

FIZYKA

w Szkole z Astronomią

CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI

399 (LXV) indeks 35810X Nr 4 lipiec/sierpień 2025 CENA 50,00 zł (w tym 8% VAT)

POLAK W KOSMOSIE

Misja Ax-4 ze Sławoszem Uznańskim-Wiśniewskim



Fermiony Bozony Dystrybucja

Czy smog śpi w dzień?

MIĘDZYNARODOWY ROK
NAUKI I TECHNOLOGII KWANTOWYCH

ASTROFIZYKA
Ewolucja gwiazd

NEUTRINA
– skąd je wziąć?

ewwaa.pl/91fce9a461



WYDANIE SPECJALNE FIZYKI W SZKOLE

WERSJA ELEKTRONICZNA – PLIK PDF

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



**Cena
25 zł**

(w tym 8% VAT)

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

eprasa.pl 91fce9a461

Drodzy Czytelnicy!

Zwielką przyjemnością przekazujemy Państwu numer 4 Fizyki w Szkole. Numer ten jest w teoretycznie wakacyjny, ale ukazuje się na przełomie sierpnia i września, więc mamy nadzieję, że wzbudzi duże zainteresowanie.

Latem jednym najważniejszych wydarzeń fizyczno-astronomicznych, był lot Polaka Sławosza Uznańskiego-Wiśniewskiego w Kosmos. Media relacjonowały na bieżąco lot, pobyt i powrót na Ziemię naszego kosmonauty, więc przypominamy tylko w skrócie najważniejsze fakty z tego wydarzenia. Polak pełnił w trakcie lotu nie tylko rolę naukowca, lecz także popularyzatora nauki i miejmy nadzieję, że jego historia przyczyni się do wzrostu zainteresowania fizyką przez uczniów, a wśród polityków inwestycjami w naukę i badania.

Jednym z ważniejszych działów fizyki jest fizyka kwantowa. Jest to dział teoretyczno-doświadczalny, gdyż osiągnięcia teoretyczne przeplatały się osiągnięciami doświadczalnymi. Jednym z ważniejszych doświadczeń było doświadczenie Francka-Hertza potwierdzające kwantową strukturę atomu. Jest mu poświęcony artykuł prof. Karwasza i jego współpracowników.

Bardziej zaawansowaną pojęciowo od fizyki kwantowej jest fizyka cząstek elementarnych. Najciekawszą częścią fizyki cząstek elementarnych jest fizyka neutrin. Współczesnym badaniom w tej dziedzinie poświęcony jest artykuł Tadeusza Wibiga

Kończąc Życzę udanej reszty wakacji

Z poważaniem
Redaktor prowadzący

Zbigniew Wiśniewski

Nauczycielom, uczniom i pracownikom oświaty życzymy sukcesów i satysfakcji w nowym roku szkolnym!

Fizyka wczoraj, dziś, jutro

4 Polak w kosmosie – czyli historia ponownie zatoczyła koło

■ Marcin Wesółowski

Po upływie 47 lat kolejny Polak, dr inż. Sławosz Uznański-Wiśniewski odbył lot w kosmos na Międzynarodową Stację Kosmiczną (ISS) w ramach misji kosmicznej Axiom Mission 4.

5 Rozpoczęła się XXI edycja konkursu *Fizyczne Ścieżki!*

■ opracowanie Redakcja

6 CREDO-Maze: a może neutrino?

■ Tadeusz Wibig

Na przełomie wieków XIX i XX doszło w fizyce do rewizji naszego poglądu na świat. Pierwiastki chemiczne, z których zrobione jest wszystko wokół, a ściśle jądra atomów przestały być niezmiennie, niezniszczalne, wiecznotrwałe.

16 Fermiony, bozony i dystrybucje

■ Maciej Panczykowski

18 Międzynarodowy Rok Nauki i Technologii Kwantowych. Doświadczenie

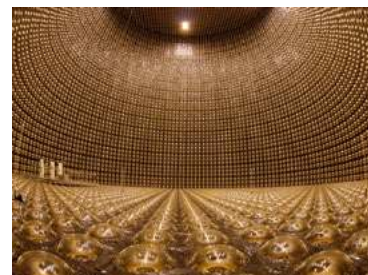
Francka-Hertza ■ Martín Seoane Ampudia, Bogumiła Jezierska, Jakub Behrendt, Krzysztof Wejer, Grzegorz P. Karwasz

25 Żyoty fizyków. Evangelista Torricelli (1608-1647) ■ Tadeusz Wibig

28 Czy smog śpi w dzień? O fizycznych mechanizmach mieszania powietrza

■ Krzysztof Markowicz

W okresie jesienno-zimowym jesteśmy zalewani informacjami o złym stanie jakości powietrza.



Z naszych lekcji

33 Fizyka w ogródku – Arleta Biegańska

36 Bezpieczny model silnika odrzutowego na „sodkę” i ocet – Stanisław Bednarek

38 Powtórz, utrwal, poszerz wiedzę. Zadania z fizyki. Cz. 6. – Waldemar Reńda

40 Nauczanie fizyki w szkołach w Ukrainie - Oleksandra Liashenko, Stanisław Bednarek

Astronomia dla każdego

44 Wybrane zagadnienia astrofizyki gwiazdowej cz. II ■ Marcin Wesółowski

Nasza obecna wiedza o budowie wewnętrznej struktury gwiazd opiera się w głównej mierze na obserwacjach astronomicznych, które dotyczą Słońca – jedynej gwiazdy w Układzie Słonecznym.

50 Międzynarodowy Dzień Światła

■ Krzysztof Kowalczyk



FIZYKA
w Szkole z Astronomią

NUMER 4 LIPIEC/SIERPIEŃ 2025
399 (LXV) indeks 35810X ISSN 0426-3383

CENA 50,00 zł
(w tym 8% VAT)

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

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



Foto – Axiom Space

Polak w kosmosie – czyli historia ponownie zatoczyła koło

Marcin Wesołowski

Od zarania dziejów kosmos fascynował ludzi poprzez bezpośrednie obserwacje ciał niebieskich aż po lądowanie na księżycu. Od samego początku w lotach kosmicznych brali udział przedstawiciele krajów wysokorozwiniętych pod względem gospodarczym. W trakcie badania kosmosu Polska ma też swój udział. Pierwszym Polakiem, który odbył lot w kosmos był gen. Mirosław Hermaszewski, co miało miejsce w 1978 roku.

W 2012 roku Polska stała się pełnoprawnym członkiem ESA (Europejskiej Agencji Kosmicznej), co umożliwiło udział naszych naukowców w międzynarodowych programach badawczych. Po upływie 47 lat kolejny Polak, dr inż. Sławosz Uznański-Wiśniewski odbył lot w kosmos na Międzynarodową Stację Kosmiczną (ISS) w ramach misji kosmicznej Axiom Mission 4.

Pierwotny start tej misji został planowany na 29 maja 2025 roku, ale z przyczyn technicznych oraz warunków meteorologicznych do startu doszło w dniu 25 czerwca 2025 roku. Start kapsuły Dragon nastąpił z Centrum Kosmicznego im. Kennedy’ego na Florydzie o godzinie 8:31 czasu polskiego. Po około 28 godzinach lotu pojazd przycumował do portu Harmony na ISS, gdzie astronauta zostali serdecznie powitani przez stałych członków załogi stacji.

Pobył czterech członków załogi na ISS (amerykańska astronautka Peggy Whitson jako dowódczyni, pilot z Indii Shubhanshu Shukla, węgierski specjalista Tibor Kapu oraz dr Sławosz Uznański-Wiśniewski jako reprezentant Europejskiej Agencji Kosmicznej) trwał 18 dni. W czasie tego pobytu dr inż. Sławosz Uznański-Wiśniewski przeprowadził trzynaście eksperymentów naukowych zaprojektowanych przez polskie instytuty badawcze i uczelnie w ramach misji o kryptonimie „Ignis” (łac. ogień).

W czasie swojego pobytu na ISS polski astronauta pełnił także rolę ambasadora edukacyjnego poprzez promocję nauki, zachęcał polskich uczniów do zgłębiania nauki w szczególności nauk ścisłych. Jednym z ważniejszych momentów dla Polaka było wręczenie przez Peggy Whitson emblematu z numerem 635 – co oznacza, że dr inż. Sławosz Uznański-Wiśniewski był 635 osobą, która brała udział w lotach kosmicznych.

W dniu 15 lipca 2025 roku miał miejsce powrót załogi na Ziemię, wodowanie na Pacyfiku. Cała misja kosmiczna od momentu startu aż do wodowania przebiegała bez komplikacji i została uznana za pełen sukces pod względem technicznym i naukowym.

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



Foto – Axiom Space

Rozpoczęła się XXI edycja konkursu *Fizyczne Ścieżki*!

Fizyczne Ścieżki to konkurs uczniowski, organizowany wspólnie przez Narodowe Centrum Badań Jądrowych i Instytut Polskiej Akademii Nauk. Konkurs skierowany jest do zainteresowanych fizyką uczniów siódmych i ósmych klas szkoły podstawowej oraz uczniów szkół ponadpodstawowych, w tym o profilu zawodowym.

Konkurs prowadzony jest w trzech kategoriach - Praca naukowa, Pokaz zjawiska fizycznego oraz Esej. W każdej z tych kategorii w pierwszym etapie przedmiotem rywalizacji są nadesłane autorskie prace uczestników. Autorzy najlepszych prac kwalifikowani są do kolejnego etapu - Finału.

Podczas finału autorzy prac naukowych omawiają swoje prace, eseści czytają nadesłane eseje, zaś autorzy pokazów prezentują zgłoszone pokazy. Jury dopytuje o szczegóły

i sprawdza kompetencje uczestników. O ostatecznej ocenie konkursowiczów decyduje nie tylko treść zgłoszonej pracy, ale też przebieg finałowych wystąpień i rozmów z jury.

Na zwycięzców czekają bardzo atrakcyjne nagrody, w tym bezwarunkowy wstęp na wydziały fizyki czołowych polskich uczelni.

Co roku do konkursu przystępuje około setki uczniów z różnych stron Polski (na poprzednią edycję zgłosiło się 151 osób). Mimo wynikającej z konkursowych założeń rywalizacji atmosfera podczas finału jest niesamowicie przyjazna, a wśród uczestników nierzadko zawiązują się trwałe znajomości. Konkurs jest też okazją do kontaktu młodzieży z naukowcami. Kontakty te stanowią źródło inspiracji dla jednych i drugich.



Ogólnopolski konkurs prac uczniowskich *Fizyczne Ścieżki* – XXI edycja

**Narodowe Centrum Badań Jądrowych i Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
zapraszają do udziału w XXI edycji konkursu *Fizyczne Ścieżki*.**

W konkursie mogą brać udział:

- Uczniowie szkół średnich (w tym branżowych)
- Uczniowie szkół podstawowych z klas 7 i 8

Konkurs odbywa się w 3 kategoriach:

- Praca naukowa
- Pokaz zjawiska fizycznego
- Esej

Na autorskie prace uczniów organizatorzy czekają do 31 stycznia 2026 r.

Regulamin oraz szczegółowe informacje o konkursie dostępne są na stronie internetowej: fizycznesciezki.pl



Zachęcamy również do zapoznania się z ofertą edukacyjną Działu Edukacji i Szkoleń Narodowego Centrum Badań Jądrowych: www.deis.ncbj.gov.pl



CREDO-Maze: a może neutrino?

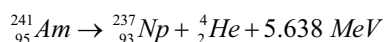
Na przełomie wieków XIX i XX doszło w fizyce do rewizji naszego poglądu na świat. Pierwiastki chemiczne, z których zrobione jest wszystko wokół, a ściśle jądra atomów przestały być niezmiennie, niezniszczalne, wiecznotrwałe. Niektóre same z siebie rozpadały się, a co z naszego punktu widzenia szczególnie interesujące, emitowały nieznane wcześniej.

Tadeusz Wibig

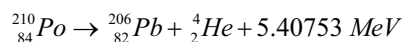
Dość szybko zidentyfikowane promienie α , β i γ . Pierwszym okazał się strumień jąder helu, drugim elektronów (ujemnych, normalnych, jak i dodatnich, czyli pozytonów, antycząstki elektronów normalnych), trzecim strumień wysokoenergetycznych kwantów promieniowania elektromagnetycznego, fotonów.

Rozpady alfa z energetycznego punktu widzenia są zasadniczo mało ciekawe. Jądro wyjściowe, to przed rozpadem, ma jakąś masę, na którą składają się masy protonów i neutronów w nim siedzących umniejszone o energię ich wiązania, której nie da się łatwo policzyć, bo oddziałuje tam wszystko ze wszystkim elektromagnetycznie i jądrowo i właściwie nie wiadomo jak. Jądro, które powstanie po rozpadzie też ma określoną masę podobnie jak cząstka alfa, ${}^4_2\text{He}$.

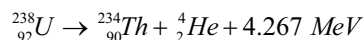
Masy jąder zmierzone są precyzyjnie i dokładnie wiadomo jaka energia musi być w takim rozpadzie wydzielona. Musi się ona ujawnić jako energia kinetyczna cząstki alfa i nowopowstałego jądra. Biorąc pod uwagę zasadę zachowania pędu w takim dwuciałowym rozpadzie energia unoszona przez cząstkę alfa jest określona dokładnie i musi mieć konkretną, jedną jedyną wartość. Na przykład:



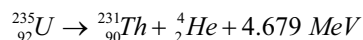
– ta reakcja używana jest w wykrywaczach dymu,



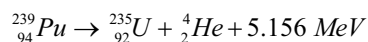
– ta zasila generatory termoelektryczne na statkach kosmicznych i użyta była w radzieckich „Łunochodach” wędrujących w latach 70 XX. wieku po powierzchni Księżyca,



– uran 238 nie nadaje się praktycznie do wytworzenia reakcji łańcuchowej i dlatego ten izotop uranu jest „bezpieczny”,

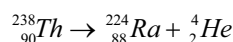


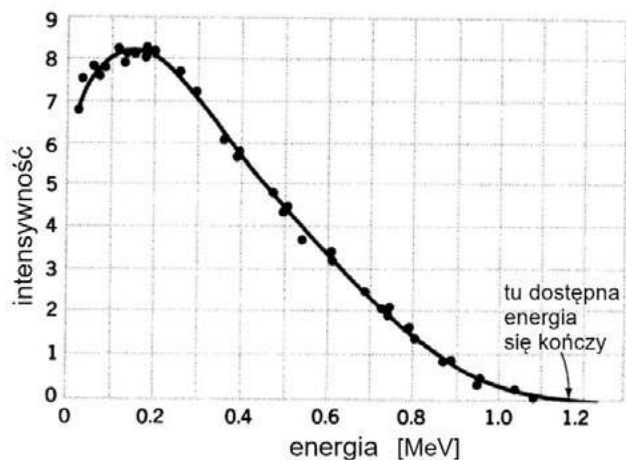
– a uran 235 nadaje się i użyto go w bombie „Little Boy” zrzuconej na Hiroszimę,



– pluton 239 wykorzystano w bombie atomowej „Fat Man”, która zniszczyła Nagasaki.

Wypada tu zauważyć, że jest to odrobinę bardziej skomplikowane, albowiem jądro w stanie końcowym niekoniecznie musi być w swoim podstawowym, najniższym energetycznie stanie, ale jądro rodzicielskie może się rozpaść na jądro w jakimś stanie wzbudzone, którego masa jest odrobinę wyższa. Na przykład w reakcji



Rysunek 1. Widmo elektronów z rozpadu ^{210}Bi .

energia cząstki alfa może być równa 5.137, 5.173, 5.208, 5.338 albo 5.421 MeV, a wszystko zależy od stanu końcowego jądra radonu. Tak, czy inaczej jednak energie cząstek alfa są określone jednoznacznie. Mówi się, że ich widmo energetyczne ma charakter liniowy, składają się nań zawsze konkretne pojedyncze wartości.

Rozpady gamma wyglądają tak samo.

I wszystkim się wydawało, że z rozpadami β nie może być inaczej, aż do roku 1911. Wtedy to właśnie Lise Meitner [1] i Otto Hahn, a dwa lata po nich Jan Kazimierz Danysz [2] zmierzili rozkład energii emitowanych w rozpadzie elektronów i okazało się, że jest on zasadniczo ciągły. Tak nawiasem mówiąc Jan Danysz był przez jakiś czas asystentem Marii Skłodowskiej-Curie, a także był ojcem Mariana Danysza odkrywcy, wspólnie z Jerzym Pniewskim, hiperjader w kliszach emulsyjnych naświetlanych na dużych wysokościach promieniowaniem kosmicznym. Jak pokazano elektrony powstałe w rozpadzie β mogły przyjmować różne energie od górnej granicy określonej różnicą mas jąder pierwotnych i końcowych (plus masa elektronu) aż do praktycznie zera.

Znikająca energia

W 1914 roku James Chadwick wykorzystując w swoim spektrometrze technologię detekcji opracowaną przez Geigera wykonał bardzo dokładne pomiary potwierdzające to sensacyjne odkrycie [3]. Sensacyjność polegała na tym, że energia jaka niewątpliwie wydzielć się w rozpadzie musiała (różnica mas i już!) znikać gdzieś w niewyjaśnionych okolicznościach. Jednym z rozwiązań tej zagadki było odrzucenie zasady zachowania energii. W rozpadach β energia nie zachowywała się. Ku temu poglądowi skłaniał się sam Niels Bohr.

Ale to jeszcze nie wszystko! Z rozpadem β coś więcej było zdecydowanie nie w porządku.

Rodząca się w tym samym mniej więcej czasie fizyka kwantowa próbując opisać świat w skali atomowej napotykała obserwacje sugerujące, że w mikroświecie są rzeczy, o jakich się makro-filozofom nie śniło nawet. Elektrony i właściwie wszystkie subatomowe cząstki i całe atomowe jądra i atomy w ogóle mają własności niespotykane w świecie dużych przedmiotów. Z grubsza można powiedzieć, że wszystkie te mikro obiekty mają coś co

można „per analogia” nazwać wewnętrznym momentem pędu, lub nie powołując się na chybione analogie: spinem.

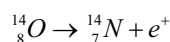
Odpowiedź na pytanie: czym jest spin, jest prosta: spin, to spin (tak jak w słynnych „Nowych Atenach” Benedykta Chmielowskiego „koń, jaki jest każdy widzi”). Żeby było ciekawiej spin, jako wielkość fizyczna, eksperymentalnie obserwowana i mierzona może przyjmować jedynie skończoną i to niewielką w zasadzie liczbę wartości. Mierzony w jednostkach $\hbar = h/2\pi$, gdzie h to stała Plancka równa $6.62607015 \times 10^{-34}$ J/Hz, może być albo liczbą całkowitą, albo połówkową ($1/2, 3/2, 5/2, \dots$). I znowu nie należy pytać - dlaczego? Taka już jest nasza mikro-rzeczywistość.

Przypisanie cząstkom i układom cząstek (jądom atomowym czy całym atomom) spinu nie jest łatwe. Związane jest z ich własnościami statystycznymi, ogólnie z ich naturą. Wszystkie elementarne składniki materii kwarki, a także leptony: elektron, mion mają spin $1/2$. Składające się z trzech kwarków bariony, w tym proton i neutron mają także spin połówkowy. Cząstki przenoszące oddziaływania (fotony, gluony, bozony W i Z) mają spin 1. Bozon Higgsa ma spin 0. Nie wykluczone, że istnieją też elementarne obiekty o spinie 2 czy 3, ale póki co nikt ich nie widział i nie ma o czym mówić.

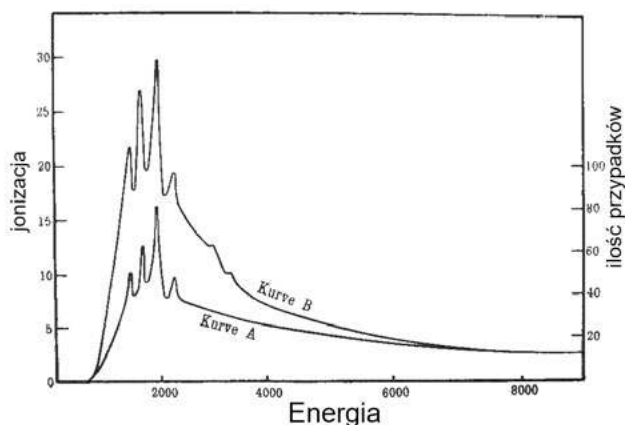
Jeśli chodzi o jądra atomowe, to ich spin może być całkowity, jeśli jądro ma parzystą liczbę nukleonów (protonów i neutronów) o spinie połówkowym, lub wartość połówkową, jeśli nukleonów jest w nim nie do pary (spiny orbitalne są z zasady całkowite i nie mówmy tu o nich).

Nie będziemy wchodzić dalej w ten skomplikowany gąszcz niezrozumiałych (makroskopowo) pojęć i praw. Powiedzieliśmy tylko to, co niezbędne jest dla sformułowania wspomnianej kolejnej sprzeczności (ze zdrowym fizycznym rozsądkiem i tym, czego nas uczono w szkole) rozpadu β .

Istnieje izotop tlenu o masie 14 i jest on niestabilny. Rozpada się z emisją elektronu dość szybko.



oba jądra mają spin całkowity, ale po prawej stronie jest jeszcze elektron ze spinem $1/2$. To się nie może zgodzić z „zasadą zachowania spinu” – alalogią zasady zachowania momentu pędu.

Rysunek 2. Pierwsze widmo cząstek β zmierzone przez Chadwicka w 1914.

Związki spinu i statystyki

Propozycja rozwiązania padła ze strony Wolfganga Pauliego w grudniu 1930 roku. Napisał list dresowany do Lise Meitner, która przebywała wtedy wraz z innymi wybitnymi fizykami, między innymi z Hansem Geigerem, Otto Hahnem, Wilhelmem Lenzem na konferencji poświęconej radioaktywności w Tybindze. List ten zatytułował „*Liebe Radioaktive Damen und Herren*” [4]. Nie jest długi i możemy go zacytować w całości (w dość luźnym tłumaczeniu):

Drogie Radioaktywne Panie i Panowie,
pisząc te słowa, których proszę najuprzejmiej, byćście wysłuchali, wyjaśnię Wam szczegółowo, jak znalazłem „desperackie” wyjście dla ratowania zasady zachowania energii i twierdzenia o związku spinu i statystyki (zakazie Pauliego) zagrożonych niepokojącymi własnościami statystycznymi jąder N- i Li-6 i ciągłym widmem rozpadu beta.

Jest nim możliwość istnienia w jądrach atomowych elektrycznie neutralnych cząstek, które można by nazwać neutronami. Miałyby one spin $1/2$ i zachowywałyby się zgodnie z zasadami statystyki (zakazem Pauliego), a które ponadto różniłyby się od kwantów światła tym, że nie poruszają się z prędkością światła. Masa neutronów powinna być tego samego rzędu, co masa elektronów, a w każdym razie nie większa niż 0.01 masy protonu. Ciągłe widmo beta stałoby się wtedy zrozumiałe przy założeniu, że w rozpadzie oprócz elektronu emitowany byłby neutron, tak że suma energii neutronu i elektronu byłaby stała.

Istnieje tu kwestia tego, jakie siły działają na neutrony. Dla mnie najbardziej prawdopodobnym modelem dla neutronu wydaje się, z powodów falowo-mechanicznych, że neutron w spoczynku jest to dipol magnetyczny o pewnym momencie μ . Eksperymenty wydają się pokazywać, że efekty jonizacyjne takiego neutronu nie mogą być większe niż promieniowania gamma, a wtedy μ prawdopodobnie nie może być większe niż $e \cdot (10^{-13} \text{ cm})$.

Na razie jednak nie ośmielałem się publikować niczego na temat tego pomysłu i z ufnością zwracam się najpierw do Was, drodzy Radioaktywni, z pytaniem, jak prawdopodobne jest znalezienie eksperymentalnych dowodów na istnienie takiego neutronu, jeśli ma on około 10 razy większą zdolność przenikania przez materię niż promień γ . Zgadzałem się, że moja recepta może wydawać się mało prawdopodobna, ponieważ ktoś już powinien zobaczyć te neutrony, gdyby one naprawdę istniały. Ale tylko ten, kto się odważy, może coś wygrać, a trudną sytuację, ze względu na ciągłą strukturę widma beta, oświeśla uwaga mojego szanownego poprzednika, pana Debye'a, który powiedział mi niedawno w Brukseli: „Och, lepiej w ogóle o tym nie myśleć, podobnie jak o nowych podatkach”. Od teraz każde rozwiązanie tej kwestii musi być dyskutowane. Tak więc, drodzy radioaktywni ludzie, patrzcie i oceniacie. Niestety, nie mogę pojawić się w Tubingen osobiście, ponieważ jestem niezbędny tutaj w Zurychu z powodu balu w nocy z 6/7 grudnia. Z najlepszymi pozdrowieniami dla Was, a także dla pana Backa. Wasz pokorny sługa,
Wolfgang Pauli

Dwa lata później James Chadwick uczeń Rutherforda i Geigera odkrył cząstkę, którą obecnie nazywamy neutronem [5] i za co w 1935 roku dostał nagrodę Nobla. Od razu było jasne, że była ona zbyt ciężka, aby być „*neutronem*” Pauliego. Konstruując swoją elegancką kwantową teorię rozpadu β w 1934 [6] roku Enrico Fermi wymyślił dla cząstki Pauliego nową nazwę. Dla Włocha nazwa, „*neutrino*” była oczywistym wyborem: to takie coś małego i neutralnego.

Dwa lata później Maurice Goldhaber, Lee Grodzins i Andrew Sunyar (GGG) zmierzili „skrętność” neutrin w pomysłowym eksperymencie przeprowadzonym w Brookhaven National Laboratory w USA i wyniki opublikowali w dwustronicowym artykule w Physical Review [7]. Skrętność cząstki opisuje kierunek jej spinu względem jej pędu – czyli, czy cząstka kręci się w lewo, czy w prawo, jeśli patrzeć w kierunku, w jakim leci. Rzecz jasna nic się tam

nie kręci, ale jakoś bawmy się dalej w analogie. I wyszło im na to, że wszystkie neutrina są zawsze lewoskrętne, spin skierowany jest przeciwnie do kierunku ruchu. Zawsze!

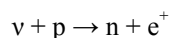
Gdyby neutrina miały jakąś, choćby niewielką masę spoczynkową, poruszałyby się wolniej niż światło i można by zawsze przejść do układu odniesienia poruszającego się szybciej niż one, a w takim układzie „kręciłyby się” w prawo, czyli byłyby prawoskrętne. Oczywistym wnioskiem z doświadczenia GGS jest to, że takich układów odniesienia być po prostu nie może, czyli, że neutrina poruszają się z największą możliwą prędkością, czyli z prędkością światła i oczywiście, tak jak światło, muszą mieć masę spoczynkową równą 0.

Wszystko zaczynało do siebie pasować. Pozostawało już tylko neutrino zobaczyć.

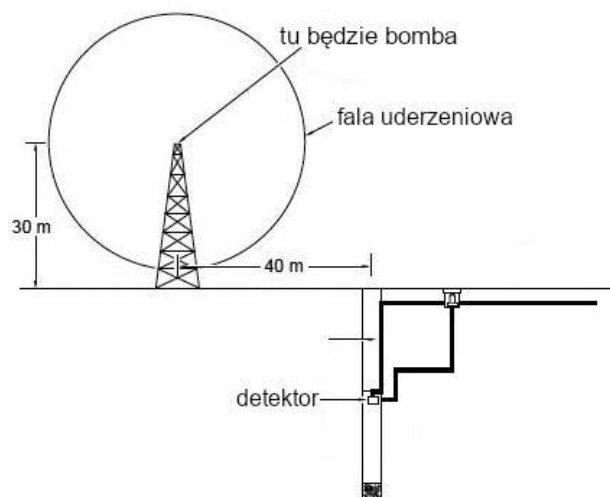
Skąd wziąć neutrina?

