FIZYKA
w Szkole z Astronomią

CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI

384 (LXIV) indeks 35810X **Nr 1 styczeń/luty 2023** CENA 40,00 zł (w tym 8% VAT)

Małe reaktory modułowe
Atomowa alternatywa

Za co Nobel 2022?
Eksperymenty ze splątanymi fotonami

Teoria względności
Dlaczego taka piękna?

Mechanika nieba
Ruch planet

Jaka szkoła jaka edukacja?

Fotowoltaika
Technologia przeniesiona z kosmosu

Żywoty fizyków
Thomas Alva Edison

Doświadczenie
Dia- czy paramagnetyk – jak to wykryć?

ISSN 0426-3383

eprasa.pl 80f50968f9

ROCZNIK 2022

Teraz z 50% rabatem

UWAGA!

Oferta ważna
do wyczerpania zapasów!

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

eprasa.pl 80f50968f9

Drodzy Czytelnicy!

Z wielką przyjemnością przekazuję Państwu pierwszy numer „Fizyki w Szkole” w tym roku. Początek roku to często czas podsumowań. Podsumowań najczęściej tego, co miało miejsce w roku poprzednim. I my nie oparliśmy się tej tendencji. Dlatego umieściliśmy w bieżącym numerze artykuł Kazimierza Mikulskiego zawierający spis podstawowych osiągnięć w fizyce. W artykule tym przedstawione są najważniejsze osiągnięcia, od fizyki plazmy poczynając, a na astrofizyce, kończąc. W artykule tym nie jest poruszona tematyka nobla. Tej tematyce poświęcone jest artykuł Jana Kurzyka pt. „Za co Nobel 2022?”, w którym autor stara się przybliżyć zwykłemu śmiertelnikowi pojęcia z dziedziny fizyki kwantowej zawarte w uzasadnieniu nagrody Nobla. Drugą niezwykle ważną i stale rozwijającą się dziedziną fizyki jest teoria względności. Tej dziedzinie poświęcony jest z kolei artykuł Cypriana Sobczaka pt. „Ogólnie potrzebna teoria względności”.

W obecnej sytuacji nie da się uciec od tematyki związanej z energią. Jest ona dyskutowany z głównie w dwóch aspektach. Po pierwsze ze względu na kryzys energetyczny i wzrost cen gazu, elektryczności i paliw ropopochodnych. Po drugie metod ich pozyskiwania i odejścia od paliw kopalnych. Wydarzeniem zeszłego roku z punktu energii było podpisanie umowy dotyczącej w Polsce budowy elektrowni jądrowej. Starsi Czytelnicy zapewne pamiętają, że podejmowaliśmy już próbę budowy elektrowni atomowej w Żarnowcu. Czy kolejna doczeka się realizacji? Czy reaktory małej mocy, o których pisze Wioletta Dynkowska są przyszłością energetyczną dla Polski? A może szersze wykorzystanie fotowoltaiki, o czym przeczytacie w artykule Andrzeja Wasiaka?

Kończąc, życzę miłej lektury.

Zbigniew Wiśniewski

Fizyka wczoraj, dziś, jutro

4 **Małe reaktory modułowe przyszłością energetyczną Polski**
Wioletta Monika Dynkowska

Nieomal stuletnie wykorzystywanie atomu w służbie ludzkości stworzyło bardzo poważne podwaliny pod dalsze prace udoskonalające techniki i materiały jądrowe.

10 **Instalacje fotowoltaiczne**
Andrzej Wasiak

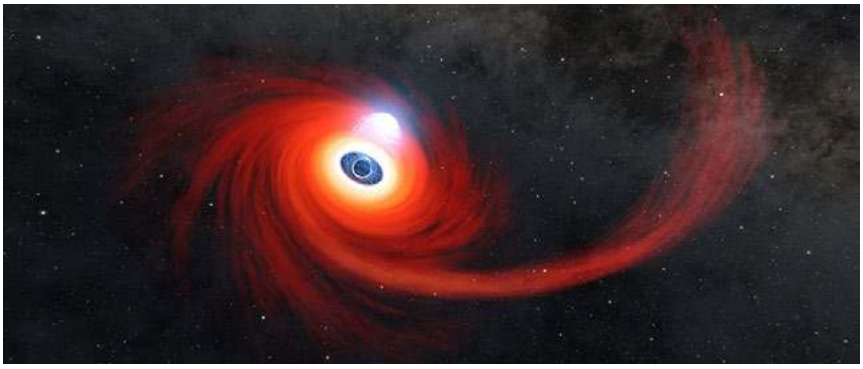
Ogniwa słoneczne pierwotnie były używane do zasilania w energię elektryczną statków kosmicznych. Jednak wraz z rozwojem technologii ogniw słonecznych i znacznym obniżeniu ich kosztów znalazły swoje ziemskie zastosowania.

16 **Za co Nobel 2022? Część 1. Interpretacja kopenhaska, paradoks EPR, stany splątane** Jan Kurzyk

21 **Co było i co osiągnięto, czyli – Jedne z najważniejszych wydarzeń minionego 2022 roku w fizyce** Kazimierz Mikulski

26 **Ogólnie potrzebna teoria względności** Cyprian Sobczak

Początek ubiegłego wieku okazał się być przełomowy na drodze naszego poznania. Przyniósł bowiem naszej cywilizacji mechanikę kwantową, przy której zawodzą nie tylko zmysły, ale także intuicja, oraz szczególną i ogólną teorię względności.



33 **Żywoty fizyków. Thomas Alva Edison (1847-1931)** Tadeusz Wibig

Niektórzy mówią, że był największym wynalazcą wszechczasów. Nawet, jeśli to nie jest prawdą, jego dokonania w ulepszaniu otaczającego nas świata są nie do przecenienia.

35 **Najwcześniejszy i najpóźniejszy Nowy Rok** PAP

Z naszych lekcji

36 **Dia- czy paramagnetyk? Oto jest pytanie!** Stanisław Bednarek, Jacek Ćwik

W artykule został opisany prosty i skuteczny układ, przeznaczony do wykrywania przedmiotów, wykazujących słabe właściwości magnetyczne.

39 **Jaka szkoła, jaka edukacja – c.d.**
Waldemar Reńda

Astronomia dla każdego

44 **Wybrane zagadnienia z mechaniki nieba. Cz. 1.** Marcin Wesołowski

FIZYKA w Szkole z Astronomią
CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI
NUMER 1 STYCZEŃ/LUTY 2023
384 (LXIII) indeks 35810X ISSN 0426-3383
CENA 40,00 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/, 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: Nuscale

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

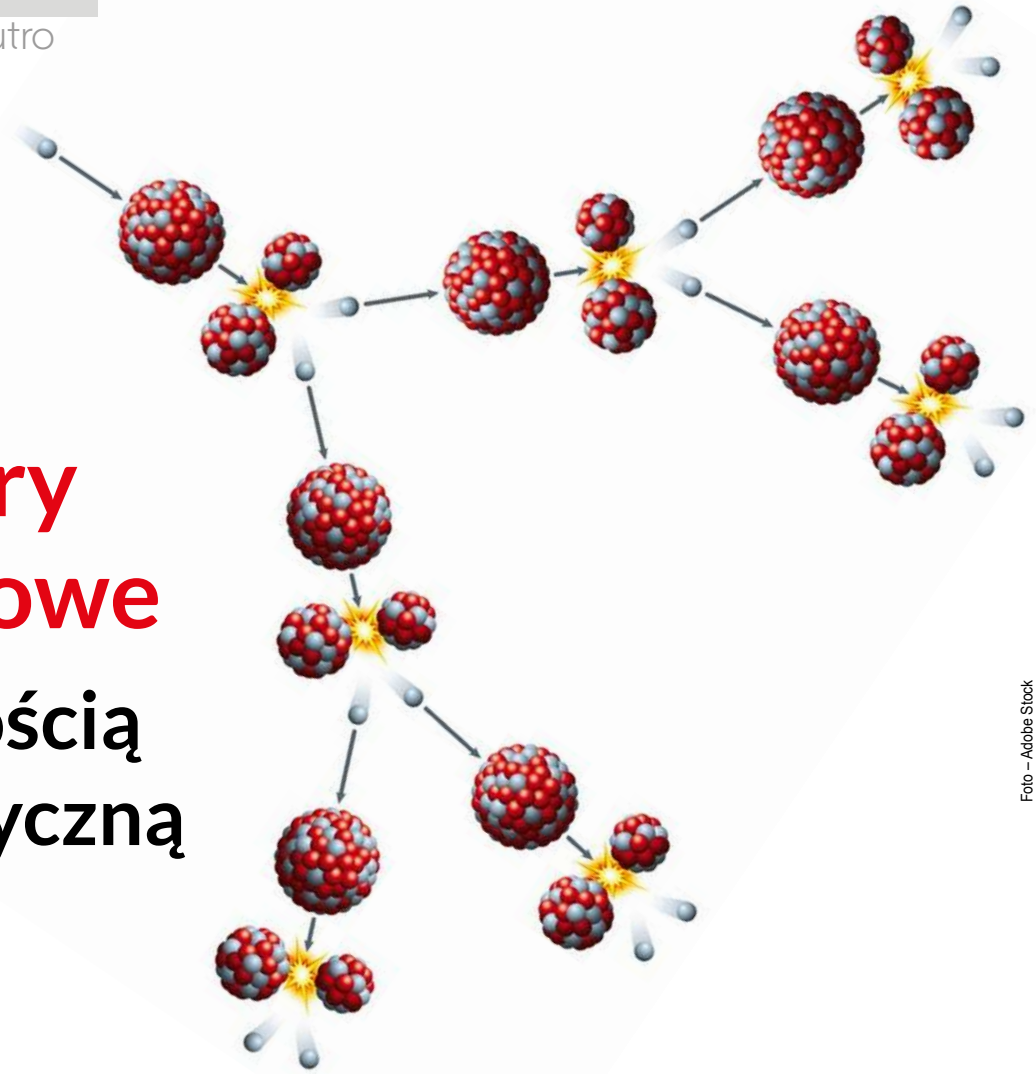


Foto – Adobe Stock

Małe reaktory modułowe przyszłością energetyczną Polski

Polityka międzynarodowa dryfująca w kierunku odejścia od energii pozyskiwanej ze źródeł węglowych w celu zmniejszenia globalnej emisji dwutlenku węgla powoduje, że coraz intensywniej poszukiwane są inne źródła energii niskoemisyjne i małoodpadowe. Jednym z takich wyborów ma być energetyka jądrowa, co do której istnieje po dziś dzień wiele kontrowersji.

Wioletta Monika **Dynkowska**

Podpisanie listu intencyjnego na rozwój rynku energetyki jądrowej w Polsce, gdzie inwestorem z zagranicznym kapitałem jest koreańska firma Korea Hydro & Nuclear Power, wzbudziło zainteresowanie społeczeństwa tematem pozyskiwania energii z wnętrza atomu. Nieomalże w tym samym czasie ruszył projekt rządowy wespół z amerykańskim koncernem Westinghouse. Projekt ten zakłada wybudowanie elektrowni jądrowej i oddanie jej w użytkowanie za około dekadę. Wciąż pozostaje zagadką, czy będzie to model klasyczny, tzw. duży atom, czy rozwiązaniem będą reaktory SMR. Jednakże optymalnym rozwiązaniem wydaje się połączenie dwóch typów reaktorów: klasycznej elektrowni jądrowej z małymi reaktorami jako jej uzupełnienie.

Trochę historii

Zjawisko rozszczepienia jąder atomu, w wyniku którego wytworzyła się dość znaczna ilość energii, odkryto już w latach trzydziestych XX wieku. Pierwszym naukowcem wspominającym o możliwości rozszczepienia jądra atomowego poprzez bombardowanie go neutronami był Enrico Fermi. Na łamach „Nature" opublikował pracę, w której dowodził odmienne działanie bombardowania neutronami w zależności od pierwiastka nimi bombardowanego. W tym samym czasopiśmie ukazał się artykuł autorstwa niemieckiej uczonej Lise Meitner, która wraz ze swym współpracownikiem Ottonem Robertem Frishem wysunęła teorię rozpadu ciężkich jąder na dwa pośrednie. Niekwestionowaną królową w chemii i fizyce jądrowej jest Maria Skłodowska-Curie, zdobywczyni dwóch nagród ustanowionych przez Alfreda Nobla, w dwóch różnych dziedzinach nauki. To dzięki badaniom jej i jej współpracowników zostało opisane zjawisko promieniotwórczości, które po dziś dzień wywołuje gęsią skórkę u większości populacji.

Ogromny potencjał energetyczny, tkwiący w jądrze atomowym ujawnił się światu w 1945 roku, po zrzuceniu przez Amerykanów dwóch bomb atomowych na japońskie miasta Hiroszimę (6 sierpnia) i Nagasaki (9 sierpnia).

eprasa.pl 80f50968f9

Tym samym rozpoczęło się negatywne postrzeganie atomu jako źródła energii, co zostało jeszcze bardziej spotęgowane czterema (sic!) awariami elektrowni jądrowych na przestrzeni… 65 lat. Dla przypomnienia: chodzi tu o awarię reaktora Three Mile Island (28 marca 1979 r.), wybuch czwartego bloku reaktora elektrowni jądrowej w Czarnobylu (26 kwietnia 1986 r.) w wyniku błędów konstrukcyjnych oraz w wyniku wystąpienia trzęsienia ziemi i następującej po nim niszczycielskiej fali tsunami awarię elektrowni jądrowej w Fukushimie (11 marca 2011 r.).

Te trzy wypadki te zaklasyfikowano jako awarie piątego (Three Miles Island) oraz siódmego (Czarnobyl, Fukushima), najwyższego stopnia w skali INES (ang. *International Nuclear and Radiological Event Scale* – Międzynarodowa Skala Zdarzeń Jądrowych i Radiologicznych). Dopiero w 1992 roku, po upadku ZSRR, świat dowiedział się o kolejnej, czwartej poważnej awarii (6. stopień w skali INES), która wystąpiła w wyniku wybuchu o charakterze niejądrowym na skutek awarii systemu chłodzenia w reaktorze w zakładach Majak (29 września 1957 r.), zwana w świecie jako „Katastrofa Kysztymska – ze względu na nieopodal leżące miasto Kysztym; bliżej położony Oziorsk był wówczas tzw. miastem zamkniętym.

Przełomową datą w próbie zmiany postrzegania atomu jako źródła energii jest 8 grudnia 1953 roku. Tego dnia prezydent Stanów Zjednoczonych Dwight Dawid Eisenhower, przemawiając na Zgromadzeniu Ogólnym ONZ zapowiedział nowy kierunek polityki Stanów Zjednoczonych dotyczący dalszego rozwoju i wykorzystania energii jądrowej, określany jako „Atomy dla pokoju”.

Wydarzenie to odbiło się szerokim echem na świecie, nie tylko w mediach. Do powstałego programu dołączyły inne kraje, między innymi jedno ze światowych ówczesnych mocarstw, Związek Socjalistycznych Republik Radzieckich (ZSRR). Skutkiem tego była zapoczątkowana na ziemiach polskich „Era Atomu”. W 1955 r. w Świerku koło Otwocka utworzony został Instytut Badań Jądrowych, a rok później uruchomiono tamże pierwszy w Polsce doświadczalny reaktor jądrowy „Ewa”.

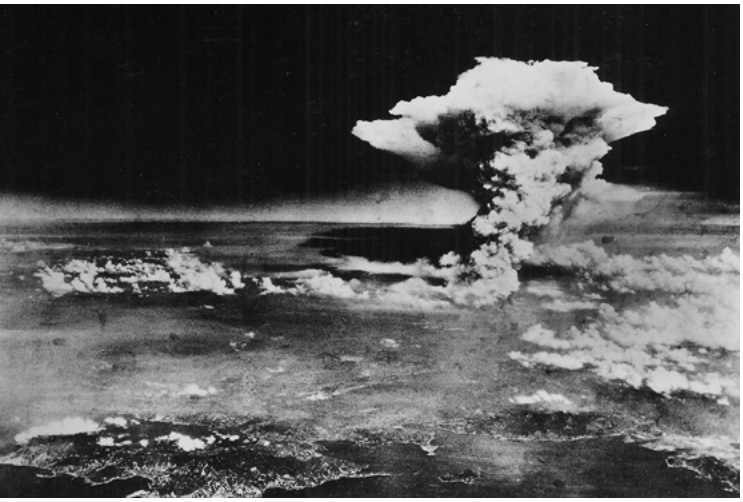
Jego nazwa, wbrew pozorom, nie pochodzi od imienia pierwszej biblijnej kobiety, jest natomiast skrótem opisującym jego parametry: **E** – jak „eksperymentalny”, **W** – jak „wodny”, **A** – jak „atomowy”. Był to reaktor typu badawczego; jego wyłączenie nastąpiło w lutym 1995 a ostateczny demontaż dokonał się w 2002 roku. Paliwo z reaktora, po zamknięciu w szczelnych pojemnikach wypełnionych gazem obojętnym (helem), przechowywane jest w mokrych przechowalnikach na terenie dawnego Instytutu Badań Jądrowych. Część paliwa, wraz z paliwem z reaktora „Maria”, co stanowiło łącznie 450 kg wysoko wzbogaconego wypalonego paliwa, została w latach 2009–2010, zgodnie z przepisami ustawy Prawo Atomowe, wywieziona w pięciu transportach do Rosji.

Reaktor „Ewa” nie był jedynym reaktorem w Polsce. W narożniku hali reaktora „Ewa”, w jej piwnicach został wybudowany reaktor „Maryla” – skrótowa nazwa od **Ma**łego **R**eaktora **La**boratoryjnego. Służył on m.in. do testowania paliwa reaktora „Ewa” oraz badań nad technologią reaktorową. W tym samym miejscu, w ówczesnym Instytucie Badań Jądrowych powstał reaktor „Anna”, a w jego sąsiedztwie reaktor „Agata”.

Reaktor „Anna” został w latach 1964-1971 włączony do międzynarodowego programu badawczego współfinansowanego przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej w Wiedniu, którego celem były badania w dziedzinie fizyki reaktorowej, w tym przede wszystkim badania zmian strumienia neutronów w czasie, szkolenia operatorów oraz szeroka wymiana doświadczeń eksploatacyjnych. Wybudowany w tej samej hali co „Anna”, reaktor „Agata” był pilotem nowo budowanego reaktora „Maria”, miał podobną do niego budowę i służył początkowo do testowania paliwa „Marii”.

Zacne grono polskich reaktorów zasilił również tamże zbudowany na bazie reaktora „Maryla” reaktor UR-100. Pomimo posiadania wdzięcznego imienia „Wanda” (akronim od słów **w**odny, **a**kademicki, **n**aukowy, **d**ydaktyczny, **a**plikacyjny), kojarzącego się z Krakowem, gdzie został w 1985 r. przewieziony do budynku D-10, do Wydziału

Foto – wikimediacommons



Od zrzucenia bomby na Hiroszimę i Nagasaki rozpoczęło się negatywne postrzeganie atomu jako źródła energii.

Experimental Breeder Reactor I (EBR-I), jedna z pierwszych na świecie elektrowni jądrowych wytwarzająca prąd pozwalający rozświetlić cztery 200 watowe żarówki.

eprasa.pl 80f50968f9

Pozostałości po niedokończonej elektrowni atomowej w Żarnowcu. Foto - wikimediacommons

Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej, nazwa robocza UR-100 była częściej używana.

Jedyny dotychczas działający polski reaktor jądrowy o mocy cieplnej 30 MW nosi imię „Maria" na cześć słynnej noblistki Marii Skłodowskiej-Curie. Jego budowę rozpoczęto w czerwcu 1970 r., a uruchomiony został w grudniu 1974 roku. Obecnie wykorzystywany jest do celów doświadczalno-produkcyjnych. Więcej na temat polskich reaktorów o kobiecych imionach można znaleźć w opracowaniach autorstwa Krzysztofa Fornalskiego: „Anna, Agata, Maryla – zapomniane polskie reaktory" (Ekoatom, 8/2013, s. 9–17) oraz „Reaktory jądrowe w Polsce" (Energia dla Przemysłu, 3–4/2011, s. 16–19).

Wspomniane wyżej reaktory, pomimo swej niezaprzeczalnej roli w rozwoju nauki na temat energii atomowej, nie zapewniały i po dziś dzień nie zapewniają bezpieczeństwa energetycznego kraju. Reaktory te służą jedynie celom badawczym.

Niemniej jednak koncepcja budowy na ziemiach polskich elektrowni jądrowej nabierała coraz wyraźniejszych kształtów. Zakładano, że przyszła elektrownia będzie pracować z mocą 250 MW i zlokalizowana zostanie w okolicy ujścia rzek Bug i Narew. 12 sierpnia 1971 r. Prezydium Rządu Polskiej Rzeczypospolitej Ludowej podjęło decyzję o zamiarze budowy elektrowni jądrowej i wykonania prac przygotowawczych. Komisja Planowania przy Radzie Ministrów decyzją z 19 grudnia 1972 r. ustaliła, że elektrownia zostanie zlokalizowana w Żarnowcu. 28 lutego 1974 r. podpisano między Rządem PRL a Rządem ZSRR umowę o współpracy przy budowie elektrowni jądrowej.

Kamieniem milowym okazały się być na przełomie lat 60 i 70 badania i następnie zaprojektowanie w Związku Radzieckim reaktora WWER-440. Nazwa reaktora to akronim rosyjskiego ***w**odo-**w**odianoj **e**niergieticzeskij **r**ieaktor* – wodno-wodny reaktor energetyczny. Był to klasyczny reaktor wodny ciśnieniowy, cechujący się niskimi kosztami budowy i eksploatacji, prostotą obsługi, jednocześnie zapewniając wysoki poziom bezpieczeństwa, a dodatkową zaletą projektu był fakt, że bardzo duża część podzespołów mogła być wyprodukowana w Polsce. Podjęto więc uchwałę o budowie elektrowni jądrowej z reaktorami tego typu, a kilkanaście miesięcy później ogłoszono lokalizację nad Jeziorem Żarnowieckim we wsi Krotoszyn.

Wybór okolic Jeziora Żarnowieckiego podyktowany był przede wszystkim panującymi tam korzystnymi warunkami geologicznymi, meteorologicznymi i demograficznymi przy jednoczesnym dużym zapotrzebowaniu na energię w północnych regionach kraju. 18 stycznia 1982 r. Rady Ministrów podjęła uchwałę w sprawie budowy Elektrowni Jądrowej Żarnowiec obejmującej dwa bloki energetyczne typu WWER-440. Uruchomienie pierwszego bloku energetycznego o mocy 465 MWe miało nastąpić w 1989 r., zaś drugiego w 1990 r., budowę rozpoczęto 31 marca 1982 r. Prace przerwano na początku lat 90., głównie pod naciskiem protestów przeciwników energetyki jądrowej.

Eskalacja niechęci wobec energetyki jądrowej przypadła na wiosnę 1986 roku po wspomnianej już awarii czwartego bloku energetycznego Czarnobylskiej Elektrowni Jądrowej. Nie bez znaczenia był fakt ukrywania katastrofy przez ówczesne władze ZSRR. Silny opór społeczny spowodował, że 17 grudnia 1990 roku rząd Tadeusza Mazowieckiego podjął uchwałę o postawieniu inwestycji „Elektrownia Jądrowa Żarnowiec w budowie" w stan likwidacji.

Reaktory SMR

O skrócie SMR w Polsce zrobiło się głośno w 2019 roku, gdy koncern Synthos, należący do jednego z najbogatszych Polaków Michała Sołowowa, ogłosił, że zamierza budować reaktor BWR-300 (ang. ***B**oiling **W**ater **R**eactor* – reaktor jądrowy moderowany i chłodzony wodą, cyrkulującą w jednym obiegu) od GE Hitachi Nuclear

eprasa.pl 80f50968f9

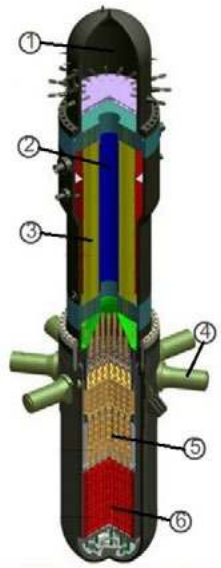
Energy. SMR, z języka angielskiego ***S**mall **M**odular **R**eactors*, to jak sama nazwa wskazuje małe reaktory modułowe, ale pod tym skrótem kryje się kilka pojęć.

Narodowe Centrum Badań Jądrowych zwracało uwagę już wiele lat temu na to, że SMR może oznaczać zarówno reaktor jako pojedynczy moduł, ale również reaktor o konstrukcji modułowej czy też reaktor o małej (ang. *small*) lub średniej (ang. *medium-size*) mocy. SMR mają według założeń być mniejszymi reaktorami o mocy do 300 MW (*small*) lub 300-700 MW (*medium*). Wszystko zależy od tego, czy mają być jedynie pojedynczymi jednostkami (jeden reaktor postawiony np. przy fabryce) czy też mają stanowić (tu ich modułowe zalety) element większej siłowni.

Dla porównania: jeden reaktor tradycyjnej elektrowni o mocy 1600 MW to tyle samo, co osiem reaktorów SMR o mocy 200 MW, pracujących równolegle. Na pewno krótszy jest czas budowy przy mniejszych reaktorach: SMR są dostarczane jako gotowe moduły, więc prace przygotowawcze są mniej rozległe. „Największą zaletą SMR jest stosunkowo niewielki koszt inwestycyjny jednego bloku, który jest trudną do pokonania barierą dla inwestujących w wielkie reaktory. (...). Ważną zaletą SMR jest możliwość instalowania blisko odbiorców, co obniża koszty sieci i przesyłu. Taka bliska lokalizacja stanowi jednak istotną zmianę w filozofii bezpieczeństwa jądrowego, która dotychczas wymagała lokalizowania reaktorów daleko od ośrodków zaludnienia" – pisano w raporcie NCBJ w 2013 roku.

Jeśli chodzi o technologię, to SMR jest rodzajem reaktora rozszczepienia jądrowego. Nie jest to żadną nowością w porównaniu z tradycyjnymi reaktorami, wykorzystującymi zjawisko rozszczepienia jąder uranu jako źródło energii przenoszonej odpowiednimi nośnikami na turbiny elektrowni. Kluczową sprawą jest konstrukcja takiego reaktora – jednostka jest mniejsza od tradycyjnych bloków energetycznych, montowana fabrycznie i dostarczana jako kompletny moduł w miejsce przeznaczenia, czyli odmiennie niż dotychczas, gdy budowa potężnego kompleksu elektrowni od podstaw przebiega w miejscu przeznaczenia. Przekłada się to silnie na ponoszone przez inwestora koszty, zarówno w zakresie technologii zgodnych z odpowiednimi zezwoleniami, a także na bezpieczeństwo jądrowe i ochronę radiologiczną, oraz czas trwania inwestycji.

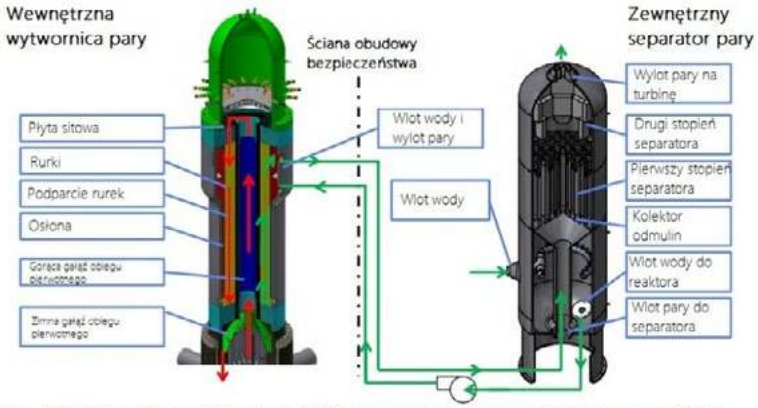
Technologie zastosowane w SMR również nie różnią się od tych opracowanych dekady temu; jednakże w Polsce brane są pod uwagę dwa typy SMR: BWRX-300 od GE Hitachi – to reaktor BWR (ang. *Boiling Water Reactor* – Reaktor wodny wrzący) oraz NuScale od Nuscale Power – to reaktor PWR (ang. ***P**ressurized **W**ater **R**eactor* – reaktor wodny ciśnieniowy). Nowoczesne reaktory małej mocy do zastosowań energetycznych i specjalnych mają mieć prostą, zintegrowaną konstrukcję, być wytwarzane seryjnie w fabrykach i posiadać krótki czas oraz niskie koszty budowy. Ponadto będą posiadać pasywne cechy bezpieczeństwa wynikające z praw przyrody (grawitacja, konwekcja). Wiele z nich zaprojektowano do



Rys. A2.1 Zbiornik reaktora SMR projektu firmy Westinghouse

1 - stabilizator ciśnienia, 2 - rurociąg gorącej wody doprowadzający podgrzane chłodziwo do wytwornicy pary (3), 4 - pompy wody chłodzącej wymuszającej przepływ chłodziwa w obiegu pierwotnym, 5 - układ prętów kontrolnych wraz z ich mechanizmami, 6 - rdzeń reaktora.

Rys. A2.2 Stabilizator ciśnienia projektu firmy Westinghouse



Rys. A2.3 Wytwornica pary reaktora SMR wraz z zewnętrznym separatorem pary projektu firmy Westinghouse.

SMR firmy Westinghouse.

umieszczenia w gruncie, przez co zwiększono ich odporność na zagrożenie terrorystyczne i proliferacyjne[1]. Promień strefy niebezpiecznej wokół takich obiektów jądrowych nie będzie przekraczać 300 m.

Bezpieczeństwo jądrowe jest najwyższym priorytetem polskiego programu jądrowego, więc budowane w przyszłości reaktory będą należeć do najbezpieczniejszych dostępnych obecnie obiektów generacji III+. Zagwarantowane jest to w ustawie Prawo atomowe, która w Art. 36b stanowi, iż w projekcie i procesie budowy obiektu jądrowego nie stosuje się rozwiązań i technologii, które nie zostały sprawdzone w praktyce w obiektach jądrowych lub za pomocą prób, badań oraz analiz. Ponadto w Art. 36c określa się warunki, jakie musi spełnić projekt takiego obiektu, aby zagwarantować jego bezpieczną eksploatację (w tym sekwencję poziomów bezpieczeństwa – tzw. system „obrony w głąb"). W tym miejscu należy zaznaczyć, że reaktory modułowe cechują się większym stopniem bezpieczeństwa, głównie dzięki automatycznym

[1] Proliferacja – zdolność rozmnażania się komorek żywego organizmu; również określenie to dotyczy zjawiska rozprzestrzeniania broni masowego rażenia.

eprasa.pl 80f50968f9

W ramach zawartej umowy, KGHM z firmą NuScale wdroży technologię SMR w Polsce. Moduł NuScale Power Module™ zdolny do generowania 77 MW energii elektrycznej.

systemom działającym bez ingerencji człowieka, co w założeniu ma zmniejszyć ryzyko potencjalnej katastrofy.

Uran, czyli nieocenione i niedocenione źródło energii

Uran to pierwiastek metaliczny, o słabym przewodnictwie cieplnym i elektrycznym. Wysoka gęstość tego pierwiastka predestynowała go do produkcji osłon wykorzystywanych do ochrony przed promieniowaniem gamma. W stanie naturalnym występuje głównie słabo promieniotwórczy izotop ^{238}U (około 99,3%), któremu towarzyszy ^{235}U (około 0,7%) i ślady ^{234}U. Niezbyt wydajne złoża uranu występują w Polsce w Rudawach Janowickich (Miedzianka, Kowary), w okolicach Masywu Śnieżnika (Kletno), w Górach Świętokrzyskich oraz w górach Izerskich (Kromnów, Kopaniec), zostały one jednak w znacznym stopniu wyeksploatowane na potrzeby ZSRR do lat pięćdziesiątych XX wieku. W latach sześćdziesiątych XX w. złoża uranu odkryto w okolicach wsi Rajsk niedaleko od Bielska Podlaskiego.

Głównym zastosowaniem jest użycie izotopu ^{235}U jako materiału rozszczepialnego w reaktorach jądrowych, które znalazły zastosowanie w elektrowniach jądrowych oraz w napędzie okrętów podwodnych. Ze względu na niską zawartość izotopu ^{235}U w uranie naturalnym, wymaga on przetworzenia zwiększającego zawartość tego izotopu w procesie zwanym wzbogacaniem. W efekcie uzyskuje się tzw. uran wzbogacony oraz produkt uboczny zwany uranem zubożonym.

Rozszczepienie jądra ^{235}U uwalnia energię całkowitą rzędu 200 MeV[2]. Dla porównania, reakcja syntezy węgla i tlenu z wytworzeniem dwutlenku węgla podczas spalania węgla kopalnego dostarcza 4 eV/atom węgla. Teoretycznie jeden gram tego izotopu może więc dostarczyć ok. 82–87×10^9 J energii, co odpowiada spaleniu ok. 2,5 t węgla kamiennego lub wybuchowi 33 ton trotylu. Pomimo że rozszczepialny izotop uranu stanowi jego niewielką część, a w reaktorach rozszczepieniu ulega tylko jego część i niewielka część uranu ^{238}U, to właśnie ten pierwiastek jest obecnie najbardziej skondensowanym źródłem energii wykorzystywanym przez człowieka do wytwarzania energii cieplnej.

SMR to rodzaj reaktora wykorzystującego zjawisko rozszczepienia jądrowego. Rozszczepienie jądrowe to proces, w którym jądro atomu dzieli się na dwa lub więcej mniejszych, lżejszych jąder. Inaczej rzecz ujmując, w wyniku rozszczepienia jądra atomu ciężkiego pierwiastka, otrzymujemy jądra innych pierwiastków, o znacznie mniejszej liczbie atomowej.

Jako przykład można podać jądro atomu uranu ^{235}U, które w wyniku rozszczepienia w procesie bombardowania neutronami rozpada się na krypton ^{83}Kr i bar ^{137}Ba oraz uwalnia trzy dodatkowe neutrony. Neutrony te użyte są następnie jako „pociski” zderzając się z innymi atomami uranu – w ten sposób mamy reakcję łańcuchową. Rozszczepiony atom uwalnia duże ilości energii w postaci ciepła i promieniowania. Jest to skutkiem uwolnienia energii wiązania jąder atomowych. Energia termiczna zostaje przekazana chłodziwu, które następnie podawane jest na turbinę i napędza generatory do produkcji energii elektrycznej.

Ponieważ proces ten wykorzystuje uran, a nie paliwa kopalne do generowania ciepła, nie ma emisji dwutlenku

[2] MeV – megaelektronowolt, jednostka energii. 1 eV=1,602×10^{-19} J

eprasa.pl 80f50968f9

węgla w procesie rozszczepienia jądrowego. Problemem natomiast są odpady – wypalone paliwo jądrowe, według ustawy Prawo Atomowe, jest odpadem wysokoaktywnym, które po zakończeniu jego eksploatacji powinno być przetransportowane do producenta. Zagrożenie w odpadach pochodzących z prętów paliwowych kryje się nie tylko pod postacią promieniowania jonizującego wciąż przezeń emitowanego, ale też w fakcie zagrożenia alternatywnym wykorzystaniem tego odpadu do celów terrorystycznych.

Należy jednak wspomnieć o innym procesie, przebiegającym w naturalnym reaktorze, jakim jest nasza dzienna gwiazda – Słońce. Jest to reakcja fuzji jądrowej, czyli reakcja poniekąd odwrotna do rozszczepienia. W wyniku fuzji jądrowej dwa lekkie jądra atomowe łączą się w jedno jądro cięższego pierwiastka a proces ten powoduje uwolnienie ogromnej ilości energii. Na potwierdzenie, jak wielka jest skala opłacalności tego procesu niech świadczy fakt, że z raptem kilku gramów mieszaniny dwóch izotopów wodoru: trytu ^{3}H i deuteru ^{2}H można wytworzyć 10^{12} J energii. Zaletą tego procesu jest również fakt, że w jego przebiegu nie pojawia się problem odpadów. Jednakże warunki panujące wewnątrz gwiazd nie są możliwe do odtworzenia na Ziemi – decydującym czynnikiem jest ekstremalne ciśnienie panujące wewnątrz gwiazdy. Stąd osiągnięcie temperatury umożliwiającej zajście syntezy jądrowej powoduje dostarczenia znacznie większej ilości energii niż sam proces rozszczepienia.

