nie tak z naszym gustem? Wrócić musimy aż do Pitagorasa i jego tajemnej szkoły



Ryc. 1 (a) Flecista etruski z VII w. p.n.e. z grobowca w Tarquini (materiały Muzeum). (b) Flet (kawałek kości) sprzed około 17 tysięcy lat (kultura Magdaleńska, Francja [4]), (c) Koreański flet ze sklepu muzycznego w Seulu (obok koreańskie sztuczki). (d) Kaszubskie diabelskie skrzypce. Te pokazane tutaj to atrapa – prawdziwe potrafią grać (a raczej skrzypieć). W tle plakat dot. analizy Fouriera „Wszystko gra” przygotowany na wystawę dydaktyczną GK w Paryżu w 2001 r. Foto Maria Karwasz.

matematycznej w Krotonie, na południowym krańcu dzisiejszych Włoch.

Dlaczego nauka Pitagorasa była tajemna, choć przywołał jego Szkołę nawet Kopernik w pierwszym rozdziale swego traktatu? (Pitagorejczycy jako pierwsi głosili hipotezę o ruchu Ziemi.) Nie dlatego, że dowiódł twierdzenie, które Egipcjanie wykorzystywali dwa tysiące lat przed nim do budowy piramid: $3 \times 3 + 4 \times 4 = 5 \times 5$. Dwa były zaskakujące odkrycia Pitagorasa: po pierwsze $\sqrt{2}$, który dziś nazywamy liczbą *niewymierną*, a po drugie – harmonia muzyczna. Harmonia muzyczna – dodam – ta nasza, grecka, europejska, zachodnia: oparta nie o pięć palców, ale o arytmetykę.

Pitagoras pochodził z wyspy Samos, ale dużo podróżował, zanim trafił do Krotonu – z pewnością poznał matematykę egipską. Egipcjanie, jak to wiemy choćby z papiirusu Rhind, sprzed ponad trzech tysięcy lat, potrafili wyliczyć np. objętość ściętego ostrosłupa, ale lubowali się w ułamkach o mianowniku 3, 33, 333. Kandydat na skrybę musiał znaleźć wspólny mianownik (zostało to do dziś w szkole, mimo układu dziesiętnego i telefonów komórkowych). Pitagoras zagadnienia upraszczał: zauważył, że struny o względnych długościach 2:1 dają wrażenie „harmonii”. Ba! również struny o długościach 3:2 i 4:3 dają wrażenie harmonii. Dziś, taki akord nazywamy *kwintą*, bo jest to stosunek częstotliwości dźwięku „G” do dźwięku „C”, a na klawiaturze fortepianu „G” jest piątym klawiszem po „C”. Podobnie *kwarta*, to „F” do „C”, czyli 4:3. Droga do współczesnych skrzypiec została otwarta, choć potrzebne było ponad dwa tysiące lat dla ich skonstruowania.

Zobaczyć harmonię

Harmonię skrzypiec możemy dziś bardzo prosto pokazać, nawet dzieciom, nie używającym pojęcia transformaty Fouriera (o której powinniśmy powiedzieć studentom). Nieskończona ilość analizatorów dźwięków, tak w Internecie jak w telefonach komórkowych pozwala na *zobaczenie* harmonii dźwięków. Na ryc. 2 pokazujemy dźwięki

„wydobyte” ze skrzypiec: ryc. 2a – kiedy niedbale pociąga się smykkiem po strunach, rys. 2b – kiedy czyni się to w sposób profesjonalny.

W pierwszym przypadku skrzypce rzeczywiście skrzypią, jak stare zawiasy; w drugim – wydobywają z siebie piękne, dziewczęce brzmienie. Jak to widzimy? Dźwięk jest falą, czyli okresową zmiennością ciśnienia powietrza propagującą w przestrzeni. Okresową – to nie znaczy sinusoidalną. Ba! Dźwięk, z wyjątkiem piszcącego kieliszka [2], to złożenie kilku sinusoid [3]. Jeśli okresy tych sinusoid (a na fot. 2b - częstotliwości) mają się do siebie jak liczby całkowite (niekoniecznie kolejne) – to dźwięk postrzegamy jako *harmoniczny*. Jeśli w składowych panuje „galimatias”, jak rys. 2a, to słyszymy zgrzyt, skrzypienie, kakofonię.

Smyczkowe i szarpane?

Instrumenty strunowe, od mezopotamskiej lutni, ryc. 3a przez średniowieczną cytrę, orkiestrową harfę po elektryczną gitarę były i są (prawie) zawsze *szarpane*. Naukowo „kostka” gitarowa służąca do takiego szarpnięcia nazywa się plektron. Ale do gry na skrzypcach (a także wiolonczeli i kontrabasie) służą smyczki. O dziwo, smyczki też szarpią strunę, i to w bardzo specjalny sposób – niejako ciągną. Drobne nierówności końskiego włosa, dobrze nasmarowanego kalafonią powodują delikatne szarpnięcia struny, która natychmiast powraca do położenia równowagi, po czym odkształca się w drugą stronę: ruch drgający, jak wahadła matematycznego.

Skrzypce, w wersji jakie dziś kosztują miliony dolarów (wybitni skrzypkowie wypożyczają instrumenty od ich właścicieli, którymi są zazwyczaj banki) powstały na przełomie XVII i XVIII wieku. Wymienia się lutników z Cremony, takich jak Nicola Amati, Antonio Stradivari, Giuseppe Guarneri. To wówczas ustalono skomplikowaną konstrukcję, jakby dwa oddzielne sektory „pudła rezonansowego”, delikatny „mostek” podtrzymujący struny, „dusza” łącząca wierzchnią i dolną płaszczyznę pudła i inne detale. Jak pokazujemy na ryc. 3, dziś ustalony standard

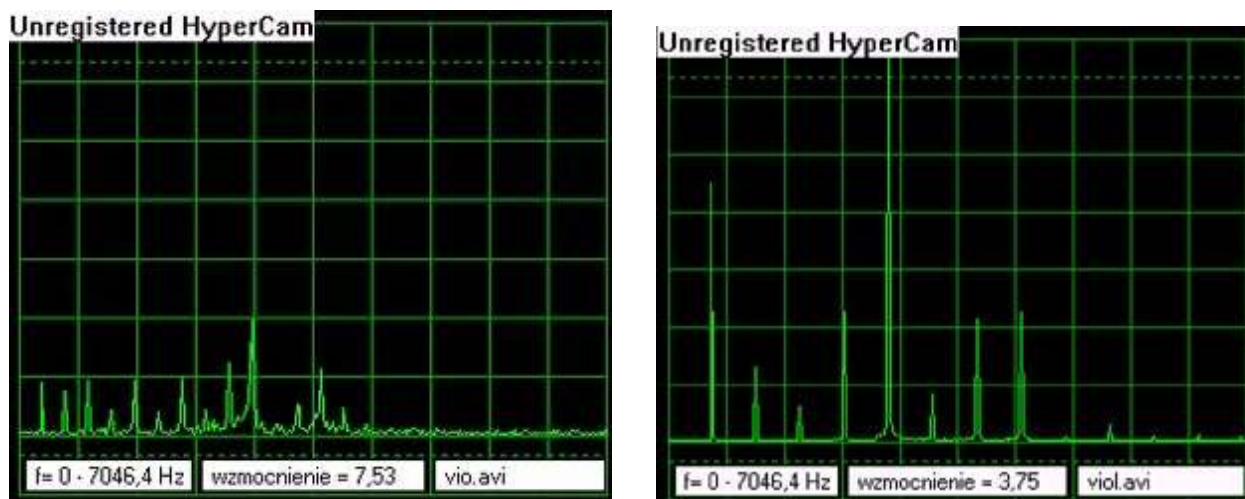


Fig. 2. Wizualizacja dźwięków poprzez komputerową (lub w telefonie komórkowym) analizę harmoniczną. (a) Celowo nieudolne pociągnięcie smykkiem wytwarza kakofonię dźwięków. (b) Profesjonalne prowadzenie smyczka daje piękny „grzebień” równo-odległych składowych harmoniczych. Zaskakująco dominuje piąta harmoniczna, mimo że wzbudzo strunę „e”, o częstości podstawowej 660 Hz. Gra: dr Piotr Karwasz.



Fig. 3. Stuletnie poszukiwania współczesnej konstrukcji instrumentów muzycznych. Muzeum Instrumentów „La Villette” w Paryżu. (a) „Quinton” – pięcio-strunowy prototyp altówki, czyli skrzypiec w niższej tonacji (viola po włosku). Nicolaus Augustin Chapuy, Paryż, 1763. Niżej, inny przodek, z 1717 r. Eksperymentowano z proporcjami pudła rezonansowego, ilością strun, wielkością instrumentu. (b) Prototyp rogu, zwanego nieco z niemieckiego waltornią. Foto Maria Karwasz

instrumentów był wynikiem stuleci prób podejmowanych przez niezliczoną rzeszę konstruktorów. Skrzypce powstawały przez stulecia, podobnie jak rogi, puzony, oboje, fagoty i inne, dziś doprowadzone do perfekcji: metalowy flet *poprzeczny* we współczesnej wersji zagrał dopiero w 1847 roku.

Przyrównuje się skrzypce do kobiecego głosu. Rzeczywiście, bogactwo składowych harmoniczných na ryc. 2b jest zaskakujące. Co więcej, skrzypce, z palcami skrzypka umieszczonymi w dowolnym miejscu (w odróżnieniu np. od gitary) pozwalają na zagranie każdej harmonii, nawet koreańskiej. Niezależnie, którą strunę wykorzystujemy, można wykonać dowolną sekwencję, czego najlepszym przykładem jest tzw. „Aria na strunie G” Johanna Sebastiana Bacha, która wcale dla struny G (czyli pierwszej, najgrubszej w skrzypcach) nie była napisana [4]. Wystarczy docisnąć strunę do gryfu we właściwym miejscu i otrzymujemy dźwięk o dowolnej częstotliwości. I to jest najdokładniejsza praktyczna realizacja harmonii odkrytej przez Pitagorasa, charakterystycznej dla naszej, Zachodniej kultury.

Dlaczego ucho lubi harmonię Pitagorasa? Bo ucho wewnętrzne, wypełnione płynem, to zwężająca się trąbka, w której pobudzeniu podlegają kolejne serie włosków „czuciowych” (przez składowe fale o rosnącej częstotliwości) a przez nie - odpowiednie neurony. Drgania harmoniczne to prosty zapis sygnału do mózgu: „Uwaga! Doszedł do nas dźwięk G i i jego wyższe harmoniczne jak w skrzypcach.”. Skrzypienie to cały ciąg liczb, bez możliwości matematycznej (kognitywistycznej) kodyfikacji. Podobnie nieco jak ze „złotą proporcją” w architekturze (i na ekranie TV): oddaje ona po prostu wymiary oczodołów (i okularów) *Homo sapiens*. Matematyka upraszcza świat. A fortepian? Dobre pytanie!

Dlaczego skrzypce nie lubią grać z fortepianem?

Fortepian, powstały pod koniec XVIII wieku to niejako kwadratura koła: jego nastrojenie wydaje się niemożliwe.

Albo inaczej: można fortepian nastroić tak, aby częstotliwości „C”: „G” miały się jak 2:3 i „C”: „F” jak 3:4, ale co z pozostałymi klawiszami? Kompozytorzy lubią pisać w różnych *tonacjach*. A właściwie – lubią *wyrażać się* w różnych tonacjach. Dwa nostalgiczne koncerty fortepianowe Chopina, napisane są w tonacjach *minorowych*, jakby smutnych „e-minor” (po polsku e-moll) i f-moll. Innymi słowy, w tonacji „e-moll” cała harmonia musi się zaczynać od drugiego czarnego klawisza. Za każdym razem przestrajać prawie 200 strun? Klawiszy jest na fortepianie 77, ale niektóre tony, te najwyższe, powstają przez uderzenie trzech strun.

Jan Sebastian Bach, geniusz z XVII wieku, napisał zbiór 24 utworów (preludia – czyli wstępy, i fugi – czyli ucieczki) pod tytułem „Równo strojona klawiatura”. Fortepian w nowoczesnej formie dopiero się rodził. Bach eksperymentuje, jak będą brzmiały różne utwory, jeśli nada się poszczególnym tonom nie proporcje dokładnie Pitagorasa – proporcji ułamków prostych liczb (uwaga! nazwa „liczba prosta” jest w matematyce zastrzeżona), ale pełnej *przestrzalności* muzyki: tak aby dowolny utwór można zaczynać od dowolnego klawisza. Ale jeśli między „C” a „F” ma być ta sama proporcja (3:4) co między „F” a „c#” (*cis* w polskim nazewnictwie) to całości klawiatury nie da się nastroić. Przynajmniej w taki sposób.

Kompromis, być może wywodzący się od Bacha, być może od ojca Galileusza, Vincenza, to „delikatne” odejście od ułamków prostych, na rzecz *równych* stosunków częstotliwości sąsiadujących ze sobą klawiszy, niezależnie czy są one czarne czy białe. A jest tych klawiszy łącznie w oktawie – dwanaście. Jak podzielić stosunek między „C” a „c” (1:2) na dwanaście równych (mnożnikowo) części? Stosunek częstotliwości C# do C wynosić musi $^{12}\sqrt{2}$ (pierwiastek stopnia 12). I tak kolejno D:D#, D#:D, też mają się do siebie jak $^{12}\sqrt{2}$: 1. Gdybyśmy się zdobyli na zapisanie tej skali w sposób logarytmiczny, za pomocą logarytmów o podstawie 2, to dźwięki od C, poprzez D:C#, D#:D aż do położonego o oktawę wyżej „c” ułożyłyby się w piękną sekwencję 1:2:3 aż do 12.



Ryc. 4. (a) Mozaika na ściankach drewnianego pogrobnika, z grobowca królewskiego z Ur, ok. 2500 r. p.n.e.; wejście muzyków [6]. (b) Cembalo – prototyp fortepianu, na dwie ręce, Benoist Stehlin, Paris, 1767 r., Musikinstrumenten-Museum, Berlin. Długości strun tworzą hiperbolę: w odróżnieniu od Mezopotamii, w Europie stosujemy harmonię Pitagorasa (materiał Muzeum).

Konsekwencją tej logarytmicznej łamigłówki jest, że „G” w fortepianie „równo strojonym” to nie jest $3/2$ „C” ale $(1^2\sqrt{2})^7 = 1,4983$ a zaś „F”: „C” = $1,335$ (a nie $1,333$). Czy nasze ucho jest w stanie wyłapać różnicę $2/1333$? Strojenie instrumentów nazywa się po angielsku „temperament”, i czasem twierdzi się, że muzykę żalobną pisze się w h-moll (jak marsz z II sonaty Chopina) a wesołą (jak „Włazł kotek”) w C-dur.

A więc konkluzja: dla skrzypka „G”: „C”, czyli tzw. kwinta to $1,5000$, a w fortepianie „równo strojonym” $1,4983$. Skrzypce nie harmonizują z fortepianem! I tak w sonatach fortepianowych, a także np. fortepianowych kwartetach (fortepian plus skrzypce, altówka i wiolonczela) albo fortepian rozwija melodię a smyczki nieśmiało potakują, albo skrzypki śpiewają swoje arie, a fortepian jedynie poddaje rytm, posłuchaj np. sonaty Beethovena [7].

Diabelska muzyka

Dla zamknięcia tematu estetyki i fizyki – pytanie, dlaczego niektórzy (rodzice) nie lubią „walenia” w bębny, mimo że jest to z kolei tradycyjna muzyka japońska. Rycina z psalterza średniowiecznego pokazuje bęben jako diabelskie granie, ryc. 5a. Dlaczego? Bo nie odpowiada kanonom harmonii Pitagorasa.

I struna i słup powietrza we flectie to obiekty liniowe. Ich drgania opisujemy funkcjami sinus (i cosinus). Miejsca zerowe funkcji sinus to $0, \pi, 2\pi$ itd., co wyjaśnia składowe harmoniczne drgań struny będące całkowitymi wielokrotnościami częstotliwości podstawowej. Wyjaśnijmy to jaśniej: częstotliwość najniższa drgań struny zamocowanej na dwóch końcach (lub podpartej z jednej strony na mostku, jak w skrzypcach) to taka, w której długość struny to $1/2$ długości fali. Kolejna częstotliwość to taka, w której długość struny odpowiada $1/1$ długości fali, kolejne $3/2$ itd.

Membrana bębna jest kolistą: drgania nie są opisane przez funkcje sinus i cosinus, ale przez ich odpowiedniki dla koła – tzw. cylindryczne funkcje Bessela. Pokazujemy je na ryc. 5b – trzy symetryczne osiowo (jak cosinus) i jedną antysymetryczną – jak sinus. Widać „gołym okiem”,

że miejsca zerowe tych funkcji nie są wielokrotnościami liczb naturalnych. Ba! wynoszą one $2,405; 3,832; 5,135$. Widmo dźwięku bębna w niczym nie przypomina układu harmonicznych z ryc. 2b.

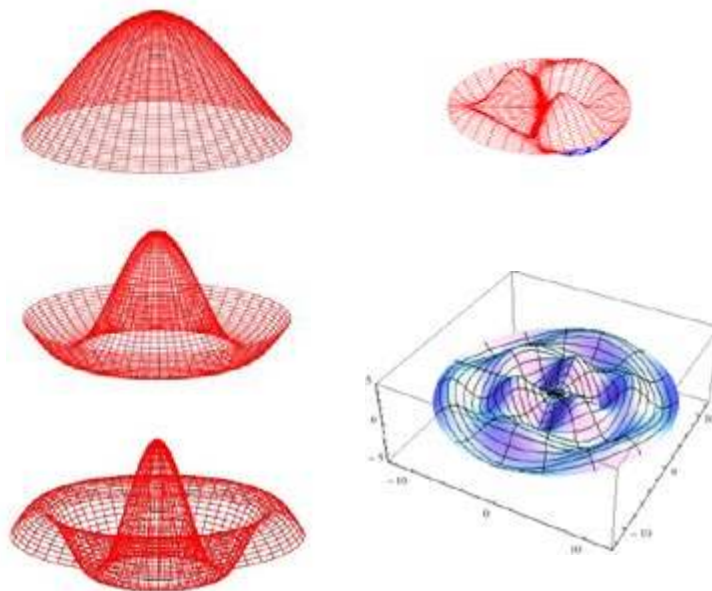
I teraz dopiero dwa słowa o „pudle rezonansowym” skrzypiec. Typowe, tautologiczne wyjaśnienie jest, że zapewnia ono „rezonans”. My nazywamy tę funkcję inaczej: samoczynny (ang. *intrinsic*) sprzęgacz modów wibracyjnych. Struna skrzypiec drga, ale słup powietrza, jaki może wprawić w ruch jest objętościowo bardzo nikły. Ale zamocowana na pudle, wprawia w drgania obie, duże płaszczyzny. A te – poruszają masę powietrza taką, że słycać sonatę w najdalszym rzędzie sali koncertowej. W przy tym, drgania płaszczyzny charakteryzują się innymi modami niż vibracje struny: dźwięk zostaje dodatkowo wzbogacony.

Dlaczego nie potrafimy odtworzyć skrzypiec Stradivarius? Na pudło rezonansowe używał drewna czerwonego świerku rosnącego wysoko w Alpach. Zimny klimat powodował powolny przyrost słoików. Kiedy drwale ścinali drzewo, Stradivarius, podobno, słuchał odgłosu obalonego pnia. Podobno.

Wnioski dydaktyczne

Akustyka, jak pokazaliśmy to już w innych artykułach (do znalezienia na stronie internetowej https://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/56) jest bardzo dźwięcznym tematem i w tematyce fal i drgań. Jakikolwiek plastikowy flet pozwala na nieskończone prawie możliwości tematyczne, w porównaniu ze skrzynką-piszczalką będącą zazwyczaj na wyposażeniu szkolnych pracowni.

Wirtualny oscyloskop, w postaci karty dźwiękowej i mikrofonu laptopa, stoi praktycznie na każdym biurku. Jak pisaliśmy w pierwszym artykule z tej serii, do „Fotonu” w 2004 r., jakość transformaty Fouriera uzyskiwanej za pomocą takiego zestawu już wtedy była znakomita, lepsza niż z dobrej klasy oscyloskopu cyfrowego. Wirtualny oscyloskop umożliwia więc ponowne, wielowątkowe podejście do zagadnień akustyki, które jeszcze do



Ryc. 5. Drgania płaszczyzny kolistej umocowanej na brzegach. (a) Księga psalmów z Katedry w Reims (ok. 1100 n.e.), obecnie w St. John's College, Cambridge. „Boska” muzyka to flety, organy, dzwonki i cytra; muzyka diabelska to róg, prymitywne (diabelskie) skrzypce i bęben. Foto: Maria Karwasz. (b) Cylindryczne funkcje Bessela – trzy symetryczne (analogia cosinusa), jedna niesymetryczna, i złożony kształt drgań przy większej ilości składowych „harmonicznych”. Animacja drgań okrągłej membrany pokazana jest w Wikipedii [8].

niedawna pozostawały domeną artystów (np. wiolinistów lub lutników), a czasem tylko fizyków [9].

Oczywiście, słuchaczom uniwersytetów dziecięcych nie opowiadamy o całce w domenie częstotliwości, ale pokazujemy „piękny, regularny grzebień”, który „podoba się również naszemu uchu.” I po całej sekwencji piszącego kieliszka, nieco lepiej brzmiącego fletu i piękna *violino* podsumowujemy: „Widzicie, dźwięk możemy również zobaczyć!”

A przede wszystkim wykłady o dźwięku są interdyscyplinarne. Umiejętność odróżnienia sonaty od symfonii może przydać się wszystkim, szczególnie nauczycielom na zastępstwie.

Pożegnalny tren

Ten tekst jest jednocześnie lamentem w sprawie „Fizyki w Szkole”. Przez dziesięciolecia tytuł ten towarzyszył uczniom, nauczycielom, hobbystom i pasjonatom. Przez wiele lat czasopismo było redagowane przez p. red. Józefa Szewczyka – sprawnie, kolorowo, profesjonalnie. Niestety, czasy dla prasy drukowanej (czytaj: przemysłanej) są trudne. Mówimy studentom, że to co nas uczyniło ludźmi, to gliniane tabliczki z Mezopotamii. Dzięki nim dowiadujemy się, kto, komu i za ile sprzedał działkę 5 tysięcy lat temu. Chcielibyśmy, aby dzisiejsze, elektryczne, czyli efemeryczne tabliczki też miały podobny czas życia. Ale pewności nie ma.

Zamyka się więc epoka, miejmy nadzieję, że tylko dla „Fizyki w Szkole” a nie dla Fizyki w Szkole. Píše o tym Państwu, z wielkim żalem, ekonomista, absolwent handlu zagranicznego Uniwersytetu Gdańskiego, tymczasowo (od 1982 r.) fizyk (GK) i młody absolwent UMK.

P.S. Artykuł, dydaktyczny, jest z konieczności pełen uproszczeń. Muzykolodzy dyskutują, czy logarytmiczny sposób strojenia wymyślił Bach (organista) czy Vincenzo Galilei (lutnik), historycy – czy cytra mezopotamska korzystała z harmonii Pitagorasa, jazzmani – czy stroić saksofon według A 440 Hz czy 442 Hz. Niestety, dziś nawet Wikipedia staje się nieczytelna. Tym bardziej polecamy nasze strony internetowe <https://dydaktyka.fizyka.umk.pl>

Grzegorz Karwasz,
Michał Kalicki

Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

LITERATURA:

- [1] G. Karwasz, E. Rajch, *Czarodziejski flet*, Fizyka w Szkole 1/2006.
- [2] G. Karwasz, *Szampańska muzyka*, Foton, 85 (Lato 2004)
- [3] G. Karwasz, G. Osiński, *Trygonometria akustyczna*, Matematyka w Szkole 28/2007.
- [4] Denis Vialou, *Au cœur de la Préhistoire. Chasseurs et artistes*, Gallimard 2003.
- [5] J.S. Bach, *Aria z suity orkiestrowej D-dur nr 3 (BWV 1068)* <https://www.youtube.com/watch?v=6yRtWrqxtvQ>
- [6] https://www.britishmuseum.org/collection/object/W_1928-1010-3
- [7] L. van Beethoven, *Sonata skrzypcowa F-Dur, No. 5 Op. 24, "Spring"* (1801), Anne Sophie Mutter, Lamber Orkis. <https://www.youtube.com/watch?v=PGFs7n6n3-8>
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/Bessel_function#/media/File:Vibrating_drum_Bessel_function.gif
- [9] Andrea Frova, *Fisica nella musica*, Zanichelli, Bologna, 2008.

10 rocznica eksperymentalnego odkrycia fal grawitacyjnych

i 110 rocznica istnienia fal grawitacyjnych wynikających z ogólnej teorii względności Alberta Einsteina



Fotografia 1. Rainer Weiss (1932 – 2025), Źródło: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/41/Rainer_Weiss_EM1B8841_%2824027015857%29.jpg

Kazimierz Mikulski

Rainer Weiss, który urodził się 29 września 1932 r. w Berlinie, a zmarł 25 sierpnia 2025 r. w Cambridge, to amerykański fizyk niemieckiego pochodzenia, profesor Massachusetts Institute of Technology. Był znany z badań nad grawitacją i astrofizyką, szczególnie nad interferometrami.¹ To on wraz z Barrym Barishem i Kipem Thorne'em zostali laureatami Nagrody Nobla z dziedziny fizyki w 2017 r. za „*decydujący wkład w detektor LIGO i zaobserwowanie fal grawitacyjnych*”.²

Fale grawitacyjne, to rozchodzące się w przestrzeni zaburzenia pola grawitacyjnego wywołane niejednostajnym ruchem mas (ciał). Istnienie fal grawitacyjnych wynika, z ogólnej teorii względności. Wyniki badań (*m.in. pulsara — PSR 1913+16 — w układzie podwójnym; za odkrycie tego pulsara uczeni amer., R. A. Hulse i J. H. Taylor otrzymali w 1993 r. Nagrodę Nobla*) dają pośrednie dowody istnienia fal grawitacyjnych.³ Przyznano im: „*za odkrycie nowego typu pulsarów, które otworzyło nowe możliwości badania grawitacji*”.

R. Weiss w 2016 r. za wkład w LIGO wraz z Kipowem S. Thorne'em i RonalDEM W. P. Dreverem (*ten ostatni zmarł 27 marca 2017 r. nie doczekawszy przyznania Nagrody Nobla*) otrzymał, przyznawaną od 2002 r. Nagrodę Shawa⁴ w dziedzinie astronomii. W uzasadnieniu z 31 maja 2016 r. napisano: „*za koncepcję i konstrukcję obserwatorium fal grawitacyjnych LIGO, którego niedawna bezpośrednia detekcja fal grawitacyjnych otwiera nowe możliwości w astronomii, gdyż pierwszym niezwykle odkryciem było połączenie się pary czarnych dziur o masie gwiazdowej*.”⁵

To właśnie w amerykańskim Obserwatorium Fal Grawitacyjnych Interferometru Laserowego (LIGO – **Laser Interferometr Gravitational-Wave Observatory**) po raz pierwszy zaobserwowano fale grawitacyjne w 2015 r., co ostatecznie potwierdziło ostatnią, niesprawdzoną prognozę stuletniej ogólnej teorii względności Alberta Einsteina.⁶

Einstein i fale grawitacyjne

Istnienie fal grawitacyjnych wynika z ogólnej teorii względności sformułowanej przez Alberta Einsteina, której równania są nieliniowe, co powoduje: rozwiązania równań nie tworzą przestrzeni liniowej, co oznacza, że nie obejmuje ich zasada superpozycji, przez co są dużo trudniejsze do rozwiązania niż równania Maxwella oraz fale grawitacyjne oddziałują ze sobą, a nie tylko z materią, w efekcie zjawisko interferencji jest zupełnie inne niż dla fal elektromagnetycznych.

Andrzej Okołów, w opracowaniu: „Czy fale grawitacyjne interferują?” w „Zapytaj Fizyka” [dostęp 2017-10-16] napisał: „*Można powiedzieć, że fale grawitacyjne interferują, pod warunkiem, że interferencję rozumiemy dostatecznie ogólnie, tzn. nie tylko jako proste sumowanie się amplitud fal.*”

Jak to się zaczęło z badaniem fal?

Sam Einstein wątpił, mimo że rozwiązania w jego teorii zapowiadały ich istnienie, że fale te kiedykolwiek będą obserwowalne, ponieważ są niezwykle słabe. Przełomowy pomysł Weissa, polegający na wykorzystaniu interferometrii laserowej, w końcu umożliwił pierwszą obserwację fal grawitacyjnych, które były emitowane podczas połączenia dwóch czarnych dziur. Obiekty te odległe od

¹ https://pl.wikipedia.org/wiki/Rainer_Weiss

² <https://www.theguardian.com/science/2017/oct/03/nobel-prize-physics-discovery-gravitational-waves-ligo>

³ <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/fale-grawitacyjne;3899721.html>

⁴ Nagroda Shawa została ustanowiona pod auspicjami pana Run Run Shawa (1907-2014). O nadrodzie pos daresem <https://web.archive.org/web/20180202004004/http://www.shawprize.org/en/shaw.php?tmp=1&twoid=1>

⁵ Więcej pod adresem <http://www.shawprize.org/en/shaw.php?tmp=3&twoid=102&threeid=254&fourid=476>

⁶ Perkowitz S., Rainer Weiss: 50 lat LIGO i fal grawitacyjnych, <https://physicsworld.com/a/rainer-weiss-50-years-ligo-gravitational-waves/>

Ziemi 1,3 miliarda lat świetlnych są jednymi z wielu, które od tego czasu wykryło LIGO. Wymagało to dziesięcioleci wysiłków Weissa i wielu innych, a odkrycie stanowiło szczytowe osiągnięcie w fizyce, które zapoczątkowało również nową erę w astronomii.

Od czasu pojawienia się astronomii obserwacyjnej, skanowaliśmy wszechświat głównie obserwując najpierw światło widzialne, a następnie szerokie spektrum fal elektromagnetycznych. Teraz fale grawitacyjne umożliwiły nowy sposób badania wielu zjawisk kosmicznych. Zaledwie siedem lat po narodzinach astronomii grawitacyjnej, dostarczyła ona już wiele cennej nowej wiedzy.

Na pomysł wykrywania fal grawitacyjnych, Weiss wpadł, poprzez pomiar zmian odległości rzędu 10–18 [m] za pomocą interferometru o długości kilku kilometrów. Propozycja zaproponowana przez niego ostatecznie doprowadziła do powstania bliźniaczego Laserowego Obserwatorium Fal Grawitacyjnych (LIGO), które po raz pierwszy wykryło takie fale w 2015 r.

Początek, czyli „Pomiar grawitacji w klasie”

Weiss rozpoczął studia na wydziale elektrotechniki w Massachusetts Institute of Technology (MIT), po czym przeniósł się na fizykę. Ostatecznie uzyskał doktorat w 1962 r., opracowując zegary atomowe pod kierunkiem Jerrolda R. Zacharias (1905–1986).⁷ Następnie pracował na Uniwersytecie Tufts, a później na Uniwersytecie Princeton, gdzie był współpracownikiem naukowym astronoma i fizyka Roberta H. Dicke’a (1916–1997), który przyczynił się do rozwoju radaru, fizyki atomowej, optyki kwantowej, fizyki grawitacji, astrofizyki i kosmologii. Motywem przewodnim jego pracy było zastosowanie przez niego zaawansowanych i skrupulatnie kontrolowanych metod eksperymentalnych do zagadnień, które naprawdę mają znaczenie.

Wiosną 1953 r. podjął pracę w MIT jako technik w Laboratorium Wiązek Atomowych wspomnianego J. Zacharias, który opracował pierwszy zegar atomowy. „*Nauka prowadzona w tym laboratorium była znakomita*” – wspomina Weiss. „*Eksperymenty dotyczyły badań właściwości izolowanych pojedynczych atomów i cząsteczek niezakłóconych przez sąsiednie układy. Każdy atom był taki sam jak następny i można było zadać fundamentalne pytania dotyczące ich struktury i oddziaływań, które je trzymały razem*”.

To, co zaczęło się jako pomoc studentom studiów podyplomowych w ich projektach magisterskich, ostatecznie doprowadziło do bezpośredniej współpracy Weissa z Zachariasem nad rozwojem zegara wiązki atomowej cezu, który ostatecznie został przyjęty jako standard czasu przez Biuro Standardów i Marynarkę Wojenną USA.⁸

Pod opieką Zacharias Weiss ukończył licencjat i doktorat i poznał eksperymenty o wysokiej precyzji, kluczowy wątek, który doprowadził do powstania LIGO.

Kolejny kluczowy temat pojawił się, gdy Weiss pracował jako adiunkt pod kierunkiem astronoma i fizyka Roberta Dicke’a na Uniwersytecie Princeton, którego Weiss nazywa „jednym z bohaterów swojego życia”. Dicke i Weiss zajęli się opracowaniem nowoczesnej wersji eksperymentu Eötvösa, aby zrozumieć zasadę równoważności ogólnej teorii względności poprzez udowodnienie równoważności masy bezwładnej i grawitacyjnej.

Eksperyment Eötvösa to sprawdzian związku między dwoma rodzajami masy: bezwładnej i grawitacyjnej, dowodzący słabej zasady równoważności. Został przeprowadzony przez Loránda Eötvösa (1848–1919) w 1909 r.

