

FIZYKA

w Szkole z Astronomią

CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI

377 (LXIV) indeks 35810X Nr 6 listopad/grudzień 2022 CENA 30,00 zł (w tym 8% VAT)

Tajniki spintroniki

Informacja niesiona przez jeden elektron

Badania rentgenowskie

– fizyczne podstawy
diagnostyki medycznej



Robert Hooke

i jego doświadczenia

Ruch obrotowy Ziemi

i co z niego wynika

Bipryzmat Fresnela

w szkolnej edukacji

Ulotne cząstki elementarne

NEUTRINA

ISSN 0426-3383



9 770426 338100



**Cena
15 zł**

w tym 8% VAT

**Czym są wulkany
i na czym polega
zjawisko
wulkanizmu?**

**Dlaczego wybuchają?
Kiedy wybuchają?
Jak wybuchają?
Gdzie wybuchają?**

WYDANIE SPECJALNE
Wersja elektroniczna – plik PDF

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

eprasa.pl 9f02696fb2

Drodzy Czytelnicy!

Oddajemy wam w ręce, ostatni w tym roku, numer „Fizyki w Szkole”. Rok ten nie należał do łatwych. Na pewno najważniejszą rzeczą zapamiętaną w tym roku była pandemia. Ze słowem pandemia w oświacie nierozzerwalnie wiąże się termin zdalne nauczanie. Pojęcie to ma złą sławę zarówno wśród nauczycieli jak i wśród uczniów. Na szczęście udało nam się przetrwać ten trudny czas i szczęśliwie dotrzeć do końca roku. Miejmy nadzieję, że przyszły będzie lepszy.

W tym numerze do grona naszych autorek dołączyła Pani Joanna Zalipska z NCBJ. Swój pierwszy artykuł poświęciła fizyce neutrin. Są to jedne z najbardziej fascynujących cząstek elementarnych. Ich niezwykła przenikliwość, a jednocześnie wszechobecność od dawna rozpalają umysły naukowców i pasjonatów nauki. Deficyt neutrin słonecznych był swego czasu wielkim problemem fizyków teoretycznych. Pani Zalipska opisała przystępnie większość tych zagadnień jednocześnie poszerzając temat o współczesne detektory neutrin.

Innymi debiutantkami na łamach „Fizyki w Szkole” są Panie Justyna Śliwińska i Joanna Nastula, które wspólnie opublikowały artykuł o ruchu obrotowym Ziemi. Ten z pozoru banalny temat kryje bowiem w sobie wiele zawiloci. Przede wszystkim prędkość wirowania Ziemi wcale nie jest stała. Zmienia się bowiem zarówno w krótkim, jak i dłuższym czasie. Wynika to zarówno z oddziaływań z innymi obiektami w naszym Układzie Słonecznym, jak i z elastycznej do pewnego stopnia natury samej Ziemi. Osoby chcące się dowiedzieć więcej na ten temat, jak też tego jakie ruch wirowy Ziemi ma konsekwencje, zapraszam do lektury tego artykułu. Innym, których nie wymieniałem, także.

Na sam koniec w imieniu redakcji chcę życzyć wszystkim naszym Czytelnikom Szczęśliwego Nowego Roku!

Z poważaniem

Zbigniew Wiśniewski

Wesołych Świąt i Szczęśliwego Nowego Roku! 2022



Fizyka wczoraj, dziś, jutro

- 4** Neutrina – ulotne cząstki elementarne ■ Joanna Zalipska
- 10** Tajniki spintroniki ■ Wioletta Kopec, Mirosław Sawczak
Współczesny rozwój techniki zapoczątkował również erę urządzeń, w których informacja niesiona jest przez zaledwie jeden elektron.
- 15** Sposób na „zobaczenie” wiązań atomowych ■ PAP, Nauka w Polsce, Karolina Duszczyk
- 16** Fizyczne podstawy badań rentgenowskich kości i stawów ■ Tomasz Kubiak
Badania rentgenowskie już od ponad wieku są fundamentem diagnostyki medycznej. Ich rola zawsze była szczególnie istotna w ortopedii i traumatologii. Współcześnie trudno nawet wyobrazić sobie rozpoznanie złamania kości czy zwichnięcia stawu bez wykonania zdjęcia rtg.
- 22** Dawki promieniowania jonizującego ■ Wioletta Dynkowska



Z naszych lekcji

- 26** Żywoty fizyków. Robert Hooke (1635-1703) ■ Tadeusz Wibig
- 28** O fizyce żeglowania ■ Marta Waclawczyk
- 31** Bipryzmat Fresnela w szkolnej edukacji ■ Kazimierz Mikulski
- 34** Prawa fizyki a filozofia ■ Waldemar Reńda
- 39** O wiejskiej szkole ■ Jerzy Kuczyński
- 40** Jaka szkoła, jaka edukacja... ■ Waldemar Reńda



Astronomia dla każdego

- 42** Znaczenie ruchu obrotowego Ziemi ■ Justyna Śliwińska, Jolanta Nastula
Ruch obrotowy naszej planety obserwujemy na co dzień. Ziemia cały czas się kręci, nieustannie wpływając na nasze życie codzienne.
- 47** Kompendium astronomiczne – wybrane pojęcia i zagadnienia – cz. 6 ■ Marcin Wesołowski, Piotr Gronkowski



FIZYKA
w Szkole z Astronomią

NUMER 6 LISTOPAD/GRUDZIEŃ 2021
377 (LXIII) indeks 35810X ISSN 0426-3383

CENA 30,00 zł
(w tym 8% VAT)

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

Zdjęcie na okładce: Adobe Stock

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



Neutrino – ulotne cząstki elementarne

Neutrino to cząstki elementarne, które od prawie stulecia fascynują fizyków. Jest ich bardzo dużo we Wszechświecie – w ciągu sekundy przenika przez ludzkie ciało 100 000 000 000 000 neutrin pochodzących ze Słońca. Z drugiej strony neutrino przeniknie przez 10 000 000 000 000 000 000 ludzi, zanim oddziałuje w człowieku. Czyli neutrino rzadko oddziałuje z materią, przez co bardzo trudno jest je złapać.

Joanna **Zalipska**

Fizycy wymyślili różne pułapki do badania neutrin. W chwili obecnej działa na świecie około 30 eksperymentów – doświadczeń naukowych dedykowanych badaniu tych tajemniczych cząstek. Artykuł ten będzie miał na celu przybliżenie kilku eksperymentów badających obecnie neutrina. Opowiemy jak te eksperymenty łapią neutrina, oraz co ciekawego o neutrinach mogą nam powiedzieć.

Co to jest neutrino?

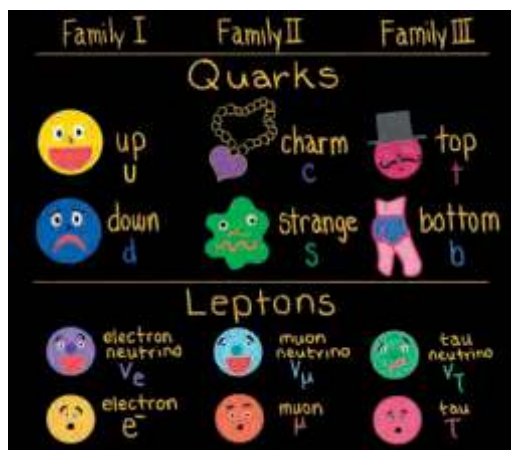
Zacznijmy od przybliżenia czytelnikowi, co to jest neutrino [1,2]. Ze szkoły wiemy, że otaczająca nas materia zbudowana jest z cząsteczek w skład których wchodzi atomy. Atomy natomiast zbudowane są z jądra i krążących wokół nich elektronów. Elektron jest cząstką elementarną, czyli niepodzielnym elementem materii o ładunku ujemnym. Natomiast jądra atomowe mają swoją wewnętrzną strukturę. A mianowicie zbudowane są one z cząstek zwanych protonami i neutronami. Proton to cząstka o ładunku dodatnim, natomiast neutron ma zerowy ładunek ani proton, ani neutron nie są niepodzielne. Zbudowane są one z mniejszych cegiełek materii o ułamkowym ładunku zwanych kwarkami.

Kwarki to niepodzielne elementy materii, a więc cząstki elementarne. Znamy ich sześć, jak pokazuje to Rys.1 (z angielskiego up, down, charm, strange, top, bottom). Kwarki nie występują w przyrodzie samodzielnie. Łączą się one w pary lub trójki tworząc różne cząstki, między innymi protony (up, up, down) i neutrony (up, down, down).

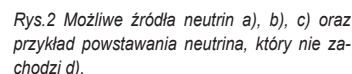
Nie są to jedyne niepodzielne budulce materii występujące we Wszechświecie.

Jak już było wcześniej wspomniane, do innej rodziny cząstek, tzw. leptonów, należy elektron, który krąży wokół jądra atomowego. Elektron ma swoich cięższych towarzyszy: mion, μ i lepton tau, τ , które również mają ładunek ujemny. Do kompletu te naładowane leptony mają swoich neutralnych towarzyszy o zerowym ładunku, które nazywamy neutrinami. I tak jak mamy elektron, mion i taon, tak istnieją trzy neutrino: neutrino elektronowe – ν_e , neutrino mionowe – ν_μ i neutrino taonowe – ν_τ .

Fizycy mówią, że neutrino mają trzy zapachy (elektronowy, mionowy i taonowy). Wyobraźmy sobie źródło



Rys. 1. Trzy rodziny cząstek elementarnych. Naładowane ułamkowo kwarki up, down, charm, strange, top, bottom, oraz rodziny leptonów neutralnych - neutrino elektronowe, neutrino mionowe i neutrino taonowe, i naładowanych, czyli elektronu, mionu i taonu.



oddziaływania promieniowania kosmicznego z atmosferą. Także reaktory jądrowe są źródłem neutrin. Do komple-
tu możemy produkować neutrina sami w akceleratorach-
przyspieszaczach cząstek, które działają np. w Japonii
(JPARC, wiązka T2K), albo w Stanach Zjednoczonych
(Fermilab, wiązka NuMi).

Gdy chcemy badać neutrino, patrzymy na to, jak neutrino oddziałuje z materią. Kiedy neutrino oddziałuje z atomami materii (przez tzw. prądy naładowane) w detektorze, tworzy naładowany lepton (elektron – e , mion – μ , taon – τ), który ma zawsze ten sam zapach co oddziałujące neutrino, jak ilustruje to rys. 3. Czyli jeśli w wyniku oddziaływania neutrino z materią obserwujemy elektron, to możemy być pewni, że oddziaływało neutrino elektronowe. Kiedy widzimy mion, oddziaływało neutrino mionowe itd. Uświadomienie sobie tego faktu jest ważne do zrozumienia innej właściwości neutrin – a mianowicie oscylacji, czyli samoczynnej zamiany tożsamości neutrin, która ta właściwość jest obecnie badana przez wiele działających eksperymentów, do której opisu przejdziemy w dalszej części artykułu.

Jednym z pierwszych takich detektorów był wybudowany w latach 80. ubiegłego stulecia detektor Kamiokande (3000 ton wody). Obecnie działa większy detektor Super-Kamiokande (50 000 ton wody) i planowany jest kolejny eksperyment Hyper-Kamiokande (260 000 ton wody).

Historia lubi płatać figle, ponieważ detektor Kamiokande zawierający 3000 ton wody został wybudowany w celu poszukiwania rozpadu protonu. Jak to tej pory żaden z istniejących detektorów nie zarejestrował rozpadu protonu, za to eksperyment Kamiokande odegrał znaczącą rolę w badaniu neutrin. Okazał się on być bardzo dobrym detektorem do rejestracji neutrin pochodzących ze Słońca. Badał on tzw. anomalię neutrin słonecznych. Wiele eksperymentów rejestrowało znacznie mniej neutrin elektronowych, ν_e , pochodzących ze Słońca niż wskazywałby na to Standardowy Model Słońca. Dopiero eksperyment SNO w początku lat 2000, który był czuły na badanie reakcji wszystkich zapachów neutrin (ν_e , ν_μ , ν_τ), wykazał, że strumień wszystkich rodzajów neutrin pochodzących ze Słońca jest zgodny z przewidywaniami Modelu Słońca [3]. Natomiast rzeczywiście neutrin elektronowych jest mniej niż pierwotnie powstaje w Słońcu. Te neutrina elektrono-



we, zanim dotrą na Ziemię zmieniają się w neutrino o innym zapachu. Dowodząc tego detektor SNO wykazał, że neutrino potrafią samoczynnie zmieniać swoją tożsamość, a więc oscylują – jak zjawisko to nazywają fizycy cząstek.

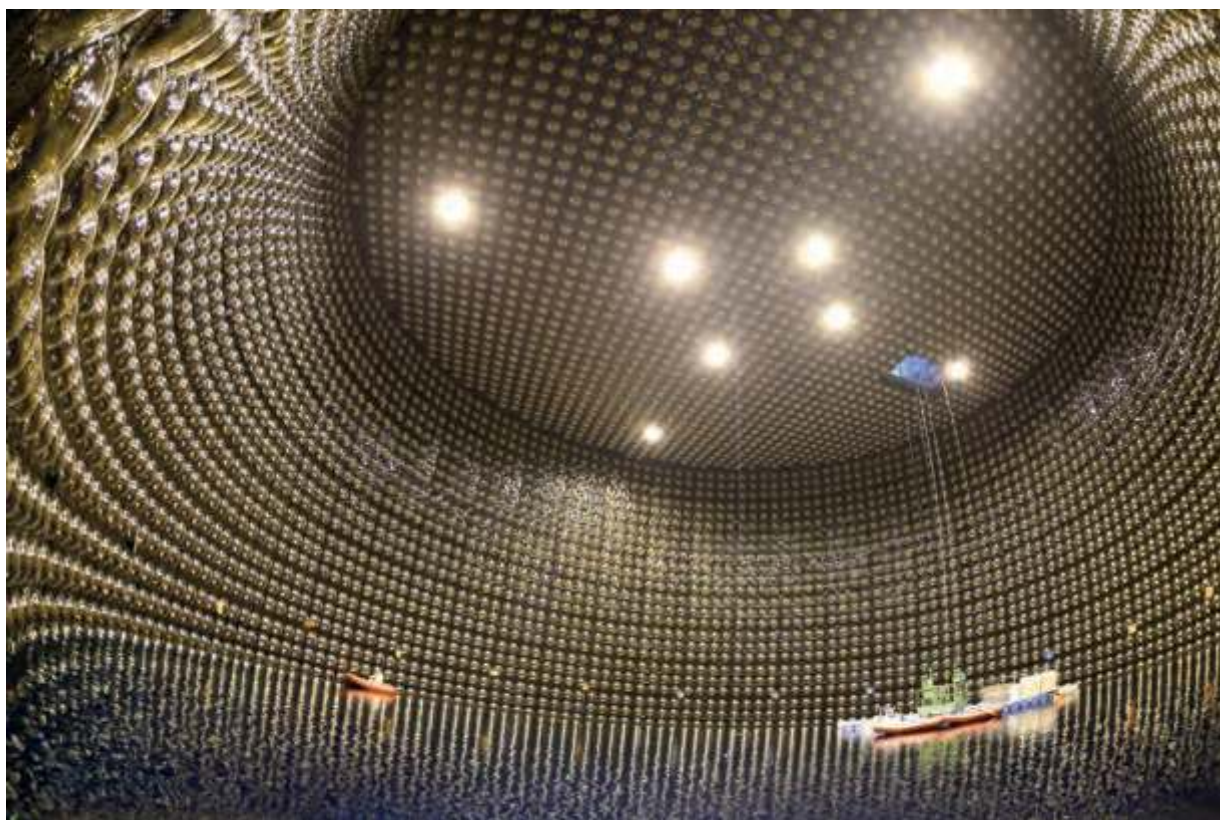
Eksperyment Kamiokande miał również szczęście zarejestrować neutrino pochodzące z wybuchu supernowej w roku 1987, będąc pionierem w neutrinowych badaniach astrofizycznych. W 2002 roku została za to przyznana nagroda Nobla dla prof. Masatoshi Koshiiby założyciela eksperymentu Kamiokande [4].

Ten duży zbiornik wodny zlokalizowany w Japonii był w stanie rejestrować również oddziaływania neutrin powstałych w atmosferze ziemskiej w wyniku oddziaływania promieniowania kosmicznego z atmosferą. Zaobserwował on asymetrię neutrin mionowych, ν_μ , przychodzących z góry i z dołu detektora, ale okazał się być zbyt małym eksperymentem, żeby wyciągnąć statystycznie znaczące wnioski z tej obserwacji. Dlatego Japończycy postanowili wybudować większy detektor Super-Kamiokande, który działa do dziś [5]. Super-Kamiokande to zbiornik w kształcie walca wypełniony 50 000 tonami ultraczystej wody i wyposażony w dziesiątki tysięcy fotoczujników (tzw. fotopowielaczy), Rys.5. Zbiornik ten znajduje się we wnętrzu góry Ikenoyama w Alpach Japońskich, jakiś kilometr pod ziemią. Otaczające zbiornik skały pozwalają zredukować tło pochodzące od mionów kosmicznych, stanowiących tło do interesujących nas oddziaływań neutrin, do zanedbywalnego poziomu.

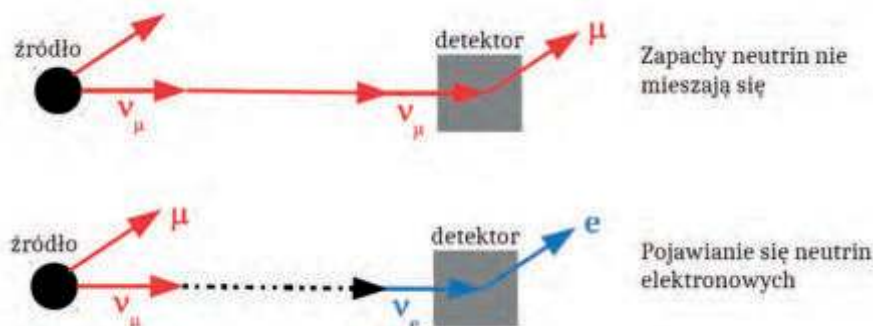
Zjawisko Czerenkowa

Sama metoda pomiaru oddziaływania neutrina w wodzie oparta jest na zjawisku Czerenkowa. Gdy neutrino mionowe oddziałuje w wodzie przez tzw. prądy naładowane powstaje mion ($\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$). Mion następnie porusza się w ośrodku, którym wypełniony jest detektor, czyli w wodzie. Jeśli mion porusza się z prędkością większą niż prędkość światła w wodzie, to emitowane jest promieniowanie Czerenkowa, podobnie do akustycznej fali uderzeniowej dla odrzutowca poruszającego się w powietrzu. Promieniowanie Czerenkowa tworzy pierścienie światła na ścianach detektora, które rejestrowane są przez umieszczone tam fotoczujniki. Analiza wyglądu tych pierścieni pozwala na odróżnieniu pierścieni pochodzących od elektronu powstałego w wyniku oddziaływania neutrina elektronowego od mionu pochodzącego z oddziaływania neutrina mionowego w wodzie, a więc odróżnienia neutrina elektronowego od mionowego. Dodatkowo informacja o czasie przyjscia sygnału w pierścieniu czerenkowskim pozwala na rekonstrukcję kierunku, z którego przybiegało neutrino.

Podsumowując, z detektora Czerenkowa, którym jest wielki zbiornik wodny Super-Kamiokande mamy informację o kierunku ruchu neutrina jak i rozróżniamy jego zapach. (Warto w tym miejscu skomentować, że neutrino taonowe nie może zostać zarejestrowane w detektorze wodnym, ponieważ próg na wyświecenie światła Czerenkowa jest większy niż typowa energia neutrin atmo-



Rys.5 Wnętrze detektora Super-Kamiokande. Na zdjęciu widoczne są fotoczujniki umieszczone na ścianach skierowane do wewnątrz. Zadaniem ich jest rejestrować światło Czerenkowa pochodzące od przechodzących mionów i elektronów powstałych w wyniku oddziaływań neutrin. Na zdjęciu detektor opróżniony jest z wody, ale w trakcie pracy cały ten zbiornik wypełniony jest 50 kilotonami ultraczystej wody.



Rys.6 a) Źródło neutrino mionowego i jego detekcja w przypadku, kiedy neutrino się nie mieszają. b) Ilustracja oscylacji neutrino mionowego powstałego w źródle w neutrino elektronowe rejestrowane w detektorze.

sferycznych. Dodatkowo wyprodukowany lepton tau jest bardzo ciężki i szybko się rozpada.)

Eksperyment Super-Kamiokande mierzy neutrino mionowe, które powstają w atmosferze i jest w stanie rozróżnić po rekonstrukcji kierunku, które z tych neutrino przyszło z góry, a które z dołu detektora. Neutrino przychodzące z dołu powstały w atmosferze po drugiej stronie kuli ziemskiej i żeby dotrzeć do detektora musiały przeniknąć przez całą Ziemię zanim oddziaływały w detektorze. Okazało się, że eksperymencie Super-Kamiokande widzi niedobór neutrino przychodzących z dołu, co zostało zinterpretowane jako oscylacje neutrino mionowych. Neutrino mionowe przechodząc przez odległość równą średnicy kuli ziemskiej samoczynnie przemienia się w neutrino taonowe, mówimy, że zachodzą oscylacje neutrino mionowych w taonowe ($\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$).

Odkrycie to razem z odkryciem oscylacji w sektorze neutrino słonecznych przez eksperymencie SNO, o czym była mowa wcześniej w artykule, zostały nagrodzone w 2015 roku przyznaniem nagrody Nobla dla głównych odkrywców, którymi byli ze strony japońskiej prof. Takaaki Kajita, a ze strony kanadyjskiej prof. Arthur McDonald [6].

Eksperyment T2K

Oscylacje neutrino mionowych bada się również przy użyciu sztucznie wyprodukowanych wiązek neutrino. Jednym z takich doświadczeń fizycznych jest eksperymencie T2K zlokalizowany w Japonii [7]. W eksperymencie tym neutrino produkowane są w akceleratorze w laboratorium JPARC, a rejestrowane 295 km dalej w znanym nam już detektorze wodnym Super-Kamiokande. W pierścieniu akceleratora przyspieszane są protony do energii 30 GeV, które następnie kierowane są na grafitową tarczę. W wyniku oddziaływania protonów z tarczą powstają wtórne cząstki takie jak piony czy kaony. Następnie umieszczone na osi wiązki rogi magnetyczne wybierają dodatnio naładowane piony – π^+ . Piony kierowane są do rury rozpadowej, gdzie rozpadając się dają początek wiązce neutrino mionowych ($\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$). Można też zmienić kierunek prądu w rogach magnetycznych, żeby wybierać nie dodatnio, ale ujemnie naładowane piony. Wtedy w wyniku rozpadu pionów ujemnych w rurze rozpadowej powstają antyneutrino mionowe ($\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$) – antycząstka neutrino mionowego, $\bar{\nu}_\mu$, analogicznie jak dla ujemnie naładowanego elektronu (e^-) antycząstką jest pozytywnie naładowany elektron zwany pozytronem (e^+).

Spróbujmy teraz zrozumieć proces samoczynnej transformacji neutrino jednego rodzaju w inne, czyli oscylacji neutrino. Jednym z procesów po raz pierwszy zarejestrowanych przez eksperymencie T2K są oscylacje neutrino mionowych z wiązki w neutrino elektronowe ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$), które zaszły na drodze 295 km od punktu produkcji neutrino przy akceleratorze do miejsca, gdzie zostają one zarejestrowane, czyli w detektorze Super-Kamiokande.

Produkowana wiązka neutrino zawierała w przybliżeniu tylko neutrino mionowe, ν_μ , natomiast w detektorze Super-Kamiokande zarejestrowano również oddziaływania neutrino elektronowych, ν_e , co świadczy o tym, że część wyprodukowanych neutrino mionowych przemieniła się w neutrino elektronowe, których nie ma w pierwotnie wyprodukowanej wiązce. Schematycznie proces oscylacji neutrino pokazany jest na rysunku Rys.6 b). To jest tak jakby z gałęzi jabłoni zaczęło spadać jabłko, ale na ziemię spadała gruszka. W czasie lotu między punktem produkcji a punktem detekcji zaszła samoczynna transformacja neutrino mionowego w elektronowe ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$). Jak to jest możliwe?

Neutrino, o których mówiliśmy do tej pory, mają określony rodzaj – zapach, fizycy mówią, że są one stanami własnymi zapachu (ν_e, ν_μ, ν_τ). Jednakże neutrino te nie mają określonej masy. Dobrze określoną masę mają stany ν_1, ν_2 i ν_3 , o masach m_1, m_2 i m_3 , które fizycy nazywają stanami własnymi masy.

Stany zapachu są kombinacją liniową 3 stanów masy neutrino, z których każde oddzielnie propaguje się w czasoprzestrzeni zgodnie z równaniem Schrodingera. Dla dwu zapachów neutrino, macierz mieszania wygląda następująco:

$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

Ponieważ stany własne masy inaczej się propagują w czasoprzestrzeni, to po przebyciu pewnej odległości może się okazać, że początkowa kombinacja ν_1, ν_2 i ν_3 , która odpowiadała neutrino mionowemu, ν_μ , będzie odpowiadała neutrino elektronowemu, ν_e . W uproszczonym przypadku dwu zapachowym, czyli gdyby istniały tylko dwa zapachy neutrino, prawdopodobieństwo przemiany neutrino – oscylacji opisuje się wzorem:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2(\Delta m_{21}^2 L/4E),$$

gdzie $\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2$ to różnica kwadratów mas neutrino, ν_1, ν_2 , L – odległość, na której mierzy się oscylacje, a E – energia neutrino.

Jak widać ze wzoru, prawdopodobieństwo oscylacji jest różne od zera, kiedy spełnione są dwa warunki. Po pierwsze kąt θ jest różny od zera, czyli zachodzi mieszanie neutrin. Po drugie różnica kwadratów mas neutrin, Δm_{21}^2 , musi być różna od zera, co dowodzi, że co najmniej jedno z dwu neutrin musi mieć niezerową masę. Ponieważ proces oscylacji neutrin został zaobserwowany zarówno dla neutrin słonecznych, jak i atmosferycznych, a później potwierdzony przez eksperymenty akceleratorowe, dowodzi to, że neutrina mają masę i się mieszają.

Dla 3 zapachów neutrin mamy trzy kąty mieszania θ_{12} , θ_{13} i θ_{23} oraz dwie niezależne różnice kwadratów mas, Δm_{21}^2 , Δm_{32}^2 . Obecny stan wiedzy pokazuje, że wielkości te mają następujące wartości (tzw. *best fit parameter*): $\theta_{12}=33.82^{+0.78}_{-0.76}^\circ$, $\theta_{23}=48.6^{+1.0}_{-1.4}^\circ$, $\theta_{13}=8.60^{+0.13}_{-0.13}^\circ$, $\Delta m_{21}^2=7.39^{+0.21}_{-0.20}\times 10^{-5} eV^2$, $\Delta m_{32}^2=2.454^{+0.029}_{-0.031}\times 10^{-3} eV^2$ [8].

Jak oscylują neutrina?

Obecnie fizyków najbardziej fascynuje pytanie czy antyneutrina oscylują tak samo jak neutrina. Poszukujemy procesów, które zachodzą odmiennie dla materii i antymaterii, gdyż to mogłoby stanowić wyjaśnienie, dlaczego nasz Wszechświat zbudowany jest z materii. Jest to zagadkowe, ponieważ po Wielkim Wybuchu było tyle samo materii i antymaterii, a jednak w chwili obecnej nie obserwuje się antymaterii we Wszechświecie, jakieś procesy musiały zachodzić asymetryczne. Między innymi w eksperymencie T2K produkuje się wiązkę antyneutrin mionowych i bada proces oscylacji $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$, porównując go do oscylacji dla wiązki neutrinowej, czyli $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$. Wyniki sugerują, że prawdopodobieństwo zajścia transformacji dla antyneutrin jest różne niż dla neutrin [9]. Jednakże wyniki te są jeszcze dość nowe i inny eksperyment NovA, badający również to samo zjawisko, dostarcza innych wyników niż eksperyment T2K.

Dlatego też fizycy planują przeszłe eksperymenty, większe od obecnych i bardziej precyzyjne, które mają zbadać tę zagadkę. Jednym z nich jest wspomniana budowa detektora Hyper-Kamiokande [10] – trzeciego z kolei wielkiego wodnego detektora neutrin w Japonii, a drugim jest eksperyment DUNE bazujący na innej technice detekcji opartej na detektorze wypełnionym ciekłym argonem. Oba te eksperymenty będą miały na celu badanie oscylacji antyneutrin. Oba też mają rozpocząć swoją działalność w drugiej połowie lat dwudziestych.

Polskiej grupie neutrinowej bliższy jest eksperyment Hyper-Kamiokande, który to detektor ma być zbiornikiem wodnym zawierającym 260 000 ton wody, a więc pięciokrotnie więcej niż obecnie działający detektor Super-Kamiokande. Poza poszukiwaniem asymetrii w oscylacjach antyneutrin mionowych eksperyment ten będzie próbował odpowiedzieć na pytanie, które neutrino jest cięższe, będzie mógł rejestrować neutrina z wybuchu supernowej, jeśli taki wybuch będzie miał miejsce, oraz będzie poszukiwał sygnałów ciemnej materii.

Pułapki na neutrina

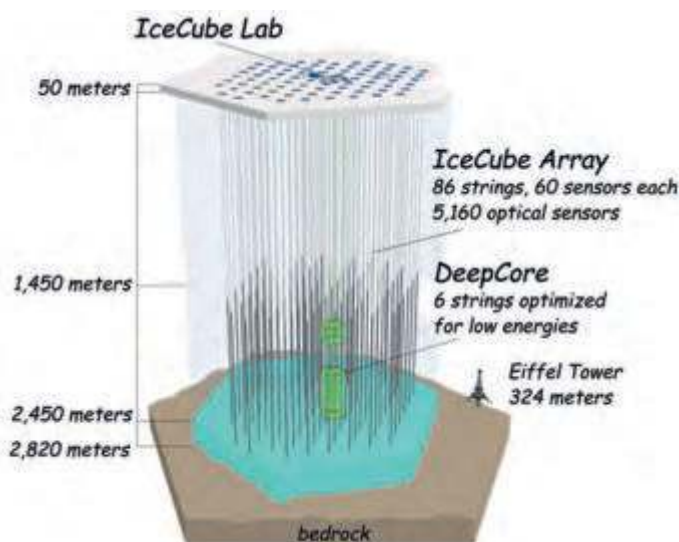
Na świecie istnieją jeszcze inne intrygujące wodne pułapki na neutrina. Jednym z takich eksperymentów jest IceCube zlokalizowany w lodach Antarktydy, Rys.7 [11].

W objętości $1 km^3$ ultraczystego lodu na Biegunie Południowym umieszczono 1450 metrów pod powierzchnią struny wyposażone w fotoczujniki. Struny te sięgają głębokości 2450 metrów. Detektor również mierzy światło Czerenkowa pochodzące z przechodzenia mionów wybitych przy oddziaływaniu neutrina, podobnie jak to robi omawiany wcześniej detektor Super-Kamiokande. Jednak neutrina, które mierzy IceCube, to zupełnie inne neutrina niż te badane przez Super-Kamiokande.

IceCube to eksperyment dedykowany astronomii neutrinowej. Neutrina przychodzące do nas z kosmosu umożliwiają identyfikację źródeł kosmicznych, czarnych dziur, rozbłysków gamma, wybuchów supernowych. Neutrina są elektrycznie obojętne, prawie bezmasowe (mają masę, ale bardzo znikomą), prawie nieabsorbowalne, przez co są dobrymi nośnikami informacji o procesach jądrowych zachodzących w odległym kosmosie.

Detektor IceCube zmierzył bardzo wysoko energetyczne neutrina o szacowanej energii 10 do 20 PeV , czyli 10 do $20 \times 10^{15} eV$. Dla porównania energie neutrin ze Słońca to typowo 1 eV , a te atmosferyczne czy produkowane w akceleratorach mają energię 1 GeV , czyli $10^9 eV$. Tak więc neutrina obserwowane na Biegunie Południowym są rzeczywiście bardzo wysoko energetyczne i pochodzą z odległego kosmosu. Dla porównania na Rys.8 pokazany jest jeden przypadek zarejestrowanego rozbłysku światła Czerenkowa w IceCube w porównaniu do obszaru zajmowanego przez miasto. Jeden przypadek zajmuje obszar kilometra kwadratowego.

Innym z ważnych pomiarów dokonanych przez ten detektor jest rejestracja neutrina pochodzącego z blazaru rodzaju bardzo jasnej galaktyki z super-masywną czarną dziurą w środku, która otoczona jest materią. Jasne jęty, czyli wiązki cząstek emitowane są z galaktyki. Wśród



Rys. 7. Schemat eksperymentu IceCube znajdującego się na Biegunie Południowym. Pokazane są struny wyposażone w detektory światła na głębokości od 1450 metrów do 2450 metrów. Cały detektor służy do badanie neutrin astrofizycznych, natomiast jego środkowa część tzw. DeepCore jest wyposażona w gęściej upakowane struny z fotoczujnikami i służy do pomiaru neutrin powstałych w atmosferze ziemskiej. Dla porównania w prawej dolnej części rysunku pokazana jest wieża Eiffla, w porównaniu do rozmiaru całego eksperymentu.

strumienia cząstek emitowane są neutrina i promieniowanie gamma, które rozchodzą się we Wszechświecie.

22 września 2017 roku IceCube wykrył wysokoenergetyczne neutrina o szacowanej energii 290 TeV , czyli $290 \times 10^{12} \text{ eV}$. Następnie teleskop Fermi umieszczony na orbicie okołoziemskiej zaobserwował wzmogłą emisję promieniowania gamma z blazaru. Czyli zaobserwowano aktywność blazaru dzięki rejestracji dwu sygnałów, wysokoenergetycznych neutrin i promieniowania gamma.

Do kompletu należałoby dodać, że część detektora IceCube jest gęściej wyposażona w sznury z fotoczujnikami, przez co może też mierzyć neutrina o niższych energiach, takie jak neutrina atmosferyczne. Ta część detektora zwana DeepCore pozwoliła na potwierdzenie, że neutrina atmosferyczne oscylują – zmieniają swoją tożsamość, tak jak to wykazał eksperyment Super-Kamiokande. Tak więc fizycy zyskali potwierdzenie swoich wcześniejszych pomiarów przy użyciu innego detektora/eksperymentu.

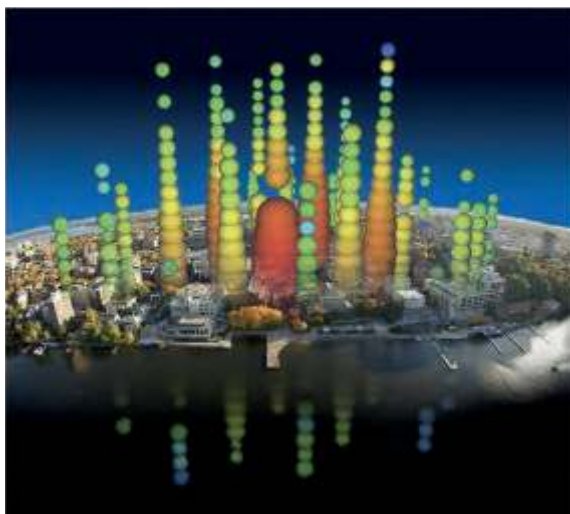
Nowe eksperymenty

Jeszcze innym eksperymentem, który w tej chwili jest konstruowany, jest detektor KM3Net zlokalizowany w Morzu Śródziemnym. Jest to również wodny detektor Czerenkowa wykorzystujący wodę w Morzu Śródziemnym, gdzie montowane są struny z zamontowanymi na nich fotodetektorami – podobnie do eksperymentu IceCube [12]. Obecnie budowane są dwa detektory: ARCA dedykowany do pomiaru wysokoenergetycznych neutrin z kosmosu oraz ORCA służący do pomiaru neutrin atmosferycznych.