Przyczyną takiego stanu rzeczy jest oddziaływanie kulombowskie pomiędzy protonami występującymi w jądrach atomowych – wiadomo, że ładunki jednoimienne odpychają się. Nie pomaga tu nawet fakt obecności neutronów, które, pomimo bycia neutralnymi – jak wskazuje ich nazwa – nie niwelują odpychania kulombowskiego. Więcej, z uwagi na niebywałą gęstość materii jądrowej ujawniają się siły grawitacyjne. Gęstość materii jądrowej można porównać do gęstości gwiazdy neutronowej, a tę oszacowano na niebotyczną liczbę 2×10^{15} g/cm^3. Obrazowo rzecz ujmując, łyżeczka takiej materii w warunkach ziemskich ważyłaby miliard ton…

Fuzja jądrowa jest niewątpliwie najbardziej opłacalną formą pozyskiwania energii, pomimo wysokich nakładów koniecznych do jej przeprowadzenia. Jednak ze względu na bariery technologiczne przeprowadzenie fuzji w warunkach ziemskich w wymiarze komercyjnym nie jest możliwe. Jak dotychczas, pomimo prowadzonych na szeroką skalę prac w kierunku „ujarzmienia potęgi gwiazd", zwieńczeniem tych działań jest ITER (Międzynarodowy Eksperymentalny Reaktor Termojądrowy), czyli projekt rozwijany od 2007 r., który ma potwierdzić skuteczność technologii i uzyskiwanej za jej pomocą energii.

Dziś…

O ile w XX w. same wzmianki o elektrowni jądrowej i wszelkich tematach dotyczących wykorzystania energii pochodzącej z atomu wywoływały irracjonalną fobię, dodatkowo spotęgowaną awarią w Czarnobylskiej Elektrowni Jądrowej, to obecnie w dobie kryzysu energetycznego wywołanego sytuacją geopolityczną następuje – co prawda słabo widoczna, ale istniejąca – zmiana kursu.

Nie od dziś wiadomo, że wszelkie zjawiska, których człowiek nie jest w stanie opisać posługując się przynajmniej trzema z pięciu zmysłów, budzą obawę przechodzącą w przerażenie. Nie posiadając żadnego biologicznego sensora, jeśli chodzi o promieniowanie jonizujące, a jedynie możliwość odczuwania skutków działania tego czynnika, trudno dziwić się sceptycyzmowi społecznemu.

Rozwiązaniem jest skuteczna edukacja dotycząca tego zjawiska z pogranicza chemii i fizyki, odnosząca się do budowy atomu, procesów zachodzących w jądrze atomowym, sposobu oddziaływania promieniowania z materią, a w szczególności przedstawienie sposobów ochrony przed promieniowaniem jonizującym oraz przedsięwzięciach realizowanych przez krajowych decydentów. Ogromna w tym rola Państwowej Agencji Atomistyki, a przede wszystkim edukacji na poziomie podstawowym – lekcje fizyki i chemii.

Oczywiście, nie każdy z nas musi być fizykiem jądrowym, jednakże według powiedzenia: „jeśli znasz wroga swego, wiesz, jak go zwalczyć", choćby podstawowa wiedza dotycząca promieniowania jonizującego powoduje, że poznajemy również sposoby ochrony przez zagrożeniem płynącym od atomu.

Eksperci zapewniają: „Atom jest bezpieczny". Pozostaje więc czekać na historyczny moment uruchomienia w Polsce pierwszej elektrowni jądrowej. Nieomal stuletnie wykorzystywanie atomu w służbie ludzkości stworzyło bardzo poważne podwaliny pod dalsze prace udoskonalające techniki i materiały jądrowe. Najwyższa pora, by atom w służbie człowieka w końcu zagościł w kraju, z którego wywodzi się ta, która poznała go na wskroś – Maria Skłodowska-Curie.

Wioletta Monika Dynkowska
Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin – Państwowy Instytut Badawczy

W powyższym artykule wykorzystano informacje z witryn internetowych (m.in. Wikipedia, Polski Atom, Kierunek – energetyka, IAEA) a także raport Narodowego Centrum Badań Jądrowych na temat Małych Reaktorów Modułowych (SMR).

W następnych wydaniach polecamy m.in.

- **Promieniowanie kosmiczne a życie na Ziemi**

Doskonale wiemy, że promieniowanie kosmiczne dochodzi do nas i w dzień, i w nocy, i latem, i zimą. Cały czas bombardują nas wysokoenergetyczne cząstki z kosmosu i odkąd udaje nam się je mierzyć jest go zasadniczo tyle samo. Zasadniczo, ale nie do końca. Jego strumień (czyli liczba cząstek przechodząca z określonego kąta bryłowego, przez jednostkę powierzchni w jednostce czasu) jest od lat monitorowany przez różne aparatury ustawione w różnych punktach globu i stwierdzono, że waha się on. Raz jest większy, raz mniejszy. Badania tych zmian wciąż trwają i choć z grubsza je rozumiemy, to nie możemy powiedzieć, że wiemy o nich wszystko.

eprasa.pl 80f50968f9

Foto – Adobe Stock

Instalacje fotowoltaiczne

Ogniwa słoneczne pierwotnie były używane do zasilania w energię elektryczną statków kosmicznych. Jednak wraz z rozwojem technologii ogniw słonecznych i znacznym obniżeniu ich kosztów znalazły swoje ziemskie zastosowania. Dzisiaj w naszym kraju można zauważyć wiele budynków pokrytych panelami fotowoltaicznymi. U naszych zachodnich sąsiadów – w Niemczech, prawie połowa budynków pokryta jest tego typu instalacjami.

Andrzej **Wasiak**

Instalacje fotowoltaiczne są jednym z odnawialnych źródeł energii (OZE). Mają one wiele zalet w porównaniu np. elektrowniami wiatrowymi jak np.: brak hałasu, który emitują wiatraki i nie stwarzają niebezpieczeństwa dla ptaków. Wiadomo, że elektrownie wiatrowe muszą być oddalone od budynków mieszkalnych ze względu na emitowane przez nie infradźwięki.

Podstawowe pojęcia związane z fotowoltaiką

Natężenie promieniowania słonecznego – chwilowa wartość gęstości mocy promieniowania słonecznego, podającego w ciągu jednej sekundy na powierzchnię jednego metra kwadratowego, prostopadłą do kierunku promieni słonecznych. Wartość ta podawana jest najczęściej W/m^2 lub kW/m^2. Do granicy atmosfery ziemskiej dociera ze słońca w sposób ciągły strumień energii o gęstości mocy 1366 W/m^2. Wielkość tę nazywamy **stałą słoneczną**. Natężenie promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi uwaga ciągłym zmianom zazwyczaj w przedziale 100–800 W/m^2. Najwyższe wartości notowane w słoneczne bezchmurne dni mogą sięgać 1000 W/m^2.

Nasłonecznienie – liczba godzin słonecznych. Czas podany w godzinach, w którym na powierzchnię Ziemi padają bezpośrednio promienie słoneczne. Jest to parametr opisujący głównie warunki pogodowe, a nie zasoby energii słonecznej. W Polsce średnia wartość nasłonecznienia jest największa dla Kołobrzegu i wynosi 1624 h/rok, dla Warszawy 1579 h/rok, a dla Zakopanego zaś – 1467 h/rok.

Efekt fotowoltaiczny – zjawisko polegające na powstaniu siły elektromotorycznej w półprzewodniku pod wpływem światła. Efekt fotowoltaiczny jest wykorzystywany w ogniwach fotowoltaicznych – urządzeniach, które produkują energię elektryczną bezpośrednio z energii słonecznej.

Moduł fotowoltaiczny – PV (bateria słoneczna, panel fotowoltaiczny) – urządzenie do bezpośredniej przemiany energii promieniowania słonecznego w energię elektryczną. Zbudowany jest z połączonych ogniw fotowoltaicznych w pełni chronionych przed wpływem warunków atmosferycznych.

Sprawność modułu fotowoltaicznego – wyrażony w procentach w stosunku mocy elektrycznej modułu fotowoltaicznego do natężenia promieniowania słonecznego podającego na powierzchnię modułu PV w danej chwili. Sprawność ta dla większości modułów jest rzędu kilkunastu procent.

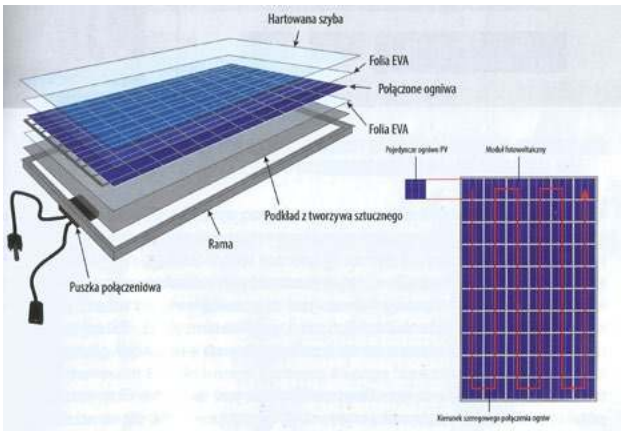
Ogniwo fotowoltaiczne – element zbudowany z półprzewodnika, w którym zachodzi konwersja promieniowania słonecznego na energię elektryczną w wyniku zjawiska fotowoltaicznego. Samodzielne ogniwo fotowoltaiczne jest elementem bardzo kruchym i delikatnym. Niechronione od czynników zewnętrznych nie może być samodzielnie wykorzystywane do pracy.

Moduły fotowoltaiczne

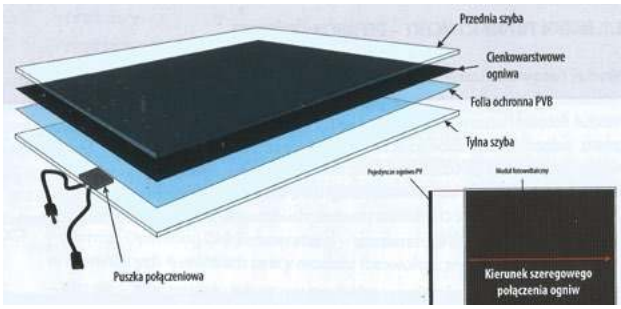
Moduł fotowoltaiczny – definicja i budowa

Każdy moduł fotowoltaiczny zbudowany jest z ogniw fotowoltaicznych łączonych szeregowo, odpowiednio zabezpieczonych i umieszczonych w obudowie. Moduły fotowoltaiczne można podzielić według kilku kryteriów. Jednym z podstawowych jest podział na klasyczne zbudowane z ogniw krzemu krystalicznego, zazwyczaj z alumi-

eprasa.pl 80f50968f9



Rys. 1. Budowa modułu fotowoltaicznego na obwodach z krzemem krystalicznego



Rys. 2. Budowa modułu fotowoltaicznego cienkowarstwowego

niową ramką – oraz cienkowarstwowe, zbudowane z ogniw cienkowarstwowych, często pozbawione ramki.

Podział ogniw ze względu na materiał półprzewodnikowy

Moduły fotowoltaiczne zbudowane są z pojedynczych ogniw. Ogniwa w postaci wafli o grubości około 0,2 mm wytwarzane są z mono- lub polikrystalicznego krzemu. Tego typu moduły PV zaliczane są do tzw. I generacji i ciągle dominują. Nowością są tak zwane ogniwa II generacji, w których materiał półprzewodnikowy jest nanoszony w postaci cienkiej warstwy i często jest to materiał inny niż krzem na przykład tellurek kadmu (CdTe) czy mieszanina miedzi, indu, galu i selenu (CIGS). Zaletą ogniw II generacji jest znaczna – w stosunku do krzemowych wafli – redukcja wykorzystywanego półprzewodnika. Grubość ogniw drugiej generacji wynosi około 1–3 mikrometrów. Z tego też względu nazywane są one cienkowarstwowym (ang. *thin films*).

Niższe zużycie półprzewodników w przypadku ogniw II generacji przekłada się na niższe nakłady energetyczne przy ich produkcji. Pod względem energetycznym tego typu ogniwa są bardziej przyjazne dla środowiska. Na rynku pojawiły się także ogniwa, które możemy zaliczyć do III generacji. Pozbawione są one klasycznego złącza P–N, niezbędnego do produkcji ogniw I i II generacji. Do ogniw III generacji zaliczyć można wiele technologii, jednak największe znaczenie rynkowe mają aktualnie tzw. ogniwa DSSC oraz ogniwa organiczne z wykorzystaniem polimerów. Wielką zaletą ogniw III generacji są niskie koszty produkcji oraz prostota ich wytwarzania. Główną przeszkodą w ich popularyzacji jest mała sprawność – rzędu kilku procent i krótka żywotność.

Moduły zbudowane z ogniw z krzemu krystalicznego

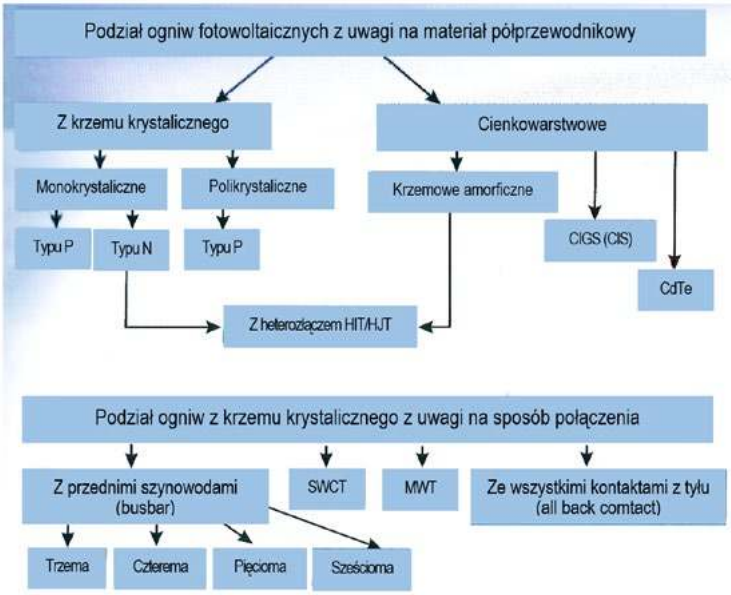
Wytwarzanie prądu elektrycznego przez krzemowe ogniwa fotowoltaiczne jest możliwe dzięki stworzeniu w nowej płycie półprzewodnikowej złącza P–N, w którym pod wpływem padających fotonów o energii większej niż przerwa energetyczna półprzewodnika, następuje przepływ prądu elektrycznego. Do utworzenia złącza typu P wykorzystuje się domieszki boru posiadającego o jeden elektron mniej niż krzem, co powoduje powstanie dodatnich dziur. Z kolei do utworzenia złącza typu N wykorzystuje się fosfor, który posiada o jeden elektron więcej niż krzem.

Większość ogniw PV budujących moduły PV na rynku oparta jest na krzemie typu P, co oznacza, że na etapie produkcji krzemu podawane są do niego domieszki – takie jak bor – które powodują, że cały materiał jest złączem typu P. Z kolei złącze typu N powstaje w wyniku napylenia fosforu na powierzchnię wafli. Z tego powodu ogniwa PV typu P są zbudowane w większej części z krzemu typu P i cienkiej warstwy krzemu typu N w górnej części ogniwa. Z kolei w przypadku ogniw PV typu N są one zbudowane odwrotnie. Dominuje w nich krzem typu N, a krzem typu P stanowi cienką warstwę.

Obecnie na rynku dominują ogniwa typu P (ok. 30% rynku). Dominacja wynika z zaszłości technologicznych i lepszej efektywności kosztowej. Jednak coraz większe jest zainteresowanie producentów ogniw rozwojem technologii typu N. Szybki rozwój tej technologii występuje szczególnie w przypadku modułów monokrystalicznych. Ogniwa typu N są także mniej wrażliwe na zanieczyszczenia, które są zazwyczaj obecne w krzemie.

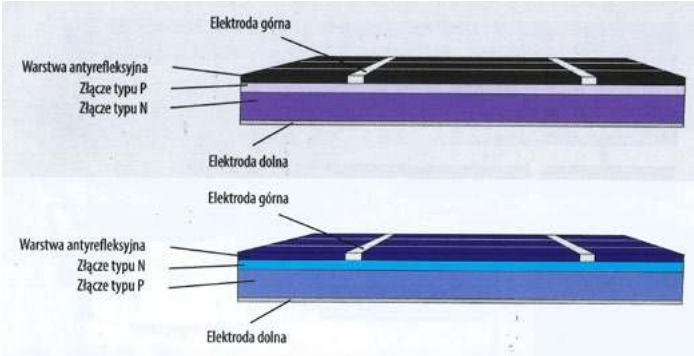
Niezależnie od domieszek stosowanych do utworzenia złącza P–N, ogniwa i moduły PV podstawowo dzieli się ze względu na stopień krystalizacji krzemu na mono-, poli- i quasi-monokrystaliczne.

Moduł fotowoltaiczny z ogniw monokrystalicznych, oznaczonych jako MONO c-Si – ogniwa tworzące moduł



Rys. 3. Podział ogniw fotowoltaicznych ze względu na zastosowany materiał półprzewodnikowy

eprasa.pl 80f50968f9



Rys. 4. Schemat budowy ogniwa z krzemu krystalicznego. U góry typu N, u dołu typu P

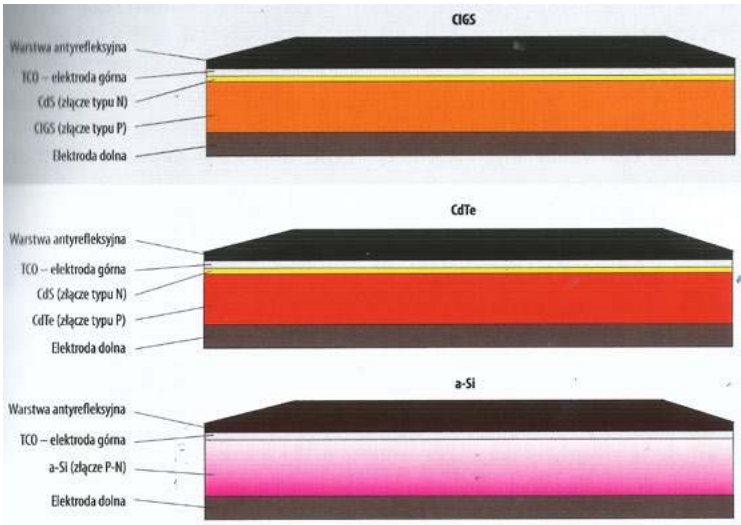
PV wyprodukowano z krzemu monokrystalicznego. Zazwyczaj mają barwę ciemnoniebieską do czarnej. Z uwagi na to, że monokryształ krzemu jest w przekroju kołem, ogniwa monokrystaliczne mają często zaokrąglone rogi. Ten typ modułów PV charakteryzuje się największą sprawnością oraz najniższym wskaźnikiem spadku mocy wraz ze wzrostem temperatury wśród powszechnie dostępnych modułów PV. Zazwyczaj jest także najdroższy w przeliczeniu na wat zainstalowanej mocy. Z krzemu monokrystalicznego oprócz tradycyjnych ogniw produkowane są także ogniwa wysokosprawne typu HIT oraz ogniwa z obiema elektrodami umieszczonym z tyłu.

Moduł fotowoltaiczny z ogniw polikrystalicznych, oznaczonych jako POLY/mc-Si – ogniwa tworzące moduł PV wyprodukowane są z krzemu polikrystalicznego, czyli takiego, który wykrystalizował w postaci wielu monokryształów. Zazwyczaj ogniwa polikrystaliczne mają barwę jasnoniebieską, często widoczne są krawędzie kryształów. Ten typ modułów PV charakteryzuje się wysoką sprawnością, lecz nieco niższą od modułu mono, oraz wysokim wskaźnikiem spadku mocy ze wzrostem temperatury, lecz zazwyczaj z niższym od modułu mono. Moduł polikrystaliczny jest także tańszy od modułu mono średnio 8–15%.

Moduły cienkowarstwowe

Podstawą działania cienkowarstwowych modułów fotowoltaicznych jest także złącze PN, choć – w przeciwieństwie do ogniw PV z krzemu krystalicznego – są one zbudowane z innych materiałów niż krzem krystaliczny z domieszkami. W przypadku ogniw typu CIGS i CdTe złącze typu N zapewnia cienka warstwa siarczku kadmu (CdS), a z kolei baza w postaci CIGS czy CdTe stanowi złącze typu P.

Moduł fotowoltaiczny amorficzny (z krzemu amorficznego) – moduł ten jest zbudowany z cieniutkich ogniw wykonanych z bezpostaciowego krzemu. Wizualnie w module brak jest wyraźnie wyróżniających się ogniw jak z klasycznym krzemowym module PV. Ogniwa tworzą jedną zwartą formację o barwie od ciemnobordowej do czarnej. Ten typ modułów fotowoltaicznych charakteryzuje się niską ceną oraz niską sprawnością na tle materiałów z krzemu krystalicznego. Zaletą modułów amorficznych jest bardzo niski wskaźnik spadku mocy wraz ze wzrostem temperatury. Niestety słabo zagospodarowują niskoenergetyczne promieniowanie podczerwone, z tego też względu w celu poprawy sprawności i efektywności moduły z krzemu amorficznego wypierane są przez rozwiązania hybrydowe zbudowane z połączonych w ramach jednego ogniwa krzemu amorficznego i mikrokrystalicznego mc-Si. Dodanie złącza z krzemu mikrokrystalicznego pozwala, poza popraw sprawności, zwiększy wydajność modułu PV słabych warunkach oświetlenia.



Rys. 5. Schemat budowy poszczególnych ogniw cienkowarstwowych

Moduł fotowoltaiczny CIGS/CiS – rolę materiału półprzewodnikowego pełni w tym module mieszanina miedzi indu, galu i selenu (CIGS) lub miedzi indu i seleny (CIS). Wizualnie w module brak jest wyraźnie wyróżniających się ogniw, podobnie jak w innych modułach cienkowarstwowych. Ogniwa tworzą jedną zwartą formację o barwie czarnej. Moduł charakteryzuje się stosunkowo niską cenę oraz umiarkowaną sprawnością, jednak wysoką jak na cienkowarstwowe moduły fotowoltaiczne i zbliżoną do słabszych modułów PV z krzemu krystalicznego. Bardzo dobrze też zagospodarowują niskoenergetyczne promieniowanie rozproszone, przez co na tle innych technologii lepiej pracują w miesiącach zimowych.

Moduły fotowoltaiczne CdTe – rolę materiału półprzewodnikowego pełni w tym module tlenek kadmu (CdTe). Wizualnie w module brak jest wyraźnie wyróżniających się ogniw, podobnie jak w innych modułach cienkowarstwowych. Ten typ modułu charakteryzuje się relatywnie niską cenę oraz umiarkowaną sprawnością, sporo jednak wyższą niż moduły z krzemu amorficznego. Moduły te mają bardzo niski wskaźnik spadku sprawności wraz z temperaturą, co przekłada się na wydajną pracę w upalne dni. Należy zaznaczyć, że mimo wykorzystania kadmu, stosowanie tego typu modułów fotowoltaicznych jest bezpiecznie, dopiero w momencie demontażu muszę one zostać odpowiednio zutylizowane.

Podział modułów ze względu na budowę ogniw pv moduł pv

Podział modułów fotowoltaicznych ze względu na rodzaj materiału półprzewodnikowego oddaje dobrze całego

eprasa.pl 80f50968f9

spektrum dostępnych na rynku technologii. Poza najbardziej popularnymi modułami PV istnieje szereg urządzeń, w których zmiany w budowie ogniw PV czy modułów PV sprawiają, że posiadają one odmienne specyficzne własności czy funkcjonalność.

Cienkowarstwowe hybrydowe moduły fotowoltaiczne

Głównym problemem modułów PV opartych na ogniwach z krzemu amorficznego jest bardzo niska sprawność, która oscyluje zwykle wokół 7%. Z tego względu w celu poprawy sprawności, a także wydajności modułów PV z krzemu amorficznego, łączy się je w ramach jednego ogniwa z krzemem mikrokrystalicznym, tworząc hybrydowe ogniwo o dwóch złączach.

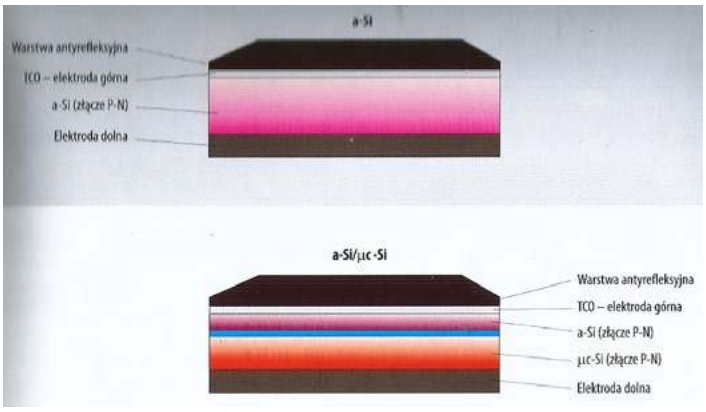
Moduły PV tego typu nazywane są mikromorficznymi i oznaczane jako a-Si/mc-Si. Dobór tych dwóch materiaBów nie jest przypadkowy. Krzem amorficzny i mikrokrystaliczny maj inn przerw energetyczn, którego dla a-Si wynosi 1,7 eV dla mc-Si wynosi 1,1 eV, dzięki czemu oba materiały półprzewodnikowe inną czułość spektralną, czyli absorbują inną część promieniowania słonecznego. Krzem amorficzny absorbuje promieniowanie wysokoenergetyczne, głównie widzialne o krótkiej długości fali, a krzem mikrokrystaliczny – niskoenergetyczne, podczerwone o większej długości fali.

Mimo swoich różnych własności fizycznych ona materiały półprzewodnikowe są krzemem, dzięki czemu mogą być wytwarzane tą samą metodą (PECVD – *Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*), co ma duże znaczenie dla procesu produkcyjnego.

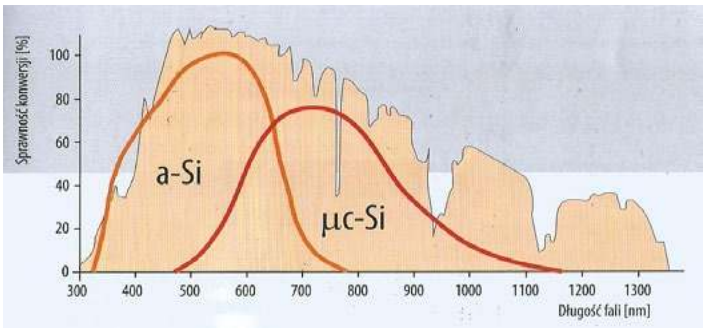
Głównymi zaletami hybrydowych modułów mikromorficznych jest poprawa sprawności. Średnia sprawność modułów a-Si/mc-Si oscyluje wokół 11–13%, co pozwala znaczco zaoszczdzić miejsce na instalację. Średnio do zainstalowania tej samej mocy w przypadku mikromorficznych modułów fotowoltaicznych potrzeba 30–40% mniej powierzchni niż w przypadku modułów PV z samego krzemu amorficznego. Moduły a-Si/mc-Si posiadaj niewielki spadek sprawności wraz z temperaturą, który wynosi około 0,28%/°C, co sprawdza się zwłaszcza w upalne dni, zwłaszcza w stosunku do modułów z krzemu krystalicznego. Z kolei dodatek krzemu mikrokrystalicznego pozwala zwiększyć sprawność przy słabym oświetleniu w stosunku do klasycznych modułów PV z krzemu amorficznego. Firmy, które produkują takiej moduły to na przykład Sharp, NextPower czy Kaneka.

Moduły monokrystaliczne z obiema elektrodami z tyłu, oparte na krzemie typu N przewodnictwa. Spośród masowo produkowanych ogniw fotowoltaicznych charakteryzujących się wyjątkowo wysoką sprawnością sięgającym 24%.

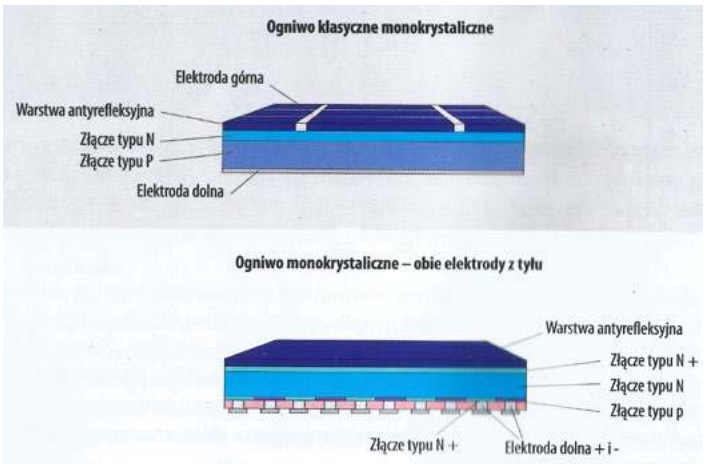
Umiejscowienie obu elektrod z tyłu sprawia, że patrząc na moduł PV nie widzimy na nich znanych z klasycznych ogniw srebrnych ścieżek. Ten brak ścieżek sprawia, że ogniwa mogą większą powierzchnią absorbować światło, mają także mniejsze straty wewnętrzne, przez co osiąga się większą sprawność w stosunku do klasycznych ogniw monokrystalicznych. Umieszczenie połączeń elektrycznych + i – z tyłu ogniwa przyczynia się do większej odporności na korozję połączeń elektrycznych. Elektrody



Rys. 6. Porównanie budowy ogniwa z krzemu amorficznego i hybrydowego



Rys. 7. Porównanie wydajności spektralnej ogniw krzemu amorficznego i mikrokrystalicznego



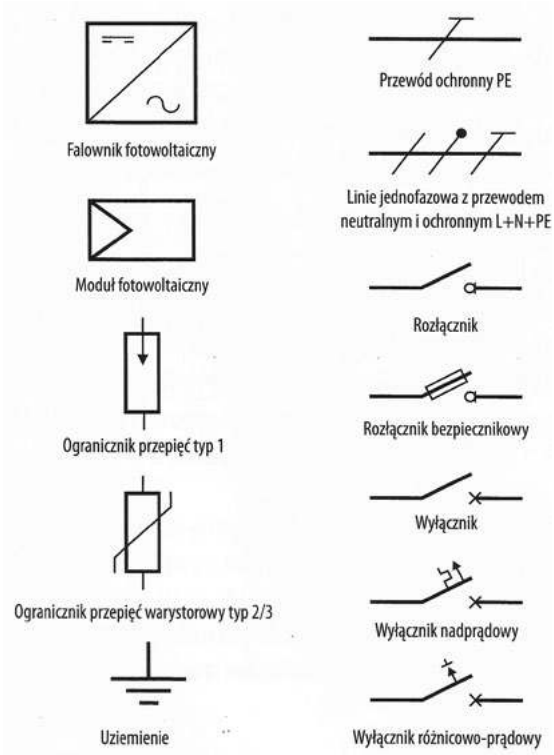
Rys. 8. Porównanie klasycznego ogniwa z ogniwem z obiema elektrodami tyłu

umieszczone w spodniej części ogniwa mogą być większe i znajdować się bliżej siebie. Moduły fotowoltaiczne tego typu dobrze absorbują niskoenergetyczne promieniowanie podczerwone, zazwyczaj mają bardzo dobre parametry elektryczne i charakteryzują się dobrym, jak na moduły z krzemu krystalicznego, temperaturowym współczynnikiem spadku mocy (0,30–0,36), co oznacza, że wraz ze wzrostem temperatury relatywnie wolno (na tle klasycznych modułów monokrystalicznych) tracą wydajność.

Instalacje fotowoltaiczne

Podstawowym elementem każdej instalacji fotowoltaicznych są panele fotowoltaiczne. Wytwarzają one na-

eprasa.pl 80f50968f9



Rys. 9. Przykłady symboli elektrycznych wykorzystywanych przy tworzeniu schematów instalacji PV

pięcie stałe, które nie jest użyteczne na odbiorcy, dlatego każda instalacja fotowoltaiczna posiada falownik zamieniający napięcie stałe na napięcie zmienne 230 V/50 Hz. W przypadku, gdy instalacja fotowoltaiczna współpracuje z siecią energetyczną potrzebny jest licznik energii elektrycznej dwustronnego działania, który mierzy energię elektryczną oddaną i pobraną z sieci.

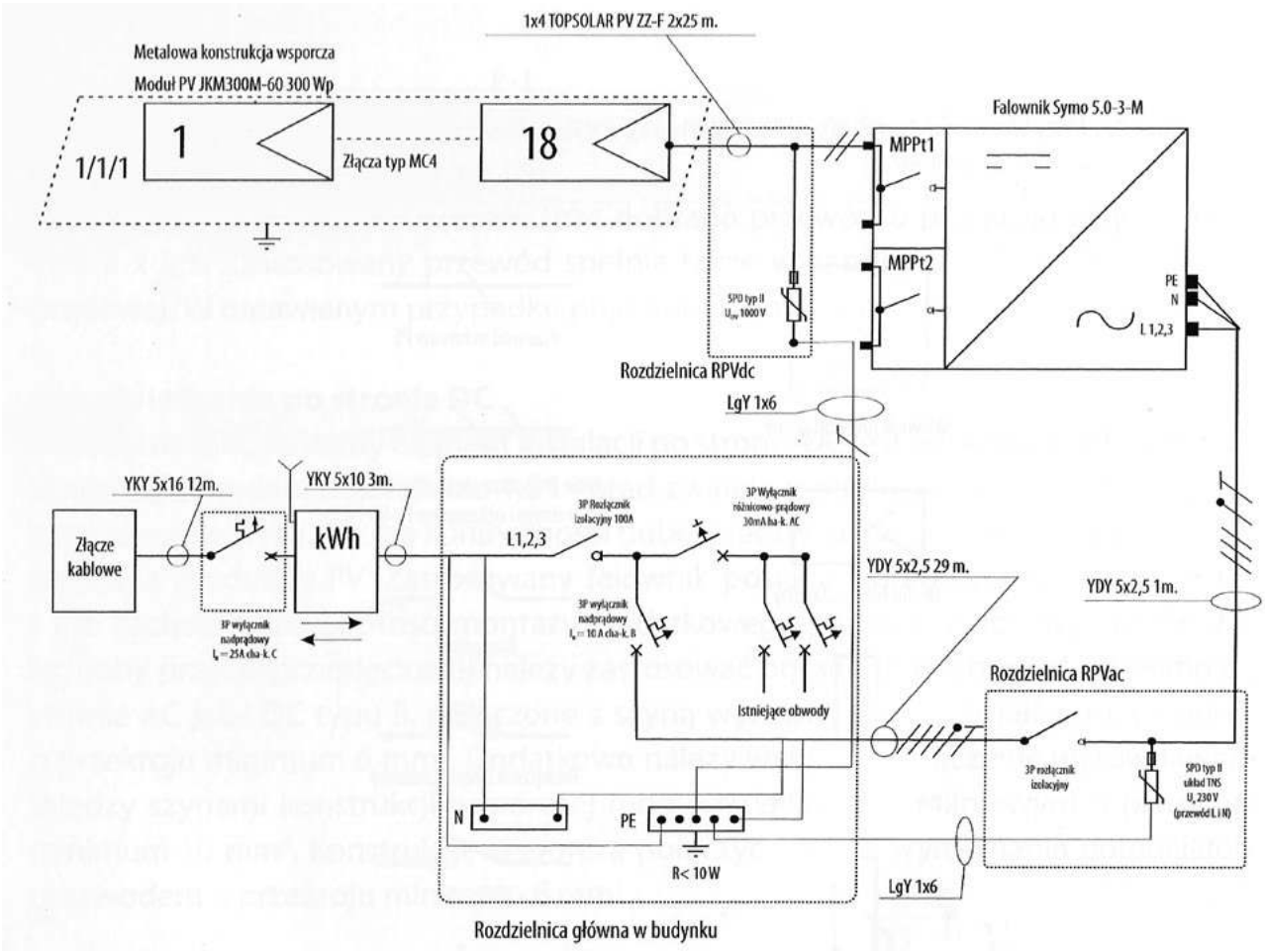
Instalacja fotowoltaiczna posiada również szereg zabezpieczeń jak ograniczniki przepięć, rozłącznik bezpiecznikowy czy wyłącznik nadprądowy. Przykłady symboli elektrycznych wykorzystywanych przy tworzeniu schematów instalacji PV pokazano na rys. 9, zaś na rys. 10 pokazano przykład instalacji PV domu jednorodzinnego.