Akurat zakończyła się II wojna światowa. Ameryka i cały świat żyła w cieniu grzybów atomowych po zrzuconych na japońskie miasta pierwszych bombach atomowych. W łańcuchowych reakcjach rozszczepienia uwalniane są neutrony i powstają radioaktywne jądra. W ułamkach sekund powstają olbrzymie ilości neutrin. Dwóch Amerykanów Fred Reines i Clyde Cowan z Los Alamos wpadło na pomysł wykorzystania próbnych wybuchów jądrowych, które stawały się wtedy dość częstymi atrakcjami pustynnych poligonów, dla eksperymentalnego potwierdzenia istnienia neutrin.

Rysunek poniżej pokazuje ideę ich pomysłu nazwanego „Poltergeist”. Obok wieży, na której planowano zdetonować ładunek jądrowy 20 kT (podobny do tego z Hiroshimy) w podziemnym bunkrze miał zostać umieszczony detektor neutrin [8]. Detektor ten nazwany pieszczotliwie *El Monstro* był po prostu wielką beczką ($\sim 1 \text{ m}^3$) wypełnioną dopiero co wynalezionym ciekłym organicznym scyntylatorem. Byłoby tam mnóstwo protonów i właśnie one miały być aktywnym składnikiem detektora. Reakcja odwrotnego rozpadu β :



tworzyłaby pozyton, który anihilując z normalnym elektronem, których też wszędzie w beczce było pełno dawał-



Rysunek 3. Szkic przedstawiający eksperyment Reinesa i Cowana.

by po dwa fotony dające się zarejestrować przez umieszczone dookoła cztery fotopowielacze.

Koncepcja *El Monstro* w trakcie dalszych prac została znacznie zmodyfikowana. Przede wszystkim porzucono pomysł wykorzystania jako źródła neutron bomb atomowej zastępując ją pokojowym reaktorem jądrowym z elektrowni atomowej w Hanford. Zauważono, że neutron powstający w reakcji odwrotnego rozpadu β też mógłby się przydać. Poruszając się w scyntylatorze, zderzając się z lekkimi jądrami byłby spowalniany i jako już w zasadzie termiczny mógłby zostać wychwycony na przykład przez jakiś proton tworząc jądro deuteru. Różne jądra mają różne przekroje na wychwyt neutronu. Gdyby tak jednak rozpuścić w scyntylatorze sole kadmu, wychwyty neutronu byłyby znacznie częstsze, a dodatkowo nowopowstałe jądro przez chwilę jest w stanie wzbudzonym i szybko powraca do stanu podstawowego emitując kwant światła



Rejestracja dwóch fotonów z anihilacji pozytonu biegnących w przeciwnych kierunkach, a po kilku mikrosekundach jeszcze jednego fotonu z wzbudzonego jądra kadmu stanowiłaby bardzo jednoznaczny sygnał tego, że właśnie zaszło oddziaływanie (anty)neutrina z protonem.

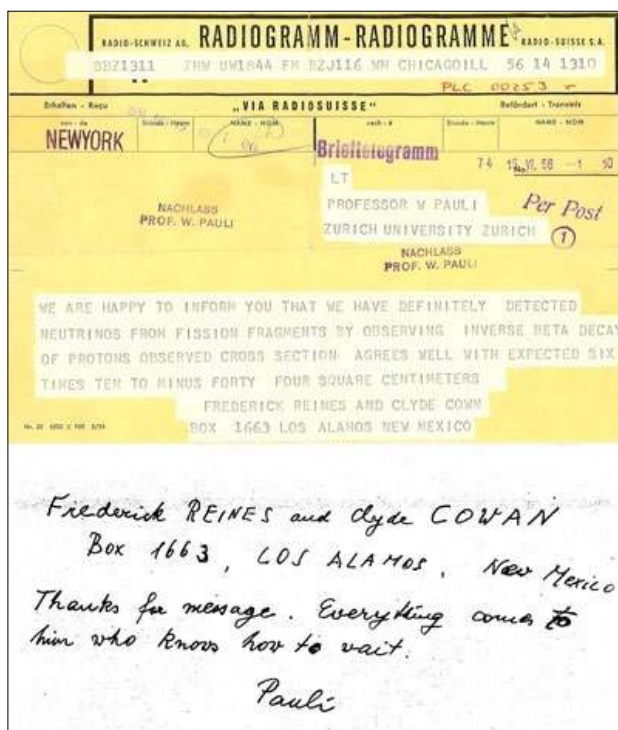
W roku 1953 w eksperymencie w Hanford [9] coś zauważono, ale pewności nie było. W roku 1955 eksperyment za radą między innymi Johna Wheelera przeniesiono do Savannah River. Zaprojektowano tam zupełnie nową konstrukcję. Odwrotny rozpad β zachodzić miał w trzech płaskich zbiornikach po 200 litrów wody z chlorkiem kadmu w każdym umieszczonymi między trzema wielkimi zbiornikami ciekłego scyntylatora oglądanych przez 110 fotopowielaczy każdy. Całość ważąca około 10 ton przykryta warstwą kilkunastu metrów betonu dla ochrony przed niechcianym promieniowaniem kosmicznym pracowała przez prawie pół roku i przez 900 godzin efektywnego zbierania danych przy działającym reaktorze i 250 przy wyłączonym (do porównania) i uzyskano pewność [10]. Reines i Cowan wysłali telegram do Pauliego donosząc mu o swoim sukcesie potwierdzającym po ćwierćwieczu jego koncepcję neutrina.

Frederick Reines musiał czekać do roku 1995 na nagrodę Nobla za swoje odkrycie. Clyde Cowan nie doczekał.

I można by pomyśleć, że to już koniec historii neutrin, ale był to dopiero początek.



Rysunek 4. Frederick Reines (z prawej) i Clyde Cowan (z lewej) i inni członkowie Projektu Poltergeist.



Rysunek 5. Telegram od Reinesa i Cowana do Pauliego.

W stronę Słońca

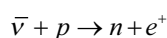
Reaktory i bomby produkują przede wszystkim antyneutrina w procesach rozpadu β . Poszukując innego źródła neutrin należy spojrzeć w niebo, ku Słońcu.

Model produkcji energii na Słońcu został po raz pierwszy zaproponowany przez Schwarzschilda w 1957 roku [11]. Opisywał on ewolucję Słońca od protogwiazdy ~ 4,5 miliardów lat temu do czasów obecnych, dopasowując znane wartości jasności, masy i promienia.

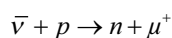
Od 1963 roku wprowadzono wiele ulepszeń, w szczególności przez Johna Bahcalla i współpracowników i tak powstał „Standardowy Model Słoneczny” (SSM) [12]. Z czasem powstało kilka wersji modelu SSM [13] i sprawa ciągle nie jest zamknięta, czego dowodzi na przykład praca [14]

Bruno Pontecorvo, fizyk o dość skomplikowanym życiorysie dość wcześnie zdał sobie sprawę, że bardzo słabo oddziałujące z materią neutrina będą doskonałym narzędziem do testowania tych teorii i badania wnętrza naszego Słońca [15].

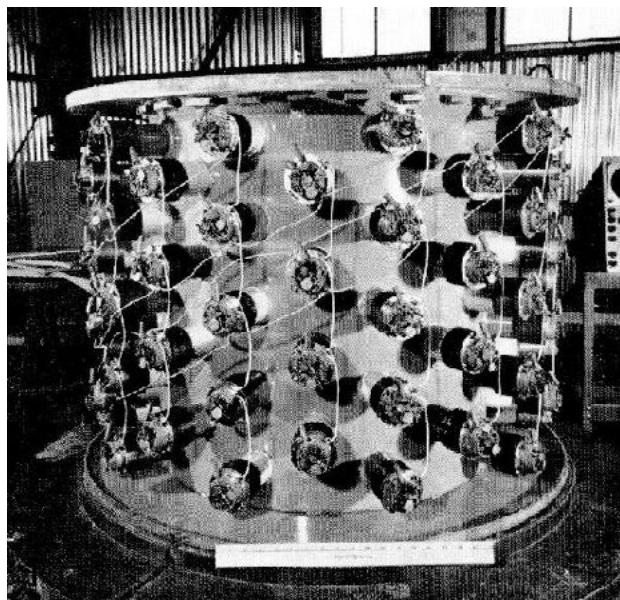
Zajmując się od lat fizyką neutrin zauważył on już wcześniej, że, mimo iż jak dotąd znane było tylko jedno neutrin, to które wykryli Reines i Cowan dziś identyfikowane jako neutrin elektronowe, to nie wykluczone, że istnieje ich więcej. Zwrócił uwagę na podobieństwa reakcji odwrotnego rozpadu β :



i analogicznej reakcji z udziałem mionu [16]:



Zadał on teoretyczne pytanie, czy jedno i drugie neutrin to ta sama cząstka. Zadał i zniknął. Odnalazł się kilka lat później w Związku Radzieckim, gdzie do końca życia pracował w fizyce w ośrodku w Dubnej.



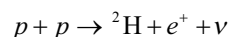
Rysunek 6. Detektor neutron eksperymentu w Hanford.

Należało na to pytanie odpowiedzieć, a do tego potrzebna była wiązka wysokoenergetycznych neutron. Akurat zdarzyło się, że w Upton na Long Island w stanie Nowy Jork w Brookhaven National Laboratory uruchomiono największy wtedy na świecie akcelerator AGS (*Alternating Gradient Synchrotron*) przyspieszający protony do szalonej energii ponad 15 GeV. W ich oddziaływaniach wytwarzane były w dużej ilości cząstki zwane pionami, które rozpadały się z czasem na miony dając neutrony i antyneutrony drugiego rodzaju (znane dziś jako mionowe).

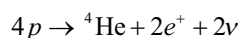
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu; \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu;$$

Leon Lederman, Melvin Schwartz i Jack Steinberger z Uniwersytetu Columbia zaproponowali eksperyment, w którym wielka komora iskrowa rejestrowała oddziaływania neutron z protonami według schematów pokazanych wyżej i nie zobaczyli niczego. Neutrony powstałe w wyniku rozpadów pionów nie chciały w ogóle oddziaływać z protonami. Był to definitywny dowód na to, że mamy co najmniej dwa rodzaje neutron. [17].

Kwestia istnienia różnych typów neutron wpłynęła trochę niespodziewanie przy okazji pomiarów neutron słonecznych. W Słońcu głównym mechanizmem generującym energię jest fuzja wodoru do helu, napędzana „słabym” procesem

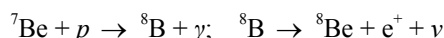
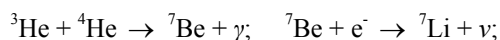


Reakcje generujące neutrony w tak zwanym łańcuchu pp oraz w cyklu CNO, obejmującym węgiel, azot i tlen, można podsumować następująco:



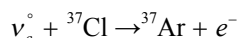
Całkowita uwolniona w nim energia to 26,73 MeV.

W gałęziach wtórnych neutrony są produkowane w wyniku wychwytu elektronów przez ${}^7\text{Be}$ oraz w rozpadzie β jąder boru ${}^8\text{B}$, w sekwencji procesów:



Detektory

Pierwszy detektor neutron słonecznych został skonstruowany w latach sześćdziesiątych XX wieku, głęboko pod ziemią w kopalni złota Homestake w Lead w Południowej Dakocie, przez Raymonda Daisa Jr (Davis otrzymał Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki w 2002 r. wraz z M. Koshibą i R. Giacconim). Użyto 615 ton tetrachloroetyleny (C_2Cl_4), w sumie ponad 2×10^{30} atomów chloru. Davis chciał wykryć proces odwrotnego rozpadu β zainicjowany przez neutrony słoneczne produkowane przez ${}^8\text{B}$ opierając się na reakcji zaproponowanej Bruno Pontecorvo, gdy ten był jeszcze w Ameryce [16]

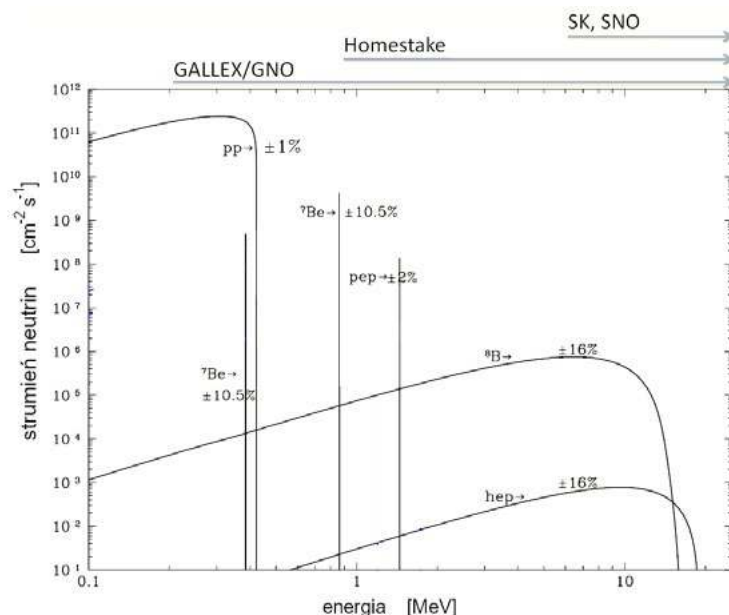


Próg energii dla zajścia tej reakcji to nieco powyżej 0,8 MeV, a więc jak widać na rysunku większość neutron z rozpadu boru znajduje się w zasięgu eksperymentu Daisa. Można też oczekiwać drobnego wkładu neutron z berylu ${}^7\text{Be}$. Neutrony z procesu pp o energiach 0,420 MeV mają energie za małe, aby dało się je w detektorach chlorowych zaobserwować.

Średnio co drugi dzień jeden atom ${}^{37}\text{Ar}$ rodził się w detektorze Homestake. Radioaktywne atomy ${}^{37}\text{Ar}$ (okres połowicznego rozpadu ${}^{37}\text{Ar}$ wynosi około 35 dni) były wydzielane na drodze chemicznej co kilka miesięcy, czyli w przybliżeniu w czasie wymaganym do osiągnięcia równowagi między produkcją i rozpadem ${}^{37}\text{Ar}$. Pierwsze wyniki eksperymentu Daisa pojawiły się w 1968 roku [18], wskazując na to, że obserwowany strumień jest znacznie niższy od teoretycznych oczekiwań. Definitywne i ostateczne wyniki zostały opublikowane w 1998 roku [19]. Średnia wartość natężenia neutron słonecznych uzyskana przez Homestake po ponad 25 latach niemal ciągłych pomiarów wynosi

$$2,56 \pm 0,16 \text{ (stat)} \pm 0,16 \text{ (sys) SNU}$$

Co stanowi około 30% przewidywanej teoretycznie wartości $8,5 \pm 0,9 \text{ SNU}$ [20].



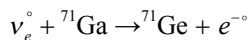
Rysunek 7 Oczekiwany strumień neutron słonecznych na powierzchni Ziemi w funkcji energii neutron, w sumie jest ich $6,5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Strzałki u góry pokazują zasięgi energetyczne eksperymentów neutronowych.

SNU to wygodna jednostka strumienia neutrin słonecznych używana w eksperymentach radiochemicznych. Jedno SNU to taki strumień neutrin, które wywołają w jednej sekundzie jedną reakcję na jednym z 10^{36} atomów substancji czynnej detektora.

No i mamy problem.

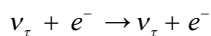
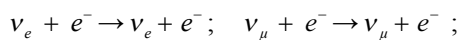
Neutrino jest za mało!

Wydawało się, że definitywnie rozstrzygnie to pomiar neutrin z procesu pp , tych o mniejszych energiach, których teoretyczny strumień zdefiniowany jest przez całkowitą energię emitowaną przez Słońce bardzo precyzyjnie. Strumień ten został ostatecznie zmierzony w latach 90-tych i w pierwszej dekadzie obecnego tysiąclecia przez inne eksperymenty radiochemiczne, GALLEX/GNO w Laboratorium Gran Sasso we Włoszech [21] i SAGE w Obserwatorium Neutrino na Baksanie w Rosji [22]. Wszystkie trzy eksperymenty badały reakcję



z niższym progiem energetycznym 0,233 MeV. We wszystkich przypadkach zaobserwowana częstość neutrin słonecznych w tym zakresie energii wynosiła około 50% przewidywań SSM, a pomiar był bardzo dokładny i nie było mowy o jakiejś pomyłce. Problem deficytu neutrin słonecznych nabierał mocy i znaczenia.

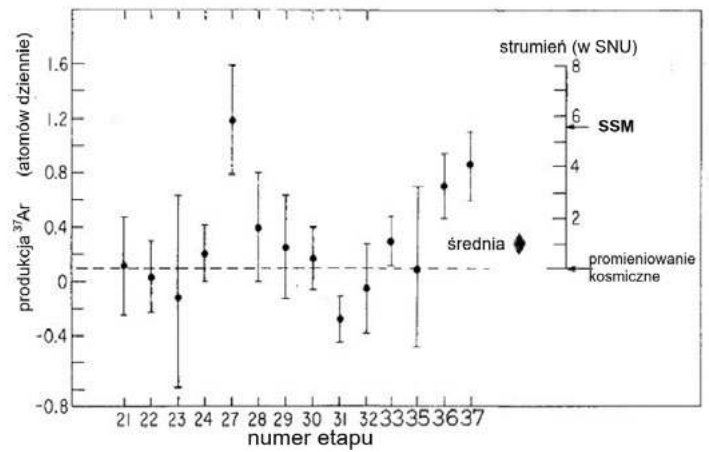
W międzyczasie w roku 1989 wielki japoński eksperyment mający zobaczyć rozpadające się protony *Kamioka Nucleon Decay Experiment*, zwany w skrócie Kamiokande zaprezentował swoje pierwsze wyniki. Protony nie chciały się rozpadać, ale wyniki w kwestii neutrin były niezwykle interesujące. Olbrzymi zbiornik czystej wody umieszczony mniej więcej kilometr pod ziemią oglądany przez kilkanaście tysięcy fotopowielaczy mógł mierzyć neutrina z rozpadów ${}^8\text{B}$ wykorzystując ich elastyczne rozpraszanie na elektronach:



Pojawiają się tu aż trzy możliwe rodzaje neutrin, bo w końcu XX wieku wiadomo było, że poza elektronami i mionami mamy jeszcze trzeci rodzaj leptonów nazwanych taonami. Postępy wiedzy na temat oddziaływań słabych, a w szczególności wykrycie istnienia bozonów pośredniczących Z i W pokazało, że za ich pośrednictwem wszystkie rodzaje neutrin mogą rozpraszają się na elektronach, acz te nie-elektronowe mniej chętnie.

Średni zmierzony strumień neutrin z ${}^8\text{B}$ był ponownie znacznie niższy niż oczekiwano, na poziomie około 50% [23]. Eksperyment Kamiokande rozbudowano do Super-Kamiokande, zwiększyło objętość czynną detektora, tym samym zwiększając dokładność pomiarów, ale wyniki nie chciały się zmienić [24].

Poprawiano też sukcesywnie modele słoneczne, w dużej mierze dzięki niestrudżonym wysiłkom J. N. Bahcalla i jego współpracowników. Nie pomagało. Wszystkie pomiary konsekwentnie wskazywały na deficyt neutrin słonecznych.



Rysunek 8. Wyniki eksperymentu Daisa.

Problem?

A rozwiązanie znane było od lat. Zanim jeszcze Davies pokazał pierwsze niepokojące wyniki w roku 1957 roku, Bruno Pontecorvo zaproponował, że neutrina i antyneutrina mogą „mieszać się”. Oscylacje materia-antymateria nie zostały nigdy zaobserwowane, ale pojawił się jakiś pomysł i w dalekiej konsekwencji stał się zaczątkiem teorii oscylacji neutrin. Została ona na serio opracowana przez Maki, Nakagawę i Sakatę w 1962 roku [24] i dalej rozwinięta przez Pontecorvo w 1967 roku [25, 26] zanim jeszcze świat poznał problem deficytu neutrin słonecznych.

W myśl tej teorii niektóre z neutrin elektronowych wyprodukowanych w jądrze Słońca mogły zmienić się i stać się neutrinami mionowymi lub taonowymi, których Davies zobaczyć nie mógł.

Problem był jednak w tym, że aby mechanizm oscylacji neutrin działał, muszą one mieć niezerowe masy i to różne, a teoretyczny model standardowy cząstek elementarnych i ich oddziaływań, powszechnie akceptowany model tego, z czego i jak zrobiony jest nasz Wszechświat zakłada, że neutrina są zdecydowanie bezmasowe. Pisaliśmy o tym w „Fizyce w Szkole” w numerze 4 z 2022 roku.

(Super) Kamiokande ze względu na różnice w przekrojach czynnych, mogło je widzieć jedynie częściowo. Rozstrzygnięcie wymagało jednoczesnej i precyzyjnej

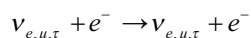
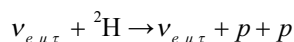
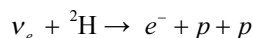


Rysunek 9. Super-Kamiokande od wewnątrz.

detekcji wszystkich rodzajów neutrin. Jeśli chodzi o neutrina słoneczne wyniki dostarczył eksperyment *Sudbury Neutrino Observatory* (SNO) w Kanadzie.

Rozpoczął on pracę w 1999 roku [27]. Detektor SNO składał się z 1000 ton ultraczystej ciężkiej wody (D_2O) umieszczonej w akrylowej kuli o średnicy 12 metrów. Objętość była monitorowana przez 9 600 potężnych fotopowielaczy o średnicy 20 cm. A wszystko to otoczone chroniącą przed rozpadami radioaktywnymi w materiałach samej konstrukcji i otaczających ją skałach osłoną z ultraczystej zwykłej wody H_2O .

Eksperyment wykorzystywał reakcje:

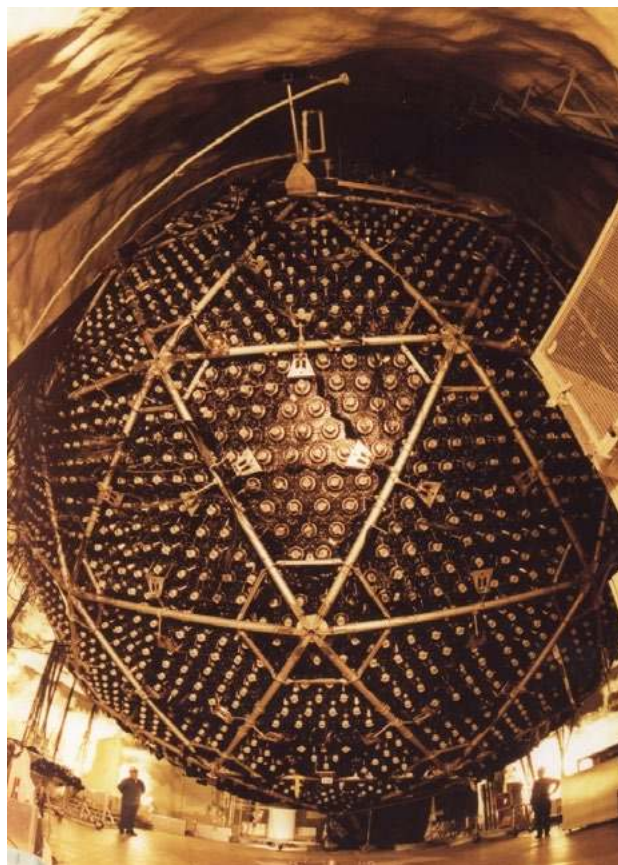


a ich produkty rejestrowane były jako błyski światła czerenkowskiego, jakie cząstki naładowane produkują poruszając się szybciej niż światło w przezroczystym dielektryku (wodzie).

I nagle wszystko zaczęło się zgadzać. Brak neutrin elektronowych brał się stąd, że na drodze od Słońca do Ziemi część z nich przechodziła w inny, niewykrywalny wcześniej rodzaj neutrin.

Próba zrozumienia na czym polegają oscylacje neutrin nie jest prosta. Jest to efekt czysto kwantowy, którego w rzeczywistości w naszej skali po prostu nie ma. Pewną analogią może być kwantowy kot Schrodingera, który jednocześnie jest żywy i nieżywy, a o tym, jaki jest przekonujemy się dopiero po otwarciu pudełka. Neutrino powstałe w Słońcu jako elektronowe jest, jak kot w pudełku, mieszaniną trzech stanów, różniących się trochę masami, a przez to podróżujących nieco inaczej. Te trzy stany masowe mają swoje długości fal (jak wszystko) i po drodze w „pudełku” zawierającym „kota w trzech stanach” proporcje tych stanów zmieniają się. A ponieważ różnice długości fal są niewielkie, bo małe są różnice mas neutrin, mamy do czynienia ze zjawiskiem „dudnienia” znanym choćby z akustyki. Przy pomiarze takiego neutrina, podobnie, jak to się ma z kotem, okazuje się dopiero, z jakim neutrinem (kotem) mamy aktualnie do czynienia. Mechanizm ten jest nieco bardziej skomplikowany, a parametrów opisujących mieszanie się neutrin jest w sumie sześć. Zmierzenie ich jest pewnym problemem, wymaga wielkich detektorów i bardzo precyzyjnych pomiarów.

Prowadzi się stale eksperymenty z neutrinami reaktorowych, podobnymi do tego Reinesa i Cowana w Hanford. Jednym z nich jest KamLAND (*Kamioka Liquid Scintillator Antineutrino Detector*). Detektor o masie 1000 ton to nylonowy balon wypełniony ciekłym scyntylatorem i oglądanych przez 1879 fotopowielaczy pływających w cylindrycznym zbiorniku, który jest detektorem czerenkowskim, wypełnionym 3200 tonami wody. Znajduje się on oczywiście w Japonii na miejscu zdemontowanego eksperymentu Kamiokande. Do roku 2005 zaobserwował 258 neutrin elektronowych o energiach przewyższających 3.4 MeV przy spodziewanej ich liczbie 365.2 ± 23.7 [28]. To duża różnica.

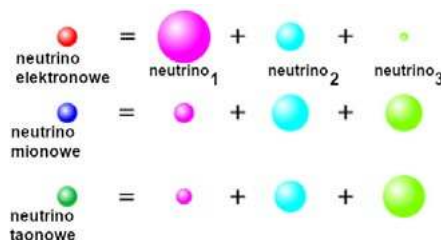


Rysunek 10. Widok detektora w Sudbury Neutrino Observatory (SNO).

