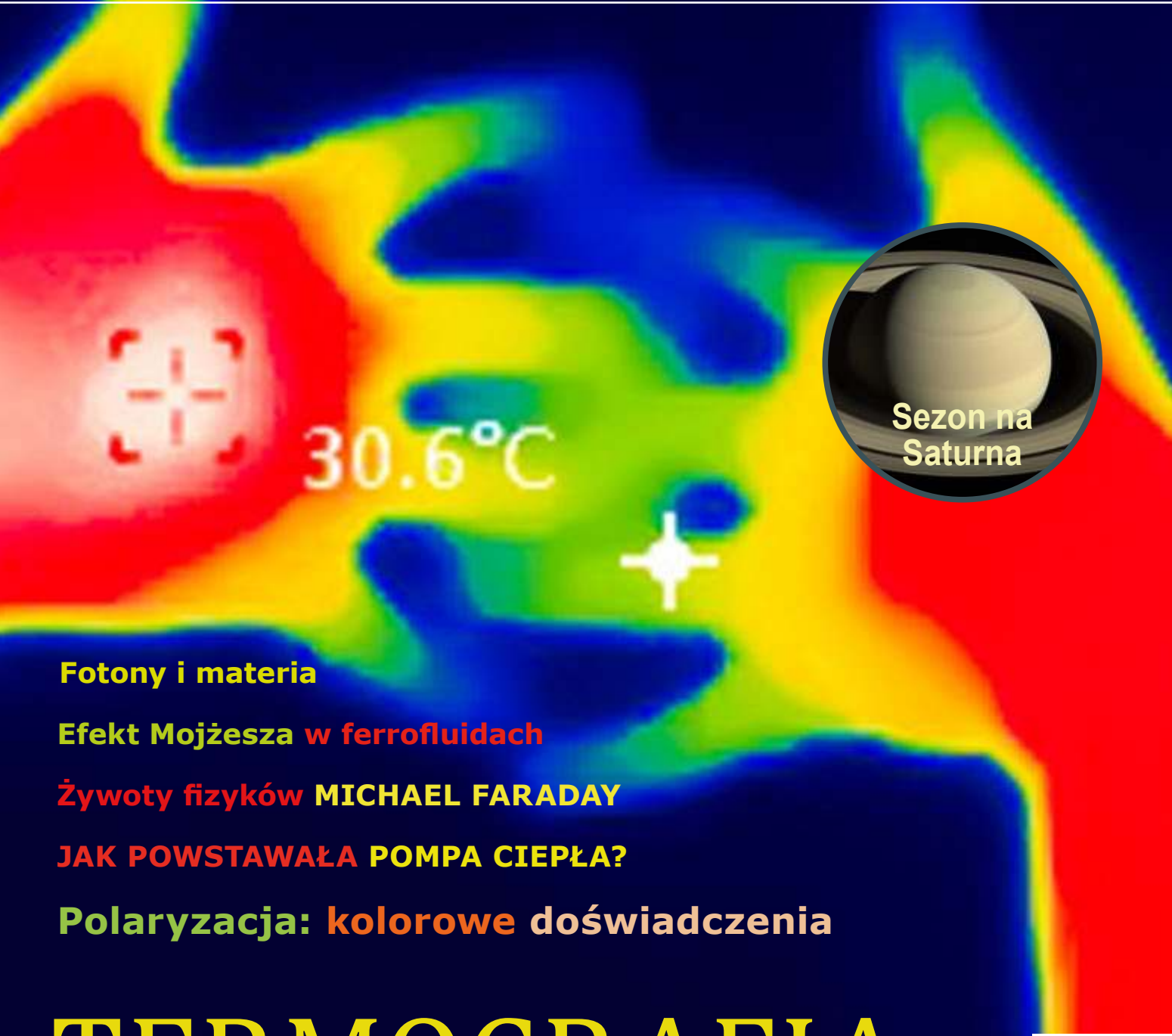
FIZYKA
w Szkole z Astronomią

CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI 400 (LXV) indeks 35810X Nr 5 wrzesień/październik 2025 CENA 50,00 zł (w tym 8% VAT)



Fotony i materia

Efekt Mojżesza w ferrofluidach

Żywoty fizyków MICHAEL FARADAY

JAK POWSTAWAŁA POMPA CIEPŁA?

Polaryzacja: kolorowe doświadczenia

TERMOGRAFIA
w praktyce medycznej

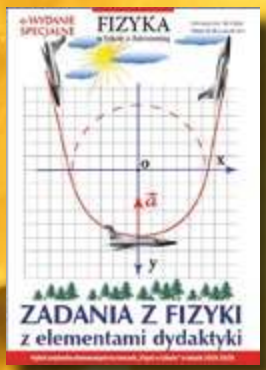
ISSN 0426-3383

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 3ca39600ed

Drodzy Czytelnicy!

Oddajemy w Państwa ręce numer 400, jubileuszowy. Mamy nadzieję, że tak jak poprzednie spełni Państwa oczekiwania.

Zupełnie inne oczekiwania mieli autorzy nieobowiązkowego przedmiotu edukacja zdrowotna, którego zbojkotowała większość rodziców.

Zanim wybuchła narodowa dyskusja o rzekomej szkodliwości edukacji zdrowotnej zanosiło się na inną – o stworzeniu jednego przedmiotu – roboczo nazwanego przyrodą, a oficjalnie edukacją klimatyczno-środowiskową. W tej sprawie otrzymaliśmy nawet listy skierowane na naszych trzech redakcji z prośbą o ich publikację. W każdym wymieniono co do tego nowego przedmiotu mogłoby trafić z obecnych chemii, fizyki i geografii. Kilka dni później autorka tego pomysłu wiceministra edukacji narodowej Joanna Mucha poddała się do dymisji uzasadniając to małym zainteresowaniem kierownictwa MEN jej pomysłami.

W dyskusji o kierunkach zmian w edukacji pojawiają się coraz częściej głosy, że w naukach ścisłych i przyrodniczych sztywny podział na biologię, chemię, fizykę i geografię jest archaiczny i nie oddaje postępu jaki dokonał się w nauce. Dziś z tych klasycznych nauk wyodrębniło się wiele działów takich jak biochemia, geochemia, biofizyka, agrofizyka, geofizyka, geomorfologia i wiele innych.

Czy zatem można w obecnych warunkach uczyć interdyscyplinarnie zastanawia się Waldemar Reńda w artykule „O korelacji treści nauczania i nie tylko…”

Z kolei Jerzy Kuczyński w artykule „Pracowania fizyczna” zastanawia się jak zachęcić studentów do wykonywania eksperymentów, dokonać pomiaru, oszacować błędy i sporządzić poprawne sprawozdanie.

Do eksperymentowania z polaryzatorami zachęca Jan Kurzyk w artykule „Kolorowe doświadczenia” i Stanisław Bednarek w artykule „Gigantyczny efekt Mojżesza w ferrofluidach”.

Natomiast Krzysztof Kowalczyk radzi nam jesienią skierować wzrok ku górze i na niebie szukać Saturna, bo ta jesień to „Sezon na Saturna”.

Józef Szewczyk

Fizyka wczoraj, dziś, jutro

4 **Od diagnostyki stanów zapalnych do medycyny sądowej, czyli termografia w praktyce** ▮ Tomasz Kubiak

Fizyczne metody diagnostyki medycznej bazują przede wszystkim na wykorzystaniu promieniowania elektromagnetycznego o różnych długościach fali.

9 **70 lat polskiej atomistyki** ▮ opracowanie redakcyjne

10 **Fotony i materia** ▮ Maciej Panczykowski

12 **Jak powstawała pompa ciepła? O odkryciach fizycznych i konstruktorach prekursorach** ▮ Kazimierz Mikulski

Chociaż wielu osobom wydaje się, że pompa ciepła to nowoczesne urządzenie skonstruowane w ciągu ostatnich dwudziestu lat, w rzeczywistości historia wynalazku sięga aż XIX w.

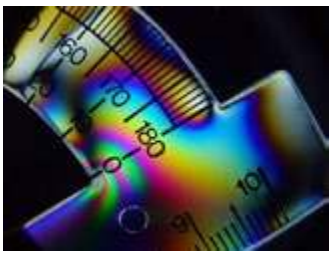
18 **Fizyka a społeczeństwo. 49. Zjazd Fizyków w Katowicach** ▮ Edward Rydygier

Z naszych lekcji

23 **O korelacji treści nauczania i nie tylko... Z cyklu: Jaka szkoła, jaka edukacja...?** ▮ Waldemar Reńda

28 **Kolorowe doświadczenia** ▮ Jan Kurzyk

Jeśli ustawimy naprzeciwko siebie dwa polaryzatory liniowe i skręcimy ich osie polaryzacji tak, aby tworzyły ze sobą kąt 90°, to otrzymamy układ tzw. skrzyżowanych polaryzatorów. Pozwala on zaobserwować wiele ciekawych i efektownych zjawisk.



38 **Żywoty fizyków. Michael Faraday (1791-1867)** ▮ Tadeusz Wibig

40 **Pracownia fizyczna** ▮ Jerzy Kuczyński

43 **Gigantyczny efekt Mojżesza w ferrofluidach** ▮ Stanisław Bednarek

Astronomia dla każdego

44 **Sezon na Saturna** ▮ Krzysztof Kowalczyk

Mamy właśnie najlepsze w roku warunki do obserwacji Saturna, którego tej jesieni widać całą noc, jako jeden z najjaśniejszych obiektów na niebie.

FIZYKA w Szkole z Astronomią
CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI
NUMER 5 WRZESIEŃ/PAŹDZIERNIK 2025
400 (LXV) indeks 35810X ISSN 0426-3383
CENA 50,00 zł (w tym 8% VAT)

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: Adobe Stock

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

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

Od diagnostyki stanów zapalnych do medycyny sądowej, czyli termografia w praktyce

Fizyczne metody diagnostyki medycznej bazują przede wszystkim na wykorzystaniu promieniowania elektromagnetycznego o różnych długościach fali. W przypadku termografii, służącej do nieinwazyjnej i bezkontaktowej wizualizacji rozkładu temperatury ludzkiego ciała, są to fale z zakresu średniej podczerwieni. Emisja promieniowania cieplnego z danej tkanki odzwierciedla jej unaczynienie i metabolizm a także wskazuje na występowanie stanów zapalnych.

Tomasz **Kubiak**

Wyznaczanie temperatury różnych regionów ludzkiego ciała w celach diagnostycznych ma stosunkowo długą historię. Analizując literaturę, możemy napotkać chociażby informację, że już w starożytności grecki lekarz i filozof Hipokrates monitorował zmiany ciepłoty powierzchni skóry swych pacjentów w oparciu o tempo wysychania pasty z mokrej glinki, którą ich smarował.

W kontekście obrazowania termograficznego istotniejszy wydaje się jednak fakt eksperymentalnego odkrycia promieniowania podczerwonego przez brytyjsko-niemieckiego astronoma Williama Herschela w 1800 roku oraz utrwalenia pierwszego prymitywnego termogramu w 1840 r. przez jego syna Johna Herschela.

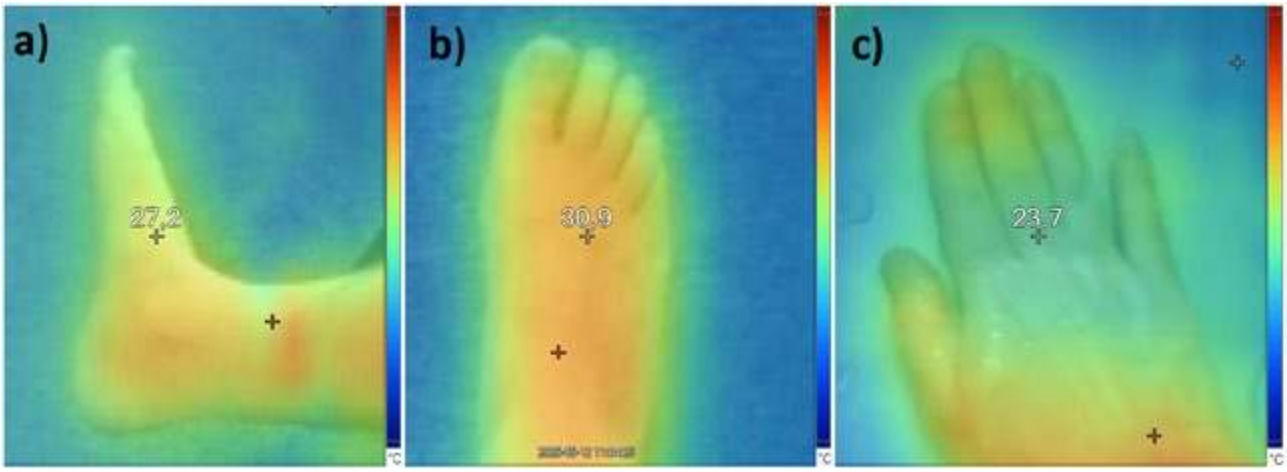
Ważną rolę pomiarów temperatury w diagnostyce rozmaitych stanów chorobowych opisał natomiast w 1868 r. niemiecki lekarz Carl Wunderlich, którego dziś uznajemy za pioniera termometrii medycznej. System obrazowania w podczerwieni, wykorzystujący bolometr termistorowy, zbudowano natomiast w 1948 roku. Czas akwizycji w przypadku tego urządzenia sięgał nawet 40 minut. W latach późniejszych nastąpił znaczący postęp w termografii, który sprawił, że od lat 60-tych XX w. znalazła ona różnorodne zastosowania kliniczne.

Fizyczne podstawy termografii

Pomiary termograficzne w medycynie opierają się na rejestracji promieniowania podczerwonego o długości fali λ = 8-15 μm, które jest emitowane przez nasz organizm. Dzięki temu możliwe jest obrazowanie różnic w temperaturze poszczególnych regionów powierzchni ciała. Wynik pomiaru, czyli termogram stanowi właśnie wizualną mapę energii wyemitowanego promieniowania cieplnego. Może on zostać szczegółowo przeanalizowany z wykorzystaniem metod komputerowych.

Warto również dodać, że barwy widoczne na obrazie są umownie przypisane do poszczególnych wartości temperatur. Fot.1. ukazuje przykładowe obrazy termowizyjne fragmentów kończyn człowieka. Widać, że chłodniejszemu otoczeniu przypisano kolor niebieski

eprasa.pl 3ca39600ed



Fot. 1. *Przykładowe termogramy fragmentów kończyn człowieka, tj. stopy (a-b) oraz dłoni c), uzyskane w wyniku automatycznego nałożenia obrazu w podczerwieni na fotografię wykonaną w świetle widzialnym. Krzyżyk to marker wskazujący miejsce odczytu wartości temperatury przedstawionej w postaci liczby. Barwy na skali z prawej strony każdego z obrazów przypisane są umownie do określonych temperatur.*

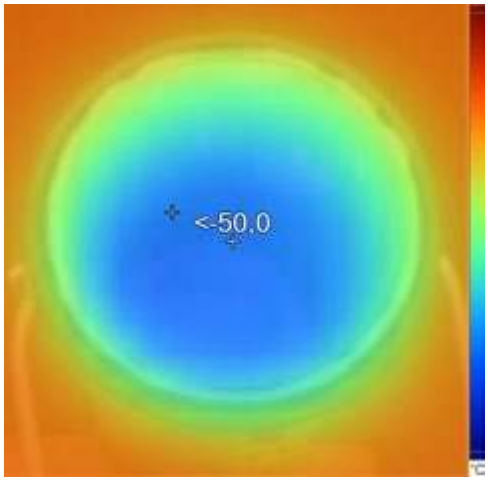
a cieplejsze miejsca na skórze wyróżniają się kolorem pomarańczowym.

Chociaż pomiar kamerą termowizyjną wydaje się być stosunkowo łatwy do przeprowadzenia, należy mieć na uwadze, iż urządzenie to nie rejestruje rzeczywistej, tylko pozorną temperaturę obiektu. Do detektora dociera bowiem nie tylko energia wyemitowana bezpośrednio przez monitorowane ciało, ale również promieniowanie odbite od niego a pochodzące od innych źródeł ciepła.

Podczas badania różnych typów powierzchni zachodzi zatem konieczność skompensowania tzw. emisyjności ε. Parametr ten określa zdolność materiału do wypromieniowywania energii w postaci podczerwieni. W myśl teorii najwyższą zdolność emisyjną = 1 w dowolnej temperaturze posiada ciało doskonale czarne, które pochłania całkowicie padające promieniowanie elektromagnetyczne. Z kolei najniższą zdolność emisyjną = 0 ma ciało zwierciadlane, odbijające całą energię.

Nie powinniśmy zatem wykorzystywać termografii do badania przedmiotów o niskiej emisyjności (< 0,5), np. wypolerowanych powierzchni metalowych.[1] Pomiary temperatury nie byłyby dla nich wiarygodne właśnie ze względu na rejestrację promieniowania odbitego. Fot.2. ukazuje termogram otwartego termosu wypełnionego ciekłym azotem. Wynik nie jest miarodajny przede wszystkim dlatego, że oczekiwana wartość znacznie wykracza poza zakres pracy urządzenia (odczyt wskazuje w sposób przybliżony, że temp. jest niższa niż –50°C), ale także ze względu na odbijającą powłokę wnętrza izolowanego pojemnika.

Podczas używania kamery termowizyjnej zawsze musimy pamiętać o konieczności skompensowania emisyjności. Nawet jeśli ludzką skórę cechuje duża zdolność emisyjna = 0,98, wartość tę podajemy w nastawach pomiarów, podobnie jak temperaturę otoczenia. Mamy wówczas większą pewność, że nasze pomiary są rzetelne. Fot.3. przedstawia procedurę rejestracji termogramu dłoni człowieka.



Fot. 2. *Nieprawidłowo wykonany termogram otwartego termosu wypełnionego ciekłym azotem.*

Fot. 3. *Procedura rejestracji termogramu dłoni zdrowego człowieka (ε = 0,98).*

[1] Przykładowo materiały z aluminium mają zwykle emisyjność poniżej 0,10.

eprasa.pl 3ca39600ed

Kamery termowizyjne

Część czytelników „Fizyki w Szkole” wykaże zapewne zdziwienie faktem, że pierwotne kamery termowizyjne wbrew swojej nazwie nie zapewniały możliwości zapisu sekwencji wideo, pozwalały jedynie wykonywać pojedyncze fotografie termograficzne. Tego typu rozwiązanie spotykane jest nadal w mniej zaawansowanych technicznie urządzeniach i tzw. pirometrach graficznych (Fot.4.). Generalnie jednak profesjonalne kamery przenośne oraz stacjonarne posiadają opcję zapisu poklatkowego lub wideo, pozwalają także na nałożenie obrazów zarejestrowanych w świetle widzialnym i podczerwieni. W opcjach podglądu oraz podczas późniejszej obróbki w programie komputerowym można stopniowo regulować udział takiego mieszania się obrazów, aby np. lepiej uwidocznić kontury obiektu (Fot.5.).

Współczesne kamery termowizyjne posiadają już stosunkowo dużą rozdzielczość detektora podczerwieni (np. 640 x 480 pikseli). Parametr ten wskazuje na liczbę punktów, w których dokonywany jest pomiar temperatury i nie należy mylić go z rozdzielczością wyświetlacza urządzenia. O jakości kamery świadczy też jej wysoka czułość termiczna (NETD od ang. *Noise Equivalent Temperature Difference*), określająca najmniejszą różnicę temperatur, jaka może zostać wykryta (np. 0,03 K). Dobór optymalnego zakresu pomiarowego zależy natomiast od przeznaczenia, w przypadku zastosowań medycznych, które omawiane są w niniejszym tekście, wystarczy przedział 0°C – 50°C.

Warto jeszcze w kilku słowach przedstawić, jak działa sama kamera termowizyjna. Docierające z analizowanego obiektu promieniowanie podczerwone skupiane jest przez system optyczny urządzenia na matrycy czujników detektora. Ich liczba, w zależności od modelu, sięga od kilkudziesięciu do kilkuset tysięcy i razem tworzą układ w formie siatki. Najpopularniejsze przenośne kamery termowizyjne wyposażone są zazwyczaj w mikrobolometryczne detektory niechłodzone, które pracują w temp. otoczenia.[2]

Bardziej zaawansowane urządzenia mogą posiadać detektory chłodzone[3] na bazie elementów półprzewodnikowych z antymonku indu (InSb) lub tellurku kadmowo-rtęciowego (HgCdTe) albo czujniki QWIP (ang. *Quantum Well Infrared Photodetector*), wykorzystujące efekt studni kwantowej. Warto dodać, iż określony typ materiału wpływa na zakres spektralny detektora.

Fot. 4. *Pirometr graficzny pozwalający zarejestrować mapę cieplną obiektu w podczerwieni i nałożyć ją na normalną fotografię.*

Fot. 5. *Nałożenie obrazów zarejestrowanych w podczerwieni i w świetle widzialnym umożliwia wizualizację zarówno temperatury jak i konturów obiektu, w tym przypadku rozgrzanej cewki w eksperymencie z hipertermią magnetyczną.*

Kamera posiada też oczywiście elektroniczne układy wzmacniania i przetwarzania sygnału a także moduł wizualizacji danych. Dzięki zastosowaniu algorytmów matematycznych rekonstruowana jest mapa temperatury pozornej obiektu. Odpowiednie jej wartości są na ekranie przedstawiane za pomocą różnych kolorów. Taki termogram, jak wspominano już wcześniej, jest często automatycznie nakładany na obraz ze standardowej kamery cyfrowej, co umożliwia szybką identyfikację obserwowanych obiektów.

Termografia w diagnostyce

W ostatnich latach gwałtownie wzrosło zainteresowanie obrazowaniem medycznym w podczerwieni, głównie ze względu na wciąż utrzymujące się zagrożenie pandemią. Kamery termowizyjne są zatem coraz powszechniej wykorzystywane w celach epidemiologicznych, przede wszystkim do kontrolowania temperatury ciała ludzi przebywających w miejscach użyteczności publicznej, np. w szpitalach czy na lotniskach (Fot.6.). Aby jednak przeprowadzane tam często automatycznie pomiary były wiarygodne, należy spełnić kilka podstawowych zasad. Temperatura w pomieszczeniach musi być stabilna i zawierać się w zakresie 10 do 30°C. Detektor powinien być oddalony od luster, szyb, nawiewników czy klimatyzatorów a także pozostawać nieruchomy. Trzeba posługiwać się kamerami termowizyjnymi z odpowiednim zakresem pomiarowym

[2] W przypadku bolometru mamy do czynienia ze zmianami oporu elektrycznego w funkcji temperatury.

[3] Do obniżania temperatury detektora wykorzystywane są chłodziarki Stirlinga działające w zamkniętym obiegu.

eprasa.pl 3ca39600ed

Fot. 6. *Wyposażone w kamerę termowizyjną urządzenia do bezdotykowego pomiaru temperatury umieszczane są np. w placówkach ochrony zdrowia.*

i dokładnością lepszą niż ± 0,5°C oraz pamiętać o ich kalibracji (dokonywanej poprzez porównanie wyników z termometrem wzorcowym) przynajmniej raz w roku.

Czytelnicy nie powinni ulegać mylnemu wrażeniu, że zastosowania termografii w medycynie ograniczają się do wykrywania osób cierpiących na infekcje wirusowe czy bakteryjne. Bardzo ważnym przykładem wykorzystania tej metody jest bowiem wczesna detekcja oraz ocena nasilenia i rozległości stanów zapalnych w tkankach. Wiąże się z tym także monitorowanie skuteczności działania podawanych pacjentowi leków przeciwzapalnych oraz sprawdzanie efektywności zabiegów fizykoterapeutycznych.

Warto dodać, iż ostre procesy zapalne (np. stawów czy wiązadeł) charakteryzują się „gorącymi ogniskami" na obrazie, co wynika m.in. ze wzrostu ukrwienia na skutek rozszerzenia się naczyń w chorej tkance. Co ciekawe, przewlekłe stany pourazowe oraz zwłóknienia widoczne są w podczerwieni jako obszary „zimne" ze względu na spadek metabolizmu. Obniżona temperatura powierzchni ciała ujawnia się również często w obrębie palców stóp i dłoni pacjentów z cukrzycą, a także u cierpiących na zespół Raynauda, co również ma związek z nieprawidłowym ukrwieniem.

Obrazowanie termiczne przydaje się ponadto przy ocenie rozległości i stopnia oparzeń. Termogramy wizualizują zarówno obszary objęte martwicą, cechujące się zanikiem metabolizmu i obniżoną temperaturą w stosunku do zdrowych tkanek, jak i regiony ze wzmożonym metabolizmem, charakterystycznym dla oparzeń niższego stopnia. Dzięki temu łatwiej jest podjąć decyzję dotyczącą dalszego postępowania, tzn. wybrać leczenie chirurgiczne albo zachowawcze.

W dermatologii termografia okazuje się również pomocna w diagnostyce przewlekłych chorób skóry, np. twardziny ograniczonej czy łuszczycy, gdyż w bezpośrednim sąsiedztwie zmian rejestruje się istotny wzrost temperatury. Śledząc literaturę fachową nietrudno zauważyć, iż obszar potencjalnych zastosowań termografii w ostatnich latach rozszerza się na kolejne działy medycyny, np. laryngologię (badania przesiewowe zatok przynosowych), stomatologię (wykrywanie chorób przyzębia i zakażeń jamy ustnej), reumatologię (monitorowanie osteoporozy) a nawet okulistykę (obrazowanie zaburzeń ukrwienia siatkówki).

Chociaż badania nad wspomnianymi medycznymi aplikacjami obrazowania termowizyjnego wydają się być w rozkwicie, należy mieć na uwadze, iż metoda ta ma przede wszystkim charakter pomocniczy, a uzyskane wyniki nie mogą być samodzielną podstawą do postawienia diagnozy. Lekarz musi zatem zawsze wspierać się innymi technikami, bazującymi oczywiście na osiągnięciach biofizyków i biochemików.

Termografia w medycynie sądowej

Obrazowanie termograficzne może dotyczyć również osób, które zakończyły swe życie, często w gwałtownych, dramatycznych okolicznościach. Nie jest to temat zbyt przyjemny, gdyż obejmuje przede wszystkim zagadnienie szacowania czasu zgonu na podstawie temperatury zwłok. Miłośnicy powieści kryminalnych wiedzą zapewne, iż przybliżone ustalenie interwału pośmiertnego odbywa się tradycyjnie poprzez ocenę rozwoju stężenia pośmiertnego, plam opadowych czy zmian biochemicznych ciała. Procedury te są ważne np. w przypadku zabójstwa i pozwalają sprawdzić, czy alibi podejrzanego pokrywa się z przedziałem godzinowym, w którym mogło dojść do popełnienia przestępstwa.

W kontekście niniejszego artykułu warto skupić się na metodzie bazującej na pomiarze temperatur: ciała denata i otoczenia. Klasycznie w tym celu wykorzystywano termometr oraz tzw. nomogramy Henssgego, czyli wykresy, które przy znajomości masy ciała pozwalały szybko odczytać przybliżony czas zgonu bez konieczności rozwiązywania równań matematycznych przez medyka sądowego.[4] Jak wiadomo, ciało ludzkie po śmierci ochładza się, przy czym szybkość tego procesu zależy od różnicy temp. między zwłokami a otoczeniem. Co ciekawe, już w 1868

[4] Nazwa nomogramów pochodzi od nazwiska niemieckiego profesora Clausa Henßge (1936-2021), który był autorem wielu prac z zakresu medycyny sądowej. Przykładowe wykresy dla temperatur mierzonych w mózgu i odbycie denata można znaleźć w publikacji: C. Henßge, B. Madea, Estimation of the time since death in the early post-mortem period, Forensic Science International 144 (2004), 167-175.

eprasa.pl 3ca39600ed

roku wykorzystano uproszczoną wersję prawa stygnięcia Newtona:

$$T(t) = T_z + (T_0 - T_z) \cdot e^{-rt},$$

w którym: $T(t)$ – temperatura zwłok po czasie t, T_z – temperatura otoczenia (w założeniu niezmienna), T_0 – temperatura człowieka w chwili śmierci, r – stała związana z właściwościami termodynamicznymi ciała, do określania czasu, jaki upłynął od momentu śmierci biologicznej do chwili znalezienia zwłok.[5]

W 1955 roku do tego eksponecjalnego modelu dodano człon uwzględniający pośmiertne plateau, dzieki czemu można było lepiej odwzorować krzywe ostygania uzyskane eksperymentalnie. Kolejny istotny krok nastapił w 1962 r., gdy opublikowano model dwuwykładniczy Marshalla i Hoare'a. Radzi sobie on znacznie lepiej z matematycznym opisem zarówno pośmiertnego wypłaszczenia przebiegu krzywej $T(t)$, jak i dalszym spadkiem o charakterze newtonowskim.

$$\frac{T - T_z}{T_0 - T_z} = \frac{p}{p - Z} \cdot e^{-Zt} - \frac{Z}{Z - p} \cdot e^{-pt}$$

W rówaniu pojawiają się parametry p oraz Z związane z tempem schładzania. W zależności od podejścia można wyznaczać je w oparciu o masę ciała albo na podstawie analiz kilku kolejnych odczytów temperatury. Oczywiście modele oraz procedury są cały czas rozwijane. W badaniach uwzględniano już m.in. ośrodek, w jakim znajdowało się ciało (np. woda, powietrze), grubość ubioru denata, zmiany temperatury otoczenia w ciągu doby czy wpływ podłoża na stygnięcie zwłok. Problemem pozostaje natomiast dokładne ustalenie temperatury rdzenia ciała tuż przed śmiercią. Zazwyczaj przyjmuje się ≈ 37°C, ale na skutek różnych patologii mogła ona być podwyższona albo obniżona, co będzie skutkować błędami w oszacowaniach.

Bezkontaktowy pomiar temperatury zwłok z wykorzystaniem kamer termowizyjnych ma wiele zalet w stosunku do metod klasycznych. Pozwala m.in. uniknąć zniszczenia ewentualnych śladów, jakie mogłyby znajdować się na ciele. Ponadto model pozwalający na wyznaczenie interwału pośmiertnego uwzględnia ważne parametry, takie jak wzrost czy budowa anatomiczna, nie ograniczając się tylko do masy. Zastosowanie termografii do szacowania czasu zgonu wymaga jednak znalezienia regionu ciała, z którego dane będą optymalne do przeprowadzania analiz. Ustalono, że takim wiarygodnym miejscem jest głowa, gdyż jej wzorzec termiczny utrzymuje się do 15h po śmierci.

Warto wspomnieć, że termografia ma też inne, mniej popularne zastosowania w medycynie sądowej. Możemy do nich zaliczyć obrazowanie termiczne oparzeń skóry, miejsc postrzałów oraz urazów, np. kręgosłupa szyjnego. W tym przypadku termografia ma jednak raczej charakter pomocniczy, uzupełniający inne metody diagnostyczne i laboratoryjne.

dr Tomasz Kubiak
Wydział Fizyki i Astronomii UAM Poznań

LITERATURA:

[1] K. Ammer, E.F.J. Ring, Application of thermal imaging in forensic medicine, *The Imaging Science Journal* 53, (2005), 125-131.
[2] L.S. Wilk i inni, Individualised and non-contact post-mortem interval determination of human bodies using visible and thermal 3D imaging, *Nature Communications* 12, (2021), 5997.
[3] C. Henßge, B. Madea, Estimation of the time since death in the early post-mortem period, *Forensic Science International* 144, (2004), 167-175.
[4] A. Modrzejewska, M. Parafiniuk, Zastosowanie termografii w medycynie – przegląd literatury, *Pomeranian Journal of Life Sciences* 64, (2018), 29-32.
[5] B. Englisz-Jurgielewicz, i inni, Obrazowanie termiczne w ocenie oparzeń, *Inżynier i Fizyk Medyczny* 9(1), (2020), 63-65.
[6] B.B. Lahiri, S. Bagavathiappan, T. Jayakumar, J. Philip, Medical applications of infrared thermography: A review, *Infrared Physics & Technology* 55, (2012), 221-235.
[7] W. Minkina, How infrared radiation was discovered – range of this discovery and detailed, unknown information, *Applied Sciences* 11, (2021), 9824.
[8] K. Dziarski, J. Parzych, Układ optyczny w długofalowych kamerach termowizyjnych przeznaczonych do obserwacji mikroelementów, *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering* 96, (2018), 83-94.
[9] M. R. Rodrigo, A Nonlinear Least Squares Approach to Time of Death Estimation Via Body Cooling, *Journal of Forensic Sciences* 61, (2016), 230-233.
[10] F. J. Ring, Pioneering progress in infrared imaging in medicine, *Quantitative InfraRed Thermography*, 11, (2014), 57-65.

[5] Historyczna praca: H. Rainy, On the cooling of dead bodies as indicating the length of time since death, Glasg. Med. J. 1, (1868), 323-330, wciąż jest cytowana ze względu na postęp, jaki zapoczątkowała.

Nagroda Nobla z fizyki 2025

Królewska Szwedzka Akademia Nauk postanowiła przyznać nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki Johnowi Clarke'owi, Michelowi H. Devoretowi i Johnowi M. Martinisowi z Uniwersytetu w Kalifornii i Uniwersytetu w Yale w USA za odkrycie makroskopowego tunelowania kwantowo-mechanicznego i kwantyzacji energii w obwodzie elektrycznym. Wpłynęły one na rozwój kryptografii kwantowej i komputerów kwantowych.

Jednym z przykładów zastosowań technologii kwantowej są tranzystory we wszechobecnych mikroprocesorach komputerowych. Odkrycie nagrodzone tegorocznym Noblem dało impuls do rozwoju kolejnej generacji technologii kwantowej, w tym kryptografii kwantowej, komputerów kwantowych i czujników.

eprasa.pl 3ca39600ed

70 lat polskiej atomistyki

Siedemdziesiąt lat temu Polska wkroczyła w erę atomu, powołując do życia Instytut Badań Jądrowych (IBJ). To wydarzenie zapoczątkowało dekady innowacyjnych badań w dziedzinie fizyki jądrowej. 24 września 2025 roku w Pałacu Staszica w Warszawie odbyła się uroczyste seminarium w ramach obchodów jubileuszu 70-lecia rozwoju badań jądrowych w Polsce, organizowane przez Narodowe Centrum Badań Jądrowych oraz Instytut Chemii i Techniki Jądrowej.

Historia polskiego programu jądrowego rozpoczęła się w latach 50. XX wieku. W 1954 r. Rząd PRL podjął *ściśle tajną uchwałę o rozpoczęciu badań nad energią atomową*. Rok później utworzono Instytut Badań Jądrowych (IBJ), który stał się największym w kraju ośrodkiem naukowym w tej dziedzinie. Jak informuje na swojej stronie Narodowe Centrum Badań Jądrowych, powołanie 4 czerwca 1955 roku Instytutu Badań Jądrowych w Świerku było kamieniem węgielnym polskiej atomistyki. Jego utworzenie było odpowiedzią na globalne odtajnienie przez światowe mocarstwa części prac z zakresu fizyki jądrowej.

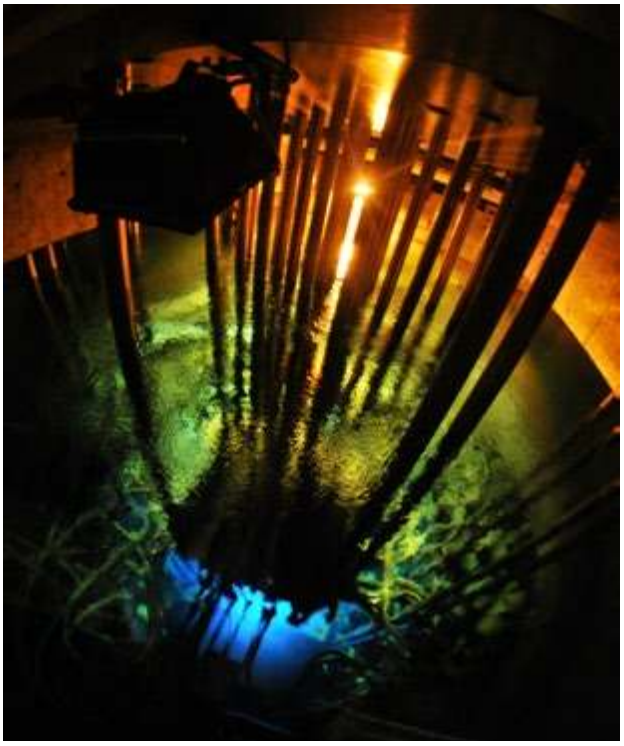
W 1958 r. w Świerku rozpoczął pracę *pierwszy polski reaktor badawczy EWA*, a kilka lat później – konstrukcji własnej – reaktor MARIA. Ten ostatni, po licznych modernizacjach, pracuje do dziś i w 2025 r. otrzymał bezterminową zgodę na eksploatację.