Eksperyment ARCA ma zajmować objętość 1 km^3 i znajdować się na głębokości około 3.5 km. Docelowo ma być wyposażony w 230 strun z fotoczujnikami, a obecnie działają 2 struny. Detektor ORCA ma zajmować znacznie mniejszą objętość 0.0036 km^3 , ma się znajdować na głębokości 2.5 km i mieć gęsto upakowane struny 115 fotoczujników, z których 6 jest obecnie już zamontowanych.

Mam nadzieję, że udało mi się zainteresować Państwa dynamicznie rozwijającą się dziedziną fizyki neutrin. Wodne pułapki na neutrina budowane są od lat 80 ubiegłego wieku i nadal są używane do badania neutrin. Wiele już o neutrinach wiemy, ale nie wszystkie zagadki zostały jeszcze rozwikłane. Wiemy, że neutrina mają masę, ale jeszcze nikomu nie udało się tej masy wyznaczyć. W eksperymentach oscylacyjnych, o których była mowa w artykule, jesteśmy czuli tylko na różnicę kwadratów mas neutrin. Istnieją też inne eksperymenty, które bezpośrednio próbują wyznaczyć masę neutrin. Jak na razie dostarczyły one informacji, że masa neutrina powinna być mniejsza niż 0.26 eV . Wiemy, że bardzo licznie we Wszechświecie występują neutrina pochodzące z Wielkiego Wybuchu. Ale ponieważ Wielki Wybuch był tak odległy, to energie tych neutrin są bardzo małe i nikt jeszcze nie wymyślił sposobu, jak te neutrina zmierzyć. Tak więc wiele pozostaje jeszcze do odkrycia.

W Polsce istnieje Grupa Neutrinowa – około 25 fizyków z wielu uczelni różnych miast, zaangażowanych głównie w eksperymenty T2K, Super-Kamiokande, Hyper-Kamio-



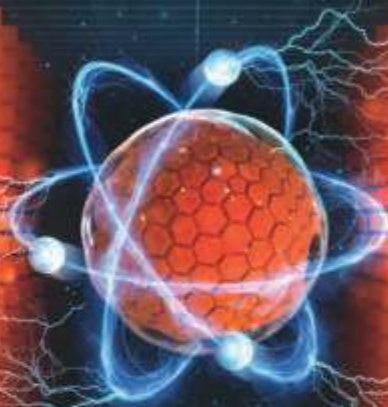
Rys.8 Przypadek oddziaływania neutrina pochodzącego z kosmosu w detektorze IceCube w porównaniu do obszaru zajmowanego przez miasto. Każdy z pierścieni ilustruje sygnał rejestrowany przez pojedynczy fotoczujnik. Wielkość pierścienia odzwierciedla ilość rejestrowanego światła Czerenkowa, natomiast kolor oznacza czas rejestracji sygnału (czerwony wcześniej, niebieski późno).

kande oraz KM3Net. Większość z nas to eksperymentatorzy badający właściwości neutrin w takich instytucjach jak Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Uniwersytet Warszawski, Instytut Fizyki Jądrowej w Krakowie oraz Uniwersytet Śląski w Katowicach. Mamy kolegów elektroników zaangażowanych w budowę fotoczujników i elektroniki odczytu na Politechnice Warszawskiej. W skład naszej grupy wchodzi również teoretycy z Uniwersytetu Wrocławskiego, skutecznie rozwijający program do modelowania oddziaływań neutrin w detektorze. Liczę na to, że dzięki temu artykułowi udało mi się przybliżyć Państwu tematykę badań, którą się na co dzień zajmujemy.

Joanna Zalińska

Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Warszawa

- [1] Wykład popularnonaukowy „Czego jeszcze nie wiemy o neutrinach” Joanna Zalińska, *Festiwal Nauki 2019*, upowszechniony na stronie wszechnica.org.pl, <https://wszechnica.org.pl/wyklad/czego-jeszcze-nie-wiemy-o-neutrinach/>
- [2] Strona poświęcona neutrinom na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego <https://www.fuw.edu.pl/~neutrina/>
- [3] „Nagroda Nobla dla neutrin i co dalej”, Joanna Zalińska, *Foton 131, Zima 2015*, <http://www.foton.if.uj.edu.pl/archiwum/2015/131>
- [4] Wywiad z Joanną Zalińską o Nagrodzie Nobla z 2002 roku, OtokoClub wrzesień 2019, archiwum <http://otokoclub.pl/>
- [5] Film popularnonaukowy „Super-Kamiokande: Advancing to the Next Wave of Discoveries” wyprodukowany przez Obserwatorium Kamioka Uniwersytetu w Tokio, dostępny na YouTube <https://www.youtube.com/watch?v=KJj2PusnkaQ>
- [6] Wywiad z Justyną Łagodą o Nagrodzie Nobla z 2015 roku, OtokoClub kwiecień 2019, archiwum <http://otokoclub.pl/>
- [7] Strona poświęcona eksperymentowi T2K <https://t2k-experiment.org/> gdzie w zakładkach „About T2K” oraz „About Neutrinos” można znaleźć ciekawe informacje przekazane w przystępny sposób.
- [8] Particle Data Group, <https://pdg.lbl.gov/>
- [9] Wywiad z prof. Janem Kisiem i prof. Arkadiuszem Bubakiem „Resztki materii, czyli cały nasz Wszechświat”, strona Uniwersytetu Śląskiego <https://us.edu.pl/resztki-materii-czyli-calny-nasz-wszechswiat-prof-jan-kisiel-i-prof-arkadiusz-bubak-o-eksperymentach-t2k/>
- [10] Film edukacyjny o planowanym eksperymencie Hyper-Kamiokande <https://www.youtube.com/watch?v=JFOE3D2z7LM&t=142s>
- [11] Film popularnonaukowy o eksperymencie IceCube https://www.youtube.com/watch?v=xUit5_B9k-U&t=1s
- [12] Przykład rejestrowanych przypadków oddziaływań neutrin w eksperymencie KM3Net <https://www.youtube.com/watch?v=AjQx8NpQJ8Y>



Tajniki spintroniki

Współczesny rozwój techniki zapoczątkował również erę urządzeń, w których informacja niesiona jest przez zaledwie jeden elektron.

Wioletta Kopeć, Mirosław Sawczak

Jednym z pierwszych sposobów przekazywania informacji były malowidła jaskiniowe. „Nieco” później zaczęto wykorzystywać do komunikacji gołębie, a „wkrótce” po tym wynaleziono pierwsze telefony. Obecnie większość danych przesyłana jest na odległość za pomocą sieci bezprzewodowych, natomiast do komunikacji wewnętrznej różnych sprzętów elektronicznych stosowany jest głównie prąd elektryczny.

Współczesny rozwój techniki zapoczątkował również erę urządzeń, w których informacja niesiona jest przez zaledwie jeden elektron. Pojedyncza cząstka elementarna to naprawdę mało w porównaniu z gołębiem – pojawia się więc pytanie: czy można pójść jeszcze o krok dalej? W tym miejscu wkracza spintronika – odmiana elektroniki, w której pierwsze skrzypce gra spin elektronu.

Spintronika

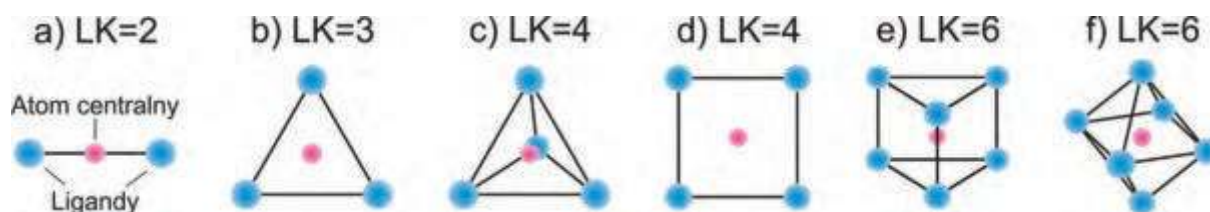
Mimo swego młodego wieku spintronika stała się dość rozległą dziedziną fizyki. Konwencjonalnie wiąże się ją ze zjawiskami bezpośrednio związanymi z przepływem prądu elektrycznego przez układy warstw różniących się właściwościami magnetycznymi, w których kierunek spinów elektronowych może być kontrolowany za pomocą zewnętrznych pól magnetycznych. W zależności od wzajemnej orientacji spinowej poszczególnych warstw, układ może cechować się niską lub bardzo wysoką rezystancją. Do najpowszechniejszych zjawisk wykorzystujących opisany mechanizm należą m. in. gigantyczny i tunelowy magnetoopor.

Mało kto zdaje sobie sprawę z faktu, iż pod nazwą „spintronika” kryje się znacznie więcej interesujących i obiecujących pod kątem przyszłych zastosowań zjawisk. Okazuje się, że spin elektronu wpływa nie tylko na parametry prądu przepływającego przez materiał, lecz może zaważyć na większości cech danego związku. Oczywiście nie wszystkie indywidua chemiczne dają się wprowadzić w odmienne stany spinowe. W zasadzie tylko niewielka grupa związków wykazuje podobną właściwość – są to tzw. związki kompleksowe (i ich polimery). Dodatkowym wymogiem jest obecność metalu, a praktyka pokazała, że najlepiej sprawdzają się związki metaloorganiczne – na nich będzie skoncentrowany ten artykuł.

Związki metaloorganiczne

Zacznijmy od podstaw. Istnieją trzy główne rodzaje wiązań chemicznych: atomowe, kowalencyjne spolaryzowane i jonowe. Czwarte, nieco mniej znane, polega na uwspólnieniu pary elektronowej pochodzącej od jednego z atomów biorących udział w tworzeniu wiązania. Nazywane jest wiązaniem koordynacyjnym i stanowi podstawowe kryterium klasyfikowania materiałów jako związki koordynacyjne (inaczej: związki kompleksowe, zwyczajowo: kompleksy). Zbudowane są one z co najmniej jednego atomu/ionu centralnego (najczęściej metalu) i ligandów, czyli przyłączonych do niego atomów, cząsteczek bądź jonów. Atom (jon) centralny posiada własność polegającą na „przyjmowaniu” elektronów pochodzących od ligandów – jest zatem akceptorem, a ligandy pełnią funkcję donorów.

W zależności od tego, ile ligandów związanych jest z atomem (jonem) centralnym (co opisuje się tak zwaną



Rys. 1. Geometria związków kompleksowych o różnych liczbach koordynacyjnych

liczbą koordynacyjną - w skrócie LK), kompleks może przyjmować różną geometrię. Przykładowo: związek kompleksowy o liczbie koordynacyjnej równej 2 jest cząsteczką liniową, natomiast $LK = 4$ odpowiada symetrii kwadratowej lub tetraedycznej. Na rys. 1 przedstawiono schematycznie budowę kompleksów o różnych liczbach koordynacyjnych. Warto zwrócić uwagę na fakt, iż związki o jednakowej liczbie koordynacyjnej mogą wypełniać przestrzeń na różne sposoby.

Jeśli uznamy pojedynczy związek koordynacyjny za jednostkę budulcową i zmnożymy na prostej, płaszczyźnie bądź w przestrzeni, otrzymamy odpowiednio 1-, 2- lub 3-wymiarowy polimer koordynacyjny (rys. 2).

Dodatkowo, jeśli spełnione są następujące warunki: po pierwsze – aby atom centralny był metalem, po drugie – by przynajmniej część ligandów stanowiły związki organiczne, dochodzimy do definicji związków metaloorga-

nicznych (*metal-organic frameworks*, MOFs). Podsumowując: związkami metaloorganicznymi nazywamy podklasę polimerów koordynacyjnych, które zawierają atom centralny w postaci metalu oraz ligandy organiczne.

Teoria pola krystalicznego

Szczególnie ciekawą grupą związków metaloorganicznych stanowią te, których atomami centralnymi są metale przejściowe, czyli metale z bloku d (m.in. mangan, chrom, żelazo, nikiel, miedź, złoto, srebro, platyna, rtęć). Jednym z modeli opisujących ich strukturę elektronową jest teoria pola krystalicznego [1]. Zgodnie z nią elektrony pierwiastków z bloku d rozmieszczone są na trzech podpowłokach: s , p i d , z czego podpowłoka d przeznaczona jest dla elektronów walencyjnych.

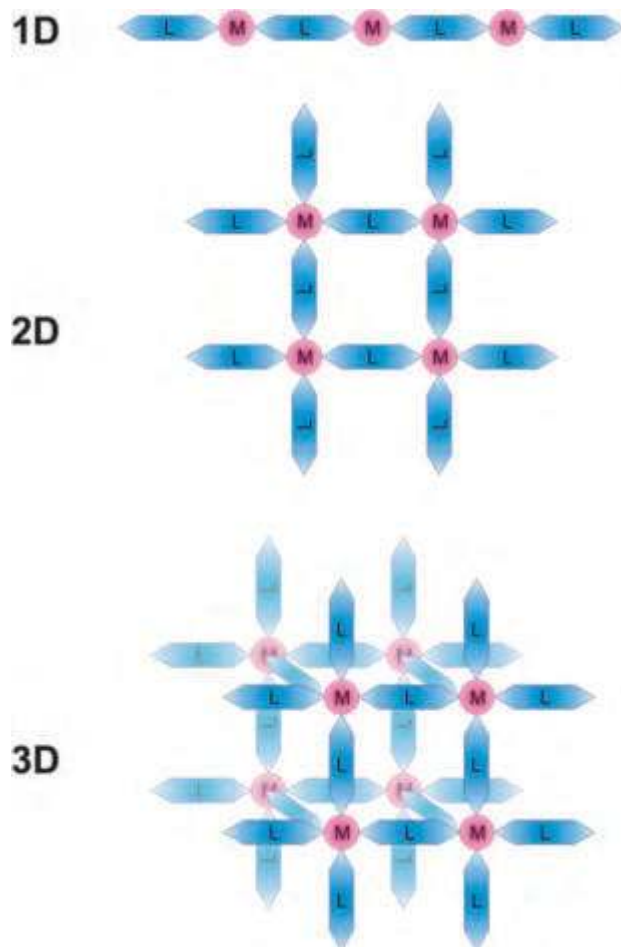
Orbitale różnią się kształtem chmury gęstości elektronowej, czyli obszaru, w którym prawdopodobieństwo odnalezienia elektronów jest największe. Orbital s ma symetrię sferyczną, zatem – w uproszczeniu – elektrony znajdują się wewnątrz objętości kuli o środku na początku układu współrzędnych.

Orbital p składa się z dwóch owalnych brył leżących po przeciwnych stronach tej samej osi, co w efekcie daje kształt „hantli”. Orbitale d zaś mogą przyjmować formę dwóch hantli lub hantli i torusa (kształtem przypominającego obwarzanek). Opisane typy orbitali przedstawione są na rys. 3.

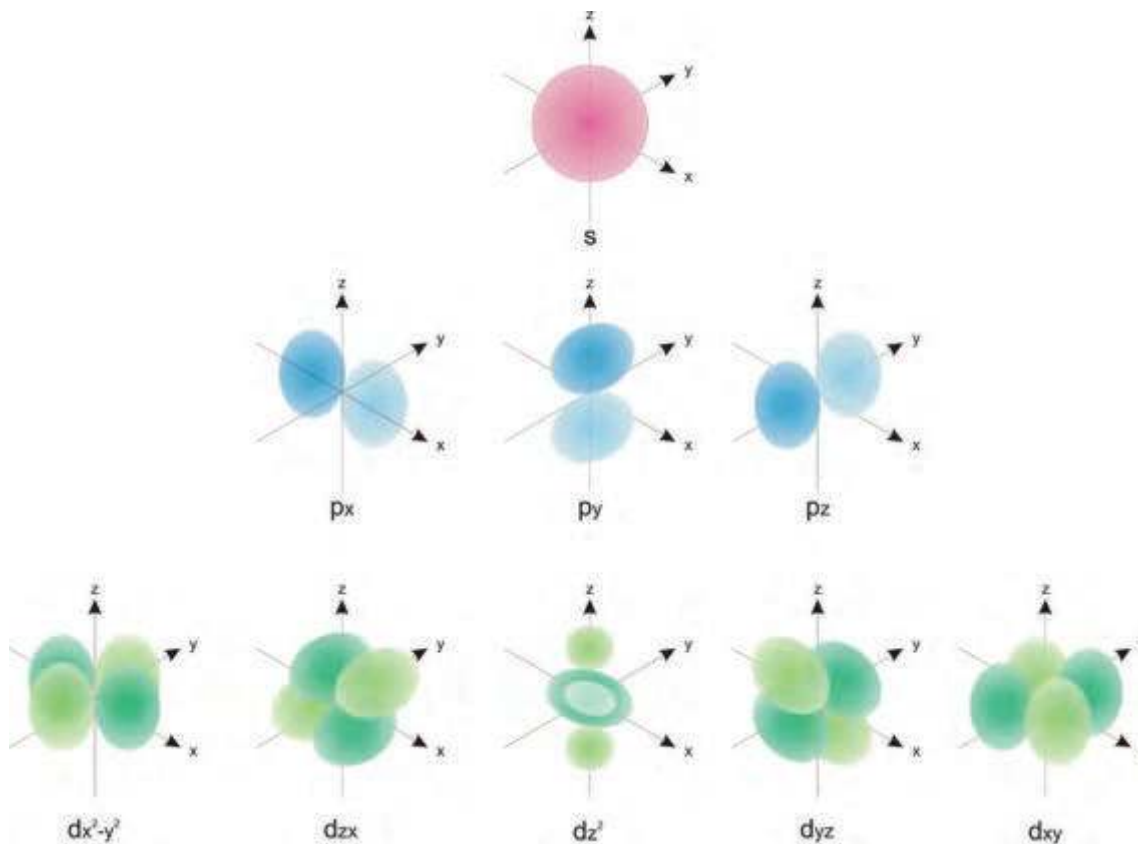
Jak widać, istnieją trzy sposoby rozmieszczenia przestrzennego orbitalu typu p (p_x , p_z i p_y) i aż pięć ułożeń podpowłoki d ($d_{x^2-y^2}$, d_{xz} , d_{yz} , d_{xy} i d_{z^2}). Dalsza część artykułu poświęcona będzie kompleksom o liczbie koordynacyjnej równej 6. W takich związkach atom centralny znajduje się na początku układu współrzędnych, natomiast ligandy, najczęściej, okupują naroża oktaedru rozpiętego na jego osiach (rys. 1f).

Na rys. 4a przedstawiono możliwe orientacje orbitalu d atomu centralnego względem ligandów (czarnych kropek). Dwie z nich (góra rys. 4a: d_{z^2} i $d_{x^2-y^2}$) nakładają się na przekątne oktaedru i „docierają” do wierzchołków, w związku z czym „czują się” z orbitalami ligandów i tworzą z nimi molekularne orbitale wiążące (biorące udział w tworzeniu wiązań chemicznych) oraz antywiążące. Trzy pozostałe (d_{xz} , d_{yz} , d_{xy}) ułożone są w przestrzeniach uniemożliwiających oddziaływanie z ligandami – formują zatem orbitale niewiążące, które nie stanowią elementu utrwalającego kompleks (nie wnoszą wkładu w tworzenie wiązań).

Na rys. 4b przedstawiony został diagram energetyczny powłoki walencyjnej atomu centralnego (orbitale wiążące mają najniższą energię, w związku z czym nie są widocz-



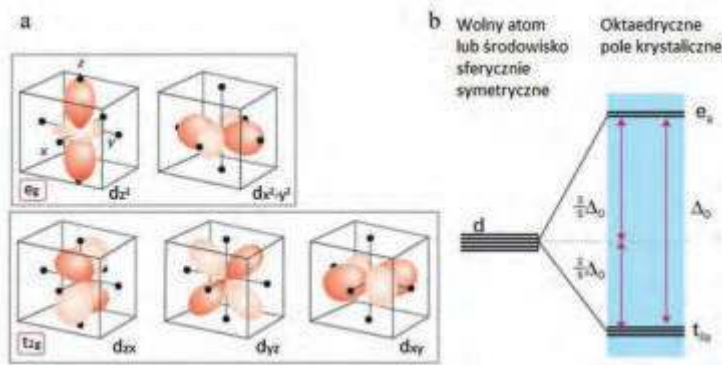
Rys. 2. Polimery koordynacyjne o różnych wymiarowościach, oznaczenia symboli: M – metal, L – ligand



Rys. 3. Schematyczne kształty orbitali s, p i d

ne na grafice). W przypadku wolnego metalu lub symetrii sferycznej atomu centralnego poziom d jest pięciokrotnie zdegenerowany, co oznacza, że wszystkie pięć orientacji gęstości elektronowej atomu centralnego (opisywanych magnetyczną liczbę kwantową) są w przybliżeniu równoważne energetycznie.

Środowisko oktaedryczne wymusza jednak częściowe zniesienie degeneracji – otrzymujemy dwa nowe poziomy energetyczne: e_g – antywiązący, o wyższej energii, dwukrotnie zdegenerowany i t_{2g} – niewiązący, o energii niższej, trzykrotnie zdegenerowany. Różnica energii między nimi (Δ_o) nosi nazwę parametru rozszczepienia pola krystalicznego i zależy od rodzaju ligandów. Warto zauważyć, że całkowita energia poziomu d przed i po rozszczepieniu w polu krystalicznym jest taka sama.



Rys. 4. a) Orientacja orbitali d atomu centralnego względem ligandów (czarne kropki) kompleksu oktaedrycznego b) Energie orbitali d w oktaedrycznym polu krystalicznym [1]

Kompleksy nisko- i wysoko-spinowe

Kompleksy metali przejściowych, które posiadają od czterech do siedmiu elektronów walencyjnych, mogą występować w dwóch stanach spinowych: niskim (LS) i wysokim (HS). Stany spinowe różnią się obsadzeniem orbitali e_g i t_{2g} metalu. Niski cechuje się możliwie najniższą całkowitą liczbą spinową, co oznacza, że możliwie największa liczba elektronów jest sparowana. Wysoki stan spinowy opisuje sytuację, w której jak najwięcej elektronów posiada jednakowe spiny, a więc całkowita liczba spinowa osiąga wartość maksymalną.

To, który stan jest preferowany przez materiał w warunkach normalnych, zależy od stosunku rozszczepienia pola krystalicznego do energii parowania elektronów (czyli energii jaką muszą posiadać dwa elektrony, aby pokonać odpychanie i znaleźć się na orbitalu o tej samej symetrii). Gdy energia parowania elektronów jest większa od rozszczepienia pola krystalicznego, korzystniejsze jest ustawienie się elektronów w konfiguracji wysokospinowej, w przeciwnym razie korzystniej jest przyjąć stan niskospinowy. Na rys. 5 przedstawiono skrócone konfiguracje elektronowe jonu metalu o sześciu elektronach walencyjnych dla dwóch stanów spinowych.



Rys. 5. Skrócona konfiguracja elektronowa jonu metalu o sześciu elektronach walencyjnych w niskim i wysokim stanie spinowym [1]

Cechy związków w stanie niskim i wysokim

Jak już zostało wspomniane wcześniej – stan spinowy wpływa na wiele istotnych właściwości materiału. Podstawową różnicą między LS i HS jest konfiguracja elektronowa atomu centralnego. Na podstawie sposobu obsadzenia poszczególnych rodzajów orbitali przez elektrony możemy wyznaczyć tzw. rząd wiązania (*Bond Order*, B.O.) między metalem a ligandami. Liczbowo jest on równy połowie różnicy orbitali wiążących i antywiązących:

$$B.O. = \frac{\text{liczba orbitali wiążących} - \text{liczba orbitali antywiązących}}{2} \quad (1)$$

Im wyższy rząd, tym wiązanie silniejsze i krótsze. Orbitaly wiążące są jednakowo obsadzone w obydwu stanach, natomiast orbital antywiązący e_g nie jest pusty jedynie w stanie wysokim. Można zatem wnioskować, iż rząd wiązania jest większy w stanie niskim, a jego długość – w wysokim. Odległości między atomami warunkują w sposób oczywisty parametry komórki elementarnej, jej objętość oraz gęstość. Otrzymaliśmy więc pierwszy zestaw cech zależnych od stanu spinowego: cechy strukturalne.

Kolejną grupę stanowią właściwości magnetyczne. W niskim stanie spinowym wszystkie elektrony są spairowane, zatem ich spiny góra-dół znoszą się i wypadkowy moment magnetyczny wynosi zero. Związek nie posiada wówczas własnych właściwości magnetycznych, a w obecności zewnętrznego pola zachowuje się jak diamagnetyk – indukowany jest w nim prąd elektryczny powodujący powstanie pola magnetycznego skierowanego przeciwnie do pola zewnętrznego.

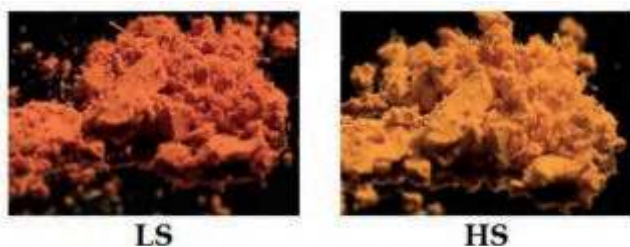
W stanie wysokim, ze względu na częściowo zapelnione powłoki elektronowe, materiał wykazuje właściwości paramagnetyczne. Niesparowane elektrony, dające przyczynek do niezerowego wypadkowego momentu magnetycznego, tworzą dipole magnetyczne. W paramagnetyku nieoddziałującym z otoczeniem ich kierunki są chaotyczne, natomiast w obecności zewnętrznego pola magnetycznego ustawiają się równolegle do niego.

Ciekawy zestaw cech zależnych od stanu spinowego kryje się także w optyce związków metaloorganicznych. Jak wiadomo, absorpcja światła następuje, gdy energia fali elektromagnetycznej padającej na materiał i różnica energii między dwoma dowolnymi poziomami energetycznymi tego materiału jest taka sama [2]:

$$h\nu = |E_j - E_i|, \quad (2)$$

gdzie: h – stała Plancka, ν – częstotliwość, E_j , E_i – energia na poziomie/orbitalu j -tym i i -tym (j , i – liczby naturalne).

Ze względu na różnice w konfiguracjach elektronowych materiał w stanie niskim absorbuje promieniowanie o innych



Rys. 6. Barwa proszku związku spintronicznego o wzorze $\text{Fe}(\text{pz})[\text{Pt}(\text{CN})_4]$ w niskim (LS) i wysokim stanie spinowym (HS)

długościach niż w stanie wysokim. W stanie LS orbital e_g jest pusty, zatem elektrony z poziomu t_{2g} mogą zostać do niego wzbudzone. W HS przejście $t_{2g} \rightarrow e_g$ byłoby bardzo niekorzystne energetycznie – można przyjąć, że nie występuje. Z tego względu pasma absorpcji związku w stanie niskim obejmują szerszy zakres spektralny, co przekłada się na różnicę w obserwowanym kolorze. Na rys. 6 przedstawiono przykładowy materiał spintroniczny w stanie niskim i wysokim.

Spin crossover

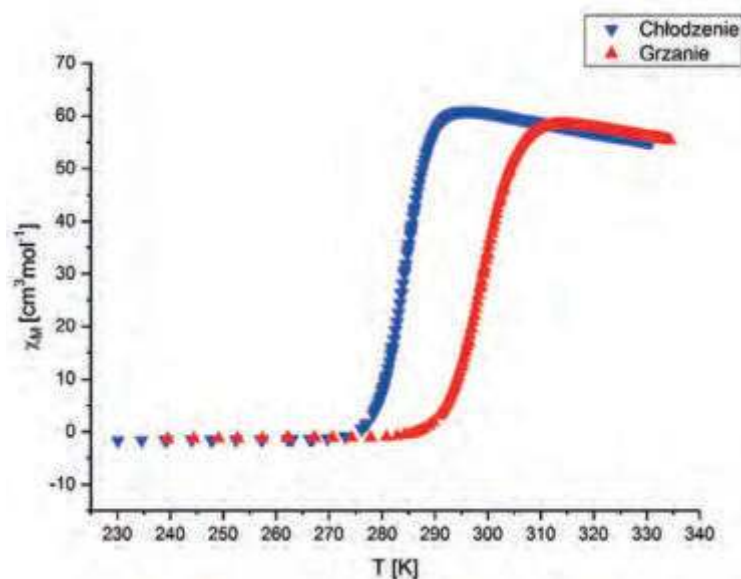
Teoria teorią, ale do czego można wykorzystać związki spintroniczne? Czy posiadają one jakieś cechy funkcjonalne? Otóż najistotniejszym faktem jest to, że na stan spinowy materiału może wpływać wiele czynników zewnętrznych, takich jak np. temperatura, skład chemiczny atmosfery czy światło.

W przypadku temperatury zależność jest dość prosta. Jeśli energia termiczna $k_B T$ (k_B – stała Stefana-Boltzmanna, T – temperatura) jest mniejsza od energii rozszczepienia pola krystalicznego (Δ_o), związek przebywa w niskim stanie spinowym. Gdy zaś energia termiczna przekroczy różnicę energii między poziomami t_{2g} i e_g , wówczas elektrony mogą przejść na wyższy poziom energetyczny i trwać w konfiguracji wysokospinowej. Warunek ten można opisać wzorem:

$$\begin{cases} k_B T < \Delta_o \rightarrow LS \\ k_B T \geq \Delta_o \rightarrow HS \end{cases} \quad (3)$$

Badając zależność jakiegoś czynnika (np. podatności magnetycznej warunkującej właściwości magnetyczne substancji) w funkcji temperatury możemy w łatwy sposób określić stan spinowy związku. Rys. 7 przedstawia wyniki pomiarów podatności magnetycznej $\text{Fe}(\text{pz})[\text{Pt}(\text{CN})_4]$ w zakresie temperaturowym 230-335 K.

Z wykresu można odczytać, że w niskich temperaturach związek cechuje niska podatność magnetyczna, zatem posiada cechy diamagnetyczne. W temperaturach wysokich staje się paramagnetykiem. Przedstawione wyniki są efektem dwóch pomiarów: jednego przeprowadzonego podczas chłodzenia próbki, drugiego w trakcie grzania.



Rys. 7. Podatność magnetyczna $\text{Fe}(\text{pz})[\text{Pt}(\text{CN})_4]$ w funkcji temperatury

Jak można zauważyć, obniżanie temperatury wiąże się z dłuższym pozostawianiem próbki w stanie wysokim, natomiast podczas grzania próbka dłużej zachowuje stan niski. Dzięki temu istnieje pewien przedział temperaturowy, w którym materiał może przebywać w obu stanach spinowych – w zależności od tego, co działo się z nim wcześniej. Na rys. 7 odczytalibyśmy, że jest to mniej więcej 275–300 K. Taka właściwość nazywana jest bistabilnością.

Drugą ważną cechą omawianych związków spintronicznych jest charakter przejścia spinowego, czyli np. w przypadku zmian podatności magnetycznej przedstawionej na rys. 7 – nachylenie (stromość) krzywej. Własność ta jest osiągana w układach wykazujących dużą kooperatywność oddziaływań, czyli szybką i skuteczną komunikację między molekułami w odpowiedzi na dany bodziec zewnętrzny. Dzięki wymienionym właściwościom (bistabilność, kooperatywność) materiały spintroniczne wykazują pętle histerezy (tutaj temperaturowej).

Zastosowania

Jak wspomniano na początku niniejszego artykułu, stan spinowy materiału może być nośnikiem informacji, przy czym można go wykorzystać zarówno do jej przechowywania, jak i sygnalizowania faktu zaistnienia czynników wywołujących jego zmianę. Jako, że stan spinowy materiału zależy od warunków zewnętrznych, takich jak np. temperatura, ciśnienie, natężenie pola magnetycznego czy też skład chemiczny otoczenia, w którym znajduje się omawiamy materiał spintroniczny, możemy w zakresie bistabilności sterować stanem spinowym badanej substancji uzyskując tzw. przełącznik molekularny.

Drugą, równie interesującą, opcją jest wykorzystanie związków spintronicznych jako czujników [3]. Wówczas wiedząc, w jaki sposób zmienia się wybrana cecha przy przejściu z jednego stanu spinowego do drugiego oraz jaka wartość wykrywanego czynnika powoduje zmianę stanu spinowego, możemy w prosty sposób oszacować czy szukana wielkość przekracza pewną wartość granic-

ną czy też nie. Najprostszym przykładem jest obserwacja barwy materiału podczas grzania/chłodzenia próbki. Po osiągnięciu temperatury krytycznej (T_c) materiał zmienia kolor, a my (znając wcześniej wartość T_c) dowiemy się jaka temperatura panuje w jego otoczeniu.

Na podobnej zasadzie można wykorzystywać dwie dowolne zmienne, z których jedna jest zależna od stanu spinowego, a druga tym stanem „steruje” (np. podatność magnetyczna i ciśnienie). Aby czujnik działał w czasie rzeczywistym i nadawał się do praktycznych zastosowań, pomiary muszą odbywać się możliwie jak najszybciej. Ze względu na wspomnianą wcześniej bistabilność, związki spintroniczne mogą służyć także jako komórki pamięci. Wówczas wykorzystywany jest fakt, że materiał poddany cyklowi zmian wybranego czynnika, np. temperatury, „pamięta” co działo się z nim wcześniej. To znaczy, że inaczej będzie się zachowywał, gdy wcześniej był grzany, a inaczej – gdy go chłodzono. Stan spinowy będzie od historii związku, zatem przechowywana w nim będzie pewna informacja.

Podsumowanie

Spintroniczne związki metaloorganiczne stanowią niezwykle obiecującą grupę materiałów. Ich cechą charakterystyczną jest możliwość występowania w dwóch stanach spinowych, różniących się konfiguracją elektronową atomu centralnego. Dzięki wrażliwości na warunki zewnętrzne mogą pełnić funkcję przełączników molekularnych, czujników czy komórek pamięci. Prace nad nimi wciąż trwają i zapowiadają okres wielkich zmian w elektronice, i nie tylko.

Wioletta Kopeć, Mirosław Sawczak

Ośrodek Techniki Plazmowej i Laserowej

Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szwalskiego PAN, Gdańsk

BIBLIOGRAFIA:

- [1] Pérez, M.T.D. (2017) *Structural Investigation of the High-Spin→Low-Spin Relaxation Dynamics in Spin Crossover Compounds*, Rozprawa doktorska, Uniwersytet Genewski, str. 13–17.
- [2] Halliday, D., Resnick R., Walker J. *Podstawy Fizyki 5*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2003, str. 38.
- [3] Linares, J., Codjovi, E., Garcia, Y. *Pressure and Temperature Spin Crossover Sensors with Optical Detection*, "Sensors" 2012, nr 12, str. 4479–4492.

Co w fizyce piszczy

Wyświetlacz z grafenem

Naukowcy z Uniwersytetu Łódzkiego stworzyli prototyp wyświetlacza w technologii OLED z elektrodą grafenową. Jak mówią, to pierwsze takie urządzenie w Polsce i jedno z nielicznych na świecie.

