FIZYKA
w Szkole z Astronomią

CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI

373 (LXIV) indeks 35810X Nr 2 marzec/kwiecień 2021 CENA 30,00 zł (w tym 8% VAT)

Skąd się wzięły KWANTY?

Jak Perseverance bada Marsa?

Fizyka instrumentów geodezyjnych

PROMIENIOWANIE a skażenie żywności

\+ Paradoks „dużego ciała" w zadaniach fizycznych

BIOFIZYKA zmysłu słuchu

Z czego zbudowany jest WSZECHŚWIAT?

ISSN 0426-3383

eprasa.pl 34b251bb23

WYDANIE SPECJALNE „Fizyki w Szkole” 1/2021

WERSJA ELEKTRONICZNA – PLIK PDF

16 artykułów z „Fizyki w Szkole” z ostatnich lat

Cena 15 zł
w tym 8% VAT

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

eprasa.pl 34b251bb23

Drodzy Czytelnicy!

Ten wstępniak będzie nietypowy.

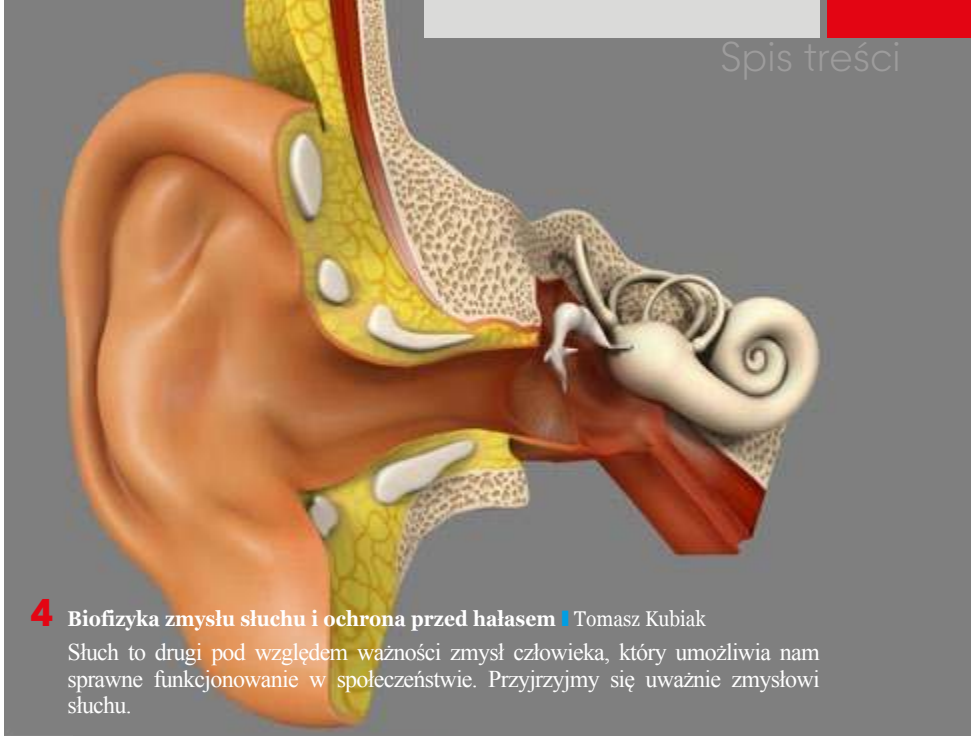
Fizycznym, a dokładniej astronomicznym wydarzeniem lutego, było lądowanie na Marsie łazika Perseverance. Misja ta jest kontynuacją misji badawczej łazika Curiosity i jej celem jest zbadanie fragmentu powierzchni Czerwonej Planety i przeprowadzenie tam szeregu istotnych eksperymentów, głównie pod kątem możliwości ewentualnego jej zasiedlenia.

Misja zaczęła się od startu dwuczłonowej rakiety Atlas V-541 o długości 58 m i masie 531 ton 30 lipca 2020 roku. Lot na Marsa trwała ponad pół roku. Jest to niezwykle mało, jeśli porówna się odległości obu obiektów. Na podziw zasługuje jeszcze jeden element techniki kosmicznej, jej precyzja. Ostatecznie duża odległość obu obiektów sprawia, że trafienie rakietą w Marsa wystrzeloną z Ziemi wymaga wielkiej precyzji obliczeń trajektorii lotu, zwłaszcza, że po wystrzeleniu rakiety praktycznie nie ma możliwości jej korekty.

Amerykańska agencja kosmiczna NASA, instytucja przeprowadzająca misje udostępnia olbrzymią ilość dotyczących jej danych. Na stronach NASA można zobaczyć zarówno surowe jak i obrobione cyfrowo zdjęcia z Czerwonej Planety https://mars.nasa.gov/mars2020/multimedia/images/?t=347&&start=61, filmy, jak też coś co stanowi istotną nowość – dźwięki. Co prawda dźwięki te przypominają szum, ale w wolnych chwilach można ich posłuchać.

Misje na Marsa mają już 61 letnią historię. Program lotów w kierunku Marsa został zapoczątkowany przez ówczesny Związek Radziecki. Wkrótce do marsjańskiego wyścigu dołączyli Amerykanie. Z czasem liczba uczestników, wciąż bezzałogowych, misji zaczęła rosnąć. Do wymienionej dwójki dołączyły Chiny, Indie, Europa, a nawet Zjednoczone Emiraty Arabskie. Obecnie jest czynnych aż 11 misji marsjańskich co stanowi dotychczasowy rekord.

W imieniu redakcji
Zbigniew Wiśniewski



4 **Biofizyka zmysłu słuchu i ochrona przed hałasem** ▮ Tomasz Kubiak

Słuch to drugi pod względem ważności zmysł człowieka, który umożliwia nam sprawne funkcjonowanie w społeczeństwie. Przyjrzyjmy się uważnie zmysłowi słuchu.

Foto – Adobe Stock

Fizyka wczoraj, dziś, jutro

11 **Dopuszczalne poziomy skażeń żywności w Polsce** ▮ Wioletta Monika Dynkowska

14 **Fizyka współczesnych instrumentów geodezyjnych** ▮ Stanisław Bednarek

Zjawiska i prawa fizyki są wykorzystywane we wszystkich dziedzinach współczesnej techniki. Jedną z ważnych dziedzin takiej działalności jest geodezja.

22 **Walther Bothe – w 130 rocznicę urodzin. Nietuzinkowy badacz i odkrywca** ▮ Kazimierz Mikulski

26 **Mechanika kwantowa – od pojęcia kwantu do całek po trajektoriach** ▮ Cyprian Sobczak

Mechanika kwantowa, w całej swojej dziwności, stanowi potężny i niezwykle pożyteczny dział fizyki, który wywrócił nasze rozumienie świata do góry nogami.

Z naszych lekcji

29 **Paradoks „dużego" ciała w fizycznych zadaniach** ▮ Czesław Surowiec

33 **Dlaczego kule w wyniku zderzenia centralnego całkowicie niesprężystego zlepiają się?** ▮ Marian Maciocha

Astronomia dla każdego

35 **Perseverance bada Marsa** ▮ Zbigniew Wiśniewski

36 **Z czego zbudowany jest Wszechświat?** ▮ Marek Demiański

To pytanie zadawano sobie już od bardzo dawna. Trudno teraz dociec, kto i kiedy zadał je po raz pierwszy. Już w V wieku przed naszą erą grecki filozof Empedokles uważał, że wszystko, co nas otacza złożone jest z czterech elementów – żywiołów: wody, powietrza, ognia i ziemi.

44 **Kompendium astronomiczne – wybrane pojęcia i zagadnienia – cz. 2** ▮ Piotr Gronkowski, Marcin Wesołowski

Geofizyka

48 **Ziemia planeta wyjątkowa – cz. 15. Ziemskie pole magnetyczne** ▮ Zbigniew Wiśniewski

FIZYKA w Szkole z Astronomią
CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI
NUMER 2 MARZEC/KWIECIEŃ 2021
373 (LXIII) indeks 35810X ISSN 0426-3383
CENA 30,00 zł (w tym 8% VAT)

Komitet redakcyjny Krystyna Jabłońska-Ławniczak, Jerzy Kreiner, Andrzej Majhofer (Przewodniczący Komitetu), Zygmunt Mazur, Andrzej Szymacha, Mirosław Trociuk **Redakcja** Zbigniew Wiśniewski (redaktor prowadzący – fizykcs@wp.pl) **Adres redakcji** ul. Warchałowskiego 2/58, 02-776 Warszawa **Wydawnictwo** Agencja AS Józef Szewczyk, ul. Warchałowskiego 2/58, 02-776 Warszawa, e-mail: szewczyk24@gmail.com, tel. 606 201 244, www.aspress.com.pl, NIP: 951-134-91-51 **Wydawca i redaktor naczelny** Józef Szewczyk, szewczyk24@gmail.com **Prenumerata** www.aspress.com.pl/prenumerata-2020/, e-mail: szewczyk24@gmail.com, tel. 606 201 244 **Reklama** Jędrzej Chodakowski, jchodakowski1953@gmail.com **Skład i łamanie** ScanSystem.pl Ewa Szelatyńska **Druk i oprawa** Paper & Tinta, ul. Ceglana 34, 05-270 Nadma
Zdjęcie na okładce: Adobe Stock

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

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

Foto – Dreamstime

Biofizyka zmysłu słuchu i ochrona przed hałasem

Już od kilku lat na łamach „Fizyki w Szkole" prezentowane są teksty poświęcone zagadnieniom związanym z fizycznymi aspektami funkcjonowania ludzkiego organizmu. Bieżący artykuł również pozwoli zgłębiać kolejne tajniki biofizyki. Tym razem przyjrzymy się uważniej zmysłowi słuchu.

Tomasz **Kubiak**

Wprawdzie tematyka ta nieobca jest studentom fizyki medycznej, protetyki słuchu czy też różnych kierunków medycznych, ale warto spopularyzować ją wśród nauczycieli i uczniów. Słuch to bowiem drugi pod względem ważności zmysł człowieka, który umożliwia nam sprawne funkcjonowanie w społeczeństwie.

Dźwięki w życiu człowieka

Emisja i odbiór fal akustycznych to fundament komunikacji werbalnej. Z kolei słuchanie muzyki uprzyjemnia nam czas, rozwija zdolności poznawcze a często także dostarcza pozytywnych wrażeń estetycznych. Sygnały dźwiękowe mogą pełnić rolę informacyjną. Przykładowo bicie zegara przypomina nam o upływie czasu. Zdecydowanie ważniejsza jest jednak ich funkcja ostrzegawcza. Fale akustyczne ze względu na zjawiska odbicia i ugięcia mogą bowiem dotrzeć w miejsca, gdzie niemożliwe jest dostrzeżenie sygnałów optycznych. Doskonale sprawdzają się również w przypadku ograniczonej widoczności, np. z powodu mgły czy silnego oświetlenia. Maszyniści przed przejazdami kolejowo-drogowymi prewencyjnie używają sygnał Rp 1 „baczność", który ma postać jednego długiego tonu. Same przejazdy bardzo często posiadają system zabezpieczenia ruchu w postaci sygnalizatora wyposażonego w buczek. Zgodnie z wytycznymi powinien być on słyszalny w odległości co najmniej 30 metrów (mierzonej od miejsca zainstalowania wzdłuż osi drogi).[1]

Ostrzegawcze sygnały dźwiękowe o zmiennym tonie informują kierowców i pieszych o zbliżaniu się pojazdu uprzywilejowanego. Emitowane w tym celu fale akustyczne posiadają częstotliwości w zakresie 300-3000 Hz i poziom natężenia około 100-115 dB, aby przynajmniej o 15 dB przekroczyć wartość charakteryzującą tło (hałas związany z ruchem ulicznym).

Wiele samochodów ciężarowych i maszyn budowlanych wyposażono z kolei w akustyczny sygnalizator cofania, który ostrzega osoby znajdujące się w tzw. tylnej „martwej strefie" przed grożącym im niebezpieczeństwem. Czytelnicy słyszeli też zapewne o dyrektywie unijnej, która nakazuje producentom samochodów elektrycznych montować urządzenia AVAS (ang. *Acoustic Vehicle Alerting System*). Tego typu auto, poruszające się z niewielką szybkością, jest bowiem zbyt ciche a zatem piesi i rowerzyści mogliby nie zdawać sobie sprawy z jego obecności na drodze.

Dźwięki permanentnie towarzyszą nam w życiu. Co ciekawe, jeśli znajdziemy się w miejscu, do którego nie dociera gwar z otoczenia, możemy poczuć się nawet niekomfortowo. Warto wspomnieć chociażby ciszę panującą w podziemnych korytarzach Międzyrzeckiego Rejonu Umocnionego, przerywaną jedynie odgłosem kapiącej w oddali wody.

Prawdziwie izolowanymi akustycznie od tła pomieszczeniami są natomiast tzw. komory bezechowe. W Polsce znajdują się one m.in. w Katedrze Akustyki Wydziału Fizyki UAM w Poznaniu czy w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki AGH w Krakowie.

Tego typu konstrukcje posiadają zazwyczaj grube ściany zewnętrzne wykonane z betonu, są posadowione niezależnie od budynku na specjalnej wibroizolacji ograniczającej przenoszenie drgań z otoczenia, a od wewnątrz

[1] Regulacje prawne w tej materii zawarte są w rozporządzeniu ministra: Dz.U. 2015 poz. 1744.

eprasa.pl 34b251bb23

ich ściany, sufit i podłogę wyłożono setkami elementów rozpraszająco-pochłaniających (fot. 1). Mają one zazwyczaj postać klinów z wełny mineralnej czy waty szklanej owiniętej pokrowcem.[2] Dzięki nim możliwe jest wyeliminowanie fal odbitych od wewnętrznych powierzchni, a zatem rejestracja dźwięków wyemitowanych wyłącznie przez umieszczone w kabinie urządzenia.

W komorach bezechowych prowadzone są m.in. pomiary parametrów akustycznych źródeł dźwięków czy testy laboratoryjne aparatów słuchowych. Miłośników historii zainteresuje na pewno fakt, że w Polsce już w latach 70-tych XX w. we wrzesińskich zakładach produkcji głośników zbudowano komorę bezechową, która należała wówczas do największych w Europie.[3] Niestety, po zamknięciu państwowego zakładu uległa ona spaleniu w 2013 r., a w jej miejscu powstały inwestycje deweloperskie.

Warto jeszcze przypomnieć, że samo echo powstaje, gdy fala akustyczna odbita od przeszkody dociera do naszych uszu już po ustaniu wrażenia słuchowego związanego z falą pierwotną (czyli po około 100 ms). Możemy zatem wyraźnie odróżnić dźwięk i jego powtórzenie. Z taką sytuacją mamy do czynienia np. w górach, gdy przeszkoda, od której dźwięk się odbija (np. skała), oddalona jest od nas o minimum 17 m.

W pomieszczeniach zamkniętych często występuje natomiast pogłos. Fale wielokrotnie odbite od przegród pionowych i poziomych docierają do nas z różnym opóźnieniem po fali pierwotnej i zlewają się w jeden wybrzmiewający dźwięk. Przy projektowaniu wnętrz czas pogłosu, określający po ilu sekundach poziom ciśnienia akustycznego zmniejszy się milion razy, musi być zoptymalizowany (np. poprzez dobór odpowiednich materiałów wykończeniowych) w zależności od funkcji pomieszczenia. Akustyka budowli to temat na osobny artykuł, powróćmy zatem do samego procesu rejestracji fal akustycznych przez człowieka.

Fot. 1. Wewnętrzne powierzchnie komory bezechowej wyłożone są setkami elementów rozpraszająco-pochłaniających w postaci klinów.

Budowa i funkcja narządu słuchu

Opis budowy układu słuchowego należy zacząć od ucha zewnętrznego (fot.2). Wchodząca w jego skład skórno-chrzestna małżowina zazwyczaj ustawiona jest pod kątem 25-45° w stosunku do powierzchni czaszki. U człowieka pozostaje ona nieruchoma, ale niektóre zwierzęta (np. zając europejski) potrafią z łatwością zwracać swe uszy w stronę źródła dźwięku.

Zadanie małżowiny to zbieranie i kierowanie fal akustycznych do przewodu słuchowego zewnętrznego. Ma on długość około 24 mm, kształt wygięty niczym litera S i kończy się błoną bębenkową. Ta membrana, oddzielająca ucho zewnętrzne od środkowego, posiada grubość około 0,1 mm i formę spłaszczonego lejka o wierzchołku łączącym się z rękojeścią młoteczka. Wibrując pod wpływem docierających fal akustycznych, przekazuje drgania właśnie na pierwszą z trzech małych, ruchomo połączonych kosteczek znajdujących się w jamie bębenkowej (rys. 1).

W tym miejscu trzeba koniecznie wspomnieć o trąbce Eustachiusza, która łącząc ucho środkowe z jamą nosowo-gardłową sprawia, że ciśnienie w jamie bębenkowej jest równe atmosferycznemu. Jakże często w sytuacji związanej z gwałtowną zmianą ciśnienia zewnętrznego, czyli np. podczas lotu samolotem czy przejazdu bardzo szybką windą, odczuwamy dyskomfort na skutek powstałej po obu stronach błony bębenkowej różnicy ciśnień. Pomaga wówczas ziewanie bądź przełykanie śliny, które wymusza otwarcie ujścia gardłowego trąbki słuchowej a tym samym wentylację ucha środkowego.

Wróćmy jednak do układu kosteczek słuchowych, które tworzą swoistą dźwignię dwustronną. Jej dłuższe ramie stanowi młoteczek, natomiast krótsze buduje kowadełko. Z nim z kolei połączone jest strzemiączko (patrz ponownie rys. 1). Podstawa tej najmniejszej kości w organizmie człowieka wpasowuje się w okienko owalne. Powierzchnia jego błony ($\approx 3{,}2$ mm^2) jest znacznie mniejsza od efektywnie drgającego obszaru błony bębenkowej (≈ 55 mm^2). Obserwujemy zatem 20-25 krotne wzmocnienie drgań.

Działanie łańcucha kosteczek jest dodatkowo regulowane przez mięśnie (napinacz błony bębenkowej oraz działający antagonistycznie mięsień strzemiączkowy), co pozwala m.in. tłumić zbyt silne drgania, chroniąc tym samym ucho przed urazem akustycznym. Ten tzw. odruch strzemiączkowy zachodzi jednak z pewnym opóźnieniem i nie zabezpiecza ślimaka przed dźwiękami impulsowymi związanymi np. z wybuchem petardy.

[2] Specjalna siatka rozpięta nad klinami umożliwia pracownikom poruszanie się w komorze.

[3] O nieistniejącej już komorze bezechowej we Wrześni można przeczytać w artykule: M. Stryjecki, Pali się! Hi Fi i Muzyka 9 (2013), s. 1.

eprasa.pl 34b251bb23

Fot. 2. Model ucha ludzkiego z zaznaczonymi strukturami ucha zewnętrznego.

Rys. 1. Młoteczek, kowadełko i strzemiączko to trzy małe kosteczki słuchowe znajdujące się w jamie bębenkowej w uchu środkowym.

Przylegające do okienka owalnego strzemiączko pracuje niczym tłok, wywołując chwilowe zmiany gęstości praktycznie nieściśliwego płynu wypełniającego ślimak. Nietrudno domyślić się, że ta znajdująca się w uchu wewnętrznym struktura zawdzięcza swą nazwę charakterystycznemu kształtowi, przywołującemu na myśl skorupę mięczaka (rys. 2 a i b).

Zmiany ciśnienia rozchodzą się w przychłonce najpierw w tzw. schodach przedsionka a po przejściu przez szparę osklepka również w schodach bębenka, osiągając okienko okrągłe (rys. 2c). Tytułem dygresji warto dodać, iż fale dźwiękowe mogą również z osłabieniem docierać do struktur ucha wewnętrznego alternatywną drogą – pośrednio na skutek przewodnictwa kostnego (drgań czaszki). Szacuje się, że w ten sposób w układzie słuchowym przenoszone jest jednak tylko około 5% energii akustycznej napływającej ze środowiska.

Powróćmy jednak do opisanych wcześniej zaburzeń gęstości cieczy, które powodują powstanie fali biegnącej w błonie podstawnej, rozciągającej się wzdłuż ślimaka. Szerokość oraz sztywność tej błony zmieniają się wraz z odległością od jej podstawy. Obszary o odmiennych właściwościach fizycznych drgają w różnym stopniu w zależności od częstotliwości tonu pobudzającego. Ślimak pełni zatem funkcję analizatora dźwięku. Narząd spiralny (Cortiego), położony na błonie podstawnej, pozwala zamienić jej drgania na impulsy nerwowe. Kluczową rolę pełnią tu receptory słuchowe, czyli komórki rzęsate.

Ruch włosków komórek rzęsatych powoduje otwieranie bądź zamykanie kanałów jonowych, wywołując chwilowe zmiany potencjału błonowego (depolaryzację bądź hiperpolaryzację). Depolaryzacja komórek rzęsatych skutkuje otwarciem bramkowanych napięciem kanałów wapniowych i tym samym zainicjowaniem uwalniania neurotransmitera (egzocytoza zależna od jonów Ca^{2+}).

Poszczególne włókna nerwowe przekazują bodźce pochodzące tylko od komórek słuchowych znajdujących się w konkretnej lokalizacji, a zatem pobudzonych przez dźwięki o określonej częstotliwości. Fizjolodzy posługują się naukowym terminem tonotopia. Bardziej obrazowo, ale zdecydowanie mniej fachowo, można powiedzieć, że każde włókno nerwowe odpowiada za inną częstotliwość dźwięku.

Wypustki dośrodkowych (aferentnych) neuronów zwoju spiralnego ślimaka tworzą nerw słuchowy. Warto nadmienić, że ośrodki słuchowe znajdują się w korze mózgowej płata skroniowego a analiza impulsów w mózgu jest odpowiedzialna za percepcję dźwięku.

W kontekście roli ośrodkowego układu nerwowego w procesie słyszenia warto wspomnieć o tzw. „efekcie cocktail-party". Polega on na zdolności skupiania uwagi na jednym, wybranym źródle dźwięku, przy jednoczesnym odfiltrowywaniu hałasu tła. Nazwa oczywiście wiąże się z sytuacją, gdy podczas imprezy koncentrujemy się na tym, co mówi nasz rozmówca, ignorując jednocześnie odtwarzaną muzykę czy szum tworzony przez głosy innych ludzi. Usłyszawszy jednak niespodziewanie swoje imię bądź istotny komunikat, możemy momentalnie dostroić naszą percepcję do tego bodźca. Wskazuje to, że informacje z tła są cały czas przetwarzane, ale na płytszym poziomie.

Percepcja dźwięku

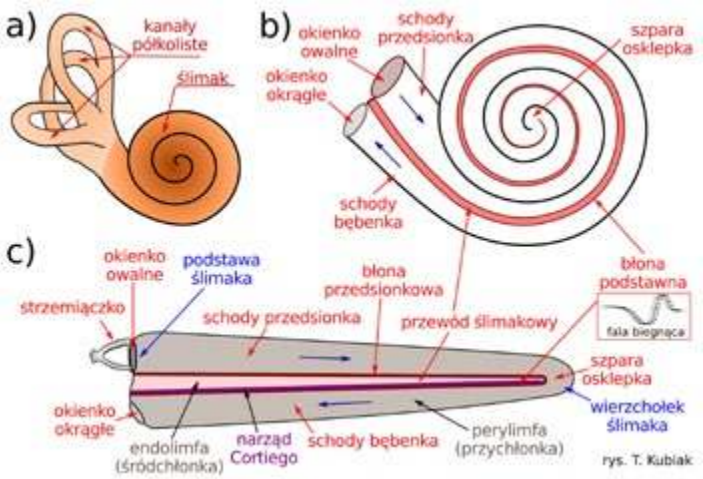
Na podstawie uśrednionych pomiarów przyjęto, że ucho ludzkie może odbierać dźwięki o częstotliwościach należących do przedziału 16 Hz – 20 kHz. Mniejsze *f* mają infradźwięki, natomiast większe posiadają ultradźwięki, które znalazły zastosowanie m.in. w medycynie.[4] Należy również podkreślić, iż górna granica słyszanych częstotliwości obniża się wraz z wiekiem.

Co ciekawe, zwierzęta domowe potrafią rejestrować fale akustyczne w znacznie szerszym zakresie niż człowiek. Przykładem są koty (45 Hz do 64 kHz) czy psy (67 Hz do 45 kHz).[5] Dlatego w sklepach zoologicznych można nabyć specjalne gwizdki ultradźwiękowe (np.

[4] O diagnostycznym wykorzystaniu ultradźwięków można przeczytać w artykule: T. Kubiak, Ultrasonografia, czyli fale akustyczne w służbie medycyny, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 5 (2017), s. 4-9.

[5] Tabelę z zakresami słyszanych częstotliwości dla różnych zwierząt podano na stronie Louisiana State University: https://www.lsu.edu/deafness/HearingRange.html (dostęp z 14.01.2021).

eprasa.pl 34b251bb23



Rys. 2. a) schmat struktur anatomicznych ucha wewnętrznego; b) budowa ślimaka; c) rozwinięty ślimak w przekroju podłużnym.

25 kHz), wykorzystywane w celu szkolenia bądź odstraszania czworonogów bez niepokojenia ludzi.

Nasze ucho jest najbardziej wrażliwe na częstotliwości 500 – 5000 Hz. Wybitni artyści często posiadają tzw. słuch absolutny, definiowany jako zdolność do natychmiastowego i precyzyjnego rozpoznawania oraz nazywania dźwięków muzycznych o konkretnej wysokości bez odnoszenia się do wzorców.

Sama wysokość dźwięku jest jednak cechą subiektywną, a jej określenie w praktyce polega na wskazaniu częstotliwości tonu, który ma w naszym odczuciu taką samą wysokość. Już w 1937 roku amerykański specjalista od psychoakustyki Stanley Stevens wraz z kolegami stworzył tzw. skalę melową, czyli zależność subiektywnie odbieranej wysokości dźwięku (jednostka mel) od obiektywnie mierzonej częstotliwości wyrażonej w hercach. Należy jednak mieć na uwadze, iż nadaje się ona tylko do opisu wysokości tonalnej, a nie muzycznej.

Warto również wspomnieć o periodycznych dźwiękach złożonych, których wysokość związana jest z częstotliwością podstawową.[6] Słuchając muzyki, np. jazzu, wyraźnie rozróżniamy dźwięki niskie, jakie wydaje gitara basowa, od wysokich emitowanych przez saksofon sopranowy. Inną kwestią pozostaje barwa dźwięku, pozwalająca odróżnić nam te same dźwięki (o jednakowej wysokości oraz głośności) grane na różnych instrumentach, np. skrzypcach Stradivariusa czy ich odpowiednikach, wykonanych przez domorosłego lutnika. Jako atrybut charakteryzujący się wielowymiarowością barwa wiąże się m.in. z liczbą i amplitudą wyższych składowych harmonicznych (składem widmowym), periodycznością a nawet sposobem prezentacji dźwięku.

Cechą, która jednak najsilniej kojarzy się z dźwiękiem, mówiąc ściślej z jego percepcją, jest głośność. Również i ten atrybut wrażenia słuchowego pozostaje wysoce subiektywny i niemierzalny bezpośrednio. Nawet w ujęciu potocznym, gdy dwie osoby wspólnie oglądają telewizję, często zdarza się, że jednej audycja wydaje się zbyt głośna, a drugiej zbyt cicha. Możemy jednak spróbować użyć skali, która dla dźwięków o określonej częstotliwości przyporządkuje ich głośność wartościom obiektywnej wielkości fizycznej, jaką jest natężenie dźwięku. Przykładem są krzywe jednakowej głośności (izofoniczne). Znajdując dla badanego dźwięku odpowiadającą mu głośność tonu wzorcowego o częstotliwości 1 kHz, określamy tzw. poziom głośności wyrażony w fonach.

Dalej wiedząc, że poziom głośności wspomnianego standardu równa się co do wartości charakteryzującemu go poziomowi ciśnienia akustycznego, możemy dokonać swoistej obiektywizacji. Co ciekawe, dla tonów o odmiennej częstotliwości obserwujemy różną szybkość wzrostu głośności wraz ze zwiększaniem poziomu natężenia dźwięku.

W tym miejscu część czytelników może poczuć się lekko zdezorientowana, gdyż w tekście pojawiły się trzy dotychczas nieobjaśnione terminy: natężenie dźwięku, poziom natężenia dźwięku oraz poziom ciśnienia akustycznego. Definicje z reguły wydają się nudne, ale w tym przypadku warto je przytoczyć.

Natężenie dźwięku wyrażane jest poprzez stosunek mocy akustycznej P do pola powierzchni S zorientowanej prostopadle do kierunku propagacji fali:

$$I = \frac{P}{S} = \frac{p^2}{2\rho v_d}$$

gdzie: ρ – gęstość ośrodka, v_d – szybkość rozchodzenia się dźwięku w danym ośrodku (w powietrzu 340 m/s w 15°C). Jak widać jest ono również proporcjonalne do kwadratu ciśnienia akustycznego p.

Jeśli rozpatrzymy źródło punktowe (o mocy P) emitujące falę kulistą:

$$I = \frac{P}{4\pi \cdot r^2}$$

przekonamy się, że natężenie dźwięku jest odwrotnie proporcjonalne do kwadratu odległości od źródła, gdyż cała moc przypada na sferę o promieniu r i powierzchni $4\pi r^2$. Oczywiście należy pamiętać, że ośrodek stawia opór rozchodzącej się w nim fali dźwiękowej, czego miarą jest impedancja akustyczna Z.

Zakres dynamiczny ucha, wyrażany jako iloraz największego ($1 W/m^2$) i najmniejszego (10^{-12} W/m^2 dla f = 1 kHz) natężenia, jakie może odebrać nasz narząd słuchu, wynosi $\approx 10^{12}$, jest zatem bardzo duży. Dlatego dla ułatwienia opisu stosuje się skalę logarytmiczną a wartości natężenia I wyraża względem wybranego natężenia odniesienia $I_0 = 10^{-12}$ W/m^2. Zdefiniowano wyrażony w decybelach [dB] poziom natężenia dźwięku L:

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

Decybel to oczywiście 0,1 bela, czyli jednostki, która swą nazwą upamiętnia szkockiego naukowca i wynalazcę Alexandra Grahama Bella. Dodajmy jeszcze, że natężeniu odniesienia odpowiada ciśnienie p_0 = 20 μPa. Stąd poziom ciśnienia akustycznego można zdefiniować jako:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0}$$

[6] Dźwięk złożony można rozłożyć na składową podstawową o częstotliwości f_0 i szereg harmonicznych o częstotliwościach $f_n = n \cdot f_0$, gdzie $n > 1$.

eprasa.pl 34b251bb23

Rys. 3. Przykładowe wartości poziomu natężenia dźwięku, z jakimi spotykamy się w naszym otoczeniu.

Jednostką będą wówczas decybele SPL od angielskiego ***s**ound **p**ressure **l**evel*.

Przykładowe wartości poziomu natężenia dźwięku, z jakimi spotykamy się w naszym otoczeniu (określone dla niewielkiej odległości od źródła), przedstawia rysunek 3. Hałas emitowany podczas startu odrzutowca (≈120 dB) czy rakiety kosmicznej (≈ 170-190 dB) jest bardzo dokuczliwy, ale zdecydowanie wyższy poziom natężenia dźwięku tj. 240-280 dB odnotowuje się podczas wybuchu bomby jądrowej.

Co ciekawe, rekordy nie należą jednak do źródeł antropogenicznych, ale naturalnych. Podczas katastrofy tunguskiej, czyli eksplozji asteroidy, do której doszło w 1908 roku nad Syberią, szacowany poziom natężenia dźwięku wyniósł około 300 dB. Jeszcze wyższą wartość (300-350 dB) przypisuje się erupcji wulkanu Krakatau w Indonezji w 1883 r. Była ona słyszana nawet w odległości 3600 km. Warto wspomnieć, że wulkany generują sygnały o szerokim widmie, w którym dominują składowe niskoczęstotliwościowe (większość energii akustycznej rozchodzi się w postaci infradźwięków, których nasze uszy nie rejestrują)[7].

Problem hałasu

Hałas bardzo niekorzystnie oddziałuje na nasze zdrowie a jego szkodliwość nie ogranicza się jedynie do wywoływania ubytków słuchu. Dowiedziono, że może wpływać również na wzrost częstości akcji serca oraz ciśnienia tętniczego krwi.[8] Stanowi bowiem fizyczny bodziec stresowy, wzmagający aktywność współczulnego układu nerwowego oraz wydzielanie tzw. hormonów stresu, czyli adrenaliny, noradrenaliny oraz kortyzolu. Oprócz negatywnego działania na układ krążenia hałas może przyczyniać się również do rozwoju chorób przewodu pokarmowego, np. wrzodów żołądka. Poza tym zdecydowanie pogarsza nasze samopoczucie, powodując bóle głowy oraz niemożność skupienia uwagi. Powinniśmy zatem minimalizować narażenie na głośne, niepożądane dźwięki, chronić nasz słuch i walczyć z hałasem.

W miastach ogromny problem stanowi hałas komunikacyjny. Generowany jest on przede wszystkim przez samochody, zależy od zastosowanej nawierzchni drogowej i wzmaga się wraz ze wzrostem prędkości pojazdów oraz natężenia ruchu. Najpopularniejszym sposobem ochrony mieszkańców są ekrany akustyczne, które odbijają fale akustyczne (fot. 3). Skuteczność ekranowania zależy przede wszystkim od długości, wysokości i usytuowania tego typu konstrukcji. Ponadto zastosowanie struktury pochłaniająco-rozpraszającej od strony źródła dźwięku nie tylko nieco zwiększa ich efektywność, ale również korzystnie wpływa na warunki panujące od strony jezdni, co służy również kierowcom.

W dużych aglomeracjach niezwykle problematyczny jest również hałas tramwajowy, nasilający się w przypadku torowisk cechujących się złym stanem technicznym. Łączenie szyn bezstykowo oraz ich szlifowanie i mocowanie sprężyście do podkładów a także budowanie tzw. „zielonych torowisk" pozwala istotnie zmniejszyć poziom natężenia uciążliwych dźwięków (fot. 4).

Należy pamiętać, że poprawę komfortu akustycznego wewnątrz pomieszczeń możemy zapewnić przez montaż rolet zewnętrznych czy dobór odpowiedniej stolarki okiennej z kilkoma szybami o różnej grubości i sprężystości oraz gazem tłumiącym (np. kryptonem), wypełniającym przestrzeń międzyszybową.

Co zrobić jednak, gdy zmuszeni jesteśmy przebywać bądź pracować w hałaśliwym miejscu? Konieczne jest wówczas stosowanie ochrony słuchu w postaci zatyczek (fot. 5) bądź słuchawek. Co ciekawe rola tych ostatnich nie musi ograniczać się do pasywnego, mechanicznego wytłumiania dźwięków. Coraz popularniejsze stają się bowiem urządzenia wyposażone w technologię ANC (ang. ***a**ctive **n**oise **c**ancelling*). W tym przypadku umieszczone na słuchawkach mikrofony zbierają odgłosy z otoczenia, następnie specjalne oprogramowanie przesuwa zarejestrowane sygnały w fazie o 180° a przetwornik emituje je przez słuchawki.

Warto podkreślić, że sam pomysł wygaszenia fali akustycznej poprzez jej superpozycję z wygenerowaną elektroakustycznie falą o odwróconej fazie został przedstawiony już w 1933 roku przez niemieckiego fizyka Paula Luega, który w 1936 roku otrzymał na ten pomysł patent.[9] Niestety, przełomowa idea nie została doceniona za życia jej twórcy, gdyż rozwój i komercjalizacja systemów aktywnej redukcji hałasu nastąpiły dopiero po ponad 50 latach od przyznania patentu.[10]

---

[7] Zainteresowanych odsyłam do rozdziału „Volcano acoustics" w książce: Modeling Volcanic Processes: The Physics and Mathematics of Volcanism, pod. red. S. A. Fagents, T. K. P. Gregg, R. M. C. Lopes, Cambridge University Press 2013, s. 359-383.

[8] O pomiarach ciśnienia tętniczego krwi można dowiedzieć się więcej z artykułu: T. Kubiak, Fizyka u internisty, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 2 (2018), s. 4-7.

[9] P. Lueg, Process of silencing sound oscillations, US2043416A, https://patents.google.com/patent/US2043416A/en?oq=Process+of+silencing+sound+oscillation (dostęp z 14.01.2021).

[10] Szczegóły w pracy: D. Guicking, On the invention of active noise control by Paul Lueg, *J. Acoust. Soc. Am.* 87(5) 1990, 2251-2254.

eprasa.pl 34b251bb23

Fot. 3. Ekrany akustyczne chronią przed hałasem komunikacyjnym.

Fot. 4. Budowanie „zielonych torowisk" pozwala zmniejszyć hałas tramwajowy.

Uszkodzenia słuchu

Zapewne wszyscy słyszeli o konieczności ochrony narządu słuchu, a mimo to wiele osób codziennie naraża go na uszkodzenie. Należy mieć świadomość, iż w wyniku ewolucji nasze uszy rozwinęły się tak, aby rejestrować odgłosy obecne w przyrodzie, a nie hałas komunikacyjny, przemysłowy czy dźwięki wzmocnione elektroniczne. Ekspozycja na głośną muzykę, emitowaną przez słuchawki z przenośnych odtwarzaczy albo głośników używanych w dyskotekach lub na koncertach, może prowadzić do uszkodzenia słuchu. Rolę odgrywają tu takie parametry, jak: poziom ciśnienia akustycznego, rozkład częstotliwościowy oraz czas trwania narażenia.