IBJ miał również ogromne znaczenie dla przemysłu: prowadził produkcję radioizotopów dla medycyny, wdrożył sterylizację radiacyjną sprzętu medycznego, rozwijał unikatowe materiały i współpracował z zakładami chemicznymi oraz metalurgicznymi w całym kraju.

W kolejnych latach w IBJ powstały także mniejsze jednostki badawcze, tzw. reaktory mocy zerowej (MARYLA, ANNA, AGATA), oraz akceleratory cząstek LECH i ANDRZEJ.

Zaawansowane badania wymagały ogromnej mocy obliczeniowej. Dlatego już w 1965 roku w Świerku zainstalowano duńską maszynę cyfrową GIER. Maszyny liczące w Świerku się zmieniały, a dziś w ośrodku działa Centrum Informatyczne Świerk – jeden z najpotężniejszych superkomputerów w kraju.

Historia IBJ to także trudne momenty polityczne. Decyzją władz stanu wojennego w 1982 roku Instytut został zlikwidowany i podzielony, co było



formą represji wobec niezależnego środowiska naukowego. W jego miejsce powstały trzy odrębne jednostki: Instytut Problemów Jądrowych (IPJ) w Świerku, Instytut Energii Atomowej (IEA) w Świerku, Instytut Chemii i Techniki Jądrowej (IChTJ) na warszawskim Żeraniu.

Po latach transformacji, w 2011 roku, z połączenia Instytutu Problemów Jądrowych i Instytutu Energii Atomowej POLATOM (wcześniej IEA), narodziło się Narodowe Centrum Badań Jądrowych (NCBJ).

Dziś, obok NCBJ i IChTJ, do najważniejszych ośrodków wywodzących się z tradycji IBJ należy także Instytut Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie. Wszystkie te instytucje kontynuują 70-letnią, bogatą historię polskiej nauki jądrowej, prowadząc badania na światowym poziomie. (NCBJ, PAP)

10 lat badania fal grawitacyjnych

Mija dekada od zaobserwowania po raz pierwszy „zmarszczek czasoprzestrzeni". Przez ten czas detektory fal grawitacyjnych zarejestrowały setki kosmicznych kataklizmów: od narodzin i zderzeń czarnych dziur aż po zjawiska, w których powstają ciężkie pierwiastki.

Choć fale grawitacyjne wstrząsają światem od miliardów lat, po raz pierwszy ludzie zaobserwowali je 14 września 2015 r. w amerykańskich obserwatoriach LIGO – we współpracy z europejskim Virgo. Nowinę tę potwierdzono i ogłoszono światu kilka miesięcy później, a już w 2017 r. badania teoretyczne z tego zakresu nagrodzono Noblem. Naukowcy jednak nie spoczęli na laurach. Badania nad promieniowaniem grawitacyjnym nie ustają, a teraz już co kilka dni daje się obserwować, jak kolejne zmarszczki czasoprzestrzeni przepływają przez Wszechświat i nasze detektory.

Przyjęło się mówić, że fale grawitacyjne to zaburzenia w czasoprzestrzeni. Wywołują je najbardziej gwałtowne zdarzenia w kosmosie – np. kolizje obiektów o ogromnych przyspieszeniach i wielkich masach. Energia z takiego układu rozchodzi się we wszystkich kierunkach z prędkością światła (jak wiemy z obserwacji fali grawitacyjnej w sierpniu 2017 roku, której towarzyszył błysk promieniowania gamma), na chwilę odkształcając całą czasoprzestrzeń na swojej drodze. Zmieniają się więc na chwilę odległości pomiędzy cząstkami materii, z której zbudowane są gwiazdy, planety i my wszyscy, a także tempo przepływu czasu między tymi obiektami.

Na Ziemi są to tak niewielkie zmiany odległości, że nie jesteśmy tego w stanie zauważyć własnymi zmysłami. Dlatego powstały na świecie obserwatoria fal grawitacyjnych: dwa działają w ramach amerykańskiego LIGO, a po jednym – w ramach europejskiego Virgo we Włoszech i japońskiego KAGRA. Są to wielokilometrowej długości interferometry, które z niezwykle wysoką precyzją mierzą minimalne zmiany odległości między oddalonymi punktami. Dzięki ich wspólnej pracy naukowcy są w stanie ustalić źródło tych fal. I nie ma wątpliwości, że tego typu „trzęsienie czasoprzestrzeni" to sygnał uwolniony dawno, dawno temu w galaktykach odległych od nas temu nawet o miliardy lat świetlnych.

Jak tłumaczy w rozmowie z PAP astrofizyk prof. Michał Bejger z Centrum Astronomicznego im. Mikołaja Kopernika PAN i Włoskiego Instytutu Fizyki Jądrowej, detekcja fal grawitacyjnych dała zupełnie nową perspektywę w badaniach kosmosu.

– Do tej pory opisywaliśmy Wszechświat dzięki informacjom przynoszonym przez cząstki elementarne – fotony promieniowania elektromagnetycznego, cząstki promieniowania kosmicznego i neutrina. Dzięki badaniom fal grawitacyjnych zyskujemy zaś zupełnie inne podejście – możemy badać dynamiczne zmiany całej czasoprzestrzeni, wywołane ruchem mas. Dostajemy więc bezpośredni dostęp do badania „osnowy" rzeczywistości, a nie tylko obiektów w niej zanurzonych – wyjaśnia prof. Bejger.

Zdaniem naukowca to nowe podejście otworzyło też wrota do tzw. astronomii wieloaspektowej (multi-messenger). Kiedy zlokalizujemy źródło fal w przestrzeni, możemy bowiem skierować w tamtą stronę teleskopy i obserwować to samo zjawisko w np. różnych pasmach promieniowania elektromagnetycznego. Albo odwrotnie: badacze obserwujący niebo w zakresie promieniowania elektromagnetycznego dają o informacje potencjalnie ciekawym źródle fal grawitacyjnych, których można szukać w danych. Dzięki temu uzyskujemy pełniejszy obraz kosmicznych kataklizmów: nie tylko je widzimy, ale i jednocześnie „słyszymy". Na podstawie – Nauka w Polsce

eprasa.pl 3ca39600ed

Foto – Adobe Stock

Fotony i materia

Maciej Panczykowski

Fotony są cząstkami elementarnymi z grupy bozonów, o spinie 1 i energii zależnej wprost proporcjonalnie od częstotliwości drgań (ν):

$$E = h\nu$$

gdzie: E – energia, h – stała Plancka

W zależności od ich energii, ich strumień stanowi (zaczynając od energii najwyższej): promieniowanie gamma, promieniowanie X (rentgenowskie), ultrafiolet, światło widzialne, podczerwień, mikrofale i „fale" radiowe.

Materia ziemska może mieć postać: gazową, ciekłą lub stałą. Gazy składają się z atomów (np. argon, ksenon) lub cząsteczek (np. tlen O_2, azot N_2, dwutlenek węgla CO_2, etan C_2H_6).

Ciecze w temperaturze pokojowej są prawie zawsze cząsteczkowe (wyjątkiem rtęć). Przykładowo: woda (H_2O), brom (Br_2), etanol (C_2H_5OH), benzen (C_6H_6).

Ciała stałe występują w formach bezpostaciowych, różnokolorowych proszków, formach amorficznych (np. szkło) lub krystalicznych. Wyróżniamy następujące rodzaje kryształów:

- **molekularne** (spajane przez oddziaływania van der Waalsa, częste wśród związków organicznych),
- **kowalencyjne** (z wiązaniami między atomami elektroujemnymi), np.: diament, węglik krzemu (SiC),
- **jonowe** (z wiązaniami między atomami elektroujemnymi a elektrododatnimi), np.: chlorek sodu (NaCl), fluorek cezu (CsF), bromek potasu (KBr),
- **metaliczne** (z wiązaniami między atomami elektrododatnimi), w metalach i ich stopach.

W tym artykule wyobrazimy sobie, że strumień fotonów pada na określony rodzaj materii i przedstawię wszystkie zjawiska, jakie mogą wtedy wystąpić.

Najogólniej – foton zmierzający w kierunku danej formy materii może:

- przez nią przejść bez interakcji (transmisja),
- zostać pochłonięty (absorpcja),
- zostać rozproszony, czyli zmienić kierunek swego ruchu,

Ujmując rzecz bardziej szczegółowo: wyróżniamy w fizyce 8 rodzajów interakcji foton-materia ziemska:

1. **Absorpcja rezonansowa** – zachodzi wtedy, gdy energia fotonu jest równa różnicy energii między poziomami energetycznymi elektronów atomu lub cząsteczki. W przypadku pochłaniania fotonów z zakresu widzialnego jak i ultrafioletu, mamy do czynienia ze stanem wzbudzonym elektronów i ich powrotem do stanu podstawowego lub **deekscytacją bezpromienistą** w postaci przekazania pochłoniętej energii innej cząsteczce podczas zderzeń. Kiedy pochłaniane są fotony z zakresu widzialnego, ich znaczna utrata (tych o określonej energii) w strumieniu padających fotonów (światło białe) odpowiada za barwę określonej substancji. To znaczy, że barwa postrzegana jest dopełniająca do „barwy" pochłanianych fotonów. Na przykład: cząsteczka chlorofilu A pochłania fotony „czerwone" i „niebieskie", a do ich mieszanki dopełniający jest kolor zielony. Jest to kolor chlorofilu i liści, w których on występuje. Inny przykład to czerwony 1,2-naftochinon, który jest taki dlatego, że pochłania „fotony zielone", a czerwień jest dopełniająca do zieleni.
W przypadku fotonów podczerwieni padających na cząsteczkę przechodzi ona do wzbudzonych stanów oscylacyjnych lub rotacyjnych (to drugie w przypadku dalekiej podczerwieni i gazów lub cieczy). Deekscytacja tych stanów podczas zderzeń sprawia, że cząsteczki poruszają się szybciej i złożona z nich substancja ma wyższą temperaturę.

2. **Fluorescencja** – zachodzi wtedy gdy na substancję padają fotony z zakresu ultrafioletu lub widzialnego, indukując stan wzbudzony elektronów, z którego powrót do stanu podstawowego odbywa się przez bardzo krótko trwający ($< 10^{-8}$ sek) stan pośredni o niższej energii. Fotony emitowane podczas przejścia ze stanu pośredniego do podstawowego mają niższą częstotliwość niż te padające.

eprasa.pl 3ca39600ed

Przykładowo: oświetlenie bromku etydyny ultrafioletem powoduje, że fluoryzuje on w zakresie widzialnym (barwa pomarańczowa). Warto tu nadmienić, że bromek etydyny potrafi interkalować z DNA. Ta właściwość wykorzystywana jest w biologii molekularnej do uwidaczniania prążków DNA na żelach używanych do rozdzielania odcinków DNA o różnych długościach.
Fluorescencja występuje tylko w przypadku niektórych substancji, np. fluoresceiny, rodaminy B.

3. **Fosforescencja** – jest podobna do fluorescencji, z tym, że w jej przypadku powrót do stanu podstawowego odbywa się przez „długo żyjący" stan metastabilny ($>10^{-8}$ sek, nawet trwający sekundy, godziny lub tygodnie).
Zjawisko to znalazło zastosowanie przy produkcji mas świecących. Również występuje tylko w przypadku określonych substancji, jak np. siarczek cynku (ZnS) lub siarczek strontu (SrS).

4. **Efekt fotoelektryczny** – efekt wybijania elektronu z materiału przez foton promieniowania X, nadfioletu lub zakresu widzialnego. Foton zostaje przez elektron pochłonięty całkowicie, a jego energia zamieniana jest (niecałkowicie) na energię kinetyczną elektronu.
Najczęściej to zjawisko przedstawiane jest na przykładzie metali i nadfioletu. Ściślej mówiąc, elektron gazu elektronowego musi wykonać jeszcze tak zwaną pracę wyjścia z metalu (W_{ext}):

$$E_{kin} = h\nu - W_{ext}$$

Ten efekt bardzo klarownie obrazuje fakt mówiący, że tak zwane promieniowanie elektromagnetyczne jest niczym innym jak strumieniem fotonów, który to nie byłby w stanie wybić z metalu żadnego elektronu, jeśli składałby się z bardzo wielu fotonów, ale o zbyt niskiej energii pojedynczej cząstki (np. „radiowych").
Zjawisko fotoelektryczne znalazło zastosowania w: fotokomórkach, fotopowielaczach, matrycach CCD aparatów fotograficznych.

5. **Rozpraszanie Comptona** – zjawisko niesprężystego rozpraszania fotonów na elektronach materiału, wskutek którego następuje przyrost energii kinetycznej elektronu i emisja fotonu rozproszonego o niższej energii. **Wzór Comptona** przedstawiający zależność między „długością fali" fotonu rozproszonego (λ_2) a fotonu padającego (λ_1) ma postać:

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{mc}(1 - \cos\alpha)$$

gdzie: h – stała Plancka, m – masa elektronu, c – prędkość światła, α – kąt pod którym nastąpiło rozproszenie
Występująca w tym wzorze wielkość: **h/mc** to tak zwana „**komptonowska długość fali** elektronu", mająca bardzo niewielką wartość. Jest to przyczyną tego, że zmiany „długości fali" są w tym zjawisku niewielkie i obserwowalne tylko dla fotonów „krótkofalowych" (promieniowania gamma i rentgenowskiego).

6. **Rozpraszanie Rayleigha** – pochłonięcie fotonu przez elektron cząsteczki mniejszej niż „długość fali" owego fotonu i jego emisja pod dowolnym kątem i bez zmiany częstotliwości drgań (rozpraszanie sprężyste). Natężenie tego zjawiska jest proporcjonalne do czwartej potęgi częstotliwości (ν^4) i jest to jeden z rzadkich przykładów występowania potęgi 4 we wzorach fizyki teoretycznej.
To rozpraszanie jest odpowiedzialne za niebieski kolor nieba (fotony „niebieskie" intensywnie rozpraszane) i czerwony kolor wschodzącego i zachodzącego słońca (do oka docierają po prostej tylko fotony najmniej intensywnie rozpraszane – fotony „czerwone").

7. **Rozpraszanie Ramana** – rodzaj rozpraszania (niesprężystego) fotonu na cząsteczkach, w którym foton padający nie ma energii odpowiadającej różnicy między poziomami oscylacyjnymi lub w niektórych przypadkach – rotacyjnymi cząsteczki. Cząsteczka po pochłonięciu fotonu emituje foton o niższej energii niż padający, po czym przechodzi na wyższy poziom oscylacyjny lub rotacyjny (**rozpraszanie stokesowskie**). Możliwe jest też rozproszenie fotonu na cząsteczce w stanie wzbudzonym oscylacyjnym lub rotacyjnym i emisja fotonu o wyższej energii niż padający połączona z jej powrotem do stanu podstawowego (**rozpraszanie antystokesowskie**).

8. **Emisja wymuszona** – to przykład procesu niewystępującego w naturze, w którym istnieje początkowo tak zwana **inwersja obsadzeń** w materiale otrzymywana przez pompowanie optyczne zewnętrznym, intensywnym źródłem światła. Większa liczba elektronów znajduje się w stanie wyższym, metastabilnym niż podstawowym. Spontaniczna emisja pojedynczych fotonów związana z powrotem do stanu podstawowego indukuje procesy powrotu i emisji bardzo wielu fotonów „w fazie" (są to bozony), co skutkuje otrzymaniem źródła światła spójnego, o dużym natężeniu. Na zjawisku emisji wymuszonej opierają się: MASERy (*microwave amplification by stimulated emission of radiation*) i później opracowane LASERy (*light amplification by stimulated emission of radiation*).

Maciej Panczykowski
Katowice, 2025.07.29

DODATEK:

John William Strutt Rayleigh (1842-1919) – fizyk angielski. Jako pierwszy wyjaśnił teoretycznie rozpraszanie na cząsteczkach mniejszych niż „długość fali" światła padającego. Odkrył argon w atmosferze ziemskiej, za co przyznano mu w 1904 roku Nagrodę Nobla.

Arthur Compton (1892-1962) – fizyk amerykański. Odkrywca rozpraszania nazwanego jego nazwiskiem (1923) i badacz promieniowania kosmicznego. Za te zasługi otrzymał w 1927 roku Nagrodę Nobla.

Chandrasekhara Raman (1888-1970) – fizyk indyjski. Badacz rozpraszania światła i odkrywca rozpraszania Ramana. Uhonorowany za to w 1930 roku Nagrodą Nobla jako pierwszy Azjata i pierwszy Hindus wykształcony w swej ojczyźnie.

eprasa.pl 3ca39600ed

Foto – Dreamstime

Jak powstawała pompa ciepła?

O odkryciach fizycznych i konstruktorach prekursorach

Kazimierz **Mikulski**

Pompa ciepła jest urządzeniem grzewczym, dzięki któremu możemy transportować energię cieplną ze środowiska o niższej temperaturze (*dolne źródło ciepła*) do środowiska o temperaturze wyższej (*górne źródło ciepła)*. Przemek Ruszczyński na łamach portalu ciepło.pl pisze: „*Historia pomp ciepła to jest ściśle związana z potrzebą komfortu bytowania człowieka. Od epoki kamienia łupanego ludzkość jest w stanie wytwarzać ciepło poprzez rozpalenie ognia. Robiono to poprzez tarcie a potem krzesanie iskier.*"

Według II Zasady Termodynamiki[1] ciepło nie może samorzutnie przechodzić z ciała o temperaturze niższej do ciała o temperaturze wyższej, dlatego aby pompa ciepła działała, należy dostarczyć określoną ilość energii, czyli np. energię elektryczną do napędu sprężarki w układzie pompy ciepła.

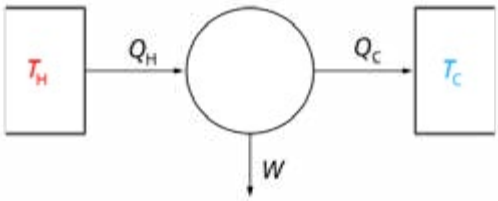
Okazuje się, że stosowane pompy ciepła działają w taki sam sposób jak chłodziarki. Urządzenia te różnią się tylko tym, co jest wykorzystywane przez użytkowników tych urządzeń. W urządzeniu chłodniczym zależy nam na chłodzie uzyskanym w parowniku dzięki temu, że ciepło zostało z niego odprowadzone. Natomiast w pompach ciepła korzystamy z ciepła generowanego w innym wymienniku ciepła, jakim jest skraplacz.

W określeniu pompy ciepła zapisano: „*Pompa ciepła – maszyna cieplna wymuszająca przepływ ciepła z obszaru o niższej temperaturze do obszaru o temperaturze wyższej. Proces ten przebiega wbrew naturalnemu kierunkowi przepływu ciepła i zachodzi dzięki dostarczonej z zewnątrz energii mechanicznej (w sprężarkowych pompach ciepła) lub energii cieplnej (w pompach absorpcyjnych)*". [patr: https://pl.wikipedia.org/wiki/Pompa_ciep%C5%82a]

Pompa ciepła zastosowana do ogrzewania pomieszczeń odbiera ciepło z otoczenia o niskiej temperaturze (z gruntu, wody lub powietrza na zewnątrz budynku) i oddaje ciepło do ogrzewanego obiektu.

Długa historia pompy ciepła

Chociaż wielu osobom wydaje się, że pompa ciepła to nowoczesne urządzenie skonstruowane w ciągu ostatnich dwudziestu lat, w rzeczywistości historia wynalazku sięga aż XIX w. To właśnie wtedy, a dokładnie w 1824 r., francuski wynalazca Nicolas Léonard Sadi Carnot (1769-1832) opublikował pierwsze zasady działania pompy ciepła. Wówczas była ona jednak wyłącznie teorią podpartą kilkoma mniejszymi eksperymentami, dlatego też powstanie prawdziwych, całkowicie sprawnych pomp

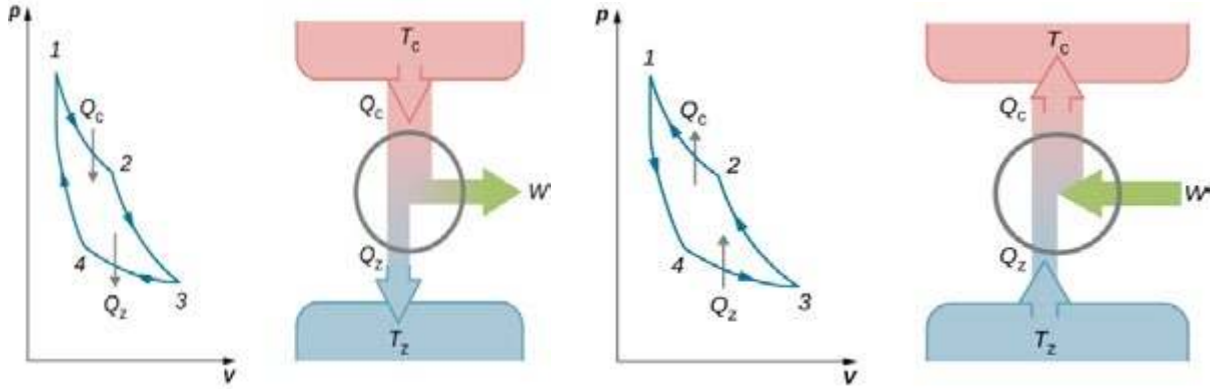


Fotografia 1, 2. Nicolas Léonard Sadi Carnot i Pierre Simon Girard
Rysunek 1. Schemat silnika Carnota (współczesny) – w którym pewna ilość ciepła Q_H przepływa z ciała o wysokiej temperaturze T_H przez płyn „ciała roboczego" (substancji roboczej), a pozostałe ciepło Q_C przepływa do zimnego ciała (odbiornika) T_C, zmuszając w ten sposób substancję roboczą do wykonania pracy mechanicznej W na otoczeniu poprzez cykle skurczu i rozszerzenia.

[1] Cztery sformułowania (Clausiusa, Kelvina, Ostwalda i Carnota) odnoszą się do ograniczeń, jakie nakłada II zasada termodynamiki na maszyny cieplne. https://pl.wikipedia.org/wiki/Druga_zasada_termodynamiki Istnieje też ogólne fenomenologiczne sformułowanie II zasady termodynamiki podane na początku XX wieku przez Caratheodory'ego *(C. Caratheodory: Mathematische Annalen, 67, 355, (1909).):W dowolnie bliskim otoczeniu każdego stanu równowagi układu termo-dynamicznego znajdują się stany nieosiągalne za pomocą równowagowej przemiany adiabatycznej.* Sformułowania Clausiusa i Carnota są uznawane za równoważne z II zasadą termodynamiki, a jednocześnie są one bardziej restrykcyjne od stwierdzeń Kelvina i Ostwalda (Don S.Lemons, Margaret K.Penner, *Sadi Carnot's contribution to the second law of thermodynamics*, „American Journal of Physics", 76 (1), 2008, s.21–25, DOI:10.1119/1.2794346).

eprasa.pl 3ca39600ed

Porównanie funkcjonowanie cyklu Carnota dla silnika i chłodziarki



Rysunek 2. Całkowita praca wykonywana przez gaz w cyklu silnika Carnota to pole na wykresie ograniczone krzywą 1–2–3–4.
oraz
Praca wykonywana na gazie w jednym cyklu chłodziarki Carnota to pole na wykresie ograniczone krzywą 1–2–3–4.
Źródło: https://openstax.org/books/fizyka-dla-szk%C3%B3%C5%82-wy%C5%BCszych-tom-2/pages/4-5-cykl-carnota

ciepła zajęło ponad sto lat! Jednak należy wspomnieć, że w 1810 r. szkocki naukowiec J. Leslie skonstruował pierwszy absorpcyjny agregat chłodniczy.

Ważna książka S. Carnota „*Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*" (Rozważania nad siłą napędową ognia i maszynami służącymi do rozwijania tej siły) została niedoceniona w momencie publikacji. Z pewnością nie dlatego, że zaistniała niezauważona w ówczesnym świecie naukowym. Dzieło zostało opublikowane 12 czerwca 1824 r., a 26 lipca tegoż roku Pierre Simon Girard (1765-1836) przedstawił jej długą recenzję w Académie des Sciences w Paryżu. Recenzja Pierre'a Girarda była bardzo pozytywna i została opublikowana w *Revue encyclopédique*. Być może problem z recenzją polegał na tym, że chociaż w pełni przedstawiono twierdzenia i wnioski z pracy S. Carnota, nie skomentowano wysoce oryginalnego rozumowania, którego Carnot użył, aby osiągnąć swoje wyniki. [Patrz: *https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Carnot_Sadi/*]

W tej książce, która miała być jego jedyną publikacją, S. Carnot opracował pierwszą udaną teorię maksymalnej sprawności silników cieplnych. Jest to cykl odwracalny składający się z dwóch przemian izotermicznych oraz dwóch adiabatycznych.

Praca naukowa Carnota, jak wspomniano, wzbudziła niewielkie zainteresowanie za jego życia, ale w 1834 r. stała się przedmiotem szczegółowego komentarza i wyjaśnienia innego francuskiego inżyniera, Benoît'a Paul'a Émile'a Clapeyrona (1799–1864). Komentarz Clapeyrona z kolei przyciągnął uwagę Williama Thomsona, (*późniejszy baron Lorda Kelvin*) (1824–1907) i Rudolfa Juliusa Emanuela Clausiusa (1822–1888). To właśnie Clausius spowodował ponowne sformułowanie zasady Carnota, znanej jako „Cykl Carnota" oraz nadał teorii ciepła prawdziwszą i solidniejszą podstawę. Jego najważniejszy artykuł, „*O sile poruszającej ciepło*",[2] opublikowany w 1850 r., po raz pierwszy przedstawił podstawowe idee drugiej zasady termodynamiki. W 1865 r. wprowadził koncepcję entropii, a w 1870 r. zaprezentował twierdzenie wirtualne, które odnosiło się do ciepła. Natomiast Thomson (*Kelvin*) wykorzystał analizę S. Carnota do opracowania absolutnej skali temperatur termodynamicznych, podczas gdy Clausius użył jej do zdefiniowania pojęcia entropii, formalizując w ten sposób drugą zasadę termodynamiki.[3]

Jednak historia pomp ciepła jest nierozłącznie związana z historią chłodnictwa, którego początki sięgają 1748 r. Wtedy to pierwszy raz zademonstrowano i udokumentowano technikę sztucznego chłodzenia dokonaną przez szkockiego naukowca Williama Cullena (1710-1790), lekarza i chemika.[4] W 1755 r. Lord Kames namówił go do objęcia stanowiska profesora chemii i medycyny na Uniwersytecie Edynburskim.

To właśnie na tym uniwersytecie Cullen przeprowadził pierwszą udokumentowaną publiczną demonstrację sztucznego chłodzenia. Po zaobserwowaniu, że parowanie eteru etylowego obniża temperaturę, w 1756 r. uzyskał odrobinę lodu poprzez odparowanie wody pod „dzwonem próżniowym" umieszczonym na pojemniku wypełnionym eterem. Ten przełomowy moment w historii technologii zapoczątkował proces, który ostatecznie doprowadził do powstania pierwszej pompy ciepła. Cullen, stosując techniki zmniejszania ciśnienia nad roztworami, osiągnął efekt chłodzenia poprzez szybkie odparowanie, otwierając tym samym nowe możliwości w dziedzinie chłodnictwa i kondycjonowania powietrza.[5]

Rewolucja sprężarkowa

W 1834 r., Jacob Perkins (1766-1849), amerykański fizyk, stworzył pierwszy i jedyny na świecie model chłodziarki sprężarkowej. Opracował prototyp urządzenia

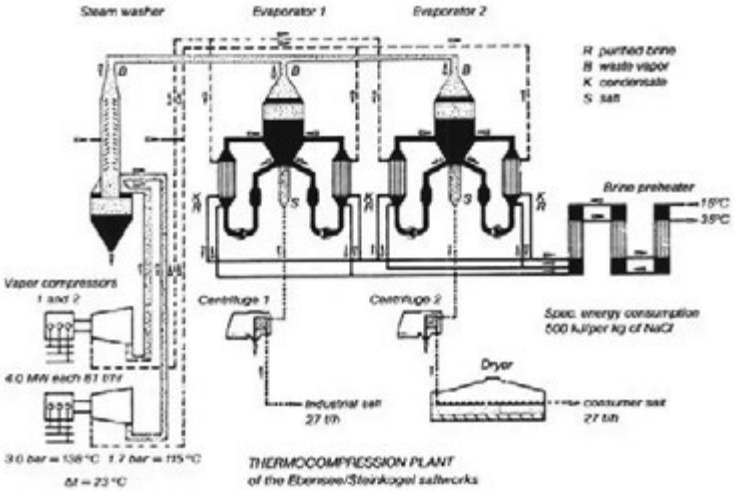
[2] *Clausius, R. (1867). The Mechanical Theory of Heat – with its Applications to the Steam Engine and to Physical Properties of Bodies. London: John van Voorst. Retrieved 19 June 2012.* editions:PwR_Sbkwa8IC. Contains English translations of many of his other works. https://openlibrary.org/books/OL20584213M/The_Mechanical_Theory_of_Heat_With_Its_Applications_to_the_Steam-engine_and_...

[3] *https://en.wikipedia.org/wiki/Nicolas_L%C3%A9onard_Sadi_Carnot*

[4] https://pl.wikipedia.org/wiki/William_Cullen

[5] Ibidem

eprasa.pl 3ca39600ed



Rysunek 3. *Pierwsza pompa ciepła Źródło: https://ecieplo.pl/pompy-ciepla/historia--pomp-ciepla/*

chłodniczego z wykorzystaniem sprężonej pary i eteru etylowego w zamkniętym systemie. Urządzenie to, choć było funkcjonalne i zapowiadało nową erę w technologii chłodniczej, nie odniosło komercyjnego sukcesu. Jednakże, jego prace stanowiły ważny krok w kierunku rozwoju efektywnych systemów chłodzenia, wyznaczając nowe ścieżki dla przyszłych wynalazców.

To on uważany jest za jednego z prekursorów chłodnictwa. W 1834 r. opatentował pomysł urządzenia chłodniczego, które wykorzystując zjawisko odparowania umożliwiało chłodzenie lub zamrażanie.[6] Jego zamknięty układ wykorzystywał elementy, które obecnie znajdziemy w pompach ciepła: parownik, kompresor, skraplacz, zawór rozprężny. Jego główny wkład w fizykę polega na eksperymentach, dzięki którym udowodnił ściśliwość wody i zmierzył ją piezometrem swojego wynalazku.

[**Piezometer** (od starożytnego greckiego *piezein* „do druku") mierzy ciśnienia cieczy] s https://pl.frwiki.wiki/wiki/Jacob_Perkins

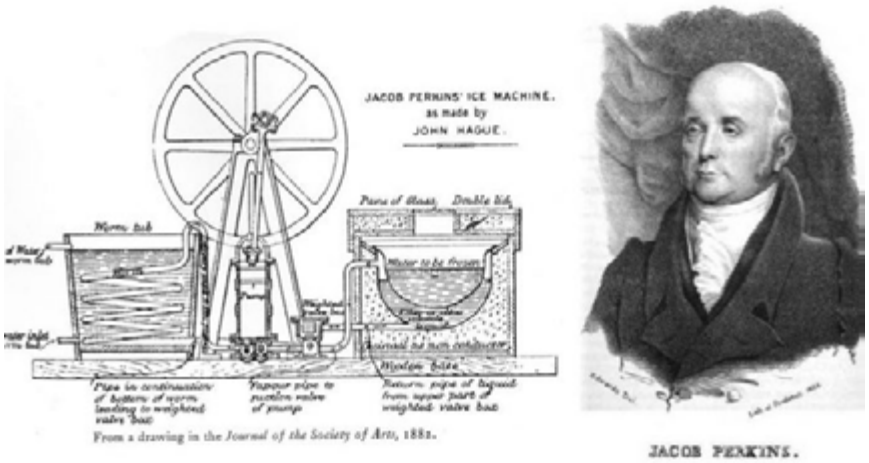
Pierwsza pompa ciepła

W 1852 r., William Thompson, (*jako Lord Kelvin i twórca skali temperatury Kelvina*), zauważył niewykorzystany dotąd potencjał w wynalazku Perkinsa. W swoich badaniach przedstawił koncept sprężarki połączonej z dwoma zbiornikami wody, działającymi jako źródła górne i dolne. Thompson zwrócił uwagę na to, że odwrócony silnik cieplny jest w stanie dostarczać nie tylko chłód, ale i ciepło, co było istotnym odkryciem dla przyszłych zastosowań technologicznych. Trzy lata później (**1855)** skonstruował parownię w jednej z warzelni soli w Austrii. W wyniku sprężania powietrza maszyna ogrzewała opary solanki, a uzyskiwane ciepło trafiało ponownie do użytku.

Dalszy rozwój technologii chłodniczo-grzewczej i pomp ciepła nastąpił dzięki rozpowszechnieniu energii elektrycznej. Później, w latach 1855-1857, austriacki naukowiec Peter Ritter von Rittinger (1811-1872) był austriackim pionierem przetwórstwa minerałów. Skonstruował parownię służącą do ogrzewania warzelni soli, wykorzystującą proces sprężania powietrza do ogrzewania oparów solanki, a następnie ponownego wykorzystania wytworzonego ciepła. Ta innowacyjna maszyna, choć pierwotnie zaprojektowana dla specyficznych potrzeb przemysłu solnego, była pierwszą praktyczną realizacją koncepcji pompy ciepła.[7] W rezultacie w Austrii pompa ciepła była używana do suszenia soli na słonych bagnach.[8]

W historii chłodnictwa ważny jest okres 1873–1876**,** gdy w Monachium Carl Paul Gottfried von Linde (1842-1934) – niemiecki inżynier i wynalazca tworzy pierwszą chłodziarkę sprężarkową do własnej metody skraplania gazów i w 1895 r., otrzymuje ciekły tlen z powietrza w procesie rektyfikacji, czyli destylacji frakcyjnej. To z fizycznego punktu widzenia destylacja kaskadowa (*wielopoziomowa*), w której każdy stopień procesu jest zasilany produktem (*destylatem*) poprzedniego stopnia. W 1902 r., założył koncern *Linde AG*.

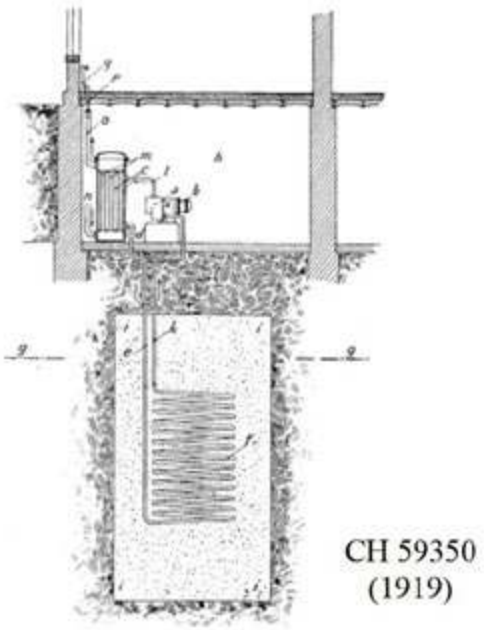
Kilka lat później Heinrich Zoelly (1862–1937) był meksykańsko-szwajcarskim inżynierem. Opracował nie tylko turbiny parowe i lokomotywy napędzane turbiną, ale w 1912 r. opatentował pompę ciepła geotermalnego i złożył wniosek patentowy, w którym opisano gruntowe źródło ciepła do pompy ciepła. Patent został wydany w 1919 r. jako szwajcarski z nr 59350. Pompa ciepła jest urządzeniem wykorzystująca energię gruntową (*również pompa ciepła geotermalna*). To system ogrzewania/chłodzenia budynków,



Rysunek 4. Maszyna Perkinsa i Jacob Perkins – amerykański fizyk, wynalazca i inżynier. https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Portrait_of_Jacob_Perkins_Esqr_(4672666).jpg [Patrz: https://www.wynalazki.edu.pl/index.php/wynalazcy/p/perkins#google_vignette krótka notatka]

[6] https://pl.wikipedia.org/wiki/Jacob_Perkins
[7] https://smart-eco.net/blog/jak-powstaly-pompy-ciepla
[8] https://en.wikipedia.org/wiki/Peter_von_Rittinger

eprasa.pl 3ca39600ed



Rysunek 5. Patent na pierwsze dolne źródło ciepła Źródło: https://ecieplo.pl/pompy--ciepla/historia-pomp-ciepla/

Fotografia 3. Heinrich Zoelly (1862–1937) ok. 1910 r., w wieku około 50 lat

który wykorzystuje pewien rodzaj pompy ciepła do przenoszenia ciepła do lub z gruntu, wykorzystując względną stałość temperatur ziemi w różnych porach roku.[9]

Podejścia naukowe, czyli pionierzy przed 1875 r.