Ponieważ teorie grawitacji alternatywne do ogólnej teorii względności, m.in. Dicke’a, (teoria Bransa–Dicke’a, teoria Einsteina–Cartana, różne teorie skalarnie, itp.)⁹ łączyła pole skalarnie z polem tensorowym ogólnej teorii względności, jego pomysłem było zbudowanie eksperymentu, który mógłby zmierzyć, jak cała Ziemia wibrowałaby, gdyby przeszła przez nią fala grawitacyjna.¹⁰ Celem eksperymentu był pomiar widma skalarnego promieniowania grawitacyjnego, ale okazało się, że czułość ich grawimetru kwarcowego była poważnie ograniczona z powodu szumu geofizycznego. Pomimo niepowodzenia badania, Weiss poznał techniki eksperymentalne, których pionierem był Dicke, i które ostatecznie okazały się niezbędne dla LIGO i wielu innych eksperymentów fizycznych.

Weiss ciągle myślał o falach grawitacyjnych, zwłaszcza gdy poproszono go o poprowadzenie kursu z ogólnej teorii względności na MIT. Nie było to łatwe. Matematyka ogólnej teorii względności jest zniechęcająca, a kursy, które uczyły tego przedmiotu, były bardziej matematyczne niż fizyczne. Weiss mówił: „*Nie jestem teoretykiem. Jestem hydraulikiem... hydraulikiem próżniowym, hydraulikiem elektronicznym, ale hydraulikiem*”. Więc on i jego studenci uczyli się matematyki razem, ale niespodziewanie jego doświadczenie eksperymentalne stało się niezwykle istotne.

Jak wyjaśnia Weiss, w tym czasie Joseph Weber z University of Maryland próbował wykryć fale grawitacyjne mierząc zmianę długości dużych aluminiowych cylindrów, gdy fala przechodziła obok. Kiedy studenci zapytali Weissa o takie pomiary, wymyślił on pedagogiczny eksperyment *gedanken*, aby pokazać w zasadzie, jak można je wykonać. W swoim eksperymencie umieścił dwie masy w pewnej odległości od siebie w wolnej przestrzeni. Jedną z laserem impulsowym, a drugą ze zwierciadłem. Następnie zmierzył czas podróży światła lasera w obie strony, czyli odległość. Jeśli przechodząca fala grawitacyjna zmienia odległość, wystarczająco precyzyjne pomiary czasu pokazałyby ten efekt. Ponieważ wszystkie pomiary są wykonywane w czasoprzestrzennym położeniu lasera, obliczenia ogólnej teorii względności stają się proste. To było przyczyną, że Weiss przypisał te działania jako problem klasowy.

⁷ <https://www.nasonline.org/directory-entry/jerrold-r-zacharias-wfk7ht/>

⁸ Źródło: <https://physicsworld.com/a/rainer-weiss-50-years-ligo-gravitational-waves/>

⁹ Alternatywą dla ogólnej teorii względności są teorie fizyczne, które próbują opisać zjawisko grawitacji, konkurując z ogólną teorią względności Einsteina – więcej patrz https://en.wikipedia.org/wiki/Alternatives_to_general_relativity

¹⁰ <https://zapytajfizyka.fuw.edu.pl/pytania/alternatywne-teorie-grawitacji/>

Projekt LIGO

W 1964 r. Weiss powrócił do MIT, gdzie rozpoczął prace nad koncepcją wykorzystania dużego interferometru do pomiaru fal grawitacyjnych. Współpracując z Kipem Thorne'em z California Institute of Technology (Caltech), Weiss opracował studium wykonalności interferometru laserowego o zwiększonym zasięgu kilku kilometrowym. W 1979 r. National Science Foundation sfinansowała Caltech i MIT w celu opracowania projektu budowy LIGO. Budowę dwóch detektorów LIGO, z których każdy miał ramiona o długości 4 km rozpoczęto w 1990 r. Obiekty uruchomiono w 2002 r. Jednak po prawie dekadzie działania nie wykryto żadnych fal. W roku 2011 oba obserwatoria zmodernizowano, zwiększając ich czułość 10-krotnie.

W dniu 14 września 2015 r. podczas pierwszej rundy obserwacyjnej Advanced LIGO, czyli aLIGO – interferometr wykrył fale grawitacyjne pochodzące z dwóch łączących się czarnych dziur, znajdujących się około 1,3 miliarda lat świetlnych od Ziemi. Detekcja miała miejsce w momencie, gdy kalibrowano dwa gigantyczne interferometry – jeden w Waszyngtonie, a drugi w Luizjanie – przed planowanym na cztery dni później rozpoczęciem pierwszej rundy obserwacyjnej. W jednym z tych osobliwych przypadków historycznych, personel dyżurny detektora w Luizjanie położył się spać kilka godzin przed nadejściem fal. Gdyby nie zaplanowali kalibracji na noc, uniemożliwiliby to LIGO wykonanie tego bardzo ważnego i historycznego pomiaru, nazwanego GW150914. To była z pewnością tylko kwestia czasu, zanim LIGO wykryłoby swój pierwszy sygnał, skoro do tej pory wykryto ponad 200 zdarzeń fal grawitacyjnych.

Odkrycie zostało ogłoszone przez naukowców realizujących LIGO w lutym 2016 r. W następnym roku Weiss otrzymał połowę Nagrody Nobla za rok 2017, a uzasadnienie brzmiało; „za decydujący wkład w detektor LIGO i obserwację fal grawitacyjnych”. Drugą połowę Nagrody Nobla podzielili się Thorne i jego kolega, fizyk z Caltech, Barry Barish, który był dyrektorem projektu LIGO.

„Niezatarty ślad”

Oprócz pionierskich badań nad detekcją fal grawitacyjnych, Weiss opracował również zegary atomowe i kierował pracami nad pomiarem widma mikrofalowego promieniowania tła za pomocą balonów meteorologicznych. Był współzałożycielem projektu NASA Cosmic Background Explorer, którego pomiary pomogły wesprzeć teorię Wielkiego Wybuchu opisującą ekspansję Wszechświata.

Oprócz Nagrody Nobla, Weiss otrzymał Nagrodę Grubera w dziedzinie kosmologii w 2006 r., Nagrodę Einsteina od Amerykańskiego Towarzystwa Fizycznego w 2007 r., a także Nagrodę Shawa i Nagrodę Kavliego w dziedzinie astrofizyki, obie w 2016 r.

Dziewięć lat temu, w Wydziale Nauk Ścisłych MIT, Nergis Mavalvala, która w latach 90. ubiegłego wieku w ramach swojej pracy doktorskiej współpracowała z Weisssem przy budowie wczesnego prototypu detektora fal grawitacyjnych twierdzi, że każde zaobserwowane zdarzenie związane



Fot. 2. Interferometr Virgo to wielkoskalowy instrument naukowy, znajdujący się w pobliżu Pizy we Włoszech, służący do wykrywania fal grawitacyjnych. [https://en-wikipedia.org.translate.google/wiki/Virgo_interferometer?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pl&_x_tr_hl=pl&_x_tr_pto=sc](https://en.wikipedia.org.translate.google/wiki/Virgo_interferometer?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pl&_x_tr_hl=pl&_x_tr_pto=sc)

z falą grawitacyjną „będzie przypomnieniem jego spuścizny”.

Podsumowanie

Obserwowanie „zmarzłeczek w czasoprzestrzeni”, które od dawna znajdowały się na listach życzeń wielu fizyków, w ciągu ostatniej dekady stało się niemal rutyną. Detekcja interesujących fal grawitacyjnych dotyczyła łączenia się czarnych dziur w układach podwójnych. W trakcie obserwacji i pomiarów odnotowano kilka zderzeń gwiazd neutronowych z czarnymi dziurami oraz kilka połączeń gwiazd neutronowych w układach podwójnych.

Już teraz fizycy planują budowę detektora fal grawitacyjnych trzeciej generacji. Urządzenie zwane Teleskopem Einsteina, będzie mogło wykonać w ciągu jednego dnia to, co LIGO zajęło dekadę. Planuje się jego otwarcie do 2035 r., O jego uruchomienie ubiegają się trzy lokalizacje: włoska Sardynia, niemiecka Saksonia, a także trzecia lokalizacja, która znajdowałaby się w pobliżu styku Niemiec, Belgii i Holandii. Decyzja ma zapadnąć za dwa lata, pod warunkiem, że uda się pozyskać 2 mld euro na koszty budowy.

Europejska Agencja Kosmiczna planuje również budowę detektora fal, którego działanie będzie oparte na pomiarze tempa i nazwanego LISA. Laserowa Antena Interferometryczna (LISA) będzie pierwszym kosmicznym obserwatorium fal grawitacyjnych. Wybrana jako trzecia duża misja ESA, będzie zajmować się tematem naukowym Wszechświata Grawitacyjnego. LISA będzie składać się z trzech statków kosmicznych, oddzielonych od siebie o 2,5 miliona kilometrów w formacji trójkątnej, podążających za Ziemią po jej orbicie wokół Słońca. Start przewidywany jest na 2037 r.¹¹ Natomiast Stany Zjednoczone mają własny projekt trzeciej generacji, nazwany Cosmic Explorer. Więcej informacji o działaniach na stronie internetowej o adresie <https://cosmicexplorer.org/>.

Naukowcy liczą, że inne kraje zaangażują się i zbudują sieć takich obiektów na całym świecie. Tym samym możemy spodziewać się nowej złotej ery astronomii fal grawitacyjnych, co powoduje, że lista marzeń dotycząca badania fal grawitacyjnych właśnie się wydłuża.

dr Kazimierz Mikulski
Maksymilianowo

¹¹ <https://sci.esa.int/web/lis>



Foto – T. Kubiak

Fizyka w medycynie XXI wieku

Medycyna XXI wieku opiera się na skutecznej diagnostyce i terapii. Rozpoznawanie chorób i wykrywanie urazów ciała człowieka nie byłoby jednak możliwe bez metod fizycznych, wykorzystujących różne zakresy promieniowania elektromagnetycznego, począwszy od gamma i rentgenowskiego aż do fal radiowych. Leczenie pacjentów wymaga z kolei zastosowania skomplikowanej aparatury, bazującej na osiągnięciach mechaniki, elektrotechniki oraz inżynierii biomedycznej. Podstawę onkologii stanowi radioterapia, zwalczająca guzy nowotworowe promieniowaniem jonizującym.

Tomasz Kubiak

Fizyka w ratownictwie medycznym

W przypadku zagrożenia życia najważniejsze jest, aby poszkodowanemu jak najszybciej udzielona została fachowa pomoc medyczna. Ratownicy na miejsce zdarzenia docierają karetką lub śmigłowcem. W 2025 roku w barwach Lotniczego Pogotowia Ratunkowego (LPR) w Polsce latało 27 lekkich śmigłowców EC135/H135 o zasięgu ponad 600 km, maksymalnej prędkości lotu poziomego 252 km/h oraz prędkości wznoszenia 7,8 m/s.¹ Start takiej nowoczesnej maszyny, który zazwyczaj odbywa się ze względów bezpieczeństwa „do tyłu” i pod wiatr, obrazuje fot.1. Siła nośna wytwarzana jest na skutek ruchu obrotowego pojedynczego wirnika głównego o średnicy 10,4 m. Tylni fenestron, czyli wentylator złożony z wielu łopatek, osadzonych w obudowie tunelowej w stateczniku pionowym, wytwarza natomiast moment siły ciągu, który równoważy moment reakcyjny, pochodzący od wirnika nośnego.

Mechanika lotu helikopterów jest stosunkowo skomplikowana, stąd poświęcono jej osobny artykuł w Fizyce w Szkole.² Warto wspomnieć również, że na całym świecie maszyny Śmigłowcowej Służby Ratownictwa Medycznego (HEMS, od ang. *Helicopter Emergency Medical Service*) wyposażone są w specjalistyczną aparaturę medyczną, z której działaniem wiąże się niezwykle ciekawa fizyka. Analogicznie rzecz się ma w przypadku tradycyjnych karetek, jakie używane są w przypadku większości wezwań pogotowia ratunkowego. Przyjrzyjmy się zatem wybranym urządzeniom znajdującym się na pokładzie ambulansu.

Najbardziej charakterystycznym wyposażeniem pojazdów służących do transportu chorych i rannych w pozycji leżącej są oczywiście nosze (fot. 2). W przeszłości miały one bardzo prostą budowę, gdyż składały się z dwóch równoległych drążków oraz rozciągniętej między nimi wytrzymałej płachty materiału. Nietrudno sobie wyobrazić, że podnoszenie i przenoszenie pacjenta przy użyciu takiego sprzętu wymagało dużej siły oraz zaangażowania co najmniej dwóch ratowników. Współcześnie na rynku dostępne są nosze o zupełnie innej konstrukcji.

¹ Informacje o helikopterach LPR pochodzą z oficjalnej strony: <https://www.lpr.com.pl/o-nas/flota> (dostęp z 10.11.2025).

² T. Kubiak, Latające karetki, czyli o fizyce śmigłowców ratowniczych, *Fizyka w Szkole z Astronomią*, nr 4 (2019), s. 4-9

Poszkodowanego układa się bowiem na materacu osadzonym na wieloczołowej płycie umożliwiającej reanimację. Całość zamontowana jest na transporterze wyposażonym w 4 koła jezdne oraz dodatkowe koła najazdowe.

Najnowsze modele noszy posiadają dodatkowo mechaniczne ramię ładunkowe oraz zasilany z akumulatora litowo-jonowego system, umożliwiający elektryczne oraz w pełni automatyczne unoszenie transportera do wybranej pozycji. Dzięki temu pacjent o masie do 320 kg może zostać sprawnie przetransportowany i umieszczony wewnątrz karetki przez pojedynczego ratownika bez nadmiernego wysiłku. Widać zatem, że nawet prosta fizyka potrafi znacznie ułatwiać codzienną pracę w ochronie zdrowia. W przypadku rannych z podejrzeniem urazów kręgosłupa wykorzystuje się natomiast sztywną deskę ortopedyczną albo tzw. nosze podbierakowe. Te ostatnie wykonane są zazwyczaj w całości ze stopu aluminium albo tworzywa sztucznego i posiadają regulowaną długość. Podczas ewakuacji pacjenta nosze rozpina się na dwie podłużne części, które układa się po bokach poszkodowanego a następnie wsuwa pod jego ciało i łączy za pomocą zatrzasków. Dzięki temu unika się bezpośredniego unoszenia rannego bez stabilizacji.

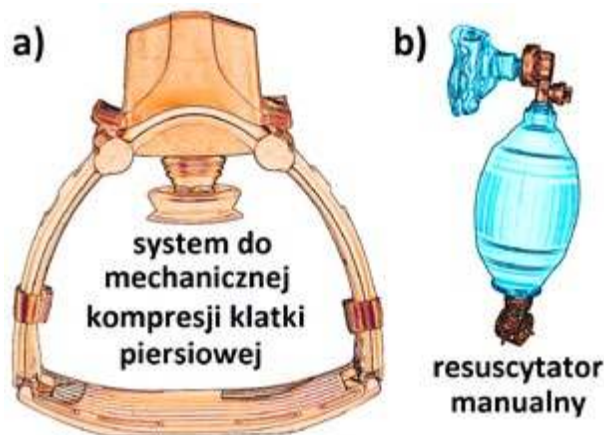
Współczesne karetki pogotowia nie służą jedynie do szybkiego transportu chorych z miejsca zdarzenia do szpitala, lecz umożliwiają także przeprowadzenie wielu, nawet zaawansowanych procedur medycznych. W tym celu wyposażono je w różne urządzenia, wyjaśnienie działania których wymaga wiedzy z różnych działów fizyki, przede wszystkim mechaniki klasycznej oraz elektryczności i magnetyzmu.³ Uwagę zwraca przede wszystkim system do mechanicznej kompresji klatki piersiowej (rys. 1a). Jest on zdolny, aby automatycznie przez kilkadziesiąt minut wykonywać masaż serca, uciskając ciało pacjenta na głębokość 4-5 cm, z częstotliwością 100-120 razy na minutę i siłą z przedziału 300 - 600 N, dostosowaną do oporności klatki piersiowej, wynoszącej 6 - 12 N/mm.

Sztuczną wentylację pacjenta prowadzi się z kolei przy użyciu worka samorozprężalnego (AMBU). Dzięki temu możliwe jest cykliczne dostarczenie do płuc pacjenta objętości oddechowej, która wynosi 400 - 600 ml powietrza.⁴ Resuscytator manualny (rys. 1b) składa się z maski twarzowej, złącz, zaworów a przede wszystkim worka silikonowego.⁵ Ratownik ściska go ręką w celu zwiększenia ciśnienia i wypchnięcia zgromadzonego powietrza do portu pacjenta, przy czym zawór bezpieczeństwa gwarantuje, że wtłaczana mieszanka oddechowa nie będzie podawana pod ciśnieniem większym niż 60 mbar u dorosłych oraz 40 mbar u dzieci, aby nie uszkodzić ich płuc.

Po zwolnieniu ucisku elastyczny worek samodzielnie powraca do pierwotnej objętości, generując podciśnienie i napełniając się z rezerwuaru świeżym, wzbogaconym o tlen powietrzem. Wydechane gazy są natomiast usu-



Fot. 2. Wnętrze przedziału medycznego ambulansu transportowego. Widoczne jest podstawowe wyposażenie, tj. nosze główne, defibrylator z łyżkami, dozownik tlenu oraz kołnierze ortopedyczne.



Rys. 1. a) System do mechanicznej kompresji klatki piersiowej automatycznie wykonuje masaż serca, znacznie odciążając ratowników; b) resuscytator manualny umożliwia cykliczne dostarczanie objętości oddechowej powietrza do płuc pacjenta.

wane przez port wydechowy. Warto jeszcze wspomnieć, że karetka pogotowia posiada instalację tlenową, na którą składają się butle, reduktory (obniżające ciśnienie pobieranego gazu), manometry (do kontroli ciśnienia) oraz szybkozłącza i dozowniki z nawilżaczem, umożliwiające skuteczną tlenoterapię.

³ Szczegółowe omówienie działania sprzętu medycznego, będącego na wyposażeniu ambulansu przedstawiono w artykule: T. Kubiak, Fizyka w karetce pogotowia, Fizyka w Szkole nr 6 (2014), s. 4-7.

⁴ O fizycznych podstawach wentylacji płucnej przeczytamy w artykułach: T. Kubiak, Fizyka u pulmonologa, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 3 (2024), s. 4-13 oraz T. Kubiak, Biofizyka układu oddechowego - od teorii do eksperymentu, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 1 (2018), s. 4-8.

⁵ Całkowita pojemność worka samorozprężalnego to około 1500 ml dla dorosłych i 500 ml dla dzieci, czyli więcej niż wynosi podawana objętość oddechowa (należy uwzględnić straty i fakt, że worek nie jest do końca ściskany).



Fot. 3. Defibrylator AED umieszczony w specjalnej szafce na budynku użyteczności publicznej.

Jeśli u pacjenta doszło do nagłego zatrzymania krążenia w mechanizmie migotania komór lub wystąpił częstoskurcz komorowy bez tętna konieczne jest użycie defibrylatora. Czytelnicy wiedzą zapewne, że w miejscach publicznych, takich jak pociągi, dworce czy lotniska zainstalowane są automatyczne urządzenia typu AED (od ang. *Automated External Defibrillator*). Na zewnątrz budynków umieszcza się je w specjalnej szafce (fot.3.), wyposażonej w moduł grzewczy (aby bateria oraz elektrody nie były narażone na działanie niskich temperatur) i chłodzący (zapobiegający przegrzewaniu się urządzenia latem).

Każdy, nawet nieprzeszkolony świadek może, podążając za instrukcją głosową z urządzenia, przykleić poszkodowanemu dwie elektrody i uratować mu życie. Jeśli bowiem automatyczna analiza rytmu serca wykaże potrzebę przeprowadzenia defibrylacji, impuls elektryczny o ustalonej energii zostanie wyzwolony samoczynnie w celu wywołania jednolitej depolaryzacji mięśnia serca i przywrócenia mu rytmu zatokowego.⁶

W karetkach pogotowia najczęściej spotyka się natomiast profesjonalne defibrylatory z elektrodami w postaci tzw. łyżek. Ratownik, trzymając za izolowane uchwyty, przykładają je do powierzchni klatki piersiowej, zamykając tym samym obwód elektryczny. Obecnie stosuje się urządzenia z dwufazowym przebiegiem fali, tzn. kierunek prądu przepływającego przez ciało pacjenta pomiędzy elektrodami po określonym czasie ulega odwróceniu.⁷

Zmagazynowanie dużej ilości energii, jaka musi zostać wyzwolona w krótkim czasie (milisekund), wymaga zastosowania kondensatora o pojemności 30 do 200 μF . Chociaż generowany impuls zazwyczaj posiada energię 150-200 J, tylko część z niej dociera do mięśnia sercowego ze względu na impedancję elektryczną tkanek. Nietrudno



Fot. 4. Wielorządowy spiralny tomograf komputerowy składa się z gantry i stołu dla pacjenta.

domyślić się, że tkanka tłuszczowa wykazuje bardzo duży opór elektryczny, stąd u osób otyłych, które notabene są bardziej podatne na choroby układu krążenia, skuteczność wyładowania będzie znacznie mniejsza i często zachodzi konieczność jego powtarzania.

Poszkodowany po udzieleniu mu pomocy przez ratowników medycznych trafia karetką lub śmigłowcem do szpitalnego oddziału ratunkowego (SOR), gdzie możliwe jest wykonanie niezbędnej diagnostyki.

Fizyka w diagnostyce

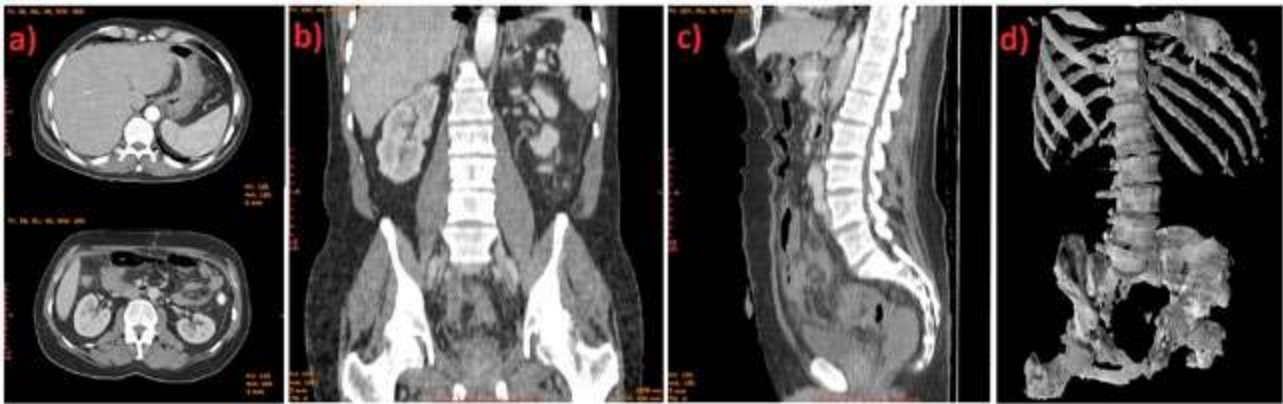
W przypadku pacjentów urazowych w pierwszej kolejności zazwyczaj wykonuje się klasyczne badanie rentgenowskie.⁸ Natężenie wiązki promieniowania X, emitowanej z lampy rtg, maleje przy przejściu przez ciało człowieka, przy czym różne struktury anatomiczne osłabiają to promieniowanie w odmienny sposób. W obrazowaniu medycznym kluczowe znaczenie ma absorpcja fotonów w wyniku zajścia zjawiska fotoelektrycznego, przeszkadza natomiast promieniowanie rozproszone na skutek efektu Comptona, zmniejszające kontrast uzyskiwanych zdjęć.

Analogowe aparaty rtg, w przypadku których obraz rejestrowany był na kliszy, czyli prostokątnym arkuszu błony halogenosrebrowej, przeszły już w większości do lamusa. Obecnie europejskie szpitale wyposażone są w urządzenia w pełni cyfrowe z detektorami bezpośrednio rejestrującymi promieniowanie X. Ewentualnie, po odpowiedniej adaptacji stanowisk analogowych, stosuje się tzw. radiografię pośrednią CR (*ang. computed radiography*). W takiej sytuacji zamiast klisz używa się wielorazowe płyty pamięciowe, pokryte fosforem magazynującym. Odczyt zawartej w nich informacji odbywa się

⁶ Rytm zatokowy to fizjologiczny rytm pracy serca, pochodzący z węzła zatokowo-przedsionkowego, czyli naturalnego rozrusznika serca. W spoczynku cechuje go częstotliwość 60-100 uderzeń na minutę.

⁷ Szczytowe natężenie prądu podawanego impulsu wynosi zazwyczaj 20-32 A.

⁸ Polecam artykuł: T. Kubiak, Fizyczne podstawy badań rentgenowskich kości i stawów, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 6 (2021), s. 16-21



Rys. 2. Różne sposoby prezentacji wyników badania jamy brzusznej i miednicy małej metodą tomografii rentgenowskiej: a) przekroje poprzeczne; b) rekonstrukcja w płaszczyźnie czołowej; c) rekonstrukcja w płaszczyźnie strzałkowej; d) widok 3D (model izopowierzchni).

w specjalnym urządzeniu w oparciu o zjawisko luminescencji fotostymulowanej.

Niestety, klasyczne badanie rtg ma wiele wad. Pozwala różnicować tylko obszary o wyraźnie odmiennych poziomach absorpcji promieniowania. Ponadto uzyskiwany obraz stanowi jedynie rzut trójwymiarowego obiektu na płaszczyznę, co nie pozwala na dokładną wizualizację nakładających się struktur anatomicznych. Dlatego zdecydowanie lepsze możliwości diagnostyczne oferuje rentgenowska tomografia komputerowa.⁹

Jak sama nazwa wskazuje („τόμος” w starożytnej grece oznaczało „przekrój, plaster”) technika ta pozwala uzyskać obrazy cienkich poprzecznych warstw ciała człowieka. We współczesnych urządzeniach (fot. 4.) podczas skanowania pacjent przemieszcza się płynnie razem ze stołem wewnątrz otworu gantry (okoła) a równocześnie jedna bądź dwie¹⁰ lampy rentgenowskie krążą wokół niego z dużą szybkością. Trajektoria poruszania się układu projekcyjnego względem pacjenta wskazuje zatem, iż mówimy o tomografii spiralnej.

Standardem jest zastosowanie wielorzędowego (nawet 320 rzędów) systemu ultraszybkich, ceramicznych detektorów scyntylacyjnych (np. GOS na bazie tlenosiarczku gadolinu). Najnowsza technologia bazuje jednak na tzw. zliczaniu fotonów (*ang. photon-counting CT*). W jego przypadku scyntylatory zostały zastąpione półprzewodnikowymi kryształami tellurku kadmu. Dzięki temu zachodzi bezpośrednia detekcja kwantów promieniowania X i generowany jest odpowiadający im sygnał elektryczny, co zdecydowanie poprawia jakość badania.

Wynik badania tomograficznego to seria zrekonstruowanych obrazów przekrojowych (rys. 2a), stanowiących w praktyce ilościową mapę liniowych współczynników osłabienia μ promieniowania X. Wartości μ dla poszczególnych wokseli są normowane z użyciem jednostek HU

(*ang. Hounsfield Units*)¹¹ a następnie wizualizowane na ekranie komputera z wykorzystaniem 256 odcieni szarości. Oczywiście odpowiednie algorytmy komputerowe pozwalają na podstawie zbioru przekrojów poprzecznych uzyskać rekonstrukcje wielopłaszczyznowe MPR (*ang. multiplanar reformation*), których przykład przedstawiono na rys. 2b i c, a także obrazy trójwymiarowe (rys. 2d) oraz wirtualne dysekcje. Ponadto istnieje możliwość wykonania szeregu zaawansowanych badań takich, jak: angiografia CT (obrazowanie naczyń krwionośnych wypełnionych kontrastem) czy kolonografia CT (wirtualna endoscopia, pozwalająca na dokładną wizualizację wnętrza jelita grubego z opcją dwukierunkowego przelotu pozorną kamerą).

Tomografia komputerowa to zatem wspaniałe narzędzie diagnostyczne, które służy przede wszystkim do wizualizacji anatomii pacjenta. Warto jednak zauważyć, iż w przypadku niektórych struktur, takich jak mózg, otoczony czaszką, czyli strukturą kostną charakteryzującą się dużym pochłanianiem promieni X, metoda ta nie jest optymalna, chociażby ze względu na konieczność użycia większej dawki promieniowania.¹² Na szczęście z pomocą przychodzi inna, doskonała metoda diagnostyczna, jaką jest tomografia magnetyczno-rezonansowa.

Obrazowanie metodą MRI (od *ang. Magnetic Resonance Imaging*) bazuje na zjawisku jądrowego rezonansu magnetycznego.¹³ Do uzyskiwania szczegółowych obrazów anatomicznych a także oceny funkcji niektórych organów, np. mózgu człowieka, nie używa się w tym przypadku promieniowania jonizującego, tylko fale radiowe (MHz), działające na pacjenta. Podczas badania leży on wewnątrz skanera w silnym, zewnętrznym polu magnetycznym B_0 o indukcji 1,5 bądź 3 tesli. Dodatkowe cewki nadawczo-odbiorcze generują falę elektromagnetyczną, której energia jest absorbowana, powodując zmianę

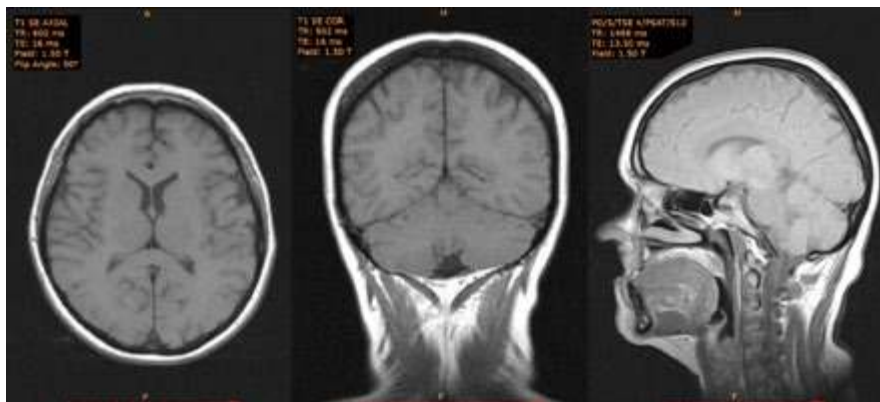
⁹ Więcej informacji o tej metodzie obrazowania czytelnicy znajdą w tekście: T. Kubiak, Tomografia komputerowa, Fizyka w Szkole nr 1 (2014), s. 7-10.

¹⁰ Tomografy dwuźródłowe wyposażone są w lampy rentgenowskie pracujące przy różnych napięciach i emitujące wiązki o odmiennych energiach, co przekłada się na lepsze różnicowanie tkanek miękkich na uzyskiwanych obrazach.

¹¹ Skala Hounsfielda swą nazwą upamiętnia laureata Nagrody Nobla, Godfreya Newbolda Hounsfielda, który w 1971 r. skonstruował pierwszy klinicznie użyteczny tomograf komputerowy.

¹² Generalnie dawki, jakie otrzymuje pacjent w badaniu przeprowadzonym nowoczesnym tomografem wielorzędowym są stosunkowo niewielkie i z reguły nie przekraczają 2 mSv, czyli wynoszą mniej niż roczna dawka promieniowania ze źródeł naturalnych w Polsce. Szerzej problem dawek w badaniach rentgenowskich omówiono w artykule: T. Kubiak, Obalamy mity, czyli biofizyka kontra legendy miejskie, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 1 (2025), s. 4-11.

¹³ O zjawisku NMR i wykorzystującej go spektroskopii przeczytać można w tekście: T. Kubiak, Od spektroskopii do obrazowania, czyli magnetyczny rezonans jądrowy w pigułce, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 3 (2025), s. 4-12.



Rys.3. Obrazy mózgu uzyskane techniką MRI w trzech płaszczyznach anatomicznych.

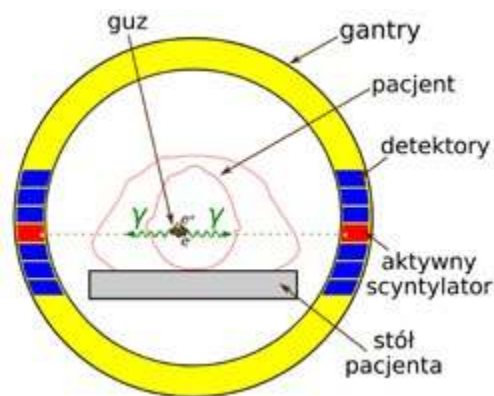
orientacji momentów magnetycznych jąder ^1H ($I = \frac{1}{2}$), znajdujących się we wspomnianym polu magnetycznym.

Protony w ciele badanego pochodzą przede wszystkim z wody zawartej w tkankach. Poziom uwodnienia oraz wartości czasów relaksacji stanowią właśnie czynniki różnicujące struktury anatomiczne na obrazie MRI. Aby jednak dokładnie umiejscowić źródło sygnału, niezbędne jest zastosowanie liniowych gradientów pola (30–80 mT/m).¹⁴ Umożliwiają one wybranie kolejnych warstw oraz rozróżnienie poszczególnych elementów objętościowych w ich obrębie. W wyniku zastosowania skomplikowanych algorytmów rekonstrukcyjnych otrzymywane są dwuwymiarowe przekroje poprzeczne ciała oraz obrazy 3D. Przykładowy wynik badania mózgu w trzech płaszczyznach anatomicznych przedstawia rys. 3.