Niepokojącym wydaje się fakt, iż wielu młodych muzyków cierpi na ubytki słuchu przynajmniej 20 dB. Są one zazwyczaj selektywne, dotycząc określonych częstotliwości, np. 6 kHz. Nawet jeśli zniekształcenia nieliniowe, powstałe na skutek urazu akustycznego, obejmują wąskie pasmo częstotliwości, mają wpływ na jakość odbioru sygnałów o złożonej strukturze widmowej. Narażenie na hałas może być również przyczyną występowania szumów usznych, czyli ciągłych, drażniących dźwięków słyszanych mimo braku bodźca akustycznego. Mają one charakter subiektywny, stąd trudno je diagnozować.

Generalnie uszkodzenia słuchu dzielimy w zależności od lokalizacji na trzy kategorie. Niedosłuch typu przewodzeniowego jest związany z blokowaniem przenoszenia fal akustycznych z ucha zewnętrznego do wewnętrznego. Przyczyny mogą być różne: od procesów zapalnych w uchu środkowym, poprzez dysfunkcję kosteczek słuchowych (otosklerozę) aż do mechanicznego zamknięcia światła przewodu słuchowego przez zgromadzoną woskowinę (wydzielinę gruczołów woskowinowych i łojowych zmieszaną ze złuszczonym nabłonkiem).

Z kolei niedosłuch typu czuciowo – nerwowego (odbiorczego) związany jest z występującymi w uchu wewnętrznym problemami z przekształcaniem fal akustycznych na odpowiadające im impulsy elektryczne bądź z degeneracją nerwów przekazujących sygnały nerwowe do mózgu. Warto wspomnieć o tzw. objawie wyrównania głośności związanym ze zniekształceniem percepcji sygnałów dźwiękowych. W takim przypadku odczuwalna głośność wzrasta niewspółmiernie do poziomu ciśnienia akustycznego.

Trzeci typ uszkodzeń słuchu ma charakter mieszany, łączy elementy niedosłuchu przewodzeniowego i czuciowo-nerwowego.

Upośledzenie słuchu występuje u wielu osób po 60 roku życia. Zazwyczaj rozwija się stopniowo, powodując m.in. prowadzące do izolacji towarzyskiej trudności w zrozumieniu mowy. Początkowo problemy z rozpoznawaniem pojedynczych słów chorzy często próbują pokonać poprzez korzystanie z kontekstu wypowiedzi lub czytając z ruchu warg. Zdecydowanie lepsze rozwiązanie to jednak przeprowadzenie odpowiedniej diagnostyki i skorzystanie z pomocy protetyka słuchu.

Jednym z najpopularniejszych badań służących do oceny słuchu jest audiometria progowa tonalna. Przez słuchawki do pacjenta docierają sygnały akustyczne o określonej częstotliwości. Natężenie dźwięku jest zwiększane do momentu aż pacjent nie zasygnalizuje jego usłyszenia. W ten sposób ustala się, o ile decybeli obniżył się próg słyszalności dla sygnału o określonej częstotliwości.

Wynik pomiarów stanowi audiogram, który graficznie pokazuje ubytki czułości słuchu. Inną metodą diagnostyczną stosowaną w audiologii, np. w przypadku badań przesiewowych u noworodków, jest otoemisja akustyczna. W tym przypadku rejestruje się odpowiedź ślimaka, a dokładnie komórek rzęsatych w uchu wewnętrznym, na bodziec dźwiękowy podawany przez głośnik znajdujący się na końcu sondy umieszczonej w przewodzie słuchowym.

Jeśli ubytek słuchu został już prawidłowo określony można przystąpić do próby jego skompensowania. W przypadku niedosłuchu 25-90 dB stosowane są aparaty słuchowe. Urządzenia te zwiększają natężenie sygnału, który dociera do ucha wewnętrznego. W uproszczeniu składają się z kilku zasadniczych elementów: mikrofonu, wzmacniaczy i słuchawki. Oczywiście istnieje kilka typów aparatów słuchowych, m.in. zauszne czy wewnątrzuszne.

Nie zawsze jednak zastosowanie protez słuchowych wystarcza. Pacjentom z bardzo głębokim niedosłuchem lub obustronną głuchotą po stosownej ocenie kwalifikacyjnej można wszczepić implant ślimakowy. Wówczas fale akustyczne odbierane są za pomocą mikrofonu,

eprasa.pl 34b251bb23

Foto – Dreamstime

Fot. 5. Użycie zatyczek stanowi najprostszy sposób ochrony słuchu.

a sygnał elektryczny przekazywany do elektrod bezpośrednio pobudzających zakończenia nerwu słuchowego. Z kolei w przypadku implantów pniowych elektroda dostarcza bodźce w okolicę jąder ślimakowych w pniu mózgu, co pomaga m.in. osobom, których nerw słuchowy został uszkodzony przez nowotwór.

Iluzje słuchowe

Na koniec warto wspomnieć o bardzo intrygującym zagadnieniu – iluzjach słuchowych. Jedną z najbardziej znanych jest tzw. dźwięk Sheparda, który wydaje się zwiększać bądź zmniejszać swą wysokość w sposób ciągły. Za takie mylne wrażenie odpowiada specjalny zestaw generowanych komputerowo tonów, odtwarzanych w sposób cykliczny. Zainteresowanych szczegółami odsyłam do pracy amerykańskiego naukowca Rogera Sheparda. Od jego nazwiska iluzja wzięła właśnie swą nazwę.[11]

Inne złudzenie to tzw. słowa fantomowe. Gdy z dwóch głośników emitowane są naprzemiennie pojedyncze sylaby w taki sposób, że tworzą powtarzające się zestawienia dwóch zgłosek, osoby słuchające zdają się wyodrębniać z tej kakofonii dźwięków konkretne słowa. Badania nad tego typu iluzjami oraz efektami psychologicznymi wywoływanymi przez muzykę prowadzi prof. Diana Deutsch z Uniwersytetu Kalifornijskiego w San Diego.[12]

Ciekawą grupę iluzji stanowią te związane z percepcją wielomodalną. Dotyczy ona przynajmniej dwóch jednocześnie pobudzanych zmysłów. Należy przywołać tzw. efekt McGurka, po raz pierwszy opisany w czasopiśmie Nature.[13] Gdy odtwarzamy specjalnie przygotowane nagranie wideo przedstawiające mówiącą osobę i patrzymy na jej usta, słyszymy powtarzającą się sylabę „da". Jeśli jednak zamkniemy oczy z głośników dobiegają do nas wyraźnie zgłoski „ba". Wyjaśnienie kryje się w fakcie, że otrzymujemy sprzeczne informacje z obu zmysłów. W rzeczywistości bowiem człowiek, którego ruch warg związany jest z wypowiadanym „ga-ga" został zdubbingowany przez „ba-ba". Takie niedopasowanie treści wizyjno-fonicznej odpowiada za iluzoryczne „da-da".

Warto przypomnieć, że samym złudzeniom optycznym poświęcono już osobny artykuł w Fizyce w Szkole.[14] Wśród iluzji związanych z obydwoma zmysłami na szczególną uwagę zasługuje „Skipping Pylon". Plik gif przedstawia słup napowietrznej linii elektroenergetycznej skaczący przez poruszane przez inne słupy przewody niczym przez skakankę. Za każdym razem, gdy odbija się od ziemi obraz jest wprawiany w drgania. W rezultacie odbiorcy zdają się słyszeć nieistniejący dźwięk uderzenia o ziemię. Wszystkich chcących doświadczyć takiej halucynacji słuchowej odsyłam do atlasu iluzji.[15]

Świat zachwyca nas bogactwem różnorodnych dźwięków a odbiór wrażeń akustycznych zawdzięczamy sprawnemu funkcjonowaniu narządu słuchu. Chrońmy się zatem przed hałasem i równocześnie starajmy poznać biofizyczne tajniki funkcjonowania naszego organizmu.

dr Tomasz Kubiak
Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa
im. Hipolita Cegielskiego w Gnieźnie

POLECANA LITERATURA:

[1] A. Michajlik, W. Ramotowski, Anatomia i fizjologia człowieka, PZWL, Warszawa 2007, s. 539-549.
[2] S. Maroonroge, D. C. Emanuel, T. R. Letowski, Basic anatomy of the hearing system [w:] Helmet-Mounted Displays: Sensory, Perceptual, and Cognitive Issues, pod red. C. E. Rash, M. B. Russo, T. R. Letowski, E. T. Schmeisser, U.S. Army Aeromedical Research Laboratory, Fort Rucker, s. 279-305.
[3] A. Sęk, Biofizyka zmysłu słuchu [w:] Biofizyka pod red. F. Jaroszyka, PZWL, Warszawa 2008, s. 456-540.
[4] The Auditory System [w:] Neuroscience: third Edition, pod red D. Purves i inni, Sinauer Associates, Sunderland 2004, s. 283-313.
[5] A. Sęk, Percepcja dźwięku, Forum Psychologiczne 5(1), 2000, s. 5-26.
[6] Protetyka słuchu, pod red. E. Hojana, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań 2017.
[7] A. Jaroszewski, P. Rogowski, Skutki ekspozycji na głośne dźwięki muzyczne [w:] Akustyka w technice, medycynie i kulturze, pod. red. Z. Engela i J. Ranachowskiego, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Kraków 1999, s. 111-124.
[8] A. Bortkiewicz, N. Czaja, Pozasłuchowe skutki działania hałasu ze szczególnym uwzględnieniem chorób układu krążenia, *Forum Medycyny Rodzinnej* 2018, tom 12, nr 2, s. 41-49.
[9] M. B. S Nielsen, Anechoic vs. Semi Anechoic Rooms, Proceedings of the 17th International Congress on Acoustics, Rome 2001.
[10] M. J. Mason, Structure and function of the mammalian middle ear, *J. Anat.* 228, 2016, s. 300-312.

[11] R. Shepard, Circularity in Judgments of Relative Pitch, Journal of the Acoustical Society of America 36 (1964), 2346-2353.

[12] Na oficjalnej stronie prof. Diany Deutsch można zapoznać się z iluzjami słuchowymi w oparciu o zamieszczone nagrania: http://deutsch.ucsd.edu/psychology/pages.php?i=201 (dostęp z 14.01.2021).

[13] H. McGurk, J. MacDonald, Hearing lips and seeing voices. Nature 264 (1976), 746-748.

[14] T. Kubiak, Od biofizyki układu wzrokowego do złudzeń optycznych, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 6 (2019), s. 4-10.

[15] https://www.illusionsindex.org/i/skipping-pylon (dostęp z 14.01.2021

eprasa.pl 34b251bb23

Foto – Dreamstime

Dopuszczalne poziomy skażeń żywności w Polsce

Wioletta Monika **Dynkowska**

Zdarzają się sytuacje powodujące uwolnienie do środowiska pewnej ilości substancji promieniotwórczej. Taką był m.in. wybuch rdzenia reaktora Czarnobylskiej Elektrowni Jądrowej. Skutkowało to rozproszeniem substancji promieniotwórczej w promieniu wielu kilometrów. W polskim prawodawstwie taka sytuacja skutkuje koniecznością wydzielenia strefy awaryjnej i podjęciem działań interwencyjnych, w tym czasowego lub stałego przesiedlenia ludności zamieszkującej tereny skażone.

Granicę strefy awaryjnej wyznacza moc promieniowania jonizującego równa i przekraczająca 0,1 mSv/h, a także skażenie powierzchni, które dla izotopów gamma i beta promieniotwórczych wynosi 1000 Bq/cm^2 a dla izotopów alfa promieniotwórczych 100 Bq/cm^2. Działaniami interwencyjnymi są natomiast ewakuacja ludności z terenu zagrożonego, nakaz pozostania w pomieszczeniach zamkniętych, podanie preparatów ze stabilnym jodem, ograniczenie lub całkowity zakaz spożywania skażonej żywności i skażonej wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi, a także żywienia zwierząt skażonymi środkami żywienia zwierząt i pojenia skażoną wodą, oraz wypas zwierząt na skażonym terenie.

Najbardziej drastycznymi działaniami są czasowe lub stałe – w zależności od stopnia narażenia na promieniowanie jonizujące – przesiedlenie ludności. Działania interwencyjne określone są w art. 90 ustawy Prawo Atomowe, natomiast według art. 87 tej samej ustawy Rada Ministrów w drodze Rozporządzenia określa wartości poziomów interwencyjnych dla poszczególnych rodzajów działań interwencyjnych a także kryteria odwołania tych działań.

Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 27 kwietnia 2004 roku w sprawie wartości poziomów interwencyjnych dla poszczególnych rodzajów działań interwencyjnych oraz kryteriów odwołania tych działań (Dz.U. z 2004 r., Nr 198 Poz. 987) zawiera szczegółowe wytyczne wielkości poziomów interwencyjnych dla poszczególnych rodzajów działań interwencyjnych.

Jak już wcześniej wspomniano, jednym z nich jest zakaz lub ograniczenie spożywania skażonej żywności i skażonej wody przeznaczonej do picia przez ludzi – jeżeli poziom zawartości substancji promieniotwórczych w skażonej żywności lub skażonej wodzie przeznaczonej do spożycia przez ludzi przekroczy wartości określone w załączniku nr 1 do rozporządzenia, a także zakaz lub ograniczenie żywienia zwierząt skażonymi środkami żywienia zwierząt i pojenia skażoną wodą oraz wypasu zwierząt na skażonym terenie – jeżeli poziom zawartości substancji promieniotwórczych w postaci izotopów cezu ^{134}Cs i ^{137}Cs w środkach żywienia zwierząt pochodzących ze skażonego terenu przekroczy wartości określone w załączniku nr 2 do rozporządzenia.

Przeglądając tekst powyższego Rozporządzenia można zastanawiać się, dlaczego akurat właśnie te pierwiastki zostały w nim zawarte. Wyjaśnienie jest dość proste: radioaktywny izotop jodu ^{131}I nie występuje naturalnie w przyrodzie, podobnie jak izotop strontu ^{90}Sr czy izotopy cezu ^{134}Cs i ^{137}Cs. Nuklidy te są natomiast charakterystycznymi produktami rozszczepienia uranu i są wskaźnikami wystąpienia opadu radioaktywnego.

Izotop plutonu ^{239}Pu można w śladowych ilościach znaleźć w rudach uranu z uwagi na jego przynależność do szeregów promieniotwórczych, natomiast ameryk ^{241}Am powstaje podczas detonacji bomb jądrowych i termojądrowych. Umiejscowienie czterech pierwszych nad ścieżką stabilności nuklidów powoduje, że wobec stosunku liczby neutronów do liczby protonów (^{90}Sr: 1,37; ^{131}I: 1,47; ^{134}Cs: 1,44; ^{137}Cs: 1,49) predysponowane są do rozpadu neutronu a w konsekwencji emisji elektronu z jądra atomowego – to emitery beta; z kolei obydwa transuranowce są emiterami alfa.

Zawartość poszczególnych grup izotopów w skażonej żywności i skażonej wodzie zawiera Tabela 3. W przypadku środków do żywienia zwierząt (załącznik nr 2 do Rozporządzenia), w zależności od przeznaczenia pasz, zawartość sumaryczna izotopów cezu ^{134}Cs i ^{137}Cs nie może przekroczyć 1250 Bq/kg (środek dla trzody chlewnej), 2500 Bq/kg (środek dla drobiu, cieląt i jagniąt) i 5000 Bq/kg (środek dla innych zwierząt).

Krótko o „newralgicznych" pierwiastkach

Emitery beta. Jądra atomowe nuklidów emitujących cząstkę beta najczęściej zawierają nadmiar neutronów w stosunku do liczby protonów. W jądrze atomowym

eprasa.pl 34b251bb23

dochodzi do rozpadu neutronu, wskutek czego tworzy się elektron i antyneutrino elektronowe:

$$ {}_{0}^{1}n \rightarrow {}_{1}^{1}p + {}_{-1}^{0}\beta^{-} + \bar{\nu} $$

Elektron wyrzucany jest z jądra atomowego jako cząstka beta minus. Im większa energia tego elektronu, tym większy jego zasięg a także zdolność jonizacji. W wyniku emisji cząstki beta powstaje pierwiastek chemiczny, który zawiera o jeden więcej proton w jądrze atomowym, jak również zostaje wyemitowane promieniowanie elektromagnetyczne gamma. Promieniowanie beta jest czynnikiem powodującym pęknięcie jednoniciowe łańcucha DNA.

Stront. Jako metal lub jego sole, stront nie jest trujący. Jednakże zagrożenie płynące ze strony izotopu strontu ^{90}Sr ($T_{1/2}$ = 29,1 lat) polega na wbudowywaniu się w tkankę kostną, co prowadzi do uszkodzenia szpiku kostnego i w konsekwencji zaburzenia syntezy krwinek czerwonych. Do organizmu ludzkiego trafia wskutek łańcucha pokarmowego. Izotop strontu ^{90}Sr po emisji cząstki beta minus o energii 610 keV, staje się radioaktywnym krótkożyciowym ($T_{1/2}$ = 2,7 dnia) izotopem itru ^{90}Y. Ten z kolei ulega dalszemu rozpadowi beta minus emitując cząstkę beta o zdecydowanie wyższej energii (2,18 MeV) przechodząc w stabilny izotop cyrkonu ^{90}Zr:

$$ {}_{38}^{90}Sr \rightarrow {}_{39}^{90}Y + {}_{-1}^{0}\beta^{-} + \bar{\nu} \qquad {}_{39}^{90}Y \rightarrow {}_{40}^{90}Zr + {}_{-1}^{0}\beta^{-} + \bar{\nu} $$

Jod. Choć jod jest mikroelementem niezbędnym dla zdrowia człowieka, to należy do pierwiastków dość rzadko występujących w przyrodzie. Większe jego ilości występują w wodzie morskiej i solankach, także w złożach występujących na terenie naszego kraju. Pierwiastek ten towarzyszy także pokładom saletry sodowej tzw. saletry chilijskiej, w Chile. Jod wchodzi w skład hormonów niezbędnych do funkcjonowania wszystkich komórek organizmu: tyroksyny i trijodotyroniny. Tyroksyna wpływa rozwój fizyczny i psychiczny młodych organizmów, trijodotyronina warunkuje prawidłowy wzrost wzdłużny i dojrzewanie organów wewnętrznych, w szczególności tkanki kostnej i mózgu. Niedobór jodu w organizmie może powodować wystąpienie wrodzonego zespołu niedoboru jodu z charakterystycznym dlań niedorozwojem umysłowym ciężkiego stopnia a także powstanie wola tarczycy. Jednakże nadmiar jodu w organizmie człowieka również jest wysoce niepożądany ze względu na fakt, iż zwiększone spożycie jodu może spowodować nadczynność tarczycy, co objawia się między innymi w postaci choroby Gravesa-Basedova, a także wywołaniem jodzicy – choroby objawiającej się zapaleniem spojówek, podrażnieniem śluzówek nosa, żołądka i oskrzeli. Dość wspomnieć, że jod w postaci czystej jest toksyczny. Działa drażniąco na skórę, oczy i śluzówki dróg oddechowych. Po spożyciu powoduje pojawienie się ciemno zabarwionych wymiotów, bólu brzucha, ciemnych plam w ustach i szumu w uszach. W cięższych przypadkach może wystąpić wstrząs, majaczenie i stupor. Duże dawki jodu mogą uszkadzać ściany żołądka i jelit, a także nerki. Dawka śmiertelna dla człowieka wynosi 3-4g.

Po katastrofie czarnobylskiej, w całej Polsce w dniu 29 kwietnia 1986 roku, na wniosek specjalistów z Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej w Warszawie, płyn Lugola zaaplikowano bezpłatnie wielu obywatelom, w znacznej większości były to dzieci i młodzież do lat siedemnastu. Celem akcji, jako elementu profilaktyki raka tarczycy, było zapobieżenie wchłaniania radioaktywnego izotopu jodu ^{131}I z opadów promieniotwórczych powstałych w wyniku wybuchu i pożaru elektrowni poprzez podanie nadwyżki „zwykłego" jodu ^{127}I. Miał on za zadanie powstrzymywać wbudowywanie radioaktywnych izotopów jodu w hormony tarczycowe. Nominalnie w takich przypadkach należy podawać tabletki jodowe, jednakże wobec ich niedostępności zdecydowano się na wykorzystanie płynu Lugola – 10% wodnego roztworu jodu w jodku potasu. Co ważne, roztwór ten przeznaczony jest wyłącznie do stosowania zewnętrznego; wyjątkowość sytuacji jednak sprawiła, że zdecydowano się na podanie wewnętrzne.

Krótki czas połowicznego rozpadu ($T_{1/2}$ = 8,04 dnia) a także energia emitowanych cząstek beta (0,61 MeV) spowodował, że ^{131}I znalazł zastosowanie jako radiofarmaceutyk. W wyniku reakcji rozpadu tworzy się trwały izotop gazu szlachetnego – ksenonu:

$$ {}_{53}^{131}I \rightarrow {}_{54}^{131}Xe + {}_{-1}^{0}\beta^{-} + \bar{\nu} $$

Tabela 1. Poziom zawartości substancji promieniotwórczych [Bq/kg] w skażonej żywności i skażonej wodzie przeznaczonej do spożycia przez ludzi (na podstawie Rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 27 kwietnia 2004 roku w sprawie wartości poziomów interwencyjnych dla poszczególnych rodzajów działań interwencyjnych oraz kryteriów odwołania tych działań (Dz.U. Nr 198/2004r., Poz. 987))

Substancja promieniotwórcza	Środki spożywcze przeznaczone do karmienia niemowląt*	Mleko, woda, przetwory mleczne i inne płyny spożywcze**	Inne środki spożywcze**
Izotopy strontu, głównie ^{90}Sr	75	125	750
Izotopy jodu, głównie ^{131}I***	150	500	2000
Izotopy alfa promieniotwórcze, głównie pluton ^{239}Pu i ameryk ^{241}Am	1	20	80
Inne izotopy o $T_{1/2}$ > 10 dni, głównie cez ^{134}Cs i ^{137} Cs	400	1000	1250

Objaśnienia: * – przez pierwszych 6 miesięcy życia; ** – dokładny wykaz danych zawiera Rozporządzenie; *** – rozważane jest podanie preparatów ze stabilnym jodem, jeżeli u dowolnej osoby z zagrożonego terenu zachodzi możliwość otrzymania na tarczycę dawki pochłoniętej równej co najmniej 100 mGy (miligrejom).

eprasa.pl 34b251bb23

Na podstawie tej reakcji widać jasno, że podstawienie „zwykłego” jodu jego nietrwałym izotopem po pewnym czasie może spowodować znaczne obniżenie zawartości tego pierwiastka w organizmie i w efekcie głębokie upośledzenie działania organizmu. Nie wspominając oczywiście o narażeniu wewnętrznym na promieniowanie jonizujące, w szczególności promieniowanie beta! Prawdopodobnie to z tego właśnie powodu Rada Ministrów w swoim Rozporządzeniu z dnia 18 stycznia 2005 roku w sprawie planów postępowania awaryjnego w przypadku zdarzeń radiacyjnych (Dz.U. z 2005 r., Nr 20 Poz. 169) zdecydowała się wprowadzić zapis nakazujący podanie preparatów ze stabilnym jodem ludności, która w wyniku zdarzenia radiacyjnego może otrzymać dawkę promieniowania jonizującego przekraczającą dawkę graniczną dla ogółu ludności (1 mSv/rok). Należy jednak zauważyć, że podanie takich preparatów nie może być uwarunkowane jedynie przekroczeniem rocznej dawki granicznej dla ogółu ludności. Jeszcze większym niebezpieczeństwem jest przyjmowanie preparatów jodowych bez konsultacji medycznej – o skutkach takiego postępowania wspomniano powyżej.

Cez. Pomijając niezwykle rzadki promieniotwórczy frans, cez jest najbardziej miękkim i najbardziej ściśliwym metalem, o największej aktywności chemicznej i najniższej elektroujemności. Z uwagi na wysoką reaktywność chemiczną cez nie występuje w stanie wolnym. Tworząc związki chemiczne (które z reguły są trujące) atom cezu oddaje swój jedyny elektron z powłoki walencyjnej stając się jednododatnim kationem tym samym występując w przyrodzie w postaci soli rozpuszczalnych.

Największe zagrożenie niosą ze sobą: izotop cezu ^{137}Cs ($T_{1/2}$ = 30 lat), najpowszechniejszy pośród radioaktywnych izotopów tego pierwiastka, oraz izotop cezu ^{134}Cs ($T_{1/2}$ = 2,1 lat). Izotopy te po emisji cząstki beta minus o energii dochodzącej do 1,18 MeV, stają się stabilnymi izotopami baru – odpowiednio ^{137}Ba i ^{134}Ba (którego sole są toksyczne):

$$^{137}_{55}Cs \rightarrow {}^{137}_{56}Ba + {}^{0}_{-1}\beta^{-} + \bar{\nu}$$

Po izotopie jodu ^{131}I cez stanowi drugi najliczniej uwalniany radioizotop w przypadku awarii reaktorów jądrowych, pomijając gazy szlachetne. Ze względu na jego chemiczne podobieństwo do potasu, jednowartościowego pierwiastka, podobnie jak cez zaliczanego do grupy litowców, stanowi zagrożenie dla zdrowia, poprzez zjawisko substytucji – atomy cezu zostają wbudowane w cały organizm człowieka w miejsce atomów potasu ^{39}K, ze szczególnym uwzględnieniem śledziony, wątroby i mięśni. Niewielka ilość wystarczy do wywołania anomalii w funkcjonowaniu organizmu.

Długożyciowe transuranowce. Zarówno pluton ^{239}Pu ($T_{1/2} = 2{,}41\times10^4$ lat), jak i ameryk ^{241}Am ($T_{1/2}$ = 4320 lat), są to izotopy alfa promieniotwórcze. Oznacza to, że z ich jąder atomowych emitowana jest cząstka alfa, składająca się z dwóch protonów i dwóch neutronów. Skutkuje to utworzeniem innych pierwiastków: dla plutonu jest to uran ^{235}U a dla ameryku neptun ^{237}Np, według poniższych reakcji:

$$^{239}_{94}Pu \rightarrow {}^{235}_{92}U + {}^{4}_{2}\alpha \qquad {}^{241}_{95}Am \rightarrow {}^{237}_{93}Np + {}^{4}_{2}\alpha$$

Nuklidy te również są nietrwałe i ulegają dalszemu rozpadowi alfa z wytworzeniem kolejnych izotopów, odpowiednio toru ^{231}Th i protaktynu ^{233}Pa:

$$^{235}_{92}U \rightarrow {}^{231}_{90}Th + {}^{4}_{2}\alpha \qquad {}^{237}_{93}Np \rightarrow {}^{233}_{91}Pa + {}^{4}_{2}\alpha$$

Nie wdając się w dalszą rozbudowę łańcucha przemian promieniotwórczych można łatwo zauważyć, że niezmiernie długożyciowe izotopy promieniotwórcze plutonu, ameryku oraz ich produktów rozpadu – toru i uranu, również są emiterami cząstek alfa.

Niebezpieczeństwo ze strony izotopów alfa promieniotwórczych płynie stąd, że emitowana cząstka alfa bardzo silnie jonizuje ośrodek, w którym się porusza. Cząstki alfa są stosunkowo duże, choćby w porównaniu z elektronem czy pojedynczym neutronem. Jedynie śladowa część energii tych cząstek ulega rozproszeniu. Zasięg jej nie jest zbyt duży, jednakże już na tak krótkim odcinku drogi helion – bo taka jest jej inna nazwa, od faktu, że jest to jądro atomu helu – może narobić bardzo wiele szkód.

W wyniku emisji cząstki alfa z jądra atomowego, zmienia się stan energetyczny elektronów w rozpadającym się atomie, a nadmiar energii z elektronów jest emitowany w postaci kwantów promieniowania elektromagnetycznego. Równocześnie zmienia się stan energetyczny jądra, co skutkuje emisją promieniowania gamma. Te trzy aspekty rozpadu alfa powodują, że opisane emitery alfa stanowią śmiertelne zagrożenie w przypadku dostania się ich do organizmu człowieka. Najpoważniejszymi szkodami wyrządzanymi przez cząstkę alfa są, oprócz radiolizy wody, dwuniciowe uszkodzenia DNA co prowadzi do nieodwracalnych zmian w genomie a tym samym jego funkcjonowaniu. Jeśli uszkodzona nić DNA nie zostanie naprawiona, prowadzi to do śmierci komórki a w konsekwencji trwałego uszkodzenia tkanek i następnie śmierci organizmu. Najgłośniejszym przykładem ostatnich lat zabójczego działania emiterów alfa jest śmierć Aleksandra Litwinienki która nastąpiła po wchłonięciu drogą pokarmową związków innego pierwiastka alfa promieniotwórczego, jakim jest polon ^{210}Po.

Serdeczne podziękowania dla dr inż. Krzysztofa W. Fornalskiego za niezwykle konstruktywne uwagi merytoryczne podnoszące jakość niniejszego artykułu.

Dr Wioletta Monika Dynkowska
Zakład Biochemii i Fizjologii Roślin Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin – PIB w Radzikowie

LITERATURA:

[1] Ustawa Prawo Atomowe (Dz.U. 2001 Nr 3 poz.18; Dz.U. 2019 poz. 1972; Dz.U. 2020 poz. 284, 322).
[2] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 27 kwietnia 2004 roku w sprawie wartości poziomów interwencyjnych dla poszczególnych rodzajów działań interwencyjnych oraz kryteriów odwołania tych działań (Dz.U. 2004 Nr 98 Poz. 987).
[3] Gostkowska, B. Fizyczne podstawy ochrony radiologicznej. Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, Warszawa 1992.
[4] Gostkowska, B. Ochrona radiologiczna. Wielkości, jednostki, obliczenia. Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, Warszawa 2018.
[5] Eichstaedt, I. Księga pierwiastków. Wiedza Powszechna, Warszawa 1970.
[6] Sieńczuk W (red.) Toksykologia współczesna. Wydawnictwo Lekarskie PZWL Warszawa 2005.
[7] Strona internetowa Państwowej Agencji Atomistyki, https://www.paa.gov.pl.

eprasa.pl 34b251bb23

Foto – Dreamstime

Fizyka współczesnych instrumentów geodezyjnych

Nie ma potrzeby uzasadniać, że zjawiska i prawa fizyki są wykorzystywane we wszystkich dziedzinach współczesnej techniki. Dziedziny te bywają związane z bardzo różnymi obszarami ludzkiej działalności, jak choćby ratownictwo medyczne, czy nawigacja satelitarna [1, 2]. Jedną z ważnych dziedzin takiej działalności jest geodezja.

Stanisław **Bednarek**

W obecnym rozumieniu geodezja zajmuje się matematycznym opisem kształtu Ziemi oraz wyznaczaniem współrzędnych punktów w pobliżu jej powierzchni [3]. Punkty te mogą należeć zarówno do obiektów pochodzenia naturalnego, np. wzniesień terenu, brzegów zbiorników wodnych, spowodowanych przez procesy geologiczne, jak też do obiektów pochodzenia sztucznego, wytworzonych przez człowieka (inaczej mówiąc antropogenicznych), np. narożniki budynków, granice ogródków działkowych. Rozpatrywane obiekty mogą również znajdować się pod powierzchnią Ziemi, np. rurociągi, kable energetyczne, chodniki w kopalniach. Osoby zajmujące się zawodowo tą dziedziną to geodeci.

Istnieją dowody wskazujące na to, że pomiary geodezyjne były wykonywane już ok. 1,5 tys. lat przed naszą erą w Babilonii i starożytnym Egipcie i polegały głównie na pomiarach gruntów, ale nie tylko [4]. Do dziś nie jest wyjaśnione, w jaki sposób wytyczono orientację boków piramidy Cheopsa o długości ponad 230 m wzdłuż kierunku północ-południe z dokładnością 4 minut kątowych i wyrównano przy nich teren, zachowując dokładność 2 cm [5].

Nazwa geodezja została wprowadzona w starożytnej Grecji przez Arystotelesa. Na terenie Polski pomiary geodezyjne były wykonywane już ok. XIII wieku i też dotyczyły głównie granic gruntów rolnych oraz granic miast. Pierwszą w Polsce książkę poświeconą geodezji napisał po łacinie profesor Akademii Krakowskiej (nazywanej później Uniwersytetem Jagiellońskim) Marcin Król z Żurawicy w roku 1450 i nadał jej tytuł „Geometria Regis".

Najstarszy podręcznik napisany w języku polskim miał tytuł „Geometria to jest miernicka nauka" i przeznaczony był właśnie dla geodetów. Dokonał tego Stanisław Grzepski w 1566 r. Pierwsza w Polsce katedra geodezji została założona w Akademii Krakowskiej, w 1610 r. Jej twórcą był matematyk Jan Brożek, który również napisał po łacinie podręcznik dla geodetów zatytułowany „Geodesia distantiarum" [6, 7].

Obecnie bez udziału geodety nie można zrealizować prawie zadanej inwestycji budowlanej, np. budynku mieszkalnego, wiaduktu, drogi, tunelu, zakładu przemysłowego, lotniska. Nawet przy budowie domu jednorodzinnego niezbędny jest geodeta, jeżeli taka inwestycja ma być wykonana zgodnie z prawem obowiązującym w Polsce. Geodeci zajmują się też obiektami już zbudowanymi, przeprowadzając tzw. pomiary powykonawcze i inwentaryzacyjne. Dokonują też m.in. podziałów i ewidencji gruntów oraz sporządzają mapy. W swojej pracy geodeci posługują się odpowiednimi przyrządami pomiarowymi, nazywanymi zwykle instrumentami. Celem tego artykułu jest pokazanie, jakie zjawiska i prawa fizyki są wykorzystywane we współcześnie używanych, instrumentach geodezyjnych.

eprasa.pl 34b251bb23

Przegląd podstawowych instrumentów

Pierwsze instrumenty pomiarowe, używane w geodezji miały bardzo prostą budowę. Były to pręty o określonej długości, tzw. żerdzie, łańcuchy czy krokiewki. Stąd też ówczesnych geodetów nazywano czasem „żerdnikami". Krokiewki przypominały nieco rozwarty cyrkiel i składały się z dwóch prętów, połączonych ze sobą w pobliżu ich końców. Między niepołączonymi końcami była ustalona odległość, która służyła jako jednostka miary. Geodeta idąc trzymał krokiewkę ręką w miejscu połączenia prętów i obracając ją o 180° zaznaczał na gruncie kolejne jednostki.

Krokiewki stosowano ponoć w Polsce zaraz po II wojnie światowej podczas przydziału rolnikom gruntów zabranych tzw. obszarnikom w ramach reformy rolnej, którą chętnie pokazywały ówczesne kroniki filmowe. Taka metoda była szybka, ale niestety mało dokładna. Nic więc dziwnego, że gdy kilka lat później zsumowano powierzchnię wszystkich działek przydzielonych tą metodą i porównano z wcześniejszymi danymi, to różnica powierzchni Polski wynosiła 4%.

Libella pudełkowa

Przyrządy pomiarowe o prostej konstrukcji też są obecnie używane w geodezji. Przykładem jest taśma miernicza, zwijana przy pomocy korbki w uchwycie i stąd nazywana w żargonie zawodowym ruletką. Takie przyrządy tracą jednak znaczenie i są zastępowane przez bardziej zaawansowane technologicznie rozwiązania, jak choćby dalmierze laserowe. Prostym i nadal często używanym przyrządem jest natomiast specjalna poziomica, nazywana libellą pudełkową lub sferyczną, mająca kształt przezroczystego, naczynia, zamkniętego od góry wypukłą (fot. 1, rys. 1). Wewnątrz znajduje się ciecz i pęcherzyk powietrza, a w środkowej części wypukłej powierzchni zaznaczony jest okrąg. Przyrząd ten stanowi odmianę lepiej znanej poziomicy rurkowej, stosowanej powszechnie, np. w budownictwie i pozwalającej wyznaczyć poziome położenie linii prostej.

W odróżnieniu od poziomicy rurkowej, libella pudełkowa umożliwia wyznaczenie poziomego położenia płaszczyzny. Jej działanie opiera się na wykorzystaniu zjawiska, polegającego na tym, że w stanie równowagi powierzchnia swobodna cieczy musi być prostopadła do pionu. Gdyby tak nie było, to wówczas istniałyby siły, powodujące przepływ cieczy i wyrównanie się poziomu, ponieważ ciecze nie mają własnego kształtu. Jeżeli warunek ten jest spełniony, to pęcherzyk powietrza w libelli znajduje się wewnątrz okręgu zaznaczonego w górnej, sferycznej części przezroczystej obudowy.

Libella pudełkowa jest szeroko stosowana do poziomowania innych instrumentów geodezyjnych i pionowego ustawiania (pionowania) łat, czyli listew z podziałką, niezbędnych m.in. do pomiarów wysokościowych. Do poziomowana służą trzy precyzyjnie wykonane śruby, wkręcane w dolną część instrumentu, nazywaną spodarką, w którą wmontowana jest również libella. Sprawne posługiwanie się tymi śrubami to umiejętność, którą powinien opanować każdy student geodezji już w pierwszych tygodniach nauki. W przypadku pionowania łat, libella jest mocowana z boku łaty na specjalnym uchwycie kątowym. Pionowanie łaty odbywa się przez jej odchylenie w odpowiednim kierunku, tak żeby pęcherzyk znalazł się wewnątrz okręgu.

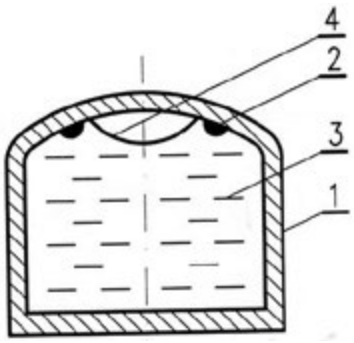
Lustro miernicze

Często do pomiarów geodezyjnych jest wykorzystywana wiązka światła laserowego, wysyłana przez instrument pomiarowy, która odbija się od zwierciadła (nazywanego zwykle lustrem) i wraca do instrumentu. Lustro jest ustawiane na wybranym punkcie mierzonego obiektu. Mogłoby się wydawać, że wystarczy do tego celu płaskie zwierciadło o odpowiednio dużym współczynniku odbicia. Tak jednak nie jest, bo wtedy, wiązka najczęściej nie wróciłaby do instrumentu.