Unikatowym rozwiązaniem autorstwa łódzkich naukowców z Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej jest zmodyfikowanie warstwy grafenu, z którego wykonano elektrodę – tlenkiem renu. „To było konieczne, ponieważ grafen, choć elastyczny i przezroczysty w 98 procentach, ma nieodpowiedni poziom tzw. pracy wyjścia, która sprawia, że dioda rozbłyśka. Dopiero gdy do warstwy grafenu dołożyliśmy warstwę tlenku renu, poziom pracy wyjścia okazał się optymalny. (...) Wcześniej nikt na świecie wcześniej tego nie robił (stosowano tlenek molibdenu). A okazało się, że grafen z dodatkiem warstwy tlenku renu o grubości 3–5 nanometrów z powodzeniem może pełnić funkcję anody w diodzie OLED, dając mu odpowiednią

ilość energii” – tłumaczył dr Paweł Krukowski, również cytowany w informacji przesłanej PAP.

Teraz naukowcy pracują nad doskonaleniem swego elastycznego wyświetlacza, szczegółowo badając jego działanie. Pochylają się m.in. nad kwestią zasilania. „Do jego zasilania można wykorzystywać napięcie 20 woltów, ale kto nosi przy sobie akumulator 20-woltowy? My potrzebujemy 3 woltu, czyli napięcie takie, jakie daje baterijka. I nad tym między innymi pracujemy” – dodał Krukowski.

Jak przypomnieli badacze, grafen to krystaliczna forma węgla, który ma tylko dwa wymiary - szerokość i długość, a grubość dokładnie jednego atomu. Ponadto grafen jest elastyczny, przezroczysty, odznacza się przepuszczalnością światła rzędu 98 procent i bardzo dobrze przewodzi prąd elektryczny i ciepło. Dziś grafen jest superhitem w nauce i elektronice. Możliwość wykorzystania go do wytwarzania diod OLED otwiera niesamowite możliwości elektroniki elastycznej.

Sposób na „zobaczenie” wiązań atomowych

Zamiast prowadzić badania spektroskopowe w zagranicznych synchrotronach, naukowcy mogą skorzystać z kompaktowych i znacznie tańszych źródeł promieniowania, które prześwietlą materiał do najgłębszej powłoki atomowej i pozwolą wykryć obecne w nim pierwiastki czy wręcz typy wiązań atomowych.

Technologię opracowali naukowcy z zespołu prof. Przemysława Wachulaka, rektora-komendanta Wojskowej Akademii Technicznej. Przyszłe zastosowania to m.in. tworzenie leków, nanotechnologia i inżynieria materiałowa.

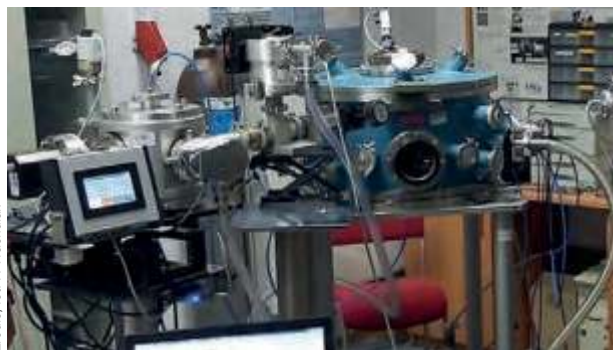
Źródło posiada tarczę gazową, którą pobudza się laserem, aby wytworzyć plazmę - stan materii, który zawiera swobodnie poruszające się cząstki naładowane: jony i elektrony. Plazma pozwala uzyskać promieniowanie elektromagnetyczne o wysokiej energii. Cała aparatura mieści się na laboratoryjnym biurku. Dla odmiany synchrotron to instalacja zajmująca cały budynek.

Instytut Optoelektroniki WAT jako jedyny w Polsce opracowuje i stosuje takie źródła w eksperymentach naukowych. Dzięki artykułom publikowanym w otwartym dostępie inne ośrodki naukowe mogą podjąć próbę zbudowania wysokoenergetycznych źródeł gazowych. Badacze zajmujący się spektroskopią materiałową przy krawędzi absorpcji (to nazwa spektroskopii, która pozwala zidentyfikować „odcisk palca”, czyli charakterystyczne widmo promieniowania każdego materiału) mogą też skorzystać ze źródeł działających w Warszawie.

„Zakres widzialny promieniowania to zakres od dwóch do trzech elektronowoltów. Tutaj mamy do czynienia z promieniowaniem o energii 1 keV, czyli tysiąc elektronowoltów. Aby uzyskać tę energię, wypuszczamy odrobinę gazu w próżni (bo promieniowanie takie rozchodzi się tylko w próżni), następnie skupiamy wiązkę laserową, uzyskując bardzo dużą intensywność w ognisku laserowym, aby odseparować elektrony od atomów. W ten sposób wytwarzamy plazmę. Po jakimś czasie następuje rekombinacja elektronów z ich atomami i emisja promieniowania w zakresie kiloelektronowoltów” – tłumaczy PAP płk. prof. dr hab. inż. Przemysław Wachulak (...)

Jak wyjaśnia prof. Wachulak, każdy materiał ma w innym miejscu swoją „krawędź absorpcji”. Jest to swoisty „odcisk palca”, pozwalający naukowcom określić, z jakim pierwiastkiem mają do czynienia. W zakresie do pojedynczych kiloelektronowoltów można zobaczyć lżejsze pierwiastki, takie jak węgiel, tlen, azot, sód - ale i metale, takie jak żelazo, kobalt, nikiel, miedź czy cynk. Co więcej, spektroskopia przy krawędzi absorpcji pozwala na otrzymanie informacji o typie wiązań pomiędzy atomami w danej próbce.

„Jest to niezbędne w zastosowaniach związanych z inżynierią materiałową, gdzie tworzy się nowe materiały i bada ich właściwości. W farmacji wiedza o wiązaniach atomowych jest bardzo ważna dla opracowaniu struktury leków i określenia, jak mogą one oddziaływać z białkami i enzymami w organizmie. Również w zastosowaniach związanych z szeroko pojętą nanotechnologią” – wylicza profesor.



Źródło, fot. P. Wachulak

W eksperymentach i badaniach do opisanego wcześniej źródła dostawia się spektrometr rentgenowski, w torze wiązki umieszczana jest próbka, którą prześwietla się promieniowaniem rentgenowskim i bada się spektrometrem widmo, czyli oscylacje spektralne pochodzące z owej próbki.

„W naszym źródle używany jest gaz szlachetny ksenon. Źródło gazowe jest powtarzalne i przy każdym impulsie lasera generuje tę samą liczbę fotonów, każdy impuls lasera oddziałuje z nową, prawie identyczną, porcją gazu. Co ważne, kiedy „strzela się” laserem do metalu, wówczas wybija się z niego małe drobiny, które zanieczyszczają wnętrze komory, próbkę i spektrometr - nie jest to źródło „czyste”. W naszym źródle wytwarzana plazma po chwili zanika i nie pozostawia żadnych materiałów ablacyjnych” – mówi naukowiec.

WAT wykonuje źródła gazowe od wielu lat. Technologię opracowano w latach 90-tych w zespole prof. Henryka Fiedorowicza. W tym przypadku optoelektronikom udało się „sięgnąć daleko w kiloelektronowolty”, a dzięki temu analiza spektroskopowa może sięgnąć do najgłębszych powłok atomowych. Inne źródła tego typu, opracowane w akademii, są wykorzystywane w mikroskopii, szczególnie do badania struktur organicznych, są też wykorzystywane do modyfikacji powierzchni polimerów oraz do tomografii rentgenowskiej.

Artykuł „Emisja 1 keV ze źródła laserowo-plazmowego na bazie tarczy z podwójnym strumieniem gazu Xenon/Hel” link: <https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-29-13-20514&id=452054> ukazał się 21 czerwca w czasopiśmie „Optics Express”. Zespół autorski (w kolejności podanej w czasopiśmie) tworzą: prof. Przemysław Wachulak, doktoranci Tomasz Fok i Łukasz Węgrzyński, prof. Andrzej Bartnik, dr Piotr Nyga, dr hab. Karol Janulewicz (b.prac.WAT) i prof. Henryk Fiedorowicz z Instytutu Optoelektroniki.

PAP – Nauka w Polsce, Karolina Duszczyk



Foto – Adobe Stock

Fizyczne podstawy badań rentgenowskich kości i stawów

Badania rentgenowskie już od ponad wieku są fundamentem diagnostyki medycznej. Ich rola zawsze była szczególnie istotna w ortopedii i traumatologii. Współcześnie trudno nawet wyobrazić sobie rozpoznanie złamania kości czy zwichnięcia stawu bez wykonania zdjęcia rtg.

Tomasz Kubiak

Wykorzystanie promieni X nie ogranicza się jednak do rejestrowania klasycznych rentgenogramów. Dzięki tomografii komputerowej możemy bowiem otrzymywać zarówno dwuwymiarowe przekroje jak i trójwymiarowe obrazy wybranych struktur anatomicznych. Z kolei densytometria pozwala wyznaczyć gęstość mineralną kości. Spróbujmy zatem zgłębić tajniki wspomnianych metod diagnostycznych z punktu widzenia fizyki.

Na wstępie warto przypomnieć dzień 8 listopada 1895 roku, kiedy to Wilhelm Conrad Röntgen, próbując zbadać promienie katodowe z wykorzystaniem lampy Crooke’a, przypadkowo zarejestrował nieznanie promieniowanie, nazwane później jego imieniem. Podczas kolejnych eksperymentów wykazał, że łatwo może ono znaleźć zastosowania w medycynie. Przekazany 28.12.1895 r. do Würzburgskiego Towarzystwa Fizyczno-Medycznego raport o stanie badań zawierał nie tylko opis cech promieniowania istotnych z punktu widzenia biofizyki, ale również słynne zdjęcie rtg dłoni żony uczonego Anny Berthy.¹

Wprawdzie u kobiety widok obrazu jej własnych kości miał wywołać lęk podsumowany słowami „zobaczyłam własną śmierć”, lekarze szybko dostrzegli ogromny potencjał, jaki niosło za sobą odkrycie. Od roku 1897 roku, kiedy to William James Morton w wyniku pojedynczej ekspozycji uwidocznił cały szkielet człowieka, dokonał się ogromny postęp w metodach obrazowania.² Współczesnym technikom wykorzystywanym w rentgenodiagnostyce układu kostno-stawowego poświęcony będzie właśnie niniejszy artykuł.

Klasyczne badanie rtg

Jeśli u pacjenta zachodzi podejrzenie wystąpienia urazu kości bądź stawów lub skarży się on na dolegliwości ze strony układu mięśniowo-szkieletowego, lekarz w pierwszej kolejności zleca zazwyczaj wykonanie klasycznego badania rtg. W przeszłości wykorzystywano w tym celu aparaty analogowe. W specjalnej kasecie wyposażonej w zawierające fosfor okładki wzmacniające (poprawiające wydajność detekcji) umieszczano się specjalną kliszę. Taki prostokątny arkusz halogenosrebrowej błony światłoczułej pozwalał rejestrować promienie X, które przeszły przez ciało pacjenta.

¹ Oryginał manuskryptu „Über eine neue Art von Strahlen (Vorläufige Mittheilung)” można obejrzeć na stronie Deutsches Röntgen Museum: https://roentgenmuseum.de/cool_timeline/eine-neue-art-von-strahlen/ (dostęp z 9.10.2021).

² Biografię Mortona i historię jego badań ukazuje artykuł: R. F. Mould, William James Morton (1845–1920). Author of America’s first X-ray textbook, *NO-TOWTORY Journal of Oncology* 68(3), 2018, 161-166.

Błona RTG wymagała dalszej obróbki z wykorzystaniem wywoływarki oraz odczynników chemicznych, które nie były przyjazne środowisku. Dopiero wówczas zdjęcie rentgenowskie można było obejrzeć na negatoskopie (jednocie podświetlanej płycie ułatwiającej ocenę radiogramu). Niestety, wynik badania w postaci kliszy występował tylko w jednym egzemplarzu i musiał być fizycznie przechowywany, co było bardzo niepraktyczne.

Na szczęście rozwój technik cyfrowych sprawił, że metody analogowe odeszły już prawie do lamusa. Aby jednak wykorzystać posiadane zasoby sprzętowe, w wielu ośrodkach diagnostycznych zdecydowano się na tzw. radiografię pośrednią CR (*ang. computed radiography*). Dzięki temu dane z aparatu analogowego mogą zostać przetworzone na obraz cyfrowy. Do detekcji promieniowania nie stosuje się już zatem wspomnianych wcześniej błon rtg, tylko wkładane do kasety tzw. płyty pamięciowe, które wykorzystuje się wielokrotnie. Fotony promieniowania X oddziałują z pokrywającym te płyty fosforem magazynującym PSP (*ang. photostimulable storage phosphor*).

W dużym skrócie można powiedzieć, że pochłonięta energia przechowywana jest przez wzbudzone elektrony i uwalniana w postaci światła niebieskiego po naświetleniu płyty silnie skolimowaną czerwoną wiązką lasera He-Ne lub diodowego. Luminescencja fotostymulowana zachodzi w obrębie kompaktowego urządzenia skanującego (czytnika CR zawierającego fotopowielacz i przetwornik analogowo-cyfrowy). Finalnie powstaje obraz, który ma formę cyfrową i może być analizowany na wielu stacjach końcowych.

Warto wspomnieć, że dostępne komercyjnie rozwiązania pozwalają w ten sposób ucyfrowić wszystkie stare aparaty dedykowane wykonywaniu badań kostno-płucnych. Najlepszym, ale bardziej kosztownym rozwiązaniem jest jednak zakup w pełni cyfrowego aparatu rtg z detektorem bezpośrednio rejestrującym promieniowanie X, które przeszło przez ciało pacjenta.

Technologia oznaczana skrótem DR (*ang. digital radiography*) pozwala na szybką akwizycję obrazów i ich przesłanie w postaci cyfrowej do stacji opisowej. Należy podkreślić, że obrazy cyfrowe (fot. 1) charakteryzują się znacznie lepszą jakością niż te analogowe, utrwalane kiedyś na kliszach. Poza tym można je łatwo archiwizować w pamięci komputera, obrabiać, analizować oraz przysyłać w sieci telemedycznej.³

Aparaty rentgenowskie mogą różnić się pod względem zastosowanych rozwiązań technologicznych. Rutynowo jednak w ich skład wchodzi: zasilacz, źródło promieniowania, układ ograniczający wiązkę (kolimatory) oraz system rejestracji obrazu (kratka przeciwozproszeniowa oraz detektory). Czytelnikom „Fizyki w Szkole” znana jest zapewne budowa lampy rentgenowskiej (rys.1).

Ta opróżniona z powietrza bańka szklana posiada dwie umieszczone wewnątrz elektrody. Katodę stanowi wolframowa spirala, której rozżarzone włókno emituje elektrony. Są one przyspieszane w silnym polu elektrycznym (na-

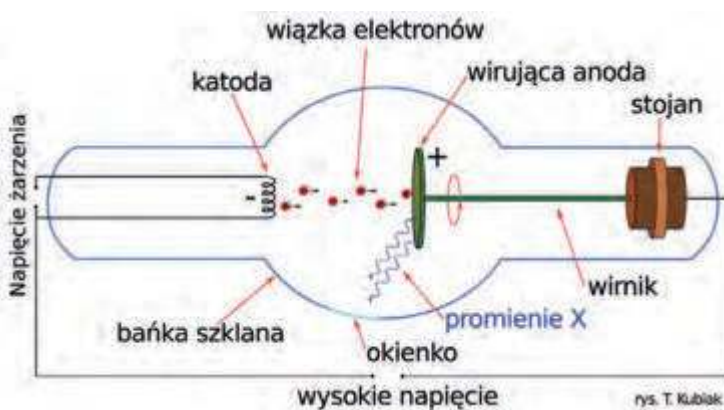
pięcie przyspieszające wynosi do kilkuset tysięcy woltów) a następnie padają na wirującą anodę (najczęściej również wolframową). Wprawdzie większość energii jest traciona w postaci ciepła (anoda musi być zatem odpowiednio chłodzona), emitowane jest także użyteczne w diagnostyce promieniowanie rentgenowskie. Jego spektrum jest złożeniem widma ciągłego, pochodzącego od promieniowania hamowania (*niem. Bremsstrahlung*) oraz linii promieniowania charakterystycznego tarczy. Szklane bądź berylowe okienko, przez które promieniowanie X opuszcza lampę, eliminuje fotony o najniższych energiach rzędu kilku keV (filtracja własna lampy).

Generalnie długofalowa część widma nie jest przydatna w diagnostyce, dlatego aby zmniejszyć dawkę, na jaką narażony jest pacjent, eliminuje się ją z wykorzystaniem cienkich filtrów wykonanych z lekkich metali (miedzi lub aluminium). Warto również wspomnieć, iż wzrost napięcia przyspieszającego lampy pozwala uzyskać promieniowanie o mniejszej długości fali, co przekłada się na jego większą przenikliwość (twardość). Z kolei natężenie I promieniowania emitowanego przez lampę można oszacować na podstawie wzoru:

$$I = k \cdot Z \cdot i \cdot U^2$$

Widać, że zależy ono od konstrukcji lampy (charakteryzowanej stałą k), liczby atomowej Z materiału anody, natężenia i prądu płynącego przez lampę oraz przyłożonego napięcia U .

Lampę RTG instaluje się na zmotoryzowanym ramieniu albo teleskopowym zawieszeniu sufitowym. Obrazy mogą być rejestrowane z różnych kątów a system jest automatycznie pozycjonowany do wybranej projekcji. Pacjenta układa się na ruchomym stole albo ustawia przy tzw. stojaku płucnym. Standardowo radiogramy kości długich, kręgosłupa i miednicy wykonuje się w projekcji przednio-tylnej. Jak sama nazwa wskazuje promienie X wnikają wówczas od przodu ciała, przechodzą przez badane struktury anatomiczne i padają na detektor znajdujący się za badaną osobą. Oczywiście w miarę konieczności stosuje się również inne projekcje, np. boczną czy skośną.

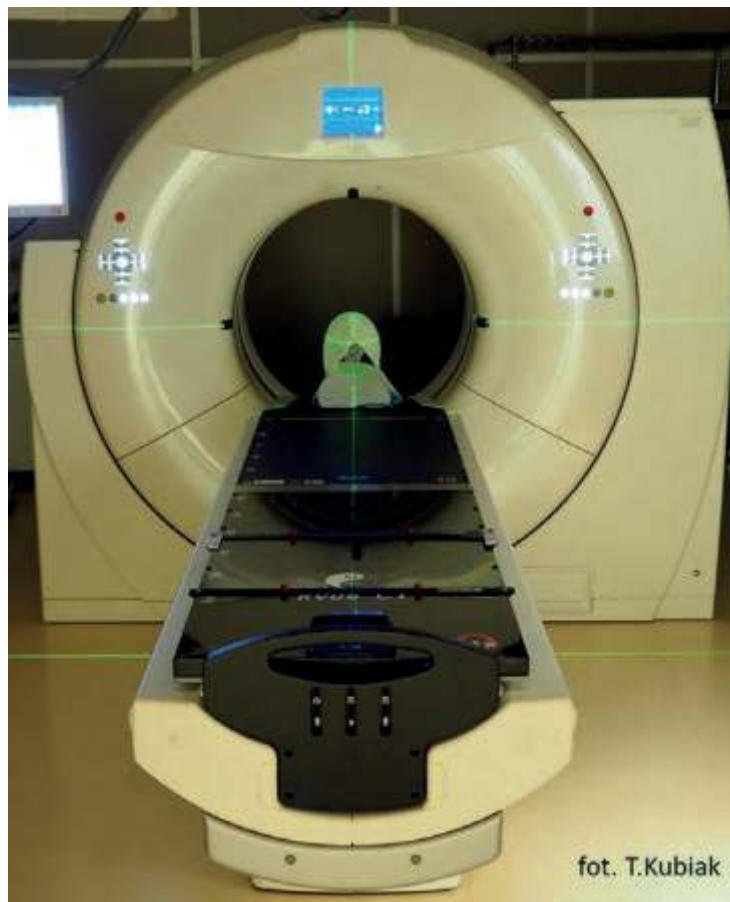


Rys.1. Schemat budowy lampy rentgenowskiej.

³ Więcej o analizie obrazów można dowiedzieć się z artykułu: T. Kubiak, Sygnały i obrazy, czyli fizyka w przetwarzaniu i analizie danych biomedycznych, „Fizyka w Szkole”, nr 3 (2020), s. 4-12.



Fot. 1. Przykładowy cyfrowy rentgenogram barku prawego.



Fot. 2. Widok ogólny tomografu komputerowego. Widoczny stół dla pacjenta i gantry.

Z punktu widzenia obrazowania medycznego istotna jest energia promieniowania zaabsorbowana w tkankach. Jeżeli wszystkie fotony X zostałyby pochłonięte w badanym materiale (np. tkance), klisza używana w rentgenografii analogowej pozostałaby biała; jeśli natomiast przeszłyby przez niego bez osłabienia, błona byłaby zupełnie czarna.

Struktury anatomiczne w zależności od budowy osłabiają promieniowanie w nieco różnym stopniu, co umożliwia ich identyfikację na obrazie. W zakresie energii fotonów stosowanych w diagnostyce medycznej (50-200 keV) promieniowanie X pochłaniane jest w kościach znacznie mocniej niż w otaczających je tkankach miękkich.⁴ Dlatego badania rentgenowskie idealnie nadają się do wizualizacji elementów szkieletu.

Trzeba jeszcze raz podkreślić, że w diagnostyce medycznej istotna jest energia promieniowania zaabsorbowana przez dane struktury anatomiczne w wyniku zajścia efektu fotoelektrycznego. Z kolei docierające do kliszy lub detektora promieniowanie rozproszone zmniejsza kontrast obrazu. Trzeba je zatem eliminować, stosując, np. kratki przeciwrzproszeniowe, które umieszcza się pomiędzy ciałem pacjenta a rejestratorem promieniowania.

Dla zainteresowanych warto dodać, że oprócz stacjonarnych aparatów rtg istnieją także urządzenia mobilne, mogące pracować przy łóżku chorego. Wykorzystuje się je sporadycznie w przypadku osób w bardzo ciężkim sta-

nie, których transport do pracowni byłby niewskazany. Ważnym problemem staje się wówczas ochrona radiologiczna personelu oraz innych pacjentów, realizowana odpowiednio przy wykorzystaniu osłon osobistych i parawanów ochronnych.

Oczywiście dawki efektywne, jakie otrzymuje pacjent podczas klasycznego badania rentgenowskiego kończyn są znikome (średnio 1 μ Sv) a zatem całkowicie bezpieczne. Należy jednak wspomnieć, iż mogą one różnić się nieco w zależności od rodzaju procedury diagnostycznej, stanu aparatury oraz dobieranych przez obsługę warunków ekspozycji.

Rentgenogram przedstawia tylko rzut trójwymiarowego obiektu na płaszczyznę. Klasyczne badanie rtg nie pozwala zatem na dokładną wizualizację nakładających się struktur anatomicznych. Z pomocą przychodzi wówczas inna, zdecydowanie bardziej skomplikowana metoda diagnostyczna, która również bazuje na użyciu promieniowania X.

Tomografia rentgenowska

W przypadku konieczności oceny skomplikowanych złamań lub innych urazów a także podczas diagnostyki nowotworów kości czy choroby zwyrodnieniowej stawów z powodzeniem wykorzystuje się rentgenowską tomografię komputerową. Ta zaawansowana technika obrazowania, określana często skrótem CT (od ang. *computed to-*

⁴ W radiografii cyfrowej przyjęto konwencję, aby sposób wyświetlania obrazu na monitorze korespondował ze zdjęciami analogowymi, tzn. struktury silnie pochłaniające (np. kości) były jasne, a tło ciemne.

mography), była już szerzej opisywana na łamach „Fizyki w Szkole”.⁵ Stali czytelnicy pamiętają zapewne, że istotą badania jest rejestracja wielu cienkich poprzecznych przekrojów ciała (warstw tomograficznych) w płaszczyźnie prostopadłej do jego osi długiej.

Popularyzatorsko można by zatem powiedzieć, że struktury anatomiczne zostają wirtualnie „pokrojone” w plasterki. Ogromną zaletą takiego rozwiązania jest eliminowanie promieniowania rozproszonego pochodzącego z sąsiednich obszarów. Podczas badania pacjent, leżąc na plecach na ruchomym stole, przemieszcza się w otworze tomografu, a wokół niego z dużą szybkością wiruje lampa rentgenowska wraz z ułożonym po przeciwnej stronie układem detektorów.⁶ Torem poruszania się układu projekcyjnego względem chorego jest zatem spirala. Zarówno źródło promieniowania jak i wielorzędowy układ detektorów schowane są oczywiście przed wzrokiem pacjenta we wnętrzu zasadniczej części urządzenia, nazywanej powszechnie gantry (a czasami w języku polskim „okołem”). Fot. 2 przedstawia widok zewnętrzny tomografu rentgenowskiego.

Dla osób zainteresowanych fizyką najważniejszy wydaje się jednak mechanizm uzyskiwania kolejnych przekrojów ciała. Jest on bardzo skomplikowany, szczególnie w zakresie stosowanych algorytmów rekonstrukcyjnych. W niniejszym artykule skupimy się zatem tylko na podstawowych informacjach. Wyemitowana przez lampę i uformowana przez kolimator wiązka promieniowania rentgenowskiego o natężeniu I_0 , przechodząc przez tkanki ulega osłabieniu zgodnie ze wzorem:

$$I(s) = I_0 \cdot e^{-\int_0^s \mu(x,y) ds}$$

gdzie: $I(s)$ - natężenie promieniowania po przebyciu drogi s w organizmie, $\mu(x,y)$ to funkcja określająca rozkład

współczynnika osłabienia μ . Wartość szczytowa napięcia przyspieszającego elektrony w lampie rentgenowskiej tomografu zawiera się w przedziale 80-140 kVp (przy jednym źródle zazwyczaj jest to 120 kVp).

W zakresie stosowanych energii osłabienie wiązki promieniowania rentgenowskiego w ciele człowieka wynika zatem zarówno z absorpcji fotonów (efekt fotoelektryczny) jak i ich rozpraszania (efekt Comptona).⁷ Promieniowanie rozproszone, które posiada niższą energię, zostaje wyeliminowane przez kolimatory końcowe w układzie detekcyjnym, co zwiększa kontrast radiograficzny oraz ostrość obrazu.

Promieniowanie X, które przeszło przez ciało pacjenta, rejestrują ultraszybkie ceramiczne detektory scyntylacyjne. Wartości I_0 i $I(s)$ są zatem znane, dzięki czemu możliwe jest określenie przestrzennego rozkładu funkcji $\mu(x,y)$:

$$p = \ln \left(\frac{I(0)}{I(s)} \right) = \int_0^s \mu(x,y) ds$$

Zaawansowane algorytmy rekonstrukcyjne pozwalają wyznaczyć liniowy współczynnik osłabienia dla każdego woksela (elementu objętościowego), tworzącego daną warstwę tomograficzną. Wartości μ przekłada się dalej na tzw. jednostki Hounsfielda HU (*ang. Hounsfield units*).⁸

Opisująca gęstość radiologiczną skala Hounsfielda zawiera się najczęściej w przedziale od -1000 (powietrze) do +3000 (gęste kości). Należy jednak pamiętać, że wynik badania jest prezentowany na monitorze komputera z wykorzystaniem 256 odcieni szarości. W celu najlepszej wizualizacji wybranych struktur anatomicznych trzeba zatem wybrać odpowiedni odcinek skali, czyli zastosować tzw. okno o określonej szerokości i środku (poziomie). Przy badaniu kości środek okna można ustawić na 500 HU a szerokość na 2000 HU. Standardowo tworzone są obrazy przekrojów aksjalnych (osiowych) ciała (fot. 3a), ale w diagnostyce coraz częściej wykorzystuje się również prezentacje wielopłaszczyznowe (fot. 3 b, c) oraz trójwymiarowe.

Warto dodać, że współczesne tomografy z wielorzędowym układem detektorów podczas jednego obrotu lampy wokół pacjenta (czyli w czasie około 0,3 s) pozwalają uzyskać dane potrzebne do rekonstrukcji nawet kilkuset warstw tomograficznych. Badanie wybranego regionu ciała trwa zatem bardzo krótko, co zmniejsza m.in. ryzyko wystąpienia artefaktów związanych z ruchem chorego. Również dawka promieniowania, jaką otrzymuje się podczas badania przeprowadzonego z wykorzystaniem nowoczesnego tomografu spiralnego, jest zdecydowanie mniejsza niż w przypadku stosowanych wiele lat temu aparatów skanujących sekwencyjnie.⁹



Foto – Adobe Stock

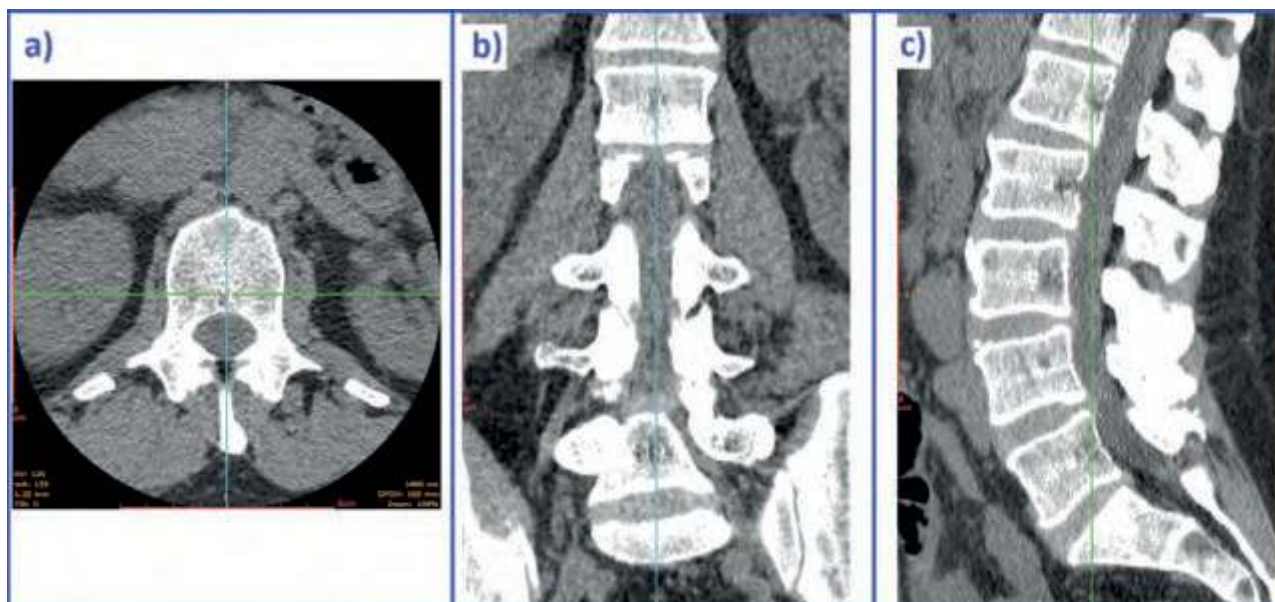
⁵ T. Kubiak, Tomografia komputerowa, „Fizyka w Szkole” nr 1 (2014), s. 7-10.

⁶ W nowoczesnych tomografach stosowane są dwa źródła emitujące promieniowanie o odmiennej energii, co ułatwia różnicowanie poszczególnych tkanek.

⁷ Oddziaływaniu promieniowania jonizującego z materią biologiczną poświęcono artykuł: T. Kubiak, Od naturalnej promieniotwórczości do medycyny nuklearnej. Człowiek a promieniowanie jonizujące, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 5 (2020), s. 4-11.

⁸ Godfrey Newbold Hounsfield skonstruował pierwszy tomograf komputerowy, za co w 1979 r. otrzymał Nagrodę Nobla w dziedzinie fizjologii lub medycyny. Nazwa skali i jednostek upamiętnia tego brytyjskiego inżyniera.

⁹ Średnie dawki promieniowania dla badań rtg i tomograficznych znaleźć można na stronie: <https://www.health.harvard.edu/cancer/radiation-risk-from-medical-imaging> (dostęp 10.10.2021).



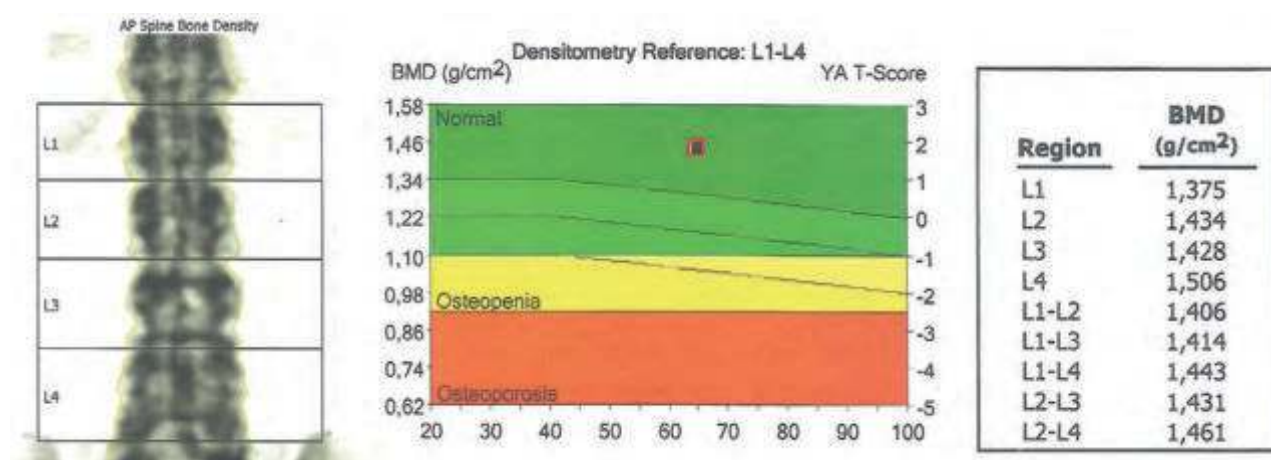
Fot. 3. Wyniki badania tomograficznego kręgosłupa lędźwiowego. a) wybrany przekrój poprzeczny; b) i c) rekonstrukcje wielopłaszczyznowe (MPR).

Densytometria

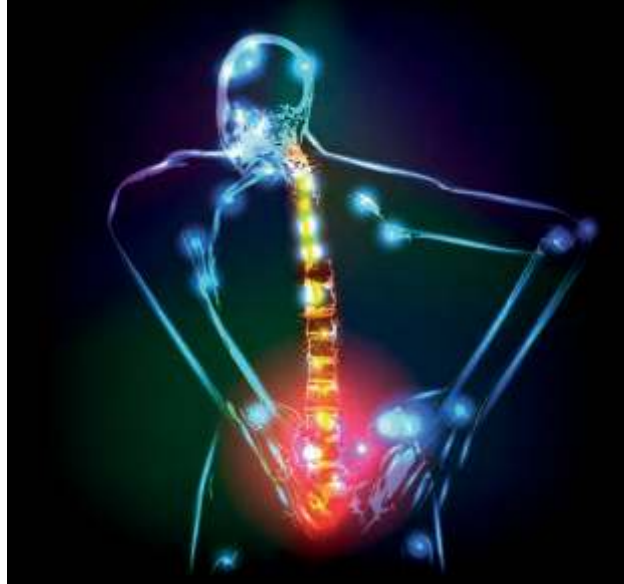
Kolejnym niezwykle istotnym zastosowaniem promieniowania rentgenowskiego w diagnostyce układu kostnego są badania densytometryczne, pozwalające wykryć osteoporozę. Ta choroba, występująca najczęściej u kobiet po menopauzie, początkowo przebiega bezobjawowo, ale z czasem ujawnia się w postaci patologicznych złamań, do jakich dochodzi nawet przy niewielkich urazach. Przyczyną jest znacznie zmniejszona masa tkanki kostnej oraz zaburzenia jej mikroarchitektury. Wczesne stadium, w którym występuje niewielkie obniżenie mineralnej gęstości kości, nazywane jest osteopenią.