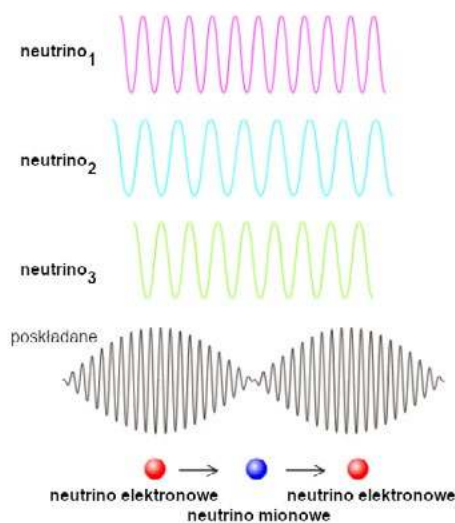
Chcąc zobaczyć, czy i jak mieszają się neutrina jeszcze wyższych energii, odwołano się do promieniowania kosmicznego. Cząstki bardzo wielkich energii wpadając w atmosferę produkują poza wszystkimi innymi cząstkami również neutrina. Zobaczenie ich przez klasyczne aparaty wielkopokłowe z rozmieszczonymi na powierzchni ziemi detektorami jest zasadniczo niemożliwe. Przelatują one przez detektory jak przez masło. Ale z drugiej strony jest ich dużo. Mając detektory takie jak Kamiokande, czy SNO, co jakiś czas zdarza się, że w ich pobliżu jakieś neutrinum jednak oddziały i, jeśli jest to neutrinum mionowe, a takie powstają w rozpadach pionów, pojawi się w detektorze samotny mion. Zdarza się to bardzo rzadko i przy-



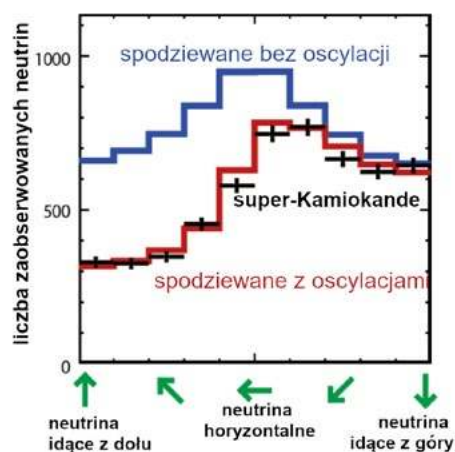
Rysunek 11. Różne stany neutrin.



Rysunek 12. Składanie stanów neutrin.



Rysunek 13. Mechanizm oscylacji neutrin elektronowych na mionowe i odwrotnie.



Rysunek 14. Odkrycie oscylacji neutrin atmosferycznych przez Super-Kamiokande.

padki te giną w powodzi innych, „normalnych” przypadków. Ale, jeśli ma się odpowiednią aparaturę i dokładnie mierzy czas, można odróżnić przypadki mionów lecących w dół i takich, rzadkich, które lecą do góry. Każdy mion lecący do góry świadczy o tym, że po drugiej stronie globu powstało neutrino, przemierzyło całą Ziemię i szczęśliwym zbiegiem okoliczności dało się zauważyć.

W roku 1998 profesor Takaaki Kajita z zespołem odkrył, że neutrin atmosferycznych dochodzących do detektora Super-Kamiokande z drugiej strony Ziemi było około połowy mniej, niż tych przychodzących z góry [29]. Otrzymał za to w 2015 nagrodę Nobla wspólnie z Arthurem McDonaldem z Sudbury Neutrino Observatory za „odkrycie oscylacji neutrin, które pokazało, że neutrina mają masę”

Z Kosmosu na Ziemię

Do Ziemi przychodzą też neutrina z odleglejszych zakątków kosmosu, spoza Układu Słonecznego, spoza nawet naszej Galaktyki. Neutrina jako cząstki elektrycznie obojętne i prawie nie oddziałujące z niczym przemierzają Wszechświat bez przeszkód i po liniach prostych wskazując na kierunek, w jakim znajdowało się ich astronomiczne źródło. Z drugiej strony, gdyby znaleźć na niebie obiekt podejrzewany o to, że produkuje neutrina, można by popatrzeć w tę stronę. Neutrina produkowane mogą być, a w zasadzie muszą być produkowane tam,

gdzie zachodzą reakcje wysokoenergetycznych cząstek promieniowania kosmicznego z materią, czyli tam, gdzie produkowane jest promieniowanie kosmiczne najwyższych energii, gdzie dzieje się coś naprawdę ciekawego

Szczęśliwie zdarzyło się, że w lutym 1987 roku w Wielkim Obłoku Magellana wybuchła supernowa. Była wielka i była względnie blisko. Można ją było zobaczyć gołym okiem, niestety tylko na półkuli południowej. Szacunki pokazują, że około 99% energii wybuchu supernowej uwalniane zostaje w postaci neutrin, można więc było oczekiwać, że coś takiego da się zaobserwować szukając neutrin.

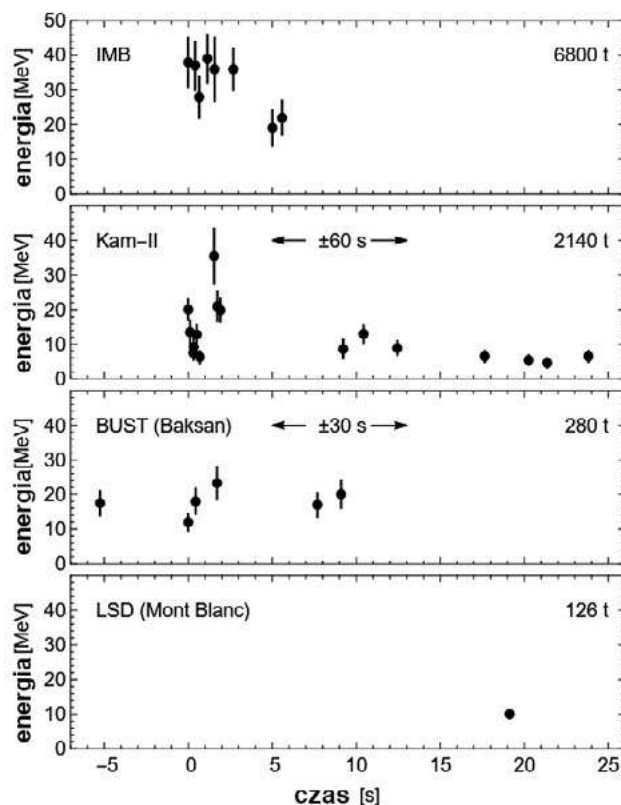
W tamtej chwili na świecie funkcjonowały cztery duże eksperymenty próbujące zaobserwować rozpad protonu. Największym z nich był eksperyment współpracy Irvine-Michigan-Brookhaven (IMB) z wodnym detektorem czerenkowskim o masie 6800 ton [30].

Drugim co do wielkości był eksperyment Kamiokande-II (Kam-II) także wodny i czerenkowski o masie 2140 ton [31].

Trzecim był *Baksan Underground Scintillator Telescope* (BUST) na Kaukazie z masą 280 ton [32]. Najmniejszym był *Liquid Scintillator Detector* (LSD) w tunelu pod Mont Blanc z masą (przeliczoną na wodę) 126 ton [33].

Rysunek pokazuje, co zmierzyły wszystkie te cztery eksperymenty. Należy podkreślić, że dwa z nich miały kłopoty z synchronizacją zegarów i rysunek pokazuje dane przesunięte w czasie o 60 i 30 sekund. Niewątpliwie jednak jakiś neutrinowy sygnał mamy.

Jak już wspomnieliśmy wysokoenergetyczne neutrina produkowane są i muszą być tam, gdzie we Wszechświecie dzieją się rzeczy ciekawe, a w szczególności tam, gdzie powstaje promieniowanie kosmiczne o najwyższych



Rysunek 15. Rejestracje neutrin związanych z wybuchem supernowej 1987A pokazane jako energia neutrina w funkcji czasu rejestracji (uwaga na przesunięcia!).

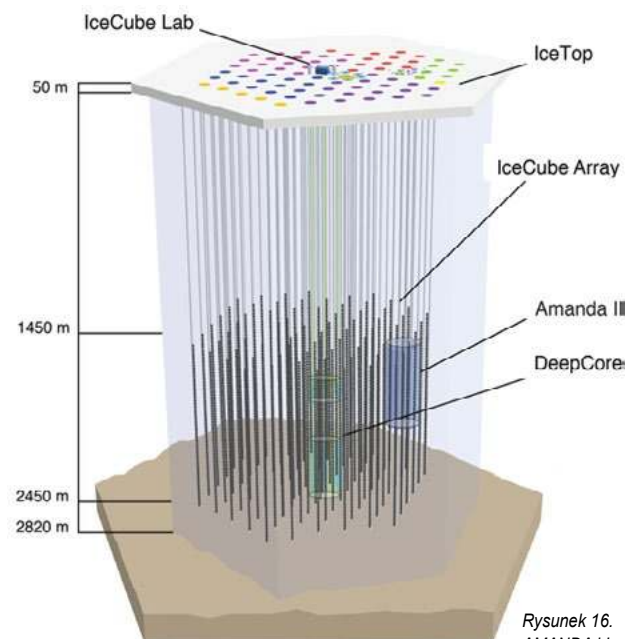
energiach. Poszukiwania tych miejsc trwają ciągle, nie więc dziwnego, że kierunki wskazywane przez neutrino eksploruje się intensywnie. Oczywiście potrzeba do tego detektorów o wielkich objętościach. 50 tysięcy ton Super-Kamiokande to zdecydowanie zbyt mało. Wydaje się, że zbudowanie czegoś istotnie większego przekracza ludzkie możliwości. Możliwości konstrukcyjne zapewne tak, ale nie możliwości intelektualne. Wszak wody na Ziemi jest o wiele więcej. Oceany stanowią naturalne zbiorniki wody, która jest dość czysta i przezroczysta, aby stanowić objętość detekcyjną dla eksperymentu neutrinowego. Wystarczy zanurzyć w niej dostatecznie głęboko detektory światłą, pozierać z nich elektroniczną informację i już!

Pod wodą

Pierwszą propozycją był DUMAND (*Deep Underwater Muon And Neutrino Detector*). W roku 1993 na przybrzeżnych wodach Hawajów 5 kilometrów pod powierzchnią zakotwiczono pionowo linę z przyczepionymi do niej fotopowielaczami. Lin takich miało być w planach znacznie więcej, ale w 1995 roku projekt porzucono. Ideę podjęto w Europie i tak powstał na Morzu Śródziemnym w pobliżu Tuluzy projekt ANTARES (*Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch*).

Grecy zbudowali w pobliżu Pylos NESTORa (*Neutrino Extended Submarine Telescope with Oceanographic Research*), który rozrósł się do rozmiarów kilometra sześciennego jako KM3NeT-Gr części większego przedsięwzięcia KM3NeT (*Cubic Kilometre Neutrino Telescope*), na które składać się mają także KM3NeT-Fr (w Tuluzie) i KM3NeT-It (Portopalo di Capo Passero, na Sycylii).

Z braku dostępu do odpowiedniego morza, ale też z faktu, że mają wspaniałe, wielkie i głębokie jak morze jezioro Bajkał Rosjanie budują swój eksperyment neutrinowy *Baikal Deep Underwater Neutrino Telescope* (BDUNT) (*Байкальский подводный нейтринный телескоп*). W 2015 ich projekt rozwinął się do *Baikal Gigaton Volume Detector* (Baikal-GVD) osiągając km^3 .



Rysunek 16.
AMANDA i IceCube.

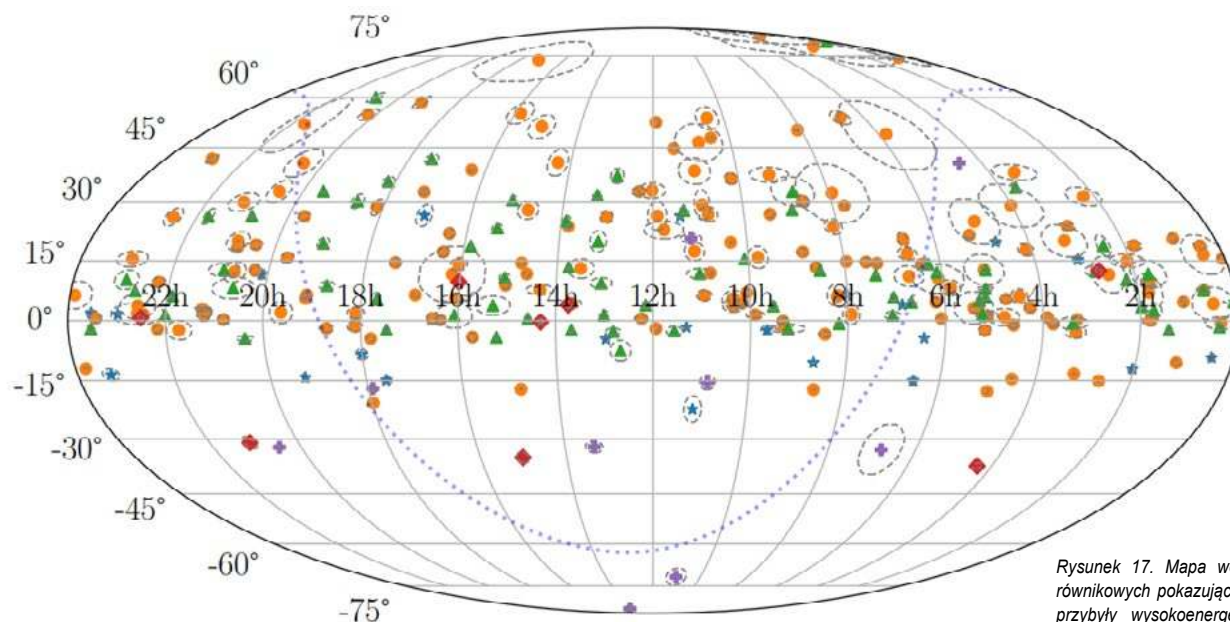
Najciekawszy jest jednak projekt wykorzystujący wodę w stanie zamrożonym. Testowy niejako eksperyment *Antarctic Muon And Neutrino Detector Array* (AMANDA) zlokalizowano na biegunie południowym w pobliżu stacji Amundsen-Scott.

Począwszy od roku 1997 Amerykanie zatopili w lodzie na głębokość około 2000 metrów linę z fotopowielaczami patrzącymi w zupełnie przezroczysty na takich głębokościach lód i rejestrujących sygnały od mionów tworzonych w nim przez propagujące się w różnych kierunkach neutrino.

Skuteczność obranej metody spowodowała, że w lodach na biegunie zatopiono już w odstępach 125 metrów 80 lin każda z 80 modułami rejestrującymi światło.

Pokazana mapa kierunków neutrin zobaczonych przez IceCube, bo tak się ten eksperyment nazywa, pokazuje niewiele. Różne kolory i symbole odpowiadają różnym sposobom identyfikowania przypadków, ale tak, czy inaczej, nie widać jakiś istotnych nieregularności.

Jednak w roku 2017 świat obiegra sensacyjna informacja o odkryciu źródła promieniowania kosmicznego



Rysunek 17. Mapa we współrzędnych równikowych pokazująca skąd na niebie przybyły wysokoenergetyczne neutrino rejestrowane przez IceCube

(neutrin) najwyższych energii. Doniesiono, że jedno ze zidentyfikowanych przez IceCube neutrin (IC-170922A) o energii sięgającej 300 TeV kierowało się do nas z bliskich okolic blazara TXS 0506+056 [34]. Blazar TXS 0506+056 był już wcześniej podejrzany.

Przypadek podobny do IC-170922A nie powtórzył się jednak dotąd ani w IceCube, ani w innym (KM3NeT) eksperymencie i mimo, iż nikt nie kwestionuje samego wyniku, to wiara w to, że znamy już obiekty, z których przychodzi promieniowanie kosmiczne najwyższych energii jest coraz mniejsza.

Wydawać by się mogło, że opowiedzieliśmy już po trosze o wszystkich neutrinach i wszystkich aspektach fizyki neutrin. Pominęliśmy jednak te, których jest najwięcej i które są wszędzie. Chodzi o neutrina kosmologiczne.

Co się jeszcze zdarzy?

Od 1965 roku wiemy, że Wszechświat wypełniony jest tak zwanym mikrofalowym promieniowaniem tła. Powstało ono niecałe 400000 lat po Wielkim Wybuchu. Wtedy to swobodne dotąd elektrony i protony połączyły się w pary tworząc atomy wodoru i zjonizowana, gorąca plazma stała się zwykłym elektrycznie obojętnym gazem, wodorem. Fotony, które dotąd kreowane były i pochłaniane co chwila we wspomnianej plazmie, uzyskały

swobodę. Mogły bez większych przeszkód poruszać się tu i tam. Mówi się, że promieniowanie (elektromagnetyczne) oddzieliło się od materii. I tak oddzielone jest do dziś. Wszechświat rozszerzał się i fotony studziły się w nim adiabatycznie. Do dziś dotrwały jako promieniowanie tła mając temperaturę około 2.72 K.

Wcześniej jednak, dużo wcześniej, gdy temperatura mierzona była w dziesiątkach MeV Wszechświat wypełniały elektrony, pozytony i neutrina właśnie, które nawzajem oddziaływały słabo utrzymując jakiś stan równowagi. Gdy ochłodzenie wszystkiego w rozprężającym się Wszechświecie zmniejszyło temperaturę cząstek do dostatecznie niskiego poziomu $\sim 2 \cdot 10^{10}$ K (2.5 MeV), a stało się to już po sekundzie od Wielkiego Wybuchu, neutrina oddzieliły się od swoich leptonów i tworzą dziś neutrinowe promieniowanie tła. Ma ono temperaturę nieco poniżej 2 K, co odpowiada energiom 10^{-4} – 10^{-6} eV. W każdym centymetrze sześciennym przestrzeni znajduje się ich ponad 300, mniej więcej tyle ile fotonów tła mikrofalowego. I o ile te drugie udało się zobaczyć, szansa na zobaczenie tych pierwszych jest bardzo mała. Ale jeśli wspomnimy, co mówił Pauli w liście do „radioaktywnych” przyjaciół o detekcji neutrin, nie tracmy nadziei. W fizyce wszystko zdarzyć się może. No, powiedzmy prawie wszystko.

LITERATURA

- [1] L. Meitner i W. Orthmann, *Über eine absolute Bestimmung der Energie der primären β -Strahlen von Radium E*. Z. Physik **60**, 143–155 (1930).
- [2] J. Danysz, *Sur les rayons beta de la famille du radium*, Le Radium **9**, 1 (1912); *Sur les rayons beta des radiums B, C, D, E*, Le Radium **10**, 4 (1913).
- [3] J. Chadwick *Intensitätsverteilung im magnetischen spektrum der beta-strahlen von radium B+C* Verhandlungen der deutschen Physikalischen Gesellschaft **16** (1914) 383
- [4] W. Pauli, *letter to Lise Meitner*, CERN Document Server (https://cds.cern.ch/record/83282/files/meitner_0393.pdf)
- [5] Chadwick, J. Possible Existence of a Neutron. Nature **129**, 312 (1932); *The existence of a neutron* Proc. R. Soc. Lond. **A136** 692–708 (1932).
- [6] E. Fermi, *Versuch Einer Theorie der β -Strahlen*. Zeitschrift für Physik. **88** (1934) 161–177.
- [7] Goldhaber, M., Grodzins, L., Sunyar, A.W. Evidence for circular polarization of bremsstrahlung produced by beta rays, Phys. Rev., **106** (4), 826–828 (1957).
- [8] Abbott, Alison (17 May 2021). „The singing neutrino Nobel laureate who nearly bombed Nevada”. Nature. **593** (7859): 334–335
- [9] F. Reines and C. L. Cowan, Jr. Detection of the free neutrino, Phys. Rev. **92** 830 <https://doi.org/10.1103/PhysRev.92.830> (1953).
- [10] Cowan CL Jr, Reines F, Harrison FB, Kruse HW, McGuire AD. Detection of the Free Neutrino: a Confirmation. Science. Jul 20;124(3212):103 (1956).
- [11] Schwarzschild, M., Howard, R., & Härm, R., *Inhomogeneous Stellar Models. V. a. Solar Model with Convective Envelope and Inhomogeneous Interior*. Astrophys. J. **125**, 233 (1957)
- [12] J.N. Bahcall, M.H. Pinsonneault and S. Basu, *Solar Models: Current Epoch and Time Dependences, Neutrinos, and Helioseismological Properties*, Astrophys. J. **555**, 990 (2001)
- [13] J.N. Bahcall, A.M. Serenelli and S. Basu, *10,000 Standard Solar Models: A Monte Carlo Simulation*, Astrophys. J. Supp. **165**, 400 (2006).
- [14] T. O’Shea, A.-C. Davis, M. Giannotti, S. Vagnozzi, L. Visinelli i J. K. Vogel, *Solar chameleons: Novel channels*, Phys. Rev. D **110**, 063027 (2024).
- [15] B. Pontecorvo, *Inverse β proces*, National Reserach Council of Canada, Division of Atomic Energy, Chalk River Lab. Report PD-205 (1946)
- [16] B. Pontecorvo, *Nuclear Capture of Mesons and the Meson Decay*, Phys. Rev. **72** 246 (1947); *B. Pontecorvo Electron and muon neutrinos*, J. Exp. Theoret. Phys. **37** 1751 (1959); *Soviet Physics; JETP* **10** 1236 (1960).
- [17] G. Danby, J.M. Gaillard, K. Goulianos, L.M. Lederman, N. Mistry, M. Schwartz and J. Steinberger, *Observation of high energy neutrino reactions and the existence of two kinds of neutrinos*, Phys. Rev. Lett. **9** (1962).
- [18] R. Davis Jr, D.S. Harmer and K.C. Hoffman, *Search for Neutrinos from the Sun*, Phys. Rev. Lett. **20**, 1205 (1968).
- [19] B.T. Cleveland et al, *Measurement of the Solar Electron Neutrino Flux with the Homestake Chlorine Detector*, Astrophys. J. **496**, 505 (1998).
- [20] C. Peña-Garay and A.M. Serenelli, *Solar neutrinos and the solar composition problem*, arXiv:0811.2424 (2008).
- [21] P. Anselmann et al, *Solar neutrinos observed by GALLEX at Gran Sasso*, Phys. Lett. **B285**, 376 (1992); *W. Hampel et al, GALLEX solar neutrino observations: results for GALLEX IV*, Phys. Lett. **B447**, 127 (1999); *M. Altmann et al, Complete results for five years of GNO solar neutrino observations*, Phys. Lett. **B616**, 174 (2005); *F. Kaether et al, Reanalysis of the Gallex solar neutrino flux and source experiments*, Phys. Lett. **B685**, 47 (2010).
- [22] A. I. Abazov et al, *Search for neutrinos from the Sun using the reaction $^{71}\text{Ga}(\nu_e e)^{71}\text{Ge}$* , Phys. Rev. Lett. **67**, 3332 (1991); *J. N. Abdurashitov et al, Measurement of the solar neutrino capture rate with gallium metal. III. Results for the 2002–2007 data-taking period*, Phys. Rev. **C80**, 015807 (2009).
- [23] Y. Suzuki, *Kamiokande solar neutrino results*, Nucl. Phys. B (proc. Suppl.) **38**, 54 (1995); *Y. Fukuda et al, Solar Neutrino Data Covering Solar Cycle 22*, Phys. Rev. Lett. **77**, 1683 (1996)
- [24] Y. Fukuda et al, *Measurements of the Solar Neutrino Flux from Super-Kamiokande’s First 300 Days*, Phys. Rev. Lett. **81**, 1158 (1998); *J. Hosaka et al, Solar neutrino measurements in Super-Kamiokande-I*, Phys. Rev. **D73**, 112001 (2006); *J.P. Cravens et al, Solar neutrino measurements in Super-Kamiokande-II*, Phys. Rev. **D78**, 032002 (2008); *K. Abe et al, Solar neutrino results in Super-Kamiokande-III*, Phys. Rev. **D83**, 052010 (2011)
- [25] Z. Maki, M. Nakagawa i S. Sakata, *Remarks on the Unified Model of Elementary Particles Progress of Theoretical Physics*, **28**, 870–880 (1962).
- [26] B. Pontecorvo, *Neutrino Experiments And The Question Of Lepton Charge Conservation*, (in Russian) Zh. Eksp. Teor. Fiz., **53**: 1717–25(1967).
- [27] V. N. Gribov and B. Pontecorvo, *Neutrino astronomy and lepton charge*, Phys.Lett. **28** 493 (1969).
- [28] Q. R. Ahmad, R. C. Allen, T. C. Andersen, J. D. Anglin, J. C. Barton, E. W. Beier, M. Bercovitch, J. Bigu, S. D. Biller et al. (SNO Collaboration), *Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory*, Phys. Rev. Lett. **89**, 011301 (2002).
- [29] T. Araki, K. Eguchi, S. Enomoto, K. Furuno, K. Ichimura, H. Ikeda, K. Inoue, K. Ishihara, T. Iwamoto, et al. (KamLAND Collaboration), *Measurement of Neutrino Oscillation with KamLAND: Evidence of Spectral Distortion*, Phys. Rev. Lett. **94**, 081801 (2005).
- [30] Y. Fukuda, T. Hayakawa, E. Ichihara, K. Inoue, K. Ishihara, H. Ishino, Y. Itoh, T. Kajita, J. Kameda et al. (Super-Kamiokande Collaboration), *Distribution of Upward Throughgoing Muons by Super-Kamiokande*, Phys. Rev. Lett. **82**, 2644, 1999.
- [31] R. M. Bionta, G. Blewitt, C. B. Bratton, D. Casper, A. Ciocio, R. Claus, B. Cortez, M. Crouch, S. T. Dye et al., *Observation of a neutrino burst in coincidence with supernova 1987A in the Large Magellanic Cloud* Phys. Rev. Lett. **58**, 1494 (1987).
- [32] K. Hirata, T. Kajita, M. Koshiba, M. Nakahata, Y. Oyama, N. Sato, A. Suzuki, M. Takita, and Y. Totsuka et al., *Observation of a neutrino burst from the supernova SN1987A*, Phys. Rev. Lett. **58**, 1490 (1987).
- [33] E. N. Alekseev, L. N. Alekseeva, V. I. Volchenko, and I. V. Krivosheina, *Possible detection of a neutrino signal on 23 February 1987 at the Baksan underground scintillation telescope of the Institute of Nuclear Research*, Pis’ma Zh. Eksp. Teor. Fiz. **45**, 10, 461 (1987).
- [34] M. Aglietta, G. Badino, G. Bologna, C. Castagnoli, A. Castellina, V. L. Dadykin, W. Fulgione, P. Galeotti, F. F. Kalchukov, B. Korchagin, *On the Event Observed in the Mont Blanc Underground Neutrino Observatory during the Occurrence of Supernova 1987a*, Europhysic Letters, **3**, 1315 (1987).
- [35] IceCube Collaboration, M. Aartsen et al., *Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert*, Science **361**, 6398, 147–151(2018)

Fermiony, bozony i dystrybucje

Maciej **Panczykowski**

W przypadku **układu zamkniętego**, czyli takiego, który wymienia z otoczeniem (o określonej temperaturze T) energię i nie wymienia materii, prawdopodobieństwo (p_i) wystąpienia w tym układzie stanu o energii E_i obliczamy według wzoru:

$$p_i = \frac{1}{Z} \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right)$$

gdzie: k – stała Boltzmanna, T – temperatura otoczenia, $\exp$ – funkcja eksponent (typu: e^{ax}), Z – **funkcja podziału** będąca określoną sumą po wszystkich stanach:

$$Z = \sum_i \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right)$$

W przypadku **układu otwartego**, wymieniającego z otoczeniem zarówno energię jak i materię, prawdopodobieństwo stanu o energii E_i i liczbie cząstek: N_i wyznaczamy następująco:

$$P_i = \frac{1}{\Xi} \exp\left(\frac{\mu N_i - E_i}{kT}\right)$$

gdzie: Ξ – **wielka funkcja podziału** będąca też sumą:

$$\Xi = \sum_i \exp\left(\frac{\mu N_i - E_i}{kT}\right)$$

a symbol „ μ ” oznacza tak zwany **potencjał chemiczny**. Czym on jest?

Zanim to objaśnię, zrobię krótką dygresję. Istnieją trzy rodzaje równowag między dwoma układami z jednym rodzajem cząsteczek:

1. **Równowaga termiczna** – gdy te układy osiągają tą samą temperaturę (T), wyznaczaną ze wzoru:

$$T = \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_{V,N}$$

Temperatura to pochodna energii wewnętrznej U po entropii S przy stałej objętości V i liczbie cząstek N . Temperatura po prostu mierzy szybkość zmian energii wewnętrznej układu ze wzrostem entropii.