Warto tu przy okazji wspomnieć, że typowa moc instalacji PV dla domu jednorodzinnego wynosi około 3,5 kW.

Współpraca instalacji PV z pompą ciepła

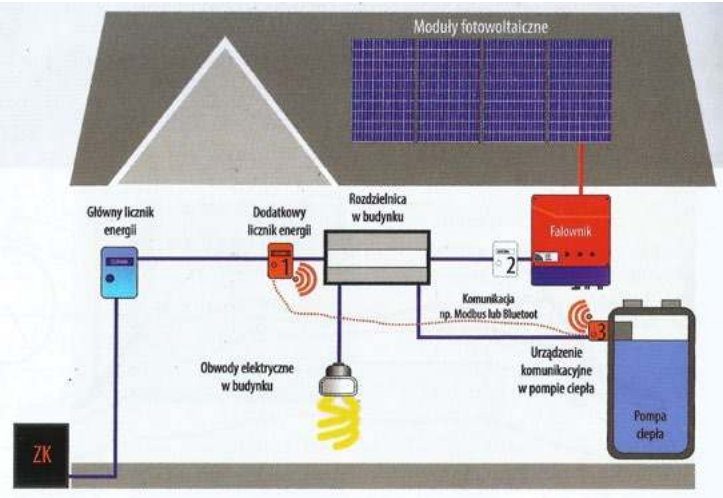
Pompa ciepła jest urządzeniem służącym do ogrzewania pomieszczeń pobierając ciepło na zewnątrz pomieszczenia, z powietrza lub gruntu.

Jednym ze sposobów zwiększenia udziału konsumpcji własnej energii wyprodukowanej przez elektrownię fotowoltaiczną jest korelacja jej pracy z odbiornikiem energii elektrycznej. Od strony energetycznej korzystnie jest, jeżeli są to odbiorniki, które mogą pracować w ciągu dnia o dowolnej porze z relatywnie dużą mocą. Wspomniane



Rys. 10. Uproszczony schemat instalacji PV domu jednorodzinnego

eprasa.pl 80f50968f9



Rys. 11. Ideowy schemat współpracy pompy ciepła z systemem fotowoltaicznym

warunki idealnie spełnia elektryczne buforowe ogrzewanie ciepłej wody użytkowej (C.W.U) np. za pomocą grzałki elektrycznej lub pompie ciepła.

Zastosowanie pompy ciepła zamiast grzałki pozwala bardziej efektywnie wykorzystać energię elektryczną i pozwala na efektywna współpracę nawet przy relatywnie małej mocy elektrowni fotowoltaicznej. Dostępnie na rynku pompy ciepła dedykowane do C.W.U osiągają COP na poziomie 3–4,3. To oznacza, że z jednego kW energii elektrycznej są w stanie wyprodukować 3–4,3 kW energii cieplnej.

Moce pomp ciepła dedykowane do C.W.U nie są duże, zazwyczaj oscylują wokół 0,5 kW, a potrzebny czas do pełnego nagrzania zasobnika C.W.U to kilka godzin. Z tego względu relatywnie niewielka instalacja fotowoltaiczna o mocy 2–3 kW będzie w stanie nawet bez bardzo dobrych warunków nasłonecznienia wytworzyć odpowiednią moc, aby pompa ciepła była zasilana większości z modułów PV, szczególnie w półroczu letnim. W półroczu zimowym zasilanie pompy ciepła będzie możliwe w słoneczne dni.

Andrzej Wasiak

LITERATURA

[1] Bogdan Szymański., Instalacje fotowoltaiczne, GL©BEnergia, Kraków 2019.

Co w fizyce piszczy

Fuzja termojądrowa

Departament Energii Stanów Zjednoczonych ogłosił, że w działającym w Kalifornii National Ignition Facility (NIF) udało się uzyskać dodatni bilans energetyczny w procesie fuzji termojądrowej z wykorzystaniem promieniowania laserowego dużej mocy. Z fuzją termojądrową wielu naukowców wiąże nadzieje w kontekście nowych źródeł energii. Specjaliście uspokajają jednak, że osiągnięcie związane z fuzją może stać się przełomem, choć raczej nie nastąpi on zbyt szybko.

„W krótkim okresie fuzja termojądrowa absolutnie nie rozwiąże naszych problemów energetycznych, ponieważ nie umiemy jeszcze jej wykorzystywać na skalę przemysłową. Nie będziemy tego umieli jeszcze przez kilka dekad. Obecnie najlepsze rozwiązanie, jakie mamy, to tradycyjne elektrownie jądrowe na uran i powinniśmy je budować wszędzie, gdzie to tylko możliwe" – mówi Dariusz Aksamit, fizyk z Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej i popularyzator nauki.

Według specjalistów fuzja jest obiecująca z kilku powodów. Jeden z najważniejszych to paliwo. „Główną zaletą energetyki jądrowej – rozszczepiania oraz fuzji jąder – jest ogromna gęstość energetyczna paliwa. W jednej ręce teoretycznie moglibyśmy utrzymać paliwo, które elektrowni wystarczy nawet na rok. W przypadku fuzji owa gęstość energetyczna jest jeszcze większa niż przy stosowanym dzisiaj rozszczepianiu atomowych jąder. To jednak nie wszystko: zasoby uranu się kiedyś skończą. Natomiast potrzebnych do elektrowni fuzyjnych lekkich pierwiastków mamy w praktyce nieskończone zasoby, bo można je uzyskiwać z oceanicznej wody" – wyjaśnia ekspert.

Kolejna kwestia dotyczy odpadów. „Elektrownie fuzyjne, wbrew niektórym doniesieniom, też będą generowały odpady. Na przykład materiały, z których zbudowane są osłony reaktora po pewnym czasie, aktywując się od powstających w reakcjach jądrowych neutronów oraz wysokoenergetycznego promieniowania gamma, same stają się promieniotwórcze. Jednak powstających w trakcie fuzji odpadów będzie po pierwsze mniej, a po drugie – będą miały znacznie krótszy czas połowicznego rozpadu. Krócej będą aktywne. Będzie więc można je łatwiej utylizować. Warto dodać, że nawet dzisiaj odpady z elektrowni jądrowych są w 100 proc. zabezpieczane" – zaznaczył Dariusz Aksamit.

Na taką technologię trzeba jednak poczekać, gdyż nadal stawia ona przed naukowcami i inżynierami potężne wyzwania. „Fuzja termojądrowa już działa tak naprawdę od kilku dekad, ale tylko w warunkach laboratoryjnych. Technologię tę nie jest łatwo przeskalować do zastosowań użytkowych. W reaktorach, mówiąc w uproszczeniu, musimy stworzyć, jak gdyby małe słońce, a to oznacza temperaturę rzędu milionów stopni. Trzeba więc stworzyć urządzenia, które ją wytrzymają i pozwolą na kontrolowanie całej reakcji" – podkreśla fizyk.

Na podstawie PAP – Nauka w Polsce

eprasa.pl 80f50968f9

Foto – Adobe Stock

Za co Nobel 2022?

Część 1. Interpretacja kopenhaska, paradoks EPR, stany splątane

W 2022 roku nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki otrzymali trzej fizycy Alain Aspect, John Clauser i Anton Zeilinger. W uzasadnieniu przyznania nagrody czytamy, że nagroda została przyznana *„za eksperymenty ze splątanymi fotonami, ustalenie naruszenia nierówności Bella i pionierską naukę o informacji kwantowej”* [1]. W tym artykule i jego następnych częściach postaram się przybliżyć sformułowania zawarte w tym uzasadnieniu.

Jan **Kurzyk**

Interpretacja kopenhaska

Na początku XX wieku fizycy zajmowali się zjawiskami, których nie dało się wytłumaczyć w ramach fizyki klasycznej. Zaczęła powstawać nowa dziedzina fizyki nazywana dziś *starą teorią kwantową*. Była to teoria próbująca do opisu układów subatomowych zastosować klasyczną mechanikę uzupełnioną o postulowane poprawki. Bazowała ona na modelu atomu wodoru zaproponowanym przez Nielsa Bohra, rozwiniętego następnie przez Arnolda Sommerfelda i zakładającego, że spośród wszystkich możliwych klasycznych stanów układu tylko niektóre są dozwolone.

Teoria ta nie została nigdy dokończona. Zaczęto zdawać sobie sprawę, że do opisu obiektów subatomowych potrzebny jest nowy aparat matematyczny. Powstały dwa niezależne formalizmy, Werner Heisenberg stworzył formalizm macierzowy, a Erwin Schrödinger formalizm falowy. Początkowo zwolennicy jednej z tych metod uważali, że ta druga jest błędna i *vice versa*. Jednak okazało się, że oba podejścia są ze sobą zgodne i tak stworzono wspólny opis teorii, którą nazwano *mechaniką kwantową*.

Równania mechaniki kwantowej dały poprawne odpowiedzi na wiele pytań, ale nie wiedziano, jak należy rozumieć mechanikę kwantową i jakie wnioski na temat rzeczywistości, w której żyjemy z niej wypływają. W latach dwudziestych ubiegłego wieku Niels Bohr, będący wówczas kierownikiem Instytutu Fizyki Teoretycznej na Uniwersytecie Kopenhaskim, zaczął rozwijać interpretację mechaniki kwantowej nazwaną później *interpretacją kopenhaską*. Połączył w niej falowy opis stanów kwantowych wynikający z równania Schrödingera z zasadą nieoznaczoności, jaką otrzymał Heisenberg na gruncie swojego formalizmu macierzowego.

Interpretacja kopenhaska nigdy nie została spisana w postaci jednolitego zbioru poglądów na mechanikę kwantową. Nawet pomiędzy poglądami głównych autorów tej interpretacji – Bohra i Heisenberga – istniały zasadnicze rozbieżności. Najważniejsze zasady interpretacji Bohra można streścić następująco:

- *Indeterminizm świata kwantowego.* Świat na poziomie atomów i tym samym mechanika kwantowa, która go opisuje są niedeterministyczne. Nie możemy mówić o przyczynach i skutkach a jedynie o prawdopodobieństwie otrzymania jakiegoś wyniku pomiaru.
- *Reguła Borna.* Prawdopodobieństwa, o których była mowa wyżej obliczamy zgodnie z regułą sformułowaną w 1926 roku przez Maxa Borna. W najprostszej postaci reguła Borna mówi, że gęstość prawdopodobieństwa znalezienia, w wyniku pomiaru, układu w danym stanie jest równa modułowi funkcji falowej[1] tego układu podniesionemu do kwadratu.

[1] Funkcja falowa może być funkcją zespoloną. Jej moduł liczymy mnożąc funkcję przez jej sprzężenie zespolone. Moduł funkcji zespolonej jest liczbą rzeczywistą, której znak może być zarówno dodatni, jak i ujemny.

eprasa.pl 80f50968f9

- *Zasada komplementarności.* Pewne własności obiektu kwantowego wzajemnie się wykluczają a jednocześnie uzupełniają, gdyż są niezbędne do pełnego opisu stanu obiektu. Dlatego zjawisk kwantowych nie da się opisać w sposób zupełny. Zasada komplementarności ma ścisły związek z zasadą nieoznaczoności Heisenberga, ale dla Bohra miała ogólniejsze znaczenie. Np. według Bohra własności korpuskularne oraz falowe materii i światła nie są odrębnymi własnościami, lecz dwoma obliczami tych samych cech. Dopiero my w wyniku pomiaru nadajemy im swoją interpretację. Dla przykładu to nie światło zmienia swój charakter, podczas zjawiska fotoelektrycznego, lecz to my decydujemy jak na nie patrzeć.
- *Zasada korespondencji.* Dla odpowiednio dużych układów znika zachowanie kwantowe i do ich opisu wystarcza fizyka niutonowska. W ten sposób Bohr próbował wyjaśnić, dlaczego w przypadku makroskopowych układów nie musimy stosować mechaniki kwantowej.

Do czasu powstania mechaniki kwantowej byliśmy pewni, że własności obiektów są dokładnie określone, a jakie one są możemy sprawdzić wykonując odpowiedni pomiar. Przyjmując interpretację kopenhaską musimy na własności obiektów kwantowych i sam pomiar spojrzeć inaczej. Pomiar nie jest aktem obojętnym dla badanego układu. Wykonując pomiar obserwator ingeruje w badany obiekt zmieniając jego stan. Zauważmy np., że, pomiar położenia cząstki wymaga „dotknięcia" jej co najmniej fotonem. To z kolei powoduje nieprzewidywalną zmianę pędu[2] cząstki. Ale nie tylko o taką ingerencję chodzi w interpretacji kopenhaskiej. Bardziej spektakularne jest coś innego. Otóż według Bohra obiekty kwantowe nie mają ściśle określonych wartości swoich własności i dopiero pomiar „zmusza" obiekt do wybrania jednej z możliwych.

Interpretacja kopenhaska nie jest jedyną interpretacją mechaniki kwantowej. Istnieje kilka innych. Każda z nich ma swoich zwolenników i przeciwników w świecie fizyków. Jedną z tych, które najbardziej rozbudzają wyobraźnię jest teoria wieloświatów sformułowana w 1957 roku przez Hugha Everetta. Zgodnie z tą teorią podczas pomiaru realizowane są wszystkie możliwe wartości mierzonej wielkości, ale każda w innym, równoległym świecie. Innymi słowy podczas pomiaru powstaje rozgałęzienie świata, świat dzieli się na światy równoległe i w każdym realizowany jest jeden z możliwych wyników pomiaru.

Paradoks EPR

Do najsłynniejszych przeciwników interpretacji kopenhaskiej należał Albert Einstein. Współtworzył on mechanikę kwantową i doceniał jej osiągnięcia, ale nie mógł zgodzić się z tym, że obiekt kwantowy nie ma konkretnych wartości swoich własności i że konkretne wartości tych własności są realizowane dopiero w wyniku pomiaru. W słynnym liście do Maxa Borna Einstein pisze, że nie może zaakceptować teorii według której natura ma charakter losowy. List kończy znanymi słowami *„...jestem przekonany, że On nie gra w kości"* [4].

Einstein był przekonany, że mechanika kwantowa jest niekompletna i musimy ją wzbogacić o dodatkowe informacje, które sprawią, że własnościom układów kwantowych będziemy mogli przypisać konkretne wartości w każdej chwili. Wraz ze swoimi współpracownikami szukał argumentów, które mogłyby obalić interpretację kopenhaską. W 1935 roku Albert Einstein, Borys Podolski i Nathan Rosen opublikowali ważny artykuł [5]. Opisali w nim myślowy eksperyment, który zdaniem autorów dowodził, że mechanika kwantowa jest niezgodna ze szczególną teorią względności (lub mówiąc inaczej nie spełnia zasady realizmu lokalnego), a tym samym jest niekompletna. Przedstawiony w artykule eksperyment nazywany jest paradoksem EPR od pierwszych liter nazwisk autorów artykułu.

W 1957 roku David Bohm wraz ze swoim studentem Yakirem Aharonovem opublikowali inną wersję paradoksu EPR. Opisali oni pierwotny argument Einsteina, Podolskiego i Rosena wykorzystując pojęcie spinu. Myślowy eksperyment Bohma jest czytelniejszy od oryginalnej wersji i częściej używany do zaprezentowania istoty paradoksu EPR. Zanim opiszę ten eksperyment muszę wyjaśnić kilka pojęć.

Superpozycja kwantowa

Stan obiektu w mechanice kwantowej jest wektorem w przestrzeni wektorowej nazywanej przestrzenią Hilberta [2]. Baza tej przestrzeni, czyli zbiór wszystkich wzajemnie prostopadłych wersorów (wektorów jednostkowych), odpowiada wszystkim możliwym wartościom danej własności obiektu (np. położenia, pędu, spinu itp.). W konsekwencji stan kwantowy jest superpozycją (liniową kombinacją) stanów, z których każdy reprezentuje konkretną wartość danej własności tego obiektu. Stany te nazywamy stanami własnymi operatora reprezentującego daną wielkość fizyczną, tak zwanej obserwabli. W notacji Diraca [3] nazywanej też notacją *bra-ket* (od angielskiego słowa bracket oznaczającego nawias) stan $|\psi\rangle$ możemy zapisać w postaci wektora[3]

$$|\psi\rangle = c_1|\alpha_1\rangle + c_2|\alpha_2\rangle + c_3|\alpha_3\rangle + \ldots$$

gdzie $|\alpha_i\rangle$ są wektorami bazowymi w przestrzeni Hilberta, a kwadrat modułu liczb c_i (mogą to być liczby zespolone) określa prawdopodobieństwo wystąpienia układu w stanie $|\alpha_i\rangle$.

Superpozycja stanów wynika wprost z formalizmu matematycznego mechaniki kwantowej, ale jej interpretacja stanowi problem. Zgodnie z interpretacją kopenhaską stan kwantowy przed pomiarem nie ma fizycznego sensu, tzn. żadna z własności, którą chcielibyśmy zmierzyć nie ma przypisanej konkretnej wartości. Dopiero w wyniku pomiaru funkcja falowa doznaje redukcji do jednego stanu. Mówimy wówczas o kolapsie funkcji falowej. Wektor stanu zostaje zrzutowany na konkretny wektor bazy przestrzeni Hilberta. Układ znajduje się wówczas w tak zwanym czystym stanie kwantowym.

[2] W ten sposób Heisenberg próbował wyjaśnić odkrytą przez siebie zasadę nieoznaczoności będącą konsekwencją jego formalizmu macierzowego.

[3] W przypadku takich wielkości fizycznych jak np. położenie cząstki swobodnej baza przestrzeni Hilberta ma nieprzeliczalny wymiar i sumę musimy zastąpić całką.

eprasa.pl 80f50968f9

Można powiedzieć, że w mechanice kwantowej pomiar nie dostarcza nam informacji o stanie układu przed pomiarem, lecz o stanie układu tuż po pomiarze.

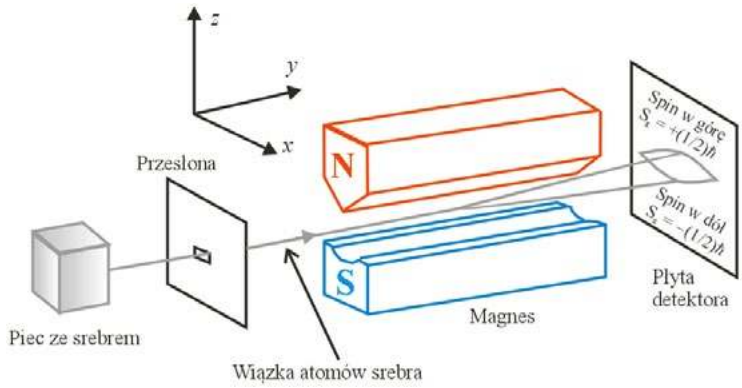
Superpozycja stanów sprawia, że nie możemy opisywać stanów układu kwantowego korzystając z pojęć i wyobrażeń ze świata makroskopowego. Np. nie istnieje coś takiego jak trajektoria ruchu cząstki, ale nieuprawnione jest też mówienie, że cząstka znajduje się w wielu miejscach w tym samym czasie.

Spin

Cząstki elementarne wykazują pewną kwantową własność nazywaną spinem. Nazwa spin[4] związana jest z naszym klasycznym wyobrażeniem na pochodzenie tej własności jaką jest moment pędu cząstki wynikający z jej ruchu obrotowego wokół własnej osi. W rzeczywistości spin nie wynika z ruchu obrotowego cząstki, lecz z własności funkcji falowej opisującej cząstkę, a dokładnie z symetrii tej funkcji względem transformacji obrotu. Spiny mogą przyjmować wartości 0ħ, ½ħ, 1ħ, 1½ħ, 2ħ itd., gdzie ħ (czytamy *ha kreślone*) jest równe stosunkowi stałej Plancka h i liczby 2π ($\hbar = h/(2\pi)$). Każdy typ cząstek elementarnych ma właściwy dla siebie spin. Niektóre cząstki mają spiny całkowite i nazywamy je bozonami, a niektóre połówkowe i nazywamy je fermionami. Często, dla uproszczenia opuszczamy symbol ħ i mówimy np. o spinie ½ mając na myśli spin, którego wartość wynosi ½ħ.

W przypadku klasycznego momentu pędu rzut wektora momentu pędu o wartości L na wybrany kierunek może przyjmować dowolną wartość z przedziału od $-L$ do $+L$, przy czym wartość tego rzutu będzie zależała od wyboru kierunku. Natomiast spin jest skwantowany i jego rzut na dany kierunek może przyjmować tylko pewne wartości różniące się o kwant momentu pędu, czyli ħ. Np. dla spinu o wartości 2ħ rzut spinu na dany kierunek może przyjmować jedynie wartości –2ħ, –1ħ, 0ħ, +1ħ +2ħ. Na dodatek jest tak niezależne od tego wzdłuż jakiego kierunku dokonujemy pomiaru!

Elektrony, protony i neutrony mają spin ½. Dla takiego spinu możemy dostać tylko dwie wartości rzutu spinu na wybrany przez nas kierunek +½ lub –½. Do opisania tych dwóch stanów spinu używamy często określeń: *spin w górę* i *spin w dół* i oznaczamy strzałkami ↑ i ↓. Przy czym pojęcia *góra* i *dół* są tu umowne. Kierunki *w górę* i *w dół* są wyznaczone przez ułożenie aparatury pomiarowej. Ze spinem cząstki związany jest jej moment magnetyczny i cząstka mająca niezerowy spin zachowuje się jak mikroskopijny magnes. Jeśli będzie ona przelatywać przez niejednorodne pole magnetyczne, to jej tor ulegnie zakrzywieniu. Nie chodzi tu o zakrzywienie toru wynikające z działania siły Lorentza, jaka działa na poruszającą się w polu magnetycznym cząstkę obdarzoną ładunkiem elektrycznym, lecz o zakrzywienie wynikające z odziaływania spinowego momentu magnetycznego cząstki z niejednorodnym polem magnetycznym.



Rysunek 1. Schemat doświadczenia Sterna-Gerlacha.

W przypadku cząstek o spinie ½ tor może zakrzywić się jedynie w dwóch przeciwnych kierunkach. Rozważmy pole magnetyczne wytworzone przez magnes taki jak na rysunku 1. Cząstka może odchylić swój tor w kierunku bieguna północnego lub południowego. W kierunku bieguna północnego będzie zakrzywiany tor cząstki o spinie, którego rzut na oś z ma wartość +½, a kierunku bieguna południowego będzie zakrzywiany tor cząstki o spinie, którego rzut na oś z ma wartość –½. W pierwszym przypadku mówimy o *spinie w górę*, a w drugim o *spinie w dół* niezależnie od tego jak w przestrzeni zorientowany jest magnes i związany z nim układ współrzędnych. Takie zachowanie strumienia atomów srebra przelatujących przez niejednorodne pole magnetyczne zaobserwowali Otto Stern i Walter Gerlach w słynnym doświadczeniu z 1922 roku[5]. Efekt ten wyjaśnił pięć lat później Wolfgang Pauli wprowadzając pojęcie spinu.

Singletowy stan spinowy

Układy złożone z cząstek elementarnych mają spin będący sumą wektorową spinów cząstek, z których zbudowany jest układ (np. jądro atomu). Wyobraźmy sobie, że utworzyliśmy układ złożony z dwóch cząstek o spinie ½ i doprowadziliśmy go do stanu, w którym jego wypadkowy spin jest zerowy. Tego typu stan nazywamy stanem singletowym. Takim stanem jest np. stan $1s^2$, w jakim znajdują się elektrony na pierwszej powłoce elektronowej atomu (powłoce K). Jest tak ze względu na zakaz Pauliego, zgodnie z którym fermiony, a takimi cząstkami są elektrony, nie mogą znajdować się w stanie opisywanym tym samym zestawem liczb kwantowych. W przypadku powłoki K oba elektrony muszą się różnić spinową liczbą kwantową, czyli jeden musi mieć spin skierowany w górę, a drugi spin skierowany w dół. Powiedzenie, że jeden z nich ma spin skierowany w górę, a drugi w dół jest pewnym uproszczeniem. Jak już wiemy nawet pojedyncza cząstka nie ma do momentu pomiaru określonego swojego stanu. Jej stan spinowy jest superpozycją stanów spinowych w górę i w dół np.

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\uparrow\rangle - |\downarrow\rangle\right).$$

W układzie cząstek będącym w stanie singletowym również nie znamy stanów spinowych cząstek składowych, a mimo to wiemy, że spin całości jest zerowy! Jest

[4] Spin w języku angielskim oznacza m.in. wir, kręcić, obracać.
[5] W lutym 2022 roku minęło 100 lat od tego ważnego odkrycia.

eprasa.pl 80f50968f9

to bardzo dziwna własność układu – lepiej znamy stan układu niż stany jego części składowych. Takiej własności nie spotykamy w przypadku układów klasycznych. Ta nietypowa własność układu kwantowego jest cechą specyficznego stanu, który nazywamy *stanem splątanym.* Pojęcia tego użył jako pierwszy Schrödinger w 1935 roku w swoim słynnym artykule o kocie. Schrödinger posłużył się tym pojęciem, aby opisać dziwne oddziaływanie obiektów kwantowych na odległość, to samo oddziaływanie, które kwestionowali Einstein, Podolski i Rosen.

Splątanie możemy uzyskać w przypadku wielu cech obiektów kwantowych, nie tylko spinu. Dla przykładu eksperymenty, które obaliły koncepcję zmiennych ukrytych były głównie prowadzone na układach splątanych fotonów, gdzie badaną własnością była ich polaryzacja. Tymi eksperymentami zajmę się w następnej części artykułu.

Stany splątane

W poprzednim punkcie na przykładzie stanu singletowego wprowadziłem pojęcie *stanu splątanego*. Należałoby jeszcze dodać, że stan singletowy jest stanem maksymalnie splątanym. W tym punkcie wyjaśnię od strony formalnej co nazywamy stanem splątanym i kiedy stan jest maksymalnie splątany. Ale jeśli ktoś nie lubi formalizmu matematycznego, to może opuścić ten punkt. Nie jest on konieczny do zrozumienia dalszej części artykułu.

Wyobraźmy sobie dwa obiekty kwantowe A i B znajdujące się w stanach

$$|\psi\rangle_A = \sum_i c_i^A |i\rangle_A ,$$

$$|\phi\rangle_B = \sum_j c_j^B |j\rangle_B .$$

Stan układu AB możemy zapisać w postaci

$$|\Psi\rangle_{AB} = \sum_{i,j} c_{ij}^{AB} |i\rangle_A |j\rangle_B .$$

W pewnych przypadkach stan układu kwantowego jest iloczynem tensorowym [6] stanów jego podukładów[6]. W takim przypadku dla wszystkich indeksów *i, j* zachodzi związek

$$c_{ij}^{AB} = c_i^A c_j^B ,$$

Są jednak stany, których nie da się zapisać w postaci iloczynu tensorowego stanów podukładów. Takie stany nazywamy *stanami splątanymi.* W przypadku stanu splątanego dla co najmniej jednej pary indeksów *i, j* współrzędne wektora opisującego stan układu nie są równe iloczynowi współrzędnych wektorów stanów jego podukładów, czyli

$$c_{ij}^{AB} \neq c_i^A c_j^B .$$

Stopień splątania zależy od tego dla ilu indeksów *i, j* zachodzi powyższy związek. Jeśli jest tak dla wszystkich indeksów, to mówimy o maksymalnym splątaniu. Analizując własności stanu splątanego można zauważyć ciekawą własność – stan całego układu jest lepiej określony niż stany jego części. Jeśli mamy obiekty kwantowe splątane w maksymalnym stopniu, to po zmierzeniu stanu jednego z tych obiektów z góry wiemy jaki będzie wynik pomiaru stanu drugiego z nich.

Rozważmy dla przykładu dwie cząstki o spinach ½ znajdujące się w następujących stanach

$$|\psi\rangle_A = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\uparrow\rangle_A - |\downarrow\rangle_A\right),$$

$$|\phi\rangle_B = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\uparrow\rangle_B - |\downarrow\rangle_B\right).$$

Stany tych cząstek są takie, że pomiar spinu każdej z nich da nam z jednakowym prawdopodobieństwem wynik: spin w górę lub spin w dół. Utwórzmy z tych cząstek układ w stanie singletowym. Stan ten możemy zapisać w takiej postaci

$$|\Psi\rangle_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\uparrow\rangle_A |\downarrow\rangle_B - |\downarrow\rangle_A |\uparrow\rangle_B\right).$$

Zauważmy, że

$$c_{\uparrow\uparrow}^{AB} = 0 \neq c_\uparrow^A c_\uparrow^B = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2},$$

$$c_{\downarrow\downarrow}^{AB} = 0 \neq c_\downarrow^A c_\downarrow^B = \frac{-1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{-1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2},$$

$$c_{\uparrow\downarrow}^{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}} \neq c_\uparrow^A c_\downarrow^B = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{-1}{\sqrt{2}} = -\frac{1}{2},$$

$$c_{\downarrow\uparrow}^{AB} = -\frac{1}{\sqrt{2}} \neq c_\downarrow^A c_\uparrow^B = \frac{-1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = -\frac{1}{2}.$$

A zatem stan singletowy jest stanem maksymalnie splątanym. Spin układu jest zerowy chociaż nie znamy stanów spinowych obu cząstek. Ale jeśli zmierzymy stany spinowe tych cząstek, to dostaniemy z jednakowym prawdopodobieństwem wyniki: spin w górę dla cząstki A i spin w dół dla cząstki B lub spin w dół dla cząstki A i spin w górę dla drugiej cząstki. Czyli jeśli pomiar wykaże, że cząstka A ma spin w górę, to cząstka B będzie miała na pewno spin w dół, zaś gdy pomiar wykaże, że cząstka A ma spin w dół, to cząstka B będzie miała na pewno spin w górę.

Paradoks EPR w wersji Bohma

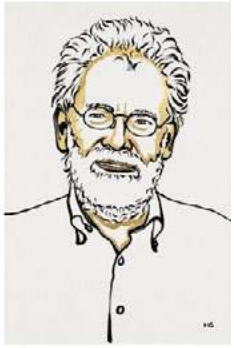
Przejdźmy teraz do opisu eksperymentu myślowego EPR w wersji spinowej zaproponowanej przez Bohma. Załóżmy, że stworzyliśmy układ dwóch cząstek o spinie ½ w stanie singletowym. Rozdzielmy teraz obie cząstki. Jeśli zrobimy to odpowiednio, to stan spinowy układu nie zmieni się. Cząstki będą nadal w stanie splątanym i spin wypadkowy układu nadal będzie zerowy. Zmierzmy teraz spin jednej z cząstek, np. cząstki A. Jak pamiętamy stan spinowy tej cząstki nie jest określony przed pomiarem, dopiero w wyniku pomiaru jej stan przyjmie z tym samym prawdopodobieństwem jedną z dwóch możliwości – spin w górę lub spin w dół. Ale jeśli następnie zmierzymy stan spinu cząstki B ustawiając aparaturę pomiarową w tym samym

[6] Stany podukładów są wektorami w różnych przestrzeniach Hilberta, a stan układu jest wektorem przestrzeni Hilberta będącej iloczynem tensorowym tych przestrzeni. Wymiar przestrzeni Hilberta, w której zapisujemy stan układu jest iloczynem wymiarów tamtych przestrzeni.

eprasa.pl 80f50968f9

Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach
Alain Aspect

Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach
John F. Clauser



Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach
Anton Zeilinger

kierunku co w przypadku pomiaru spinu cząstki A, to okaże się, że jest on przeciwny do spinu pierwszej cząstki.

Zgodnie z interpretacją kopenhaską stan spinu cząstki A ustalił się dopiero w wyniku jego pomiaru, a w takim razie cząstka B musiała ustalić swój spin dopiero po pomiarze spinu pierwszej z nich. Według Einsteina, Podolskiego i Rosena jeśli cząstki nie miały wcześniej ustalonych spinów, to musiałaby nastąpić wymiana informacji między cząstką A i cząstką B, żeby ta druga „wiedziała" jak ma ustawić swój spin. Ale cząstki możemy odsunąć od siebie na dużą odległość a pomiary spinów obu cząstek przeprowadzić w odstępie czasu na tyle krótkim, żeby żadna informacja nie zdążyła przedostać się od cząstki A do cząstki B. Wiemy przecież ze szczególnej teorii względności, że żadna informacja nie może być przenoszona z szybkością większą niż szybkość światła w próżni. To dla Einsteina, Podolskiego i Rosena był dowód na niekompletność mechaniki kwantowej i niepoprawność interpretacji kopenhaskiej. Einstein nazwał splątanie *„upiornym działaniem na odległość"* (niem. *„spukhafte Fernwirkungen", ang. „spooky actions at a distance"*). Według niego stany kwantowe obu cząstek są dobrze określone od samego początku, ale zapisane są w postaci tzw. zmiennych ukrytych[7], których mechanika kwantowa w obecnej wersji nie uwzględnia. W ten sposób próbował bronić fundamentu szczególnej teorii względności tzw. zasady realizmu lokalnego.

Argument o konieczności natychmiastowej wymiany informacji między cząstkami wydawał się być miażdżący dla mechaniki kwantowej w jej niedeterministycznej postaci. To jednak nie zrażało fizyków, mechanika kwantowa rozwijała się bardzo dobrze i odnosiła coraz więcej sukcesów.

Rozstrzygnięcie sporu poprzez eksperyment długo było niemożliwe, po pierwsze z powodu braku możliwości technicznych, a po drugie z powodu braku kryterium przesądzającego o poprawności jednej z tych dwóch idei. Samo uzyskanie w wyniku pomiaru ustawienia spinu drugiej cząstki zawsze przeciwnego do spinu pierwszej nie odpowiada na nasze pytanie. Nie wiemy, czy dzieje się tak dlatego, że spiny były tak ustawione od początku, jak chciał Einstein, czy też dlatego, że cząstki znajdowały się w stanie splątanym.

[7] Sam Einstein nie użył nigdy pojęcia zmienne ukryte. To pojęcie pojawiło się później

Sytuacja uległa zmianie dopiero w latach 60. ubiegłego wieku. W 1964 roku północnoirlandzki fizyk John Stewart Bell wykorzystując eksperyment myślowy EPR w wersji zaproponowanej przez Bohma udowodnił twierdzenie, które można sformułować następująco: *„Żadna lokalna teoria zmiennych ukrytych nie może opisać wszystkich zjawisk mechaniki kwantowej"* [7]. Twierdzenie to jest znane w postaci tak zwanych nierówności Bella. Bell wyprowadził je przy założeniu istnienia zmiennych ukrytych. Z nierówności Bella wynika, że zdefiniowane przez niego statystyczne funkcje korelacji nie mogą przekraczać pewnych wartości. Tymczasem funkcje korelacji wyliczone na gruncie mechaniki kwantowej osiągają wartości większe niż te występujące w nierównościach Bella. Korelacje kwantowe są silniejsze niż klasyczne!

Oczywiście sam fakt, że formalizm mechaniki kwantowej łamie nierówności Bella o niczym nie przesądza. Odpowiedź na nasze pytanie może dać jedynie eksperyment. Nierówności Bella stworzyły podstawy do eksperymentalnego rozstrzygnięcia dylematu, czy splątanie kwantowe jest realnym efektem wynikającym z praw rządzących światem, czy też nasza interpretacja związanych z nim zjawisk jest błędem wynikającym z niepełnej wiedzy o rządzących w świecie prawach. Przepis na rozstrzygnięcie dylematu jest następujący: należy przeprowadzić dużą liczbę eksperymentów pozwalających na wyliczenie wartości statystycznych funkcji korelacji występujących w nierówności Bella. Jeśli wyliczone na podstawie tych eksperymentów wartości tych funkcji będą spełniały nierówność Bella, to rację miał Einstein, a jeśli nie będą jej spełniały, to rację miał Bohr.

Bell wytyczył kierunek działań, ale jego nierówności nie były wygodne do eksperymentalnej weryfikacji. Pięć lat później, w 1969 roku, czterej fizycy: John Clauser (jeden z wymienionych we wstępie laureatów nagrody Nobla) i jego współpracownicy, Michael Horne, Abner Shimony i Richard Holt [8] zaproponowali praktyczniejszą wersję nierówności Bella. Ich nierówność nazywana jest nierównością CHSH (od pierwszych liter nazwisk) lub nierównością Bella-CHSH, choć bardzo często właśnie ta nierówność nazywana jest błędnie nierównością Bella.