Wykrycie tej patologii jest niezwykle istotne, żeby nie rozwinęła się dalej w osteoporozę. Stąd coraz popularniejsze są przesiewowe badania densytometryczne wykonywane nawet w specjalnych busach (mobilnych pracowniach radiologicznych) jeżdżących po całym kraju. Warto zatem przyjrzeć się, jak ewoluowały techniki służące do oceny gęstości mineralnej kości.

Tradycyjne zdjęcia rentgenowskie, rejestrowane na kliszy i analizowane wzorkowo przez radiologa, w zasadzie nie były przydatne do diagnostyki odwapnienia kości. Ewidentnie uwidaczniało się ono bowiem dopiero wówczas, gdy gęstość struktur zmniejszyła się o około 40%. W przeszłości wykorzystywano jednak tzw. morfometrię: jakościową oraz ilościową. Pierwsze z wymienionych były bardzo subiektywne i bazowały na porównywaniu widocznych na rentgenogramie badanego zmian w kręgosłupie (np. w układzie beleczek w trzonie kręgu) z szeregiem zdjęć referencyjnych. Do technik ilościowych należała natomiast rentgenogramometria (ustalanie wymiarów określonych kości na podstawie zdjęć rtg). Bardziej współczesne metody pomiaru gęstości kości to absorpcjometria wiązki fotonów o pojedynczej energii SPA (od ang. *single photon absorptiometry*) albo dwóch wiązek promieni X o odmiennych energiach, czyli DXA (lub DEXA, ang. *dual energy X-ray absorptiometry*).



Fot. 4. Przykładowy wynik badania densytometrycznego kręgosłupa lędźwiowego. Pomiar przeprowadzony metodą DXA.



Badanie SPA bazowało na pomiarze osłabienia monochromatycznej, skolimowanej wiązki promieniowania gamma, przechodzącej przez kości i tkanki miękkie. Źródło promieniowania stanowił izotop ^{125}I (fotony o energii 27,3 keV). Technikę stosowano najczęściej do oceny gęstości kości promieniowej lub piętowej. Podstawowym utrudnieniem przy wykonywaniu pomiarów ilościowych był wymóg, iż grubość kości i tkanek miękkich na drodze wiązki powinna być stała. W celu spełnienia tego warunku kończynę otaczano warstwą materiału tkania podobnego (np. żelu) lub zanurzano w zbiorniku wypełnionym wodą. Wynik pomiaru (g/cm) określał zawartość mineralnych składników kości (BMC od ang. *bone mineral content*) na jednostkę długości kości.¹⁰

Powszechnie wykorzystywaną metodą pomiarową w densytometrii jest absorpcjometria dwóch wiązek fotonów o różnych energiach. Początkowo stosowano technikę DPA (ang. *dual-photon absorptiometry*), gdzie fotony γ (44 keV i 100 keV) emitował izotop ^{153}Gd . Źródło to musiało być corocznie wymieniane, a zanik jego radioaktywności negatywnie wpływał na dokładność oraz powtarzalność pomiarów.

Współcześnie w metodzie DXA źródłem promieniowania jest lampa rentgenowska. Wyeliminowało to problemy z kosztowną wymianą izotopów, umożliwiło lepszą kolimację wiązek, pozwoliło zwiększyć rozdzielczość przestrzenną badania oraz zmniejszyć dawkę promieniowania a także zapewniło powtarzalność wyników. Z szerokiego widma lampy za pomocą specjalnych filtrów (*K-edge filters*) separuje się dwa piki wycelowane na odpowiednich energiach, np. 40 i 70 keV.

Innym podejściem jest naprzemienne podawanie na lampę różnych napięć przyspieszających, np. 70 kVp i 140 kVp. Emitowane wiązki są w różnym stopniu pochłaniane przy przejściu przez kości i tkanki miękkie. Linio- wy współczynnik osłabienia μ zależy bowiem nie tylko od rodzaju absorbenta, ale również od energii fotonów X. Po przeprowadzeniu obliczeń wyodrębnia się składową absorpcji charakteryzującą kości. Możliwa jest zatem także

ocena gęstości elementów szkieletu otoczonych nieregularną masą tkanek miękkich, np. kręgosłupa lędźwiowego czy fragmentu kości udowej. Wyznacza się gęstość mineralną kości (*BMD od ang. bone mineral density*), czyli w praktyce gęstość powierzchniową [g/cm²]. Przykładowy wynik badania densytometrycznego przedstawia fot.4.

Czytelników na pewno zainteresuje fakt, że narażenie pacjenta na promieniowanie podczas badania DXA jest znikome. Skanowanie kręgosłupa lędźwiowego czy bioder wiąże się z dawką efektywną około 1 μSv przy stosowaniu wiązki ołówkowej i do 10 μSv przy wiązce wachlarzowej. Dla porównania warto przypomnieć, że w Polsce roczna dawka skuteczna ze źródeł naturalnych to około 2,45 mSv.¹¹

W kontekście badań densytometrycznych warto również wspomnieć, że wartość mineralnej gęstości kości wyrażoną w mg/cm³ można oszacować na podstawie pomiarów przeprowadzonych techniką ilościowej tomografii komputerowej QCT (od ang. *quantitative computed tomography*). Wykorzystanie specjalnych fantomów, reprezentujących wzorcowe gęstości kości, pozwala na kalibrację systemu a tym samym przełożenie wartości HU na jednostki gęstości mineralnej.¹² Przekroje ciała pacjenta (np. odcinka kręgosłupa lędźwiowego) wykonuje się najczęściej standardowym tomografem komputerowym.

Produkowane są też specjalne urządzenia dedykowane obwodowej jakościowej tomografii komputerowej pQCT (ang. *peripheral quantitated computed tomography*). Dawka, jaką otrzymuje pacjent podczas badania QCT kręgosłupa lędźwiowego, wynosi około 90 μSv , czyli jest większa niż w przypadku opisanej wcześniej, używanej w badaniach przesiewowych techniki DXA. Możliwości diagnostyczne tomografii ilościowej są jednak znacznie szersze, a otrzymane wyniki BMD odnoszą się do objętości a nie powierzchni.

dr Tomasz Kubiak
biofizyk i fizyk medyczny, Gniezno

POLECANA LITERATURA:

- [1] Tomografia komputerowa [w:] Wskazania do badań obrazowych, pod red. B. Pruszyńskiego, PZWL, Warszawa 2011, s. 88-98.
- [2] R. Cierniak, Tomografia komputerowa. Budowa urządzeń CT. Algorytmy rekonstrukcyjne, EXIT, Warszawa 2005.
- [3] T. Kraśnicki i inni, Novel Clinical Applications of Dual Energy Computed Tomography, Adv. Clin. Exp. Med. 2012, 21, 6, 831-841.
- [4] Encyklopedia Badań Medycznych, pod red. L. Kalinowskiego, Wydawnictwo Medyczne MAKmed, Gdańsk 1996, 353-368; 568-571.
- [5] P. Jodłowski, J. Ostachowicz, Dozymetria promieniowania X, Wydział Fizyki i Techniki Jądrowej AGH, Kraków 2006.
- [6] J. A. Rowlands, The physics of computed radiography, Phys. Med. Biol. 47 (2002), R123-R166.
- [7] L. M. Thorson, H. W. Wahner, Single- and Dual-Photon Absorptiometry Techniques for Bone Mineral Analysis, Journal of Nuclear Medicine Technology 14(3), 1986, 163-171.
- [8] Rozpoznanie osteoporozy [w:] Osteoporoza. Zasady rozpoznawania i leczenia, pod red. Clifforda Rosena, Springer PWN, Warszawa 1998, 91-148.
- [9] E. Pankowski, Podstawy fizyczne metod obrazowania tkanek i narządów [w:] Biofizyka pod red. F. Jaroszyka, PZWL, Warszawa 2008, s. 826-847.
- [10] J. E. Adams, Quantitative computed tomography, European Journal of Radiology 71 (2009), 415-424.
- [11] Dual energy X ray absorptiometry for bone mineral density and body composition assessment, pod red. L. Davidssona, IAEA Human Health Series nr 15, International Atomic Energy Agency, Wiedeń 2013.

¹⁰ Mineralnym składnikiem kości jest hydroksyapatyt (hydroksyfosforan wapnia).

¹¹ Na podstawie: Raport roczny. Działalność Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki oraz ocena stanu bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce w 2020 roku, Warszawa 2021, s. 50. (<https://www.gov.pl/web/paa/raport-roczny-prezesa-paa>, dostęp z 8.10.2021).

¹² Fantomy są zbudowane z materiałów stałych, np. hydroksyapatytu.

Dawki promieniowania jonizującego

Ze względu na właściwości promieniowania jonizującego, w szczególności wysokoenergetycznego promieniowania gamma, zatrudnienie w warunkach narażenia na promieniowanie jonizujące jest reglamentowane prawnie.

Wioletta Dynkowska

Limity dawek promieniowania jonizującego

Przypominając: według ustawy z dnia 29 listopada 2000 r – Prawo atomowe, promieniowanie jonizujące to promieniowanie składające się z cząstek bezpośrednio lub pośrednio jonizujących albo z obu rodzajów tych cząstek lub fal elektromagnetycznych o długości do 100 nm (nanometrów).

Ustawa Prawo atomowe ustanawia wielkość dawki promieniowania jonizującego, na jaką może być narażona osoba z ogółu ludności. Określenie „osoby z ogółu ludności” oznacza w tym przypadku wszystkie te osoby, które nie są w jakikolwiek sposób związane ze zwiększonym narażeniem na działanie promieniowania jonizującego. Jedynym źródłem narażenia jest w tym przypadku promieniowanie tła. Jest to promieniowanie naturalne, emitowane ze źródeł pochodzenia naturalnego ziemskiego i kosmicznego. Są to między innymi rudy metali, których radioaktywne izotopy występują naturalnie w glebie, promieniotwórcze izotopy pierwiastków wchodzące w skład materiałów budowlanych (narażenie radonowe), promieniotwórcze izotopy kosmogenne, itp. Wszystko to razem tworzy naturalną składową promieniowania tła, która w Polsce szacowana jest średnio na 2,4 mSv rocznie.

Istotną informacją jest, że do promieniowania tła wlicza się również dawkę pochodzącą od narażenia na promieniowanie jonizujące w wyniku poddawania się diagnostyce medycznej, poprzez wykonywanie zdjęć rtg, tzw.

prześwieśleń, a jej wysokość szacowana jest na 1,2 mSv rocznie. Wówczas dawka promieniowania jonizującego, na jaką jest narażony w ciągu roku przeciętny Polak, nie mający nic wspólnego z pracą w warunkach zwiększonego oddziaływania na promieniowanie jonizujące, wynosi około 3,6 mSv rocznie. Dopuszczalna wielkość narażenia dla osób z ogółu ludności według ustawy Prawo atomowe to 1 mSv rocznie ponad dawkę promieniowania pochodzącą od promieniowania tła.

A jak to jest w przypadku osób pracujących w warunkach narażenia na promieniowanie jonizujące? Otóż w pierwszej kolejności należy określić wiek osoby zatrudnionej w warunkach narażenia. Ustawa dopuszcza roczną wysokość dawki promieniowania jonizującego na 20 mSv dla osób pełnoletnich zatrudnionych w warunkach narażenia.

Kolejnym czynnikiem jest rodzaj źródła promieniowania jonizującego, a także określenie czynności, jakie będą wykonywane na danym stanowisku, w związku z czym powinien być określony faktyczny poziom narażenia. Granicą jest tu 6 mSv, powyżej której pracownicy zatrudnieni w warunkach narażenia zaliczeni są do kategorii A narażenia, natomiast narażenie rzędu 1-6 mSv powoduje zaliczenie pracownika do kategorii B narażenia. Taki rozdział jest ściśle związany ze sposobem rejestracji dawki promieniowania jonizującego, na jaką narażony jest pracownik, określenie tygodniowego czasu pracy dla takiego pracownika oraz częstość kontroli lekarskich i innych rozwiązań prowadzących do ochrony zdrowia pracowników.

Nieletni (16-18 lat) zatrudnieni w warunkach narażenia, którymi są zazwyczaj uczniowie i praktykanci, nie mogą być narażeni na dawkę promieniowania wyższą niż zostało to określone dla pracowników kategorii B narażenia. Specjalną opieką są również objęte kobiety w ciąży. Ustawa wyraźnie określa, że mające urodzić się dziecko nie powinno być narażone na otrzymanie dawki wyższej niż wynosi ona dla osób z ogółu ludności (1 mSv rocznie); w praktyce kobiety w ciąży są odsuwane od pracy w warunkach narażenia na promieniowanie jonizujące.

Skąd to ograniczenie? Promieniowanie jonizujące wywołuje zmiany w żywych komórkach. Najbardziej narażone na niszczące działanie promieniowania jonizującego są komórki szybko dzielące się (proliferujące). Tym samym praca w warunkach narażenia w trakcie trwania intensywnego wzrostu i dojrzewania organizmu niesie ze sobą zwiększone ryzyko i większe prawdopodobieństwo wystąpienia późnych skutków oddziaływania promieniowania jonizującego na organizm. Zauważmy, zarówno grej, jak i siwert to jednostki wyrażane stosunkiem energii do masy. Nietrudno więc domyślić się, że ta sama energia niesiona przez wiązkę promieniowania jonizującego zdecydowanie silniej oddziaływać będzie na dziecko, a inaczej na osobę dorosłą. Różnica masy ciała ma tu decydujące znaczenie.

Narażenie wewnętrzne wiąże się przede wszystkim z wchłonięciem izotopu do organizmu. W praktyce uwzględnia się dwie główne drogi przedostania się substancji promieniotwórczej do organizmu: drogę oddechową i drogę pokarmową. Niezmiernie rzadko przedostanie się izotopu promieniotwórczego do wnętrza organizmu odbywa się za pośrednictwem skóry, przez otwarte rany. Mówimy wówczas o obciążającej dawce równoważnej.

Według rekomendacji ICRP (Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej; ang. *International Commission on Radiological Protection*) dawka taka obliczana jest jako suma narażenia wewnętrznego i zewnętrznego. Współczynniki używane w obliczeniach zostały ustalone na podstawie efektów, jakie wywołuje jednostkowa obciążająca dawka skuteczna po tym, jak zostanie wchłonięta do organizmu i zawarte są w załączniku do Rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 11 sierpnia 2021 roku w sprawie wskaźników pozwalających na wyznaczenie dawek promieniowania jonizującego stosowanych przy ocenie narażenia na promieniowanie jonizujące.

Według ustawy Prawo atomowe obciążająca dawka równoważna $H_T(\tau)$ jest to dawka obliczona jako całka po czasie (τ) z mocy dawki równoważnej w tkance lub narządzie T, będąca wynikiem wniknięcia substancji promieniotwórczej do organizmu. Jeśli nie jest znany czas wchłonięcia izotopu, dla dorosłych przyjmuje się τ jako 50 lat, natomiast dla dzieci τ to 70 lat.

Promieniowanie alfa i beta.

Niebezpieczeństwo, na jakie narażony jest pracownik zatrudniony w warunkach narażenia związane jest z oddziaływaniem zewnętrznym i wewnętrznym. O ile w przypadku źródeł zamkniętych oraz aparatów rentgenowskich, gdzie wykorzystywane jest jedynie promieniowanie elektromagnetyczne, mamy do czynienia wyłącznie z narażeniem zewnętrznym, to praca ze źródłem otwartym, izotopowym, obarczona jest ryzykiem wchłonięcia cząstki emitowanej ze źródła promieniowania jonizującego lub samego izotopu promieniotwórczego.

Skutki oddziaływania cząstek alfa i beta na organizm są niezwykle groźne (Fizyka w Szkole, 1/2021), dlatego też szczególną uwagę poświęca się osłonom przed promieniowaniem jonizującym (Fizyka w Szkole, 4/2021). Wątpiącym należy przypomnieć postać Aleksandra Litwinienki, otrutego izotopem polonu ^{210}Po , silnym emitorem cząstek alfa. Wobec powyższego pojawia się pytanie o jeden z rodzajów czujek dymu, w którym zastosowano inny emitery cząstek alfa – ameryk ^{241}Am , czy takie czujki są bezpieczne. Odpowiedź brzmi: tak. Cząstki alfa to cząstki stosunkowo ciężkie, złożone są z dwóch protonów i dwóch neutronów; ich zasięg w powietrzu jest niezwykle mały (do kilku centymetrów), więc właściwa obsługa tych urządzeń zapewnia bezpieczeństwo użytkownika.

Ze względu na zdecydowanie mniejszą masę, niesioną wysoką energię i w związku z tym dużo większy zasięg w powietrzu (do kilku metrów) dużo bardziej niebezpieczne dla człowieka są cząstki beta. Te wysokoenergetyczne elektrony wylatujące z jądra atomowego w wyniku rozpadu neutronu są w stanie pokonać odległość nawet ośmiu metrów; oczywiście odległość ta zależy od nuklidu, z którego są one emitowane. Do pracy z otwartymi źródłami promieniowania beta powszechnie stosuje się osłony. Przeważnie są to ekrany ze szkła sodowego lub organicznego o określonej grubości, odpowiednio dobranej do materiału, z którym wykonywana jest praca. Zauważmy, osłona nie tylko pochłonie pędzące elektrony, ale również częściowo wytłumi dawkę promieniowania elektromagnetycznego.

Promieniowanie rentgenowskie oraz gamma

Promieniowanie elektromagnetyczne towarzyszy każdemu wcześniej wymienionemu rodzajowi promieniowania. Nic dziwnego, wyrzut wysokoenergetycznej cząstki z jądra atomowego skutkuje zmianą poziomów energetycznych pozostałych nukleonów a emisja promieniowania elektromagnetycznego jest wynikiem zmian ich energii.

Do obliczeń dawki promieniowania gamma potrzebna jest znajomość jakościowo-ilościowa źródła promieniowania. Krótko mówiąc, musimy wiedzieć, z jakim źródłem

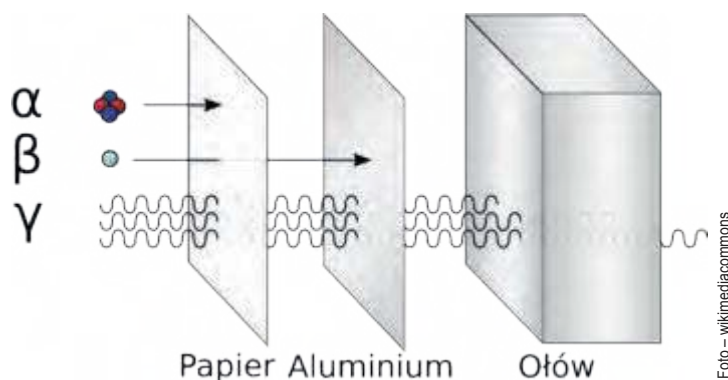


Foto – Wikimedia commons

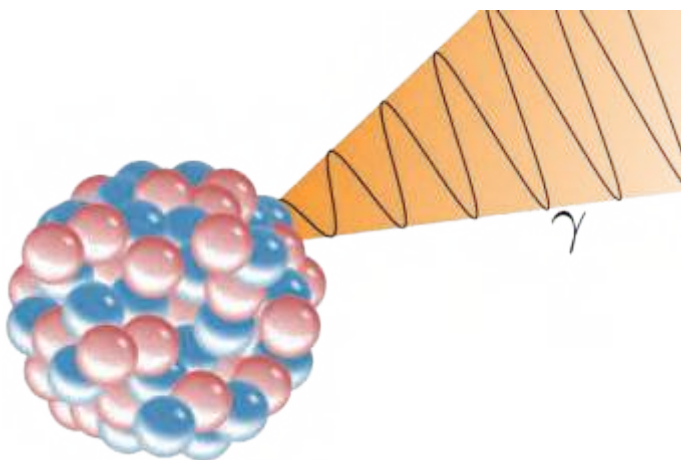


Foto – wikimediacommons

mamy do czynienia oraz musimy znać aktywność źródła a także jego rodzaj: czy jest to źródło otwarte czy źródło zamknięte. W przypadku źródeł izotopowych wiedza na temat stosowanego izotopu promieniotwórczego pozwala na poruszanie się w stabelaryzowanych wielkościach dla danego izotopu, w szczególności na odczytanie czasu połowicznego zaniku ($T_{1/2}$), energii promieniowania gamma oraz stałej Γ_p , wielkości niezwykle istotnej do obliczeń dawki promieniowania jonizującego. Wielkość ta zwana jest równoważną wartością stałej ekspozycyjnej i została ona wyznaczona doświadczalnie i stabelaryzowana.

Należy jednak zauważyć, że jeszcze do niedawna w ochronie radiologicznej użyciu były następujące jednostki: rentgen (R), rad (rd), rem (re), kiur (Ci). Dotyczyły one odpowiednio wielkości dawki ekspozycyjnej, wielkości dawki pochłoniętej, wielkość równoważnika dawki promieniowania jonizującego pochłoniętego przez organizm oraz aktywności źródła. Obecnie stosowane jednostki, zgodne z Międzynarodowym Układem Jednostek Miar SI, przedstawia tabela 1. Sporządzane jednak wiele lat temu Polskie Normy z użyciem „starych” jednostek zawierają dane opracowane eksperymentalnie. Termin „równoważna wartość stałej ekspozycyjnej” wprowadzono po przeliczeniach wartości tabelarycznych na nowe jednostki.

Podobnie jest z obliczeniem dawki wynikającej z narażenia na inny rodzaj promieniowania elektromagnetycznego, czyli promieniowanie rentgenowskie. Dla przypomnienia: zarówno promieniowanie gamma jak i promieniowanie rentgenowskie niosą ze sobą wysoką energię, rzędu 10^4 keV i wyższą, długości fal obydwu rodzajów promieniowania są podobne, jednakże różnią się one pochodzeniem.

Promieniowanie gamma jest wynikiem energii wypromieniowywanej z jądra atomowego w wyniku przemian jądrowych, natomiast promieniowanie rentgenowskie jest to wynik hamowania pędzących elektronów w pobliżu ciężkich jąder atomowych. Nie oznacza to, że skutek innego pochodzenia, obydwie rodzaje promieniowania będą w inny sposób oddziaływać na żywy organizm. W obydwu przypadkach mamy przecież do czynienia z wysokoenergetyczną falą elektromagnetyczną, efekty oddziaływania na organizm więc będą podobne.

Skutki, jakie niesie ze sobą promieniowanie jonizujące w postaci fali elektromagnetycznej powodują, że przykła-

dowo dostęp do pracowni rentgenowskich celem wykonania prześwietlenia jest ograniczony a każdorazowe wykonanie zdjęcia rentgenowskiego w celach diagnostycznych wymaga skierowania od lekarza z podaniem stosownego uzasadnienia. Nie inaczej jest, jeśli chodzi o możliwość uzyskania prawa do wykonywania niektórych zawodów, takich jak – przykładowo – operator aparatu rentgenowskiego, kierowca w firmie transportowej posiadającej zezwolenie na transport źródeł promieniowania jonizującego oraz odpadów radioaktywnych, a także, co może wydawać się dużym zaskoczeniem, pilot samolotu i cały personel pracujący na pokładzie lecącego samolotu.

Dawki promieniowania rentgenowskiego obliczamy jednak nieco inaczej. O ile współczynnik Γ_r jest charakterystyczny dla danego izotopu, to do obliczeń dawki promieniowania rentgenowskiego używamy wielkości U, I, oraz filtru z glinu, miedzi, żelaza lub innych pierwiastków. Nie zmienia się natomiast zasada spadku dawki promieniowania jonizującego wraz z odległością ani istotność czasu narażenia. Ważność wiedzy na temat przyłożonego napięcia oraz natężenia prądu anodowego jest tu o tyle istotna, że wraz z wyższym napięciem prądu anodowego moc dawki wzrasta.

A w medycynie...

Nie należy zapominać o osobach poddających się terapii z zastosowaniem izotopów promieniotwórczych. I tu czeka mała niespodzianka, gdyż dawki promieniowania jonizującego pochodzące od zastosowań medycznych nie wliczają się do dawki rocznej. Nie oznacza to jednak, że ekspozycja medyczna niesie ze sobą większe zagrożenie. Wielkość dawki promieniowania jonizującego, rodzaj izotopu i częstość naświetlań dobierana jest przez wysokiej klasy specjalistów, mających na względzie przede wszystkim dobro pacjenta.

Irracjonalny strach przed promieniowaniem

11 marca 2011 roku w wyniku trzęsienia ziemi i wystąpieniu po nim fali tsunami doszło do uszkodzenia reaktora w Elektrowni Atomowej Fukushima nr 1 Dai-Ichi. Wypaadek ten został zaklasyfikowany jako druga w świecie



Foto – wikimediacommons

awaria stopnia 7 w siedmiostopniowej skali INES (Międzynarodowa skala zdarzeń jądrowych i radiologicznych, ang. *International Nuclear and Radiological Event Scale*). Nietrudno domyślić się, że niechlubne pierwszeństwo przypadło awarii czwartego bloku Czarnobylskiej Elektrowni Jądrowej, które to zdarzenie miało miejsce 26 kwietnia 1986 roku.

Ze względu na wciąż żywą pamięć o wydarzeniach sprzed 35 lat, informacje o awarii elektrowni jądrowej wywoływały ożywione dyskusje w kontekście zagrożenia promieniowaniem jonizującym oraz skutkach, jakie wywołają, gdy fala promieniowania jonizującego dotrze do Polski. Tymczasem...

Tymczasem należy wziąć pod uwagę przede wszystkim odległość, jaka dzieli Polskę i Japonię. Dawka promieniowania jonizującego spada wraz z kwadratem odległości od źródła promieniowania, więc samo to powinno już uspokajać. Sytuacja meteorologiczna, przede wszystkim kierunek wiatru, termika, stopień wilgotności i wiele innych czynników związanych z lokalizacją obydwu krajów sprawia, że w Polsce nie istnieje zagrożenie od strony wspomnianej elektrowni. Nie ma co więc panikować i wykupywać całego zapasu jodu z aptek lub innych źródeł dystrybucji, gdyż nie tylko, że nie jest on w tym momencie potrzebny, to samowolne dawkowanie tego pierwiastka może być bardzo groźne w skutkach dla organizmu człowieka.

Na zakończenie przytoczę fragment książki autorstwa Serhija Plokhiego „Czarnobyl. Historia nuklearnej katastrofy” wydanej przez Wydawnictwo Znak Horyzont w 2019 roku: „Maksymalna dawka dopuszczalna dla robotników uprzątających teren czarnobylskiej elektrowni jądrowej latem 1986 roku wynosiła 25 remów, czyli 0,25 Sv. Wielkość dawki promieniowania otrzymanej przez ludzi ewakuowanych z czarnobylskiej strefy zamkniętej szacuje się dzisiaj na 30 remów (0,3 Sv). Choroba popromienna, której towarzyszą takie objawy jak mdłości

i „opalenizna popromienna” – ciemnienie skóry poparzonej promieniowaniem, które nie zawsze prowadzi do śmierci – zaczyna się od 100 remów (1 Sv). Połowa osób otrzymujących dawkę promieniowania zabójczą dla szpiku kostnego, który obumiera przy dawkach 400-500 remów, czyli 4-5 Sv, żegna się z życiem w ciągu miesiąca. Operatorzy czarnobylskiej elektrowni i strażacy, którzy zmarli po niespełna miesiącu od napromienienia, otrzymali ponad 600 remów (6 Sv). Odpowiada to 6 grejom promieniowania gamma lub beta. Aleksandr Akimow, kierownik zmiany bloku czwartego w momencie eksplozji, pochłonął około 15 grejów promieniowania. Zmarł piętnaście dni po awarii.”

Tabela 1. Wybrane jednostki w ochronie radiologicznej stosowane wcześniej i obecnie.

Wielkość	Jednostka nie używana	Jednostka stosowana obecnie
Dawka ekspozycyjna	Rentgen (R)	Kulomb na kilogram
Dawka pochłonięta	Rad (rd)	Grej (Gy)
Równoważnik dawki pochłoniętej	Rem (rem)	Siwert (Sv)
Aktywność źródła promieniowania jonizującego	Kiur (Ci)	Bekerele (Bq)

dr Wioletta Dynkowska

Zakład Biochemii i Fizjologii Roślin, Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin
Państwowy Instytut Badawczy, Radzików

LITERATURA:

- [1] Ustawa z dnia 29 listopada 2000 roku – Prawo atomowe (Dz.U. z 2021 r., poz. 623 i 784, tekst jednolity z dnia 1 marca 2021 r.)
- [2] B. Gostkowska: Ochrona radiologiczna. Wielkości, jednostki, obliczenia. Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, Warszawa, 2018.
- [3] S. Plochy: Czarnobyl. Historia nuklearnej katastrofy. Wydawnictwo Znak Horyzont, Warszawa 2019

Co w fizyce piszczy

Pole magnetyczne opon

Grupa naukowców Politechniki Opolskiej opracowała metodę sprawdzania stanu opon samochodowych za pomocą badania ich pola magnetycznego. Zdaniem autorów tej metody w przyszłości odpowiednie urządzenia mogą być montowane w każdym aucie.

O stanie opony możemy dużo się dowiedzieć po zbiciu jej pola magnetycznego. Jak powiedział prof. Sebastian Brol z Katedry Pojazdów Wydziału Mechanicznego Politechniki Opolskiej, zastosowanie odpowiednich czujników pozwoli na kontrolę jakości opony bez potrzeby jej zdejmowania z pojazdu.

„Ta metoda pozwala na wcześniejsze wskazanie, że pozostała bardzo mała ilość warstwy mieszanki gumowej bieżnika. Pod bieżnikiem opony samochodowej znajduje się struktura zwana opasaniem. Składa się ona z drutów stalowych, które podczas jazdy ulegają odkształceniu i w wyniku efektu Villariego zmienia się ich pole mag-

netyczne. Za pomocą czujnika magnetycznego obserwujemy zmiany tego pola podczas eksploatacji. Na tej podstawie wnioskujemy, czy bieżnik jest zużyty, czy też nie. Możemy także sprawdzić, czy opona była uszkodzona, naprawiana, czy też coś się do niej wbiło. Jesteśmy także w stanie oszacować czas eksploatacji opon oraz opisać, jak zmiany ciśnienia w oponach wpływają na ich pole magnetyczne” - wyjaśnia prof. Brol.

Według badań naukowców opolskiej uczelni, istnieje relacja pomiędzy stanem bieżnika ze zmianami rozkładu pola magnetycznego opasania opony. Obecnie do badania opon wykorzystywane jest stanowisko wielkości poręcznej walizki. W przyszłości autorzy urządzenia widzą szansę na jego zastosowanie jako stałe wyposażenie samochodu. Jak przypominają naukowcy, na zużycie opony ma wpływ nie tylko widoczne gołym okiem zużycie bieżnika, ale także jej wiek i obciążenia, jakim są poddawane w czasie eksploatacji. (PAP)

Żywoty fizyków

Robert Hooke

(1635 – 1703)

Tadeusz Wibig



Foto – wikimedia commons

Miał to nieszczęście, że był niemal rówieśnikiem wielkiego Newtona. A sam był wzrostu niedużego, dodatkowo garbił się jeszcze, szczupły, żeby nie powiedzieć chudy wręcz, na starość skóra i kości. Twarz miał bladą, a w niej wylupiałe, rozbiegane szare oczka, nos cienki, umiarkowany, usta zaś szerokie i cienkie, na głowie niedużej niedbałe brązowe loki nieprzycinane i zwisające w nieładzie. Tak widzieli go niechętni mu współcześni, a takich, z Newtonem na czele, było bardzo wielu. Trudny charakter Hooke’a mógł mieć źródła w jego wczesnym dzieciństwie, gdzie był zdecydowanie najmłodszym dzieckiem w rodzinie, znacznie młodszym od swoich dwóch siostr i dwojga braci, choć nie wiemy nic, aby rodzeństwo znęcało się nad nim nadmiernie.

Gdy miał 13 lat umarł jego ojciec zostawiając mu spadek w wysokości 40 funtów. Było to na tyle dużo, że Robert mógł wybrać się do Londynu i rozpocząć tam studia. Szybko opanował grekę i łacinę, *Elementy* Euklidesa i grę na organach. To ostatnie właśnie sprawiło, że pojawił się w Oksfordzie. Tam jako dalekiego krewnego zatrudnił go w charakterze asystenta znany i uznany badacz ludzkiego ciała ze szczególnym uwzględnieniem mózgu niejaki Tomasz Willis. Niedługo potem Hooke poznał Roberta Boyle’a badacza sprężania i rozprężania gazów. Boyle zatrudnił dwudziestoletniego Hooke’a na etacie swojego asystenta. Razem przez siedem lat sprężali i rozprężali, coraz lepiej i efektywniej, co się tylko dało.

Niektórzy twierdzą, że to Hooke odkrył prawo znane dziś jako prawo Boyle’a (Boyle’a-Mariotte’a), historia jednak nazwisko asystenta w tym miejscu zamilczała. A on w międzyczasie zajmował się na krótko teorią lotów maszyn ciężkich od powietrza, ale i transportem wody w roślinach badając efekty kapilarne. Boyle tymczasem wraz z kolegami naukowcami utworzył coś na kształt kółka zainteresowań zwanego „Niewidocznym Uniwersytetem” (*Invisible College*), które w 1663 włączyło się i zdominowało praktycznie istniejące od trzech lat *The Royal Society of London for Improving Natural Knowledge* (Towarzystwo Królewskie). Boyle i Hooke zostali jednymi z pierwszych jego członków.

Od roku 1663 Hooke oglądał świat głównie przez mikroskop. Jego pomnikowa praca *Micrographia* ukazała się w 1665 i zawiera najwcześniejszy zaobserwowany

mikroorganizm, pleśniak, właściwie grzyb. To Hooke przyglądając się strukturze korka ukuł termin komórka, sugerując podobieństw struktury ścian komórkowych do komórek w plastrze miodu. W *Micrographii* możemy też znaleźć przepiękne obrazy much, komarów, wszy i pcheł i innych nie lubianych stworzeń, a także innych przedstawicieli świata ożywionego w dużym powiększeniu.

W tej samej *Micrographii* Hooke zajmował się nie tylko pięknem mikroświata. Poświęcił tam wiele miejsca grawitacji jako przyciąganiu się ciał niebieskich. Rok później w 1666 roku na wykładzie sformułował dwa postulaty w tym względzie: po pierwsze „ciała poruszają się zawsze po liniach prostych, chyba, że jakaś siła zmusi je do zmiany kierunku” i „siła przyciągania (grawitacja) jest silniejsza, gdy ciała są bliżej siebie”. Nie będziemy tu rozwodzić się nad tym, jak ma się to do grawitacji opisanej w „*Principiach*” Newtona (1687). To osobna, długa i niejasna do końca historia. Dziś w szkole uczymy się, że grawitacja to pomysł Newtona i tylko jego.

Poza tym w *Micrographii* znajdują się Hooke’a rozważania paleontologiczne. Obserwując pod mikroskopem strukturę skamieniałego drewna porównał ją z obrazem drewna dzisiejszego i zauważył znaczące podobieństwo. Doprowadziło go to do konkluzji, że także i inne skamienieliny, jak choćby skamieniałe amonity, to nic innego jak pozostałości dawnego, bardzo dawnego życia i niewykluczone, że kiedyś żyły na Ziemi stworzenia, których dziś już nie ma. Trzeba przyznać, że był to pogląd dość nieortodoksyjny i zdecydowanie wyprzedzający swe czasy i jako taki został zapomniany.