2. **Równowaga mechaniczna** – gdy te układy osiągają to samo ciśnienie (p), wyznaczane ze wzoru:

$$p = -\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_{S,N}$$

Ciśnienie to pochodna energii wewnętrznej U po objętości V przy stałej entropii S i liczbie cząstek N (ze znakiem minus).

3. **Równowaga chemiczna** – gdy te układy osiągają ten sam potencjał chemiczny (μ), wyznaczany ze wzoru:

$$\mu = \left(\frac{\partial U}{\partial N}\right)_{S,V}$$

Potencjał chemiczny zatem mierzy zmiany energii wewnętrznej układu wraz ze zmianami liczby cząstek przy stałej entropii S i objętości V .

Dystrybucja Fermiego-Diraca określa średnią liczbę fermionów zajmujących dany stan energetyczno-spinowy. Fermiony to cząstki o spinie połówkowym, a więc każdy stan może być, zgodnie z **zakazem Pauliego**, zajęty przez jeden fermion lub w ogóle nie zajęty.

Średnią liczbę cząstek w danym stanie (n_{i-sr}) wyznacza się w fizyce teoretycznej według wzoru:

$$n_{i-sr} = kT \frac{1}{\Xi} \left(\frac{\partial \Xi}{\partial \mu} \right)$$

Używamy wielkiej funkcji podziału (Ξ), gdy fermiony są w układzie otwartym, więc jest możliwa wymiana energii i tych cząstek.

Na początku obliczymy wielką funkcję podziału. Będzie ona po prostu sumą dwóch części: dla N i $E_i = 0$ (brak fermionu w danym stanie) i $N = 1$ i $E_i = \epsilon_i$ (energia pojedynczego fermionu):

$$\Xi = \exp\left(\frac{0(\mu - \epsilon_i)}{kT}\right) + \exp\left(\frac{1(\mu - \epsilon_i)}{kT}\right)$$

$$\Xi = 1 + \exp\left(\frac{\mu - \epsilon_i}{kT}\right)$$

Policzmy teraz pochodną tego wyrażenia po potencjale chemicznym:

$$\frac{\partial \Xi}{\partial \mu} = \frac{1}{kT} \exp\left(\frac{\mu - \epsilon_i}{kT}\right)$$

Tak więc (wracając do wzoru na średnią liczbę cząstek):

$$kT \frac{\partial \Xi}{\partial \mu} = \exp\left(\frac{\mu - \epsilon_i}{kT}\right)$$

i podzielmy to przez wielką funkcję podziału:

$$n_{i-sr} = \frac{\exp\left(\frac{\mu - \epsilon_i}{kT}\right)}{1 + \exp\left(\frac{\mu - \epsilon_i}{kT}\right)}$$

I następnie podzielmy licznik i mianownik tego ułamka przez widoczny eksponent. Otrzymujemy ostatecznie:

$$n_{i-sr} = \frac{1}{\exp\left(\frac{\epsilon_i - \mu}{kT}\right) + 1}$$

Oto dystrybucja Fermiego-Diraca w pełnej krasie. Obowiązuje ona przy dwóch uproszczeniach: fermiony układu nie oddziałują ze sobą i nie ma stanów zdegenerowanych (różnych, ale o tej samej energii).

Dystrybucja Bosego-Einsteina dotyczy bozonów – cząstek o spinie całkowitym. Każdy stan może w ich przypadku być zajęty przez dowolną liczbę cząstek.

W takim przypadku wielka funkcja podziału będzie miała postać:

$$\Xi = \sum_{N=0}^{\infty} \exp\left(\frac{N(\mu - \varepsilon_i)}{kT}\right) = \sum_{N=0}^{\infty} \left(\exp\left(\frac{\mu - \varepsilon_i}{kT}\right)\right)^N$$

Wzór na sumę danego poniżej szeregu geometrycznego ($q > 0$ i $q < 1$):

$$\sum_{N=0}^{\infty} q^N = \frac{1}{1-q}$$

W naszym przypadku otrzymujemy:

$$\Xi = \frac{1}{1 - \exp\left(\frac{\mu - \varepsilon_i}{kT}\right)}$$

Wracając ponownie do wzoru na średnią liczbę cząstek, bierzemy odwrotność wielkiej funkcji podziału i mnożymy ją przez kT :

$$kT \left(1 - \exp\left(\frac{\mu - \varepsilon_i}{kT}\right)\right)$$

oraz bierzemy pochodną wielkiej funkcji podziału po potencjale chemicznym:

$$\frac{\partial \Xi}{\partial \mu} = \frac{\frac{1}{kT} \exp\left(\frac{\mu - \varepsilon_i}{kT}\right)}{\left(1 - \exp\left(\frac{\mu - \varepsilon_i}{kT}\right)\right)^2}$$

Teraz połączymy obydwa wyrażenia:

$$n_{i-sr} = \frac{\exp\left(\frac{\mu - \varepsilon_i}{kT}\right)}{1 - \exp\left(\frac{\mu - \varepsilon_i}{kT}\right)}$$

Podzielmy licznik i mianownik ułamka przez ten eksponent:

$$n_{i-sr} = \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon_i - \mu}{kT}\right) - 1}$$

i nareszcie otrzymujemy wynik. Oto dystrybucja Bosego-Einsteina w pełnej krasie. Różni się ona od poprzedniej tylko znakiem jedynki w mianowniku, ale ten znak robi różnicę.

Obydwie one zbiegają do znanej i popularnej w fizyce teoretycznej **dystrybucji Maxwella-Boltzmanna** przy niskich gęstościach cząstek i/lub wysokich temperaturach.

Warto tu nadmienić, że odkrywcą tej dystrybucji był wybitny indyjski fizyk Satyendra Nath Bose (1925 rok) i koncepcję tą rozwijał także Albert Einstein. Odkrywcami dystrybucji Fermiego-Diraca byli niezależnie w 1926 roku: wybitny włoski fizyk Enrico Fermi i wybitny angielski fizyk Paul Adrien Dirac.

DODATEK:

Ciało doskonale czarne to pewna idealizacja. To ciało które ma doskonałą zdolność emisyjną fotonów i całkowicie pochłania fotony o wszystkich częstotliwościach drgań.

W równowadze termicznej z tym ciałem gęstość energii fotonów na przedział częstotliwości $u(\nu)$ wyraża się wzorem:

$$u(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

gdzie: h – stała Plancka, ν – częstotliwość drgań fotonu, c – prędkość światła.

Jest to matematyczna postać **prawa promieniowania Plancka**. Aby uzyskać całkowitą gęstość energii fotonów (U/V), trzeba powyższy wzór scałkować po wszystkich częstotliwościach.

$$\frac{U}{V} = \frac{8\pi h}{c^3} \int_0^{\infty} \frac{\nu^3 d\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

Aby obliczyć tę niełatwą całkę, robimy trik. Podstawiamy: $h\nu/kT = s$ i wyznaczamy dv :

$$\nu = s kT/h, d\nu/ds = kT/h, d\nu = (kT/h) ds$$

Kontynuujemy:

$$\frac{U}{V} = \frac{8\pi h}{c^3} \left(\frac{kT}{h}\right)^4 \int_0^{\infty} \frac{s^3 ds}{e^s - 1}$$

Ta całka wynosi: $\pi^4/15$

A więc:

$$\frac{U}{V} = \sigma T^4$$

gdzie: $\sigma = 8\pi^5 k^4 / 15 c^3 h^3$ (stała)

Jest to postać słynnego w fizyce **prawa Stefana-Boltzmanna**. Całkowita gęstość energii fotonów proporcjonalna jest do czwartej potęgi temperatury. Czwarta potęga rzadka w fizyce...

Maciej Panczykowski
Katowice, 2025.05.28

Międzynarodowy Rok Nauki i Technologii Kwantowych

Doświadczenie Francka-Hertza

Doświadczenie Francka-Hertza, z 1914 roku, o zasadniczym znaczeniu dla zrozumienia kwantowej struktury atomu, nadal w wielu, nawet zagranicznych podręcznikach fizyki do liceum jest błędnie interpretowane. Nie każde liceum ma wyposażenie do przeprowadzenia doświadczenia – można je wykonać na zaprzyjaźnionej uczelni, ale jego wyniki są istotne dla zrozumienia nie tylko mechaniki kwantowej, ale również struktury atomu, zjawisk w wyładowaniach elektrycznych w gazach i działania lamp neonowych. Z tego powodu „sprawozdajemy” nasze wyniki, uzyskane w na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu, w ramach laboratorium studenckiego.

Martín Seoane Ampudia, Bogumiła Jezierska, Jakub Behrendt,
Krzysztof Wejer, Grzegorz P. Karwasz

Międzynarodowy Rok Nauki i Technologii Kwantowych

Rok 2025 został ogłoszony przez ONZ Rokiem Nauki i Technologii Kwantowych. Sto lat temu, we wrześniu, Werner Heisenberg opublikował artykuł, w którym pojawiło się słowo „teoria kwantowa” [1] i który jest pierwszym, tzw. macierzowym sformułowaniem „nowej” teorii kwantów. Już nie tylko fotony Einsteina z efektu fotoelektrycznego i z prawa Plancka emisji ciała doskonale czarnego, już nie kwantowane, ale nieco „wyciągnięte z kapelusza” koliste orbity Bohra, ale początek tego, co do dziś niepokoi fizyków: dlaczego mechanika kwantowa nie pozwala nam na „dokładne” przewidywanie przyszłości? Wkrótce po artykule z 1925 roku pojawia się zasada nieoznaczoności, też Heisenberga i równanie Schrödingera, wraz z jego kotem. O zaskakujących konsekwencjach filozoficznych mechaniki kwantowej, tak jak je dziś rozumiemy, napiszemy w najbliższej przyszłości.

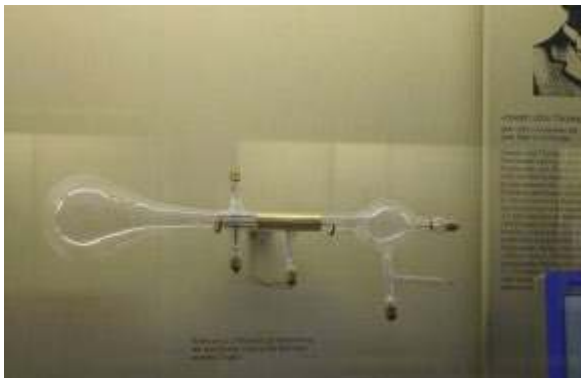
Ale teoria kwantowa nie narodziła się „przy biurku”: u jej podstaw leżała cała seria doświadczeń, wskazujących na kwantową naturę i światła i atomów. Od połowy XIX

wieku było wiadomo, że atomy w fazie gazowej emitują światło w postaci pojedynczych linii. Zależności matematyczne dla długości fali czterech obserwowanych w zakresie światła widzialnego linii w atomowym wodorze podał w 1885 roku nauczyciel z Bazylei, Johann Balmer.

W innych pierwiastkach, już nawet w helu (odkrytym w 1868 roku poprzez obserwacje widm optycznych) jest znacznie więcej linii w zakresie widzialnym (czułe oko rozdzieli ich nawet 25). Niektóre z obserwowanych linii są wąskie (ostre, czyli po angielsku *sharp*), inne silne, jakby podstawowe (*principal*), inne jeszcze rozmyte (*diffused*).

Od czasów modelu atomu wodoru Bohra, tj. od około 1912 roku, wiemy, że atom emituje światło, kiedy elektrony przeskakują z wyższej orbity na niższą. A w zasadzie powinniśmy mówić nie o orbitach, ale o *orbitalach*. I od rodzajów linii widmowych wzięły się dzisiejsze nazwy orbitali: *s*, *p*, *d*, *f*.

Sam elektron znany był też znany od połowy XIX wieku, pod formą promieni katodowych (zob. rys. 3a w naszym artykule [2] o kuli plazmowej w „Fizyka w Szkole” nr 3/2000). Ale dopiero w 1897 elektron został „oficjalnie” odkryty, kiedy J. J. Thompson zmierzył jego masę *m* i ładunek *e* (a w zasadzie jedynie stosunek *e/m*). Thompson badał odchylenie promieni katodowych pod wpływem pola elektrycznego i magnetycznego, zob. fot. 1a.



Ryc. 1. (a) Oryginalna aparatura J. J. Thompsona, za pomocą której w 1897 r. „odkrył” elektron, a właściwie zmierzył stosunek ładunku do masy. (b) Współczesna wersja doświadczenia fotoelektrycznego Philippa Lenarda, z 1902 roku. W szklanej ampule umieszczono foto-katodę. Energia emitowanych elektronów rośnie wraz ze zmianą koloru światła padającego na tę fotokatodę: od czerwonego, poprzez żółte do niebieskiego. Deutsches Museum w Monachium, 2007 r., reprodukcja z [3], foto Maria Karwasz.



Ryc. 2. (a) Stała Plancka h podana jest na tablicy przy wejściu do Instytutu Fizyki UMK. Przez ostatnie 50 lat kilkakrotnie poprawiano tę stałą. Od 2014 roku, tj. od przyjęcia nowego standardu stałych fizycznych, to liczba π pozostaje niedokładna, a stała h już się nie zmienia. (b) Zestaw firmy Phywe do doświadczenia Francka-Hertza. Z prawej strony ampulka z rtęcią, zamknięta w metalowej obudowie z regulowaną temperaturą, w środku zasilacz z trzema regulowanymi napięciami – żarzenia katody, napięcia przyspieszającego elektrony i napięcia selektywnie hamującego elektrony, które straciły energię w zderzeniach z atomami. Po lewej stronie – ekran komputera sterującego doświadczeniem. W głębi – czarna obudowa ampulki z neonem. Foto BJ.

Pod koniec XIX wieku powoli zaczynały się krystalizować podstawy doświadczalne tak zwanej starej teorii kwantów: tej wywodzącej się od Plancka, Einsteina i Bohra, ale jeszcze przed pracami Schrödingera i Heisenberga. Po pierwsze znane było, że atomy emitują światło jako seria ściśle określonych długości fali (np. wspomniana seria Balmera).

A co się dzieje, jeśli oświecimy atomy światłem o określonym kolorze? Doświadczenie dydaktyczne w Deutsches Museum w Monachium, ryc. 1b, pokazuje to zjawisko. W opróżnionej z powietrza ampulce umieszczono dwie elektrody. Jedna z nich, katoda, jest oświetlana lampami (laserami) o różnych kolorach. Metale, szczególnie alkaliczne, ale też np. cynk, pod wpływem światła emitują elektrony. Ale energia tych elektronów nie zależy od intensywności światła, ale od jego koloru, czyli długości fali.

Co więcej, jak widać z ryc. 1b, określonej długości fali odpowiada ściśle określona energia emitowanych elektronów. Jeżeli energia kwantów jest niewystarczająca, elektrony nie są emitowane. Nazywamy to zjawisko fotoelektrycznym, jego odkrywcą, Philipp Lenard, w grudniu 1905 roku otrzymał nagrodę Nobla. A kilka miesięcy wcześniej młody, nikomu nieznany Albert Einstein wyjaśnił to zjawisko teoretycznie, zakładając, że każdej długości fali λ odpowiada ściśle określona, czyli skwantowana, energia, E . Wzór jest dobrze znany $E = h\nu$, gdzie zależność między długością fali światła a jego częstotliwością wynosi $\lambda = c/\nu$. Wartość stałej Plancka h podaje tablica przy wejściu do Instytutu Fizyki UMK, fot. 2a. Jest to już wartość absolutnie dokładna, bo wybrana razem z prędkością światła c jako definicja innych jednostek fizycznych.

W naszej kwantowej układance pojawia się drugi fragment: atomy nie tylko emitują światło w postaci kwantów, ale również absorbują światło jako kwanty. A jednocześnie elektrony emitowane w zjawisku fotoelektrycznym

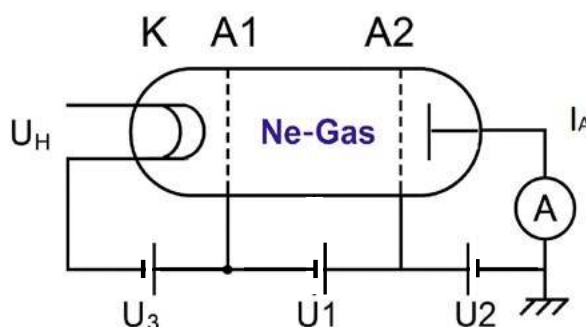
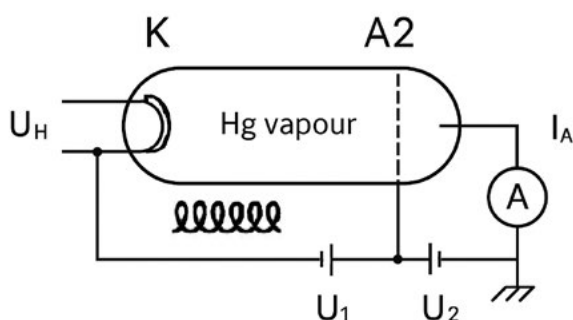
unoszą skwantowane wartości energii, ryc. 1b. A czy elektrony przechodzące przez np. rurę z gazem tracą energię również w skwantowanych ilościach? Do całości układanki brakowało tej odpowiedzi. Gdyby elektrony (i atomy) były sztywnymi kulkami, wartości energii traconej (i zyskiwanej) nie musiałyby być skwantowane. Ale doświadczenie Francka-Hertza pokazało, że elektrony tracą energię w ściśle określonych porcjach.

Rura z rtęcią

James Franck i Gustav Hertz przedstawili wyniki swego doświadczenia na posiedzeniu Akademii Nauk w Berlinie 24 kwietnia 1914 r. Dwa tygodnie później złożyli rękopis do druku: zdążyli z publikacją przed wybuchem wojny. Nie miał tego szczęścia pracujący również z elektronami, ale w Heidelbergu, Carl Ramsauer, odkrywca kolejnego fragmentu układanki współczesnej mechaniki kwantowej.

Ramsauer, badając przepływ elektronów o niskich energiach (kilku eV) zauważył, że argon (a również krypton i ksenon) stają się prawie zupełnie przezroczyste dla elektronów o ściśle określonych energiach (około 0,3 eV), ale dla wyższych energii, 10-30 eV stają się nieprzezroczyste (tzn. silnie rozpraszają elektrony). Zjawisko niemożliwe do wyjaśnienia na podstawie „starej” teorii kwantów, i wymagające założenia, że elektrony, podobnie jak światło, wykazują podwójną naturę: falowo-korpuskularną. Ramsauer wykonał doświadczenie w 1914 roku, ale opublikował dopiero w 1921 roku, kiedy pracował już na Politechnice w Gdańsku, wówczas Danzig Technische Hochschule. Wkrótce po artykule Ramsauera, hrabia Luis de Broglie wysunął hipotezę o falowej naturze elektronu.

Franck i Hertz też badali elektrony – te same przepływające w miedzianym kablu, kreślące obraz na kineskopie telewizora starego typu i wywołujące jarzenie gazu



Ryc. 3. Schemat doświadczenia Francka-Hertza w parach rtęci i w neonie. W pierwszym przypadku konieczne jest regulowanie temperatury ampulki z parami Hg; w drugim, dla lepszej kontroli warunków dryfu elektronów dodano za katodą dodatkową siatkę. Katoda jest z metalu o niskim potencjale emisji elektronów (w polskich podręcznikach nazywanym „pracą wyjścia”), np. Ta, lub LaB_6 , i jest żarzona w sposób pośredni.

w lampie „neonowej” nad naszą głową (a właściwie lampie rtęciowej) lub w żarówce energo-oszczędnej. Pytanie badawcze, jakie postawili Franck i Hertz miało następujący sens. Z modelu Thompsona atomu (niesłusznie porównywanym do puddingu z rodzynkami) wiadano, że elektrony w atomach drgają, a w czasie przeskoku elektronów na niższy poziom emitują kwanty światła. Ale nie oznaczało to, że atomy *absorbują* energię w kwantach. Elektrony, na hipotetycznych sprężynkach, mogły zachowywać się jak naciągana struna łuku: absorbować energię w wielu, niekoniecznie kwantowanych porcjach, a oddawać ją jednym „wystrzałem”. Należało to sprawdzić.

O ile Ramsauer badał przepływ elektronów przez gazy szlachetne, Franck i Hertz wybrali pary rtęci: materiał niedrogi, łatwy do umieszczenia w szklanej ampulce, a przy tym o regulowanym ciśnieniu par (poprzez zmianę temperatury, ryc. 3a). Jak wyjaśnimy dalej, był to wybór bardzo trafny również z innego, atomowego punktu widzenia.

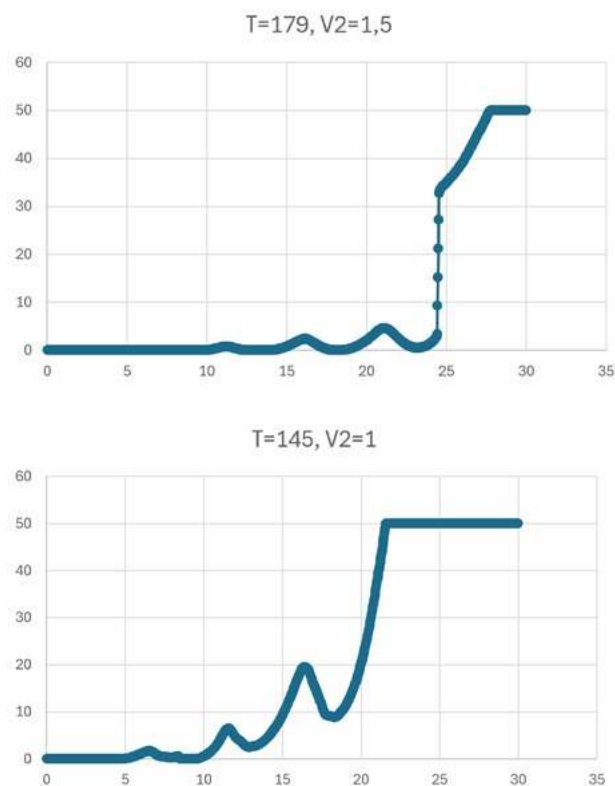
Doświadczenie Francka-Hertza jest niezwykle proste, ryc. 3. Potrzebny jest zasilacz do rozgrzania katody (historycznie, jak w innych lampach elektronowych, używa się napięcia 6-7 V), drugi, regulowany zasilacz niskiego napięcia (do 80 V) dla przyspieszania elektronów, zasilacz niskiego napięcia (do 10 V) hamujący elektrony, które utraciły część swej energii kinetycznej, anoda zbierająca elektrony oraz czuły amperomierz (do pomiaru prądów w zakresie nanoamperów). Ampulka jest umieszczona w metalowej skrzynce, z okienkiem do obserwacji wyładowania elektrycznego.

W doświadczeniu z parami rtęci (ryc. 3a) w skrzynce jest też umieszczona grzałka z regulacją temperatury. W dzisiejszych czasach używa się gotowych zestawów doświadczalnych, kontrolowanych automatycznie, rys. 2b. Sterowanie komputerem niezwykle ułatwia i przyspiesza pomiary. Niestety, aby sfotografować interesujące nas sytuacje doświadczenia pokazane na zdjęciach, trzeba ręcznie zatrzymać program pomiarowy.

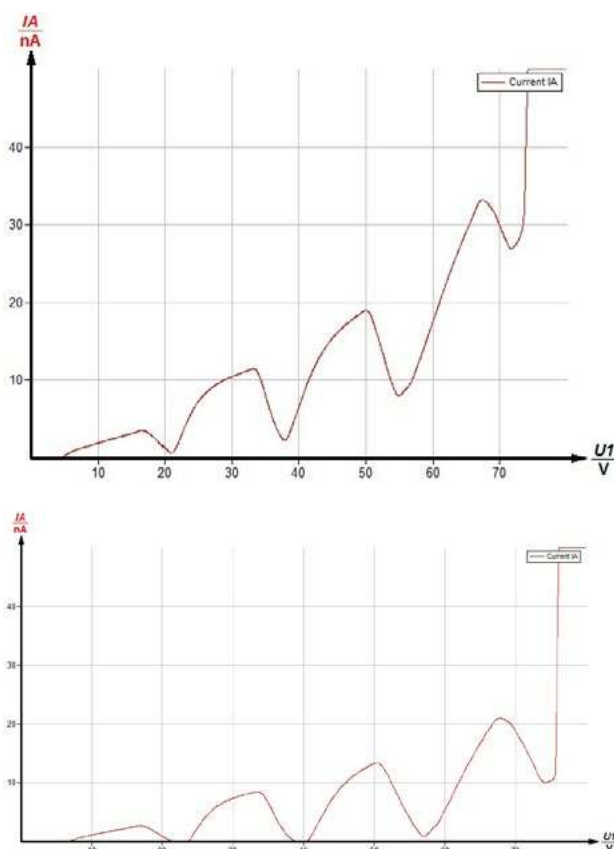
Podobnie proste jest przeprowadzenie doświadczenia. Po nagraniu ampulki z rtęcią do wybranej temperatury (a dokładniej – nagrzania wnętrza skrzynki) i rozżarzeniu katody, ustawiamy napięcie hamujące między siatką a anodą (np. 5-7 V, zaraz się wyjaśni, dlaczego takie) i wciskamy „start” w programie komputerowym. Zasilacz, sterowany przez komputer, w kilkanaście sekund

zwiększa stopniowo napięcie przyspieszające elektrony od zera do wybranej wartości (U_1 na ryc. 3): rejestrowany jest prąd docierający do anody.

To co było odkryciem Francka-Hertza (i za co odebrali nagrodę Nobla w 1926 roku), to zaskakująca zależność tego prądu od napięcia przyspieszającego. Po przekroczeniu pewnej wartości napięcia, prąd nagle spada, ryc. 4. Po czym ponownie rośnie i znów spada, nawet do zera (głębokość minimów zależy od napięcia hamującego U_2 między siatką obszaru dryfu a anodą), por. ryc. 4a i 4b. Minima są odległe od siebie o około 4,8-4,9 V. To ta wartość jest istotą odkrycia Francka-Hertza.



Ryc. 4. Doświadczenie F-H w parach rtęci: zależność prądu docierającego do anody (w nA) w zależności od napięcia (U_1) przyspieszającego w komorze dryfu elektronów. Odległości między minimami wynoszą około 4,8-4,9 V. (a) Temperatura par $+179^\circ\text{C}$, napięcie hamujące $V_2=1,5$ V. (b) Temperatura par $+145^\circ\text{C}$, napięcie hamujące $U_2=1$ V. W niższej temperaturze ciśnienie par jest mniejsze i mniej elektronów rozprasza się „po drodze”: prąd docierający do anody jest większy. Położenie pierwszego minimum zależy m.in. od rodzaju katody. Pomiary: MSA



Ryc. 5. Doświadczenie F-H w neonie. Zależność prądu docierającego do anody w zależności od napięcia przyspieszającego w komorze dryfu. Odległości między minimami (około 16 V) są większe niż w przypadku Hg. Wynika to z wyższej energii stanów wzbudzonych w Ne niż w Hg. (a) Napięcie hamujące, między drugą siatką w komorze dryfu a anodą $U_2 = -5$ V. (b) Wyższe napięcie hamujące (7 V) odcina większą ilość elektronów rozproszonych nie-elastycznie – w konsekwencji prąd docierający jest mniejszy i minima głębsze; pozycje minimum pozostają takie same. Pomiary BJ.