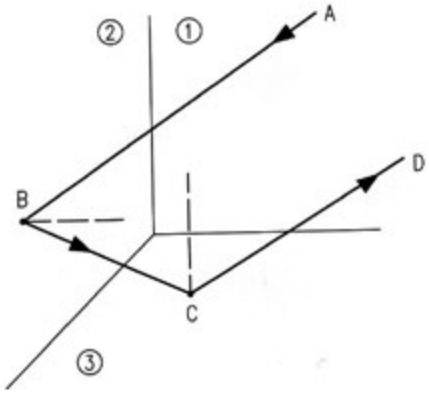
Zgodnie z prawami odbicia światła, taki powrót byłby możliwy tylko w jednym przypadku – prostopadłego padania wiązki na zwierciadło. Z tego powodu stosowane są układy trzech wzajemnie prostopadłych zwierciadeł płaskic, przypominające narożnik pryzmatu (rys. 2). Dlatego takie lustra są też nazywane lustrami pryzmatycznymi.

Taki układ ma interesującą własność. Polega ona na tym, że wiązka padająca pod dowolnym kątem na któreś ze zwierciadeł wraca wzdłuż linii równoległej do kierunku padania. Podobną strukturę, złożoną z wielu przylegających do siebie mikropryzmatów, mają folie odblaskowe, używane w geodezji zamiast luster, powierzchnie znaków drogowych i świateł odblaskowych.

Fot. 1. Wygląd zewnętrzny libelli pudełkowej.

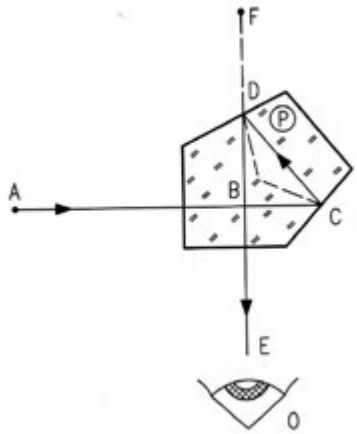


Rys. 1. Budowa libelli pudełkowej pokazana w przekroju osiowym; 1 – przezroczysta obudowa, 2 – linia w kształcie okręgu, 3 – ciecz, 4 – pęcherzyk powietrza.



Rys. 2. Zasada działania zwierciadła trójściennego; 1, 2, 3 – wzajemnie prostopadłe zwierciadła płaskie, AB, BC, CD – promienie odpowiednio: padający, pośredni i powracający.

eprasa.pl 34b251bb23



Rys. 3. Zasada działania węgielnicy z pryzmatem pentagonalnym; P – pryzmat, AC, CD, DE – promienie odpowiednio: padający, pośredni i wychodzący, O – oko, BF – odcinek wyznaczający kierunek prostopadły do kierunku AB.

Fot. 2 Niwelator optyczny firmy Bosch.

Węgielnica

Również prostym i interesującym przyrządem jest węgielnica, przeznaczona do wyznaczania w terenie linii prostopadłych do siebie (rys. 3). Jej nazwa pochodzi od przestarzałej nazwy „węgieł", oznaczającej narożnik budynku lub budowli, który najczęściej powinien mieć kąt prosty. W takich narożnikach umieszczono też na początku budowy symboliczne kamienie, nazywane kamieniami węgielnymi.

Węgielnica ma postać pięciokątnego, pryzmatu wykonanego ze szkła. Taki pryzmat jest nazywany pryzmatem pentagonalnym. Współczynnik załamania szkła powinien być odpowiednio duży – taki żeby promień światła, wchodzący do pryzmatu przez jedną z dwóch prostopadłych do siebie ścian, ulegał całkowitemu, wewnętrznemu odbiciu od pozostałych ścian. Niech pryzmat będzie przymocowany do tyczki ustawionej pionowo i przechodzącej przez punkt B, natomiast druga tyczka zostanie ustawiona punkcie A. Geodeta patrząc na jedną z prostopadłych do siebie ścian widzi pozorny obraz tyczki z punktu A, jako znajdujący się w punkcie F. Żeby wytyczyć dwie linie wzajemnie prostopadłe, należy ustawić trzecią tyczkę w punkcie F.

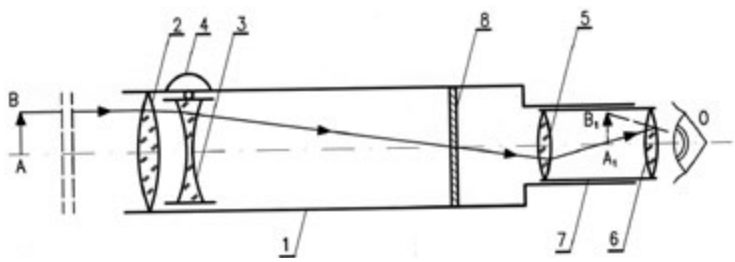
Niwelator

Niwelator jest instrumentem przeznaczonym do pomiarów wysokości, na których znajdują się wybrane punkty. Są to pomiary względne w stosunku do znanych wysokości ustalonych punktów, tzw. reperów, przyjętych w obowiązującym układzie odniesienia. Elementem pośredniczącym w tych pomiarach są laty, czyli listwy z podziałką, ustawiane pionowo w odpowiednich punktach. Wygląd zewnętrzny typowego niwelatora optycznego przedstawia fot. 2. Jednym z najważniejszych jego podzespołów jest luneta geodezyjna, obracana wokół osi pionowej i poziomej, a przez to umożliwiająca precyzyjne wycelowanie na wybrany punkt. Schematycznie taka luneta została pokazana na rys. 4, wyjaśniającym też sposób powstawania w niej obrazu. Jest to rozbudowana luneta Keplera, która w wersji wyjściowej dawała obraz odwrócony.

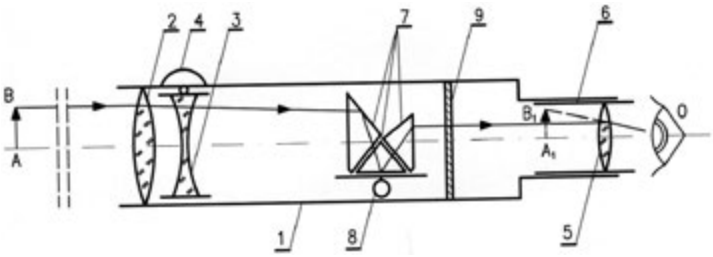
Odwracanie obrazu, nie przeszkadzające w obserwacjach astronomicznych, byłoby bardzo niewygodne w pomiarach geodezyjnych, ponieważ, np. cyfry na łatach byłoby widać „do góry nogami". Dlatego w lunecie geodezyjnej dodano do okularu soczewkę, która odwraca obraz i dzięki temu geodeta widzi końcowy obraz prosty, pozorny i powiększony. Typowe powiększenie lunety geodezyjnej wynosi 30 razy.

Przez okularem lunety umieszczono płytkę z kreskami, krzyżującymi się na osi optycznej lunety, tzw. płytkę krzyża kresek, który naprowadza się na wybrany punkt, żeby umożliwić celowanie. Do obiektywu dodano też przesuwaną soczewkę rozpraszającą, co z kolei ułatwia ustawienie ostrości obrazu wybranego przedmiotu. Taki obiektyw jest nazywany teleobiektywem. Ostrość krzyża kresek ustawia się przemieszczając okular.

Schemat podany na rys. 4 został znacznie uproszczony, ponieważ w rzeczywistych konstrukcjach zamiast poje-



Rys. 4. Schemat lunety Keplera zastosowanej jako luneta geodezyjna; 1 – tubus lunety, 2, 3 – soczewki obiektywu, 4 – pokrętło ustawiania ostrości przedmiotu, 5, 6 – soczewki okularu, 7 – tubus okularu, 8 – płytka z krzyżem kresek, O – oko, AB – przedmiot, A_1B_1 – obraz.



Rys. 5. Schemat lunety Keplera z kompensatorem grawitacyjnym zastosowanej jako luneta geodezyjna; 1 – tubus lunety, 2, 3 – soczewki obiektywu, 4 – pokrętło ustawiania ostrości przedmiotu, 5 – soczewka okularu, 6 – tubus okularu, 7 – pryzmaty kompensatora, 8 – oś obrotu kompensatora, 8 – płytka z krzyżem kresek, O – oko, AB – przedmiot, A_1B_1 – obraz.

eprasa.pl 34b251bb23

dynczych soczewek stosuje się ich zespoły w celu usunięcia wad optycznych, takich jak: aberracje: sferyczną i chromatyczną oraz dystorsję, astygmatyzm i komę.

Przed rozpoczęciem pomiarów niwelator powinien być dokładnie spoziomowany. Do tego celu służy opisana wcześniej libella pudełkowa, widoczna też z prawej strony na fot. 2. Ręczne, dokładne poziomowanie instrumentów geodezyjnych jest dość uciążliwe i zajmuje sporo czasu.

W celu usunięcia drobnych błędów poziomowania, w granicach ok. 0,5°, stosowane są w niektórych niwelatorach kompensatory grawitacyjne (rys. 5). Są to układy pryzmatów zawieszone wahadłowo, które ustawiają się pionowo, mimo niewielkiego pochylenia osi lunety [8]. Te pryzmaty powodują też odwracanie obrazu, dzięki zjawisku całkowitego wewnętrznego odbicia światła od ich podstawy. Przykład lunety geodezyjnej z kompensatorem grawitacyjnym i wyjaśnienie sposobu powstawania obrazu końcowego przedstawia schematycznie rys. 5.

Oprócz niwelatorów optycznych stosowane są też niwelatory elektroniczne, które umożliwiają m.in. zapis wyników pomiarów w pamięci instrumentu. Nadal jednak ich podstawowym podzespołem jest luneta geodezyjna. Dodatkowe linie, naniesione obok krzyża kresek, umożliwiają też pomiary odległości, ale w ograniczonym zakresie.

Dalmierz laserowy

Jak wspomniano wcześniej, zamiast bezpośrednich pomiarów, np. za pomocą taśmy mierniczej, coraz częściej wykonuje się pomiary zdalne. Służą do tego celu m.in. dalmierze laserowe. Najprostsze z nich są dostępne w hipermarketach z materiałami budowlanymi w cenie ok. 150 zł. Dalmierz laserowy wysyła wiązkę światła czerwonego albo z zakresu bliskiej podczerwieni, którego źródłem jest laser półprzewodnikowy, zasilany z baterii, albo akumulatora. Ta wiązka jest modulowana amplitudowo falą o mniejszej częstotliwości i kierowana na wybrany punkt, od którego ulega częściowemu odbiciu i wraca do fotodetektora umieszczonego w dalmierzu.

Na przejście od dalmierza do wybranego punktu i powrót jest potrzebny określony czas. Wiązka wchodząca do fotodetektora jest więc przesunięta w fazie względem wiązki wychodzącej i przesunięcie to zależy od odległości. Wykrycie wielkości tego przesunięcia przez układ elektroniczny umożliwia wyznaczenie odległości dalmierza od wybranego punktu. Prędkość światła zależy od ciśnienia, temperatury i wilgotności powietrza i wpływa na przesunięcie fazowe. Dokładne dalmierze uwzględniają wpływ tych czynników. Bardziej zawansowane wersje najnowszych dalmierzy pozwalają też na pomiar kątów między kierunkami odległości i zapis wyników pomiarów w pamięci instrumentu (fot. 3).

Fot. 3. Nowoczesny dalmierz laserowy z możliwością pomiaru kątów.

Teodolit

Teodolit jest instrumentem używanym do pomiaru kątów w płaszczyźnie pionowej i poziomej (fot. 4). Dokonuje się tego przy użyciu lunety, zbudowanej podobnie jak w przypadku niwelatora i mającej dwa stopnie swobody, czyli możliwość obrotu wokół osi pionowej i poziomej. Po wycelowaniu środka krzyża kresek na wybrany punkt kąty są odczytywane na skalach koła poziomego i pionowego.

Wykorzystując wyniki pomiaru tych kątów i wcześniej zmierzonej z dużą dokładnością odległości między dwoma punktami, nazywanej bazą, oblicza się odległości między innymi punktami, dla których zmierzono te kąty. W tym celu są stosowane zależności matematyczne, zachodzące między bokami i kątami trójkątów. Stąd też ta metoda jest nazywana triangulacją.

Niektóre typy teodolitów były wyposażone w nasadkę dalmierczą, pozwalającą również na pomiar odległości. Obecnie teodolity są rzadko używane, ponieważ zostały zastąpione przez instrumenty nowszej generacji, czyli tachimetry. Przed rozpoczęciem pomiarów teodolit wymagał wypoziomowania za pomocą wcześniej opisanej libelli pudełkowej albo w przypadku starszych typów za pomocą dwóch ustawionych prostopadle do siebie libelli rurkowych.

Tachimetr

Jest to jeden z najczęściej obecnie używanych instrumentów geodezyjnych. Umożliwia pomiary z dużą dokładnością odległości wybranych punktów oraz kątów pionowych i poziomych [9]. Wysokiej klasy tachimetry pozwalają na pomiar kąta z błędem nie przekraczającym 1” (jednej sekundy kątowej) i odległości z błędem nie większym, niż 5 mm/km. Zakres pomiarów w sprzy-

Fot. 4. Teodolit Dahlta 010B z lat osiemdziesiątych XX w.

Fot. 5. Wygląd zewnętrzny współczesnego tachimetru.

eprasa.pl 34b251bb23

jających warunkach atmosferycznych bez lustra wynosi kilkaset metrów, a z lustrem do 5 km.

Tachimetry nazywane są czasem stacjami pomiarowymi. Również w tym instrumencie podstawowym podzespołem jest wcześniej opisana luneta geodezyjna, służąca do wycelowania środka krzyża kresek na wybrany punkt. Współczesne tachimetry są bardzo zaawansowanymi technologiczne przyrządami optoelektronicznymi. Pomiar odległości odbywa się za pomocą wbudowanego w nich dalmierza laserowego, a poziomowanie przy pomocy libelli pudełkowej, opisanych wcześniej albo libelli elektronicznej. Wyniki pomiarów są zapisywane w pamięci półprzewodnikowej, np. na karcie SD, mogą być też wstępnie opracowywane za pomocą programów obliczeniowych, dostępnych w instrumencie i przesyłane drogą radiową przez Bluetooth'a.

Stosuje się również tachimetry zmotoryzowane, obsługiwane zdalnie przez jedną osobę z pozycji mierzonego punktu, gdzie ustawione jest lustro. Odbywa się to za pomocą kontrolera, przymocowanego do tyczki lustra i łącza Bluetooth.

Są też tachimetry zrobotyzowane, wyposażone w układ automatycznego rozpoznawania celu (ATR – automatic target recognition), które wykonywają pomiary według wprowadzonego do ich pamięci programu. Następnie opracowują wyniki pomiarów i wykorzystują je do zdalnego sterowania, np. równiarką na budowie drogi, albo koparką w kopalni odkrywkowej.

Kamera fotogrametryczna

Fotogrametria zajmuje się pomiarami geodezyjnymi na podstawie zdjęć powierzchni Ziemi. Zdjęcia te są wykonywane najczęściej z samolotów – fotogrametria lotnicza. Wykorzystuje się też w tym celu zdjęcia ze sztucznych satelitów Ziemi oraz z bezzałogowych statków powietrznych tzw. dronów. Do wykonywania zdjęć mają zastosowanie kamery fotogrametryczne, których zasada działania jest taka sama, jak aparatów fotograficznych. Promienie światła po przejściu przez wysokiej jakości obiektyw tworzą pomniejszony, rzeczywisty i odwrócony obraz wybranego fragmentu terenu [10].

Dawniej do zapisu tych obrazów używano płyt lub błon pokrytych specjalnie spreparowaną warstwą emulsji światłoczułej. Zapisany obraz był niewidoczny dla oka. Dlatego należało go poddać obróbce chemicznej, polegającej na wywołaniu i utrwaleniu, a następnie przeniesieniu na papier. Obecnie zapis obrazów dokonywany jest elektronicznie. W tym celu obiektyw tworzy obraz na płytce półprzewodnika o strukturze warstwowej, złożonej z wielu milionów elementów, nazywanych pikselami. Najczęściej jest to tzw. matryca CCD (ang. charge coupled device – matryca ze sprzężeniem ładunkowym), w której dzięki wewnętrznemu zjawisku fotoelektrycznemu, obraz zostaje przetworzony na ciąg sygnałów elektrycznych, zapisywanych następnie w pamięci aparatu.

Współczesna fotogrametria wykorzystuje oprócz światła widzialnego także promieniowanie podczerwone i ultrafioletowe – tzw. fotogrametria hiperspektralna. Pozwala to na obrazowanie, np. szybkości wzrostu roślin czy obiektów o podwyższonej temperaturze. Obiektywy kamer fotogrametrycznych muszą być wtedy wykonane ze specjalnego rodzaju szkła przepuszczającego dany rodzaj promieniowania [11]. Chociaż zasada działania i ogólna budowa kamer fotogrametrycznych jest podobna do powszechnie używanych aparatów fotograficznych, to mają one dodatkowe funkcje i podzespoły, np. zdalne sterowanie, programy automatycznego wykonywania zdjęć seryjnych, czy zabezpieczenie przed drganiami.

Odbiornik GPS

Znane i powszechnie używane na co dzień systemy globalnego pozycjonowania GPS (ang. Global Positioning System) są również podstawą pomiarów geodezyjnych. Systemy takie składają się z trzech komponentów – kosmicznego, naziemnego i zbioru użytkowników.

System kosmiczny to grupa (tzw. konstelacja) sztucznych satelitów Ziemi, poruszających się po odpowiednio dobranych orbitach. Każdy satelita jest wyposażony w precyzyjny zegar atomowy oraz w nadajniki i odbiorniki fal elektromagnetycznych, w tym nadajnik fali, zwierającej zakodowane informacje o jego położeniu, tzw. depeszę nawigacyjną.

Komponent naziemny to stacje kontrolne, rozmieszone w punktach o dokładnie pomierzonych współrzędnych. Zadaniem tych stacji jest sprawdzanie prawidłowości działań zegarów na satelitach i ich pozycji oraz obliczanie parametrów orbit i przekazywanie tych danych do satelitów. Użytkownicy korzystają z odbiorników fal elektromagnetycznych, wyposażonych w mikroprocesory i oprogramowanie, które na podstawie sygnałów dochodzących z satelitów obliczają współrzędne anteny odbiornika.

Do jednoznacznego wyniku obliczeń potrzebny jest jednoczesny odbiór sygnałów z co najmniej czterech satelitów. W ten sposób można wyznaczyć pozycję z do-

Fot. 6. Odbiornik GPS z kompensacją kąta pochylenia.

Fot. 7. Szybki skaner 3D firmy Faro.

eprasa.pl 34b251bb23

kładnością kilku metrów, co w zupełności wystarcza do zrządzania ruchem pojazdów, czy dla turystów. W geodezji konieczne są jednak dokładności w granicach 1 cm. Dlatego odbiorniki geodezyjne korzystają jeszcze z sieci stacji referencyjnych, które nadają informacje zwierające poprawki do obliczeń. Dopiero uwzględnienie tych poprawek zapewnia wymaganą dokładność.

Najnowsze odbiorniki GPS używane w geodezji nie wymagają pionowego ustawienia tyczki, na której są zamontowane. Wykorzystując efekt żyroskopowy wykrywają pochylenie i wprowadzają do obliczeń poprawki kompensujące. Takie rozwiązanie znacznie przyspiesza i ułatwia pomiary.

Najstarszym i najbardziej znanym systemem GPS jest amerykański GNSS Nav Star (Global Navigation Satellite System) powstały w latach sześćdziesiątych XX w. i wykorzystywany początkowo przez marynarkę wojenną.

Obecnie funkcjonują lub są wdrażane inne systemy, takie jak: europejski GALILEO, rosyjski GLONASS, chiński Bei Dou (Wielka Niedźwiedzica), indyjski GAGAN i francuski DORIS. Innowacyjnym rozwiązaniem są instrumenty hybrydowe, stanowiące połączenie odbiornika GPS i tachimetru. W miejscach, gdzie brak jest dostępu do sygnału z satelitów, np. pod drzewami, w cieniu wysokich budynków, instrument hybrydowy przełącza się na pomiar za pomocą tachimetru.

Skaner 3D

Bardzo szybki rozwój technologii informacyjnych spowodował wyodrębnienie się z geodezji nowej specjalności, którą jest geoinformatyka. Jej cel stanowi uzyskiwanie i przetwarzanie cyfrowych obrazów powierzchni Ziemi i znajdujących się na niej obiektów [12]. Do tworzenia tych obiektów są przeznaczone m.in. skanery 3D (fot. 7). Działają one na podobnej zasadzie, jak skanery do otrzymywania obrazów obiektów płaskich.

Skaner 3D wysyła wiązkę światła laserowego, kierowaną wzdłuż kolejnych linii na wybrany obiekt. Wiązka ta trafiając na poszczególne elementy obiektu ulega od nich częściowemu odbiciu w sposób zależny od lokalizacji i struktury tych elementów, a następnie wraca do fotodetektora znajdującego się w skanerze. W ten sposób powracająca wiązka przynosi informacje o poszczególnych elementach objętości obiektu, tzw. vokselach (z ang. volume element) Są to informacje np. o ich odległości, kolorze, nachyleniu powierzchni, zawarte w natężeniu, czasie powrotu, czy zmianie fazy wiązki. Te właściwości wiązki są przetwarzane przez fotodetektor na sygnały elektryczne, a następnie zapisywane w pamięci skanera.

Współczesne skanery 3D używane w geodezji mogą zbierać w czasie 1 s bardzo dużą ilość informacji, dotyczącą setek milionów punktów obiektu. W ten sposób tworzą tzw. chmury punktów. które po obróbce przez programy graficzne, np. Fotocapture, dają trójwymiarowe obrazy obiektu na ekranie monitora komputerowego. Obrazy te można otrzymywać za pomocą skanerów stacjonarnych – umieszczonych na statywie albo skanerów mobilnych, np. zamontowanych na samochodach lub przemieszczanych ręcznie wokół obiektu.

Fot. 8. Radar geodezyjny w czasie pracy.

Radar geodezyjny

Radary geodezyjne są przeznaczone do wykrywania oraz określania kształtu i położenia obiektów, znajdujących się pod powierzchnią gruntu, albo posadzki (fot. 8). Działają na podobnej zasadzie, jak radary do wykrywania obiektów w atmosferze. Emitują fale elektromagnetyczne, skierowane w dół, które ulegają odbiciu od znajdujących się na ich drodze obiektów, szczególnie metalowych np. rurociągów, kabli, a także starej broni, czy zabytkowych przedmiotów. Po odebraniu i przetworzeniu fal odbitych uzyskuje się informacje o współrzędnych i kształcie tych obiektów przedstawiane w postaci obrazów na ekranie monitora. Te informacje można również zapisywać i poddawać dalszej obróbce.

Ze względu na większe pochłanianie mikrofal przez grunt, radary geodezyjne pracują na falach ultrakrótkich (częstotliwość w granicach kilkudziesięciu MHz), zamiast na mikrofalach, wykorzystywanych przez inne radary. Głębokość penetracji gruntu dochodzi do kilkudziesięciu metrów, ale ze wzrostem głębokości maleje rozdzielczość, czyli zdolność wykrywania obiektów o małych rozmiarach.

Radary geodezyjne były używane m.in. do poszukiwania przed kilku laty słynnego „Złotego pociągu" w Wałbrzychu. Entuzjaści istnienia tego obiektu nie chcieli pogodzić się z wynikami przedstawionymi przez specjalistów i świadczącymi o jego niewykryciu. Przystąpili więc do prac wykopaliskowych, które przyniosły rozczarowujące efekty. W tej sytuacji zaczęli twierdzić, że „Złoty pociąg" istnieje, ale w innym miejscu.

Grawimetr

Ostatnią grupą opisywanych instrumentów są grawimetry, przeznaczone do dokładnych pomiarów przyspieszenia ziemskiego. Wykowywane przez uczniów ćwiczenie, polegające na wyznaczaniu przyspieszenia ziemskiego przy użyciu wahadła matematycznego też można uznać za pomiar grawimetryczny z tym zastrzeżeniem, że osiągana w warunkach szkolnych dokładność ok. 0,1 m/s^2 jest bardzo mała oraz zupełnie niewystarczająca do potrzeb geodetów i geologów.

eprasa.pl 34b251bb23

Najbardziej czułe, współczesne grawimetry wykrywają różnice przyspieszenia ziemskiego rzędu 10^{-11} m/s^2. Taką czułość osiągają wykorzystując zmiany położenia kuli z nadprzewodnika, lewitującej w polu magnetycznym (fot. 9).

Inne, znacznie mniej czułe przyrządy, działają na zasadzie dokładnego pomiaru czasu spadania kulki w próżni między dwoma bramkami fotoelektrycznymi [13].

Liczna grupa grawimetrów bazuje na pomiarach odkształcenia elementu sprężystego, spowodowanego przez ciężar zawieszonego na nich obciążnika. Najbardziej czułe grawimetry będą prawdopodobnie wykorzystywały efekty kwantowe, takie jak efekt tunelowy i zmiany w strukturze kondensatu Bosego-Einsteina.

Fot. 9. Precyzyjny grawimetr nadprzewodnikowy, wyprodukowany w USA.

Podsumowanie

Dla zapewnienia szybkiej orientacji w poruszanym temacie opisane z konieczności skrótowo instrumenty geodezyjne, ich zastosowanie i najważniejsze zjawiska fizyczne, dzięki którym te instrumenty działają zostały

Tab. 1. Zestawienie najczęściej używanych instrumentów geodezyjnych oraz ich zastosowań i fizycznych podstaw działania.

Lp.	Nazwa instrumentu	Zastosowanie	Zjawiska fizyczne, decydujące o głównej funkcji instrumentu
1	libella pudełkowa (sferyczna)	pionowanie i poziomowanie innych instrumentów	równowaga cieczy
2	lustro miernicze (pryzmatyczne)	pomiary odległości i kątów	odbicie światła
3	węgielnica	wytyczanie linii prostopadłych	załamanie i całkowite wewnętrzne odbicie światła
4	niwelator	pomiary wysokości punktów	załamanie, odbicie i całkowite wewnętrzne odbicie światła
5	dalmierz laserowy	pomiary odległości punktów, (opcjonalnie kątów)	odbicie światła, przesunięcie fazowe
6	teodolit	pomiary kątów (opcjonalnie odległości)	załamanie, odbicie i całkowite wewnętrzne odbicie światła
7	tachimetr (stacja pomiarowa)	pomiary odległości i kątów	załamanie, odbicie i całkowite wewnętrzne odbicie światła, przesunięcie fazowe (opcjonalnie propagacja fal radiowych)
8	kamera (aparat) do fotogrametrii lotniczej, satelitarnej, albo naziemnej	otrzymywanie obrazów terenu i obiektów terenowych	załamanie, odbicie i rozproszenie światła (opcjonalnie promieniowania podczerwonego i ultrafioletowego), efekt fotoelektryczny wewnętrzny
9	odbiornik GPS	pomiary współrzędnych punktów	propagacja fal elektromagnetycznych (mikrofal), przesunięcie fazowe, (opcjonalnie efekt żyroskopowy, propagacja fal radiowych)
10	skaner 3D	otrzymywanie cyfrowych obrazów obiektów	załamanie, odbicie i rozproszenie światła, fotoefekt wewnętrzny
11	radar geodezyjny (georadar)	otrzymywanie obrazów obiektów ukrytych (np. w gruncie, pod posadzką)	propagacja fal elektromagnetycznych (ultrakrótkich)
12	grawimetr	dokładne pomiary przyspieszenia ziemskiego	ruch jednostajnie zmienny, sprężystość, drgania, odbicie, załamanie i interferencja światła, lewitacja nadprzewodnika w polu magnetycznym, efekty kwantowe

eprasa.pl 34b251bb23

zebrane w tab. 1. Ponieważ prawa fizyki mają charakter uniwersalny, to bardzo kształcącym zadaniem będzie polecenie uczniom przeprowadzenie samodzielnych poszukiwań i sporządzenia podobnej tabeli dla przyrządów lub urządzeń stosowanych w innej dziedzinie współczesnej techniki, np. w informatyce, czy w obrazowej diagnostyce medycznej.

Możliwości wyboru odpowiedniej dziedziny są bardzo szerokie i mogą być zrealizowane w ten sposób, żeby były zbieżne z aktualnymi zainteresowaniami uczniów, czy zamiarami wyboru przez nich przyszłej pracy zawodowej. To z kolei pozwoli kształtować obraz fizyki, jako nauki o ogromnym potencjale aplikacyjnym i przez to bardziej przyjaznej uczniom.

Jako uzupełnienie trzeba dodać, że oprócz zjawisk fizycznych, decydujących spełnianiu podstawowej funkcji danego instrumentu, np. pomiarze odległości, zachodzą zjawiska wykorzystywane w jego podzespołach pomocniczych, ale też bardzo ważnych np. wyświetlaczu ciekłokrystalicznym, czy pamięci półprzewodnikowej. Są też zjawiska, mające negatywny wpływ na pracę instrumentu, których nie sposób uniknąć. Do takich zjawisk należy: pochłanianie światła przez zamgloną atmosferę, ograniczające zasięg lub uniemożliwiające pracę, niwelatorów, dalmierzy i tachimetrów, zwiększona aktywność Słońca, zakłócająca pracę odbiorników GPS, rozszerzalność cieplna źle wpływająca na dokładność łat geodezyjnych i wiele innych. Tego rodzaju zjawiska stanowią odrębny i obszerny problem, dlatego nie będą brane pod uwagę w tym artykule. Natomiast dla odnotowania tego problemu w nagłówku tab. 1 użyto sformułowania „Zjawiska fizyczne, decydujące o głównej funkcji instrumentu".

Praca geodety związana jest z dużą odpowiedzialnością. Błąd wytyczenia lokalizacji słupa energetycznego, pomiaru strzałki ugięciu mostu, czy położeniu granicy działki może spowodować duże szkody materialne, konflikty społeczne lub sprowadzić niebezpieczeństwo katastrofy budowlanej. Przed II wojną światową zawód geodety był zaliczany do grupy tzw. zawodów zaufania publicznego. Pomiary wykonane przez geodetę są też podstawą gospodarki nieruchomościami i zarządzania przestrzennego. Grunty, szczególnie te nadające się do uprawy rolniczej, są dobrem, którego niestety nie przybywa, a wręcz odwrotnie. Powierzchnia tych gruntów maleje z wielu powodów, m.in. wskutek rozwoju miast czy budowy dróg. To również jest przesłanką do dokładnej i odpowiedzialnej pracy.

Do wykonywania zawodu geodety potrzebne są: dobra znajomość matematyki, umiejętność pracy w zespole i wykorzystania technologii informacyjnej. kreatywność, a także rozumienie praw fizyki, zwłaszcza gdy podczas pomiarów w terenie nowoczesne instrumenty zachowują się w zaskakujący – tak bywa w pobliżu linii wysokiego napięcia. Czasem przydaje się też dobra kondycja fizyczna, np. gdy podczas jednego dnia pracy trzeba wykonać pomiary przenosząc instrument na drodze kilkunastu kilometrów albo utrwalić wyznaczone punkty i wbić kilkaset palików w twardy grunt.

Należy też zauważyć, że współczesna geodezja obejmuje dwa główne zakresy działalności. Pierwszy z nich to działalność praktyczna, polegająca na rutynowych pomiarach według dobrze znanych metod i obowiązujących norm prawnych. Drugi zakres stanowi działalność naukowa, w której zawiera się m.in. na poszukiwanie dokładniejszych i bardziej skutecznych metod pomiarów oraz opracowywania wyników i ocena użyteczności tych metod.

Do działalności naukowej należy też budowa i testowanie innowacyjnych instrumentów pomiarowych. Szczególnie ten drugi zakres stanowi okazję, a często także duże wyzwanie, dla inżynierów elektroników, mechaników, optyków do umiejętnego wykorzystania zjawisk i praw fizyki.

Stanisław Bednarek
Uniwersytet Łódzki, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

Fot. 1-3 i 5-9 pochodzą z firmowych materiałów informacyjnych, fot. 4 – fotografia autorska.

LITERATURA

[1] T. Kubiak, Latające karetki, czyli o fizyce śmigłowców, „Fizyka w Szkole, Czasopismo dla Nauczycieli", 363, Rocz. LXIII, nr 4, (2019).
[2] J. Kurzyk, Dlaczego działa GPS?, „Fizyka w Szkole, Czasopismo dla Nauczycieli", 355, Rocz. LX, nr 4, (2017).
[3] W. Kosiński, Geodezja, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa (2012).
[4] http://www.geosilesia.pl/historia-geodezji/ [dostęp: 4.05 2020].
[5] S. Bednarek, Anomalie pola grawitacyjnego Ziemi powodowane przez człowieka, „Fizyka w Szkole Czasopismo dla Nauczycieli", 367, Rocz. LXIV, nr 2, (2020).
[6] M. Iłowiecki, Dzieje nauki polskiej, Wydawnictwo Interpress, Warszawa (1981).
[7] K. Sawicki, Pięć wieków geodezji polskiej. Szkice historyczne XV-XIX wiek, Państwowe Przedsiębiorstwo Wydawnictw Kartograficznych, Warszawa (1964).
[8] E. Osada, Geodezyjne pomiary szczegółowe, Wydawnictwo UxLan, Wrocław (2014).
[9] E. Osada, Geodezja, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław (2001).
[10] F. Ratajczyk, Instrumenty optyczne, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław (2002).
[11] M. Spiralski, Wstęp do teledetekcji, czyli optyka w praktyce, „Fizyka w Szkole, Czasopismo dla Nauczycieli", 364, Rocz. LXIII, nr 5, (2019).
[12] S. Ilczuk, Cyfrowa Ziemia 20 lat później, „Przegląd Geodezyjny", Rocz. XCI, nr 4, (2019).
[13] Z. Fajklewicz, Grawimetria stosowana, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne Akademii Górniczo-Hutniczej, Kraków (2007).

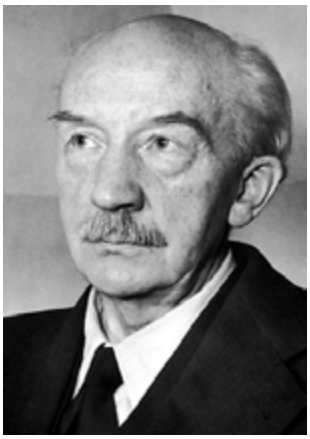
Zostań kosmonautą!

Europejska Agencja Kosmiczna (ESA) rozpocznie 31 marca rekrutację chętnych do udziału w misjach kosmicznych. Każdy, kto nie przekroczył 50 lat może zgłaszać swój akces. Organizatorzy zachęcają zwłaszcza kobiety, jak również osoby z niepełnosprawnościami. Aby zostać kosmonautą trzeba jednak mieć ukończone studia z obszaru nauk ścisłych. Preferowane, choć niekonieczne, jest posiadanie certyfikatu pilota testowego. ESA planuje przyjąć od 4 do 6 osób. Wynagrodzenie nawet 8 tys. euro miesięcznie.

Oferta ukaże się pod linkiem https://www.esa.int/About_Us/Careers_at_ESA, gdzie zostaną podane wszystkie informacje w zakresie wymaganych dokumentów.

eprasa.pl 34b251bb23

Walther Bothe
– w 130 rocznicę urodzin
Nietuzinkowy badacz i odkrywca



Fot. 1, 2. *Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947) nagroda Nobla w 1918 r. oraz Walther Wilhelm Georg Bothe (1891-1957) nagroda Nobla w 1954 r.*
Źródło: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d7/Max_planck.jpg
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ea/Bothe.jpg

Początek XX wieku był okresem wielkich, wręcz rewolucyjnych, odkryć i osiągnięć w fizyce teoretycznej i eksperymentalnej.

Kazimierz **Mikulski**

W 1900 roku zaczęło się od Maxa Plancka[1] i Alberta Einsteina, który dokonał „zburzenia panującego paradygmatu fizyki newtonowskiej". W tym okresie zrealizowano eksperymentalne prace nad badaniem budowy atomu. Dokonali tego tacy fizycy jak Ernest Rutherford, Hans Geiger i Artur Compton.

W latach dwudziestych tegoż wieku, inni naukowcy ze świata fizyki, jak: Niels Bohr, Werner Heisenberg, Max Born, Wolfgang Pauli, James Franck położyli teoretyczne podstawy współczesnej mechaniki kwantowej. Takie przełomowe działania nie tylko ogromnie wpłynęły na rozwój fizyki, ale wkrótce zauważalny był ich wpływ w innych naukach przyrodniczych, filozofii, a także i polityce międzynarodowej. Jednym z tych nietuzinkowych badaczy był uczeń i zaufany asystent Plancka i Geigera – Walther Bothe „*głęboko zanurzony w tej intelektualnej rewolucji*."[2]

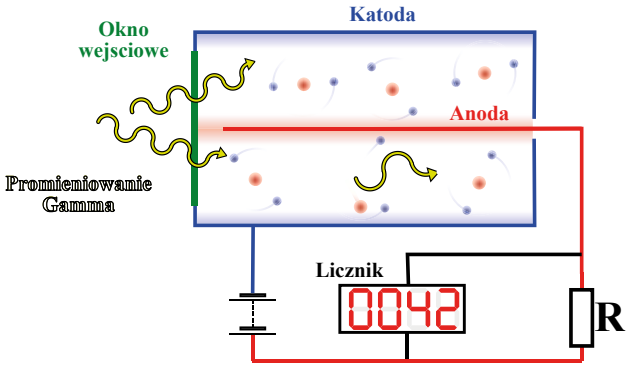
Walther Wilhelm Georg Bothe urodził się 8 stycznia 1891 roku w Oranienburgu, a zmarł 8 lutego 1957 r. w Heidelbergu. To niemiecki fizyk, matematyk i chemik, a przede wszystkim laureat Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki w roku 1954, której współlaureatem był Max Born[3].