Warto jeszcze wspomnieć, że poprawę jakości obrazu MRI uzyskać można poprzez podanie pacjentowi odpowiednich środków kontrastujących, które zmieniają czasy relaksacji wybranych tkanek. Dotychczas stosowano przede wszystkim paramagnetyczne związki gadolinu, ale obecnie trwają wdrożenia preparatów zawierających superparamagnetyczne nanocząstki tlenku żelaza w biologicznych powłokach.¹⁵ To wymowny znak, iż nanotechnologia, którą zajmuje się współcześnie wielu fizyków, znajduje coraz szersze zastosowanie w medycynie.

W przypadku pogłębionej diagnostyki, oprócz obrazowania anatomii pacjenta, niezwykle ważne jest zbadanie metabolizmu różnych narządów, np. mózgu, nerek czy serca. Służą do tego techniki medycyny nuklearnej takie, jak: tomografia emisyjna pojedynczych fotonów, czyli SPECT (ang. *single-photon emission computed tomography*) oraz pozytonowa tomografia emisyjna, tj. PET (ang. *positron emission tomography*).

W przypadku pierwszej z nich do krwioobiegu pacjenta podaje się preparat zawierający izotop, najczęściej metastabilny technet $^{99\text{m}}\text{Tc}$ o czasie połowicznego rozpadu $T_{1/2} = 6,01$ h. Gromadzi się on w regionach o zwiększonym

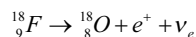


Rys.4. Zasada działania skanera PET. Pozyton, powstały w wyniku rozpadu β^+ izotopu zawartego w radiofarmaceutyku, ulega anihilacji z elektronem, a dwa kwanty gamma poruszają się pod kątem $\approx 180^\circ$ i są rejestrowane przez przeciwległe detektory scyntylacyjne.

metabolizmie i emituje promieniowanie gamma o energii $E \approx 141$ keV. Fotony γ po opuszczeniu ciała zbierane są przez gamma kamery, obracające się wokół stołu z pacjentem. Po wykonaniu szeregu projekcji i przeprowadzeniu rekonstrukcji otrzymuje się informację o przestrzennym rozkładzie znakowanej radioaktywnej substancji w tkankach.

Nieco bardziej zaawansowaną metodą obrazowania metabolicznego jest PET. W połączeniu z opisaną wcześniej rentgenowską tomografią komputerową¹⁶, stanowi ona podstawę współczesnej diagnostyki onkologicznej, gdyż pozwala nie tylko na wykrycie pierwotnego nowotworu, ale także jego odległych przerzutów. W tym celu pacjentowi dożylnie podaje się radiofarmaceutyk, czyli substancję powstającą z chemicznego połączenia wytwarzanego w specjalnym cyklotronie radioizotopu oraz nośnika, sprawiającego, że specyfik jest preferencyjnie wychwytywany przez regiony o zwiększonym metabolizmie.

W przypadku badania PET najczęściej stosuje się fluorodeoksyglukozę, czyli analog cukru prostego glukozy, który znakowany jest promieniotwórczym fluorem 18 ($T_{1/2} \approx 110$ min). Izotop ten ulega rozpadowi beta plus, emitując pozyton e^+ , czyli antycząstkę elektronu:



Innymi, zdecydowanie rzadziej używanymi w diagnostyce obrazowej izotopami są: ^{11}C ($T_{1/2} \approx 20,3$ min), ^{15}O ($T_{1/2} \approx 124$ s), ^{13}N ($T_{1/2} \approx 10$ min).¹⁷

Zasięg wyemitowanego w tkance pozytonu to zaledwie kilka mm, gdyż jest on spowalniany do szybkości ruchów termicznych (następuje tzw. termalizacja) a następnie oddziałuje z elektronem z otoczenia, tworząc pozytonium, czyli quasi-stabilną strukturę złożoną z e^+ i e^- . Istnieje ona w organizmie zaledwie przez ns, a później obie cząstki anihilują (rys.4.), dając dwa kwanty γ o energii 511 keV każdy. Fotony te poruszają się wzdłuż tej samej prostej, ale w przeciwne strony (kąt wynosi $180^\circ \pm 0,25^\circ$), co wynika bezpośrednio z zasady zachowania pędu. Zakładamy

¹⁴ Rozmieszczenie cewek gradientowych i szczegóły budowy oraz działania skanera MRI zwizualizowano w artykule: T. Kubiak, Od protonów do diagnostyki, czyli obrazowanie metodą rezonansu magnetycznego, *Fizyka w Szkole z Astronomią*, nr 4 (2017), s. 4–9.

¹⁵ O biomedycznych zastosowaniach nanocząstek traktuje tekst: T. Kubiak, Od nanocząstek do mikrokapsulek, czyli fizyczne rewolucje w medycynie, *Fizyka w Szkole z Astronomią*, nr 6 (2018), s. 4–8.

¹⁶ Hybryda PET-CT, dostarcza równocześnie informacje metaboliczne oraz anatomiczne.

¹⁷ Ze względu na krótki czas połowicznego zaniku zastosowanie tych izotopów wymaga lokalizacji cyklotronu produkcyjnego w sąsiedztwie skanera PET.

bowiem, że w chwili anihilacji elektron i pozyton znajdowały się w spoczynku. W praktyce mogą posiadać jednak niewielką składową prędkości, co powoduje, iż kierunek emisji fotonów będzie się nieco różnić od wspomnianych 180 stopni. Sytuacja ta oraz inne czynniki, tj. określony zasięg e^+ w tkance (zależący od jego energii kinetycznej) a także rozproszenie Comptonowskie fotonów anihilacyjnych, pociągają za sobą ograniczenie przestrzennej zdolności rozdzielczej skanera PET do około 3-4 mm.

W celu lokalizacji miejsca anihilacji wykorzystuje się układ pomiarowy złożony z wielu pierścieni detektorów -kryształów scyntylacyjnych, np. BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) wraz z fotopowielaczami. Pomiar czasu pomiędzy dotarciem dwóch fotonów γ do położonych naprzeciwko siebie detektorów pozwala określić współrzędne miejsca anihilacji pozytonu ze wspomnianą wcześniej dokładnością. Tworzona jest mapa intensywności sygnału w granicach ciała pacjenta. Odzwierciedla ona ilość izotopu zgromadzonego w danym miejscu, czyli de facto metabolizm badanego obszaru. W przypadku guza nowotworowego konsumpcja znakowanej glukozy jest znacznie podwyższona, co ujawnia się na obrazach w badaniu PET.

Fizyka w terapii

Po gruntownym zdiagnozowaniu pacjenta należy przystąpić do jego efektywnego leczenia. Tutaj kluczowe znaczenie ponownie ma zaawansowana aparatura medyczna, której działanie opiera się na fascynującej fizyce. Największy postęp odnotowujemy w kardiologii, onkologii oraz chirurgii. Obraz lekarza stojącego ze skalpelem nad pacjentem ułożonym na stole operacyjnym powoli odchodzi już do przeszłości. W ostatnich latach do naszych szpitali (nawet powiatowych) wkroczyła bowiem chirurgia robotowa, która staje się powszechna w przypadku zabiegów z zakresu urologii, ginekologii oraz chirurgii onkologicznej.¹⁸

Na rynku dostępnych jest wiele typów robotów medycznych. Najbardziej znane opinii publicznej jest oczywiście zaawansowane amerykańskie urządzenie o nazwie da Vinci, które doczekało się już 5 generacji, a w Polsce pracuje już w kilkudziesięciu szpitalach. System składa się z trzech części, tj. korpusu z układem czterech ramion robotycznych, konsoli sterowniczej oraz wózka wizyjnego. Elektromechaniczne ramiona zawierają końcówki zakończone narzędziami chirurgicznymi, mającymi co najmniej 7 stopni swobody.

Chirurg, siedząc wygodnie przy konsoli sterowniczej, obsługuje urządzenie za pomocą manipulatorów i obserwuje pole operacyjne w trójwymiarze dzięki specjalnemu systemowi wizyjnemu.¹⁹ Maszyna redukuje efekt drżenia rąk operatora a także kompensuje jego gwałtowne czy nieskoordynowane ruchy. Obecnie roboty nie działają jesz-

cze autonomicznie, tylko wymagają obsługi przez lekarza. Dzięki ich asyście operacje są wykonywane jednak znacznie precyzyjniej i w sposób małoinwazyjny.

Co ciekawe, intensywnie rozwija się także telechirurgia, czyli operowanie na odległość. 1 sierpnia 2025 r. w Polsce przeprowadzono pierwsze tego typu zabiegi z zakresu kardiochirurgii i urologii. Robot operował pacjentów w Warszawie a sterujący nim lekarz znajdował się przy konsoli w Gdańsku. Opóźnienie transmisji danych pomiędzy tymi miejscami wyniosło mniej niż 5 ms.²⁰

Na świecie zdalne zabiegi robotyczne wykonywano już wiele lat temu. Przykładem jest słynna międzykontynentalna operacja Lindbergh z 7 września 2001 roku. Wówczas robot, sterowany przez chirurga przebywającego w Nowym Jorku, usunął pęcherzyk żółciowy (czyli mówiąc językiem fachowym wykonał laparoskopową cholecystektomię) pacjentce leżącej na sali operacyjnej w Paryżu. Technika daje zatem wspaniałe możliwości i dzięki niej chorzy nie będą musieli już podróżować do innych krajów, aby zostać zoperowanym przez wybitnego specjalistę. Futurologi przewidują nawet, iż roboty chirurgiczne, wykorzystując algorytmy sztucznej inteligencji, zyskają częściową autonomię, zmniejszając tym samym ryzyko błędów popełnianych czasami przez lekarzy.

Pacjent po ciężkim zabiegu chirurgicznym trafia zazwyczaj na salę pooperacyjną lub oddział intensywnej opieki medycznej. Tam również znaleźć możemy mnóstwo sprzętu (fot.5.), którego funkcjonowanie bazuje na ciekawej fizyce. Warto wspomnieć chociażby urządzenia do śledzenia funkcji życiowych, np. kardiomonitor i pulsoksymetri. Ważne są również pompy infuzyjne, które w sposób ciągły lub cykliczny dawkują odpowiednie leki oraz respiratory, prowadzące wentylację mechaniczną pacjenta poprzez wymuszanie przepływu powietrza przez



Fot. 5. Na oddziale intensywnej opieki medycznej znajduje się mnóstwo specjalistycznego sprzętu, m.in. kardiomonitor, respiratory i pompy infuzyjne.

¹⁸ Ukazał się raport „Raport chirurgii robotowej 2025” podsumowujący dynamiczny rozwój robotyki chirurgicznej w Polsce (<https://www.gov.pl/web/rpp/raport-chirurgia-robotowa-2025>, dostęp 15.11.2025).

¹⁹ Laparoskop z dwoma teleskopami przekazuje obraz z kamer do binokularów umieszczonych w konsoli sterowania (każde oko chirurga odbiera zatem obraz z innej kamery, co daje wrażenie widzenia stereoskopowego).

²⁰ Relacja z tego wydarzenia pojawiła się we wszystkich ważnych mediach, można o niej przeczytać także na stronie MSWiA: <https://www.gov.pl/web/mswia/nowy-etap-w-medycynie-pierwsza-w-europie-operacja-przeprowadzona-miedzy-szpitalami-w-pim-mswia> (dostęp 15.11.2025).



Fot.6. Stanowisko gantry do terapii protonowej nowotworów w Centrum Cyklotronowym Bronowice w Krakowie.

jego drogi oddechowe. Fizyka urządzeń medycznych, znajdujących się na OIOM, to zdecydowanie temat na odrębny artykuł. W naszym podsumowaniu medycyny XXI wieku musimy nawiązać jeszcze do jednego ważnego aspektu fizyki medycznej, czyli terapii nowotworów.

Podstawowym sposobem miejscowego leczenia raka od wielu lat pozostaje radioterapia, wykorzystująca różne rodzaje promieniowania jonizującego.²¹ Warto przypomnieć, iż jej nadrzędnym celem jest dostarczenie możliwie wysokiej dawki promieniowania w obręb guza przy maksymalnej ochronie sąsiadujących zdrowych tkanek. Wyróżniamy brachyterapię, w której źródło promieniowania umieszcza się w obrębie guza lub w jego bezpośrednim sąsiedztwie oraz teleterapię, czyli leczenie wiązkami promieniowania podawanymi z urządzeń zewnętrznych.

W teleradioterapii stosuje się przede wszystkim wysokoenergetyczne promienie X (4 MeV do 22 MeV), generowane w kompaktowych akceleratorach liniowych w wyniku kierowania przyspieszonej wiązki elektronów na tarczę. Ze względu na wysokie koszty infrastruktury zdecydowanie rzadziej używa się bardziej skutecznych protonów i jonów węgla.

Przewaga terapii hadronowej nad fotonową wynika przede wszystkim z lepszego rozkładu dawki na głębokości. Dla fotonów maksymalna dawka jest deponowana tuż pod powierzchnią skóry i spada wykładniczo wraz ze wzrostem głębokości w ciele pacjenta, co jest niekorzystne i naraża na promieniowanie zdrowe tkanki.

W przypadku p^+ i $^{12}C^{6+}$ maksimum przekazu energii występuje natomiast w obszarze tzw. piku Bragga, na końcu ich zasięgu. Regulując energię kinetyczną jonów, możemy zatem sprawić, by położenie wspomnianego piku pokrywało się z lokalizacją guza. W technice skano-

wania rastrowego podzielony na niewielkie elementy objętościowe obszar nowotworu jest napromieniany z dużą precyzją wąskimi wiązkami, odchylanymi za pomocą zestawu elektromagnesów. Dzięki temu bezpiecznie leczy się guzy położone w pobliżu narządów krytycznych, czyli tych szczególnie wrażliwych na promieniowanie, jak np. gałki oczne czy pęcherz moczowy. Dodatkowo jony węgla cechuje wysoki, liniowy przekaz energii LET (*ang. Linear Energy Transfer*) oraz współczynnik efektywności biologicznej (*RBE od ang. Relative Biological Effectiveness*), co sprawia, że doskonale nadają się do niszczenia nawet odpornych na promieniowanie nowotworów.²²

Warto uzmysłowić sobie, iż w Polsce terapia protonowa w 2025 roku realizowana była tylko w jednym ośrodku, tj. Centrum Cyklotronowym Bronowice w Krakowie (fot.6). W naszym kraju nie ma natomiast infrastruktury do terapii jonami węgla i zainteresowani taką formą leczenia pacjenci muszą udać się np. do niemieckiego Heidelbergu albo austriackiego Wiener Neustadt.²³ Przyczyną są oczywiście m.in. ogromne koszty aparatury tj. źródła jonów, synchrotronu (lub cyklotronu) przyspieszającego $^{12}C^{6+}$ do odpowiednich energii²⁴ oraz stanowisk terapeutycznych typu gantry, gdzie ogromne elektromagnesy nadprzewodzące nakierowują wiązkę hadronów na cel z milimetrową precyzją.

Intensywne badania prowadzone przez fizyków oraz inżynierów biomedycznych zaowocują na pewno kolejnymi niesamowitymi rozwiązaniami technicznymi, pozwalającymi ratować ludzkie życie. Trzeba zatem, aby zarówno lekarze jak i pacjenci mieli świadomość, jakim dyscyplinom zawdzięczają postęp we współczesnej medycynie, a nauczyciele przekazywali tę wiedzę uczniom.

dr Tomasz Kubiak

biofizyk i fizyk medyczny,

Wydział Fizyki i Astronomii UAM Poznań

LITERATURA:

- [1] M. T. Weisz, Physical principles of defibrillators, *Anaesthesia & Intensive Care Medicine* 10(8), 2009, s. 367-369.
- [2] Manual Resuscitators [w:] J. A. Dorsch, S. E. Dorsch, *Understanding Anesthesia Equipment*, Philadelphia, 2008, s. 282-295.
- [3] R. Cierniak, Tomografia komputerowa. Budowa urządzeń CT. Algorytmy rekonstrukcyjne, EXIT, Warszawa 2005.
- [4] B. Gonet, Spektroskopia i tomografia NMR [w:] Biofizyka pod red. F. Jaroszyka, PZWL, Warszawa 2008, s. 848-874.
- [5] J. Stankowski, W. Hilczer, Wstęp do spektroskopii rezonansów magnetycznych, PWN, Warszawa, 2005, 13-27, s. 62-87.
- [6] Fizyczne metody diagnostyki medycznej i terapii pod red. A. Z. Hryniewiczza i E. Rokity, PWN, Warszawa 2000, s. 64-88, 102-111.
- [7] Edward Pankowski, Tomografia emisyjna SPECT oraz Pozytonowa emisyjna tomografia komputerowa PET [w:] Biofizyka pod red. F. Jaroszyka, PZWL, Warszawa 2008, s. 874-888.
- [8] T. Kubiak, Jony węgla w radioterapii - szanse i wyzwania, *Postępy Fizyki* 76(1), 2025, s. 13-20.
- [9] T. Kubiak, Particle therapy of moving targets-the strategies for tumour motion monitoring and moving targets irradiation, *The British Journal of Radiology* 89(1066), 2016, 20150275.
- [10] A. Choucha i inni, The Da Vinci Robot, a promising yet underused minimally invasive tool for spine surgery: A scoping review of its current role and limits, *Neurochirurgie* 71, 2025, 101624.

²¹ Polecam wszystkim zainteresowanym artykuł: T. Kubiak, Od konwencjonalnej radioterapii fotonowej do terapii hadronowej, czyli fizyka w leczeniu nowotworów, *Fizyka w Szkole z Astronomią*, nr 6 (2015), s.4-7.

²² Jony węgla, jako cząstki naładowane, jonizują materię bezpośrednio. Fotony X jonizują natomiast jedynie pośrednio, gdyż oddziałują poprzez efekt fotoelektryczny, zjawisko Comptona oraz kreację par elektron-pozyton.

²³ W 2025 roku na świecie funkcjonowało 15 centrów terapii jonami węgla, z czego aż 7 z nich w Japonii.

²⁴ Dla $^{12}C^{6+}$ do 430 MeV/u w przypadku nowotworów położonych na głębokości 30 cm u otyłych pacjentów.

Żywoty fizyków

J. J. Thomson**(1856–1940)**

Tadeusz Wibig

Joseph John Thomson (1856–1940) urodził się w Cheetham Hill w Anglii, niedaleko Manchesteru. Jego ojciec był księgarzem i marzyło mu się, że jego syn zostanie inżynierem, a to w tamtych czasach wymagało odbycia jakiejś praktyki zawodowej. Rodziny nie było stać na pokrycie niezbędnych kosztów i wieku 14 lat został wysłany do Owens College, gdzie prowadził prace eksperymentalne. W 1876 roku otrzymał niewielkie stypendium, a to umożliwiło mu przeniesienie się do Trinity College w Cambridge, gdzie studiował matematykę aż do uzyskania licencjatu w 1880 roku.

Po ukończeniu studiów Thomson został członkiem Trinity College i rozpoczął pracę w Laboratorium Cavendisha, będącym częścią Wydziału Fizyki Uniwersytetu Cambridge. W 1883 roku został wykładowcą w Cambridge, a rok później został mianowany profesorem fizyki eksperymentalnej w Laboratorium Cavendisha. Pierwszym na tym stanowisku był James Clerk Maxwell, drugim lord Rayleigh. Gdy został profesorem Cambridge, Thomson miał zaledwie dwadzieścia siedem lat. Jego nominacja została ostro skrytykowana przez niektórych starszych i bardziej ortodoksyjnych profesorów i wykładowców. Jeden z nich wyraził opinię, że sprawy na uniwersytecie zaszły już chyba za daleko, skoro zwykli chłopcy są mianowani profesorami. Jednak komisja wyborcza, w skład której wchodził sir William Thomson (lord Kelvin), prof. G. G. Stokes i prof. G. H. Darwin, wiedziała chyba, co robi. W tym samym roku Thomson został wybrany na członka Królewskiego Towarzystwa Naukowego w Londynie. Na zaszczyt ten zasłużył swoimi pracami rozwijającymi teorię elektromagnetyzmu Maxwella. [„Notes on Recent Researches in Electricity and Magnetism Intended as a Sequel to Professor Clerk-Maxwell's Treatise on Electricity and Magnetism” (1893), Clarendon Press.]

W 1881 roku ukazała się praca Thomsona poświęcona teorii wirów, która zdobyła nagrodę Adamsa. W tamtych czasach teoria, że atomy są wirami w eterze, była bardzo popularna i kojarzona z kilkoma znanymi nazwiskami. Z czasem teoria wirów popadła w zapomnienie. W jednym z pierwszych eksperymentów sir J. J. Thomsona potwierdził teorię elektromagnetyczną Maxwella, a mianowicie określeniem stosunku jednostki elektrostatycznej do jednostki elektromagnetycznej ładunku elektrycznego. Powinien być on, jeśli teoria Maxwell byłaby prawdziwa, równy prędkości światła i na to rzeczywiście wyszło. [XXIII. On the determination of the number of electrostatic units in the electromagnetic unit of electricity, Phil.



Trans. R. Soc. 174707–721 (1883) <http://doi.org/10.1098/rstl.1883.0023>]

Kolejną ważną pracą opublikowaną przez sir J. J. Thomsona była seria artykułów w *Philosophical Transactions of the Royal Society* w latach 1886–1887 [*Applications of Dynamics to Physics and Chemistry*, Nature 38, 585–587 (1888). <https://doi.org/10.1038/038585a0>]. Praca ta sugeruje szereg ogólnych metod rozwiązywania problemów chemicznych i fizycznych, które okazały się niezwykle przydatne. Ich największa wartość polega na tym, że można je stosować nawet w przypadkach, gdy niewiele wiadomo o zachodzących procesach wewnętrznych.

W 1889 roku przeprowadzono bardzo ważne doświadczenie. Sir J. J. Thomson opracował metodę określania stałej dielektrycznej różnych substancji dla bardzo szybko zmieniających się pól elektrycznych. Eksperymenty te dały kolejne potwierdzenie teorii Maxwella.

Na początku lat 90. XIX wieku większość badań Thomsona koncentrowała się na przewodnictwie elektrycznym w gazach. Jeszcze w latach 70 Williamowi Crookesowi udało się uzyskać w szklanej bańce z elektrodami ciśnienie poniżej milionowej części ciśnienia atmosferycznego. Podłączenie do elektrod wysokiego napięcia powodowało spektakularne efekty, które znamy choćby z neonów i zwykłych świetlówek. Badanie generowanego w rurach Crookesa *promieni katodowych* stało się gorącym tematem szczególnie po odkryciu przez Roentgena promieniowania X w roku 1895.

Co do ich natury istniały wśród fizyków dwie teorie. Jedną z nich preferowaną przez Niemców mówiła o nich jako o falach eteru. Z kolei fizycy brytyjscy i francuscy uważali, że promienie te są cząstkami niosącymi ładunek

elektryczny. Jedni i drudzy mieli swoje argumenty i swoje eksperymentalne „dowody” na ich prawdziwość.

J. J. Thomson podczas wizyty w Stanach Zjednoczonych w 1896 roku wygłosił serię wykładów, które zostały opublikowane pod tytułem „*Discharge of Electricity through Gases*” [„*The Discharge of Electricity Through Gases*”, (1898), Charles Scribner’s Sons] w 1898 roku. W tym samym roku, po powrocie do Cambridge, Thomson dokonał swojego najważniejszego naukowego odkrycia.

O mało co jednak, elektron odkryłby ktoś inny. W 1890 r. Artur Schuster rozszerzył eksperymenty Crookesa, umieszczając metalowe płytki równoległe do promieni katodowych i przykładając napięcie elektryczne między nimi. Pole odchyliło promień w kierunku płytki naładowanej dodatnio dowodząc, że promienie przenoszą ładunek ujemny. Mierzając wielkość odchylenia dla danego pola elektrycznego i magnetycznego Schuster był w stanie oszacować stosunek masy do ładunku składników promieniowania. Uzyskał on wartość ponad tysiąc razy większą niż oczekiwał, a oczekiwał błędnie, bo myślał, że w rurze lecą naładowane ujemnie atomy wodoru, a może nawet azotu. [The discharge of electricity through gases. Proceedings of the Royal Society of London. 47, 526–559, (1890). doi:10.1098/rsp1.1889.0111]. W sumie Schuster miał wielką szansę przejść do historii, jego szacunki okazały się później zasadniczo prawidłowe. Do historii przeszedł J. J. Thomson, który nie przestraszył się wyników swoich eksperymentów.

30 kwietnia 1897 roku ogłosił on swoje odkrycie podczas wykładu w *Royal Institution*.

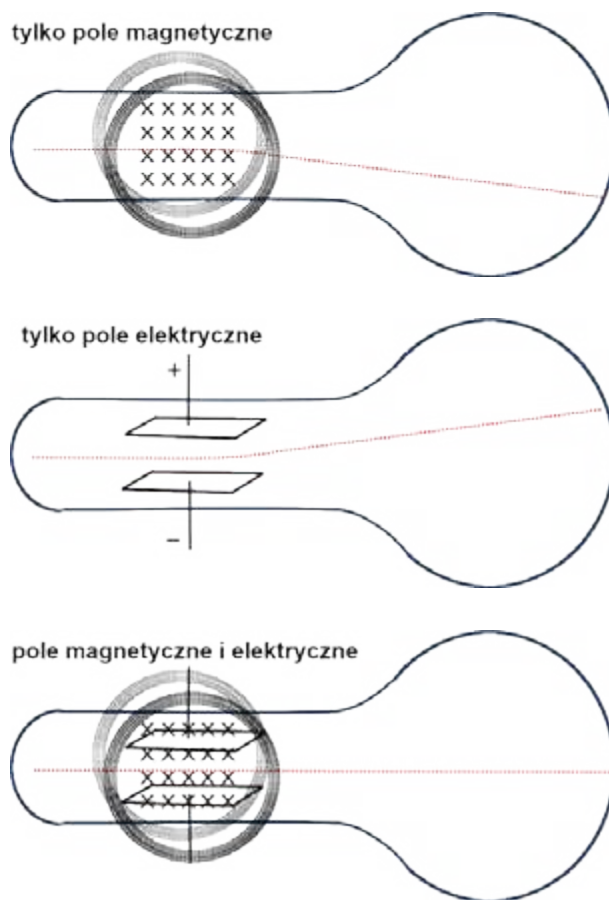
Sama idea eksperymentu była bardzo prosta.

Cząstka o ładunku e o masie m poruszając się w polu magnetycznym B z prędkością v doznaje działania siły o wartości $F = eBv$. Jeśli teraz na tę cząstkę podziałać jednocześnie odpowiednio skierowanym polem elektrycznym to siły magnetyczna i elektryczna, równa $F = Ee$, mogą się zrównoważyć i cząstka się w ogóle nie odchyli. Porównanie obu tych sił daje wartość prędkości poruszających się cząstek $v = E/B$. Jeśli teraz wyłączyć pole elektryczne to będziemy mieli do czynienia z ruchem po okręgu o promieniu R określonym przez przyrównanie tej siły magnetycznej $F = eBv$ do siły dośrodkowej $F = mv^2/R$ otrzymujemy po prostych przekształceniach

$$e/m = E/(B^2R)$$

J. J. Thomson nazywał cząstki składające się na promieniowanie katodowe *korpuskułami*. Rzeczywiście, tak jak zmierzył to Schuster, korpuskuły były prawie dwa tysiące razy lżejsze od atomów wodoru i wartość ta nie zależała ani od materiału z jakiego zrobione były elektrody, ani od gazu, jaki znajdował się w rurze prawie próżniowej. Korpuskuły były zawsze takie same. Nazwa elektron została już wcześniej, bo w 1891 r. zarezerwowana przez George’a Johnstone’a Stoney’a dla jednostki ładunku elektrycznego obserwowanej w doświadczeniach elektrochemicznych [Of the „*Electron*,” or Atom of Electricity. Phil. Mag. 5. 38: 418–420 (1894)].

Kto i kiedy nazwał korpuskuły elektronami, nie jest jasne. W grę wchodzi nazwiska Hendrika Lorentza



i George’a Francis Fitzgeralda, ale to nie jest takie ważne, nie o nazwę wszak chodzi.

Elektrony musiały wchodzić w skład atomu. Jak wchodziły? Thomson zaproponował model, nazywany modelem „puddingu śliwkowego” (*plum pudding*) albo „ciastem z rodzynkami” (*raisin cake*), w którym maleńkie, ujemnie naładowane korpuskuły znajdują się wewnątrz chmury ładunku dodatniego. Teoria ta została obalona w 1913 roku przez ucznia Thomsona, Ernesta Rutherforda.

Od roku 1906 Thomson rozszerzył zakres swoich badań i zajął się promieniowaniem przechodzącym przez dziurki w katodzie. Odkrył je w 1886 r. Eugen Goldstein (urodził się w Gliwicach, a doktoryzował we Wrocławiu) i nazwał promieniowaniem kanalikowym (*Kanalstrahlen*). Badania doprowadziły Thomsona w roku 1912 do kolejnego ważnego odkrycia. Skierował on strumień promieni kanalikowych w obszar pola magnetycznego i elektrycznego i wykorzystując to, co wiedział o odchyłaniu, zmierzył stosunek ładunku do masy cząstek promieniowania kanalikowego.

W ten sposób odkrył, że neon, bo po odpompowaniu w rurze znajdowały się jeszcze śladowe ilości tego gazu, może występować w dwóch różnych rodzajach. Atomy neonu składające się w jego doświadczeniu na promienie kanalikowe mogą mieć różne masy. Thomson odkrył, że pierwiastki mogą mieć różniące się masą izotopy. Było to pierwsze ważne zastosowanie spektrometrii masowej. [Rays of positive electricity Proceedings of the Royal Society A 89, 1-20 (1913)].

J. J. Thomson miał syna. George Paget Thomson, poszedł w ślady ojca i jak on zdobył Nagrodę Nobla z fizyki. Za wykazanie doświadczalne, że elektrony zachowują się nie zawsze jak cząstki, jakimi widział je ojciec, ale czasem jak fale.

Całkiem niedawno, bo w 1991 roku podjęto próbę upamiętnienia J. J. Thomsona specyficzną jednostką miary. Miała ona służyć do wyrażania stosunku masy do ładunku konkretnych cząstek, zasadniczo głównie chemicznych

$$1\text{ Th} = \frac{1\text{ Da}}{e} \approx 1.036426 \times 10^{-8} \text{ kg/C}$$

(1 Da, 1 dalton, to jednostka masy równa 1/12 masy niezwiązanego atomu ^{12}C w stanie podstawowym i w spoczynku, a e to ładunek elementarny). Od 2013 r. termin „thomson” jest uznawany przez IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) za przestarzały, a czasopismo *Rapid Communications in Mass Spectrometry*

try uznaje termin „thomson” za „termin, którego należy unikać w publikacjach dotyczących spektrometrii masowej”. Wszystko wskazuje na to że J. J. Thomson miary swojej miał nie będzie.

Przez większość swojego życia Thomson był czołową postacią naukową w Wielkiej Brytanii. W 1908 roku rodzina królewska nadała Thomsonowi tytuł szlachecki. Jego zasługi zostały dodatkowo docenione poprzez nadanie mu Orderu Zasługi (1912). Pełnił różne funkcje m.in. był prezesem Królewskiego Towarzystwa Geograficznego i Królewskiego Towarzystwa Naukowego. Był członkiem wielu towarzystw naukowych m.in. Królewskiej Szwedzkiej Akademii Nauk, Amerykańskiej Akademii Sztuki i Nauki, Rosyjskiej Akademii Nauk i Królewskiej Pruskiej Akademii Nauk.

Otrzymał wiele prestiżowych nagród m.in. Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki oraz liczne medale.

Doświadczenie domowe:

„Spektrograf masowy”

A. Potrzebne materiały

1. Duża gładka płaszczyzna (półka od szafy, ale może też być blat biurka, stolika).
2. Linijka z uchwytem (mająca po środku rowek, wgłębienie) (~30-50 cm).
3. Magnes neodymowy o rozmiarze kilku centymetrów.
4. Metalowe kulki o różnych średnicach (od kilku centymetrów do kilku milimetrów).
5. Plastelina.
6. Taśma klejąca.

B. Narzędzia: zasadniczo zbędne.

C. kolejność czynności

1. Ustawić płaszczyznę pod pewnym niewielkim kątem ($\sim 5^\circ$).
2. Przycocować do niej taśmą klejącą od spodniej strony mniej więcej pośrodku magnes neodymowy.
3. Ułożyć na płaszczyźnie linijkę w taki sposób, aby kulki zsuwające się wzdłuż rowka odchylały się przyciągane przez magnes. Właściwe ustawienie osiąga się metodą prób i błędów.



4. Wzdłuż dolnej krawędzi płaszczyzny ułożyć z plasteliny murek, który zatrzymywał będzie staczające się kulki.
5. Umieścić na górze linijki stalową kulkę i puścić ją swobodnie zapamiętując miejsce, gdzie wpadnie w plastelinowy ogranicznik.
6. Powtórzyć punkt 5. kilka razy.
7. Zmienić kulkę i powtórzyć czynności od punktu 5, aż ustalimy, w jakich punktach zatrzymują się kulki wszystkich rozmiarów, jakie mieliśmy do dyspozycji.
8. Podsumować wyniki i wyciągnąć wnioski.

Okazuje się, że kulki większe odchylane są mniej, a te bardzo małe bardziej. Wygląda to tak, jakby kulki zachowywały się tak jak cząstki naładowane w doświadczeniach J. J. Thomsona. Czy ta analogia jest aby na pewno poprawna?

Można mieć wątpliwości, bo:

- wszystkie kulki staczają się oczywiście z taką samą prędkością,
- w polu magnesu neodymowego w metalowych kulkach indukuje się ich własne pole magnetyczne i kulki stają się same magnesami,
- im większa kulka, tym większe pole się indukuje i tym większa siła ich przyciągania,
- siła ta powoduje przyspieszenie i w efekcie odchylenie kulki, a przyspieszenie to jest dla większych kulek oczywiście mniejsze (II zasad dynamiki Newtona),
- jak z tego widać wszystkie kulki powinny odchylać się tak samo.