Po przekroczeniu pewnego napięcia, którego wartość zależy od ciśnienia par, prąd zaczyna gwałtownie rosnąć – rozwija się niekontrolowane wyładowanie elektryczne, więc program komputerowy wyłącza zasilacz napięcia U_1 w komorze dryfu.

Doświadczenie w neonie różni się od tego w Hg w wyraźny sposób. Odległości między minimami są znacznie większe (około 16 eV) a maksimum wygląda jakby składało się z dwóch odcinków o różnych nachyleniach. Doświadczenie w Ne nie wymaga regulacji temperatury, więc nie jest tak ciekawe jak w Hg.

Szczęście uważnym sprzyja

Do dziś doświadczenie F-H jest przeprowadzane w parach rtęci. Jak pisaliśmy, w tym samym czasie co Franck i Hertz, Carl Ramsauer badał przepływ elektronów przez gazy szlachetne. W obu doświadczeniach dokonano odkryć zjawisk zupełnie odmiennych, ale w obu – o zasadniczym znaczeniu dla powstania nowoczesnej mechaniki kwantowej. Z doświadczenia Ramsauera wynikało, że elektrony zachowują się jak fale, doświadczenie F-H pozwoliło zrozumieć strukturę wewnętrzną atomów.

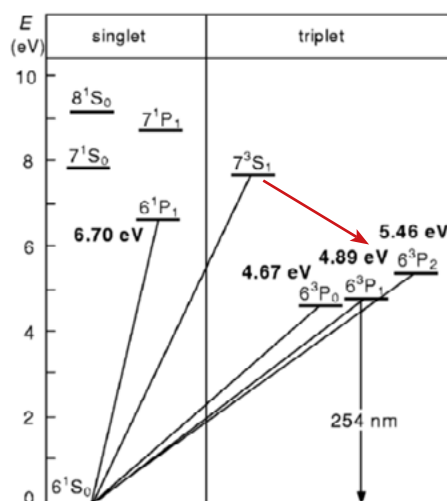
Jeżeli atomy rtęci absorbują energię elektronów w dość dokładnie określonych porcjach, i energia ta odpowiada wzbudzeniu elektronów Hg na wyższy poziom (lub wyż-

sze poziomy) energetyczne, to atom rtęci powinien też emitować odpowiedniej energii kwanty światła. I rzeczywiście, Franck i Hertz opublikowali w tym samym, 1914 roku jeszcze jeden artykuł [4] dotyczący tego samego doświadczenia, ale obserwowali emitowane światło. Energii 4,89 eV odpowiada długości fali 254 nm, czyli bliski nadfiolet. I rzeczywiście światło o tej długości fali zarejestrowali Franck i Hertz.

Jak pisaliśmy na wstępie, tzw. lampy neonowe, w postaci białych rur – to właściwie lampy jarzeniowe, wypełnione argonem i parami rtęci. Atomy rtęci emitują światło nadfioletowe, niewidoczne dla oka ludzkiego (choć widoczne dla pszczoł), a przy tym szkodliwe. Wewnętrzne ścianki lamp jarzeniowych pokryte są więc specjalnymi substancjami (luminoforami) zamieniającymi światło nadfioletowe na widzialne, możliwe o szerokim zakresie długości fali tak, aby wydawało się nam białe.

Ale jak widać z wykresu poziomów energetycznych atomu rtęci, ryc. 6, energia 4,89 eV nie jest najniższym dostępnym przejściem energetycznym; jest nim energia 4,67 eV. Natomiast jak wynika z najnowszych obliczeń teoretycznych, z trzech poziomów energetycznych tzw. trypletu, 6^3P_1 , najbardziej prawdopodobne jest wzbudzenie do stanu 6^3P_1 .

Co oznaczają te symbole? Liczba 6 mówi, że rozważamy elektrony na orbicie $n=6$. Litera P oznacza, że całkowity moment orbitalny elektronów wynosi $L=1$. Górny



Stan	Energia (eV)	Czas życia (s)
6^1S_0	0	-
6^3P_0	4.667	5.78
6^3P_1	4.887	10^{-7}
6^3P_2	5.461	0.67
6^1P_1	6.704	$1.35 \cdot 10^{-9}$
7^3S_1	7.730	$8 \cdot 10^{-9}$ [8]

Ryc. 6 i tab. 1. Układ najniższych poziomów energetycznych atomów rtęci i ich czasy życia. Dominujące wzbudzenie obserwowane w doświadczeniu F-H odpowiada przejściu $6^1S_0 \rightarrow 6^3P_1$ (4,89 eV). W konsekwencji, najsilniejszą linią emisyjną jest UV 254 nm. Obserwowany przez nas kolor świecenia odpowiada przejściu (de-ekscytacji) między wyższymi poziomami $7^3S_1 \rightarrow 6^3P_2$, tj. różnicy energii $\Delta E = 7,730 - 5,461 = 2,27$ eV, czyli długości fali 546 nm (kolor zielony). Dokładne określenie czasów życia stanów wzbudzonych w rtęci jest nadal przedmiotem badań doświadczalnych i teoretycznych [8].

indeks, $(2S+1)$, oznacza, że całkowity spin elektronów wynosi $S=1$. Ale ponieważ i spin i moment orbitalny są wektorami, mogą się one różnie sumować, dając różne całkowite momenty pędu elektronów $J = 0, 1, 2$. Stąd wspomniany „tryplet” – układ trzech poziomów energetycznych, niewiele się od siebie różniących: o takim samym całkowitym spinie S i momencie orbitalnym L , ale o różnych wartościach całkowitego momentu pędu J .

Ale czasy życia, czyli czasy emisji kwantów światła z trzech poziomów 6^3P różnią się bardzo istotnie: od kilku sekund dla 6^3P_0 do ułamka mikrosekundy dla 6^3P_1 . Dlaczego? I tu kolejny element naszej współczesnej wiedzy o atomach. Kwanty światła unoszą nie tylko energię, ale i moment pędu. Wynosi on $\hbar$. Innymi słowy, przejścia elektronowe, w których zmiana pędu wynosi $\Delta L = 1$ są najbardziej prawdopodobne, czytając: emisja zachodzi w najkrótszym czasie. Co widać z tabeli obok rysunku 6: przejście $6^1P_1 \rightarrow 6^1S_0$ jest w najszybsze, zachodzi w ciągu nanosekundy. Zmiana momentu orbitalnego wynosi w tym przejściu $\Delta L = 1$ a przy tym nie zmienia się całkowity spin. Bo zmiana spinu to jakby przestawienie osi Ziemi „do góry nogami”: proces bardzo trudny (tylko Wenus wiruje w odwrotnym kierunku, no i Uran ma oś ustawioną zupełnie „poziomo”).

Wróćmy ponownie do schematu na ryc. 6a. Poziomów energetycznych jest wiele, a więc i możliwych przeskoków elektronowych mnóstwo. Ale szczęśliwie dla Francka i Hertza, w zakresie widzialnym jest ich mniej niż np. w helu. Wynika to z położenia rtęci w układzie Mendelejewa, czyli z konfiguracji elektronowej atomu. W nowoczesnej formie układu okresowego rtęć leży w grupie 2B: na prawo od platyny i złota a pod cynkiem i kadmem. Przypominamy Państwu nasze artykuły w „Fizyce w Szkole” [5] o stanach skupienia: temperatury topnienia i wrzenia

też odzwierciedlają położenia atomów w układzie Mendelejewa.

Konfiguracja elektronowa rtęci to, jak podaje Wikipedia, $[Xe] 4f^{14}5d^{10}6s^2$, czyli tylko dwa elektrony na najwyższej powłoce elektronowej, orbitalu s (a orbitale p i d niższych powłok są kompletnie zapełnione). W odróżnieniu od neonu, który ma swej najwyższej, czyli drugiej powłocy aż 8 elektronów (i mnóstwo poziomów energetycznych), układ poziomów w rtęci jest więc stosunkowo prosty. Co więcej, dominuje prawdopodobieństwo przejścia do stanu 6^3P_1 : stąd w doświadczeniu na ryc. 4 minima pojawiają się co 4,8-4,9 V. Ale nie są to „ostre” linie absorpcyjne jak w przypadku linii optycznych np. Fraunhofera (z czego korzystają astronomowie). Otóż, w przypadku wzbudzenia atomu przez padające elektrony, reguły wyboru opisane powyżej nie są tak „żelazne” jak w przypadku wzbudzania kwantami światła. Stąd wynika dość duża szerokość minimów w naszych krzywych na rys. F-H. A co z emitowanym światłem?

Kolory plazmy

Kolory różnego rodzaju wyładowań elektrycznych w gazach pokazywaliśmy we wspomnianym artykule o kuli plazmowej [2]: było to obserwacje „gołym okiem”. Franck i Hertz korzystali z profesjonalnego spektroskopu UV. My dysponujemy jedynie telefonem komórkowym. Zdjęcia z obecnego doświadczenia w Hg, dla dwóch różnych temperatur ampulki (czyli prężności par) pokazujemy na ryc. 7. Szklana szybka ograniczająca rozgrzaną skrzynkę skutecznie osłabia promieniowanie UV, którego i tak nasze oko nie widzi. Znakomicie widoczna jest natomiast zielona poświata. Na ryc. 7a ma ona postać szerokiego obłoku w pobliżu siatki ograniczającej komorę dryfu, na ryc. 7b – przypomina strumień promieni katodowych.



Ryc. 7. Doświadczenie F-H w parach rtęci. Emisja światła z atomów Hg zarejestrowana przy temperaturze $T = 163^\circ\text{C}$ (napięcie żarzenia katody $U_H = 6\text{V}$, ryc. 7a i c) oraz w temperaturze $T = 107^\circ\text{C}$ ($U_H = 5\text{V}$, ryc. 7b). Ryc. 7a i c przedstawiają przypadek większego ciśnienia par Hg (o czynnik 10 w stosunku do ryc. 7b). W konsekwencji, elektrony na ryc. 7b rozpraszają się (średnio) jednokrotnie, a na rys. 7a i c – wielokrotnie: obserwujemy ich wiązkę (7b) lub rój (swarm, ryc. 7a i c). Ryc. 7c przedstawia moment pojawienia się pierwszego minimum w charakterystyce I-V na ryc. 4a. Czerwony punkcik na dole to rozżarzona katoda. Foto BJ i GK.

Udało się zarejestrować dwa modelowe przypadki badania rozpraszania elektronów w gazie. W przypadku na ryc. 7b, w temperaturze 107°C (czyli przy ciśnieniu par rtęci według tablic termodynamicznych równym 0,52 hPa) prawdopodobieństwo rozproszenia elektronu jest niskie, widzimy więc ich całą wiązkę, jak w doświadczeniach Ramsauera. W temperaturze 163°C (ciśnienie par 6,3 hPa) elektrony, na drodze przez komorę dryfu, rozpraszają się (w różnych kierunkach) wielokrotnie: obserwujemy ich rój, jak pszczół. Po angielsku ten rodzaj dryfu elektronów, przy stosunkowo dużym ciśnieniu gazu, ma podobną nazwę: *swarm*.

Pozostaje pytanie, dlaczego obserwujemy światło zielone, jeśli dopiero co pisaliśmy o linii UV 254 nm? Musimy wrócić do schematu poziomów elektronowych. Jest ich na rys. 6a, oprócz poziomu podstawowego, jeszcze osiem. Dlaczegoż miałby być wzbudzany tylko poziom 6^3P_1 ? Przecież energia padających na atom elektronów nie jest skwantowana. Dryf elektronów to nie tylko wzbudzenia niesprężyste, ale i sprężyste, pod różnymi kątami. Elektrony w komorze dryfu mogą mieć różne energie. Początkowa wiązka (rys. 7b) zamienia się w złożony rój. Innymi słowy – w roju elektronów znajdą się i takie, których energia jest równa lub wyższa niż 7,73 eV, co umożliwia wzbudzenie również do stanu 7^3S_1 . Stan ten żyje bardzo krótko, ale reguły wyboru „zabraniają” przejścia do stanu 6^1S_0 (zmiana spinu przy jednoczesnym $\Delta L=0$). Możliwe jest natomiast przejście $7^3S_1 \rightarrow 6^3P_2$, z różnicą energii 2,27 eV, co odpowiada długości fali 543 nm – kolorowi zielonemu.

Możemy więc skonsultować nasze przewidywania z widmem emisji lampy rtęciowej. Pokazaliśmy to widmo w naszym innym, prawnym już artykule [6], ale z uwagi na kiepską jakość tamtego zdjęcia, skorzystamy z internetu, ryc. 8. Jest widmie Hg i linia zielona 546 nm (przejście $7^3S_1 \rightarrow 6^3P_2$) i są linie niebieskie 436 nm ($7^3S_1 \rightarrow 6^3P_1$) i 405 nm (przejście $7^3S_1 \rightarrow 6^3P_0$), te dwie ostatnie „gołym okiem” niebieskawe. Bo tak naprawdę, kolor świecących atomów rtęci na rys. 7 jest niebiesko-zielony, prawda?

Podsumowanie

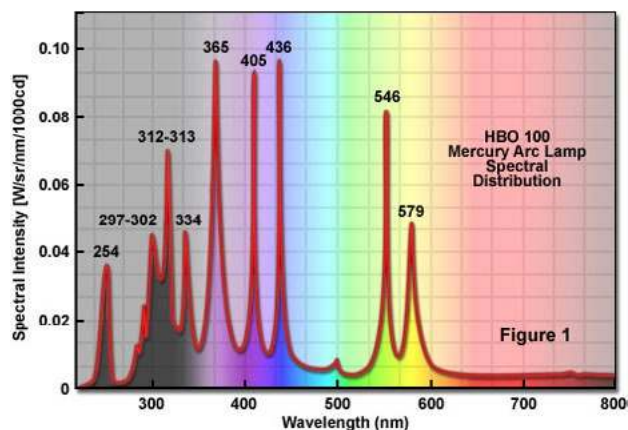
Przy okazji prostego, choć noblowskiego, doświadczenia Francka-Hertza sprzed I wojny światowej, udało się nam nie tylko uzupełnić kwantowe puzzle z tamtych

czasów, ale dzięki współczesnej znajomości poziomów energetycznych (zbudowanej na doświadczeniu i na teorii) – wyjaśnić kolory świecenia rtęci. A neon? Zapomnielibyśmy. Świeci, jak prawdziwa lampa neonowa, czyli na czerwono. W zakresie widzialnym? Zaskakujące, jako że pierwszy pakiet czterech stanów wzbudzonych ($s - w$ tzw. notacji Paschena) leży między 16,2 a 16,85 eV. Ale są to stany s , czyli *optycznie* wzbronione. Ale stany te mogą być bez trudu wzbudzone w zderzeniach z wiązką elektronów. Co znakomicie widać jako początek „dołka” w zależnościach prądowo-napięciowych na rys. 5.

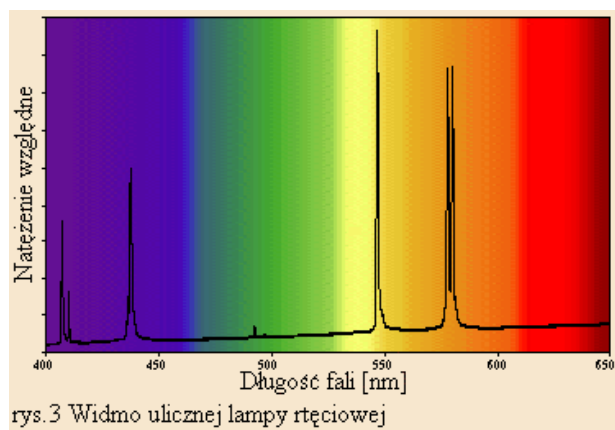
Następny pakiet, dziesięciu stanów wzbudzonych Ne (p w notacji Paschena) leży między 18,4 a 18,9 eV. Różnice energii między tymi pakietami, to mniej więcej 1,6-2,2 eV, czyli cała paleta koloru czerwonego. (Przypominamy umowny zakres światła widzialnego 760-380 nm, czyli 1,63-3,26 eV.) Ponieważ przejścia $p \rightarrow s$ są dozwolone, neon powinien świecić na czerwono. Możemy to sprawdzić na ryc. 9. Tak! I nie tylko widać czerwone świecenie, ale i równoległe paski, jak na tygrysie. I dopiero wzbudzenia do wyższych niż $3s$ stanów powodują pojawienie się głębokiego minimum w charakterystykach prądowo-napięciowych z rys. 5. Odległości między minimami wynoszą około 16 V, a szerokość tych minimów, kiedy prąd anody jest równy zero, świadczy o mnogości stanów wzbudzanych w procesach zderzeń z elektronami.

I tu dochodzimy do sedna wyjaśnienie doświadczenia Francka-Hertza. Prawdą jest, że atomy mają wiele poziomów wzbudzonych. Ale tylko dla atomowego wodoru są one dość znacznie odległe jeden od drugiego. I w rtęci, i w neonie, to warunki *dynamiczne* zderzeń z elektronami decydują, jakie poziomy zostaną wzbudzone. Z pewnością te najniższe, ale nie tylko. Nie jest prawdą, że drugie minimum to wzbudzenie do wielokrotności pierwszego stanu wzbudzonego (jak to wyjaśniają niektóre podręczniki).

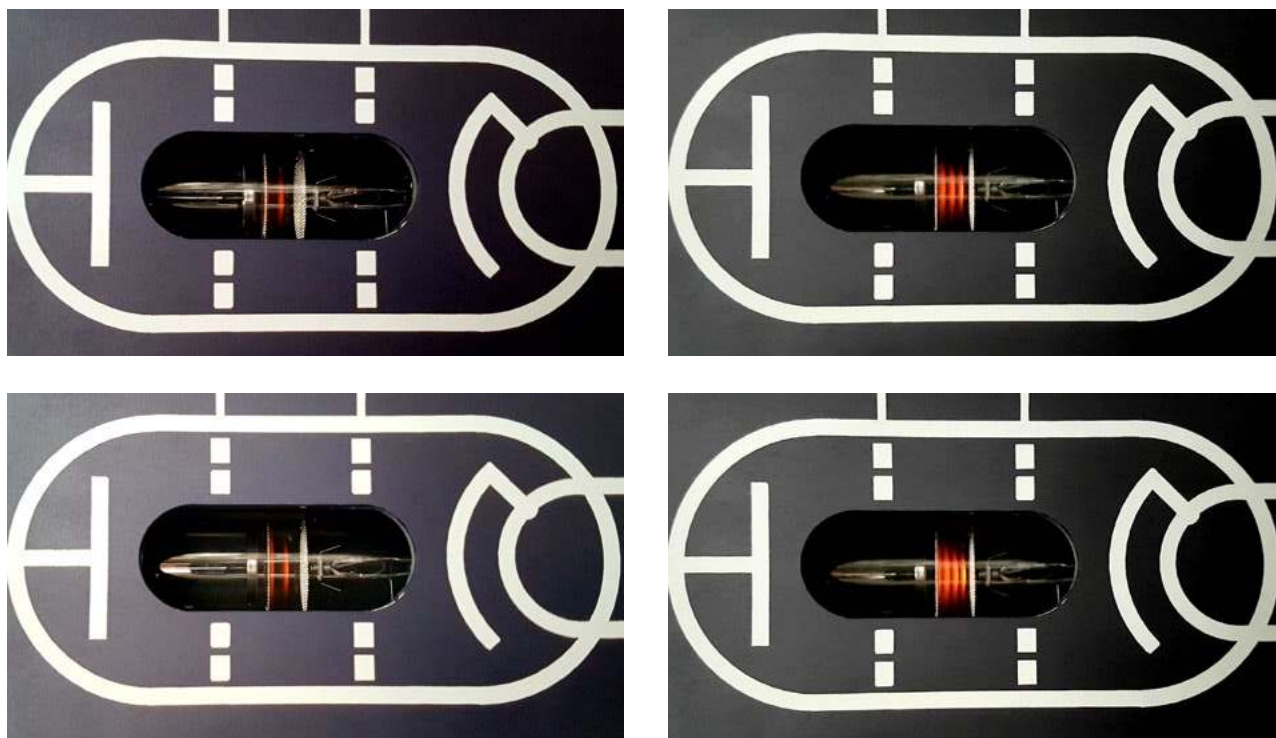
Pierwsze minimum to jeden tylko pasek tygrysa: pojawiający się tuż przed końcową siatką komory dryfu elektronów. Spora część elektronów straciła 4,9 eV (w Hg) lub 16-18 eV (w Ne). Co więcej, na krótkim dystansie dzielącym ten prążek od końcowej siatki komory dryfu (przypominamy – w jednorodnym polu elektrycznym E różnica napięć ΔV jest proporcjonalna do różnicy odległości d wzdłuż linii pola, $\Delta V=Ed$) elektrony nie zdołały



Ryc. 8. Widmo emisji atomów rtęci w lampie lutowej (oślepiająco białej lampie ulicznych). Widmo „profesjonalne” [7] i nasze, amatorskie, ze spektrometrem w postaci płyty CD [6].



rys.3 Widmo ulicznej lampy rtęciowej



Ryc. 9. Fotografie ampulki z neonem w doświadczeniu F-H dla różnych wartości napięcia przyspieszającego. W kolejności, zdjęcia zostały zrobione przy napięciach w komorze dryfu, gdy pojawia się pierwsze, drugie, trzecie, czwarte minimum. Zdjęcia ilustrują sens doświadczenia F-H. Po wzbudzeniu atomów (czerwony pasek), elektrony nie zdołały uzyskać (z przyspieszającego je pola elektrycznego) dość energii, aby pokonać napięcie hamujące przed anodą (anoda jest po lewej stronie). Zauważmy, jak tygrysie paski poszerzają się przy anodzie: rój elektronów ulega poprzecznej dyfuzji. Foto BJ.

uzyskać dostatecznej energii, aby pokonać napięcie hamujące między tą siatką a anodą. W zależności, ile elektronów wyemitowanych z katody zderzyło się elastycznie a ile nie-elastycznie, minimum jest głębsze lub płytsze.

Ale, jakie są prawdopodobieństwa wzbudzenia dla określonych energii elektronów, musimy spytać kolegów teoretyków z USA [9]. A dlaczego te tygrysie paski stają się coraz szersze przy anodzie – może na to odpowiedzą nam koledzy od modelowania *swarm* z Australii lub Serbii.

Po 110 latach od doświadczenia Francka i Hertza, oj dużo, dużo, jest jeszcze do zrobienia w fizyce atomowej! Zapraszamy na UMK.

P.S. W doświadczeniu na ryc. 7b, przeprowadzonym po częściowym wystygnięciu lampy, tj. w niższej niż na rys. 7a temperaturze, w górnej części ampulki widać skroplo-ną rtęć (grzałka znajduje się pod ampulką). Jest to ważna kompetencja społeczna: nigdy nie suszymy białizny na kaloryferach. Woda odparowana w cieplejszym miejscu pokoju na pewno skropi się w jakimś zimnym kącie. A stamtąd jej tak łatwo nie odpardujemy.

Martin Seoane Ampudia, Bogusława Jezierska,
Jakub Behrendt, Krzysztof Wejer, Grzegorz P. Karwasz
Instytut Fizyki, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

BIBLIOGRAFIA

- [1] W. Heisenberg, *Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen*. Zeitschrift für Physik, 33(1), 879–893, settembre 1925.
- [2] G. Karwasz, A. Karbowski, K. Wejer, *O kuli plazmowej i wyladowaniach w gazach*, Fizyka w Szkole 3/2020.
- [3] G. Karwasz, J. Kruk, *Idee i realizacje dydaktyki interaktywnej*, Wyd. Nauk. UMK, 2012
- [4] J. Franck, G. Hertz, *Über die Erregung der Quecksilberresonanzlinie 253,6 μ m durch Elektronenstöße*, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, 16 (1914) 512.
- [5] G. Karwasz, *Stany skupienia*, Fizyka w Szkole, wyd. specjalne, <https://www.aspress.com.pl/stany-2/>
- [6] D. Pliszka, T. Wróblewski, M. Brozis, G. Karwasz, *Proste doświadczenia ze źródłami światła*. Fizyka w Szkole, 5/2000, <https://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki/files/articles/cd/cd.html>
- [7] Mercure Arc Lamps, Zeiss, <https://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/mercurycarc.html>
- [8] K. Blagoev i in. W: Phys. Rev. A 66 (2002), 032509.
- [9] O. Zatsarinny, K. Bartschat, Phys. Rev. A 86 (2012) 022717.

Elektronika nadprzewodząca

W 2023 roku około 4,4% (176 terawatogodzin) całkowitego zużycia energii w Stanach Zjednoczonych padało na centra danych, które są niezbędne do przetwarzania dużych ilości informacji. Z tych 176 TWh, około 100 TWh (57%) zużywały procesory CPU i GPU. Zapotrzebowanie na energię znacznie wzrosło w ciągu ostatniej dekady i będzie nadal rosło, co sprawia, że rozwój energooszczędnych komputerów ma kluczowe znaczenie.

Elektronika nadprzewodząca stała się obiecującą alternatywą dla komputerów klasycznych i kwantowych. Naukowcy z Instytutu Technologii w Massachusetts i Fusion Center opisali w czasopiśmie „Nature Electronics” jak udało się im opracować diody nadprzewodzące i prostowniki dla obwodów kwantowych, które mogą zastąpić powszechnie stosowane obecnie półprzewodniki, a przy okazji wyeliminować nadmierne okablowanie łączące elektronikę.

Żywoty fizyków

Evangelista Torricelli (1608-1647)

Tadeusz Wibig

Pochodził z biednej rodziny. Gaspare Torricelli i Caterina Angetti mieli trzech synów. Najstarszy przejawiał niezwykle talenty, ale rodziców nie stać było na zapewnienie mu jakiegos wykształcenia. Wysłali go więc do wuja, mnicha z klasztoru Św. Jana w Faenzy, aby czegoś go jednak nauczył. I udało się. W roku 1624 Evangelista wstąpił do kolegium jezuickiego najprawdopodobniej też w Faenzy, gdzie dalej przejawiał zdolności nieprzeciętne. Wuj załatwił mu dalsze nauki u ucznia Galileusza Abbota Benedetto Castelliego, który wykładał na Uniwersytecie Sapienza w Rzymie i był w wolnych chwilach nauczycielem siostrzeńca papieża Urbana VIII.

Torricelli formalnie nigdy nie studiował. Castelliego dawał mu prywatnie lekcje matematyki, mechaniki, hydrauliki i astronomii i szło mu chyba nieźle, bo został z czasem jego sekretarzem. Pełnił tę rolę w latach 1626-1632. Czasem zastępował nawet Mistrza w obowiązkach uczelniowych, gdy ten był akurat poza Rzymem.

W roku 1632 Torricelli odważył się napisać list do samego Galileusza. Zaczął tak:

„Najczcigodniejszy i czcigodny Signor: Pod nieobecność naszego mistrza, najczcigodniejszego ojca matematyki, ja, jego najbardziej niegodny uczeń i sługa, który ma zaszczyt być jego sekretarzem...”

Poinformował on dalej o swojej własnej pracy matematycznej. Zaczął od tego, że jest z zawodu matematykiem, studiował klasyczne teksty Apolloniusza, Archimidesa i Teodozjusza. Przeczytał również prawie wszystko, co napisali współcześni matematycy Brahe (Tycho) i Longomontanus (Regiomontanus?). Znał i gorąco popierał teorię Kopernika. Uważnie przestudiował też *Dialogo sopra due Massimi Sistemi del Mondo Tolemaico e Copernicano* (Dialog o dwóch głównych systemach świata – ptolemejskim i kopernikańskim), który Galileusz opublikował około sześć miesięcy wcześniej.