W szerokiej literaturze przedmiotu można zapoznać się działaniami i życiem naukowym tego niecodziennego fizyka.[4] Po I wojnie światowej Bothe współpracował z Hansem Geigerem w *Physikalisch-Technische Reichsanstalt* w Berlinie, gdzie dokonali najistotniejszego odkrycia. Wspólnie z Geigerem stworzyli „metodę koincydencji". Zbudowany w 1924 roku przez Bothera obwód elektryczny był jedną z pierwszych w historii realizacją bramki logicznej AND. Miało to istotne znaczenie dla późniejszej konstrukcji komputera, których działanie oparte było na półprzewodnikach.

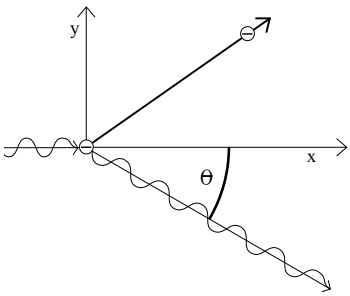
W uzasadnieniu przyznanej Bothowi Nagrody Nobla napisano: „**za metodę zbiegu okoliczności i dokonane dzięki niej odkrycia**".

Wykładu po przyznaniu Nagrody Nobla W. Bothe z powodu choroby nie wygłosił. W przekazanym tekście zatytułowanym „Metoda zbiegu okoliczności[5]" poinformował o swojej współpracy z Maxem Planckiem, u którego wykonał pierwsze pomiary w ramach pracy magisterskiej oraz z Hansem Geigerem, u którego w 1913 roku został asystentem.

Bothe wskazał, „że eksperymenty Geigera i Marsdena (wpływ Rutherforda, u którego wykonali eksperymen-



Rysunek 1. Licznik Geigera-Müllera – licznik promieniowania jonizującego opracowany przez Hansa Geigera wraz z Walterem Müllerem (1095-1979) w 1928 roku, służący do detekcji promieniowania jądrowego.
Źródło: https://pl.wikipedia.org/wiki/Licznik_Geigera



Rys 2. *Schemat zjawiska Comptona, którego wynik Compton ogłosił w roku 1922 a opublikował w roku 1923. W roku 1927 otrzymał za tę pracę Nagrodę Nobla.*
Źródło: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/dd/Rozpraszanie_Comptona.svg

[1] Max Planck otrzymał Nagrodę Nobla rok później, w 1919 r. Podczas selekcji w 1918 r. Komitet Noblowski w dziedzinie fizyki zdecydował, że żadna z nominacji nie spełnia kryteriów określonych w testamencie Alfreda Nobla. Zgodnie ze statutem Fundacji Nobla, Nagroda Nobla może być w takim przypadku zastrzeżona do następnego roku, w którym statut zrealizowany. Dlatego Max Planck otrzymał Nagrodę Nobla za 1918 rok później, w 1919 roku. https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1918/summary/

[2] https://www.nobelprize.org/prizes/themes/walther-bothe-and-the-physics-institute-the-early-years-of-nuclear-physics-2/

[3] https://pl.wikipedia.org/wiki/Walther_Bothe

[4] Między innymi na stronie https://www.nobelprize.org/prizes/themes/walther-bothe-and-the-physics-institute-the-early-years-of-nuclear-physics-2/

eprasa.pl 34b251bb23

Fot. 3. *Johannes (Hans) Wilhelm Geiger (1882-1945).*
Źródło: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/17/Geiger%2CHans_1928.jpg

Fot. 4. *Arthur Holly Compton (1892-1962), Nagroda Nobla w 1927 r.*
Źródło: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c3/Arthur_Compton.jpg

Fot. 5, 6. *Heinz Maier-Leibnitz (1911-2000) i Bruno Benedetto Rossi (1905-1993)*
Źródło: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7a/Bruno_B_Rossi.jpg
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/27/Bundesarchiv_B_145_Bild-F041738-0006%2C_Prof._Heinz_Maier-Leibnitz.jpg

ty) dotyczące rozpraszania promieni alfa stanowią część początku całej eksperymentalnej fizyki atomów ostatnich dni."

W 1924 roku Walther Bothe zapoznał się z artykułem teoretycznym Bohra, Kramersa i Slatera, w którym sugerowali możliwą interpretację dualizmu falowo-cząsteczkowego w przyjętym opisie właściwości światła. Należy przez to rozumieć, że światło o wszystkich długościach fal zachowuje się jak proces falowy (interferencja) z czystą propagacją, ale zachowuje się też jak cząstki – kwanty światła: znany efekt fotoelektryczny zewnętrzny, efekt Comptona, przy konwersji na inne rodzaje energii[6].

Tym samym wykazano bardzo ważne prawo zachowania energii w procesie elementarnym. Wkrótce wynik ten został potwierdzony przez różnych badaczy przy użyciu ówczesnych różnych układów eksperymentalnych.

Kilkanaście lat później, około 1935 r., wraz z ówczesnym asystentem, H. Maier-Leibnitzem,[7] noblista uzupełnił i ulepszył oryginalny eksperyment w punkcie, którego celem było zademonstrowanie równoczesności i jednorodności kierunku rozproszenia kwantowego i odrzutu elektronu, jak można było oczekiwać zgodnie z teorią Comptona, czyli zgodnie z prawami sprężystego uderzenia między dwoma ciałami. Zastosowali bogate w energię promieniowanie gamma preparatu radiothorium. Otrzymany rezultat był pozytywny i tym samym pokazano zarówno zachowanie energii, jak i zachowanie impulsu.

Wynikiem przeprowadzonego w 1926 roku kolejnego eksperymentu było to, że nie wystąpiły żadne systematyczne zbiegi okoliczności i ścisła zasada zachowania energii w procesie elementarnym została potwierdzona także przez negatywny eksperyment.

Problem cząstek falowych, jak ujawnia Bothe, miał pozostać otwarty tylko przez krótki czas. W tym czasie, jak wspomina, miał szczególne szczęście, że mógł nieustannie omawiać ten problem z Einsteinem. Zwraca uwagę, że niektóre eksperymenty przeprowadzone zgodnie z sugestią Einsteina nie przyniosły żadnych zdecydowanie nowych rezultatów. Rozwiązanie (przynajmniej formalne) zapewniła mechanika falowa, która jest zawarta w założeniu Schrödingera fali w układzie składającym się z n cząsteczek i jest falą w 3n -wymiarowej przestrzeni.

Zupełnie inną dziedziną, w której metoda koincydencji zaowocowała, jest „promieniowanie kosmiczne" lub „ultra-promieniowanie", jak nazwał to odkrywca Hess. Eksperymenty, które przeprowadził Bothe wraz z Wernerem Kolhörsterem (1887-1946) w latach 1928-1929[8], doprowadziły do odważnego wniosku, że promieniowanie kosmiczne nie składa się głównie z promieni gamma, jak powszechnie zakładano wcześniej ze względu na dużą moc przenikania, ale z cząstek materialnych o energii co najmniej 1000 milionów elektrono woltów.

Materialny charakter cząstek pierwotnego promieniowania kosmicznego, jak omawiał to Bothe, został potwierdzony, chociaż procesy te okazały się być bardziej skomplikowanymi niż przypuszczano. Wspomina, że B. Rossiemu, który również spędził pewien czas jako gość w jego laboratorium, udało się zaobserwować za pomocą zbieżności między *zestawionymi* licznikami („krzywa Rossiego") pierwsze oznaki wystąpienia deszczu cząstek. Możliwości zastosowania metody koincydencji do zagadnienia promieniowania kosmicznego bynajmniej nie zostały jeszcze wyczerpane.

Te same zasady pomiaru, co w przypadku promieniowania kosmicznego, zastosowano do badania zwykłych promieni beta i gamma. Przy pomocy tylko dwóch liczników i zmiennego absorbera między nimi, w 1930 roku, Bothe wraz z Beckerem, określili średnią energię gamma w mieszaninie promieni gamma i ich elektronów wtórnych. Zwrócono uwagę, że ta metoda może być przydat-

[5] https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1954/bothe/lecture/

[6] Nowy pomysł polegał na zaprzeczeniu ścisłej ważności prawa impulsów energetycznych. W procesie indywidualnym lub elementarnym, tak długo, jak długo występował tylko jeden akt emisji, prawa zachowania uważano za spełnione jedynie statystycznie, aby obowiązywały tylko dla makroskopowej całości bardzo dużej liczby procesów elementarnych, tak że nie było konfliktu z dostępnymi dowodami empirycznymi.

[7] Heinz Maier-Leibnitz (1911-2000) był niemieckim fizykiem. https://en.wikipedia.org/wiki/Heinz_Maier-Leibnitz

[8] W latach 1928–29 Walter Bothe i Kolhörster wykorzystali detektor Geigera-Mullera, aby wykazać, że promienie kosmiczne są w rzeczywistości naładowanymi cząstkami. Zdolność tych cząstek do penetracji atmosfery ziemskiej oznaczała, że muszą one być wysokoenergetyczne. W1935 roku został dyrektorem Institut für Hohenstrahlungsforschung w Berlinie – Dahlemie, gdzie został profesorem zwyczajnym. https://en.wikipedia.org/wiki/Werner_Kolh%C3%B6rster opracował metodę koincydencji razem z Waltherem Bothe do badania promieni kosmicznych https://nat.museum-digital.de/index.php?t=people&id=42582

eprasa.pl 34b251bb23

na, gdy z jakiegoś powodu nie można zastosować zwykłej metody spektrometru z odchyleniem magnetycznym.[9]

Użyłem, jak wspomina Bothę, obwodu wykorzystującego wielokrotny zawór koincydencyjny w sieci już w 1929 roku.

Prekursorem szerokiej gamy tego typu układów koincydencyjnych jest właśnie układ Bothego (Rys. 3). Zaproponowana przezeń nowa metoda pomiarowa stanowiła istotny przełom w technice pomiarów koincydencyjnych tworząc fundament nowoczesnej spektrometrii czasowej.

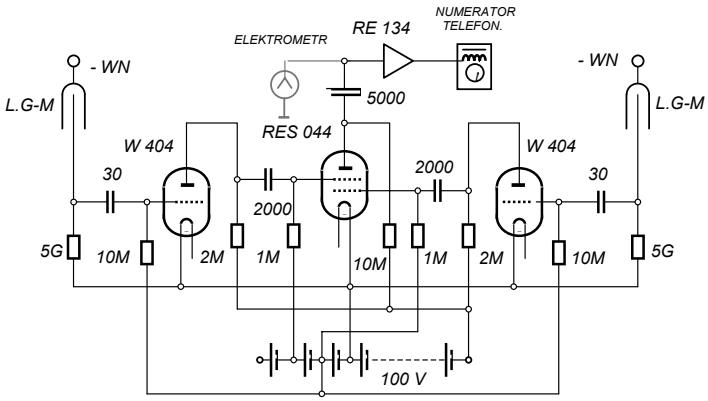
Najważniejszym elementem układu jest wykonany na lampie dwusiatkowej RES 044 – układ wybierający. W układzie zastępczym można go przedstawić w formie szeregowego zespołu kluczy sterowanych sygnałami wejściowymi[10]. Uzupełniają go wejściowe subukłady kondycjonowania impulsów licznikowych (obwody skracające C-R w kaskadzie ze wzmacniaczami na lampach W 404) oraz obwody rejestracji zdarzeń koincydentnych (elektrometr lub wyjściowy stopień wzmacniający na lampie RE 134 z numeratorem telefonicznym). W stanie spoczynkowym obydwie siatki lampy RES 044 spolaryzowane są zaporowo i potencjał jej anody równy jest napięciu zasilania (100 V). Działające w koincydencji na wejściu układu ujemne impulsy licznikowe powodują odblokowanie lampy, wywołując w konsekwencji spadek potencjału anodowego; praktycznie do poziomu zerowego.

Uformowana w ten sposób odpowiedź układu wybierającego rejestrowana jest w stowarzyszonym obwodzie rejestracji zdarzeń. Czas rozdzielczy prototypowej konfiguracji układu Bothego wynosił aż 1.4 ms, co satysfakcjonowało autora eksperymentów. Znaczącą poprawę tego parametru osiągnięto dzięki postępowi w rozwoju lamp elektronowych.[11]

Co to takiego koincydencja?

Koincydencja (fr. *coincident*, od śred. łac. im. czas. *coincidere*, od *co-*, „razem, współ-" i *incidere*, „upadać na", od *in-* i *cadere*, „upadać", być może spokr. z sanskr. *śad-*, „spaść") – przypadek, zbieg okoliczności, zbieżność kilku zdarzeń, często nieoczekiwana i bez dostrzegalnej przyczyny. Jako takie koincydencje są nieintuicyjne do badania naukowego przez co bywają źródłem błędów poznawczych prowadzących. Ze statystycznego punktu widzenia koincydencje są nieuniknione, mniej niezwykłe i nieoczekiwane niż wynikałoby to z intuicji. Zwykle są zdarzeniami losowymi o nieoszacowanym prawdopodobieństwie.[12]

Natomiast układ koincydencyjny jest układem aktywnym dającym odpowiedź wyłącznie na równoczesne (*koincydentne*) działanie zadanej liczby wymuszeń. Zależnie



Rys 3. *Schemat układu koincydencyjnego Bothego.*
Źródło: http://www.ftj.agh.edu.pl/koidc/materials/korbel/ekstrakcja/SekcjaF.pdf
[za] [251] Walther W.G. Bothe (in Charlottenburg).: Zur Vereinfachung von Koinzidenzzählun – gen. Zeitschrift für Physik. Vol. 59, Heft 1/2, 1, 1929.

od wymogów konkretnego eksperymentu pomiarowego jest on wykorzystywany do *ekstrakcji* informacji o częstości (liczbie) zdarzeń koincydentnych, bądź do *selekcji* takich zdarzeń w celu dalszego ich procesowania. Z punktu widzenia funkcjonalności układu stanowi on w istocie (wielokanałowy) **detektor równoczesności zdarzeń**.[13]

Dogodniejsze możliwości zastosowania układów lampowych w technice półprzewodnikowej zapewniają realizacja o konfiguracji równoległej. Grupę takich układów koincydencyjnych zapoczątkowało opracowanie B. Rossiego.

Opublikowane zaledwie kilka miesięcy po ukazaniu się artykułu Bothego zyskało dominującą popularność, stając się zarazem inspiracją do konstrukcji szeregu konfiguracji pochodnych.

W literaturze przedmiotu przypomniano układ Rossiego również w jego oryginalnej realizacji. Schemat ideowy przedstawiono na rysunku 4. Podstawowy blok funkcjonalny układu, stanowi układ wybierający – trójkanałowy. Na rysunku wyróżniono przez zaciemnienie mieszczącego go części pola schematowego. Blok obejmuje zespół lampowych stopni wzmacniających (L1, L2, L3) ze wspólną rezystancją obciążenia R_L.

W stanie spoczynkowym, wobec zerowej polaryzacji wstępnej ich siatek, wszystkie lampy pracują w nasyceniu, a wspólny ich potencjał anodowy V_0 utrzymywany jest na poziomie bliskim zera. Impulsy wejściowe ujemnej polarności powodują blokowanie poszczególnych stopni podnosząc odpowiednio – zależnie od krotności koincydencji k – potencjał anodowy V_k. Proces ten jest silnie nieliniowy, tak że dla niepełnych koincydencji zmiana potencjału anodowego jest pomijalnie mała. Dopiero przy k = n zachodzi skokowy wzrost potencjału anodowego Vn do poziomu napięcia zasilania V_Z. Stanowi on sygnał wyjściowy układu wybierającego, przekazywany na stopień wyjściowy (L4) wyposażony w sygnalizator akustyczny (słuchawkę).

[9] W międzyczasie znacznie udoskonalono technologię liczenia przypadków. Zamiast skomplikowanej rejestracji fotograficznej już dawno przeszliśmy do obwodów zaworowych w połączeniu z licznikami mechanicznymi, co zapewnia większą prostotę i pozwala na zmniejszenie tzw. okresu rozdzielczości o kilka rzędów wielkości, tak że zakłócające „przypadkowe „zbiegi okoliczności w wielu przypadkach nie odgrywają żadnej roli.

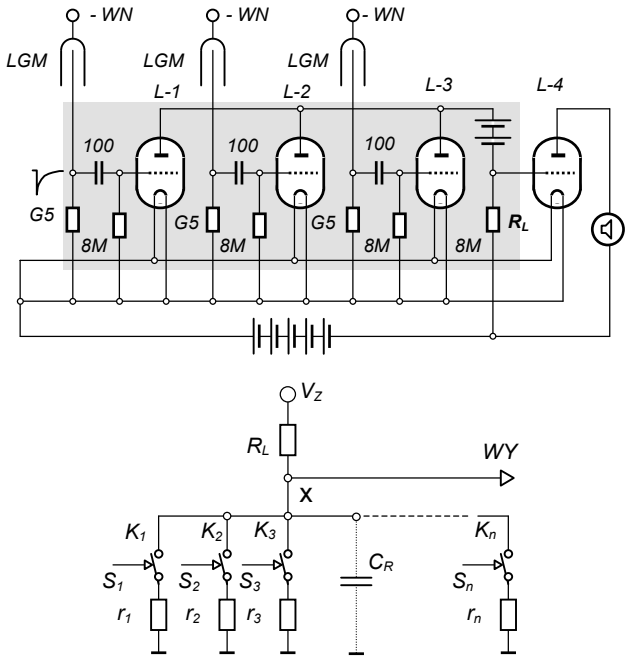
[10] Z tego też względu układ ten zaliczany jest do kategorii układów szeregowych.

[11] Z wykorzystaniem http://www.ftj.agh.edu.pl/koidc/materials/korbel/ekstrakcja/SekcjaF.pdf Reprezentatywne przykłady takich rozwiązań znajdzie czytelnik w opracowaniu monograficznym [J. M. Massalski.: Detekcja promieniowania jądrowego, PWN, Warszawa 1959]. Szczególnie dobrymi własnościami (ρ = 103; τr = 3 10-10s) wyróżnia się wśród nich układ z lampą strumieniową 6BN6 w stopniu wybierającym [J. Fisher, J. Marshall, A 6GN6 Gated-beam Tube as a Fast Coincidence Circuit. The Review of Scientific Instruments. Vol. 23, 417, 1955].

[12] https://pl.wikipedia.org/wiki/Koincydencja

[13] http://www.ftj.agh.edu.pl/koidc/materials/korbel/ekstrakcja/SekcjaF.pdf

eprasa.pl 34b251bb23



Rys. 4, 5. *Schemat układu koincydencyjnego Rossiego i uogólniony schemat zastępczy układu. Źródło: [za] http://www.ftj.agh.edu.pl/koidc/materials/korbel/ekstrakcja/SekcjaF.pdf oraz B. Rossi.: Method of Registering Multiple Simultaneous Impulses of Several Geiger Counters. Nature. Vol. 125, 636, 1930.*

Zliczanie wykrywanych koincydencji dokonywano w prymitywny, choć zadowalający na miarę ówczesnych potrzeb eksperymentalnych sposób, odnotowując ręcznie sygnalizowane zdarzenia.[14]. W literaturze przedmiotu zapisano, że „*Podstawowe parametry konfiguracji Rossiego w oczywisty sposób zależą od własności zastosowanych lamp elektronowych i wartości pasywnych elementów układowych*".

Kolejnym obszernym obszarem zastosowania metody koincydencji są reakcje jądrowe.

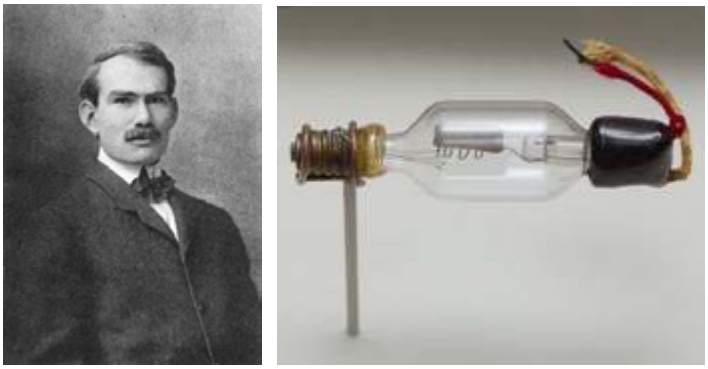
We wspólnym badaniu, w 1928 roku ze swoimi współpracownikami H. Fränzem i Pose w Halle odkrył, że podczas sztucznej konwersji jądra (w ich przypadku ^{10}B) przez promienie alfa występuje kilka dyskretnych grup protonów o różnej energii. Wkrótce potem w 1930 roku wraz z H. Beckerem odkrył promienie gamma, które powstają podczas bombardowania nie tylko boru, ale także innych pierwiastków promieniami alfa. Analogiczne problemy spontanicznych przemian, naturalnej i sztucznej radioaktywności, można rozwiązać eksperymentalnie w ten sam sposób, jak wykazano w przypadku rozkładu RaC, co zrealizował Bothe i Maier-Leibnitz, w 1937 roku[15].

Uzupełnienie

W trakcie I wojny światowej w latach 1915-1919, Walter Schottky zbudował w zakładach Siemens&Halske lampę z dwiema siatkami – tetrodę. Tetroda różni się od triody tym, że posiada o jedną siatkę więcej. Funkcje dodatkowej siatki mogą być różne, w zależności od jej położenia, konstrukcji i polaryzacji. Powstało więc kilka rodzajów tetrod o różnych właściwościach i przeznaczeniu.

[14] http://www.ftj.agh.edu.pl/koidc/materials/korbel/ekstrakcja/SekcjaF.pdf oraz B. Rossi.: Method of Registering Multiple Simultaneous Impulses of Several Geiger Counters. Nature. Vol. 125, 636, 1930

[15] Więcej można przeczytać na stronie o adresie https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1954/bothe/facts/



Fot. 7, 8. Lee de Forest (1873-1961) – amerykański radiotechnik i wynalazca oraz trioda Lee De Foresta (1906).
Źródło: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/65/Lee_De_Forest.jpg https://pl.wikipedia.org/wiki/Lee_De_Forest http://www.ftj.agh.edu.pl/koidc/materials/korbel/ekstrakcja/sekcjaA.pdf

Fot. 9, 10, 11. *Walter Schottky (1886-1976) – niemiecki fizyk, udoskonalił lampy elektronowe i dokonał odkrycia dziur w paśmie walencyjnym półprzewodnika. Zaproponował dyfuzyjną teorię przepływu prądu przez złącze metal–półprzewodnik stwarzając podwalinę do budowy diody nazwanej jego nazwiskiem. Przekrój przez 9-milimetrową diodę Schottky'ego.*
Źródło: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4a/Walter_Hermann_Schottky_%281886-1976%29.jpg https://pl.wikipedia.org/wiki/Walter_Schottky https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9c/Schottky_Diode_Section.JPG https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/30/RE20_int.jpg https://pl.wikipedia.org/wiki/Dioda_Schottky%E2%80%99ego

dr Kazimierz Mikulski
Maksymilianowo

NETOGRAFIA

[1] https://www.nobelprize.org/prizes/themes/walther-bothe-and-the-physics-institute--the-early-years-of-nuclear-physics-2/

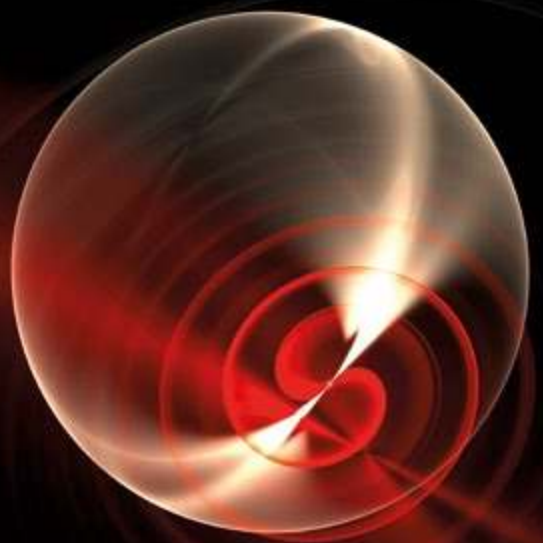
Koincydencja-jednoczesne występowanie kilku zjawisk lub zdarzeń; zbieżność
[2] https://sjp.pl/koincydencji
[3] https://synonim.net/synonim/koincydencja
[4] http://synomix.pl/slownik-synonimow/koincydencja
[5] https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1954/bothe/facts/

Zbieg okoliczności czy prawo wielkich liczb? Czyli o koincydencji można przeczytać w opracowaniu Steven Novella na stronie o adresie:
[6] http://www.listyznaszegosadu.pl/nauka/zbieg-okolicznosci-czy-prawo-wielkich-liczb

Układy koincydencyjne.
[7] http://www.ftj.agh.edu.pl/koidc/materials/korbel/ekstrakcja/SekcjaF.pdf
[8] http://www.foton.if.uj.edu.pl/documents/12579485/9c4b6a37-2d76-4c22-8aff-2c542bb6540c

Wyznaczanie aktywności źródła promieniowania gamma izotopu 60 Co metodą koincydencji
[9] http://www.wfis.uni.lodz.pl/kfj/pl/nuc_lab/PJ-05_Aktywno%C5%9B%C4%87_Co-60.pdf
[10] http://www.foton.if.uj.edu.pl/documents/12579485/9c4b6a37-2d76-4c22-8aff-2c542bb6540c
[11] http://ftj.agh.edu.pl/koidc/materials/korbel/ekstrakcja/SekcjaX.pdf
[12] ĆWICZENIE 5 Wyznaczanie aktywności źródła promieniowania gamma izotopu 60Co metodą koincydencji http://www.wfis.uni.lodz.pl/kfj/pl/nuc_lab/PJ-05_Aktywno%C5%9B%C4%87_Co-60.pdf
[13] Korbel K., Ekstrakcja informacji z sygnału radiometrycznego. (Monografia w opracowaniu na prawach rękopisu) Kraków 2000 http://www.ftj.agh.edu.pl/koidc/materials/korbel/ekstrakcja/sekcjaA.pdf

eprasa.pl 34b251bb23



Mechanika kwantowa

od pojęcia kwantu do całek po trajektoriach

Foto – Adobe Stock

Mechanika kwantowa, w całej swojej dziwności, stanowi potężny i niezwykle pożyteczny dział fizyki, który wywrócił nasze rozumienie świata do góry nogami.

Cyprian **Sobczak**

Długa droga, rozpoczynająca się od założenia, że energia może być tracona i przyjmowana jedynie porcjami, prowadziła przez kolejne szalone pomysły, do stworzenia wielkiej teorii. Została ona opisana dotychczas w trzech ujęciach: mechaniki macierzowej, mechaniki falowej i całek po trajektoriach, chociaż niewykluczone, że z czasem pojawią się nowe.

Mechanika kwantowa jest opisem mikroświata, dalekim od tego, który podsuwa nam rozsądek i intuicja, zbudowana na obserwacji tego, co nas otacza. Jest to opis tak nieoczekiwany, że niemal każdy, komu jest dane go poznać, broni się przed jego akceptacją i bezskutecznie szuka podobieństwa do rzeczy, które zna, aby analogią uzasadnić jego racje bytu. Jednak ten piękny gmach nauki, budowany przez fizykę, stoi na bardzo solidnym fundamencie, jakim jest eksperyment. To właśnie eksperymenty doświadczalne decydują, czy dana hipoteza pretenduje do miana teorii opisującej rzeczywistość, czy działa jedynie w głowie jej twórcy.

Jak dotąd teoria kwantów zdaje wszystkie egzaminy stawiane jej przez eksperymentatorów, a w pewnym sensie jest nawet przez nie budowana. Zanim przejdziemy do wyjaśnienia, czym jest tytułowa całka po trajektoriach oraz jakie dziwactwa czekają na nas w świecie kwantów, omówmy pokrótce inspirującą drogę do ich odkrycia.

Skąd się wzięły kwanty?

Pojęcie kwantu wprowadził do nauki Max Planck, który chcąc rozpocząć studia, stanął przed ciężkim wyborem – czy warto zająć się fizyką teoretyczną, czy nie? Postanowił poradzić się w tej sprawie jednego z monachijskich profesorów – Philippa von Jolly. On jednak odradził mu podjęcie tego kierunku twierdząc, że jest to dziedzina właściwie zamknięta, mimo istnienia paru nierozwiązanych problemów, z którymi w niedługim czasie ludzkość na pewno sobie poradzi. Całe szczęście, że Planck nie posłuchał tej rady i wybrał fizykę, a w 1900 roku rozwiązał jeden z tych nierozwiązanych problemów, którym było promieniowanie ciała doskonale czarnego [1].

Problem ten polegał na niespójności obserwacji z opisem teoretycznym tego, jak ciało doskonale czarne wypromieniowuje energię. Jego rozwiązanie sprowadzało się do rewolucyjnego pomysłu, że energia (na przykład ze stygnącego kawałka żelaza), może być emitowana w określonych porcjach, a nie w sposób ciągły. Taka porcja energii jest obecnie nazywana kwantem, a jej wprowadzenie sprawiło, że teoria zaczęła zgadzać się z doświadczeniem, oraz otworzyło drzwi do rozwoju fizyki [1].

Rozwój mechaniki kwantowej

Wprowadzenie koncepcji kwantu sprawiło, że fizyka stała się pełna pytań, których ilość rosła w niezwykłym tempie. Nie jest to jednak opowieść o fascynującej historii tego przełomu w nauce, na którego temat powstało wiele książek. Przyjrzyjmy się więc tylko wybranym jego aspektom. Pomysł kwantowania energii bardzo szybko podchwycił Albert Einstein i wyjaśnił przy jego użyciu zjawisko fotoelektryczne. Był to kolejny (podobnie jak promieniowanie ciała doskonale czarnego) z dotychczas nierozwiązanych problemów, które miał na myśli Philipp von Jolly [1].

Efekt fotoelektryczny polega na emisji elektronów z powierzchni materiału (na przykład miedzi), pod wpływem oświetlania go światłem o określonej długości fali. (Obecnie, zjawisko to stosuje się w panelach słonecznych, które wykorzystują światło słoneczne do produkcji energii elektrycznej).

eprasa.pl 34b251bb23

Przed powstaniem idei kwantów energii, efekt ten był niejasny z powodu pewnej subtelności. Otóż to, czy doszło do emisji elektronu, nie zależało od czasu i intensywności oświetlania powierzchni materiału, a jedynie od długości fali światła, jakie na nią padało. Długość fali jest pewną charakterystyczną cechą promienia światła (i ogólnie promieniowania elektromagnetycznego), która jednoznacznie określa jego energię (a w przypadku światła widzialnego, również barwę). Innymi słowy, jeżeli na przykład mówimy, że jakaś fala elektromagnetyczna ma długość 500 nanometrów, to wiemy, że mamy na myśli barwę zieloną (bo taki kolor odpowiada tej długości fali elektromagnetycznej) oraz, że ma ona energię równą 3,978 eV. (eV jednostka nazywana elektronowoltem wynosząca $1*10^{-19}$J). Co możemy wyrazić równaniem:

$$\frac{hc}{\lambda} = \mathrm{E}\,, \qquad (1)$$

gdzie: Stała h została wprowadzona przez Plancka jako stały współczynnik wynoszący $6{,}63*10^{-34}$J*s i jest nazywana od jego nazwiska – stałą Plancka, c – prędkość światła, λ – długość fali, E – energia.

Powyższy wzór wyprowadził i wyjaśnił Albert Einstein, co było głównym powodem przyznania mu Nagrody Nobla w 1921 roku. Dopiero po wyjaśnieniu natury efektu fotoelektrycznego, stało się w pełni jasne, że atomy mogą zarówno przyjmować i oddawać energię jedynie w określonych porcjach. Krótko po tym dokonaniu ruszyła prawdziwa lawina odkryć i pomysłów, które stworzyły obecną teorię kwantów.

Do jednych z nich należała między innymi koncepcja Louisa de Broglie, który opisał w swojej rozprawie doktorskiej falowe ujęcie materii. Był to dla współcześnie żyjących pogląd niedopuszczalny, jednak ostatecznie przyznano mu tytuł doktora, ze względu na szlacheckie pochodzenie. Koncepcja, że szklanka stojąca na stole może być jakąś formą fali i teraz nie wydaje się zbyt rozsądna [1]. Niemniej jednak właśnie od takich niespodzianek roi się wręcz mechanika kwantowa a eksperyment, któremu przyjrzymy się niebawem, uzasadnia taki pogląd.

Kolejną cegiełkę, do budowy teorii kwantów dołożył Werner Heisenberg wraz z Maxem Born'em i Ernestem Jordanem, formułując pierwszy całościowy opis, zwany mechaniką macierzową. Heisenberg zobaczył w tym ujęciu mechaniki kwantowej, pewne prawo przyrody, które ponownie wprawiło badaczy w osłupienie. Natomiast obecnie wiadomo, że ma ono charakter fundamentalny. Jest to zasada nieoznaczoności Heisenberga, mówiąca, że im dokładniej znamy położenie obiektu kwantowego (jak na przykład elektronu), tym mniej możemy powiedzieć o jego prędkości (lub ściśle rzecz biorąc pędzie). Wynika z niej, że jeśli rzucimy „kwantową piłkę" tenisową do góry, to będziemy mogli albo wskazać jej dokładne położenie albo prędkość (więc również kierunek ruchu), ale nigdy obu naraz dokładnie. Z tego wynika, że obiekt kwantowy nigdy nie może być w jednym miejscu, tylko ciągle musi się przemieszczać. Rozwiewając resztki wątpliwości czytelników, którzy konstruują właśnie w głowie, złożone metody pomiarowe, aby udowodnić, że się da... nie, nie da się, ponieważ kłopot nie tkwi w problemach pomiarowych, tylko w samej przyrodzie.

Kolejnym i obecnie najbardziej rozpowszechnionym ujęciem mechaniki kwantowej, jest mechanika falowa (czyli obraz Erwina Schrödinger'a), wyrażona przez słynne równanie [2]:

$$\frac{-\hbar^2}{2m}\nabla^2\Psi(r,t)+\mathrm{V(r)}\Psi(r,t) = i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\Psi(\mathrm{r,t})\,, \qquad (2)$$

równanie to pozwala ustalić, zachowanie się układu kwantowego, opisanego funkcją $\Psi(r, t)$:

Równanie Schrödinger'a rozwija pogląd de Broglie'a, o falowej naturze materii i zakłada istnienie pewnej wielkości nazwanej funkcją falową, którą posiada każdy obiekt. Innymi słowy, stół w kuchni ma funkcję falową, książka ma funkcję falową i stół z książką na nim leżącą, też mają wspólną funkcję falową. Dzięki odpowiednim działaniom na takowej funkcji możemy wyznaczyć prawdopodobieństwo tego w jakim stanie, będzie się znajdować nasz obiekt za chwilę. Wydaje się to łatwo, ale w rzeczywistości ciężko nam przewidywać, stany nawet prostych obiektów (na przykład kryształów złożonych z kilku różnych pierwiastków), ze względu na złożoność obliczeń. Po tym niewielkim przeglądzie historycznym możemy przejść do kłopotów z akceptacją konsekwencji mechaniki kwantowej, a jest ich sporo [2].

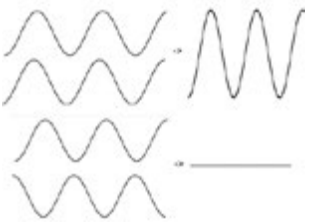
W krainie kwantów

Najłatwiej będzie nam zrujnować dotychczasowe wyobrażenie o przewidywalności natury w mikroświecie, na konkretnym przykładzie. Od początku XIX wieku, za sprawą Thomasa Younga, są nam znane zjawiska interferencji i dyfrakcji, będące warunkiem, kwalifikującym coś jako fale.

Dokładniej rzecz ujmując, interferencja jest zjawiskiem znanym każdemu, kto kiedykolwiek obserwował zachowanie wody podczas wpadania w nią czegokolwiek. Dla przypomnienia, wyobraźmy sobie, że wrzucamy do stawu kamień, w efekcie na wodzie powstają fale, rozchodzące się w kształcie okręgów. Teraz wrzucamy do stawu drugi kamień, nieopodal poprzedniego i efekt jest taki sam. Jednak w momencie, w którym wędrujące fale wpadają na siebie, dochodzi do ich wzajemnego wzmocnienia, lub wygaszenia i to właśnie nazywamy interferencją [1]. Ilustracja tego zjawiska znajduje się poniżej (rys. 1).

Efekt dyfrakcji również można łatwo zaobserwować, jeżeli na drodze rozchodzącej się fali umieścimy ściankę z dwoma otworami, jak na rysunku poniżej (rys. 2).

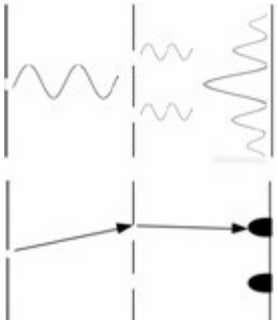
Otwory w ściance spowodują ugięcie się fali, która będzie się zachowywać tak jak gdyby po przejściu przez ściankę powstała z dwóch nowych źródeł, którymi są szczeliny.



Rys. 1 Przedstawia nakładanie się na siebie dwóch fal. Na górnym obrazku „górka" spotyka się z „górką" i w efekcie powstaje fala o dwa razy większej „górce" (amplitudzie). Na dolnym obrazku „górka" spotyka się z „dołkiem" i w efekcie efekt falowania znika.

eprasa.pl 34b251bb23

Rys. 2. Przedstawia, jak zachodzi dyfrakcja. Fala natrafiająca na przeszkodę z dwiema szczelinami ulega ugięciu, wskutek czego, po przejściu przez przeszkodę, powstają dwie fale w miejscach występowania szczelin.