Nierówność Bella-CHSH i eksperymenty które ją naruszyły będą tematem następnej części artykułu.

dr Jan Kurzyk
Katedra Fizyki Politechniki Krakowskiej

LITERATURA

[1] https://pl.wikipedia.org/wiki/Laureaci_Nagrody_Nobla_w_dziedzinie_fizyki [Dostęp 08.12.2022].
[2] https://pl.wikipedia.org/wiki/Przestrze%C5%84_Hilberta [Dostęp 08.12.2022].
[3] https://pl.wikipedia.org/wiki/Notacja_Diraca [Dostęp 08.12.2022].
[4] W. Isaacson, *Einstein. Jego życie i jego wszechświat,* przeł. J. Skowroński Wydawnictwo W.A.B. Warszawa 2010.
[5] A. Einstein, B. Podolski, N. Rosen, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete,* Phys. Rev. 47, 1935.
[6] https://pl.wikipedia.org/wiki/Iloczyn_tensorowy_przestrzeni_Hilberta [Dostęp 08.12.2022].
[7] https://pl.wikipedia.org/wiki/Twierdzenie_Bella [Dostęp 08.12.2022].
[8] J. F. Clauser, M. A. Horne, A. Shimony, and R. A. Holt, Phys. Rev. Lett. 23, 880 (1969).

eprasa.pl 80f50968f9

Co było i co osiągnięto, czyli
Jedne z najważniejszych wydarzeń minionego 2022 roku w fizyce

Miniony rok 2022 obfitował w wiele wydarzeń nie tylko politycznych, ale także w świecie badań naukowych dokonano odkrycia nowych możliwości, które poznajemy i na rozwój których czekamy w 2023 r.

Kazimierz **Mikulski**

Matin Durrani, redaktor naczelny, *Physics World* w pierwszym biuletynie w 2023 r. pisze, że *„Zanim zanurzysz się w nowy rok, może po raz ostatni spojrzysz wstecz na 2022 rok?*

Świat nauk fizycznych odnotował wiele ciekawych i nowych spojrzeń na stan materii; ogólnie stan Przyrody pisanej z dużej litery. Przy ogromie nowych informacji i doniesień naukowych, spójrzmy tylko na wybrane zagadnienia.

Ciekawe informacje z fizyki znajdujemy na stronie o adresie https://alanstonebraker.com/. Umieszczono nie tylko oryginalne, ale przede wszystkim aktualne wyniki badań i komunikatów naukowych

Redaktorzy magazynu *Physics* wybierają swoje ulubione artykuły z 2022 r.[1] Piszą w telegraficznym skrócie i odsyłając do autorskich komunikatów.

Synteza laserowa

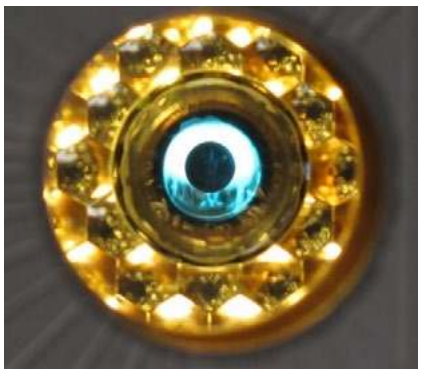
Redaktorzy *Physics* wskazują, że dzięki oszałamiającym zdjęciom z Kosmicznego Teleskopu Jamesa Webba, przełomomie w syntezie laserowej, włączeniu zmodernizowanego Wielkiego Zderzacza Hadronów i pierwszym testom systemu obrony asteroid, rok 2022 dostarczył wielu wyników do omówienia.

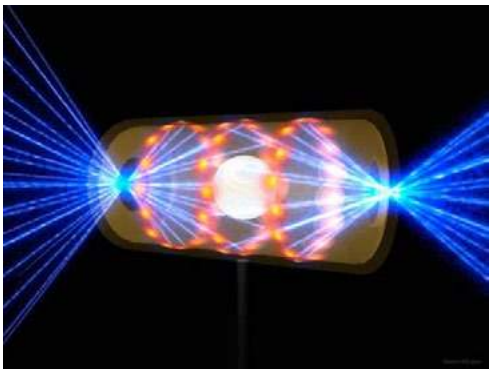
Informacje o wydarzeniach 2022 r. rozpoczyna komunikat – „*Sztandarowy rok fuzji laserowej*". Rok zakończył się cennym wynikiem badania, a National Ignition Facility (NIF) (*Krajowa Instalacja Zapłonowa*) osiągnął długo oczekiwany rezultat. Z początkiem tego roku zespół uzyskał zapłon, pozwalający na samopodtrzymujący się stan spalania, w którym lokalne samonagrzewanie dominuje zarówno na zewnątrz, jak i na stratach energii do środowiska.[2]

Pod adresem https://physics.aps.org/articles/v15/67 Mateusz Zepf[3] przedstawia komunikat pt.: „*Schemat syntezy laserowej osiągnął zapłon – ważny krok na drodze do produkcji energii*." NIF wykorzystuje największy na świecie laser do ogrzewania i kompresji małej kapsuły zawierającej paliwo wodorowe, a tym samym indukowania reakcji syntezy jądrowej w paliwie, podejście znane jako inercyjna synteza jądrowa.[4]

Na początku 2021 r. zespół z NIF osiągnął kamień milowy, pokazując, że może wytworzyć płonącą pla-

[1] Materiale z 19 XII 2022 r. https://physics.aps.org/articles/v15/197
[2] patrz Fuzja podkręca ciepło (temperaturę) adres: https://physics.aps.org/articles/v15/67
[3] Mateusz Zepf – Helmholtz Institute Jena, Niemcy, 8 VIII 2022 r.
[4] J. Lindl, „Rozwój podejścia z napędem pośrednim do fuzji bezwładnościowej i podstaw fizyki celu dla zapłonu i wzmocnienia", Phys. Plasmas 2, 3933 (1995)





Fotografia 1. Jeden z celów urządzeń w NIF. Pośrodku widać kulistą kapsułę, w której ładowane jest paliwo termojądrowe. Zewnętrzny cylinder to hohlraum, które przekształca przychodzące światło lasera w promienie rentgenowskie, które bombardują kapsułę ciepłem

Fotografia 2. Matthew Zepf – prof. na Uniwersytecie Friedricha Schillera w Jenie i dyrektor Instytutu Helmholtza w Jenie. Kieruje programem laserów dużej mocy obejmującym dwa multiterawatowe systemy laserowe. Pracował nad laserami dużej mocy. Działał w Wielkiej Brytanii, korzystając z urządzeń laserowych dużej mocy w Rutherford Appleton Laboratory's Central Laser Facility.

Rysunek 1. Wykonane przez artystę przedstawienie wiązek laserowych NIF wchodzących przez otwory na obu końcach hohlraum zawierającego docelowy śrut. Ściskając i ogrzewając próbkę, wiązki indukują syntezę jądrową w grudce. Źródło: https://physics.aps.org/articles/v14/168

eprasa.pl 80f50968f9

zmę[5] stan, w którym dominującym źródłem ogrzewania paliwa jest samonagrzewanie w wyniku reakcji syntezy jądrowej, a nie zewnętrzne ogrzewanie przez impulsy laserowe. **Dziś NIF informuje, że osiągnęli kolejny „kamień milowy" w badaniach nad syntezą jądrową: wytworzyli plazmę**, w której samonagrzewanie lokalnie przewyższa nie tylko ogrzewanie zewnętrzne, ale także mechanizmy strat, spełniając warunki wskazane w wcześniejszych opracowaniach.[6] W rezultacie schemat kusząco zbliża się do świętego Graala w tej dziedzinie — uzyskanie fuzji w celu wytworzenia energii netto większej niż ta zawarta w napędzających impulsach laserowych. (patrz Gaining Ground in Nuclear Fusion[7]). Podczas gdy praktyczny reaktor termojądrowy oparty na laserze jest odległy o dziesięciolecia, wyniki pokazują, że synteza laserowa postępuje w tempie podobnym do tempa rozwoju komputerów, mówi Matthew Zepf z Instytutu Helmholtza w Jenie.

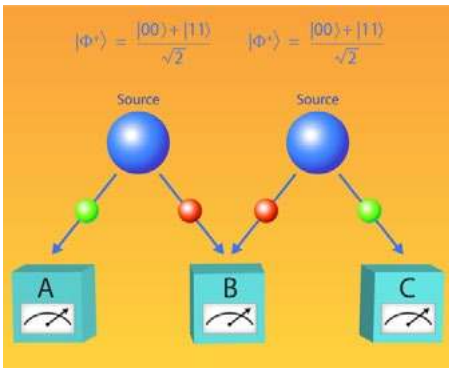
Nie wyobrażaj sobie, że fizyka kwantowa jest prawdziwa

Redaktorzy magazynu *Physics* piszą, że w kwantowym równaniu Schrödingera – jednym z podstawowych równań nierelatywistycznej mechaniki kwantowej, sformułowane przez austriacka - Erwina Schrödingera w 1926 r., pozwalającym opisać ewolucję stanu układu kwantowego w czasie w sposób znacznie dokładniejszy, niż czyni to mechanika klasyczna. W nierelatywistycznej mechanice kwantowej równanie Schrödingera odgrywa rolę fundamentalną, analogiczną do roli zasad dynamiki Newtona w mechanice klasycznej.[8]

$$\hat{H}\left|\Psi(t)\right\rangle = \mathrm{i}\hbar\frac{\partial}{\partial t}\left|\Psi(t)\right\rangle$$

gdzie: i – jednostka urojona, $\hbar = h/2\pi$ gdzie h – stała Plancka, $\hat{H}$ – operator Hamiltona (operator energii całkowitej układu, w skrócie nazywany hamiltonianem), $\left|\Psi(t)\right\rangle$ – wektor stanu układu

Aby rozwiązać równanie Schrödingera dla danego układu kwantowego, należy znaleźć właściwą postać operatora Hamiltona i wyrazić wektor stanu w odpowiedniej reprezentacji. W literaturze przedmiotu zapisano dwie reprezentacje – położeniową i spinową. W równaniu występuje liczba urojona <*i*>, co oznacza, że rozwiązania tego równania mogą mieć wartości zespolone. Ale czy liczby zespolone to tylko matematyczna wygoda? Czy teorię kwantową można sformułować tylko na liczbach rzeczywistych?



Fotografia 3. Alessio Avella – doktorat z fizyki na Uniwersytecie w Turynie w 2014 r. Zajmuje się eksperymentalną optyką kwantową o zainteresowaniach naukowych rozciągających się od technologii kwantowych po podstawy mechaniki kwantowej. Innowator protokołów pomiarowych w mechanice kwantowej i do rozwoju nowych technik obrazowania kwantowego i detekcji kwantowej. Źródło: https://physics.aps.org/authors/alessio_avella

Rysunek 2. Szkic koncepcyjny gry trójstronnej wykorzystanej przez naukowców w celu wykazania, że prawdziwa teoria kwantowa nie może opisać pewnych pomiarów w małych sieciach kwantowych. W grze biorą udział dwa źródła rozprowadzające splątane kwantowe. Źródło: https://physics.aps.org/articles/v15/7#

Na początku roku eksperymenty dwóch niezależnych grup — oparte na „grze", w której trzy strony wykonują podobne do Bella eksperymenty wskazały konieczność innego ujęcia problemu. (Zobacz artykuł: https://physics.aps.org/articles/v15/7 Mechanika kwantowa musi być złożona – szczegóły pod adresem https://physics.aps.org/articles/v15/7).

Alessio Avella z Narodowego Instytutu Badań Metrologicznych (INRIM) w Turynie, już 24 stycznia 2022 r. pisze o dwóch **niezależnych badaniach pokazujących, że do odtworzenia wyników eksperymentów konieczne jest sformułowanie mechaniki kwantowej obejmujące liczby zespolone, a nie rzeczywiste.**[9]

Liczby zespolone są niezbędne do opisania takich eksperymentów, co sugeruje, że liczby rzeczywiste są niewystarczające do opisania świata kwantowego, tak jak go ogólnie rozumiemy.

Kolejne zagadnienie opisane przez Katherine Wright, na łamach *Physics*, to „**Czarna dziura Drogi Mlecznej pojawia się w polu widzeni**a".

W maju 2022 r. naukowcy dokonali drugiego w historii zdjęcia czarnej dziury. Pierwsze, opublikowane w 2019 r., przedstawiało supermasywną czarną dziurę w odległości ponad 50 milionów lat świetlnych od Ziemi. Drugie ukazywało Sagittarius A*, czarną otchłań, która znajduje się zaledwie 26 000 lat świetlnych od nas. Sagittarius A* (w skrócie Sag A*) ma masę około 4 milionów razy większą od Słońca. Naukowcy podejrzewali, że obiekt ten

[5] AB Zylstra *i in.*, „Płonąca plazma uzyskana w syntezie inercyjnej", Nature 601 , 542 (2022)

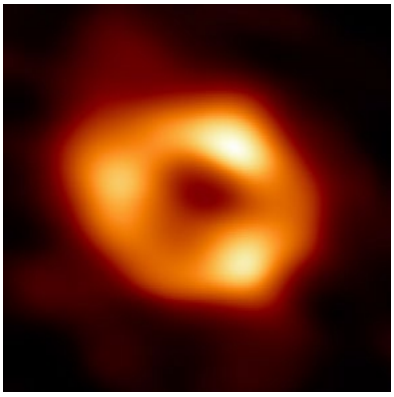
[6] H. Abu-Shawareb *i in.* (Indirect Drive ICF Collaboration), „Kryterium Lawsona dotyczące zapłonu przekroczone w eksperymencie inercyjnej syntezy jądrowej", Phys. Wielebny Lett. 129 , 075001 (2022). AL Kritcher, „Projekt eksperymentu syntezy inercyjnej przekraczający kryterium Lawsona dotyczące zapłonu", Phys. Wersja E 106 , 025201 (2022). AB Zylstra i in., „Eksperymentalne osiągnięcie i sygnatury zapłonu w National Ignition Facility", Phys. Wersja E 106 , 025202 (2022).

[7] *Zapłon pierwszy w reakcji syntezy jądrowej* – 30 XI 2021 r. *W sierpniu reakcja syntezy jądrowej w NIF dała rekordową energię 1,3 MJ, uwalniając po raz pierwszy więcej energii niż pochłonęła kapsułka z paliwem.* https://physics.aps.org/articles/v14/168

[8] https://pl.wikipedia.org/wiki/R%C3%B3wnanie_Schr%C3%B6dingera

[9] Ibidem

eprasa.pl 80f50968f9



Fotografia 4. Obraz czarnej dziury w centrum naszej Galaktyki, uchwycony przez Teleskop Horyzontu Zdarzeń (EHT). Źródło: https://physics.aps.org/articles/v15/74

jest czarną dziurą ze względu na sposób, w jaki gwiazdy krążą wokół niego, powiedział Michael Johnson, astrofizyk z Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, który pracował nad wykonaniem tego zdjęcia. „*Gwiazdy dały nam dokładną prognozę czegoś, czego zupełnie nie widzieliśmy*" — mówi. Ale bez wizualnych dowodów naukowcy nie byli w stanie potwierdzić tego pomysłu.[10] First Image of the Milky Way's Black Hole[11] – *Pierwsze zdjęcie czarnej dziury w Drodze Mlecznej.* – https://physics.aps.org/articles/v15/74.

Bezpośrednie sfotografowanie czarnej dziury w centrum naszej Galaktyki wymagało od badaczy odzyskania pełnego obrazu ze zdjęć wykonanych przez oddzielne teleskopy i jednocześnie uszkodzonych przez rozmycie spowodowane ruchem gazu wokół Sagittarius A*. W celu obejścia tych problemów, zespół opracował algorytmy, które mogą wybrać spośród tysięcy zrekonstruowanych obrazów obraz najlepiej pasujący do niekompletnych danych. „*Dojście do tego wniosku zajęło lata, ale nigdy nie cofnęliśmy się przed wyzwaniem*" – powiedziała Katie Bouman, inżynier z California Institute of Technology, pracująca nad algorytmami.

Więcej wkrótce na temat bozonu Higgsa

Dziesięć lat po odkryciu bozonu Higgsa nic nie wymyka się modelowi standardowemu. Ale fizycy cząstek elementarnych uważają, że badanie Higgsa jest ważniejsze niż kiedykolwiek (patrz **The Era of Higgs Physics** – *Era fizyki Higgsa*).[12] Wiedza o tym, jak Higgs oddziałuje ze sobą i innymi cząstkami lub znalezienie innych cząstek podobnych do Higgsa, może pomóc fizykom rozszyfrować naturę ciemnej materii lub wyjaśnić dominację materii nad antymaterią. Trzeci przebieg Wielkiego Zderzacza Hadronów, który rozpoczął się w lipcu (patrz **Dobry omen dla przebiegu 3**)[13], podwoi liczbę cząstek Higgsa dostępnych do analizy. „*Naprawdę wkraczamy w erę precyzyjnej fizyki Higgsa*" — mówi Luca Malgeri, rzecznik CMS Collaboration, która współodkryła Higgsa.

Dwa kosmiczne kamienie milowe

12 lipca 2022 r. NASA podzieliła się pierwszymi zdjęciami wykonanymi przez Kosmiczny Teleskop Jamesa Webba, największy teleskop w Kosmosie.[14] Trzy miesiące później potwierdzono, że pierwsza demonstracja narzędzia do obrony planetarnej, która polegała na uderzeniu statkiem kosmicznym w asteroidę, zrobiła to, co zamierzała: zmienić orbitę asteroidy.[15]

26 września statek kosmiczny DART wielkości lodówki celowo zderzył się z asteroidą Dimorphos z prędkością 22 000 km/h. Od tego czasu astronomowie uważnie obserwowali asteroidę, aby wykryć wszelkie zmiany jej orbity wokół pobliskiej asteroidy. Opublikowane dane pokazują, że okres orbitalny Dimorphosa skrócił się o 32 minuty – a asteroida potrzebuje teraz 11 godzin i 23 minut, aby zakończyć obrót. Ta zmiana czasu jest 25 razy większa niż minimalna poprzeczka, którą naukowcy NASA wyznaczyli sobie jako udane odchylenie. „*To przełomowy moment dla obrony planetarnej i przełomowy moment dla ludzkości"*, powiedział administrator NASA Bill Nelson. Rok 2022 zapisze się w podręcznikach historii jako przełomowy dla badań kosmicznych.

Działania współczesnego Galileusza

Pod koniec lata (14 IX 2022 r.) eksperyment *MIKROSKOP* – zbudowany przez francuskie Narodowe Centrum Badań Kosmicznych (CNES), potwierdził zweryfikowanie zasady równoważności z najwyższą dotychczas osiągniętą precyzją.[16] Zgodnie z tą zasadą masy grawitacyjne i bezwładnościowe są w pełni równoważne, a znalezienie rozbieżności między nimi może ujawnić fizykę wykraczającą poza standardowy model, związaną z tajemnicami, takimi jak ciemna materia i ciemna energia. Eksperymenty przeprowadzane od czasów Galileusza z coraz większą czułością potwierdzały tę zasadę. Wolny od zakłóceń, które wpływają na testy uziemienia, MIKROSKOP pobił wszelkie rekordy czułości.

Byliśmy uczeni jednego z najbardziej sprzecznych z intuicją faktów dotyczących świata fizycznego: dwa obiekty o nierównej masie upuszczone w próżni spadną na ziemię jednocześnie. Galileusz rzekomo przetestował tę zasadę równoważności ze szczytu Krzywej Wieży w Pizie, podobnie jak astronauta David Scott, upuszczając młotek i pióro sokoła na powierzchnię Księżyca w 1971 r.

---

[10] Więcej https://physics.aps.org/articles/v15/74

[11] https://physics.aps.org/articles/v15/74

[12] *Era fizyki Higgsa* 1 VII 2022 r. Dziesięć lat fizyki Higgsa ujawniło, jak wiele jeszcze można się dowiedzieć o tajemniczej cząstce. https://physics.aps.org/articles/v15/98

[13] https://physics.aps.org/articles/v15/104

[14] *Ikoniczne kosmiczne obrazy z Kosmicznego Teleskopu Jamesa Webba*, (Iconic Cosmic Images from the James Webb Space Telescope) źródło: https://physics.aps.org/articles/v15/105.

[15] *Katastrofa statku kosmicznego zmienia orbitę asteroidy o 32 minuty,* Spacecraft Crash Changes Asteroid Orbita o 32 minuty źródło: https://physics.aps.org/articles/v15/156

[16] Filip Brax Satellite Confirms the Principle of Falling – *Satelita potwierdza zasadę spadania,* Instytut Fizyki Teoretycznej, Uniwersytet Paris-Saclay, Francja, Źródło: https://physics.aps.org/articles/v15/94

eprasa.pl 80f50968f9

Fotografia 5. Philippe Brax jest fizykiem teoretycznym pracującym w Instytucie Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Paris-Saclay we Francji. Specjalista od kosmologii i modyfikacji ogólnej teorii względności. Specjalizuje się w kosmologii teoretycznej. Autorem ponad 200 artykułów.
Źródło: https://physics.aps.org/articles/v15/94
Rysunek 3. Czy w próżni dwa przedmioty będą spadać z tą samą prędkością?
Teraz satelita MICROSCOPE potwierdził zasadę równoważności z rekordową precyzją, porównując swobodny ruch dwóch metalowych cylindrów.
Źródło: https://physics.aps.org/articles/v15/94#

Zdrowy rozsądek podpowiadałby, że cięższy przedmiot powinien spadać szybciej niż lżejszy. Grawitacja to specyficzna interakcja. Aby zrozumieć tę siłę – *i co może nam powiedzieć o innych tajemnicach, takich jak ciemna materia i ciemna energia* – musimy ją testować z coraz większą precyzją.

Eksperyment potwierdził, że dwie masy tytanu i platyny na pokładzie satelity krążącego wokół Ziemi spadają dokładnie w ten sam sposób z dokładnością do 1 części na 10^{15}. To potwierdzenie nakłada najściślejsze jak dotąd granice na alternatywy dla ogólnej teorii względności, która jest obecnie naszym najlepszym modelem grawitacji. Porównując prędkości opadania dwóch cylindrów wykonanych z różnych materiałów, wykazał, że jeśli masa grawitacyjna i bezwładna różnią się, to jest to mniej niż 1 część na (10^{15}).[17] *Magazyn Physics* również zilustrował eksperyment w postaci karykatury pt.: „*Zasada równoważności pod MIKROSKOPEM*".

Patrz: https://physics.aps.org/articles/v15/95. ***Karykatury ilustrują wyniki misji satelitarnej MICROSCOPE , która zmierzyła z astronomiczną czułością tempo opadania różnych obiektów pod wpływem grawitacji.***

Złamana tajemnica rtęci

Rtęć, pierwszy zidentyfikowany nadprzewodnik, zdradził niektóre ze swoich tajemnic, gdy naukowcy opracowali teoretyczny opis, który może przewidzieć zachowanie metalu na podstawie podstawowych zasad (zob. **Wyjaśnienie nadprzewodnictwa rtęci, 111 lat później**).[18]

Chociaż nadprzewodnictwo rtęci zostało później uznane za „*konwencjonalne*", żadna teoria mikroskopowa nie była w stanie go dokładnie opisać.[19] Będąc najstarszym znanym nadprzewodnikiem, rtęć w stanie stałym jest w tajemniczy sposób nieobecna we wszystkich obliczeniowych bazach danych nadprzewodników. Obliczenia ujawniają liczne anomalie we właściwościach elektronowych i sieciowych, które w większości można obsłużyć, z należytą ostrożnością, za pomocą nowoczesnych technik. W szczególności podkreśla się anomalną rolę sprzężenia spin-orbita w stabilności dynamicznej i w efektywnym oddziaływaniu kulombowskim i ostatecznie w temperaturze krytycznej.[20]

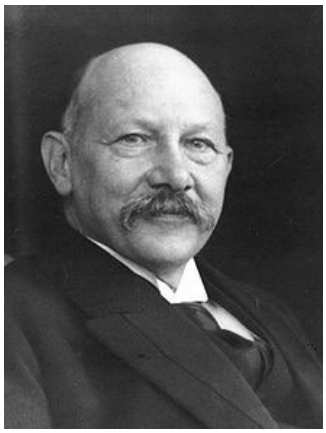
Uwzględniając subtelne i często zaniedbywane efekty związane z nadprzewodnictwem rtęci, naukowcy właśnie to zrobili. Zdobyta wiedza jest pomocna w poszukiwaniach konwencjonalnych nadprzewodników zgodnie

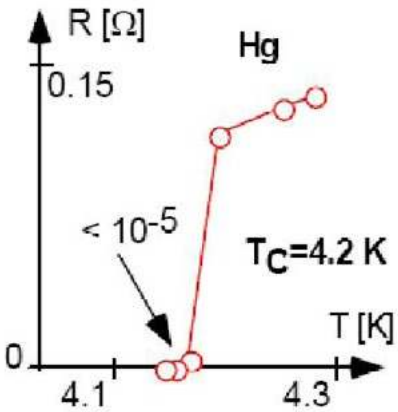
[17] P. Touboul *i in.* (współpraca MICROSCOPE), „ Misja *MICROSCOPE*: Ostateczne wyniki testu zasady równoważności", Phys. Wielebny Lett. 129 , 121102 (2022) .

[18] Patrz https://physics.aps.org/articles/v15/s155 z 3 XI 2022 r., s.155

[19] Cesare Tresca, Gianni Profeta, Giovanni Marini, Giovanni B. Bachelet, Antonio Sanna, Matteo Calandra i Lilia Boeri – Dlaczego rtęć jest nadprzewodnikiem, https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.106.L180501 – z 3 XI 2022 r.

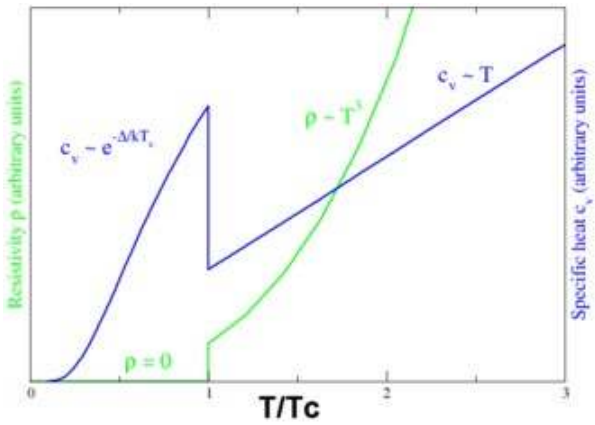
[20] https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.106.L180501

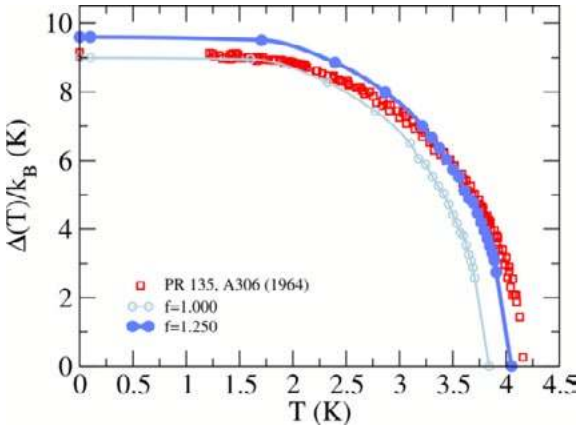




Fotografia 6. Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926) był holenderskim fizykiem i laureatem Nagrody Nobla – 1913 r. za „badania właściwości materii w niskich temperaturach, które doprowadziły między innymi do wytworzenia ciekłego helu ". Wykorzystał cykl Hampsona-Linde'a do skraplania helu w 1908 r. Odkrył nadprzewodnictwo w 1911 r. Fotografia z 1913 r. Rysunek obok to grafika przedstawiająca Heike Kamerlingh-Onnes w 1922 r. Źródło: https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1913/onnes/biographical/
Rysunek 4. Zjawisko całkowitego zaniku oporu elektrycznego nazwano nadprzewodnictwem. Dla rtęci Hg, występuje ono przy temperaturze 4.2 K. Dokładność pomiaru oporu jest wskazana na rysunku.

eprasa.pl 80f50968f9





Rysunek 5. Zachowanie pojemności cieplnej (cv, niebieski) i rezystywności (ρ, zielony) w nadprzewodzącym przejściu fazowym.
Źródło: https://en.wikipedia.org/wiki/Superconductivity
Rysunek 6. Porównanie luki teoretycznej (jasnoniebieskie kółka) i eksperymentalnej -czerwone kwadraty, wykreślone jako funkcja temperatury. Niebieskie pełne koła uzyskano przy liniowym skalowaniu widma elektronowego 1,25, jak opisano w tekście.
Źródło: https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.106.L180501#c10

z projektem materiałowym zbliżonych do warunków otoczenia, takich jak temperatura i ciśnienie.

Aby sprostać wyzwaniom związanym z rtęcią, Gianni Profeta z Uniwersytetu w L'Aquila we Włoszech wraz ze współpracownikami przeanalizował wszystkie właściwości fizyczne istotne dla konwencjonalnego nadprzewodnictwa, w którym pośredniczy sprzężenie elektronów z fononami. W szczególności naukowcy uwzględnili wcześniej zaniedbywane efekty relatywistyczne, które zmieniają częstotliwości fononów, poprawili opis efektów korelacji elektronów, które modyfikują pasma elektroniczne, i wykazali, że *d*-elektrony zapewniają anomalny efekt ekranowania, który promuje nadprzewodnictwo poprzez zmniejszenie odpychania kulombowskiego między elektronami nadprzewodzącymi. Dzięki tym ulepszeniom ich obliczenia dostarczyły *prognozę* T_c rtęci tylko o 2,5% niższą niż wartość eksperymentalna.

Nowe zrozumienie najstarszego nadprzewodnika znajdzie miejsce w podręcznikach, ale może również stanowić cenną lekcję dla badań nad nadprzewodnictwem, mówi Profeta. „*Jeśli nie uwzględnimy subtelnych efektów podobnych do tych, które mają znaczenie dla rtęci, obliczenia te mogą przeoczyć wiele interesujących materiałów lub pomylić się w przewidywaniach temperatury krytycznej o setki kelwinów*" – mówi.

Wyraźniejszy słuch kwantowy

Nowa technika szybkiego pomiaru par fotonów splątanych mechanicznie kwantowo doprowadziła do zademonstrowania kwantowego mikrofonu optycznego, który przewyższa klasyczny (**Hearing the Quantum Difference** – *Słyszenie różnicy kwantowej*).[21] Podczas demonstracji zespół zakodował serię słów wypowiedzianych przy niskim poziomie głośności w sygnały optyczne przenoszone przez splątane fotony, które następnie zostały wykryte i przekształcone w nagrania dźwiękowe.

Słuchacze identyfikowali słowa w tych „*nagraniach kwantowych*" dokładniej niż słowa nagrane równoważną techniką klasyczną. Naukowcy twierdzą, że ich demonstracja pokazuje potencjał ich metody do pomiaru szybkich, zaszumionych sygnałów, takich jak te generowane przez ruchy pojedynczych cząsteczek w komórkach biologicznych.

Ostatnie artykuły dotyczą tematyki równie ciekawej

- Kierowanie przepływem jednokierunkowym z polem dwukierunkowym 22 grudnia 2022 r. https://physics.aps.org/articles/v15/s174
- Rozwiązywanie pięt achillesowych pomiarów przewodnictwa cieplnego Halla 21 grudnia 2022 r. https://physics.aps.org/articles/v15/198
- Wykrywanie rozpadu ciemnej materii 21 grudnia 2022 r. https://physics.aps.org/articles/v15/s171

Z polskiego podwórka

Polski procesor kwantowy: od spektroskopii do… obliczeń kwantowych – o tym w jaki sposób i na jakich zasadach działa pierwszy polski procesor kwantowy. Jak radzi sobie z tzw. szumami kwantowymi i w jakich dziedzinach można go praktycznie wykorzystać?

Z jakim oddźwiękiem świata naukowego spotkało się to opracowanie i na ile ta technologia jest unikalna na rynku komputerów kwantowych?

Czy dzięki niej mógłby powstać pierwszy w Polsce komputer kwantowy? https://itwiz.pl/polski-procesor-kwantowy-od-spektroskopii-do-obliczen-kwantowych/ a także warto przeczytać https://www.chip.pl/artykul/to-wreszcie-sie-udalo-stworzono-komputery-kwantowe-o-wiernosci-przekraczajacej-99 oraz Procesor kwantowy z Polski może zmienić świat. „Obecne komputery kwantowe są niewyobrażalnie słabe" https://www.youtube.com/watch?v=tv-8LMaogFA

dr Kazimierz Mikulski
Maksymilianowo

[21] https://physics.aps.org/articles/v15/87

eprasa.pl 80f50968f9

Foto – Adobe Stock

Ogólnie potrzebna teoria względności

Fizyka stanowi niewątpliwie wyjątkową dziedzinę nauki. Jej głównym celem jest poznanie i opisanie otaczającego nas świata, takim, jakim on jest, a nie takim, jakim nam się wydaje być. Oczywiście nauka ta zmaga się z ciągłym zwalczaniem racjonalizowania tego, jakim chcielibyśmy, żeby świat był, jak ma to miejsce w przypadku ogromnej ilości hipotez i koncepcji, które znajdują potwierdzenie jedynie w głowach ich twórców.

Cyprian **Sobczak**

Wstęp

Początek ubiegłego wieku okazał się być przełomowy na drodze naszego poznania. Przyniósł bowiem naszej cywilizacji mechanikę kwantową, przy której zawodzą nie tylko zmysły, ale także intuicja, oraz szczególną i ogólną teorię względności. Te ostatnie uświadomiły nam, jak mylne jest nasze wyobrażenie o tym, czym jest przestrzeń i czas. W niniejszym artykule postaram się przybliżyć piękno i magię ogólnej teorii względności. Jako iż miałem już przyjemność, piać o szczególnej teorii względności w jednym z poprzednich wydań, podkreślę jedynie jej najważniejsze aspekty.

Wstrzymał czas, ruszył obserwatora inercjalnego

Albert Einstein, formułując szczególną teorię względności w 1905 roku, przyjął jedynie dwa niewinne postulaty, które prowadzą do niezwykłych wniosków.

1. Prędkość światła jest stała i wynosi c (w przybliżeniu 300 000 km/s).
2. Prawa fizyki są jednakowe w układach inercjalnych.

To, aby prawa fizyki były takie same w układach poruszających się ze stałą prędkością, wydaje się dość rozsądnym postulatem. Raczej każdy intuicyjnie czuje, że jest on słuszny i przewidywał go już Galileusz.

Drugi postulat, również pojawiał się w historii wiele razy. Już w XVII wieku Olaus Romer szacował prędkość światła z niezłym skutkiem. Co zatem zrobił Einstein ?

Wyciągnął z tego założenia wnioski. Okazuje się, że wraz ze wzrostem naszej prędkości, zmienia się to jak, interpretują nasz upływ czasu obserwatorzy w układach inercjalnych o niższych prędkościach i odwrotnie. Obserwator stojący na przystanku będzie postrzegał upływ czasu na zegarku osoby jadącej w autobusie jako wolniejszy niż na swoim. Jednak w skali dostępnych dla nas prędkości na ziemi, efekt ten jest zaniedbywalnie mały. Zostały natomiast przeprowadzone eksperymenty, dowodzące tego efektu.

Jeden z nich (przeprowadzony przez Joseph Hafele i Richard Keating), polegał na użyciu samolotów, w których latały zegary, zsynchronizowane z zegarami spoczywającymi. Istotnie, okazało się, że dla zegara poruszającego się, czas płynął nieznacznie wolniej. Eksperyment powtórzono ponad 600 razy, otrzymując przewidziane wyniki!

eprasa.pl 80f50968f9

Oczywiście rodzi się pytanie od naszego pasażera autobusu: dlaczego to mój zegarek ma chodzić wolniej? Może to ziemia nagle zaczęła się poruszać i ucieka spod kół autobusu, a to ja tak naprawdę spoczywam? Jest to przeformułowanie słynnego paradoksu bliźniąt, ułatwiającego zrozumienie czym jest układ inercjalny.

W chwili, kiedy obaj obserwatorzy stoją razem na przystanku, ich czas płynie jednakowo dla obu. Załóżmy, że synchronizują wtedy swoje zegarki tak, aby wskazywały te samą godzinę. Następnie jeden wsiada do autobusu, aby lepiej dostrzec efekt, wyobraźmy sobie, że to międzyplanetarny autobus poruszający się z prędkością bliską prędkości światła. W tym kursie autobus zabiera pasażerów na przejażdżkę, w której zawraca gdzieś w okolicy naszego słońca i wraca na przystanek.