List swój Torricelli zakończył tak:

„...Uważam się za najszczęśliwszego człowieka na świecie, ponieważ urodziłem się w tym stuleciu, kiedy mogę poznać i korespondować z samym Galileuszem, wyrocznią natury, i kiedy mogę mieć łaskę bycia spokrewnionym i prowadzonym przez samego Ciampoliego...” (mniejsza o to kim był Giovanni Ciampoli).

Po procesie Galileusza w 1633 r. Torricelli zdał sobie sprawę, że dalsze obstawanie przy teorii Kopernika, byłoby co najmniej ryzykowne. Z premedytacją przez kolejne lata zajmował się czymś bezpieczniejszym – balistyką.

Do 1641 r. Torricelli ukończył znaczną część pracy, którą planował opublikować w trzech częściach jako *Opera*



Foto – commons.wikimedia.org

geometrica w 1644 roku. W części drugiej zatytułowanej *De motu gravium naturaliter descentium et projectorum* (O ruchu ciał ciężkich opadających w naturalny sposób i pocisków) rozwijał on koncepcje Galileusza o parabolicznym ruchu pocisków w rzucie ukośnym. Pojawiła się ona w *Discorsi e dimonstrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* (Rozmowy i dowodzenia matematyczne w zakresie dwóch nowych umiejętności dotyczących mechaniki i ruchów miejscowych) rozprawie opublikowanej w 1638 roku. W kwietniu 1641 r. Castelli, któremu Torricelli dał do zrecenzowania swoją pracę *De motu gravium*, jechał z Rzymu do Wenecji. Po drodze zatrzymał się w Arcetri, gdzie w areszcie domowym po wyroku Inkwizycji przebywał Galileusz. Przekazał mu kopię manuskryptu Torricellego i zasugerował, by ten wziął go na asystenta. I tak też się stało. 10 października 1641 r. Torricelli przybył do Arcetri. Poznał tam Vincenzo Vivianiego, ucznia, asystenta w końcu biografa Mistrza. Trzy miesiące później w styczniu 1642 roku Galileusz zmarł. Torricelli został jego następcą na stanowisku „Filozofa i Pierwszego Matematyka Jego Wysokości Wielkiego Księcia Toskanii” Ferdynanda II. Stanowisko to piastował aż do śmierci, mieszkając w pałacu książęcym we Florencji.

Poprawiła się jego sytuacja finansowa. Został wykładowcą matematyki w Accademia del Cimento (Akademii Nauk) i fortyfikacji wojskowych na Akademii Projektowania (Accademia del Disegno). Mógł teraz więcej czasu poświęcić pracy naukowej.

Posługując się metodą opisaną kilka lat wcześniej przez innego ucznia Castelliego Bonaventurę Cavalieriego w dziele *Geometria indivisibilis continuorum nova*, która była zasadniczo niczym innym, jak rozwinięciem metody wyczerpywania Archimidesa i w której niektórzy widzą załączki rachunku różniczkowego, obliczył pole powierzchni i znalazł środek ciężkości cykloidy. Szczególne zainteresowanie, a nawet podziw u współczesnych wzbudził tym, jak wykazał, że hiperboloida obrotowa (rozciągająca się do nieskończoności) jest bryłą o skończonej jednak objętości. Nikt się tego nie spodziewał.

Ciekawostką jest, że Torricelli w roku 1640 rozwiązał problem Fermata. Oczywiście nie żadne wielkie czy małe

Twierdzenie Fermata, a zadanie, które ten sformułował ponad sto lat wcześniej: „biorąc pod uwagę trzy punkty na płaszczyźnie, znajdź czwarty punkt tak, aby suma jego odległości od trzech podanych punktów była jak najmniejsza”

Ale tak naprawdę tym, za co cenimy go najbardziej i za co trafił do podręczników jest to, że był pierwszym, który praktycznie zrealizował próżnię. Przy okazji nijako zbudował barometr. W 1643 roku zaproponował słynny eksperyment, jaki później przeprowadził wspomniany już Viviani, a który wykazał, że ciśnienie atmosferyczne określa wysokość, na jaką podniesie się ciecz w odwróconej rurce.

Torricelli 11 czerwca 1644 roku napisał list do swojego przyjaciela Michelangelo Ricci (który także był uczniem Castelliego): *Zwróciłem już uwagę na pewne eksperymenty filozoficzne, które są w toku ... odnoszące się do próżni, mające na celu nie tylko wytworzenie próżni, ale stworzenie instrumentu, który będzie wykazywał zmiany w atmosferze, która czasami jest cięższa i gęstsza, a innym razem lżejsza i cieńsza. Wielu uważało, że próżnia nie istnieje, inni twierdzili, że wprawdzie istnieje, ale tylko z trudem, przeciwko naturze; nie znam nikogo, kto twierdziłby, że jednak istnieje bez żadnego sprzeciwu ze strony natury.* To, czy próżnia istnieje, było kwestią, o którą spierano się przez wieki. Arystoteles twierdził po prostu, że próżnia jest logiczną sprzecznością. „Natura nie znosi próżni”. Galileusz wprawdzie miał eksperymentalne dowody na to, że pompa ssąca może podnieść wodę tylko na wysokość około dziesięć metrów, ale podał błędne tego wyjaśnienie. Torricelli jako pierwszy wyjaśnił to poprawnie:

Zrobiliśmy wiele szklanych naczyń ... z rurkami o długości dwóch łokci. Napelniano je rtęcią, otwarty koniec zamykano palcem, a następnie odwracano rurki w naczyniu, w którym znajdowała się rtęć. ... Zobaczyliśmy, że powstała pusta przestrzeń i że nic się nie wydarzyło w naczyniu, w którym ta przestrzeń powstała Twierdząc, że siła,

która powstrzymuje rtęć przed spadaniem, jest zewnętrzna i pochodzi spoza rurki.”

Torricelli próbował zbadać swą próżnię w szczegółach: czy dźwięk może się w niej rozchodzić, czy mogą w niej żyć owady? Wydaje się jednak, że badania te nie doprowadziły go do żadnych definitywnych konkluzji.

W *De motu gravium* Torricelli udowodnił również, że szybkość wypływu cieczy przez otwór w dnie zbiornika jest proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego z wysokości poziomu cieczy nad otworem. Wynik ten znany jest obecnie jako **twierdzenie Torricellego**. Niektórzy są zdania, że czyni go to praojcem hydrodynamiki. Za właściwych ojców można bowiem uznać Johanna i Daniela Bernoullich, którzy prawie sto lat później napisali, że $v = \sqrt{2gh}$.

Wiele prac Torricellego nie przetrwało. Opublikował tylko jedno, acz wielkie dzieło. Zachowało się kilka z jego listów, które mówią co nieco o jego osiągnięciach. Jest też kilka spisanych po jego śmierci wykładów z Akademii. W jednym z nich Torricelli jako pierwszy podał prawidłowe naukowe wyjaśnienie odwiecznego pytania ludzkości: skąd wieje wiatr? Zaproponował, że „... wiatry są wytwarzane przez różnice temperatury powietrza, a tym samym gęstości, między dwoma regionami Ziemi.”

W październiku 1647 r. Torricelli zachorował na tyfus, a kilka dni później zmarł. Miał 39 lat.

W świecie jednostek Torricelli został upamiętniony (oczywiście) jednostką ciśnienia, którą nazwano torem. Jeden tor to prawie jeden milimetr słupa rtęci (też była kiedyś taka jednostka!), a dokładnie

$$1 \text{ tor} = 0,999999857533699 \text{ mmHg.}$$

A w układzie SI

$$1 \text{ tor} = 133,322368421 \text{ Pa.}$$

Doświadczenie domowe:

Twierdzenie Torricellego

A. Potrzebne materiały

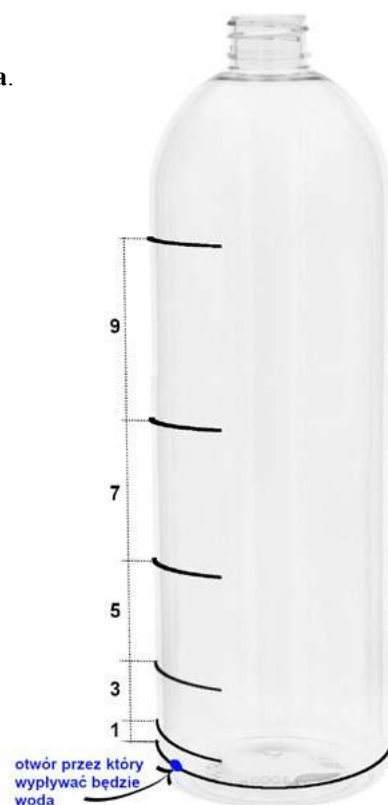
1. duża butelka PET o przekroju nie zmieniającym się na długości ~20-25 cm
2. woda
3. gwóźdź z łepkiem o średnicy ~5 mm
4. korek (do wbicia weń gwóźdźa i młotek do tego niezbędny)
5. świeczka i zapalki

B. Narzędzia:

1. stoper (a najlepiej telefon z kamerką)
2. mazak

C. kolejność czynności

1. Odmierzamy od dna (od miejsca, w którym butelka zaczyna mieć stały przekrój) i zaznaczamy mazakiem jak na rysunku odcinki o długościach 1,3,5,7,9 jednostek (nie musi to być np. 10 mm, może być 8, lub 9 mm).
2. Wbijamy gwóźdź w korek.



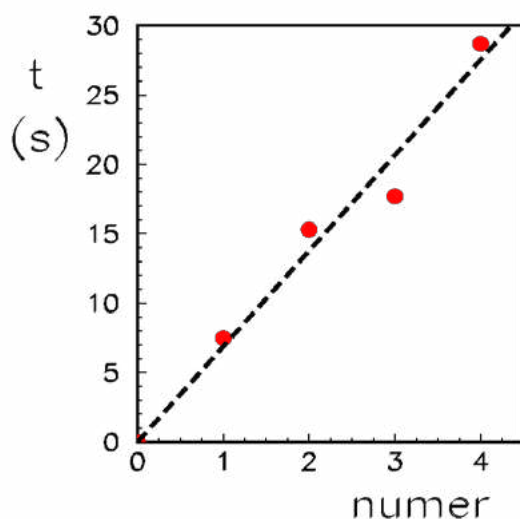
3. Trzymając za korek rozgrzewamy łąpek gwoźdźnia nad świeczką.
4. W dolnym odcinku wypalamy ostrożnie łąpkiem gwoźdźnia otwór.
5. Ustawiamy butelkę na krawędzi wanny/umywalki, aby woda miała gdzie wyciekać nie robiąc szkody.
6. Zatykając palcem otwór wlewamy do butelki wodę.
7. Ustawiamy ją w odpowiednim miejscu.
8. Otwieramy odpływ.

używając stopera	mając telefon z kamerką
1. Włączamy stoper, gdy poziom wody osiągnie pierwszy znacznik i wyłączmy go, gdy dojdzie do drugiego.	1. Włączamy kamerkę.
2. Ponownie wlewamy wodę i otwieramy odpływ.	2. Wyłączamy kamerkę, gdy cała woda się wyleje.
3. Włączamy stoper, jak poprzednio i wyłączamy przy trzecim znaczniku.	3. Oglądamy film na urządzeniu, które wyświetla nam czas na nagraniu.
4. itd. aż do końca.	4. Notujemy czasy, w jakich poziom wody osiągał kolejne znaczniki.

Pomiar możemy powtórzyć kilka razy i wyniki odpowiednio uśrednić. W tabeli podajemy przykładowe czasy otrzymane przez nas.

Numer kolejnego znacznika	Czas mierzony od momentu mijania najwyższego znacznika do poziomu znacznika kolejnego (s)
1	7,5
2	15,3
3	17,7
4	28,7

Sporządzamy wykres: na osi poziomej odkładamy numer znacznika (1, 2, 3 i 4), a na osi pionowej mierzony czas.



Twierdzenie Torricellego po odpowiednich przekształceniach matematycznych mówi, że wyniki powinny układać się na linii prostej. I układają się całkiem nieźle.

Co wywołuje pioruny?

Zespół badawczy pod kierownictwem Penn State rozwiązał długotrwałą zagadkę powstawania piorunów w chmurach burzowych. Ich odkrycia oferują pierwsze ilościowe, oparte na fizyce wyjaśnienie powstawania piorunów.

W badaniu opublikowanym w czasopiśmie *Journal of Geophysical Research* autorzy opisali, w jaki sposób odkryli, że silne pola elektryczne w chmurach burzowych przyspieszają elektrony, które zderzają się z cząsteczkami azotu i tlenu, wytwarzając promieniowanie rentgenowskie i inicjując emisję dodatkowych elektronów i wysokoenergetycznych fotonów – idealną burzę, z której rodzą się pioruny.

Zespół wykorzystał modelowanie matematyczne, aby potwierdzić i wyjaśnić obserwacje terenowe zjawisk fotoelektrycznych w atmosferze ziemskiej – kiedy relatywistyczne elektrony energetyczne, generowane przez promieniowanie kosmiczne docierające do atmosfery z kosmosu, namnażają się w burzowych polach elektrycznych i emitują krótkie, wysokoenergetyczne rozkłaski fotonów. Zjawisko to, znane jako ziemski błysk gamma, obejmuje niewidzialne, naturalnie występujące rozkłaski promieniowania rentgenowskiego i towarzyszące im emisje radiowe.

Czy smog śpi w dzień?

O fizycznych mechanizmach mieszania powietrza

Foto – Adobe Stock

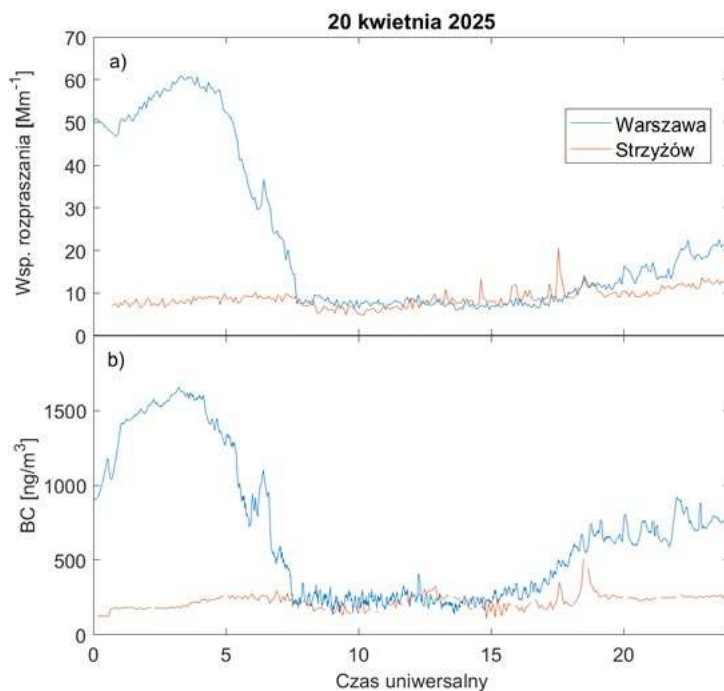
Krzysztof Markowicz

1. Wstęp

W okresie jesienno-zimowym jesteśmy zalewani informacjami o złym stanie jakości powietrza. Gdy przychodzi wiosna i lato temat ten schodzi na dalszy plan. Co prawda od czasu do czasu pojawiają się informacje o wysokich koncentracjach alergenów i pyłkach roślinnych jednak problematyka smogu praktycznie zanika do jesieni. Sporadycznie w tym okresie notuje się złą jakość powietrza co jest oczywiście związane z faktem występowania wyższych temperatur powietrza i wyłączeniem systemów służących do ogrzewania budynków mieszkalnych.

W tym okresie emisje zanieczyszczeń pochodzących z transportu samochodowego jedynie w dużych aglomeracjach miejskich mogą wpływać na nieco gorszą jakość powietrza. Pomiary jakości powietrza w dużych miastach oraz w stacjach prowadzone w okresie wiosenno-letnim w godzinach południowych wskazują na podobne wartości. W szczególności długookresowe obserwacje własności optycznych aerozoli atmosferycznych prowadzone w Warszawie oraz w stacji górskiej na Podkarpaciu wskazują, że wiosną i latem w godzinach okołopołudniowych podczas ok. 70% pomiarów różnice w wartościach współczynnika rozpraszania na drobinach zanieczyszczeń w obu lokalizacjach jest zaniedbywalna (poniżej błędu pomiarowego).

Biorąc pod uwagę jedynie źródła zanieczyszczeń wyniki takie wydają się wręcz nieprawdopodobne. W szczególności transport samochodowy w Warszawie ruch



Ryc. 1. Przebiegi dobowe współczynnika rozpraszania światła (a) dla długości fali 525 nm w Mm^{-1} oraz koncentracji węgla elementarnego (b) w ng/m^3 w Warszawie (niebieskie linie) oraz w Strzyżowie na Podkarpaciu (czerwone linie) w dniu 20 kwietnia 2025 roku.

obejmuje setki tysięcy pojazdów na dobę, podczas gdy na Podkarpaciu w rejonie górskiej stacji pomiarowej to zaledwie kilkadziesiąt pojazdów w odległości kilkuset metrów. Przykładowe dane zarejestrowane 20 kwietnia

2025 r. w Warszawie oraz w stacji pomiarowej na Podkarpaciu ukazują niemal identyczne wartości współczynnika rozpraszania światła przez aerozol oraz koncentracji węgla elementarnego w godzinach od 08:00 do 19:00 UTC, przy istotnie wyższych wartościach nocą (ryc. 1).

Takie zbieżności wyników pomiarów w ciągu dnia nie mogą być przypadkowe, zwłaszcza że tego typu przypadki nie należą do rzadkości w skali całego roku. Mimo wszystko stopień podobieństwa mierzonych wielkości w obu stacjach, oddalonych od siebie o około 260 km, jest wręcz zadziwiający. Można więc powiedzieć, że mieszkańcy Warszawy oddychają w ciągu dnia powietrzem o jakości porównywalnej z tą na obszarze z dala od dużych miast. Dodatkowo, przebieg dzienny tych parametrów optycznych w Warszawie nie wykazuje istotnego statystycznie związku z dobowym cyklem natężenia ruchu samochodowego, który osiąga minimum nocą, a maksimum w porannym i popołudniowym szczycie.

2. Wybrane wielkości fizyczne opisujące jakość powietrza

Większość współczesnych metod pomiarowych prowadzonych w trybie rzeczywistym bazuje na pomiarach optycznych, a więc rozpraszaniu światła na cząstkach aerozolu. W przyrządach takich mierzy się natężenie promieniowania rozproszonego pod określonym kątem, które następnie przeliczona jest na koncentrację masy. Natomiast w nefelometrach mierzy się natężenie promieniowania we wszystkich kątach rozpraszania co bezpośrednio pozwala wyznaczyć współczynnik rozpraszania światła na aerozolu

$$\sigma(\lambda) = \int_0^\infty r^2 \pi Q(m, r, \lambda) n(r) dr \quad (1)$$

gdzie Q oznacza efektywny przekrój czynny dla procesów rozpraszania, $n(r)$ opisuje rozkład wielkości cząstek, zaś r jest promieniem cząstki. Efektywny przekrój czynny dla

cząstek sferycznych może być wyznaczony z teorii Lorenza-Mie dla określonego zespolonego współczynnika załamania światła, promienia cząstki i długości fali. Dla cząstek o rozkładzie mono dyspersyjny

$$n(r) = N_o \delta(r - r_o) \quad (2)$$

wzór dla współczynnika rozpraszania upraszcza się do postaci

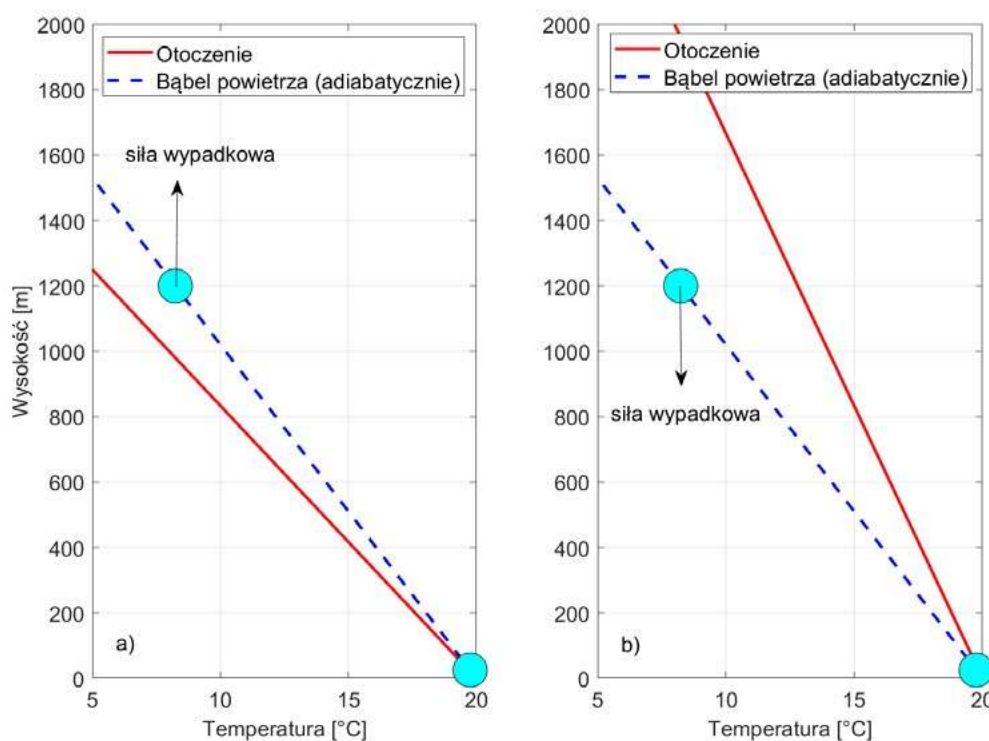
$$\sigma(\lambda) = \pi r_o^2 N_o Q(m, r_o, \lambda) \quad (3)$$

gdzie N_o jest koncentracją cząstek o promieniu r_o w jednostce objętości. Na ogół do określania jakości powietrza używa się wielkości potocznie zwanej jako PM_{10} lub $PM_{2.5}$ będącej koncentracją masy cząstek odpowiednio o średnicy poniżej 10 i 2,5 μm . Nie jest jednak oczywistym czy masa cząstek w jednostce objętości jest wielkością dobrze opasującą ekspozycję człowieka na submikronowi cząstki.

W ostatnim czasie pojawiły się prace pokazujące, że do określania jakości powietrza w kontekście wskaźnika ekspozycji człowieka powinno się używać koncentracji powierzchniowych związanych nie z masą a powierzchnią aerozolu. Jednak ze względu na metody pomiarowe monitorowanie masy cząstek jest prostsze. Część metod pomiarowych uznawanych jako referencyjne wykorzystuje techniki wagowe filtru, na którym deponowanych jest aerozol. Wielkość PM_{10} jest zdefiniowana następująco

$$PM_{10} = \int_0^{10\mu m} \pi \rho(r) r^3 n(r) dr \quad (4)$$

gdzie $\rho(r)$ jest gęstością cząstek w zależności od ich promienia. Można pokazać, że współczynnik rozpraszania i koncentracja masy są powiązane ze sobą poprzez tzw. wydajność rozpraszania masowego (MSE), która jest ilorazem współczynnika rozpraszania światła do koncentracji masy



Ryc. 2 Warunki termodynamiczne podczas (a) chwiejnej i (b) stabilnej stratyfikacji dolnej atmosfery. Linia czerwona obrazuje zmiany temperatury powietrza z wysokością natomiast przerywana linia niebieska zmiany temperatury elementu objętości (bąbla) powietrza przemieszczającego się w pionie w procesie adiabaticznym. Początkowo bąbel znajduje się na powierzchni ziemi i zostaje mu nadana niewielka prędkość pionowa skierowana do góry.

$$MSE = \frac{3}{4} \frac{\langle Q \rangle}{\langle \rho \rangle r_{\text{eff}}} \quad (5)$$

gdzie $\langle Q \rangle$ jest średnim efektywnym przekrojem czynnym na procesy ekstynkcji, $\langle \rho \rangle$ jest średnią gęstością aerozolu, zaś r_{eff} opisuje efektywny promień cząstek (iloraz trzeciego do drugiego momentu rozkładu wielkości cząstek). Wielkość ta na ogół zawiera się w przedziale od 3 do 5 $\text{Mm}^{-1}/\mu\text{g}/\text{m}^3$ i zależy od składu chemicznego oraz rozmiaru aerozolu (rośnie jak promień cząstek zmniejsza się).

3. Wpływ warunków meteorologicznych na poziom zanieczyszczenia powietrza

Aby zrozumieć przypadek przedstawione na ryc. 1. należy zastanowić się, od jakich procesów fizykochemicznych zależy jakość powietrza w danej lokalizacji. Przede wszystkim są to lokalne źródła emisji oraz warunki meteorologiczne. Do tych drugich zalicza się m.in. transport horyzontalny (adwekcję), który sprawia, że nawet w miejscach pozbawionych źródeł emisji poziom zanieczyszczeń może być relatywnie wysoki. Z drugiej strony adwekcja może prowadzić do rozcieńczania zanieczyszczeń tam, gdzie występują intensywne źródła emisji. Kluczową rolę odgrywają tu prędkość i kierunek wiatru, jako fizyczne wielkości sterujące tymi procesami.

Istotny wpływ ma także transport pionowy, związany głównie z konwekcją termiczną i turbulencją mechaniczną. W pierwszym przypadku mieszanie powietrza zachodzi dzięki sile wyporu wywołanej różnicami gęstości (cieplejsze powietrze jest lżejsze od powietrza chłodnego). Głównym

źródłem energii napędzającym konwekcję jest promieniowanie słoneczne, które w ciągu dnia powoduje dodatni strumień netto energii na powierzchni ziemi. Skutkuje to ogrzewaniem się cienkiej warstwy gruntu a od niego wskutek termodyfuzji i turbulencji najniższych warstw powietrza.

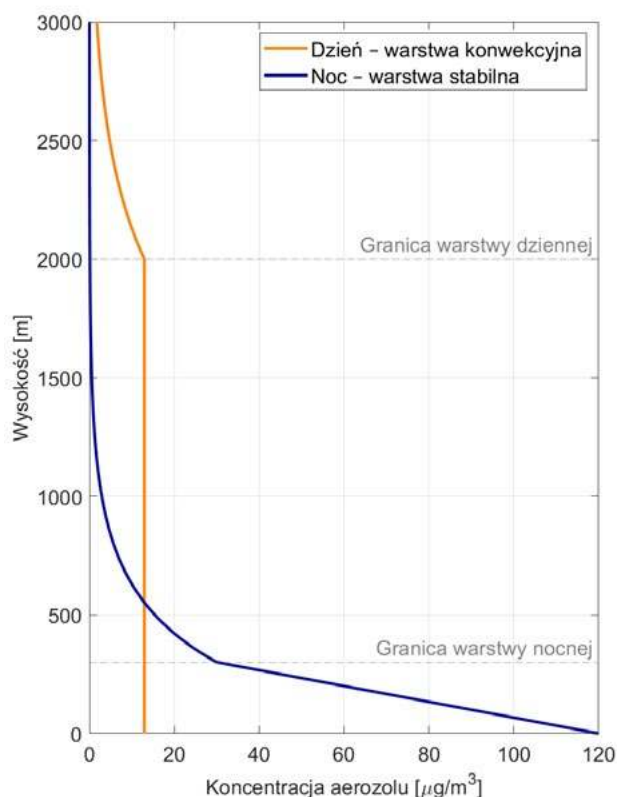
Należy przy okazji podkreślić, że powietrze jest w pierwszym przybliżeniu przezroczyste dla promieniowania słonecznego i bezpośrednie nagrzewanie czy ochładzanie powietrza rzadko przekracza wartość 1-2 K na dobę. Dolna atmosfera staje się konwekcyjnie niestabilna, gdy spadek temperatury z wysokością przekracza 0,98°C/100 m (wartość ta jest ilorazem przyspieszenia grawitacyjnego do ciepła właściwego powietrza). Wtedy przemieszczająca się adiabatycznie (bez wymiany masy i ciepła) w górę porcja (bąbel) powietrza rozpręża się i ochładza zgodnie z tzw. suchą adiabatą (0,98°C/100 m).