Dlaczego więc tak się nie dzieje?

Czy mamy na stole prawdziwy spektrograf masowy, czy tylko tak nam się wydaje?



Fotometria i kolorymetria

– wybrane pojęcia

Foto – Dreamstime

Marcin Wesołowski

Fotometria to dział optyki zajmujący się pomiarem natężenia (światłości), strumienia i jasności światła w zakresie widzialnym (światło widzialne), czyli takim, na który reaguje ludzkie oko. Inaczej mówiąc fotometria jest to nauka o ilościowej ocenie światła w odniesieniu do wrażeń wzrokowych.

Fotometria zasadniczo dzieli się na:

- fotometrię obiektywną (zwaną także radiometrią), która bada jaką energię dopływa ze źródła,
- fotometrię subiektywną, która analizuje jak jasno świeci źródło światła w ocenie przeciętnego człowieka.

W pierwszej części naszych rozważań zajmiemy się fotometrią subiektywną. Przypomnijmy, że zakres widzialny (światło widzialne, zakres optyczny) to część promieniowania elektromagnetycznego, na które reaguje siatkówka oka w procesie widzenia. Dla człowieka zakres widzialny to zakres promieniowania elektromagnetycznego, obejmujący długości fal od około 380 nm do 750 nm (czasami w literaturze górny zakres podawany jest jako 780 nm), na który reaguje ludzkie oko, pozwalając nam widzieć i rozróżniać barwy (rys.1). Dla każdej z dostrzegalnych barw możemy przypisać określoną długość fali

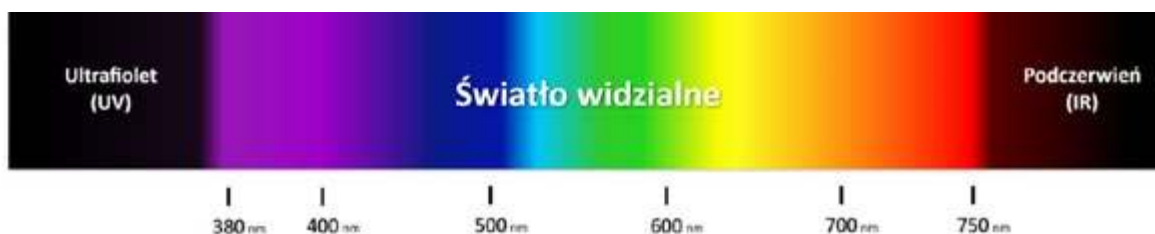
(najdłuższym falą odpowiada kolor czerwony, natomiast najkrótszym odpowiada kolor fioletowy). Najjaśniejsza z barw to biała, która to jest mieszaniną barw prostych.

W optometrii kolorymetria nie jest bezpośrednią dziedziną, lecz zjawisko to jest wykorzystywane w badaniach nad widzeniem barw, szczególnie do diagnostyki zaburzeń takich jak daltonizm. Kolorymetria sama w sobie to dział psychofizyki zajmujący się ilościowym opisem barw, który pozwala na pomiar wrażeń wzrokowych za pomocą parametrów fizycznych, opierając się m.in. na trójkromatycznym modelu percepcji barw.

Aby poprawnie badać i opisywać kluczowe parametry fizyczne musimy wprowadzić kilka pojęć natury fizycznej.

Podczas rozchodzenia się fal elektromagnetycznych przenoszona jest energia, którą nazywamy *energią promieniowania*. W fotometrii bada się energię promieniowania wysyłaną przez źródło promieniowania widzialnego, to znaczy energię przenoszoną przez fale elektromagnetyczne o długościach fal na które reaguje nasze oko.

W praktyce dla uproszczenia naszych rozważań często będziemy posługiwać się pojęciem punkowego źródła światła. Podkreślimy, że rzeczywiste źródła światła np. blask pochodzący od komety widocznej na nocnym niebie tylko w przybliżeniu można taktować jako źródła punkowe (Foto. 1).



Rys. 1. Zakres widzialny (światło widzialne) dla człowieka. Poszczególnym barwą przypisana została odpowiadająca im długość fali, która została wyrażona w nm.

Kluczową rolę w tym podejściu odgrywa skala odległości, gdyż to przybliżenie jest tym lepsze im mniejsze są rozmiary źródła w porównaniu z odległością do punktu, w którym badamy właściwości światła. Ponadto w różnych kierunkach źródło światła wysyła energię promieniowania zwykle w różnych ilościach. W naszych rozważaniach będziemy zakładać, że źródło światła wypromieniowuje energię izotropowo to znaczy we wszystkich kierunkach równomiernie.

1. **Kąt bryłowy** ω definiujemy jako:

$$\omega = \frac{S}{r^2}, \quad (1)$$

gdzie S jest to pole powierzchni stożka sferycznego wyciętego z kuli (inaczej część powierzchni kuli), a r to promień tej kuli. Kąt bryłowy mierzymy się w steradianach (sr) i jest bezwymiarową wielkością, która określa „rozpiętość” obiektu widzianego z danego punktu. Zauważmy, że jeśli powierzchnia S jest równa powierzchni kuli to znaczy: $S = 4\pi r^2$, to w oparciu o równanie (1) mamy:

$$\omega = \frac{S}{r^2} = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi, \quad (2)$$

to powierzchni tej w takim przypadku odpowiada pełny kąt bryłowy $\omega = 4\pi$.

2. **Strumień świetlny** $\Delta\Phi$ wysyłany w kąt bryłowy $\Delta\omega$ przez izotropowe źródło punktowe, którego światłość wynosi I w każdym kierunku jest dana zależnością:

$$\Delta\Phi = I\Delta\omega. \quad (3)$$

Jednostką strumienia świetlnego jest lumen (lm). Lumen to strumień świetlny wysyłany w jednostkowy kąt bryłowy przez izotropowe źródło światła o światłości jednej kandeli (cd), które umieszczone jest w wierzchołku tego kąta:

$$[lm] = [cd \cdot sr].$$

3. **Natężenie oświetlenia** (oświetlenie) – jest to stosunek strumienia świetlnego $\Delta\Phi$ do powierzchni ΔS , która jest oświetlona, co możemy zapisać jako:

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}. \quad (4)$$

Jednostką natężenia oświetlenia jest luks (lx), który określany jest jako oświetlenie wywołane przez równomiernie rozłożony strumień świetlny o wartości równej 1 lumen (lm) padający na powierzchnię 1 m^2 .

$$[E] = \left[\frac{lm}{m^2} \right] = \left[\frac{cd \cdot sr}{m^2} \right] = [lx].$$

Ponieważ strumień świetlny jest liczbowo równy energii przenoszonej w ciągu jednostki czasu więc na podstawie równania (4) oświetlenie jest ilością energii świetlnej padającej na jednostkę powierzchni w ciągu jednostki czasu. W ogólności oświetlenie powierzchni, na którą pada strumień świetlny, nie jest równomierne, to znaczy w każdym punkcie powierzchni jest różne. Jeżeli źródłem światła jest źródło punktowe o światłości I , dające równomierny strumień świetlny, to natężenie oświetlenia E (oświetlenie) w każdym punkcie na powierzchni kuli o promieniu r jest jednakowe. Wówczas wykorzystując



Foto. 1. Fotografia nocnego nieba, na którym widoczna jest międzygwiazdowa komet 31/Atlas odkryta 1 lipca 2025 roku, obserwacja wykonana za pomocą zdalnego teleskopu w Hiszpanii (Foto. Peter Carson). Na fotografii widoczne są wydłużone linie, które odpowiadają gwiazdom znajdującym się w tle. Dzieje się tak, ponieważ teleskop śledzi poruszający się obiekt (kometę), a nie gwiazdy. W ten sposób obiekt pojawia się jako wyraźny punkt, a gwiazdy są „śledzone” przez czas ekspozycji.

zależność na strumień świetlny (równanie 3) i definicję kąta bryłowego (równanie 1) otrzymujemy:

$$\Delta\Phi = I\Delta\omega = I \cdot \frac{\Delta S}{r^2}. \quad (5)$$

Podstawmy teraz równanie (5) do wyrażenia (4), wówczas mamy:

$$E = \frac{I\Delta S}{\Delta S} = \frac{I}{r^2}. \quad (6)$$

Uwaga:

W przypadku nie izotropowego źródła światła równania 3 i 4 są zdefiniowane odpowiednio jako:

$$\begin{cases} d\Phi = I d\omega, \\ E = \frac{d\Phi}{dS}. \end{cases} \quad (7)$$

4. **Skuteczność widmowa względna**, oznaczana jako $V(\lambda)$, jest stosunkiem mocy promienistej na danej długości fali do mocy promienistej na długości fali emitującej najwyższe wrażenia świetlne, które wywołują wrażenia świetlne o identycznej intensywności w określonych warunkach fotometrycznych. Mówiąc prościej, $V(\lambda)$ opisuje, jak dobrze ludzkie oko odczuwa światło o danej długości fali, w porównaniu do jego rzeczywistej mocy.

Względna skuteczność świetlna promieniowania monochromatycznego $V(\lambda)$ jest to stosunek mocy promienistej $\Phi_e(\lambda_{\max})$ dla wybranej długości fali $\lambda_{\max}$ do mocy promienistej $\Phi_e(\lambda)$ dla danej długości fali λ , które w określonych warunkach fotometrycznych wywołują wrażenie świetlne o tej samej intensywności. Wartość długości fali $\lambda_{\max}$ została dobrana tak, aby największa wartość $V(\lambda) = 1$.

$$V(\lambda) = \frac{\Phi_e(\lambda_{\max})}{\Phi_e(\lambda)}. \quad (8)$$

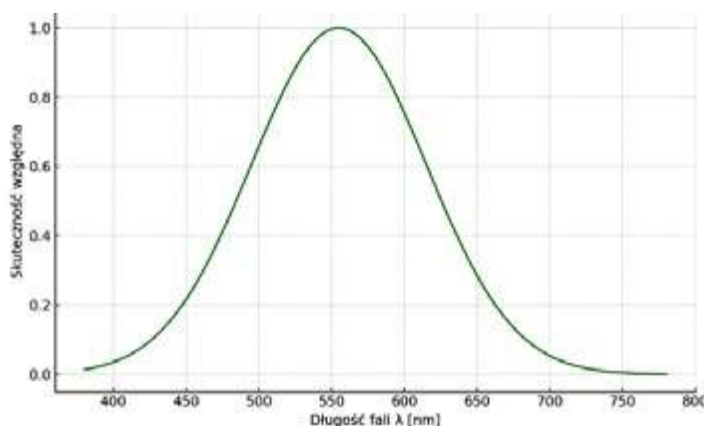
Zauważmy, że nasze oko nie odbiera wszystkich długości fal świetlnych z taką samą intensywnością. Względna skuteczność widmowa $V(\lambda)$ jest funkcją długości fali λ i określa, że ludzkie oko jest najbardziej wrażliwe na światło o długości fali ok. 555 nm (kolor zielony), a wrażliwość spada wraz z oddalaniem się od tego zakresu (rys.2).

Dodatkowo podkreślmy, że względna skuteczność świetlna zależy od stanu adaptacji wzroku do panującego poziomu oświetlenia.

Zauważmy, że między strumieniem energetycznym $\Phi_e(\lambda)$ a odpowiadającym mu strumieniem świetlnym Φ (zależność dana równaniem 3) zachodzi zależność:

$$\Phi(\lambda) = K_m V(\lambda) \Phi_e(\lambda), \quad (9)$$

gdzie K_m jest fotometrycznym równoważnikiem promieniowania, wynikającym z definicji podstawowego wzorca fotometrycznego. Inaczej mówiąc jest to stosunek strumienia świetlnego do odpowiedniego strumienia



Rys. 2. Skuteczność widmowa względna.

energetycznego dla długości fali odpowiadającej największej czułości oka: $V(\lambda=555\text{nm})=1$. Ponieważ strumień świetlny mierzymy w lumenach, a strumień energetyczny w watach, to fotometryczny równoważnik promieniowania wyrażony jest:

$$[K_m] = \left[\frac{\text{lm}}{\text{W}} \right].$$

Ponieważ w praktyce występuje mieszanina promieniowania o różnych długościach fali, konieczne jest obliczanie całkowitego strumienia świetlnego jako sumy monochromatycznych strumieni świetlnych, które wyrażamy jako:

$$\Phi = \int \Phi(\lambda) d\lambda. \quad (10)$$

W oparciu o równanie (9) prawą stronę równania (10) możemy przekształcić do następującej postaci:

$$\Phi = \int K_m V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda, \quad (11)$$

ponieważ fotometryczny równoważnik promieniowania K_m jawnie nie zależy od długości fali λ , więc na mocy twierdzenia wynikającego z rachunku całkowitego (liniowości całki względem stałych, co oznacza że stałą można wyłączyć przed znak całki) równanie (11) możemy zapisać jako:

$$\Phi = K_m \int V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda. \quad (12)$$

Skuteczność świetlna promieniowania K to stosunek strumienia świetlnego Φ (danego równaniem 12) do odpowiadającego mu strumienia energetycznego $\Phi_e(\lambda)$:

$$K = \frac{\Phi}{\Phi_e} = \frac{K_m \int V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda}{\int \Phi_e d\lambda}. \quad (13)$$

Skuteczność świetlna η to stosunek całkowitego strumienia świetlnego Φ (danego równaniem 12) emitowanego przez źródło światła do pobieranej przez nie mocy elektrycznej.

$$\eta = \frac{\Phi}{P} = \frac{K_m \int V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda}{P}. \quad (14)$$

Wielkość tą wyrażamy w lumenach na wat (lm/W). Oznacza to, że im wyższa wartość skuteczności świetlnej, tym efektywniej źródło światła przetwarza energię elektryczną na światło widzialne.

Warto w tym miejscu postawić proste pytanie co określa skuteczność świetlna?

- Efektywność energetyczna, czyli miara tego, ile lumenów światła produkuje lampa na każdy zużyty wat energii elektrycznej.
- Wydajność, która informuje o tym, jak sprawnie energia elektryczna jest przekształcana w światło.
- Oszczędność, czyli wyższa skuteczność świetlna oznacza mniejsze zużycie energii przy tym samym natężeniu oświetlenia.

Z kolei odpowiednikiem energii promieniowania jest ilość światła czyli iloczyn strumienia świetlnego Φ i czasu t , podczas którego strumień ten jest wysyłany (przenoszony lub pochłaniany):

$$Q = \int_t \Phi dt. \quad (15)$$

Wielkość tą najczęściej wyrażamy w lumenosekundach (lm s).

5. Jeżeli wiązka światła pada na daną powierzchnię wówczas możemy zachodzić następujące procesy:

- **odbicie** (ρ), którego miarą jest współczynnik odbicia, czyli stosunek strumienia świetlnego odbitego Φ_p do strumienia padającego Φ :

$$R = \frac{\Phi_p}{\Phi} = \frac{\int_0^\infty \Phi_{\text{ew}} R(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{\text{ew}} V(\lambda) d\lambda}, \quad (16)$$

gdzie $R(\lambda)$ oznacza widmowy współczynnik odbicia. Jeżeli $R(\lambda)=0$, oznacza to, że powierzchnia całkowicie pochłania światło dla tej długości fali, natomiast jeżeli $R(\lambda)=1$, to powierzchnia całkowicie odbija światło dla tej długości fali. Jednym z głównych czynników wpływających na

wartość współczynnika odbicia jest wizualna barwa próbki lub badanego ciała (np. komety). Jako przykład przedstawmy widmo albedo półkulistego (rys.4), które wykonano przy użyciu spektrofotometru Cary 5000 wraz z przystawką (kulą całkującą). Dodajmy, że odbicie może nastąpić w sposób kierunkowy, rozproszony bądź mieszany.

- **przepuszczalność** czyli stosunek strumienia świetlnego przepuszczonego Φ_τ do strumienia padającego Φ :

$$\tau = \frac{\Phi_\tau}{\Phi} = \frac{\int_0^\infty \Phi_{\text{ew}} \tau(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{\text{ew}} V(\lambda) d\lambda}, \quad (17)$$

gdzie $\tau(\lambda)$ to widmowy współczynnik przepuszczania. Jeżeli $\tau(\lambda) = 1$, oznacza że 100% padającego światła przechodzi przez materiał (idealna przezroczystość dla danej długości fali), natomiast jeżeli $\tau(\lambda) = 0$, to występuje brak przepuszczania wówczas może zachodzić pochłanianie lub odbicie. Podobnie jak w przypadku odbicia współczynnik przepuszczania może zachodzić w sposób kierunkowy, rozproszony bądź mieszany.

- **pochłanianie** czyli stosunek strumienia świetlnego pochłoniętego Φ_a do strumienia padającego Φ :

$$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi} = \frac{\int_0^\infty \Phi_{\text{ew}} \alpha(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{\text{ew}} V(\lambda) d\lambda}, \quad (18)$$

gdzie $\alpha(\lambda)$ to widmowy współczynnik pochłaniania.

Zauważmy, że współczynnik odbicia, przepuszczania i pochłaniania wiąże następująca prosta relacja:

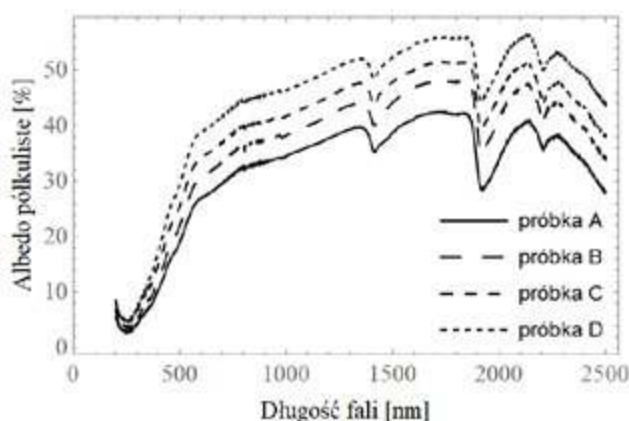
$$R + \tau + \alpha = 1. \quad (19)$$

6. **Współczynniki luminancji** w fotometrii (czasem zwane też współczynnikami odbicia światła) określają, jak jasna wydaje się powierzchnia w porównaniu do powierzchni idealnie białej, rozpraszającej światło (tzw. wzorca Lambertowskiego). Zatem, współczynnik luminancji q jest to stosunek luminancji powierzchni badanego materiału do luminancji powierzchni doskonale rozpraszającej (wzorca) o tym samym natężeniu oświetlenia:

$$q = \pi \frac{L}{E}, \quad (20)$$

gdzie: L jest to luminancja powierzchni [cd/m^2], E jest to natężenie oświetlenia wyrażone w luksach [lx], π jest współczynnikiem normalizujący dla przypadku idealnego odbicia Lambertowskiego.

W tabeli 1 na podstawie danych dostępnych w literaturze przedstawiono przykładowe zestawienie współczynników luminancji.



Rys. 4. Rozkład albedo półkulistego dla różnych gatunków piasku.

Tabela 1. Przykładowe wartości współczynnika luminancji.

Material/powierzchnia	Współczynniki luminancji q
Śnieg świeży	0,70 – 0,90
Papier biały	0,70 – 0,85
Beton jasny	0,40 – 0,60
Beton ciemny	0,20 – 0,40
Drewno jasne	0,30 – 0,50
Drewno ciemne	0,10 – 0,20
Zieleń roślinna (trawa, liście)	0,10 – 0,25
Piasek suchy	0,30 – 0,45
Asfalt świeży, czarny	0,05 – 0,10
Asfalt suchy, stary	0,10 – 0,20
Kostka brukowa jasna	0,25 – 0,40
Kostka brukowa ciemna	0,15 – 0,25
Stal ocynkowana	0,40 – 0,60
Aluminium polerowane	0,60 – 0,75
Powierzchnia czarna matowa	0,02 – 0,05

Zauważmy, że w praktyce wartości te są przybliżone i zależą od:

- stanu powierzchni (czystość, wilgotność, chropowatość),
- kąta padania i obserwacji,
- rodzaju źródła światła.

Wskaźnik luminancji (β) jest to stosunek luminancji danej powierzchni do luminancji powierzchni białej matowej (wzorca rozpraszającego, tzw. powierzchni Lambertowskiej), oświetlonej w identycznych warunkach. Wartość tego parametru możemy obliczyć korzystając z zależności:

$$\beta = \frac{L}{L_0}, \quad (21)$$

gdzie: L oznacza luminancja badanej powierzchni [cd/m^2], a L_0 oznacza luminancja powierzchni wzorcowej białej [cd/m^2]. Zauważmy, że współczynnik luminancji odnosi się do stosunku luminancji powierzchni do natężenia oświetlenia, znormalizowanego przez π , natomiast wskaźnik luminancji porównuje powierzchnię z konkretnym wzorcem białym o współczynniku odbicia równym $R = 1$.

Wskaźnik rozpraszania S jest miarą względnej ilości światła rozproszonego w stosunku do światła transmitowanego. Zwykle definiuje się go w następujący sposób:

$$S = \frac{I_r}{I_c}, \quad (22)$$

gdzie: I_r oznacza natężenie światła rozproszonego, a I_c jest całkowite natężenie światła padającego lub transmitowanego.

Wskaźnik ten pozwala ocenić stopień mętności roztworu lub obecność cząstek w próbce, natomiast w fotometrii:

- analiza zawiesin i koloidów: Wskaźnik rozpraszania pozwala ocenić wielkość cząstek i koncentrację w zawiesinach.
- kontrola jakości w przemyśle farmaceutycznym i spożywczym: Pomiar mętności, klarowności napojów lub roztworów.

- badania biologiczne: Śledzenie agregacji białek czy komórek w roztworach.

Rodzaje rozpraszania:

- Rayleigha: dla cząstek dużo mniejszych od długości fali światła.
- Mie: dla cząstek porównywalnych z długością fali światła.
- Nieelastyczne (Raman, fluorescencja): światło zmienia częstotliwość, ale też można mierzyć rozproszenie.

7. **Prawo Lamberta** jest jednym z podstawowych praw w fotometrii i w optyce światła rozproszonego lub absorbującego. Prawo to brzmi:

Natężenie światła przechodzącego przez powierzchnię pochłaniającą światło maleje wykładniczo wraz ze wzrostem grubości warstwy, którą światło przechodzi, co możemy zapisać jako:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}, \quad (23)$$

gdzie: I jest to natężenie światła po przejściu przez warstwę materiału, I_0 jest to natężenie światła padającego na powierzchnię, μ jest współczynnikiem pochłaniania (wyrażonym w m^{-1}), a x jest to grubość materiału, przez który przechodzi światło (wyrażona w metrach [m]).

Prawo to mówi też, że płytka powierzchnia idealnie dyfuzyjna odbija światło w taki sposób, że natężenie obserwowane pod kątem θ względem normalnej jest proporcjonalne do $\cos \theta$. Czasami w literaturze prawo Lamberta określane jest mianem prawa cosinusów.

W fotometrii prawo Lamberta stosuje się np. do:

- określania absorpcji światła przez substancje,
- obliczania światłości powierzchni idealnie dyfuzyjnej (tzw. powierzchni lambertowskiej),
- projektowania źródeł światła i ekranów, które mają równomiernie rozpraszać światło.

Cechy powierzchni lambertowskiej :

- odbite światło rozchodzi się równomiernie we wszystkich kierunkach,
- natężenie obserwowane pod kątem θ maleje zgodnie z funkcją $\cos \theta$.

Fotometryczne prawo odległości opisuje, jak natężenie światła (lub jasność) punktowego źródła maleje wraz ze wzrostem odległości od źródła, które możemy wyrazić:

$$I = \frac{1}{r^2} = r^{-2}, \quad (24)$$

gdzie: I to natężenie światła docierającego do obserwatora (lub powierzchni), a r jest to odległość od źródła światła.

Wyjaśniające fotometryczne prawo odległości warto zwrócić uwagę na:

- Światło punktowego źródła rozchodzi się jednakowo we wszystkich kierunkach, tworząc sferę.
- Pole powierzchni sfery rośnie z kwadratem promienia: $S = 4\pi r^2$



Rys.5. Podsumowanie znaczenie fotometrii.

- Ponieważ ta sama energia jest rozkładana na większą powierzchnię, natężenie maleje zgodnie z zależnością (24).

Przykład:

Jeżeli źródło światła wytwarza 80 luksów w odległości 1 m to w odległości 2 metrów natężenie wynosi:

$$I_2 = I_1 \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 = 80 \cdot \left(\frac{1}{2} \right)^2 = 20 \text{ lx.} \quad (25)$$

Uwaga:

Fotometryczne prawo odległości można stosować tylko wtedy, gdy odległość źródła od powierzchni oświetlonej jest dostatecznie duża w stosunku do wymiarów źródła.

Podsumowanie:

W praktyce optometrysty fotometria ma zastosowanie w kilku obszarach:

1. Ocena oświetlenia w gabinecie i miejscu pracy pacjenta:

- Prawidłowe warunki oświetleniowe są kluczowe przy wykonywaniu badań np. refrakcji.
- Optometrysta może korzystać z luksmierzy (mierników natężenia światła) do sprawdzania, czy oświetlenie spełnia normy (do czytania 300–500 lx, prace precyzyjne 500–1000 lx, oświetlenie uliczne 5–20 lx, światło księżyca ~0,25 lx).

2. Badania funkcji widzenia związane z czułością na kontrast i światło:

- Fotometria pozwala na standaryzację warunków testów kontrastu, widzenia zmierzchowego i oślnienia.

- W praktyce używa się np. specjalnych tablic kontrastowych pod określonym oświetleniem.

3. Fotometria w soczewkach okularowych i kontaktowych:

- Pomiary transmisji światła przez soczewki (np. ile światła przepuszczają szkła fotochromowe, soczewki barwione).
- Ocenia się np. czy soczewki spełniają wymagania filtracji UV i światła niebieskiego.

4. Diagnostyka i terapia:

- Badania widzenia zmierzchowego i adaptacji do ciemności (fotometria progowa).
- Analiza światłoczułości u pacjentów z chorobami siatkówki czy zaćmą.

Oprócz zastosowań fotometrii typowo związanych z szeroko pojętą medycyną prawa fotometrii stosuje się także w:

- architekturze wnętrz,
- przemyśle (w szczególności badania materiałowe),
- astronomii.

dr hab. Marcin Wesołowski, prof. UR

Uniwersytet Rzeszowski, Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych, Instytut Nauk Fizycznych,
Centrum Innowacji i Transferu Wiedzy Techniczno-Przyrodniczej
Uniwersytetu Rzeszowskiego.

LITERATURA:

- [1] E. Helbig, Podstawy fotometrii, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1975.
- [2] J. Mielicki, Zarys wiadomości o barwie, Fundacja Rozwoju Polskiej Kolorystyki, Łódź 1997.

Pole magnetyczne

Maciej Panczykowski

Prawo Coulomba jest podstawowym prawem elektrostatyki. Jego matematyczna postać to:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r^2}$$

gdzie: F – wartość siły, ϵ_0 – przenikalność elektryczna próżni, Q i q – wartości ładunków, r – odległość między ładunkami.

Prawo to odczytujemy następująco: *siły jakimi dwa ładunki działają wzajemnie na siebie są co do wartości proporcjonalne do iloczynu wartości tych ładunków i odwrotnie proporcjonalne do kwadratu odległości między nimi.*

Różnoimienne ładunki przyciągają się, a jednoimienne odpychają. Siły te są wektorami działającymi wzdłuż linii łączącej ładunki.

Klasyczny obraz jest taki: każdy ładunek jest źródłem pola i na drugi ładunek umieszczony w tym polu zadziała siła. Przykładowo:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E}$$

gdzie: $\mathbf{F}$ – wektor siły elektrostatycznej, $\mathbf{E}$ – wektor **natężenia pola elektrycznego** o wartości: $(1/4\pi\epsilon_0)Q/r^2$ generowany przez ładunek Q

Prawo Ampere’a jest podstawowym prawem magnetostryki. Jego postać to:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2 l}{r}$$

Siły między dwoma równoległymi przewodnikami o długości „ l ”, w których płyną prądy o natężeniach I_1 i I_2

są co do wartości proporcjonalne do iloczynu tych natężeń i do ich długości i odwrotnie proporcjonalne do odległości między nimi (μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni).

Przewodniki, w których płyną prądy w tym samym kierunku – przyciągają się, w przeciwnym razie – jest odpychanie.

Klasyczny obraz w tym przypadku jest taki: każdy przewodnik z prądem jest źródłem pola wektorowego (wektory **B indukcji pola magnetycznego**), które działa na drugi przewodnik z prądem i powoduje jego ruch. Wektory tego pola są styczne do koncentrycznych okręgów wokół przewodników.

Wprowadzenie nowego pola było w przypadku przewodników niezbędne, gdyż są one obojętne elektrycznie.

Aby dobrze zrozumieć czym jest pole magnetyczne skupimy się teraz na obrazowym i uproszczonym przykładzie. Mamy do czynienia z prądem złożonym z elektronów poruszających się jednostajnie, „gęsiego” w określonym kierunku i z drugim, pobliskim prądem ładunków dodatnich poruszających się też „gęsiego” i antyrównoległe do tego pierwszego. To będzie nasz przewodnik.

Wyobraźmy sobie teraz, że w pewnej odległości od tego przewodnika porusza się elektron z taką samą prędkością i w tym samym kierunku, co ładunki dodatnie przewodnika. Ze swojego układu odniesienia (w którym jest on w spoczynku) będzie on „widział” ładunki dodatnie w spoczynku i ładunki ujemne poruszające się z dużą prędkością (składanie prędkości). Ze względu na tak zwane **skrócenie Lorentza** (efekt relatywistyczny) odległość między elektronami prądu będzie postrzegana jako krótsza niż pomiędzy statycznymi ładunkami dodatnimi. Zatem liniowa gęstość ładunków ujemnych przewyższy gęstość ładunków dodatnich i pojawi się

wypadkowy ładunek ujemny, który to będzie źródłem pola elektrycznego.

Spójrzmy teraz na elektron z układu odniesienia laboratorium. Widzimy, że porusza się równolegle do przewodnika, w którym płyną prądy ładunków ujemnych i dodatnich. Tutaj sytuacja jest inna. Przewodnik jest obojętny elektrycznie, ale widzimy, że na elektron również będzie działać siła, bo nie może być tak, że w jednym układzie inercyjnym zjawisko jest, a w innym – go nie ma. Musimy zatem przyjąć, że przewodnik jest źródłem pewnego pola (magnetycznego), które wpływa na ładunek w ruchu.

Trzeba jednak pamiętać, że wektory, pola wektorowe są czymś, co służy nam do modelowania zjawisk. W rzeczywistym świecie, wokół przewodnika, są one zdecydowanie niewidzialne i nieobecne. **Jest przestrzeń, która jest w jakiś sposób zmieniona i elektron znajdując się w niej wykonuje inny ruch niż w przypadku, w którym tych zmian by nie było.**

James Clerk Maxwell – szkocki fizyk uważany za najwybitniejszego w XIX wieku i największego pomiędzy czasami Izaaka Newtona (XVII wiek) i Alberta Einsteina (XX wiek) jako pierwszy intuicyjnie i genialnie mówił o możliwych naprężeniach i deformacjach w hipotetycznym eterze wypełniającym przestrzeń.

Osobiście postuluję przesunięcia (dyslokacje) i obroty w regularnej, geometrycznej strukturze próżni, ale tutaj się zatrzymam.

Dobrym podsumowaniem tych rozważań jest zdanie:

Jest różnica między obiektami matematycznymi a fizyczną rzeczywistością.

Innym, trafnym przykładem tej różnicy jest matematyczna funkcja falowa, bardzo popularna w teoriach kwantowych, ale nigdy nie obserwowana w świecie rzeczywistym.

Dla bardzo dociekliwych:

W fizyce teoretycznej istnieje ciekawy obiekt matematyczny zwany **tensorem pola elektromagnetycznego** ($F_{\mu\nu}$), który ma postać macierzy o wymiarach 4x4:

$$F_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} 0 & B_z & -B_y & -iE_x \\ -B_z & 0 & B_x & -iE_y \\ B_y & -B_x & 0 & -iE_z \\ iE_x & iE_y & iE_z & 0 \end{bmatrix}$$

gdzie: i – jednostka urojona (pierwiastek z minus 1)

Ujmując on wszystkie składowe natężenia pola elektrycznego (E_x, E_y, E_z) i indukcji pola magnetycznego (B_x, B_y, B_z). Zauważmy, że składowe diagonalne, przekątne tego tensora wynoszą zero ($F_{11} = F_{22} = F_{33} = F_{44} = 0$) i składowe po przestawieniu indeksów są dla siebie przeciwieństwami, np. $F_{12} = -F_{21}$. Takie właściwości ma tzw. tensor antysymetryczny.

Składowe tego tensora stwierdzane w układzie inercyjnym poruszającym się wzdłuż naszej osi OX z prędkością V będą inne i transformacja ta jest bardziej złożona niż w przypadku czterowektorów w czasoprzestrzeni, bo obiekt jest od nich bardziej złożony:

$$F'_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} 0 & \gamma(B_z - \beta E_y) & -\gamma(B_y + \beta E_z) & -iE_x \\ -\gamma(B_z - \beta E_y) & 0 & B_x & -i\gamma(E_y - \beta B_z) \\ \gamma(B_y + \beta E_z) & -B_x & 0 & -i\gamma(E_z + \beta B_y) \\ iE_x & i\gamma(E_y - \beta B_z) & i\gamma(E_z + \beta B_y) & 0 \end{bmatrix}$$

gdzie: $\beta = V/c$, $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$

Widać, że pola: elektryczne i magnetyczne mogą „zastępować się” i dlatego pole elektryczne w jednym inercyjnym układzie odniesienia jest opisywane jako pole magnetyczne w innym (co wyjaśniałem wcześniej).