Po wyjściu obserwator, który został na przystanku, porównuje godzinę z pasażerem i okazuje się, że według niego, czas pasażera płynął wolniej! Przy sugerowanej prędkości czas podróży na słońce to około 8 minut, więc różnice na zegarkach będą równe około 16.

Dlaczego to zegarek pasażera się późni? Aby się rozpędzić i zawrócić, pasażer musiał przejść do układu nieinercjalnego, tzn. doznawał działania sił. Na układ inercjalny nie działają, żadne siły i nie są one rozróżnialne. Kiedy jedziemy pociągiem po prostych torach i zamykamy oczy, to nie jesteśmy, wstanie wskazać różnicy pomiędzy postojem na stacji. Zrozumienie tej względności jest niezwykle przydatne przy poznaniu motywacji powstania ogólnej teorii względności, do której dążymy. Tymczasem ciężko się oprzeć pokusie zarysowania, osiągnięć szczególnej teorii względności, jakimi są:

- Odkrycie równoważności masy i energii (codziennie wykorzystywane w CERN oraz przy przemianach jądrowych).
- Różnica długości fal odbieranych względem emitowanych przez obserwatorów poruszających się (np. obiekty emitujące światło widzialne, będą mieć przesunięte widmo w kierunku światła czerwonego przy oddalaniu się od obserwatora). Zrozumienie tego zjawiska posłużyło do udowodnienia ekspansji wszechświata.
- Szczególna teoria względności ma również zastosowanie w chemii, gdzie modele wymagają poprawek na zachowanie się atomów, w których elektrony walencyjne poruszają się z prędkościami porównywalnymi z c jak złoto (uwzględnienie poprawki relatywistycznej wskazuje na ekranowanie jądra atomowego, czego efektem jest zwiększenie przerwy energetycznej między elektronami skutkujące charakterystycznym kolorem złota).

Droga do ogólnej teorii względności

Sformułowanie ogólnej teorii względności przez Einsteina, w przeciwieństwie do jego poprzedniego wielkiego sukcesu (szczególnej teorii względności), okazało się być bardzo ciężkim problemem i prawdziwą drogą przez mękę, która trwała od 1907 do 1915 roku. Ponownie, niewinne spostrzeżenie Einsteina, okazało się nieść niezwykle spektakularne wnioski.

Można powiedzieć, że podobnie jak w szczególnej względności, ogólna teoria względności stara się opisać co dzieje się z obserwatorem, który tym razem, zamiast poruszać się z dużymi prędkościami, przyśpiesza. Jest to kwestia dotycząca nas w dużo większym stopniu, ponieważ nie wszyscy poruszamy się z prędkością bliską prędkości światła, natomiast wszyscy jesteśmy nieustannie przyśpieszani za sprawą grawitacji!

Innymi słowy, ogólna teoria względności, jest teorią grawitacji, stanowiącą uzupełnienie teorii newtonowskiej (będącej wypadkiem szczególnym teorii względności), która świetnie opisuje grawitacje w pobliżu niewielkich mas, jak na przykład ziemia, dla której poprawki relatywistyczne są konieczne, ale nie są powalające [7].

Warto rozwiać przy okazji wątpliwości dotyczące kwestii autorstwa, tej wspaniałej teorii, ponieważ od czasu do czasu pojawiają się głosy, iż Einstein tak naprawdę był oszustem i wszystkie pomysły pochodziły od jego i żony Milevy Marić. Istotnie Mileva uczęszczała na te same studia i ponoć posiadała niezwykły intelekt, ale na tym fakty sprzyjające tej teorii spiskowej się kończą.

Istnieją przesłanki sugerujące, że Mileva mogła pomagać w przepisywaniu początkowych prac (o szczególnej teorii względności, rok 1905), jednak poza spekulacjami nie ma żadnych dowodów na to, aby jej wkład był większy. Istnieje natomiast duża ilość listów i przekazów, świadczących o samotnej walce, jaką toczył Einstein, aby stworzyć równanie pola.

Ponadto, gdy Einstein wyprowadził w końcu poprawne równanie, jego małżeństwo było już kompletną ruiną. Relacje z Marić były tak fatalne, że zgodziła się dać Einsteinowi rozwód (aby mógł ponownie się ożenić), jedynie pod warunkiem, że przekaże jej swoją nagrodę Noblowską w razie jej otrzymania, co rzeczywiście się stało.

Przyczyn tych plotek (jak i wielu późniejszych), należy się dopatrywać w zazdrości i pochodzeniu odkrywcy. Wielu uczonych starej daty nie było w stanie zaakceptować rewolucyjnej wizji, która płynęła z nowej teorii.

W kolejnych latach kłopotem stały się również żydowskie korzenie Alberta Einsteina, a jego prace były nazywane „Żydowską fizyką", co niezwykle przykre, nawet przez wybitnych fizyków. Powstał nawet list otwarty, pod którym podpisało się 100 największych niemieckich uczonych, co miało dowodzić, jakoby cała teoria była nieprawdziwa. Nauka mimo wszystko nie uznaje demokracji, ponieważ racje ma ten, kto ją ma, a nie ten, którego poprze większość. Od stu podpisów, lepszy byłby jeden dowód o fałszywości teorii, a takiego nie ma do dziś.

Więc to tylko Einstein?

Wyprowadzanie równania pola, przypominało rodzenie w bólach, i wiązało się z ogromnym nakładem czasu i energii, ponieważ aparat matematyczny, którego wymaga to równanie, właściwie wtedy nie istniał. Prawie nikt nie rozumiał, czym Einstein się zajmował. No właśnie… prawie wyjątek stanowił jeden z najwybitniejszych matematyków XX wieku, Dawid Hilbert. Na jednej z konferencji naukowych, Hilbert usłyszał wystąpienie Einsteina i bardzo żywo zainteresował się zagadnieniem, starannie wypytując uczonego o szczegóły jego pracy.

eprasa.pl 80f50968f9

Skutkiem tej rozmowy, okazał się wyścig do skonstruowania równania grawitacji, w którego trakcie, tych dwóch Panów w pełen szacunku sposób (co nawet w nauce nie zawsze ma miejsce), prowadziło ze sobą korespondencje, wymieniając się postępami w pracy, lecz bez dzielenia się szczegółami. Ostatecznie wyścig wygrał matematyk, nieznacznie ubiegając Einsteina, o czym poinformował go w liście.

Dlaczego wiec równanie grawitacji nazywa się równaniem Einsteina, a nie Hilberta? Praca Hilberta wpłynęła do redakcji 20 listopada 1915 roku, lecz została wydana na początku 1916, podczas gdy Einstein przedstawił swój wynik w formie wykładu, 25 listopada 1919. Dawid Hilbert zaprezentował ogromną klasę i dał wyraz tego, jak wielkiego formatu był człowiekiem, zrzekając się pierwszeństwa do wyprowadzenia równania, i nie wchodząc w polemikę z Einsteinem.

Przyznał, że gdyby nie Einstein, nie zainteresowałby się tym tematem i właściwie nie wie, co to równanie oznacza w fizyce, ponieważ widział w nim strukturę matematyczną, a nie opis prawa przyrody. Dodatkowo drogi, jakimi uczeni doszli do swoich konkluzji, nie miały ze sobą nic wspólnego i wciąż korzystając z wyprowadzenia Hilberta, dostrzega się kunszt i wyrafinowanie matematyczne, a korzystając ze ścieżki Einsteina widać pomysłowość i wyobraźnie, jaką posiadał [7].

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + g_{\mu\nu} \Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

1.1 Równanie Einsteina.

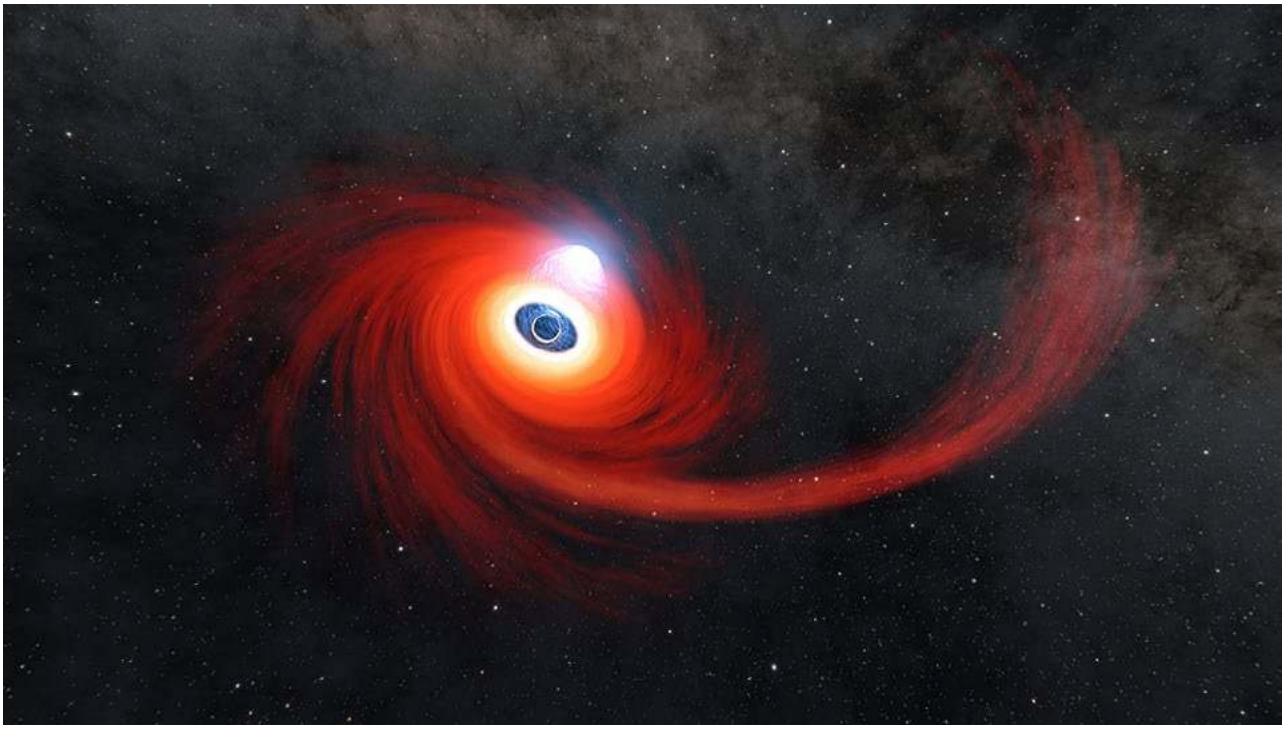
Po sformułowaniu swojego równania, które w istocie jest równaniem na metrykę (czyli pewną specyficzna tablice funkcji, lub liczb, która definiuje geometrie), pojawił się problem, jak takie rozwiązanie znaleźć. Einstein uznał, że rozwiązanie będzie bardzo ciężko znaleźć i może to trwać latami, a potrwało… niecały rok. W przebłysku geniuszu Karl Schwarzschild, odkrył metrykę dla sferycznie symetrycznej, nierotującej gwiazdy. Była to pierwsza metryka, z której wynikało istnienie czarnych dziur [1,4].

Ruszył masę, odkształcił przestrzeń

Jak już wspomniałem, inspiracją Einsteina do sformułowania ogólnej teorii względności, było rozważanie kwestii rozróżnienia przyśpieszenia newtonowskiego od grawitacyjnego. Najprościej będzie to sobie wyobrazić na przykładzie windy, którą chyba każdy co najmniej raz w życiu jechał. Gdy winda zaczyna jechać w górę, stojąc w niej, zaczynamy czuć się cięższi, ponieważ przyśpieszenie, z jakim winda porusza się w górę, w myśl trzeciej zasady dynamiki Newtona, dodaje się do przyśpieszenia ziemskiego, przez co na chwile wzrasta nasz ciężar (ciężar to nie to samo co masa!).

Gdyby jednak ktoś nieoczekiwanie, przeniósł windę, w której się znajdujemy do statku kosmicznego, który po opuszczeniu ziemi poruszałby się ze stałym przyśpieszeniem wynoszącym około 9.81 m/s^2, to co czulibyśmy wtedy ? Okazuje się, że nic specjalnego. Nie potrafilibyśmy rozróżnić, czy jesteśmy na statku kosmicznym, czy na ziemi.

Einstein wykazał teoretycznie, że siły newtonowskie i grawitacyjne są nierozróżnialne (zasada równoważności), a dane eksperymentalne, które mają zawsze decydujący głos, potwierdziły to z ogromną dokładnością. Można więc powiedzieć, że ogólna teoria względności jest uzupełnioną o przyśpieszenie, szczególną teorią względności. Jednak ten wkład od przyśpieszenia prowadzi do zdumiewających wniosków. Kluczowym dla zrozumienia



Dysk gorącego gazu wiruje wokół czarnej dziury. Źródło: NASA/JPL-Caltech

eprasa.pl 80f50968f9

ogólnej teorii względności jest spostrzeżenie, że masa zakrzywia czasoprzestrzeń, niczym ciężki przedmiot rzucony na łóżko, odgniata materac. Im masa większa, tym większe odkształcenie czasoprzestrzeni [4].

Naprawdę ciekawie zaczyna się dziać, jeżeli zaczniemy rozważać, co się dzieje z obserwatorem umieszczonym w pobliżu czegoś bardzo masywnego, jak gwiazda neutronowa lub czarna dziura. Siła grawitacyjna przyjmuje w pobliżu tych obiektów ekstremalnie wysokie wartości, doprowadzając materie do niebotycznych gęstości.

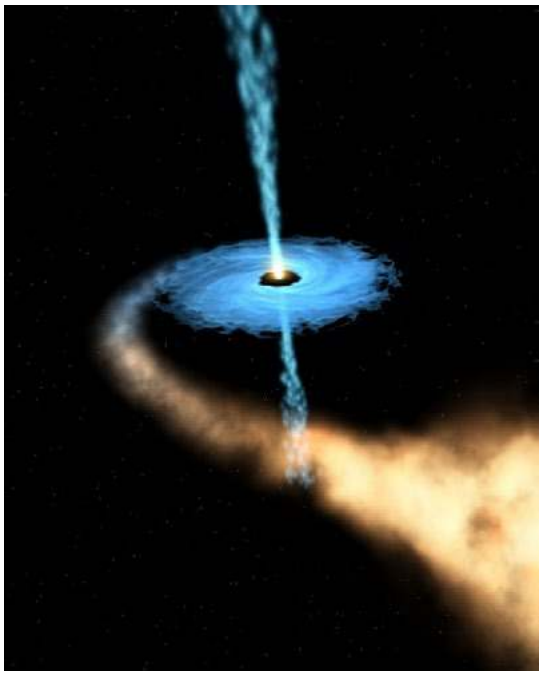
Sam Einstein kwestionował istnienie czarnych dziur, uważając je za jeden z matematycznych artefaktów swojej teorii, dla metryki sferycznie symetrycznej gwiazdy [1,4]. Czarna dziura to nic innego jak materia skondensowana do tak dużych gęstości, że zakrzywia przestrzeń wystarczająco mocno, aby światło nie mogło uciec po przekroczeniu pewnego obszaru zwanego horyzontem zdarzeń.

Warto podkreślić tu, że za efekt ten jest odpowiedzialne silne zniekształcenie czasoprzestrzeni, w której światło porusza się po zakrzywionym torze (w zniekształconej czasoprzestrzeni foton wciąż „sądzi", że biegnie prosto przed siebie, lecz obserwator zewnętrzny widzi zakrzywienie owej trajektorii). Nie jest to efektem (jak sugeruje się w niektórych licealnych podręcznikach lub nawet niezbyt wyszukanych artykułach naukowych [5]), wina niewystarczającej prędkości światła, aby przekroczyć prędkość ucieczki z czarnej dziury (wydaje się być jednak prawdą, że obiekt poruszający się szybciej od światła byłby do tego zdolny, jednak ponownie nie jest to kwestia prędkości ucieczki, a faktu, że potencjalny nad świetlny obserwator, porusza się wstecz w czasie) [4].

Horyzont zdarzeń to pewnego rodzaju obszar graniczny, spod którego nie może się wydostać żadna informacja w uporządkowanej postaci (czarne dziury promieniują, zgodnie z teorią Hawkinga, lecz nie można z tego promieniowania odzyskiwać informacji (na razie nawet solidnie dowieść)) [1].

Wokół czarnej dziury istnieje jeszcze jeden interesujący obszar, w którym światło porusza się po krzywych zamkniętych. Jeśli umieścimy obserwatora na takiej sferze i przyczepimy mu lampkę do pleców, to obserwator będzie widział jej światełko przed sobą! Gdybyśmy natomiast lampkę świecącą na niebiesko, wyrzucili w kierunku czarnej dziury i sami obserwowali z bezpiecznego miejsca jej podróż w nieznane, zobaczylibyśmy, że emitowane przez nią światło, zmieniałoby barwę, przesuwając się po widmie w kierunku dłuższych fal, przez zielony, aż do czerwonego. Następnie przestalibyśmy wiedzieć jej światło, chociaż nadal by promieniowała, lecz w zakresie dłuższych fal. Zjawisko to jest nazywane efektem Dopplera dla światła. Czy zobaczylibyśmy wpadanie lampki do czarnej dziury? Niestety nie, ponieważ z naszego układu odniesienia, wymagałoby to upłynięcia nieskończenie długiego odcinka czas [1].

Nieskończoność to bardzo długo, jak na prowadzenie doświadczenia, ale poniżej horyzontu zdarzeń, na którym czas dla obserwatorów zewnętrznych staje w miejscu, jest jeszcze gorzej, ponieważ pod nim, pojęcie czasu traci sens, do którego przywykliśmy.



Rys. 1. Dysk akrecyjny, źródło ilustracji: https://pl.wikipedia.org/wiki/Dysk_akrecyjny

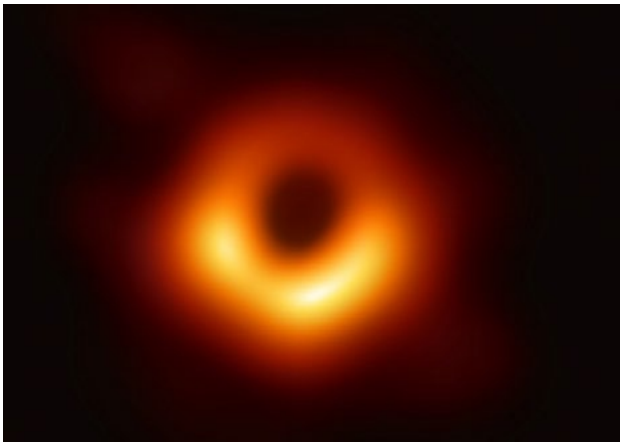
Jak bardzo traci sens? Bez wdawania się w szczegóły, zaznaczę tylko, że z punktu widzenia obecnych narzędzi, czas i przestrzeń pod horyzontem zdarzeń zamieniają się miejscami. Oznacza to, że pod horyzontem współrzędne mają 3 wymiary czasowe i jeden przestrzenny. Przy pierwszym zetknięciu z taką koncepcją, chciałoby się powiedzieć, że to tylko sztuczka matematyczna, ale w historii ogólnej teorii względności już nie raz padało to stwierdzenie…

Co zatem czuje nasza spadająca lampka? Nie powinniśmy się z nią wiązać w zbyt empatyczny sposób, ponieważ już przed dotarciem do horyzontu zdarzeń, rozerwałyby ją siły pływowe, ale ciekawsze dla naszych dywagacji, będzie założenie, że jednak przetrwała nieco dłużej. Załóżmy, że przekroczyła w całości horyzont zdarzeń. Z jej perspektywy, nie dzieje się zupełnie nic ciekawego. W układzie odniesienia związanym z lampką nie zaobserwuje się momentu przejścia przez horyzont. Spektakularne może być jednak napotkanie po drodze dysku akrecyjnego będącego pierścieniem mocno promieniującej materii, która ściera się ze sobą, przed wpadnięciem do czarnej dziury, lecz nie musi on występować zawsze [1,4].

To właśnie obraz takiego dysku akrecyjnego, został uchwycony na słynnym „zdjęciu czarnej dziury" w 2019 roku. Jest to, doprawdy wspaniałe osiągniecie, jeśli chodzi o badanie czarnych dziur i dowód niemal bezpośredni ich istnienia, jednak warto zaznaczyć, że zdjęcie to zostało złożone jako obraz z kilku radioteleskopów. Sygnał, który został odebrany przez radioteleskopy, był w istocie w zakresie mikrofal co modyfikuje nieco nasze oczekiwania po stwierdzeniu „zdjęcie".

Kolejną ciekawą rzeczą, która rzuca się w oczy podczas patrzenia na owy obraz, jest różnica w kolorze pierścienia na dole i na górze. Okazuje się bowiem, że wynika ona z kierunku wirowania materii, która porusza się po orbicie

eprasa.pl 80f50968f9



Rys. 2 Obraz wygenerowany, z sygnału odebranego w 2019 r. Źródło: https://pl.wikipedia.org/wiki/Czarna_dziura#/media/Plik:Black_hole_-_Messier_87_crop_max_res.jpg

z ogromną prędkością. Tu ponownie mamy do czynienia z efektem Dopplera, tym razem wynikającym z ruchem z dużą prędkością. Świecący gaz, który porusza się w naszym kierunku, będzie emitował fale o krótszej długości niż gaz, który porusza się w kierunku przeciwnym, co na ilustracji zostało odpowiednio wyrażone kolorem białym i czerwonym.

Falowanie czasoprzestrzeni

Kolejną interesującą własnością równań Einsteina, był fakt, że można z nich było wyprowadzić równanie falowe, co oznaczało, że przestrzeń może falować. Było to kolejny raz, gdy Einstein kwestionował wnioski ze swoje teorii. Sceptycyzm co do fal grawitacyjnych przeniósł, również na swojego współpracownika, Polaka Leopolda Infelda. Dopiero wybitny doktorant Infelda profesor Andrzej Trautman, postanowił podejść bardziej otwarcie do problemu i zbudował teoretyczne podstawy do tego, aby ich szukać [6]. Chociaż profesor Andrzej Trautman, nie został uhonorowany nagrodą Nobla, która została, przyzna za wykrycie fal grawitacyjnych w 2017 roku, to należy z dumą podkreślić, że nasz rodak miał w tym duży wkład.

Co to właściwie znaczy, że przestrzeń faluje? Otóż wiemy już, że przestrzeń można odkształcić przy pomocy dużej masy, jeżeli masa ulegnie przemieszczeniu, to również odkształcenie pójdzie za nią. Jeśli więc wprawimy masę w ruch oscylacyjny, na przykład będziemy nią kręcić w kółko, to zacznie ona wywoływać uporządkowane drganie. Jeśli więc weźmiesz do ręki wisiorek i zaczniesz nim kręcić, to istotnie wywołasz falę grawitacyjną, jednak będzie ona tak nikła, że jej powstanie rozejdzie się bez echa. Aby fala grawitacyjna była wystarczająco mocna do tego, by ją zaobserwować, trzeba zakręcić czymś naprawdę masywnym, jak dwie gwiazdy neutronowe kręcące się wokół siebie, które tuż przed zderzeniem wyemitowały impuls, na tyle silny, aby dało się go zmierzyć na ziemi. Taka rozchodząca się fala, jest bardzo trudna do zaobserwowania, ponieważ zmienia długości wszystkich obiektów jednakowo na określonych kierunkach, również instrumentów pomiarowych. Jak już wspomniałem, udało się to zrobić, co opisałem w artykule: „Fale grawitacyjne”.

Dlaczego jest to dla nas takie ciekawe? Ponownie, to co zaobserwowano, było pierwszym solidnym dowodem istnienia czarnych dziur. Bardzo solidnym, ponieważ z obliczeń można było wywnioskować jaką masę i rozmiar musi mieć obiekt, który powstał w wyniku połączenia się gwiazd. Do czasu wykrycia fal grawitacyjnych, główną przesłanką o istnieniu czarnych dziur, były obserwacje zachowania ciał niebieskich w centrach galaktyk, jak na przykład w centrum Drogi Mlecznej. Okazuje się, że materia w centrum galaktyki zachowuje się, jakby krążyła wokół monstrualnej gwiazdy, ale problem polegał na tym, że nic tam nie świeci. Stąd płynął wniosek, że musi to być czarna dziura. Jak widać, była to przesłanka silna, lecz mało satysfakcjonująca. Dzisiaj mamy już na to solidne dowody doświadczalne, a takie nauka lubi najbardziej.

Czym jest czasoprzestrzeń ?

Dotychczas bardzo dużo mówiłem o przestrzeni, ale czym ona właściwie jest? Najuczciwiej powiedzieć, chyba że jest to kwestia nierozstrzygnięta, czekająca być może, aż któryś z szanownych czytelników podejmie to wyzwanie. Od Newtona wyszło wyobrażenie, jakoby przestrzeń była sceną, na której rozgrywa się rzeczywistość. Dodano do tej myśli nieco później, że jest ona wypełniona eterem, czyli ośrodkiem przenoszącym fale elektromagnetyczne. Jednak pomimo wielu wysiłków wybitnych naukowców takich jak Lorentz, koncepcja ta zawaliła się pod naporem eksperymentu Michelsona Morleya, który przekreślił ją raz na zawsze.

I tak stała się próżnia… Gdy świat naukowy pogodził się już z koncepcją bezkresnej pustki, w teatrze Wszechświata, Einstein za sprawą ogólnej teorii względności,

Czym jest czasoprzestrzeń? Źródło: Adobe Stock

eprasa.pl 80f50968f9

wykazał, że scena ta może być nieco bardziej plastyczna i brać czynny udział w przedstawieniu. Wtedy na scenę wkroczyła mechanika kwantowa z zasadą nieoznaczoności Heisenberga w roli głównej. Wynika z niej, że tak naprawdę w pustej przestrzeni, mogą się pojawiać i znikać cząstki, ale na bardzo krótkie chwile. Jak krótkie? Im cząstka ma większą energię, tym chwila musi być krótsza. Z wielkim bólem głowy zostało to przyjęte przez świat naukowy, po potwierdzeniu za sprawą efektu Casimira (którego opis pominę, lecz zachęcam do zapoznania się).

Ponownie świat naukowy przyjął do wiadomości, że przestrzeń, w której wszystko się znajduję, jest kształtowana, przez to, co w niej jest… Próżnia, która z definicji nie powinna zawierać nic, jest w istocie kotłem z gotującymi się cząstkami, które powstają i znikają w takim tempie, że zmierzenie pojedynczych cząstek jest niewykonalne. Po tym wszystkim w roku 2017 okazało się, że cała ta przestrzeń może falować jakby rzeczywiście była jakiegoś rodzaju ośrodkiem, służącym do przenoszenia fal grawitacyjnych… bardzo to wszystko zagmatwane, ale najnowsze koncepcje tego, czym owa przestrzeń jest, okazują się być jeszcze bardziej zawiłe i co najważniejsze, na chwilę obecną nieudowadnialne i nie falsyfikowalne, więc nie będę ich przybliżał.

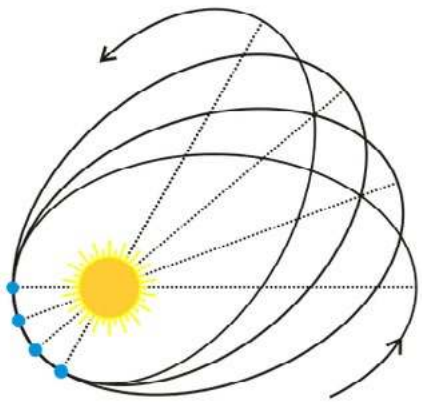
Korzyści z ogólnej teorii względności

Wszystko, co do tej pory opisałem, brzmi dość dziwacznie. Wręcz ciśnie się na język komentarz, że fajna ta teoria, tylko po co ? Każda teoria w fizyce ma pewne korzystne skutki, uboczne jakimi jest rozwinięcie aparatu matematycznego. Tak było z rachunkiem różniczkowym, analizą wektorową i w dużej mierze z geometrą różniczkową, która zyskała dużą sławę w świecie fizyki za sprawą badania czasoprzestrzeni. Dzisiaj ma ona zastosowanie również przy analizie powierzchni wzrastających kryształów, co ma duże znaczenie dla elektroniki. Innym aspektem, który wiąże się z niepohamowaną potrzebą ludzi do zaspokajania ciekawości, okazała się możliwość wyjaśnienia dziwnego zachowania peryhelium Merkurego.

Peryhelium jest najmniejszą odległością, pomiędzy ciałem niebieskim a Słońcem (jak wiemy, planety poruszają się po elipsach). Wszechświat nie jest jednak układem statycznym i peryhelia planet ulegają okresowym zmianą, które w większości wciąż dało się wyjaśnić na gruncie fizyki newtonowskiej. Wyjątek stanowił Merkury, dla którego ruch peryhelium, różnił się od przewidywań.

Mechanika newtonowska była świetnie potwierdzoną teorią, co za tym idzie, nie w niej szukano nieścisłości. Postulatów wskazujących na przyczynę, dziwnego ruchu peryhelium Merkurego było wiele, włącznie z zasugerowaniem, dodatkowej planety zaburzającej jego ruch tylko wciąż nie odkrytej, nazywanej „Wulkan". Pomysł ten nie był całkiem absurdalny, ponieważ dokładnie w ten sposób odkryto Neptuna, będącego bliźniaczą planetą Urana, oraz zaburzającego okresowo jego ruch.

Koncepcja istnienia Wulkana, nie znalazła jednak potwierdzenia (co może smucić fanów Star Trek). Przez kolejne dekady, dodatkowe 43'' kątowe męczyły astronomów. Aż do listopada 1915 roku, kiedy to problem rozwiązał Einstein i był to pierwszy dowód poprawności ogólnej teorii względności [2].



Rys 3. Ilustracja ruchu peryhelium. Źródło: https://pl.wikipedia.org/wiki/Ruch_peryhelium

Kolejnym zastosowaniem tej wspaniałej teorii w astronomii, jest przewidzenie zjawiska soczewkowania grawitacyjnego. Polega ono na fakcie, że światło biegnące w polu grawitacyjnym, przestaje biec po prostej linii i zaczyna nieco skręcać w kierunku masy. Nie wynika to w żadnym razie z przyciągania fotonów przez masę, bo do tego foton sam musiałby masę posiadać. Natura tego zjawiska bierze się z zakrzywienia czasoprzestrzeni w pobliżu masy. Im większa masa, tym bardziej zakrzywia czasoprzestrzeń, im bardziej czasoprzestrzeń jest zakrzywiona, tym mocniej trajektoria fotonów odbiega od linii prostej, zdaniem obserwatorów zewnętrznych.

Ten spektakularny efekt, został dowiedziony eksperymentalnie w roku 1919, przez Artura Eddingtona, który wyruszył ze swoim zespołem, aby obserwować zaćmienie słońca w Afryce. Zaćmienie słońca było niezbędne, ponieważ efekt jest bardzo subtelny, a słońce było wtedy największą masą, na której można było przeprowadzić pomiar, lecz jednocześnie zbyt jasną, aby zrobić to w ciągu dnia.

Wynik eksperymentu przyniósł obu uczonym wielką sławę, chociaż większość ludzi kompletnie nie wiedziała, o co w tym wszystkim chodzi. Znana jest anegdota, kiedy to pewien dżentelmen, zaczepił Artura Eddingtona i z dumą stwierdził, że podobno ogólną teorię względności rozumie tylko trzech ludzi na świecie. Na te słowa, Eddington miał zareagować irytacją, zwieńczoną słowami: Kto jest trzecią [1,2]?

Obecnie soczewkowanie grawitacyjne jest często obserwowanym w astronomii zjawiskiem, umożliwiającym obserwacje gwiazd, których położenie znajduje się za masywnymi obiektami. Stanowi również potencjalne narzędzie do obserwacji czarnych dziur.

Dotychczas wymienione argumenty o przydatności ogólnej teorii względności można, odrzucić, uzasadniając to brakiem bezpośredniego pożytku dla ludzi, nie zajmujących się nauką. Ta piękna teoria, ma jednak bezpośredni wpływ na życie codzienne. Wszyscy w dzisiejszych czasach, używamy systemu GPS. Gdyby nie ogólna i szczególna teoria względności, system GPS byłby, delikatnie mówiąc, wysoce bezużyteczny. Do precyzyjnego określe-

eprasa.pl 80f50968f9

nia położenia niezbędny jest kontakt z co najmniej czterema satelitami, ponieważ czasoprzestrzeń posiada cztery współrzędne, z czego jedną z nich, jest czas, który jak już wspomniałem, ulega dylatacji. Jak wiadomo, na dylatacje czasu wpływa zarówno oddziaływanie grawitacji, jak i ruchu obiektu, a bez uwzględniania tych poprawek system GPS, myliłby się o 11 kilometrów na dobę…

Poza praktycznymi aspektami nie można zapomnieć o jej filozoficznym znaczeniu rzucający zupełnie inne spojrzenie na naszą rzeczywistość oraz otworzeniu drogi do znajdywania odpowiedzi na pytania o działanie wszechświata i zadawania kolejnych mądrych pytań.

Dlaczego taka piękna?

Ogólna teoria względności stanowi piękny pomnik myśli ludzkiej. Chociaż na inspiracje do jej powstania składała się praca wielu gigantów, to została sformułowana przez jednego człowieka. Piękno tej teorii polega na spójnym toku rozumowania, który przejrzyście odsłania przed studiujący jej równania, całą koncepcję. Chociaż aparat matematyczny niezbędny do zrozumienia, wyprowadzenia równania Einsteina jest wysoce zaawansowany, to mimo wszystko zachęcam do zadania sobie trudu i przejścia przez drogę.

Teoria względności stanowi niejako wstęp, do dalszego poznawania świata, ponieważ znakomicie opisuje ona duże, masywne obiekty, jednak do opisu mikro świata, stosuje się mechanikę kwantową, stanowiąca estetyczny kontrast dla ogólnej teorii względności. O tyle, o ile ta pierwsza pozwala na ogromną ilość przewidywań pojawiających się w sposób naturalny. Nieraz pokazując swojemu ojcu Einsteinowi, że ma do powiedzenia na temat wszechświata dużo więcej niż by chciał.

Mechanika kwantowa stawia sprawę zupełnie inaczej. Jest ona owocem pracy ogromnej ilości ludzi, którzy rozwijali ją od efektu do efektu, oczywiście przewidując przy tym pewne nowe zjawiska, lecz mimo wszystko jej język nie jest tak konsystentny, a wyjaśnienie jej natury, budzi raczej opór niż zachwyt. Już Einstein próbował połączyć ze sobą te dwie wielkie teorie, nigdy mu się to jednak nie udało. Przez ostatnie stulecie, wiele wybitnych osób próbowało dokonać tej unifikacji, jednak nikomu się nie udało. Nie można zaprzeczyć, że próby połączenia tych teorii, przyniosłyby nowe, spektakularne przewidywania, lecz o tym innym razem.

LITERATURA

[1] Bernard F. Schutz, „Wstęp do ogólnej teorii względności", PWN, Warszawa 1995.
[2] J. Foster, J. D. Nightingale, „Ogólna teoria względności", PWN, Warszawa 1985.
[3] Kajetan Wróblewski, „Historia Fizyki", PWN, Warszawa 2006.
[4] James B. Hartle, „Grawitacja", WUW, Warszawa 2018.
[5] Tianyi Chen, Shutong Ge, Jiahui Li, Xuheng Ma,"The Progress of Black Holes: Principles & Physical Detection Technology", J. Phys.: Conf. Ser. 2083 022047, Tianyi Chen 2021 .
[6] W. Kopczyński, A. Trautman, „Czasoprzestrzeń i grawitacja", PWN, Warszawa1981.
[7] Walter Lsaacson, „Jak Einstein odkrył na nowo rzeczywistość", Scientific American nr 10 (290), Październik 2015, Warszawa.