Julius Robert von Mayer (1814–1878) był niemieckim lekarzem, chemikiem i fiykiem oraz jednym z twórców termodynamiki, który ustanowił zasadę równoważności między pracą a ciepłem w 1842 r., Zasada została udowodniona eksperymentalnie przez Jamesa Prescotta Joule (1818–1889) w 1843 r. W 1847 r. Joule badał naturę ciepła i odkrył jego związek z pracą mechaniczną. Doprowadziło to do powstania prawa zachowania energii, które z kolei doprowadziło do opracowania pierwszej zasady termodynamiki. Jednostka energii w układzie SI dżul (J), została nazwana na jego cześć. Natomiast Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894) ustanowił zasadę zachowania energii (pierwsze prawo termodynamiki).

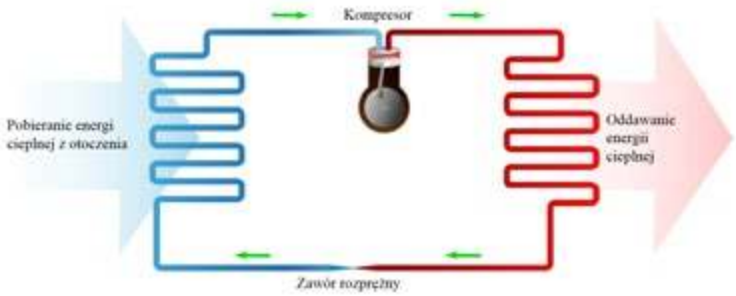
W 1866 r. Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906) był austriackim matematykiem i fizykiem teoretycznym, który nadał nowe znaczenie drugiej zasadzie, łącząc pojęcie entropii z pojęciem prawdopodobieństwa w fizyce statystycznej. Entropia zatem reprezentuje stopień nieuporządkowania. W 1878 r. Josiah Willard Gibbs (1839-1903), amerykański inżynier, mechanik i naukowiec, wniósł fundamentalny wkład teoretyczny do fizyki, chemii i matematyki, wprowadził wartość entalpii. Jednak Richard Mollier (1863-1935), wprowadził ją do termodynamiki stosowanej dopiero w 1902 r.

Z pomysłów wysuniętych przez G. Zeugnera w 1859 r. i Hansa Lorenza w 1896 r. zrodziła się idea egzergii, czyli użytecznej maksymalnej pracy wykonanej przez układ zmieniający się z danego stanu początkowego w dany stan końcowy za pomocą stałego źródła i ujścia temperatury. Termin wprowadzony w 1955 r. przez słoweńskiego fizyka Zorana Ranta (1904-1972) jako zdolność do wykonywania pracy – jest rodzajem energii, która może służyć jako zapas energii. Cechuje ją ilość i jakość, a ulega zniszczeniu, gdy jest wykorzystywana.

Jednak zbudowano tylko jedną maszynę. W 1855 r. A. C. Twining zaprezentował pierwszą komercyjną instalację do produkcji lodu wykorzystującą chłodzenie przez sprężanie pary. Natomiast J. Harrison opracował pierwszą sprężarkę gotową do praktycznej eksploatacji w 1856 r. Wprowadzono kilka czynników chłodniczych: amoniak do systemów absorpcyjnych przez F. Carré, do systemów sprężania przez J. Beatha (1868) i D. Boyle'a (1873), eter metylowy przez Ch. Tellier (1863), dwutlenek węgla Thaddeus S.C. Lowe (1866) i dwutlenek siarki Szwajcar R. Pictet (1874). Jednak P. Van der Weyde wynalazł termostatycznie sterowany system chłodniczy już w **1870** r. Koncentracja i krystalizacja przez parowanie są stosowane na całym świecie na dużą skalę. W otwartym cyklu rekompresji pary spaliny takich systemów są sprężane do wyższego ciśnienia w celu ich skroplenia w celu odzyskania ciepła około 10K powyżej temperatury wrzenia roztworu solanki, aby zapewnić dobry transfer ciepła. Ten niewielki wzrost temperatury jest oczywiście optymalny dla procesu pompy ciepła. Dlatego mechaniczna rekompresja pary została zrealizowana znacznie wcześniej niż pompy ciepła do ogrzewania pomieszczeń i inne urządzenia niskotemperaturowe.

[9] History of Heat Pumps Swiss Contributions and International Milestones Martin Zogg, Dr.sc.techn., Process and Energy Engineering, Oberburg, Berne, Switzerland https://www.zogg-engineering.ch/Publi/IEA_HPC08_Zogg.pd

eprasa.pl 3ca39600ed



Rysunek 6. Zasadę działania opisano pod adresem Internetowym https://fhuinventor.pl/zakres-instalacji/powietrzne-pompy-ciepla/czym-jest-i-jak-dziala-pompa-ciepla/

Wspomniany już P. von Rittinger był pierwszym, który próbował zrealizować ten pomysł w 14-kilowatowej instalacji pilotażowej w austriackich zakładach solnych w Ebensee. Oprócz nieco dziwnego pomysłu zamkniętego cyklu, pojawiło się wiele problemów procesowych. Instalacja pilotażowa nigdy nie działała pomyślnie. W 1851 r. Francuz F. Carré zaprojektował pierwszy komercyjnie udany system chłodzenia absorpcyjnego amoniaku. Była to pierwsza maszyna chłodnicza, która osiągnęła ogólne znaczenie przemysłowe. Rozwój był w większości empiryczny. Teoria maszyny absorpcyjnej pojawiła się znacznie później, w latach 10. XX wieku, dzięki E. Altenkirchowi.

W 1928 r. T. G. Haldane zbudował pierwszą w Anglii instalację do ogrzewania domu opartą na amoniakalnym urządzeniu sprężarkowym. W tym samym 1928 r. Aurel Stodola buduję jedna z pierwszych pomp ciepła, których dolne źródło ciepła stanowią wody jeziora Genewskiego. Do dziś jezioro stanowi źródło ciepła dla ratusza w Genewie.

W pełni poprawne i eksploatowane w sposób ciągły pompy ciepła zaczęły powstawać w latach trzydziestych ubiegłego stulecia.

Należy wspomnieć, że osiem lat później, w 1936 r., zamontowano pompę ciepła w ratuszu w Zurichu, która działała jeszcze w XXI wieku. Pierwsza połowa XX wieku w Szwajcarii była momentem przełomowym dla pomp ciepła. Dzięki nim było ogrzewanych wiele budynków miejskich oraz obiektów użyteczności publicznej. Pompy ciepła pobierały ciepło z powietrza oraz z rzeki Limmat.

Industrializacja w latach 1876-1918

W tym okresie funkcjonalne modele pionierów zostały zastąpione bardziej niezawodnymi i zoptymalizowanymi produktami przemysłowymi na podstawie szybko rozwijającej się wiedzy naukowej i zdolności produkcji przemysłowej. Systemy chłodnicze zaczęto produkować na skalę przemysłową. Już w 1875 r. Monachijskie Towarzystwo Politechniczne podjęło pierwsze testy porównawcze maszyn chłodniczych. Około 1900 r. dokonano najbardziej fundamentalnych wynalazków. Do 1918 r. amoniak był dominującym czynnikiem chłodniczym, a w USA i Europie było wielu producentów sprężarek. W Szwajcarii byli to Escher Wyss w Zurychu, Sulzer w Winterthur i Société Genevoise w Genewie.

W 1878 r. Sulzer, jeden z wiodących producentów silników parowych, rozpoczął budowę sprężarek i instalacji chłodniczych jako logiczne rozszerzenie swoich działów „silników parowych" i „sprężarek". Sulzer stał się jednym z najważniejszych producentów dla Linde. W 1878 r. Sulzer rozpoczął eksport urządzeń chłodniczych dla firmy produkującej lód w Bombaju w Indiach. Jej dwie sprężarki tłokowe Sulzer były napędzane przez dwie maszyny parowe Sulzer o mocy 37 kW każda. Pierwsza instalacja chłodnicza w Szwajcarii została zainstalowana w 1879 r. w browarze Hürlimann w Zurychu. W 1898 r. Sulzer wyprodukował pierwszą dwustopniową sprężarkę skojarzoną amoniaku, a następnie sprężarkę chłodniczą o mocy 1,45 MW w 1909 r. i instalację klimatyzacyjną dla hotelu w Buenos Aires w 1914 r. W tym czasie dominującym sposobem napędzania sprężarek była maszyna parowa.

Międzynarodowe kamienie milowe

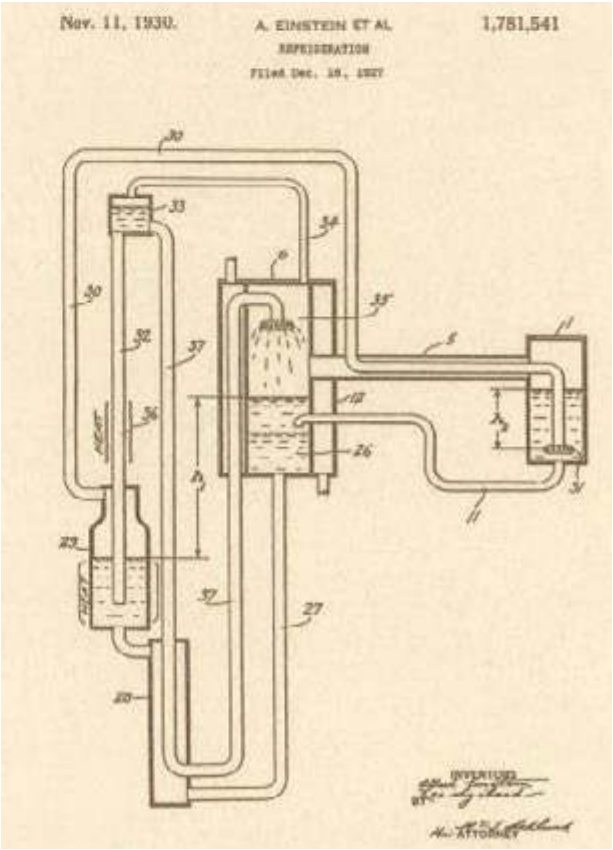
Prawdziwy przełom w dziedzinie sprężarek amoniaku dokonał wymieniony powyżej C. von Linde. Jego sprężarka tłokowa z poziomym cylindrem dwustronnego działania z 1877 r. została wyprodukowana na licencji w Europie i w USA. W 1885 r. (W.G. Lock, Australia Sulzer) i 1892 r. (S. Saint Clar, USA York) wprowadzono dwustopniowe sprężarki amoniaku. W 1880 r. F. Windhausen zaprojektował instalację chłodniczą dwutlenku węgla, a w 1886 r. działającą sprężarkę chłodniczą CO2. Chlorek metylu wprowadzono jako czynnik chłodniczy w 1878 r. oraz chloroetan w 1883 r., a chlorek etylu w 1884 r.

Zasada działania sprężarki śrubowej została po raz pierwszy opatentowana przez H. Krigara w 1878 r., ale produkcja nie była jeszcze możliwa. Zasada działania nowoczesnej sprężarki łopatkowej sięga początków XX wieku, ale nie udało się jej zastosować w praktyce aż do 1920 r. Od 1911 r. W. Carrier po raz pierwszy poważnie pracował nad sprężarkami turbo promieniowymi do klimatyzacji. Zasada działania sprężarki spiralnej została opatentowana w 1905 r. przez L. Creux. Jednak precyzyjna obróbka tych unikalnie ukształtowanych części nie była wówczas możliwa. Jednym z głównych powodów dominacji systemów absorpcyjnych do około 1890 r. było bezpośrednie wykorzystanie pary. W tamtym czasie elektryczność była wytwarzana przez silniki parowe o bardzo niskiej sprawności. Hybrydowy system absorpcyjno-sprężarkowy wprowadzono już w 1895 r., a zasadę cyklu dyfuzyjno-absorpcyjnego ustanowił już w 1899 r. H. Geppert. Warto również odnotować wprowadzenie korka jako materiału izolacyjnego przez Grünzweiga w 1880 r. Około 1900 r. na scenie pojawił się skraplacz skorupowy. W 1902 r. Vilter zainstalował separator cieczy w linii ssącej, a automatyczny zawór rozprężny został opatentowany przez A. Marshalla.

Konkurencyjna pompą ciepła

W latach 1919=1950 pompy ciepła do ogrzewania pomieszczeń i podgrzewania wody użytkowej rozwijały się od rzadkich pierwszych prototypów do niezawodnego, wydajnego i - w zależności od indywidualnych warunków granicznych - nawet ekonomicznie opłacalnego urządzenia grzewczego. Zwiększenie prędkości obrotowej sprężarek zostało zaakcentowane i spowodowało zmniejszenie ich objętości i wagi. Po 1918 roku silnik elektryczny stał

eprasa.pl 3ca39600ed



Rysunek 7. Z danych patentowych (patrz na stronę o adresie Internetowym: https://portpc.pl/pdf/RE1_patent_einstein_en.pdf)

się pierwszym wyborem do napędzania sprężarek. Około 1920 roku popularny stał się synchroniczny silnik elektryczny, bezpośrednio podłączony do sprężarki. Od 1920 r. Sulzer rozszerzył swoją produkcję sprężarek o większą objętość do NH3, CO2 i chlorku metylu. Od 1922 r. Sulzer produkował również kompaktowe agregaty chłodnicze. Ostatecznie w 1927 r. Sulzer zbudował największą na świecie sprężarkę tłokową do chłodnictwa o mocy 9,4. W 1937 r. jeszcze większą wersję o mocy 11,6 MW. Na początku lat 30. XX wieku Sulzer wprowadził bezolejową „suchą sprężarkę tłokową labiryntową", która była najpierw używana do sprężania powietrza, a po modyfikacjach była również używana jako sprężarka chłodnicza od około 1955 r. Sulzer rozpoczął produkcję sprężarek turbo już w 1909 r. i wszedł na rynek chłodniczy w 1927 r. z wielostopniową sprężarką turbo amoniakową z napędem turbiny parowej.

Brown Boveri skupił się na sprężarkach turbo i w 1926 r. wyprodukował maszynę amoniakową o mocy 9,3 MW, a następnie o mocy 17,4 MW w 1927 r. Później BBC używało chlorku etylu i bromku etylu, a następnie freonów. W 1935 roku jego „Frigobloc", chłodnica wody lub solanki, została wyposażona w sprężarki o mocy od 23 kW do 1,4 MW. Przed 1940 rokiem potrzebowano 5 do 6 kół dla sprężarek turbo promieniowych, następnie 2 do 3. Po 1960 roku produkowano coraz więcej sprężarek jednokołowych o prędkościach obwodowych zbliżonych do prędkości dźwięku. Escher Wyss wyprodukował sprężarkę tłokową, tzw. „Rotasco" w 1936 roku. Ten typ sprężarki wybrano do pierwszej europejskiej pompy ciepła w Zurychu.

W 1930 r. powstaje absorpcyjne urządzenie chłodnicze, którego twórcą byli Albert Einstein (1879-1955) i Leó Szilárd (1898-1964). Na podstawie tego urządzenia konstruowane są dzisiejsze absorpcyjne pompy ciepła. Jako napęd w takim urządzeniu służy ciepło ze spalania gazu, a nie sprężarka, a energia cieplna z dolnego do górnego źródła ciepła jest przekazywana dzięki różnicy gęstości absorbentu oraz różnicy ciśnień. Uczeni uzyskali patent dotyczący urządzenia chłodniczego, które miało możliwość przekazywania ciepła z miejsca niższej temperaturze do miejsca o temperaturze wyższej, dzięki m.in. różnicy ciśnień, różnicy gęstości zastosowanego absorbentu oraz dostarczaniu ciepła napędowego. Na tym patencie oparta jest współczesna technologia absorpcyjnych pomp ciepła.

Podsumowując – pompa ciepła dzisiaj

Nie można jednoznacznie określić, kto wynalazł pompę ciepła, ponieważ wynalazców było wielu i każdy z nich miał swój wkład w rozwój tej technologii. Obecnie najwięcej pomp ciepła odnotowuje się w takich krajach jak Szwecja, Szwajcaria czy Austria. W Sztokholmie około 60% ludności korzysta z ciepła systemowego zasilanego m.in. miejskimi pompami ciepła, których dolnym źródłem ciepła jest woda morska z Bałtyku oraz ścieki komunalne. W Szwecji zainstalowanych jest też wiele urządzeń małej mocy w domach jednorodzinnych. Szacuje się, że nawet około 25% domów jest wyposażonych w pompę ciepła. Bardzo podobnie jest w Szwajcarii, gdzie w nowych budynkach pompa ciepła jest standardem.

W Polsce obecnie rośnie zainteresowanie pompami ciepła małej mocy, stosowanymi w zabudowie mieszkaniowej. Wpłynęła na to większa świadomość społeczeństwa w zakresie ochrony środowiska, opłacalność i długowieczność urządzeń wspomaganych stosowaniem fotowoltaiki, jako źródła energii elektrycznej. Zainteresowanie nowymi technologiami cieplnymi będzie rosnąć lub utrzymywać się na podobnym poziomie. Można zauważyć wzrost realizowanych inwestycji z uwzględnieniem pozyskiwanych środków unijnych. Pompy ciepła są w aktualnie najlepszą alternatywą dla kotłów grzewczych w technice cieplnej.

Kończąc, pompy ciepła można podzielić w zależności od dolnego źródła ciepła, czyli środowiska, z którego pobierana jest energia cieplna na powietrzne, gruntowe oraz wodne. W szerokiej literaturze przedmiotu wyróżnia się urządzenie ze względu na zastosowany napęd, dzięki któremu odbywa się cykl układu. Należą do nich: pompy absorpcyjne, które są napędzane energią cieplną, stosowane głównie w przemyśle; pompy termoelektryczne z napędem elektrycznym; pompy sprężarkowe z napędem mechanicznym, najpowszechniej stosowane w ogrzewnictwie do zasilania w ciepło domów mieszkalnych.

dr Kazimierz Mikulski
Maksymilianowo

eprasa.pl 3ca39600ed

Fizyka a społeczeństwo

49. Zjazd Fizyków w Katowicach

Edward **Rydygier**

W dniach 5-11.09.2025 r. w Katowicach odbył się 49. Zjazd Fizyków Polskich zorganizowany przez Oddział Katowicki Polskiego Towarzystwa Fizycznego oraz Uniwersytet Śląski. Uroczysta sesja plenarna została przeprowadzona w sobotę 6 września w gmachu Filharmonii Śląskiej im. Henryka Mikołaja Góreckiego, podczas której jako gość honorowy wygłosiła wykład laureatka Nagrody Nobla z fizyki w 2023 r. prof. Anne L'Huillier. Mowę wstępną wygłosił dr hab. Dariusz Krajewski (prof. UŚ) reprezentujący Komitet Organizacyjny Zjazdu. Następnie prezeska PTF prof. Teresa Rząca-Urban (UW) otworzyła formalnie Zjazd. Tradycyjnie przyznano nagrody i wyróżnienia PTF, w tym prestiżowy Medal Smoluchowskiego za 2025 r., który otrzymał prof. Witold Nazarewicz (Rys. 1).

Prof. Witold Nazarewicz (ur. 26.12.1954 r. w Warszawie) jest amerykańskim i polskim fizykiem jądrowym, profesorem Uniwersytetu w Knoxville, Tennessee, USA i Uniwersytetu Warszawskiego. Niestety, Laureat nie mógł być obecny, a jedynie połączył się zdalnie celem wyrażenia podziękowań, a jego wykład laureacki został przełożony na kolejny Zjazd.

Rys. 1. Przyznanie Medalu Smoluchowskiego prof. W. Nazarewiczowi

Gość honorowy Anne L'Huillier – piąta kobieta z Noblem z fizyki

Anne Geneviève L'Huillier Wahlström (ur. 1958 r. w Paryżu) jest profesorem fizyki na Uniwersytecie w Lund (Szwecja). Nagrodę Nobla z fizyki otrzymała w 2023 roku wraz z Pierrem Agostinim (ur. 1941 r., prof. fizyki na Uniwersytecie Stanu Ohio) i Ferencem Krauszem (ur. 1962 r., dyrektor Max Planck Institute of Quantum Optics w Garching koło Monachium). Uczona otrzymała 1/3 nagrody Nobla za „metody doświadczalne tworzenia attosekundowych impulsów światła do badania dynamiki elektronów w materii". Jest piątą kobietą nagrodzoną tym wyróżnieniem w dziedzinie fizyki. W 2022 roku otrzymała Nagrodę Wolfa w dziedzinie fizyki. Nagroda Wolfa jest przyznawana przez Fundację Wolfa w Izraelu za wybitne osiągnięcia na rzecz ludzkości i przyjaźni między narodami. Laureat otrzymuje dyplom i 100 000 dolarów. USA. Nagroda Wolfa jest zaliczana do trzech najbardziej prestiżowych nagród w każdej z dziedzin (chemia, fizyka, matematyka, medycyna, rolnictwo i sztuka), w których jest przyznawana. W 2011 roku Uczona otrzymała Nagrodę L'Oreal-UNESCO dla kobiet w nauce, a w 2021 roku Amerykańskie Towarzystwo Optyczne uhonorowało ją nagrodą im. Maxa Borna. W 1987 roku Anne L'Huillier odkryła, że przepuszczenie światła laserowego w podczerwieni przez gaz szlachetny prowadzi do powstawania wielu różnych harmonicznych odcieni światła. W trakcie badań tego zjawiska wygenerowała impulsy attosekundowe światła. W 2003 roku wygenerowała najkrótszy impuls laserowy o długości 170 attosekund. Impulsy attosekundowe pozwalają uchwycić ruchy elektronów wewnątrz atomów, cząsteczek i ciał stałych. Badania dynamiki

eprasa.pl 3ca39600ed

Rys. 2. Wykład noblistki Anne L'Huiller na 49. ZFP w Katowicach

elektronów są istotne w rozwoju nauki, gdyż ruchy elektronów inicjują procesy, które tworzą i podtrzymują życie, a także odpowiadają za wymianę energii między światłem a materią. Można je uznać za jedne z najważniejszych ruchów dla ludzkiego życia, zachodzących w czasie liczonym w setkach attosekund. Wykład Noblistki cieszył się dużym zainteresowaniem słuchaczy (Rys. 2).

Pytania po wykładzie zadali tylko dwaj słuchacze. Jako pierwszy zadał pytanie dr Grzegorz M. Koczan z SGGW o istnienie operatora położenia fotonu w mechanice kwantowej fotonów, czyli o to czy operator położenia fotonu istnieje lub czy powinien istnieć, precyzyjniej chodziło o operator położenia z niekomutującymi składowymi, ale pytanie dopuszczało także składowe przemienne. Drugie i ostatnie pytanie Noblistce zadał prof. Ryszard Horodecki z Uniwersytetu Gdańskiego (dyrektor Krajowego Centrum Informatyki Kwantowej UG), a dotyczyło ono praktycznego zastosowania impulsów attosekundowych do badania układów fizycznych. Na pierwsze pytanie Noblistka odpowiedziała, że nie specjalizuje się w teorii kwantowej fotonów, a raczej w eksperymentach, w których elektrony generują wymuszone impulsy fotonowe. W ocenie Noblistki pola laserowe promieniowania elektromagnetycznego miały charakter klasyczny. Niemniej Noblistka formalnie nie zaprzeczyła istnieniu operatora położenia fotonu, a swoją odpowiedź oceniła jako dyplomatyczną. Natomiast w odpowiedzi na drugie pytanie, Uczona stwierdziła, że jej badania dotyczyły stworzenia narzędzia wytwarzania superkrótkich impulsów laserowych i nie skupiały się na ich zastosowaniach. Zapewniła jednak, że impulsy attosekundowe nie są sztuką dla sztuki i że wykorzystywali je partnerzy eksperymentów. Można dodać, że czytelny przykład takiej współpracy stanowi inicjatywa „ELI" zaprezentowana na sesji poniedziałkowej.

Popularyzacja nauki

W sobotę 6 września prof. Andrzej Dragan wygłosił wykład popularnonaukowy nazwany „Wykładem niespodzianką". Wykładowca zaprezentował szczególne podejścia do wyprowadzenia transformacji Lorentza polegające na wykazaniu, że postulat stałej prędkości światła można wyprowadzić z innych założeń. Ponadto przedstawił rozwiązania nadświetlne dla równań transformacji Lorentza. Wykład prof. Dragana cieszył się dużym zainteresowaniem słuchaczy. W odpowiedzi na pytania po wykładzie, prof. Dragan wyjaśnił, że dodatkowe rozwiązania zmieniają znak interwału czasoprzestrzennego, w ten sposób unika się rozwiązań opartych na liczbach urojonych. Wyjaśnił też, że składanie przestrzennych transformacji Lorentza prowadzi do obrotów, co po raz pierwszy zostało opisane przez fizyka z Polski Ludwika Silbersteina (ur. 1872 r. w Warszawie, zm. w 1948 r. w Rochester, USA), od 1920 r. zatrudnionego w firmie Eastman Kodak w Rochester (stan Nowy Jork). Uczony zajmował się m.in. ogólną i szczególną teorią względności, napisał jeden z pierwszych podręczników teorii względności w języku angielskim (1914 r.). W 1935 roku zakwestionował ogólną teorię względności Einsteina, rozpoczynając dłuższą polemikę. Prof. Andrzej Dragan (ur. 1978 r.) jest fizykiem teoretykiem zajmującym się informacją kwantową (na Wydziale Fizyki UW), ale też znanym artystą: fotografem i kompozytorem, twórcą filmowym, a także popularyzatorem nauki.

Dydaktyka

Spośród wystąpień na sesjach dydaktycznych (naukowych) interesujący dla nauczycieli był wykład dr Pauliny Trybek (Uniwersytet Śląski w Katowicach, Wydz. Nauk Ścisłych i Technicznych) pt. „Sztuczna inteligencja w eksploracji nauk ścisłych" dotyczący wykorzystania modnej obecnie sztucznej inteligencji w nauczaniu szkolnym.

Wśród sesji dydaktycznych została przeprowadzona sesja dydaktyki akademickiej. Na tej sesji najciekawsze okazały się wykłady dotyczące relacji akademickiego nauczania fizyki ze społeczeństwem. Mateusz Gala z AGH w Krakowie (Wydz. Fizyki i Informatyki Stosowanej) wygłosił referat pt. „Rola fokusu i empirii w dydaktyce mieszanej na styku szkoły i uczelni". Referent zwrócił uwagę na to, że nauczanie myślenia krytycznego i twórczego na lekcjach przedmiotów ścisłych jest znacznie utrudnione przez pokusę szybkiego dostępu do niezweryfikowanych informacji. Współczesna dydaktyka fizyki staje przed wyzwaniem utrzymania uwagi uczniów w warunkach rosnącej dekoncentracji spowodowanej m. in. nadmiarem bodźców cyfrowych. Należy zatem stosować takie rozwiązania metodyczne, które z jednej strony wspierają używanie urządzeń mobilnych, a z drugiej angażują twórczo młodzież. Odpowiedni tutoring w szkole sprzyja wzmacnianiu koncentracji, formowaniu postawy badawczej i przygotowuje uczniów do udziału w przyszłych zajęciach akademickich. Błażej Żyliński, doktorant na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej przedstawił referat pt. „Fizyka w przestrzeni publicznej". Referent wyjaśnił, że planowane zmniejszenie liczby godzin dydaktycznych fizyki w szkole jest jednym z efektów słabego poparcia społecznego dla tej dziedziny nauki. Redukcja treści nauczania nie spotkała się z istotną reakcją potencjalnych wyborów. Jakość edukacji nie była tematem ostatnich wyborów prezydenckich. Tymczasem inżynieria i nauki ścisłe powinny być dyscyplinami strategicznymi, lecz niestety nie są dostatecznie istotne dla polityków. Referent przedstawił wyniki analizy społecznego postrzegania fizyki oraz obecności osób posiadających wykształcenie ścisłe i techniczne w przestrzeni publicznej. Oprócz sesji

eprasa.pl 3ca39600ed

Rys. 3. Pokazy dla nauczycieli

dydaktycznych odbyły się także warsztaty i pokazy eksperymentalne dla nauczycieli (Rys. 3).

Na sesjach dydaktycznych ciekawymi wykładami, wartościowymi dla nauczycieli, były wystąpienia Tomasza Sobiepana (*Image Recording Solutions* Sp. z o.o., jedyny reprezentant na Polskę firmy PASCO) pt. „Nowoczesna dydaktyka fizyki oparta o eksperymenty wykonane z użyciem urządzeń cyfrowych" (Rys. 4), prof. Andrzeja Ziemby (AGH, Kraków) pt. „Kopernik o atomach", dr Leszka Gładczuka (IF PAN, Warszawa) o konkursie dla uczniów zwanym Turniejem Młodych Fizyków pt. „Młodzi fizycy na start! Przygotowanie do Turnieju Młodych Fizyków – Poradnik dla przyszłych finalistów", dr Waldemara Bereja (UMCS w Lublinie) o Otwartych Kołach Olimpijskich pt. „Otwarte Koła Olimpijskie w Lublinie. Od idei do realizacji", prof. Piotra Zielińskiego (IFJ PAN im. Henryka Niewodniczańskiego w Krakowie) pt. „Samopodobne metamateriały, kształty i dźwięki od fizykochemii do kogniwistyki", Ludwika Lehmana (II L.O. im. M. Kopernika w Głogowie) pt. „Czym naprawdę jest ciężar", Agnieszki Cudek (SOLARIS Narodowe Centrum Promieniowania Synchrotronowego, Uniwersytet Jagielloński w Krakowie) pt. „Potencjał Centrum SOLARIS w popularyzacji nauki: Akademia Skilla jako innowacyjny model edukacji". W niedzielę 7 września odbył się także Bazar Dobrych Praktyk.

Prof. Andrzej Ziemba opowiedział o atomach w dziele Mikołaja Kopernika *De Revolutionibus*. Kopernik jest znany z badania obiektów w skali kosmicznej, ale w manuskrypcie jego słynnego dzieła znajduje się fragment liczący 56 wyrazów, w którym znajduje się słowo „atomy"

Rys. 4. IMAGE i PASCO, nowoczesna dydaktyka – wykład, pokazy, stoisko

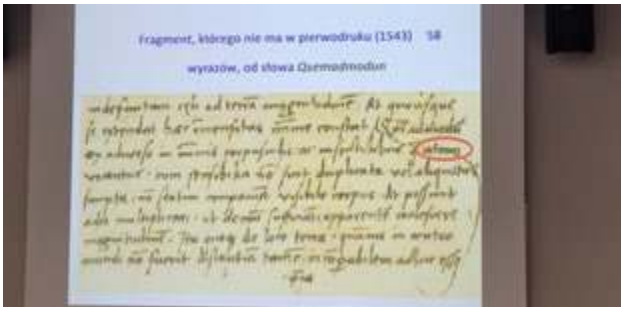
(łac. *atomi*). Kopernik wykorzystał w nim pojęcie atomu do sformułowania jednego z kilku argumentów za niezmiernie wielką odległością do gwiazd stałych (Rys. 5). Fragmentu z atomami nie ma w pierwodruku norymberskim z 1543 r. i w kolejnych wydaniach do końca XIX w. Użycie przez Kopernika słowa „atomy" świadczy o tym, że znał hipotezę o ziarnistości materii. Ponadto Referent przytoczył mało znany okres pobytu w Krakowie (w latach 1554-1574} Jerzego (Georga) Retyka (1514-1574), niemieckiego astronoma, profesora matematyki na Uniwersytecie w Wittenberdze, uważanego za jedynego ucznia Mikołaja Kopernika, który opublikował jego dzieło. W Krakowie pracował nad dziesięciocyfrowymi tablicami trygonometrycznymi oraz prowadził praktykę lekarską.

Oprócz wykreśleń w rękopisach, które nie zostały opublikowane, badając starodruki można natrafić na egzemplarze dzieła Kopernika należące niegdyś do astronomów pokryte ich notatkami na marginesie, co zostało opisane w popularnonaukowej książce Owena Gingericha pt. „Książka, której nikt nie przeczytał". Jest to dowodem na długotrwały proces akceptowania heliocentrycznego Kosmosu jako fizycznie realnego opisu świata. Dr Leszek Gładczuk zrelacjonował inicjatywę Turnieju Młodych Fizyków. Następnie przekazał głos uczniom, aby przedstawili swoje rozwiązania zagadnień lub zadań. Finalistka konkursu żywiołowo w jęz. angielskim zrelacjonowała zadanie z histerezą sprężyn.

Wykład Ludwika Lehmana „Czym naprawdę jest ciężar" został oceniony przez słuchaczy jako za trudny do wykorzystania w dydaktyce szkolnej, nadawał się raczej jako temat intelektualnych dysput naukowych nad aktualnym stanem wiedzy. L. Lehman nawiązując do zerwanej windy z Ogólnej Teorii Względności Einsteina doszedł do wniosku, że siła grawitacji jest siłą pozorną, nieistniejącą realnie, a realna jest siła nacisku. Zwykle jako siły pozorne przedstawiane są siły bezwładności, jednak Referent unikał mówienia o siłach bezwładności. Zdefiniował na początku ciężar jako siłę grawitacji, jednak zamiast mówić o sile bezwładności używał terminu siła nacisku. Agnieszka Cudek przedstawiła Narodowe Centrum Promieniowania Synchrotronowego SOLARIS Uniwersytetu Jagiellońskiego jako unikalną infrastrukturę badawczą w Polsce oferującą szerokie możliwości nie tylko dla naukowców, ale również w przestrzeni edukacji i popularyzacji nauki.

W programie sesji plenarnej znalazła się informacja o nowopowstałej Sekcji Dydaktyki Fizyki PTF, którą przedstawiła dr Aneta Mika z XIV L. O. z Oddziałami Dwujęzycznymi w Szczecinie. Nowa sekcja działa od stycznia 2025 roku i liczy już prawie 100 członków reprezentujących wszystkie poziomy edukacyjne włączając w to również dydaktykę akademicką. Sekcja Dydaktyki Fizyki swoją aktywność wiąże z badaniami naukowymi w obrębie dydaktyki fizyki, a także z popularyzacją fizyki. Utworzona została strona internetowa, a także powołany został rzecznik prasowy, którego zadaniem jest przygotowywanie miesięcznych raportów do newslettera PTF. Badania w zakresie metodyki nauczania fizyki to sprawa niezwykle ważna dla współczesnego społeczeństwa także z tego względu, że rzeczywistość w jakiej żyją

eprasa.pl 3ca39600ed



Rys. 5. Wykład prof. Andrzeja Ziemby

dziś młodzi ludzie jest inna niż ta, w której dorastali ich nauczyciele i wykładowcy. Zreformować należy nie tylko programy nauczania, ale całą metodologię nauczania fizyki, co oznacza pilną potrzebę nowych specjalistów – metodyków fizyki. Zadanie to może być zrealizowane jednak tylko wtedy, gdy dydaktyka fizyki potraktowana zostanie jako dyscyplina naukowa, a ośrodki naukowe w Polsce umożliwią dydaktykom zdobywanie stopni naukowych doktora oraz doktora habilitowanego. Jeśli problem nie zostanie na czas rozwiązany, to w niedalekiej przyszłości zabraknie dobrze metodycznie wykształconych nauczycieli fizyki. Następstwem będzie zamykanie w liceach oddziałów z rozszerzonym programem nauczania fizyki (co już niestety ma miejsce), drastyczny spadek abiturientów wybierających fizykę na egzaminie maturalnym (tylko w roku 2024 liczba osób wybierających fizykę na maturze spadła o prawie 3000!) i w konsekwencji spadek liczby kandydatów na studia techniczne i fizyczne oraz niski poziom tych, którzy te studia wybiorą.

W poniedziałek 8 września został wygłoszony wykład dla młodzieży szkolnej z pokazami eksperymentów pt. „Od silnika parowego do ogniwa wodorowego". Wykład był poświęcony ewolucji technologii napędowych – od silników spalających paliwa kopalne po nowoczesne rozwiązania oparte na wodorze. Adam Czempik i Marcin Łaciak (UŚ w Katowicach) omówili kluczowe wyzwania związane z dekarbonizacją oraz rolą wodoru jako paliwa przyszłości. Dokonano oceny wpływu innowacyjnych technologii napędowych na środowisko.

Po wykładzie dla młodzieży została przeprowadzona sesja dydaktyczna, na której Dobromiła Szczepaniak (Akademickie L.O. we Wrocławiu) w wykładzie pt. „Olimpijskie nauczki" przedstawiła działania szkolnego koła olimpijskiego OSA (od nazwy Olimpijskie Seminarium Akademickie). Wg Referentki koło olimpijskie służy udostępnianiu przestrzeni współpracy młodych zdolnych ludzi, dlatego zajęcia koła mają charakter akademickiego seminarium. Doktoranci z WAT Mateusz Majszyk z kolegą przedstawili inicjatywę „ELI" (skrót od ang. *Extreme Light Infrastructure*) do badań ultrakrótkich impulsów świetlnych. Inicjatywa „ELI" posiada trzy ośrodki badawcze: na Węgrzech, w Czechach i Rumunii. Silne źródła laserowe w ultrafiolecie do badań ultraszybkich zjawisk fizycznych stosowano w ośrodku węgierskim. W pracach badawczych ośrodka węgierskiego uczestniczyła m. in. Anne L'Huillier z Uniwersytetu w Lund, laureatka Nagrody Nobla w 2023 r., która była gościem 49. Zjazdu Fizyków w Katowicach i wygłosiła wykład inauguracyjny.