Rys. 3. Przedstawia obraz interferencyjny, powstały po przejściu światła przez podwójną szczelinę (obrazek na górze), falki oznaczają fale świetlne, a obraz na ekranie to schematyczny rysunek obrazu interferencyjnego. Druga ilustracja (obrazek na dole), to efekt otrzymany przy rzucaniu piłkami przez podwójną szczelinę. Strzałki ilustrują trajektorię lotu piłki, a kropki na ekranie obszary, w które trafiają piłki.

Jak zauważyliśmy powyżej, są to zjawiska charakterystyczne dla fal, a jak pokazał Young, również dla światła, co świadczy o jego falowej naturze. Young dowiódł tego przy pomocy eksperymentu z dwiema szczelinami. Znalazł spójne źródło światła (używając światła świecy przechodzącego przez mały otwór w przesłonie), a następnie skierował jego promienie na dwa blisko położone otwory w kolejnej przesłonie. Światło przechodząc przez otwory, ulegało dyfrakcji, a następnie padało na ekran, na którym obserwował interferencję, powstałą z nałożenia się fal [1].

Obraz interferencyjny, powstały na ekranie, otrzymany przez Younga, przedstawiał się jako na przemian jasne i ciemne paski. Niespodziewanie najintensywniej oświetlony był obszar znajdujący się pomiędzy szczelinami. Gdyby światło było cząstkami, to po przejściu przez szczeliny, gromadziłoby się w dwóch obszarach (widzielibyśmy dwa oświetlone obszary na ekranie na wprost szczelin), na podobieństwo piłek rzucanych przez dziury w ścianie.

Ten wspaniały dowód, wprawił wszystkich w zdumienie, w szczególności, gdy zestawiono go ponad 100 lat później z wyjaśnieniem efektu fotoelektrycznego. Jednym z wniosków, do tej pory niewymienionych, płynących z efektu fotoelektrycznego, jest to, że kwant światła (nazywany również fotonem), powinien być cząstką, aby móc wybić elektron, a nie falą! Fizyka napotkała w tym momencie coś dotychczas niespotykanego.

Jeżeli teoria nie zgadza się z eksperymentem, to znaczy, że jest błędna. Jednakże co, jeżeli dwa eksperymenty przeprowadzone poprawnie dają różną odpowiedź na to samo pytanie? W takim przypadku obie odpowiedzi są poprawne. Światło jest jednocześnie cząstką i falą, w zależności od warunków doświadczenia. Taki charakter obiektów, nazywa się korpuskularno-falowym.

To jednak zdecydowanie nie koniec niespodzianek. W 1989 roku zakończył się eksperyment Akiry Tonomury, analogiczny do eksperymentu Younga z dwoma szczelinami (z tym, że dla pojedynczych elektronów), który potwierdził ich falowy charakter. W trakcie badania, emitowano pojedyncze elektrony, które po przejściu przez podwójną szczelinę, trafiały na kliszę. Tam, gdzie uderzył elektron, pojawiała się kropka, a im więcej się ich pojawiało, tym bardziej obraz przypominał, interferencyjne paski otrzymane przez Younga.

Koncepcja de Broglie okazała się prawdziwa – cząstka posiadająca masę, zachowywała się jak fala. Był to dowód niesłychanej wagi. Ponadto, zarówno elektrony, jak i fotony, w trakcie eksperymentów jakby „wiedziały", czy są obserwowane (i wtedy zachowywały się jak cząstki), czy nie (i wtedy przejawiały charakter falowy). Jakiekolwiek próby ustawienia „pułapki", która pozwoliłaby ustalić, co dzieje się na szczelinach[1], powodowały ingerencje w układ kwantowy i sprawiały, że zaczynał się on zachowywać normalnie (czyli tak, jak przy rzucaniu piłek) [1-3].

Wnioski płynące z eksperymentów przytłaczały wielu twórców mechaniki kwantowej. Planck w nią nie wierzył, Einstein uważał, że jest niepełna i że gdzieś tkwią subtelności, których poznanie pozwoli w elegancki, teoretyczny sposób uzasadniać zachowanie się obiektów kwantowych i uczyni je mniej dziwnymi [1]. Nawet Erwin Schrödinger uznał obraz kreowany przez mechanikę kwantową, za tak sprzeczny z tym, do czego przywykł, że postanowił wyrazić jej działanie poprzez alegorię, nazywaną obecnie paradoksem kota Schrödinger'a.

Paradoks ten sprowadza się do wniosku, że kot zamknięty w kartonie wraz z trucizną, która uśmierci go w ciągu godziny z prawdopodobieństwem 50%, będzie po upłynięciu tego czasu, żywy i martwy jednocześnie, dopóki nie otworzymy kartonu. Schrödinger uznał to za doskonały argument, na podważenie mechaniki kwantowej, a jej zwolennicy za wspaniałe zobrazowanie jej idei. Bez względu na wybranie strony, po której się opowiemy, lepiej nie zostawiać naszych zwierząt bez opieki zbyt długo [1].

Całki po trajektoriach

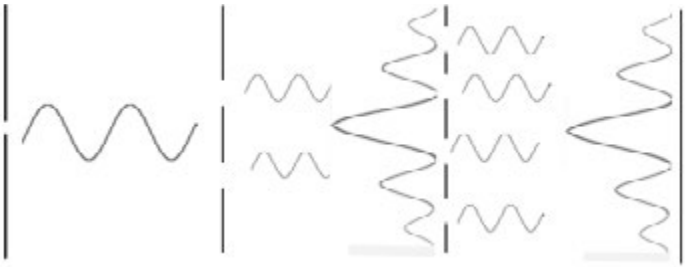
Richard Feynman, znany z ogromnej błyskotliwości i geniuszu, powiedział kiedyś, że jeżeli ktoś uważa, że rozumie mechanikę kwantową, to faktycznie wcale jej nie rozumie. Co stanowi najlepszy dowód na to, że nie tylko nam wydaje się ona niejasna. Feynman twierdził również, że doświadczenie z dwiema szczelinami jest jej kwintesencją i poświęcając się rozważaniom nad nim, wyprowadził trzeci obraz ujęcia mechaniki kwantowej, nazywany metodą całek po trajektoriach.

Jego rozumowanie było następujące: jeżeli za ekranem z dwiema szczelinami wstawimy kolejny, w którym będzie jeszcze więcej dziur (rys.4), to światło będzie musiało przejść najpierw przez początkowe dwie szczeliny, na których ulegnie dyfrakcji, a następnie przez szczeliny w następnym ekranie, na których również ulegnie dyfrakcji.

Feynman, idąc dalej tym tokiem rozumowania uznał, że w takim razie stawiając kolejne ekrany i robiąc w nich kolejne dziury, dojdzie się do momentu, w którym cała

[1] Dla światła próby te były przeprowadzane na innych wersjach układów pomiarowch, jak interferometr Macha-Zehnera, ale sens jest ten sam

eprasa.pl 34b251bb23



Rys. 4. Schematyczna ilustracja światła przechodzącego przez kolejne szczeliny, na których naprzemiennie ulega dyfrakcji i interferencji.

przestrzeń między źródłem a ekranem, będzie pusta (jeżeli położymy na sobie stertę desek jedna na drugiej, a następnie przewiercimy je w każdym punkcie, to pozostanie jedynie sterta wiórów).

Wniosek z rozumowania Feynmana jest zdumiewający: światło biegnące do nas od źródła (np. z telewizora), w pewien sposób uwzględnia każdą z możliwych dróg, a następnie wybiera tę najkorzystniejszą (w myśl zasady najmniejszego działania).

Jak absurdalnie by ta koncepcja nie brzmiała, to rzuca ona nowe spojrzenie na zjawiska, takie jak tunelowanie (pokonywanie przez cząstki barier, których nie powinny być w stanie przejść), czy efekt Aharonova-Bohma (eksperyment udowadniający, że elektron potrafi oddziaływać z polem elektrycznym, do którego nie powinien mieć dostępu). Ponadto metody stosowane przy tym podejściu, stanowią również narzędzie do badania świata na najbardziej elementarnym poziomie, jakim jest chromodynamika kwantowa [2,4].

Podsumowanie

Mechanika kwantowa, pomimo kłopotów, jakie stanowi przyzwyczajenie się do niej, stała się narzędziem, którym fizycy i inżynierowie zbudowali naszą codzienność. Gdyby nie ona, nie istniałyby smartfony, domowe komputery, energooszczędne żarówki, a wręcz cała elektronika. Świat nie różniłby się znacznie od tego, jak prezentował się na początku XX wieku, gdyby młodzi fizycy z XIX wieku pogodzili się z poglądem, że wszystko, co ważne zostało już osiągnięte. Innymi słowy, świat jest zbudowany tak, jak jest, a nie tak jak nam się wydaje, a przyglądanie się pozornie drobnym jego aspektom, może stanowić drogę do kolejnego wielkiego przełomu.

mgr Cyprian Sobczak

BIBLIOGRAFIA:

[1] A. K. Wróblewski, „Historia fizyki", PWN, Warszawa (2006).
[2] R. Shankar, „Mechanika Kwantowa", Wydawnictwo PWN, Warszawa (2006).
[3] Paweł Pęczowski, „Tajemnicza Mechanika Kwantowa", oficyna wydawnicza Łośgraf, Warszawa (2011)
[4] R. Rattazzi, „The Path Integral approach to Quantum Mechanics Lecture Notesfor Quantum Mechanics IV", Technical Books Center (2009).

Paradoks „dużego" ciała w fizycznych zadaniach

Czesław **Surowiec**

Zagadnienie paradoksów w zadaniach fizycznych omówiłem w artykule „Paradoksy w zadaniach z fizyki" nr 3 z 2019 r. Zainteresowanym tym zagadnieniem polecam ten artykuł, w którym mogą znaleźć przykłady paradoksów z różnych działów fizyki, sposoby ich rozwiązywania oraz zadania do rozwiązania.

Rozwiązując zadania, w których rozpatrujemy oddziaływania ciał o znacznie różniących się masach, zazwyczaj pomijamy zmiany energii ciała o bardzo dużej masie. Często takie przybliżenie jest możliwe. Celem tego opracowania jest odpowiedź na pytania.

1. Jakie ciało możemy nazywać „dużym"?
2. W jakim przypadku możemy pominąć zmiany energii ciała „dużego"?
3. Kiedy uwzględnienie zmian energii ciała „dużego" jest niezbędne?
4. Jak rozwiązywać zadania tego typu, aby jego rozwiązanie nie doprowadziło do paradoksu?

Ciałem „dużym" będziemy nazywać ciało, którego masa jest znacznie większa od masy pozostałych ciał oddziaływujących z nim. Aby odpowiedzieć na te pytania rozwiążemy dwa przykłady zadań sformułowane w postaci paradoksu.

Przykład 1.

Kamień o masie m spada na ziemię z wysokości h. Zapisz zasadę zachowania energii kamienia dla dwóch układów odniesienia:

a) Układzie odniesienia związanym ze środkiem mas układu kamień – Ziemia.
b) Układzie odniesienia związanym z windą, która porusza się pionowo w dół ze stałą wartością prędkości v_u.

Rozwiązanie.

a) W przypadku układu odniesienia związanego ze środkiem mas układu kamień – Ziemia zapiszemy, że w momencie upadku kamienia cała energia potencjalna kamienia zamienia się na jego energię kinetyczną

Dalej na str. 30

eprasa.pl 34b251bb23

$mgh = \frac{mv^2}{2}$, gdzie v – prędkość kamienia w chwili uderzenia o Ziemię.

b) W przypadku układu odniesienia związanego z windą poruszającą się pionowo w dół ze stałą wartością prędkości v_u względem Ziemi, energia kinetyczna Ziemi w chwili początkowej wynosi $\frac{Mv_u^2}{2}$, a kamienia będzie $\frac{mv_u^2}{2}$. W chwili upadku kamienia na ziemię jego energia kinetyczna i potencjalna wynosi 0. Dla całego układu w tej chwili możemy zapisać

$$\frac{Mv_u^2}{2} + \frac{mv_u^2}{2} + mgh = \frac{Mv_u^2}{2}, \text{ ponieważ } \frac{mv_u^2}{2} + mgh = 0.$$

Stwierdziliśmy, że zasada zachowania energii nie jest spełniona w układzie windy, ale jest spełniona w układzie środka masy, w którym winda porusza się ze stałą prędkością. Otrzymaliśmy paradoks?

Rozwiązanie paradoksu.

Musimy poszukać odpowiedzi na następujące pytania:

1. Dlaczego przy wyborze jednych układów odniesienia otrzymuje się poprawne wyniki, a przy wyborze innych paradoksy?
2. Jaki układ odniesienia wybrać rozwiązując zadanie, aby ciało o większej masie pominąć?
3. Czy zmiana energii kinetycznej w obydwu układach odniesienia jest jednakowa?

Aby odpowiedzieć na te pytania przeprowadzimy bardzo dokładnie rozważania.

a) W układzie odniesienia związanym ze środkiem mas układu kamień – Ziemia w chwili początkowej Ziemia spoczywa i cała energia układu jest równa energii potencjalnej kamienia.

W chwili upadku kamienia na Ziemię energia układu wynosi

$$E_k = \frac{mv^2}{2} + \frac{Mv_z^2}{2}.$$

gdzie: v – prędkość jaką uzyskał kamień pod wpływem działania siły grawitacji Ziemi, v_Z – prędkość jaką uzyskała Ziemia pod wpływem działania siły grawitacji kamienia

Znajdziemy prędkość v_Z korzystając z zasady zachowania pędu:

$$mv - Mv_z = 0, \quad \text{stąd} \quad v_z = \frac{m}{M}v.$$

Zapiszemy zasadę zachowania energii

$$mgh = \frac{mv^2}{2} + M\frac{\left(\frac{m}{M}v\right)^2}{2} = \frac{mv^2}{2}\left(1 + \frac{m}{M}\right).$$

Jest to zapis bardzo dokładny. Jednak wydaję się oczywiste, że w przypadku wszystkich realnych zadań o spadku ciał na Ziemię spełniony jest warunek $m << M$ i wielkość m/M jest znikomo mała w porównaniu z 1, tak więc można ją pominąć. Dlatego w układzie związanym ze środkiem mas układu ciał kamień – Ziemia zasadę zachowania energii zapiszemy: $mgh = \frac{mv^2}{2}$.

b) W układzie odniesienia związanym z windą początkowa energia tego układu E_0 jest równa

$$E_0 = mgh + \frac{mv^2}{2} + \frac{Mv^2}{2},$$

a w momencie upadku kamienia energia końcowa układu E_K wyniesie:

$$E_k = \frac{Mv_Z^2}{2},$$

gdzie v_z – prędkość Ziemi w tej chwili.

Wykorzystując zasadę zachowania pędu zapiszemy:

$$mv + Mv = Mv_z, \text{ skąd } v_z \text{ wyniesie: } v_z = v\left(1 + \frac{m}{M}\right).$$

Energia końcowa układu (w chwili upadku kamienia) wyniesie

$$E_k = \frac{Mv_u^2}{2} = \frac{M}{2}\left[v\left(1 + \frac{m}{M}\right)\right]^2 = \frac{Mv^2}{2} + mv^2 + \frac{m}{M}\cdot\frac{mv^2}{2}.$$

Wcześniej uważaliśmy, że energia Ziemi nie ulega zmianie i w momencie upadku kamienia wynosi $\frac{Mv^2}{2}$.

Pominęliśmy wielkość $\frac{M_z^2}{2} - \frac{Mv^2}{2} = mv^2 + \frac{m}{M}\cdot\frac{mv^2}{2}$, która jest większa od energii kinetycznej kamienia.

W tym tkwił błąd, który doprowadził do paradoksu.

Dokładny zapis zasady zachowania energii ma postać

$$mgh + \frac{mv^2}{2} + \frac{Mv^2}{2} = \frac{Mv^2}{2} + mv^2 + \frac{m}{M}\cdot\frac{mv^2}{2}.$$

Wykorzystując, że Ziemia jest „dużym" ciałem, czyli uwzględniając m << M możemy pominąć wielkość $\frac{m}{M}\cdot\frac{mv^2}{2}$ i wtedy zasada zachowania energii ma postać $mgh = \frac{mv^2}{2}$.

Wnioski końcowe są następujące:

1. W układzie odniesienia związanym ze środkiem mas układu kamień – Ziemia, w którym „duże" ciało Ziemia początkowo spoczywa, zmianę energii „dużego" ciała można pominąć.
2. W układzie odniesienia związanym z windą „duże" ciało Ziemia posiada prędkość początkową v, zmiana jego energii jest porównywalna ze zmianą energii kamienia i nie można jej pominąć.

Na podstawie tych wniosków otrzymujemy odpowiedź na dwa postawione pytania. Aby odpowiedzieć na pytanie: czy zmiana energii kinetycznej Ziemi jest jednakowa w obydwóch układach odniesienia? – obliczymy siłę przyciągania działającą na Ziemię ze strony kamienia. W obydwóch układach odniesienia siła przyciągania jest jednakowa i równa $\vec{F_g} = M\vec{a} = -m\vec{g}$.

Jednak przemieszczenia Ziemi w różnych układach odniesienia są różne:

eprasa.pl 34b251bb23

$h_z = \frac{at^2}{2}$ w układzie związanym ze środkiem mas układu.

$H_z = vt + \frac{at^2}{2}$ w układzie związanym z windą.

Wykonana przez siłę grawitacji praca i odpowiadająca jej zmiana kinetycznej energii w tych układach są równe:

$$W_1 = \Delta E_{k_1} = mg\frac{at^2}{2},$$

$$W_2 = \Delta E_{k_2} = mg\left(vt + \frac{at^2}{2}\right).$$

Podstawiając: $a = \frac{mg}{M}$ i $v = g{\cdot}t$ otrzymujemy:

$$\Delta E_{k_1} = \frac{mv^2}{2}\cdot\frac{m}{M},$$

$$\Delta E_{k_2} = mv^2 + \frac{mv^2}{2}\cdot\frac{m}{M}.$$

Wyniki te pokazują, że zmiana energii kinetycznej może się zasadniczo różnić w różnych układach odniesienia. Jednak zasada zachowania energii dla zamkniętego układu ciał jest spełniona w dowolnym inercjalnym układzie odniesienia.

Przykład 2.

Pocisk o masie m lecący z prędkością o wartości v trafia w zbocze góry i grzęźnie w nim. Zapisz zmianę energii kinetycznej pocisku w następujących układach odniesienia:

a) W układzie odniesienia, w którym Ziemia jest nieruchoma.

b) W układzie odniesienia związanym z autobusem, który porusza się z prędkością o wartości v_a, którego kierunek i zwrot jest zgodny z kierunkiem i zwrotem ruchu pocisku.

c) W układzie odniesienia związanym z autobusem, który porusza się w kierunku ruchu pocisku, ale zwrot jego ruchu jest przeciwny do zwrotu ruchu pocisku.

Rozwiązanie.

a) W układzie odniesienia związanym ze spoczywającą Ziemią zmiana kinetycznej energii pocisku wynosi:

$$\Delta E_{k1} = E_{kk} - E_{k0} = 0 - \frac{mv^2}{2} = -\frac{mv^2}{2}.$$

b) W układzie odniesienia związanym z autobusem poruszającym się z prędkością o wartości v_a zgodnie z ruchem pocisku zmiana kinetycznej energii pocisku wynosi:

$$\Delta E_{k2} = \frac{mv_a^2}{2} - \frac{m(v - v_a)^2}{2} = \frac{mv^2}{2} + mv\cdot v_a.$$

c) W układzie odniesienia związanym z autobusem, który porusza się w kierunku zgodnym z ruchem pocisku, ale w stronę przeciwną zmiana kinetycznej energii pocisku wyniesie:

$$\Delta E_{k3} = \frac{mv_a^2}{2} - \frac{m(v + v_a)^2}{2} = -\frac{mv^2}{2} - m\cdot v\cdot v_a.$$

Gdzie podziała się część kinetycznej energii pocisku? Przy gwałtownym hamowaniu pocisku wydziela się ciepło które możemy zmierzyć (np. pocisk trafia w kalorymetr). Jednak z naszych rozważań wynika, że przeprowadzając trzy razy taki sam pomiar możemy otrzymać różne wyniki ($Q_1 \neq Q_2 \neq Q_3$). Paradoks?

Wyjaśnienie paradoksu.

Zmiany kinetycznej energii w rozpatrywanych układach odniesienia są różne ($\Delta E_{k1} \neq \Delta E_{k2} \neq \Delta E_{k3}$). Ponieważ zgodnie z teorią o kinetycznej energii: praca siły zewnętrznej nad ciałem jest równa zmianie kinetycznej energii tego ciała, różna jest również praca siły zewnętrznej, siły działającej ze strony zbocza góry na pocisk. Inaczej mówiąc w wyniku względności przemieszczenia w różnych układach odniesienia, również względna jest praca siły zewnętrznej, względna jest również zmiana kinetycznej energii układu otwartego. Paradoks jaki pojawił się w tym zadaniu jest wywołany błędem zapisu $Q = -\Delta E_k$.

Zależność ta jest słuszna a zamkniętym układzie ciał, ponieważ dla układów zamkniętych zmiana kinetycznej energii wszystkich ciał układu jest niezmienna względem dowolnych inercjalnych układów odniesienia. W tym przykładzie ilość wydzielonego ciepła powinna być zapisana zależnością

$$Q = \Delta E_{kp} + \Delta E_{kz},$$

gdzie: ΔE_{kp} jest zmienną kinetycznej energii pocisku, ΔE_{kz} jest zmianą kinetycznej energii Ziemi.

Odpowiedź w punkcie a jest prawdziwa, mianowicie taka ilość ciepła wydzieli się w każdym układzie odniesienia, w którym rozwiązujemy zadanie.

$$Q = |\Delta E_k| = \frac{mv^2}{2}.$$

Udowodnimy to stwierdzenie. Aby dokonać tego, przeprowadzimy dokładnie nasze rozważania dotyczące tych trzech układów odniesienia.

a) W układzie odniesienia, w którym Ziemia (góra) początkowo spoczywa energia układu jest równa kinetycznej energii pocisku. Po trafieniu pocisku w górę Ziemia uzyskuje pewną wartość prędkości v_z, którą możemy obliczyć z zasady zachowania pędu.

$$Mv_z = mv \quad \text{stąd} \quad v_z = \frac{m}{M}\cdot v.$$

Ziemia uzyskuje kinetyczną energię

$$\Delta E_{kz} = \frac{Mv_z^2}{2}.$$

Prawo zachowania energii zapiszemy w postaci

$$|\Delta E_{kp}| = \frac{mv^2}{2} = \frac{m}{M}\cdot\frac{mv^2}{2} + Q \text{ lub } Q = \frac{mv^2}{2} - \frac{m}{M}\cdot\frac{mv^2}{2}.$$

Uwzględniając warunek „dużego" ciała $(m \ll M)$ otrzymamy

$$Q = \frac{mv^2}{2} = |\Delta E_{k1}|.$$

b) W układzie odniesienia związanym z autobusem, który porusza się z prędkością v_a, w tym samym kierunku

eprasa.pl 34b251bb23

co pocisk i w stronę zgodną z jego ruchem, kinetyczna energia Ziemi zmienia się o wielkość $\Delta E'_{kz}$. Zmiana ta jest wywołana zmianą wartości prędkości od wartości v_z do wartości $v_z - \Delta v_z$. Wartość Δv_z można obliczyć stosując zasadę zachowania pędu dla układu pocisk – Ziemia w inercjalnym układzie odniesienia związanym z ich środkiem mas (zmiana prędkości jest niezmiennicza względem inercjalnych układów odniesienia):

$$M \cdot \Delta v_z = mv \quad \text{stąd} \quad \Delta v_z = \frac{m}{M} v .$$

Uwzględniając tę wartość Δv_z zmiana kinetycznej energii Ziemi w rozważanym układzie odniesienia wyniesie

$$\Delta E'_{kz} = \frac{M\left(v_z - \Delta v_z\right)^2}{2} - \frac{Mv_z^2}{2} = -Mv_z \cdot \Delta v_z + \frac{M \cdot \Delta v_z^2}{2}$$
$$= -m \cdot v \cdot v_z + \frac{m}{M} \cdot \frac{mv^2}{2}.$$

Ponieważ $m \ll M$ to możemy zapisać $\Delta E'_{kz} = -mvv_z$

Uwzględniając zmniejszenie kinetycznej energii Ziemi zasadę zachowania energii zapiszemy w postaci

$$\frac{m\left(v - v_z\right)^2}{2} = \frac{mv_z^2}{2} - m\, v\, v_z + Q$$

stąd

$$Q = \frac{mv^2}{2} .$$

c) W układzie odniesienia związanym z autobusem, który porusza się z prędkością o wartości v_a w tym samym kierunku co pocisk,ale w stronę przeciwną kinetyczna energia Ziemi zwiększa się o wartość $\Delta E''_{kz} = mvv_a$. Dowód tego jest analogiczny do poprzedniego dowodu.

Uwzględniając zwiększenie kinetycznej energii Ziemi, zasadą zachowania energii zapiszemy w postaci

$$\frac{m\left(v + v_a\right)^2}{2} = \frac{mv_a^2}{2} + m\, v\, v_a + Q \quad \text{stąd} \quad Q = \frac{mv^2}{2} .$$

Zależność $Q = \Delta E$ jest słuszna w zamkniętym układzie odniesienia (wtedy, kiedy ΔE jest zmianą energii całego układu) okazuje się słuszna i dla układu otwartego, kiedy ten układ rozpatrujemy w układzie odniesienia, w którym „duże” ciało spoczywa.

Zadania „paradoksy” do rozwiązania.

Zadanie1.

Autobus A porusza się z prędkością v o wartości v względem Ziemi. W chwili, kiedy wartość jego prędkości podwoiła się jego kinetyczna energia wzrosła o wartość

$$\Delta E_{k1} = \frac{m\left(2v\right)^2}{2} - \frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2} mv^2 .$$

Z punktu widzenia pasażera, który znajdował się w autobusie B poruszającym się z taką samą wartością prędkości v w tym samym kierunku i w tą samą stronę zmiana kinetycznej energii wynosiła

$$\Delta E_{k2} = \frac{mv^2}{2} - 0 = \frac{mv^2}{2} .$$

Dla obserwatora, który porusza się w autobusie C, poruszającym się w tym samym kierunku, ale w stronę przeciwną niż autobus A, zmiana kinetycznej energii autobusu A wynosi

$$\Delta E_{k3} = \frac{m\left(3v\right)^2}{2} - \frac{m\left(2v\right)^2}{2} = \frac{5}{2} mv^2 .$$

Otrzymaliśmy dziwny na pierwszy rzut oka wynik: ilość spalonego paliwa w autobusie A nie zmienia się, a zmiana kinetycznej energii różni się zasadniczo. Czy nie jest to sprzeczne z zasadą zachowania energii?

Zadanie 2.

Pocisk o masie m poruszający się z prędkością o wartości v_p trafia w platformę z piaskiem poruszającą się z prędkością o wartości v w tym samym kierunku i w tą samą stronę:

a) W układzie odniesienia związanym z Ziemią.
b) W układzie odniesienia związanym z platformą.

Rozwiązanie.

a) W układzie odniesienia związanym z Ziemią

$$Q_1 = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_p^2}{2} = \frac{m}{2}\left(v^2 - v_p^2\right).$$

b) W układzie związanym z platformą

$$Q_2 = \frac{m}{2}\left(v - v_p\right)^2 .$$

Otrzymaliśmy paradoks, w jednym układzie odniesienia pocisk może się stopić a w drugim nie.

Zadanie 3.

Z działka umieszczonego w samolocie lecącego z prędkością o wartości v_s wystrzelono pocisk w kierunku lotu samolotu i w tą samą stronę z prędkością o wartości v. Jaką kinetyczna energię uzyska pocisk w wyniku spalania prochu wydzielenia się energii, o wartości energii spalania E_s

a) W układzie odniesienia związanym z samolotem.
b) W układzie odniesienia związanym z Ziemią.

Rozwiązanie.

a) Względem układu odniesienia poruszającego się z prędkością o wartości v_s, pocisk posiada prędkość o wartości v. Kinetyczna energia pocisku w tym układzie powstanie kosztem energii spalania prochu E_s

$$E_s = \frac{mv^2}{2} .$$

b) Względem układu odniesienia zwoiązanego z Ziemią, wartość prędkości pocisku wynosi $v + v_s$, z czego wynika

$$E_s = \frac{m\left(v + v_s\right)^2}{2} - \frac{mv_s^2}{2} .$$

Ponieważ wielkość E_s jest niezmiennicza względem inercjalnych układów odniesienia to z tych zależności wynika $v^2 + v_s^2 = (v + v_s)^2$. Znajdź błąd w tym rozumowaniu.

Czesław Surowiec
Dębica

eprasa.pl 34b251bb23

Dlaczego kule w wyniku zderzenia centralnego całkowicie niesprężystego zlepiają się?

Marian **Maciocha**

Centralne zderzenie całkowicie niesprężyste dwóch kul spełnia następujące trzy warunki:

1. Na kule nie działają żadne siły zewnętrzne, czyli kule tworzą układ odosobniony. Zatem podczas zderzenia spełniona jest zasada zachowania pędu.
2. Przed zderzeniem środki obu kul poruszają się po tej samej prostej, więc pędy obu kul mają taki sam kierunek.
3. W wyniku zderzenia możliwie największa energia kinetyczna zamieniana jest na pracę związaną z odkształcaniem się kul, w wyniku czego wydzielane jest ciepło. Jednakże ograniczeniem możliwości zamiany energii kinetycznej na tę pracę jest konieczność pełnienia zasady zachowania pędu.

Chciałbym zaproponować przeprowadzenie dowodu na to, że spełnienie powyższych warunków wymusza „zlepienie się" kul, które zderzają się centralnie całkowicie nie sprężyście.

Dowód ten można przeprowadzić w następujących trzech etapach:

Etap 1:

Tradycyjny matematyczny opis całkowicie niesprężystego centralnego zderzenia dwóch kul.

Etap 2:

Wykorzystanie nierówności:

$$m_1u_1^2 + m_2u_2^2 \geq \frac{(m_1u_1 + m_2u_2)^2}{m_1 + m_2} \qquad (*)$$

(gdzie: m_1, m_2 – dowolne dodatnie liczby rzeczywiste, u_1, u_2 – dowolne liczby rzeczywiste) do wykazania, że kule w wyniku zderzenia centralnego całkowicie niesprężystego „zlepiają się".

Etap 3:

Dwa dowody nierówności (*). Do przeprowadzenia pierwszego dowodu zastosujemy nierówność Jensena. Drugi dowód będzie dowodem elementarnym.

Tradycyjny matematyczny opis całkowicie niesprężystego centralnego zderzenia dwóch kul.

Niech dane będą masy i prędkości początkowe kul – odpowiednio $m_1 > 0$ i $\vec{\mathbf{v}}_1$ oraz $m_2 > 0$ i $\vec{\mathbf{v}}_2$. Aby doszło do zderzenia przynajmniej jedna kula musi poruszać się, więc przyjmijmy, że $\vec{\mathbf{v}}_1 \neq \vec{0}$.

Niech kule poruszają się po prostej, którą oznaczymy jako oś x i zwrot osi x jest zgodny ze zwrotem wektora $\vec{\mathbf{v}}_1$. Zatem możemy przyjąć, że $v_1 > 0$. Jeżeli w chwili początkowej kula o masie m_2 jest nieruchoma (wektor $\vec{\mathbf{v}}_2$ jest wektorem zerowym), to przyjmujemy, że $v_2 = 0$.

Jeżeli $\vec{\mathbf{v}}_2 \neq \vec{0}$ i wektory $\vec{\mathbf{v}}_1$ i $\vec{\mathbf{v}}_2$ mają zwroty zgodne, to przyjmujemy, że $v_2 > 0$.

Jeżeli $\vec{\mathbf{v}}_2 \neq \vec{0}$ i wektory $\vec{\mathbf{v}}_1$ i $\vec{\mathbf{v}}_2$ mają zwroty przeciwne, to przyjmujemy, że $v_2 < 0$.

Zatem spełnienie nierówności $v_1 > v_2$ jest warunkiem koniecznym i wystarczającym zaistnienia zderzenia się kul.

Prędkości kul o masach m_1 i m_2 po zderzeniu oznaczmy odpowiednio przez $\vec{\mathbf{u}}_1$ i $\vec{\mathbf{u}}_2$. Ponieważ zderzenie kul jest zderzeniem centralnym, to wektory $\vec{\mathbf{u}}_1$ i $\vec{\mathbf{u}}_2$ mają taki sam kierunek jak wektor przez $\vec{\mathbf{v}}_1$.

Jeżeli $\vec{\mathbf{u}}_1 \neq \vec{0}$, to przyjmujemy, że:

- $u_1 > 0$, jeśli wektor $\vec{\mathbf{u}}_1$ ma zwrot zgodny ze zwrotem osi x,
- $u_1 < 0$, jeśli wektor $\vec{\mathbf{u}}_1$ ma zwrot przeciwny do zwrotu osi x.

Jeżeli $\vec{\mathbf{u}}_2 \neq \vec{0}$, to przyjmujemy, że:

- $u_2 > 0$, jeśli wektor $\vec{\mathbf{u}}_2$ ma zwrot zgodny ze zwrotem osi x,
- $u_2 < 0$, jeśli wektor $\vec{\mathbf{u}}_2$ ma zwrot przeciwny do zwrotu osi x.

Z zasady zachowania pędu wynika równanie:

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1u_1 + m_2u_2 . \qquad (1)$$

Z zasady zachowania energii wynika równanie:

$$\frac{m_1v_1^2}{2} + \frac{m_2v_2^2}{2} = \frac{m_1u_1^2}{2} + \frac{m_2u_2^2}{2} + E_{\max} , \qquad (2)$$

gdzie: $E_{\max}$ – maksymalna energia kinetyczna, która może zostać zamieniona na pracę związaną z odkształcaniem się kul.

Układ równań (1) i (2) jest pewnym matematycznym opisem centralnego zderzenia całkowicie niesprężystego dwóch kul.

Wykorzystanie nierówności (*) do wykazania, że kule w wyniku zderzenia centralnego całkowicie niesprężystego „zlepiają się".

Korzystając z nierówności (*) oraz równania (1) możemy w następujący sposób oszacować sumę $\frac{m_1u_1^2}{2} + \frac{m_2u_2^2}{2}$, która pojawiła się w równaniu (2):

$$\frac{m_1u_1^2}{2} + \frac{m_2u_2^2}{2} \geq \frac{(m_1u_1 + m_2u_2)^2}{2(m_1 + m_2)} = \frac{(m_1v_1 + m_2v_2)^2}{2(m_1 + m_2)} .$$

Uwzględniając powyższe oszacowanie dla centralnego zderzenia całkowicie niesprężystego otrzymujemy układ równań dla dwóch niewiadomych u_1 i u_2:

$$\begin{cases} m_1v_1 + m_2v_2 = m_1u_1 + m_2u_2 \\ \frac{m_1u_1}{2} + \frac{m_2u_2}{2} = \frac{(m_1v_1 + m_2v_2)}{2(m_1 + m_2)} \end{cases} \qquad (3)$$

eprasa.pl 34b251bb23

Układ równań (3) rozwiążemy metodą podstawiania. Z pierwszego równania układu równań wyznaczamy u_2:

$$u_2 = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2 - m_1 u_1}{m_2} \tag{4}$$

i podstawiamy do drugiego równania układu równań (3):

$$\frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 \left(m_1 v_1 + m_2 v_2 - m_1 u_1\right)^2}{2m_2^2} = \frac{\left(m_1 v_1 + m_2 v_2\right)^2}{2\left(m_1 + m_2\right)}. \tag{5}$$

Równanie (5) możemy przekształcić do postaci:

$$m_1\left[u_1\left(m_1 + m_2\right) - \left(m_1 v_1 + m_2 v_2\right)\right]^2 = 0 \text{, a stąd}$$

$$u_1 = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}. \tag{6}$$

Podstawiając (6) do (4) dostajemy:

$$u_2 = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}. \tag{7}$$

Zatem $u_1 = u_2$. Oznacza to, że kule w wyniku zderzenia centralnego całkowicie niesprężystego kule zlepiają się.

Dwa dowody nierówności (*).

Dowód pierwszy (*) – (*z wykorzystaniem nierówność Jensena*):

Nierówność Jensena dla funkcji wypukłych.

Dla dowolnych liczb rzeczywistych nieujemnych $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_n$, takich, że

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_n = 1$$

oraz dla dowolnego przedziału zbioru liczb rzeczywistych P, dowolnych liczb rzeczywistych $x_1, x_2, \ldots, x_n$, $x_n \in P$ i dowolnej funkcji f wypukłej na zbiorze P zachodzi nierówność:

$$\alpha_1 f\left(x_1\right) + \alpha_2 f\left(x_2\right) + \ldots + \alpha_n f\left(x_n\right) \geq f\left(\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \ldots + \alpha_n x_n\right).$$

Funkcja kwadratowa $f(x) = x^2$ jest funkcją wypukłą na zbiorze liczb rzeczywistych.