Hooke nie tylko patrzył na świat w skali mikro, ale także poświęcał sporo uwagi badaniom astronomicznym. Próbowal metodą paralaksy zmierzyć odległość od gwiazdy Eltanin (*Gamma Draconis*) najjaśniejszej w gwiazdozbiórze Smoka. W *Micrographii* mamy rysunek gromady Plejad, mamy rysunki kraterów na Księżycu i pierścieni Saturna. Hooke jako pierwszy zaobserwował też gwiazdę podwójną Mesarthim - γ w gwiazdozbiórce Barana.

Micrographia zawiera również pomysły Hooke’a, a może Boyle’a i Hooke’a, dotyczące procesu spalania. Eksperymenty Hooke’a doprowadziły go do wniosku, że do spalania niezbędna jest obecność powietrza. Gdyby Hooke pociągnął swe badania dalej w tym kierunku,

mógłby odkryć tlen na sto lat przed Priestleyem. Historia jednak potoczyła się inaczej.

Hooke trafił jednak do podręczników fizyki. Znały jest przede wszystkim z **prawa Hooke'a**. Wymyślił je w roku 1676 i ogłosił światu pisząc „ceiinossttuy”. Dziś piszemy „ $F = -kx$ ” i wszyscy wiedzą o co chodzi, ale Hooke'owi nie chodziło o to, by wszyscy prawo to poznali, ale by zapewnić sobie pierwszeństwo, gdyby ktoś inny próbował zawłaszczyć jego odkrycie. Dwa lata później wyjaśnił w dziele „*Lectures de Potentia Restitutiva, Or of Spring Explaining the Power of Springing Bodies*”, że „ceiinossttuy” to anagram, który odczytać należy jako „*ut tensio, sic vis*”, czyli po polsku „jakie rozciągnięcie, taka i siła”, czyli właśnie $F = -kx$.

Odkrycie to wygląda niepozornie, jednak jego znaczenie jest ogromne. Już sam Hooke wykorzystał je praktycznie do budowy zegarka, którego chód stabilizował mechanizm ze sprężynowym balansem i wychwytem kotwicznym. Powstał tak zegarek przenośny i dzięki niemu można było budować bardzo dokładne zegary niezbędne w nawigacji do ustalania aktualnej pozycji, długości geograficznej okrętów na morzu. Hooke próbował opatentować, acz bez powodzenia swój wynalazek, co więcej, przy okazji pokłócił się z innym wybitnym naukowcem z kontynentu Holendrem Christiaanem Huygensem, który opatentował swój zegarek kieszonkowy dopiero pięć lat później, a mimo to uznany został przez historię za twórcę sprężynowego mechanizmu balansowego.

Hooke nie zdawał sobie najpewniej sprawy z tego, jakie znaczenie ma jego „ceiinossttuy”. Przybliżenie $F = -kx$ doskonale się sprawdza nie tylko dla mas zawieszonych na sprężynkach, ale i przy niewielkich odchyleniach od położenia równowagi i innych układów fizycznych. Ponieważ z drugiej strony mamy $F = ma$ (drugie prawo Newtona), to w połączeniu z prawem Hooke'a możemy sformułować proste równania ruchu dla takich układów. Rozwiązaniem ich są oscylacje zwane harmonicznymi: $x(t) = x_0 \sin(\omega t + \varphi)$. Drgań harmonicznym wokół nas jest mnóstwo.

Hooke był też oficjalnym geodetą Londynu i pomagał w odbudowie Londynu po wielkim pożarze w 1666 roku, a także pracował nad projektem Królewskiego Obserwatorium Greenwich i wielu innych budynków. Jego pomysły urbanistyczne przeprojektowania ulic Londynu na wzór siatki z szerokimi ulicami i bulwarami znalazły uznanie nie tylko w Anglii, ale i we Francji, a nawet Ameryce i do dziś są aktualne, choć o Hooke jak architekcie specjalnie się nie pamięta. Hooke zajmował się też pamięcią, teoretycznie. Jego w dużej części zapomniane koncepcje są zaskakująco nowoczesne, nawet, jak na dzisiejsze czasy.

Warto jeszcze wspomnieć jego prace z zakresu akustyki i opis dwuwymiarowych obrazów na szklanych płytach pobudzanych do drgań o określonych częstościach. Sto lat później opisał je i badał intensywnie niejaki Ernst Chladni. Figury, jakie obserwował Hooke znane są dziś na świecie pod nazwą *figury Chladniego*. I tym razem historia dla Hooka nie okazała się łaskawa.

Tadeusz Wibig
Katedra Fizyki Teoretycznej
Uniwersytet Łódzki

Doświadczenie domowe:

Figury Chladniego

A. Potrzebne materiały

1. smartfon,
2. duży głośnik, a nawet kolumna głośnikowa,
3. wzmacniacz akustyczny, do którego wejścia podłączymy smartfon, a do wyjścia głośnik,
4. płytka z plexi, może być z innego tworzywa, czy metalu, byle by była dostatecznie sztywna, a jednocześnie lekka,
5. cztery szklanki lub duża misa, albo doniczka, albo coś w tym rodzaju,
6. sól.

B. Narzędzia – odpowiednie kabelki do podłączenia smartfonu, wzmacniacza i głośnika.

C. Kolejność czynności

1. Korzystając ze smartfona ściągnąć i zainstalować na nim jakąś aplikację „generator akustyczny” (*frequency generator, tone generator* dla znających angielski), jest ich w sieci bardzo wiele, można wybierać. Podłączyć smartfon do wzmacniacza, a wzmacniacz z głośnikiem.
2. Uruchomić aplikację w modzie sinusoidalnym i sprawdzić, czy z głośnika wydobywa się właściwy dźwięk. Jego głośność musi być duża, pischczenie przy wysokich częstotliwościach musi osiągać „granice wytrzymałości” normalnego człowieka (no, bez przesady).
3. Kolumnę/głośnik ustawić membraną ku górze.
4. Zamontować płytkę plexi nad kolumną (głośnikiem). Mocowanie powinno być dokonane z użyciem elementów twardych, solidnych, nie pochłaniających istotnie drgań. Można ją na przykład oprzeć na szklankach, czy innych sztywnych postawach. (w przykładzie pokazanym na zdjęciu użyłem głośnika włożonego do kamionkowej misy i moja płytka (faktycznie użyłem szufladki na dokumenty) leży po prostu na tej misce).



5. Posypać delikatnie płytkę solą.
6. Włączyć generator w smartfonie i zmieniać powoli częstotliwość dźwięku kontrolując jednocześnie głośność.
7. Przy pewnych częstotliwościach powinniśmy zaobserwować drgania ziarenek soli, które dla odpowiednich częstości powinny gromadzić się w miejscach, gdzie na płycie pojawiają się węzły fali stojącej.
8. Niewielkie zmiany częstości prowadzą do zdecydowanej zmiany wzorów na płycie.



Może figura pokazana na zdjęciu nie jest najpiękniejsza, ale jak ktoś chce, może łatwo znaleźć bardzo ładne przykłady w internecie, a najlepiej, gdyby spróbował zrobić je samemu.

O fizyce żeglowania

Foto – Adobe Stock

Marta Wacławczyk

Żeglarstwo to temat, który fascynuje wiele osób. Ważną częścią kursów żeglarskich, oprócz nauki techniki pozwalającej na sterowanie jachtem, jest opanowanie tzw. teorii żeglowania, czyli fizycznych podstaw ruchu jachtu. Pozwalają one zrozumieć m.in., dlaczego jacht

płyne, w jakim kierunku może on płynąć, jakie ustawienie żagli jest optymalne.

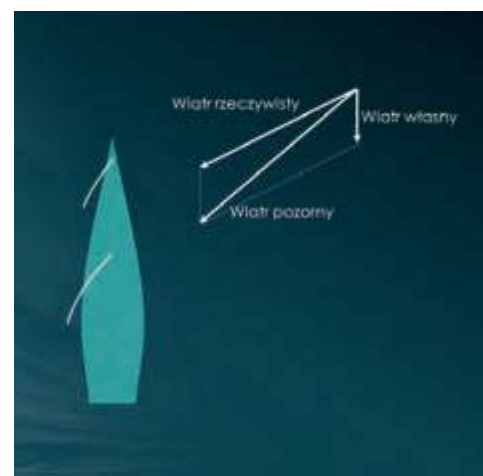
Jeśli poobserwujemy żaglówki w czasie regat zauważymy, że płyną one różnymi kursami względem wiatru (Rys. 1). Po starcie jachty przemieszczają się w kierunku boi znajdującej pod wiatr. Ponieważ nie mogą płynąć wprost pod wiatr muszą wykonywać zwroty, czyli halsować.

Płyną wówczas tak zwanym kursem ostrym. Po dopłynięciu do boi, kapitan jachtu robi zwrot, luzuje żagle i do następnej boi płynie półwiatrem. Po jej ominięciu jacht płynie z wiatrem, tzw. kursem pełnym.

Oczywiście, aby jacht płynął potrzebny jest wiatr. Nazywamy go wiatrem rzeczywistym. Jacht rozpędza się do pewnej prędkości, z czym związane jest powstawanie tak zwa-



Rys. 1. Żaglówki w czasie regat



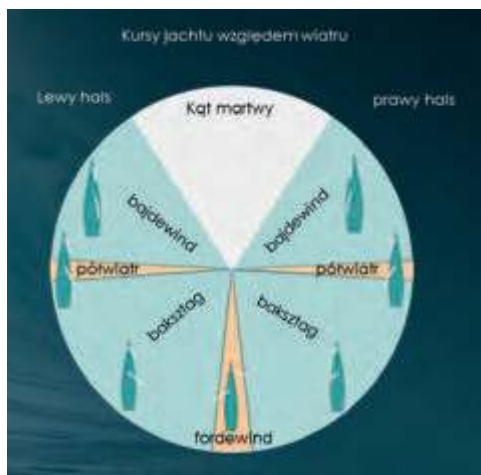
Rys. 2. Wiatr rzeczywisty, własny i pozorny.

nego wiatru własnego. Czujemy go na przykład, gdy jedziemy na rowerze lub biegniemy. Wiatr, który działa na żagle jest wypadkową wiatru rzeczywistego i własnego, nazywa się go wiatrem pozornym (Rys. 2).

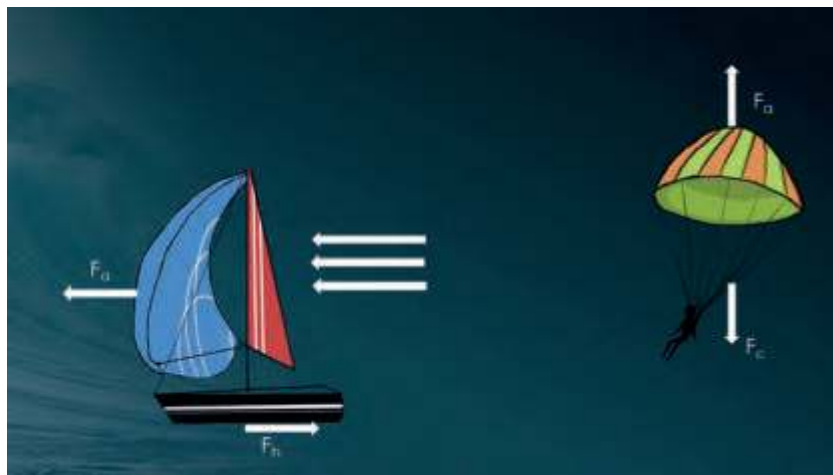
Kursy jachtu względem wiatru dzielimy na ostre: bajdewind i półwiatr oraz pełne: baksztąg i fordewind, czyli wiatr pełny. Poza tym w zależności od tego, z której burty wieje wiatr, jacht może płynąć prawym lub lewym halsem. Żaglówka nie może płynąć wprost pod wiatr, dlatego pewien kąt, liczony od dziobu jachtu nazywany jest kątem martwym.

Warto zastanowić się, dlaczego możliwe są różne kursy jachtu względem wiatru. Czy zasada powstawania siły działającej na żagle jest we wszystkich przypadkach taka sama? Najbardziej intuicyjne będą tutaj kursy pełne, w czasie których wiatr pcha jacht do przodu. Przypadek ten można porównać z lotem spadochronu, na który działają w kierunku pionowym siła oporu aerodynamicznego F_a oraz siła ciężkości F_c (Rys. 4). Kiedy siły te są w równowadze, spadochron spada ze stałą prędkością. Podobnie żagiel stawia opór F_a , dzięki któremu wiatr może pchać jacht do przodu. Siła oporu aerodynamicznego równoważona jest w tym wypadku przez siłę oporu hydrodynamicznego kadłuba jachtu F_h .

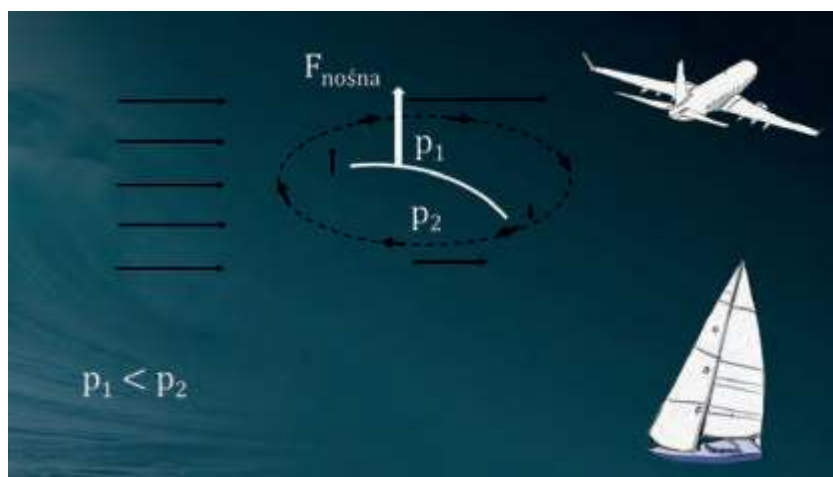
Wartość siły oporu aerodynamicznego jest proporcjonalna do kwadratu prędkości wiatru pozornego działającego na żagiel, powierzchni żagla A oraz gęstości powietrza ρ .



Rys. 3. Kursy jachtu względem wiatru.



Rys. 4. Jacht w czasie kursów pełnych.



Rys. 6. Zasada powstawania siły na żaglu w czasie kursów ostrych.

$$F_a = \frac{1}{2} C_D \rho A v^2.$$

C_D jest tutaj współczynnikiem oporu, który charakteryzuje przepływy wokół żagla.

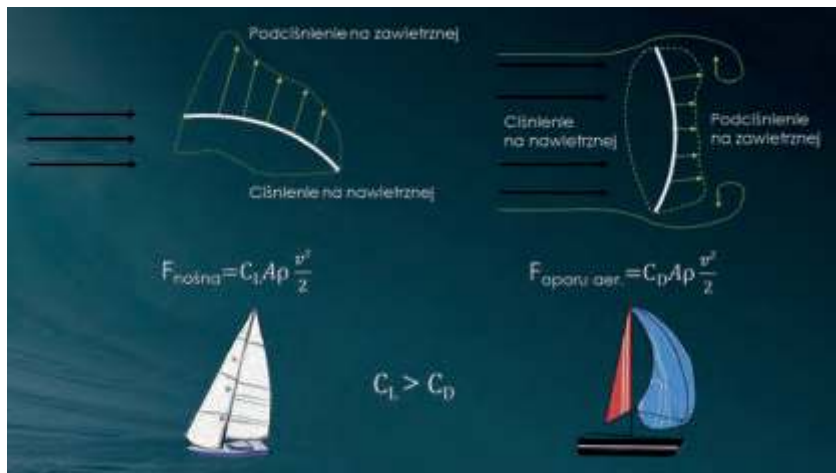
Inny mechanizm odpowiedzialny jest za powstanie siły na żaglu w czasie kursów ostrych. Jest on taki sam jak mechanizm tworzący siłę nośną na skrzydłach samolotu i polega na wytworzeniu dużej różnicy ciśnień. Obecność skrzydła zaburza w pewien sposób przepływ strugi wiatru. Wokół skrzydła powstaje zawirowanie nazywane cyrkulacją. Nakłada się ono na przyływ powietrza strumienia wiatru i powoduje, że na górnej stronie płata, nazywanej stroną ssącą prędkość wiatru jest większa, natomiast na dolnej stronie płata (nazywanej cisnącą) prędkość jest mniejsza. Ta różnica prędkości powoduje powstanie różnicy ciśnień, zgodnie z prawem Bernoulliego, któ-

re dla podanego przypadku można zapisać w postaci

$$\frac{1}{2} \rho v_c^2 + p_c = \frac{1}{2} \rho v_s^2 + p_s,$$

gdzie v_c i p_c oznaczają, odpowiednio, prędkość i ciśnienie po stronie cisnącej a v_s i p_s prędkość i ciśnienie po stronie ssącej. Jeżeli prędkość przepływu strugi wiatru powyżej skrzydła v_s jest większa od prędkości v_c poniżej skrzydła, $v_s > v_c$, to aby spełnione było powyższe równanie, zachodzić musi nierówność $p_s < p_c$. Ta różnica ciśnień powoduje powstanie siły nośnej na skrzydle samolotu. To właśnie dzięki niej samolot unosi się w powietrzu.

Podobny mechanizm związany jest z siłą powstającą na żaglu jachtu płynącego kursem ostrym, bajdewindem albo półwiatrem (Rys. 6). Ciśnienie po jednej stronie żagla, nazywanej stroną zawietrzną, jest wyższe niż po drugiej (nawietrznej) stronie. Podobnie jak w przypadku skrzydła samolotu, róż-



Rys. 7. Porównanie rozkładu ciśnień na żaglu w czasie kursów ostrych i pełnych.

nica ciśnień generuje siłę nośną. Jej wartość będzie zależna od pewnego współczynnika C_L , który charakteryzuje przepływ, od pola powierzchni żagla A , gęstości powietrza oraz kwadratu prędkości wiatru pozornego

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho A v^2.$$

Można teraz porównać ciśnienie powstające na żaglu w czasie kursów

ostrych i kursów pełnych. W pierwszym przypadku struga wiatru opływająca żagiel jest dość regularna i podąża za profilem żagla, wytwarzając przy tym duże podciśnienie na stronie zawietrznej (Rys. 7). W przypadku kursów pełnych przepływ koło żagla staje się burzliwy. Strugi wiatru odrywają się, a silne zawirowania obecne po zawietrznej stronie żagla absorbują energię kinetyczną wiatru. Wpływa to

negatywnie na wartość podciśnienia i w efekcie zmniejsza siłę, która działa na żagiel. Jest ona w rzeczywistości mniejsza niż w przypadku kursów ostrych. Dzięki temu dobrej klasy jachty żaglowe lub bojery (czyli ożaglowane jednostki ślizgające się po lodzie) mogą przy kursach ostrych płynąć z prędkością większą niż prędkość wiatru. Na przykład katamarany płynące podczas regat o puchar Ameryki osiągały prędkość 24 węzłów przy prędkości wiatru około 15 węzłów.

Teoria żeglowania obejmuje te i wiele innych zagadnień związanych z aero- i hydrodynamiką, statecznością czy sterownością jachtów żaglowych. Dobra znajomość podstaw fizyki będzie na pewno pomocna przy zdawaniu egzaminu na stopnie żeglarskie, a może nawet dzięki niej uda się wygrać regaty!

ŹRÓDŁA:

- [1] Czesław Marchaj, „Teoria żeglowania” Warszawa, 1970

Co w fizyce piszczy

Misja DART – pierwszy test obrony Ziemi przed asteroidami

Sonda kosmiczna DART wystartowała z Kalifornii z pierwszą w historii misją polegającą na próbie zmiany kursu asteroidy w ramach rozwijanego przez NASA programu obrony planetarnej.

Test Double Asteroid Redirection Test (DART), to pierwszy lot pokazowy NASA dla obrony planetarnej, ma na celu przetestowanie i zweryfikowanie metody ochrony Ziemi w przypadku zagrożenia uderzeniem asteroidy. Misja ma na celu przesunięcie orbity asteroidy poprzez uderzenie kinetyczne – w szczególności poprzez uderzenie statku kosmicznego w mniejszy element układu podwójnego asteroid Didymos, aby zmienić jego prędkość orbitalną.

DART ma dotrzeć do podwójnego układu asteroid Didymos oddalonego o 11 mln km 30 września 2022 r. i zgodnie z planem przeprowadzi test uderzenia kinetycznego na księżycowiec Dimorphos. Do zderzenia 633-kilogramowej sondy ma dojść przy prędkości 23,7 tys. km/h. Przez większość czasu misji sonda będzie sterowana z Ziemi, jednak przez ostatnie cztery godziny lotu „celowaniem” w asteroidę zajmie się autonomiczny system kontroli stworzony przez NASA.

Lindley Johnson, szef programu obrony planetarnej NASA, zapowiedział wcześniej, że misja DART będzie



pierwszym z wielu planowanych testów obrony Ziemi przed asteroidami.

Choć żadna ze zidentyfikowanych dotąd asteroid nie stanowi dla Ziemi zagrożenia w przewidywalnej przyszłości, wciąż wiele obiektów nie zostało jeszcze zaobserwowanych. NASA szacuje, że odkryte zostało ok. 90 proc. asteroid o średnicy większej niż 1 km, ale tylko ok. 40 proc. tych mniejszych. Tymczasem zaledwie 150-metrowa asteroida byłaby w stanie zniszczyć duże miasto i wywołać daleko idące skutki odczuwalne na sporym obszarze. (NASA, PAP)

Bipryzmat Fresnela w szkolnej edukacji

Kazimierz Mikulski

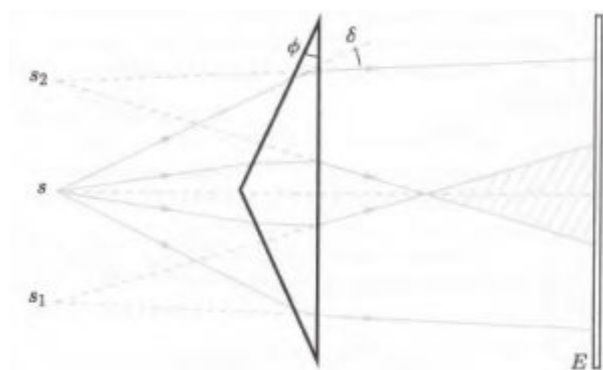
Często zadajemy sobie pytanie, na jakiej zasadzie działa dane urządzenie oraz ewentualnie przyrząd lub nawet zabawka dla dzieci.

Promień świetlny przechodząc przez pryzmat (rys. 1) o małym kącie łamiącym Φ doznaje odchylenia o kąt δ , którego wartość obliczymy ze wzoru:

$$\delta = (n - 1) \Phi$$

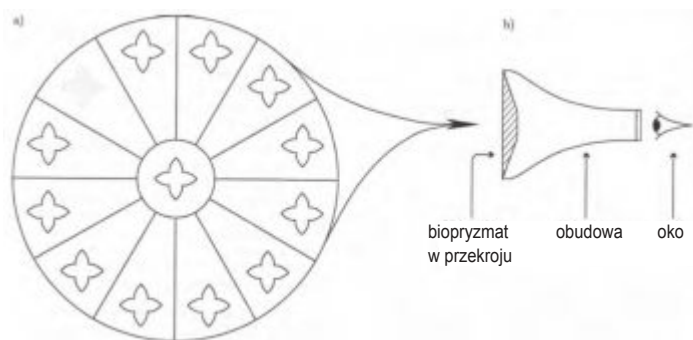
gdzie n jest współczynnikiem załamania pryzmatu.

Otrzymany obraz przedmiotu (źródła światła) jest przesunięty o kąt δ w stosunku do obrazu oglądanego gołym okiem. Jednym z elementów optycznych, jakim jest bipryzmat Fresnela, bywa stosowany w układach optycznych, w fotografii do zdjęć trickowych lub do zabawek dla dzieci. Rzut połówki bipryzmatu na płaszczyznę to wycinek koła o kącie $360^\circ/2k$, gdzie k jest liczbą bipryzmatów. Stosowany filtr, przy odpowiednim ustawieniu w stosun-



Rysunek 1. Układ klinów połączonych podstawami, czyli bipryzmatu Fresnela: s – źródło światła, s_1 , s_2 – dwa źródła pozorne, E – ekran.

Źródło: Mikulski K., Ruskiewicz D.J., Bipryzmat Fresnela, „Mała Delta” nr 4/95.



Rysunek 2. Dwunastokątny bipryzmat Fresnela z oszlifowanym środkiem, a) obraz widziany przez oko, b) schemat „zabawki” w przekroju.

Źródło: Mikulski K., Ruskiewicz D.J., Bipryzmat Fresnela, „Mała Delta” nr 4/95.

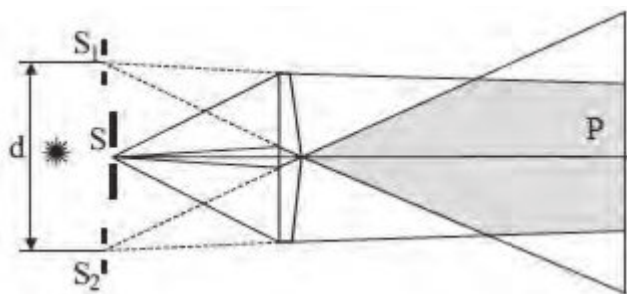
ku do oglądanego przedmiotu daje maksymalnie $2k+1$ obrazów pozornych. Należy pamiętać, że $2k$ obrazów jest tworzonych przez dany bipryzmat, a ostatni pochodzi od ściętej części układu.

W zasadzie układ taki jest znany, ale czy można „wykorzystać” w szkolnej pracowni fizycznej?

Omawiając zagadnienie „Interferencja fal” poruszamy problem tworzenia obrazu w wyniku podziału czoła fali. Przykładowo, interferometr Younga, w którym czoło falowe jest dzielone za pomocą dwóch szczelin, które działają jak punktowe źródła światła. Fale świetlne rozchodzące się ze szczelin nakładają się i interferują ze sobą, tworząc na ekranie obserwacyjnym obraz interferencyjny, złożony z minimów i maksimów. Innym przykładem jest interesujący bipryzmat Fresnela, złożony z dwóch sklejonnych pryzmatów. Dzieli czoło fali na dwie części, które nakładają się na siebie w pewnej odległości od bipryzmatu.¹

Sama definicja, w literaturze przedmiotu, wskazuje, że jest to „element optyczny składający się z 2 prostokątnych, sklejonnych podstawami pryzmatów o bardzo małych kątach łamiących; stosowany w przyrządach fotometrycznych oraz do obserwacji interferencji światła.”² Czytając więcej, jest to odmiana doświadczenia interferencyjnego typu Younga, w którym do wytworzenia dwóch spójnych wiązek światła używa się podwójnego pryzmatu, jak wskazano będącego złożeniem dwóch pryzmatów o małych kątach łamiących, złożonych podstawami.

Światło pada na bipryzmat ze szczeliny S , równoległej do krawędzi wspólnej podstawy pryzmatów. Obserwator w punkcie P widzi dwa pozorne źródła światła S_1 i S_2 , które są odpowiednikami szczelin w doświadczeniu Younga³. Prążki powstają tam, gdzie wiązki promieni, odchyłone przez obydwie połówki bipryzmatu, krzyżują się. Prążki interferencyjne są wyraźniejsze i jaśniejsze niż w doświadczeniu Younga i powstają one bez udziału zjawiska dyfrakcji. Używany jest w urządzeniach fotometrycznych do rozdzielania pola widzenia na dwie porównywalne części.

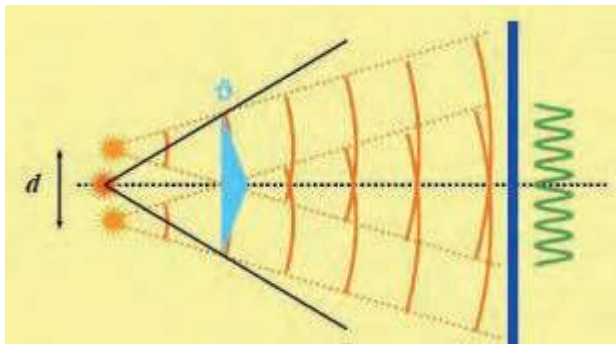


Rysunek 3. Powstawanie obrazu interferencyjnego za pomocą bipryzmatu Fresnela. Źródło: na podstawie http://www.edupedia.pl/words/index/show/532530_sownik_fizyczny-bipryzmat_fresnela.html

¹ Jan Masajada, Laboratorium Optyki Falowej, Instrukcja do ćwiczenia pt: Interferometr Macha-Zehndera, http://www.if.pwr.wroc.pl/~masajada/Interferencja%20w%20C5%9Bwietle%20spolaryzowanym_jm.pdf

² https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/bipryzmat-Fresnela;3877914.html?utm_source=TradeTracker&utm_medium=display

³ Czyli interferencja światła.

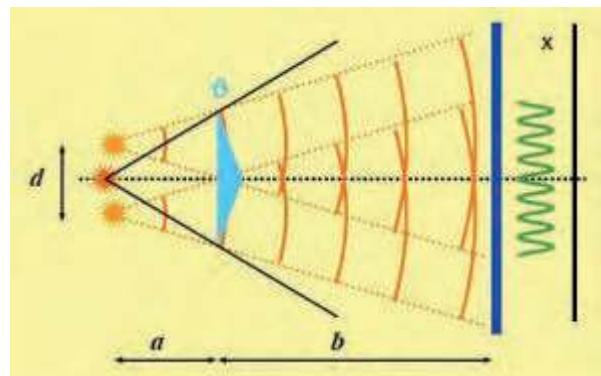
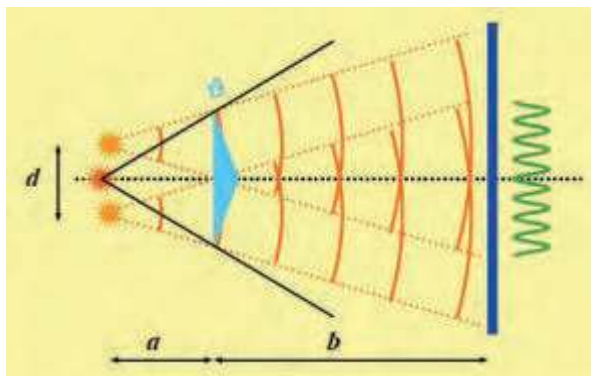


Rysunek 4. Bipryzmat Fresnela złożony jest z dwóch sklejonych pryzmatów, które umożliwiają podział czoła fali na dwie części, nakładające się na siebie w pewnej odległości od bipryzmatu, a na ekranie otrzymujemy obraz interferencyjny.
Źródło: na podstawie tekstu z strony w Internecie http://www.if.pwr.wroc.pl/~masajada/Interferencja%20w%20C5%9Bwietle%20spolaryzowanym_jm.pdf

Jak można obserwować zjawiska interferencji przez bipryzmat Fresnela?

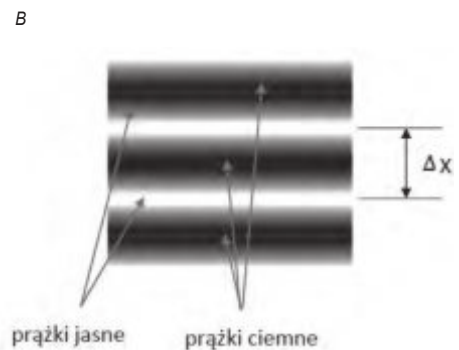
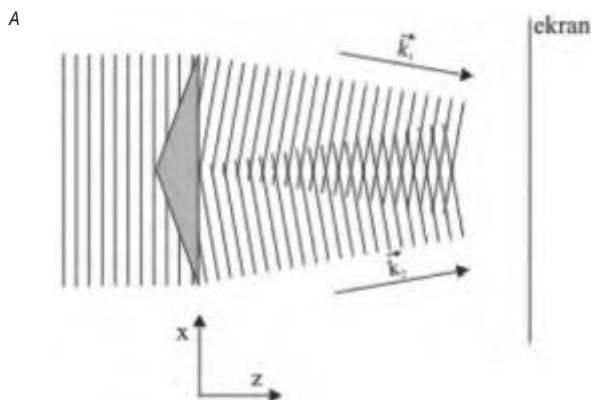
Czoło fali płaskiej przechodząc przez układ jakim jest bipryzmat, ulega podziałowi (rys. 4). Po przejściu przez pryzmatem następuje superpozycja dwóch wiązek: przechodzących przez górną i przechodzącą przez dolną część pryzmatu, powodując powstanie prążków interferencyjnych. Maksima interferencyjne powstają tam, gdzie różnica dróg optycznych pomiędzy interferującymi wiązkami jest całkowitą wielokrotnością długości fali λ .

Maksima interferencyjne pojawiają się zawsze w miejscach, w których różnica dróg optycznych pomiędzy interferującymi wiązkami, opisanymi przez wektory falowe k_1 , k_2 jest całkowitą wielokrotnością długości fali λ . Dla dużych odległości L ($a+b$) położenie pomiędzy sąsiednimi maksimami (minimami) obliczamy z wzoru: $\Delta X = \frac{a+b}{d} \lambda$.



Rysunek 5.6. Bipryzmat Fresnela, gdzie $(a+b)$ to odległość źródła od ekranu, x - oś współrzędnych (przyjęta do wizualizacji i obliczeń).

Wzory na podstawie rysunku są następujące: $X_{min} = m \frac{a+b}{d} \lambda$, $X_{max} = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{a+b}{d} \lambda$, gdzie $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ (nr otrzymanego prążka), λ - długość fali padającego światła, a, b - odległości z rysunku, d - odległość między pozornymi źródłami światła.



Rysunek 7.8. Schematyczne przedstawienie przejścia wiązki przez bipryzmat Fresnela. A) Górna i dolna część pryzmatu w różnym kierunku załamują wiązkę padającą na pryzmat. B) W pewnym obszarze za pryzmatem obserwujemy prążki interferencyjne. Źródło światła (Laser He-Ne $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ lub inny), d - odległość pomiędzy dwoma pozornymi źródłami światła, u - kąt pryzmatu (w radianach), ΔX - odległość między prążkami, czyli pomiędzy sąsiednimi maksimami bądź minimami na interferogramie.

Źródło: na podstawie https://www.fuw.edu.pl/~zopt/ultrafast/pfv10/11_interferencja.pdf

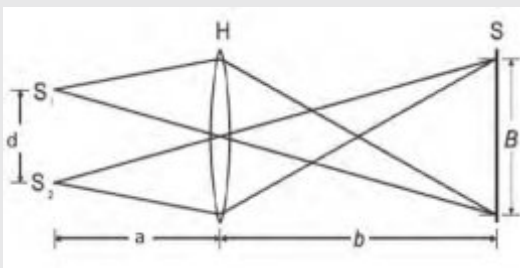
NETOGRAFIA

- [1] https://encyklopedia.interia.pl/fizyka/news-bipryzmat,nId,2053546#utm_source=paste&utm_medium=paste&utm_campaign=chrome
- [2] <https://encyklopedia.interia.pl/fizyka/news-bipryzmat,nId,2053546>
- [3] http://www.edupedia.pl/words/index/show/532530_sownik_fizyczny-bipryzmat_fresnela.html
- [4] http://www.if.pwr.wroc.pl/~masajada/Interferencja%20w%20C5%9Bwietle%20spolaryzowanym_jm.pdf
- [5] http://www.if.pwr.wroc.pl/~masajada/Lab%201%20Kolimacja%20wi%20C4%85zka%20laserowej%20_jm.pdf
- [6] <http://www.if.pw.edu.pl/~oleniacz/opto/inter.pdf>
- [7] https://www.fuw.edu.pl/~zopt/ultrafast/pfv10/11_interferencja.pdf
- [8] http://mif.duo.netstrefa.pl/fale_files/interferencja.pdf
- [9] http://www.edupedia.pl/words/index/show/532530_sownik_fizyczny-bipryzmat_fresnela.html

dr Kazimierz Mikulski
Maksymilianowo

Ćwiczenie 1. Wyznaczenie odległości pomiędzy pozornymi źródłami S_1, S_2

W sytuacji, gdy L jest odległością pomiędzy płaszczyzną źródła obserwacji a płaszczyzną źródła światła ($L = a + b$) i odległość d pomiędzy pozornymi źródłami światła S_1, S_2 można określić korzystając z prostego układu optycznego



Rysunek 9. Układ do wyznaczenia odległości między pozornymi źródłami światła.