Wprowadziłem ten tensor też dlatego, żeby pokazać, że bardzo znane i ważne w fizyce równania Maxwella mogą za jego pomocą być ujęte oszczędnie w postaci 2 równań zgodnych ze szczególną teorią względności (relatywistycznie niezmienniczych):

$$\sum_{\mu=1}^4 \frac{\partial F_{\mu\nu}}{\partial x_\mu} = -4\pi J_\nu$$

$$\frac{\partial F_{\mu\nu}}{\partial x_\sigma} + \frac{\partial F_{\nu\sigma}}{\partial x_\mu} + \frac{\partial F_{\sigma\mu}}{\partial x_\nu} = 0$$

gdzie:

$x_\mu = (x, y, z, ict) = (x_1, x_2, x_3, x_4)$ to czterowektor położenia
 $J_\mu = (j_x, j_y, j_z, ip) = (J_1, J_2, J_3, J_4)$ to czterowektor gęstości prądu

Te dwa równania można krok po kroku „rozpakować” i otrzymać z nich cztery równania Maxwella w dobrze znanej postaci:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 4\pi\rho$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + 4\pi \vec{j}$$

gdzie: c – prędkość światła, ρ – gęstość ładunku elektrycznego

Pierwsze z wcześniejszych dwóch równań przechodzi w równania: pierwsze i czwarte powyżej. Drugie przechodzi w drugie i trzecie powyżej. Sprawdzić to mogą na przykład ambitni uczniowie na kółku fizycznym lub matematycznym korzystając ze wskazówek:

1. W pierwszym z dwóch równań istnieją cztery możliwe wartości „ ν ” i dla każdej z nich wykonuje się sumowanie po czterech wartościach „ μ ”. Otrzymujemy 4 równania, z których jedno jest skalarnie (pierwsze powyżej), a trzy dotyczą 3 składowych równania wektorowego (czwarte powyżej).

2. W drugim z dwóch równań dla kombinacji indeksów $(\sigma, \mu, \nu) = (1, 2, 3)$ otrzymujemy równanie skalarnie (drugie powyżej), a dla pozostałych kombinacji: $(1, 2, 4)$, $(1, 3, 4)$ i $(2, 3, 4)$ otrzymujemy 3 równania na składowe równania wektorowego (trzecie powyżej).

CREDO-Maze: miony – po co komu i dlaczego?

Tadeusz Wibig

Słynne zdanie „i kto to zamawiał?”, o którym pisaliśmy w „Fizyce w Szkole” w roku 2022 [1] odnosiło się do cząstek elementarnych zwanych mionami, które wykryto w strumieniu wtórnego promieniowania kosmicznego docierającego do powierzchni ziemi w latach trzydziestych ubiegłego wieku. Początkowo wszyscy się ucieszyli, bo wyglądało na to, że może to być oczekiwana cząstka Yukawy, która miała pośredniczyć w przenoszeniu oddziaływań jądrowych, ale entuzjazm szybko minął, bo okazało się, że miony z jądrami silnie oddziałują niechętnie, a precyzyjnie to bardzo rzadko słabo, a zasadniczo jedynie elektromagnetycznie. Szybko okazało się, że są jedynie czymś w rodzaju ciężkich elektrów i stąd nasze pytanie tytułowe. Nikt istnienia takiego tworu wtedy nie oczekiwał i dziś na pierwszy rzut oka wydaje się on zbędny, a co więcej od niedawna przysparza nam poważne teoretyczne kłopoty, które stanowią bardzo poważny problem dla współczesnej fizyki. Ale o tym wspomnimy dopiero na końcu nie chcąc zniechęcać Czytelnika już teraz.

A więc po co nam miony?

Zanim odpowiemy na to pytanie, poznamy je bliżej.

Skąd one się w ogóle biorą?

O mionach wiemy, że żyją średnio, gdy nie poruszają się (relatywistycznie), bardzo krótko, mniej więcej 2 milionowe części sekundy (2 μ s). Nawet te o energiach 100 GeV, gdy są bardzo relatywistyczne, o czynniku Lorentza $\gamma = E/(m_0 c^2)$ rzędu tysiąca, czas ich życia zgodnie z teorią względności Einsteina wydłuża się, żyłyby w naszym układzie odniesienia powiedzmy 2 milisekundy i mogłyby wtedy średnio przelecieć jakieś 600 km. W odległościach astronomicznych to tyle co nic, a więc jasne jest, że nie mogą one przychodzić do nas z kosmosu.

Z tego, co wiemy możemy przypuszczać, że są one produkowane w atmosferze przez pierwotne promieniowanie kosmiczne, które oddziałuje z jądrami atomów powietrza. W oddziaływaniach tych produkowane są w dużych ilościach różne cząstki elementarne, ale w największej te

najlejsze. Nazywają się one pionami (π). Piony mogą być naładowane elektrycznie albo elektrycznie obojętne. Piony neutralne (π^0) żyją bardzo krótko kilkadziesiąt miliardów razy krócej niż miony. Piony naładowane już tylko sto razy krócej, ale to i tak wystarczy, aby większość z nich się rozpadła zanim dotrze do powierzchni ziemi. W 99,99% przypadków rozpadają się na miony i odpowiednie neutrino (anty neutrino) mionowe

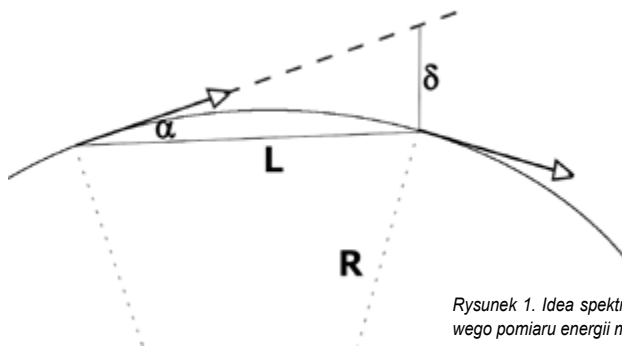
$$\begin{aligned}\pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ \pi^- &\rightarrow \mu^- + \text{anty}(\nu_\mu)\end{aligned}$$

Istnieją jeszcze inne kanały produkcji mionów, ale ich wkład w to, co mierzymy na powierzchni ziemi jest nieduży.

Jeśli taka jest geneza mionów, spodziewać się należy, że obserwacje zmian strumienia mionów na powierzchni ziemi dają informację o tym, jak zmienia się ilość promieniowania kosmicznego bombardujące naszą atmosferę, ale także i o tym, jak zmienia się atmosfera jako taka. To pierwsze to nic innego jak pogoda kosmiczna, a to drugie to w szerokim rozumieniu meteorologia. Jedno i drugie ważne i warte osobnego omówienia, ale my nie o tym. Chcemy powiedzieć o mionach.

Od momentu, gdy zaczęto mionom kosmicznym przyglądać się dokładniej, co miało miejsce w latach 50 ważnym pytaniem było, jakie są ich energie.

Oczywistym sposobem zmierzenia energii cząstek naładowanych jest metoda spektroskopowa, czyli zbadanie,



Rysunek 1. Idea spektroskopowego pomiaru energii mionów.

jak oddziałują one z polem magnetycznym, czy prościej mówiąc, jak silnie pole magnetyczne odchyła ich tory.

Możemy dokonać pewnych oszacowań bazując na wiedzy szkolnej.

Promień krzywizny toru R (promień Larmora) cząstki o pędzie $p=mv$ naładowanej ładunkiem q poruszającej się w stałym polu magnetycznym B do niego prostopadle otrzymujemy porównując siłę odśrodkową z siłą Lorentza

$$R = mv / (qB)$$

Biorąc mały wycinek łuku ($L \sim R \alpha$) możemy oszacować odchylenie toru

$$\delta \sim L^2 / R$$

Wyrażając energię cząstki E w jednostkach używanych przez fizyków od cząstek (GeV) i ładunek jako wielokrotność Z ładunku elementarnego e , (pole B oczywiście w teslach) wzór ten przedstawia się następująco:

$$\delta \sim 30 L^2 Z B / E$$

i wynik otrzymujemy w centymetrach.

Biorąc „zwykły magnes” neodymowy, który może wytworzyć potężne pole $\sim 1\text{ T}$ (ale tylko na odległościach powiedzmy kilku centymetrów) dla mionów o energiach $\sim 1\text{ GeV}$ odchylenie jest praktycznie niemierzalne, wynosi ułamki milimetra. Aby zobaczyć odchylenia takich mionów i zmierzyć ich energię trzeba by zbudować magnes o rozmiarach najlepiej metrowych. Nie takie jednak trudności pokonywała ciekawość fizyków. Już w latach 50 ubiegłego wieku uzyskaliśmy odpowiedź. Aktualne światowe

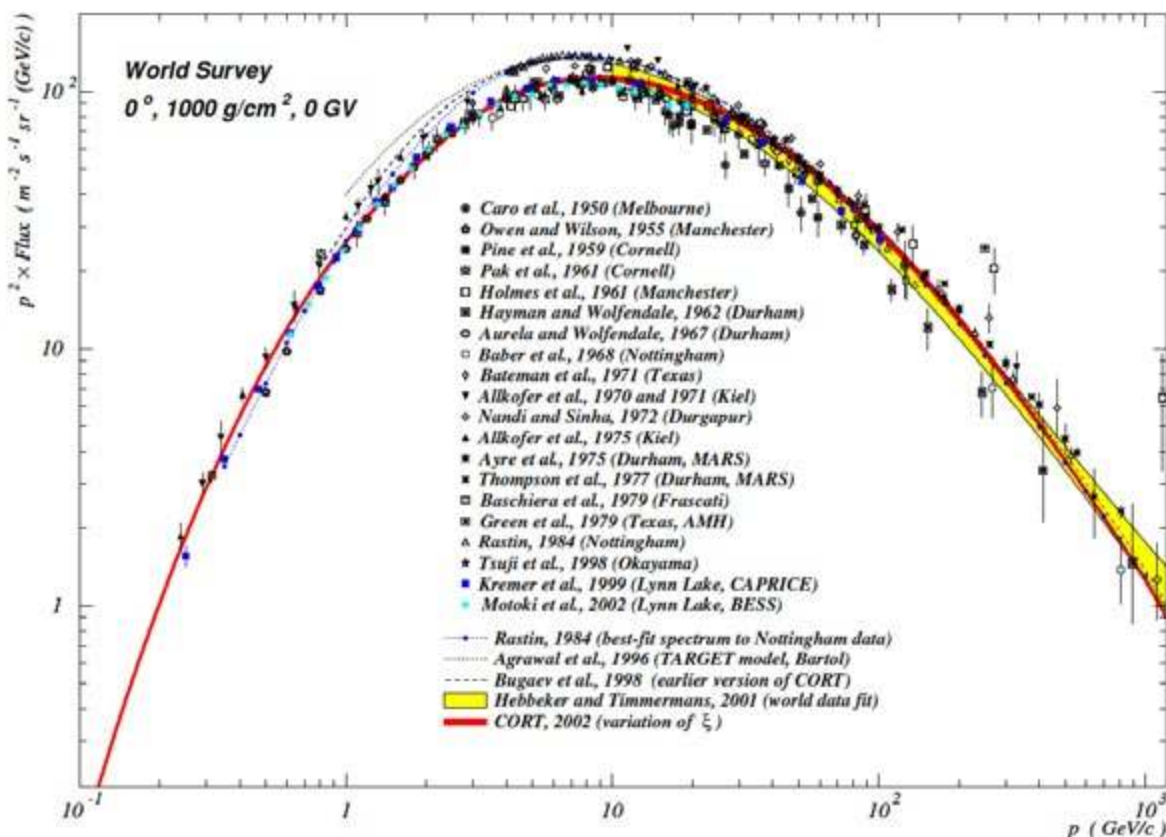
podsumowanie sytuacji pokazuje Rysunek 2 zaczerpnięty z [2]. Wartości na osi rzędnych pomnożone zostały przez pęd mionów w kwadracie, aby lepiej było wszystko widać, a widać jest to, że najwięcej ich ma energię kilku (do 10) GeV, średnio 4 GeV.

Skoro już wiemy, jaka energię miony mają, możemy zadać kolejne pytanie: jak miony oddziałują z materią?

Miony sklasyfikowane zostały razem z elektronami i taonami (i odpowiadającymi im neutrinami) jako leptony stanowiące w Modelu Standardowym łącznie z odpowiadającymi im antycząstkami 12 z podstawowych składników materii. Jeśli dodać do nich 12 kwarków, bozony pośredniczące i cząstkę Higgsa, to mamy już komplet. Leptony naładowane, jak wspomnieliśmy, oddziałują zasadniczo prawie wyłącznie elektromagnetycznie, czyli za pomocą sił, jakie znali już starożytni Grecy pocierając bursztyn i bawiąc się okruchami magnetytu. Nie oddziałują „silnie”, jądrowo.

Różnica między mionami i elektronami, bierze się z różnicy ich mas. Miony są bardziej masywne. Energia spoczynkowa ($m_0 c^2$) elektronu to około 0,5 MeV, mionu 105 MeV, a więc 200 razy więcej i to właśnie robi różnicę.

Zacznijmy od początku. Fizyka cząstek elementarnych zaczęła się właściwie już w połowie XIX wieku, gdy Julius Plücker i Johann Wilhelm Hittorf [3] zaobserwowali po raz pierwszy promienie katodowe, a nazwał je tak (*Kathodenstrahlen*) dopiero w 1876 roku Eugen Goldstein [4]. Właściwy początek miał miejsce w 1897 roku, kiedy brytyjski fizyk J. J. Thomson wykazał, że promienie katodowe to strumień nieznanych wcześniej cząstek o ładunku



Rysunek 2. Rozkład energii mionów obserwowanych na powierzchni ziemi [3].

ujemnym [5], którą później nazwano za Georgem Johnstonem Stoney’em elektronami.

Elektrony, jakie można już było zauważyć w rurze Crookesa (Sir William Crookes 1832-1919) czasem zwaną też rurą Crookesa-Hittorfa (Johann Wilhelm Hittorf 1824-1914), czy nawet wcześniej w rurkach Geisslera (Johann Heinrich Wilhelm Geißler, który był właściwie przede wszystkim dmuchaczem szkła, a fizykiem w dalszej kolejności 1814-1879) poruszając się w rozrzedzonych gazach powodowały ich świecenie. Widzimy to w neonach, a nawet w zwykłych świetłówkach. Świecenie to jest efektem jonizacji, a następnie rekombinacji i wzbudzenia pozostałości gazu w szklanych rurkach.

Oczywiście jonizacja, aczkolwiek mniej spektakularna zachodzi przy przechodzeniu cząstek naładowanych przez każdą substancję. Cząstki zderzając się z elektronami związanymi w atomach tracą swoją energię. Jeśli początkowa energia cząstek jest mała, jonizacja atomów ośrodka jest dominującym mechanizmem tych strat. Słowo „mała” oznacza tu, że cząstki są nierelatywistyczne. Przy wyższych energiach włączają się procesy emisji promieniowania hamowania i inne jeszcze bardziej egzotyczne procesy, takie jak produkcja par, ale o tym nie mówimy. Energia spoczynkowa elektronu wynosi, jak już wspominaliśmy około 0,5 MeV. Ich relatywistyczność zaczyna się zatem od kilku MeV. Dla cięższych mionów jest ona 200 razy więcej, czyli już kilkaset MeV.

Cząstki relatywistyczne, niezależnie od tego, czy są to miony, elektrony, czy cokolwiek innego (byłe naładowanego pojedynczym ładunkiem elektrycznym) tracą wszystkie na jonizację przy przejściu tej samej ilości materii mniej więcej tyle samo. Na każdy 1 g/cm² materii jest to około 2 MeV. Dla elektronu to sporo, ale mion może sobie na to pozwolić i dlatego właśnie miony są tak przenikliwe.

Ta cecha mionów jest tym, co czyni je użytecznymi. Tylko do czego mogą się przydać?

Pierwszą nagrodę Nobla z fizyki dostał w 1901 roku Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) za odkrycie promieniowania X zwanego powszechnie promieniowaniem Roentgena. Bardzo znane jest zdjęcie rentgenowskie dłoni Alberta von Köllikera wykonane przez Röntgena w *Physikalisches Institut* Uniwersytetu w Würzburgu 23 stycznia 1896 r. Pokazuje ono nie tylko kości Alberta, ale także możliwości, jakie daje nowe, odkryte właśnie



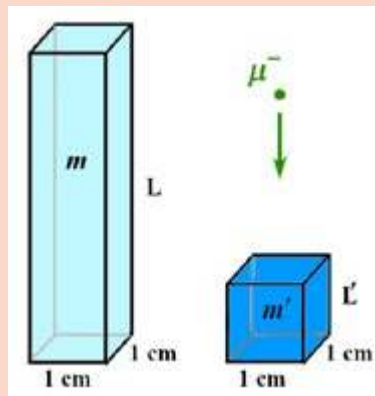
Rysunek 3. Zdjęcie rentgenowskie dłoni Alberta von Köllikera wykonane przez Röntgena w 1896 roku.

promieniowanie. Przenika ono łatwo przez skórę i miękkie tkanki i zatrzymywane jest silniej przez elementy gęste, zawierające pierwiastki ciężkie, pierścionki, obrączki. Możliwości te w oczywisty sposób docenia medycyna, ale i służba ochrony na lotniskach i innych miejscach wymagających sprawdzenia, czy nikt nie stara się przenieść nielegalnie zakazanych przedmiotów.

Miony kosmiczne przez dłoń Alberta przeszłyby nie zauważając jej praktycznie, ale gdyby tak ręka ta była 200² razy większa? Oczywiście nikt tak dużej ręki nie ma, ale znamy inne obiekty o rozmiarach mierzonych w setkach metrów, które we wnętrzu zawierać mogą takie czy inne ciężkie rzeczy. I nie chodzi tu akurat o pagórki, w których są żyły złota o wadze wielu ton, choć to byłby niezwykle ciekawy i niewątpliwie pożądany obiekt badań („złoty pociąg”!).

Najbardziej chyba znanymi „pagórkami”, których wnętrza bardzo chcielibyśmy poznać, są egipskie piramidy. W pobliżu Kairu są trzy najbardziej znane: Cheopsa, jego syna Chefrena i Snofru.

W roku 1965 grupa fizyków, głównie amerykańskich zaproponowała, aby użyć strumienia kosmicznych mionów do prześwietlenia piramidy Chefrena w poszukiwaniu

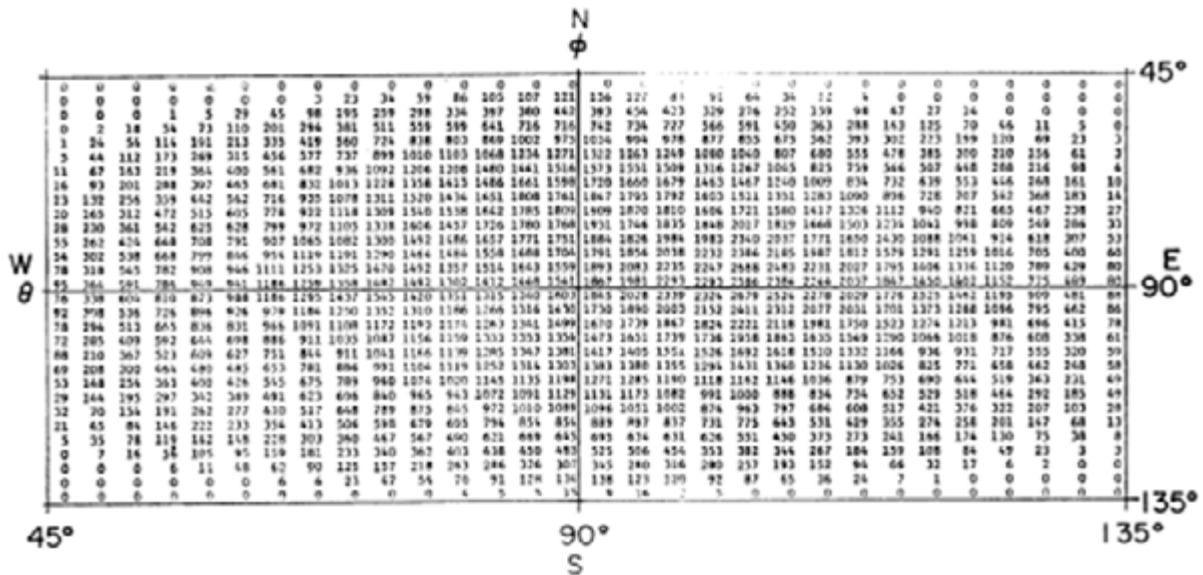


Gramatura (g/cm²) to bardzo wygodna miara ilości materii. Mówi on, ile znajduje się jej w prostokącie o podstawie 1 cm² i ustalonej wysokości L. Oczywiście, jak wiemy ze szkoły gęstość (ρ) to stosunek masy do objętości. Przyjmijmy przez chwilę, że nie pracujemy w układzie SI, tylko w starym tak zwanym „bezwzględny” układzie jednostek CGS, gdzie masę mierzy się w gramach, a długość w centymetrach.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1g}{1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times L}; \quad L[\text{cm}] = \frac{1g}{1\text{ cm}^2} / \rho$$

czyli wysokość jest jakby odwrotnością gęstości.

Warto zauważyć, że jak się tę samą ilość materii „rozciągnie” pionowo, to gęstość zmaleje dokładnie tak samo i gramatura pozostanie bez zmian. Na przykład zastanawiając się nad ciśnieniem atmosferycznym dochodzimy do wniosku, że jest to ilość materii nad nami, nieważne jak wysoko sięga atmosfera i jak bardzo rozciągnięta.



Rysunek 4. Liczby mionów zarejestrowane przez Alvareza i kolegów przychodzące z określonych kątów na niebie do komory Belzoniego w piramidzie Chefrona.

komory grobowej faraona, której istnienie było wysoce prawdopodobne, ale żadnemu z archeologów „klasycznych” nie udało się jej dotąd odnaleźć. Wiosną 1967 roku zainstalowano w centralnie położonej w płaszczyźnie podstawy piramidy komorze zwanej komorą Belzoniego aparaturę składającą się z wielkiego detektora mionów (dwóch komór iskrowych o rozmiarach prawie 4 metrów kwadratowych wywołanej koincydencją trzech dużych liczników scyntylacyjnych umieszczonych nad i pod nimi) i potężnych szaf z elektroniką obsługującą sam detektor. Pomiary ruszyły rok później i po zebraniu ponad miliona rejestracji stwierdzono, że... żadnej komory wewnątrz piramidy nie ma [6].

Oryginalne wyniki otrzymane przez grupę Alvareza po kilku miesiącach pracy w postaci „mapy” 3° x 3° przedstawia Rysunek 4. Widać na nim, że... nic nie widać! Nad komorą Bolzoniego nie ma żadnej porównywalnej z nią wielkością innej komory.

Niepowodzenia Alvareza nie zraziły fizyków i już po prawie 50 latach na Wielką Piramidę Cheopsa w Gizie rzucili się z nowoczesnym sprzętem zupełnie nowej generacji i kilkoma różnymi technikami obserwacji cząstek Japończycy. Odkryli oni w niej wielką pustą przestrzeń (*Big Void*), której istnienia nikt nie podejrzewał i której przeznaczenie do dziś nie jest jasne [7].

Całkiem niedawno ekipa nazywająca się *Exploring the Great Pyramid* zaproponowała projekt, który ideę zastosowaną przez zespół Alvareza przeniósł na kolejny, jeszcze wyższy poziom technologiczny. Bardzo duży teleskop mionowy (12 m x 2,5 m x 3 m), który będzie miał ponad 100 razy większą czułość niż ten, który był ostatnio używany pół wieku wcześniej, ma rejestrować jednocześnie miony ze wszystkich kierunków i po raz pierwszy stworzyć prawdziwy mionograficzny obraz tak dużej struktury [8]. Prace trwają. W latach 2016 i 2017 zespół *ScanPyramids* poinformował o kilku odkryciach pustych przestrzeni.

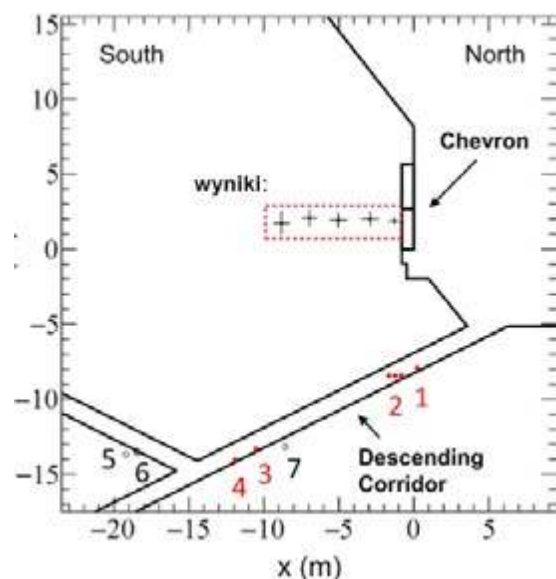
W 2023 doniesiono o odkryciu nieznanego wcześniej struktury (*Small Void*) w kształcie korytarza o długości co najmniej 5 metrów umiejscowionej za tak zwaną strefą

Chevron na północnej ścianie piramidy [9]. Egipcjanie z urzędu ds. starożytności wpuścili tam przez dziurę małego zdalnie sterowanego robota z kamerą, który potwierdził istnienie ukrytego wewnętrznego korytarza o długości 9 metrów i szerokości 2,1 metra ponad głównym wejściem do Wielkiej Piramidy w Gizie [10].

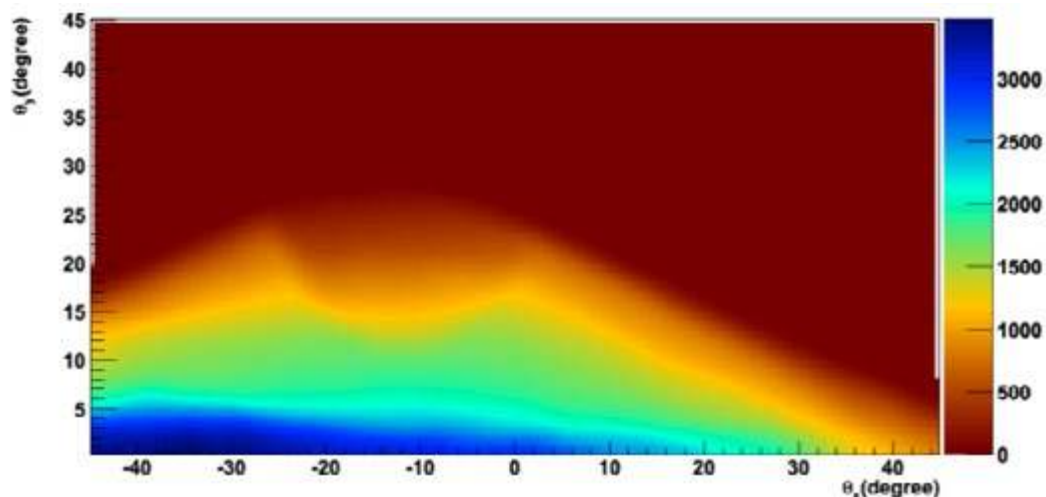
Ale zostawmy piramidy. Można by o nich jeszcze opowiadać, ale przecież nie są one jedynym zastosowaniem techniki zwanej mionografią (tomografią mionową).

Innym zastosowaniem mionografii są obserwacje geologiczne przede wszystkim wulkanów. Pozwalają one zajrzeć do ich wnętrza z bezpiecznej odległości.

W ramach włoskiego projektu MU-RAY naukowcy opracowali niewielki, przenośny detektor charakteryzujący się niskim zużyciem energii, wytrzymałością, mobilnością i dobrą rozdzielczością przestrzenną i czasową. Używając



Rysunek 5. Wyniki z 2023 roku (czerwony prostokąt i punkty wewnątrz) pokazujące wnętrze piramidy Cheopsa z nowym korytarzem otrzymane przez zespół ScanPyramids z analizy danych detektorów umieszczonych w różnych punktach (liczby).



Rysunek 6. Wezuwiusz widziany w strumieniu mionów kosmicznych.

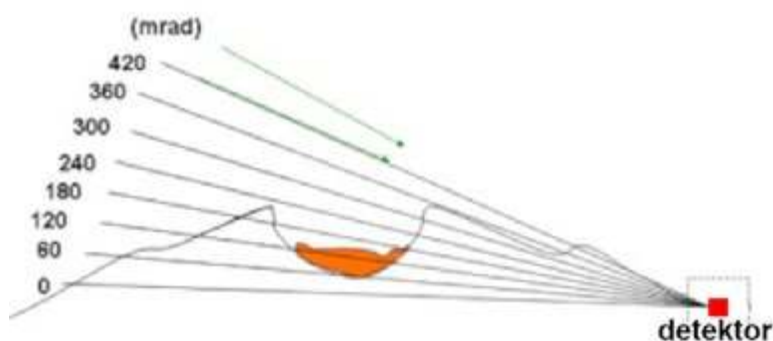
prototypu o powierzchni 1 m^2 przez jeden miesiąc w 2013 roku zbierali dane na Wezuwiuszu. Druga kampania pomiarowa została przeprowadzona w Puy de Dôme we Francji w ciągu ostatnich miesięcy 2013 roku. [11].

Podobny projekt uruchomili także Japończycy i wykonali pomiary na wulkanie Mt. Asama. Detektor mionów o powierzchni ponad $0,5 \text{ m}^2$ został zainstalowany około 1 km od krateru. Ślady mionów rejestrowano w warstwach emulsji w detektorze.

Na głębokościach kilkuset metrów poniżej dna krateru wykryto obszar o podwyższonej gęstości, który odpowiada położeniu i kształtowi kopca lawy utworzonego podczas ostatniej erupcji, a tuż pod nim zauważono obszar o niskiej gęstości, jakby kanał. Autorzy zapewniają, że ich metoda zapewnia znacznie wyższą rozdzielczość niż jakiegokolwiek konwencjonalne pomiary geofizyczne [12].

Detale wypływu lawy z aktywnego wulkanu Satsuma-Iwojima Hiroyuki Tanaka wraz z kolegami z uniwersytetów w Tokio i Nagoi badał mionograficznie i dynamicznie od 2013 roku. Widoczny wyraźnie komin, z którego wypływała co jakiś czas lawa pokazany jest na Rysunku 9 otrzymanym przy długim czasie „naświetlania” mionami w czasie, gdy wulkan był względnie spokojny [13]. Aż tu nagle 4 czerwca 2013 wulkan obudził się i udało się sfotografować (zmionografować) całą sekwencję budzącego się wulkanu [14].

Obrazowanie wnętrza wulkanów, w szczególności dynamiczne, pozwala dowiedzieć się wiele o geologii (fizyce) tych potencjalnie groźnych obiektów. Dane te są niezwykle cenne dla teoretycznego ich zrozumienia i modelowania, przez co staramy się zbliżyć do chwili,



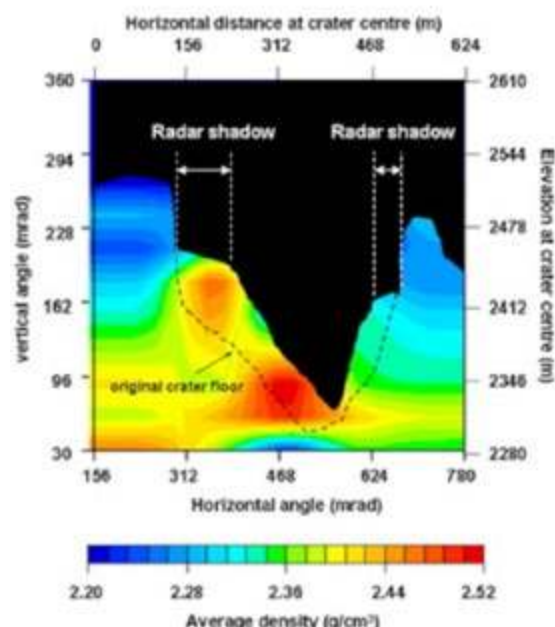
Rysunek 7. Schemat pomiarów wulkanu Asama.

w której będziemy mogli przewidywać erupcje i zapobiegać przez to ich, czasem dramatycznym skutkom.

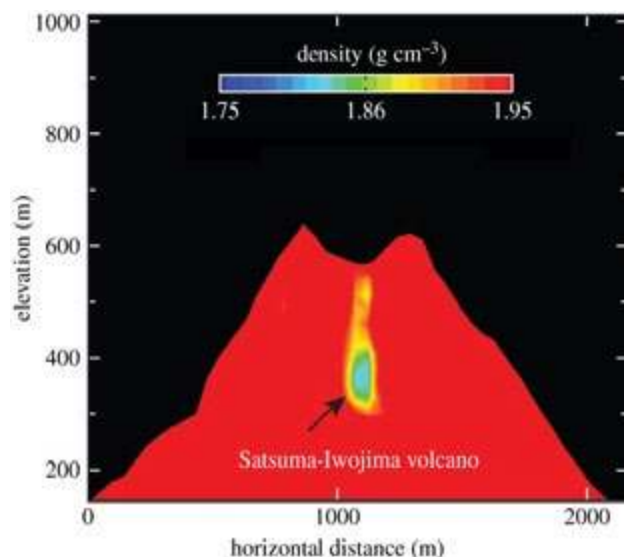
Badanie struktur geologicznych ważne jest nie tylko w obawie przed wybuchami wulkanów. Planując wielkie przedsięwzięcia techniczne też dobrze by było wiedzieć, co też jest pod ziemią. Od tego zresztą zaczęła się mionografia jako taka [15]. W 1955 roku Eric Paul George zmierzył grubość nadkładu skalnego nad tunelem elektrowni wodnej w australijskich Górach Śnieżnych, porównując ubytek strumienia mionów po przejściu przez skałę z wartością strumienia na powierzchni. Nic trudnego, jeśli ma się teleskop mionowy. W jego przypadku był to prosty układ liczników Geigera-Millera.