Jeśli m_1, m_2 są dowolnymi dodatnimi liczbami rzeczywistymi, to

$$\alpha_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} > 0, \quad \alpha_2 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} > 0, \quad \alpha_1 + \alpha_2 = 1.$$

Z nierówności Jensena wynika, że dla dowolnych liczb rzeczywistych $x_1 = u_1$, $x_2 = u_2$ i dla dowolnych dodatnich liczb rzeczywistych $\alpha_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2}$, $\alpha_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2}$ takich, że $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ zachodzi nierówność:

$$m_1 u_1^2 + m_2 u_2^2 = (m_1 + m_2) * \left(\frac{m_1}{m_1 + m_2} * u_1^2 + \frac{m_2}{m_1 + m_2} * u_2^2\right)$$

$$\geq (m_1 + m_2) * \left(\frac{m_1}{m_1 + m_2} * u_1 + \frac{m_2}{m_1 + m_2} * u_2\right)^2$$

$$= \frac{(m_1 u_1 + m_2 u_2)^2}{m_1 + m_2}.$$

Dowód drugi (elementarny) nierówności (*):

Dla dowolnych liczb rzeczywistych u_1, u_2 zachodzi nierówność:

$$\left(u_1 - u_2\right)^2 \geq 0. \tag{8}$$

Z nierówności (8) wynika, że:

$$u_1^2 + u_2^2 \geq 2 u_1 u_2. \tag{9}$$

Liczby m_1, m_2 są dowolnymi dodatnimi liczbami rzeczywistymi, więc liczba $m_1 * m_2$ jest dodatnią liczbą rzeczywistą.

Obie strony nierówności (9) mnożymy przez dodatnią liczbę rzeczywistą $m_1 m_2$:

$$m_1 m_2\left(u_1^2 + u_2^2\right) \geq 2 m_1 m_2 u_1 u_2. \tag{10}$$

Do obu stron nierówności dodajemy $\left(m_1^2 u_1^2 + m_2^2 u_2^2\right)$:

$$m_1 m_2\left(u_1^2 + u_2^2\right) + m_1^2 u_1^2 + m_2^2 u_2^2 \geq 2 m_1 m_2 u_1 u_2 + m_1^2 u_1^2 + m_2^2 u_2^2,$$

a stąd

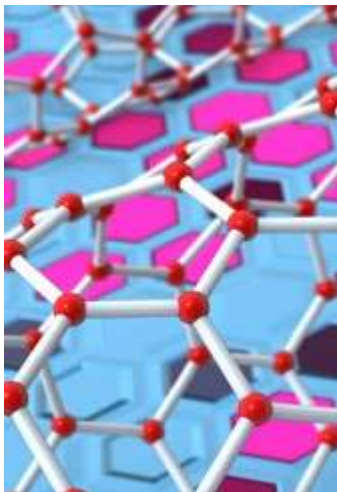
$$m_1\left(m_1 + m_2\right) u_1^2 + m_2\left(m_1 + m_2\right) u_2^2 \geq (m_1 u_1 + m_2 u_2)^2. \tag{11}$$

Liczby m_1, m_2 są dowolnymi dodatnimi liczbami rzeczywistymi, więc liczba $(m_1 + m_2)$ jest dodatnią liczbą rzeczywistą. Dzieląc obie strony nierówności (11) przez dodatnią liczbę rzeczywistą $(m_1 + m_2)$ otrzymujemy nierówność (*).

W następnym numerze

Co to jest grafen?

Czym w ogóle jest grafen? To pojedyncza dwuwymiarowa warstwa atomów węgla. Można ją porównać do warstwy piłeczek pingpongowych o grubości jednej piłeczki. W graficie atomy węgla ułożone są w trzech wymiarach. W tym przypadku piłeczki pingpongowe usypują się równomiernie na powierzchni tworząc kolejne warstwy atomów. Jedna warstwa grafitu to warstwa grafenu. Czemu cienki grafen jest ciekawszy od grubego grafitu? Aby to wyjaśnić posłużmy się analogią do szkoły. Można w nim wyróżnić szereg grup: uczniów, nauczycieli, sprzątaczek itp. Zachowania prezentowane przez grupy zależą nie tylko od interakcji w jej obrębie, ale i wzajemnej interakcji między grupami. Na wyjeździe integracyjnym bezludnej wyspie samotni uczniowie będą zachowywać się zupełnie inaczej niż podczas wyjazdu z nauczycielami czy też podczas zajęć w szkole. Analogicznie dzieje się z węglem, otoczenie pojedynczej warstwy atomów węgla diametralnie zmienia jego właściwości. Co się stanie zatem jeśli odseparujemy pojedynczą warstwę węgla od podłoża tworząc grafen?



eprasa.pl 34b251bb23

Foto – NASA

Perseverance bada Marsa

Zbigniew **Wiśniewski**

Wydarzeniem lutego w dziedzinie badań kosmosu było lądowanie na powierzchni Marsa łazika Perseverance. Lądowanie było kulminacyjnym punktem misji Mars 2020. Jako środka transportu użyto rakiety Atlas V-541. Start jej odbył się 20 lipca 2020 roku a Mars został osiągnięty po ponad półrocznym locie, czyli dość szybko. Łazik wylądował w dawnym kraterze uderzeniowym o wiele mówiącej nazwie Jezero, czyli spokojnie możemy używać polskiej nazwy jezioro. Zdaniem ekspertów NASA, faktycznie dawno temu było to głębokie na 250 m jezioro i nie można wykluczyć, że w prehistorycznych czasach pływały w nim marsjańskie sandacze, albo przynajmniej marsjańskie pantofelki.

Głównym celem misji jest przeprowadzenie badań z dziedziny szeroko rozumianej astrobiologii. Astrobiologia, jak większość z nas wie, jest dziedziną badającą życie w kosmosie. Wielu naukowców sądzi, że na Marsie były kiedyś warunki umożliwiające życie. Przede wszystkim była tam woda a nawet podobne do ziemskich oceany. A jak przypuszczamy to właśnie w ziemskich oceanach pojawiło się życie. W tym kontekście pytanie o tym czy życie kiedyś istniało na Marsie uzyskuje wymiar zasadniczej kwestii poznawczej, bo jeśli na Marsie było życie, to czy potrzebny jest akt tworzenia życia?

Pytanie to nie jest nowe. Tak naprawdę do nauki wprowadził je na dobre pewien duchowny, który hobbystycznie zajmował się astronomią. Duchownym tym był Mikołaj Kopernik. Napisałem hobbystycznie, ponieważ astronomia nie była jego głównym źródłem utrzymania. Drugie pytanie to – czy na Marsie jest życie? Tutaj ludzkie poglądy w XIX i XX wieku gwałtownie ewoluowały. Na początku XX wieku większość ludzi święcie wierzyła, że na Marsie jest rozwinięta cywilizacja. Dowodem na nią miały być kanały na Marsie. Na serio też obawiano się inwazji Marsjan.

Niestety z czasem okazało się, że kanały te dziwnym trafem nie dają się sfotografować. Pierwsze misje marsjańskie ostatecznie rozwiały przeświadczenie o istnieniu marsjańskich kanałów i w ogóle jakiejkolwiek cywilizacji. Pierwsze misje udowodniły jeszcze coś. Otóż wykazały, że na Marsie nie ma mórz i lądów, chociaż takowe są widoczne z Ziemi. Niestety są to tylko różnice w wielkości ziaren marsjańskiego gruntu, skutkujące różnicami współczynnika odbicia światła.

Pierwsze misje marsjańskie wykazały też, że Mars ma zbyt rzadką atmosferę, aby utrzymać ciekłą wodę na swojej powierzchni. Ciśnienie marsjańskie jest tak niskie, że jakakolwiek woda ciekła na powierzchni Marsa natychmiast zaczęłaby wrzeć. Nie zniechęciło to jednak poszukiwaczy marsjańskiego życia, tyle, że tym razem miały być to mikroby zagrzebane w marsjańskim gruncie.

Pierwsze badania pod tym względem dały – co ciekawe – dość niejednoznaczne wyniki i kwestia tak naprawdę do dziś pozostaje nierozstrzygnięta, ale ostatnio jakoś mniej zaprząta uwagę opinii publicznej. Może dlatego, że bakteria to nie to samo co zielony ludzik. Pojawiło się jednak kolejne pytanie – czy jest możliwa kolonizacja Marsa? Na to pytanie również szukać odpowiedzi ma łazik. Jednym z pytań jest, czy da się na powierzchni Marsa produkować tlen przez rozkład CO_2. Na ziemi robią to rośliny i nazywamy to fotosyntezą.

Kwestia marsjańskiej atmosfery jest też istotna z punktu widzenia ochrony przed promieniowaniem jonizującym pochodzącym zarówno z kosmosu jak i od Słońca. W przypadku Ziemi rolę tarczy przed nim pełni też ziemskie pole magnetyczne, które na Marsie jest znacznie słabsze, więc może naukowcy z NASA wymyśliliby sposób, aby jakoś te pole odtworzyć? Jak widać, jeśli ktoś na serio traktuje kwestie kolonizacji Marsa musi się wykazać dużą kreatywnością.

Wróćmy jednak do marsjańskiego łazika. Jest to starszy brak łazika Curiosity. Jest on o 14% cięższy od swojego młodszego brata i ma solidniejsze koła. Reszta wyposażenia jest zbliżona. No może z jednym wyjątkiem. Ma on na swoim pokładzie drona, który ma sprawdzić czy w marsjańskiej atmosferze da się latać, a kiedy już zacznie latać ma wykonać dokładne mapy okolicy dla przyszłych marsjańskich globtroterów, gdy tacy się tam pojawią. Nadal nie wiemy czy będzie to za 10, 15, 200 czy 5000 lat, ale chcemy być przygotowani.

Innym pomysłem jest, aby łazik pospacerował sobie po Marsie, zebrał kilka próbek, schował je do torby i w takim stanie przechował je do następnej misji, która miałaby od niego te próbki odebrać. Kiedy będzie mieć miejsce ta misja? Jak na razie nie wiadomo, bo misja ta jest dopiero w planach. Nie za bardzo wiem jak taka misja miałaby dokładnie przebiegać. Mars jest co prawda lżejszy od Ziemi jednak z drugiej strony jednak trochę waży, w związku z tym łatwiej jest na nim wylądować niż z niego odlecieć, aby odlecieć trzeba bowiem nadać obiektowi tak zwaną drugą prędkość kosmiczną. Każdy w wolnej chwili może policzyć, ile ona wynosi. A kto ma ochotę na dalsze obliczenia może też obliczyć jaką część masy rakiety marsjańskiej powinno stanowić paliwo, aby mogła się ona oderwać od marsjańskiej grawitacji.

eprasa.pl 34b251bb23

Z czego zbudowany jest Wszechświat?

Foto – NASA

Marek **Demiański**

To pytanie zadawano sobie już od bardzo dawna. Trudno teraz dociec, kto i kiedy zadał je po raz pierwszy. Z zachowanych starożytnych dzieł dowiadujemy się, że już w V wieku przed naszą erą grecki filozof Empedokles uważał, że wszystko, co nas otacza złożone jest z czterech elementów – żywiołów: wody, powietrza, ognia i ziemi. Sformułował też, jakbyśmy to teraz nazwali zasadę zachowania materii: „nie może nic powstać z tego, czego nie ma, jest niemożliwe i niesłychane, by to co jest zginęło".

Nieco później Leupidekos i Demokryt uznali, że wszystkie rzeczy materialne składają się z niepodzielnych, nieprzenikliwych niewyobrażalnie małych drobin materialnych, które nazwali atomami. Późniejsi filozofowie greccy Platon i Arystoteles odrzucili poglądy atomistów i przez ponad 1500 lat panowało przekonanie, że wszystko, co istnieje składa się z czterech żywiołów.

Jeszcze zanim zaczęto formułować te filozoficzne poglądy o podstawowych składnikach całego Wszechświata rozwijało się garncarstwo, wytapiano i obrabiano metale, wytwarzano barwniki i znane były różne sposoby konserwowania i przetwarzania żywności. Zaawansowane procesy obróbki metali doprowadziły do powstania alchemii, której głównym celem było wynalezienie sposobu przetwarzania metali nieszlachetnych w złoto. Te próby prowadzono bardzo intensywnie w krajach arabskich, gdy w Europie trwał ciemny okres średniowiecza.

Przełom w badaniu materii

Przełom w rozumieniu podstawowych składników materii i renesans teorii atomistycznej nastąpił dopiero w XVIII wieku, gdy A. Lavoisier odkrył prawo zachowania masy i powstała koncepcja substancji prostych, które obecnie nazywamy pierwiastkami. Na początku XIX wieku John Dalton wprowadził atomowy obraz reakcji chemicznych i twierdził, że pierwiastki chemiczne składają się z atomów, które mają określoną masę i rozmiary. Atomy różnych pierwiastków mogą łączyć się ze sobą tworząc cząsteczki, przy czy stosunki liczb różnych atomów w cząsteczce są zawsze stosunkami liczb całkowitych. Podczas reakcji chemicznych atomy łączą się ze sobą, rozdzielają lub zmieniają konfigurację.

Korzystając z atomistycznej koncepcji Daltona, kilka lat później Amadeo Avogadro wysunął hipotezę, że jednakowe objętości różnych gazów o tej samej temperaturze i ciśnieniu zawierają taką samą liczbę cząstek, zwaną teraz liczbą Avogadro. Istnieje wiele różnych metod pomiaru liczby Avogadro, według współczesnych pomiarów liczba Avogadro wynosi $N_A = (6.0221367 \pm 36 \cdot 10^{-7})\ 10^{23}\ \mathrm{mol}^{-1}$.

Wiek XIX zapoczątkował burzliwy rozwój badań chemicznych, co doprowadziło do odkrycia wielu nowych pierwiastków. Analiza własności tej rosnącej liczby pierwiastków doprowadziła do odkrycia ważnych prawidłowości i podobieństw. W 1869 roku Dmitrij Mendelejew usystematyzował znane wówczas pierwiastki względem rosnących mas atomowych w dwuwymiarowej tablicy wyróżniając 8 grup pierwiastków. Pierwsza tablica Mendelejewa zawierała 68 pierwiastków, ale były tam też puste miejsca, które z biegiem czasu były uzupełniane. Obecnie znamy 118 pierwiastków. (Rys.1)

Teoria atomistyczna została w pełni zaakceptowana, gdy w roku 1913 korzystając z powstającej wówczas mechaniki kwantowej Niels Bohr zaproponował model atomu złożonego z centralnego dodatnio naładowanego jądra i chmury elektronów, które mogą zajmować dyskretne poziomy energetyczne. Jak się później okazało jądro atomowe składa się z dodatnio naładowanych protonów i neutralnych elektrycznie neutronów. Ten kwantowy model atomu pozwolił na wyjaśnienie przebiegu reakcji chemicznych i wiązań atomów w cząsteczkach.

W drugiej połowie XIX wieku Gustaw Bunsen i Karl Kirchhoff ulepszyli spektroskop i badając widma różnych

eprasa.pl 34b251bb23

gazów odkryli, że atomy każdego pierwiastka emitują charakterystyczne linie widmowe. W ten sposób odkryli dwa nowe pierwiastki cez i rubid. Położenie linii widmowych można było opisać prostymi ułamkowymi zależnościami matematycznymi, które później zostały wyjaśnione przez kwantowy model atomu Bohra.

Po odkryciu wielu różnych pierwiastków chemicznych pojawiło się naturalne pytanie o skład chemiczny Ziemi. Bezpośrednio można badać skład chemiczny skorupy ziemskiej korzystając z próbek skalnych wydobywanych z głębokich odwiertów w głąb ziemi. Okazjonalne podczas wybuchów wulkanicznych wyrzucane są odłamki skalne z głębokości sięgających do 200 km. Własności głębszych warstw można badać tylko pośrednio, na przykład analizując rozchodzenie się fal sejsmicznych. Na podstawie tych danych oraz modeli jądra Ziemi oszacowano, że Ziemia składa się z:

Pierwiastek	Symbol	Procentowa zawartość (w stosunku wagowym)
Żelazo	Fe	32%
Tlen	O	30%
Krzem	Si	15%
Magnez	Mg	14%
Siarka Nikiel Wapno Glin	S Ni Ca Al	3% 2% 1.5% 1.5%

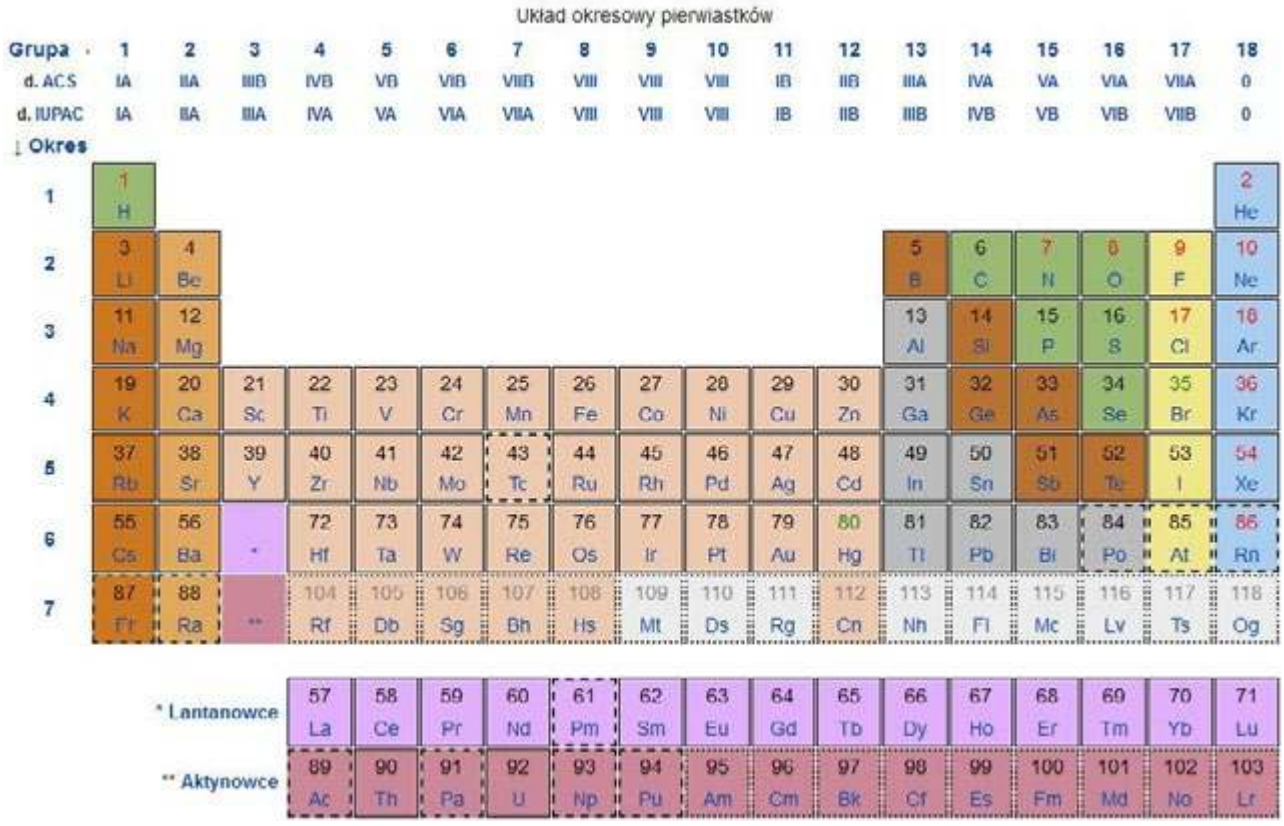
Nad Ziemią rozciąga się na odległość kilkudziesięciu kilometrów atmosfera złożona (w stosunku objętościowym) z:

Azotu N ~ 78%
Tlenu O ~ 21%
Argonu Ar ~1%

Już Izaak Newton eksperymentując ze światłem słonecznym zauważył, że przechodząca przez pryzmat wiązka światła ulega rozszczepieniu na wszystkie kolory tęczy. Na początku XIX wieku Joseph Fraunhofer, który zajmował się profesjonalnym wytwarzaniem soczewek i pryzmatów zauważył, że przygotowany przez niego pryzmat rozszczepia światło słoneczne na różne kolory tęczy, ale na tle tych kolorów występuje wiele wąskich ciemnych linii. Są one teraz nazywane liniami Fraunhofera. (Rys. 2)

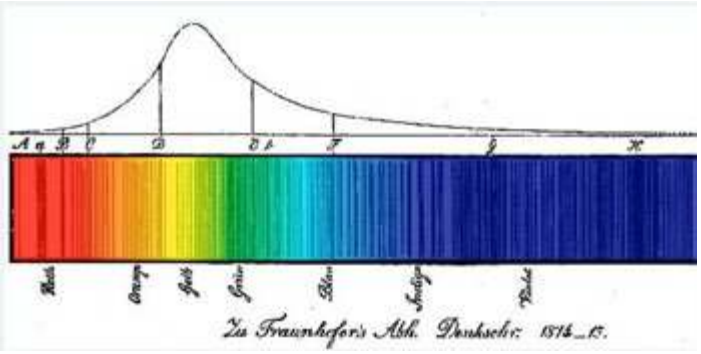
Po odkryciu Bunsena i Kirchhoffa linie Fraunhofera zostały zinterpretowane, jako linie absorpcyjne różnych pierwiastków. W taki oto sposób nie dysponując nawet drobną próbką materii, z której zbudowane jest Słońce możemy się dowiedzieć, jakie pierwiastki występują na Słońcu. W widmie Słońca uzyskiwanym przez najlepsze spektrografy optyczne astronomowie zidentyfikowali kilkadziesiąt tysięcy linii! Dzięki tym danym wiemy, że Słońce jest zbudowane (w stosunku wagowym) z:

Wodoru H	71%
Helu He	27.1%
Tlenu O	0.97%
Węgla C	0.4%



Rys. 1. Tablica Mendelejewa

eprasa.pl 34b251bb23



Rys. 2. Linie Fraunhofera

z nieznaczną domieszką innych pierwiastków takich jak azot, krzem, magnez, nikiel, siarka i żelazo.

Korzystając z coraz większych teleskopów optycznych w pierwszej połowie XX wieku astronomowie zbadali widma bardzo dużej liczby gwiazd i stwierdzili, że wszystkie składają się głównie z wodoru i helu.

W 1923 roku Edwin Hubble, korzystając z największego wówczas teleskopu optycznego znajdującego się na Mount Wilson koło Los Angeles, w mgławicy w Andromedzie, która uważana była za obłok gazowy, zauważył gwiazdy, w tym cefeidy, gwiazdy o okresowo zmieniającej się jasności, co pozwoliło na oszacowanie odległości. Okazało się, że mgławica w Andromedzie składa się z gwiazd i znajduje się daleko poza granicami naszej galaktyki Drogi Mlecznej. W ten sposób Hubble odkrył nowy bardzo bogaty świat galaktyk.

Po odkryciu kilkudziesięciu galaktyk Hubble dokonał kolejnego przełomowego odkrycia, wykazał, że galaktyki oddalają się od nas, przy czym im dalej od nas położona jest galaktyka z tym większą prędkością się od nas oddala. Te odkrycia radykalnie zmieniły nasze wyobrażenia o podstawowych składnikach Wszechświata i jego dynamice. Okazało się, że Wszechświat składa się z niezliczonej liczby galaktyk, jest tworem dynamicznym i obecnie się rozszerza.

Jeszcze zanim Hubble odkrył, że Wszechświat składa się z galaktyk i rozszerza się, Aleksander Friedman korzystając z sformułowanej kilka lat wcześniej przez Alberta Einsteina ogólnej teorii względności zaproponował prosty model Wszechświata. Friedman założył, że materia wypełniająca Wszechświat jest rozłożona w przestrzeni w sposób jednorodny i izotropowy, co oznacza, iż żaden punkt ani kierunek we Wszechświecie nie jest wyróżniony. Rozwiązując równania Einsteina opisujące taki układ pokazał, że w zależności od średniej gęstości materii Wszechświat może się albo wiecznie rozszerzać albo po epoce rozszerzania się zacznie się kurczyć. W obu przypadkach Wszechświat miał początek i w tym początkowym stanie był bardzo gęsty, formalnie gęstość materii była wówczas nieskończona. George Lemaitre wykazał, że w takim rozszerzającym się Wszechświecie galaktyki oddalają się od siebie zgodnie z prawem Hubble'a

$$v = H\,d,$$

czyli prędkość względna galaktyk v jest proporcjonalna do ich wzajemnej odległości d, a współczynnik proporcjonalności H zwany stałą Hubble'a zależy od czasu. Z dostępnych obecnie pomiarów astronomicznych wynika, że $H = 70 \pm 3$ km/s Mpc, Mpc = 10^6 pc ≈ 3 10^6 lat świetlnych to astronomiczna jednostka odległości. Stała Hubble'a ma wymiar 1/czas, więc jej odwrotność można przyjąć za szacunkowy wiek Wszechświata, czyli czas, jaki upłynął od momentu, kiedy gęstość Wszechświata była nieskończona. Po prostych obliczeniach otrzymujemy, że wiek Wszechświata wynosi około 14 miliardów lat.

Model Wielkiego Wybuchu

Początkowo do modelu Friedmana odnoszono się bardzo sceptycznie, trudny do zaakceptowania był fakt, że początkowo gęstość Wszechświata była nieskończona. Dopiero po II wojnie światowej George Gamow postanowił zbadać fizyczne konsekwencje modelu Friedmana. Poprawnie ocenił, że jeżeli początkowo Wszechświat był bardzo gęsty to powinien też być bardzo gorący i w takim stanie nie mogły istnieć ani atomy ani nawet jądra atomowe.

Wraz ze swoimi młodymi współpracownikami założył, że w tym początkowym stanie Wszechświat był wypełniony bardzo gorącą mieszaniną protonów, neutronów, elektronów, pozytonów (antycząstek elektronów), fotonów i neutrin i wprawdzie początkowo rozszerzał się bardzo szybko, bardzo szybko zachodziły też różne reakcje między tymi cząstkami i dzięki temu można było przyjąć, że materia wypełniająca Wszechświat była w stanie równowagi termodynamicznej. Wszechświat się rozszerzał, malała więc gęstość materii i malała też temperatura.

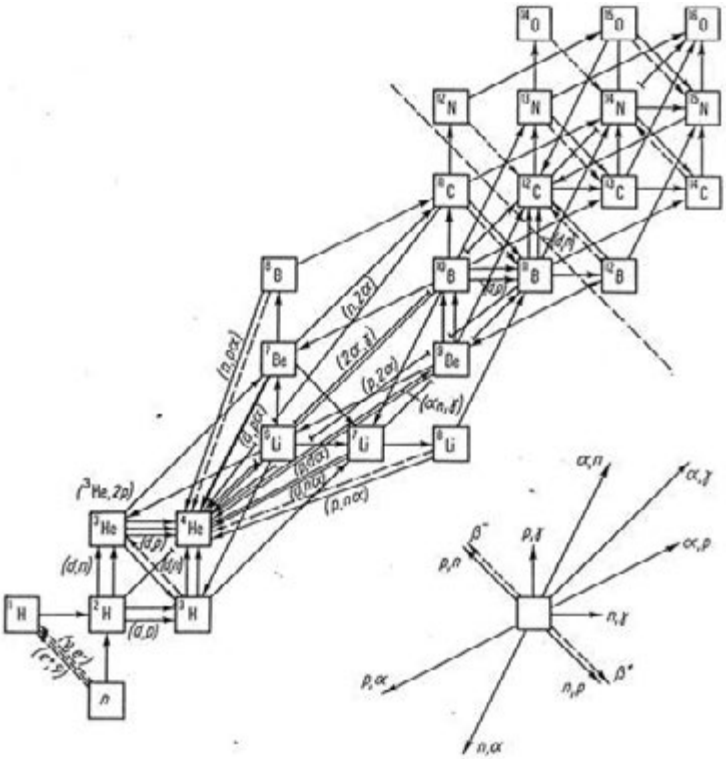
Ten model bardzo gęstego i gorącego początku Wszechświata nazwano później Modelem Wielkiego Wybuchu. W modelu Gamowa pierwszym istotnym procesem była anihilacja par elektronowo pozytonowych i moment, kiedy neutrina przestały oddziaływać z istniejącymi wówczas cząstkami. Nastąpiło to w przybliżeniu, gdy średnia energia fotonów obniżyła się do około 0.5 MeV, czyli energii masy spoczynkowej elektronów. Zniknęły pozytony, ale pozostały nadal elektrony, aby zapewnić elektryczną neutralność materii. Na krótko ustalił się stosunek liczby protonów i neutronów. Przy dalszym obniżeniu temperatury rozpoczął się proces pierwotnej nukleosyntezy:

$$p + n \leftrightarrow D$$
$$D + p \rightarrow {}^3He$$
$$D + D \rightarrow {}^4He$$

gdzie D oznacza deuter. Zachodziły też inne bardziej złożone reakcje, które doprowadziły do powstania helu i śladowych ilości innych lekkich pierwiastków aż do tlenu i węgla włącznie. (Rys. 3)

Początkowo Gamow przypuszczał, że w tym początkowym okresie rozszerzania się bardzo gęstego i bardzo gorącego Wszechświata powstały wszystkie pierwiastki, które obecnie istnieją we Wszechświecie. Okazało się jednak, że początkowo Wszechświat rozszerzał się bardzo szybko i bardzo szybko malała gęstość i obniżała się temperatura i proces pierwotnej nukleosyntezy nie mógł doprowadzić do powstania pierwiastków cięższych od tlenu i węgla. Z analizy procesu pierwotnej nukleosyntezy wynikało, że materia, z której następnie powstały pierwsze

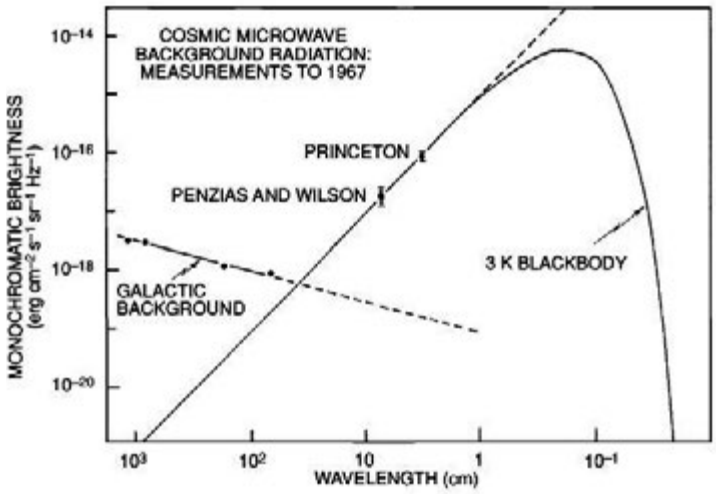
eprasa.pl 34b251bb23



Rys. 3. Reakcje jądrowe we wczesnym Wszechświecie

gwiazdy była złożona w około 75% z wodoru i 25% z helu z mała domieszką innych lekkich pierwiastków. Wyjaśniło się, więc dlaczego gwiazdy są zbudowane głównie z wodoru i helu. To był wielki sukces analizy Gamowa.

Gamow zauważył też, że ten początkowy okres ewolucji Wszechświata, gdy Wszechświat był wypełniony bardzo gorącą plazmą protonowo-neutronowo-elektronową powinien pozostawić jeszcze jeden ślad w postaci tła promieniowania fotonowego o widmie odpowiadającym promieniowaniu ciała doskonale czarnego i nawet oszacował jego obecną temperaturę na około 5 stopni powyżej absolutnego zera. Maksimum rozkładu energii takiego promieniowania wypada w zakresie fal milimetrowych. Wydawało się, że promieniowanie to nigdy nie zostanie



Rys. 4. Widmo promieniowania reliktowego

odkryte, gdyż jego ślady będą ukryte w znacznie silniejszym tle promieniowania wszystkich gwiazd.

W 1964 roku dwaj amerykańscy inżynierowie Arno Penzias i Robert Wilson testowali dużą, ale prymitywną antenę radiową, która miała służyć do badania możliwości przekazywania sygnałów telewizyjnych między stacjami naziemnymi przez odbijanie wiązki od balonów stratosferycznych. Badając czułość tej anteny zauważyli, że odbiera ona stały bardzo słaby sygnał niezależnie od kierunku ustawienia anteny i od pory dnia. Po wyeliminowaniu możliwości generowania tego sygnału przez samą antenę i jej złożony układ detektorów uznali, że ten sygnał dociera ze wszystkich kierunków na niebie. Znając rezonansową długość fali anteny (7.5 cm), energię sygnału oraz zakładając, że sygnał ma widmo promieniowania ciała doskonale czarnego oszacowali jego temperaturę na 3.5 stopnia powyżej absolutnego zera.

W tym samym czasie grupa fizyków pod kierunkiem Roberta Dicke przygotowywała specjalną antenę do odbioru bardzo słabych sygnałów radiowych w zakresie mikrofalowym z zamiarem odkrycie promieniowania reliktowego, którego istnienie przewidywał Gamow. Gdy oba zespoły dowiedziały się o swoich pracach wyjaśniło się, że źródłem sygnałów, które odbierała antena Penziasa i Wilsona jest promieniowanie reliktowe. (Rys. 4) Odkrycie promieniowania reliktowego przypieczętowało ostateczną akceptację modelu Wielkiego Wybuchu. Trzeba było zaakceptować to, że w początkowych fazach swojej ewolucji Wszechświat był bardzo gęsty i bardzo gorący.

Pomiar temperatury promieniowania reliktowego pozwolił na wyznaczenie gęstości liczby fotonów we Wszechświecie. Obecnie w każdym cm^3 we Wszechświecie znajduje się średnio około 500 fotonów promieniowania reliktowego.

Jak powstawały pierwiastki?

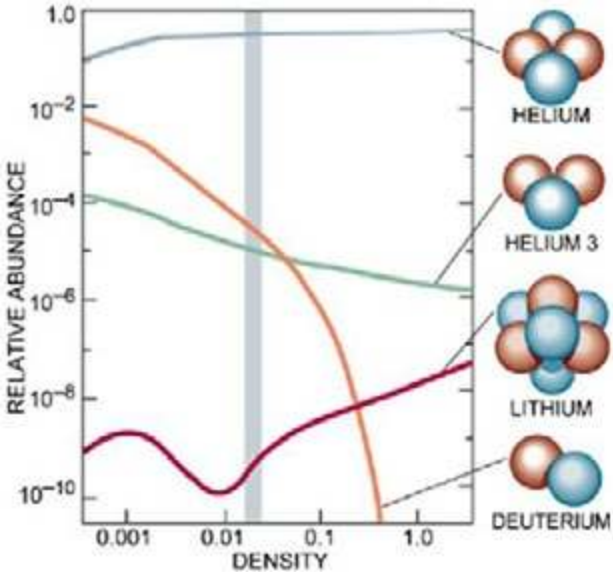
Względne rozpowszechnienie lekkich pierwiastków we Wszechświecie pozwala na oszacowanie gęstości materii barionowej. Z obserwacji astronomicznych wynika, że średnia gęstość materii barionowej mierzona bezwymiarowym parametrem, a mianowicie stosunkiem gęstości materii barionowej do tak zwanej gęstości krytycznej wynosi $\Omega_B = 0.04$. Gęstość krytyczna to gęstość materii w płaskim Wszechświecie, która zależy od stałej grawitacyjnej G i stałej Hubble'a

$$\rho_{kryt} = \frac{3H^2}{8\pi G},$$

a $\Omega_B = \rho_B/\rho_{kryt}$, gdzie ρ_B to średnia gęstość materii barionowej. (Rys. 5)

Jeżeli w początkowych fazach ewolucji Wszechświata powstał jedynie wodór i hel to, w jaki sposób i kiedy powstały te wszystkie pierwiastki, które występują obecnie w tablicy Mendelejewa? Rozwój fizyki jądrowej pozwolił w połowie XX wieku na opracowanie szczegółowych schematów powstawania różnych coraz cięższych pierwiastków w procesach reakcji termojądrowych zachodzących we wnętrzach gwiazd. Już pierwsze pomiary masy jąder atomowych wykazały, że masa jądra jest mniejsza

eprasa.pl 34b251bb23



Rys. 5. Rozpowszechnienie lekkich pierwiastków w Wszechświecie

od sumy mas tworzących je protonów i neutronów. Ten deficyt masy lub równoważna jej energia to energia wiązania nukleonów w jądrze. Interesującym parametrem charakteryzującym różne jądra jest energia wiązania jądra na jeden nukleon. Zmienia się ona wraz z liczbą masową jądra (patrz rys. 6). Początkowo w miarę wzrostu liczby masowej jądra energia wiązania na jeden nukleon rośnie osiągając maksimum dla jądra żelaza ^{56}Fe, a następnie monotonicznie maleje. Z tej zależności wynika, że połączenie dwóch jąder lżejszych od żelaza powoduje wydzielenie energii.

W końcu lat dwudziestych XX wieku astronomowie przypuszczali, że głównym źródłem energii gwiazd są procesy syntezy termojądrowej. Procesy termojądrowe zachodzące we wnętrzach gwiazd są bardzo złożone i tutaj skoncentruję się jedynie na najważniejszych etapach ewolucji gwiazd. Gwiazdy powstają w wyniku powolnego grawitacyjnego procesu kondensacji z obłoków materii międzygwiazdowej złożonej głownie z wodoru i helu. Gdy temperatura w centrum takiego kurczącego się obłoku osiągnie temperaturę kilku milionów stopni rozpoczynają się reakcje termojądrowe prowadzące do zamiany wodoru w hel. Oto przykład takiego cyklu reakcji:

$$p + p \rightarrow {}^{2}H + e^{+} + \nu$$
$$p + {}^{2}H \rightarrow {}^{3}He + \gamma$$
$${}^{3}He + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + 2\,p.$$

Bilans tego cyklu reakcji prowadzi do zamiany czterech protonów na jedno jądro helu i w trakcie tego procesu powstają dwa pozytony, dwa neutrina i co najmniej dwa fotony. Neutrina, które bardzo słabo oddziałują z materią tworzącą gwiazdę swobodnie ulatują unosząc niewielką część energii wydzielonej podczas reakcji termojądrowych. Pozytony bardzo szybko anihilują z napotkanymi elektronami, powstaje para wysoko energetycznych fotonów, co prowadzi do podgrzania centrum gwiazdy. Te reakcje są głównym źródłem energii emitowanym przez Słońce.