Przy użyciu soczewki H tworzymy na ekranie rzeczywiste obraz źródeł S_1, S_2 . Z rys. 9 wynika bezpośrednio, że:

$$d/a = B/b \Rightarrow d = Ba/b$$

Jeśli znamy ogniskową $\langle f \rangle$ soczewki H , to odległość $\langle a \rangle$ możemy wyznaczyć z następującego równania:

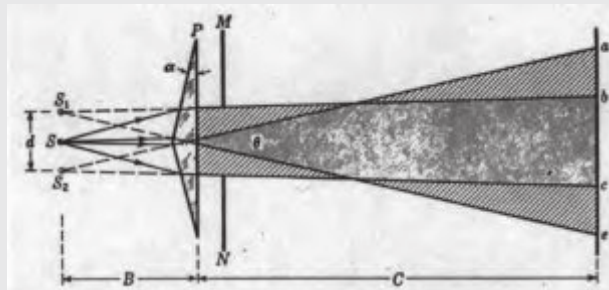
$$1/a = (1/f) - (1/b) \Rightarrow a = (fb)/(b - f)$$

Wykonując pomiary: wartości $\langle b \rangle$ oraz na ekranie wartości $\langle B \rangle$ dokonujemy dalszych obliczeń i otrzymujemy

$$d = Ba/b \Rightarrow d = B(fb/b - f) / b \\ \Rightarrow d = Bf / (b - f)$$

Ćwiczenie 2. Wyznaczenie długości fali świetlnej stosując bipryzmat Fresnela

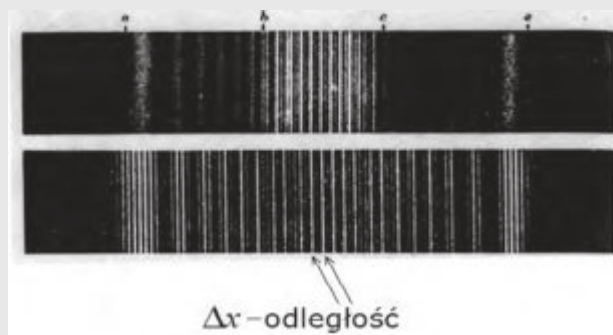
W celu dokonania pomiarów i obliczeń fali świetlnej przyjmujemy następujące założenia jak na rys. 10.



Rysunek 10. Układ do wyznaczenia długości fali świetlnej.

Źródło: na podstawie http://mif.duo.netstrefa.pl/fale_files/interferencja.pdf

W oparciu o literaturę przedmiotu można przedstawić obraz interferencyjny jak poniżej



Rysunek 11. Obraz interferencyjny do wyznaczenia długości fali świetlnej, gdzie Δx to odległość między prążkami na obrazie interferencyjnym.

Źródło: na podstawie http://mif.duo.netstrefa.pl/fale_files/interferencja.pdf

Wykorzystując wcześniejsze obliczenia oraz zgodnie ze sztuką pomiarów otrzymujemy wzór na obliczanie długości fali następującej postaci:

$$\lambda = (\Delta x \cdot d) / (B + C)$$

gdzie odpowiednie wielkości pomierzone zgodnie z wskazaniem na rys. 10.

Notatka o badaczu



Fotografia 1. Thomas Young (1773–1829) i Fresnel Augustin Jean (1788–1827)

Źródło: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9f/Thomas_Young_%28scientist%29.jpg

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/02/Augustin_Fresnel.jpg

Fresnel przez całe życie walczył z gruźlicą, której niestety uległ w wieku 39 lat. Nie stał się osobą publiczną sławną w trakcie swojego życia, ale żył wystarczająco długo, aby uzyskać należne uznanie od swoich rówieśników, a jego imię jest wszechobecne we współczesnej terminologii optyki i fal. Po przyjęciu teorii falowej światła zaproponowanej przez Maxwella, niektórzy nie zwracali uwagi na wielkość wkładu Fresnela w rozwój fizyki.

W okresie między unifikacją optyki Fresnela a szerszą unifikacją wprowadzoną przez Maxwella, ówczesny autorytet, Humphrey Lloyd (1800–1881)¹, opisał teorię fali poprzecznej Fresnela jako „*najszlachetniejszą tkaninę, która kiedykolwiek zdobiła dziedzinę fizyki, z wyjątkiem systemu wszechświata Newtona*”.

1809 – Ukończył Szkołę Mostów i Dróg w Paryżu.

1818 – Przedstawił rozprawę o dyfrakcji światła.

1819 – Badał wpływ polaryzacji na interferencję światła.

1822 – Odkrył i wyjaśnił polaryzację kołową i eliptyczną światła wytłumaczył zjawisko skręcenia płaszczyzny polaryzacji zaprojektował soczewkę Fresnela.

1823 – Sformułował wzory Fresnela odkrył polaryzację eliptyczną światła przy całkowitym wewnętrznym odbiciu został członkiem francuskiej Akademii Nauk.

1825 – Został członkiem Towarzystwa Królewskiego w Londynie.

¹ [https://en.wikipedia.org/wiki/Humphrey_Lloyd_\(physicist\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Humphrey_Lloyd_(physicist))

² Na podstawie https://en.wikipedia.org/wiki/Augustin-Jean_Fresne



Foto – Dreamstime

Prawa fizyki a filozofia

Waldemar Reñda

Na wstępie cytuję z „Alicji w krainie czarów” Lewisa Carrolla:

„Król, który od pewnego czasu pracownice pisał coś w swym notatniku, zawołał „Cisza!” i przeczytał: „Reguła czterdziesta druga. Wszystkie osoby mierzące więcej niż jedną milę wysokości muszą opuścić dwór”.

Wszyscy spojrzeli na Alicję.

– Ależ ja nie mam mili wzrostu – powiedziała Alicja.

– Masz! – stwierdził Król.

– Zgoda, ale ta reguła nie jest powszechnie przyjęta. Pan ją wymyślił na poczekaniu.

– To jest najstarsza reguła w tej książce – powiedział Król.

– Powinna więc mieć numer jeden! – odrzekła Alicja. Król przybladł i pospieszenie zamknął notatnik...

Dlaczego przytoczyłem tę powiastkę? Zauważcie, że Alicja zgodziła się na stwierdzenie, iż ma więcej niż milę wzrostu, bo mogą być różne mile. Nie zgodziła się jednak na dowolne traktowanie prawa. W opowieści tej król na poczekaniu wymyślał prawa. Fizyk natomiast praw nie wymyśla. Fizyk je odkrywa. Są one bowiem właściwością przyrody, a ich odkrywanie to wspaniała intelektualna przygoda.

Przypomnę, że fizyka jest podstawową nauką przyrodniczą, której zadaniem jest badanie obiektywnych własności otaczającego nas materialnego świata i zachodzących w nim zjawisk, gromadzenie faktów obserwacyjnych i odnajdywanie ich wzajemnej zależności. Fizyka jest nauką ścisłą. Oznacza to, że badane ciała, zjawiska oraz procesy fizyczne opisuje ilościowo, formułując na tej podstawie prawa i zasady. Do opisu ciał i zjawisk stosuje ściśle określone pojęcia będące mierzalnymi cechami tych ciał, zjawisk i procesów. Prawa zaś wiążą te pojęcia poprzez odpowiednie funkcje logiczne lub matematyczne. Prawo, które nie zostało w pełni zweryfikowane przez doświadczenie, nazywamy *hipotezą*. Zwykle hipotezy

są pierwszym etapem dochodzenia do praw fizycznych i bywa, że okazują się niesłuszne.

Zasady są to najbardziej ogólne prawa, które najczęściej nie są wyrażane wzorami. Mamy więc zasadę zachowania pędu, momentu pędu, energii, ładunku czy masy. Do zasad zaliczono też trzy zasady dynamiki Newtona, choć II zasada jest klasycznym prawem fizycznym. Dodam tu jeszcze trzy zasady termodynamiki.

Ogólnie prawa fizyczne dzielimy na *deterministyczne* – np. prawa dynamiki Newtona i prawa *statystyczne* – np. prawa kinetyczno-molekularnej teorii gazów czy prawo rozpadu promieniotwórczego.

Powiedziałem, że prawo może wyrażać matematyczne relacje pomiędzy wielkościami fizycznymi. Newton podał matematyczną zależność pomiędzy działającą na ciało wypadkową siłą, a uzyskanym przez to ciało przyspieszeniem. Prawo powszechnego ciężenia orzeka, że siła grawitacji jest wprost proporcjonalna do iloczynu oddziałujących mas, a odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości między nimi. Natomiast prawo Archimidesa nie jest wyrażone wzorem funkcyjnym, a jedynie mówi o związku pomiędzy siłą wyporu a ciężarem cieczy wypartej przez to ciało. Zasady zachowania również nie są wyrażane wzorami funkcyjnymi, lecz mówią np. o tym, że jakaś wielkość fizyczna, w ściśle określonych warunkach,¹ zachowuje swą wartość – np. zasada zachowania pędu, momentu pędu czy energii.

Jak konstruuje się prawo fizyczne?

Najczęściej ma ono postać implikacji, np. „Jeżeli na ciało nie działają siły, **to** ciało spoczywa lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym”. Wprawdzie newtonowskie prawa ruchu nazywamy zasadami, ale Newton nazywał je prawami (lex).

Ile jest praw i czy wszystkie można sprowadzić do jednego – uniwersalnego? Chyba nie ma odpowiedzi na te pytania. Wśród uczonych zajmujących się filozofią przyrody i metodologią fizyki, istnieją dwa poglądy: Jeden, że istnieje ograniczona liczba obiektów fizycznych i praw

¹ Np. w układach odosobnionych.

² Takie próby są podejmowane i wiele z nich jest udanych – np. prawa Maxwella łączą elektrostatykę, magnetyzm, prąd elektryczny i fale elektromagnetyczne.

oraz że te prawa można na tyle uogólnić, że powstanie spójna teoria „tego wszystkiego”.² Drugi pogląd to taki, że istnieje nieograniczona liczba obiektów fizycznych i relacji między nimi, a więc i rządzących nimi praw; że jedno prawo uzupełnia drugie (np. mechanika relatywistyczna uzupełniła mechanikę newtonowską) oraz że muszą być różne prawa na różnych poziomach organizacji materii. Tak czy owak, chyba nie zabraknie pracy dla uczonych.

Warto tu wspomnieć o „matematyczności” praw fizyki. Roger Penrose³, pisząc o „tajemniczym” związku matematyki z przyrodą, cytuje E. Wignera, który wspominał o „niezrozumiałej skuteczności matematyki w fizyce”. Natomiast Andrew Gleason sądzi, że zgodność między matematyką a fizyką stanowi jedynie odbicie faktu, że „matematyka jest nauką porządku”. Natomiast sam Roger Penrose twierdzi, że „nadzwyczajna precyzja, subtelność i wyrafinowanie, jakie odkrywamy w matematycznych prawach opisujących elementarne procesy fizyczne, są czymś więcej niż tylko przejawem *porządku* w funkcjonowaniu świata”.

Mówi się często, że prawa fizyki rodzą się jako herezje, a umierają jako przeżytek. Oznaczałoby to, że żadne prawo nie jest prawdziwe, a tak nie jest.⁴ Bywa oczywiście, że po pewnym czasie dane prawo jest uszczegóławiane lub okazuje się, że jest ważne tylko w ściśle określonych warunkach, co nie znaczy, że przestaje obowiązywać. Przykładem mogą być przytaczane prawa Newtona, które dotyczą mechaniki nierelatywistycznej.⁵ Nie możemy też oczekiwać, że teoria Kopernika przestanie kiedyś obowiązywać, mimo że poprzednia okazała się niesłuszna. Choć rozwój wiedzy o przyrodzie przypomina wędrówkę przez nieznanne tereny, to jednak wypadkowym efektem pracy uczonych jest nieustanne i asymptotyczne zbliżanie się do coraz pełniejszej prawdy. Dowodem na słuszność znanych praw jest choćby to, że budowane dzięki nim urządzenia poprawnie działają!

Prawa przyrody są niezmiennie (niezmiennicze) w czasie jak i przestrzeni. Niech o tym świadczy choćby fakt, iż widma odległych gwiazd są identyczne z widmami gwiazd bliskich, mimo że te pierwsze są bardziej odległe zarówno w czasie jak i przestrzeni. Stwierdza się też niezmienniczość i jedność materii w czasie jak i przestrzeni. Świadczy o tym zarówno powyższy przykład jak i to, że we wszystkich dotąd przeprowadzonych doświadczeniach elektrony były i nadal są identyczne.

Wspominałem, że na różnych poziomach organizacji materii rządzą nieco inne prawa. Na przykład siłą organizującą Kosmos jest grawitacja, zatem prawo powszechnej grawitacji jest tu szczególnie ważne. Natomiast budowa cząsteczek zależy od sił elektromagnetycznych. Zjawiskami tymi rządzić więc będzie prawo Coulomba. Za budowę jądra atomowego odpowiedzialne są siły jądrowe, które opisywane są przez odpowiednie prawa. Zauważmy, że satelity można umieścić na dowolnej orbicie,⁶ natomiast

elektrony krążą po ściśle określonych orbitach. Ciału rzuconemu w polu grawitacyjnym możemy nadać energię o dowolnej wartości, ale cząsteczka czy atom emitują energię o ściśle określonych wartościach.⁷

Prawa Newtona pozwalają przewidzieć ruch planet na tysiące lat naprzód. Takie prawa nazywamy *deterministycznymi*. Nie można natomiast przewidzieć, ile oczek uzyskamy po rzuceniu kostką do gry. Takie zdarzenia nazywamy przypadkowymi. Określa się wówczas *prawdopodobieństwo* wystąpienia danego stanu lub zjawiska. Nie możemy na przykład przewidzieć, co – reszkę czy orła – wylosuje sędzia piłkarski rzucając przed meczem monetę, ale możemy być prawie pewni, że przy 100 rzutach liczba reszek będzie bliska 50. Podobnie jest z rozpadem promieniotwórczym; nie wiemy, który atom w danym momencie ulegnie rozpadowi, ale wiemy na przykład, że w czasie zwanym *okresem połowicznego rozpadu* rozpadnie się połowa z nich. Mówimy, że zjawiskami przypadkowymi rządzą *prawa statystyczne*. Można je nazwać prawami *indeterministycznymi*.

Zauważmy, że jeśli rzucamy dwie monety, dość często może się zdarzyć, że obie upadną na reszkę lub orła. Jeżeli mamy ich dziesięć, to prawdopodobieństwo, że wszystkie upadną na tę samą stronę jest już nieporównywalnie mniejsze. Dlaczego o tym wspominam? Jak wiemy, powietrze w pokoju składa się z ogromnej liczby cząsteczek. Cząsteczki te są w ciągłym ruchu. Nie można przewidzieć, gdzie po kilku sekundach znajdzie się dana cząsteczka. Wiemy też, że każda z tych cząsteczek może mieć inną energię kinetyczną, przy czym nie wiemy, która jaką. Wiemy natomiast dokładnie, jaki procent cząsteczek ma określoną wartość tej energii lub z jaką poruszają się szybkością. Informuje nas o tym *krzywa rozkładu Maxwella*. Znamy też równania precyzyjnie określające parametry stanu gazu, czy też prawa rządzące przemianami stanu tego gazu. Umiemy też obliczyć średnią energię kinetyczną ruchu postępowego cząsteczek gazu w danej temperaturze, która podana w kelwinach jest miarą tej energii. Natomiast prawdopodobieństwo, by wszystkie cząsteczki o tej samej energii kinetycznej (np. te „cieplejsze”) znalazły się w pobliżu siebie jest znikomo małe. Wywołałoby to na przykład równoczesne i samoczynne zagotowanie tej porcji wody, a skrzepnięcie innej w tym samym naczyniu.

Znamy prawa gazowe, ale mimo to nie można przewidzieć pogody nawet na kilka dni naprzód. Dlaczego? Dlatego, że liczba potrzebnych parametrów, które należałoby przeanalizować, by określić stan atmosfery, jaki będzie za kilka dni jest tak duża, że nie jesteśmy w stanie tej analizy dokonać. Nie znamy również wszystkich czynników, mających – w danym momencie i w danym miejscu – wpływ na stan atmosfery i zmiany jej parametrów. Mówimy wówczas o procesach przypadkowych.

³ R. Penrose, *Droga do rzeczywistości*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2010, s. 106.

⁴ Najlepszym dowodem na to jest choćby prawo Archimidesa, mające ponad 2000 lat!

⁵ Czyli dla ciał poruszających się z prędkością znacznie mniejszą od prędkości światła.

⁶ Nie rozwiązana dotąd zagadką jest reguła Titiusa-Bodego dotycząca relacji pomiędzy promieniami orbit planet Naszego Układu: $r = 0,4 + 0,3n$, gdzie $n = 0, 1, 2, 4, 8, 16, 32$. (liczbie $n = 8$ odpowiada pas planetoid). Reguła ta przypomina równanie kwantowe atomu wodoru N. Bohra.

⁷ Tu rządzą prawa kwantowe.

Ktoś powiedział, że ruch skrzydeł motyla nad Amazunką może w konsekwencji wywołać tajfun na Karaibach. To ogromna przesada. Istnieją bowiem procesy redukcji tak niewielkich fluktuacji stanu gazu, jakie wywołuje motyl. I choć znamy mechanizmy powstawania tajfunów (jest to niezwykle aktywny niż baryczny), to nie potrafimy przewidzieć, gdzie i kiedy to nastąpi. Nie możemy też przewidzieć toru jego przemieszczania, jak i skutków tego kataklizmu. Tu już rządzi wspomniany przypadek.⁸

Jakie mogą być makroskopowe skutki zdarzeń przypadkowych? Niektóre z nich możemy dość precyzyjnie określić – np. rozpad promieniotwórczy. Są jednak skutki zdarzeń przypadkowych, których nie da się przewidzieć. Wybór danej liczby w grze w totka jest przypadkowy (i równoważnościowy), ale trafienie szóstki daje nieprzewidywalne i nieporównywalne z wkładem skutki. Podobnie jest z innymi zdarzeniami przypadkowymi. W przyrodzie przypadkowe zdarzenia mogą prowadzić

nawet do katastrof. Czy możemy nimi kierować? Niestety, pewne zjawiska przebiegają tak, że trudno zmienić ich przebieg. Nie można na przykład zatrzymać lawiny lub tajfunu. Wiemy wprawdzie, że takie zjawisko, jak trąba powietrzna, jest czułe na parametry własne i otaczającej ją atmosfery, ale – niestety – nie potrafimy nimi kierować, bo układ jest zbyt dynamiczny i zbyt wiele parametrów decyduje o takim a nie innym przebiegu tego zjawiska.

Czym jest przypadek?

Przypadek to zdarzenie, którego nie możemy przewidzieć, bo jest ono wynikiem tak wielu oddziaływań, iż ustalenie zarówno przyczyn, jak i ich skutku nie jest praktycznie możliwe. Nie można na przykład przewidzieć, gdzie spadnie liść lub gdzie potoczy się biała po kilku kolejnych zderzeniach. I choć wszystkie występujące tu oddziaływania podlegają prawom deterministycznym, to jednak pojawia się tak wiele zaburzeń, że nie można obliczyć trajektorii lotu tego

⁸ Przypadkiem nazywamy zdarzenie, którego prawdopodobieństwo wystąpienia jest mniejsze od jedności. Zob. Michał Heller, *Filozofia przypadku*, Wydawca: Copernicus Center Press, Kraków 2017.

Definicje wybranych pojęć

Hipoteza

Hipoteza jest zdaniem nie w pełni uzasadnionym opartym na prawdopodobieństwie, wymagającym sprawdzenia (zweryfikowania), mającym na celu odkrycie nieznanego zjawiska lub praw. Hipoteza jest niezupełnie pewnym orzeczeniem, przypuszczeniem. Według Tadeusza Kotarbińskiego przez hipotezę rozumie się na ogół w metodologii takie przypuszczenie dotyczące zachodzenia pewnych zjawisk lub zależności między nimi, które pozwala wyjaśnić jakiś niewytłumaczony dotąd zespół faktów będących dotąd problemem.

Władysław Zaczynski uważa, że „hipoteza robocza jest założeniem przypuszczalnych zależności, jakie zachodzą między wybranymi zmiennymi”. Hipoteza musi określać zależności między zmiennymi, powinna być na tyle precyzyjna, aby ściśle ograniczyć zasięg swego znaczenia. Powinna być zbudowana na podstawie uznanej wiedzy naukowej. Czasem hipoteza jest tylko odwróceniem szyku i zmianą formy gramatycznej pytania, tzn. problemu.

Podstawowym warunkiem sformułowania poprawnej pod względem metodologicznym oraz użytecznej hipotezy jest wstępne rozpoznanie problemu i terenu badań oraz znajomość literatury przedmiotu. Od trafności i poprawności teoretycznej i metodologicznej hipotezy badawczej zależy skuteczność przeprowadzonych badań oraz możliwość wykrycia rzeczywistych uwarunkowań, struktur i dynamiki badanych zjawisk czy rzeczy.

Teoria naukowa

Pierwsze znaczenie to hipoteza, która ma być poddana naukowemu potwierdzeniu lub zaprzeczeniu. Drugie znaczenie to system twierdzeń logicznie i rzeczowo uporządkowanych, powiązanych określonymi (występującymi w danej nauce) relacjami logicznymi oraz spełniający przyjęte w niej kryteria naukowości i poprawności metodologicznej. Pojęcie to dotyczy może zarówno systemu zweryfikowanego doświadczalnie, np. *teoria kinetyczno-molekularna gazów*, jak i niezwyfikowanego, np. *kwantowa teoria grawitacji* Hawkinga.

Problem badawczy

Problem badawczy jest to zagadnienie wymagające rozwiązania. Według S. Nowaka „problem badawczy to pewne pytanie lub zespół pytań, na które odpowiedzi ma dostarczyć badanie”. J. Pieter stwierdza, że „[...] problemy badawcze są to pytania, na które szukamy odpowiedzi na drodze badań naukowych. Wysuwając je, zadajemy pytanie »przyrodzie«, a nie drugiej osobie.”

Problemy badawcze mają postać pytań. Pytania mogą dotyczyć cech przedmiotu, zjawiska, ich własności. Mają wówczas postać prostą, zawierającą pytanie o jedną cechę lub o jedną właściwość przedmiotu. Mogą być też pytania o rodzaj związków między cechami zjawiska lub o rodzaj zależności między zjawiskami. Zmuszają wówczas badacza do szerszych poszukiwań. Problem badawczy to

inaczej deklaracja o naszej niewiedzy zawarta w gramatycznej formie pytania.

Metoda badawcza

W opracowaniach metodologicznych można spotkać się z bardzo różnymi klasyfikacjami metod i technik badawczych. Różnice te są na tyle poważne, że to, co dla niektórych jest metodą, dla innych jest techniką i odwrotnie. Najczęściej w pedagogice definiuje się metodę jako „zespół teoretycznie uzasadnionych zabiegów koncepcyjnych i instrumentalnych obejmujących całość postępowania badacza, zmierzających do rozwiązania określonego problemu naukowego: określony powtarzalny sposób rozwiązania problemu”.

Według wspomnianego wyżej Stefana Nowaka: „[...] metody badawcze to przede wszystkim typowe i powtarzalne sposoby zbierania, opracowywania, analizy i interpretacji danych empirycznych, służące do uzyskiwania maksymalnie (lub optymalnie) uzasadnionych odpowiedzi na stawiane w nich pytania”. „[...] metoda jest pojęciem najszerszym i nadrzędnym w stosunku do techniki narzędzia badawczego. Technika z kolei jest pojęciem podrzędnym wobec metody i nadrzędnym w stosunku do narzędzia badawczego. To ostatnie zaś ma zakres najwęższy i jest pojęciem podrzędnym zarówno wobec pojęcia metody jak i pojęcia techniki badawczej”

Według A. Kamińskiego techniki badawcze to przede wszystkim sposoby zbierania materiału oparte na starannie opracowanych dyrektywach

liścia czy toru bili. Tam, gdzie rządzi przypadek, następstwa nawet drobnych zmian są nieprzewidywalne. Nieprzewidywalna jest też przyszłość – również nasza.

Dlaczego jednak planujemy wydarzenia i potrafimy je zrealizować? Oto przykład: idąc do szkoły, niespodziewanie spotkaliśmy kolegę. Chwilę zatrzymaliśmy się, by z nim porozmawiać. Aby jednak zdążyć na lekcję, musimy potem iść szybciej. W ten sposób niwelujemy skutki zdarzeń przypadkowych. Możemy też z dużym prawdopodobieństwem powiedzieć, że określonego dnia wyjedziemy na wycieczkę. Czy to oznacza, że zdarzenia są w pełni przewidywalne? Nie! My jedynie zachowujemy się celowo i niwelujemy skutki przypadkowych i niechcianych zdarzeń, ale im podlegamy. Dlatego też nie możemy znać przyszłości swojej i innych osób.

Są jeszcze zdarzenia podlegające zasadzie Heisenberga. Mówi ona, że nie można równocześnie i dowolnie dokładnie określić np. położenia i pędu cząstki. Rządzi tu bowiem zasada nieoznaczoności Heisenberga. Wynika z niej, że jeżeli

określimy położenie cząstki z możliwie dużą dokładnością, to nie wiemy, dokąd ona pobiegnie. I na odwrót: określając dokładnie pęd cząstki,⁹ przestajemy wiedzieć, gdzie ona jest.¹⁰ Prawa ruchu cząstek są więc *indeterministyczne*.

Myśl ludzka wiąże się z przepływem bioprądów, które swą dynamiką przypominają pofalowaną powierzchnię wody w basenie, w którym bawią się dzieci. Nie można więc przewidzieć biegu myśli. Dlaczego zatem udaje się nam rozwiązywać zadania i problemy? Sądzę, że jest to wynik ukierunkowania procesu myślenia na uzyskanie określonego efektu. Einstein w jednym z wywiadów wspominał, że jego praca naukowa polega na głębokim „wmyślaniu się” w problem – aż do jego rozwiązania. Dodam, że to potrafi tylko człowiek!

Implikacje filozoficzne

Pojawienie się w Kosmosie istot rozumnych dostarcza poważnych problemów natury filozoficznej. Paul Davies

⁹ Jako wielkości wektorowej o znanej wartości i usytuowaniu jej wektora w przestrzeni.

¹⁰ Przypomina to cytat z *Kubusia Puchatka*: „Im bardziej go szukano, tym bardziej go nie było.”

(dokładnych, jasnych, ścisłych), weryfikowanych w badaniach różnych nauk społecznych i dzięki temu posiadających walor użyteczności międzydyscyplinarnej. Mają charakter instrukcji – tym użyteczniejszej, im wierniej stosowanej”.

Indukcyjna metoda rozumowania

Jest to dochodzenie do uogólnień poprzez badanie faktów jednostkowych. Tą metodą posługiwał się m.in. Jan Kepler, formułując swoje prawa ruchu planet. Mierzył on okresy obiegu planet i porównywał z ich średnimi odległościami od Słońca. Podobnie postąpił J. J. Balmer, odgadując postać równania opisującego linie widmowe wodoru. Metoda ta nie musi dawać poprawnych wyników, gdyż nie sprawdza się jej we **wszystkich** możliwych przypadkach. Jest ona często stosowana w matematyce jako tzw. *indukcja zupełna*, w której sprawdza się słuszność danej zasady dla wszystkich przypadków.

Dedukcyjna metoda rozumowania

Jest to dochodzenie do prawdy poprzez jej sformułowanie w oparciu o znane prawo lub prawa. Taką metodę zastosował Izaak Newton udowadniając, że prawa Keplera są słuszne, gdyż wynikają z bardziej podstawowych praw jakimi są zasady dynamiki oraz prawo powszechnej grawitacji.

Rozumowanie przez analogię

Przykładem może tu być planetarna teoria budowy atomu wodoru N. Bohra. Analogie wy-

stępują również w opisie takich pól jak grawitacyjne, elektrostatyczne czy magnetyczne. W tym ostatnim przypadku badano, czy odosobnione bieguny magnetyczne³ oddziałują tak, jak ładunki elektryczne, a więc czy obowiązuje prawo podobne do prawa Coulomba. Sformułowano nawet podobny wzór, ale zrezygnowano z tego opisu ze względu na inny charakter pola magnetycznego, które – w odróżnieniu od źródłowego i centralnego pola elektrycznego – jest polem beźródłowym – wirowym.

Determinizm

Pogląd filozoficzny polegający na przekonaniu, że wszystkie zjawiska we Wszechświecie dadzą się precyzyjnie wyjaśnić oraz że ich przebieg można dokładnie przewidzieć, znając parametry stanu wyjściowego oraz warunki, w których te zjawiska zachodzą. Poprawność tego rozumowania wynika z założenia, że zjawiskami tymi rządzą ściśle określone i niezmiennie w czasie prawa. Niestety, poglądu tego nie da się dowieść w sposób logiczny⁴, a oparty jest jedynie na wieloletniej obserwacji zjawisk oraz na fakcie, iż urządzenia zbudowane w oparciu o te prawa działały i nadal działają poprawnie. Determinizm zakłada możliwość przewidywania przyszłości.

Indeterminizm

Pogląd filozoficzny zakładający, że nie jest możliwe dokładne przewidywanie przebiegu zjawisk, a więc i przyszłości. Za słusznością tego

poglądu przemawia fakt funkcjonowania zasady Heisenberga, która orzeka, że np. nie jest możliwe równoczesne i dokładne ustalenie np. położenia i pędu cząsteczki. Ponieważ zasada Heisenberga obowiązuje w mikroświecie, zatem trudno tam stosować prawa deterministyczne. Natomiast prawa te są z powodzeniem stosowane w makroświecie. Można np. bardzo dokładnie na wiele lat wcześniej i z dużą dokładnością obliczyć moment zaćmienia Słońca czy Księżyca, a także położenie na niebie danej planety.

Omawiając obie idee nie należy mylić ich z **indeterminizmem pozornym**, w którym zjawiska opisywane są przy pomocy rachunku prawdopodobieństwa (np. efekt rzutu monetą). W tym przypadku nie można ustalić dokładnego wyniku eksperymentu, ale nie dlatego, że prawa rządzące tym zjawiskiem są indeterministyczne, lecz dlatego, że nie możemy dokładnie określić **wszystkich** (zwykle bardzo licznych) parametrów rządzących tym zjawiskiem (np. wszystkich oddziaływań, którym podlega spadający liść). W takim przypadku posługujemy się metodami statystycznymi.

¹ S. Nowak, *Metodologia badań socjologicznych*, Warszawa 1970, s. 214.

² J. Pieter, *Ogólna metodologia pracy naukowej*, Wrocław-Warszawa 1997, s. 67.

³ Użyto magnesów prętowych z dużą odległością pomiędzy biegunami.

⁴ Poprzez *indukcję zupełną*, czyli sprawdzenie **wszystkich** przypadków

w swej książce „Kosmiczna wygrana” pisze tak: „Aby życie mogło się pojawić, muszą być spełnione liczne warunki. Kosmos wydaje się tak *zaprojektowany*, że sprzyja pojawieniu się w nim życia, a także istot rozumnych”¹¹.

W swojej książce Paul Davies stara się odpowiedzieć na pytanie, co sprawiło, że istniejemy; czy jest to przypadek, czy ewolucyjna konieczność?¹² Jakie czynniki i jakie właściwości materii sprawiły, że w wyniku jej ewolucji mogły powstać organizmy żywe, w tym istoty rozumne, czyli takie, które mogą tworzyć wiedzę o sobie i otaczającej je rzeczywistości przyrodniczej. Jak to jest, że natura sprzyja powstaniu życia?

W 1974 r. australijski fizyk i filozof przyrody Brandon Carter sformułował tzw. *zasadę antropiczną*, zgodnie z którą materia ma takie właściwości, by mogła wyewoluować z niej istotę mogącą ją poznawać. Jest to oczywiście problem filozoficzny, ale fizyk może spróbować odpowiedzieć na pytanie: „Jak to jest możliwe, że nieożywiona materia, po kilkunastu miliardach lat ewolucji, wytworzyła istoty, które są w stanie ją badać?”

Brandon Carter zadał również i takie pytanie: „Jak wyglądałby świat, gdyby obowiązywały inne (lub nieco inne) prawa fizyczne?” (Filozofowie nazwali takie rozważania „analizą kontrfaktyczną”.) Jego wyliczenia wskazywały na to, że niewielkie odstępstwa od obowiązujących praw oraz wartości stałych fizycznych sprawiłyby, że albo Wszechświat by nie powstał, albo istniałby zbyt krótko, by mogło w nim powstać życie. Stwierdził on, że nasze istnienie zależy od precyzyjnego „dostrojenia” praw i wartości stałych fizycznych.¹³

Pomijam tu problem, czy powstanie Wszechświata było wynikiem „prób i błędów” kolejnych alternatywnych wszechświatów z teorii Hawkinga, czy też zamierzonego planu Stwórcy, bo jest to problem filozoficzny lub teologiczny, ale nie fizyczny!

Nauka stawia jednak wciąż nowe pytania. Niektóre z nich są poza zasięgiem możliwości poznawczych człowieka. Próbuje na nie odpowiedzieć jedynie filozofia lub religia. Bywa, że do tych pytań sięgają również fizycy i Kosmologowie. Zapewne wracać będziemy do pytań: Co sprawiło, że istniejemy? Czy jest to przypadek, czy ewolucyjna konieczność? Jakie czynniki i jakie właściwości materii sprawiły, że w wyniku jej ewolucji mogły powstać organizmy żywe – w tym istoty rozumne? Jak to jest, że natura sprzyja powstaniu życia?

Dodam, że fizyk nie pyta: „Dlaczego tak jest?” lecz „Jak to jest?”, bo pytanie „Dlaczego?” jest pytaniem filozoficznym, a nie fizycznym.¹⁴ W piosence *Я пишу исторический роман* Bułat Okudźawa śpiewa: „Так природа захотела; поцему – не наше дело; для чего – не нам судить.” („Tak zechciała przyroda; dlaczego – nie nasza sprawa; po co – nie nam osądzać.”)

Zasada antropiczna może wskazywać na fakt, iż Wszechświat został „zaplanowany” przez Stwórcę, co koresponduje z religijnymi wierzeniami. Uczeni o przekonaniach ateistycznych sprzeciwiają się takiej interpretacji. Powołują się oni na hipotezę, że materia jest wieczna, a Wszechświat przechodzi przez kolejne kreacje i kontrakcje, przy czym w kolejnych „istnieniach” prawa nią rządzące (oraz wartości stałych fizycznych) mogą być inne, a my żyjemy w świecie, o takich właśnie a nie innych prawach oraz takich a nie innych wartościach stałych fizycznych.