70 lat później Chińczycy opublikowali wyniki swojego obrazowania skały nad tunelem w Changshu w Chinach [16]. Kompaktowy system o powierzchni czulej wynoszącej nieco ponad pół metra kwadratowego mierzył rozkład kątowy mionów. Wyniki pokazuje Rysunek 12.

Technika tomografii mionowej związana z badaniem podziemnych struktur w mniejszej skali rozwija się intensywnie w ostatnich czasach. Naukowcy z Uniwersytetu we Florencji udoskonalili detektor MU-RAY stosowany



Rysunek 8. Obraz mionograficzny górnej części wulkanu Asama.



Rysunek 9. Obraz mionograficzny wulkanu Satsuma-Iwojima. Strzałka wskazuje magmę o niskiej gęstości (z pęcherzykami gazów).

wcześniej w pomiarach wielkoskalowych i stworzyli detektor nazwany MIMA (*Muon Imaging for Mining and Archaeology*). Użyto go w kopalni Temperino w Parku Archeologicznym w San Silvestro w Toskanii dla poszukiwania i trójwymiarowej rekonstrukcji pustych przestrzeni (komór, tunele). Kopalnia ta była eksploatowana od czasów etruskich do roku 1973, a obecnie jest dużą atrakcją turystyczną regionu. Oprócz zainteresowań czysto archeologicznych pomiary te są ważne dla kwestii bezpieczeństwa turystów zwiedzających kopalnię.

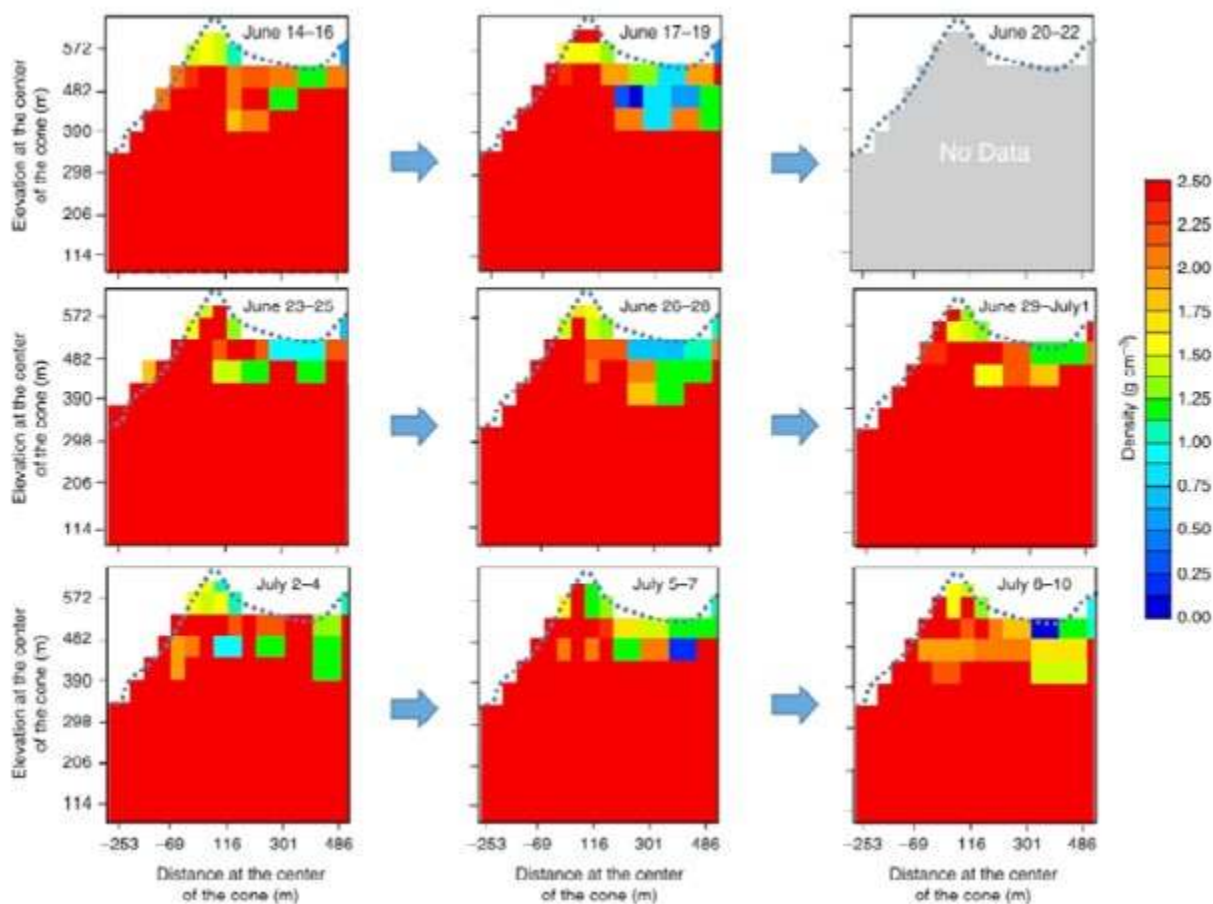
Detektor MIMA ma wielkość $50 \times 50 \times 50 \text{ cm}^3$ i umieszczony jest na platformie pozwalającej na jego rotację azy-

mutalną. Pomiary w kopalni trwają od 2018 roku z detektorem umieszczanym w różnych punktach kopalni, po około dwa miesiące w każdym. W rezultacie odkryto nieznane wcześniej komory (Rysunek 15). Speleolodzy próbowali do nich dotrzeć, ale dostęp okazał się niemożliwy [17].

Ich koledzy z Neapolu także postanowili zbadać nawet bardziej starożytne podziemne stanowisko. Pomiary na górze Echia, miejscu najwcześniejszej osady miasta Neapol z VIII wieku p.n.e. i zastosowanie nowatorskiej techniki obrazowania doprowadziło do odkrycia ukrytej podziemnej komory, której istnienie nie było widoczne na „zwykłych” dwuwymiarowych wykresach mionograficznych. [18]

Jeśli chodzi o nieco młodsze zabytki architektury podziemnej bliższy nam geograficznie i cokolwiek ambitniejszy plan badań zaproponowali Węgrzy. Planują oni „przeświecić” mionami Zamek Królewski w Budzie w Budapeszcie. Projekt trwa od 2020 roku i niedługo powinien się zakończyć, a wtedy ukaże się nam podziemna część południowej części wzgórza Zamku Królewskiego, gdzie znajduje się obecny zamek i częściowo zakopane ruiny starożytnych budynków. Nieznane podziemne puste przestrzenie (jaskinie i tunele) o wielkości większej niż $2 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$, a także zasypane piwnice, tunele, strefy gruzu skalnego itp. powiedzą nam coś więcej o historii [19,20].

I w tym miejscu musimy wspomnieć o naszym polskim podziemnym przedsięwzięciu mionograficznym realizowanym niejako przy okazji „kosmicznego” projektu CREDO-Maze. Mamy i u nas groty, które nie do końca są poznane i zbadane, a które doskonale nadają się do



Rysunek 10. Obrazy mionograficzne wykonane w sekwencji czasowej podczas erupcji wulkanu Satsuma-Iwojima w 2013 roku.

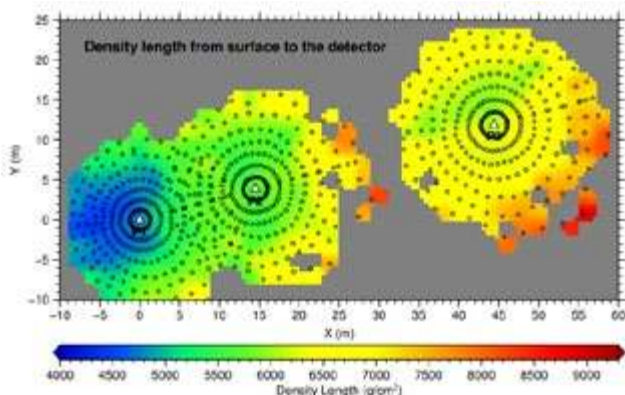


Rysunek 11.. E. P. George i jego dwaj studenci John Lehane i John O'Neill przy pracy.

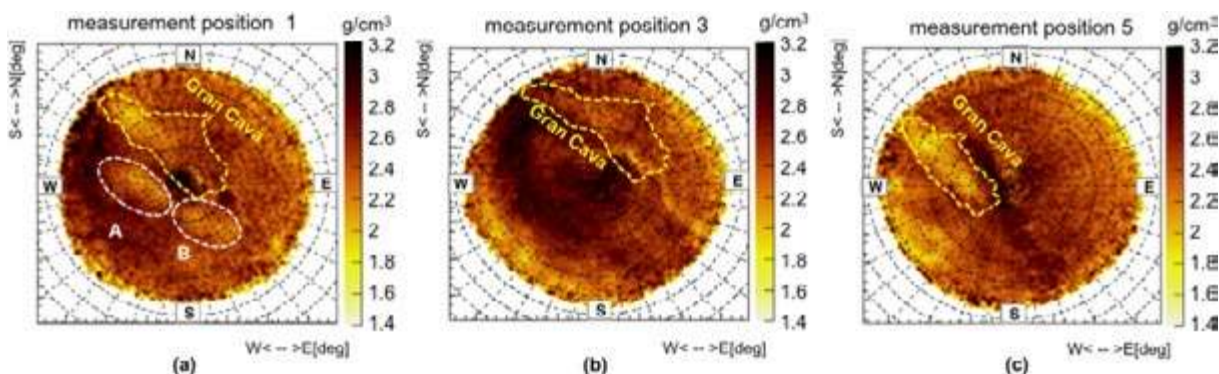
prześwietlenia kosmicznymi mionami. Mamy na myśli Grotę Nagórzyckie w Tomaszowie Mazowieckim.

Wraz z uczniami Tomaszowskiego I Liceum Ogólnokształcące im. Jarosława Dąbrowskiego i w porozumieniu z Miejskim Centrum Kultury, które zawiaduje Grotami, rozpoczęliśmy ich miono-skanowanie.

Aparatura to cztery liczniki projektu CREDO-Maze [21] umieszczone na długim na ponad metr ramieniu zamontowanym na statywie i pracujące w koincydencji, takiej samej jak aparatury w geometrii wielkopękowej. Jeśli zanotujemy jednoczesne trafienie wszystkich czterech, albo nawet tylko trzech z nich, to będziemy mieć pewność, że wzdłuż ramienia takiego teleskopu przeszła naładowana cząstka, a mógłby to być tylko mion. Kąt bryłowy z jakiego teleskop zbiera cząstki jest nieduży i jeśli obracać będziemy powoli ramię z detektorami otrzymamy obraz pochłaniania mionów z określonych kierunków. Oczywiście teleskop



Rysunek 12. Wyniki pomiarów pochłaniania mionów w tunelu w Changshu.



Rysunek 13. Odkrycie nowych komór w Temperino.

jest wyposażony w mechanizm „samoobracający” i zasadniczo może pracować autonomicznie. Na wszelki wypadek będzie przez uczestników projektu monitorowany co kilka, kilkanaście dni i zbierane dane będą spisywane i sukcesywnie przeglądane. Skanowanie Grot Nagórzyckich będzie trwało długo. To nie jest przedsięwzięcie przewidziane na tydzień, czy nawet miesiąc. Im dłuższy czas, tym więcej danych zbierzemy i tym lepsze będą obrazy spod ziemi.

I można by tak jeszcze długo, bo mionografia rozwija się w ostatnich latach bardzo intensywnie. Pominęliśmy tu zastosowania skierowane przeciw przemytnikom-terrorystom i monitorujące składowiska odpadów z elektrowni atomowych. To są za poważne sprawy, aby skwitować je w kilku akapitach. W miarę aktualny przegląd technik i zastosowań, także tych, o których nie wspomnieliśmy zawiera praca [22].

A na koniec wróćmy do tego, co miony mogą dać fizykom. Oczywiście dobrze, że są, bo domykają Model Standardowy, o czym już wspomnieliśmy, ale jednocześnie wskazują na drobną, małą skazę, jaką jawi się coraz wyraźniej na tym obowiązującym modelu naszej Rzeczywistości, naszego świata. I być może jest to ta szparka, przez którą zagląda do nas Nowa Fizyka.

Jeśli traktować elektron (albo mion) jako naładowaną małą kulę, która się obraca z momentem pędu L to można spodziewać się, że ma też moment magnetyczny μ .

$$\mu = \frac{-e}{2m_e} L$$

W mechanice kwantowej jest podobnie, ale trochę inaczej. Elektron ma moment magnetyczny

$$\mu = g_e \frac{-e}{2m_e} L = -g_e \mu_B \frac{S}{\hbar}$$

Gdzie S to spinowy moment pędu, a μ_B to stała nazywana się magnetonem Borha. To, co nas naprawdę interesuje to stała g . Zasadniczo jest ona równa 2. Wynika to z równania Diraca i nie ma tu żadnych wątpliwości. Problem w tym, że tak dla elektronu, jak mionu i taonu we wszystkich pomiarach wychodzi, że g jest większe od 2. Niewiele, ale zdecydowanie ponad wszelką wątpliwość. (Wygodnie jest prezentować wyniki używając zamiast g zmiennej $\alpha = (|g| - 2)/2$, która „powinna” być równa 0.)

Póki co, nie jest to jeszcze problem. Fizycy są sprytni i nie takie problemy potrafią rozwiązywać. Otóż leptony



Rysunek 14. Groty Nagórzkie w Tomaszowie Mazowieckim.

w realnym świecie, te, które mierzymy, nigdy nie są samotne (jak piłkarze Liverpool FC). Wokół nich mogą, a jak mogą, to na pewno powstają stałe cząstki wirtualne. Powstają na niesłychanie krótką chwilę, tak krótką, na jaką pozwala zasada nieoznaczoności Heisenberga. I w każdej chwili coś tam zawsze jest, a jak jest to dodaje jakąś bardzo niewielką poprawkę także i do momentu magnetycznego cząstki, o jaką pytamy. Sprytni fizycy używając Modelu Standardowego potrafią policzyć wkład od wszystkich możliwych ich konfiguracji (powiedzmy: prawie wszystkich, tych istotnie znaczących) i tak, po długich rachunkach wyszło im, że elektron powinien mieć moment magnetyczny (α) równy

$$\alpha_e = 0,001\ 159\ 652\ 181\ 643\ (764)$$

(w nawiasach podano niepewność obliczeń).

Zmierzono go i rzeczywiście tyle ma (w granicach błędu oczywiście, niepewność pomiaru podano w nawiasie).

$$\alpha_e = 0,001\ 159\ 652\ 180\ 59\ (13)$$

Dla elektronu wszystko jest zasadniczo OK.

To samo zrobiono dla mionu. Ponad 130 fizyków z 78 instytucji w 21 krajach wyliczyło, że moment magnetyczny mionu (α) zgodnie z Modelem Standardowym powinien być równy [23]:

$$\alpha_\mu = 0,001\ 165\ 918\ 10\ (43)$$



Rysunek 15. Teleskop CREDO-Maze do mionografii.

Najnowsze pomiary współpracy *Muon g-2* z Fermilab (ponad 200 osób z 35 instytucji z 7 krajów) z pokazują [24], że w rzeczywistości mamy:

$$\alpha_\mu = 0,001\ 165\ 920\ 715\ (145)$$

Niby podobne, ale... Fizycy wolą mierzyć podobieństwo dwóch wyników odwołując się do odchylenia standardowego (σ). Porównując obie liczby trzeba zauważyć, że jesteśmy już bardzo blisko poziomu 6σ , a to oznacza, że gdyby ta różnica była rezultatem jedynie przypadkowego, nieszczęśliwego zbiegu okoliczności, to mogłoby się tak zdarzyć tylko raz na pół miliarda prób. To jest sto razy rzadziej niż trafienie 6 w Totolotku! „ 6σ ” zwykło się w fizyce uważać za poziom odkrycia Nowej Fizyki. Jak widać brakuje nam już bardzo, bardzo mało. Być może już niedługo...

A wszystko to może stać się przez miony, cząstki, których swego czasu nikt nie zamawiał.

BIBLIOGRAFIA:

- [1] Fizyce w Szkole w roku 2022 67/4, 18 (2022).
- [2] Hebbeker T. i Timmermans C. "Compilation of the vertical muon flux". Astropart. Phys. **18**, 107 (2002). CORT https://www.physics.purdue.edu/~nneumeis/cosmic_muons2.pdf.
- [3] J. Plucker i J.W. Hittorf, On the spectra of ignited gases and vapours, with especial regard to the different spectra of the same elementary gaseous substance Proc. R. Soc. London. **13** 153 (1864), doi: 10.1098/rsp.1863.0037.
- [4] E. Goldstein "Vorläufige Mittheilungen über elektrische Entladungen in verdünnten Gasen" (Preliminary communications on electric discharges in rarefied gases), Monatsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin (Monthly Reports of the Royal Prussian Academy of Science in Berlin), 279 (1876).
- [5] J.J. Thomson XL. Cathode Rays. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, **44** (269), 293 (1897). doi: 10.1080/14786449708621070.
- [6] L.W. Alvarez, et al. Search for hidden chambers in the pyramids. Science **167**, 832, (1970); doi: 10.1126/science.167.3919.832.
- [7] K. Morishima, M. Kuno, A. Nishio, A. i in. Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons. Nature **552**, 386, doi: 10.1038/nature24647 (2017).
- [8] A.D. Bross i in., Tomographic Muon Imaging of the Great Pyramid of Giza, FERMI-LAB-PUB-22-055-ND, arXiv:2202.08184 [physics.ins-det] (2022).
- [9] S. Procureur, K. Morishima, M. Kuno, M. i in. Precise characterization of a corridor-shaped structure in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons. Nat Commun **14**, 1144 (2023); doi: 10.1038/s41467-023-36351-0.
- [10] „Egypt: Hidden corridor in Great Pyramid of Giza seen for first time” 2 March 2023 David Gritten BBC News.
- [11] F. Ambrosino, I in. The MU-RAY project: Detector technology and first data from Mt. Vesuvius. J. Instrum. **9**, C02029–C02029 (2014); doi: 10.1088/1748-0221/9/02/c02029.
- [12] H. K. M. Tanaka, i in. High resolution imaging in the inhomogeneous crust with cosmic-ray muon radiography: The density structure below the volcanic crater floor of Mt. Asama, Japan. Earth Planet. Sci. Lett. **263**, 104 (2007); doi: 10.1016/j.epsl.2007.09.001.
- [13] H. Tanaka, T. Kusagaya i H. Shinohara, Radiographic visualization of magma dynamics in an erupting volcano. Nat Commun **5**, 3381 (2014) doi: 10.1038/ncomms4381.
- [14] H. Tanaka I K. M. Hiroyuki Japanese volcanoes visualized with muography Phil. Trans. R. Soc. A.37720180142, (2019) doi: 10.1098/rsta.2018.0142.
- [15] E. P. George, Cosmic rays measure overburden of tunnel. Commonwealth Engineer. (1955); Melbourne: Tait Publishing Co.: 455. ISSN 0366-8398.
- [16] R. Han i in., Cosmic muon flux measurement and tunnel overburden structure imaging” Journal of Instrumentation **15** P06019 (2020); doi: 10.1088/1748-0221/15/06/P06019.
- [17] D. Borselli, T. Beni, L. Bonechi, I in. Three-dimensional muon imaging of cavities inside the Temperino mine (Italy). Sci Rep **12**, 22329, (2022); doi: 10.1038/s41598-022-26393-7.
- [18] L. Cimmino, G. Baccani, P. Noli i in. 3D Muography for the Search of Hidden Cavities. Sci Rep. (2019) 9 (1):2974. doi: 10.1038/s41598-019-39682-5. Erratum in: Sci Rep. **9** (1):7402 (2019); doi: 10.1038/s41598-019-43833-z.
- [19] G. Surányi, D. Varga, G. Hamar i in. Underground muography measurements by the HUN-REN Wigner Research Centre for Physics. J. Appl. Phys. **138**, 064903, (2025); doi: 10.1063/5.0273449.
- [20] Balázs, L., Hamar, G., Csiksek, Á. i in. Detection of fractured zones, faults, and cavities by high resolution muon tomography in the Buda Hills. Sci Rep **15**, 17514 (2025); doi: 10.1038/s41598-025-02510-0.
- [21] T. Wibig, CREDO-Maze: promieniowanie kosmiczne w każdej szkole, Fizyka w Szkole 67/2, 26 (2022).
- [22] L. Bonechi, R. D'Alessandro i A. Giammarco, Atmospheric muons as an imaging tool, Reviews in Physics, **5**, 100038 (2020) doi: 10.1016/j.revip.2020.100038.
- [23] T. Aoyama, i in., The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model, Physics Reports, **887**, 1, (2020); doi: 10.1016/j.physrep.2020.07.006.
- [24] The Muon g-2 Collaboration, D. P. Aguillard, i in. Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 127 ppb (2025), <https://arxiv.org/abs/2506.03069>.

Prawo Gaussa

Jerzy Kuczyński

Gdy byłem licealistą, przeczytałem bardzo rozsądne zdanie na temat matematyki w nauczaniu elementarnej, choć akademickiej, fizyki. Otóż autor jednego z wówczas popularnych podręczników stwierdzał, że w celu sprawnego poznawania fizyki na tym poziomie student musi znać sens i niektóre podstawowe własności całek i pochodnych, ale nie jest mu potrzebna znajomość rachunku różniczkowego i całkowego. Inaczej mówiąc można nauczyć dość zaawansowanej fizyki, wraz z rozwiązywaniem większości spotykanych na poziomie inżynierskim problemów, bez znajomości standardowej analizy matematycznej.

Biorąc pod uwagę, że pominięcie tej dziedziny matematyki stanowi znaczne ułatwienie nauki, prawdopodobnie również w szkole dałoby się przedstawiać uczniom znacznie bardziej zaawansowaną fizykę od tej, która jest nauczana współcześnie. Byłaby to fizyka ciekawsza, praktycznie użyteczna a jednocześnie chyba łatwiejsza intelektualnie od tego czego uczymy obecnie. Jedyną dodatkową inwestycją byłoby wyjaśnienie sensu całki i pochodnej co nie powinno zająć więcej niż kilkanaście minut. Jeżeli jeszcze z pochodną mogłoby być trochę problemów to całka jest zupełnie oczywista, bo to po prostu suma i ma niemal wszystkie własności sum skończonych¹.

W przypadku funkcji to pole pod wykresem a w praktyce fizycznej $\int dm$ „po krześle” to masa krzesła, $\int ds$ po powierzchni przedmiotu to pole powierzchni tego przedmiotu a $\int dV$ po bryle to objętość tej bryły. Zrozumienie tego nie stanowi problemu nawet dla ucznia szkoły podstawowej. Z pochodną jest niewiele gorzej a znaczna część wiedzy jest już realizowana pod nazwą „nauka o prędkości” i wydaje się, że użycie terminu „pochodna” za wiele niczego by nie skomplikowało.

Biorąc pod uwagę niezwykłą prostotę rachunków różniczkowych² można by tego (gdyby się chciało!) bez problemu nauczyć. Inna rzecz, że zastosowanie pochodnej w elementarnej fizyce nie jest zbyt duże. Natomiast przy użyciu pojęcia całki da się przedstawić dużo ciekawej a obecnie słabo znanej fizyki. Do tego da się to zrobić dużo szerzej, bardziej jednolicie i z mniejszym nakładem wysiłku od tego co mamy teraz. Konkretnie mam na myśli wykorzystanie prawa Gaussa.

Prawo Gaussa mówi, że całka po zamkniętej powierzchni ni ze „strumienia” pola jest równa całkowitej wydajności źródeł tego strumienia znajdujących się wewnątrz powierzchni. Jeżeli przyjąć, że strumień pola to po prostu ilość linii sił wytwarzanych przez źródła a linie „wychodzą” i „kończą się” zawsze w jakimś źródle to dalsze tłumaczenie

nie jest już potrzebne. A źródłami pola może być wiele rzeczy. Oczywiście „klasyczne” to masa i ładunek elektryczny. Ale prawo stosuje się całkiem nieźle do hałasu, fal sztormowych na oceanie czy ciepła z grzejnika. Dodatkowo prawo wiąże zachowanie pola z rodzajem przestrzeni. Zauważmy, „polem” nie musi być znane z podstawowej fizyki pole a mogą to być liczne znane z codzienności całkiem zwyczajne wielkości fizyczne. Dodatkowo przy pomocy prawa Gaussa można badać nie tylko „pola” ale również przestrzenie, w których te pola się rozchodzą. Samo prawo ma postać

$$\oint P \cdot ds = \rho \quad (1)$$

gdzie P „polem”, ds elementem zamkniętej powierzchni, po której się całkuje (sumuje) a ρ wydajnością źródeł pola wewnątrz powierzchni.

Chwilę uwagi trzeba poświęcić wielkości A . Całka jak każda suma nie zmienia jednostek. Tym samym wielkość $\oint P \cdot ds$ ma wymiar „pole razy powierzchnia” a po prawej stronie znaku równości jest źródło pola, czyli zdecydowanie inna wielkość niż pole. Tym samym, aby mogła nastąpić równość trzeba uzgodnić jednostki a dodatkowo w zależności od tego jakie jednostki wybierzemy, potrzebny jest współczynnik ilościowy. I właśnie te funkcje pełni parametr A .

W przypadku elektryczności i układu SI parametr nazywa się ϵ_0 i jak wiemy wynosi $8,854187818 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$ (już sama wartość współczynnika może zniechęcić do SI!). Mając równanie (1) i ϵ_0 zupełnie elementarnie znajdujemy prawo oddziaływania ładunków, czyli prawo Coulomba³. Dodatkowo zrozumiemy skąd się to prawo wzięło! W tym celu umieszczamy ładunek q w środku sfery o promieniu „ r ”. Wiedząc, że linie sił kończą się jedynie w ładunku niezależnie od wielkości „ r ” przez powierzchnię sfery przechodzi tyle samo tych linii a ze względu na to, że wszystkie punkty sfery są tak samo odległe od ładunku (żaden punkt sfery nie jest wyróżniony) wartość pola E (natężenie pola) jest w każdym punkcie taka sama⁴. Możemy więc napisać równanie słuszne dla dowolnego r (sfery o dowolnym promieniu)

$$\epsilon_0 \oint E \cdot ds = \epsilon_0 E \cdot \oint ds = \epsilon_0 \cdot E \cdot 4\pi \epsilon_0 \cdot r^2 = Q$$

Stała, jak w przypadku każdej sumy można wyłączyć przed całkę a $\oint ds = 4\pi \cdot r^2$, bo ta całka to pole sfery. Stąd natężenie pola elektrycznego $E(r) = Q / (4\pi \epsilon_0 \cdot r^2)$. Biorąc pod uwagę, że siła $F = E \cdot q$ możemy napisać prawo Coulomba

$$F(r) = E \cdot q = q \cdot Q / (4\pi \epsilon_0 r^2)$$

Jak widać żadne całkowanie nie było potrzebne – wystarczyło jedynie znać wzór na pole sfery⁵.

¹ Oczywiście całka oznaczona. Całka nieoznaczona wydaje mi się w ogóle mało przydatnym pojęciem. Przynajmniej na poziomie elementarnej fizyki.

² W praktyce potrzebny byłby tylko jeden wzór $(x^n)' = n \cdot x^{n-1}$. Dla „szczególnie zainteresowanych” uzupełniony wzorami na pochodną iloczynu, ilorazu i złożenia funkcji. Ten ostatni wzór wydaje mi się warty do wprowadzenia w szkole do szacowania błędów pomiaru. Dzięki niemu da się wyjaśnić, dlaczego pewne wielkości mają większy a inne mniejszy wpływ na całkowitą niepewność pomiaru, co wydaje mi się mieć duże „ideologiczne” znaczenie w kształceniu na bardziej zaawansowanym poziomie.

³ Dla elektrostatyki pełny opis problemu można znaleźć w popularnych podręcznikach. Np. w książce D. Hallidaya a R. Resnicka.

⁴ Można trochę skomplikować problem podając, że „ $\cdot$ ” oznacza iloczyn skalarny wektorów P i ds .

⁵ Prawdziwe rachunki całkowe potrzebne są dopiero by uzyskać wzory na pole czy objętość kuli.

W identyczny sposób uzyskamy prawo grawitacji Newtona. W tym celu zamiast q i Q podstawimy masy m i M . Chwilowo zostawimy współczynnik A i wykonując te same co poprzednio operacje, czyli umieszczając masę M w środku sfery o promieniu r i zauważając, że jak poprzednio ilość „linii sił” przechodzących przez sferę nie zależy od jej promienia a siła działająca na masę jest równa iloczynowi przyspieszenia grawitacyjnego (pełniącemu tu rolę „natężenia tego pola”) i masy m , na którą to przyspieszenie działa otrzymujemy wzór

$$F(r) = m \cdot M / (4\pi A r^2) \quad (2)$$

Oczywiście standardowa postać prawa grawitacji wygląda tak

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

ale przez porównanie tych równań bez trudu wyliczymy, że A dla grawitacji wynosi

$$A = 1/4\pi G \text{ lub } G = 1/4\pi A.$$

W ten sposób mamy wyprowadzone dwa z podstawowych wzorów fizyki. Ponieważ udało się powiązać te prawa z przestrzenią możemy zobaczyć co by się działo w przestrzeniach o innym wymiarze. Najmniej przekonujący jest problem dwu wymiarów. W elektryczności dwa wymiary symulujemy trochę sztucznie biorąc nieskończenie długą naładowaną prostą. Łatwo zauważyć, że linie sił pochodzące od takiej prostej są do niej prostopadłe. Wybierając do całkowania powierzchnię walca, przez którego środki podstaw przechodzi wspomniana prosta, łatwo zauważyć, że przez „denka” nie przejdzie żadna linia sił, bo denka są prostopadłe do prostej wytwarzającej pole, a wszystkie natężenia pola na poboczniczy walca są równe. Stąd całka (1) wyniesie

$$\epsilon_0 \int E \cdot ds = \epsilon_0 E \cdot \int ds = \epsilon_0 \cdot E \cdot 2\pi \epsilon_0 \cdot r \cdot h = \sigma \cdot h$$

gdzie σ to gęstość liniowa ładunku na prostej a h jest wysokością walca. Ostatecznie zależność pola od odległości od naładowanej prostej opisuje wzór

$$E = \sigma / (2\pi \epsilon_0 r)$$

Jak widać współczynnik przy π wynosi teraz dwa, ale co istotniejsze wykładnik promienia wynosi tylko jeden – pole w płaszczyźnie maleje wolniej niż w przestrzeni. To dlatego, że długość okręgu jest proporcjonalna do promienia a powierzchnia kuli do jego kwadratu.

Jest jasne, że biorąc masywny nieskończenie długi walec otrzymamy zachowanie „dwuwymiarowej grawitacji”. Dwuwymiarowe pole ma stosunkowo niewiele praktycznych zastosowań. Tak naprawdę jedyne, które mi przychodzi do głowy to opis fali rozchodzącej się od dość odle-

głego sztormu (będącego źródłem fal). Otóż w odległości wyraźnie większej od rozmiarów obszaru sztormowego, energia takiej fali (zwanej martwą) maleje odwrotnie proporcjonalnie do odległości od tego sztormu. W praktyce oznacza to, że taka fala maleje dość wolno i możemy ją dość często napotkać⁶.

Bardzo często stykamy się z polem w jednym wymiarze. Tym razem modelem tej sytuacji jest nieskończenie naładowana płaszczyzna o gęstości powierzchniowej ładunku η . Oczywiście i w tym przypadku linie sił są prostopadłe do takiej płaszczyzny. Jeżeli na taką płaszczyznę nałożymy walec o osi prostopadłej do tej płaszczyzny to tym razem przez pobocznice nie przejdzie żadna linia. Dlatego całka ograniczy do sumy powierzchni S podstaw

$$\epsilon_0 \int E \cdot ds = \epsilon_0 E \cdot \int ds = \epsilon_0 \cdot E \cdot 2S = \eta \cdot S \implies E = \eta / 2\epsilon_0$$

Zauważmy, jednowymiarowe pole w ogóle nie maleje z odległością. Można to zademonstrować eksperymentalnie budując „telefon ze sznurka”. Jeżeli połączyć sznurkiem dwa pudełka (np. po paście do butów) to mówiąc do jednego z nich odległy nawet o kilkadziesiąt metrów słuchacz wcale nieźle słyszy głos w drugim pudełku. bo dźwięk „wpuszczony” do sznurka nie rozprasza się. Oczywiście klasycznym przykładem jednowymiarowego pola jest grawitacja przy powierzchni Ziemi. Blisko powierzchni można uznać, że ta powierzchnia jest w przybliżeniu płaska i nieskończona. Dlatego przyspieszenie ziemskie przy powierzchni jest stałe a dopiero gdy ujawnia się kulistość Ziemi pole jest opisane wzorami (2).

Jednym z ciekawszych zastosowań wzoru na pole nieskończonej płaszczyzny jest próba obliczenia własności orbity Słońca w Galaktyce. Mleczna Droga jest płaska (grubość do średnicy są zbliżone stosunków jakie reprezentuje płyta CD). Dlatego w funkcji wysokości nad płaszczyznę Galaktyki pole grawitacyjne jest z grubsza stałe. Znajac masę galaktyki można policzyć „średnią gęstość powierzchniową”⁷ i traktując ruch w wysokości jak rzut ukośny i znając wektor prędkości Słońca (składowe pionową i poziomą) można wyliczyć okres między kolejnymi przejściami Słońca przez płaszczyznę Galaktyki.