W gwiazdach o większej masie zachodzi bardziej złożony cykl reakcji, zwany cyklem CNO:

$$C + p \rightarrow N + \gamma$$
$$N \rightarrow C + e^{+} + \nu$$
$$C + p \rightarrow N + \gamma$$
$$N + p \rightarrow O + \gamma$$
$$O \rightarrow N + e^{+} + \nu$$
$$N + p \rightarrow C + He$$

Jądra węgla, azotu i tlenu pełnią rolę katalizatorów i ich liczba nie ulega zmianie. W efekcie tego cyklu cztery protony zastają zamienione na jedno jądro ^{4}He i powstają dwa pozytonu, dwa neutrina i fotony.

Po wypaleniu wodoru w centrum w gwiazdach bardziej masywnych niż Słońce następuje spalanie helu. Ten proces okazał się być bardzo złożony, gdyż jądra atomowe o masach atomowych 5 i 8 są niestabilne i ich średni czas życia to 10^{-16} s. Przy odpowiednio dużej koncentracji jąder ^{4}He (cząstek alfa) możliwe są reakcje:

$${}^{4}He + {}^{4}He \rightarrow {}^{8}Be$$
$${}^{8}Be + {}^{4}He \rightarrow {}^{12}C + \gamma$$

Okazało się przy tym, że jądro ^{12}C posiada odpowiedni poziom rezonansowy, genialnie przewidziany przez F. Hoyle'a, co znacznie powiększa prawdopodobieństwo zachodzenia tej ostatniej reakcji.

Dalsze procesy spalania węgla i tlenu prowadzą do powstania jąder neonu, magnezu i siarki:

$$C + He \rightarrow O + \gamma \qquad Ne + He \rightarrow Mg + \gamma$$
$$O + He \rightarrow Ne + \gamma \qquad Mg + He \rightarrow Si + \gamma$$

Wraz z pojawieniem się jąder węgla i tlenu możliwe są też inne reakcje jądrowe prowadzące do powstania jąder sodu, magnezu, krzemu, fosforu i siarki.

Gwiazdy, których początkowa masa jest większa od około 15 mas Słońca mogą spalać cięższe pierwiastki. Temperatura w centrum takiej gwiazdy może wzrosnąć do ponad 10^{8} K. Następuje wówczas bardzo szybki proces spalania kolejnych cięższych pierwiastków:

$$Si + He \rightarrow S + \gamma$$
$$S + He \rightarrow Ar + \gamma$$
$$\vdots$$
$$Ti + He \rightarrow Cr + \gamma$$
$$Cr + He \rightarrow Fe + \gamma$$

W naturalnych warunkach we wnętrzach gwiazd żelazo nie może być przetwarzane w cięższe pierwiastki, ta reakcja jest endotermiczna. W środku takiej gwiazdy zaczynają się gromadzić jądra żelaza. Centrum gwiazdy zaczyna przypominać żelaznego białego karła. Masa stabilnego białego karła nie może jednak przekraczać 1.4 masy Słońca. Reakcje termojądrowe w centrum gwiazdy zachodzą nadal i w końcu masa żelaznego jądra osiąga krytyczną wartość $1.4M_{\odot}$ i następuje katastroficzny proces grawitacyjnego zapadania. Temperatura w centrum gwiazdy gwałtownie rośnie i następuje fotodysocjacja jąder żelaza

$${}^{56}Fe + \gamma \rightarrow 13\,{}^{4}He + 4\,n$$
$${}^{4}He + \gamma \rightarrow 2p + 2n$$

eprasa.pl 34b251bb23

W centrum gwiazdy drastycznie zmienia się skład chemiczny, gorąca plazma żelazno-elektronowa zostaje zamieniona na gorącą plazmę protonowo-neutronowo-elektronową. Część energii wydzielona podczas grawitacyjnego zapadania centrum gwiazdy jest unoszona przez bardzo silny strumień neutrin.

Proces grawitacyjnego zapadania zostaje zatrzymany, gdy ciśnienie zdegenerowanego gazu neutronowego, który jest wówczas dominującym składnikiem, równoważy siły grawitacyjne. W ten sposób w środku gwiazdy powstaje gwiazda neutronowa o masie około 1.4 $M_{\odot}$ i gęstości ~10^{14} g/cm^3, czyli gęstości porównywalnej do średniej gęstości jąder atomowych. Zewnętrzne warstwy gwiazdy nagle tracą wsparcie wewnętrznego ciśnienia i zaczynają się też zapadać rozpędzając się do prędkości bliskich prędkości światła (prędkość ucieczki z powierzchni gwiazdy neutronowej wynosi około 1/3 c!). Spadająca materia zderza się z bardzo twardą powierzchnią gwiazdy neutronowej i odbija się. W środku gwiazdy spotykają się dwa przeciwbieżne strumienie szybko poruszających się cząstek. Powstaje w ten sposób najsilniejszy akcelerator we Wszechświecie. Zachodzą różne reakcje jądrowe i powstają wówczas wszystkie pierwiastki cięższe od żelaza.

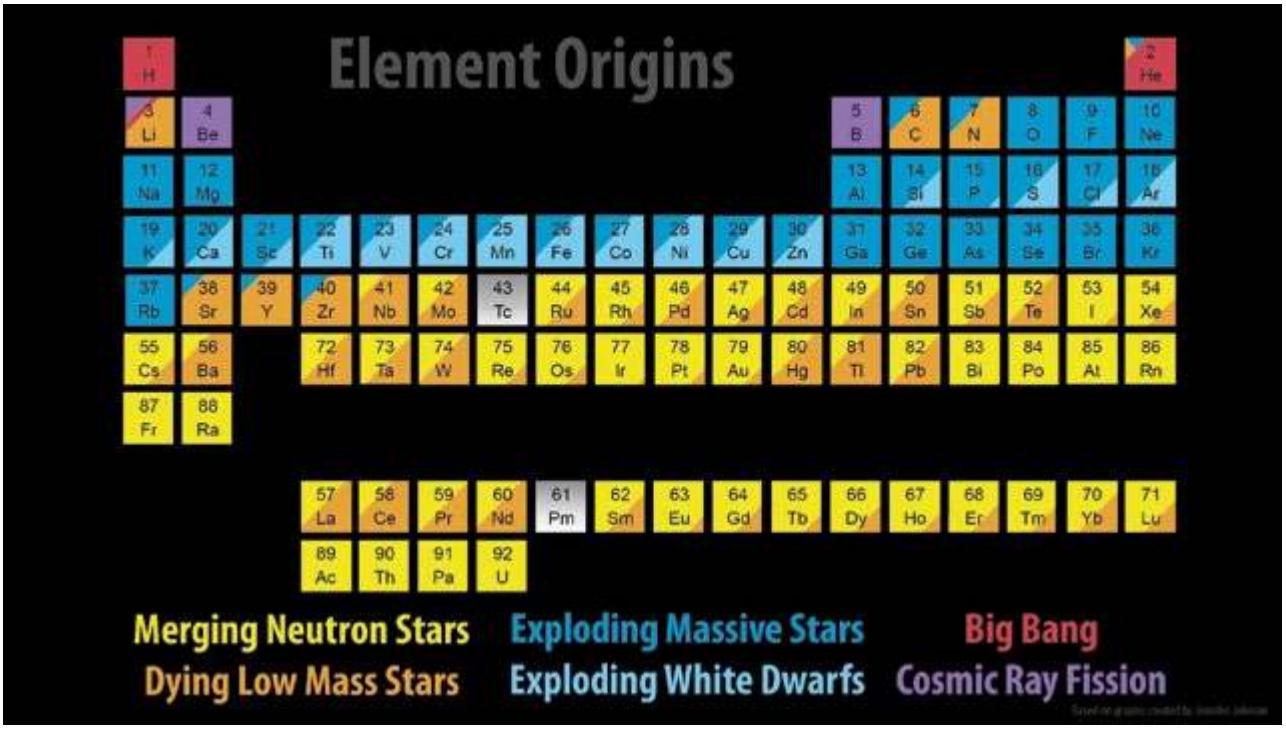
Gdy już wydawało się, że w ogólnych zarysach rozumiemy, w jaki sposób powstały pierwiastki we Wszechświecie 17 sierpnia 2017 roku trzy laserowe detektory fal grawitacyjnych LIGO/VIRGO zaobserwowały sygnał, który został wyemitowany podczas zlewania się dwóch gwiazd neutronowych o masach 1.46$M_{\odot}$ i 1.27$M_{\odot}$. Dzięki temu, że sygnał został zarejestrowany przez trzy położone daleko od siebie detektory można było dość dokładnie określić kierunek na niebie skąd ten sygnał został wyemitowany. Rozpoczęła się skoordynowana akcja poszukiwania obiektu, który można było uznać za źródło tego sygnału.

Niemal jednocześnie z sygnałem fal grawitacyjnych dwa satelitarne teleskopy rentgenowskie Fermi i INETGRAL zarejestrowały krótki sygnał charakterystyczny dla krótkich błysków gamma. Zaledwie po kilku godzinach udało się stwierdzić, że zaobserwowane sygnały zostały wyemitowane z galaktyki NGC 4993. Ten obiekt, nazwany później kilonową, przez kilka następnych miesięcy był najczęściej obserwowanym obiektem na niebie i to w całym zakresie widma promieniowanie elektromagnetycznego. Analiza widma tego obiektu pozwoliła stwierdzić, że w procesie zlewania się dwóch gwiazd neutronowych około 10% ich masy została odrzucona i przyspieszona do prędkości bliskiej prędkości światła. Tworzące ten relatywistyczny strumień cząstki, głównie protony, neutrony i jądra żelaza zderzały się ze sobą tworząc jądra wszystkich ciężkich pierwiastków występujących we Wszechświecie (Rys. 6.)

Skomplikowany proces powstawania pierwiastków we Wszechświecie można podzielić na trzy etapy: Wielki Wybuch – wtedy powstał głównie wodór i hel, cięższe pierwiastki, aż do żelaza włącznie, powstały podczas reakcji termojądrowych w centrach gwiazd, a pierwiastki cięższe od żelaza w katastroficznych procesach zapadania się bardzo masywnych gwiazd i podczas zlewania się układów podwójnych gwiazd neutronowych.

Jak „zważyć galaktykę”?

Kiedy już wydawało się, że wiemy, z czego zbudowany jest Wszechświat astronomowie postanowili „zważyć galaktyki”. Masę galaktyki można ocenić na podstawie jej jasności absolutnej, czyli energii, jaką emituje w paśmie optycznym widma promieniowania elektromagnetycznego. Zakładając, że Słońce jest typową gwiazdą i dzieląc absolutną jasność galaktyki przez jasność Słońca można oszacować z ilu gwiazd składa się galaktyka, a mnożąc tę liczbę



Rys. 6. Różne procesy powstawania pierwiastków

eprasa.pl 34b251bb23

przez masę Słońca otrzymujemy szacunkową wartość masy galaktyki. Galaktyki zawierają również pył, ale przypuszczano, że nie daje on znaczącego wkładu do masy galaktyki.

Większość galaktyk, które występują we Wszechświecie to są galaktyki spiralne. Z kształtu dysku galaktycznego i rozkładu materii wynikało, że gwiazdy tworzące dysk w przybliżeniu poruszają się po okręgach względem centrum galaktyki. Z pomiarów profilu jasności galaktyk spiralnych wynikało, że najwięcej energii emitują centralne części galaktyki. Przypuszczano więc, że w centralnych częściach galaktyki skoncentrowana jest dominująca część masy galaktyki. Innymi słowy gwiazdy w galaktykach spiralnych powinny, zgodnie z trzecim prawem Keplera, obiegać centrum galaktyki z prędkościami malejącymi jak odwrotność pierwiastka z odległości od centrum, podobnie jak planety krążące wokół Słońca w naszym układzie planetarnym (Rys. 7)

$$v = \sqrt{\frac{GM_{\odot}}{r}}\,.$$

W naszej galaktyce Słońce krąży wokół centrum z prędkością około 200 km/s i obiega centrum Drogi Mlecznej w ciągu 230 milionów lat. Na początku lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku Vera Rubin postanowiła sprawdzić jak w naszej galaktyce poruszają się gwiazdy znajdujące się dalej od centrum Drogi Mlecznej niż Słońce. Z tych obserwacji wynikało, że prędkości tych gwiazd nie maleją zgodnie z przewidywaniami prawa Keplera.

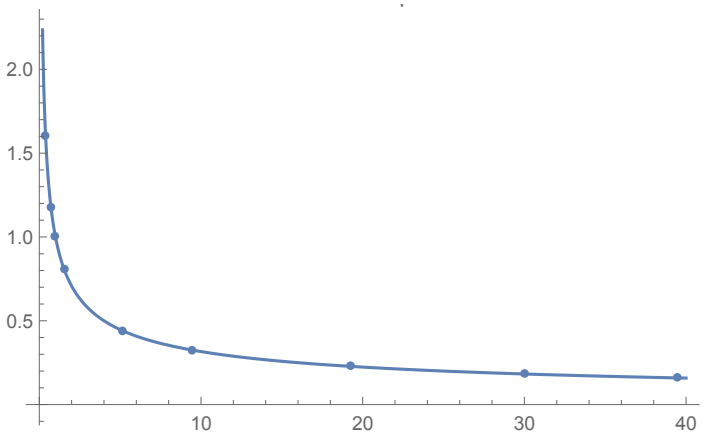
Do pomiarów prędkości gwiazd, Vera Rubin powróciła po dziesięciu latach i wówczas wraz ze swoimi współpracownikami wyznaczyła krzywe rotacji gwiazd dla kilkudziesięciu galaktyk. Okazało się, że wszystkie te krzywe są płaskie, to znaczy, że gwiazdy położone w różnych odległościach od centrum galaktyki poruszają się w przybliżeniu z takimi samymi prędkościami. Z trzeciego prawa Keplera

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}\,,$$

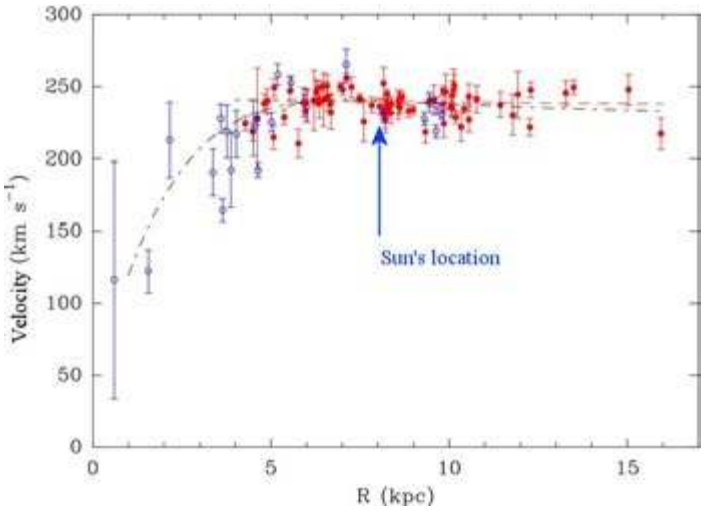
wynika zatem, że

$$M(r) \sim r,$$

gdyż $v(r) \approx$ const. (Rys. 8) Okazało się, że masa galaktyk spiralnych jest kilka razy większa od masy szacowanej na podstawie ich jasności absolutnej. Intuicyjnym parametrem, który wyraźnie wskazuje na te różnice jest stosunek masy galaktyki wyrażony w jednostkach masy Słońca do jej jasności też wyrażonej w jednostkach jasności Słońca $(M/M_{\odot})/(L/L_{\odot})$ lub po prostu M/L, dla typowych galaktyk ten stosunek wynosi



Rys. 7. III Prawo Keplera



Rys. 8. Krzywa rotacji Galaktyki

$$M/L|_{\text{galaktyki}} \sim 5 - 50.$$

Ciemna materia występuje również w galaktykach eliptycznych. O jej istnieniu świadczą tam ruchy własne gwiazd.

Gdy rozwinęła się astronomie rentgennowska i zaczęto obserwować gromady galaktyk okazało się, że w centralnych obszarach gromad galaktyk występują obłoki bardzo gorącego gazu o temperaturze sięgającej kilkunastu milionów stopni. Takie obłoki mogą być utrzymywane w centrach gromad galaktyk przez bardzo długi okres czasu, rzędu miliardów lat, jeżeli znajdują się w odpowiednio głębokiej grawitacyjnej studni potencjału. Z pomiarów profili temperatury tych gorących obłoków można było oszacować masę gromady. Okazało się, że jest ona znacznie większa od sumy mas tworzących ją galaktyk. Z tych pomiarów wynikało, że

$$M/L|_{\text{gromady galaktyk}} \sim 100 - 500.$$

Te oszacowania masy gromad galaktyk zostały następnie potwierdzone przez obserwacje zjawiska soczewkowania grawitacyjnego. Zakrzywienie biegu promieni świetlnych w polu grawitacyjnym Słońca było jednym z pierwszych efektów ogólnej teorii względności przewidzianych przez Einsteina. Po raz pierwszy ten efekt został zaobserwowany w roku 1919 podczas całkowitego zaćmienia Słońca. Efekt zakrzywienia promieni świetlnych na kosmologicznych odległościach został zaobserwowany po raz pierwszy w 1979 roku, gdy odkryto tak zwanego podwójnego kwazara – dwa bardzo blisko siebie położone obrazy kwazara okazały się być obrazami tego samego obiektu. Obecnie soczewkowanie grawitacyjne spowodowane przez gromady galaktyk jest wykorzystywane do oceny ich masy. Masy gromad galaktyk uzyskane z obserwacji soczewkowania grawitacyjnego są zgodne z wynikami obserwacji rentgenowskich.

W ten sposób dowiedzieliśmy się, że galaktyki i gromady galaktyk zawierają bardzo dużo materii, która nie świeci. Bardzo szybko wyjaśniło się, że ta nieświecąca materia to

eprasa.pl 34b251bb23

nie może być materia barionowa. Gęstość materii barionowej oszacowanej na podstawie rozpowszechnienia lekkich pierwiastków we Wszechświecie wynosi $\Omega_B = 0.04$ natomiast szacowana gęstość nieświecącej materii, którą nazwano ciemną materią wynosi w przybliżeniu $\Omega_{DM} = 0.23$.

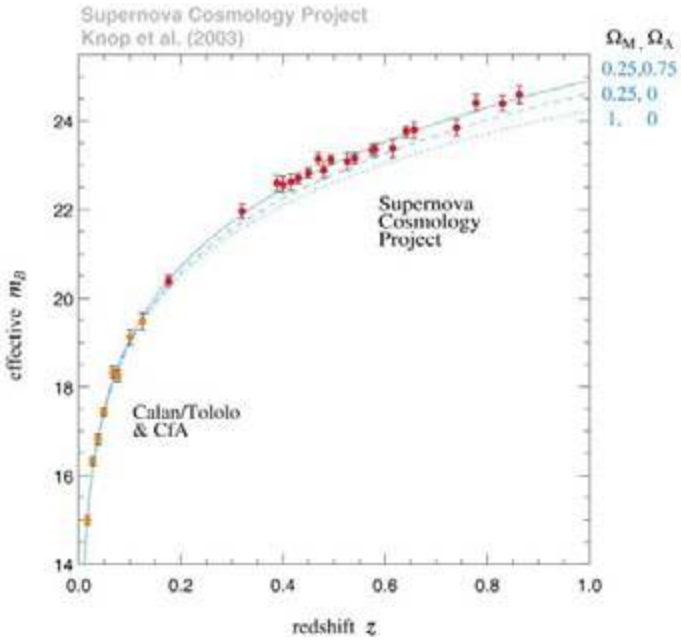
Ciemna materia i energia

Przypuszcza się, że ciemna materia składa się z jakichś cząstek bardzo słabo oddziałujących z barionami. Pomimo wielu różnych prób nie udało się dotychczas odkryć cząstek ciemnej materii. Ciemna materia odgrywała istotną rolę w procesie formowania się wielkoskalowej struktury rozkładu materii we Wszechświecie. Wyjaśnienie natury ciemnej materii jest jednym z najważniejszych problemów, jaki stoi przed fizyką cząstek elementarnych i astronomią w XXI wieku.

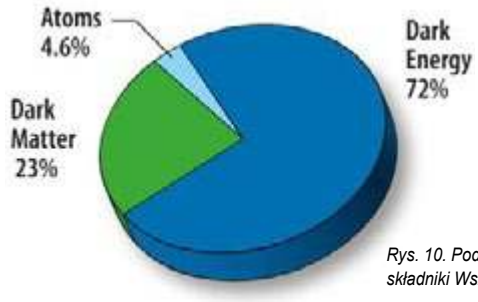
Na przełomie wieków astronomowie postanowili sprawdzić, czy wszechświat rozszerza się zgodnie z przewidywaniami modelu Friedmana. Bez wchodzenia w szczegóły modelu Friedmana, na podstawie prawa powszechnego ciążenia Newtona, można wywnioskować, że tempo rozszerzania się Wszechświata, a więc również stała Hubble'a powinna maleć. Aby to sprawdzić trzeba było wyznaczyć stałą Hubble'a korzystając z relatywnie bliskich galaktyk i z obserwacji obiektów bardzo dalekich, dla których można było wyznaczyć odległość i prędkość ucieczki.

Postanowiono wybrać do tego celu supernowe typu Ia. Jak już wspominaliśmy wcześniej białe karły istnieją jako stabilne gwiazdy, gdy ich masa nie przekracza $1.4M_\odot$. Jeżeli biały karzeł jest składnikiem układu podwójnego i jego towarzyszem jest niezbyt odległa zwykła gwiazda to w takim układzie może następować powolna akrecja materii na białego karła. Masa białego karła będzie stopniowo rosła i gdy osiągnie wartość $M_\odot$, biały karzeł traci stabilność i wybucha jako supernowa typu Ia.

W widmie supernowych typu Ia nie występują linie wodoru a ich krzywa blasku (zależność jasności od czasu) ma



Rys. 9. Przyspieszona ekspansja Wszechświata



Rys. 10. Podstawowe składniki Wszechświata

charakterystyczny kształt. Ponieważ wybuchający biały karzeł ma zawsze masę w przybliżeniu równą $1.4M_\odot$ to można oczekiwać, że podczas wybuchu wydzielana jest zawsze taka sama ilość energii, czyli ich jasność absolutna powinna być podobna. Jest to niezbędna własność tak zwanych świec standardowych. Jasność pozorna l lub strumień promieniowania mierzony przez obserwatora jest związany z jasnością absolutną L i odległością prostą zależnością

$$l = \frac{L}{4\pi d^2}.$$

Dwie niezależne grupy astronomów rozpoczęły program obserwacji dalekich supernowych typu Ia. Wykorzystywane były do tego satelitarne obserwatorium Huuble'a oraz największe teleskopy w Chile, Australii i na Hawajach. Po kilkuletnich obserwacjach w 2003 roku obie grupy opublikowały wyniki swoich obserwacji. Okazało się, że obecnie tempo rozszerzania się Wszechświata przyspiesza zamiast, jak oczekiwano, zwalniać. (Rys. 9) Taki efekt może być spowodowany różną od zera stałą kosmologiczną, którą w 1917 roku wprowadził Albert Einstein proponując statyczny model Wszechświata.

Przyspieszone tempo rozszerzania się Wszechświata może też być spowodowane przez dziwne medium wypełniające cały Wszechświat o dodatniej energii, ale wytwarzające odpowiednio ujemnym ciśnienie. Takie własności ma, na przykład samo oddziałujące pole skalarne. To dziwne medium zostało nazwane ciemną energią. Z obserwacji wynika, ze ciemna energia stanowi około 73% energii-masy Wszechświata. Dotychczas zaproponowano wiele różnych modeli ciemnej energii. Stałą kosmologiczną też można uważać za specyficzne medium o tej niezwykłej własności, że jego gęstość energii jest stała i nie ulega zmianie, choć Wszechświat się rozszerza.

Z dostępnych obecnie obserwacji astronomicznych wynika zatem, że Wszechświat jest wypełniony materią barionową o względnej gęstości $\Omega_B = 0.04$, ciemną materią o gęstości $\Omega_{DM} = 0.23$ i ciemną energią o gęstości $\Omega_{DE} = 0.73$. (Rys. 10)

Doszliśmy do niezwykłego wniosku, znamy zaledwie 4% materii wypełniającej Wszechświat. Przypuszczamy, że ciemną materię tworzą jakieś cząstki bardzo słabo oddziałujące ze zwykłą materią, ale tych cząstek nikomu jeszcze nie udało się zaobserwować. O naturze ciemnej energii wiemy jeszcze mniej. Przypuszczamy jedynie, że jest ona równomiernie rozłożona w całym Wszechświecie. Wyjaśnienie natury ciemnej materii i ciemnej energii to ogromne wyzwanie, jakie stoi obecnie przed fizyka i astronomią.

eprasa.pl 34b251bb23

Marcin Wesołowski, Piotr Gronkowski

Kompendium astronomiczne – wybrane pojęcia i zagadnienia – cz. 2

Kompendium astronomiczne zostało napisane z myślą o szerokim gronie czytelników. Może być ono przydatne dla uczniów szkół ponadpodstawowych, a także dla kandydatów na studia, którzy planują zdawać egzamin maturalny z przedmiotu fizyka z astronomią. Również może stanowić ciekawą pozycję literaturową dla nauczycieli przedmiotu fizyka z astronomią i wszystkich miłośników tego przedmiotu. W pracy tej przedstawiono najważniejsze pojęcia i terminy związane z astronomią.

Foto – Dreamstime

W drugiej części tego kompendium zostały przestawione wybrane zagadnienia z astronomii od litery C do F.

CCD, (detektor CCD) – półprzewodnikowy detektor promieniowania elektromagnetycznego (ang. Charge Coupled Device) powstały w Bell Laboratories w 1970 roku. Podstawowy element detektora jest wykonany podobnie jak złącze półprzewodnikowe typu MOS (ang. Metal Oxid Semiconductor). Takie trzy elementy tworzą podstawowy segment detektora – pixel. Rozmiary pojedynczych pixeli są bardzo małe rzędu mikrometrów. Zasada działania wykorzystuje zjawisko fotoelektryczne, dlatego obraz rzutowany przez układ optyczny teleskopu zostaje zapisany jako rozkład ładunku na detektorze, który następnie jest odpowiednio odczytany i zapisany w pamięci komputera. Detektory CCD mają zwykle formę matrycy składającej się z milionów pixeli i charakteryzują się bardzo dużą wydajnością kwantową dochodzącą do 90%. Są one znacznie czulsze niż klisze fotograficzne i dlatego prawie całkowicie je wyparły. Dodatkowe zalety detektorów CCD to ich liniowa charakterystyka, niski poziom szumów, zdolność do długotrwałej akumulacji promieniowania i cyfrowy zapis obrazu w postaci wygodnej do natychmiastowego dalszego opracowania.

Całka Jacobiego – całka energii w ograniczonym zagadnieniu trzech ciał znaleziona przez Jacobiego w 1836 roku. Jedyna znana całka w tym zagadnieniu.

Cassini – sonda międzyplanetarna wystrzelona 15.10.1997 r. jako wspólny projekt badawczy NASA, ESA oraz Włoskiej Agencji Kosmicznej, którego celem było badanie Saturna oraz bliższa penetracja jednego z jego księżyców Tytana przez próbnik Huygens, który po oddzieleniu od sondy dotarł do celu 14.01.2005 r. Potwierdziły się przypuszczenia, że atmosfera tego księżyca jest zdominowana przez metan. Nazwa sondy nawiązuje do nazwiska francuskiego astronoma pochodzenia włoskiego Gian Domenico Cassiniego (1625–1712), który odkrył 4 księżyce Saturna (Tethys, Dione, Rea, Japetos) i stwierdził złożoną strukturę jego pierścieni. Nazwa próbnika pochodzi z kolei od nazwiska słynnego fizyka i astronoma holenderskiego Christiaan'a Huygens'a (1629–1695), który między innymi odkrył Tytana oraz był prekursorem falowej teorii światła.

Cefeidy – gwiazdy fizycznie zmienne o periodycznych zmianach blasku. Rozróżniamy cefeidy krótkookresowe o okresie zmienności mniejszym niż jeden dzień (typu RRLyrae) oraz długookresowe o okresach 1.1 – 70 dni (typu δ Cephei lub typu W Virginis). Cefeidy długookresowe służą do wyznaczania odległości we Wszechświecie, gdyż wykazują ścisłą zależność okresu zmian blasku od jasności absolutnej.

Foto. 1. RS Puppis – przykład gwiazdy zmiennej w Galaktyce Drogi mlecznej (Foto. NASA).

Chandra – kosmiczne obserwatorium promieniowania X wprowadzone na orbitę wokółziemską przez prom kosmiczny Columbia w 1999 r.

Ciemna energia – jest to hipotetyczny rodzaj energii, która wypełnia całą przestrzeń i wywiera na nią ujemne ciśnienie. Skutkuje to przyspieszeniem tempa rozszerzania się Wszechświata. Jest to jedno z pojęć wprowadzonych w celu wyjaśnienia przyspieszania ekspansji kosmosu oraz problemu brakującej masy we Wszechświecie. Twórcą tego terminu był Michael Turner. Warto również dodać, że współczesne badania, które zostały opublikowane w 2011 r. potwierdzają istnienie ciemnej energii.

Ciemna materia – hipotetyczna, lecz dziś szeroko akceptowana w kosmologii forma nieświecącej materii trudno dostępna bezpośrednim obserwacjom (stąd jej nazwa), która miałaby wypełniać

Foto. 2. Na fotografii przedstawiono gromadę galaktyk Abell 520, która znajduje się w konstelacji Oriona. Kolorem niebieski oznaczono ciemną materie, natomiast różowym gorący gaz (Foto. NASA).

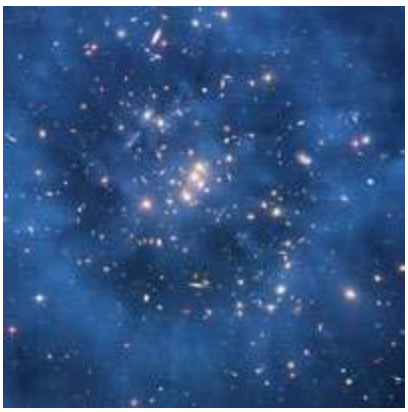


Foto. 3. Fotografia gromady galaktyk CL0024+17 – zdjęcie zostało wykonane przez kosmiczny teleskop Hubble'a. Na fotografii można dostrzec zjawisko soczewkowania grawitacyjnego pierścienia ciemnej materii (Foto. NASA). Wyjaśnijmy, że soczewkowanie grawitacyjne polega na zakrzywieniu promieni świetlnych w polu grawitacyjnym masywnego ciała niebieskiego prowadzące do ich skupienia.

eprasa.pl 34b251bb23

przestrzeń międzygwiazdową i międzygalaktyczną. Istnienie wielkich obłoków ciemnej materii wokół galaktyk spiralnych pozwala wytłumaczyć stabilność dysków galaktycznych i dynamikę gwiazd poruszających się w ich zewnętrznych obszarach a także dynamikę galaktyk znajdujących się w gromadach. Istnieją przypuszczenia, według których ciemną materię stanowią neutrina, lub mogą to być gwiazdy neutronowe, czarne dziury i brązowe karły. Prawdopodobnie ciemnej materii jest kilka razy więcej niż wynikałoby to z ilości świecących obserwowanych gwiazd w galaktykach.

Cobe (ang. Cosmic Background Explorer) – satelita amerykański (1989–1993), wyznaczył temperaturę równoważną ciała doskonale czarnego dla promieniowania tła Wszechświata T ≈ 2.73 K.

Czarna Dziura – obiekt astronomiczny o tak silnym polu grawitacyjnym, że żadna forma energii ani materii nie może go opuścić. Czarna dziura może powstać jako bardzo późny etap ewolucji masywnych gwiazd, które po wyczerpaniu paliwa jądrowego zapadają się pod wpływem ciśnienia własnej grawitacji, którego nic nie jest w stanie zrównoważyć. Czarna dziura ograniczona jest tzw. powierzchnią Schwarzschilda o promieniu równym promieniowi Schwarzschilda. Powierzchnia Schwarzschilda pełni rolę półprzepuszczalnej membrany, przez którą cząstki i sygnały świetlne niosące informacje mogą przenikać do jej środka, ale nie mogą się przez nią wydostać na zewnątrz. Taką powierzchnię nazwano horyzontem. Nazwa obiektu – czarna dziura (ang. black hole) pochodzi stąd, że początkowo sądzono, iż jej bardzo silne pole grawitacyjne czyni ją absolutnie niewidzialnym. Jednak Hawking wykazał, że czarne dziury również mogą promieniować (parować). Czarne dziury występujące w układach podwójnych gwiazd mogą być centrami dysków akrecyjnych, które silnie promieniują w dziedzinie rentgenowskiej. Promień Schwarzschilda (czasami określany historycznie jako promień grawitacyjny) jest fizycznym parametrem, który pojawia się w rozwiązaniu Schwarzschilda równań pola Einsteina. Niemiecki fizyk i astronom Karl Schwarzschild obliczył w 1916 roku jego wielkość w oparciu o dokładne rozwiązanie ogólnej teorii względności Alberta Einsteina jako wielkość definiującą horyzont zdarzeń czarnej dziury.

Promień Schwarzschilda r_s jest równy:

$$r_S = \frac{2GM}{c^2}.$$

W tym powyższym równaniu G, M, c oznaczają odpowiednio stałą grawitacji, masę ciała centralnego (czarnej dziury) oraz prędkość światła.

Czas gwiazdowy – kąt godzinny t_γ punktu Barana (równonocy wiosennej γ).

Czas słoneczny prawdziwy (T_S) – kąt godzinny środka tarczy słonecznej t_S powiększony o 12 godzin; $T_S = t_S + 12^h$.

Czas słoneczny średni (T_{SR}) – kąt godzinny Słońca średniego t_{SR} powiększony o 12 godzin; $T_{SR} = t_{SR} + 12^h$.

Czas uniwersalny – średni czas słoneczny na południku zerowym przechodzącym przez obserwatorium w Greenwich (Londyn). Stosuje się dla niego oznaczenia: GMT (Greenwich Mean Time) lub UT (Universal Time).

Czasoprzestrzeń – rozpatrywana w teorii względności czterowymiarowa rozciągłość powstała ze zespolenia ze sobą przestrzeni i czasu. Inaczej zbiór zdarzeń umiejscowionych w przestrzeni i czasie o strukturze afinicznej i metrycznej, której postać zależy od modelu fizycznego czasoprzestrzeni. Pojęcie to odgrywa fundamentalną rolę w rozważaniach kosmologicznych.

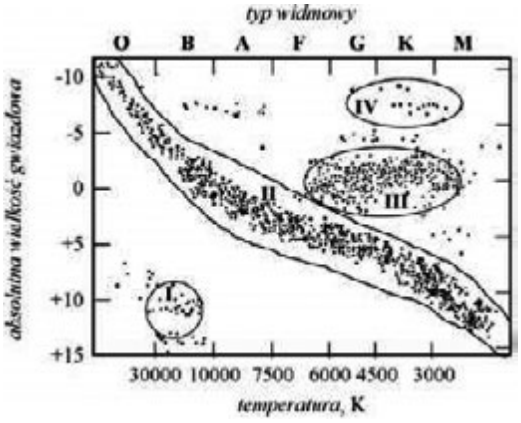
Czerwony Olbrzym – zaawansowana ewolucyjnie gwiazda o wymiarach znacznie większych niż Słońce (do 10 mas Słońca) lecz o małej temperaturze powierzchniowej. Jej struktura jest bardzo niejednorodna – składa się z małego gęstego helowego jądra oraz dużej rozrzedzonej otoczki wodorowej. Typowymi przykładami czerwonych olbrzymów są α Aurigae (Capella) i α Bootis (Arktur). Jako ciekawostkę można dodać, że Słońce najprawdopodobniej stanie się czerwonym olbrzymem za około 5 – 6 miliardów lat.

Foto. 4. α Bootis (Arktur) – najjaśniejsza gwiazda w gwiazdozbiorze Wolarza. Fotografia wykonana w zakresie widzialnym (Foto. NASA).

Deklinacja (δ) – jedna ze współrzędnych stosowanych w układach współrzędnych równikowych. Jest to kąt pomiędzy płaszczyzną równika niebieskiego a kierunkiem do rozważanego obiektu kosmicznego (wyrażana w stopniach). Inaczej odległość kątowa ciała kosmicznego od równika niebieskiego.

Deep Impact (EPOXI) to sonda kosmiczna, która została wystrzelona przez NASA w dniu 12 stycznia 2005 roku z kosmodromu na przylądku Canaveral. Celem tej misji było zbadanie składu jądra komety Tempel 1, a później także obserwacja jądra komety 103P/Hartley.

Diagram Hertzsprunga-Russella, (diagram H-R) – diagram przedstawiający zależność pomiędzy typem widmowym gwiazdy (lub temperaturą efektywną lub wskaźnikiem barwy) a jasnością absolutną gwiazdy wyrażoną w wielkościach gwiazdowych lub mocą promieniowania. Na diagramie gwiazdy skupiają się głównie w pewnych obszarach: tzw. ciągu głównego, podolbrzymów, czerwonych olbrzymów, nadolbrzymów i białych karłów. Diagram H-R odgrywa kluczową rolę w teorii ewolucji gwiazd – każdy proponowany model ewolucji gwiazd powinien być z nim zgodny.



Rys. 1. Diagram Hertzsprunga-Russella, na który przyjęto następujące oznaczenia: I – Białe karły, II – ciąg główny w którym obecnie znajduje się Słońce, III – Olbrzymy, IV – Nadolbrzymy.

Długość ekliptyczna (λ) – jedna ze współrzędnych układu współrzędnych ekliptycznych. Jest to kąt dwuścienny pomiędzy płaszczyzną koła wielkiego przechodzącego przez bieguny ekliptyczne i punkt Barana a płaszczyzną koła wielkiego przechodzącego przez bieguny ekliptyczne i ciało niebieskie (liczony w kierunku rocznego ruchu Słońca i wyrażony w mierze stopniowej).