Jeżeli otaczające powietrze jest chłodniejsze (rzeczywisty gradient temperatury przekracza gradient sucha adiabatyczny), bąbel pozostaje cieplejszy od otoczenia i jego wznoszenie przyspiesza (Ryc. 2a). W przeciwnym przypadku siła wyporu jest ujemna i bąbel powietrza wraca w dół (równowaga stabilna, Ryc. 2b). Zatem rozwój konwekcji wymaga szybkiego spadku temperatury z wysokością. Gdy temperatura rośnie z wysokością (inwersja), powstaje bardzo stabilna równowaga, która hamuje mieszanie – takie warunki występują głównie nocą, kiedy powierzchnia ziemi ochładza się szybciej niż powietrze nad nią. Sprzyja to powstawaniu smogu.

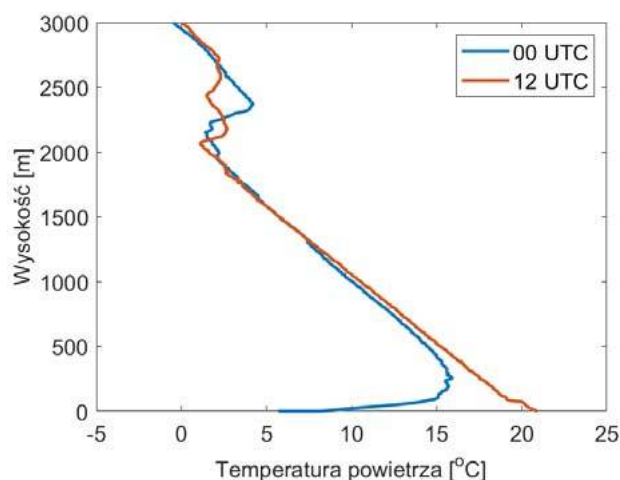
Turbulencja mechaniczna z kolei wynika ze zmian prędkości i kierunku wiatru z wysokością. Może ona



Fot. 1 - Urządzenie do pomiarów stężeń pyłu zawieszonego PM10 i PM2,5, fot - <https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/content/show/1000919>



Ryc. 3 Przykładowe (teoretyczne) profile koncentracji aerozolu podczas dziennej (linia pomarańczowa) i nocnej (linia niebieska) warstwy granicznej przy założeniu, że masa całego aerozolu jest identyczna w dzień i w nocy.



Ryc. 4 Profile pionowe temperatury powietrza o godzinie 00 UTC (linia niebieska) i 12 UTC (linia czerwona) podczas bezchmurnych warunków w dniu 29 kwietnia 2025 roku.

zapewniać pewien stopień mieszania, zwłaszcza podczas nocnych inwersji. Oprócz tego o jakość powietrza decydują również procesy związane z depozycją np. opady atmosferyczne oraz procesy chemiczne i fotochemiczne, takie jak konwersja gazów w cząstki czy produkcja ozonu i tlenków azotu pod wpływem promieniowania słonecznego.

Analizując dane przedstawione na ryc. 1, można zauważyć, że zarówno dobowy cykl koncentracji zanieczyszczeń w Warszawie, jak i niemal zerowe różnice między obiema lokalizacjami w ciągu dnia muszą być związane z procesami konwekcyjnymi. Zjawiska te zwykle aktywują się 1–2 godziny po wschodzie słońca i prowadzą do intensywnego mieszania powietrza w dolnej troposferze.

W pierwszym przybliżeniu można założyć, że koncentracja cząstek jest stała od powierzchni ziemi aż do górnej granicy warstwy granicznej, sięgającej wiosną i latem nawet 2 km (Ryc. 3a). Oznacza to, że zanieczyszczenia emitowane przy powierzchni ziemi są równomiernie rozprowadzane w całej tej warstwie.

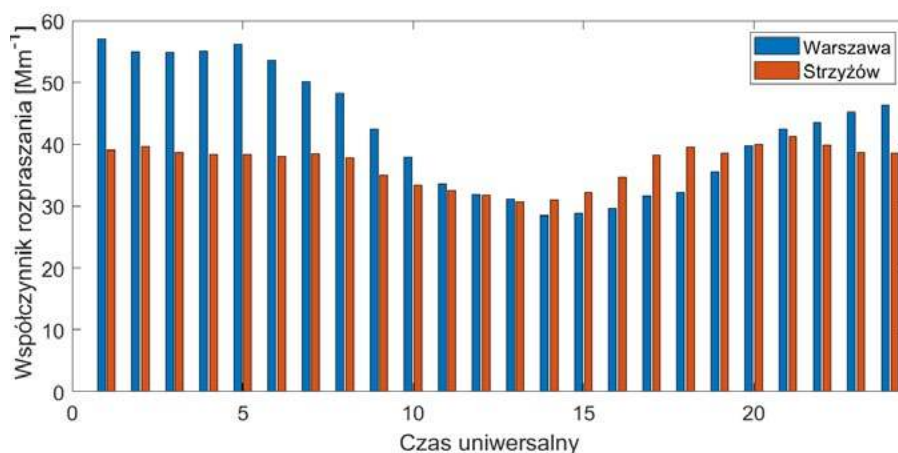
Z drugiej strony nocą, gdy ustaje konwekcja i prędkość wiatru przy powierzchni ziemi zmniejsza się, tworzą się idealne warunki do uwięzienia zanieczyszczeń przy powierzchni ziemi. Najgęstszy smog jest na ogół obserwo-

wany w bardzo cienkiej warstwie powietrza przylegającej do powierzchni ziemi (Ryc. 3b). Dane pochodzą z obserwacji wykonanych za pomocą aparatury zainstalowanej na dronie (Chiliński i in., 2018), czujników zainstalowanych na różnych wysokościach Pałacu Kultury i Nauki w Warszawie (Chiliński i in., 2025) czy z obserwacji w terenie górzystym (Chiliński i in., 2016) wskazują, że grubość warstwy smogu rzadko przekracza 100 metrów.

Skrajne warunki smogowe są obserwowane w jeszcze cieńszych warstwach powietrza sięgających zaledwie 40–50 metrów. Tym samym mieszkając w dużych miastach powyżej 10–15 piętra można oddychać nocą powietrzem o znacznie lepszej jakości niż na niskich piętrach czy spacerując po powierzchni ziemi. Co ciekawe niejednokrotnie gęsty smog powstaje w czystych masach powietrza napływających nad Polskę z kierunku północnego. W tym przypadku smog ma grubość kilkudziesięciu metrów natomiast powyżej powietrze jest niemal krystalicznie czyste (Chiliński i in., 2018).

Ryc. 4 obrazuje rzeczywiste profile pionowe temperatury powietrza zmierzone podczas nocy (00 UTC) oraz w ciągu dnia (12 UTC) 29 kwietnia 2025 r. W godzinach nocnych tuż przy powierzchni ziemi panuje bardzo silna inwersja (ok 10°C w pierwszych 100 metrach), która uniemożliwia konwekcyjne mieszanie powietrza. Temperatura zaczyna spadać z wysokością dopiero powyżej 300 m. Zupełnie inne warunki panują o godz. 12 UTC, kiedy to najwyższą temperaturę panuje tuż nad gruntem i poza pierwszym 100 metrami temperatura spada ze stałym gradientem (ok $1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$) do wysokości ok 2 km. Tym samym konwekcja przenosi zanieczyszczenia w tej warstwie zmniejszając koncentracje.

Inwersja powyżej 2 km obecna zarówno w dzień i w nocy skutecznie hamuje dalsze mieszanie zanieczyszczeń. Jednak w przypadku dnia, gdy pojawia się głęboka konwekcja i rozwijają się chmury burzowe (warstwa inwersyjna na szczycie warstwy granicznej jest bardzo słaba albo nie istnieje) zanieczyszczenia mogą być transportowane do górnej troposfery (10–12 km). Generalnie takie sytuacje występują relatywnie rzadko a aerozol dominuje głównie w warstwie granicznej atmosfery.



Ryc. 5 Średnie dobowe przebiegi współczynnika rozpraszania światła (a) dla długości fali 525 nm w Mm^{-1} w Warszawie (niebieskie słupki) oraz w Strzyżowie na Podkarpaciu (czerwone słupki) podczas bezchmurnych dni w okresie od maja do września 2023 roku.

Długookresowe pomiary prowadzone w Warszawie i na Podkarpaciu w okresie od maja do września ukazują, że podczas dni bezchmurnych współczynnik rozpraszania w godzinach południowych i popołudniowych jest bardzo zbliżony (Ryc. 5). Zauważyć można nawet, że po 15 UTC wartości są istotnie wyższe na Podkarpaciu niż w Warszawie. Zgodnie z oczekiwaniem w godzinach nocnych wartości współczynnika rozpraszania w stolicy są znacząco wyższe niż na Podkarpaciu. Najsilniejszy cykl dobowy widoczny jest w Warszawie z wartościami blisko dwukrotnie wyższymi nocą i rano. W Strzyżowie zmiany dobowe są mniejsze i sięgają ok. 30%.

4. Podsumowanie

Czynniki, które kontrolują poziom zanieczyszczenia powietrza powiązane są z warunkami meteorologicznymi. Przy podobnej aktywności źródeł emisji to intensywność procesów mieszania decyduje o poziomie zanieczyszczenia powietrza. W okresie zimowym, gdy poziom emisji komunalno-bytowych jest wysoki o poziomie zanieczyszczenia decyduje głównie prędkość wiatru. W dni o umiarkowanej i wysokiej prędkości wiatru poziom koncentracji aerozoli są znacznie niższy niż w dni, gdy prędkość wiatru jest niewielka.

Przy bardzo niskich prędkościach wiatru w godzinach nocnych rozwijają się przygruntowe inwersje, które odpowiadają za pojawianie się najgęstszego smogu. W okresie wiosenno-letnim czynnikiem istotnym staje się konwekcja, która w ciągu dnia prowadzi do silnego mieszania zanieczyszczeń i znacznego spadku koncentracji przy powierzchni ziemi. Wysokość warstwy mieszania w tym okresie zmienia się typowo w przedziale około od 1.5 do 2 km co powoduje, że nie ma większego znaczenia jak intensywne są emisje zanieczyszczeń przy powierzchni

ziemi, bo poziom nawet w dużych miastach jest podobny jak w terenach niezurbanizowanych.

Jakość powietrza zależy nie tylko od obecności aerozoli antropogenicznych, lecz również od tych pochodzenia naturalnego, emitowanych podczas pożarów lasów, burz pustynnych, erupcji wulkanicznych czy sztormów morskich. Pył pustylny nad Polską najczęściej transportowany jest w środkowej troposferze (na wysokości 3–7 km) i tylko sporadycznie dociera do warstw przyziemnych (głównie zostawia ślady na szybkach po opadach deszczu).

W ostatnich latach jednym z ciekawszych przypadków była sytuacja z 31 marca 2024 r., kiedy to niemal w całym kraju odnotowano podwyższone koncentracje PM_{10} związane z obecnością pyłu saharyjskiego przy powierzchni ziemi. Z kolei 2 lutego 2024 r. do centralnej Polski dotarł aerozol morski, który powstał nad Morzem Północnym w wyniku silnego sztormu. Obecność powietrza bogatego w sól morską w głębi lądu jest wyjątkowo rzadka, szczególnie jeśli towarzyszy jej bardzo niski poziom zanieczyszczeń antropogenicznych. Mieliśmy więc do czynienia z naturalną tężnią obejmującą swoim zasięgiem znaczną część kraju.

Prof. dr hab. Krzysztof Markowicz

Instytut Geofizyki, Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

LITERATURA

- [1] Chyliński, M. T., Markowicz, K. M. & Kubicki, M. UAS as a Support for Atmospheric Aerosols Research: Case Study. *Pure Appl. Geophys.* 175, 3325–3342 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1767-3>
- [2] Chyliński, M. T., Broda, M., Nurowska, K. *et al.* The Near-Surface Vertical Variability of Aerosol Single-Scattering Properties over Warsaw: Case Study. *Aerosol Air Qual. Res.* 25, 14 (2025). <https://doi.org/10.1007/s44408-025-00018-w>
- [3] Chyliński, M. T., K. M. Markowicz, J. Markowicz, Observation of vertical variability of black carbon concentration in lower troposphere on campaigns in Poland, *Atmospheric Environment*, 137, 2016, 155–170, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.04.020>.



Fot. 2 - Pożary lasów, burze pustynne, erupcje wulkanów wpływają na jakość powietrza. Fot. – Adobe Stock

Fizyka w ogródku

Foto – Dreamstime

Arleta Biegańska

Od dłuższego czasu trwa dyskusja na temat stanu polskiego szkolnictwa. Polskie szkoły znalazły się w ogniu krytyki całego społeczeństwa, a zwłaszcza ze strony głównych odbiorców, tj. rodziców i uczniów. Uczniowie czują się przepracowani, znerwicowani z powodu ciągłego stresu. Krytyki nie szczędzą również nauczyciele, organy prowadzące oraz urzędnicy z nadzoru pedagogicznego. Pada wiele propozycji naprawy obecnego stanu rzeczy, niektóre już są wdrażane, inne są na etapie planowania.

Jednym z przedmiotów nadmiernie stresujących uczniów jest fizyka. Fizyka generalnie postrzegana jest jako przedmiot trudny i niezrozumiały. Na łamach „Fizyki w Szkole” wielokrotnie był poruszany temat spadku popularności fizyki jako przedmiotu szkolnego. Niestety wdrażane zmiany programów i planów nauczania oraz zmiany podręczników nie przyczyniają się do poprawy wizerunku tego przedmiotu. Wprost przeciwnie kolejne modyfikacje ramowych planów nauczania polegają na systematycznym zmniejszaniu liczby godzin przeznaczonych na nauczanie fizyki. Skutkiem tego jest ograniczenie ulubionej przez uczniów formy nauczania fizyki poprzez doświadczenia, zwłaszcza w formie ćwiczeń uczniowskich. Żaden film nie zastąpi samodzielnie przeprowadzonego eksperymentu. Z tego powodu uczniowie nadal często pytają „po co nam ta fizyka?”.

Z drugiej strony wiele osób, nie tylko w wieku szkolnym, lubi zabawy z fizyką. W sieci znajdziemy wiele filmów, zdjęć z przeprowadzanych obserwacji i doświadczeń. Znajdziemy całe serie filmów, takich jak na przykład „Zabawy z fizyką w domu”, „Fizyka w kuchni” itp. Ja proponuję w nauczaniu fizyki wykorzystać ogródek szkolny.

Ogródki szkolne

Na forach publicznych oprócz wielu krytycznych uwag w rodzaju „tego nie uczą w szkołach” znajdziemy propozycje „tego czego powinni uczyć”. Moją uwagę zwróciła propozycja wdrożenia zajęć związanych z sadzeniem i pielęgnowaniem roślin przez uczniów. Zwolennicy zakładania szkolnych ogródków wskazują na wiele korzyści wynikających z bezpośredniego kontaktu uczniów z roślinami. Zwracają uwagę na to, że ogródek jest miejscem integracji nauczycieli, uczniów, rodziców i innych osób. W zależności od jego wielkości jest przyjaznym miejscem do wypoczynku w czasie przerw. Więcej informacji o zaletach wprowadzenia tej tematyki znajdziemy m.in. na stronie MamaDu.pl¹.

Aktualnie w przepisach prawa oświatowego nie ma żadnych zapisów dotyczących ogródków przyszkolnych. Wcześniej ogródki uwzględniano m.in. w rozporządzeniach dotyczących podstaw programowych.

Na przykład w rozporządzeniu z 2012 r. w zalecanych warunkach i sposobach realizacji podstawy programowej dla przedszkoli był zapis „W trosce o prawidłowy rozwój

¹ Sadzenie roślin w szkole? To powinno być w podstawie programowej | MamaDu.pl

psychoruchowy oraz przebieg wychowania i kształcenia dzieci w wieku przedszkolnym zaleca się następujące proporcje zagospodarowania czasu (...) pkt. 2 co najmniej jedną piątą czasu (w przypadku młodszych dzieci – jedną czwartą czasu) dzieci spędzają w ogrodzie przedszkolnym, na boisku, w parku² (...).³ W warunkach realizacji przyrody był zapis „Szkoła powinna zapewnić warunki do bezpiecznego prowadzenia zajęć badawczych i terenowych, obserwacji i doświadczeń.”⁴

W aktualnie obowiązujących podstawach programowych mowa jest o kąciach przyrodniczych w przedszkolach. W warunkach realizacji przyrody czy biologii mówi się o zajęciach terenowych. Takim miejscem może być ogródek przyszkolny.

Pomimo braku formalnych wymagań w wielu szkołach funkcjonują ogródki przyszkolne. Niektóre z nich były i są zakładane w ramach realizacji innowacji pedagogicznej w szkole. Inne powstawały w ramach realizacji zadań konkursowych, projektów edukacyjnych itp. Aktualnie są to na przykład programy „Eko-szkoła”⁵, czy program promujący zdrową dietę⁶.

Ogródek przyszkolny pozwala nie tylko na realizację programu przyrody czy biologii poprzez praktyczne działania, bezpośrednie obserwacje żywych roślin, owadów itp. Może być również wykorzystany w nauczaniu fizyki.

Fizyka w ogródku przyszkolnym

W punkcie pierwszym celów i wymagań ogólnych zapisanych w podstawach programowych fizyki czytamy: „I. Wykorzystanie pojęć i wielkości fizycznych do opisu zjawisk oraz wskazywanie ich przykładów w otaczającej rzeczywistości”⁷

Otoczając ucznia rzeczywistością jest m.in. ogród, park, las czy pole uprawne. Jednym ze sposobów realizacji tego wymagania jest prowadzenie lekcji poza izbą szkolną. Można wyjść poza teren szkoły, ale równie dobrze wystarczy wyjść na boisko czy do szkolnego ogródka. Uczniowie bardzo lubią terenowe lekcje i często dopytują się „kiedy pójdziemy na dwór?”. Uzasadnienie słuszności wychodzenia z uczniami poza izbę lekcyjną znajdziemy w zapisach prawa.

W warunkach i sposobach realizacji fizyki w szkole podstawowej czytamy m.in. „Fizyka jest nauką przyrodniczą, nierozzerwalnie związaną z codzienną aktywnością człowieka. Wiele zagadnień charakterystycznych dla fizyki jest poznawanych i postrzeganych przez uczniów znacznie wcześniej niż rozpoczyna się ich formalna edukacja z tego przedmiotu. (...) Uczenie podstaw fizyki bez nieustannego odwoływania się do przykładów z codziennego życia, bogatego ilustrowania kontekstowego

oraz czynnego badania zjawisk i procesów jest sprzeczne z fundamentalnymi zasadami nauczania tego przedmiotu. (...) Eksperymentowanie, rozwiązywanie zadań problemowych oraz praca z materiałami źródłowymi winny stanowić główne obszary aktywności podczas zajęć fizyki”⁸.

Możliwość przeprowadzenia lekcji w ogródku ułatwia spełnienie wymaganych warunków i sposobów nauczania fizyki. Przecież ogrodnicy prawie w każdym działaniu, czasem podświadomie, wykorzystują wiedzę o zjawiskach fizycznych. Zwrócenie uczniom uwagi na konstrukcję maszyn i narzędzi ogrodniczych, wyjaśnienie zasadności niektórych działań ogrodnika to jest „odwoływanie się do przykładów z codziennego życia”.

Wizyta w ogródku jest pretekstem do postawienia wielu pytań, np. dlaczego paliki i podpory do roślin mają zastrzone końcówki? Jakie prawa fizyki trzeba uwzględnić stawiając wysoką pergolę? Kolejnym przykładem jest przegląd narzędzi ogrodniczych. Czym różni się sekator od nożyc do cięcia gałęzi? Uczniowie od razu dostrzegają różnice w długości uchwytów. Mogą sprawdzić przyczynę grubszych gałęzi. Mogą spróbować kopania dołków łopatką z krótką rączką i kopania szpadłem. Jest to przykład wykorzystania zasady działania maszyn prostych.

Omawiając siły przylegania i siły spójności oraz zjawisko włoskowatości możemy przeprowadzić doświadczenie z umocnieniem końcówki kredy czy sznureczka w wodzie i obserwować zwilżenie sznurka powyżej poziomu wody. Zjawisko to wyjaśnia, dlaczego po siewie rolnik na polu wykonuje tzw. wałowanie gleby, a ogrodnik „uklepuje” zagonek. Ziemia ubita w wierzchniej warstwie jest wilgotna, co sprzyja wschodom.

W ogrodzie możemy zaobserwować inne skutki działania sił przylegania i spójności. Zwróćmy uwagę na zwilżanie liści. Krople wody z liści niektórych roślin (np. kapusty) spływają w postaci kropelek, inne rośliny mają



Foto – Dreamstime

² Podkreślenia w tekście moje

³ Rozporządzenie MEN z dnia 27 sierpnia 2012 r. w sprawie podstawy programowej wychowania przedszkolnego oraz kształcenia ogólnego w poszczególnych typach szkół. Zalecane warunki i sposób realizacji podstawy programowej dla przedszkoli (Dz. U. poz. 977 ze zmianami).

⁴ tamże

⁵ Eko-Szkoła – jak ją zorganizować? - LIBRUS Szkoła

⁶ Scenariusz 5 - Zakładamy ogródek klasowy. | Program dla szkół

⁷ Rozporządzenie Ministra Edukacji z dnia 28 czerwca 2024 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie podstawy programowej wychowania przedszkolnego oraz podstawy programowej kształcenia ogólnego dla szkoły podstawowej, (...) Dz. U. 2024 poz. 996

⁸ tamże



mokre liście. Możemy to sprawdzić polewając ogrodowe roślinki. Stosując opryski ochronne na rośliny ogrodnik dodaje do opryskiwacza np. mydło ogrodnicze, co powoduje zmniejszenie napięcia powierzchniowego.

Rozchodzące się w ogrodzie zapachy lawendy czy innych pachnących ziół dowodzą występowania zjawiska dyfuzji.

Instalacje wodne w ogrodzie, takie jak systemy do podlewania, fontanny, oczka wodne czy konstrukcje opryskiwaczy to przykłady praktycznego zastosowania wiedzy o naczyniach połączonych czy z zakresu ciśnienia hydrostatycznego. Jedną z moich propozycji pracy domowej jest zrobienie zdjęć urządzeń i maszyn rolniczych, w działaniu których stosowane jest prawo Pascala.

Oglądanie kwiatów przez różne barwne filtry wywołuje dużo radości wśród uczniów. Ulubionym ćwiczeniem jest podpalanie suchej trawy, papierków (oczywiście z zachowaniem zasad bezpieczeństwa) za pomocą soczewki o dużej zdolności skupiającej. Dużo emocji wywołuje obserwacja zjawiska tęczy wytworzonej z wykorzystaniem węża ogrodowego.

Jesienne prace są pretekstem do postawienia pytania jakiego materiału należy użyć, aby zabezpieczyć rośliny przed mrozem? Uczniowie poznają stosowane izolatory termiczne w praktyce. Dlaczego w okresie przymrozków sadownicy opryskują wodą kwitnące drzewa? Te przykłady wskazują na praktyczne stosowanie wiedzy o zjawiskach cieplnych.

Oprócz ogródka przy szkołach podstawowych często znajduje się wydzielony plac zabaw dla dzieci. Dla uczniów starszych, oprócz tradycyjnych boisk, znajdują się wydzielone miejsca rekreacyjne wyposażone w urządzenia do ćwiczeń na dworze, takie jak orbitrek, wahadło, rowerek i wiele innych. Wykorzystajmy je w naszej pracy. Ile zabawy może być, jeśli na placu zabaw będziemy sprawdzać zależność okresu drgań huśtawki wahadłowej od jej długości i masy osoby siedzącej na huśtawce. Wykorzystując huśtawkę równoważną działającą na zasadzie dźwigni o równych ramionach i przeznaczoną dla dwóch osób sprawdzimy, jak powinny usiąść osoby o różnych masach ciała. Zaprosimy do doświadczeń młodszych uczniów. W ten dowcipny sposób sprawdzamy prawo dźwigni. Podobnie możemy wykorzystać inny sprzęt znajdujący się w ogródku czy na placu zabaw. Lekcje

w plenerze prowadzone są w atmosferze zabawy i na pewno uczniowie zapamiętają je na długo. Pozytywne emocje sprzyjają zapamiętywaniu.

Ogródek Marysieńki

Przy Szkole Podstawowej im. Marii Skłodowskiej-Curie w Kawęczynie w 2015 r. powstał „Rodzinny ogródek Marysieńki”. Ogródek zbudowano w ramach współpracy szkoły ze stowarzyszeniem „Kawęczyńskie Forum Rodziców”. Stowarzyszenie pozyskało potrzebne środki finansowe uczestnicząc w programie „Wolontariat Rodzinny – lokalnie”. Program ten realizowała Fundacja PZU we współpracy z Akademią Rozwoju Filantropii w Polsce. Byłam koordynatorką tego projektu. Z dotacji zakupiono rośliny, altankę, pergole i orbitrek do ćwiczeń. Wszystkie prace zostały wykonane w ramach wolontariatu. Ogródek funkcjonuje do dziś.

Przy samym wejściu do ogródka pięknie prezentują się róże polskiego hodowcy Stanisława Żyły. Same nazwy róż mają moc dydaktyczną. Są to róże m. in. „Maria Curie”, „Chopin”, „Mikołaj Kopernik” i „Jarocin”⁹. W tym przypadku to nazwy odmian zdecydowały o ich wyborze. Posadzono również wiele bylin, ziół i krzewów, w tym rzadki lawendy i innych ziół.

Przy szkole, w której aktualnie uczyć jest dużo, zazieleniony plac rekreacyjny, i miejsce zabaw dla młodszych. Pozwala to na prowadzenie zajęć poza izbą lekcyjną. Z czego, zwłaszcza wiosną, często korzystamy.

Ograniczona liczba godzin fizyki, pogoda, liczebność oddziałów ogranicza możliwość wyjścia na lekcje do ogródka. Warto jednak korzystać z tej formy zajęć na przykład podczas lekcji powtórzeniowych, czy w sytuacji realizacji nagłych zastępstw. Można zachęcić uczniów do odwiedzania ogródka w czasie przerwy międzylekcyjnej w celu sprawdzenia na żywo występowania omawianych zjawisk.

Wykorzystajmy również fakt, że uczniowie mają okazję, jeśli nie uczestniczyć wprost w pracach ogrodowych, to obserwować prace ogrodnicze w czasie pobytu z rodziną w ogródku działkowym, w czasie wyjazdów wakacyjnych na wieś itp. Oczywiście uczniowie szkół wiejskich mają ułatwiony dostęp do ogrodu. Mają możliwość codziennego obserwowania prac rolnika z użyciem maszyn rolniczych. W trakcie lekcji odwołujemy się do wiedzy pozaszkolnej i doświadczeń uczniów.

W swojej pracy powinniśmy wykorzystywać specyfikę środowiska oraz potrzeby uczniów. Ucząc fizyki w szkołach ponadpodstawowych uwzględniamy specyfikę profilu kształcenia. Trudno nie nawiązywać do poruszanej tu tematyki ucząc fizyki w technikach ogrodniczych, rolniczych itp.