Podsumowując - przy niewielkiej „inwestycji intelektualnej” udało się przedstawić stosunkowo duży i interesujący obszar fizyki. Rozwijając te rozważanie nietrudno wyjaśnić jak można by ujawnić „dodatkowe siły” przyrody (np. tzw. piątą siłę), jak przedstawić siły o skończonym zasięgu (np. oddziaływanie silne) czy uzasadnić, dlaczego Wszechświat jako całość ma zerowy ładunek elektryczny. Możliwości są olbrzymie i raczej jest problem z powstrzymaniem się z nadmiernym rozwijaniem tej tematyki⁸.

Jerzy Kuciński
Akademia Śląska

⁶ W. Dremljug w „Oceanografia nautyczna” podaje, że na Północnym Atlantyku, gdy prędkość wiatru jest dwukrotnie mniejsza od prędkości fal, martwe fale stanowią około 95 % wszystkich fal. Za martwą uważamy falę, która powstała w wyniku innego wiatru od obecnie wiejącego (odległego lub po prostu tego, który się już skończył). Można dodać, że martwiak to jedno z najbardziej nieprzyjemnych zjawisk na morzu.

⁷ Trzeba by wyliczyć „gęstość powierzchniową” galaktyki w pobliżu Słońca. W ogóle zadanie nie jest proste i realne rachunki wymagają trochę umiejętności, ale jest b. ciekawe. M.in. jego rozwiązanie miałoby tłumaczyć okresowe zjawiska na Ziemi gdy Słońce przechodzi przez płaszczyznę Galaktyki, Ziemia może podlegać np. zlodowaceniom.

⁸ Bardzo interesującym z praktycznego punktu widzenia jest omówienie rozchodzenia się światła we Wszechświecie w tym mierzenie odległości i jasności obiektów. De facto od tego należałoby rozpocząć zapoznanie uczniów z prawem Gaussa. Też chciałem od tego zacząć, ale ... temat jest na tyle obszerny, że rozsądziłby ramy tekstu.



Teorie fizyczne a życie człowieka

Czy teorie fizyczne mikro- i makroświata mają wpływ na ludzkie życie?

Edward Rydygier

Na Zjeździe Fizyków w Gdańsku we wrześniu 2023 roku aktywiści środowiska nauczycielskiego postulowali, aby nie ograniczać nauczania fizyki w szkole tylko do realizacji coraz bardziej redukowanej podstawy programowej, ale uzupełniać treści nauczania informacjami o aktualnych nagrodach Nobla z fizyki i przez objaśnianie uczniom najnowszych osiągnięć i wynalazków z zakresu fizyki i techniki (por. „Kondycja nauczania fizyki w polskich szkołach. 48. Zjazd Fizyków Polskich”, *Fizyka w Szkole z Astronomią*, nr 6/2023).

Te dodatkowe treści nauczania nie są tylko rozszerzeniem wiedzy podręcznikowej, a stanowią wyzwanie dla dydaktyków, gdyż w mediach odkrycia naukowe i wynalazki są prezentowane jak ciekawostki, uczonych przedstawia się jak celebrytów, a w kulturze masowej usilnie lansowane są trendy przystosowania teorii fizycznych mikro- i makroświata do życia człowieka, co powoduje chaos pojęciowy. Chodzi tu głównie o różne koncepcje teoretyczne powstałe z rozwinięcia szczególnej i ogólnej teorii względności oraz zasad mechaniki kwantowej. Należy podkreślić, że próby powiązania teorii fizycznych, czy nawet hipotez, z życiem człowieka podejmują też fizycy i to posiadający znaczący dorobek naukowy.

Konsekwencje upowszechniania teorii makroświata

W kulturze masowej, głównie w literaturze i filmach z gatunku *science-fiction*, wykorzystywane są od dawna koncepcje wywodzące się z ogólnej teorii względności, jak podróże w czasie, hiperprzestrzeń, światy równoległe, czarne dziury, piąty wymiar, czy ostatnio tunele czasoprzestrzenne.

Podróże w czasie (serial *Dark*, film *Wehikuł czasu*) oraz loty statków kosmicznych w hiperprzestrzeni (serial *Star Trek*, filmy z cyklu *Star Wars*) ze względu na zdecydowaną krytykę naukowców, odbiorcy traktują jako nierealne rozwiązania pod względem naukowym, ale atrakcyjne jako rozrywka. Tymczasem koncepcja „tuneli czasoprze-

strzennych” w filmie *Interstellar* została zaprezentowana w tak atrakcyjnej i sugestywnej formie, że widzom wydało się możliwe do zrealizowania (Rys. 1).

Koncepcja tuneli czasoprzestrzennych została wykorzystana w filmie *s-f Interstellar* (z 2014 roku) do podróży do odległych zakątków Wszechświata. Film został nagrodzony Oscarem (2015 rok) za najlepsze efekty specjalne (i nominowany w 4 innych kategoriach). W filmie zagraли znani hollywoodzcy aktorzy, jak Michael Caine, Anne Hathaway, Matt Damon, Ellen Burstyn.

Początkowo reżyserii podjął się sam Steven Spielberg. W filmie przedstawiono egzystencję ludzkości po globalnej katastrofie klimatycznej. Głównym zadaniem ocalałych ludzi jest uprawa zbóż i kukurydzy, aby zapewnić pożywienie. Ale w tajnym ośrodku naukowym grupa naukowców odkrywa w przestrzeni kosmicznej tunel cza-



Rys. 1. Reklama filmu „Interstellar”. Źródło: portal reklamowy „Filmweb”

soprzestrzenny, który umożliwia poszukiwanie nowego domu dla ludzi pozostałych na zniszczonej Ziemi. Dzięki nowoodkrytemu w Kosmosie tunelowi czasoprzestrzennemu badacze pokonują granice do tej pory przekraczające ludzkie możliwości podróżowania w innym wymiarze.

Film *Interstellar* oparty został na hipotezie naukowej tuneli czasoprzestrzennych (w jęz. ang. *Wormholes*, co nawiązuje do dziur wygryzionych przez robaka w jabłku) opracowanej przez fizyka teoretyka (i astrofizyka) Kipa Thorne'a (ur. 1940 r.) z *Caltech* (skrót od ang. nazwy *California Institute of Technology*) w Pasadenie w Kalifornii na przedmieściach Los Angeles.

Thorne współpracował jako konsultant naukowy z reżyserem Christopherem Nolanem przy realizacji filmu, a wcześniej z bratem reżysera Jonathanem Nolanem przy pisaniu scenariusza, co razem opisali w książce pt. „Interstellar i nauka” (tytuł oryg. *The science of interstellar*, polskie wydanie: Prószyński i S-ka, Warszawa 2015). Thorne nadzorował m.in. proces tworzenia widowiskowej wizualizacji czarnej dziury (Rys. 2).

Prof. Kip Stephen Thorne jest noblistą, nagrodę Nobla z fizyki otrzymał w 2017 roku wraz Rainerem Weisssem (ur. 1932 r., profesor *MIT*) i Barrym Barishem (ur. 1936 r., profesor *Caltech*) za zaobserwowanie fal grawitacyjnych, które są jedną z konsekwencji ogólnej teorii względności Alberta Einsteina. Jest też znanym popularyzatorem nauki, w Polsce oprócz książki „Interstellar i nauka”, została wydana inna jego książka popularyzatorska „Czarne dziury i krzywiżny czasu”.

Wraz z polską astrofizyczką Anną Żytkow (ur. 1947) pracującą w Uniwersytecie w Cambridge, wymyślił i opracował teoretycznie model nowego rodzaju gwiazd (powstałych z połączenia dwóch innych gwiazd) zwanych obiektami Thorne-Żytkow.

Oryginalną koncepcję tunelu czasoprzestrzennego Kip Thorne opracował w 1988 roku wraz ze swoim ówczesnym studentem Mikiem Morrisem (tunel Morris-Thorne'a) w oparciu o tunel czasoprzestrzenny zwany mostem Einsteina-Rosena (*Einstein-Rosen bridge*), który został tak zmodyfikowany, aby można było przesłać przez niego energię i materię.

By powstrzymać czasoprzestrzeń tunelu przed zapadnięciem się, Thorne i Morris ustabilizowali ją tzw. egzotyczną materią posiadającą ujemną energię. Tunel czasoprzestrzenny to hipotetyczna właściwość topograficzna czasoprzestrzeni stanowiąca skrót pomiędzy co najmniej dwoma obszarami Wszechświata lub rodzaj mostu łączącego wszechświaty.

Tunele czasoprzestrzenne są przedmiotem poszukiwań i polemik współczesnych fizyków. Chociaż do dzisiaj nie zaobserwowano w Kosmosie żadnego tunelu czasoprzestrzennego, ale w ramach ogólnej teorii względności Einsteina istnienie tuneli jest możliwe w niektórych modelach czasoprzestrzeni.

Dzięki tunelom czasoprzestrzennym możliwa byłaby podróż do odległych regionów Wszechświata we względnie krótkim czasie, szybciej niż dotarłoby tam światło, ale bez konieczności przekroczenia prędkości światła w próżni dla podróżującego przez tunel. Ponieważ tunele łączą ze



Rys. 2. Wizualizacja czarnej dziury z filmu „Interstellar”. Źródło: portal reklamowy „Filmweb”

sobą regiony czasoprzestrzeni, umożliwiałyby one nie tylko podróż do odległych regionów Wszechświata, lecz również podróżowanie w czasie. W filmie *Interstellar* ukazane zostały obie te możliwości tuneli czasoprzestrzennych.

Książka „Interstellar i nauka” jest godną polecenia pozycją popularnonaukową, gdyż nie tylko opisuje współpracę reżysera z autorem koncepcji naukowej przy kręceniu filmu, a wcześniej na etapie pracy nad scenariuszem, ale jest ciekawym wykładem napisanym językiem zrozumiałym dla zwykłego czytelnika, w którym w przystępny sposób wyjaśnione zostały powstanie i ekspansja Wszechświata, a także zaprezentowane zostały koncepcje kosmologiczne w oparciu o ogólną teorię względności. Wydawca książki „Interstellar i nauka” tak reklamuje film Christophera Nolana i wkład Kipa Thorna:

Reżyser zabiera widzów we wspaniałą podróż do najodleglejszych zakątków Wszechświata a nawet poza nasz Wszechświat, do piątego wymiaru nazywanego przez fizyków hiperprzestrzenią. Niezwykła intryga filmu i wspaniałe efekty specjalne są oparte na solidnych podstawach naukowych. Kip Thorne, jeden z najwybitniejszych współczesnych fizyków już od samego początku zaangażował się w proces powstawania filmu. Czarne dziury, tunele czasoprzestrzenne, zakrzywienie czasu i przestrzeni, osobliwości, kwantowa grawitacja, anomalie grawitacyjne, piąty wymiar, hypersześcian, Kip Thorne wyjaśnia w książce „Interstellar i nauka” te i wiele innych zdumiewających zjawisk pokazanych w filmie, i czyni to z ogromnym zaangażowaniem. Dzięki tej książce można się przekonać, jak bardzo fascynujące są naukowe odkrycia i hipotezy, zbliżające nas do zrozumienia Wszechświata.

Natomiast Christopher Nolan, reżyser filmu *Interstellar*, w przedmowie do książki tak pisze:

Ta książka doskonale pokazuje, że Kip jest obdarzony żywą wyobraźnią i nie szczędzi wysiłków, by przybliżyć naukę tym z nas, którzy nie mają jego ogromnych zdolności intelektualnych ani przebogatych zasobów wiedzy. Chciałby, żeby ludzie zrozumieli niesamowite fakty związane z naszym Wszechświatem i dali się im uwieść.

W filmie *Interstellar* czarna dziura nazywa się Gargantua. Jest to obiekt o wielkiej masie, który umożliwia podróż do innych galaktyk i znalezienie nowego domu dla ludzkości.

Kip Thorne aktywnie uczestniczył w realizacji filmu i często przebywał na planie filmowym rozmawiając z aktorami i oceniając scenografię. Aktor Michael Caine, który zagrał rolę profesora – kierownika zespołu badawczego i odkrywcy tunelu czasoprzestrzennego nawet upodobił się do Uczzonego zapuszczając bródkę. Reżyser prosił Thorna o zapisanie tablic odpowiednimi wzorami matematycznymi, które w filmie miałyby być efektem pracy postaci Profesora.

Fizyka kwantowa a życie człowieka

W odpowiedzi na przyznanie nagrody Nobla z fizyki za osiągnięcia w rozwoju fizyki kwantowej i ich wykorzystanie w komputerach kwantowych czy w kryptologii (por. „Za co Nobel 2022?”, *Fizyka w Szkole z Astronomią*, nr 6/2023), media starają się odnieść koncepcje fizyki kwantowej opisującej zjawiska mikroświata do życia człowieka, w tym do jego doznań psychicznych i zachowań społecznych.

W 2022 roku Nagrodę Nobla z fizyki otrzymali Alain Aspect (ur. 1947, prof. *Ecole Polytechnique* w Paryżu), John F. Clauser (ur. 1942 r., z *Livermore National Laboratory* i *University of California* w Berkeley) i Anton Zeilinger (ur. 1945 r., prof. na Uniwersytecie Wiedeńskim) za „eksperymenty ze splątaniem fotonami, wykazanie naruszenia nierówności Bella i pionierskie badania nad informacją kwantową”.

Ich prace nad splątaniem kwantowym otworzyły drogę do nowych technologii w dziedzinie przetwarzania i przesyłania informacji. Badacze wykorzystali splątane fotony, aby przeprowadzić eksperymenty, które potwierdziły fundamentalne aspekty mechaniki kwantowej. Wykorzystali splątanie do naruszenia nierówności Bella, tj. ich prace wykazały, że mechanika kwantowa, w przeciwieństwie do klasycznej fizyki, dopuszcza istnienie zależności między częstkami oddalonymi od siebie. Eksperymenty te stanowią podstawę dla rozwoju innowacyjnych technologii

kwantowych, takich jak komputery kwantowe i szyfrowanie kwantowe.

Nie tylko media, ale także fizycy i to o uznanym dorobku naukowym zajmują się wykorzystaniem fizyki kwantowej w życiu człowieka, m.in. prowadzą badania w zakresie wpływu zjawisk kwantowych na świadomość człowieka, a nawet na uzdrawianie z ciężkich chorób.

Wykorzystaniem osiągnięć fizyki kwantowej w medycynie zajmuje się fizyk teoretyk dr Amit Goswami, który swoje badania przedstawił w książce pt. „Lekarz kwantowy” (tyt. oryg. w jęz. ang. *The Quantum Doctor*), wydanej w Polsce przez Wydawnictwo Kobiectwo (wyd. III, Białystok 2023) (Rys. 3).

Wykorzystanie koncepcji fizyki kwantowej do leczenia człowieka Wydawca wpisał w rozwój medycyny alternatywnej, nazwanej medycyną integralną, reklamując książkę w następujący sposób:

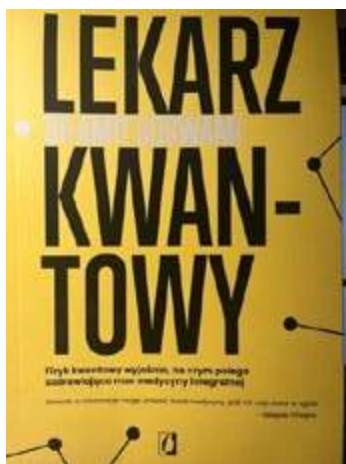
Skuteczność medycyny integralnej potwierdza nowoczesna fizyka kwantowa. Z tej perspektywy dowiesz się, w jaki sposób działa uzdrawianie umysłu i ciała, jak funkcjonują chińskie i hinduskie systemy lecznicze i na czym polega homeopatia. Odkryjesz też, dlaczego pozytywne rezultaty przynoszą leki i operacje, jak również leczenie dłońmi lub terapia ziołowa. Goswami wierzy, że źródło choroby i uzdrowienia tkwi w świadomości, dlatego medycyna integracyjna, która uwzględnia moc sprawczą umysłu, ma do zaoferowania pacjentom i lekarzom o wiele szersze spektrum możliwości w kwestii uzdrawiania.

Autor dr Amit Goswami (Rys. 4) uważa, że nad ciałem nie panuje umysł, a świadomość i z tego punktu widzenia powołuje się na obowiązującą w fizyce kwantowej zasadę nieoznaczoności Heisenberga, według której dla materialnego obiektu kwantowego można jednocześnie zmierzyć położenie oraz pęd jednostki, ale tylko jedna z tych wielkości będzie precyzyjna. Wg Goswami’ego zasadę nieoznaczoności można odnieść do ruchu myśli: człowiek jest w stanie określić treść myśli, bądź jej kierunek (skorządzenie), gdyż:

Jeśli skupiamy się na treści myśli (np. kiedy powtarzamy w myślach te same słowa niczym mantrę), tracimy poczucie kierunku, w którym zmierzała nasza myśl. Jeżeli rozumiemy na drodze wolnych skojarzeń, nie będziemy w stanie przypomnieć sobie potem treści swojej myśli. Z pewnością psychiatrzy powinni zapoznać się z zasadą nieoznaczoności myśli.

Dr Amit Goswami (ur. 1936 r. w Indiach) dowodzi, że zjawiska kwantowe mają wpływ na umysł człowieka i dlatego są pomocne przy uzdrawianiu z chorób, które konwencjonalna medycyna traktuje jako dolegliwości wyłącznie materialne i stosuje w leczeniu leki oraz operacje.

Prof. Goswami przez 32 lata wykładał fizykę pracując jako wykładowca akademicki w Instytucie Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Stanu Oregon. W wieku 38 lat zmienił zainteresowania fizyką nuklearną i skupił się na



Rys. 3. „Lekarz kwantowy”. Źródło: własne, zdjęcie autora



Rys. 4. Amit Goswami. Źródło: portal „Lubimy czytać”

kosmologii kwantowej, teorii pomiaru kwantowego i zastosowaniu mechaniki kwantowej w dylemacie psychofizycznym. Na świecie jest znany jako pionier paradygmatu „nauki w obrębie świadomości”.

Prof. Goswami jest także znanym popularyzatorem nauki, występuje w filmach popularyzatorskich i dokumentalnych, wygłasza wykłady otwarte podróżując po USA i całym świecie (jako emeryt) oraz prowadzi własną stronę internetową. W Polsce wydano wiele jego książek popularnonaukowych, jak m.in. „Kwantowy umysł” (2013 r.), „Fizyka duszy” (2015 r.), „Kwantowy świat” (2024 r.).

Goswami zwraca uwagę na tzw. uzdrawianie kwantowe, kwestionowane przez medycynę konwencjonalną, chociaż lekarze medycyny tradycyjnej wykorzystują w leczeniu efekt placebo, akceptują spontaniczne uzdrawianie oraz dobroczynny wpływ na polepszenie zdrowia pacjenta życzliwego środowiska, w którym odbywa się leczenie. Te niewytłumaczalne z punktu widzenia medycyny konwencjonalnej zjawiska autor „Lekarza kwantowego” wiąże z aspektem kwantowym. Jak wyjaśnia:

Skupiając się na powyższych przykładach, pomijamy jednak istotny składnik procesu leczenia, a mianowicie aspekt kwantowy. Istnieje kilka wyraźnych kwantowych aspektów leczenia umysłu i ciała: przeskok kwantowy, nielokalność kwantowa, przyczynowość odgórna oraz hierarchia splątania. Dopóki nie weźmiemy pod uwagę fizyki kwantowej związanej z procesami leczenia umysłu i ciała, dopóty nie będziemy w stanie w pełni zrozumieć, dlaczego są one tak skuteczne.

Dr Goswami kontynuuje badania lekarza Deepaka Chopry, który w latach 80. poszukiwał wyjaśnienia zjawiska samoleczenia. Chopra (ur. 1946 r. w New Delhi), amerykański lekarz, pisarz i filozof, wprowadził koncepcje świadomości i fizyki kwantowej do leczenia umysłu i ciała, czym zapoczątkował nowy naukowy model zjawiska samoleczenia wykraczający poza ramy fizyki klasycznej, chemii czy biologii. Wg Chopry kwestią fundamentalną

dla leczenia umysłu i ciała jest przyczynowość odgórna polegająca na tym, że myśl, emocja lub przekonanie rozpoczyna proces leczenia. Goswami rozwinął badania Chopry poprzez odkrycie, że świadomość jednocześnie rozpoznaje i wybiera, spośród wszystkich kwantowych możliwości oferowanych przez umysł i sferę nadmentalną, myśl o samoleczeniu oraz stan mózgu, który tworzy nową cząsteczkę neuropetutu.

Wpływ zjawisk kwantowych na świadomość człowieka badał także znany fizyk teoretyk i matematyk, noblista z 2020 roku, prof. Roger Penrose (ur. 1936 r.) z Uniwersytetu w Oksfordzie, który nawet stworzył koncepcję kwantowego pola świadomości (por. „Roger Penrose, fizyk noblista – oryginalny popularyzator nauki”, *Fizyka w Szkole z Astronomią*, nr 6/2024).

Jego badania w tym zakresie zostały ocenione przez świat naukowy jako kontrowersyjne, a koncepcja związku zjawisk kwantowych ze świadomością spotkała się z wieloaspektową krytyką specjalistów z wielu dziedzin. Wskutek tej krytyki Penrose zaprzestał dalszych badań w tym zakresie, ale też nigdy nie zaprzeczył ich prawdziwości. Nagrodę Nobla otrzymał za badania teoretyczne nad rozwinięciem ogólnej teorii względności, a szczególnie za teoretyczny opis czarnych dziur.

Fizyka kwantowa funkcjonuje w kulturze masowej, gdyż media uznały, że doniesienia o komputerach kwantowych czy kryptologii kwantowej (Nobel 2022) są atrakcyjnymi tematami dla widzów i czytelników, które mają bezpośrednie przełożenie na życie człowieka (por. „Nowoczesna popularyzacja fizyki”, *Fizyka w Szkole z Astronomią*, nr 2/2024).

W odpowiedzi na medialną popularyzację fizyki kwantowej, twórcy kultury podejmują próby przeniesienia teoretycznego opisu mikroświata do wyjaśnienia życia wewnętrznego człowieka. Postąpiła tak warszawska aktorka Julia Wyszyńska, autorka monodramu, który zatytułowała „Fizyka kwantowa, czyli rozmowy nigdy nieprzeprowadzone”, gdyż uznała, że taki tytuł spektaklu zaintryguje widzów.

Tymczasem postać 8-letniego chłopca, w którego wcieliła się aktorka monodramu mówi tylko, że nauka szkolna mu nie idzie, a najtrudniejszym przedmiotem jest fizyka. W Warszawie monodram Julii Wyszyńskiej w 2022 roku stał się popularnym spektaklem, został nawet wystawiony pod patronatem Burmistrza Śródmieścia z okazji Międzynarodowego Dnia Teatru 27 marca 2022 roku w budynku użytkowanym przez fundację teatralną „Komuna Warszawa”, gdzie wcześniej mieściło się gimnazjum (a jeszcze dawniej szkoła podstawowa), które zostało zmuszone do opuszczenia budynku na skutek decyzji ówczesnych władz Warszawy o wyprowadzeniu szkół ze Śródmieścia. Dzięki protestom mieszkańców, budynek szkoły ocalał i nie został zburzony przez deweloperów, aby w jego miejsce zbudować apartamentowce i obecnie służy społecznej działalności kulturalnej.

Oprócz wystawiania spektaklu w „Komunie Warszawa” (premiera), gościnne występy odbyły się w znanym warszawskim Teatrze Powszechnym na Pradze. Pomimo tego, że artystka odgrywała postać 8-letniego chłopca, spektakl był dozwolony dla widzów od 16. roku życia.

Po obejrzeniu spektaklu, a także po wnikliwym przestudiowaniu materiałów reklamowych można dojść do wniosku, że jego autorka wykorzystanie zasad fizyki kwantowej nie sprowadziła tylko do chwytliwego tytułu, a odniosła je do życia wewnętrznego człowieka, gdyż jak pisze recenzent w materiałach reklamowych:

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.

Aktorka spektaklu Julia Wysznińska, scenografka, reżyserka i aktorka zrozumiała z popularnonaukowych przekazów medialnych, że fizyka kwantowa opisuje świat tajemniczy, niemal magiczny, w którym wszystko jest możliwe, gdzie nie ma ograniczeń czasowych, dlatego można w nim spotkać nawet osoby z przeszłości. Spektakl „Fizyka kwantowa” może stanowić przykład psychospołecznego odbioru medialnych informacji o najnowszych osiągnięciach fizyki.

Podsumowanie. Historia wielkiego podrywu

Oddziaływanie fizyki teoretycznej na życie człowieka świetnie ilustruje amerykański serial komediowy „Historia wielkiego podrywu” (tyt. ang. *The Big Bang Theory*) z lat 2007-2019 (12 sezonów). W serialu przedstawione jest życie genialnych młodych naukowców pracujących w Caltech w Kalifornii. Jak reklamuje film Dystrybutor (na portalu „Filmweb”):

Fizycy Leonard i Sheldon rozumieją wszystko począwszy od nieuchronnego przyciągania czarnej dziury, a skończywszy na skomplikowanej budowie atomu. Ale jeśli złożycie te atomy w kobietę, wtedy ich rozumowanie nagle się kończy. Dla Leonarda i Sheldona nie ma tajemnic w naukach ścisłych czy grach komputerowych, ale w relacjach damsko-męskich nie radzą sobie w ogóle.



Rys. 5. Noblista Kip Thorne w scenie serialu „Historia wielkiego podrywu”. Źródło: portal „Filmweb”

Serial zdobył nagrodę Złoty Glob, 52 inne nagrody oraz 172 nominacje. Obecnie uważany jest za serial kultowy. W serialu występują gościnnie postacie autentyczne, jak prof. Stephen Hawking, założyciel firmy Apple Steve Wozniak, Bill Gates, Elon Musk, astronauta (misja księżycowa) Buzz Aldrin, aktorzy z „Gwiezdných Wojen” Carrie Fisher i Mark Hamill, a także noblista, profesor z Caltechu Kip Thorne (w świecie filmu znany z „Interstellara”).

Kip Thorne wystąpił w odcinku 8 w ostatnim 12 sezonie w scenie zanegowania badań głównego bohatera serialu fizyka Sheldona Coopera (rys. 5). Rektor Uczelni zorganizował przyjęcie z udziałem laureatów nagrody Nobla w celu pozyskania poparcia dla kandydatury Sheldona i jego żony do nagrody Nobla. Przyjaciele Sheldona zyskują aprobatę Thorne’a przypomnieniem jego sukcesu w współtworzeniu filmu *Interstellar*.

Autorzy serialu Chuck Lorre i Bill Prady w 2007 r. wpadli na pomysł nakręcenia serialu komediowego o „nerdach”, czyli ludziach pasjonujących się naukami ścisłymi, filmami *science-fiction*, komiksami oraz grami komputerowymi. Oprócz wyobcowania bohaterów i ich trudności w kontaktach z otoczeniem, serial przedstawia konfrontację naukowców zajmujących się wysoko zaawansowanymi zagadnieniami nauk ścisłych a społeczeństwem, które nie rozumie ich badań. Przy czym obraz naukowców na znanej amerykańskiej uczelni wcale nie jest idealny. Badacze konkurują ze sobą, walczą o zdobycie funduszy na własne badania, eliminują konkurentów do nagród i premii, nawet jeśli chodzi o ubieganie się o nagrodę Nobla. Uczelnia musi zabiegać o fundusze na działalność wśród instytucji społecznych i prywatnych darczyńców, którzy zupełnie nie rozumieją celowości zaawansowanych badań teoretycznych i ich przydatności dla społeczeństwa.

Badania podstawowe w naukach ścisłych są czasochłonne i wymagają znacznych środków finansowych, tymczasem społeczeństwo oczekuje szybkich korzyści z tego typu badań. Media w obecnych czasach stanowią potężne narzędzie oddziaływania na społeczeństwo i sami uczeni muszą z nimi współpracować, choćby dlatego, aby pozyskać fundusze na badania. Dochodzi jednak do tego, że społeczeństwo czerpie wiedzę nie bezpośrednio od naukowców i instytucji edukacyjnych, ale z mediów. I tak w społeczeństwie tworzony jest nieprawdziwy obraz nauki. Dlatego rozszerzenie treści nauczania przedmiotów ścisłych o wyjaśnianie uczniom nowych odkryć w nauce i technice oraz krytyczne odniesienie do przekazów medialnych słusznie uważane jest przez aktywistów dydaktyków za ważne zadanie edukacyjne.

Edward Rydygier

Autor jest fizykiem jądrowym, doktorem n. techn., posiada tytuł Fizyka Europejskiego (EurPhys), działa w Sekcji Dydaktyki Fizyki PTF, interesuje się nowoczesną popularyzacją nauki i rolą mediów w edukacji i popularyzacji fizyki

„Moje spojrzenie na Czerwoną Planetę”

Krzysztof Kowalczyk

Astronomią interesowałem się od czasów szkolnych, a Marsem w szczególności. Nie było więc przypadkiem, że pracę magisterską z fizyki pisałem właśnie o Marsie, a rok później – już jako pracownik Planetarium Centrum Nauki Kopernik w Warszawie – komentowałem m.in. lądowanie łazika Curiosity na Czerwonej Planecie.

Gdy wcześniej w 2005 r. jako uczeń IV LO im. Stefania Sempołowskiej w Lublinie referatem o Marsie wygłoszonym na Wojewódzkim Seminarium Astronomiczno - Astronautycznym we Włodawie zakwalifikowałem się do finału Ogólnopolskiego Młodzieżowego Seminarium Astronomicznego w Grudziądzu, po Marsie jeździły dwa bliźniacze łaziki (Spirit i Opportunity) i był to jeden z wiodących tematów omawianych na tym seminarium. Dziś wielu uczestników tego seminarium sprzed 20 lat jest już znanymi astronomami, nauczycielami i pracownikami planetariów i „zaraża pasją” kolejnych adeptów fizyki i astronomii. Coroczny konkurs na referat z zakresu astronomii i astronautyki nadal jest organizowany pod auspicjami Planetarium i Obserwatorium Astronomicznego w Grudziądzu (więcej informacji na stronie: <https://www.planetarium.grudziadz.pl/omsa>) i od lat jest znakomitą okazją do zapoznania się z aktualną wiedzą i metodami badawczymi astronomii oraz do zdobycia pierwszych doświadczeń z wystąpień publicznych polegających na prezentacji wiedzy naukowej. Wracając po latach do naszych dawnych tekstów i wystąpień porównujemy co wiedzieliśmy wtedy, a co wiadomo teraz i jaki postęp się dokonał w badaniach kosmosu.

Przedmiotem niniejszej pracy jest m.in. przedstawienie geologii Czerwonej Planety, począwszy od jej narodzin, przez utratę dipolowego pola magnetycznego, wypiętrzanie płaskowyżu Tharsis, procesy wulkaniczne czy globalne zmiany klimatyczne, które doprowadziły do utraty powierzchniowej wody w stanie ciekłym.

Ogólna charakterystyka Marsa

Mars to planeta wielkich skrajności i kontrastów, niewątpliwie najlepiej poznana po Ziemi. Ma ślady niegdyś płynącej wody na powierzchni, rzadką atmosferę, największe wulkany w Układzie Słonecznym o rozmiarach setek kilometrów i szczątkowe pole magnetyczne. Młodsza powierzchnia na półkuli północnej ma zadziwiająco delikatną rzeźbę (jeśli nie liczyć nielicznych kraterów), a skorupa jest na rozległych obszarach półkuli północnej wyraźnie cieńsza (nawet kilkakrotnie) niż na większości obszarów starszej półkuli południowej.

Obecnie przede wszystkim jednak badamy powierzchnię, atmosferę czy skały przypowierzchniowe Marsa, a mniej wiemy o wnętrzu planety. Dopiero misja InSight, która lądowała na Marsie w 2018 r., pozwoliła dowiedzieć się więcej o jego budowie wewnętrznej, m.in. odkrywając, że Mars ma większe niż wcześniej zakładano jądro o promieniu 1830 ± 40 km. Powstało kilka interesujących hipotez, mających wyjaśnić m.in. powstanie tak osobliwych obszarów, jak Tharsis czy dolina kanionów Valles Marineris, postulujących gwałtowne procesy we wnętrzu Czerwonej Planety, w tym erupcje jądra i napór płaszcza

Ważniejsze dane charakteryzujące Marsa przedstawiają się następująco:

- masa: 0,107 masy Ziemi;
- średnia odległość od Słońca: 228 mln km;
- rok marsjański: 687 dni ziemskich;
- doba słoneczna: 24 godz. 39 min. 36 sek.;
- średnica równikowa: 6800 km;
- nachylenie równika do orbity: $25,19^\circ$;
- nachylenie orbity do ekliptyki: $1,85^\circ$;
- skład atmosfery: dwutlenek węgla – 95,32 %, azot – 2,7 %, argon – 1,6 %, tlen – 0,13 % oraz śladowe ilości tlenu węgla, pary wodnej, neonu, kryptonu i ksenonu;
- średnie ciśnienie atmosferyczne na powierzchni: ok. 7 mb;
- temperatura na powierzchni: średnia 210 K (-63°C), maksymalna 293 K (20°C), minimalna 133 K (-140°C);
- dwa księżyce: Fobos i Deimos.

na skorupę skutkujący wypiętrzeniem wielkiego płaskowyzu Tharsis.