Droga Mleczna – jasny pas światła na sferze niebieskiej rozciągający się wzdłuż płaszczyzny równika Galaktyki pochodzący od położonych w jej pobliżu gwiazd.

Foto. 5. Fotografia Drogi Mlecznej wykonana w podczerwieni (Foto. NASA).

Dyssypacja atmosfer ciał niebieskich – ucieczka molekuł gazów z atmosfer ciał kosmicznych (planet, gwiazd) spowodowana ich ruchem cieplnym. Warunkiem tego, aby dane ciało kosmiczne miało trwałą atmosferę jest, aby średnia prędkość termiczna gazów atmosferycznych

eprasa.pl 34b251bb23

była znacznie mniejsza niż prędkość ucieczki danego obiektu (→ druga prędkość kosmiczna).

Dżet – wyrzucany z dużą prędkością przez aktywny obszar obiektu kosmicznego (kometę, gwiazdę, jądro galaktyki) strumień materii.

Foto. 6. Fotografia jądra komety 103P/Hartley (Hartley 2) wykonana podczas misji EPOXI. Na fotografii widoczne są strumienie materii kometarnej – dżety (Foto. NASA).

Einstein – satelita badawczy pracujący na orbicie wokółziemskiej w latach 1978 – 1981. Prowadził obserwacje w dziedzinie promieniowania rentgenowskiego i odkrył kilka tysięcy jego źródeł.

Ekliptyka – okrąg koła wielkiego na sferze niebieskiej będący jej przecięciem z płaszczyzną orbity Ziemi w ruchu względem Słońca, wzdłuż niego przemieszcza się pozornie Słońce w ruchu rocznym na tle gwiazd.

Ekliptyczne bieguny – dwa punkty na sferze niebieskiej będące jej przecięciem z prostą prostopadłą do płaszczyzny ekliptyki i przechodzącą przez obserwatora. Północny biegun ekliptyczny E_N znajduje się na półkuli północnej ($\alpha = 18^h$, $\delta = +66°.5$, gwiazdozbiór Smoka) a południowy na południowej E_S ($\alpha = 6^h$, $\delta = -66°.5$, gwiazdozbiór Złotej Ryby).

Ekstynkcja – wielkość określająca osłabienie strumienia promieniowania elektromagnetycznego przechodzącego przez ośrodek materialny w wyniku absorpcji i rozpraszania.

Elementy orbity – zespół wielkości opisujących rozmiary, kształt oraz orientację w przestrzeni orbity ciała niebieskiego. W przypadku orbity eliptycznej używane są następujące elementy: duża półoś *a*, mimośród *e*, nachylenie orbity *i*, długość węzła wstępującego Ω, odległość perycentrum od węzła wstępującego ω oraz moment przejścia ciała przez perycentrum T_0.

Elongacja planety – różnica długości ekliptycznych Słońca i planety.

ESA – Europejska Agencja Kosmiczna – międzynarodowa organizacja państw europejskich powstała w 1975 roku, której zadaniem jest kierowanie i koordynacja badaniami i wykorzystaniem przestrzeni kosmicznej. Siedzibą organizacji jest Paryż, główny ośrodek badawczy mieści się w Noordwijk aan Zee w Holandii. Kosmodrom należący do ESA znajduje się w Gujanie Francuskiej.

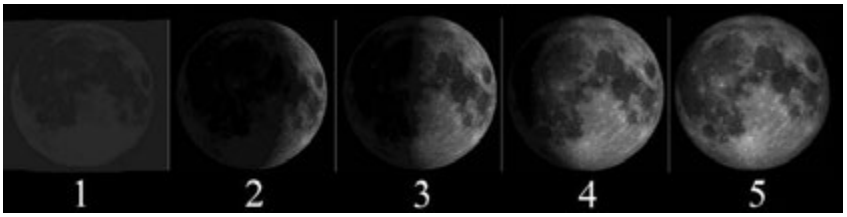
ESO – Europejskie Obserwatorium Południowe – międzynarodowa organizacja państw europejskich powstała w 1962 roku mająca na celu patronowanie obserwacjom południowej części sfery niebieskiej poprzez budowę i utrzymanie obserwatoriów położonych w południowych szerokościach geograficznych. Siedziba organizacji mieści się w Niemczech w Garching pod Monachium. Do ESO należą trzy obserwatoria położone w Chile: La Silla, Paranal i zespół radioteleskopów na górze Llano de Chajnatar.

Ewolucja gwiazd – ogół zmian fizyko-chemicznych jakim ulegają gwiazdy wraz z upływem czasu. Powszechnie uważa się, że gwiazdy powstają z materii międzygwiazdowej w wyniku kurczenia się wielkich obłoków molekularnych. Obłoki te zawierają głównie wodór, hel i pył. Kurczenie obłoku następuje wtedy, gdy oddziaływanie grawitacyjne pomiędzy jego cząsteczkami przezwycięża ciśnienie gazu. Aby tak się stało obłok musi spełnić tzw. kryterium Jeansa określające jego minimalną masę M_J, (masę Jeansa) przy której możliwy jest proces kontrakcji grawitacyjnej. Swobodnie kurczący się obłok wypromieniowuje coraz to więcej wyzwalanej energii grawitacyjnej i jego jasność rośnie, lecz temperatura pozostaje stała. Pierwotny olbrzymi obłok kurcząc się zwiększa swoją gęstość. Ponieważ masa Jeansa jest odwrotnie proporcjonalna do pierwiastka z gęstości obłoku więc w zapadającym się pierwotnym obłoku powstają lokalne skupienia spełniające kryterium Jeansa. Dochodzi do jego fragmentyzacji, czyli rozpadu na mniejsze obłoki – protogwiazdy, z których każda kurczy się oddzielnie zwiększając swoją gęstość i temperaturę. Gdy masa kurczącego się pojedynczego obłoku jest nie mniejsza niż $0.08M_S$ (gdzie M_S oznacza masę Słońca) temperatura centralna może osiągnąć wartość około 10 mln Kelvinów. Wtedy w jądrze protogwiazdy może rozpocząć się proces przemiany wodoru w hel, któremu towarzyszy wydzielanie się olbrzymich ilości energii. Energia ta w większości jest wypromieniowana z powierzchni fotosfery jako promieniowanie świetlne, a pewna jej część uwalniana jako energia neutrin. Zostaje osiągnięta równowaga hydrostatyczna tzn. ciśnienie grawitacyjne zostaje zrównoważone prze ciśnienie gazu, ustaje proces kontrakcji grawitacyjnej. W zależności od masy nowo powstałej gwiazdy zachodzi w niej synteza helu w cyklu proton-proton lub w cyklu węglowo-tlenowym (CNO). W ten sposób rodzi się gwiazda, która na wykresie H-R osiąga ciąg główny. Ponieważ procesy nukleosyntezy zachodzą tylko w centralnych rejonach gwiazdy więc po pewnym czasie zaczyna wyczerpywać się paliwo wodorowe, głównym składnikiem gwiazdy staje się hel i tempo spalania wodoru słabnie. Gwiazda na tym etapie ewolucji zbudowana jest z helowego jądra spowitego wodorową atmosferą. Ciężar górnych warstw gwiazdy przestaje być równoważony przez ciśnienie promieniowania, gwiazda traci stabilność i jej jądro zaczyna się kurczyć. Powoduje to wzrost temperatury na tyle duży, że w cienkiej warstwie wokół jądra helowego powstają warunki do dalszej przemiany wodoru w hel, której tempo zaczyna wzrastać. W konsekwencji ciśnienie promieniowania przeważa nad ciężarem zewnętrznych warstw atmosfery i gwiazda zaczyna „puchnąć" – zwiększać swoje wymiary przekształcając się w czerwonego olbrzyma. Na diagramie H-R odpowiada temu droga ewolucyjna polegająca na odejściu w prawo od ciągu głównego do obszaru olbrzymów. Czas przebywania gwiazdy na ciągu głównym zależy od jej masy. Gwiazdy bardziej masywne ewoluują szybciej (szybciej się „starzeją"). Uważa się, że zasadniczo do stadium czerwonego olbrzyma ewolucja wszystkich gwiazd o masach większych niż około 0.4 M_S przebiega podobnie. Natomiast gwiazdy o masach mniejszych od tej granicznej wartości po wyczerpaniu wodoru w jądrze osiągają szybko stadium białego karła. Dalsza droga ewolucyjna zależy w zasadniczy sposób od masy gwiazdy. Dla gwiazd o masach zbliżonych do masy Słońca opisane powyżej kurczenie się helowego jądra może doprowadzić do warunków sprzyjających syntezie węgla z helu (proces 3α – polega on na syntezie jądra węgla z trzech jąder helu). Ten etap ewolucji określany jest jako błysk węglowy. Gwiazda ma jednak zbyt małą masę, aby po wypaleniu się helu mogła przemieniać węgiel w pierwiastki cięższe. Końcowy etap ewolucji takich gwiazd polega na stopniowym wygaszaniu przemian jądrowych, kurczeniu się jądra do momentu aż ciśnienie grawitacyjne zostanie powstrzymane przez ciśnienie zdegenerowanego gazu elektronowego. Jednocześnie zaistniałe dynamiczne niestabilności powodują odrzucenie warstw zewnętrznych. Powstała w ten sposób mgławica planetarna otacza gwiazdę kończącą ewolucję jako stygnący biały karzeł. Gwiazdy bardziej masywne o masach większych niż 2,5 M_S mogą przemieniać powstały węgiel sukcesywnie aż do żelaza i niklu. Zachodzą w nich kolejno reakcje syntezy neonu, tlenu, krzemu i w końcu żelaza i niklu. Na tych dwóch pierwiastkach kończy się nukleosynteza w gwiazdach, gdyż charakteryzują się one największą energią wiązania. Dalsze przemiany jądrowe są endotermiczne i wymagałyby dostarczenia energii z zewnątrz. Powstający żelazo-niklowy rdzeń gwiazdy pozostaje stabilny tak długo jak długo ciśnienie zdegenerowanego gazu elektronowego jest w stanie zrównoważyć ciśnienie grawitacyjne. Gdy rdzeń gwiazdy osiągnie pewną graniczną masę (≈ 1.4 M_S), wtedy następuje gwałtowny rozpad jąder żelaza i niklu na jądra helu i neutrony. Towarzyszy temu gwałtowne zmniejszenie się objętości rdzenia – jego implozja. Następnie powstaje fala uderzeniowa, która rozrywa gwiazdę. Zjawisko to obserwuje się jako wybuch supernowej. W trakcie wybuchu zachodzą reakcje jądrowe, których produktem są jądra ciężkich pierwiastków, które nie mogłyby być wyprodukowane

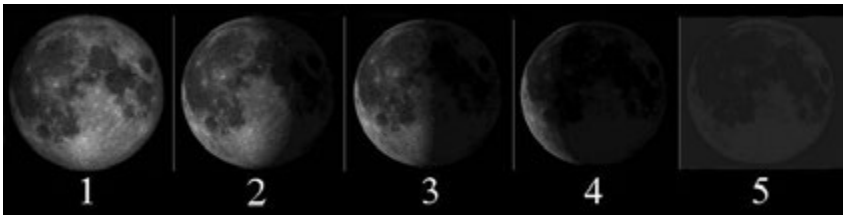
eprasa.pl 34b251bb23

we wnętrzach gwiazd. W wyniku wybuchu powstaje świecąca mgławica otaczająca odsłonięty rdzeń gwiazdy, który stanowi teraz gwiazdę neutronową. W przypadku bardzo masywnych gwiazd o masach większych niż 8 M_S przypuszcza się, że ten ostatni etap przebiega podobnie, lecz powstała fala uderzeniowa nie jest w stanie odrzucić kolejnych warstw zewnętrznych gwiazdy, które opadając na rdzeń zwiększają jego masę. Ostatecznie ma miejsce kolaps rdzenia, który przekształca się w czarną dziurę.

Fale grawitacyjne – przewidziane przez teorię grawitacji Einsteina zaburzenia czasoprzestrzeni rozchodzące się z prędkością światła. Fale grawitacyjne mają zasadniczo różne właściwości od fal elektromagnetycznych chociaż mają również pewne wspólne cechy. W przeciwieństwie do fal elektromagnetycznych nie istnieje dipolowe promieniowanie grawitacyjne. Zasadnicze znaczenie dla generowania fal grawitacyjnych ma kwadrupolowy moment rozkładu mas, dlatego promieniowanie grawitacyjne ma charakter kwadrupolowy. Fale grawitacyjne podobnie jak elektromagnetyczne są falami poprzecznymi, jednak w przeciwieństwie do fal elektromagnetycznych nie ulegają osłabieniu przy przechodzeniu przez ośrodek materialny, ale podobnie jak dla fal elektromagnetycznych ich amplituda maleje z kwadratem odległości. Potencjalne źródła promieniowania grawitacyjnego można podzielić na trzy grupy: 1) wybuchowe (np. wybuchy supernowych, asymetryczne kolapsy grawitacyjne), 2) regularne (np. układy podwójne, wirujące pojedyncze gwiazdy neutronowe – pulsary) 3) grawitacyjne promieniowanie tła (pozostałość po Wielkim Wybuchu). Fale grawitacyjne są bardzo trudne do wykrycia. Wykazanie istnienia fal grawitacyjnych jest obecnie jednym z najważniejszych wyzwań w astrofizyce relatywistycznej. Pośrednio dowodów na istnienie fal grawitacyjnych dostarczyły obserwacje pulsara PSR 1913+16, który stanowi układ podwójny z drugą gwiazdą neutronową. Obserwowane zmiany okresu orbitalnego są zgodne z hipotezą, że układ emituje fale grawitacyjne. Wiele należy spodziewać się po wynikach prac pierwszych interferometrycznych obserwatoriów fal grawitacyjnych takich jak japoński TAMA, niemiecko-brytyjski GEO 600 i amerykański LIGO. W 2004 r. teleskop rentgenowski Chandra wykonał szereg obserwacji obiektu J0806, który jest prawdopodobnie układem podwójnym białych karłów krążących bardzo szybko wokół wspólnego środka masy z okresem 5 min 22 s. Zaobserwowane subtelne zmiany w rotacji układu mogą być prawdopodobnie spowodowane emisją fal grawitacyjnych. W dniu 14 września 2015 roku w obserwatorium fal grawitacyjnych LIGO (ang. Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) wykonano pierwszą w historii udaną obserwację fal grawitacyjnych. Sygnał jaki został zarejestrowany był zgodny z teoretycznymi przewidywaniami fal grawitacyjnych powstałych w wyniku połączenia dwóch czarnych dziur. Obserwacja ta dostarcza jak dotąd najbardziej konkretnych dowodów na istnienie czarnych dziur.



Rys. 2. Księżyc przybywający to okres od nowiu aż do pełni (źródło: https://pl.wikipedia.org/wiki/Plik:Waxing_Moon_slides.jpg).



Rys. 3. Księżyc ubywający to okres od pełni aż do nowiu (źródło: https://pl.wikipedia.org/wiki/Plik:Waning_Moon_slides.jpg).

Fazy Księżyca – zjawisko polegające na tym, że Księżyc oglądany z Ziemi zmienia swój wygląd przechodząc ciąg faz: nów, pierwsza kwadra, pełnia, ostatnia kwadra. Średni okres zmienności faz jest równy miesiącowi synodycznemu równemu 29.53 dób słonecznych. Zjawisko spowodowane jest tym, że oglądamy oświetloną przez Słońce tarczę Księżyca pod różnymi kątami, gdyż Słońce, Ziemia i Księżyc zmieniają okresowo położenie względem siebie.

Zjawisko faz księżyca możemy podzielić na dwa etapy. W pierwszym etapie Księżyca przybywa oznacza to, że obserwator z każdym kolejnym dniem widzi coraz większą część oświetlaną tarczy Księżyca – trwa to od nowiu aż do pełni (w przybliżeniu czas ten wynosi 14.75 doby, co stanowi połowę miesiąca synodycznego). Drugi etap to Księżyc ubywający oznacza to, że z każdym dniem widzimy coraz mniejszą część jego tarczy. Czas trwania drugiego etapu jest analogiczny jak w pierwszym etapie.

Poniżej przedstawiamy dwa przykładowe zdjęcia tarczy Księżyca które zostały wykonane podczas różnych jego faz.

Foto. 7. Dwie przykładowe fazy Księżyca (Foto. M. Wesołowski). Na fotografii pierwszej licząc od lewej strony widzimy charakterystyczne katery oraz linię terminatora, która oddziela część oświetloną Księżyca od części nieoświetlonej.

Fotosfera – warstwa atmosfery gwiazdowej, w której produkowane jest jej widmo ciągłe.

Fotometria – jeden z działów astrofizyki obserwacyjnej dotyczący pomiarów widomej jasności obiektów astronomicznych.

dr Marcin Wesołowski[1,2],
dr hab. Piotr Gronkowski[1,2], prof. senior UR
[1]Kolegium Nauk Przyrodniczych,
Instytut Nauk Fizycznych, Uniwersytet Rzeszowski,
[2]Centrum Innowacji
i Transferu Wiedzy Techniczno-Przyrodniczej
Uniwersytetu Rzeszowskiego.

Uwaga:
Pozostałe pojęcia będą sukcesywnie omawiane w kolejnych częściach tego kompendium.

LITERATURA:

[1] Harrington, P., S., 1999, Zaćmienie! Co, gdzie, kiedy, dlaczego i jak?, Prószyński i S-ka, Warszawa.
[2] Rybka, E., 1976, Astronomia ogólna, PWN, Warszawa.
[3] Borkowski, K. M., 1991, Astronomiczne obliczenia nie tylko dla geografów, UMK Toruń.
[4] Artymowicz, P. 1995, Astrofizyka układów planetarnych, Wyd. Naukowe PWN.
[5] Kubiak M., 1994, Gwiazdy i materia międzygwiazdowa, PWN, Warszawa.

LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA:

[1] Stodółkiewicz J. S., 1978, Astrofizyka ogólna z elementami geofizyki, PWN Warszawa.
[2] Jaroszyński M., 1993, Galaktyki i budowa Wszechświata, PWN, Warszawa.
[3] Urania – Postępy Astronomii roczniki z lat 2000–2020.
[4] Fizyka w szkole z astronomią – roczniki z lat 2000–2020.

STRONY INTERNETOWE:

[1] https://www.nasa.gov/
[2] https://sci.esa.int/

eprasa.pl 34b251bb23

Ziemia planeta wyjątkowa – cz. 15

Ziemskie pole magnetyczne

Zbigniew **Wiśniewski**

O istnieniu pola magnetycznego ziemskiego wiedziano już od dawna. No może nie o samym polu, bo samo pojęcie pola jako sposobu opisu zjawisk fizycznych pojawiło się dopiero pod koniec dziewiętnastego wieku, ale znano zjawiska magnetyczne. Takim zjawiskiem jest oczywiście zachowanie się małego magnesiku, igły magnetycznej, który, jeśli pozwolić mu na swobodę ustawiania zawsze ustawi się tak aby wskazywać pewien punkt.

Przez wieki sądzono, że jest to biegun północny. Niedokładnie. Biegun magnetyczny jest odrobinę przesunięty względem bieguna ziemskiego. Kąt ten wynosi około 11 stopni. Ten to właśnie fakt sprawił, że statki Kolumba zboczyły na południe podczas swoich wypraw. Nie zmienia to faktu, że morskie podróże przez Atlantyk czy Pacyfik były znacznie ułatwione dzięki istnieniu tego urządzenia. Kompas w Europie pojawił się podobno około dwunastego wieku. Nie tylko Europejczycy znali igłę magnetyczną. Znali ją też Chińczycy, choć ich kompas różnił się od europejskiego, było to bowiem naczynie z wodą, w którym umieszczano magnes. Nie wiadomo, czy europejski kompas był udoskonaleniem chińskiego czy też był odrębnym wynalazkiem.

Położenie bieguna magnetycznego, czyli punktu wskazywanego przez igłę ciągle się zmienia. Nie jest on jednak nigdy nadmiernie oddalony od bieguna geograficznego. Co pewien czas (rzędu milionów lat lat) obserwuje się zamianę biegunów. Bieguny ziemskiego magnesu się odwracają. Południowy wskakuje na miejsce północnego a północny na miejsce południowego. Oczywiście nie jest to proces natychmiastowy, więc przez kilka tysięcy lat Ziemia jest pozbawiona pola magnetycznego, a ściślej pole jest wtedy bardzo słabe i nie ma właściwości dipolowości.

Skoro praktycznie w każdym punkcie Ziemi zachowanie igły magnetycznej jest określone możemy wnioskować, że istnieje pole, które je określa. Pole te nosi nazwę pola elektromagnetycznego. Pole elektromagnetyczne jakiekolwiek, w tym pole elektromagnetyczne ziemskie jest opisywane poprzez równania Maxwella. Parametrem, który możemy wyznaczyć w każdym punkcie tego pola jest indukcja magnetyczna. Wartość indukcji magnetycznej mierzymy w Teslach choć w tym przypadku raczej w Nanoteslach.

Do pełnego scharakteryzowania wektora indukcji nie wystarczy podanie tylko jego wielkości. Trzeba podać też jego orientację w przestrzeni. Wykonuje się to podając dwa dodatkowe parametry inklinacje i deklinacje magnetyczną. Inklinacja magnetyczna jest to kąt zawarty pomiędzy płaszczyzną poziomą a osią swobodnie zawieszonej igły magnetycznej. Deklinacja magnetyczna jest to z kolei kąt między kierunkiem wskazywanym przez igłę magnetyczną a południkiem geograficznym.

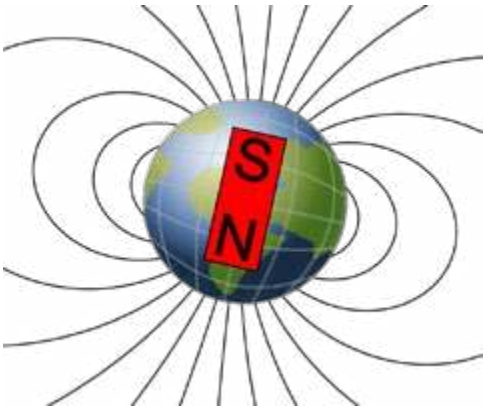


Fig. 1 Ziemskie pole magnetyczne.
Źródło: https://pl.wikipedia.org/wiki/Plik:Earth%27s_magnetic_field,_schematic.svg

Ze względu na tajemniczą jak i użyteczną naturę pola magnetycznego Ziemi od kilku stuleci trwają intensywne badania tego fenomenu. Pierwszego pomiaru ilościowego pola magnetycznego dokonał w 1835 roku Carl Friedrich Gauss.

Pierwotne badania ograniczały się głównie do badań z powierzchni ziemi lub morza. Pierwsze lądowe obserwacje pola magnetycznego zaczęto przeprowadzać w pobliżu dużych ośrodków akademickich takich jak Rzym, Paryż czy Edynburg. Od roku 1840 rozpoczęto prace nad stworzeniem ogólnoświatowej sieci obserwatoriów, za pomocą której to sieci monitorowano by pole mag-

eprasa.pl 34b251bb23

netyczne w sposób ciągły. Dziś sieć lądowych obserwatoriów obejmuje 180 stacji badawczych. Jedną z nich jest prowadzona przez Instytut Geofizyki PAN stacja w Belsku (nie mylić z Bielskiem). Dane z tych stacji pozwalają śledzić fluktuacje pola magnetycznego, obecnie już na przełomie stuleci. Należy jednak zwrócić uwagę na dość nierównomierne rozmieszczenie wspomnianych stacji. Duża ich liczba występuje w Europie i Ameryce Północnej. Najmniejsza gęstość jest w Afryce.

Pomiary wykonywane na terenach lądowych są uzupełniane o pomiary z powierzchni morza, chociaż przed wiekiem 21 trudno mówić o systematycznych pomiarach wykonywanych w tych warunkach. Ziemskie pole magnetyczne jest dość słabe. Jego pomiary należą do trudnych. Paradoksalnie w naszych czasach trudność w wykonywaniu wiarygodnych pomiarów nawet wzrosła. Jest to związane z pojawianiem się co raz większej liczby urządzeń elektrycznych wytwarzających własne pole magnetyczne. W szczególności czynnikami zakłócającymi są linie elektryczne czy stacje nadawcze telefonii komórkowej. Dla przykładu pomiary w Belsku są zaburzane przez przejazdy pociągów pobliskiej linii kolejowej.

Rozwój technologii kosmicznej umożliwił przeprowadzanie badań za pomocą satelitów. Wykorzystanie satelitów umożliwia bardziej systematyczne i bardziej ujednolicone pomiary niż za pomocą stacji naziemnych. Pierwszymi satelitami przeznaczonymi do pomiarów ziemskiego pola magnetycznego były satelity serii POGO, czyli *Polar Orbiting Geophysical Obserwatories*. Mierzyły głównie natężenie pola magnetycznego, nie mierząc jego pozostałych parametrów. Były aktywne w latach 1965-1971. Pomiary wszystkich parametrów pola magnetycznego były wykonywane za pomocą satelity Magsat w latach 1979-80. Obecnie pracuje satelita Ørsted, który jest pierwszym duńskim satelitą. Inny satelita to satelita niemiecki Champ.

Istnieją też metody zdobywania informacji o polu magnetycznym z czasów wcześniejszych. Bazują one na fakcie, że skały czy ludzkie wyroby mogą pamiętać pole magnetyczne z czasów swojego powstania. Jest to gałąź archeologii. Występuje tu jakby pewne wzajemne wspomaganie. Z jednej strony archeologia korzysta z metod magnetycznych np. do datowania a z drugiej geofizyka korzysta z wydobywanych przez archeologów próbek, aby ustalać informacje o polu magnetycznym. Istnieje nawet specjalna nauka zwana archeomagnetyzmem.

Tak więc Ziemia stanowi wielki magnes z biegunem północnym i południowym. Jest pod tym względem podobna do Merkurego. Analizując model ziemi jako kuli ze sztabką magnesu można wywnioskować, że pole magnetyczne będzie najsłabsze w okolicach równika. Faktycznie wynosi ono tam ok 20 000 nT. Najsilniejsze jest oczywiście przy biegunach 70 000 nT. Pole magnetyczne ma zasadnicze znaczenie z punktu techniki komputerowej i elektroniki. Ekranuje bowiem Ziemię od szkodliwego wpływu wiatru słonecznego.

Nie jest to jednak jego jedyna rola. O jego roli w rozwoju żeglugi dalekiego zasięgu już wspomnieliśmy. Ma ono też ważne znaczenie dla migrujących ptaków posiadających pewnego rodzaju zmysł magnetyczny. Dodatkowo pole magnetyczne chroni naszą atmosferę od wpływu wiatru słonecznego. Gdyby go nie było, to wiatr słoneczny dużo efektywniej usuwałby z niej pierwiastki lekkie, w tym wodór i tlen co w geologicznej skali czasu prowadzi do wysuszania planet. Takie zjawisko obserwujemy m.in. na Marsie.

Ziemskie pole magnetyczne jest też czynnikiem sprawczym zórz polarnych. Po prostu zjonizowane cząstki wiatru słonecznego uwięzione przez nasze pole magnetyczne są kierowane w rejonach podbiegunowych w atmosferę, gdzie wskutek procesu jonizacji powodują świecenie.

Pojawia się oczywiście pytanie skąd bierze się ziemskie pole magnetyczne? Aby odpowiedzieć na to pytanie przypomnijmy sobie podstawowe wiadomości, na temat pola magnetycznego. Po pierwsze, źródłem pola magnetycznego może być prąd elektryczny. Po drugie, magnesy trwałe. W przypadku Ziemi mamy do czynienia z oboma źródłami. Wielkim magnesem trwałym nie może być jądro wewnętrzne, ponieważ jego temperatura jest znacznie powyżej punktu Curie. Najważniejszą role gra jednak pierwszy z nich– ruch prądu elektrycznego.

Pojawia się jednak pytanie, gdzie wewnątrz Ziemi płynie prąd? Otóż największy prąd płynie tam, gdzie występuje silny konwekcyjny transport masy. Do ruchu konwekcyjnego bardziej nadaje się ośrodki płynne niż stałe. Płynnym ośrodkiem jest jądro zewnętrzne i płaszcz wewnętrzny. Jądro zewnętrzne znajduje się pomiędzy dwoma stałymi warstwami. Jądrem wewnętrznym i płaszczem. Powstaje więc cyrkulacja pomiędzy jądrem a płaszczem. Wysoka temperatura panująca wewnątrz płaszcza i jadra zewnętrznego powoduje jonizację istniejących tam ładunków elektrycznych. Czyli mamy ruch ładunków, który powoduje powstanie wypadkowego prądu, a w konsekwencji pola magnetycznego. Samo zjawisko może być opisane za pomocą równania:

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (u \times B) + n\nabla^2 B$$

Gdzie u – prędkość cieczy, t – czas, n – dyfuzyjność magnetyczna.

Fig. 2. Pomnik Gausa w Brunszwiku. Źródło Wikipedia.

eprasa.pl 34b251bb23

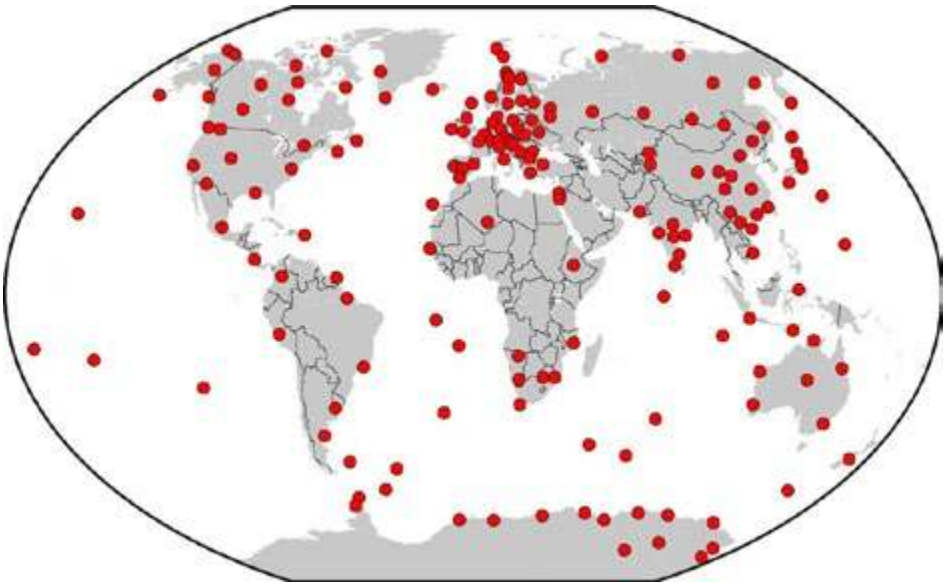


Fig. 3. Rozmieszczenie stacji międzynarodowej sieci przeznaczonej do pomiaru ziemskiego pola magnetycznego.

Ten efekt określany jako dynamo jest odpowiedzialny za 98% ziemskiego pola magnetycznego. Drugim źródłem pola magnetycznego Ziemi jest jonosfera. Ostatecznie stanowi ona zbiór poruszających się ładunków. Pole pochodzenia jonosferycznego jest jednak o kilka rzędów wielkości mniejsze niż to wywoływane efektem dynamo.

Kolejnym źródłem pola magnetycznego ziemi są zawarte w niej minerały magnetyczne takie jak magnetyty i hematyty (Thébault at al. 2010). Duże nagromadzenie materiałów magnetycznych może prowadzić do tego, że pole magnetyczne przez nie wytwarzane całkowicie zamaskuje pole ziemskie. Obszary, w których taki efekt zachodzi to anomalie magnetyczne. Przykładem takiej anomalii jest Kurska Anomalia Magnetyczna.

Dla naukowców badających zagadnienia magnetyzmu ziemskiego niezwykle trudnym modelem jest wyodrębnienie poszczególnych składników je tworzących. Oczywiście żeby skały mogły wytwarzać pole magnetyczne muszą znajdować się w temperaturach niższych niż ich temperatura Curie, czyli 580-670 C (w zależności od składu). Na podstawie rozkładu temperatur w Ziemi możemy wywnioskować, że pole magnetyczne mogą wytwarzać jedynie skały zewnętrznych warstw litosfery. Rozkład pola magnetycznego pochodzącego od Ziemi jest więc związany silnie z procesami cieplnymi zachodzącymi w litosferze. Na przykład znaczące anomalie magnetyczne obserwuje się w rejonie subdukcji płyt tektonicznych. Procesy tektoniczne są też odpowiedzialne za tworzenie i przemieszczanie ziemskich materiałów magnetycznych. Czyli ich badanie może nam dostarczyć informacji o tektonice płyt kontynentalnych.

LITERATURA

[1] R. M. Hazen, „Historia Ziemi od gwiezdnego pyłu do żyjącej planety", Pruszyński i S-ka, 2012

[2] E. Stenz, „Ziemia", PWN, 1956

[3] E. Thébault, M. Purucker, K. A. Whaler, B. Langlais, T. J. Sabaka, „The Magnetic Field of the Earth's Lithosphere" Space Sci Rev 155: 95–127. 2010

Prenumerata 2021

I. PRENUMERATĘ NA 2021 ROK MOŻNA ZAMÓWIĆ BEZPOŚREDNIO U WYDAWCY

■ **Przez internet:** zakładka *Prenumerata 2021* na stronie www.aspress.com.pl i wypełniając formularz zamówienia na podstronie prenumeraty

■ **e-mailem:** szewczyk24@gmail.com ■ **telefonicznie:** 606 201 244 ■ **listownie:** Agencja AS Józef Szewczyk, ul. Warchałowskiego 2/58, 02-776 Warszawa

Cena prenumeraty w 2021 roku

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

Zamów prenumeratę przez Internet
www.aspress.com.pl/prenumerata-2021/

II. PRENUMERATA DOSTARCZANA PRZEZ FIRMY KOLPORTERSKIE:

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

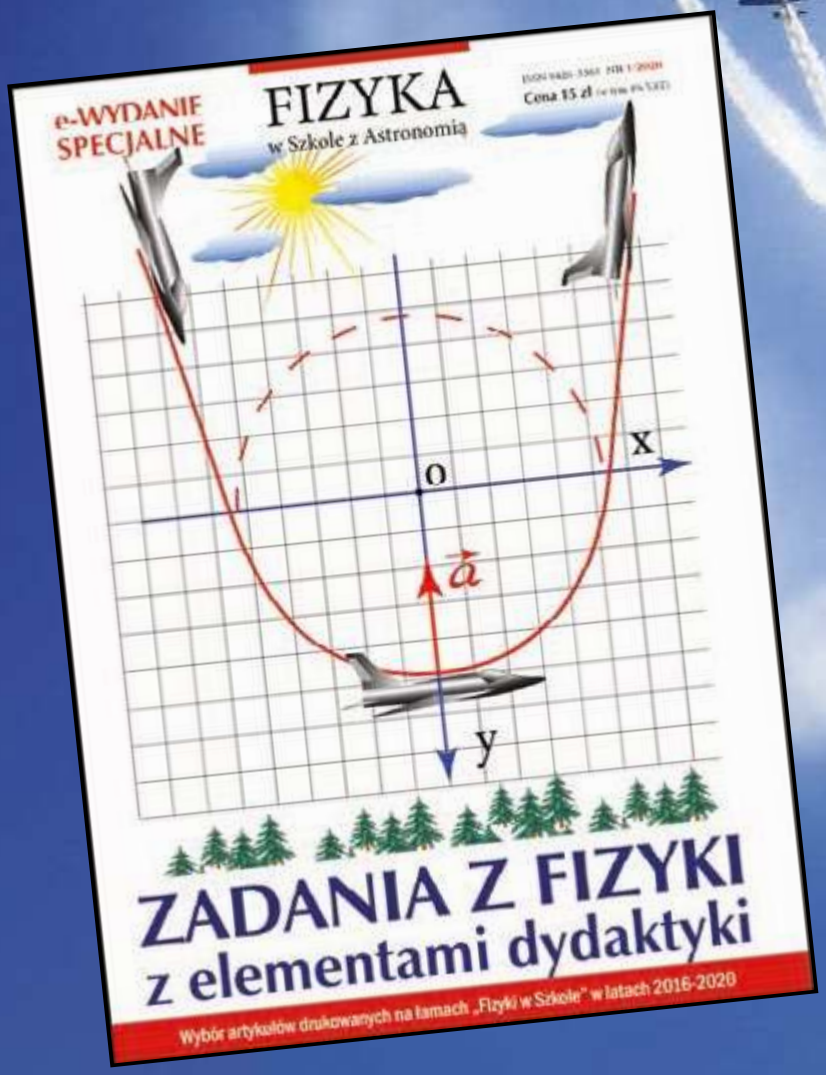
III. NUMERY ARCHIWALNE DRUKOWANE dostępne są w ograniczonym zakresie. Przed złożeniem zamówienia prosimy o kontakt pod adresem: szewczyk24@gmail.com.

eprasa.pl 34b251bb23

90 zadań, 20 przykładów i 10 problemów

(z omówieniem niektórych rozwiązań)

- ✔ **Dlaczego fizyka** jest trudna dla nauczyciela?
- ✔ **Światowe trendy** w dydaktyce fizyki
- ✔ **Które zadania** są dla ucznia interesujące?
- ✔ **Czynniki wpływające** na zapamiętywanie wiedzy



Wydanie specjalne w wersji elektronicznej (PDF)

Cena 15 zł!

Szczegóły i formularz zamówienia: www.aspress.com.pl/specjalne/

eprasa.pl 34b2516b23

Energia za połowę ceny!

ROCZNIK 2020
50% taniej

ROCZNIKI STARSZE
80% taniej

(oferta ważna do wyczerpania zapasów)

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

eprasa.pl 34b251bb23