Pomijam tu moim zdaniem nierealną hipotezę, jakoby Wszechświat był różny w różnych jego miejscach, a my żyjemy w korzystnym dla życia rejonie. Tym bardziej nierealną jest hipoteza, że aktualnie istnieje wiele różnorodnych wszechświatów, a my istniejemy w takim, który umożliwił powstanie życia. Niestety, wciąż powstają dziwne i sprzeczne ze zdrowym rozsądkiem idee. I na ten fakt powinniśmy zwracać baczną uwagę. Wciąż bowiem, obok rzetelnych informacji, pojawiają się publikacje, w których autorzy ogłaszają teorie, udowadniając je mętnym rozumowaniem, nieuzasadnionymi założeniami, lub też mają tendencję do filozofowania bez oparcia o rzetelną wiedzę. W efekcie możemy czuć się zagubieni w obfitości kosmologicznych teorii.

Zostawmy jednak ten problem i zajmijmy się dalszymi losami Kosmosu. Są tu możliwe dwa scenariusze: jeden to rozszerzanie się Kosmosu w nieskończoność, drugi zaś to zatrzymanie rozszerzania i zapoczątkowanie kurczenia się. Etap ten skończyłby się końcem świata lub jak twierdzi Hawking – kolejną osobliwością. To, który z tych wariantów nastąpi, zależy od stosunku energii potencjalnej do kinetycznej Kosmosu. Jeżeli energie te (co do bezwzględnej wartości) są sobie równe, to Wszechświat będzie rozszerzał się w nieskończoność z malejącą do zera szybkością. Jeżeli natomiast przeważa energia potencjalna, to po etapie rozszerzania nastąpi kurczenie. Problem jest trudny do rozstrzygnięcia, gdyż nie jest znana dokładna gęstość materii w dostatecznie dużych obszarach Kosmosu.

Stephen Hawking twierdził, że obecny kosmos jest jednym z możliwych stanów, przez który przeszła materia w nieskończonym procesie kolejnych kreacji i kolapsów, przy czym w danym akcie kreacji wartości stałych uniwersalnych mogą być różne,¹⁵ co pociąga za sobą różne czasy trwania poszczególnych wszechświatów – od ułamka sekundy po miliardy lat. Dodam tu, że pytanie o to, co było przed „Wielką Osobliwością”, nie jest pytaniem fizycznym, gdyż stan ten – jeśli był – nie podlega fizycznym badaniom.¹⁶

Waldemar Reńda
Olkuś

¹¹ P. Davies, *Kosmiczna wygrana. Dlaczego Wszechświat sprzyja życiu*, Pruszyński i S-ka, Warszawa 2008.

¹² Ktoś może powiedzieć, że jest to wynik świadomego kierowania przypadkiem przez Stwórcę?

¹³ Zmiana wartości takich stałych jak szybkość światła, ładunek elementarny, stałe pola grawitacyjnego i elektrycznego itp. sprawia, że materia nabiera innych cech. W efekcie Wszechświat mógłby istnieć zbyt krótko, aby powstało w nim życie.

¹⁴ Nie pytamy np. **dlaczego** siła grawitacji maleje z kwadratem odległości, a jedynie badamy, czy tak rzeczywiście jest i co z tego wynika.

¹⁵ Problem polega na tym, że gdyby np. stała grawitacji była nieco większa, to tworzyłyby się duże i bardzo niestabilne gwiazdy. Podobnie byłoby ze zmianą innych stałych. Tylko odpowiednia korelacja ich wartości dawała szansę na stabilną ewolucję Kosmosu i powstanie życia.

¹⁶ Na pytanie: „Co robił Pan Bóg przed stworzeniem świata?” fizycy odpowiadają żartobliwie: „Obmyślał piekło dla tych, którzy o to pytają.”

O wiejskiej szkole

Jerzy Kuczyński

W numerze 5/21 „Fizyki w Szkole” ukazał się tekst (*Góra lodowa i edukacja polska*, J. Orzechowski), którego sporym fragmentem była pochwała obecnego systemu edukacyjnego. Mam na ten temat wprost przeciwne zdanie. Ten system ma zasadnicze wady a główna z nich wynika stąd, że organizacją edukacji w Polsce zajmują się mieszkańcy wielkich miast.

Ludzie, którzy nigdy nie wzięli pod uwagę tego, że Polska jest krajem wiejskim, a nawet w ogóle zapominają, że około połowy jej mieszkańców mieszka na wsi i w małych miastach. Bardzo śmieszny, gdyby nie był tragiczny, cytat znalazł jeden z moich Kolegów¹. Otóż w jednym ze szkolnych podręczników znalazł polecenie „Jeżeli masz krewnych na wsi to dowiedz się ...”. A więc autor podręcznika nie wpadł na to, że uczeń może mieszkać na wsi, co pokazuje do jakiego stopnia można wyrzucić ze świadomości problem wsi.

Powiedzmy tu jasno w dużym mieście system podziału szkół może być dowolny. Można zrobić jednolite szkoły od żłobka do matury. Nic też nie przeszkadza by uczeń zmieniał szkołę co rok a nawet i co semestr. Oczywiście pewne systemy będą mniej sprawne a często uciążliwe, ale w wielkim mieście jakoś będzie działać. Stąd dyskusja czy 8+4 czy 6+3+3 jest w przypadku dużego miasta mało istotna. Jako fizyk powiedziałbym, że to drugie i dalsze wyrazy szeregu, których znaczenie bez trudu „przebiję” wartości współczynnika pierwszego wyrazu. Inaczej mówiąc w mieście łatwo zorganizować bardzo dobre i zupełnie złe szkolnictwo w dowolnym systemie.

Inaczej jest na wsi. Wieś, nawet bardzo duża to około 2000 mieszkańców. Przy obecnej dzietności to nie więcej niż 20 uczniów w roczniku. Dla mniejszej wsi i niewielkiej a często spotykanej dzietności rzędu ułamka procenta to najwyżej kilkoro dzieci w roczniku (a często żadnego!).

Wieś, gdzie do szkoły chodzi mój wnuk liczy wg Wikipedii 3014 mieszkańców. Jest więc większa od całkiem sporych miasteczek. A w pierwszej klasie jest szesnaścioro dzieci (być może część chodzi do szkół w sąsiednich miastach). Oznacza to, że w praktyce w gminach wiejskich jedna szkoła wypadnie na kilka czy kilkanaście wsi.

Kilka lat temu na konferencji rozmawiałem z nauczycielką, wówczas gimnazjum, która stwierdziła, że do jej szkoły chodzą uczniowie z 13 wsi. Warto dodać, że znam okolicę i wiem, że to duża wieś w górskim terenie zaledwie kilka kilometrów od granicy prawie stutysięcznego miasta. Wynika z tego, że w systemie 8+4 siedmiolatki



Foto – Dreamstime

będą zimą wędrować przez lasy i góry po kilka kilometrów w zaspach śniegu. Bo oczywiście w tych małych podgórskich wsiach ośmioklasówek się nie zorganizuje.

Oczywiście żartuję. Po prostu dzieci będą dowożone i odwożone. Będą czekać na rozpoczęcie lekcji i na przyjazd samochodu, bo w większości wsi sąsiedzi spróbują zorganizować jakoś dojazdy. W tej chwili, w każdy dzień, gdy nie mam zajęć na uczelni jeżdżę po wnuka tracąc uczciwe czas odpowiadający połowie etatu nauczycielskiego na tę czynność. A w szkole spotykam stadko ludzi, rodziców i dziadków odbierających swe dzieci i wnuki ze szkoły. Podsumowując trzeba stwierdzić – Państwo swe obowiązki edukacyjne (i nie tylko!) w znacznej mierze bezwstydnie przerzuca na obywatela i jeszcze żąda mnożenia się.

Od strony organizacji szkoły i nauczycieli jest chyba jeszcze gorzej. Pamiętam z młodości, gdy byłem wiejskim nauczycielem, narzekania na tzw. „gminnych nauczycieli” (jakim byłem). Otóż był to nauczyciel, którego praktycznie w szkole nie było. Po prostu by wyrobić etat (prawda nieco wyższy niż obecnie) nauczyciel pracował w kilku szkołach. Oczywiście w różnych wsiach. Dzieliłem pracownię z chemiką (imieniem Alina) której nigdy nie zobaczyłem, bo gdy ja byłem w jakiejś szkole to jej oczywiście tam być nie mogło.

W praktyce całość tego co nazywa się „praca wychowawcza” spoczywało na nauczycielach nauczania początkowego, wuefu i polskiego (i oni właśnie narzekali), czyli tych którzy mieli więcej godzin w danej szkole. „Gminni nauczyciele” wpadali uczyli i wypadali. A trzeba dodać, że było to w czasach niesamowitej wręcz obfitości godzin i uczniów². Fizyki było w szkole 8 godzin tygodniowo (2 godziny w szóstej i po trzy w siódmej i ósmej klasie). Przy obecnej dzietności, ilości godzin i projektowanym pensum zupełnie sobie tego nie wyobrażam. Jedyne co mi przychodzi na myśl, że jakiś przepis pozwalał zatrudniać nauczyciela na 2/3 pensum co może uratować organizację szkoły. Oczywiście za 2/3 pensji³.

Jak widać z punktu widzenia wsi (pamiętajmy około połowy mieszkańców Polski) system 8+4 jest zdecydowanie zły. Poprzedni był dużo lepszy, choć kilka sub-

¹ Polonista profesor Dariusz Rott z Uniwersytetu Śląskiego.

² W szkole, gdzie obecnie uczy się mój wnuk miałem w klasach po trzydziestu kilku uczniów.

³ Nie wiem, czy przepis działa. Od wielu lat już w szkołach nie pracuję. Ale pracowałem we wszystkich typach szkół z wyjątkiem techników. Od SPZ (podstawowa dla uczniów nie radzących sobie w normalnej szkole) do wyższej uczelni, gdzie teraz pracuję.

telnych, decyzji powodowało, że daleko mu było do dobrego. Co więc byłoby dobre? Przede wszystkim szkoła „elementarna” bardzo blisko miejsca zamieszkania ucznia z 2-3 nauczycielami uczących wszystkich przedmiotów. W praktyce ucząc małe dzieci od strony fachowej nauczyciel może uczyć praktycznie wszystkich przedmiotów⁴. Ile miałyby trwać to problem dla fachowców. Myślę ze 4-6 lat. Konkretnie tyle by po jej ukończeniu uczeń mógł samodzielnie dotrzeć do następnego typu szkoły.

Rozsądne byłoby mieć odpowiednik gimnazjum, w którym byłaby pewna specjalizacja nauczycieli a sama szkoła nie byłaby zbyt daleko (przypominam uczniowie z 13 wsi w gimnazjum w pobliżu stutysięcznego miasta). Dodatkowo moje osobiste doświadczenia wskazują, że częste zmiany szkoły wychodzą uczniom na zdrowie psychiczne. Po prostu uczą przystosowywania się do nowego środowiska. W obecnym zmiennym świecie to znacznie ważniejsze od wiedzy z takiego czy innego przedmiotu. I dopiero na końcu liceum, gdzie podstawową nauką byłaby już rzeczywiście konkretna wiedza, a celem nauczanie solidnej pracy⁵.

Jeżeli jeszcze miałbym wyrazić jakieś życzenie co do takiego systemu szkolnego to byłoby to życzenie, by każdy typ szkoły stanowił selekcję – by gimnazja i licea dzieliły się na lepsze i gorsze i to nie z powodu famy, ale z realnego statusu prawnego. Po prostu nagrodą za solidniejszą pracę powinna być możliwość dalszej solidnej pracy. W szczególności gimnazja mogłyby być np. 2,5 letnie i 3 letnie. Przy czym w tych pierwszych program i wymagania byłyby dużo **większe**. Podobnie w liceum. W ten sposób uczeń ciężiej pracujący dostawałby w nagrodę rok wcześniejszą maturę.

Ktoś powie, że w ten sposób podzielimy uczniów. Prawda, ale obecnie preferujemy bylejakosć. Inny powie, że w ten sposób uniemożliwimy awans uczniom, którzy z jakichś powodów mieli w pewnym momencie gorszy okres. Oczywiście nieprawda. Po prostu do lepszego typu szkoły można by się dostać przez odpowiedni dodatkowy okres edukacji (lub odpowiedni egzamin). Np. półroczny by trafić na okres przyjęć do lepszego liceum lub po liceum na możliwość zdawania matury uprawniającej do lepszej (np. opłacanej z pieniędzy publicznych) uczelni.

Na koniec można dodać, że można by przewidywać inny system na terenach wiejskich a inny w miastach. I tu znowu warto od razu odeprzeć zarzut, że oznaczałoby to gorsze kształcenie na wsiach. Oczywiście trochę wysiłku intelektualnego i system na wsi mógłby być nawet lepszy niż w miastach. A warto przypomnieć w miastach można implementować dowolny system. A więc również i taki jaki byłby na wsiach.

Jerzy Kuczyński
Wyższa Szkoła Techniczna w Katowicach

⁴ Z pewnymi wyjątkami. Np. ze mnie nie da się zrobić, nawet miernego, nauczyciela muzyki. Ale już plastyki uczyłem, choć bez większych sukcesów.

⁵ Jeden z moich „guru” prof. Andrzej Białas z Uniwersytetu Jagiellońskiego kiedyś stwierdził, że najważniejszą rzeczą w edukacji jest nauczanie wykonywania nudnych i żmudnych czynności. Po prostu po osiągnięciu tej umiejętności już nic nie stanowi problemu.

Jaka szkoła, jaka edukacja...

Waldemar Reńda

Z zainteresowaniem przeczytałem artykuł pana Jacka Orzechowskiego nr 5/2021 „Fizyki w Szkole”.

Pełna zgoda co do metod nauczania matematyki.

Kiedyś dawno, dawno temu uczyłem w „wieczorówce”. Uczniami były osoby którym z różnych powodów (również wojny) nie udało się ukończyć szkoły podstawowej. Gdy doszło do dodawania ułamków, to dodawali tak:

$$\frac{1}{4} + \frac{1}{4} = \frac{2}{8}$$

Wówczas pytałem: – a ile jest ćwiartka i ćwiartka? Odpowiedź była poprawna: – pół litra.

Podobno matematyka zaczęła się wówczas, gdy człowiek dostrzegł zależność pomiędzy liczbą swoich palców, a liczbą pasących się na stepie zwierząt. O ile bowiem w matematyce ważna jest umiejętność dostrzegania relacji ilościowych pomiędzy zbiorami przedmiotów i liczb, to w fizyce potrzebna jest umiejętność dostrzegania związków przyczynowo-skutkowych zachodzących pomiędzy obserwowanymi zjawiskami.

Co do wieku dojrzałości szkolnej, to też pełna zgoda. W wyniku poprzedniej reformy, 1 września rozpoczynała naukę duża liczba dzieci 5-letnich. Mam siedmioletniego wnuka i mogę stwierdzić, że dopiero teraz mógł z powodzeniem zostać uczniem pierwszej klasy.

A teraz o gimnazjum i 3-letnim liceum. Byłem wśród osób przygotowujących tamtą reformę i zgłaszałem zastrzeżenia zarówno do programów nauczania w gimnazjum jak i organizacji nauczania w liceum.

Pomysł zaczerpnięto ze szkolnictwa zachodnioeuropejskiego, ale bez tych elementów, które gwarantowałyby uzyskanie należytego przygotowania absolwentów do studiów. W szkołach zachodnich są licea 3-letnie, ale organizowane są fakultety z wybranych przez ucznia przedmiotów. Przy czym przedmioty te realizowane są w liczbie 5 do 6 godzin tygodniowo. Przy tak zorganizowanym nauczaniu i przy późniejszej maturze, uczeń w ciągu 3 lat nauki jest w stanie opanować program z wybranych przedmiotów co najmniej na wystarczająco dobrym poziomie. A programy wcale nie są tam łatwiejsze niż nasze. (Zob. choćby podręczniki wydawnictwa Schroeder: Dorn-Bader, Physik, Grundkurs czy Physik, Oberstufe.) Dodam, że Niemcy nie robią co kilka lat reformy szkolnej, a jedynie doskonalą to, co aktualnie funkcjonuje.

Od wielu, wielu lat postuluję zmianę form nauczania w liceum i wprowadzenia zajęć fakultatywnych z odpowiednią liczbą godzin przeznaczonych na naukę w zakresie wybranych przedmiotów. Byłby wówczas czas i na nauczanie problemowe, i na jego indywidualizację; na doświadczenia z fizyki czy chemii i na inne potrzebne działania dydaktyczne.



Foto – Dreamstime

Gdy już jestem przy szkole niemieckiej, to można im pozazdrościć pracowni fizycznych czy chemicznych. Dodam, że w szkołach angielskich nauczyciel ma do pomocy asystenta.

A u nas? Jeżeli jest już pracownia przedmiotowa, to – jak pisze autor – odbywają się w niej lekcje różnych przedmiotów, a pomoce, jeśli nawet są, to leżą zakurzone w szafach na zapleczu. Przez kilkanaście lat pełniłem obowiązki doradcy metodycznego i odwiedzałem szkoły. Niestety, muszę ze smutkiem stwierdzić, że wielu nauczycieli nie posiada odpowiednich umiejętności eksperymentatorskich. A stan ten się pogłębia, gdyż nie są oni należycie przygotowywani na uczelniach do tego typu zajęć. Pomijam już przygotowanie metodyczne, pedagogiczne czy psychologiczne do pracy z uczniem, bo i z tym nie jest najlepiej. A doradcy metodyczni? Oj, przydaliby się, przydaliby...

Autor pisze, że nie korzystał z podręczników. Moi uczniowie, też ich nie nosili do szkoły. Dla mnie podręcznikiem były moje konspekty, które w miarę potrzeb uzupełniałem, a jeśli należało je poprawić, to poprawiałem. Przez kilkanaście lat byłem rzeczoznawcą MEN ds. podręczników z fizyki. Jakie były? Różne. Niestety, rzeczoznawca nie ma możliwości żądać od autorów zmian dotyczących stosowanych metod. Może to robić wyłącznie w przypadku dostrzeżonych błędów merytorycznych, a o inne zmiany może tylko prosić, co z reguły nie odnosi skutku. Autor ma bowiem prawo do wyboru metody, a wydawnictwo do wyboru autora. W tej sytuacji nauczyciel musi sam podejmować decyzję, jaką zastosuje metodę nauczania. Oby była skuteczna!

Waldemar Reńda
Olkus

Co w fizyce piszczy

Cyfrowy mózg w CNK

Jak „myśli” sztuczna inteligencja? Czy można jej zaufać? Skąd czerpie natchnienie komputerowy artysta? Ucząca się sieć neuronowa. Autonomiczny samochód. Robot, który zawsze złapie spadający telefon. Uciekające cienie. Algorytmy komponujące muzykę i tworzące obrazy.

Wystawa „Przyszłość jest dziś. Cyfrowy mózg?” w Centrum Nauki Kopernik otwarta z okazji 11 rocznicy otwarcia placówki skłania do przemyśleń o granicach zaufania, prywatności, intymności, poczuciu bezpieczeństwa oraz o nowych definicjach sztuki i kreatywności.

Sztuczna inteligencja bezproblemowo wkroczyła w sferę naszych uczuć i relacji. Nie tylko uczy się odczytywać i odpowiednio reagować na nasze emocje, ale coraz lepiej umie je naśladować i „okazywać”.

Historia nauki pokazuje, że wielkie rewolucje naukowe za każdym razem otwierały nową epokę, która zmieniła ludzkość. Rewolucja kopernikańska, darwinowska i kwantowa zmieniły nasze myślenie o roli i miejscu człowieka w świecie. Teraz rozwój systemów sztucznej inteligencji zdaje się prowadzić do kolejnego punktu zwrotnego. Jednych zachwyca, a innych przeraża.

Wystawa została podzielona na cztery grupy eksponatów, które są ułożone według zagadnień problemowych. Pierwsza grupa koncentruje się wokół sztucznej inteligencji – zwiedzający dowiaduje się z niej, jak wygląda proces uczenia się sztucznej inteligencji. Druga grupa eksponatów dotyczy tematu zaufania do technologii. Zwiedzający, w ramach testowania zaufania, mogą oddać maszynie własny telefon i patrzeć, jak jest przez nią podrzucany i łapany.

Trzecia grupa eksponatów skupia się wokół problemu sztuki połączonej ze sztuczną inteligencją.

Czwarta grupa mówi o naszych relacjach z technologią. Są tam m.in. roboty, które mogą wspierać a nawet japoński robot – hologramiczną partnerkę, która przypomni o nieprzeczytanych mailach i zapali światło przed powrotem człowieka do domu, by nie czuł się samotny.



Foto – Dreamstime

W następnym numerze

Fizyczne podstawy dalmierza

W użyciu praktycznym dalmierz ręczny to urządzenie popularne w branży budowlanej, służące do łatwego wyznaczania odległości, oraz powierzchni i kubatury. Szczególnie ciekawe są dalmierze laserowe, które realizują obliczanie dystansu na podstawie czasu, w jakim impuls elektromagnetyczny – światło, przebywa mierzony odcinek. Ogólnie podstawą działania dalmierza laserowego jest układ optyczno-elektroniczny. Wysyła on impuls świetlny (elektromagnetyczny), który po dotarciu do określonego obiektu, w mierzonej odległości np. ściany, odbija się od powierzchni. Nie może to być powierzchnia przezroczysta, ponieważ wiązka musi się odbić.

Znaczenie ruchu obrotowego Ziemi

Ruch obrotowy naszej planety obserwujemy na co dzień. Ziemia cały czas się kręci, nieustannie wpływając na nasze życie codzienne.

Justyna Śliwińska, Jolanta Nastula

Każdy z nas wie, że Ziemia kręci się wokół własnej osi łączącej bieguny ziemskie. Obserwujemy ten ruch jako następujące po sobie dzień i noc czy też pozorną wędrówkę słońca i innych gwiazd na naszym niebie. Przecież nie raz o poranku mówimy do siebie, że słońce już wstało, tak jak wieczorem często obserwujemy słońce, które zachodzi, czy też „idzie spać”. A tak naprawdę słońce wcale nie porusza się po naszym niebie, lecz to właśnie Ziemia wykonuje w ciągu doby pełen obrót wokół własnej osi i sprawia, że w niektórych miejscach na świecie w danym momencie jest dzień, a w innych noc. Właśnie dzięki temu ludzie opracowali rachubę czasu.

Pierwsza definicja doby związana była właśnie z czasem potrzebnym Ziemi na pełen obrót wokół własnej osi. Współcześnie jednak czas określa się za pomocą dokładnych zegarów atomowych. Co więcej, sama definicja sekundy w międzynarodowym układzie jednostek miar (SI) nie jest już oparta o czas obrotu Ziemi wokół własnej osi, lecz związana jest z drganiami w atomach cezu. Niemniej jednak Ziemia cały czas się kręci, nieustannie wpływając na nasze życie codzienne.

Nie każdy zdaje sobie sprawę jak szybko wiruje nasza planeta. Prędkość liniowa tego ruchu na równiku wynosi niemal 1700 km/h i maleje w kierunku biegunów, gdzie wynosi 0. Oznacza to, że będąc na równiku w ciągu całej doby pokonujemy odległość równą obwodowi naszej pla-

nety, czyli około 40 000 kilometrów, czego zdajemy się wcale nie odczuwać.

Tak ogromna prędkość wirowania naszej planety jest jednak wykorzystywana przez ludzi na przykład podczas wynoszenia rakiet w przestrzeń kosmiczną w celu nadania przyspieszenia. Aby maksymalnie wykorzystać ruch wirowy naszej planety i ograniczyć zużycie paliwa, wielkie porty kosmiczne, skąd startują rakiety i sondy kosmiczne, rozmieszcza się jak najbliżej równika. Na przykład amerykańska agencja kosmiczna NASA ma swój port na przylądku Canaveral na Florydzie, Europejskie rakiety startują z Gujany Francuskiej, Rosjanie korzystają z kosmodromu Bajkonur na terenie Kazachstanu czy też portów Plesieck



Rakiety i sondy kosmiczne, startują z kosmodromów, które znajdują się jak najbliżej równika.

i Wostocznyj, a Chińczycy na swoje porty kosmiczne wybierają miejsca ulokowane na południu kraju.

Przyczyny obrotu Ziemi

Wielu z nas zastanawia się zapewne, dlaczego Ziemia, zamiast stać w miejscu, nieustannie się kręci. Otóż tak naprawdę wszystko w przestrzeni kosmicznej wiruje: planety, gwiazdy, galaktyki. Tak jest od początku istnienia Wszechświata. Ziemia uformowała się około 4.5 miliarda lat temu z chmury gazu i pyłu, który wirował wokół nowo powstałego Słońca. Gęsto nagromadzone cząstki zderzały się i łączyły ze sobą, tworząc naszą planetę. W trakcie formowania się Ziemi, skały kosmiczne nieustannie się z nią zderzały i wprawiały ją w wirowanie. Prawdopodobnie w początkach Wszechświata wszystkie obiekty obracały się w tym samym kierunku, ale późniejsze wydarzenia, takie jak zderzenia z innymi obiektami, zmieniły ten stan rzeczy.

Należy pamiętać, że oprócz wirowania wokół własnej osi, nasza planeta wykonuje również ruch obiegowy wokół Słońca znajdującego się w centrum Układu Słonecznego, co wynika z oddziaływania grawitacyjnego Słońca. Ta sama zasada wyjaśnia fakt, iż Księżyc porusza się po orbicie wokół Ziemi, a Słońce krąży wokół centrum naszej galaktyki. Ruch obiegowy naszej planety wokół Słońca oraz nachylenie jej osi obrotu do płaszczyzny orbity przyczyniają się między innymi do zmienności pór roku na Ziemi.

Warto wspomnieć, że już starożytni Grecy uważali, że Ziemia zarówno obraca się wokół własnej osi, jak i krąży wokół Słońca. Jednakże ta teoria została na długi czas porzucona w okresie średniowiecza, kiedy to twierdzono, że nasza planeta jest nieruchoma i stanowi centrum Wszechświata. Dopiero w XVI wieku polski astronom, Mikołaj Kopernik, wyjaśnił, że Ziemia razem z innymi planetami krąży dokoła Słońca. Teorię tę potwierdzili kolejni naukowcy na czele z Galileuszem.

Ruch obrotowy naszej planety jest bardziej skomplikowany niż myślimy

Choć na co dzień obserwujemy konsekwencje ruchu obrotowego Ziemi, to jednak zapewne nie każdy z nas jest świadomy, jak bardzo skomplikowany jest ten ruch. Ziemia zwalnia lub przyspiesza obrót wokół swojej osi, a sama oś obrotu również zmienia swoje położenie zarówno względem gwiazd, jak i względem swojej powierzchni. Tak naprawdę Ziemia nieustannie chwieje się i kołysze, wykonując ruch podobny do ruchu wirującego bąka – zabawki znanej z dzieciństwa. Oczywiście będąc na powierzchni Ziemi nie odczuwamy tego, żeby Ziemia zwalniała czy też przyspieszała, tak samo jak nie zauważamy, żeby jej oś obrotu zmieniała położenie.

Okazuje się, że w wyniku oddziaływania grawitacyjnego Słońca i Księżyca, Ziemia bardzo powoli hamuje, a długość doby wydłuża się o 2 milisekundy na każde sto lat. Szacuje się, że w okresie, kiedy na Ziemi żyły dinozaury, doba była o około jedną godzinę dłuższa niż obecnie. Z kolei różnica w długości doby między marcem i lipcem wynosi 1 milisekundę.



Na ruch obrotowy Ziemi wpływa m.in. sezonowa cyrkulacja wiatrów, prądy morskie, silne trzęsienia ziemi i wybuchy wulkanów.

Jeżeli chodzi o położenie bieguna ziemskiego, to przemieszcza się on nieustannie w kierunku zachodnim, w stronę Kanady, w tempie 11 centymetrów na rok. Jednakże naukowcy zauważyli, że w ciągu ostatnich kilkunastu lat ruch bieguna zmienił swój kierunek, skręcając na wschód, co badacze wiąże z ocieplaniem się klimatu i związanym z tym intensywnym topnieniem pokrywy lodowej na Grenlandii.

Oprócz tego nieustannego dryfu bieguna, występuje szereg innych, większych i mniejszych zmian w ruchu bieguna, rzędu od kilku milimetrów do kilku metrów, bowiem ten jednostajny ruch bieguna w kierunku zachodnim jest zaburzany przez wiele zjawisk. Współczesne techniki pozwalają na pomiar współrzędnych bieguna z dokładnością 1.5 mm i takie zmiany są przez precyzyjne pomiary geodezyjne wychwytywane.

Dlaczego Ziemia nie porusza się w sposób jednostajny?

Gdyby Ziemia była idealną kulą o jednorodnej strukturze wewnętrznej, tak jak na przykład szklana kula, oraz gdyby została umieszczona w próżni, to rzeczywiście poruszałaby się z jednakową prędkością, a położenie jej osi obrotu byłoby niezmiennie. W rzeczywistości jednak Ziemia nie jest jednorodnym ciałem sztywnym, a bardziej przypomina jajko na miękko. W jej wnętrzu znajduje się kilka warstw, które różnią się składem, gęstością i temperaturą.

Oprócz tego ruch obrotowy Ziemi podlega wpływom różnorodnych procesów zachodzących we wnętrzu Ziemi, na jej powierzchni i w atmosferze ponad nią. Takie zjawiska to na przykład ruch płyt tektonicznych, interakcje pomiędzy jądrem i płaszczem ziemskim, sezonowa cyrkulacja wiatrów, prądy morskie, zmiany rozkładu wód na powierzchni kontynentów związane z sezonowymi



Obserwacje ruchu obrotowego Ziemi są jednym z zadań współczesnej geodezji

okresami deszczowymi i suchymi, z powodziami i suszami w różnych miejscach na świecie, topniejące lodowce i związane z tym podnoszenie się poziomu oceanów, silne trzęsienia ziemi i wybuchy wulkanów.

Tak naprawdę każde takie zjawisko w mniejszym lub większym stopniu wpływa na ruch obrotowy Ziemi. Gdyby w jednym czasie cała ludzkość na świecie przemieściła się w jedno miejsce, to takie zdarzenie również byłoby zauważone przez współczesne techniki obserwacyjne na obecnym poziomie dokładności.

Do tego dochodzą również oddziaływania grawitacyjne innych ciał niebieskich, z których największy wpływ ma Księżyc i Słońce. Co ciekawe, to Księżyc w większym stopniu zaburza ruch obrotowy Ziemi niż Słońce, mimo tego, że jest on 400 razy mniejszy od Słońca, i ma masę stanowiącą zaledwie milionową część procenta masy Słońca, ale jest po prostu znacznie bliżej Ziemi niż Słońce.

W jaki sposób mierzyć zaburzenia ruchu obrotowego Ziemi?

Dla geodetów, ale również całej społeczności naukowców zajmujących się badaniem Ziemi, bardzo ważne jest ciągle monitorowanie ruchu obrotowego Ziemi.

W geodezji zaburzenia ruchu obrotowego Ziemi określamy za pomocą tak zwanych parametrów orientacji Ziemi, w skrócie EOP (ang. Earth Orientation Parameters). Wśród nich wyróżniamy trzy wielkości: zmiany długości doby, czyli zmiany prędkości wirowania planety, ruch bieguna, czyli zmiany położenia osi obrotu Ziemi względem jej powierzchni oraz precesję i nutację, które odpowiadają za zmiany położenia osi obrotu Ziemi względem gwiazd.

wiadają za zmiany położenia osi obrotu Ziemi względem gwiazd.

Kiedyś pomiary zmian ruchu obrotowego Ziemi były prowadzone w oparciu o obserwowanie gwiazd na niebie. Takie pomiary jednak nie zapewniały dużej dokładności i w związku z tym nie było możliwe wykrycie subtelnego wpływu niektórych zjawisk na wirowanie naszej planety. Również do połowy XX wieku uważano, że Ziemia wiruje ze stałą prędkością. Dopiero wykorzystanie zegarów wahadłowych, a następnie kwarcowych i atomowych, uzmysłowiło nam, że ruch ten nie jest jednostajny.

Obecnie, dokładnych obserwacji parametrów EOP dostarczają współczesne geodezyjne techniki pomiarowe, na czele z globalnymi systemami nawigacji satelitarnej (ang. global navigation satellite systems, GNSS), satelitarnymi pomiarami laserowymi (ang. satellite laser ranging, SLR) oraz interferometrią bardzo długich baz (ang. very long baseline interferometry, VLBI).

W dużym uproszczeniu, zasada pomiaru GNSS opiera się na znajomości współrzędnych satelitów w momencie wysyłania sygnału z odbiornika i precyzyjnym pomiarze odległości od satelity do odbiornika. Na tej podstawie możemy wyznaczyć naszą pozycję czy też pozycję dowolnego punktu na powierzchni Ziemi.

W przypadku pomiarów SLR, system laserowy znajdujący się na stacji naziemnej wysyła wiązkę laserową w kierunku satelity, na którym znajduje się reflektor zwrotny. Wiązka ta ulega odbiciu i wraca do stacji. Wykorzystując znajomość prędkości wiązki laserowej i mierząc czas, w jakim przebyła ona drogę tam i z powrotem, jesteśmy w stanie określić odległość pomiędzy satelitą a punktem na powierzchni Ziemi.

Z kolei podstawą obserwacji VLBI jest rejestracja mikrofalowego sygnału emitowanego przez bardzo odległe pozagalaktyczne źródła za pomocą dwóch radioteleskopów znajdujących się w znacznej odległości od siebie. Precyzyjny pomiar czasu odbioru tych sygnałów pozwala na wyznaczenie odległości między tymi dwoma stacjami.

Warto zaznaczyć, że każda z tych technik posiada sieć stacji prowadzących ciągłe pomiary, zatem nieustannie wyznaczane są ich współrzędne. Na podstawie pozycji stacji można określić położenie Ziemi względem ciał niebieskich, a zatem również parametry jej obrotu.

Aktualnie wykorzystywane metody obserwacyjne pozwalają na pomiar parametrów EOP z dokładnością 1.5 mm. Współcześnie obserwacje te wykonywane są przez kilkadziesiąt ośrodków obserwacyjnych na całym świecie, są gromadzone i przetwarzane przez wiele centrów badań, w tym głównie przez Międzynarodową Służbę Ruchu Obrotowego Ziemi i Systemów Odniesienia (IERS), która, stosując międzynarodowe standardy, wyznacza parametry EOP z wysoką dokładnością i udostępnia je dla środowiska międzynarodowego.

Dlaczego tak ważne jest regularne monitorowanie ruchu obrotowego Ziemi?

Monitorowanie ruchu obrotowego Ziemi ma istotne znaczenie w precyzyjnym wyznaczaniu pozycji, co jest niezbędne w pracy geodetów. A jak wiemy, dokładne

wyznaczanie pozycji obiektów to podstawowe zadanie geodezji. Wszak geodeci nanoszą na mapy współrzędne nowo powstałych budynków, granice działek, żadna inwestycja nie może się obejść bez dokładnie zaplanowanego rozmieszczenia instalacji, rurociągów, czy też bez precyzyjnie wytyczonych dróg i torowisk. A współcześnie współrzędne wyznacza się przede wszystkim za pomocą odbiorników GNSS.

Jednakże zasada działania GNSS opiera się na pomiarach odległości pomiędzy satelitami a punktem na Ziemi i w efekcie wyznaczona w ten sposób pozycja odniesiona jest do pozycji satelitów na ich orbitach. Nam zależy na wyznaczeniu naszych współrzędnych w stosunku do powierzchni Ziemi, czyli w układzie współrzędnych związanym z wirującą Ziemią. Dlatego też zachodzi konieczność przeliczenia wyznaczonych współrzędnych z układu związanego z ciałami niebieskimi, tzw. układu niebieskiego, do układu ziemskiego, w którym operujemy podczas pomiarów geodezyjnych. I takim właśnie łącznikiem między tymi dwoma układami współrzędnych są parametry EOP. Znając je, możemy przeliczać współrzędne z jednego układu do drugiego i odwrotnie. Oczywiście my nie musimy tego robić, ponieważ cała „magia” dzieje się w środku odbiornika GNSS, a my na wyświetlaczu dostajemy gotowe współrzędne.