Sesje plakatowe

Podczas Zjazdu odbyły się aż 3 sesje plakatowe, w sobotę 6 września równolegle plakatowa sesja dydaktyczna i plakatowa sesja *InnoFussion* (dla studentów), a w poniedziałek 8 września naukowa sesja plakatowa (równolegle z Zebraniem Delegatów).

Z plakatów dydaktycznych wyróżniał się poster dr hab. Pawła Perkowskiego (WAT Warszawa), na którym został zaprezentowany cały wiek badań ciekłych kryształów w Polsce, co stanowiło promocję polskich tradycji fizyczno-naukowych, które powinny być bardziej eksponowane na Zjazdach Fizyków Polskich. Ciekawy był także plakat dr Tomasza Kubiaka (UAM w Poznaniu), który dotyczył kształcenia symulacyjnego w biofizyce i fizyce medycznej. Dr Kubiak otrzymał w tym roku nagrodę PTF za popularyzację fizyki.

Na naukowej sesji plakatowej uwagę uczestników skupiał duży plakat dr Grzegorza M. Koczana (SGGW Warszawa) pt. „Reanaliza drzewkowa kanałów prawdopodobieństwa Feynmana w turbince Smoluchowskiego", który wyróżniał się oryginalną formą graficzną, gdyż w tle zawierał twarze znanych fizyków: Smoluchowskiego i Feynmana.

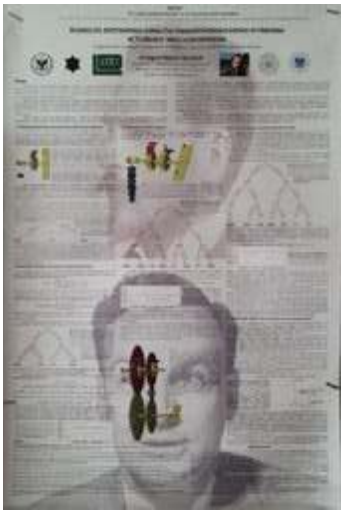
Na plakacie zostały przedstawione rysunki trzech wersji modeli turbinek Smoluchowskiego z użyciem jednego lub dwóch mechanizmów zapadkowych. Autor plakatu podjął się krytycznej matematycznej analizy dowodu z podręcznika Feynmana na temat nieefektywności równowagowej zapadki Smoluchowskiego. Tadeusz Firszt z Planetarium i Obserwatorium Śląskiego przedstawił na plakacie zapomniane „antyosobliwe" rozwiązanie gwiazdowe Eddingtona. Wiele rozwiązań sferyczno-symetrycznych w fizyce charakteryzuje się osobliwością centralną, kłopotliwą w opisie. Natomiast rozwiązanie na plakacie dotyczy sytuacji odmiennej, tj. w środku gwiazdy panuje tak wielkie ciśnienie promieniowania, że wypycha materię na zewnątrz nadając jej zerową gęstość w tym punkcie. Dr Grzegorz M. Koczan zaprezentował jeszcze drugi interesujący plakat pt. „Nielokalne pchnięcia Lorentza szansą struktury grupowej dla operacji składania prędkości" (Rys. 7).

Drugi plakat dr Koczana utrzymany był w konwencji pierwszego, też w tle znalazły się wizerunki fizyków: na dole Einsteina, a na górze Zbigniewa Oziewicza (1941-2020), polskiego fizyka teoretyka, działacza opozycji w okresie PRL. Plakat zawierał oryginalne twierdzenie na temat złożenia nielokalnych pchnięć Lorentza w sposób czysty, tzn. bez obrotów. Istotną pomocą w przedstawieniu trudnego matematycznie tematu stał się gest *finger gun* symbolizujący pchnięcie Lorentza i jego znamienne atrybuty.

Sesja kwantowa – atrakcyjne wydarzenie zjazdowe

Nowością w obradach zjazdowych stanowiła sesja interdyscyplinarna, a także specjalna zdalna sesja plenarna dla wykładowców ze sfer czasowych Ameryki – obie sesje zostały przeprowadzone 9 września. Wydawało się, że sesja nowoczesnych technologii w czwartek 10 września będzie interesująca dla uczestników, jednak przegrała z przebiegającą równolegle sesją fizyki kwantowej, która

eprasa.pl 3ca39600ed



Rys. 6. Plakat dr Grzegorza M. Koczana

Rys. 7. Drugi plakat dr Grzegorza M. Koczana

niespodziewanie okazała się niezwykle ciekawym wydarzeniem zjazdowym, grupującym uczestników i to bez żadnej reklamy, owocnym w interesujące dyskusje na wysokim poziomie merytorycznym. Widać z tego, że najnowsze odkrycia w dziedzinie fizyki kwantowej, w których także mają udział polscy uczeni, wzbudzają wielkie zainteresowanie środowiska naukowego fizyków. Na sesji fizyki kwantowej dr hab. Jan Chwedeńczuk (UW) zaprezentował kwantowe przekazywanie informacji w łańcuchach spinów na duże odległości i to możliwie wiernie. Wykład został zilustrowany widokiem sieci zamków warownych we Włoszech, których załogi komunikowały się ze sobą za pomocą sygnałów świetnych z płomieni ognisk. Dr hab. Marek Rams (UJ) przedstawił symulacje komputerowe obliczeń algorytmicznych w kontekście komputerów kwantowych.

Fizyka a społeczeństwo

Dla nauczycieli oprócz sesji i pokazów interesujące okazały się także stanowiska wystawowe, które popularyzowały ciekawe inicjatywy badawcze. Wystawa na stanowisku inicjatywy międzynarodowej „ELI" uzupełniała prezentację przedstawioną na sesji dydaktycznej. Stanowisko wystawowe prezentujące Centrum SOLARIS nawiązywało do wykładu Agnieszki Cudek na sesji dydaktycznej, ale temat SOLARIS pojawił się także w sesji o zastosowaniach fizyki w gospodarce, gdzie dr Mikołaj Gołuński (UJ) omówił wykorzystanie promieniowania wytwarzanego przez krakowski synchrotron.

W ostatnim dniu Zjazdu w czwartek 11 września odbyła się debata interdyscyplinarna nt. „Rola fizyki i fizyków w kluczowych obszarach życia społecznego", Chodziło o takie obszary, jak medycyna, cyberbezpieczeństwo oraz psychologia. W debacie udział wzięli eksperci z różnych dziedzin: prof. dr hab. n. med. Krzysztof Składowski (lekarz), dr hab. inż. Paweł Marć (inżynier) i prof. dr hab. Tadeusz Marek (psycholog) oraz fizycy pracujący na styku tych nauk: prof. dr hab. Paweł Olko, dr hab. Piotr Kolenderski, prof. dr hab. Stanisław Drożdż (IFJ PAN). Debatę poprowadził dr hab. Jerzy Grębosz (IFJ PAN) – fizyk, informatyk i popularyzator nauki. Węzłowe pytania debaty to: Czy fizyka może uratować życie? Ochronić przed cyberatakami? Pomóc zrozumieć ludzki mózg? W XXI wieku to właśnie w tych obszarach – medycynie, cyberbezpieczeństwie i badaniach nad mózgiem – toczy się walka o zdrowie, bezpieczeństwo i przyszłość społeczeństwa.

Zupełnie ostatnim punktem 49. ZFP w Katowicach, już po jego formalnym zakończeniu, była sesja wyjazdowa 11 września w Planetarium. Planetarium Śląskie jest największym w Polsce pod względem średnicy kopuły (23 m) i liczbie miejsc (300 osób). W pokazie uwzględniono tzw. asteryzmy czyli bardzo jasne i wyraźne geometrycznie układy gwiazd, które nie stanowią formalnie gwiazdozbiorów, ale wchodzą w ich części albo łączą części kilku gwiazdozbiorów. Przykładem asteryzmu jest Wielki Wóz stanowiący trzon gwiazdozbioru Wielkiej Niedźwiedzicy. Po seansie uczestników czekała jeszcze jedna atrakcja, czyli zwiedzanie wystawy stałej pt. „Astronomia" (alternatywą była wystawa „Geofizyka"). Na koniec wystawy na owalnej mapie nieba można było zobaczyć gwiazdozbiory i asteryzmy. Gdy padło sformułowanie „najbardziej polski gwiazdozbiór" na określenie Tarczy Sobieskiego, to w podziękowaniu dr Grzegorz Koczan wręczył przewodnikowi swoją książkę „Obrona ‚Fizyki' Arystotelesa" zawierającej na okładce rycinę Heweliusza Tarczy Sobieskiego.

Uwagi końcowe

Zarząd Sekcji Dydaktyki Fizyki PTF w podsumowaniu obrad stwierdził, że Zjazd spełnił wszystkie oczekiwania członków Sekcji. Sesje dydaktyczne włączone zostały w skład sesji naukowych. Odbyła się ich rekordowa liczba, bo aż 7, w tym sesja poświęcona dydaktyce akademickiej. Dodatkowo odbyły się liczne warsztaty, sesje posterowe, pokazy eksperymentów, wycieczka do planetarium. Te wszystkie zaproponowane przez Komitet Programowy 49. ZFP aktywności bardzo przysłużyły się promocji dydaktyki fizyki. Następny 50. Zjazd Fizyków Polskich odbędzie się w 2027 roku w Krakowie.

Warto wspomnieć, że z Katowicami związana jest noblistka z dziedziny fizyki Maria Göppert-Mayer (ur. 1906 r. w Katowicach, zm. 1972 r. w San Diego w Kalifornii), amerykańska uczona pochodzenia niemieckiego. Nagrodę Nobla otrzymała w 1963 r. za „odkrycia dotyczące struktury powłokowej jądra atomowego". Uczona była drugą kobietą, która otrzymała Nagrodę Nobla z fizyki (po Marii Skłodowskiej-Curie). Göppert-Mayer pochodziła z zasłużonej dla Śląska rodziny uczonych. W 1910 r. przeniosła się z rodzicami do Getyngi. W 1930 r. wraz z mężem wyjechała na stałe do Stanów Zjednoczonych. W czasie II wojny światowej brała udział w pracy nad bombą atomową w ramach Projektu Manhattan. Tablicę pamiątkową na fasadzie domu urodzenia Uczonej przy ul. Młyńskiej 5 ufundowało PTF, a została odsłonięta podczas Zjazdu Fizyków Polskich w 1997 r.

Podziękowania: Autor dziękuje dr Grzegorzowi M. Koczanowi za inspirujące relacje z obrad 49. Zjazdu Fizyków Polskich oraz zgodę na zamieszczenie przesłanych zdjęć. W artykule wykorzystano też zdjęcia z elektronicznej strony Polskiego Towarzystwa Fizycznego.

Edward Rydygier
fizyk jądrowy, doktor n. techn.,
posiada tytuł Fizyka Europejskiego (EurPhys), działa w Sekcji Dydaktyki Fizyki PTF,
interesuje się nowoczesną popularyzacją nauki i rolą mediów w edukacji i popularyzacji fizyki

eprasa.pl 3ca39600ed

Foto – Adobe Stock

O korelacji treści nauczania i nie tylko...

(Z cyklu: Jaka szkoła, jaka edukacja...)

Jeszcze w czerwcu (zanim upadła – przyp. red.) aktualna była propozycja, by w klasach V i VI szkoły podstawowej wprowadzić przedmiot „przyroda", obejmujący treści nauczania, które dotąd realizowane były na lekcjach biologii i geografii. Byłaby to kontynuacja obecnie realizowanego programu przedmiotu *przyroda* w kl. IV.[1] Wydaje się, że jest to dobry pomysł, zważywszy, że zjawiska zachodzące zarówno w przyrodzie ożywionej, jak i nieożywionej są wzajemnie ściśle związane. Mamy bowiem jedną rzeczywistość przyrodniczą.

Waldemar **Reńda**

Zauważmy, że między zjawiskami zachodzącymi w atmosferze, litosferze, hydrosferze, kriosferze i biosferze występują określone **zależności**, które można opisać jedynie, gdy będziemy ową rzeczywistość przyrodniczą ukazywać jako całość. Można to robić poprzez opisywanie owych zależności na lekcjach poszczególnych przedmiotów lub tworząc zintegrowany przedmiot – przyrodę.[2]

Przyroda

Liczba godzin przedmiotu przyroda ma być sumą liczby godzin przeznaczonych dotychczas na realizację przedmiotów przyrodniczych realizowanych dotychczas w danej klasie. Ponieważ w klasach V i VI ramowy plan nauczania przewiduje po jednej godzinie geografii i biologii, mielibyśmy zatem w tych klasach po 2 godziny lekcji przyrody.[3] Dodam, że 2-godzinna realizacja programu jest dydaktycznie korzystniejsza niż w przypadku 1 godziny tygodniowo.

Kto ma uczyć tego przedmiotu? Jest to oczywiście pewien problem, bo nauczyciele poszczególnych przedmiotów przyrodniczych przygotowywani byli do nauczania swojego przedmiotu. Ponadto metodyki tych przedmiotów się nieco różnią. W efekcie biolog twierdzi, że nie zna się na geografii czy fizyce, geograf mówi, że nie zna się na biologii i fizyce, a fizyk, że nie zna się na geografii i biologii.[4]

Zapytam jednak przekornie: skończyliśmy przecież kiedyś szkołę podstawową i średnią, a zatem uczyliśmy się tych przedmiotów. Jeżeli tak, to powinniśmy mieć przynajmniej elementarną wiedzę z tych przedmiotów. A jeżeli to i owo uleciało nam z pamięci, to są do tego odpowiednie wydawnictwa, by ją odświeżyć. Poza tym zasady nauczania są wspólne dla wszystkich przedmiotów nie tylko przyrodniczych. Przytoczę tu chociażby zasadę przystępności czy poglądowości w nauczaniu. Resztę powinniśmy znaleźć w odpowiednim poradniku metodycznym, który powinien być opracowany przez specjalistów i dostarczony nauczycielom. Sądzę więc, że nauczanie przyrody nie powinno sprawić większego problemu zarówno nauczycielowi geografii jak i biologii, bo w przedmiotach tych występuje wiele wspólnych zagadnień. A wzajemne ich przenikanie i omawianie będzie korzystne dla procesu dydaktycznego.[5]

---

[1] Por.: Ramowy plan nauczania dla szkoły podstawowej, załącznik nr 1 rozporządzenia MEN z dnia 28 marca 2017 (poz. 703).

[2] Przedmiot ten już był kiedyś realizowany w kl. VI . Nie jest zatem nowością w dydaktyce szkoły podstawowej.

[3] W klasach VII i VIII jest już podział na poszczególne przedmioty i tak powinno pozostać.

[4] W programie przyrody znajdą się jedynie elementy treści z fizyki.

[5] Dawne SN-y oraz Wyższe Szkoły Pedagogiczne przygotowywały absolwentów do nauczania co najmniej dwóch przedmiotów pokrewnych. I tak np. wiodącym przedmiotem była fizyka, ale pobocznym – chemia.

eprasa.pl 3ca39600ed

Edukacja klimatyczno-środowiskowa

Wszystko wskazuje, że w klasach VII i VIII chemia, fizyka i geografia pozostaną oddzielnymi przedmiotami, ale planuje się uzupełnienie ich podstaw programowych o edukację klimatyczno-środowiskową. I tak np. na lekcjach chemii nowe treści nauczania powinny obejmować np. budowę i właściwości gazów cieplarnianych (CO_2, CH_4, N_2O, freony), na lekcjach fizyki - efekt cieplarniany jako zjawisko fizyczne, a na lekcjach geografii - przyczyny i skutki globalnego ocieplenia, źródła i skutki emisji gazów cieplarnianych, ślad węglowy i ślad wodny. To tylko jeden przykład, ale dobrze ilustrujący interdyscyplinarny charakter zagadnienia efektu cieplarnianego. Tematów takich jest znacznie więcej i i mam nadzieję, że nauczyciele przedmiotów przyrodniczych potrafią je odszukać i omówić na swoich lekcjach.

Czy korelacja międzyprzedmiotowa ma obejmować tylko przedmioty przyrodnicze? Uważam, że należy ją rozszerzyć na wszystkie przedmioty. Dam taki przykład. Oto w podręczniku matematyki do kl. IV szkoły podstawowej znalazłem takie zadanie: „Która z polskich rzek Wisła czy Odra jest dłuższa i o ile kilometrów?" Albo: „Ile lat minęło od koronacji Bolesława Chrobrego?" Czy w ten sposób matematyk uczy geografii lub historii? Nie, ale jest to doskonały przykład, że można łączyć treści nauczania z pożytkiem dla procesu dydaktycznego tych przedmiotów.

A co w szkole średniej?

To była szkoła podstawowa. Czy owe korelacje można stosować w szkole średniej? Uważam, że nie tylko jest to możliwe, ale dydaktycznie konieczne. Natomiast jestem sceptycznie nastawiony do nauczania w pełni zintegrowanego. Byłaby to rewolucja w nauczaniu, którą zapewne odrzuciłoby społeczeństwo oraz większość nauczycieli. Wiem bowiem, że wyniki eksperymentu mogą być pozytywne, ale nie musi się on sprawdzić w powszechnym stosowaniu. Jestem raczej za przemyślanymi i ewolucyjnymi zmianami. Ewolucja sprawdziła się w przyrodzie.[6] Sądzę, że sprawdzi się również w dydaktyce.

Pomysł korelacji międzyprzedmiotowej koresponduje z celami nauczania przedmiotów przyrodniczych. W przypadku fizyki podstawa programowa dla szkół średnich definiuje je w następujący sposób: „…Fizyka jest nauką przyrodniczą ściśle związaną z codzienną aktywnością człowieka. …Głównym celem nauczania fizyki na tym etapie edukacyjnym jest dostarczenie narzędzi ułatwiających **całościowe**[7] postrzeganie różnorodności i złożoności zjawisk otaczającego świata z punktu widzenia nauk przyrodniczych. Zdobycie ogólnej wiedzy, wykształcenie podstawowych umiejętności oraz ukształtowanie postaw charakterystycznych dla fizyki ułatwia rozumienie procesów i zjawisk, które towarzyszą człowiekowi na co dzień. …Rozumowanie to obejmuje rozpoznawanie zagadnień, wyjaśnianie zjawisk fizycznych, interpretowanie oraz wykorzystywanie wyników i dowodów naukowych do budowania fizycznego obrazu rzeczywistości." W programach pozostałych przedmiotów przyrodniczych nie występuje tego typu ogólne sformułowanie celów nauczania, ale pojawiają się one w tematyce szczegółowej.

Aby ową korelację międzyprzedmiotową z powodzeniem realizować, należy przygotować zmodyfikowane programy nauczania, napisać odpowiednie podręczniki i informatory.[8] Powinny to **wspólnie** zrobić zespoły specjalistów różnych przedmiotów, a nie wyłącznie dydaktycy danego przedmiotu. Ponadto, aby realizacja tej idei była udana, potrzeba odpowiedniego zaangażowania nauczycieli. Tu już nie wystarczy wąska specjalizacja i np. nauczyciel matematyki nie może powiedzieć – ja się na tym nie znam, gdy zobaczy w podręczniku zadanie korelujące z fizyką, astronomią, chemią czy geografią.

Podobnie powinno być w przypadku innych przedmiotów. Mam nadzieję, że nauczyciele szybko przekonają się, iż takie międzyprzedmiotowe przenikanie treści nauczania sprzyja procesowi dydaktycznemu.[9] Dam taki o to przykład: Gdy, omawiając rzut ukośny, pokazałem uczniom, że uzyskana funkcja y(x) jest taką samą funkcją kwadratową, jaką poznali na lekcjach matematyki, jeden z uczniów stwierdził z radością: „Wreszcie wiem, do czego służy to, czego się uczyłem na lekcjach matematyki!" Niestety, problemem bywa niekiedy brak **czasowej** koordynacji tematów, ale o tym – potem.

[6] I tu mała dygresja. W USA w latach 1991/2 przeprowadzono eksperyment o nazwie „Biosfera 2". Kosztował 200 mln dolarów, a jego celem było stworzenie sztucznej biosfery. Eksperyment ten skończył się fiaskiem, bo zapewne nie można w dwa lata zrobić tego, co zrobiła przyroda w 2 miliardy. Jest to też zimny prysznic na głowy tych, którym się marzy zasiedlanie innych planet.

[7] Podkreślenie moje.

[8] Ciągle brakuje tego typu wydawnictw. Dodam, że powinny one być na odpowiednim poziomie dydaktycznym.

[9] Aby umiejętnie korzystać z treści siostrzanych przedmiotów, nauczyciele muszą znać ich programy.

Foto – Adobe Stock

eprasa.pl 3ca39600ed

Matematyka w edukacji przyrodniczej

Chciałbym teraz omówić treści nauczania, które występują równocześnie w programach przedmiotów matematyczno-przyrodniczych. W przypadku przedmiotów przyrodniczych relacje zachodzące pomiędzy tymi treściami są równorzędne, bo dotyczą wyłącznie treści lub metod badawczych. Natomiast w przypadku matematyki jest nieco inaczej. Matematyka jest bowiem swoistym językiem, z którego korzysta fizyka, astronomia, geografia czy chemia.[10] Należy jednak posługiwać się tym językiem w sposób precyzyjny. Nie może to być jakiś przedmiotowy żargon. Stosujmy więc poprawne nazewnictwo. Stosujmy również procedury zgodne z tymi, które obowiązują w matematyce. A zatem przekształcajmy wzory tak, jak przekształca się wyrażenia algebraiczne w matematyce. Rozwiązujmy równania tak, jak każe matematyka. Wykonujmy działania tak, jak to robi matematyka. W rewanżu matematyk, ćwicząc np. działania na potęgach, może polecić obliczenie czasu biegu światła ze Słońca na Ziemię, stosując dane: $s = 1{,}5\cdot 10^8$ km oraz $v = 3\cdot 10^5$ km. Może też obliczyć masę Ziemi, przekształcając znany wzór na siłę grawitacji i wstawiając odpowiednie dane. Może także podać przykłady funkcji liniowej czy kwadratowej zaczerpnięte z programu fizyki. Przecież matematyka nie musi operować wyłącznie symbolami: x, y, z, czy: a, b, i c.

Matematyka w korelacji z fizyką

Tu wspomnę o owej korelacji tematycznej. Obecnie pojęcie funkcji wprowadza najpierw fizyk. Dam takie przykłady: W kinematyce kreślimy wykres funkcji s(t), która jest funkcją liniową dla ruchu jednostajnego lub kwadratową dla ruchu jednostajnie przyspieszonego (ewentualnie opóźnionego). Analizując centralne pole grawitacyjne lub elektrostatyczne, kreślimy wykresy funkcji $\gamma(r)$ i $E(r)$, które są funkcjami typu: $y = C/x^2$, a w przypadku energii potencjalnej czy potencjału pola elektrycznego są to wykresy funkcji typu $y = C/x$. Wykresy te sporządzamy w oparciu o obliczenie wartości danej funkcji dla kilku charakterystycznych punktów. Jeżeli pojęcie funkcji wprowadzimy poprawnie, to nic złego się nie stanie. Może nawet okaże się ono dydaktycznie korzystne, bo potem na matematyce uczniowie powiedzą: – O, o tym mówił(a) nam pan(i) na fizyce!

Niestety, nie we wszystkim fizyk może zastąpić matematyka. Oto przykład: Omawiając rzut ukośny w górę, otrzymujemy funkcję kwadratową postaci: $y = -ax^2 + bx + c$, gdzie: $a = g/(2v_o^2\cos^2\varphi)$, $b = \mathrm{tg}\varphi$, $c = y_o$.

Wówczas maksymalną wysokość rzutu można by obliczyć jako współrzędną y wierzchołka paraboli, a zasięg rzutu jako jedno z miejsc zerowych tej funkcji. Niestety, postać kanoniczną tej funkcji uczniowie poznają na matematyce zwykle później, niż byłoby to potrzebne na lekcji fizyki. Aby tę tematykę skorelować czasowo, należałoby rzuty realizować jako rodzaj ruchu ciał w jednorodnym lub centralnym polu grawitacyjnym. Dodam, że w przypadku ruchu ciał w polu centralnym, tory tych ciał to krzywe stożkowe. Ale o ile z okręgiem i parabolą można sobie jakoś poradzić, to z elipsą czy hiperbolą jest już dużo gorzej.

Zatrzymam się przy elipsie. Pojawia się ona w I prawie Keplera. Zwykle mówi się jedynie, że jest to krzywa owalna, mająca dwa charakterystyczne punkty zwane ogniskami i że w jednym z nich jest Słońce. Czy można więcej? Uważam, że nawet trzeba. Wprawdzie nie podamy równania kanonicznego tej krzywej, ale możemy powiedzieć, że elipsę tworzy zbiór punktów takich, że suma odległości tych punktów od owych ognisk jest równa długości dłuższej osi elipsy. (Tę właściwość można wykorzystać do nakreślenia tej krzywej. Mam nadzieję, że wszyscy znamy ten sposób.)

A hiperbola? Jej równanie pojawia się jako równanie soczewkowe (ew. zwierciadłowe):[11] $1/x + 1/y = 1/f$. Warto wówczas narysować wykres funkcji y(x) uzyskanej z tej funkcji.[12] Jeżeli dodamy do tego część opisującą powstawanie obrazu pozornego, to otrzymamy pełną hiperbolę.

W dziale „fizyka jądrowa" pojawia się wykres ilustrujący rozpad promieniotwórczy. Podręczniki podają tu funkcję wykładniczą postaci: $N = N_o\cdot e^{-kt}$. Niestety, tego wzoru nie potrafimy wyprowadzić, gdyż wymaga rozwiązania równania różniczkowego opartego na stwierdzeniu, że liczba rozpadów w próbce jest wprost proporcjonalna do liczby atomów N oraz czasu t, czyli: $\Delta N = k\cdot N\cdot \Delta t$. Natomiast wykres N(t) otrzymamy ze znanej własności tego zjawiska, a mianowicie, że po czasie T – zwanym okresem połowicznego rozpadu – w próbce rozpada się połowa atomów tego izotopu. Ta właściwość pozwala nam napisać funkcję N(t) w postaci: $N = N_o(½)^{t/T}$.

[10] Nie chciałbym, by matematyka zakładała koronę królowej nauk, ale by im chętnie służyła pomocą.

[11] Wyprowadzenie tego równania jest łatwe i znajduje się w podręcznikach fizyki.

[12] Obliczamy wartości tej funkcji dla kilku wybranych wartości x, pamiętając, że jeżeli mianownik ułamka dąży do zera, to jego wartość dąży do nieskończoności, a gdy mianownik dąży do nieskończoności, to wartość ułamka dąży do zera.

eprasa.pl 3ca39600ed

A funkcje trygonometryczne? Ich znajomość przydałaby się nam – fizykom już w kl. I liceum. Niestety, uczniowie na lekcjach matematyki poznają je znacznie później. Opisując więc np. siły działające na ciało znajdujące się na równi pochyłej, z konieczności posługujemy się właściwościami trójkątów podobnych. Z tym, że na ogół uczniowie nie wiedza, że dwa kąty są równe, jeżeli ich odpowiednie ramiona (lewe do lewego lub prawe do prawego) są prostopadłe lub równoległe. Z konieczności nauczyciel fizyki musi to udowodnić, korzystając z faktu, że są to albo kąty naprzemianległe wewnętrzne lub zewnętrzne, odpowiadające lub wierzchołkowe.[13] Jak widać, fizyk musi biegle posługiwać się odpowiednią wiedzą matematyczną, jak i znać metodykę nauczania tego przedmiotu.

Mówiąc o funkcjach trygonometrycznych, należy zauważyć, że na lekcjach fizyki kreślimy wykresy wartości sinφ oraz cosφ zarówno dla $\varphi < 90^0$ jak i dla $\varphi > 90^0$. Dotyczy to np. ruchu harmonicznego, falowego itp.[14] I tu pojawia się tzw. koło trygonometryczne. Pozwala ono wyprowadzić znane funkcje opisujące wychylenie, prędkość i przyspieszenie punktu poruszającego się ruchem harmonicznym w zależności od jego fazy φ. W tym przypadku korzystamy z faktu, że ruch ten definiujemy jako rzut punktu poruszającego się ruchem jednostajnym po okręgu na jedną ze średnic. Wówczas również wektory wielkości opisujących ruch harmoniczny są rzutami wektorów opisujących ruch jednostajny punktu po okręgu. Wystarczy jedynie dostrzec fakt podobieństwa odpowiednich trójkątów.

I jeszcze o pochodnych. Pojawiły się one w programie rozszerzonym matematyki licealnej w kl. IV. Wówczas w fizyce już nie możemy z nich skorzystać, ale przydałyby się w kinematyce, dynamice czy w ruchu harmonicznym. Wówczas fizyk nie może z nich skorzystać, ale może to zrobić matematyk, wykonując w kl. IV kilka zadań z tych działów z zastosowaniem owych pochodnych. Chciałbym, aby w nowych podręcznikach matematyki dla kl. IV liceum pojawiły się tego typu zadania z pożytkiem zarówno dla matematyki (zastosowania!), jak i fizyki. A przyda się to uczniom w czasie studiów.

Związki z chemią

Opisałem tylko niewielką cząstkę tego, co łączy fizykę z matematyką. A teraz o związkach pomiędzy innymi przedmiotami przyrodniczymi. Zerknijmy do chemii. Już w klasie I liceum pojawia się wielkość charakteryzująca odczyn roztworu – tzw. **ph**, który jest ujemnym dziesiętnym logarytmem stężenia jonów wodoru H^+ w roztworze. Niestety, w klasie I liceum uczniowie jeszcze nic nie wiedzą o logarytmach. Natomiast nie ma problemu z większością obliczeń stechiometrycznych, bo opierają się na znanych uczniom proporcjach. Z tym, że na ogół nauczyciel chemii musi przypomnieć uczniom sposoby rozwiązywania owych proporcji, bo uczniowie już tego nie pamiętają.[15]

Chemia korzysta również z tego, czego uczymy na lekcjach fizyki. Ale i tu bywają problemy z korelacją tematyczną, bo np. chemicy omawiają budowę atomów już w klasie I liceum, a fizycy dopiero w klasie IV. A oto inny przykład: chcąc np. na lekcji chemii w kl. I liceum obliczyć objętość powstałego produktu gazowego, należałoby zastosować równanie van der Vaalsa, a to równanie pojawia się w fizyce znacznie później. Dodam, że pozwala ono laboratoryjnie wyznaczać masy cząsteczkowe owych gazów i szkoda, że tego chemicy nie robią, a przecież ważne jest, by uczyć o **metodach badawczych**, jakie stosuje się w poszczególnych dziedzinach nauki.

A teraz geografia…

W tym przedmiocie związki z fizyką (i *vice versa*) są liczne. Omawiając np. zjawiska związane z dynamiką atmosfery, należy wyjaśnić powstawanie pasatów, cyklonów, antycyklonów czy tornad. Tu ważną rolę odgrywa różnica ciśnień barycznych, temperatur oraz siła Coriolisa. W przypadku wiatru fenowego należy wspomnieć o II zasadzie termodynamiki. W dynamice hydrosfery należy wyjaśnić np. zjawisko pływów.[16] Liczne są też związki geografii z astronomią. W tym przypadku pory roku zależą od usytuowania Ziemi względem Słońca. Tu pojawiają się związki biologii z geografią. Wszak szata roślinna zależy od klimatu, a ten od położenia geograficznego i warunków atmosferycznych na danym rejonie, a te z kolei zależą od zjawisk fizycznych.

Biologia i fizyka

Rozpatrując związki biologii z fizyką, warto zauważyć, że nasz układ kostno-mięśniowy to zespół różnego rodzaju dźwigni przenoszący znaczne siły. Niestety, w programie fizyki brakuje obecnie tego tematu.[17] Ucząc biologii, warto wspomnieć o roli, jaką spełniają różnego rodzaju urządzenia techniczne np. w diagnozowaniu i leczeniu chorób. Zauważmy też, że na organizmy żywe, zarówno rośliny i zwierzęta, silnie oddziałują warunki fizyczne środowisk, w których te organizmy żyją, co sprawia, że są do nich doskonale dostosowane.

[13] Zob. też warunki podobieństwa trójkątów.
[14] A także prądu sinusoidalnie zmiennego.
[15] Dodam, że działania na proporcjach są stosowane w wielu obliczeniach w różnych dziedzinach, a także w życiu codziennym.
[16] Zob.: W. Reńda, *Pływy na Ziemi i w Kosmosie*, Fizyka w Szkole, 1/2015.
[17] Słusznie zauważa ten fakt pani A. Biegańska w art. *Praca domowa z fizyki,* Fizyka w szkole 2/2025.

Foto – Adobe Stock

eprasa.pl 3ca39600ed

Nauki pogranicza

Treści wspólnych w przedmiotach przyrodniczych jest znacznie więcej. Nic dziwnego, że powstały nauki z pogranicza tych dziedzin. Mamy więc astrofizykę i biofizykę, geofizykę oraz biochemię. Arystoteles badał nie tylko zjawisko spadania ciał, ale stworzył pierwszą systematykę organizmów żywych.[18] Dopiero znacznie później zaczęły się rozwijać nauki szczegółowe – nie zawsze z korzyścią dla nich samych i dla widzenia świata jako pewnej całości z licznymi i wzajemnymi zależnościami. Postęp tych nauk prowadził do ich dalszych specjalizacji, a ich osiągnięcia coraz bardziej oddalały się od możliwości poznawczych społeczeństw.

Miało to również wpływ na programy nauczania, które były coraz bogatsze w treści, preferując równocześnie teorię, a zaniedbując praktyczną stronę zdobywanej przez uczniów wiedzy.[19] Czas, by to zmienić.[20] **Nauka bowiem musi być funkcjonalna,** w przeciwnym razie jest bezużyteczna.[21] Uczeń musi wiedzieć, dlaczego i po co się tego czegoś uczy.

Podstawowa wiedza przedmiotowa ma pozwolić uczniom poznać i zrozumieć otaczającą rzeczywistość przyrodniczą. Dlatego **należy rozwijać u uczniów kompetencje poznawcze, takie jak twórcza ciekawość oraz umiejętność badania i analizowania obserwowanych zjawisk przyrodniczych.**

Podstawowym zadaniem nauczania powinno być kształtowanie postaw zdroworozsądkowych oraz umiejętności krytycznego analizowania problemów, a przekazywane treści winny być oparte wyłącznie na sprawdzonej wiedzy naukowej,

Jak uczyć przedmiotów przyrodniczych?

Przede wszystkim **poprzez obserwację i badanie zjawisk**.[22] To znaczy: opisujemy zjawiska, interpretujemy je, ale bez nacisku na stronę teoretyczno-matematyczną.[23] Uczeń powinien zrozumieć otaczającą go rzeczywistość przyrodniczą, ale niekonieczne od skomplikowanej strony matematycznej.[24] Ewentualne obliczenia powinny dotyczyć tylko tego, z czym mieć będzie do czynienia w życiu codziennym lub te, które uzupełniają treści nauczania. Uczeń powinien też poznać podstawowe prawa przyrody 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 naukach przyrodniczych ważna jest umiejętność dostrzegania relacji pomiędzy zjawiskami i procesami zachodzącymi zarówno w przyrodzie ożywionej, jak i nieożywionej. Dlatego należy je uczniom ukazywać i analizować. **Nic bowiem w dydaktyce nie zastąpi żywego postrzegania i działania związanego z obserwacją realnych zjawisk.**[25]

W nauczaniu przedmiotów przyrodniczych należy omówić **etyczne aspekty działalności naukowej** oraz odpowiedzialność uczonych za efekty swych prac. **Należy podejmować tematy ochrony zdrowia, przyrody i klimatu**. A także takie tematy, jak pseudonauka, twórczość *science fiction* i inne. Problematykę tę zawierał przedmiot, który pojawił się w liceach, a realizowany był w klasach o profilach humanistycznych. Warto do tej tematyki powrócić. Ktoś może powiedzieć, że zamiast ciąć programy, proponuję poszerzanie tematyki. A ja odpowiem: – Czy słuszne jest to, że podstawa programowa – poziom podstawowy niewiele różni się od podstawy z poziomu rozszerzonego? Przecież to dydaktyczny nonsens. Nie mnóżmy ich i działajmy racjonalnie!

Waldemra Reńda
Olkusz, maj/czerwiec 2025

---

[18] Ponoć w badaniach flory i fauny pomagała mu żona – Pytia, notując jego spostrzeżenia.