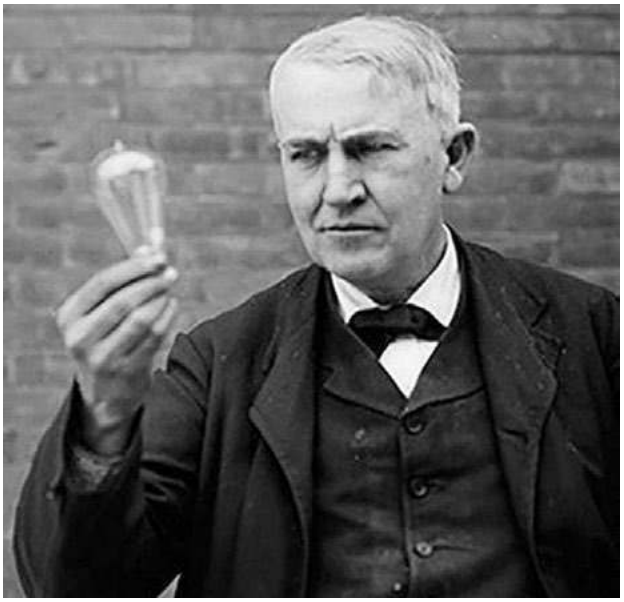
Gdyby nie ogólna i szczególna teoria względności, system GPS byłby wysoce bezużyteczny. Źródło: Adobe Stock

eprasa.pl 80f50968f9

Żywoty fizyków

Thomas Alva Edison (1847-1931)

Tadeusz **Wibig**



Można spierać się, czy był, czy nie był fizykiem, ale to w gruncie rzeczy nie jest takie ważne. Z całą pewnością był „fizykiem stosowanym", a to specjalność szczególnie pożądana w dzisiejszych czasach.

Niektórzy mówią też, że był największym wynalazcą wszechczasów. Nawet, jeśli to nie jest prawdą, jego dokonania w ulepszaniu otaczającego nas świata są nie do przecenienia.

Edison miał trudne dzieciństwo i fakt, że w życiu do szkoły chodził tylko przez 12 tygodni, wcale go nie cieszył. Douczał się jak mógł w przerwach w sprzedawaniu gazet i cukierków w pociągach zatrzymujących się na stacji w Port Huron. Już wtedy objawił się jego talent do zarabiania na dobrych pomysłach, a że dodatkowo pasjonowało go od dziecka wymyślanie nowych rzeczy, przy odrobinie szczęścia jego los był przesądzony. A Edison szczęście miał.

Jego życiorys pełen jest historyjek o przygodach, jakie przydarzały mu się często i anegdot, które też czasem mogły być prawdziwe. Ktoś, kto posiada ponad 1000 patentów w Stanach, kto wyposażył ludzkość w światło, położył podwaliny pod przemysł fonograficzny, filmowy i telewizyjny i pierwszy budowniczy pierwszych fabryk prądu, musiał mieć o czym opowiadać. Mimo iż nie jest prawdą, że wynalazł krzesło elektryczne, czy lampę elektronową (choć był blisko!) i tak należy uznać Edisona za geniusza.

Pierwszym opatentowanym wynalazkiem Edisona była elektryczna maszyna do liczenia głosów. Nie przyjęła się. Jak widać senatorom (w Stanach) nieszczególnie zależało na szybkim, sprawnym i bezbłędnym liczeniu ich głosów. Za to wynalezienie maszyny telegraficznej do natychmiastowego przekazywania notowań giełdowych biznesmenom spotkało się z oczywistym zainteresowaniem wszystkich ludzi mających pieniądze oraz tych, którzy tylko chcieli je mieć, a kto nie chce!

Najczęściej jednak kojarzy się Edisona z żarówką. Nie jest jednak prawdą, że to on po raz pierwszy zamienił prąd na światło. Niewątpliwie zaś on pierwszy zrobił interes na handlu żarówkami – bo były to dobre żarówki. Fonograf był już naprawdę dziełem Edisona. Pierwsze urządzenie potrafiące zapisać i odtwarzać zapisany dźwięk składało się z obracającego się walca owiniętego cynową folią i membrany połączonej z igłą, która drapiąc folie dźwięk zapisywała, a potem przesuwając się w wyżłobionym wcześniej rowku drgała tak samo, jak przy zapisie i przekazując drgania membranie odtwarzała zapisany dźwięk. Zachowało się kilkunastosekundowe nagranie głosu samego Edisona. Można znaleźć je bez trudu w sieci i posłuchać, jak mówi wierszyk o Mary i jej owieczce.

Po finansowych sukcesach swoich przedsięwzięć elektrycznych Edison postanowił nadmiar gotówki zainwestować w coś solidnego. Zainwestował w żelazo. Ruda zawierająca żelazo bywa dość uboga i Edison wpadł na pomysł, aby wzbogacać ją przepuszczając przez elektromagnetyczne sito. Wpadająca z góry ruda oddzielana była na tę zawierającą trochę więcej żelaza i pozostałości słabiej przyciągane przez wielkie elektromagnesy. Doświadczenia w skali laboratoryjnej były obiecujące. Po raz pierwszy Edison otworzył zakład wzbogacania rudy w 1870 roku, by zamknąć go po kilku latach z braku wystarczającego popytu.

Drugie podejście miało miejsce prawie dwadzieścia lat później. W zakładzie wzbogacania zainstalował trzy gigantyczne elektromagnesy mogące przetworzyć ponad 1200 ton rudy dziennie. Problemy techniczne i finansowe wstrzymały jednak dalszy rozwój przedsięwzięcia. Nie pomogło nawet pozbycie się akcji General Electric i w1899 roku Edison definitywnie zakończył ze znacznymi stratami finansowymi zabawę z rudą.

Podsumowując tę klęskę Edison z właściwym milionerom poczuciem humoru stwierdził, że wprawdzie rzeczywiście wszystko skończyło się klapą, ale w międzyczasie zabawa była świetna. Okazało się jednak, że klapa też nie była taka ostateczna, bo w procesie wzbogacania rudy wytwarza się, jako produkt odpadowy, materiał skalny pozbawiony w dużym stopniu składników zawierających żelazo, a taki materiał jest bardzo pożądany przy produkcji cementu. Edison nie byłby sobą, gdyby nie zainteresował się możliwościami stojącymi przed przemysłem cementowym i w tym samym jeszcze roku nie powołał do życia Edison Portland Cement Company. Można powiedzieć, że nie ma tego złego, co by na dobre nie wyszło. Zwłaszcza jeśli jest się Edisonem

eprasa.pl 80f50968f9

Doświadczenie domowe:

Elektromagnes praktycznie – wzbogacanie rudy

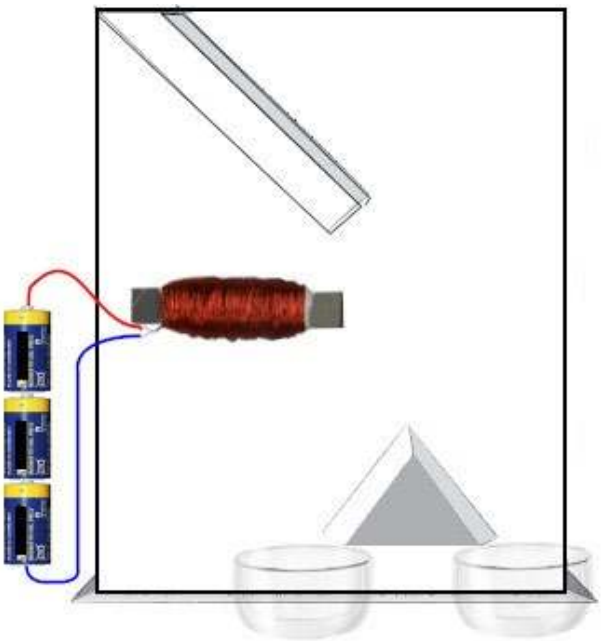
A. Potrzebne materiały

1. Drobne elementy żelazne; mogą to być małe nakrętki, gwoździki, pineski, można też pociąć na małe kawałki żelazny drut, choćby spinacze biurowe.
2. Drobne elementy nieżelazne podobne kształtem i wielkością do opisanych w punkcie 1. elementów żelaznych, może też być to zwykły żwir czy piasek.
3. Dwa pojemniki: na rudę i nie-rudę.
4. Źródło zasilania (3 bateryjki R20 lub coś w tym rodzaju).
5. Kawałek żelaza długości kilku centymetrów i w przekroju około centymetra, może to być fragment starego transformatorka (najlepiej), albo gruby gwóźdź, śruba, względnie kilka gwoździ.
6. Drut nawojowy (miedziany w emalii) o średnicy 0,2 – 0,5 mm długości kilkunastu metrów albo i więcej.
7. Deska drewniana o rozmiarach 0,5 m × 0,5 m.
8. Tektura do montażu konstrukcji „zakładu wzbogacania rudy".
9. Taśma klejąca do mocowania elementów tekturowych, choć lepszy byłby pistolet z klejem na gorąco.

B. Narzędzia – nożyk, nożyczki

C. Kolejność czynności

1. Montujemy konstrukcję „zakładu wzbogacania rudy":
   a) Ustawiamy deskę pochyło (kąt zależy od „rudy", powiedzmy około 30º).
   b) Na dole umieszczamy dwa pojemniki.
   c) U góry deski montujemy zrobiony w tektury kanał wlotowy rudy kończący się mniej więcej w połowie szerokości deski.
   d) Na środku pod wylotem kanału wlotowego instalujemy tekturowy klin, który rozdzielałby spadająca rudę na dwa strumienie wpadające do dwóch pojemników.
2. Na kawałek żelaza (gruby gwóźdź lub kilka długich, cieńszych gwoździ) nawijamy uzwojenie elektromagnesu z cienkiego drutu w emalii. Im więcej zwojów (w granicach rozsądku), tym lepiej będzie działał. Liczba 1000 jest zadawalająca. Zostawiamy końcówki uzwojenia o długości kilkunastu centymetrów.
3. Mocujemy elektromagnes do deski ponad klinem i pod wylotem rudy. Dokładne miejsce trzeba będzie po zmontowaniu całości dobrać eksperymentalnie uwzględniając siłę przyciągania naszej „rudy".



4. Jeden z przewodów elektromagnesu łączymy z baterią na stałe, drugi dołączmy na chwilę tylko, gdy chcemy, aby zakład wzbogacania rudy pracował.
5. Sporządzamy „rudę": mieszamy elementy żelazne i nieżelazne w dowolnej proporcji, ale dobrze jest naśladować naturę – żelaza jest mniej niż nie-żelaza.
6. Uruchamiamy zakład testowo. Wsypujemy powoli rudę i obserwujemy, czy elektromagnes umieszczony jest w odpowiednim miejscu: nie za blisko, by ruda nie przylepiała się do niego i nie za daleko, by w ogóle była przeciągana na stronę właściwego pojemnika na dole.
7. Po właściwym ustawieniu magnesu mocujemy go na stale. Późniejsze szczegółowe korekty można dokonywać zmieniając trochę pozycję klina i wlotu „rudy", a także zmieniając kąt nachylenia całej deski.

Prawidłowo zmontowany mechanizm oddziela elementy żelazne od nieżelaznych, a przynajmniej w jednym pojemniku proporcja żelaza jest większa niż początkowa. To się nazywa wzbogacanie.

eprasa.pl 80f50968f9

Najwcześniejszy i najpóźniejszy Nowy Rok

Kiedy zaczął się Nowy Rok 2023? Zaczął się o północy z 31 grudnia na 1 stycznia, ale w różnych miejscach na Ziemi moment ten nie zachodził jednocześnie, tylko zależy od stref czasowych na kuli ziemskiej.

Doba trwa 24 godziny, ale gdy w jednych częściach naszej planety panuje dzień, w innych jest noc. Aby jakoś poradzić sobie z ujednoliceniem czasu pomiędzy krajami i zachować względne dostosowanie czasu urzędowego do czasu słonecznego, Ziemię podzielono na 24 strefy czasowe, zdefiniowane wzdłuż południków o szerokości 15 stopni długości geograficznej. Pomysłodawcą tego podziału był Sandford Fleming z Kanady. Jego propozycję z 1878 roku wprowadzono w życie w 1884 roku.

W praktyce granice stref czasowych nie zawsze biegną wzdłuż południków i są dostosowane np. do przebiegu granic państw. Niektóre duże obszarowo kraje mają nawet po kilka stref czasowych na swoich terytoriach, np. Stany Zjednoczone czy Rosja, ale są też wśród nich takie, gdzie panuje jedna strefa (Chiny). W Unii Europejskiej w większości krajów, od Polski do Hiszpanii, przyjęto czas tej samej strefy czasowej.

Do oznaczania stref czasowych stosuje się obecnie skrót UTC (od Universal Time Coordinated, czyli uniwersalny czas koordynowany) z dodaną liczbą godzin. Jako punkt startowy przyjęto południk zerowy i wokół niego zdefiniowany jest tzw. czas uniwersalny (UTC+00:00). W strefach czasowych biegnących na wschód od południka zerowego dodaje się godziny, a w tych położonych na zachód odejmuje się godziny. W Polsce jako czas zimowy obowiązuje czas środkowoeuropejski (UTC+01:00), a jako czas letni czas wschodnioeuropejski (UTC+02:00).

Co się jednak dzieje po drugiej stronie globu, gdy spotkają się strefy czasowe UTC+12:00 i UTC-12:00? Zdefiniowano tam umowną „międzynarodową linię zmiany daty". Przebiega ona wzdłuż południka 180 stopni, z niewielkimi odchyłkami na obszarach w pobliżu, które są zamieszkałe – np. na Aleutach, Półwyspie Czukockim czy na Samoa. Gdy przekraczamy linię zmiany daty w kierunku wschodnim, następuje odjęcie jednego dnia. Przy podróży w przeciwnym kierunku dodajemy jeden dzień. Ten mechanizm jest na przykład kluczowym elementem w fabule powieści Juliusza Verne'a pt. „W 80 dni dookoła świata".

Linia zmiany daty biegnie przez Ocean Spokojny, czyli tereny niezamieszkałe, ale jednak w pobliżu leżą wyspy, gdzie jej przebieg jest mocno skomplikowany. I to właśnie tam znajdują się tereny, na których Nowy Rok witany jest najszybciej – albo najpóźniej.

Najszybciej Nowy Rok zaczęli mieszkańcy wysp w państwach Kiribati, Samoa, Tonga. Dla nich 1 stycznia rozpoczął się już w sobotę o godz. 11.00 polskiego czasu. W szczególności dotyczy to mieszkańców wyspy Kiritimati (Wyspa Bożego Narodzenia) w państwie Kiribati. Co ciekawe, na tej wyspie znajduje się miejscowość o nazwie Poland. Mieszka w niej kilkaset osób.

Kiribati – tu zaczyna się Nowy Rok – wikimediacommons

Jako ostatni Nowy Rok przywitają mieszkańcy Samoa Amerykańskiego – dopiero w niedzielę o godz. 12.00 polskiego czasu.

Technicznie rzecz biorąc jeszcze później Nowy Rok rozpoczął się na wyspach Baker i Howland, w niedzielę o godz. 13.00 polskiego czasu. Są one jednak niezamieszkałe.

Jednymi z pierwszych witających byli mieszkańcy Nowej Zelandii – w sobotę o godz. 12.00 polskiego czasu. Wyjątek stanowi fragment terytorium tego kraju: archipelag Chatham, który zaczyna świętowanie 45 minut wcześniej.

Australia wchodziła w Nowy Rok przez kilka godzin, ale główna jej część – w sobotę o godz. 14.00 czasu polskiego. W Japonii pora na Nowy Rok nadeszła o godz. 16.00, w Chinach – o 17.00, w Indiach – o godz. 19.30. W Rosji trwało to wiele godzin, np. w Moskwie sylwestrowa północ wybiła o „naszej" godzinie 22.00.

Większość krajów Unii Europejskiej świętuje o tej samej porze, co my – czyli o 24.00. Wielka Brytania wita Nowy Rok godzinę później (w niedzielę o godz. 1.00 polskiego czasu).

Z kolei wschodnie wybrzeże Stanów Zjednoczonych zaczęło Nowy Rok w „naszą" niedzielę o godz. 6.00, natomiast zachodnie wybrzeże – o godz. 9.00, a Alaska o godz. 10.00. Na Hawajach kolejny rok zaczął się o godz. 11.00 naszego czasu. (PAP)

Strefy czasowe, Adobe Stock

eprasa.pl 80f50968f9

Dia- czy paramagnetyk?

Oto jest pytanie!

W artykule został opisany prosty i skuteczny układ, przeznaczony do wykrywania przedmiotów, wykazujących słabe właściwości magnetyczne. Korzystając z tego układu można wykonać doświadczenia, których zwykle nie wykonuje się w szkole, ponieważ są uważane za zbyt trudne lub się nie udają.

Stanisław **Bednarek**
Jacek **Ćwik**

Wykrywanie przedmiotów wykonanych z materiałów ferromagnetycznych jest łatwe, ponieważ te przedmioty są silnie przyciągane przez magnesy trwałe i jest to powszechnie znane. Wiele przedmiotów w naszym otoczeniu jest jednak zrobionych z materiałów, które słabo albo bardzo słabo oddziałują z polem magnetycznym. Są to materiały dia-, albo paramagnetyczne.

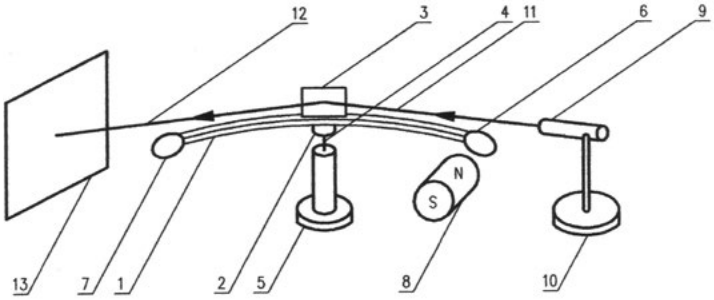
Materiały diamagnetyczne bardzo słabo oddziałują z polem magnetycznym i są wypychane z obszaru o większej wartości indukcji pola. Z kolei materiały paramagnetyczne oddziałują z polem magnetycznym nieco silniej i ulegają wciąganiu w obszar pola o większej wartości indukcji [1].

Informacja o tym jest zwykle podawana uczniom „na wiarę" bez poparcia eksperymentalnego, ponieważ wykonanie odpowiedniego doświadczenia w warunkach szkolnych jest uważane za zbyt trudne. Okazuje się, że wcale tak być nie musi. Opisany w tym artykule układ doświadczalny pozwala przy użyciu prostych środków skutecznie wykrywać materiały o słabych właściwościach magnetycznych i odróżniać diamagnetyczne od paramagnetycznych.

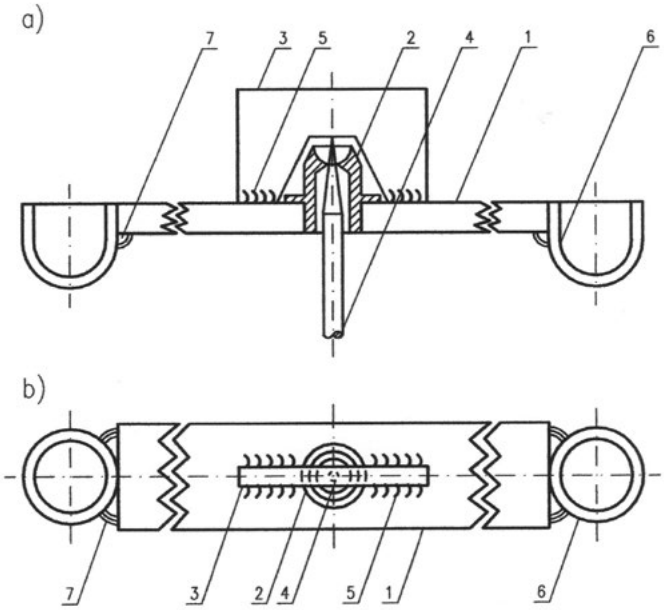
Budowa układu doświadczalnego

W budowie układu wykorzystano dwa pomysły. Pierwszy z nich polega na zwiększeniu niewielkiej siły oddziaływania dia- albo paramagnetyków z ogólnie dostępnymi magnesami trwałymi, tak żeby pokonać moment sił oporu ruchu i zauważyć skutek tego oddziaływania [2]. Ten pomysł zrealizowano przez zastosowanie długiej i lekkiej dźwigni, która może obracać się z małym tarciem. Drugi pomysł polega na uwidocznieniu dla dużej grupy osób małych zmian położenia dźwigni. Odbywa się to na ekranie przy użyciu wiązki światła ze wskaźnika laserowego, czyli tzw. „dźwigni optycznej" [3]. Układ doświadczalny, w którym dwa wspomniane pomysły są zastosowane przedstawia rys. 1.

Do budowy układu będzie potrzebna cienka i lekka listewka 1 o długości ok. 1 m i przekroju poprzecznym w kształcie prostokąta lub kwadratu o boku 3-5 mm. Listewka może być wykonana z drewna sosnowego i wtedy jest do nabycia w sklepie z artykułami budowlanymi, albo z balsy – bardzo lekkiego i dość wytrzymałego drewna i takie listewki są dostępne w sklepach z artykułami dla modelarzy lub dla plastyków. W połowie długości listewki należy wywiercić przelotowy otwór o średnicy, umożliwiającej umieszczenie w nim dolnej części metalowej końcówki 2 zużytego wkładu do długopisu (rys. 2). Końcówka 2 powinna być wcześniej umyta alkoholem z resz-

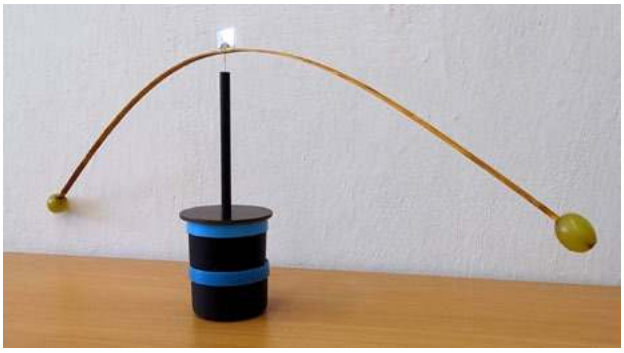


Rys. 1. Schemat układu doświadczalnego; 1 – cienka listewka sosnowa albo z balsy, 2 – łożysko z końcówki wkładu do długopisu, 3 – zwierciadełko płaskie z kawałka folii lustrzanej, 4 – cienka igła, 5 – podstawka igły, 6 – badany obiekt, np. owoc winogrona, 7 – przeciwciężar, 8 – magnes trwały neodymowy, 9 – wskaźnik laserowy, 10 – podstawka wskaźnika laserowego, 11 – wiązka światła padająca, 12 – wiązka światła odbita, 13 – ekran.



Rys. 2. Szczegóły przygotowania listewki: a) widok z boku, b) widok z góry; cyfry 1-4 mają takie same znaczenie, jak na rys. 1, 5, 7 – klej epoksydowy, 6 – połowa kapsułki od lekarstwa, albo miseczka z wytłoczki (tzw. blistra) od tabletek.

eprasa.pl 80f50968f9



Fot. 1. Wygląd wykonanej listewki do wykrywania materiałów magnetycznych z owocami winogrona na końcach.

tek tuszu i należy z niej wypchnąć piszącą kuleczkę przy pomocy igły. Dolną część tak przygotowanej końcówki 2 smaruje się klejem epoksydowym 5, np. Poxipol i umieszcza w otworze listewki 1 (rys. 2a).

Po stwardnieniu kleju 5, trwającym ok. 10 min., nad wystającą z listewki 1 ku górze końcówką wkładu 2 należy przykleić małe zwierciadełko płaskie 3, używając tego samego kleju 5. Najprostszy sposób uzyskania takiego zwierciadełka, to wycięcie prostokąta o wymiarach ok. 1,5 x 3 cm z kawałka folii lustrzanej. Arkusz takiej folii formatu A4 można kupić w sklepach z artykułami papierniczymi lub artykułami dla plastyków. W arkuszu należy też zrobić trójkątne wycięcie na wystającą część końcówki 2 od wkładu. Zwierciadełko 3 ustawia się w podłużnej płaszczyźnie symetrii listewki 1, (rys. 2.b), nakłada klej 5 na jego dolny brzeg oraz wycięcie i pozostawia nieruchome w tej pozycji przez ok. 10 min.

Tak przygotowaną listewkę 1 trzeba nałożyć na ostrze cienkiej igły 4, osadzonej w podstawce 5, wykonanej z materiału nieferromagnetycznego (fot. 1). Igłę 4 wprowadza się od dołu w otwór końcówki 2 wkładu do długopisu. Można również wykorzystać w tym celu drewnianą lub plastikową podstawkę od igły magnetycznej. Ważne jest, żeby ostrze igły 4 weszło luźno do otworu końcówki 2, a listewka 1 obracała się w płaszczyźnie poziomej z jak najmniejszym tarciem. Gdyby ostrze w gotowej podstawce było zbyt grube, należy je spiłować.

Eksperymenty

Oczywiście, doświadczenia muszą być wykonywane w miejscu, gdzie nie ma powiewów powietrza i wstrząsów. Dla zachowania poprawności metodologicznej (kanonów jedynej różnicy i jedynej zgodności), należy najpierw pokazać, że końce listewki 1 bez umieszczonych na nich badanych przedmiotów lub materiałów 6 nie oddziałują w zauważalny sposób z polem magnetycznym zastosowanych magnesów. Co prawda, drewno jest diamagnetykiem. Jeżeli jednak zastosowana listewka jest dostatecznie cienka i nie zwiera zanieczyszczeń, szczególnie materiałami ferromagnetycznymi, np. drobnymi opiłkami, żelaza, które mogły się do niej przypadkowo przykleić w czasie obróbki, to jej oddziaływanie będzie niezauważalne.

Badane przedmioty lub materiały 6, umieszcza się na jednym z końców listewki 1 i równoważy przeciwciężarem 7, tak żeby ramiona listewki zajmowały pozycję symetryczną względem pionowej osi obrotu. Jeżeli obiekt jest miękki, np. owoc winogrona, truskawka, kawałek plasteliny, to można go nałożyć na listewkę wbijając na jej koniec (fot. 1). Obiekty o małych rozmiarach w granicach kilku milimetrów, np. kawałek grafitu, można położyć bezpośrednio na końcu listewki.

Po umieszczeniu badanego obiektu na końcu listewki trzeba poczekać aż ustaną jej wahania. Do badanych obiektów należy powoli zbliżyć na odległość kilku milimetrów magnes trwały 8, wykonany ze spieku proszków żelaza, neodymu i boru, pokryty ochronną warstwą niklu, nazywany potocznie magnesem neodymowym.

Jeżeli badany obiekt ma właściwości diamagnetyczne, bo np. zwiera dużo wody, tak jak owoce winogrona, to nastąpi jego odpychanie od magnesu. W przypadku obiektów paramagnetycznych efekt będzie odwrotny. Ponieważ listewka ma pewien moment bezwładności, więc po przeniesieniu magnesu na przeciwną stronę obiektu należy poczekać aż jej ruch ulegnie wyhamowaniu i wtedy dopiero będzie widoczny właściwy efekt oddziaływania obiektu z magnesem.

Szczególnie widowiskowe i łatwe do wykonania jest wykazanie właściwości diamagnetycznych wody przy użyciu dwóch dużych owoców winogrona. Listy substancji dia- i paramagnetycznych wraz z wartościami przenikalności lub podatności magnetycznej, które stanowią informację o sile ich oddziaływania z polem magnetycznym są podawane w tablicach fizycznych, np. [4].

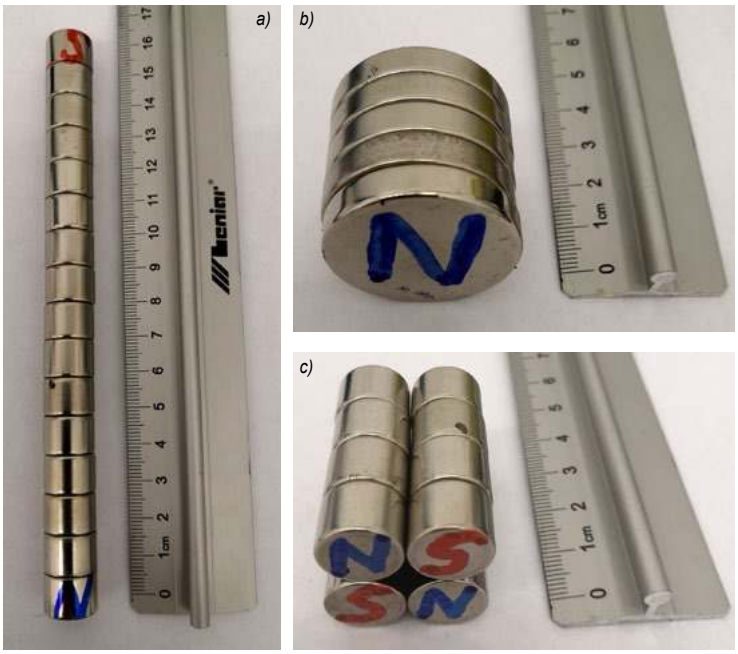
Ze względu na znaczną wartość indukcji pola wytwarzanego przez magnesy neodymowe, należy zachować ostrożność podczas ich używania. W szczególności trzeba usunąć przedmioty ferromagnetyczne o dużych rozmiarach oraz magnetyczne nośniki danych z miejsca doświadczeń. Nie wolno też puszczać swobodnie magnesów, ponieważ mogą przycisnąć skórę palców, a z powodu kruchości spieku ulec pęknięciu podczas uderzenia. Osoby z różnego rodzaju implantami medycznymi nie powinny używać tych magnesów bez uprzedniej konsultacji z lekarzem.

Ulepszenia układu

Efekty doświadczalne w opisanym układzie są już widoczne przy użyciu pojedynczych magnesów neodymowych w kształcie walca o rozmiarach ok. 1,5 cm. Siła oddziaływania badanych obiektów z magnesem zależy jednak nie tylko od wartości indukcji pola magnetycznego, ale też od jego niejednorodności, której miarą jest gradient. Dokładniej, wartość tej siły jest wprost proporcjonalna do iloczynu tych wielkości i objętości obiektu zawartej w tym polu [5]. Dlatego w niejednorodnym polu powinien znajdować cały obiekt.

Niestety, łatwo dostępne w handlu magnesy neodymowe mają zwykle niewielkie rozmiary. Żeby w przypadku niektórych materiałów zauważyć wyraźniejsze efekty, można użyć większej liczby magnesów złożonych w odpowiedni sposób. Przykłady takich zestawów przedstawia fot. 2. Zestaw w kształcie długiego pręta, złożony z dużej liczby magnesów walcowych (fot. 2.a) pozwala zwiększyć wartość indukcji magnetycznej przy końcowych magnesach, ponieważ długi pręt ma mniejszy współczynnik odmagnesowania [6].

eprasa.pl 80f50968f9



Fot. 2. Zestawy magnesów neodymowych używanych podczas doświadczeń: a) odpowiednik długiego magnesu sztabkowego, b) krótki magnes o zwiększonym polu przekroju poprzecznego, c) zestaw czerech krótkich magnesów o zwiększonym gradiencie pola.

Zestaw, składający się z kilku magnesów o większej średnicy (fot. 2.b) umożliwia objęcie polem magnetycznym całego obiektu. Z kolei zestaw czerech magnesów, ustawionych obok siebie z naprzemiennie skierowanymi biegunami (fot. 2.c), daje wzrost gradientu pola i objętości zajmowanej przez to pole.

Do pokazania obrotu listewki 1 o niewielki kąt dużej grupie osób jest przeznaczony układ rozbudowany o wskaźnik laserowy 9, zamocowany na podstawce 10 i ekran 13 (rys. 1). Wskaźnik 9 emituje wiązkę światła 11, padającą na zwierciadełko 3, która następnie jako wiązka odbita 12 daje plamkę świetlną na ekranie 13. Jeżeli, w wyniku oddziaływania obiektu 6 umieszczonego na listewce 1 z magnesem 8, nastąpi obrót zwierciadełka 3 i zmiana kąta padania wiązki 11 o $\Delta\alpha$, to kąt odbicia wiązki 12 zmieni się o $2\Delta\alpha$. Oprócz tego ekran 13 może być ustawiony w odległości kilku metrów od zwierciadełka 3. Dzięki temu przesunięcie plamki świetlnej na ekranie będzie duże i dobrze widoczne dla licznej grupy osób.

Żeby umożliwić badanie cieczy i materiałów sypkich za pomocą opisanego układu, należy na końcach listewki 1 przykleić klejem epoksydowym dwa małe pojemniczki 6 (rys. 2), wykonane z cienkiej, niemetalowej folii. Dobrze nadają się do tego celu połowy kapsułki od lekarstwa lub miseczki otrzymane przez odcięcie zagłębienia wytłoczki na tabletki, tzw. blistra. Ilość materiału tego pojemniczka powinna być na tyle mała, żeby jego oddziaływanie w stanie pustym z zastosowanymi magnesami było niezauważalne.

Podsumowanie

Opisany w tym artykule układ jest jednym z przykładów na to, że doświadczania uważane za trudne lub niemożliwe do wykonania w warunkach szkolnych dają się z powodzeniem przeprowadzić, jeżeli będą zastosowane odpowiednie materiały i umiejętnie dobrane ważne parametry układu. Używane do opisanych doświadczeń magnesy neodymowe są wykonane z nowoczesnych materiałów spiekanych, których technologia została opracowana w latach osiemdziesiątych XX w. [7]. Z kolei zastosowanie długiej i lekkiej listewki, ułożyskowanej na igle i końcówce wkładu do długopisu, pozwala zwiększyć niewielki moment sił oddziaływania magnetycznego i pokonać opory ruchu. Wskaźnik laserowy jest wprost idealnym źródłem światła, dającym niemal równoległą wiązkę bez dodatkowych elementów optycznych. Pomyślne przeprowadzenie w szkole trudnego doświadczenia wzbudza też wiele pozytywnych emocji, umacnia wiarę we własne siły i podnosi autorytet nauczyciela.

Interpretując zaobserwowane efekty doświadczeń, trzeba jednak zachować krytyczne podejście i nie wyciągać zbyt szybko końcowych wniosków. W którymś z doświadczeń może się zdarzyć, że badany materiał będzie przyciągany, co sugerowałoby posiadanie właściwości paramagnetycznych. W odpowiednich tablicach ten materiał będzie jednak zaliczany do diamagnetyków, a więc powinien być odpychany. Tak może się zdarzyć, gdy badany materiał będzie zanieczyszczony nawet niewielką ilością substancji o znacznie silniejszych właściwościach paramagnetycznych lub ferromagnetycznych, np. mikroskopijnymi opiłkami stali z narzędzia używanego do przycięcia kwakała tego materiału.

W przeprowadzonych doświadczeniach nie jest przecież badany skład chemiczny materiałów. Z kolei w przypadku badania kawałków metalu o małym oporze właściwym, np. miedzi czy aluminium, może okazać się, że są one najpierw odpychane od zbliżanego magnesu, a następnie podczas jego oddalania przyciągane. Taki efekt może być spowodowany indukowaniem prądów wirowych w kawałku metalu i ich oddziaływaniem z magnesem, zgodnie z regułą Lenza. W tym przypadku należy zmniejszyć szybkość ruchu magnesu albo podzielić materiał na mniejsze części.

Stanisław Bednarek
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Uniwersytetu Łódzkiego
Jacek Ćwik
Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych
Polskiej Akademii Nauk we Wrocławiu

LITERATURA

[1] S. Szczeniowski, Fizyka doświadczalna, cz. III, Elektryczność i magnetyzm, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa (1980), s. 330.
[2] S. Szczeniowski, Fizyka doświadczalna, cz. I, Mechanika i akustyka, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa (1973), s. 303.
[3] S. Szczeniowski, Fizyka doświadczalna, cz. IV, Optyka, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa (1983), s. 25.
[4] W. Mizerski, Tablice fizyczno-astronomiczne, Wydawnictwo Adamantan, Warszawa (2013), s.187.
[5] H. Rawa, Elektryczność i magnetyzm w technice, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa (1994), s. 336.
[6] J. K. Kuryłowicz, Badania materiałów magnetycznych, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa (1964), s. 24.
[7] M. Lenowicz, J. J. Wysłocki, Współczesne magnesy, technologie, mechanizmy koercji, zastosowania, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa (2005), s. 48.

eprasa.pl 80f50968f9

Foto – Adobe Stock

Jaka szkoła, jaka edukacja – c.d.