Takie same odbiorniki, może nieco mniej dokładne niż te używane przez geodetów, znajdują się w naszych telefonach komórkowych czy w nawigacji samochodowej. Współcześnie chyba nikt nie może się obyć bez map inter-

netowych czy aplikacji, które nie dość, że pokazują naszą pozycję, to jeszcze wyznaczają optymalną trasę do miejsca docelowego i czas, w jakim go pokonamy.

Znajomość ruchu obrotowego jest również potrzebna podczas planowania startu misji kosmicznych. Chcemy przecież wiedzieć, w którym miejscu względem Słońca będzie znajdował się punkt, z którego planujemy wystrzelić sondę zmierzającą w jego kierunku. Jeśli nie uwzględnimy tego, że Ziemia się obraca, możemy wysłać statek kosmiczny w zupełnie inne miejsce niż planujemy.

Znajomość ruchu obrotowego naszej planety ma też inne zastosowania, bardziej naukowe. Ruch obrotowy Ziemi, jak i każdej bryły, zależy od jej wewnętrznej budowy, zatem obserwując jej obrót pod wpływem znanych sił zewnętrznych, można bezinwazyjnie uzyskać informację na temat jej wnętrza. Ruch obrotowy Ziemi zależy również od rozkładu jej mas. Zewnętrzne warstwy ciekłe Ziemi, takie jak oceany i wody na powierzchni lądów, oraz gazowe jak atmosfera, przemieszczają się po powierzchni Ziemi, oddziałując na jej ruch obrotowy. Obserwacje parametrów ruchu obrotowego umożliwiają zatem monitorowanie globalnych zmian zachodzących w tych ośrodkach.

Poszukiwanie przyczyn zaburzeń ruchu obrotowego Ziemi

Naukowcy, oprócz tego, że chcą dokładnie określić zmiany parametrów ruchu obrotowego Ziemi, poszukują również przyczyn tych zaburzeń. Wieloletnie badania pokazały, że na precesję i nutację wpływają głównie



Znajomość zmian wirowania naszej planety jest niezbędna w planowaniu misji kosmicznych



Precyzyjne wyznaczanie parametrów ruchu obrotowego naszej planety wymaga wykorzystania kilku technik obserwacyjnych, takich jak GNSS, SLR i VLBI.

oddziaływanie grawitacyjne Księżyca i Słońca, co zostało bardzo dokładnie opisane przez modele precesji i nutacji.

Na zmiany długości doby w sposób istotny wpływają natomiast zmiany cyrkulacji wiatrów strefowych. Z kolei na ruch bieguna oddziałują głównie cyrkulacja atmosferyczna, czyli prędkość wiatru i rozkład ciśnienia atmosferycznego, oraz cyrkulacja oceaniczna, czyli prądy morskie i ciśnienie wywierane przez wodę oceaniczną na dno morskie.

Ostatnie badania wykazały jednak, że ważną rolę odgrywają również zmiany mas hydrosfery lądowej, czyli wody w zbiornikach wodnych, rzekach, glebie, śniegu, a nawet w roślinach. Takie oddziaływania można wyznaczyć na podstawie modeli atmosfery, oceanów i hydrosfery. Jednak dużo bardziej wartościowych danych dostarczają nam globalne pomiary zmian pola grawitacyjnego Ziemi. Takie zmiany ziemskiej grawitacji są niczym innym jak efektem wspomnianych zmian mas atmosfery, oceanów i hydrosfery. Takich niezwykle cennych danych dostarczała misja satelitarna Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), której pomiary są kontynuowane przez jej następcę – misję GRACE Follow-On.

Zasada pomiaru w tych misjach polega na bardzo dokładnym pomiarze zmian odległości pomiędzy dwoma identycznymi satelitami znajdującymi się na tej samej orbicie. Zmiany odległości między tymi satelitami odzwierciedlają zmiany pola grawitacyjnego Ziemi. Przykładowo, podczas przelatywania satelitów ponad Himalajami, odstęp między satelitami zmienia się o długość równą grubości ludzkiego włosa. Odpowiednio opracowane obserwacje misji pozwalają na monitorowanie takich zjawisk jak topnienie lodowców, powódzie, susze, podnoszenie poziomu oceanów – a właśnie te wszystkie zjawiska mają wpływ na ruch obrotowy naszej planety.

Dlaczego istotne jest prognozowanie ruchu obrotowego Ziemi?

Oprócz precyzyjnego pomiaru zmian ruchu obrotowego Ziemi oraz poszukiwania ich przyczyn, ważne jest również przewidywanie przyszłego zachowania się rotacji

naszej planety. Tak jak meteorolodzy przewidują pogodę na najbliższe dni, naukowcy prognozują parametry ruchu obrotowego Ziemi. Dlaczego? Otóż trzeba wiedzieć, że bardzo precyzyjne wyznaczanie parametrów ruchu obrotowego naszej planety wymaga wykorzystania kilku technik obserwacyjnych, takich jak wspomniane wcześniej GNSS, SLR i VLBI. Wymaga to stosowania skomplikowanych procedur obliczeniowych, wykorzystujących duże zbiory danych pozyskanych z różnych technik i różnych ośrodków obserwacyjnych. Zdarzają się również opóźnienia w dostarczaniu niektórych obserwacji. W związku z tym, końcowe wartości parametrów opisujących ziemską rotację są często dostarczane z opóźnieniami. A my przecież często chcemy poznać swoją pozycję czy też wyznaczyć trasę w czasie rzeczywistym.

Podobnie, przyszłe zmiany wirowania naszej planety są potrzebne w planowaniu misji kosmicznych. A przecież takich misji nie planuje się z dnia na dzień, tylko z nawet kilkuletnim wyprzedzeniem. Decyzja o dacie i godzinie startu rakiety jest między innymi zależna od parametrów ruchu obrotowego Ziemi. Jedynym rozwiązaniem jest zatem prognozowanie ruchu obrotowego. Dlatego też wiele instytutów z całego świata podjęło próbę opracowania metody prognozowania parametrów ruchu obrotowego Ziemi, wykorzystując nie tylko różne modele geofizyczne, a także zaawansowane metody matematyczne.

Powstało wiele różnych metod prognozowania, a poszczególne ośrodki ścigają się kto lepiej i dokładniej przewidzi, jak będzie się zmieniać w przyszłości ruch obrotowy naszej planety. Ale tak jak w przypadku prognozy pogody, gdzie na każdym kanale telewizyjnym prezenterzy prognozują podobną, ale nie taką samą temperaturę, tak w przypadku ruchu obrotowego Ziemi poszczególne prognozy różnią się nieco między sobą.

Warto również wspomnieć, że dokładność predykcji zmienia się w zależności od długości prognozy. Wartości tych parametrów możemy przewidzieć na 1-2 dni w przód z dosyć dużą pewnością, jednak wraz ze wzrostem długości prognozy ta dokładność spada, podobnie jak w przypadku długoterminowej prognozy pogody.

Zmiany ruchu obrotowego Ziemi, być może niezauważalne na co dzień, stanowią obiekt badań naukowców oraz wpływają na codzienne czynności, takie jak wyznaczanie pozycji czy nawigacja do określonego punktu. Zaburzenia tego ruchu wiążą się z wieloma zjawiskami, które obserwujemy na co dzień, takimi jak zmiany klimatyczne, wahania poziomu wód gruntowych, cyrkulacja prądów morskich. Wielowątkowość tych badań sprawia, że przed naukowcami stoją dalsze wyzwania.

Justyna Śliwińska
Jolanta Nastula
CBK PAN

Fotografie – Dreamstime

Kompendium astronomiczne

– wybrane pojęcia i zagadnienia – cz. 6

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

W szóstej części tego kompendium zostały przedstawione wybrane zagadnienia z astronomii w porządku alfabetycznym od litery O aż częściowo do litery R.

Ogólna teoria względności – ta nazwa określa relatywistyczną teorię grawitacji, której podstawy zostały opublikowane przez Alberta Einsteina w 1916 roku. Ogólna teoria względności (OTW) jest jednocześnie fizyczną teorią czasoprzestrzeni, w której znajdują się obiekty materialne. OTW stanowi rozszerzenie szczególnej teorii względności odnoszącej się do inercjalnych układów odniesienia na dowolne również nieinercyjne układy odniesienia. Oparta jest ona na czterech postulatach:

1. Czasoprzestrzeń jest czterowymiarową przestrzenią topologiczną, w której określona jest struktura różniczkowej klasy C^2 .

2. Lokalnie geometria czasoprzestrzeni jest geometrią Minkowskiego.

3. Tensor metryczny czasoprzestrzeni spełnia równania pola Einsteina:

$$R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} R g_{\alpha\beta} = -8\pi \frac{G}{c^4} T_{\alpha\beta} = -\kappa T_{\alpha\beta}, \quad (1)$$

przy czym przyjmujemy następujące oznaczenia: $R_{\alpha\beta}$ – tensor krzywizny Ricciego, R – skalar krzywizny, $g_{\alpha\beta}$ – tensor metryczny $T_{\alpha\beta}$ – tensor energii-pędu układu fizycznego. Newtonowska stała grawitacji jest oznaczona jako G , stała grawitacji Einsteina jako κ , prędkość światła w próżni jest oznaczona przez c . Lewa strona

powyższego równania tensorowego jest zbudowana z wielkości związanych ze strukturą geometryczną czasoprzestrzeni a prawa strona opisuje rozkład gęstości, ciśnienia, pędów i energii. Równanie to wyraża podstawowy fakt, że rozkład materii wyznacza geometrię czasoprzestrzeni, która z kolei determinuje ruch materii. Równanie to może być zapisane w innej związanej postaci w następujący sposób:

$$G_{\alpha\beta} = -\kappa T_{\alpha\beta}, \quad (2)$$

gdzie $G_{\alpha\beta}$ oznacza tensor Einsteina, który jest równy:

$$G_{\alpha\beta} = R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} R g_{\alpha\beta}. \quad (3)$$

Równanie tensorowe Einsteina jest układem równań różniczkowych nieliniowych drugiego rzędu ze względu na składowe tensora metrycznego.

4. Linie świata cząstek próbnych w czasoprzestrzeni są czasowo zorientowanymi liniami różniczkowej czasoprzestrzennej.

Już analiza powyższych postulatów wskazuje, że OTW jest bardzo zaawansowaną fizycznie i matematycznie teorią. Zawiera ona fundamentalne idee fizyczne odnoszące się do koncepcji przestrzeni i czasu, równoważności masy grawitacyjnej i bezwładnej i lokalnej nierozróżnialności siły grawitacji i siły bezwładności. W aspekcie matematycznym posługuje się rachunkiem tensorowym i wykorzystuje elementy geometrii nieeuklideso-

wej. OTW zmieniła dramatycznie sposób postrzegania Wszechświata przez fizyków i stała się fundamentem dla nowoczesnej kosmologii.

Następujące zjawiska są astronomicznym obserwacyjnym potwierdzeniem OTW:

- *Ruch peryhelium Merkurego* – orbita Merkurego ściśle rzecz biorąc nie jest ustaloną elipsą lecz wykonuje ruch precesyjny tzn. elipsa keplerowska obraca się w swojej płaszczyźnie wokół ogniska w którym jest Słońce o około 573" na stulecie. Z tego obrót o około 530" na stulecie tłumaczy klasyczna dynamika newtonowska oddziaływaniem innych planet. Brakujące 43" nie znajdujące potwierdzenia w fizyce klasycznej wyjaśnia właśnie OTW.
- *Ugięcie promieni świetlnych* nadlatujących z bardzo daleka (z nieskończoności) i odlatujących do nieskończoności w polu grawitacyjnym gwiazdy jest zgodnie z OTW równe:

$$\Delta\varphi = \frac{4GM}{c^2 R}, \quad (4)$$

gdzie G , M , R , c oznaczają odpowiednio stałą grawitacji, masę gwiazdy, jej promień i prędkość światła. Dla Słońca zgodnie z przewidywaniami OTW jest równe $\Delta\varphi = 1.75''$. To zjawisko zaobserwowano po raz pierwszy w 1919 roku w czasie całkowitego zaćmienia Słońca. Położenia dalekich gwiazd znajdujących się na sferze niebieskiej blisko przesłoniętej przez Księżyc tarczy Słońca były przesunięte

o $\Delta\varphi = 1''.98$. Późniejsze obserwacje dały wyniki jeszcze lepiej zgodne z wartością przewidywaną przez OTW. Oprócz tych dwóch "klasycznych" dowodów słuszności OTW można jeszcze wymienić inne zjawiska przewidywane przez OTW, które znalazły eksperymentalne potwierdzenie np.: przesunięcie prążków widmowych w kierunku fal dłuższych w silnych polach grawitacyjnych lub opóźnienie w odbitych od planet sygnałach radarowych wysyłanych z Ziemi.

Oś świata – linia przechodząca przez północny biegun astronomiczny P i obserwatora. Przechodzi ona również przez południowy biegun astronomiczny P'. Jeśli przyjmujemy, że wymiary Ziemi są zanedbywalnie małe w stosunku do wymiarów sfery niebieskiej to wtedy oś świata pokrywa się z osią rotacji Ziemi. Obserwator na Ziemi odnosi wrażenie, że sfera niebieska obraca się ze wschodu na zachód wokół osi świata – jest to odbicie obrotu Ziemi wokół własnej osi z zachodu na wschód.

Paralaksa – zjawisko zmiany kierunku, w którym obserwowany jest obiekt w następstwie zmiany położenia obserwatora czyli pozorna zmiana położenia kąowego ciała niebieskiego związana ze zmianą położenia przez obserwatora. Rozróżniamy paralaksę dzienną – związana z obrotem Ziemi wokół własnej osi, roczną – związaną z ruchem Ziemi wokół Słońca i wiekową związaną z ruchem Układu Słonecznego względem gwiazd Galaktyki. Paralaksy ciał kosmicznych pozwalają wyznaczyć ich odległości.

Parsek, (ps) – jednostka długości stosowana w astronomii i astrofizyce. Odległość gwiazdy od Układu Słonecznego jest równa 1ps, jeśli jej paralaksa trygonometryczna jest równa $\pi = 1''$. Oznacza to, że z odległości 1 parseka widać promień orbity Ziemi w ruchu wokół Słońca pod kątem jednej sekundy łuku.

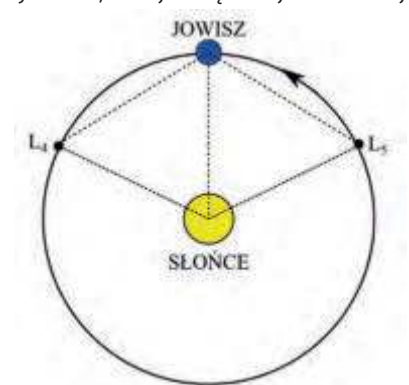
$1\text{ps} = 3.083 \cdot 10^{16} \text{ m} = 206\,265 \text{ AU} = 3.263 \text{ lat świetlnych}$. Stosuje się również jednostki pochodne: $1 \text{ kps} = 10^3 \text{ ps}$ oraz $1 \text{ Mps} = 10^6 \text{ ps}$.

Perturbacje – zaburzenia ruchu ciał układu spowodowane przez oddziaływanie ciał nie należących do tego układu. W najprostszym przypadku mogą być to np. perturbacje ruchu planety A poruszającej się wokół Słońca spowodowane oddziaływaniem innej planety B. Jeżeli traktujemy układ Słońce – planeta A jako zagadnienie dwóch ciał to ciałem perturbującym jest planeta B. Dlatego ruch

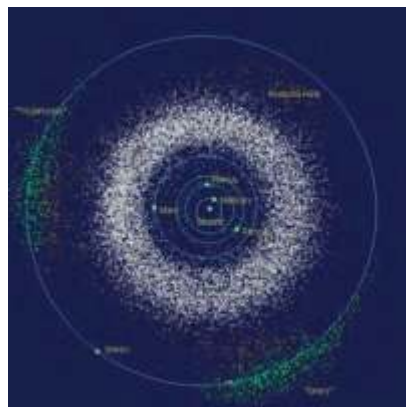
planety A wokół Słońca nie odbywa się po ściśle keplerowskiej orbicie, gdyż na jej ruch keplerowski nakładają się perturbacje pochodzące od planety B. Rachunek perturbacyjny odgrywa bardzo istotną rolę w wyznaczaniu orbit ciał kosmicznych: planet, planetoid, komet oraz gwiazd w Galaktyce.

Planeta – ciało kosmiczne krążące wokół gwiazdy, które widoczne jest dzięki oświetleniu przez gwiazdę a nie mające wystarczających źródeł własnej energii promienistej o średnicy większej niż około 1000 km. Oprócz planet krążących w Układzie Słonecznym znane są dziś planety krążące wokół innych gwiazd w pozasłonecznych układach planetarnych.

Planetoidy (Asteroidy) – niewielkie ciała niebieskie, bryły skalno-metaliczne krążące wokół Słońca głównie w tzw. Głównym Pasie Asteroidów w średniej odległości od środka Układu Słonecznego równej 2.8 AU po niezbyt spłaszczonych elipsach. Zasadniczo przyjmuje się, że asteroidy mają rozmiary większe niż 100 m (mniejsze ciała uważa się za meteoroidy lub pył kosmiczny). Największe z nich o średnicach powyżej 100 km mają kształty kuliste, mniejsze są mniej lub bardziej



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie położenia planetoid trojańskich w pobliżu punktów libracyjnych L_4 i L_5 w układzie Słońce – Jowisz.



Rys. 2. Wewnętrzny Układ Słoneczny wraz graficznym przedstawieniem położenia grup planetoid. (źródło: https://pl.wikipedia.org/wiki/Plik:Rodzina_Hildy.PNG).

nieregularnymi bryłami. Największe z nich to: Ceres (średnica około 1000 km), Pallas, Westa i Juno. Oprócz obiektów Głównego Pasa Asteroidów istnieją planetoidy krążące po dość wydłużonych orbitach, które mogą penetrować wewnętrzne rejony Układu Słonecznego i zbliżać się Ziemi. Nazwano je NEAs (ang. Near Earth Asteroids). Ze względu na charakterystykę orbit wyróżniamy wśród nich kilka grup: asteroidy grupy Ateny, Apolla, Amora. Osobną bardzo interesującą grupę stanowią tzw. planetoidy trojańskie – Trojańczycy, piękny przykład realizacji trójkątnego zagadnienia trzech ciał w przyrodzie. Grupują się one w pobliżu punktów libracji Lagrange'a L_4 i L_5 będących wierzchołkami trójkątów równobocznych o podstawie Słońce–Jowisz (rys. 1, rys. 2).

Pływy (przyptywy, odptywy) – odkształcenia ciał niebieskich spowodowane przez działanie sił pływowych. Przykładem mogą być cykliczne odkształcenia i ruchy masy w hydrosferze (pływy oceaniczne), atmosferze i litosferze Ziemi. Przyczyną tych zjawisk w układzie Ziemia–Księżyc jest siła pływowa będąca wypadkową siły bezwładności wynikającej z faktu, że nasza planeta obraca się dookoła wspólnego środka masy układu i przyciągania grawitacyjnego Księżyca. Oprócz siły pływowej związanej z Księżycem daje się zauważyć na Ziemi również słabsze działanie pływowe Słońca. Ogólnie oddziaływanie pływowe manifestują swoją obecność w układach podwójnych (lub wielokrotnych) np. planeta – satelita, Słońce – planeta oraz w gwiazdach podwójnych.

Południk niebieski (astronomiczny) miejsca obserwacji – koło wielkie przechodzące przez zenit i biegun niebieski północny. Południk przecina horyzont w punkcie północy N i południa S, przy czym punkt N znajduje się bliżej północnego bieguna niebieskiego P. W odstępach po 90° między punktami N i S znajdują się na horyzoncie dwa pozostałe kardynalne punkty horyzontu, punkt wschodni E oraz zachodni W.

Pozasłoneczne układy planetarne – układy planet krążących wokół innych gwiazd niż Słońce. Pierwszy pozasłoneczny układ planetarny odkrył w 1992 r. Wolszczan wokół pulsara PSR 1257+12 w oparciu o analizę przesunięć w czasie jego impulsów radiowych. Ruch planet związanych z pulsarem wymusza jego ruch wokół środka masy układu. Ruch pulsara wiąże się z jego cyklicznym przybliżaniem i od-

dalaniem od Ziemi co powoduje obserwowane Dopplerowskie przesunięcia emitowanego przez pulsar impulsu. Metoda ta nazywana jest chronometrażem pulsarów. Inne proponowane metody detekcji planet w pozastonecznych układach planetarnych mogą opierać się na analizie zaburzeń ruchu gwiazdy pod wpływem planet, przejść planet przez tarczę gwiazdy, soczewkowaniu grawitacyjnym czy ewentualnie bezpośrednich obserwacjach.

Prędkość kosmiczna pierwsza (dla kulistego obiektu kosmicznego) – jest to prędkość V_I jaką należy nadać w kierunku poziomym małemu ciału (satelicie) aby krążył po orbicie kołowej "tuż" nad powierzchnią rozważanego obiektu kosmicznego (np. planety). Określona jest ona wzorem:

$$V_I = \sqrt{\frac{GM}{R}}, \quad (5)$$

gdzie G , M , R oznaczają odpowiednio stałą grawitacji, masę obiektu i jego promień. Dla Ziemi pierwsza prędkość kosmiczna jest równa około 7.91 km/s.

Prędkość kosmiczna druga (dla danego obiektu kosmicznego) – najmniejsza prędkość jaką należy nadać ciału próbnemu (sondzie kosmicznej) spoczywającej na powierzchni danego obiektu aby oddaliło się od niego do nieskończoności. Drugą prędkość kosmiczną V_{II} wyraża wzór:

$$V_{II} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}, \quad (6)$$

gdzie G , M , R oznaczają odpowiednio stałą grawitacji, masę i promień obiektu. Dla Ziemi druga prędkość kosmiczna jest równa 11.2 km/s. Oprócz pierwszej i drugiej prędkości kosmicznych wyróżnia się jeszcze trzecią prędkość kosmiczną tzn. taką, która pozwala uciec ciału z Układu Słonecznego oraz czwartą prędkość kosmiczną wystarczającą do ucieczki z pola Galaktyki.

Promieniowanie kosmiczne – dzielimy na pierwotne i wtórne. Promieniowanie kosmiczne pierwotne to promieniowanie docierające do atmosfery Ziemi z przestrzeni kosmicznej składające się z protonów (83% – 89%), cząstek α (10% – 15%), śladowych ilości jonów cięższych pierwiastków oraz neutronów, elektronów, promieni γ oraz neutrino. Ważną cechą pierwotnego promieniowania kosmicznego jest jego izotropowość w obszarach poza atmosferą Ziemi świadcząca o tym, że dociera ono do Ziemi głównie z przestrzeni międzygwiazdowej a nie jest związane z jakimś ciałem Układu Słonecznego.

Drobna tylko część tego promieniowania rzędu 1% pochodzi ze Słońca. Średnia energia cząstek pierwotnego promieniowania kosmicznego wynosi około 10^{10} eV ale energia pojedynczych cząstek może osiągać nawet 10^{19} eV. Promieniowanie kosmiczne wtórne to promieniowanie powstałe w atmosferze Ziemi w wyniku zderzeń cząstek pierwotnego promieniowania kosmicznego z atomami i cząsteczkami gazów atmosferycznych. Zderzenia te indukują kaskadę cząstek, której ostatni stopień dociera do powierzchni Ziemi. Składa się ono głównie z mezonów, elektronów, nukleonów i mionów. Strumień naładowanych cząstek przy powierzchni Ziemi jest rzędu $2 \cdot 10^2$ cząstek/($m^2 \cdot s$).

Promieniowanie relikowe (promieniowanie tła, promieniowanie szczątkowe, ang. blackbody background radiation) – promieniowanie elektromagnetyczne przewidziane w 1949 r. przez Gamow i odkryte w 1965r. przez Penziasa i Wilsona o natężeniu odpowiadającym promieniowaniu ciała doskonale czarnego o temperaturze około 2.726 K, którego maksimum natężenia odpowiada długości fali około 0.001 m, z bardzo dużą dokładnością promieniowanie to ma charakter izotropowy. Stanowi ono bardzo mocny dowód teorii $\rightarrow$ Wielkiego Wybuchu.

Promień grawitacyjny, promień Schwarzschilda (r_g) – w ogólnej teorii względności wielkość przypisywana ciału o masie M . Dla typowych obiektów astronomicznych takich jak planetoidy, komety, planety, gwiazdy, galaktyki promień grawitacyjny jest bez porównania mniejszy od ich wymiarów geometrycznych i np. dla Słońca $r_g = 3$ km. Dla gwiazd neutronowych promień grawitacyjny jest mniejszy ale tego samego rzędu co promień geometryczny. Efekty relatywistyczne odgrywają tym większą rolę im bardziej promień grawitacyjny zbliża się do promienia geometrycznego czyli gdy stosunek r_g/r dąży do jedności. Jeżeli $r_g > r$ to wtedy prędkość ucieczki z powierzchni obiektu staje się większa niż prędkość światła i żadna forma materii nie może wydostać się z niego na zewnątrz. Taki obiekt staje się czarną dziurą.

Punkt równonocy wiosennej, punkt Barana γ – punkt na ekliptyce, w którym Słońce około 20/21 marca przechodząc z półkuli południowej na północną zmienia deklinację z ujemnej na dodatnią. Przeciwny punkt na ekliptyce nazywa się **punktem równonocy jesiennej** (punktem Wagi Ω).

Słońce przechodzi przez niego około 22/23 września. Punkty równonocy są punktami przecięcia ekliptyki z równikiem niebieskim. Należą one do czterech kardynalnych punktów ekliptyki. Pozostałe dwa to punkty przesileni: letniego; punkt Raka i zimowego; punkt Koziorożca. Słońce przechodzi przez te punkty odpowiednio około 21 czerwca i 21 grudnia.

Radiogalaktyki – galaktyki, które są źródłami bardzo silnego promieniowania radiowego. W odróżnieniu od kwazarów będących źródłami zwartymi, radiogalaktyki są obiektami rozciągniętymi. Zwykle galaktyki promieniują w dziedzinie radiowej moc rzędu 10^{32} W pochodzącą głównie z pulsarów i pozostałości gwiazd supernowych, gdy tymczasem radiogalaktyki są źródłami promieniowania radiowego o widmie potęgowym o mocy rzędu 10^{36} W – 10^{38} W. Silne radiogalaktyki posiadają w swoim centrum punktowe źródło promieniowania połączone tzw. radioobłokami wydłużonymi dżetami. Za ich pośrednictwem, energia z centrum radiogalaktyki jest przesyłana do promieniujących radiowo dwóch obłoków. Niektóre czynne radiowo pulsary mają również podobną do takiej podwójną strukturę.

Radioteleskop – przyrząd do detekcji i rejestracji fal radiowych emitowanych przez ciała kosmiczne, podstawowy instrument obserwacyjny stosowany w radioastronomii. Zasadnicze dwie części radioteleskopu to: antena – która zbiera padające na nią promieniowanie radiowe oraz odbiornik – wzmacniający i zapisujący odbierany sygnał radiowy. Anteny radioteleskopów stanowią albo metalowe czasze paraboliczne albo dipole lub metalowe siatki. Podstawowe dwa parametry określające jakość radioteleskopu to zdolność rozdzielcza – minimalna odległość kątowa dwóch radioźródeł, które możemy jeszcze odróżnić od siebie oraz czułość – określająca zdolność odbierania sygnałów radiowych o jak najmniejszej mocy. Zdolności rozdzielcze pojedynczych radioteleskopów są tym większe im większe są anteny odbiorcze – generalnie nie są one jednak duże gdyż są ograniczone rozmiarami anten, które z kolei są ograniczone względami natury technicznej. Dlatego w celu znacznego poprawienia zdolności rozdzielczej buduje się układy interferometryczne. Najprostszy interferometr radiowy składa się z dwóch anten odbiorczych umieszczonych w pewnej odległości od siebie. Ponieważ zdolność rozdzielcza

interferometru wzrasta wraz z bazą interferometru czyli odległością pomiędzy antenami składowymi więc obecnie wykorzystuje się w interferometrii radioteleskopy oddalone od siebie o tysiące kilometrów. Tego typu radiointerferometry noszą nazwę interferometrów VLBI (ang. very long baseline interferometry). Zdolność rozdzielcza interferometrów w kierunkach prostopadłych do ich osi jest niewielka dlatego buduje się układy interferometrów o wzajemnie prostopadłych osiach tzw. krzyże Millsa. W celu dalszego poprawienia zdolności rozdzielczej stosuje się zamiast dwóch układy kilku czy kilkunastu radioteleskopów. W ciągu ostatnich dwudziestu lat intensywnie rozwinięta się technika przeprowadzania obserwacji z wykorzystaniem interferometrów o zmiennej bazie zwana syntezą apertury. Teoretycznie z pomocą tej metody można uzyskać informacje jakie dostarczyłby jeden radioteleskop o powierzchni anteny równej polu po jakim przesuwają się ruchome anteny interferometru. Dalsze rozwinięcie tej metody wykorzystujące ruch obrotowy Ziemi to tzw. supersynteza apertury. Do najśłynniejszych odkryć radioastronomicznych można zaliczyć odkrycie promieniowania relikowego będącego pozostałością początkowego etapu ewolucji Wszechświata, pulsarów (gwiazd neutronowych) – bardzo późnych etapów ewolucji masywnych gwiazd i bardzo dalekich silnych radioźródeł – kwazarów. Słynne radioteleskopy:

Największy na świecie radioteleskop **FAST** (Five hundred meter Aperture Spher-

ical Telescope) położony w chińskiej prowincji Kuejczou w pobliżu miejscowości Pingtang o pojedynczej czaszy o średnicy 500m, **Arecibo** na wyspie Puerto Rico, największy amerykański jednoantenowy radioteleskop o średnicy czaszy 300 m, **Effelsberg** w Niemczech – średnica anteny 100 m, **Jodrell Bank** (Anglia) – średnica anteny 76 m. Największy polski radioteleskop o średnicy 32 metrów znajduje się w obserwatorium radioastronomicznym Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w miejscowości **Piwnice pod Toruniem**.

Rektascensja (wznoszenie proste α) – jedna ze współrzędnych drugiego układu równikowego. Jest to kąt dwuścienny pomiędzy płaszczyzną koła wielkiego przechodzącego przez oś świata i dane ciało niebieskie a płaszczyzną przechodzącą przez oś świata i punkt Barana γ – punkt równonocy wiosennej (liczony od punktu Barana w kierunku z zachodu na wschód i wyrażany w mierze czasowej; godzinach, minutach, sekundach).

Rigel (Beta Orionis, β Ori) – najjaśniejszy składnik gwiazdowy w konstelacji Oriona o obserwowanej wielkości gwiazdowej $+0,18^m$ i absolutnej $-7,84^m$ odległy od Słońca o 863 lata świetlne typu widmowego B8 i temperaturze powierzchni 12100 K.

Rok świetlny (ly) – jednostka długości stosowana w astronomii i astrofizyce; jest to odległość jaką przebędzie promień świetlny w próżni w ciągu jednego roku zwrotnikowego.

$$1 \text{ ly} = 9,461 \cdot 10^{15} \text{ m} = 0,3066 \text{ ps} = 63 \text{ 240 AU}.$$

Rosetta to sonda kosmiczna należąca do ESA, której zadaniem było wejście na orbitę wokół jądra komety 67P/Churyumov-Gerasimenko i osadzenie na jego powierzchni lądownika Philae w dniu 12 listopada 2014 roku.

Uwaga:

Pozostałe pojęcia będą sukcesywnie omawiane w kolejnych częściach tego kompendium.

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

LITERATURA:

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

LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA:

- [6] Stodółkiewicz J. S., 1978, Astrofizyka ogólna z elementami geofizyki, PWN Warszawa.
- [7] Jaroszyński M., 1993, Galaktyki i budowa Wszechświata, PWN, Warszawa.
- [8] Urania – Postępy Astronomii roczniki z lat 2000 – 2020.
- [9] Fizyka w szkole z astronomią – roczniki z lat 2000-2020.

STRONY INTERNETOWE:

- [10] <https://www.nasa.gov/>
- [11] <https://sci.esa.int/>

I. PRENUMERATĘ NA 2022 ROK MOŻNA ZAMÓWIĆ BEZPOŚREDNIO U WYDAWCY

- **Przez internet:** zakładka *Prenumerata* na stronie www.aspress.com.pl i wypełniając formularz zamówienia na podstronie prenumeraty
■ **e-mailem:** szewczyk24@gmail.com ■ **telefonicznie:** 606 201 244 ■ **listownie:** Agencja AS Józef Szewczyk, ul. Warchałowskiego 2/58, 02-776 Warszawa

Cena prenumeraty w 2022 roku

Tytuł	Liczba wydań (I i II półroczne)	Cena egzemplarzowa	Cena prenumeraty rocznej	Cena prenumeraty w I półroczu
Dwumiesięczniki				
Chemia w Szkole	6 (3+3)	35,00	210,00	105,00
Geografia w Szkole	6 (3+3)	35,00	210,00	105,00
Fizyka w Szkole z Astronomią	6 (3+3)	35,00	210,00	105,00
Wiadomości Historyczne z WOS	6 (3+3)	35,00	210,00	105,00

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

eprasa.pl 9f02696fb2

II. PRENUMERATA DOSTARCZANA PRZEZ FIRMY KOLPORTERSKIE:

1. **RUCH** – zamówienia na prenumeratę w wersji papierowej i na e-wydania można składać bezpośrednio na stronie www.prenumerata.ruch.com.pl. Ewentualne pytania prosimy kierować na adres e-mail: prenumerata@ruch.com.pl lub kontaktując się z Centrum Obsługi Klienta „RUCH” pod numerami: 22 693 70 00 lub 801 800 803 – czynne w dni robocze w godzinach 7.00–17.00. Koszt połączenia wg taryfy operatora.
 2. **GARMOND PRESS** – tel. 22 836 69 21 prenumerata.warszawa@garmondpress.pl.
 3. **KOLPORTER S.A.** – prenumeratę instytucjonalną można zamawiać w oddziałach firmy. Informacje: www.kolporter.com.pl.
 4. **POCZTA POLSKA** – zamówienia we wszystkich urzędach pocztowych lub u listonoszy, drogą elektroniczną: www.poczta-polska.pl. Infolinia w godz. 8.00–22.00: 801 333 444 (dla telefonów stacjonarnych) i 801 333 444 (dla telefonów komórkowych i z zagranicy).
- III. **NUMERY ARCHIWALNE DRUKOWANE** dostępne są w ograniczonym zakresie. Przed złożeniem zamówienia prosimy o kontakt pod adresem: szewczyk24@gmail.com.

WYDANIE SPECJALNE W WERSJI ELEKTRONICZNEJ – PLIK PDF



15 artykułów o tym,
dlaczego Ziemia
jest planetą wyjątkową!

**Cena
15 zł**
(w tym 8% VAT)

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

eprasa.pl 9f02696fb2

PRENUMERATA 2022

PRZEDŁUŻ LUB ZAMÓW!



Zamów
wydanie
darmowe!

PRENUMERATA:

- ☐ w wersji drukowanej,
- ☐ w wersji elektronicznej (pliki PDF),
- ☐ roczna,
- ☐ półroczna.

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

eprasa.pl 9f02696fb2