[19] Pisała o tym m.in. pani A. Biegańska w art. *Praca domowa z fizyki,* Fizyka w szkole 2/2025.

[20] Pisałem wprawdzie o tym m.in. w art. *Jaka szkoła, jaka edukacja…,* Fizyka w Szkole 1/2023, ale warto przypomnieć pewne zawarte w tym artykule tezy.

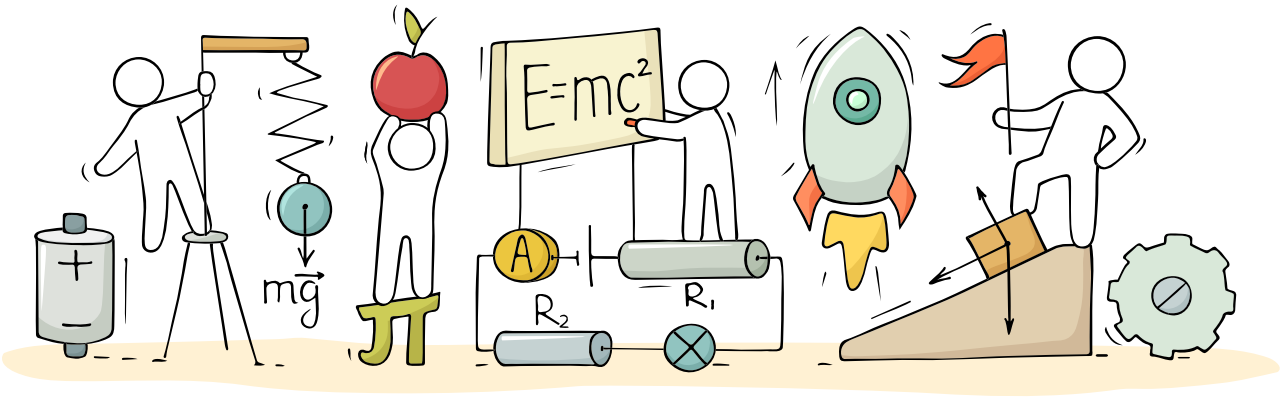
[21] Cóż bowiem z tego, że uczeń na lekcji poznał np. funkcję wykładniczą, jeżeli nie rozumiał, na czym polegał np. wykładniczy wzrost zachorowań na Covid-19.

[22] Wynika to z faktu, iż u uczniów szkoły podstawowej oraz młodszych klas szkoły średniej dominuje myślenie konkretno-obrazowe, a myślenie logiczno-abstrakcyjne rozwija się nieco później.

[23] Jeszcze przed reformą gimnazjalną w kl. VI szkoły podstawowej była fizyka, której program opierał się na poznawaniu zjawisk w otaczającej nas rzeczywistości przyrodniczej. Wówczas był to przedmiot bardzo lubiany przez uczniów. Przestał nim być, gdy w kl. VII pojawiła się nasycona matematyką kinematyka. Wyciągnijmy z tego właściwe wnioski!

[24] Tę realizujmy w programie rozszerzonym danego przedmiotu.

[25] Znam szkoły, w których nie wykonuje się doświadczeń, lub wykonuje się je sporadycznie. Jeżeli np. na lekcji biologii uczymy o lesie, to idźmy do niego. Uczniowie bowiem nie znają podstawowych gatunków leśnych drzew, krzewów czy roślin.



eprasa.pl 3ca39600ed

Kolorowe doświadczenia

Jan **Kurzyk**

Jeśli ustawimy naprzeciwko siebie dwa polaryzatory liniowe i skręcimy ich osie polaryzacji tak, aby tworzyły ze sobą kąt 90°, to otrzymamy układ tzw. *skrzyżowanych polaryzatorów*. Zgodnie z prawem Malusa światło przez taki układ nie przechodzi. Ten niepozorny układ pozwala zaobserwować wiele ciekawych i efektownych zjawisk. Wystarczy pomiędzy oba polaryzatory wkładać przeźroczyste obiekty o pewnych własnościach. Niektóre z tych zjawisk będą tematem tego artykułu[1].

Układ trzech polaryzatorów

Zacznijmy od najprostszej sytuacji. Pomiędzy skrzyżowane polaryzatory wstawmy trzeci polaryzator liniowy. Ciemne pole za drugim z układu skrzyżowanych polaryzatorów rozjaśni się. Łatwo przewidzieć, że tak się stanie, ale zawsze robi to wrażenie. Zdjęcie z takiego doświadczenia pokazano na rysunku 1 (c).

Korzystając z prawa Malusa możemy policzyć jakie będzie natężenie światła, które przejdzie przez układ tych trzech polaryzatorów. Załóżmy, że pierwszy z układu skrzyżowanych polaryzatorów ma oś polaryzacji ustawioną pionowo, a drugi poziomo. Niech oś trzeciego polaryzatora, który wstawiamy między skrzyżowane polaryzatory tworzy z pionem kąt α. Oznaczmy natężenia światła w poszczególnych obszarach naszego układu następująco:

I_0 jest natężeniem światła niespolaryzowanego przed pierwszym polaryzatorem,

I_1 jest natężeniem światła w obszarze między pierwszym polaryzatorem, a polaryzatorem środkowym,

I_2 jest natężeniem światła w obszarze między środkowym polaryzatorem, a polaryzatorem drugim (końcowym)

I_k jest natężeniem światła za ostatnim polaryzatorem.

Światło niespolaryzowane padające na pierwszy polaryzator przejdzie przez niego jako światło spolaryzowane liniowo w pionie, ale jego natężenie będzie dwa razy niższe niż przed polaryzatorem (patrz [1])

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0 .$$

Po przejściu przez środkowy polaryzator światło będzie światłem spolaryzowanym liniowo pod kątem α do pionu, a jego natężenie będzie równe

$$I_2 = I_1 \cos^2(\alpha) = \frac{1}{2} I_0 \cos^2(\alpha).$$

Po przejściu przez ostatni polaryzator światło będzie spolaryzowane liniowo w poziomie, a jego natężenie wyniesie

$$I_k = I_2 \cos^2\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = I_2 \sin^2(\alpha) =$$

$$\frac{1}{2} I_0 \cos^2(\alpha) \sin^2(\alpha) = \frac{1}{8} I_0 \sin^2(2\alpha).$$

Łatwo zauważyć, że gdy oś środkowego polaryzatora będzie równoległa do osi pierwszego (α = 0°) lub do osi drugiego polaryzatora (α = 90°), to światło nie przejdzie przez układ. W pozostałych przypadkach światło przejdzie, przy czym najjaśniejsze będzie wtedy, gdy oś środkowego polaryzatora będzie ustawiona pod kątem α = 45°. Natężenie światła za ostatnim polaryzatorem wyniesie wówczas

$$I_k = \frac{1}{8} I_0 .$$

[1] Dla lepszego zrozumienia przedstawianych zjawisk proponuję wcześniejsze zapoznanie się z artykułami [1] i [2].

(a) (b) (c)

Rysunek 1. (a) Układ dwóch polaryzatorów z osiami równoległymi. Pierwszy polaryzator oświetlony jest światłem niespolaryzowanym. Po przejściu przez polaryzator światło jest spolaryzowane liniowo. Jego natężenie jest dwa razy mniejsze niż przed polaryzatorem. Światło spolaryzowane przechodzi przez drugi polaryzator o osi równoległej do pierwszego niezmienione. (b) Układ dwóch skrzyżowanych polaryzatorów. Światło nie przechodzi przez układ. (c) Pomiędzy polaryzatory o skrzyżowanych osiach wstawiono (częściowo, żeby widoczne były jednocześnie pole ciemne i jasne) trzeci polaryzator o osi tworzącej z osiami tamtych polaryzatorów kąt α = 45°. Światło przechodzi przez układ tych trzech polaryzatorów. Jego natężenie jest 8 razy mniejsze niż przed pierwszym polaryzatorem (patrz tekst główny).

eprasa.pl 3ca39600ed

(a) (b)

Rysunek 2. (a) Słoik z czystą wodą pomiędzy skrzyżowanymi polaryzatorami. Światło nie przechodzi. (b) Słoik z osłodzoną wodą pomiędzy skrzyżowanymi polaryzatorami. Światło przechodzi.

Aktywność optyczna

Teraz do doświadczeń użyjemy trzech obiektów: pustego szklanego słoika, słoika wypełnionego czystą wodą i słoika wypełnionego wodą osłodzoną cukrem jakiego używamy w kuchni. Łatwo można sprawdzić, że żaden z tych obiektów nie polaryzuje światła. Wstawienie pomiędzy skrzyżowane polaryzatory pierwszych dwóch obiektów niczego nie zmienia. Światło nie przechodzi przez układ, pole drugiego polaryzatora pozostaje ciemne (patrz rysunek 2 (a)). Ale jeśli pomiędzy polaryzatory wstawimy słoik z osłodzoną wodą sytuacja zmieni się. Światło przejdzie przez układ (patrz rysunek 2 (b)).

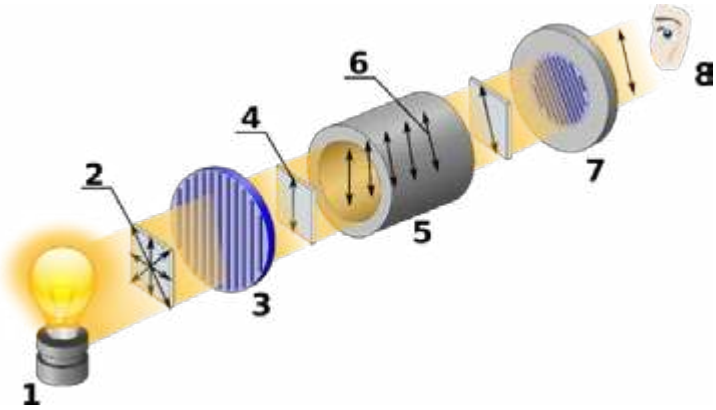
Widać, że za efekt odpowiada roztwór cukru. Skręcając analizator (drugi polaryzator) o pewien kąt możemy wygasić światło za analizatorem (o ile użyliśmy światła monochromatycznego lub zminimalizować jego natężenie w przypadku światła białego). Dokładniejsze badania pokażą, że kąt ten jest zależny od długości warstwy roztworu, przez które musi przejść światło spolaryzowane oraz od stężenia roztworu. Jak już wspominałem żaden z badanych obiektów nie jest polaryzatorem, więc zaobserwowany efekt ma inne źródło niż w układzie trzech polaryzatorów. Okazuje się, że cząsteczki cukru, choć same nie polaryzują światła, mają zdolność skręcania płaszczyzny polaryzacji światła spolaryzowanego. O substancjach wykazujących taką cechę mówimy, że są *aktywne optycznie*[2].

Przyrząd do pomiaru kąta skręcenia nazywamy *polarymetrem* [3]. Schemat takiego polarymetru przedstawia rysunek 3.

Aktywność optyczną wykazują substancje zawierające tzw. cząstki chiralne [4]. Należą do nich m.in. cukry, niektóre białka, czy chiralne ciekłe kryształy. Chiralność polega na tym, że danej cząstki (lub innego obiektu) nie da się nałożyć na jej lustrzane odbicie. Przykładem obiektów posiadających taką cechę są nasze dłonie (patrz rysunek 4 (a)). Stąd wzięła się nazwa cechy, która pochodzi od starogreckiego słowa *χείρ* [kheír] oznaczającego rękę. Chiralne cząsteczki chemiczne występujące w dwóch odmianach chiralnych nazywamy *enancjomerami* [5]. Stosowane są różne konwencje oznaczeń typu chiralności: *D* i *L*, *R* i *S* lub „+" i „–". Oznaczenia *D* i *L* wywodzą się z łacińskich słów: *dexter* i *levo*. Oznaczają one *prawy* i *lewy* głównie w kontekście kierunków ruchu. Oznaczenia *R* i *S* również wywodzą się z łacińskich słów. Są to słowa *rectus* oznaczające *prosty* lub *prawidłowy* i *sinister* oznaczające *znajdujący się po tej stronie co serce człowieka*.

Enancjomery mają prawie wszystkie własności fizyczne i chemiczne takie same, ale różnią się kierunkiem skręcania płaszczyzny polaryzacji. Mogą też różnić się smakiem, zapachem i innymi działaniami biologicznymi. Dla przykładu substancja naturalna o nazwie karwon w wersji *R* ma zapach olejku kminkowego, a w wersji *L* zapach olejku miętowego. Innym przykładem może być penicylamina, która w wersji *L* jest lekiem stosowanym przy leczeniu tzw. pierwotnego przewlekłego zapalenia stawów, a w wersji *R* ma silne własności toksyczne.

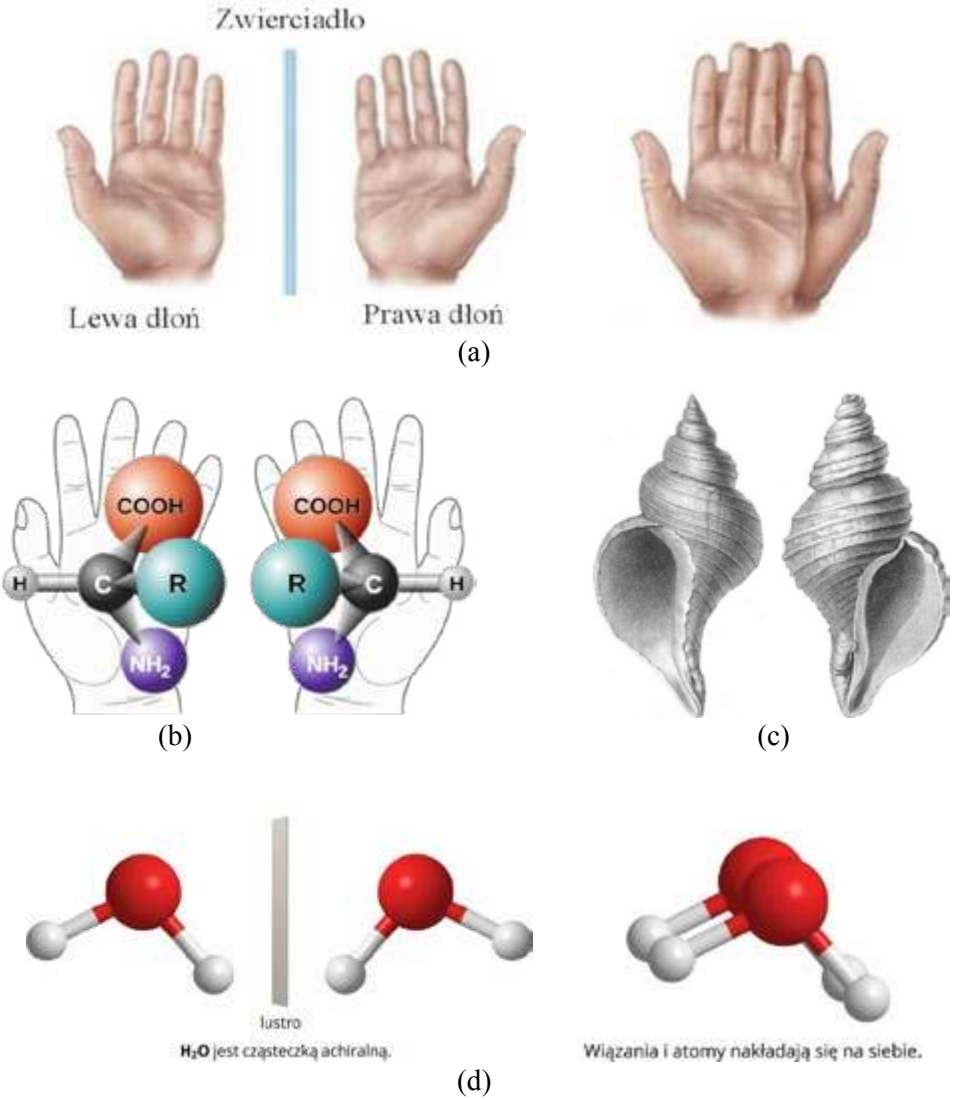
W przypadku roztworów z substancją aktywną optycznie zdolność skręcania płaszczyzny polaryzacji zależy



Rysunek 3. Schemat działania polarymetru do pomiaru zdolności skręcającej badanej substancji. Oznaczenia: 1. Źródło światła 2. Światło niespolaryzowane 3. Polaryzator liniowy 4. Światło spolaryzowane liniowo 5. Rurka zamknięta z obu stron szklanymi płytkami zawierająca badane cząsteczki 6. Skręcalność optyczna spowodowana cząsteczkami 7. Obrotowy analizator liniowy 8. Detektor. Źródło: https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Kaidor.

[2] Aktywność optyczna nazywana jest również skręcalnością optyczną lub czynnością optyczną

eprasa.pl 3ca39600ed



Rysunek 4. Chiralność pokazana na przykładzie (a) dłoni lewej i prawej, (b) Dwóch chiralnych cząsteczek aminokwasów, (c) prawoskrętnej i lewoskrętnej muszli ślimaków. (d) Przykładem cząsteczki niechiralnej jest cząsteczka wody H_2O. Źródła: (a), (c) https://stomatologia.umed.lodz.pl/wp-content/uploads/2011/07/1.-chiralnosc-2.pdf b) https://en.wikipedia.org/wiki/Chirality, d) Źródło: GroMar Sp. z o.o., licencja: CC BY-SA 3.0.

od rodzaju tej substancji, stężenia roztworu, rodzaju rozpuszczalnika, długości warstwy, temperatury i długości fali świetlnej. Znając tzw. *właściwą zdolność skręcającą* danej substancji i długość próbki można za pomocą polarymetru zmierzyć stężenie substancji w roztworze.

Niektóre substancje skręcają płaszczyznę polaryzacji zgodnie z ruchem wskazówek zegara, patrząc w stronę źródła (np. roztwory wodne sacharozy, czyli głównego składnika cukru jakiego używamy na co dzień), a inne przeciwnie do ruchu wskazówek zegara (np. roztwory wodne fruktozy, czyli cukru owocowego).

Ponieważ zdolność skręcająca zależy od temperatury i od długości fali świetlnej, wartość tzw. *skręcalności właściwej* danej substancji podawana jest dla konkretnej długości fali i temperatury substancji. Istnieją substancje, które fale o pewnych długościach skręcają zgodnie, inne przeciwnie do ruchu wskazówek zegara, a jeszcze innych nie skręcają w ogóle. Takie własności mogą mieć substancje zawierające różne rodzaje cząstek chiralnych.

W przypadku roztworów czystych chemicznie, np. roztwór jednego rodzaju cukru w wodzie destylowanej właściwą zdolność skręcającą substancji liczymy ze wzoru [6]

$$[\alpha]_{\lambda}^{T} = \frac{\alpha}{l \cdot c}.$$

W powyższym wzorze T oznacza temperaturę, λ długość fali (często zamiast podawania długości fali stosuje się oznaczenie D odnoszące się do linii D sodu – fali żółtej o długości 589 nm), α jest kątem mierzonym w stopniach o jaki skręcona zostaje płaszczyzna polaryzacji po przejściu przez warstwę roztworu o długości l podawanej w decymetrach i stężeniu c podawanym w g/cm^3. Np. dla roztworu sacharozy

$$[\alpha]_{D}^{20^\circ C} = +66,47^\circ \cdot \mathrm{dm}^{-1} \cdot \mathrm{g}^{-1} \cdot \mathrm{cm}^{3}.$$

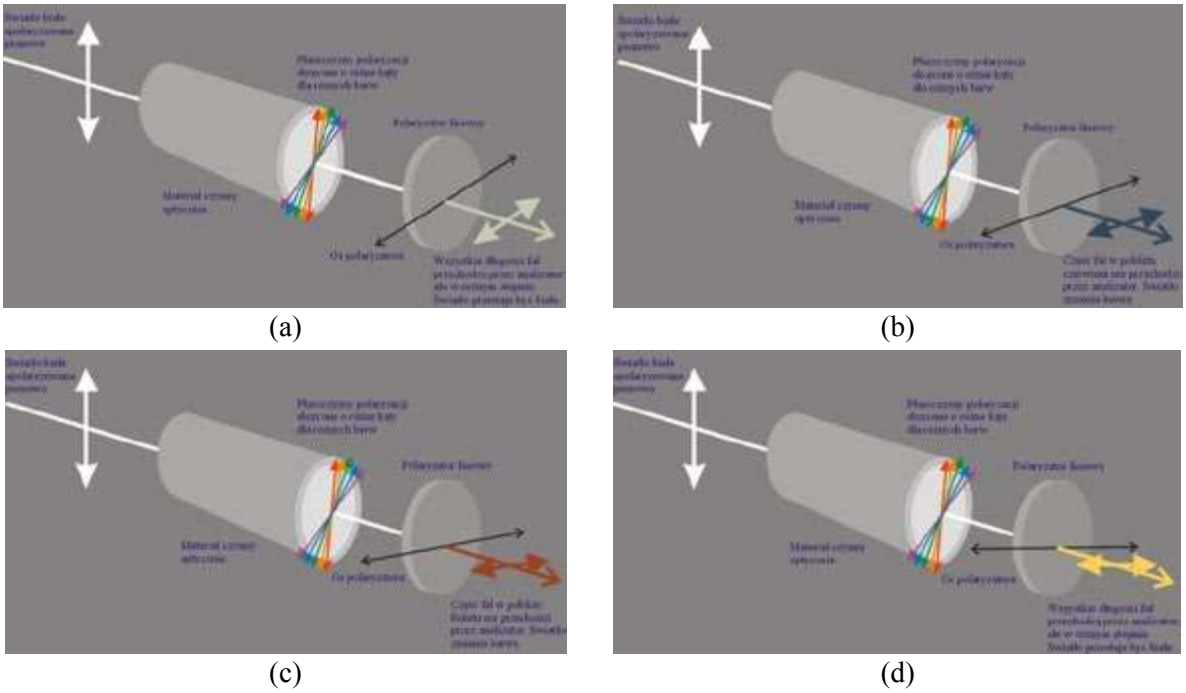
Znak + podkreśla fakt, że sacharoza skręca płaszczyznę polaryzacji zgodnie z ruchem wskazówek zegara (patrząc w kierunku źródła światła).

W pierwszym przybliżeniu zdolność skręcająca jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu długości fali

$$[\alpha]_{\lambda}^{T} = A + \frac{B}{\lambda^2}.$$

A zatem jeśli substancję czynną optycznie oświetlimy spolaryzowanym liniowo światłem białym, to najbardziej zostanie skręcona płaszczyzna polaryzacji fali fioletowej, a najmniej fali czerwonej (patrz rysunek 5). W konsekwencji, zgodnie z prawem Malusa, każda z barw przejdzie przez analizator w innym stopniu i światło za analizatorem przestanie być białe. Kolor tego światła będzie zależał od

eprasa.pl 3ca39600ed



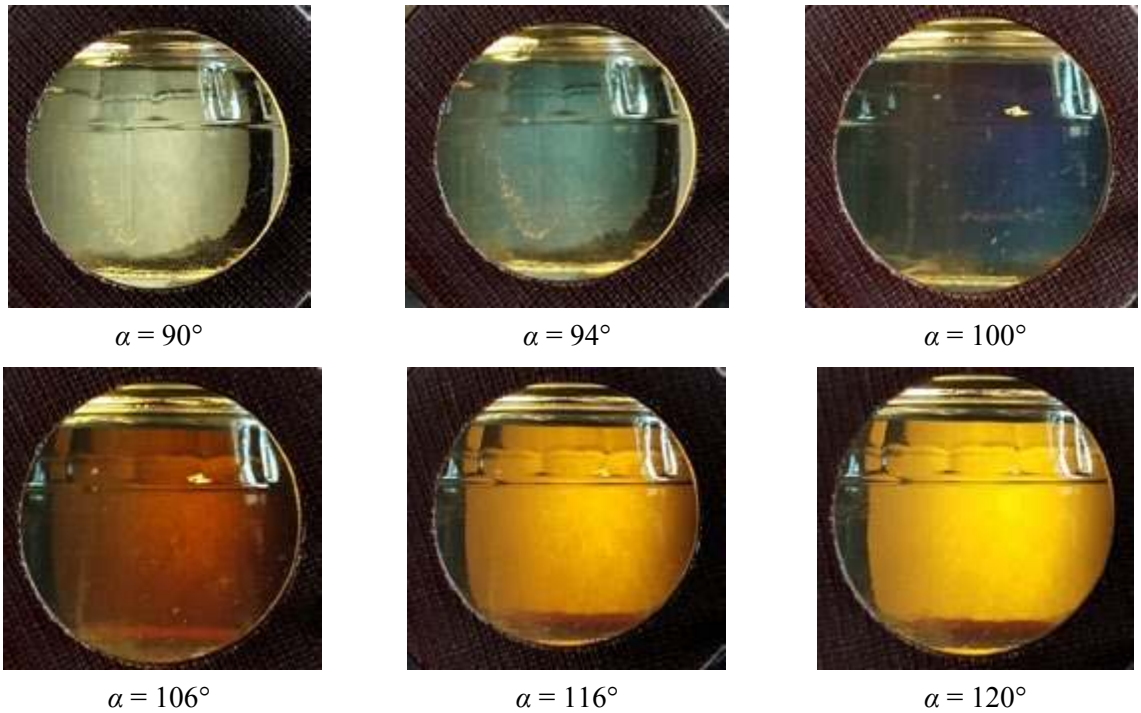
Rysunek 5. Światło białe spolaryzowane w pionie przechodzi przez ośrodek optycznie czynny, a następnie trafia na analizator. (a) Oś analizatora ustawiona w poziomie. (b) Oś analizatora skręcona tak, że płaszczyzny polaryzacji fal czerwonych tworzą z osią analizatora kąt bliski 90°. (c) Oś analizatora skręcona tak, że płaszczyzny polaryzacji fal fioletowych tworzą z osią analizatora kąt bliski 90°. (d) Oś analizatora skręcona tak, że przez analizator ponownie przechodzą wszystkie fale, ale w innych proporcjach niż na rysunku (a). Opis w tekście głównym (patrz też rysunek 6).

kąta skręcenia osi analizatora. Światło będzie najbardziej odbiegało od światła białego przy takich kątach ustawienia osi analizatora, przy których płaszczyzny polaryzacji fal za ośrodkiem czynnym optycznie będą tworzyć z osią analizatora kąt równy lub zbliżony do 90°. Fale o długościach, dla których ten kąt jest najbardziej zbliżony do 90° będą praktycznie blokowane przez analizator. Brak danej grupy barw w ich mieszaninie za analizatorem wpłynie wyraźnie na kolor światła (patrz rysunek 5 (b) i (c)).

Rysunek 6 pokazuje efekty doświadczeń opisanych powyżej i schematycznie przedstawionych na rysunku 5. Substancją optycznie czynną jest tu wodny roztwór cukru jaki stosujemy w kuchni (głównym składnikiem tego cukru jest sacharoza).

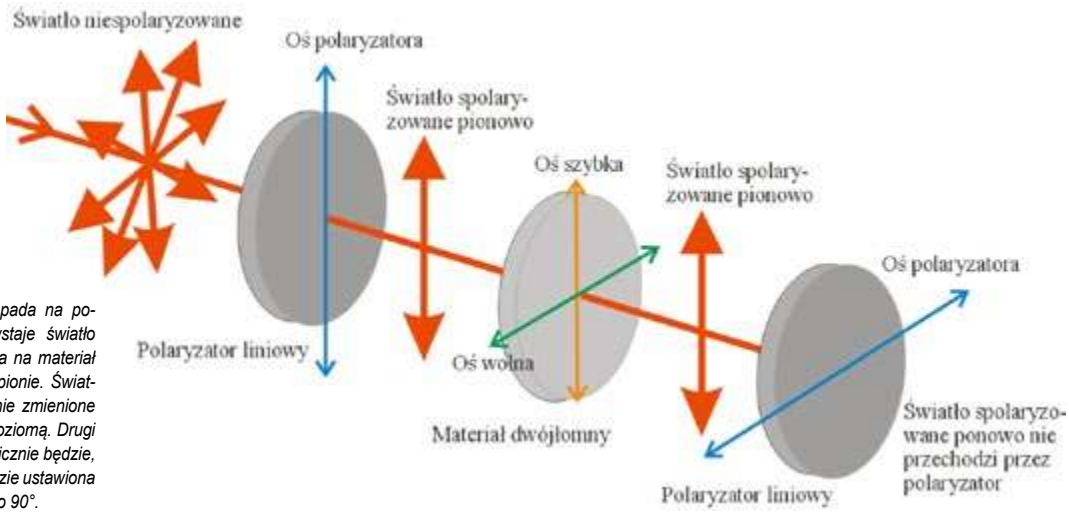
Materiały dwójłomne

W kolejnych doświadczeniach pomiędzy skrzyżowane polaryzatory będziemy wkładać obiekty wykazujące dwójłomność. Zjawisko dwójłomności opisywałem w [2]. Materiały dwójłomne rozdzielają wiązkę światła przechodzącego przez nie na dwie wiązki: tzw. *promień zwyczajny* i *promień nadzwyczajny.* Oba promienie są spolaryzowane



Rysunek 6. Słoik z osłodzoną wodą pomiędzy dwoma polaryzatorami dla różnych kątów skręcenia osi analizatora względem osi pierwszego polaryzatora (patrz też rysunek 5).

eprasa.pl 3ca39600ed



Rysunek 6. Światło niespolaryzowane pada na polaryzator liniowy o osi pionowej. Powstaje światło spolaryzowane pionowo. To światło pada na materiał dwójłomny o osi szybkiej ustawionej w pionie. Światło spolaryzowane w pionie przechodzi nie zmienione i następnie pada na polaryzator z osią poziomą. Drugi polaryzator nie przepuści światła. Analogicznie będzie, gdy oś wolna materiału dwójłomnego będzie ustawiona w pionie. Czyli wygaszenie ma miejsce co 90°.

liniowo w płaszczyznach do siebie prostopadłych. W takich materiałach możemy wyróżnić dwa kierunki nazywane *osią szybką* i *osią wolną*. Promienie: zwyczajny i nadzwyczajny są spolaryzowane wzdłuż tych osi. Promień nadzwyczajny wzdłuż osi szybkiej, a zwyczajny wzdłuż osi wolnej. Promień nadzwyczajny porusza się w tym materiale nieco szybciej niż promień zwyczajny. Stąd wzięły się nazwy osi.

Do materiałów dwójłomnych należą m.in.:

- Kryształy takie jak: kalcyt ($CaCO_3$), kwarc (SiO_2), mika.
- Niektóre ciekłe kryształy (używamy ich w wyświetlaczach ciekłokrystalicznych LCD [1]).
- Materiały organiczne np. sacharoza (cukier) w postaci krystalicznej.
- Polimery: np. poliwęglan (PC), polistyren (PS), polietylen (PE), celofan (folia celulozowa).

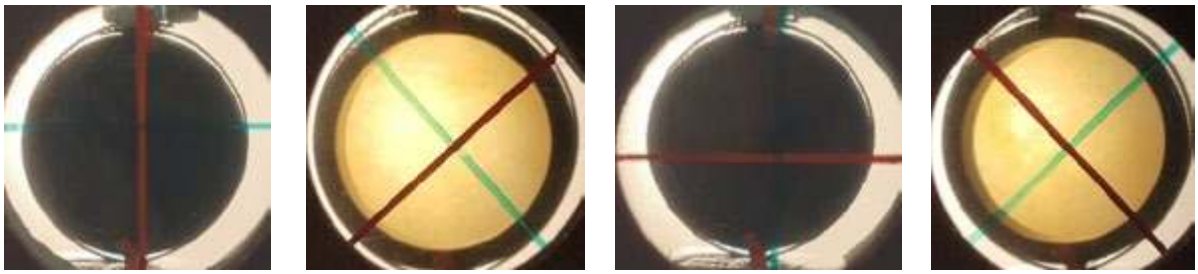
W niektórych przypadkach dwójłomność jest konsekwencją naturalnej budowy materiału (np. wymienione wyżej kryształy). W innych przypadkach dwójłomność może się pojawić w wyniku odpowiednich procesów zachodzących na etapie produkcji (np. folie polimerowe rozciągane w czasie produkcji w danym kierunku). Istnieje też dwójłomność wymuszona wywołana czynnikami zewnętrznymi np. polem elektrycznym czy magnetycznym lub naprężeniami. Dwójłomność wymuszona może zostać utrwalona. Dla przykładu naprężenia powstałe podczas hartowania szkła lub stygnięcia odlewów z materiałów polimerowych pozostają w powstałych tak przedmiotach.

W [2] opisywałem jak materiały dwójłomne zmieniają przesunięcie fazowe między falą spolaryzowaną wzdłuż osi szybkiej, a falą spolaryzowaną wzdłuż osi wolnej. Jeśli na taki materiał pada światło spolaryzowane liniowo wzdłuż którejś z osi (szybkiej lub wolnej) to przechodzi bez zmiany polaryzacji. Promień nie rozdziela się na zwyczajny i nadzwyczajny. Przechodzi tylko jeden z nich – ten odpowiadający danej osi. W takim przypadku światło nie przejdzie przez drugi polaryzator o osi prostopadłej do pierwszego. Jeśli materiał dwójłomny obrócimy o 90° tak, że osie wolna i szybka zamienią się miejscami, sytuacja powtórzy się, czyli wygaszenie dostajemy co 90°, a nie jak w przypadku materiałów optycznie czynnych co 180°. Schemat takiej sytuacji przedstawia rysunek 6, a rysunek 7 przedstawia doświadczenie wykonane z takim materiałem.

Jednak, gdy płaszczyzna polaryzacji tego światła nie jest zgodna z żadną z tych osi, to przez materiał przejdą oba promienie, ale po wyjściu z materiału promienie zwyczajny i nadzwyczajny będą przesunięte w fazie o kąt $\Delta\varphi$ zależny od długości padającej fali λ, grubości warstwy d oraz współczynników załamania promienia nadzwyczajnego n_n i zwyczajnego n_z

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi d\left(n_n - n_z\right)}{\lambda}.$$

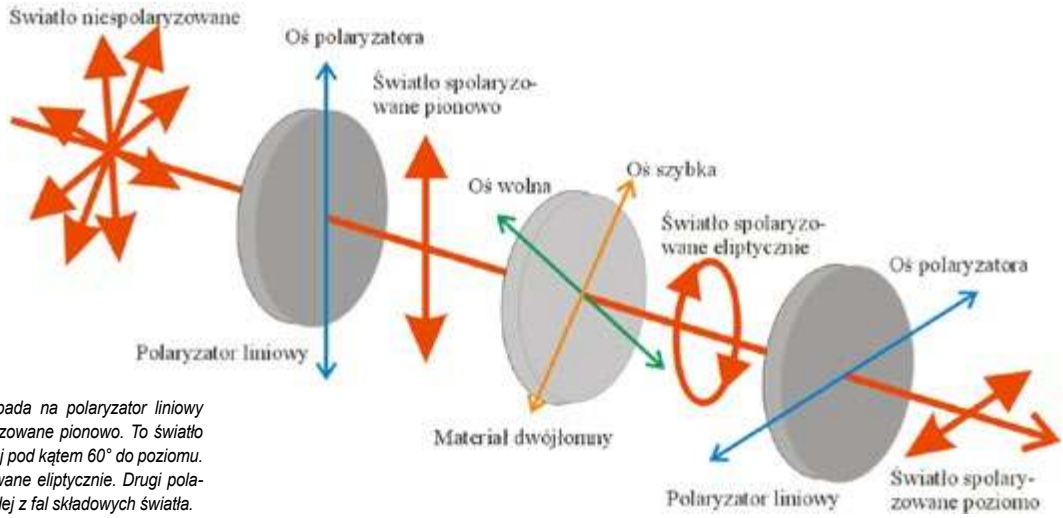
Jeśli przesunięcie fazowe wynosi $\pi/2$ to warstwę dwójłomną nazywamy *ćwierćfalówką*, gdyż obie fale przesunięte są o ¼ długości fali. Przy przesunięciu fazowym o π warstwę dwójłomną nazywamy *półfalówką* (fale są przesunięte o ½ długości fali).



(a) (b) (c) (d)

Rysunek 7. Celofan wstawiony pomiędzy skrzyżowane polaryzatory oświetlone niespolaryzowanym światłem białym. (a) Jedna z osi dwójłomnych (szybka lub wolna) ustawiona w pionie. (b) Folia obrócona o ok. 45° względem pozycji z rysunku (a). (c) Folia obrócona o ok. 90° względem pozycji z rysunku (a). (d) Folia obrócona o ok. 135° względem pozycji z rysunku (a). Wygaszenie następuje co 90°, czyli wtedy, gdy oś szybka lub wolna jest równoległa do osi któregoś ze skrzyżowanych polaryzatorów.

eprasa.pl 3ca39600ed



Rysunek 8. Światło niespolaryzowane pada na polaryzator liniowy o osi pionowej. Powstaje światło spolaryzowane pionowo. To światło pada na materiał dwójłomny o osi szybkiej pod kątem 60° do poziomu. Na wyjściu dostajemy światło spolaryzowane eliptycznie. Drugi polaryzator przepuści składowe poziome każdej z fal składowych światła.