W artykule „Jaka szkoła, jaka edukacja...", który ukazał się w „Fizyce w Szkole" nr 6/2021 pisałem o problemach związanych z realizacją obecnego programu nauczania fizyki, mając nadzieję, że rozpocznie on dyskusję o potrzebie zmian w szkolnictwie. Sądzę bowiem, że już czas, by spróbować odpowiedzieć na pytanie, jaką chcemy mieć szkołę, bo na pewno nie taką, jaka jest obecnie, ale i nie taką, jaka była. A więc jaką?

Waldemar **Reńda**

Zacznę od systemu szkolnego.[1]

Aby odpowiedzieć na wyżej postawione pytanie, należy przyjrzeć się systemom, które już były oraz przeanalizować ich plusy i minusy. Po II Wojnie Światowej mieliśmy 7-klasową szkołę podstawową, 4-letnie liceum lub technikum oraz dwu- lub 3-letnie szkoły zawodowe.[2] Przy czym większość uczniów kształciła się w technikach i szkołach zawodowych.[2]

Potem pojawiło się przekonanie, że należałoby wydłużyć okres kształcenia ogólnego, co zrealizowano, wprowadzając gimnazja. W efekcie kształcenie podstawowe trwało 9 lat. Uzupełniało je 3-letnie liceum oraz 4-letnie technikum. Ostatnio powrócono do poprzedniego systemu.

Który system jest lepszy? Niestety, każdy system ma zarówno zalety jak i wady. Nie można zbudować idealnego systemu szkolnego. Niemniej jednak należy starać się, by był on możliwie optymalny.

Zapytajmy więc, jakie cele stoją przed szkolnictwem? Otóż **zasadniczym celem szkoły jest wyposażenie uczniów w podstawową wiedzę o społeczeństwie, przyrodzie i kulturze oraz przygotowanie uczniów do pełnienia określonych ról społecznych.** Ponadto szkoła powinna przygotowywać uczniów do kontynuowania kształcenia w kolejnym etapie tego procesu, łącznie z przygotowaniem do podjęcia studiów. Szkolnictwo powinno również organizować kształcenie zawodowe.

A zatem, czy ma to być 8-klasowa szkoła podstawowa plus 4-ro lub 5-letnia szkoła średnia? A może 6-letnia szkoła podstawowa, 3-letnie gimnazjum plus 3-letnie liceum lub 4-letnie technikum?

Rozważmy za i przeciw obu rozwiązaniom.

Krytycy systemu, który jest obecnie i który funkcjonował przed poprzednią reformą twierdzili, że należy organizować gimnazja, by wyrównać szanse rozwojowe części uczniów pochodzących z małych, wiejskich szkół podstawowych. Dodatkowym argumentem było to, że należy przesunąć moment, w którym uczniowie będą decydować czy rozpocząć naukę zawodu, czy też kontynuować naukę w liceach. Gimnazja miały i ten walor, że nauczyciele przedmiotów przyrodniczych mogli mieć dostateczną liczbę godzin swojego przedmiotu, czego nie

[1] System szkolny sprzyja dobrej pracy szkół lub ją utrudnia.
[2] Później były 5-letnie technika, a następnie 8-klasowe szkoły podstawowe i 4-letnie technika.
[3] Wówczas do liceów uczęszczało ok. 20% uczniów. Potem te proporcje wyrównały się.

eprasa.pl 80f50968f9

można było uzyskać w mniejszych szkołach podstawowych. W efekcie nauczyciele ci, albo łączyli etaty w kilku szkołach, albo uczyli też innych przedmiotów. I tak też jest – niestety – obecnie.

A szkolnictwo zawodowe?

Uważam, że szkolenie zawodowe po gimnazjum jest już spóźnione. Młodzież w tym wieku już niechętnie podejmuje naukę zawodu.[4] A przecież nadal będą potrzebni murarze, stolarze, hydraulicy, mechanicy samochodowi, spawacze, hutnicy, rolnicy, fryzjerzy, itp. itd. Trzeba zatem kształcić młodzież także w tych zawodach. Czyż tokarz obsługujący tokarkę numeryczną wartą kilkadziesiąt milionów złotych, jest mniej wartościowym pracownikiem niż biuralista po studiach ekonomicznych? Oczywiście szkoły zawodowe są znacznie droższe od ogólnokształcących, ale nie należy z nich rezygnować, a wręcz przeciwnie – starać się, by były jak najlepsze.

Jeżeli już zdecydowano by się na gimnazja, to warto za przykładem niektórych krajów zachodnich organizować w nich klasy o zróżnicowanych programach. Mogłyby to być klasy dla uczniów o określonych zainteresowaniach – np. ogólnotechniczne, przyrodnicze, artystyczne itp. Tu nie chodzi o przygotowanie do zawodu, ale o rozwijanie zainteresowań i uzdolnień. W tym przypadku w liceum fakultety przedmiotowe należałoby organizować już od klasy pierwszej.

Trzeba jednak wyraźnie powiedzieć, że w obecnej sytuacji kolejna rewolucja organizacyjna byłaby trudna do przeprowadzenia. Zostańmy więc (przynajmniej na razie) przy obecnym systemie.

A teraz o programach nauczania.

Wadą poprzedniego systemu było to, że program gimnazjalny był tak przeładowany wiedzą faktograficzną, że nie można było go zrealizować w 3 lata i kończono w I klasie liceum. Drugą wadą tego systemu był zbyt krótki czas przygotowania uczniów liceów do studiów, bo praktycznie wynoszący zaledwie półtora roku,[5] co przy złej organizacji nauczania przedmiotów w zakresie rozszerzonym, pogarszało stan wiedzy uczniów z tych przedmiotów. Bez względu na to, czy pozostaniemy przy obecnym systemie z 8-klasową szkołą podstawową i obecnym kształceniem na poziomie średnim, czy też powrócimy do systemu z gimnazjami, należy wprowadzić wiele zmian zarówno programowych jak i organizacyjnych.

Aby odpowiedzieć na pytanie, jakie powinny być programy nauczania, warto zbadać, co po 10 lub 20 latach od matury pozostało w naszej pamięci. Zaryzykuję twierdzenie, że owa wiedza niewiele wykracza poza poziom ośmioklasowej szkoły podstawowej. Mam tu oczywiście na myśli wiedzę nie związaną z wykonywaną profesją lub indywidualnymi zainteresowaniami. Następnie zapytałbym o to, jaka wiedza jest nam potrzebna, abyśmy w optymalny sposób mogli funkcjonować w społeczeństwie. Okazuje się, że oprócz wiedzy zawodowej, potrzebna jest nam jeszcze inna wiedza niż ta, którą zdobywaliśmy w liceum.[6] Jakie stąd wynikają wnioski?

Oto one: Po pierwsze: należy odchudzić programy dla szkół podstawowych, gdyż obecnie w każdym z przedmiotów uczeń musi poznać po kilka tysięcy pojęć, które za rok lub dwa w większości zapomni.[7] Podstawowa wiedza przedmiotowa ma wprawdzie pozwolić uczniom poznać i zrozumieć otaczającą rzeczywistość przyrodniczą i społeczną, ale **zamiast ćwiczenia pamięci, należy rozwijać u uczniów kompetencje poznawcze, takie jak ciekawość poznawczą oraz umiejętność badania i analizowania obserwowanych zjawisk przyrodniczych i społecznych.**

Po drugie: Aby pogodzić zmniejszenie odciążenia uczniów z wysoką jakością nauczania, należy postawić na **specjalizację przedmiotową**, a więc na przedmioty, przygotowujące uczniów do studiów na wybranym kierunku. Można to uzyskać, organizując zajęcia w grupach fakultatywnych, a nie w klasach sprofilowanych. Fakultety tworzą bowiem system bardziej elastyczny i lepiej dostosowany do potrzeb uczniów.[8] Uczeń powinien mieć możliwość wyboru dowolnego fakultetu z dwóch lub trzech przedmiotów. Wiem, że to komplikuje organizację nauczania, ale **szkoła jest dla uczniów, a nie uczniowie dla szkoły!**[9]

W przypadku 4-letniego liceum fakultety należy organizować od klasy drugiej i większość czasu lekcyjnego poświęcić na zajęcia w owych fakultetach. Przy czym, aby dobrze przygotować uczniów do studiów, uczniowie powinni mieć w tygodniu minimum trzy 2-godzinne zajęcia z każdego przedmiotu kierunkowego.[10]

Po trzecie: należy wprowadzić treści, które dadzą wiedzę potrzebną do aktywnego udziału w życiu społecznym, a więc elementy psychologii, socjologii, politologii, etyki, ekonomii i ekologii. Psychologia i etyka pozwalają kształtować właściwe relacje międzyludzkie,[11] a socjologia i politologia – rozumieć procesy i zachowania społeczne. Ekonomia zaś uczy, jak dbać o byt materialny swój i najbliższych nam osób oraz rozumieć procesy ogólnogospodarcze. Należy też wprowadzić zajęcia z kulturoznawstwa oraz historii sztuki, co pozwoli na świadome uczestnictwo w kulturze i tworzenie kulturowej wspólno-

[4] Z badań wynika, że np. zainteresowania techniczne u chłopców pojawiają się dość wcześnie i potem słabną.

[5] W klasie I liceum uzupełniano programy nauczania gimnazjów.

[6] Nie wspominam tu o szkołach zawodowych, ale i tam jest wiele do zrobienia. Przede wszystkim trzeba je doposażyć i zapewnić należytą kadrę nauczycielską i instruktorską.

[7] Treści te można łatwo znaleźć w Internecie.

[8] Klasy sprofilowane utrudniają swobodny wybór przedmiotów, w tym języka obcego.

[9] Obecnie ok. 1/3 naszych licealistów korzysta z korepetycji (w Niemczech to tylko kilkanaście procent), co oznacza, że nasz system szkolny nie jest dostosowany do potrzeb edukacyjnych młodzieży.

[10] Fakultety należy organizować w możliwie niewielkich grupach.

[11] Jeżeli chcemy mieć społeczeństwo zdrowe psychicznie, należy na terenie szkoły wyeliminować wszelkie zachowania patologiczne.

eprasa.pl 80f50968f9

ty społeczeństwa.[12] Obecnie wzrost poziomu wykształcenia niestety nie przekłada się na wzrost kultury naszego społeczeństwa.

Uczeń powinien też posiadać wiedzę o tym, jak dbać o własne zdrowie fizyczne i psychiczne oraz jak świadomie podejmować zachowania związane z seksualnością i świadomym macierzyństwem. I wreszcie, jak uczyć odpowiedzialności za własny los, los osób nam bliskich, a także los społeczeństwa, którego jest cząstką. **Nauczanie i wychowanie powinno służyć szeroko pojętemu dobru człowieka.**

Podstawowym zadaniem nauczania powinno być kształtowanie postaw zdroworozsądkowych oraz umiejętności krytycznego analizowania problemów. Realizację tego celu można uzyskać w każdym działaniu dydaktycznym, a także poprzez wprowadzenie do nauczania elementów filozofii. **Nauczanie powinno być nauczaniem wychowującym oraz przygotowującym młodego człowieka do podejmowania w życiu racjonalnych wyborów.** Aby to osiągnąć, **szkoła powinna być wolna od jakiejkolwiek ideologii, a przekazywane treści oparte wyłącznie na sprawdzonej wiedzy naukowej.**[13]

Potrzebna jest również wiedza medialna, czyli jak należy roztropnie korzystać ze środków masowego przekazu i zawartych tam informacji. Uczeń powinien umieć je selekcjonować i tak z nich korzystać, by nie być podatnym na wszelkiego rodzaju manipulacje oraz niebezpieczne dla zdrowia psychicznego i fizycznego propozycje. Wiedza ta powinna być przekazywana uczniom już od pierwszych klas szkoły podstawowej na godzinach wychowawczych, czy też na specjalnych prelekcjach.

Nie będę tu dokładnie omawiał programów nauczania poszczególnych przedmiotów, co będzie domeną ich szczegółowych dydaktyk. Liczę, że **nie będą to programy przeładowane treściami, ale równocześnie na odpowiednim poziomie zarówno merytorycznym i dydaktycznym.**

Program klasy pierwszej liceum 4-letniego powinien obejmować wszystkie podstawowe przedmioty przewidziane w nauczaniu ogólnokształcącym, przy czym każdy z tych przedmiotów powinien zawierać historię myśli tej dziedziny nauki, wiedzę o jej twórcach, meandrach dociekań naukowych oraz najnowsze osiągnięcia w tej dziedzinie – łącznie z celami, jakie stawiają sobie uczeni odnośnie dalszych poszukiwań i prac w zakresie tej nauki.

W każdym przedmiocie należy zwrócić uwagę na stosowane metody badawcze w tej dziedzinie nauki oraz jej relacje do innych nauk. **Szczególną uwagę należy zwrócić na problemy ekologiczne** związane z daną dziedziną działalności. Należy więc opracować takie tematy jak: biologia a ekologia, geografia a ekologia, chemia a ekologia, fizyka a ekologia itp.

W dydaktyce nic nie zastąpi żywego postrzegania i działania związanego z obserwacją realnych zjawisk – Adobe Stock

A jak uczyć fizyki?

To oczywiście zależy od poziomu nauczania i zainteresowań uczniów, ale zawsze tak, by nie była ona postrachem dla uczniów.

W przypadku szkoły podstawowej, w kl. VI pojawia się przedmiot „przyroda", traktujący ogólnie o zjawiskach przyrodniczych zarówno dotyczących przyrody ożywionej jak i nieożywionej, z którymi uczeń styka się w życiu codziennym. Potem powinien być realizowany w miarę pełny, ale **elementarny** kurs tego przedmiotu. Przy czym powinien on być realizowany przede wszystkim **poprzez obserwację i badanie zjawisk fizycznych**.[14] To znaczy: opisujemy zjawiska, interpretujemy je, ale nie kładziemy nacisku na stronę teoretyczno-matematyczną. Uczeń musi zrozumieć otaczającą go rzeczywistość przyrodniczo-techniczną, ale niekonieczne od strony matematycznej. Obliczenia powinny dotyczyć tylko tego, z czym mieć będzie do czynienia w życiu codziennym. Uczeń powinien też poznać podstawowe prawa fizyczne i umieć je skomentować oraz zdobyć przekonanie, że przyrodą rządzą nienaruszalne prawa, których słuszność została w pełni potwierdzona. Ochroni to go przed przyjmowaniem niesprawdzonych hipotez i poglądów.

W przypadku liceum należałoby w kl. I. uzupełnić kurs fizyki realizowany w szkole podstawowej o zagadnienia fizyki współczesnej z treściami, o których pisałem wyżej. Natomiast pełny kurs fizyki na odpowiednio wysokim poziomie powinien być realizowany na zajęciach fakultatywnych dla uczniów, którzy ten przedmiot wybiorą na egzaminie maturalnym.

Należy wzajemnie skorelować programy fizyki i matematyki. Przykładem niech będzie program fizyki w kl. I liceum, w którym występuje konieczność matematycznej analizy różnych rodzajów ruchu bez znajomości funkcji linowej czy kwadratowej oraz umiejętności graficznej ilustracji tych funkcji. Ponadto w programie szkolnej matematyki brak jest zadań dotyczących problemów, jakie pojawiają się w naukach ścisłych.[15]

---

[12] Zaniedbane jest szeroko pojęte kształcenie estetyczne. Oczywiście pojawia się pytanie, kto tych dodatkowych przedmiotów lub dodatkowych treści powinien uczyć i skąd wziąć specjalistów? Otóż studia pedagogiczne powinny zawierać wykłady zarówno z psychologii, filozofii z etyką, elementy socjologii i politologii, a także zajęcia z kulturoznawstwa. Poza tym będą oczywiście potrzebne odpowiednie podręczniki oraz materiały pomocnicze.

[13] Uważam, że szkolnictwo powinno być apolityczne, Szkoła powinna też być światopoglądowo neutralna, a **nauczanie i wychowanie** (w tym etyka) **pozbawione jakiejkolwiek ideologii**. Taki warunek spełnia m.in. książka Anny Pawełczyńskiej „Drogi do szczęścia". Ukazała się ona w 1993 r. nakładem WSiP i warto ją wznowić.

[14] Wiemy, że u uczniów na poziomie szkoły podstawowej i w młodszych klasach szkoły średniej dominuje myślenie konkretno-obrazowe, a myślenie logiczno-abstrakcyjne rozwija się nieco później.

[15] Matematycy nie chcą robić tego typu zadań, bo twierdzą, że się na tym nie znają.

eprasa.pl 80f50968f9

Ponieważ w fizyce ważna jest umiejętność dostrzegania relacji pomiędzy zjawiskami i procesami fizycznymi, dlatego należy jej uczyć poprzez wykonywanie i analizowanie możliwie dużej liczby doświadczeń zarówno w postaci pokazów, jak i ćwiczeń laboratoryjnych. Dzięki tym ostatnim kształcimy dodatkowo umiejętności badawcze. **Nic bowiem w dydaktyce nie zastąpi żywego postrzegania i działania związanego z obserwacją realnych zjawisk.**[16]

Wskazane byłoby nauczanie holistyczne ukazujące treści wspólne dla fizyki, geografii i astronomii.[17] W nauczaniu wszystkich przedmiotów należy omówić **etyczne aspekty działalności naukowej** oraz odpowiedzialność uczonych za efekty swych prac. Szkoła powinna też umiejętnie reagować na problemy środowiska, w którym funkcjonuje, a także na problemy globalne.

A teraz o matematyce.

Zacznę od tego, o czym napisałem na początku. Otóż każdy z nas, kto zawodowo nie ma do czynienia z zaawansowaną matematyką, operuje w zasadzie czterem działaniami, proporcjami oraz procentami. Tak więc wiedza wyniesiona z programu szkoły podstawowej jest na ogół wystarczająca w życiu codziennym. Rozmawiałem o tym ze studentami uczelni technicznych. Zgodnie twierdzili, że nawet 80% tego, czego ich uczono na lekcjach matematyki w liceum, było nieprzydatne w czasie studiów. Natomiast potrzebny był im rachunek różniczkowy i całkowy. I właśnie te treści powinny znaleźć się w programie rozszerzonym z matematyki i fizyki. Natomiast we wszystkich profilach należy poświęcić więcej czasu na analizę wykresów, diagramów itp., opisujących **rzeczywiste** procesy, a do programu wprowadzić **elementy statystyki**. **Matematyka nie może być nauką samą dla siebie i jej nauczanie należy oprzeć na praktycznych zastosowaniach**. **Nauka musi być funkcjonalna,** w przeciwnym razie jest bezużyteczna.[18] Dotyczy to zresztą wszystkich przedmiotów. Dlatego osoby przygotowujące programy muszą to wziąć pod uwagę. Nie jestem też przekonany do obowiązkowej matury z matematyki w profilach humanistycznych, a szczególnie takiej, jaka jest obecnie.

Wniosek: należy uczyć matematyki, ale nie tak i nie tej, która jest obecnie nauczana.[19]

Powyższe propozycje nie są nowe, gdyż już pojawiały się w programach wprowadzanych w poprzednich reformach. Ciekawym pomysłem był program przedmiotu „przyroda" realizowany niestety z pewnymi oporami i trudnościami w klasach o profilu humanistycznym. Warto wrócić do niektórych tematów z tego programu i to we wszystkich profilach czy grupach fakultatywnych.

Aby z powodzeniem realizować owe programy, należy wyposażyć szkoły we wszystkie środki dydaktyczne zapewniające realizację pełnego zakresu zajęć poznawczych i badawczych, a więc m.in. w dobrze wyposażone i wykorzystane pracownie fizyczne, chemiczne, biologiczne, historyczne, geograficzne, językowe itp., itd.[20] Każda szkoła powinna mieć również dobrze zaopatrzoną bibliotekę nie tylko z lekturami, ale też z wydawnictwami popularnonaukowymi, czasopismami metodycznymi itp.

Nowa szkoła wymaga lepszego kształcenia nauczycieli.[21]

To powinny być 5-letnie pedagogiczne studia przygotowujące do zawodu, nie tylko z odpowiednim programem przedmiotu kierunkowego i jego metodyki nauczania, ale także z kursem dydaktyki ogólnej, psychologii ogólnej i rozwojowej (ze szczególnym uwzględnieniem psychologii wieku szkolnego), pedagogiki, podstaw socjologii oraz kursem filozofii wraz z etyką, a nawet erystyki.[22] Uczelnia taka powinna mieć do dyspozycji szkołę ćwiczeń ze wszystkimi trzema poziomami nauczania. Absolwent powinien nie tylko odbyć lekcje próbne w tej szkole, ale także minimum miesięczne praktyki w każdym z tych typów szkół. Dobrze by było, by przed pełnym zatrudnieniem przeszedł roczną asystenturę pod kierunkiem doświadczonego i dobrego nauczyciela.[23]

Mężczyźni coraz rzadziej wybierają zawód nauczyciela – Adobe Stock

[16] Znam szkoły, w których nie wykonuje się doświadczeń, lub wykonuje się je sporadycznie. Dodam, że programy fizyki z 1986 i 1990 r. zawierały tematy, które należało wykonać w formie ćwiczeń uczniowskich.

[17] Fizyka jest nauką podstawową dla innych nauk przyrodniczych i techniki. Jest więc nauką interdyscyplinarną (por.: geofizyka, biofizyka, chemia kwantowa, astrofizyka itp.) i tak powinna być nauczana. Należałoby również wrócić do astronomii sferycznej, bo rośnie w społeczeństwie zainteresowanie obserwacjami nieba.

[18] Cóż bowiem z tego, że uczeń na lekcji poznał np. funkcję wykładniczą, jeżeli nie rozumiał na czym polegał wykładniczy wzrost zachorowań na Covid-19.

[19] Mówi się, że matematyka jest królową nauk. Jest ona jedynie ich użytecznym językiem. Matematycy twierdzą, że nauczanie matematyki jest potrzebne, choćby po to, że rozwija myślenie. Owszem, ale jest to myślenie matematyczne, a nie uniwersalne. Każda bowiem dziedzina wiedzy kształtuje swoisty typ rozumowania. Matematyk zwykle operuje pewnym zbiorem algorytmów, które nie zawsze pomagają w analizowaniu zjawisk przyrodniczych i społecznych oraz w podejmowaniu życiowych decyzji. Nie zauważyłem bowiem, by pod tym względem matematycy wyróżniali się spośród przedstawicieli innych dziedzin.

[20] Stan pracowni szkolnych jest katastrofalny. W dodatku nauczyciele z nich nie korzystają, bo jak twierdzą, brak im na to czasu, a ja dodam: chęci, a nawet umiejętności.

[21] Zachętą do wyboru tego typu studiów powinna być **należyta płaca nauczycieli**! Dodam, że przed wojną płace te były relatywnie wysokie, a nasz zawód cieszył się społecznym poważaniem.

[22] Takie programy realizowano w dawnych Wyższych Szkołach Pedagogicznych.

[23] Pozwoli to również na poznanie sposobów radzenia sobie z uczniami sprawiającymi trudności wychowawcze, co jest przysłowiową piętą Achillesa początkujących nauczycieli.

eprasa.pl 80f50968f9

Dobrze wyposażone i wykorzystane pracownie fizyczne pozwalają lepiej realizować program – Adobe Stock

W przypadku fizyki program studiów powinien obejmować całość fizyki ogólnej i doświadczalnej oraz kurs astronomii. Szczególną uwagę należałoby zwrócić na kształcenie umiejętności wykonywania doświadczeń pomiarowych i pokazów.

Aby proces dydaktyczny był owocny, oprócz należytego przygotowania zawodowego nauczyciela i odpowiedniego wyposażenia szkoły we wszystkie pomoce naukowe niezbędne do realizacji programu nauczania danego przedmiotu, uczeń musi mieć możliwość korzystania z dobrych podręczników napisanych przez sprawdzone zespoły dydaktyków danego przedmiotu oraz różnorodnych pomocniczych środków dydaktycznych. Należy jednak pamiętać, że **nic nie zastąpi uczniowi kontaktu z mądrym nauczycielem, będącym jego życzliwym przewodnikiem zarówno w świecie nauki, jak i w świecie wartości.**

Nauczyciel powinien mieć zapewnioną specjalistyczną pomoc ze strony doświadczonych metodyków oraz możliwość nieodpłatnego doskonalenia zawodowego, a ocena jego pracy powinna dotyczyć jedynie postawy pedagogicznej oraz uzyskiwanych efektów dydaktyczno-wychowawczych.

Inne uwagi:

Matura powinna być przesunięta na drugą połowę maja i poprzedzona obowiązkowymi konsultacjami z przedmiotów maturalnych. Powinna być wyłącznie pisemna na poziomie rozszerzonym z przedmiotów kierunkowych realizowanych w danym profilu czy fakultecie.

No i najwyższy czas, by skończyć z testomanią.[24]

W szkole podstawowej należy prowadzić dodatkowe zajęcia z dziećmi, które nie nadążają z opanowywaniem materiału programowego.

Co jeszcze? Przede wszystkim trzeba szkołę odbiurokratyzować. Ilość tego typu zadań jest ogromna i na ogół zbyteczna. Nauczyciel ma ministerialną podstawę programową i ma obowiązek ją realizować. Po co więc jeszcze dodatkowe plany, sprawozdania, wypełnianie druków, rubryczek itp. itd. Ponadto szkoła powinna być uwolniona od wszelkiego typu nacisków administracyjnych, jak i wpływowych środowisk oraz czynników politycznych, a jej ocena jak i ocena poszczególnych nauczycieli powinna dotyczyć jedynie postawy pedagogicznej oraz pracy dydaktyczno-wychowawczej.

Jeżeli chcemy mieć dobrych nauczycieli, musimy ich należycie wynagradzać. Należy zapewnić im możliwie najlepszy komfort pracy, niezbyt liczne klasy i nie obciążać ich zbyt wieloma godzinami nadliczbowymi, ani też dodatkowymi zajęciami. **Nauczyciel przemęczony to nie tylko zły nauczyciel, ale i zły wychowawca.**

I jeszcze jedna uwaga. Zawód nauczycielski jest zawodem nadmiernie sfeminizowanym. W efekcie nierzadko jedynym mężczyzną w szkole podstawowej jest nauczyciel w-f. Podobnie zaczyna być i w liceach, a przecież młodzież potrzebuje również męskich autorytetów i wzorców działania. Istnieją różnice psychofizyczne pomiędzy dziewczynkami[25] i chłopcami, które trzeba uwzględniać zarówno w procesie dydaktycznym, jak i w działalności wychowawczej. Tak się jednak nie dzieje i w efekcie nie są dostatecznie rozwijane zainteresowania i uzdolnienia bardziej typowe dla chłopców. Cierpi na tym szczególnie nauczanie fizyki, bo wykonywanie doświadczeń raczej nie jest domeną kobiet, a bez doświadczeń trudno dobrze uczyć fizyki.

I na koniec: programy nauczania nie powinni układać naukowcy, ale praktycy.[26] Powinien to być zespół osób zajmujący się dydaktyką danego przedmiotu. Wskazane by było, aby wybrani członkowie tego zespołu napisali również podręcznik, opracowali instrukcję programową i inne potrzebne materiały dydaktyczne zarówno dla uczniów jak i nauczycieli.

O organizacji procesu nauczania, siatce godzin itp. nie mogą decydować politycy,[27] ani lobby takiego czy innego przedmiotu. Tak było dotąd, w efekcie czego przedmioty przyrodnicze były traktowane po macoszemu. A przecież to właśnie nauki przyrodnicze w największym stopniu decydują o postępie technicznym i cywilizacyjnym społeczeństw.

Olkusz, grudzień 2022 r.

Waldemar Reńda

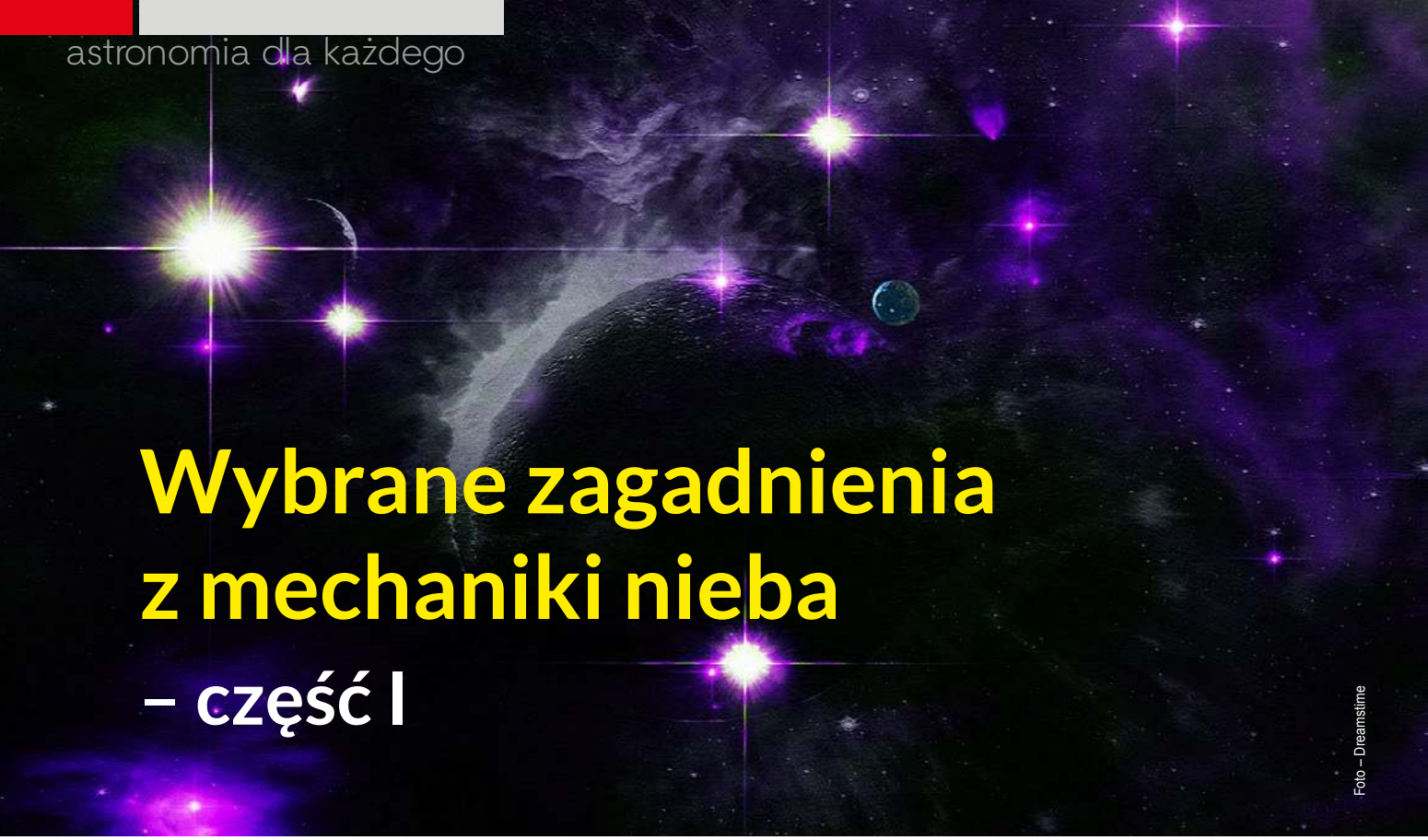
[24] Owe testy pojawiają się już na poziomie szkoły podstawowej. Natomiast znikają pytania podsumowujące kontrolne i zadania problemowe. Zob.: W. Reńda, *O rozwiązywaniu zadań…* „Fizyka w Szkole", 5/2017.

[25] Psycholodzy zwracają uwagę na to, że w szkole podstawowej faworyzowane są dziewczynki, bo są grzeczniejsze i pilniejsze niż chłopcy.

[26] Naukowcy powinni jedynie konsultować treści programowe pod kątem ich zgodności z osiągnięciami danej dziedziny nauki.

[27] Polityczne otoczenie szkoły może ulegać zmianie, ale ona powinna pozostać instytucją organizacyjnie i programowo stabilną.

eprasa.pl 80f50968f9



Wybrane zagadnienia z mechaniki nieba – część I

Foto – Dreamstime

Marcin **Wesołowski**

Oddziaływanie grawitacyjne w klasycznej fizyce zaliczane jest do jednego z czterech fundamentalnych oddziaływań w przyrodzie. Ruch ciał w Układzie Słonecznym związany jest z polem grawitacyjnym, które w głównej mierze pochodzi od Słońca i planet. Wpływ pozostałych ciał wchodzących w skład Układu Słonecznego (komet, planetoid i materii międzyplanetarnej) w pierwszym przybliżeniu ze względu na ich małą masę w bezpośrednim porównaniu do Słońca i planet możemy pominąć.

Dla uproszczenia naszych rozważań załóżmy, że planety i ich księżyce swoimi kształtami przypominają idealną kulę. W rzeczywistości odchylenia powierzchni tych ciał niebieskich od powierzchni kuli są na tyle małe w porównaniu z odległościami pomiędzy poszczególnymi planetami, że większość rozważanych zagadnień w mechanice naszego układu planetarnego możemy traktować jako opis pola grawitacyjnego pochodzącego od układu punktów materialnych. W tym miejscu przypominamy z klasycznej fizyki, że poprzez punkt materialny rozumiemy ciało fizyczne, które jest obdarzone masą a jego rozmiary są małe skupione w punkcie, względem którego określamy ruch danego ciała.

Zagadnienie dwóch punktów materialnych

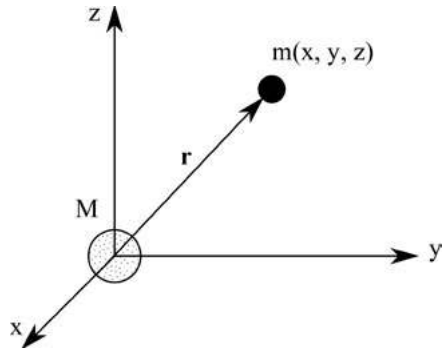
Zagadnieniem dwóch ciał nazywa się ogólnie problemem znalezienia ruchów dwóch punktów materialnych oddziaływujących na siebie siłą centralną. W czasie ruchu w polu sił centralnych, spełniających zasadę akcji i reakcji, zachowuje się całkowity moment pędu układu. W rozważanym tu wypadku dwóch punktów materialnych wnioskujemy, że punkty poruszają się w płaszczyźnie wyznaczonej przez prostą poprowadzoną przez ich położenia chwilowe oraz przez wektor prędkości względnej. Niezależnie od tego ruchu względnego, który jest ruchem płaskim, cały układ może się przemieszczać dowolnie w przestrzeni ze stałą prędkością.

Rozważmy dwa punkty materialne jeden o masie M a drugi o znacznie mniejszej masie m, które spełniają następującą zależność $m << M$.

Korzystając z prawa grawitacji lub ściślej mówiąc z prawa powszechnego ciążenia możemy przedstawić matematyczne podejście do opisu ruchu planety wokół Słońca. Prawo to możemy wyrazić jako:

$$F_g = \frac{GMm}{r^2}, \qquad (1)$$

gdzie F_g jest siłą grawitacji, G jest stałą grawitacji, M jest masą większego ciała np. Słońca, m jest masą mniejszego ciała np. planety, a r jest odległością pomiędzy tymi cia-



Rys. 1. Graficzne przedstawienie układu dwóch ciał, przy czym masa większego ciała została umieszczona w początku kartezjańskiego układu współrzędnych.

eprasa.pl 80f50968f9

łami. Załóżmy dla wygody naszych obliczeń, że Słońce i planetę możemy potraktować jako punkty materialne. Dodatkowo wpływ oddziaływania grawitacyjnego pochodzącego od innych ciał niebieskich pomijamy.

W oparciu o prawo grawitacji dane równaniem (1) wartość siły oddziaływania jaką Słońce wywiera na planetę w postaci wektorowej możemy zapisać jako:

$$\mathbf{F}_g = -\frac{GMm}{r^3}\mathbf{r}. \tag{2}$$

Zauważmy, że wartość tej siły jest ujemna, gdyż jest przeciwnie skierowana niż wektor promienia wodzącego **r** (Rys.1). W oparciu o II zasadę dynamiki możemy zapisać:

$$m\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{GMm}{r^3}\mathbf{r} \tag{3}$$

Dzięki wprowadzeniu kartezjańskiego układu współrzędnych wektor wodzący **r** możemy rozłożyć na składowe tego wektora: **r** = [x, y, z], oraz przyspieszenie jako drugie jego pochodne względem czasu: $\ddot{a} = [\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}]$. Korzystając bezpośrednio z równania (3) tzn. rozkładając lewą jego stronę na poszczególne składowe przyspieszenia otrzymujemy następujący układ równań (4):

$$\begin{cases} m\ddot{\mathbf{x}} = -\dfrac{GMm}{r^3}\mathbf{x} \\ m\ddot{\mathbf{y}} = -\dfrac{GMm}{r^3}\mathbf{y} \\ m\ddot{\mathbf{z}} = -\dfrac{GMm}{r^3}\mathbf{z} \end{cases} \tag{4}$$

Niech $U = -\frac{GMm}{r}$ oznacza potencjał efektywny, który otrzymujemy całkując równanie (1) po *dr*, a siła $F = -\text{grad}\,U$, czyli $F = -\left[\frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial U}{\partial y}, \frac{\partial U}{\partial z}\right]$.