Czerwona Planeta nieprzypadkowo budzi szczególne zainteresowanie astronomów. Pomimo istotnych różnic warunki klimatyczne na Marsie wciąż są najbardziej zbliżone do ziemskich ze wszystkich planet Układu Słonecznego.

Narodziny planety

Powstanie Marsa – podobnie jak i innych planet w Układzie Słonecznym – związane jest z narodzinami Słońca. Mars zaistniał ok. 4,6 mld lat temu w dysku protoplanetarnym otaczającym młode Słońce. Niepozorne drobiny pyłowe, zbudowane z tlenków metali i związków krzemu, pokryte prawdopodobnie cienkimi powłokami lodowymi, skupiły się w płaszczyźnie równikowej dysku. Pyłki uderzały o siebie i się odbijały, by znowu ulec zbliżeniu. Zlepiały się też ze sobą w wyniku zderzeń niesprężystych, co wymuszone było w znacznej mierze przez oddziaływania grawitacyjne w pierwotnym dysku i siły Van der Waalsa.

Proces ten był tak wydajny (rzędu kilkudziesięciu procent), że powstałe w rezultacie, zdolne do kolapsu grawitacyjnego zagęszczenia – w istocie zalążki pierwotnych w Systemie Słonecznym jąder kometarnych i planetoid – miały odcisnąć swe piętno w nieuchronnym procesie formowania planet. Grawitacja zginała stosy skał i zagęszczała materię tak, że we wnętrzach odpowiednio dużych, gęstych i masywnych skupisk materii pod ogromnym ciśnieniem i przy znacznej temperaturze w wyniku stopienia materiału skalnego pojawiały się ogromne ilości magmy. Tak właśnie m.in. narodził się Mars – równocześnie pod wpływem siły ciężenia cięższe pierwiastki poczęły spływać ku centrum protoplanety.

Mars stawał się planetą w miarę jak wyodrębniała się u niego warstwowa struktura – płaszcz i bogate w żelazo jądro; takie jest bowiem podstawowe kryterium pozwalające odróżnić protoplanetę od planety. Jakkolwiek taki podział może wydawać się nieco sztuczny, to moim zdaniem należy uzmysłowić sobie, że narodziny planety nie są procesem spontanicznym (aczkolwiek bardzo krótkim w geologicznej skali czasu).

Nie bez znaczenia jest już różnica między z początku dosyć jednorodną protoplanetą, a mającym ją utworzyć skupiskiem planetozymali – spójnym, choć chaotycznie niejednorodnym. Każda z takich planetozymali, nie „zciepiona” z innymi, byłaby tylko zlepkiem nieprzetopionego luźnego materiału skalnego, związanego bardzo słabą siłą grawitacji. Razem mogły jednak tworzyć coraz masywniejsze skupisko, dążące do bardziej jednorodnej gęstości przez kolaps grawitacyjny. Naturalnie, w jego centrum gęstość, tak czy owak, byłaby największa, ale znaczne różnice gęstości miały się pojawić po rychłym stopieniu materiału budulcowego i opadnięciu wielkich ilości najcięższych pierwiastków ku centrum – nie spowodowałyby ich sam kolaps grawitacyjny.

Szczegóły procesu powstawania planety Mars – o których z powodu jego „geologicznej spontaniczności” nie mówi się prawie nic w planetologii – spróbowałbym więc sprowadzić do trzech etapów. Pierwszy z tych bardzo krótkich geologicznie hipotetycznych etapów charakteryzowałyby się chaotyczną niejednorodnością rozkładu



Rys. 1. Wizualizacja Czerwonej Planety (wygląd współczesny) w programie Cartes du Ciel.

planetozymalnej masy. Cechowała ona poddawane od samego początku silnym uderzeniom (a być może i fragmentacjom) powiększające się skupisko związanych grawitacyjnie – i niekoniecznie od razu w jedno ciało – planetozymali. Być może właśnie w swoistym roju planetozymali powstały dwa małe księżycy Marsa – Fobos i Dejmos – niewykluczone jednak, że zostały one później przechwycone grawitacyjnie przez planetę jako planetoidy z pasa planetoid.

Dzięki tendencji do skupiania się materii ku środkowi ciężkości i jej zapadaniu grawitacyjnemu powstało ciało o względnie jednorodnej gęstości, którego wnętrze uległo przetopieniu, zaś gęsta magma początkowo mogła niwelować niejednorodności gęstości materii pochodzącej z różnych planetozymali. Taki prawdopodobnie był Mars w stadium protoplanety (drugi etap w moim opisie). Nieuchronnie jednak – na skutek istniejącego gradientu ciśnienia, będącego wynikiem własnego ciężenia protoplanety – we wnętrzu pra-Marsa pojawił się niewielki gradient gęstości, który z czasem narastał. Przyrost gradientu gęstości w jednostce czasu zaczął wyraźnie dążyć do zera wraz z osiągnięciem przez Marsa pierwszych zarysów budowy warstwowej, co zapoczątkowało trzeci etap, czyli stadium planety.

Fizycznie rzecz ujmując, najważniejsze zarysy obecnej struktury wewnętrznej Marsa ustanowione zostały przez podział całego obiektu na zasadnicze koncentryczne warstwy o zróżnicowanej gęstości (przynajmniej jądro i płaszcz). Właśnie fakt, że drogę do tego ostatniego stadium otworzyć mogło tylko i wyłącznie przetopienie materii skalnej, poprzedzone bardzo silnym metamorfizmem – procesem niszczenia skał pod ogromnym ciśnieniem i w znacznej temperaturze – skłonił mnie ku oryginalnemu podejściu do stadium protoplanety. Proponuję, aby traktować pra-Marsa jako przejściowy etap, w którym ciało mogące stać się planetą, teoretycznie nawet bez dalszego dopływu masy z zewnątrz, było niemal w całości płynną i półpłynną kulą, lecz nie posiadało jeszcze wyraźnie wyodrębnionych ogólnych zarysów budowy warstwowej.

Czy jednak łatwo byłoby uchwycić granicę między protoplanetą a planetą, tylko dlatego, że przyjęte przeze mnie

kryterium jest dość wyraźne (albo istnieje warstwowa struktura, albo jej nie ma)? Z pewnością niewielkie nawet warstwowe różnice proporcji pierwiastków i warstwowe dysproporcje gęstości pod powierzchnią Marsa, świadczące o wyodrębnianiu się jądra i płaszcza, nie pojawiły się spontanicznie. Uniemożliwiało to silne wymieszanie cięższych pierwiastków z lżejszymi (wynikające z tego, że Mars powstawał z wielu planetozymali). Być może nawet przy pełnej wiedzy na temat młodego niestabilnego Marsa próba określenia tego jednego momentu, w którym ogólne zarysy jego budowy warstwowej by się pojawiły, byłaby rzeczą dosyć arbitralną. Nie zmienia to jednak faktu, że jakieś przejście do stadium planety istotnie musiało mieć miejsce. W geologicznej skali czasu mógł to być wręcz zanedbywalnie krótki, dosyć gwałtowny proces czy też krótkie stadium w historii Marsa, które z pewnością dobiegło końca na długo przed ustabilizowaniem się w miarę warunków na jego powierzchni.

W tym samym mniej więcej czasie, co jądro i płaszcz, wykształciła się zapewne pierwotna cienka marsjańska skorupa. Całkiem możliwe, że przeszywały ją nawet na całej grubości uderzenia wielkich meteoroidów, a niewykluczone, że i rozrywały potężne erupcje wulkaniczne. Część materii bogatej w pierwiastki ciężkie, pochodzącej z nowych meteoroidów żelaznych, mogła jednak z czasem mieć odcięty dostęp do wnętrza Marsa. Coraz grubsza powłoka skalna, tworzona przez zastygającą na powierzchni lawę i krystalizujące minerały, zatrzymywała coraz szybsze i coraz masywniejsze pociski. Później część żelaza, która została w skorupie reagowała z wodą i wiązała się z atmosferycznym tlenem – to właśnie obecnym w gruncie i w drobinach pyłu tlenkiem żelaza Mars zawdzięcza swą obecną rdzawoczerwoną barwę. Najnowsze badania, opublikowane na początku 2025 r. na łamach „Nature Communications” przez zespół pod kierunkiem Adomasa Valantinasa z Wydziału Nauk o Ziemi, Środowisku i Planetach na Uniwersytecie Brown (USA) wskazują zresztą, że Mars zardzewiał wcześniej niż dotychczas sądzono. Kiedy na Marsie było jeszcze sporo ciekłej chłodnej wody, ta reagując z żelazem wytwarzała pewien szczególny rodzaj tlenku żelaza - nanominerał ferrihydryt, który powstaje właśnie w środowisku wodnym i do dziś jest obecny w marsjańskim pyłe. – *Próbowaaliśmy stworzyć replikę pyłu marsjańskiego w laboratorium, używając różnych rodzajów tlenku żelaza. Odkryliśmy, że ferrihydryt zmieszany z bazaltem, skałą wulkaniczną, najlepiej pasuje do minerałów widzianych przez sondy kosmiczne na Marsie* – mówił główny autor badania Adomas Valantinas. Wcześniejsza hipoteza wyjaśniająca czerwony kolor Marsa opierała się na dominującej roli hematytu – tlenku żelaza powstałego w warunkach suchej powierzchni poprzez reakcje z marsjańską atmosferą w ciągu miliardów lat, co miało mieć miejsce po wczesnym okresie wilgotnym w historii Marsa.

Wracając jednak do najwcześniejszych etapów formowania się Marsa, to swego czasu postawiłem hipotezę, że unoszone siłą wyporu oceanu magmy meteoroidy też mogły mieć ważny przyczynek do tworzenia marsjańskiej skorupy. Byłoby to możliwe, o ile – paradoksalnie – wydłużałoby ich uderzenia proces powstawania pierwotnej



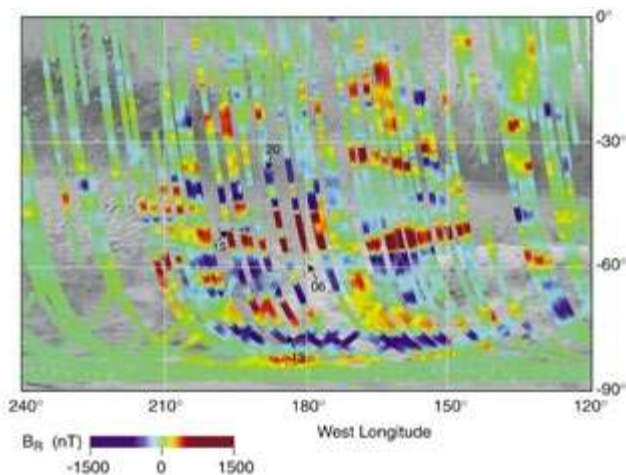
Rys. 2. Księżyc Marsa Fobos z charakterystycznym dużym kraterem Stickney na obrazie powstałym w 1978 r. ze złożenia trzech zdjęć z orbitera Viking 1.

skorupy, powodując jednak nagromadzenie materiału skalnego przy powierzchni, zaś magma wystarczająco długo byłaby odpowiednio gęsta, aby efektywnie unosić swoiste kry skalne. W każdym razie zaskakująca porowatość części planetoid, które mają na tyle niską gęstość, że ich wnętrza muszą przypominać bardziej rumowiska skalne niż litą skałę, mogłaby przemawiać na rzecz takiej hipotezy. Dotyczy to w szczególności najbardziej pierwotnych obiektów, takich jak 253 Mathilde – badana w 1997 r. przez sondę NEAR planetoida typu C o gęstości zaledwie $1,3 \text{ g/cm}^3$. Mathilde podobnie jak Fobos posiada pokaźnych rozmiarów krater, świadczący o wielkiej katastrofie, która w przypadku mniej porowatego obiektu mogłaby się skończyć jego zniszczeniem. Wielkie struktury impaktowe na tak małych ciałach niebieskich, jak Fobos czy Mathilde są silnym argumentem na rzecz ich porowatości, która przyczyniła się do tego, że ciała te nie zostały rozerwane w czasie wielkich kosmicznych kolizji, gdyż energia kinetyczna zderzenia mogła być deponowana na ich częściowe „sprasowanie”, ale już nie rozerwanie na wiele mniejszych fragmentów.

Wysoka porowatość pierwotnych planetozymali miała też niebagatelne znaczenie dla formowania Marsa i innych planet Układu Słonecznego, jako czynnik ograniczający fragmentację zderzających się obiektów, a tym samym sprzyjający ich wzrostowi w coraz większe skupiska w wyniku wzajemnych zderzeń.

Pole magnetyczne i wnętrze Marsa

Ciężkie i poddane niewyobrażalnemu ciśnieniu jądro musiało z czasem – według jednej z hipotez – zwalniać w swym ruchu wirowym względem uciskającego je płaszcza. Ruch ten bowiem – jak przypuszczają teoretycy – wywołany był prawdopodobnie u zarania dziejów Marsa przez napływające intensywnie ku centrum wielkie masy pierwiastków ciężkich. Późniejsze ustanie tej



Rys. 3. Indukcja marsjańskiego pola magnetycznego w zależności od współrzędnych areograficznych wg. danych z sondy MGS z 1999 r. Źródło: <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA02008>

dosycy osobliwej rotacji, podtrzymywanej przez opadanie po spirali na powierzchnię powiększającego się jądra materii pierwiastków ciężkich, miało hipotetyczny przyczynek do osłabienia i ustabilizowania się pierwotnego pola magnetycznego Marsa. Jeśli i jądro Ziemi obracałoby się w płynnej magmie w ten sposób, implikowałoby to ciągłą, silną rekoneksję (zmiany konfiguracji) jej pola magnetycznego na początku archaiku. Natężenie pola magnetycznego Ziemi nie uległo jednak ani 4,5 mld. lat temu, ani kiedykolwiek później tak drastycznym redukcjom, jak to w przypadku pola Marsa, w znacznej mierze dlatego, iż jej jądro zewnętrzne (jak i wewnętrzne) zachowało odpowiednią temperaturę.

Ok. 3,5 mld lat temu Mars utracił dipolowe pole magnetyczne o globalnym charakterze i posiada teraz jedynie pole lokalne. Utrata dawnej magnetosfery wiązała się z trwałym zwiększeniem ekspozycji atmosfery na działanie wiatru słonecznego, co przyczyniło się do utraty gazów atmosferycznych i globalnych zmian klimatycznych.

Pomiary wykonane przez magnetometr sondy Mars Global Surveyor (MGS) ujawniły istnienie w skorupie marsjańskiej naprzemiennych pasm o przeciwnej biegunowości. Te struktury o przeciętnej szerokości ok. 160 km i długości ok. 1000 km, podobne do liniowych anomalii magnetycznych u ziemskich den oceanicznych, wskazują na istnienie dipolowego pola magnetycznego w czasach, kiedy we wnętrzu Marsa funkcjonował mechanizm dynamo magnetohydrodynamicznego.

Wyraźne rozbieżności między natężeniem marsjańskiego pola magnetycznego przed miliardami lat (określanym również na podstawie badań właściwości magnetytu – minerału żelaza, znajdowanego często w marsjańskich meteorach), a zmierzonym przez sondy kosmiczne znikomym polem magnetycznym Czerwonej Planety, próbuje się najczęściej wyjaśnić tym, że jądro marsjańskie stygło. Około miliarda lat po powstaniu Marsa jego stygnące jądro praktycznie przestało wzbudzać pole magnetyczne, co jednak nie przesądziło o braku geologicznej aktywności wnętrza Czerwonej Planety. Wiadomo, iż jeszcze ponad miliard lat temu zachodziła na Marsie intensywna aktywność wulkaniczna, a ok. 200 mln lat temu dolina Athabasca

plynęła lawa. Trzeba też wziąć pod uwagę rozpady izotopów promieniotwórczych we wnętrzu Czerwonej Planety, które dodatkowo podwyższały temperaturę.

Według jednej ze śmiałych hipotez erupcje płynnego, krystalizującego jądra miały deformować strukturę planety. Ich przyczyną mogłoby być ochładzanie się, a w dalszej konsekwencji zastyganie wnętrza Marsa; im bowiem magma ma niższą temperaturę, tym mniejsze wywiera ciśnienie na jądro. Jeden z ostatnich silnych wybuchów – zarazem najsilniejszy – mógłby przyczynić się do wypiętrzenia potężnego płaskowyżu Tharsis, wielkości ziemskiego kontynentu i o wysokości 11 km. Zgodnie z tą odważną hipotezą eksplozja zniekształciła naciskający coraz słabiej na jądro płaszcz planety na tyle, że wielkie ilości materii skupiły się w okolicy równika u ściany skorupy. Pozostałością tych procesów mogłaby być wielka dolina kanionów Valles Marineris oraz część przynajmniej spośród mniejszych poprzecznych szczelin, obserwowanych na powierzchni Marsa zwłaszcza na półkuli południowej, gdzie bardziej pokraterowana powierzchnia wydaje się zdecydowanie starsza.

Obecnie również bez odwoływania się do tej hipotezy przyjmuje się często, że silny napór wywierany na skorupę spowodował wypiętrzenie Tharsis – trudno wyjaśnić powstanie tak wielkiego płaskowyżu wyłącznie wielkimi wpływami lawy (które też w końcu musiałyby mieć swoją przyczynę). Oczywiście nie można uciekać od poszukiwania odpowiedzi na pytanie, co mogłoby być źródłem tego niezwykle silnego wypiętrzenia i związanej z nim zdumiewającej aktywności wulkanicznej na tak małej planecie jak Mars. Samo mniemanie o takim wypiętrzeniu wymaga w mojej opinii od planetologów racjonalnego formułowania opartych na prawach fizycznych niekonwencjonalnych hipotez; takie też musi być zapewne ostateczne wyjaśnienie genezy Tharsis. Tym niemniej już dziś niektóre z hipotez formułowanych przez marsjańskich planetologów są na tyle niezwykle, że chętnie sięgają po nie nawet pisarze science fiction, np.: „Część areologów obstaje przy tezie, że płaskowyż Tharsis powstał w wyniku spadku tego samego meteorytu, który utworzył niekę Hellas, inni z kolei twierdzą, że Fobos i Dejmos to skały wyrzucone podczas zderzenia.”. Tego typu enuncjacje znajdujemy w słynnej marsjańskiej trylogii Kima Stanley’a Robinsona, który jest nie tylko sprawnym pisarzem, ale też znawcą i popularyzatorem marsjańskiej geologii, a jego opisy marsjańskich krajobrazów



Rys. 4. Mapa Marsa. Strzałkami zaznaczony obszar Tharsis. Źródło: <http://marsrovers.jpl.nasa.gov/home/index.html>



Rys. 5. Fragment mapy powierzchni Marsa z wulkanami i Doliną Marinerów (podpisy dodane przez autora artykułu). Źródło: <http://chapters.marssociety.org/polska/mar0kuu2.jpg>

w powieściach o terraformowaniu Marsa mogłyby w mojej ocenie się równać z trylogią Henryka Sienkiewicza.

Hipoteza, że Fobos tak jak ziemski Księżyc powstał z materii wyrzuconej ze swej macierzystej planety miała być sprawdzana w ramach misji sondy Fobos – Grunt, której jednym z celów był pobór próbek marsjańskiego księżycyca przez zbudowany w Centrum Badań Kosmicznych PAN penetrator geologiczny CHOMIK. Start odbył się z kosmodromu Bajkonur 08.11.2011 r., ale pojawiły się problemy z opuszczeniem orbity okołozemskiej, których nie udało się rozwiązać i misja rosyjskiego próbnika, który w 2014 r. miał po raz pierwszy sprowadzić próbki marsjańskiego księżycyca na Ziemię zakończyła się niepowodzeniem. Kolejnych prób już nie podejmowano.

We współczesnych modelach wnętrza Marsa przyjmuje się istnienie jądra o promieniu ok. 1830 km (dane z misji InSight, która badała wnętrze Marsa metodami tomografii sejsmicznej w latach 2018-2022). Amerykański lądownik InSight nie znalazł wyraźnych wskazówek, by jądro marsjańskie tak jak ziemskie dzieliło się na wewnętrzne i zewnętrzne, ustalono natomiast, że wydaje się być ono całkowicie płynne. Podczas gdy gęstość jądra Ziemi zawiera się w przedziale 9,6–18,5 g/cm³, to dla jądra Marsa jest już to jedynie 5,7–6,3 g/cm³. Jądro Marsa składa się w ok. 14-17% z siarki, która występuje głównie w postaci siarczku żelaza. Względnie niska gęstość marsjańskiego jądra wskazuje na obecność w nim domieszki lekkich pierwiastków, takich jak węgiel, tlen, krzem czy azot. Mars zbudowany jest też z krzemianowego płaszczu, który w odróżnieniu od ziemskiego nie dzieli się na wewnętrzny i zewnętrzny. Na granicy płaszczu i jądra panuje temperatura rzędu 1900-2000 K i ciśnienie 18-19 GPa. Ponad płaszczem Marsa znajduje się skorupa o grubości ok. 50 km, miejscami dochodzącej do 125 km (dla porównania: grubość skorupy Ziemi to od ok. 10 km do 70 km).

Znaczną część cech składu chemicznego Marsa przypisuje się miejscu jego powstania w Układzie Słonecznym. Siarka, fosfor i chlor, jako pierwiastki o względnie niskiej temperaturze wrzenia (równiej odpowiednio: 444,72°C, 276,85°C i -34,04°C) były prawdopodobnie usuwane przez wiatr słoneczny z obszarów bliższych Słońcu. W wyniku tego we wnętrzu Marsa i na jego powierzchni występują procentowo w większej obfitości niż w warunkach ziemskich. Podobnie zawartość tlenu – tem-



Rys. 6. Zbliżenie na Valles Marineris z widocznymi stromymi zboczami. Źródło: <http://chapters.marssociety.org>

peratura wrzenia zaledwie -182,97°C – na Marsie od początku powinna być większa niż na Ziemi. Tlen wiązał się z żelazem, którego Mars ma znacznie większą zawartość w płaszczu i skorupie, aniżeli Ziemia. Można też oczekiwać, że masywniejsza Ziemia może mieć bardziej zróżnicowaną pod względem chemicznym warstwową strukturę niż Mars, o czym mógłby świadczyć fakt, że większość obecnego w niej żelaza skupiła się w jądrze.

Dostrzegam szerokie perspektywy w zastosowaniu metod tomografii sejsmicznej do gruntowego „prześwietlenia” głębokich warstw Czerwonej Planety. Nie chodzi mi tu o takie badania, jakie już w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku stały się udziałem lądowników Viking czy w ostatnich latach lądownika InSight. W celu pełniejszego zrozumienia genezy najbardziej osobliwych i monumentalnych form powierzchniowych trzeba będzie przeprowadzić szeroko zakrojone programy naukowe; takie, jakie obecnie realizuje się na Ziemi. Wysyłając fale sejsmiczne z wielu zupełnie różnych obszarów na powierzchni Marsa, do wnętrza planety, można będzie badać dla różnych współrzędnych (a nie tylko punktowo) profil gęstości, składu i temperatury do jądra włącznie. Ogromna wiedza o wnętrzu Marsa, zdobyta przez uczonych – kolonistów, pomoże usystematyzować teorie na temat ewolucji planet skalistych, a wcześniej można mieć nadzieję, że lądowanie kilku lądowników w obszarze Tharsis, wyposażonych w łaziki i sejsmometry, znacząco przybliżyłoby nas do tej wiedzy. Jakkolwiek pewne sugestie co do gwałtownych procesów we wnętrzu Marsa, jak np. erupcje jądra w wyniku ochładzania planety, mogą dziś brzmieć interesująco, to decydujące rozstrzygnięcia w tym zakresie nastąpią dopiero wraz z pogłębieniem szczegółowej wiedzy na temat wewnętrznej struktury Marsa, o której wciąż tak niewiele wiemy.

Marsjańskie wulkany i kaniony

Wraz z płaskowyżem Tharsis, dzięki wzbudzonej przez wielkie wypiętrzenie skorupy długofalowej aktywności wulkanicznej, ukształtowały się na Marsie potężne wulkany tarczowe. Są to rozległe plackowate struktury: Olympus Mons, Arsia Mons, Pavonis Mons i Ascraeus Mons. W wyniku silnej asymetrii w rozkładzie masy przy powierzchni doszło też zapewne do gigantycznych spękań skorupy, które mogłyby wyjaśniać powstanie wybiegającej z Tharsis wielkiej doliny kanionów Valles Marineris.



Rys. 7. Wulkan Olympus Mons na zdjęciu z orbity. Źródło: <http://chapters.marssociety.org>

Strome zbocza opadają tam w dół nawet na 8 km, a szerokość odgałęzień niektórych kanionów jest rzędu 500 km. Tą słynną dolinę ukazały w pełnej krasie dopiero zdjęcia z orbitera Mariner 9 w 1971 roku (stąd pochodzi jej nazwa). To wtedy stwierdzono, że stanowi ona spektakularny sznur głębokich kanionów o długości co najmniej 4500 km, porównywalnej z długością Stanów Zjednoczonych, mierzoną od wybrzeża zachodniego po wschodnie.

W 2000 r. z kolei, w centralnym obszarze Valles Marineris (tzw. Candor Chasma) odkryto grube osady przemawiające za silną erozją wodną. Nie ma jednakże pełnej zgodności co do potężnych procesów, jakie kształtowały Dolinę Marinerów i jeszcze w 1999 r., jako początkujący miłośnik astronomii, natrafiłem na artykuły sugerujące, że spływała tamtędy lava. Być może i w tym jest jakaś prawda, tym bardziej, że gdy nie dawniej niż 1,3 mld. lat temu powstawały te kaniony, na Tharsis zachodziła intensywna aktywność wulkaniczna.

Olympus Mons (Góra Olimp) to niewątpliwie najwyższy i najrozleglejszy szczyt w Układzie Słonecznym, bo wysoki na 24 km i mający średnicę podstawy aż 650 km. Zbocza Góry Olimp pokrywają rozchodzące się radialnie potoki zastygłej lawy, wybiegające z centralnej kaldery o średnicy około 20 km. Na dokładniejszych zdjęciach wygasłego wulkanu dopatrzonego się nawet małych kanałów, które wyrzeźbiła niegdyś spływająca lava, a analiza danych z sondy Mars Global Surveyor wskazuje, że do ostatniej erupcji mogło dojść nawet 100-200 mln lat temu. Stwierdzono ponadto, iż stożek wulkaniczny odcina od dołu skarpa, wznosząca się od 2 do 4 tys. metrów ponad powierzchnię podstawy. Otaczająca skarpe aureola utworzona zapewne została przez potoki lawy i popioły wulkaniczne z licznych erupcji. Rozciągając się na około 500 km od wulkanu zdoła niejedno zdjęcie Olympus Mons z orbity.

Z bliska, jak sądzę, to jednak centralna kaldera Olympus Mons wyglądałaby najbardziej widowiskowo. Jej strome stoki są nachylone do pionu pod średnim kątem zaledwie około 5 stopni, podczas gdy około 90% powierzchni zboczy to łagodnie wzniesione równiny. Obserwator stojący na tych lekko nachylonych równinach mógłby nawet nie wiedzieć, że stoi na najwyższym szczycie Układu Słonecznego, a odległy o około 7 km horyzont pozwalałby zobaczyć tylko małą część wulkanu!

Masa Olympus Mons przekroczyła o dwa rzędy wielkości masę najmasywniejszego wulkanu na Ziemi – Mauna Loa na Hawajach. Stało się tak prawdopodobnie w wyniku długotrwałego braku aktywnej tektoniki płyt, co sprzyjało wylewom lawy ciągle w tym samym miejscu przez wiele milionów lat. Cytowana w „National Geographic” nr. 1/2004 Michelle Minitti z Uniwersytetu Stanu Arizona uważa, że „skały na największym wulkanie Układu Słonecznego mogłyby nam wiele powiedzieć o wewnętrznej strukturze Marsa”, oczywiście gdyby wylądował tam lądowca. Można też oczekiwać, iż cztery wielkie marsjańskie wulkany dostarczyły na powierzchnię planety wiele materiału opartego na węglu. Niestety są one najprawdopodobniej zbyt młode, aby mogły przyczynić się do istnienia życia na powierzchni planety (co najwyżej jakichś mikroorganizmów pod powierzchnią gruntu). Chciałbym jednak wyrazić nadzieję, że odpowiednio dokładne badania terenowe i chemiczne dostarczą dzięki nim kiedyś istotnych przesłanek co do natury starszych wulkanów sprzed 3-4 mld lat i wyrzucanego z nich materiału organicznego w czasach, gdy na Marsie mogło być jeszcze sporo ciekłej wody. Najstarsze wulkany zaobserwowano na płaskowyżu Elysium (np. Alba Patera), są to jednak dosyć mocno zerodowane struktury.

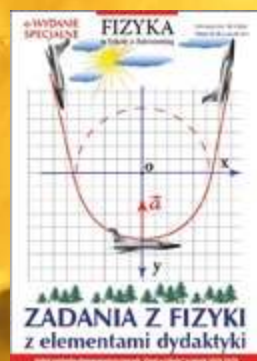
Krzysztof Kowalczyk

Cyfrowe wydania specjalne

Fizyki w Szkole

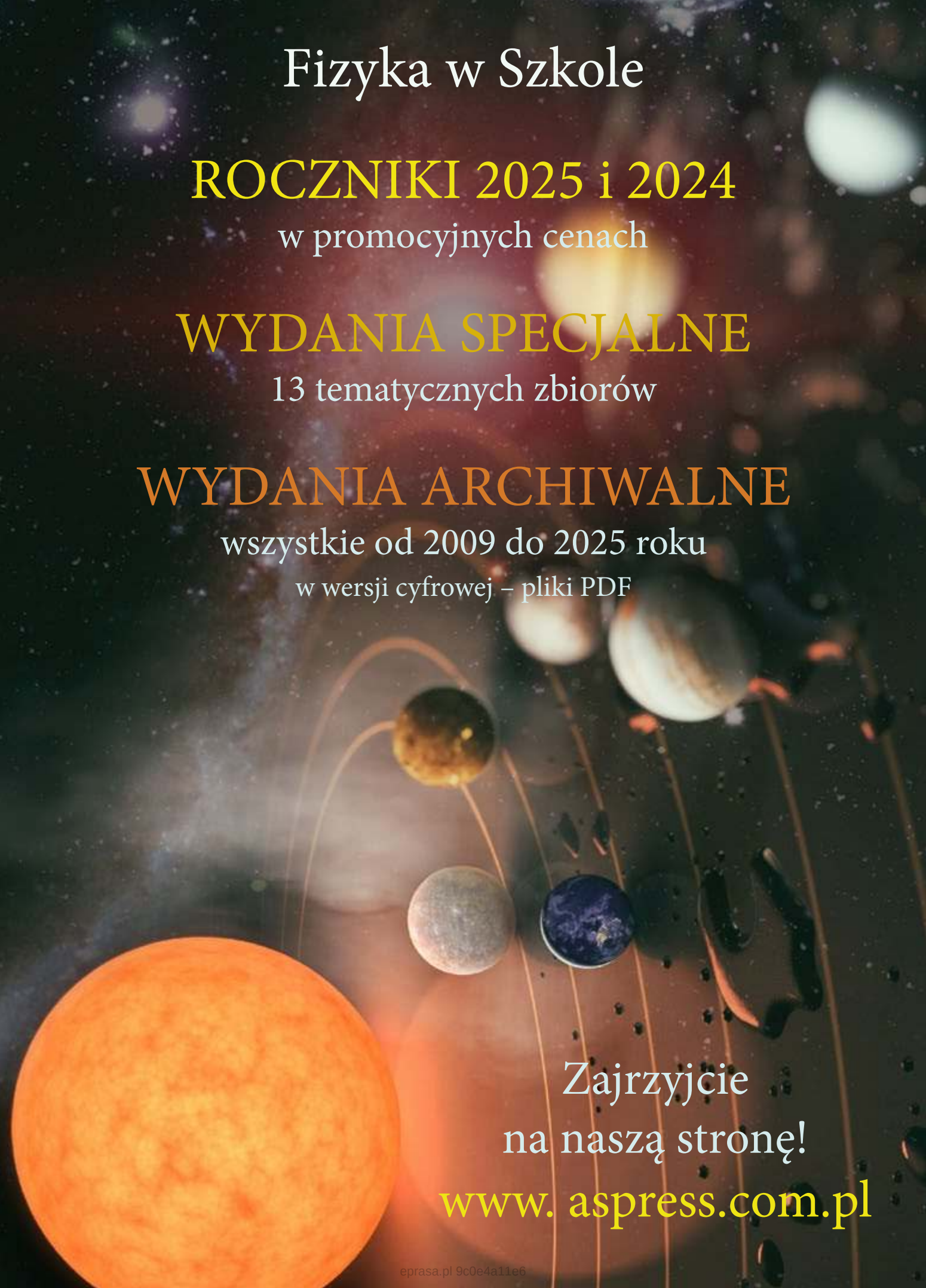
Tylko w wersji PDF!

Już od 10 zł!
Wysyłamy na adres
mailowy!



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

eprasa.pl 9c0e4a11e6

The background of the entire page is a cosmic scene. It features a large, bright orange sun in the bottom left corner. Several planets of different sizes and colors (blue, grey, brown, white) are shown in orbit around the sun, connected by thin, curved lines representing their paths. The background is filled with a dense field of stars and nebulae in various colors like purple, blue, and orange.

Fizyka w Szkole

ROCZNIKI 2025 i 2024

w promocyjnych cenach

WYDANIA SPECJALNE

13 tematycznych zbiorów

WYDANIA ARCHIWALNE

wszystkie od 2009 do 2025 roku

w wersji cyfrowej – pliki PDF

Zajrzyjcie
na naszą stronę!

www.aspress.com.pl