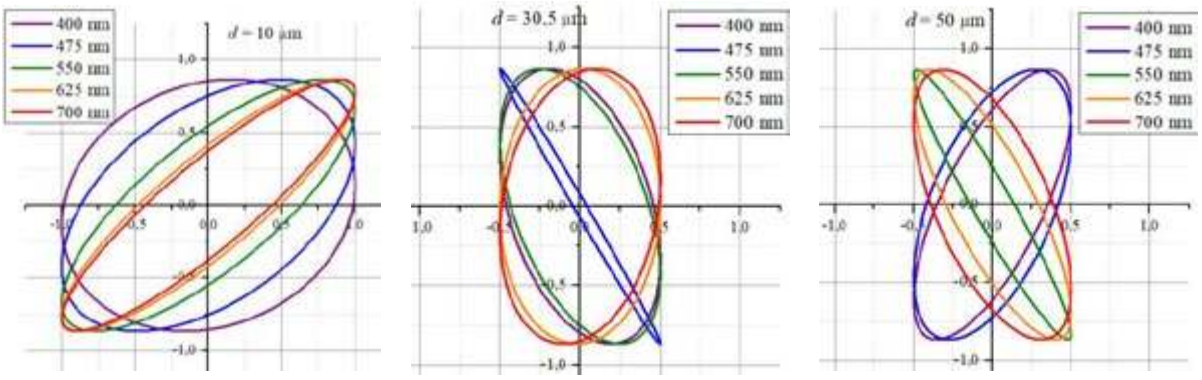
Ćwierćfalówka oświetlona światłem spolaryzowanym liniowo pod kątem 45° względem osi wolnej i szybkiej na wyjściu da nam światło spolaryzowane kołowo prawoskrętnie lub lewoskrętnie, zależnie od ułożenia osi szybkiej i wolnej względem płaszczyzny polaryzacji padającego światła. Półfalówka oświetlona takim samym światłem skręci płaszczyznę polaryzacji o 90°. Przy innych przesunięciach fazowych na wyjściu dostaniemy falę spolaryzowaną eliptycznie.

W fali spolaryzowanej eliptycznie koniec wektora natężenia pola elektrycznego zaczepionego w danym punkcie zakreśla w ciągu okresu fali elipsę. Wobec tego w każdym momencie (z wyjątkiem dwóch pozycji w ciągu jednego okresu), wektor natężenia pola elektrycznego będzie miał niezerowy rzut na oś drugiego polaryzatora, więc światło spolaryzowane eliptycznie przejdzie przez polaryzator liniowy. Teoretycznie światło przechodzące będzie miało okresowo zmieniające się natężenie, ale częstotliwość tych zmian jest bardzo duża. Zmienia się od 400 THz (teraherców, 1 THz = 10^{12} Hz) dla fali czerwonej do 790 THz dla fioletowej. Oko ludzkie nie jest w stanie zauważyć tak szybkich zmian, widzimy uśredniony efekt. Schemat takiej sytuacji przedstawia rysunek 8.

Materiał dwójłomny oświetlony światłem białym spolaryzowanym liniowo w płaszczyźnie niezgodnej ani z osią szybką, ani wolną da nam na wyjściu światło będące mieszaniną fal spolaryzowanych eliptycznie o różnym stopniu tzw. *ekscentryczności* elips, czyli mówiąc obrazowo o różnym stopniu spłaszczenia zależnie od długości fali. Również nachylenia osi elips dla poszczególnych długości fal będą różne (patrz rysunki 9 i 10). W efekcie każda z fal przejdzie przez drugi polaryzator w różnym stopniu, więc światło przestanie być białe. Dostaniemy różne ciekawe efekty barwne. Dla danego materiału kolor będzie zależny m.in. od grubości warstwy.

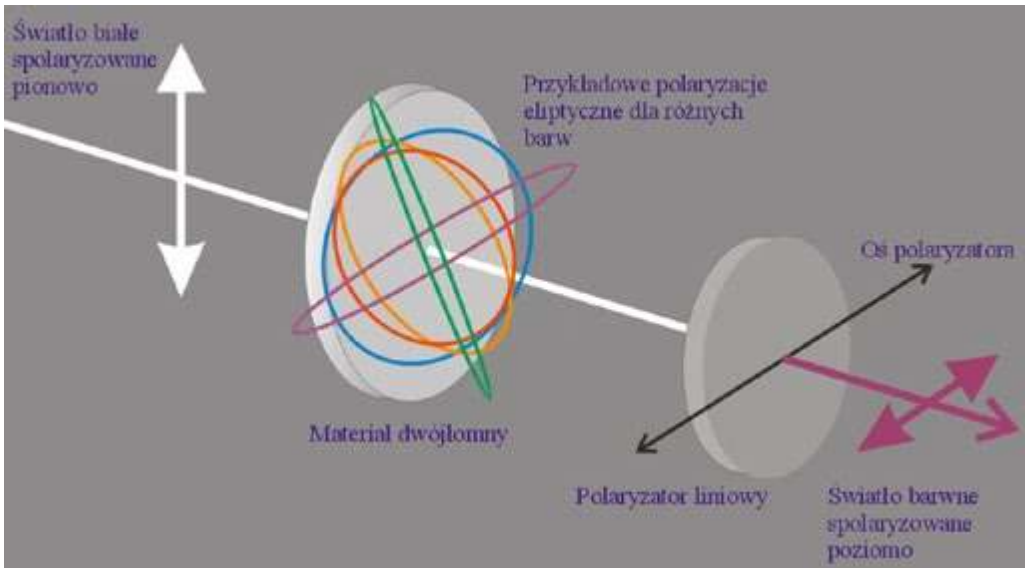
Na rysunku 11 widzimy układ nakładających się na siebie warstw folii celulozowej. Patrząc na rysunki 11 (a) i (b) od lewej strony mamy kolejno: brak foli, jedną warstwę, dwie warstwy, trzy warstwy itd. Na pierwszym rysunku układ folii jest oświetlony białym światłem spolaryzowanym liniowo. Na wyjściu dostajemy światło spolaryzowane eliptycznie, o różnych elipsach dla poszczególnych długości fal, ale brak drugiego polaryzatora sprawia, że światło pozostaje białe, gdyż zarówno oko ludzkie jak i matryca aparatu fotograficznego „nie widzi" polaryzacji. Gdybyśmy oświetlili ten układ światłem białym niespolaryzowanym, to obraz byłby taki sam. Niestety czym większa liczba warstw, tym bardziej światło jest pochłaniane i rozpraszane na mikro-rysach na powierzchniach kolejnych warstw. I dlatego kolejne pasy są coraz ciemniejsze.

Ten sam układ folii wstawiony pomiędzy skrzyżowane polaryzatory staje się kolorowy (patrz rysunek 11 (b)). Barwy poszczególnych pasów zależą od liczby warstw, czyli grubości materiału dwójłomnego, przez który musi przejść światło. Od tego zależy wielkość przesunięć fazowych fal o różnych długościach, co prowadzi do różnych polaryzacji eliptycznych i w konsekwencji wpływa na



Rysunek 9. Przykładowe kształty elips fal spolaryzowanych eliptycznie po przejściu światła spolaryzowanego pionowo przez płytkę materiału dwójłomnego dla wybranych długości światła dla trzech grubości płytki d podanych na rysunkach. Oś szybka ćwierćfalówki jest obrócona w kierunku przeciwnym do wskazówek zegara o kąt 30° względem pionu.

eprasa.pl 3ca39600ed



Rysunek 10. Ponieważ dla różnych długości fal przesunięcia fazowe są inne, to światło białe po przejściu przez materiał dwójłomny będzie mieszaniną fal spolaryzowanych eliptycznie w różny sposób i po przejściu przez polaryzator liniowy będzie światłem barwnym.

natężenie poszczególnych barw po przejściu przez drugi polaryzator.

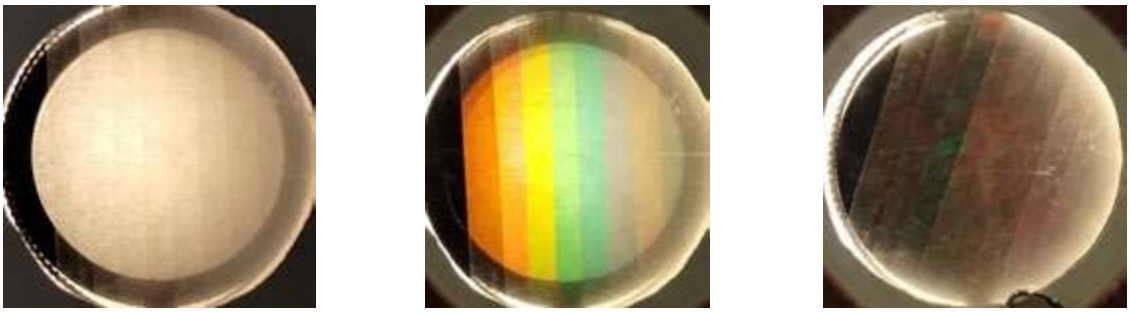
Na rysunku 11 (c) układ folii obrócono tak, że światło jest blokowane przez układ skrzyżowanych polaryzatorów. Z tego doświadczenia możemy wyciągnąć kilka wniosków. Po pierwsze, że osie: szybka i wolna poszczególnych warstw są w miarę równoległe do siebie. I po drugie, że w tej pozycji są one prostopadłe do osi polaryzacji polaryzatorów. Dodatkowo widzimy, że czym większa jest liczba warstw folii tym pas jest jaśniejszy (przeciwnie niż na rysunku 11 (a)). Oznacza to, że podczas rozpraszania światła spolaryzowanego dochodzi do częściowej depolaryzacji tym większej, im większy jest stopień rozproszenia. Jest to widoczne również na rysunku 11 (b), gdzie kolory pasów składających się z większej liczby warstw folii są mniej „czyste".

Inne barwne efekty przy użyciu różnych obiektów wykazujących dwójłomność pokazano na rysunku 12.

Dodatkowy wpływ na kolor światła widziany po przejściu światła przez analizator ma własność nazywana *dichroizmem kołowym.* Polega ona na tym, że fale spolaryzowane eliptycznie o danej skrętności są pochłaniane w innym stopniu niż te o skrętności przeciwnej. Może też występować tzw. *dwójłomność kołowa* polegająca na tym, że światło spolaryzowane prawoskrętnie ma nieco inną prędkość w tym materiale niż światło spolaryzowane lewoskrętnie.

W przypadkach warstw bardzo grubych w porównaniu z długościami fal powstające różnice faz pomiędzy falami szybkimi i wolnymi będą bardzo duże i może zdarzyć się tak, że podczas przejścia światła przez materiał będzie wielokrotnie dochodzić do interferencji fal o różnych długościach. Doprowadzi to do uśrednienia i wytłumienia efektów barwnych. Taki efekt widzimy np. na rysunku 12 w trzecim wierszu. Badanym obiektem jest tam pokrywka garnka wykonana ze szkła hartowanego z otworkiem na parę. Dwójłomność jest tu wywołana naprężeniami powstałymi podczas hartowania szkła. Z podobnym efektem mamy do czynienia na rysunku 12 w czwartym wierszu oraz na rysunku 14 (b) i (d). Z tym, że w tych przypadkach materiał nie jest bezbarwny, więc obserwujemy wzory o różnych jasnościach koloru badanego materiału.

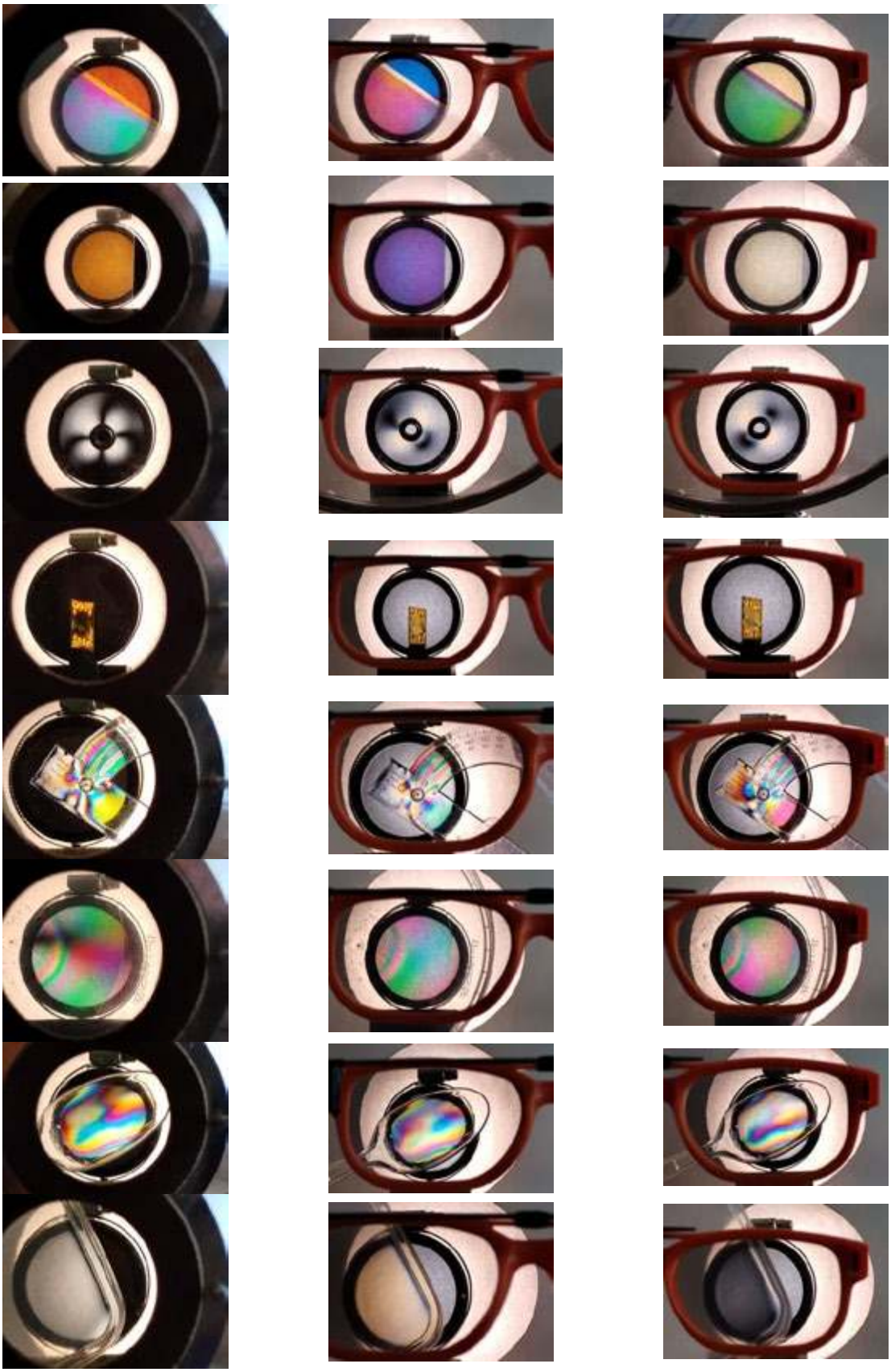
Spotykamy się również z przypadkami, gdy dla cienkich warstw dwójłomnych, dla których można by się spodziewać efektów barwnych dostajemy tylko efekt zmiany natężenia światła zależnie od kąta skręcenia badanej substancji, ale z powtarzaniem się wygaszania światła co 90°, a nie 180°, jak w przypadku materiałów optycznie czynnych. Może to być związane z tym, że przesunięcia fazowe między promieniem nadzwyczajnym i zwyczajnym dla różnych długości światła są do siebie zbliżone. W takim przypadku na wyjściu z materiału dwójłomnego fale o różnych



(a) (b) (c)

Rysunek 11. Układ nałożonych na siebie folii celulozowych. Czym więcej warstw folii musi pokonać światło tym większe jest jego rozproszenie i pochłanianie. (a) Układ folii oświetlony białym światłem spolaryzowanym (brak drugiego polaryzatora). W przypadku światła niespolaryzowanego obraz byłby taki sam. (b) Układ folii pomiędzy skrzyżowanymi polaryzatorami. Barwne efekty są związane z różnymi grubościami celofanu. Patrząc od lewej strony mamy kolejno: brak folii (pas czarny), pojedyncza warstwa, podwójna warstwa, potrójna itd. (b) Ten sam układ warstw folii, ale obrócony w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara o około 20° względem pozycji z rysunku (b). W pozycji (c) światło jest blokowane przez układ skrzyżowanych polaryzatorów, co oznacza, że osie: szybka i wolna są prostopadłe do osi polaryzacji polaryzatorów.

eprasa.pl 3ca39600ed



(a) (b) (c)

Rysunek 12. Obrazy różnych próbek o własnościach dwójłomnych umieszczonych między (a) dwoma polaryzatorami liniowymi o osiach skrzyżowanych, (b) polaryzatorem liniowym i lewym szkłem okularów do kina 3D, (c) polaryzatorem liniowym i prawym szkłem okularów do kina 3D. Każda z przedstawionych próbek (poza kostką w czwartym wierszu) w świetle zwykłym jest bezbarwna.

eprasa.pl 3ca39600ed

długościach będą spolaryzowane eliptycznie z elipsami tak do siebie zbliżonymi, że analizator przepuści każdą z nich w podobnym stopniu pozostawiając światło białym (patrz rysunek 12 ostatni wiersz, kolumna (a)).

Skoro materiały dwójłomne oświetlone światłem spolaryzowanym liniowo na wyjściu dają światło spolaryzowane eliptycznie, to drugi polaryzator liniowy w naszych eksperymentach możemy zastąpić analizatorem światła spolaryzowanego kołowo. Wówczas powinniśmy zobaczyć inny obraz niż w wersji omawianej powyżej. Ponadto użycie analizatora lewoskrętnego da nam inny obraz niż w przypadku analizatora prawoskrętnego. Przykłady widzimy na rysunku 12. W kolumnie (b) użyto lewego szkła, a w kolumnie (c) prawego szkła okularów kina 3D.

Wróćmy jeszcze do doświadczenia przedstawionego na rysunku 7. Mamy tam celofan wstawiony pomiędzy skrzyżowane polaryzatory. Jeśli oś szybka (lub wolna) jest równoległa do osi jednego z polaryzatorów, to światło nie przechodzi przez układ co widać na rysunkach 7 (a) i (c). Przez folię przechodzi wówczas tylko jeden z promieni – zwyczajny lub nadzwyczajny. Przy innych ustawieniach, np. takich jak na rysunkach 7 (b) i (d) światło przechodzi przez folię jako światło spolaryzowane eliptycznie prawoskrętnie lub lewoskrętnie. Aby to sprawdzić zastąpmy drugi z polaryzatorów analizatorem światła spolaryzowanego eliptycznie prawoskrętnie lub lewoskrętnie. W roli analizatorów możemy użyć szkieł okularów kina 3D.

Wyniki tych doświadczeń przedstawia rysunek 13. Jak widzimy przy takim ustawieniu folii jak na rysunku 7 (b) światło przechodzi bez zmiany koloru przez lewe szkło okularów 3D (patrz rysunek 13 (a)), a zmienia kolor po przejściu przez prawe szkło okularów 3D (patrz rysunek 13 (b)). Sugeruje to, że światło jest spolaryzowane eliptycznie lewoskrętnie [2]. Zaś przy takim ustawieniu jak na rysunku 7 (d) światło przechodzi bez zmiany barwy przez prawe szkło okularów 3D, a zmienia barwę po przejściu przez lewe szkło. Sugeruje to, że światło jest spolaryzowane eliptycznie prawoskrętnie.

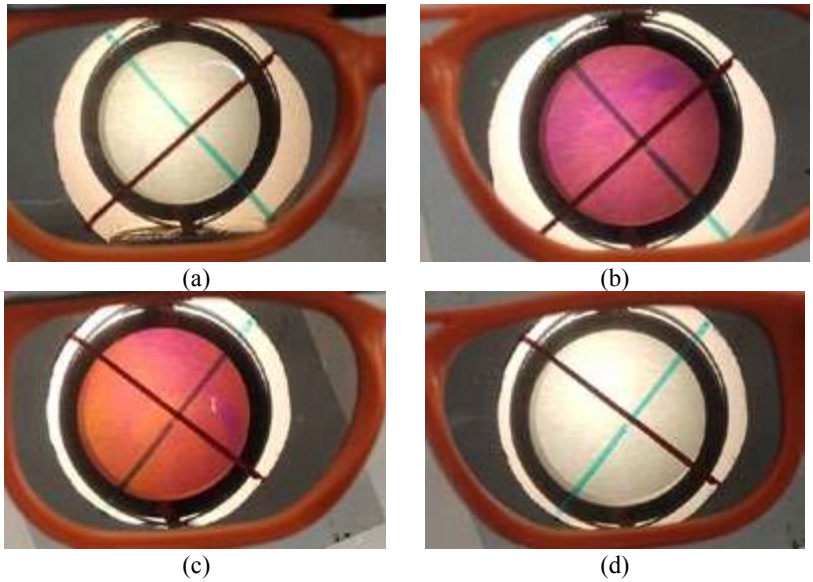
Zauważmy, że na rysunkach 13 (b) i (d) mamy jedynie zmianę koloru światła, a nie wygaszenie. Podobną sytuację opisywałem w [2]. Przypomnę, że w tamtym przypadku wystarczyło obrócić pierwsze (lub drugie szkło) o 90° wokół osi optycznej szkła, aby dostać wygaszanie światła spolaryzowanego lewoskrętnie przechodzącego przez prawe szkło i odwrotnie. W układzie z rysunku 13 pełnego wygaszenia nie dostalibyśmy, gdyż przesunięcia fazowe powstałe w foli są nieco inne niż w materiale dwójłomnym okularów 3D. Choć najprawdopodobniej te przesunięcia fazowe nie różnią się znacząco, skoro w sytuacjach z rysunku 13 (a) i (d) dostajemy światło białe.

Z doświadczeń z rysunku 13 możemy wyciągnąć jeszcze jeden wniosek. Możemy stwierdzić, że oś zaznaczona na foli czerwoną kreską jest osią szybką, a oś zielona jest osią wolną (wyjaśnienie w [2])

Zobaczmy jeszcze jak zmieniają się kolory poszczególnych pasów składających się z różnej liczby warstw folii celulozowej z rysunku 11, jeśli wstawiamy ten układ w trzech różnych pozycjach pomiędzy: skrzyżowane polaryzatory (rysunek 14 (a)), polaryzator liniowy i lewe szkło okularów 3D (rysunek 14 (b)) oraz polaryzator liniowy i prawe szkło okularów 3D (rysunek 14 (c)). W ostatnim wierszu pokazano układ warstw folii celulozowej o nieco innej grubości niż w wierszach wcześniejszych.

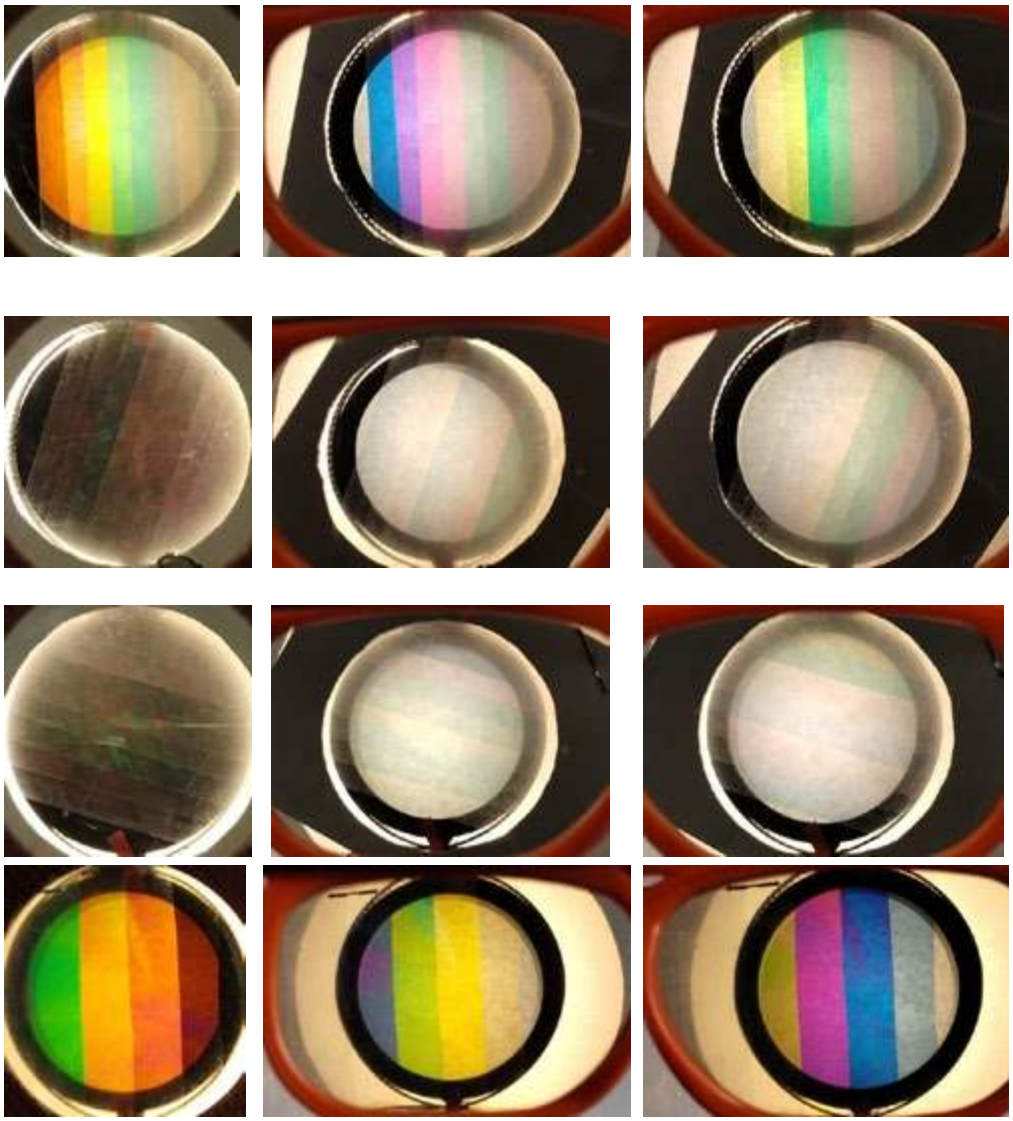
Elastoplastyka

W warstwach dwójłomnych czy to naturalnych, czy wytworzonych sztucznie (jak np. folie polimerowe) efekty, o których była mowa powyżej są w miarę jednorodne na całej powierzchni warstwy. Ale w przypadku dwójłomności wymuszonej przez naprężenia obraz powstały podczas obserwacji obiektu umieszczonego pomiędzy dwoma polaryzatorami o osiach skrzyżowanych ma charakterystyczne kształty, na podstawie których możemy dowiedzieć się jaki jest przebieg naprężeń w badanym materiale (patrz rysunek 14).



Rysunek 13. Celofan wstawiony pomiędzy układ złożony z polaryzatora liniowego o osi pionowej i szkła okularów 3D oświetlony niespolaryzowanym światłem białym. Na rysunkach (a) i (c) użyto lewego szkła okularów 3D, a na rysunkach (b) i (d) użyto szkła prawego. Szczegóły w tekście głównym.

eprasa.pl 3ca39600ed



(a) (b) (c)

Rysunek 14. Trzy pozycje kilkuwarstwowego układu folii celulozowej opisanej na rysunku 11 umieszczonego: (a) pomiędzy skrzyżowanymi polaryzatorami, (b) pomiędzy polaryzatorem liniowym a lewym szkłem okularów 3D, (c) pomiędzy polaryzatorem liniowym a prawym szkłem okularów 3D. W ostatnim wierszu pokazano układ warstw folii celulozowej o nieco innej grubości niż w wierszach wcześniejszych.

(a) (b) (c) (d)

Rysunek 14. Przebieg izochrom w różnych próbkach. Czym ciemniejszy prążek, tym większe naprężenie. Na zdjęciu (c) pokazano próbkę przed przyłożeniem siły, a na zdjęciu (d) po przyłożeniu siły. Źródła: (a) https://pl.wikipedia.org/wiki/Elastooptyka, (c), (d) [7]

Dziedzina nauki i techniki zajmująca się tego typu badaniami nazywana jest *elastooptyką* [7]. Do badań używa się przyrządów nazywanych *polaryskopami.* W powstałych obrazach wyróżnia się dwa rodzaje linii: *izokliny* i *izochromy*. Izokliny są miejscami geometrycznymi w badanej próbce, w których naprężenia główne mają jednakowe kierunki. Z kolei izochromy są prążkami interferencyjnymi przebiegającymi przez punkty, w których wartość naprężeń jest taka sama. Czym ciemniejszy jest prążek izochromy, tym większa jest wartość naprężenia.

dr Jan Kurzyk
Katedra Fizyki Politechniki Krakowskiej

LITERATURA

[1] Jan Kurzyk. *Polaryzacja liniowa światła.* Fizyka w Szkole 2, 2025.
[2] Jan Kurzyk. *Polaryzacja kołowa i eliptyczna światła.* Fizyka w Szkole 3, 2025.
[3] https://en.wikipedia.org/wiki/Polarimeter. [Dostęp 25.01.2025]
[4] https://en.wikipedia.org/wiki/Chirality_(chemistry). [Dostęp 25.01.2025]
[5] https://pl.wikipedia.org/wiki/Enancjomery. [Dostęp 25.01.2025]
[6] https://pl.wikipedia.org/wiki/Skr%C4%99calno%C5%9B%C4%87_w%C5%82a%C5%9Bciwa. [Dostęp 28.01.2025]
[7] Bartosz Kruczek, *Problemy Nauk Stosowanych*, 2016, Tom 4, s. 085 – 094.

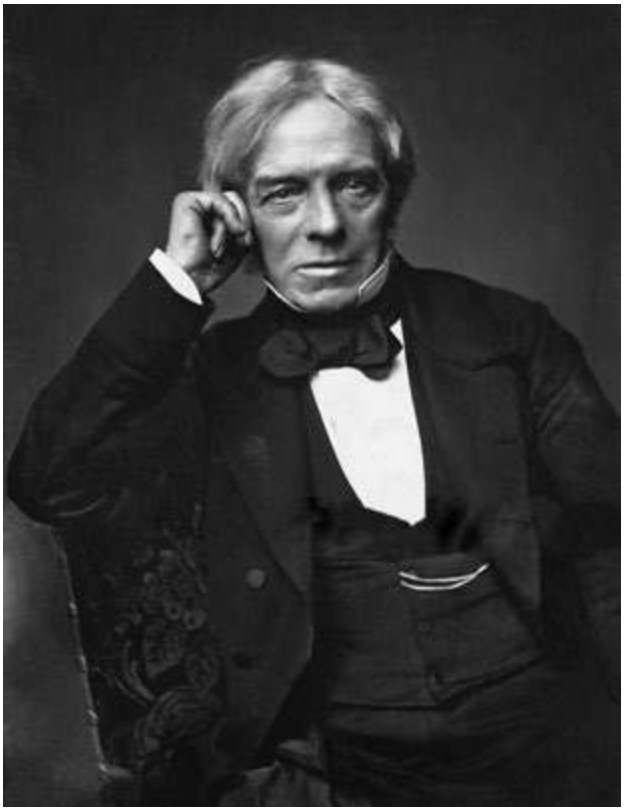
eprasa.pl 3ca39600ed

Żywoty fizyków

Michael Faraday

(1791-1867)

Tadeusz **Wibig**



Był jednym z najważniejszych fizyków budujących gmach współczesnej fizyki. Ernest Rutherford złożył hołd jego geniuszowi, oświadczając: „*Kiedy weźmiemy pod uwagę wielkość i zakres jego odkryć oraz ich wpływ na postęp nauki i przemysłu, nie ma nazbyt wielkiego zaszczytu, by oddać cześć pamięci Faradaya, jednego z największych odkrywców naukowych wszechczasów*”.

Pisaliśmy o nim dawno temu w „Fizyce w Szkole” (numer 5/2014) i tamże skupiliśmy się na wyliczeniu jego osiągnięć, jakie trafiły do podręczników fizyki nierzadko opatrzone jego nazwiskiem, jak efekt Faradaya, prawo Faradaya, czy stała Faradaya. Niewiele miejsca poświęciliśmy mu jako człowiekowi i teraz postaramy się krótko nadrobić ten brak.

Urodził się w wiosce Newington Butts, wówczas w Surrey, która dziś jest częścią londyńskiego centrum. Wtedy była uboga, tak jak i rodzina Faradaya, która właśnie w 1791 roku wyemigrowała tam z północnej Anglii za pracą. Jego ojciec był kowalem, ale chorowitym i z tego właśnie powodu stałej pracy znaleźć nie mógł i Michael z trojgiem rodzeństwa często wręcz głodował. Matka, prosta, acz zacna kobiecina opiekowała się nim, jak mogła, a mogła niewiele.

Całe formalne wykształcenie, jakie zdobył otrzymał w kościelnej szkółce niedzielnej. Nauczył się tam czytać, pisać i liczyć. System edukacji powszechnej wychodził z założenia, że powinno mu to wystarczyć, no bo niby czego więcej mógłby oczekiwać przeciętny biedny wioskowy chłopaczek od życia w przyszłości? Tylko Michael Faraday okazał się być nieprzeciętny.

Dorosłe życie zaczął jako roznosiciel gazet. Dostarczał je między innymi sprzedawcy książek i introligatorowi, który naprawiał stare i wyczytane książki. Faraday skorzystał z okazji, aby przeczytać niektóre. I tak trafił na trzecie wydanie „*Encyclopædia Britannica*”. Dzieło to wydane w roku 1797 zawierało bardzo wiele pasjonujących tekstów. Faraday nie miał do dyspozycji wszystkich 18 tomów, ale szczęśliwie miał ten, który zawierał artykuł o elektryczności. Na ponad 60 stronach (z ilustracjami) opisywał wszystko, co wiadomo było w tamtym czasie w temacie.

Na podstawie tej lektury skonstruował maszynę elektrostatyczną, przy użyciu której przeprowadził pierwsze swoje fizyczne eksperymenty. Zbudował też stos Volty. Wciągnęło go to bardzo.

Przechodząc któregoś dnia Fleet Street zauważył ogłoszenie o wieczornym wykładzie z filozofii naturalnej pana Tatuma, na Dorset Street 53. Bilet wstępu kosztował jednego szylinga. Sfinansował mu go jego starszy brat. Spodobało się. Pomiędzy lutym a wrześniem 1810 roku Faraday wysłuchał kilkunastu wykładów. Zrobił pełne i piękne notatki ze wszystkiego, co usłyszał. Jego zeszyty, oprawione przez niego samego, zachowały się do dziś. Zdobył się na odwagę i napisał uprzejmy list do jednego z wykładowców Humphreya Davy’ego, który na początku 1813 r. zaprosił go spotkanie. Okazała się, że zwolniło się miejsce asystenta w Royal Institution, ale przy okazji Davy radził, by Michael nie rezygnował z aktualnego zajęcia, bo nauka jest surową kochanką (z finansowego punktu widzenia).

I tak zaczęła się kariera Faradaya najpierw jako chemika, a potem fizyka. Ale o tym już trochę napisaliśmy poprzednio, więc nie chcąc się powtarzać zwróćmy się w innym kierunku, ku duchowej stronie Michaela Faradaya

Rodzina Faradaya i on sam należała do kościoła Sandemańskiego. Założony on został przez Johna Glasa, pastora prezbiteriańskiego usuniętego za swoje przekonania z Kościoła Szkockiego w roku 1730. Powołał wtedy do życia odrębne liczące około 100 osób z jego własnej i sąsiednich parafii *ecclesiolae in ecclesia* (kościółek w kościele). Zasadniczo była to sekta chrześcijańska, ale zreformowana, w istocie kalwińska. Jej członkowie mieli mieć przede wszystkim prawość i miłość w sercu, a ponieważ królestwo Chrystusa jest zasadniczo duchowe, kościół nie może być budowany ani utrzymywany przez siłę, ale jedynie przez słowo. Nazwa tego religijnego ruchu nie nawiązała jednak do nazwiska założyciela, a do jego zięcia Roberta Sandeman, szkockiego nonkonformistycznego teologa, który dołączył do trzódki Glassa w Dundee.