Zauważmy, że w powyższych zależnościach wykorzystaliśmy pojęcie gradientu (grad), który w układzie współrzędnych jest wektorem, a jego składowe to pochodne cząstkowe danej funkcji.

Rozważmy następujący przykład, niech:

$$\mathbf{F}_x = -\frac{GMm}{\mathbf{r}^3}x. \tag{5}$$

Obliczmy teraz następujący czynnik:

$$-\frac{dU}{dx} = -\frac{d}{dx}\left(-\frac{GMm}{\mathbf{r}}\right) = GMm\frac{d}{dx}\left(\frac{1}{\mathbf{r}}\right), \tag{6}$$

gdzie $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, wówczas otrzymujemy, że:

$$\frac{d}{dx}\left(\frac{1}{r}\right) = -\frac{x}{r^3}. \tag{7}$$

Pomnóżmy teraz obustronnie układ równań (4) przez pierwszą pochodną (każde równanie ściśle według swojego kierunku), wówczas możemy zapisać:

$$\begin{cases} m\ddot{x}\dot{x} = -\dfrac{\partial U}{\partial x}\dot{x} \\ m\ddot{y}\dot{y} = -\dfrac{\partial U}{\partial y}\dot{y}. \\ m\ddot{z}\dot{z} = -\dfrac{\partial U}{\partial z}\dot{z} \end{cases} \tag{8}$$

W ten sposób uzyskaliśmy układ trzech równań różniczkowych drugiego rzędu, w których zmienną niezależną jest czas.

Dodajmy stronami ostatni układ równań i wtedy otrzymujemy:

$$m\cdot\left(\ddot{x}\cdot\dot{x} + \ddot{y}\cdot\dot{y} + \ddot{z}\cdot\dot{z}\right) = -\left[\frac{\partial U}{\partial x}\dot{x} + \frac{\partial U}{\partial y}\dot{y} + \frac{\partial U}{\partial z}\dot{z}\right]. \tag{9}$$

Ponieważ zmienną niezależną był czas, dlatego powyższe równanie obustronnie całkujemy względem czasu:

$$\int m\cdot(\ddot{x}\cdot\dot{x} + \ddot{y}\cdot\dot{y} + \ddot{z}\cdot\dot{z})\,dt = \\ = \int -\left[\frac{\partial U}{\partial x}\dot{x} + \frac{\partial U}{\partial y}\dot{y} + \frac{\partial U}{\partial z}\dot{z}\right]dt. \tag{10}$$

Korzystając z następującej zależności, że:

$$\int \ddot{x}\cdot\dot{x}\,dt = \frac{1}{2}\cdot\dot{x}^2 + C \tag{11}$$

Wynik całkowania równania (10) możemy zapisać jako:

$$\frac{1}{2}\cdot m\cdot(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) = -\int\frac{dU}{dt}dt. \tag{12}$$

Ostatecznie rozwiązanie to przyjmuje postać:

$$\frac{1}{2}\cdot m\cdot(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) = -U + C. \tag{13}$$

Zauważmy, że w równaniu (13) po jego lewej stronie w nawiasie mamy sumę kwadratów prędkości odpowiednio w każdym kierunku, więc równanie to możemy uprościć do następującej postaci:

$$\frac{1}{2}\cdot m\cdot v^2 + U = C, \tag{14}$$

gdzie: C oznacza stałą całkowania. Równanie (14) określane jest jako całka energii i jednocześnie definiuje prawo energii: w układzie izolowanym całkowita energia mechaniczna (suma energii potencjalnej i kinetycznej) jest zachowana (stała). Ponadto całka energii (prawo energii) pozwala obliczyć w dowolnym momencie prędkość *v* ciała, które porusza się po orbicie w polu grawitacyjnym ciała centralnego np. Słońca.

Moment pędu

W mechanice klasycznej moment pędu **K** ciała określamy jako iloczyn wektorowy pędu **p** i wektora wodzącego **r**. Na podstawie tej definicji moment pędu możemy zapisać jako:

$$\mathbf{K} = \mathbf{r}\times\mathbf{p}. \tag{15}$$

Pomóżmy teraz obustronnie równanie (15) przez czynnik $\frac{d}{dt}$, wówczas otrzymujemy, że:

eprasa.pl 80f50968f9

$$\frac{d\mathbf{K}}{dt}=\frac{d\mathbf{r}}{dt}\times m\cdot\mathbf{v}+\mathbf{r}\times\frac{d\mathbf{p}}{dt}=\mathbf{v}\times m\cdot\mathbf{v}+\mathbf{r}\times\mathbf{F}_g$$
$$=m\cdot\underbrace{\mathbf{v}\times\mathbf{v}}_{0}+\mathbf{r}\times\mathbf{F}_g. \tag{16}$$

Zauważmy, że w równaniu (16) wykorzystaliśmy definicję prędkości i pędu ciała oraz uogólnioną postać drugiej zasady dynamiki Newtona. Ponadto z własności iloczynu wektorowego, a dokładniej tabliczki mnożenia wektorowego wynika, że iloczyn wektorowy dwóch tych samych wektorów równy jest tzw. wektorowi zerowemu. Dlatego też równanie (16) możemy przepisać do następującej postaci:

$$\frac{d\mathbf{K}}{dt}=\mathbf{0}+\mathbf{r}\times\mathbf{F}_g. \tag{17}$$

Pamiętajmy, że wektor zerowy **0** w przestrzeni liniowej pełni rolę elementu neutralnego dodawania wektorów. W oparciu o powyższe założenia oraz zmodfikowaną postać równania (5) mamy:

$$\frac{d\mathbf{K}}{dt}=\mathbf{r}\times\mathbf{F}_g=\mathbf{r}\times\left(-\frac{GMm}{r^3}\cdot\mathbf{r}\right)=\left(-\frac{GMm}{r^3}\right)\cdot\mathbf{r}\times\mathbf{r}. \tag{18}$$

Następnie zastosujmy tą samą regułę wynikającą z własności iloczynu wektorowego jak w przypadku powyżej. Wówczas otrzymamy, że:

$$\frac{d\mathbf{K}}{dt}=\mathbf{0}. \tag{19}$$

Ponieważ moment pędu K jest wektorem stałym a moment pędu jako iloczyn wektorowy jest prostopadły do każdego ze swoich dwóch składników ($\mathbf{K}\perp\mathbf{r}$ oraz $\mathbf{K}\perp\mathbf{v}$) to na podstawie zasady zachowania momentu pędu ruch tego ciała jest płaski tzn. otrzymujemy przypadek dwuwymiarowy x i y.

Traktując ruch rakiety jako przypadek dwuwymiarowy możemy wektor prędkości rozłożyć na dwie składowe radialną i transwersalną prędkości w układzie biegunowym. Wówczas moment pędu jest równy:

$$\mathbf{K}=\mathbf{r}\times m\cdot\mathbf{V}=m\cdot\mathbf{r}\times\mathbf{V}=m\cdot\mathbf{r}\times[\mathbf{V}_r+\mathbf{V}_\phi]. \tag{20}$$

W tym miejscu przypomnijmy, że prędkość radialna określa prędkość zmiany długości promienia wodzącego ***r***. Prędkość radialną $\mathbf{V}_r$ możemy wyrazić jako:

$$\mathbf{V}_r=\frac{dr}{dt}=\dot{r}\,\mathbf{i}_r, \tag{21}$$

gdzie $\mathbf{i}_r$ jest wersorem o kierunku radialnym. Natomiast składowa transwersalna prędkości określa prędkość zmiany położenia w kierunku prostopadłym do promienia wodzącego ***r***. Prędkość transwersalną $\mathbf{V}_\varphi$ możemy zdefiniować jako:

$$\mathbf{V}_\varphi=r\cdot\frac{d\varphi}{dt}\mathbf{i}_\phi=r\cdot\dot{\varphi}\,\mathbf{i}_\varphi, \tag{22}$$

gdzie $\mathbf{i}_\varphi$ jest wersorem o kierunku prostopadłym do radialnego. W astronomii składowa prędkości transwersalnej określana jest jako prędkość tangencjalna (styczna). Prędkość tangencjalna to składowa prędkości ciała niebieskiego inaczej mówiąc jest to prędkość prostopadła do odcinka łączącego dane ciało niebieskie (obserwowany obiekt) z obserwatorem. Prędkość tą wyznaczamy znając ruch własny (zmiana szybkości pozycji gwiazdy na niebie w funkcji czasu) badanego obiektu i jego odległość od obserwatora.

W oparciu o równania (21-22) równanie (20) możemy zapisać jako:

$$\mathbf{K}=m\cdot\underbrace{\mathbf{r}\times\mathbf{V}_r}_{0}+m\cdot\mathbf{r}\times\mathbf{V}_\varphi=m\cdot\mathbf{r}\times\mathbf{V}_\varphi. \tag{23}$$

Wykorzystajmy teraz definicję prędkości transwersalnej, która zdefiniowana jest równaniem (22), wówczas otrzymujemy, że:

$$K=m\cdot r\cdot r\cdot\dot{\varphi}=m\cdot r^2\cdot\dot{\phi}=m\cdot r^2\cdot\frac{d\varphi}{dt}. \tag{24}$$

Przekształćmy teraz równanie (24) tak, abyśmy mogli policzyć wyrażenie $\frac{d\varphi}{dt}$,

$$\frac{d\varphi}{dt}=\dot{\varphi}=\frac{K}{m\cdot r^2}. \tag{25}$$

Wprowadźmy teraz kartezjański układ współrzędnych x, y jak na rysunku 3.

Pole powierzchni *ds* możemy obliczyć korzystając z zależności:

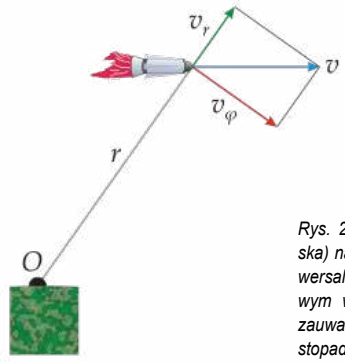
$$ds=\frac{1}{2}\cdot r^2\cdot\dot{\varphi}\,dt. \tag{26}$$

Podzielmy teraz obustronnie równanie (26) przez *dt* wówczas możemy zapisać, że:

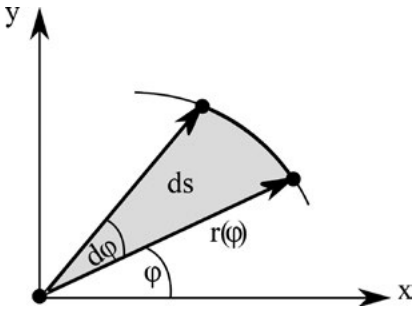
$$\frac{ds}{dt}=\frac{1}{2}\cdot r^2\cdot\dot{\varphi}. \tag{27}$$

Do równania (27) podstawmy zależność (25) co daje:

$$\frac{ds}{dt}=\frac{r^2}{2}\cdot\frac{K}{m\cdot r^2}. \tag{28}$$



Rys. 2. Rozkład prędkości rakiety (niebieska) na składową radialną (zielona) i transwersalną (czerwona) w układzie biegunowym względem obserwatora O. Ponadto zauważmy, że składowa radialna jest prostopadła do składowej transwersalnej.



Rys. 3. Rysunek pomocniczy do wyznaczenia zależności wynikającej z II prawa Keplera.

eprasa.pl 80f50968f9

Po uproszczeniu otrzymujemy, że

$$\frac{ds}{dt}=\frac{K}{2m}. \tag{29}$$

Ponieważ wykazaliśmy wcześniej, że moment pędu K jest wielkością stałą, więc zależność (29) też jest wielkością stałą, co możemy zapisać jako:

$$\frac{ds}{dt}=\frac{K}{2m}=\text{const}. \tag{30}$$

Dodatkowo zależność dana równaniem (30) określa II prawo Keplera – **Prędkość polowa planety w ruchu wokół Słońca jest stała dla danej planety**. Zauważmy, że II prawo Keplera jest bezpośrednią konsekwencją zasady zachowania pędu. Natomiast czynnik $\frac{ds}{dt}$ oznacza prędkość polową danej planety.

Kształt orbity

Dla uproszczenia naszych dalszych rozważań pozostajemy nadal w układzie współrzędnych biegunowych. W układzie tym wartość kwadratu prędkości całkowitej dana jest jako:

$$V^2=V_r^2+V_\phi^2, \tag{31}$$

gdzie tak jak poprzednio V_r jest składową radialną prędkości a V_φ jest składową transwersalną prędkości. Wykorzystując definicje tych dwóch składowych (równania 21-22) możemy zapisać:

$$V^2=\left(\frac{dr}{dt}\right)^2+r^2\cdot\left(\dot{\varphi}\right)^2. \tag{32}$$

Zauważmy, że w równaniu (32) w drugim członie po jego prawej stronie występuje czynnik $\dot{\varphi}$. Wartość tego parametru (prędkości kątowej ciała) możemy wyrazić poprzez moment pędu K zgodnie z równaniem (25). Wówczas otrzymujemy, że:

$$V^2=\left(\frac{dr}{dt}\right)^2+r^2\cdot\left(\frac{K}{m\cdot r^2}\right)^2=\left(\frac{dr}{dt}\right)^2+\left(\frac{K}{m\cdot r}\right)^2. \tag{33}$$

Następnie wykorzystajmy całkę energii (prawo energii) dane równaniem (14), co możemy zapisać jako:

$$\frac{1}{2}m\cdot\left[\left(\frac{dr}{dt}\right)^2+\left(\frac{K}{m\cdot r}\right)^2\right]+U=E. \tag{34}$$

Wykorzystując wcześniejsze założenie, że $U=-\frac{GMm}{r}$ równanie (34) przyjmuje następującą postać:

$$\frac{1}{2}m\cdot\left[\left(\frac{dr}{dt}\right)^2+\left(\frac{K}{m\cdot r}\right)^2\right]+\left(-\frac{GMm}{r}\right)=E. \tag{35}$$

Niech $\beta=GMm$ wówczas równanie (35) możemy uprościć do następującej postaci:

$$\frac{1}{2}m\cdot\left[\left(\frac{dr}{dt}\right)^2+\left(\frac{K}{m\cdot r}\right)^2\right]-\frac{\beta}{r}=E. \tag{36}$$

Pomnóżmy teraz równanie (36) przez czynnik $\frac{2}{m}$, a wyrażenie $\frac{\beta}{r}$ przenieśmy na drugą stronę wówczas mamy:

$$\left[\left(\frac{dr}{dt}\right)^2+\left(\frac{K}{m\cdot r}\right)^2\right]=\frac{2}{m}\cdot\left(E+\frac{\beta}{r}\right). \tag{36}$$

Z równania (36) obliczmy teraz składową radialną prędkości, czyli czynnik $\frac{dr}{dt}$, który po prostych przekształceniach jest równy:

$$\frac{dr}{dt}=\pm\sqrt{\frac{2}{m}\cdot\left(E+\frac{\beta}{r}\right)-\left(\frac{K}{m\cdot r}\right)^2}. \tag{37}$$

Zauważmy teraz, że słuszna jest następująca relacja:

$$\frac{dr}{dt}=\frac{dr}{d\varphi}\cdot\frac{d\varphi}{dt}=\frac{dr}{d\varphi}\cdot\dot{\varphi}=\frac{dr}{d\varphi}\cdot\frac{K}{m\cdot r^2}. \tag{38}$$

Wówczas równanie (37) przyjmuje postać:

$$\frac{dr}{d\varphi}\cdot\frac{K}{m\cdot r^2}=\pm\sqrt{\frac{2}{m}\cdot\left(E+\frac{\beta}{r}\right)-\left(\frac{K}{m\cdot r}\right)^2}. \tag{39}$$

Obliczmy następnie z równania (37) czynniki $d\varphi$, który jest równy:

$$d\varphi=\frac{\frac{K}{m\cdot r^2}dr}{\sqrt{\frac{2}{m}\cdot\left(E+\frac{\beta}{r}\right)-\left(\frac{K}{m\cdot r}\right)^2}}. \tag{40}$$

Zauważmy, że możemy jeszcze uprościć prawą stronę równania (40) poprzez wyciągnięcie z licznika jak i mianowania czynnika $\frac{1}{m}$, co daje:

$$d\varphi=\frac{\frac{1}{m}\cdot\frac{K}{r^2}dr}{\sqrt{\frac{1}{m^2}\left(\frac{2\cdot E\cdot m^2}{m}+\frac{2\cdot\beta\cdot m^2}{r\cdot m}-\frac{K^2}{r^2}\right)}}=\frac{\frac{1}{m}\cdot\frac{K}{r^2}dr}{\frac{1}{m}\cdot\sqrt{\left(\frac{2\cdot E\cdot m^2}{m}+\frac{2\cdot\beta\cdot m^2}{r\cdot m}-\frac{K^2}{r^2}\right)}}. \tag{41}$$

Wówczas po uproszczeniu równania (41) mamy:

$$d\varphi=\frac{\frac{K}{r^2}dr}{\sqrt{\left(2\cdot E\cdot m+\frac{2\cdot\beta\cdot m}{r}-\frac{K^2}{r^2}\right)}}=\frac{\frac{K}{r^2}dr}{\sqrt{2\cdot m\cdot\left(E+\frac{\beta}{r}\right)-\left(\frac{K}{r}\right)^2}}. \tag{42}$$

eprasa.pl 80f50968f9

W równaniu (42) w liczniku po prawej stronie obliczmy następującą całkę:

$$\int \frac{K}{r^2} dr = -\frac{K}{r}, \tag{43}$$

co daje nam:

$$d\varphi = \frac{-d\left(\frac{K}{r}\right)}{\sqrt{2\cdot m\cdot\left(E+\frac{\beta}{r}\right)-\left(\frac{K}{r}\right)^2}}. \tag{44}$$

Takie podejście pozwala nam rozwiązać zależność (44) za pomocą wzoru wynikającego z rachunku całkowego w następującej postaci:

$$-\int \frac{dx}{\sqrt{a^2-x^2}} = \arccos\left(\frac{x}{a}\right). \tag{45}$$

W oparciu o równanie (45) zależność (44) dana jest jako:

$$\int d\varphi = \int \frac{-d\left(\frac{K}{r}-\frac{m\cdot\beta}{K}\right)}{\sqrt{\left[2\cdot m\cdot E+\left(\frac{m\cdot\beta}{K}\right)^2\right]-\left(\frac{K}{r}-\frac{m\cdot\beta}{K}\right)^2}}, \tag{46}$$

gdzie stałe a^2 i b^2 występujące w zależności (45) wynoszą odpowiednio: $a^2=\left[2\cdot m\cdot E+\left(\frac{m\cdot\beta}{K}\right)^2\right]$, $b^2=\left(\frac{K}{r}-\frac{m\cdot\beta}{K}\right)^2$.

W wyniku obliczeń możemy zapisać, że:

$$\varphi = \arccos\left(\frac{\frac{K}{r}-\frac{m\cdot\beta}{K}}{\sqrt{2\cdot m\cdot E+\left(\frac{m\cdot\beta}{K}\right)^2}}\right). \tag{47}$$

Pomnóżmy teraz obustronnie równanie (47) przez funkcję cosinus i jednocześnie pamiętajmy, że $\cos(\arccos(x))=x$, wówczas mamy:

$$\cos\varphi = \frac{\frac{K}{r}-\frac{m\cdot\beta}{K}}{\sqrt{2\cdot m\cdot E+\left(\frac{m\cdot\beta}{K}\right)^2}}. \tag{48}$$

Następnie, aby uprościć równanie (48) pomóżmy go obustronnie przez $\sqrt{2\cdot m\cdot E+\left(\frac{m\cdot\beta}{K}\right)^2}$ wówczas możemy zapisać, że:

$$\frac{K}{r}-\frac{m\cdot\beta}{K} = \sqrt{2\cdot m\cdot E+\left(\frac{m\cdot\beta}{K}\right)^2}\cdot\cos\varphi. \tag{49}$$

Dodajmy obustronnie czynnik $\frac{m\cdot\beta}{K}$ do równania (49), wówczas otrzymamy:

$$\frac{K}{r} = \frac{m\cdot\beta}{K}+\sqrt{2\cdot m\cdot E+\left(\frac{m\cdot\beta}{K}\right)^2}\cdot\cos\varphi. \tag{50}$$

Przekształćmy teraz równanie (50) w taki sposób, aby można było obliczyć r, co możemy zapisać jako:

$$r = \frac{K}{\frac{m\cdot\beta}{K}+\sqrt{2\cdot m\cdot E+\left(\frac{m\cdot\beta}{K}\right)^2}\cdot\cos\varphi}. \tag{51}$$

Następnie w mianowniku równania (51) wyłączmy przed nawias czynnik $\frac{m\cdot\beta}{K}$ wówczas otrzymujemy, że:

$$\begin{aligned} r &= \frac{K}{\frac{m\cdot\beta}{K}+\sqrt{\left(\frac{m\cdot\beta}{K}\right)^2\left(\frac{2\cdot m\cdot E\cdot K^2}{m^2\cdot\beta^2}+1\right)}\cdot\cos\varphi} \\ &= \frac{K}{\frac{m\cdot\beta}{K}+\frac{m\cdot\beta}{K}\sqrt{\left(\frac{2\cdot E\cdot K^2}{m\cdot\beta^2}+1\right)}\cdot\cos\varphi} \\ &= \frac{K}{\frac{m\cdot\beta}{K}\left(1+\sqrt{\left(\frac{2\cdot E\cdot K^2}{m\cdot\beta^2}+1\right)}\right)\cdot\cos\varphi}. \end{aligned} \tag{52}$$

Po uproszczeniu otrzymujemy, że:

$$r = \frac{\frac{K^2}{m\cdot\beta}}{1+\sqrt{\left(\frac{2\cdot E\cdot K^2}{m\cdot\beta^2}+1\right)}\cdot\cos\varphi}. \tag{53}$$

Wprowadźmy teraz następujące oznaczenia, niech parametr elipsy będzie równy $p=\frac{K^2}{m\cdot\beta}=a\cdot(1-e^2)$, a mimośród orbity eliptycznej $e=\sqrt{\left(\frac{2\cdot E\cdot K^2}{m\cdot\beta^2}+1\right)}$, wówczas równanie (53) możemy zapisać w prostej postaci jako:

$$r = \frac{p}{1+e\cdot\cos\varphi} = \frac{a\cdot(1-e^2)}{1+e\cdot\cos\varphi}. \tag{54}$$

Zauważmy, że równanie (54) jest to równanie biegunowe orbity eliptycznej. W przypadku ruchu ciała po orbicie eliptycznej możemy wyróżnić dwa charakterystyczne punkty takie jak: **peryhelium,** czyli punkt, w którym ciało niebieskie (planeta, kometa) znajduje się najbliżej Słońca oraz **aphelium,** czyli punkt największego oddalenia (planety, komety) od Słońca. W trakcie ruchu ciała niebieskiego po orbicie eliptycznej kąt φ będzie zmieniał się w zakresie od 0° (dla peryhelium) do 180° (dla aphelium). Wówczas na podstawie równania (54) mamy:

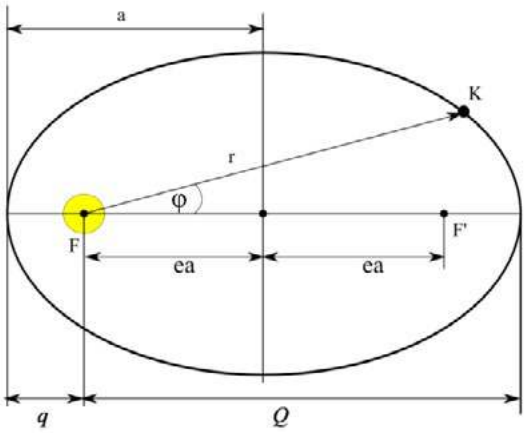
- dla peryhelium

$$r = \frac{a\cdot(1-e^2)}{1+e\cdot\cos 0} = \frac{a\cdot(1-e)(1+e)}{1+e} = a\cdot(1-e) = q,$$

- dla aphelium

$$r = \frac{a\cdot(1-e^2)}{1+e\cdot\cos 0} = \frac{a\cdot(1-e)(1+e)}{1-e} = a\cdot(1+e) = Q.$$

eprasa.pl 80f50968f9



Rys. 4. Przykładowa orbita eliptyczna dla komety okresowej. Przyjęto tu następujące oznaczenia: q – peryhelium, Q – aphelium, K – kometa, F, F' – ogniska.

Na rysunku 4 została przedstawiona przykładowa orbita eliptyczna dla komety wraz z zaznaczonymi podstawowymi parametrami orbitalnymi.

Jednocześnie równanie (54) stanowi uogólnienie I prawa Keplera, bowiem w zagadnieniu dwóch ciał, które przyciągają się siłą wynikającą z prawa powszechnego ciążenia, orbita względna każdego z tych ciał jest tzw. przecięciem stożkowym, czyli jest elipsą, kołem, parabolą lub hiperbolą. Oznacza to, że orbita ciała niebieskiego jest w ogólnym przypadku krzywą stożkową, a równanie (54) jest także określane jako równanie stożkowe.

Wówczas możemy sformułować I prawo Keplera, które brzmi:

Planety w Układzie Słonecznym poruszają się po elipsach, a w jednym z ognisk znajduje się Słońce.

Obliczmy jeszcze energię całkowitą E korzystając z zależności na kwadrat mimośrodu e^2, co możemy zapisać jako:

$$e^2 = \left(\frac{2\cdot E\cdot K^2}{m\cdot\beta^2}+1\right). \tag{55}$$

Występujący w równaniu moment pędu K możemy obliczyć korzystając z zależności definiującej parametr elipsy:

$$p = \frac{K^2}{m\cdot\beta} = a\cdot(1-e^2). \tag{56}$$

Wówczas możemy zapisać, że:

$$K^2 = m\cdot\beta\cdot a\cdot(1-e^2). \tag{57}$$

Podstawmy teraz równanie (57) do zależności (55) co możemy wyrazić jako:

$$e^2 - 1 = \frac{2\cdot E}{m\cdot\beta}\cdot\frac{m\cdot\beta\cdot a\cdot(1-e^2)}{1}. \tag{58}$$

Po uproszczeniu mamy:

$$E = -\frac{\beta}{2\cdot a}, \tag{59}$$

pamiętając, że $\beta = GMm$ równanie (59) możemy wyrazić jako:

$$E = -\frac{GMm}{2\cdot a}. \tag{60}$$

Kształt krzywej stożkowej po której porusza się ciało niebieskie zależy od energii E i mimośrodu e. Wówczas możemy wyróżnić następujące relacje:

- jeżeli mimośród e spełnia następującą nierówność: $0 < e < 1$ i $E<0$ to orbita jest elipsą,
- jeżeli mimośród $e = 1$ i $E = 0$ to orbita jest parabolą,
- jeżeli mimośród $e > 1$ i $E > 0$ to orbita jest hiperbolą,
- jeżeli mimośród $e = 0$ to orbita jest kołem.

Na podstawie pierwszego prawa Keplera wiadomo, że torem ruchu planety jest krzywa zwana elipsą, przy czym Słońce znajduje się w jednym z ognisk elipsy. Z punktu widzenia opisu matematycznego elipsa jest miejscem geometrycznym punktów, których suma odległości od dwóch pozostałych ognisk elipsy jest stała.

Drugie spostrzeżenie Keplera polegało na stwierdzeniu, że planety nie obiegają Słońca z jednakową szybkością, ale poruszają się raz wolniej a raz szybciej: szybciej, kiedy są bliżej Słońca, a wolniej, gdy są dalej.

Przypuśćmy, że obserwujemy położenie planet w dowolnych dwóch chwilach, np. w odstępie tygodniowym i że promień wodzący planety w tym czasie zakreśla pewien fragment łuku orbity, który planeta pokonała w tym czasie. Wówczas oba promienie wychodzące ograniczają pewien płaski obszar. Jeśli po pewnym czasie znów dokonamy obserwacji w takim samym odstępie czasu, ale wówczas, gdy planeta znajdzie się w innej, dalszej od Słońca części orbity okaże się znów, że pole obszaru ograniczonego promieniami wodzącymi i łukiem orbity jest takie samo jak poprzednio.

Okres obiegu planety wokół Słońca możemy zapisać jako:

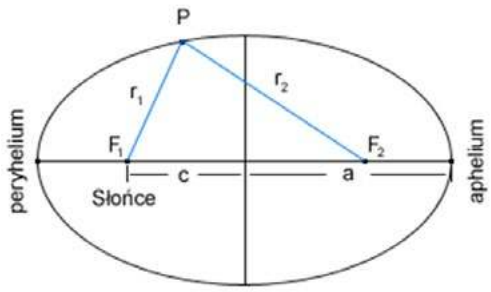
$$T = \frac{S}{\delta}, \tag{61}$$

gdzie S jest powierzchnią elipsy równą $S = \pi\cdot a\cdot b$, a δ jest prędkością polową, którą możemy zdefiniować jako:

$$\delta = \frac{1}{2}\cdot|\mathbf{r}\times\mathbf{V}| = \frac{K}{2m}. \tag{62}$$

Z właściwości elipsy wiadomo, że: $b = a\cdot\sqrt{1-e^2}$, $p = a\cdot(1-e^2)$. Podnosząc obustronnie do kwadratu równanie (61) na okres obiegu planety wokół Słońca i podstawiając odpowiednie wartości otrzymujemy:

$$T^2 = \frac{S^2}{\delta^2} = \frac{\pi^2\cdot a^2\cdot b^2}{\frac{K^2}{4m^2}} = \frac{\pi^2\cdot a^4\cdot(1-e^2)}{\frac{K^2}{4m^2}}. \tag{63}$$



Rys. 5. Rysunek pomocniczy do wykazania słuszności III prawa Keplera.

eprasa.pl 80f50968f9

Na podstawie powyższych rozważań możemy zapisać, że:

$$K^2 = m\beta p, \quad \beta = GMm, \quad p = a(1-e^2). \tag{64}$$

Korzystając z równań (63) i (64) możemy zapisać:

$$T^2 = \frac{\pi^2 \cdot a^4 \cdot (1-e^2)}{\frac{K^2}{4m^2}} = \frac{\pi^2 \cdot a^4 \cdot (1-e^2)}{\frac{GMm^2 a \cdot (1-e^2)}{4m^2}}. \tag{65}$$

Po redukcji otrzymamy, że:

$$T^2 = \frac{4 \cdot \pi^2}{G \cdot M} \cdot a^3,$$

lub

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4 \cdot \pi^2}{G \cdot M} = \text{const}.$$

W ten sposób została wykazana słuszność III prawa Keplera dla orbity eliptycznej. Zauważmy, że powyższe zagadnienie na potrzeby rachunków wykonanych w szkole można nieco uprościć, przyjmując za założenie, że ciało niebieskie (planeta, kometa) porusza się po okręgu. Wówczas w celu wykazania słuszności III prawa Keplera wystarczy rozpatrzenie relacji tożsamościowo równej pomiędzy siłą grawitacji i siłą dośrodkową, która utrzymuje ciało na linii toru (na linii okręgu).

III prawo Keplera brzmi:

Stosunek kwadratów okresu obiegu planet wokół Słońca do sześcianu jej dużej półosi jest wielkością stałą, która jest równa $\frac{4 \cdot \pi^2}{G \cdot M}$.

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

LITERATURA:

[1] Rybka, E., 1976, Astronomia ogólna, PWN, Warszawa.
[2] Borkowski, K. M., 1991, Astronomiczne obliczenia nie tylko dla geografów, UMK Toruń.
[3] Artymowicz, P. 1995, Astrofizyka układów planetarnych, Wyd. Naukowe PWN.
[4] Stodółkiewicz J. S., 1978, Astrofizyka ogólna z elementami geofizyki, PWN Warszawa.
[5] Kreiner, J. M., 1988, Astronomia z astrofizyką, PWN Warszawa.

Co w fizyce piszczy

Polski kandydat na astronautę

Dr inż. Sławosz Uznański znalazł się w gronie 17 astronautów zakwalifikowanych przez Europejską Agencję Kosmiczną (ESA) do pełnienia misji księżycowych NASA. Polak pokonał ponad 22 tys. kandydatów z całej Europy w trwających półtora roku eliminacjach ESA. Kandydaci przechodzili różnorodne testy wiedzy o kosmosie i technologiach kosmicznych, inteligencji i sprawności obliczeniowej, umiejętności rozwiązywania złożonych, nietypowych problemów pod presją czasu, odporności psychicznej i zachowania zimnej krwi w warunkach stresu. Poddani byli szczegółowym badaniom medycznym i przeszli wiele rozmów kwalifikacyjnych.

Nie bez znaczenia w wyborze Polaka było jego doświadczenie nabyte w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych (CERN) w Genewie, gdzie pracuje jako operator Wielkiego Zderzacza Hadronów LHC.

Podczas spotkania z parlamentarzystami zespołu ds. Technologii Kosmicznych, Astronomii i Obchodów 550. Rocznicy Urodzin Mikołaja Kopernika dr Sławosz Uznański przyznał, że wykształcenie, jakie zdobył w Polsce dało mu solidne, teoretyczne podstawy do dalszej kariery naukowej.

„W Polsce dostałem bardzo mocną, solidną podstawę mojej pracy naukowej, matematyczno-fizyczne bardzo solidne podstawy teoretyczne, które później mi owocowały podczas mojej kariery. Część mojej kariery spędziłem za granicą, budując technologie dla przemysłu francuskiego, gdzie dostałem możliwość praktycznego wykorzystania wiedzy. Ta strona praktyczna i teoretyczna pozwala mi być mocnym argumentem w takich dziedzinach, jak zostanie potencjalnie astronautą" – mówił dr Sławosz Uznański.

Zapytany, jak zachęcić polskich uczniów do nauki matematyki czy fizyki dr Uznański przyznał, że w jego ocenie warto do edukacji wprowadzić nowoczesne kanały komunikacji, którymi biegle posługują się uczniowie i studenci. „Technologia idzie do przodu, dostosowanie kanałów komunikacyjnych i propagowanie edukacji tymi kanałami, które są używane przez młodzież, przez studentów, którzy się biegle technologią posługują, będzie miało duży wpływ na edukację. Technologia idzie do przodu tak szybko, że wciąż można nad tym pracować, coś poprawiać" – przyznał. PAP – Nauka w Polsce

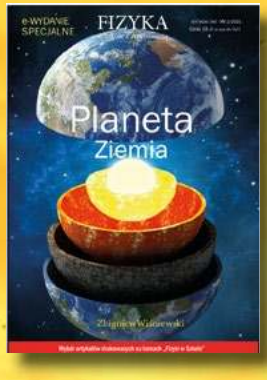
eprasa.pl 80f50968f9

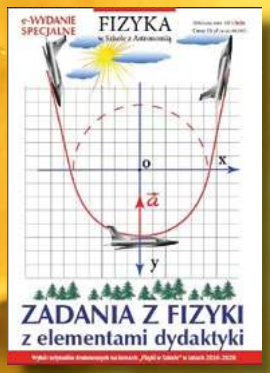
Cyfrowe wydania specjalne

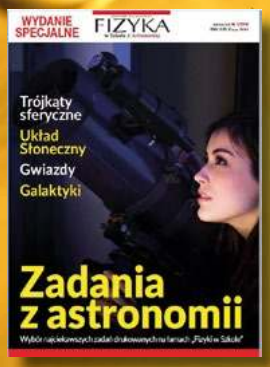
Fizyki w Szkole

Tylko w wersji PDF!

Już od 10 zł!
Wysyłamy na adres mailowy!







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

eprasa.pl 80f50968f9

NOWE! WYDANIE SPECJALNE 1/2023

WERSJA ELEKTRONICZNA – PLIK PDF

194

POJĘĆ I TERMINÓW
z astronomii i astrofizyki
od ACHERNER
po ZIEMIĘ

Cena 20 zł
w tym 8% VAT

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

eprasa.pl 80f50968f9