Faraday był Sandemanistą. Odegrało to wielką rolę w kształtowaniu charakteru młodego Michaela i jego poglądów na świat. Od samego początku swojej pracy naukowej Faraday wierzył w to, co sam nazywał jednością sił natury. Rozumiał przez to, że wszystkie oddziaływania były

eprasa.pl 3ca39600ed

przejawami jednej uniwersalnej siły i dlatego powinna istnieć możliwość wzajemnie ich w siebie przekształcania.

Do 1839 roku Faraday eksperymentując i odkrywając kolejne tajemnice natury budował swoją własną, oryginalną teorię oddziaływań elektrycznych. Zgodnie z nią elektryczność, czymkolwiek by była, w zetknięciu z materią powodowała powstawanie w niej napięć, naprężeń. Gdy napięcia te były gwałtownie rozładowywane (tj., gdy ciała nie były w stanie wytrzymać aż tak dużego obciążenia) następują szybkie oscylacje: powtarzanie narastania, zaniku i ponownego ich narastania, które, jak fala, propaguje się w tejże materii.

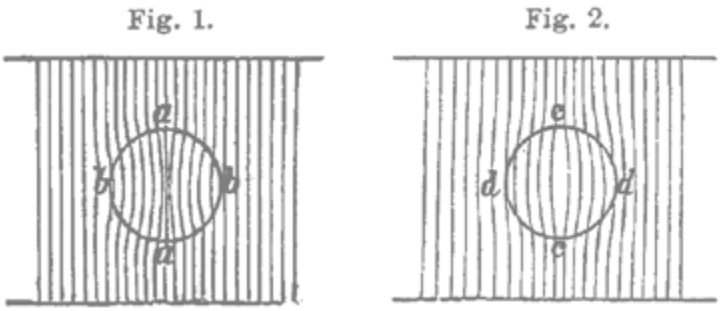
Zdaniem Faradaya tak zachowujące się substancje nazwa się przewodnikami. W procesach elektrochemicznych szybkość narastania i zaniku naprężeń jest proporcjonalna do powinowactwa chemicznego zaangażowanych w proces substancji, ale prąd i w tym wypadku nie jest przepływem czegokolwiek, jakiś nośników prądu, ale falowymi, oscylacyjnymi wahaniami napięć, naprężeń. Izolatory to po prostu materiały, których cząsteczki mogą wytrzymać nadzwyczajne naprężenia, zanim nastąpi ich rozładowanie. Ładunki elektrostatyczne w gromadzone w izolatorach są po prostu miarą tych skumulowanych naprężeń. I, podsumowując, Faraday twierdził, że w ten sposób wszystkie działania elektryczne są wynikiem wymuszonych napięć w ciałach materialnych.

Osiem lat nieustannej pracy eksperymentalnej i teoretycznej, jak się okazało, było dla Faradaya zbyt dużym obciążeniem i w 1839 roku podupadł na zdrowiu. Przez następne sześć lat nie zajmował się zasadniczo zbyt twórczo nauką.

Kiedy powrócił do aktywności w 1845 roku, wrócił też do pytania o istotę elektryczności. Po raz kolejny próbował znaleźć oznaki naprężeń międzycząsteczkowych w substancjach poddawanych działaniu pól elektrycznych, ale bez powodzenia. W tym czasie młody Szkot, William Thomson (późniejszy Lord Kelvin) zasugerował, aby poeksperymentował z polami magnetycznymi.

Faraday skorzystał z tej rady i odkrył skręcanie płaszczyzny polaryzacji światła w ośrodku w obecności pola magnetycznego. Rotacja Faradaya jego zdaniem dowodziła istnienia naprężeń w materii. Niezależnie od tego, czy to prawda, czy nie, pokazał jako pierwszy, że światło i magnetyzm mają ze sobą coś wspólnego.

Faraday poszedł za ciosem, przekonany, że cała materia musi wykazywać pewną reakcję na pole magnetyczne



Paramagnetyk i diamagnetyk wg Faradaya z Experimental-Untersuchungen über Elektrizität (1855)

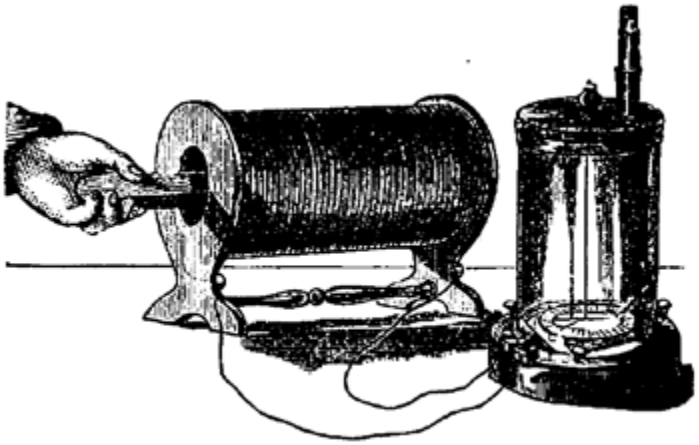


FIG. 358.—*Faraday's first Experiment.*

Rysunek z Cyclopaedic Science (1869).

i odkrył, że tak jest w rzeczywistości, choć nie jest to takie proste. Niektóre substancje, takie jak żelazo, nikiel, kobalt i tlen przyciągane są w kierunku bardziej intensywnych pól magnetycznych, a inne przeciwnie. Faraday nazwał te pierwsze paramagnetykami, a drugie diamagnetykami. Po dalszych badaniach zbudował teorię, w myśl której paramagnetyki są ciałami, które przewodziły linie sił magnetycznych lepiej niż otaczający je ośrodek, podczas gdy diamagnetyki przewodziły je gorzej.

W roku 1850 Faraday rozwinął też radykalnie nowy pogląd na przestrzeń i siły. Przestrzeń nie była już „niczym", sceną dla ciał i sił, ale była medium zdolnym do podtrzymywania naprężeń sił elektrycznych i magnetycznych. Energie świata nie były zlokalizowane w ciałach, ale raczej znajdowały się w otaczającej je przestrzeni. W ten sposób narodziła się teoria pola. Jak później przyznał Maxwell, podstawowe idee jego matematycznej teorii pól elektrycznych i magnetycznych pochodziły od Faradaya; jego wkład polegał jedynie na matematyzacji tych idei w postaci klasycznych równań pola.

Około 1855 roku umysł Faradaya zaczął szwankować. Nadal przeprowadzał sporadyczne eksperymenty. Jeden polegał na próbie znalezienia elektrycznego efektu podnoszenia czegoś ciężkiego, ponieważ przeczuwał, że grawitacja, podobnie jak magnetyzm, musi dać się przekształcić w inny rodzaj siły, na przykład w siłę elektryczną. Dziś byśmy powiedzieli, że chciał zunifikować grawitację i elektromagnetyzm. Nie udało mu się. Nic dziwnego, do dziś nie udało się to nikomu. Royal Society odmówiło opublikowania jego negatywnych wyników.

Faraday coraz bardziej pogrążał się w starość.

Królowa Wiktoria nagrodziła jego życiowe poświęcenie nauce, sprezentowując mu dom w Hampton Court, a nawet zaoferowała mu tytuł szlachecki. Faraday z wdzięcznością domek przyjął, ale przyjęcia tytułu odmówił wierząc, że dążenie do nagród jest sprzeczne ze słowami Biblii. Powiedział, że woli pozostać „*zwykłym panem Faradayem do końca*". Zmarł w 1867 roku i został pochowany na cmentarzu Highgate w Londynie.

eprasa.pl 3ca39600ed

Doświadczenie domowe:

Klatka Faraday'a

A. Potrzebne materiały
1. dwa telefony
2. metalowy garnek, w którym zmieści się telefon
3. deska kuchenna, którą można w całości przykryć garnek od góry
4. folia aluminiowa

B. Narzędzia:
1. nożyczki
2. linijka

C. kolejność czynności
1. Wkładamy telefon do garnka.
2. Przykrywamy garnek z góry w miarę szczelnie folią aluminiową.
3. Przykrywamy folię deską.
4. Dzwonimy do telefonu w garnku – nie powinien zareagować.
5. Wycinamy w folii prostokątny otwór 1 cm x 2 cm.
6. Dzwonimy.
7. Nic nie słychać.
8. Wydłużamy otwór by miał dalej szerokość 1 cm.
9. Dzwonimy.
10. Jeśli nie ma reakcji wracamy do punktu 8 i powtarzamy wydłużanie otworu i dzwonienie, dopóki nie usłyszymy sygnału z garnka.
11. Notujemy długość otworu w folii.
12. Możemy powtórzyć pomiary robiąc otwory okrągłe zwiększając powoli ich średnicę.

Informację telefoniczną przenoszą fale elektromagnetyczne. Jeśli rozmiar naszego otworu jest znacznie mniejszy od długości fali, ta nie dostanie się do środka. Mówimy wtedy o ekranowaniu. Jeśli dziura jest duża, to tak jakby jej nie było. Granicą „przepuszczalności" fal elektromagnetycznych jest mniej więcej rozmiar równy długości fali. W doświadczeniu wykonywanym przez nas otwór o długości 10 cm był za mały, zaś wydłużenie go do 13 cm powodowało, że telefon w garnku dzwonił. Szybkie rachunki zgodnie ze szkolnym wzorem

$$f = c / L \qquad \text{(c to prędkość światła, 300 000 000 m/s)}$$

dają 3 GHz ~ 2 GHz (mniej więcej), co zgadza się z dobrą dokładnością z tym, co w Internecie można wyczytać o częstotliwościach używanych dziś przez telefony.

Od dość dawna uważam, że w szkole powinno się nie tyle nauczać systematycznej wiedzy co raczej wskazywać wartościowe elementy uzyskane w ramach nauk szczegółowych. Wartościowe, czyli takie, które mogą z jednej strony być użyteczne poza nauką, w której zostały znalezione i oczywiście nauczać użycia tych elementów w możliwie różnorodnych sytuacjach. Do takich ogólnie użytecznych elementów fizyki jestem skłonny zaliczyć doświadczenia zdobyte na pracowni fizycznej.

Jerzy **Kuczyński**

Pracownia fizyczna, taka jaka występuje w wyższych uczelniach umożliwia kontakt z dość prostą realnością fizyczną, wymagając następnie by uzyskane wyniki poprawnie i zrozumiale przedstawić czytelnikowi. To ostatnie, bo podstawowym elementem związanym z pracownią jest tzw. „sprawozdanie". Sporządzenie sprawozdania oznacza konieczność opisania tego co i w jaki sposób zostało zrobione oraz jakie wnioski z tego należy wyciągnąć.

Sprawozdanie

W przypadku wymagającego prowadzącego (czyli poważnie traktującego swoje obowiązki!) sprawozdanie to prawdziwy horror dla studenta. Bywa, że sprawozdanie jest kilkakrotnie odrzucane, co każdorazowo oznacza konieczność przeznaczenia kilku godzin na powtórne jego opracowanie. Z tych powodów pracownia nie jest lubiana przez studentów i często się spotyka twierdzenie, że procedura zaliczania ćwiczeń to zwykły sadyzm.

Ta ocena wynika w dużej mierze z tego, że nie tłumaczy się studentom po co się robi sprawozdanie i… z braków w zakresie edukacji humanistycznej – studenci nauk przyrodniczych zwykle słabo piszą po polsku i często nie potrafią zrozumiale redagować tekstu. Jeżeli dodać do tego brak umiejętności wyciągania wniosków z zauważonych faktów i skłonność do tolerowania jawnych niekonsekwencji w sporządzonym sprawozdaniu, to irytacja czytającego skutkująca stwierdzeniem „proszę napisać to jeszcze raz, ale zrozumiale i zgodnie z regułami" jest dosyć oczywista.

W praktyce okazuje się, że bardzo trudno jest zmusić studentów do zrozumienia faktu, że referowanie w zrozumiały sposób jest podstawowym elementem większości „inteligenckich" zawodów, a nieumiejętność wykonania takiej czynności jest w tych zawodach dyskwalifikująca (m.in. skutkująca problemami przy doktoracie!). Wynika z tego, że jest to umiejętność o zasadniczym znaczeniu dla przyszłej kariery obecnego studenta[1].

Sens pomiaru

Z punktu widzenia samej fizyki, głównym problemem pracowni jest brak zrozumienia sensu pomiaru i jego ograni-

eprasa.pl 3ca39600ed

Pracownia fizyczna

Foto – Adobe Stock

czeń. W praktyce na pracowni spotykamy bardzo proste pomiary związane zwykle z równie prostą teorią. Jeżeli dodać, że są to zwykle pomiary wykonywane na „ustawionych" typowych przyrządach opisanych w odpowiedniej instrukcji i ogólnie dostępnych podręcznikach, to wydawałoby się, że trudno o jakieś dziwne problemy. Dlatego prawdziwym zaskoczeniem może być czytanie sprawozdań.

Okazuje się, że wielu przypadkach doświadczenie „nie wychodzi". Z trudnych do zidentyfikowania powodów pojawiają się niezrozumiałe efekty a w trakcie rachunków mających prowadzić do oczywistych wyników okazuje się, że te uzyskane z pomiarów różnią się istotnie od tych spodziewanych. Dlatego w dużej mierze zadaniem studenta jest znalezienie przyczyn tych dziwnych zjawisk. Zwykle się te przyczyny znajduje, choć czasem z pewnym trudem.

Do najczęstszych należą błędy w zapisie tego co zmierzono i zwykłe błędy rachunkowe w trakcie obliczeń. Ale zdarzają się często tzw. błędy grube. Takie jak np. wpływ wstrząsu spowodowanego przejazdem pod oknem pracowni tira czy zwykłym potrąceniem stołu. Nie mówiąc o wpływie wykonywanych przy sąsiednich stołach eksperymentów. Te ostanie najczęściej w postaci rozpraszających studenta zdarzeń, typu zapalenia się oscyloskopu[2]. Do tego dochodzą spodziewane i uwzględniane w ramach pracowni błędy przypadkowe.

Błędy

Tu warto przypomnieć, w ramach pracowni błędów (niepewności) się nie ukrywa a ich wielkość pracowicie się szacuje jako tzw. niepewność pomiarową. Nauczenie studenta szacowania tej niepewności jest poza sporządzaniem sprawozdania drugim głównym celem pracowni. Warto zwrócić uwagę na to jak to w praktyce wygląda. Otóż, jak wspomniano, wykonywane doświadczenie jest z zasady dość banalne a to co powinno wyjść dobrze znane przede wszystkim prowadzącemu, ale i studentowi, bo z zasady przed przystąpieniem do pomiarów musiał przeczytać o doświadczeniu, a często wie, jak poszło z tym doświadczeniem innym studentom. Dlatego w praktyce dąży się do uzyskania wyniku zgodnego z oczekiwaniem. Mówiąc prosto stara się by uzyskany wynik pomiaru różnił się od wartości literaturowej o mniej niż oszacowana niepewność.

W oczywisty sposób uzyskanie wyniku znacznie wykraczającego poza ten zakres skutkuje problemami. Dlatego w najgorszym przypadku, gdy nie da się odpowiednio solidnie „naciągnąć" niepewności, trzeba przywołać jakieś „nadzwyczajne" okoliczności (czyli szuka się błędu grubego), co nie jest łatwe, bo ćwiczenia na pracowni nie należą do oryginalnych i znalezienie „oryginalnej" przyczyny nie jest łatwe. Ale przede wszystkim ciągnie się „w górę" błędy pomiaru tak by uzyskane wyniki różniły się od spodziewanej wartości o mniej niż niepewność pomiaru.

Ostateczny wniosek z pracowni, dla inteligentnego studenta, jest (powinien być) taki, że nawet przy najlepszych chęciach popełnia się wiele błędów i wiara w to, że pomiar może być bezbłędny (że błąd ma niewielkie znaczenie) jest naiwnością[3]. Bez wykonania (osobiście!)

[1] Często spotyka się pogląd preferujący rodzaj wykształcenia. Np. „ja jestem humanistą…" lub „ja jestem ścisłowcem …" z czego miałoby wynikać, że ten drugi rodzaj wykształcenia danej osoby nie dotyczy. To oczywiście fałszywy pogląd. Nawet jeżeli mamy takie czy inne zdolności i niektóre rzeczy są dla nas trudne, czy wręcz niemożliwe to „trzeba się liczyć z rzeczywistością", a ta wymaga pewnych umiejętności. Powyższe stwierdzenie wygłosił do mnie kiedyś jeden z moich Kolegów (astronom, Kazimierz Szyling, wzrostu ok. 1,5 metra) dodając „i ja np. nigdy nie chciałem być koszykarzem". To bardzo rozsądna uwaga. Naturalne talenty są ważne i ich brak powoduje konieczność albo rezygnacji z pewnych ścieżek kariery, albo włożenie odpowiedniego wysiłku by zniwelować braki naturalnych talentów.

[2] Trudne do uwierzenia, ale widziałem takie zdarzenie.

eprasa.pl 3ca39600ed

kilku doświadczeń i co ważniejsze wykonania porządnego sprawozdania z tych czynności, w tym rachunku błędu, nie dowiemy się o tym.

Podsumowując głównym zyskiem z przejścia przez pracownię dla inteligentnego studenta jest umiejętność jasnego formułowania myśli (sprawozdanie) i świadomość, że nawet w pełni sformalizowanej i prostej sytuacji popełniamy liczne błędy.

Niestety doświadczenie tak jak rozumie się to w szkole, czyli jako pokaz, z którego ma coś wynikać i to niezależnie od tego czy „demonstruje" nauczyciel czy doświadczenie wykonują uczniowie nie niesie najważniejszego przesłania doświadczenia fizycznego, czyli tego, że jest z jednej strony obarczone licznymi błędami a z drugiej, że istotna treść pomiaru daje się ujawnić jedynie w wyniku obróbki matematycznej.

Szkolne doświadczenia

Warto w tym momencie podkreślić, że wspomniane błędy i niekonsekwencje, mogą ujawnić się jedynie w przypadku, gdy ocenę sprawozdania dokona ktoś kompetentny. Doświadczenia „szkolne" mające o czymś przekonywać w wyniku zwykłej obserwacji są oszustwem stanowiącym ewidentną propedeutykę magii. I to warto podkreślić – typowe agitacje z zakresu magii i „parapsychologii" typu „płaska Ziemia" mają tę samą strukturę co szkolne „doświadczenia". Tak jak w szkole typowe doświadczenie polega na obserwacji jakiegoś zdarzenia a następnie „jedynie słusznej" interpretacji na podstawie jakiegoś modelu, bez próby dokonania tego co jest istotą sprawozdania z pracowni, czyli ilościowych rachunków, oceny zakresu niepewności i wykluczenie błędu grubego. W przypadku uzasadniania własności magicznych, z zasady jest tak samo, czyli wskazuje się jakieś obserwowane zjawisko, dobierając je tak by dało się je zinterpretować zgodnie z założoną, w tym przypadki magiczną, teorią jednocześnie opuszczając obróbkę logiczną (matematyczną, czyli ilościową). Uczeń, często nieświadomie, porównując to co spotkało go w szkole i to co dotyczy magii zauważą, że struktura rozumowań jest w obu przypadkach podobna. Niestety w tym zakresie odniesiono niesamowity wręcz sukces. Tzw. przeciętny człowiek wierzy, że doświadczenie można zrobić tak by błąd miał marginalne znaczenie.

Wybory

Ja również, może nieświadomie, uległem temu poglądowi. Mam tu na myśli propagandę wmawiającą nam, że można zrobić wybory bez popełniania błędów w liczeniu głosów. Oczywiście zdrowy rozsądek człowieka, który przeszedł przez pracownię wskazuje, że to jest niemożliwe. W przypadku gdy różnica głosów jest duża można uznać, że pomiar jest dokładny i błąd nie zmieni wyniku.

Jednak, aby to ocenić, trzeba oszacować wielkość niepewności, czego o ile wiem nigdy nie zrobiono. I dopiero wtedy można uznać, że nie warto dyskutować co do wyniku wyborów (jeżeli niepewności nie wpływają na wynik). Czyli gdy błędy są **dużo** mniejsze od ilości mogących zmienić wynik wyborów. Na to jednak trzeba umieć oszacować tę niepewność. Np. przez weryfikację wyników w losowo wybranych komisjach. Jeżeli się tego nie zrobi to wynikiem jest pyskówka godna tzw. „dyskusji w maglu" gdy zwolennicy tej czy innej opcji próbują wykazać, że mamy do czynienia z oszustwem. Co, znając polskie realia trudno wykluczyć[4]. Niestety bardzo realne jest przypisywane Józefowi Stalinowi twierdzenie „Nieważne kto i jak głosuje. Ważne kto liczy głosy".

Sądzę, że sposobe m na ograniczenie (nie wykluczenie, bo tego raczej nie da się zrobić) wątpliwości co do wyników byłoby solidne oszacowanie niepewności wyniku, czyli wyciągnięcie wniosków z doświadczeń pracowni fizycznej.

Jerzy Kuczyński
Akademia Śląska

Foto – Dreamstime

[3] Myśli ludzkie chodzą różnymi drogami i czasem studenci dochodzą do wniosku, że w ogóle empiryzm jest bez sensu, bo doświadczalnictwo sprowadza się do oszukiwania i naciągania wyników. Odpowiedzią jest zauważenie, że na pracowni mamy do czynienia z dobrze zbadanym fragmentem rzeczywistości, dlatego za wszelkie odstępstwa od spodziewanych wyników należy obarczyć wykonującego doświadczenie. Nie przeszkadza, że ma on możliwość wyjaśnienia dziwnego wyniku. Ale to wymaga to sporego wysiłku intelektualnego.

[4] Tu trudno mi nie wspomnieć o zdarzeniu z mojej młodości. Otóż, gdy nasze dzieci były maleńkie wraz ze szwagrem wybraliśmy się „do urny", pozostawiając żony przy dzieciach. Było to na wsi, gdzie wszyscy się znają a w komisji był bliski krewny, od którego pobieraliśmy karty do głosowania. Zadał pytanie „gdzie żony". Ano przy dzieciach. To zagłosujcie za nie. Dalej padło pytania o teściów. Nie wiemy. To też zagłosujcie za nich. Nie pamiętam, ile tych kart zgarnęliśmy, bo pytań było chyba więcej. Ponieważ w naszym obwodzie z pierwszego miejsca kandydował Edward Gierek pomaszerowaliśmy do kabiny i radośnie na tych kilku (nastu?) kartach go skreśliliśmy. Gdy wróciliśmy do domu oczywiście powiadomiliśmy rodzinę o spełnieniu „obywatelskiego obowiązku" na co usłyszeliśmy, że Teściowa była rano głosować i zagłosowała za całą rodzinę. Pamiętając to wydarzenie trudno mi uwierzyć, że nic podobnego nie dzieje się obecnie. Może nie bywa aż takich przypadków jak opisane powyżej, ale na pewno są i wybryki członków komisji, i pewnie dużo powszechniejsze, naturalne pomyłki

eprasa.pl 3ca39600ed

Foto – Adobe Stock

Gigantyczny efekt Mojżesza w ferrofluidach

Osiągnięcia nowoczesnych technologii prowadzą do pojawienia się materiałów o niezwykłych lub nieznanych dotychczas właściwościach. Dzięki temu przy użyciu łatwo dostępnych środków można wykrywać i badać zjawiska trudne do zarejestrowania w materiałach spotykanych w przyrodzie.

Stanisław **Bednarek**

Zmiany niektórych wielkości w interesujących zjawiskach fizycznych jest trudno zmierzyć, nawet przy użyciu profesjonalnych przyrządów. Ma to miejsce w przypadku magnetostrykcji, czyli zmiany wymiarów ciała m.in. w wyniku jego namagnesowania lub magnetooporu, polegającego na zamianie oporu elektrycznego w polu magnetycznym. Rozwój technologii pozwala jednak wytworzyć materiały, w których takie zamiany okazują się bardzo duże i przez to zjawiska w tych materiałach nazwano gigantycznymi lub kolosalnymi.

Dla przykładu, w układzie cienkich warstw, złożonych z materiałów ferromagnetycznych i niemagnetycznych, pojawia się gigantyczny i kolosalny magnetoopór [1, 2]. Za odkrycie tego zjawiska Albert Fert i Peter Grynberg otrzymali w 2007 r. Nagrodę Nobla z fizyki.

Z kolei w stopach dysprozu, terbu i żelaza wykryto gigantyczną magnetostrykcję [3, 4]. Interesujący, ale bardzo niewielki efekt Mojżesza, polegający na zmianie kształtu powierzchni swobodnej cieczy w niejednorodnym polu magnetycznym, staje się kilka tysięcy razy większy w specjalnym rodzaju zawiesin [5]. Tymi zawiesinami są ferrofluidy, które stały się łatwo dostępne, m.in. w sprzedaży internetowej [6]. Dlatego efektowi Mojżesza w tych zawiesinach poświecono trochę uwagi w niniejszym artykule.

Efekt Mojżesza i ferrofluidy

W celu wprowadzenia do tematu zostanie podana tutaj tylko najbardziej podstawowa informacja na temat efektu Mojżesza. Jeżeli ciecz ma właściwości diamagnetyczne, czyli jej względna przenikalność magnetyczna $\mu_r < 1$, wtedy ta ciecz jest wypychana z obszaru, wypełnionego przez silniejsze pole magnetyczne [3]. To powoduje, że poziom cieczy w obszarze silniejszego pola magnetycznego się obniża i jej powierzchnia swobodna jest wklęsła. Ten wariant zjawiska jest nazywany prostym efektem Mojżesza.

Dla cieczy paramagnetycznej $\mu_r > 1$ i zachodzi jej wciąganie do obszaru silniejszego pola magnetycznego. Skutkiem tego powierzchnia swobodna cieczy ma kształt wypukły i ten wariant zjawiska jest nazywany odwrotnym efektem Mojżesza. W polu elektrycznym pojawia się tylko odwrotny efekt Mojżesza, ponieważ względne przenikalności elektryczne cieczy $\varepsilon_r > 1$. Więcej informacji dotyczących tego efektu, pochodzenia jego nazwy i zastosowań zawierają liczne publikacje i Wikipedia [7-9].

Ferrofluidy są stabilnymi zawiesinami cząstek materiału magnetycznego o bardzo małych rozmiarach w cieczach, np. w oleju albo w wodzie, które są nazywane

eprasa.pl 3ca39600ed

cieczami dyspersyjnymi [10, 11]. Ponieważ rozmiary cząstek wynoszą 10^{-9}-10^{-8} m, to te cząstki są nazywane nanocząstkami. Materiałami używanymi do wytworzenia nanocząstek są najczęściej magnetyt lub hematyt.

Mimo, że gęstość materiału nanocząstek jest większa, niż gęstość cieczy dyspersyjnej, to nanocząstki nie opadają na dno naczynia pod działaniem ich ciężaru. Dzieje się tak dlatego, że nanocząstki wykonują ruchy Browna i na skutek tego znajdują się w całej objętości cieczy dyspersyjnej. Niestety, nanocząstki mają tendencję do łączenia się ze sobą i tworzenia aglomeratów o większych rozmiarach, które opadają na dno naczynia. Żeby zapobiec temu niekorzystnemu zjawisku, nanocząstki są pokryte warstwą substancji powierzchniowo czynnej, np. kwasu oleinowego, która uniemożliwia nadmierne zbliżenie się i łączenie cząstek.

Suma objętości nanocząstek zwieszonych w cieczy dyspersyjnej jest zwykle w granicach 5-15% objętości ferrofluidu. Objętość substancji powierzchniowo czynnej wynosi ok. 10%. Pozostała część objętości ferrofluidu jest wypełniona przez ciecz dyspersyjną. Dzięki temu ferrofluidy nie umieszczone w polu magnetycznym mają właściwości podobne do zwykłych cieczy.

Większość cząstek o podanych rozmiarach zawiera tylko jedną domenę magnetyczną. Dlatego podczas magnesowania ferrofluidów nie pojawia się histereza, chociaż ich krzywa namagnesowania może być nieliniowa [11]. Takie cząstki nazywane są superparamagnetycznymi. Względna przenikalność magnetyczna ferrofluidów μ_r jest znacznie większa niż przenikalność substancji paramagnetycznych i zwykle ma wartość od kilku do kilkunastu. Udało się też wytworzyć ferrofluidy o μ_r = 120-150 w temperaturze 200 K i rekordowej wartości $\mu_r \approx 200$ w temperaturze ciekłego azotu [10]. Dzięki temu ferrofluidy wykazują łatwo zauważalne oddziaływanie z polem magnetycznym, nawet o niewielkim natężeniu. Jest to jedna z istotnych cech, różniących ferrofluidy od cieczy dia- i paramagnetycznych.

Pole magnetyczne powoduje wzrost lepkości ferrofluidów i przez to uzyskanie właściwości cieczy reologicznych. Współczynnik lepkości takich cieczy nie jest stały, ale zależy od szybkości wywierania ciśnienia i innych czynników. Umożliwia to m.in. kierowanie ruchem ferrofluidów i otrzymanie niezerowego modułu sztywności, charakterystycznego dla ciał stałych. Jeżeli natężenie pola magnetycznego jest większe od krytycznego, to w ferrofluidach pojawiają niestabilności. Wtedy wewnątrz ferrofluidu cząstki łączą się w długie włókna i grupują w kolumny. To przejawia się utworzeniem na powierzchni swobodnej ferrofluidu, charakterystycznych wypustek, podobnych do kolców lub igieł.

Dzięki unikalnemu połączeniu właściwości ciekłych, magnetycznych i reologicznych oraz łatwym sterowaniu tymi właściwościami przez pole magnetyczne ferrofluidy znalazły liczne zastosowania. Zakres zastosowań jest bardzo szeroki i zawiera m.in. kontrolę dozowania leków podczas chemioterapii nowotworów, tłumiki drgań, czujniki, filtry i przetworniki sterowane polem magnetycznym. Również efekt Mojżesza jest interesującym zjawiskiem nie tylko w powodów poznawczych, ale również ze względu na szerokie zastosowanie w zaawansowanych technologiach, umożliwiające np. poprawę działania układów elektronicznych, a nawet tworzenie innowacyjnych aranżacji artystycznych [12-14].

Budowa układu eksperymentalnego

O wyborze ferrofluidu do doświadczeń zdecydowała wspomniana wcześniej duża wartość przenikalności magnetycznej w porównaniu z innymi cieczami. Najczęściej podawany literaturze wzór na zmianę wysokości poziomu cieczy w wyniku efektu Mojżesza ma postać [7, 9]

$$h(r) = \frac{\mu_0(\mu_r - 1)H^2(r)}{2\rho g} \qquad (1).$$

Znaczenie symboli we wzorze (1) jest następujące: H – natężenie pola magnetycznego ρ – gęstość cieczy, r – odległość od osi źródła pola, μ_r – względna przenikalność magnetyczna cieczy, g – przyspieszenie ziemskie, $\mu_0 = 4\pi\times10^{-7}$ (Vs)/(Am) i oznacza przenikalność magnetyczną próżni.

Wzór (1) został wyprowadzony przy następujących założeniach upraszczających. Pierwsze założenie polega na tym, że rozkład przestrzenny pola magnetycznego ma tzw. symetrię cylindryczną i jego oś jest skierowana pionowo. Symbol r oznacza odległość od tej osi mierzoną w kierunku radialnym. Drugie założenie polega na tym, że siła magnetyczna działa na ciecz tylko w kierunku radialnym. Kierunek działania siły magnetycznej jest wyznaczony przez kierunek gradientu pola, czyli wielkości wektorowej, obliczanej jako pochodna jego natężenia względem przyjętych współrzędnych. Dlatego gradient przy tym założeniu musi mieć tylko jedną składową skierowaną radialnie, której wartość zależy od zmiennej r. Oprócz tego na ciecz działa jej ciężar, skierowany pionowo. W stanie równowagi powierzchnia swobodna cieczy w każdym punkcie jest prostopadła do wypadkowej siły magnetycznej i ciężaru.

Jako źródło pola magnetycznego zastosowano odcinek prostoliniowego przewodnika skierowanego pionowo, w którym płynął prąd elektryczny. Jeżeli taki przewodnik jest odpowiednio długi, to z dobrym przybliżeniem w otoczeniu środkowej części wytwarza pole magnetyczne, spełniające założenia przyjęte do wyprowadzenia wzoru (1). Stosując to przybliżenie tzw. nieskończenie długiego przewodnika, natężenie pola magnetycznego można wyrazić znanym z podręczników szkolnych wzorem

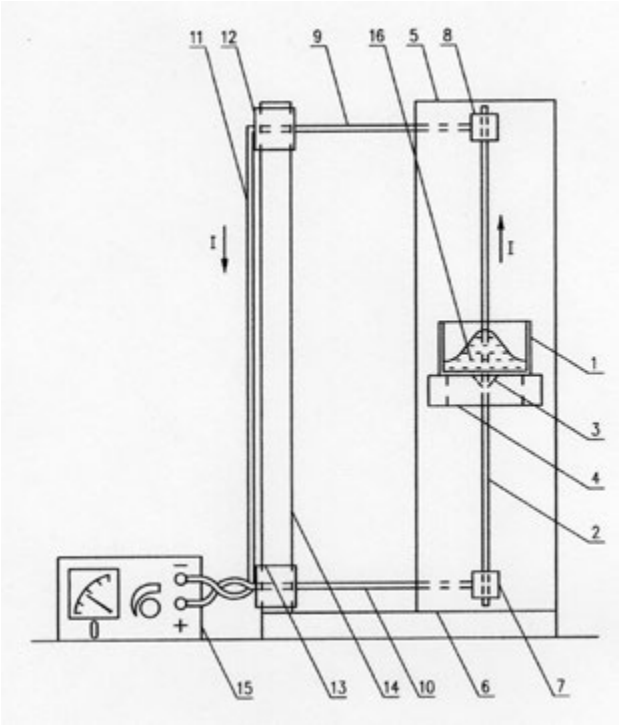
$$H(r) = \frac{I}{2\pi r} \qquad (2).$$

Po podstawieniu wzoru (2) do wzoru (1) otrzymuje się następujący wzór

$$h(r) = \frac{\mu_0(\mu_r - 1)I^2}{8\pi^2\rho g r^2} \qquad (3),$$

który wyraża zależność zmiany wysokości poziomu cieczy m.in. od natężenia prądu I w przewodniku. Zastosowanie przewodnika z prądem, jako źródła pola magnetycznego jest też uzasadnione łatwym wytwarzaniem pola o zadanym natężeniu $H(r)$ przez zmianę natężenia prądu.

eprasa.pl 3ca39600ed



Rys. 1. Budowa układu doświadczalnego: 1 – przezroczyste naczynie, 2 – drut miedziany, 3 – uszczelka z silikonu, 4 – wspornik, 5 – płyta pionowa, 6 – płyta pozioma, 7, 8 – zaciski, 9 – przewód górny 10 – przewód dolny, 11 – zasilacz, 12 – przewód pionowy, 13 – opaska górna, 14 – opaska dolna, 15 – słupek, 16 – ferrofluid.

Schemat układu eksperymentalnego przedstawia rys. 1. W układzie zastosowano przezroczyste naczynie 1, otwarte od góry i wykonane z poliestru. Wymiary podstawy naczynia wnosiły 50×50 mm. Przez otwór w środku dna naczynia 1 przechodził pionowo drut 2, w którym płynął prąd elektryczny. Drut 2 miał średnicę 3 mm, długość 40 cm i był wykonany z miedzi. Miejsce przejścia drutu 2 przez dno naczynia 1 uszczelniono od dołu silikonem 3. Odcinek drutu ponad tym miejscem przejścia pokryto cienką warstwą silikonu, żeby zminimalizować zwilżanie drutu przez ferrofluid. Skutkiem tego, kiedy przez drut prąd nie płynął, to powierzchnia ferrofluidu w jego otoczeniu była płaska.

Naczynie 1 zostało ustawione na poziomym wsporniku 4 z otworem, przez który przechodził drut 2. Wspornik 4 był przymocowany do płyty pionowej 5 połączonej z podstawą 6. W płycie pionowej 5 osadzono zaciski 7, 8, umożliwiające łatwą wymianę drutu 2 wraz z naczyniem 1. Zaciski 7, 8 łączyły końce drutu 2 z przewodami w izolacji: górnym 9 i dolnym 10, skierowanymi poziomo. Przewód górny 9 został zagięty pod kątem prostym i był poprowadzony w dół, jako przewód pionowy 11, przymocowany opaskami 12 i 13 do słupka 14, połączonego z płytą poziomą 6. Końce przewodu dolnego 10 i pionowego zostały skręcone ze sobą i przyłączone do zasilacza 15, dającego prąd stały o regulowanym natężeniu I w granicach kilkunastu A. Przewód pionowy 11 był oddalony od drutu 2 na odległość 15 cm w celu ograniczenia natężenia pola magnetycznego, wytwarzanego przez ten przewód w objętości naczynia 1.

Ponieważ kierunki prądu w drucie 2 i w pionowym przewodzie 11 były przeciwne, to pole magnetyczne wytwarzane przez ten przewód 12 zmniejszałoby natężenie pola magnetycznego wytwarzanego przez drut 2 w objętości naczynia 1. Dla uniknięcia rozpraszania pola magnetycznego poziomy wspornik 4, płytę pionową 5, podstawę 6 i słupek 14 wykonano z materiału nieferromagnetycznego, którym była sklejka. Również dlatego połączenia tych elementów wykonano przy użyciu kleju epoksydowego i kołków drewnianych.

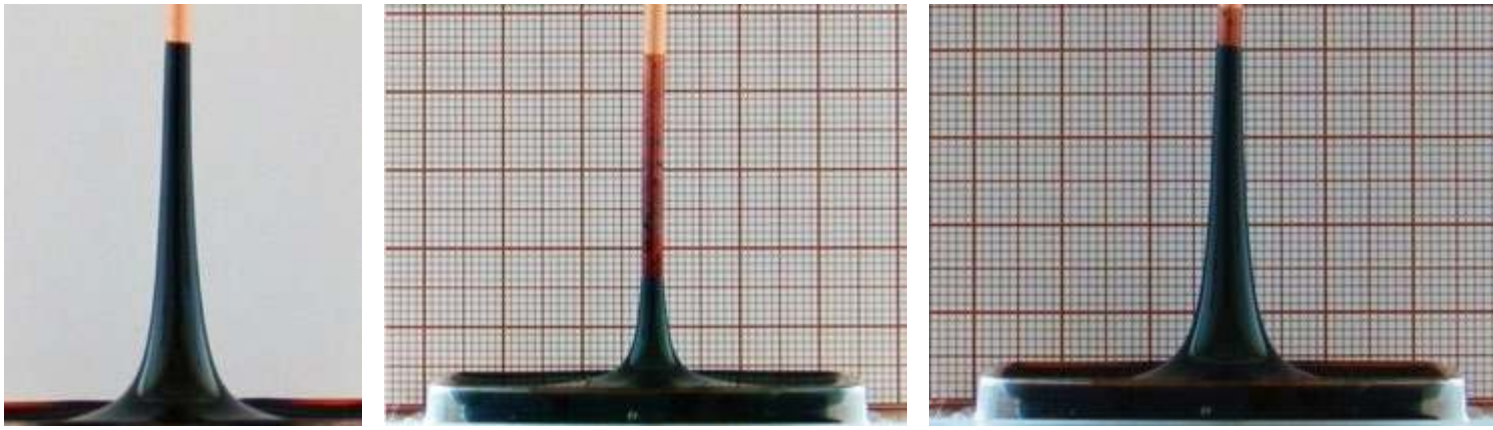
Część układu doświadczalnego z naczyniem 1 i utrzymującą je opisaną konstrukcją jest przedstawiona na fot. 1. Do naczynia 1 wlano ferrofluid 16, w którym podczas przepływu prądu pojawiał się efekt Mojżesza. Zastosowano ferrofluid dostępny w handlu, wyprodukowany przez firmę Supermagnete i zawierający nanocząstki magnetytu zawieszone w oleju. Parametry tego ferrofluidu były następujące: względna przenikalność magnetyczna $\mu_r = 2{,}14$, gęstość $\rho = 1{,}59\times10^3$ kg/m^3. Dla porównania, względne przenikalności magnetyczne cieczy dia- lub paramagnetycznych są w granicach 10^{-7}-10^{-5} [15].

W przypadku braku w szkolnej pracowni fizycznej odpowiedniego zasilacza prądu stałego można wykorzystać prostownik do ładowania akumulatorów. Należy jednak pamiętać, że prąd o natężeniu kilku A, płynąc przez przewodnik powoduje jego nagrzewanie. Dlatego używając prądów o większym natężeniu należy zachować ostrożność.

Dla zaobserwowania efektu Mojżesza prąd wystarczy włączyć na kilka sekund. Między kolejnym włączeniami należy stosować przerwy, trwające 1-2 minut, niezbędne do ochłodzenia układu. Wskazane jest przyłączenie zasilacza szeregowo przez zabezpieczający opornik suwakowy o oporności kilku omów, nawinięty grubym drutem. Najlepiej, żeby zasilacz był wyposażony w bezpiecznik

Fot. 1. Wygląd zewnętrzny fragmentu układu doświadczalnego z naczyniem zawierającym ferrofluid i konstrukcją nośną.

eprasa.pl 3ca39600ed



Fot. 2. Efekt Mojżesza w polu magnetycznym, wytwarzanym przez prąd elektryczny, przepływający w prostoliniowym odcinku drutu – kolumny ferrofluidu otrzymane podczas wzrostu natężenia prądu.

elektromagnetyczny, automatycznie wyłączający prąd o zbyt dużym natężeniu.

Wyniki eksperymentów i podsumowanie

Prąd elektryczny przepływający przez drut 2 wytwarza wokół niego niejednorodne pole magnetyczne. Zgodnie ze wzorem (2) natężenie pola jest odwrotnie proporcjonalne do odległości r od osi drutu 2. W tej sytuacji ferrofluid jest wciągany do obszaru silniejszego pola magnetycznego, który znajduje się bliżej jego osi. Skutkiem tego obserwuje się utworzenie efektownej kolumny ferrofluidu otaczającej drut. Przykłady uzyskanych w ten sposób wyników przedstawia fot. 2.

Ze wzoru (3) wynika, że powierzchnia swobodna ferrofluidu ma kształt hiperboloidy obrotowej. Wzrost wysokości poziomu ferrofluidu $h(r)$ jest wprost proporcjonalny do kwadratu natężenia prądu I, płynącego przez drut 2 i odwrotnie proporcjonalny do kwadratu odległości r od jego osi.

W celu dalszej analizy wyników eksperymentu kolumnę ferrofluidu można sfotografować. Oś optyczną obiektywu aparatu fotograficznego, np. w smartfonie, należy ustawić poziomo. Dzięki temu otrzymuje się profil powierzchni swobodnej ferrofluidu. W celu łatwiejszych porównań i pomiarów, jako tło fotografii jest korzystne zastosowanie prostokątnego kawałka papieru z siatką milimetrową przyklejonego do wspornika 4, (fot. 2.b, c).

Mierząc natężenie prądu I za pomocą amperomierza, wbudowanego w zasilacz lub prostownik, albo oddzielnego amperomierza, włączonego szeregowo do obwodu i fotografując powierzchnię swobodną ferrofluidu przy zmierzonych natężeniach prądu, uzyskuje się dane, które po opracowaniu umożliwią sprawdzenie zależności $h(I)$ oraz $h(r)$ wyrażonych wzorem (3).

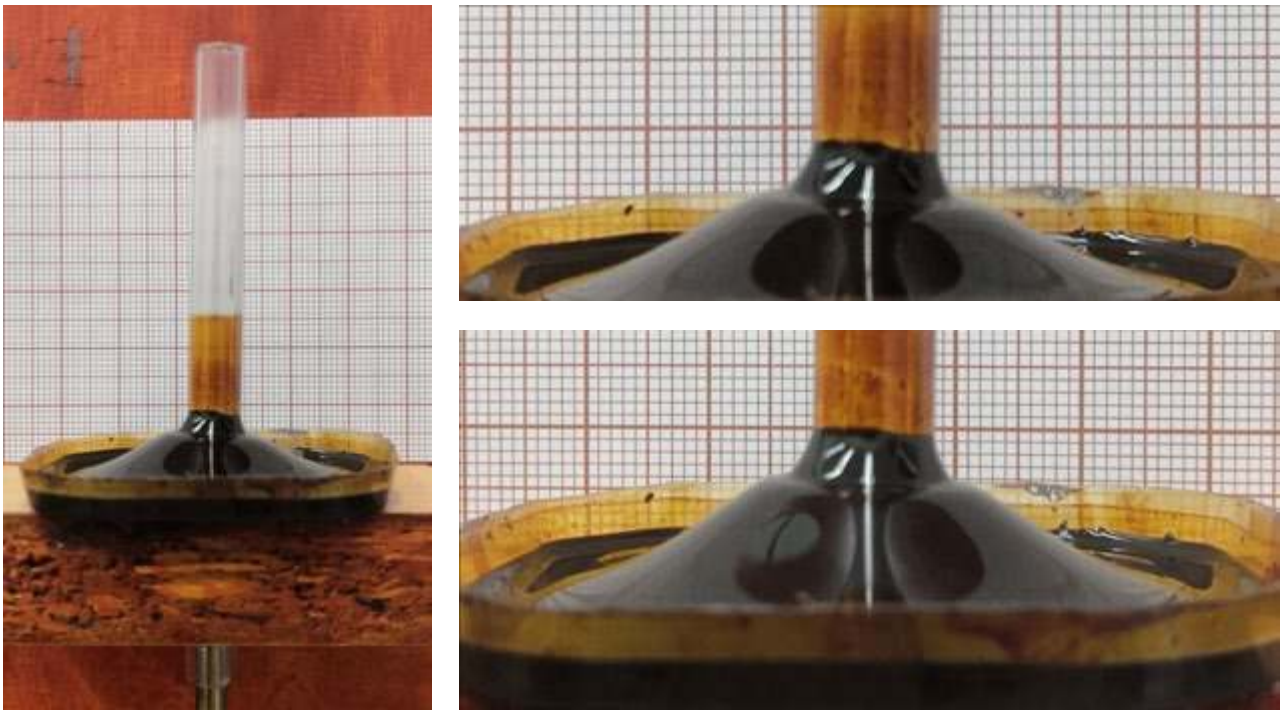
Do ilościowego opracowania wyników należy fotografie wydrukować i wykonać pomiary na wydrukach przy użyciu linijki. Dla zwiększenia dokładności wydruki mogą być powiększone, ale wtedy podczas pomiarów należy uwzględnić współczynnik ich powiększenia. Powiększenie wydruków jest korzystne przy mniejszych zmianach wysokości poziomu ferrofluidu $h(r)$, które pojawiają się dla niewielkich natężeń prądu I.

Zastosowanie ferrofluidu pozwala na uzyskanie zmian wysokości $h(r)$ w granicach kilku mm, nawet przy stosunkowo niewielkich natężeniach prądu, wynoszących kilka A. Gdyby zamiast ferrofluidu były zastosowane inne ciecze dia- lub paramagnetyczne, wtedy te zmiany wynosiłyby setne części mm i byłyby trudne do zauważenia w warunkach szkolnej pracowni fizycznej.

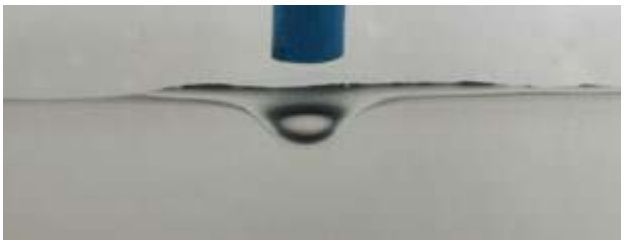
Pole magnetyczne niezbędne do uzyskania efektu Mojżesza w ferrofluidach można też wytworzyć przy użyciu kilku cienkich magnesów neodymowych w kształcie walca o średnicy ok. 3 mm. W tym celu trzeba nieco zmodyfikować układ doświadczalny. W środku dna przezroczystego naczynia 1, takiego samego jak poprzednio, należy wykonać otwór i zamocować w nim kawałek przezroczystej, cienkościennej rurki szklanej lub plastikowej o długości ok. 5 cm. Średnica wewnętrzna rurki musi być nieco większa od średnicy magnesów tak, żeby magnesy można w niej swobodnie przesuwać. Zamocowanie rurki najłatwiej wykonać przy pomocy przezroczystego kleju epoksydowego lub silikonu. Ważne jest szczelne połączenie rurki z brzegiem otworu. Tak przygotowane naczynie 1 ustawia się na wsporniku 4 i wlewa do niego ferrofluidu 16, podobnie jak w poprzednim doświadczeniu. Powierzchnia swobodna ferrofluidu powinna być pozioma. Następnie kilka magnesów neodymowych łączy się ze sobą biegunami różnoimiennymi i utworzony w ten sposób „pręcik" wsuwa od dołu do rurki. Oddziaływanie ferrofluidu z polem magnetycznym zachodzi w sposób analogiczny, jak poprzednio. Przykład wytworzonej w ten sposób kolumny ferrofluidu przedstawia fot. 3. Kształt i wysokość tej kolumny zmienia się przez przesuwanie układu magnesów wewnątrz rurki.

Ten wariant doświadczenia jest łatwiejszy do wykonania pokazów, ale trudniejszy do interpretacji ilościowej, ponieważ wymaga przeprowadzenia pomiarów indukcji pola magnetycznego z zastosowaniem czujnika hallotronowego o małej powierzchni. Nie należy też używać magnesów, wytwarzających zbyt silne pole magnetyczne, ponieważ w ferrofluidzie nastąpi agregacja cząstek magnetycznych. Wtedy, zamiast gładkiej, zakrzywionej przez pole magnetyczne powierzchni, pojawią się znane z wielu

eprasa.pl 3ca39600ed



Fot. 3. Efekt Mojżesza w polu magnetycznym, wytwarzanym przez „pręcik" złożony z małych magnesów neodymowych, wsuwanych od dołu do rurki – kształt powierzchni swobodnej cieczy dla różnych położeń magnesu. Magnes jest widoczny u dołu for. 3.a.



Fot. 4. Efekt Mojżesza spowodowany przez strumień powietrza, wypływający z rurki prostopadle na powierzchnię wody.

fotografii wypustki, przypominające kolce jeża. Zjawisko jest niewątpliwie efektowne, ale nie o to chodzi w tym doświadczeniu.

Używając ferrofluidów łatwo można też pokazywać i badać efekt Mojżesza w polach magnetycznych o innych rozkładach przestrzennych. Dla przykładu, w polach wytwarzanych przez dwa równoległe przewodniki, w których płynie prąd elektryczny lub przez magnesy, skierowane poziomo i umieszczone pod dnem naczynia z ferrofluidem. Takie doświadczenia z użyciem małych magnesów neodymowych są inspirujące dla uczniów i co najważniejsze bezpieczne, Należy zachować ostrożność głównie podczas przelewania ferrofluidu, ponieważ ta ciecz pozostawia brunatne plamy, trudne do usunięcia, zwłaszcza z odzieży.

Kończąc warto zauważyć, że efekt Mojżesza pojawia się w wielu sytuacjach, gdy ciecz, a także materiały sypkie, znajdują się w niejednorodnym polu sił. Mogą to być również siły elektryczne, grawitacyjne lub nierównomiernie rozłożone w przestrzeni ciśnienie gazu, albo innej, nie mieszającej się cieczy. Widowiskowy efekt Mojżesza można uzyskać w bardzo prosty sposób kierując strumień powietrza, wydmuchiwany z rurki o średnicy kilku mm, prostopadłe na powierzchnię wody (fot. 4). Efekt Mojżesza ma nie tylko znacznie poznawcze, ale też praktyczne zastosowania, m.in. do wyznaczania podatności magnetycznej cieczy [7].

Wszystkie fot. i rys. wykonane przez autora.

Stanisław Bednarek
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Łódzkiego

LITERATURA

[1] E. Hirota, K. Inomata, Giant Magneto-Resistance Devices, Springer, Berlin, p. 30 (2002).
[2] A. Fert, P.M. Levy, S. Zhang, Electrical conductivity of magnetic multilayered structures, „*Physical Review Letters*", Vol. 65, p. 1643–1646 (1990).
[3] A.E. Clark, Ferromagnetic Materials, Vol. 1, E.P. Wolfhart (Editor), North-Holland, Amsterdam, p. 531 (1986).
[4] http://aml.seas.ucla.edu/research/areas/magnetostrictive/mag-composites/ [dostęp: 27.07 25].
[5] S. Bednarek, Efekt Mojżesza i bąbelki w polu magnetycznym, *Fizyka w Szkole z Astronomią, Czasopismo dla Nauczycieli*", Nr 5 (382), Rocz. LXVII, s. 30-33 (2022).
[6] E. Blums, A. Cebers, M. M. Maiorov, Magnetic fluids, Walter de Gruyter, Berlin, New York, p. 163 (1997).
[7] D. Shulman, M. Lewkowicz, E. Bromashenko, Measurement of magnetic susceptibility of diamagnetic liquids exploiting the Moses effect, „*Journal of Magnetism and Magnetic Materials"*, Vol. 571, p. 170553 (2023).
[8] N. Sirota, T. Homma, H. Sugawara, K. Kitazawa, M. Iwasaka, S. Ueno, H. Pokoi, Y. Kakudate, S. Fujiwara, Rise and Fall of Surface Level of Water Solutions under High Magnetic Field, „*Japanese Journal of Applied Physics"*, Vol. 34, no. 8A, p. L991-L993 (1995).
[9] https://en.wikipedia.org/wiki/Moses_effect [dostęp: 27.07 25].
[10] C. Scherer, A. M. Figueiredo Neto, Ferrofluids: Properties and Applications, „*Brazilian Journal of Physics"*, Vol. 35, no. 3A, p. 718-727 (2005).
[11] R. E. Rosensweig, Magnetic Fluids, „*Scientific American",* Vol., 247, no. 4, p. 136-145 (1982).
[12] A.Y. Solovyova, E.A. Elfimova, The initial magnetic susceptibility of high-concentrated, polydisperse ferrofluids: Universal theoretical expression, „*Journal of Magnetism and Magnetic Materials"*, Vol. 495, p. 165946 (2020).
[13] S. Bednarek, Ferrofluidy – ciekłe materiały magnetyczne, „*Przegląd Elektrotechniczny, Organ Stowarzyszenia Elektryków Polskich*", Rocz. LXXI, nr 1, s. 1-5 (1995).
[14] S. Bednarek, Dyspersyjne materiały ferromagnetyczne, „*Postępy Fizyki, Dwumiesięcznik Polskiego Towarzystwa Fizycznego*", Tom 46, Zesz. 2, s. 103-122 (1995).
[15] W. Mizerski, Tablice fizyczno-astronomiczne, Wydawnictwo Adamantan, Warszawa, s. 187 (2013).

eprasa.pl 3ca39600ed

Sezon na Saturna

Na zdjęciu: Saturn i jego pierścienie na obrazie z sondy Cassini z 2016 r. Fot. NASA/JPL-Caltech/SSI/Kevin M. Gill

Krzysztof **Kowalczyk**

Mamy właśnie najlepsze w roku warunki do obserwacji Saturna, którego tej jesieni widać całą noc, jako jeden z najjaśniejszych obiektów na niebie. Krótko po zapadnięciu zmroku znajdziemy Saturna jako jasny niemigoczący punkt na południowym wschodzie, a o wczesnych godzinach porannych na południowym zachodzie. Świeci obecnie jako najjaśniejszy obiekt w gwiazdozbiorze Ryb, który pozbawiony jest jasnych gwiazd.

Saturn jako najdalsza planeta widoczna gołym okiem był znany już w starożytności. Dziś wiemy, że jako szósta planeta od Słońca obiega Słońce w średniej odległości 9,58 jednostek astronomicznych, czyli prawie 10 razy dalej niż Ziemia. Dokładnie 20.09.2025 o 7:00 naszego czasu planeta znalazła się w opozycji, czyli po drugiej stronie Ziemi niż Słońce. Oznacza to również, że Saturn osiągnął minimalną odległość od Ziemi, która wynosi 8,66 jednostek astronomicznych. Jedna jednostka astronomiczna (w skrócie AU) to średnia odległość Ziemi od Słońca (ok. 149,6 mln km). Łatwo więc przeliczyć, że skoro wielka półoś orbity Saturna ma rozmiar 9,58 AU (co odpowiada średniej odległości od Słońca), to w kilometrach średnia odległość Saturna od Słońca wynosi ok. 1,43 mld. km

Planeta Saturn, 95 razy masywniejsza od Ziemi i o tysiąckrotnie większej objętości, obiega Słońce w ciągu 29 lat i 168 dni ziemskich. Dzięki swoim znacznym rozmiarom należy do najjaśniejszych obiektów na niebie. Choć sama planeta jest doskonale widoczna, to tegoroczne warunki nie sprzyjają zbytnio obserwacji pierścieni Saturna, które z Ziemi widzimy niejako „z boku". Co prawda pierścienie Saturna są dość rozległe (250 tys. km szerokości), ale zarazem bardzo cienkie, więc warunki ich widoczności silnie zależą od kąta nachylenia względem obserwatora. Na lepsze warunki do obserwacji pierścieni trzeba będzie poczekać do 2026 i 2027 r., kiedy pierścienie Saturna będą nachylone do nas pod większym kątem.

Natura pierścieni

Saturn i jego pierścienie były badane przez bezzałogowe sondy Voyager 1 i Voyager 2, a także przez sondę Cassini, która stała się jego pierwszym sztucznym satelitą. Starsze źródła podawały grubość pierścieni jako nieprzekraczającą kilkunastu kilometrów, ale dzięki misji sondy Cassini (1997-2017) wiemy, że w rzeczywistości są one jeszcze cieńsze. Na przykład najgrubsza część pierścienia A ma grubość zaledwie 10-15 metrów, a w obrębie słynnej przerwy Cassiniego, która też nie jest zupełnie pusta, grubość pierścieni to 3-5 metrów.

Pierścienie Saturna po raz pierwszy zobaczył Galileusz, który w 1610 r. zapisał, że widział Saturna jako obiekt potrójny. Gdy pierścienie Saturna są do nas nachylone pod większym kątem (nie tak jak w tym roku), już w obiektywie lunety lub lornetki o średnicy 5 cm można ujrzeć wydłużony kształt Saturna i przerwy po obu stronach wskazujące na istnienie planety i pierścieni. Właśnie taki widok po raz pierwszy zobaczył Galileusz. Włoski astronom wnikliwie przyglądał się szóstej planecie od Słońca także dwa lata później, jednak Saturn jawił mu się wtedy jako obiekt pojedynczy. Galileo uznał wobec tego, że w 1610 r. miał do czynienia ze złudzeniem i hipoteza o istnieniu pierścienia pojawiła się dopiero w umyśle holenderskiego fizyka i astronoma Christiaana Huygensa w latach sześćdziesiątych XVII wieku.

Naturę pierścieni Saturna próbował wyjaśnić szkocki fizyk James Clerke Maxwell, który w 1857 roku doszedł do wniosku, że muszą się one składać z licznych

eprasa.pl 3ca39600ed

niewielkich fragmentów materii obiegających planetę po niezależnych orbitach. Wcześniej Pierre Simon de Laplace (1749-1827) – jeden z największych autorytetów w dziedzinie mechaniki nieba – wskazywał, że sztywny pierścień z luką pośrodku (tzw. przerwą Cassiniego, od nazwiska odkrywcy największej przerwy w pierścieniach Saturna Giovanniego Cassiniego) nie ma prawa istnieć. Maxwell podzielał pogląd Laplace'a, że grawitacja planety i ruch obrotowy pierścienia spowodowałyby szybko jego rozerwanie, jednak wprowadził pewne udoskonalenia do jego wizji bardzo wielu cienkich pierścieni, wirujących wokół osi obrotu planety, tak że pozostają w równowadze między siłą dośrodkową, którą stanowi siła grawitacji a siłą odśrodkową. Dziś wiemy, że miał rację.

Gazowy olbrzym

Sam Saturn, „udekorowany" przez system pierścieni, to blady, biało-kremowy gazowy olbrzym, rozmiarami zbliżony do Jowisza. Masę ma jednak wyraźnie mniejszą, więc i jego gęstość musi być znacznie mniejsza. I rzeczywiście – okazuje się, że Saturn ma średnią gęstość mniejszą od gęstości wody wynoszącą 0,7 g/cm³. Teoretycznie mógłby więc pływać po wodzie, podobnie jak góra lodowa, oczywiście gdyby znalazł się odpowiednio duży i głęboki basen, w którym mógłby się zanurzyć. Problem w tym, że gdy próbujemy to sobie w praktyce wyobrazić, np. w postaci hipotetycznej, pokrytej oceanem planety wodnej, po której Saturn mógłby pływać, to dochodzimy do wniosku, że planeta ta musiałaby mieć rozmiary porównywalne ze Słońcem. Wtedy jednak, ze względu na olbrzymią masę i ciśnienie panujące w środku takiego obiektu, należałoby mówić raczej o gwieździe, a nie planecie. Gwiazdy zaś, jak wiadomo, nie mają warunków do utrzymania wody w stanie ciekłym z uwagi na reakcje syntezy termojądrowej. Poza tym trzeba pamiętać, że poszczególne warstwy Saturna mają bardzo zróżnicowaną gęstość (metaliczne jądro jest znacznie gęstsze niż gazowa otoczka), przez co, nawet gdyby taki zbiornik ciekłej wody wielkości Słońca mógł istnieć, to na skutek ciążenia Saturn raczej by się w nim rozpadł, niż pływał niczym góra lodowa.

Tak mała gęstość planety jak 0,7 g/cm^3 daje się wytłumaczyć grubą warstwą ciekłego wodoru cząsteczkowego. Warstwa ta ma grubość około 30 tys. km, czyli połowę promienia Saturna! Głębiej znajdują się warstwa ciekłego wodoru metalicznego i krzemianowo-metaliczne jądro. Atmosfera Saturna zbudowana jest natomiast przede wszystkim z wodoru i helu. Podobną budowę ma Jowisz, jednak proporcje w grubości warstw obu planet są różne i stąd różnice w średniej gęstości.

Analogicznie do Jowisza Saturn wypromieniowuje około dwa razy więcej energii niż dociera do niego ze Słońca, a ciepło wypływające ze stygnącego wnętrza planety stanowi najważniejszy czynnik wpływający na stan jej atmosfery. Saturnowe zjawiska atmosferyczne są jednak znacznie mniej różnorodne niż te na Jowiszu, charakteryzują się też mniejszą gwałtownością. Wynika to z tego, że nadwyżka promieniowania, przypadająca na podczerwień (bo w końcu chodzi tu o promieniowanie cieplne), jest po prostu wyraźnie mniejsza w przypadku Saturna.

Pasy na Saturnie nie są tak wyraźne jak pasy na Jowiszu, mają też znacznie mniej zróżnicowane barwy. Podczas gdy wznoszące i opadające jowiszowe prądy atmosferyczne tworzą pasiasty „deseń" niemal we wszystkich kolorach tęczy, w atmosferze Saturna spotykamy głównie biel i odcienie barwy żółtej, które łagodnie kontrastują z zielono – błękitnym zabarwieniem okolic podbiegunowych. Pierścienie Saturna na licznych fotografiach wydają się mieć bardziej zróżnicowaną kolorystykę; trzeba jednak pamiętać, że ich barwy są często sztucznie wzmocnione za pomocą techniki komputerowej.

Spłaszczona planeta

Podobnie jak i Jowisz, Saturn rotuje szybko; doba trwa na nim średnio zaledwie 10 godzin i 16 minut. Analogicznie do Słońca Saturn wiruje najszybciej na równiku, a wolniej blisko biegunów, co daje dosyć ciekawe efekty. Gdyby Saturn miał stałą powierzchnię, to stojąc na jego równiku poruszalibyśmy się niczym satelita wystrzeliwany z powierzchni Ziemi z prędkością 10,2 km/s. Tyle, że z powodu znacznie większej prędkości ucieczki nie opuścilibyśmy dzięki rotacji planety jej powierzchni...

Szybki ruch wirowy sprawia, że Saturn jest wyraźnie spłaszczony. Średnica równikowa planety jest aż o 10% większa od średnicy biegunowej i wynosi 120 536 km. (dziewięć i pół razy więcej niż średnica równikowa Ziemi). Jak na planetę Saturn ma nietypowe spłaszczenie i efekt spłaszczenia Saturna jest dostrzegalny nawet przez amatorskie teleskopy. Nie wydaje się jednak szczególnie duży w porównaniu ze spłaszczeniem najbardziej wydłużonych gwiazd, jakie znamy. W szczególności Achernar – dziewiąta pod względem jasności gwiazda nocnego nieba – jest pod tym względem prawdziwym ewenementem. Widoczny na tle południowej części gwiazdozbioru Erydanu jaśniejszy składnik tej gwiazdy podwójnej (niewidocznej z Polski, ale z krajów dalekiego południa) ma największe spłaszczenie ze wszystkich znanych gwiazd i jak oceniono w 2003 roku, jego średnica równikowa jest większa od biegunowej aż o 55%. W tej konkurencji nawet Saturn nie ma szans.

Obserwatorium Manua Kea, foto - Dremastime

eprasa.pl 3ca39600ed

Księżycowy rekordzista

Jest za to jedna dziedzina, w której Saturn pozostaje bezkonkurencyjny. To liczba odkrytych księżyców. W marcu 2025 r. ogłoszono potwierdzenie odkrycia aż 128 nowych księżyców Saturna, co zwiększyło ich liczbę aż do 274. Tym samym Saturn umocnił się na pozycji lidera w ilości odkrytych księżyców w Układzie Słonecznym, zwiększając swoją przewagę nad Jowiszem, który ma ich obecnie 97. Wszystkich odkrytych naturalnych satelitów planet Układu Słonecznego jest już ponad 400, z czego większość należy właśnie do Saturna.

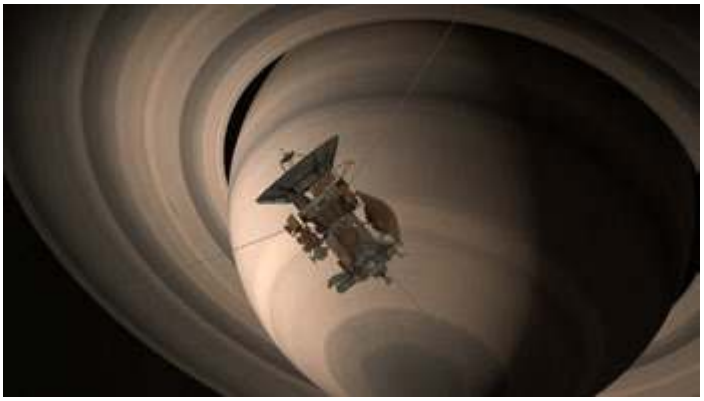
Wszystkie nowo odkryte księżyce Saturna mają średnicę od 2 km do 4 km i są zbyt małe, by utrzymać kulisty kształt – przypominają raczej małe planetoidy. Tych wystarczająco masywnych księżyców Saturna, by zachować kulisty kształt, jest tylko 7 i nie spodziewamy się, by to się miało zmienić – względnie duże obiekty wokół Saturna zostały już dawno odkryte i teraz odkrywane są po prostu coraz mniejsze.

Odkrycia 128 nowych księżyców Saturna dokonał międzynarodowy zespół astronomów pod kierunkiem Kanadyjczyka Edwarda Ashtona z Academia Sinica w Tajpej na Tajwanie. Do obserwacji wykorzystali oni Teleskop Kanadyjsko-Francusko-Hawajski (CFHT) o średnicy zwierciadła 3,6 metra znajdujący się na szczycie Mauna Kea na Hawajach. Teleskop umożliwia wykonywanie wielogodzinnych ekspozycji, które następnie mogą być składane ze sobą. Wykonując serie zdjęć i dostosowując je do ruchu Saturna po niebie można było następnie nałożyć na siebie kolejne ekspozycje uzyskując wystarczająco ostre obrazy, by zobaczyć obiekty, które nie byłyby widoczne na pojedynczych ekspozycjach. Ta technika obserwacyjna, którą wykorzystano z uwzględnieniem ruchu Saturna po niebie nazywana jest w żargonie astronomicznym „shift and stack", co znaczy dosłownie „przesuń i ułóż w stos".

Największego z księżyców Saturna – Tytana – zobaczymy już przez mały teleskop jako jedną z „gwiazdek" przy samym Saturnie (warto sprawdzić np. w programie Stellarium aktualne położenie, by nie pomylić z jakąś gwiazdą). Jest jedynym znanym księżycem z gęstą atmosferą (złożoną głównie z metanu i azotu), a na jego powierzchni ze względu na niską temperaturę znajdują się zbiorniki ciekłego metanu – zasoby, które z pewnością będą kiedyś wykorzystywane jako paliwo przy przyszłej eksploracji Układu Słonecznego. W styczniu 2005 r. na Tytanie wylądował lądownik Huygens, który oddzielił się od sondy Cassini, co pozostaje do dziś najdalszym lądowaniem na innym ciele niebieskim w Układzie Słonecznym.

Inny ciekawy księżyc Saturna to Enceladus, spod którego lodowej skorupy tryskają gejzery. Nie mniej egzotyczny jest księżyc Phoebe, od którego w czerwcu 2004 r. rozpoczęły się wnikliwe, pionierskie badania księżyców Saturna przez sondę Cassini. Wcześniej sonda, która na kilkanaście lat stała się sztucznym księżycem Saturna, zarejestrowała rzadkie zjawisko połączenia się dwóch wielkich burz w atmosferze planety o średnicy ok. 1000 km każda.

Dzięki analizie danych widmowych i doskonałej jakości zdjęć odkryto m.in., że powierzchnia Phoebe znacznie różni się od powierzchni planetoid z głównego pasa, oddzielającego planety ziemiopodobne od gazowych (występują na niej dwutlenek węgla, lód wodny, minerały zawierające wodę oraz rozmieszczone chaotycznie obszary, zawierające proste molekuły organiczne).



Satelita Cassini zbliża się do Saturna. Animacja komputerowa inspirowana elementami NASA, foto – Dremastime

W czerwcu 2004 r. uczeni mogli po raz pierwszy obserwować szczegóły obiektu tego typu, a otrzymane wyniki potwierdziły wcześniejsze przypuszczenia o pochodzeniu Phoebe z dalekiego Pasa Kuipera, rozciągającego się za orbitą Neptuna. Sonda Cassini dostarczyła też istotnych danych spektroskopowych, przemawiających za istnieniem w pierścieniach Saturna cząstek podobnych do ciemnego materiału odkrytego na Phoebe. Utrata pyłu przez Phoebe oraz kriowulkanizm na Enceladusie odpowiadający za wyrzucanie drobin lodu w gejzerach, wymieniane są jako mechanizmy zasilające pierścienie Saturna.

Z kolei na obrzeżach pierścieni sonda Cassini wykryła tlen atomowy, który teoretycznie mógłby pochodzić z niedawnej kolizji jakiegoś ciała z materią pierścieni. Wskazuje to, że zderzenia w okolicach Saturna mogą być kolejnym mechanizmem zasilającym pierścienie w materię. W 2017 r. sonda zakończyła swą owocną misję wlatując w zaplanowany sposób w chmury Saturna i przekazując do końca drogą radiową dane naukowe o stanie atmosfery gazowego giganta zanim uległa zniszczeniu po zanurzeniu się w tej gazowej planecie.

Proste doświadczenie – „znikające" pierścienie Saturna

Zadanie: zbuduj prosty model Saturna z pierścieniami. Do zbudowania modelu Saturna potrzebujemy następujących rzeczy: piłki (np. tenisowej albo futbolowej), taśmy klejącej, pierścienia wyciętego z kartonu.

Weź piłkę i wytnij z kartonu okrągły pierścień z otworem większym od piłki. Przymocuj go do piłki taśmą klejącą, tak by przypominał pierścienie Saturna (zachowaj odstęp między pierścieniami a planetą). Następnie obracaj tak zbudowanym modelem Saturna w różne strony i oglądaj go z różnych odległości. Możesz też zawiesić model na sznurku i sam zmieniać względem niego położenie. Będzie to odpowiadało różnym warunkom obserwacji Saturna przez obserwatora z Ziemi – raz ledwie widać „uszy" Saturna, innym razem pierścień jest dobrze wyeksponowany. A gdy nasz papierowy pierścień umieścimy na wysokości oczu, tak by nasz wzrok padał wzdłuż jego krawędzi, to z większej odległości możemy go nawet nie zauważyć, podobnie jak pierścienie Saturna są niewidoczne, gdy planeta ustawi się względem nas krawędzią swych pierścieni.

Krzysztof Kowalczyk

eprasa.pl 3ca39600ed

WYDANIE SPECJALNE *FIZYKI W SZKOLE*

WERSJA ELEKTRONICZNA – PLIK PDF

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

Cena 25 zł
(w tym 8% VAT)

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

eprasa.pl 3ca39600ed

Odkrycia
Polska Edycja EUCYS

Najbardziej prestiżowy konkurs uczniowskich prac badawczych

- interdyscyplinarny (nauki ścisłe, przyrodnicze, nauki społeczne)
- gwarancja rzetelnej oceny
- wsparcie merytoryczne
- nagrody finansowe i staże
- cenne kontakty naukowe

Na prace czekamy do 31 grudnia 2025

Wymyśliłeś? Zbadałeś? Pokaż!

więcej informacji: fundusz.org/odkrycia

Weź udział w kolejnej edycji EUCYS!

Polska Edycja EUCYS
European Union Contest for Young Scientists

Organizator: Fundusz ZDOLNI

Patronat: PAN

EUCYS w Polsce wspiera: HUAWEI

eprasa.pl 3ca39600ed