Starajmy się, aby lekcjom fizyki towarzyszyła radość z odkrywania faktu, że każda, nawet banalna czynność może być opisana językiem nauki.

Arleta Biegańska

Szkoła Podstawowa im. Płk. Pil. St. J. Skarżyńskiego w Skarżynie

⁹ Piękne, odporne róże, moja ulubione. Zachęcam miłośników kwiatów do zaproszenia tych róż do swoich ogródków

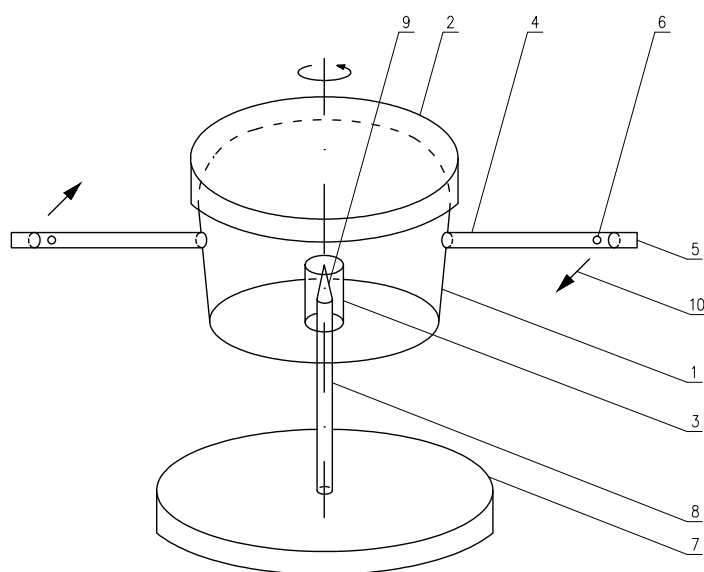
Bezpieczny model silnika odrzutowego na „sodkę” i ocet

Stanisław Bednarek

Nauczyciele fizyki z dużym stażem zawodowym mogą pamiętać okazałych rozmiarów model silnika odrzutowego, produkowany przez Fabrykę Pomocy Naukowych w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku [1]. Ten model składał się z dwóch podzespołów. Pierwszym z nich była rama z dwoma szynami zaopatrzoną na końcu w poprzeczkę do zaczepienia haczyka siłomierza. Drugi podzespół to czterokołowy wózek przystosowany do ustawienia na szynach.

Do wózka była przymocowana komora spalania, dysza wylotowa w kształcie długiej, poziomej rury i zbiornik paliwa. Uruchomienie modelu odbywało się świecą zapłonową od silnika samochodowego, wmontowaną w komorę spalania. Wózek był łączony z ramą za pomocą siłomierza, który pozwalał na pomiar siły ciągu silnika. Praca tego silnika była bardzo efektowna, ale jeszcze bardziej hałaśliwa i niebezpieczna.

Dziś pewnie trudno byłoby znaleźć taki model w jakiejś szkolnej pracowni fizycznej. Ponieważ zjawisko odrzutu jest ważnym tematem, to ta sytuacja stała się zachętą do opracowania innego modelu silnika odrzutowego, który jest łatwy do wykonania z przedmiotów codziennego użytku i co najważniejsze bezpieczny. Dlatego uczniowie mogą z nim samodzielnie eksperymentować bez obaw o wyrządzenie komukolwiek szkody.



Rys. 1. Budowa modelu silnika odrzutowego; 1 – plastikowy przezroczysty pojemnik, 2 – zakrętka lub pokrywka pojemnika, 3 – probówka, 4 – słomka do napojów, 5 – zamknięty koniec słomki, 6 – otwór, 7 – podstawka, 8 – pręt, 9 – ostrze igły lub szpilki, 10 – strumień dwutlenku węgla.

Wygląd zewnętrzny silnika został przedstawiony na rys. 1. Silnik jest bezpieczny m.in. dlatego, że nie zachodzi w nim spalanie i pracuje w temperaturze pokojowej. Zamiast komory spalania w silniku zastosowano okrągły pojemnik 1, wykonany z przezroczystego tworzywa sztucznego i zaopatrzonego w pokrywę lub zakrętkę 2, umożliwiającą jego szczelne zamykanie. Ważne jest, żeby pojemnik był możliwie lekki. Średnica pojemnika powinna wynosić 5-10 cm, a wysokość ok. 5 cm. Do tego celu bardzo dobrze nadaje się pojemnik przeznaczony do zbierania próbek do badań laboratoryjnych, który można kupić w aptece za ok. 2 zł lub pojemnik od produktów spożywczych, np. gotowych zup.

W środku dna pojemnika należy wyciąć okrągły otwór, wcisnąć do niego krótką probówkę 3, skierowaną dnem do góry i krawędź otworu wokół probówki uszczelnić klejem epoksydowym lub silikonem. W górnej części bocznej ścianki pojemnika należy wyciąć dwa umieszczone naprzeciw siebie otworki, wcisnąć w nie końce słomek do napojów 4 lub końce plastikowych rurek o średnicy ok. 4-5 mm i długości ok. 10 cm oraz uszczelnić krawędzie otworów podobnie, jak poprzednio. Końce 5 słomek 4 należy zacisnąć i zakleić, a w pobliżu tych końców w każdej słomce wykonać otworek 6 o średnicy ok. 1 mm. Otworki muszą być skierowane w przeciwne strony, a do ich wykonania można wykorzystać grubą igłę lub koniec nożyczek.

Obecnie dostępne są głównie słomki ekologiczne, wykonane z papieru. Takie słomki szybko rozmiękają i są przeznaczone do jednorazowego użytku. Żeby słomki w silniku można używać wielokrotnie, należy je utrwalić przez posmarowanie z zewnątrz wodoodpornym klejem lub lakierem. Tak przygotowany pojemnik stanowi wirnik silnika, który umieszcza się na podstawce 7 z przymocowaną do niej pionowym prętem 8, zaopatrzonym na górnym końcu w igłę lub szpilkę 9, skierowaną ostrym końcem do góry. Podstawkę 7 i pręt 8 można wykonać z różnych materiałów, np. z drewna, a dolny koniec igły lub szpilki 9 posmarować klejem epoksydowym i włożyć tępa stroną w otworek wywiercony w górnym końcu pręta 9.

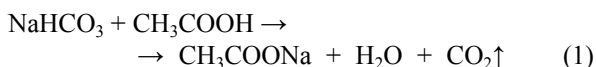
Zeby uruchomić silnik należy do otwartego pojemnika 1 wsypać ok. 2-3 cm³ wodorowęglanu sodu NaHCO₃, dostępnego w sklepach spożywczych, pod nazwą „soda oczyszczana” lub „sodka” (torebka o zawartości 70 g kosztuje ok. 2 zł) i wlać 10-15 ml octu o stężeniu 10% lub 5%. Taki ocet stanowi roztwór kwasu octowego CH₃COOH w wodzie H₂O i jest powszechnie używany do celów spożywczych.

Pojemnik 1 z tymi substancjami trzeba szybko zamknąć zakrętką lub pokrywką 2 i umieścić na ostrzu 9. Z otworków 6 zaczną wypływać strumienie dwutlenku węgla 10 (wzór chemiczny CO₂), skierowane w przeciwne strony. Zgodnie trzecią zasadą dynamiki lub zasadą zachowania



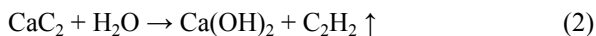
Fot. 1. Wygląd zewnętrzny jednego ze budowanych modeli silnika odrzutowego, w którym wykorzystano pojemnik dostępny w aptekach.

pędu, na końce słomek 4 zadziałają przez to siły reakcji, których moment spowoduje obrót całego wirnika, trwający zwykle kilkadziesiąt sekund. Po ustaniu obrotu można wylać z pojemnika pozostałe produkty reakcji i powtórzyć doświadczenie. Dwutlenek węgla w pojemniku jest wytwarzany zgodnie z reakcją



Jest to reakcja zobojętniania, w wyniku której zostaje wytworzony octan sodu CH_3COONa , stanowiący sól sodową kwasu octowego, woda H_2O i dwutlenek węgla CO_2 , napędzający silnik.

Bardziej dociekliwi lub kreatywni uczniowie mogą wyrazić chęć podjęcia prób z innymi substancjami w celu uzyskania szybszych obrotów wirnika. Niektóre z takich prób są związane z niebezpieczeństwem i mogą być przeprowadzone tylko pod nadzorem nauczyciela lub osoby dorosłej, mającej wiedzę chemiczną. Dla przykładu, zastosowanie pokruszonego karbidu (węglík wapnia CaC_2 , dostępny w sklepach, jako środek do odstraszania kretów i nornic oraz używany podczas spawania gazowego) i wody H_2O spowoduje wydzielanie acetyleny, zgodnie z reakcją



Wirnik będzie obracał się znacznie szybciej, ale acetylen C_2H_2 jest gazem palnym i przy odpowiednim stężeniu z powietrzem tworzy mieszaninę wybuchową. Oprócz tego, reakcja (2) jest egzotermiczna i powoduje silne nagrzewanie się pojemnika, zaś wytwarzany wodorotlenek wapnia Ca(OH)_2 ma właściwości żrące. Podczas przeprowadzonych doświadczeń z tymi substancjami konieczne było użycie rękawic ochronnych, a po kilku próbach nastąpiło rozszczelnienie pojemnika wskutek przegrzania i pęknięcia gwintu.

Zkolei zastąpienie wodorowęglanu sodu NaHCO_3 przez proszek do pieczenia, który też zawiera tę substancję, spowodowało bardzo powolny obrót wirnika. Powód łatwy do wyjaśnienia – zawartość NaHCO_3 w proszku

do pieczenia jest zbyt mała do celów tego doświadczenia. Zadawalających efektów nie dało też zastosowanie pokruszonej kredy, zawierającej węglan wapnia CaCO_3 i octu, a także tabletek musujących, z których wydziela się dwutlenek węgla CO_2 po zalaniu wodą. Tak więc, mieszanina wodorowęglanu sodu NaHCO_3 i octu stanowi optymalny dobór związków chemicznych do napędu silnika, zarówno pod względem bezpieczeństwa, dostępności, ceny i efektywności działania.

Konstrukcja opisanego silnika wykazuje podobieństwo do dwóch innych pomocy naukowych, zaliczanych do tzw. turbin odrzutowych, które były kiedyś produkowane fabrycznie. Są to „młynek parowy” i młynek Segnera [2, 3]. Pierwszy z nich zawierał metalową, płaską puszkę, napełnianą wodą i umieszczaną na łożyskach między ramionami obejmą w kształcie skierowanej poziomo litery U. Puszka była szczelnie zakręcana metalową zakrętką oraz połączona z dwiema rurkami, skierowanymi radialnie i zamkniętymi na końcach, przy których były wykonane otworki, podobnie jak w zbudowanym modelu.

Pod puszką znajdowała się rynienka napełniana denaturatem. Po jego zapaleniu woda w puszcze była doprowadzana do wrzenia, a wytworzona para wypływała przez otworki w rurkach i powodowała obrót puszki w wyniku zjawiska odrzutu. Młynek Segnera zawierał zamkniętą dnem, pionową rurę, która mogła obracać się na łożyskach wokół swojej osi. Ponad dnem z rurą łączyły się cztery radialnie skierowane rurki, rozmieszczone co 90° , podobne jak w „młynku parowym”. Przez górny, otwarty koniec wlewało się do rury wodę, która wypływała pod własnym ciężarem przez otworki w końcach rurek i w wyniku odrzutu powodowała obrót rury. Następnie woda spływała do cylindrycznego naczynia w dolnej części młynka.

Jeżeli któryś z opisanych młynków przetrwał i nadaje się do użytku, to warto go wykorzystać. Zjawisko odrzutu ma ważne znaczenie nie tylko w technice, umożliwiając m.in. pracę silników rakietowych i niektórych silników lotniczych. Również pewne grupy zwierząt wykorzystują to zjawisko do poruszania się. Tak czynią jamochłony, które najpierw zasysają wodę do jamy chłono-trawiającej, a następnie kurczą się i wyrzucają wodę same poruszają się w przeciwną stronę. [4]. Zjawisko odrzutu było znane już w starożytnej Grecji, o czym świadczy tzw. bania Herona, która jest najstarszym pierwowzorem turbiny odrzutowej i młynka parowego.

Stanisław Bednarek
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Uniwersytetu Łódzkiego

LITERATURA

- [1] T. Potocki (red.), Katalog pomocy naukowych i sprzętu szkolnego, Państwowe Zakłady Wydawnictw Szkolnych, Warszawa 1963.
- [2] J. Kowalewski (red.), Katalog pomocy naukowych i sprzętu szkolnego, Zrzeszenie Przemysłu Pomocy Naukowych i Zaopatrzenia Szkół Biofiz, Warszawa 1985.
- [3] Bożena Pędzisz, Instrukcje do podstawowych przyrządów w Pracowni Dydaktyki Fizyki, Wydawnictwa Wyższej Szkoły Pedagogicznej w Opolu, Opole 1985.
- [4] Paul G. Hewitt, Fizyka wokół nas, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2015.

Powtórz, utrwal, poszerz wiedzę

Zadania z fizyki. Cz. 6.

Waldemar Reńda

Zadanie 73. * (gravitacja)

Wiedząc, że $M_{\text{Ziemi}} = 81 M_{\text{Księżycza}}$ oraz że $r_K = 60 R_Z$, oblicz, w jakiej odległości na osi Ziemia-Księżyc mie-
rzonej w R_Z znajduje się punkt, w którym natężenie pola
grawitacyjnego tego układu ciał jest równe zero. Jaką
wartość ma w tym punkcie potencjał tego pola? Jaka jest
wartość tego potencjału w otoczeniu tego punktu? Jaką
rolę w związku z tym może pełnić ten punkt w przypadku
lotów na Księżyc?

*Odp.: Ten punkt jest jakby „przełączką” (siodłem) tego
pola i przez niego przebiega najbardziej ekonomiczna
trajektoria statków kosmicznych udających się w pobliże
Księżycza.*

Zadanie 74. * (gravitacja, energia potencjalna i kinetyczna satelity)

a) Oblicz wartość pierwszej i drugiej prędkości kos-
micznej dla Księżycza i porównaj z wartościami tych prę-
dkości dla Ziemi. Porównaj energię kinetyczną z energią
potencjalną satelity krążącego po orbicie kołowej. Jaka
jest wówczas całkowita energia mechaniczna tego satelity?

(Odp.: $E_k = \frac{1}{2}|E_p|$, $E_c = -E_k$).

b) Oblicz pracę potrzebną do zmiany orbity satelity
o masie m z orbity o promieniu $r_2 > r_1$.

c) Jeżeli gwiazda powstaje z rozległego obłoku pyłowe-
go i nie posiada planet, to jaka część energii potencjalnej
tego obłoku powinno zamienić się na energię wewnętrzną
(cieplną) powstałej gwiazdy? (*Odp.: $\frac{1}{2}$.*)

d) Oszacuj średnią wartość temperatury, jaką powinna
uzyskać gwiazda przy założeniu, że gwiazda składa się
z wodoru, ma masę równą masie Słońca oraz że niewielka
część energii została wypromieniowana w czasie jej twor-
zenia.

Zadanie 75. * (kosmologia, zasada zachowania momentu pędu)

Czarną dziurę definiujemy jako obiekt, dla którego
prędkość ucieczki ma wartość większą lub równą szybko-
ści światła. Oblicz promień czarnej dziury o masie równej
masie Słońca. Oblicz jej gęstość i porównaj z gęstością
jądra atomowego. Przyjmij masę Słońca równą 333000
mas Ziemi ($\sim 2 \cdot 10^{30}$ kg).

Oblicz minimalny promień obiektu tworzącego czarną
dziurę, przyjmując, że jest on gwiazdą neutronową. Ob-
licz jego masę i porównaj z masą Słońca. Przyjmij, że po-
jedynczy neutron zajmuje przestrzeń równą $(1,3 \cdot 10^{-15} \text{ m})^3$.

Odp.: $R = 33 \text{ km}$, $m = 11 M_S$.

Przyjmując, że gwiazda tworząca pulsar traci ok. po-
łowy swej masy, otrzymujemy $m = 20 M_S$, co jest zgodne
z obliczeniami astrofizyków.

Zadanie 76. * (kosmologia, zasada zachowania momentu pędu)

Uważa się obecnie, że pulsar jest gwiazdą neutronową
powstałą w wyniku kompresji jądra masywnej gwiazdy
w czasie jej wybuchu (zjawisko „supernowej”)¹. Oblicz
promień i okres² obiegu pulsara, który powstałby z jądra
o masie równej masie Słońca i okresie obiegu równym
okresowi obrotu Słońca – tj. ok. 26 dni. Przyjmij, że gę-
stość jądra gwiazdy jest jednakowa w całej jego objętości
i równa 100 g/cm^3 oraz załóż, że nie zachodzą procesy
zmieniające moment pędu tego jądra.

Zadanie 77. * (fizyka a kosmologia)

a) Jakich informacji o gwiazdzie może dostarczyć
emitowane przez nią światło (jego widmo)? Jakie elemen-
ty widma dostarczają tych informacji i dlaczego?

*Odp.: O temperaturze – natężenie poszczególnych barw
w widmie (prawo Wiena); składzie chemicznym fotosfery
– rozkład i natężenie linii widmowych (analiza widmowa);
ruchu gwiazdy względem obserwatora – dopplerowskie
przesunięcie linii widmowych; rotacji – poszerzenie linii
widmowych; występowanie układu podwójnego i okres
obiegu jego składników – okresowe przesunięcia dopple-
rowskie linii widmowych itp.*

b) Mówi się, że promieniowanie reliktowe ma tempe-
raturę 4K. Oblicz λ_{max} dla tej temperatury. *Odp.: 0,75 mm.*
Jaką temperaturę wskaże termometr umieszczony w próż-
ni na Ziemi, a jaka w próżni kosmicznej?

c) Obłoki wodoru znajdujące się w przestrzeni kos-
micznej emitują falę o długości 21cm. Wytwarzana jest
ona przy zmianie orientacji spinu elektronu. Oblicz ΔE tej
zmiany.

Zadanie 78. * (siły bezwładności w ruchu ciał niebieskich)

Oblicz i porównaj siły bezwładności, jakie działają na
ciebie w związku z:

a) ruchem obrotowym Ziemi,

b) jej ruchem orbitalnym,

c) ruchem Słońca dookoła centrum Galaktyki. Przyjmij
 $v = 250 \text{ km/s}$ oraz $r = 10000$ parseków. (1 parsek to odle-
głość, z której jednostkę astronomiczną widać pod kątem
1 sekundy kątowej. Jednostka astronomiczna to średnia

¹ Supernowa powstaje z gwiazd o masach kilkanaście razy większych od masy Słońca.

² Będzie to wartość szacunkowa

odległość Ziemi od Słońca. Okres obrotu Ziemi dookoła osi oraz czas jednego pełnego obiegu Ziemi dookoła Słońca odszukaj w tablicach lub w encyklopedii.)

Zadanie 79. * (przyspieszenie dośrodkowe w ruchu ciał niebieskich)

Oblicz i porównaj przyspieszenie dośrodkowe ruchu Księżyca dookoła Ziemi z przyspieszeniem ruchu Ziemi dookoła Słońca. Jaki stąd wynika wniosek odnośnie kształtu toru Księżyca względem Słońca? Dane:

Średnia odległość Księżyca od Ziemi: 3844000 km,

Średnia odległość Ziemi od Słońca: 149597870 km,

Okres obiegu Księżyca dookoła Ziemi: 27,3217 dob (po 86400 s),

Okres obiegu Ziemi dookoła Słońca: 365,2564 dob.

Odp.: $a_d \text{ Księżyca} = 0,0027233 \text{ m/s}^2$, $a_d \text{ Ziemi} = 0,0059 \text{ m/s}^2$. Ponieważ $a_K < a_Z$, więc torem tym jest krzywa wypukła.

Zadanie 80. * (prawo Stefana-Boltzmanna)

Oblicz temperaturę powierzchni Księżyca oświetlonej prostopadłe padającym promieniowaniem Słońca, jeżeli albedo Księżyca $A = 0,07$. (Oznacza to, że powierzchnia Księżyca odbija 7% padającego promieniowania.) Przyjmij wartość stałej słonecznej $C = 1368 \text{ W/m}^2$ (energia promieniowania padającego na 1 m^2 prostopadłej do niego powierzchni w czasie 1 s).

Odp.: $T = 387 \text{ K}$ (114°C). **Uwaga!** Do takiej temperatury może się ogrzać pokryta sadzą powierzchnia ciała także na powierzchni Ziemi, jeżeli ustawimy ją prostopadłe do padających promieni słonecznych (zob. radiatory).

Jak powinniśmy ubierać się w zimie, by ochronić ciało od wyziębienia, a jak w lecie, by ochronić je od przegrzania? (W samochodzie zaparkowanym w lecie w słońcu temperatura dochodzi do 70°C ! Uwaga na dzieci i zwierzęta pozostawiane w samochodach!)

Zadanie 81. * (parcie wywołane promieniowaniem)

Wiemy, że fotony wywołują nacisk. Oblicz nacisk fotonów słonecznych działających na Księżyc.

Rozwiązanie: Nacisk wywołany promieniowaniem fotonowym Słońca można obliczyć, korzystając z faktu, iż foton zachowuje się tak, jakby miał pęd o wartości $p = h/\lambda = hf/c$. Wiemy też, że ma on energię $\epsilon = hf$. Zatem $p = \epsilon/c$. Zamiast energii jednego fotonu (ϵ) można wstawić energię wszystkich fotonów, która jest równa stałej słonecznej* (C) na orbicie Księżyca i jest ona mniej więcej równa stałej dla Ziemi, czyli ok. $1370 \text{ J/m}^2\text{s}$. Zatem całkowity pęd fotonów padających na 1 m^2 powierzchni Księżyca $p = C/c$. Z II zasady dynamiki Newtona wiemy, że siła nacisku wywołana zmianą pędu padających cząstek równa jest $\Delta p/\Delta t$. Ponieważ grunt Księżyca niemal w całości absorbuje promieniowanie fotonowe, zatem zmiana pędu tych cząstek jest równa ich pędowi. Tak więc parcie wywołane tym promieniowaniem i działające na całą Księżyc*, obliczymy ze wzoru: $F = S \cdot C/c = \pi R^2 C/c$.

(Sprawdź analizą wymiarową, czy wzór ten jest poprawny!)

Wstawiając dane, otrzymamy (w SI): $F = \pi \cdot 1738000^2 \cdot 1370/3 \cdot 10^8 \text{ N} = 4,33 \cdot 10^7 \text{ N}$, co odpowiada (na Ziemi) ciężarowi ciała o masie 44 tys. ton.

Jak widać jest to niebagatelna wartość! Podobne obliczenie można wykonać dla Ziemi, ale problem jest z uśrednieniem albedo dla danej półkuli.

Np. na pow. 1 km^2 powierzchni pokrytej śniegiem** i ustawionej prostopadłe do padającego promieniowania (dotyczyć to może np. alpejskiego lodowca), siła ta będzie miała wartość równą $2 \cdot 10^6 \cdot 1370/3 \cdot 10^8 \text{ N}$, czyli ok. 9 N, a więc stosunkowo niewiele.

Jeżeli więc chcielibyśmy do celów podróży międzygwiazdowych używać żagli fotonowych, to powinny one być ogromne, co zwiększyłoby masę statku, a równocześnie zmniejszyło uzyskiwane przyspieszenie. Natomiast taki napęd byłby bezużyteczny w przestrzeni kosmicznej odległej od poszczególnych gwiazd, gdyż stała słoneczna (natężenie promieniowania gwiazdy) maleje z kwadratem odległości od niej.

* Stała słoneczna podaje wartość energii padających fotonów na 1 m^2 powierzchni ustawionej **prostopadłe** do tego promieniowania poza atmosferą planet. Obliczając zatem parcie, bierzemy pod uwagę nie powierzchnię półkuli, ale największą powierzchnię jej przekroju.

Dodam, że siły te wywołują m.in. rozwijanie warkocza komety ustawionego przeciwnie do kierunku skąd padają promienie słoneczne. „Pomaga” im również tzw. wiatr słoneczny, w skład którego wchodzi głównie protony.

** W tym przypadku niemal 100% fotonów ulega odbiciu. Zmiana ich pędu jest wówczas dwa razy większa niż w przypadku, gdy fotony te są pochłaniane.

Zadanie 82. * (dokładność pomiaru)

W angielskim roczniku (kalendarzu) z 1629 r jest informacja, że „stosunek rozmiarów Ziemi do rozmiarów całego świata jest jak 1 do 115 623 400 095 703”. Dlaczego ta wartość powinna wydawać się mało prawdopodobna? Jaki obiekt astronomiczny ma podobne rozmiary? Z jaką dokładnością podaje się obecnie tę wartość?

Zadanie 83. ** (aerostatyka)

Wiedząc, że średnia wartość ciśnienia atmosferycznego na poziomie morza i na 45° szer. geogr. $p_0 = 101325 \text{ Pa}$, oblicz masę atmosfery Ziemi (odp.: rzędu 10^{18} kg) i porównaj z masą Ziemi. Jak fakt istnienia lądów wpłynie na wynik? Oszacuj wartość powstałą z tego powodu różnicy wyniku, wiedząc, że lądy zajmują 1/3 powierzchni kuli ziemskiej, a średnią wysokość lądów ocenia się na 800 m.

Zadanie 84. * (niepewność pomiaru)

Długość 1m w czasie pomiarów południka zerowego Ziemi wyznaczono z dokładnością do 0,2mm. Z jaką dokładnością wyznaczono długość południka zerowego? Z jaką dokładnością można było wówczas wyznaczyć średnią wartość promienia Ziemi i jej objętość?

Wskazówka: $\Delta l/l = 0,2\text{mm}/1000\text{mm}$. Ustalono wówczas, że długość południka równa jest 40 000 000 m. Niepewność względną objętości obliczamy ze wzoru: $\delta_V = 3\Delta V/V$.



Nauczanie fizyki w szkołach w Ukrainie

Oleksandra Liashenko, Stanisław Bednarek

Według informacji podanych przez resort edukacji i dziennik „Rzeczpospolita” do polskich szkół podstawowych i ponadpodstawowych w czerwcu 2024 r. uczęszczało ok. 150 tys. uczniów z Ukrainy. Po rozpoczęciu roku szkolnego 2024/25 ta liczba wzrosła o ok. 20 tys. [1, 2]. Starsze roczniki tych uczniów zaczęły naukę fizyki w Ukrainie i kontynuują w Polsce, a pozostałe rozpoczną naukę tego przedmiotu w najbliższych latach. Jak powszechnie wiadomo, fizyka nie należy do łatwych przedmiotów nauczania. Z tych powodów dla wielu polskich nauczycieli może być pomocne poznanie zarysu systemu edukacji i głównych treści nauczania fizyki w Ukrainie.

Zarys systemu szkolnictwa

Obecnie działający w Ukrainie system szkolnictwa w zakresie podstawowym i średnim jest trójstopniowy i przypomina polski system sprzed likwidacji gimnazjów. Do tego systemu należą:

1. Czteroletnia szkoła podstawowa.
2. Siedmioletnia szkoła średnia w tym:
 - a) szkoła średnia niższa, trwająca 5 lat i nazywana też gimnazjum podstawowym,
 - b) szkoła średnia wyższa, która jest odpowiednikiem szkoły ponadgimnazjalnej i nauka w niej trwa 2 lata.

Od 2027 r. nauka w szkole średniej wyższej ma zostać wydłużona do 3 lat. Łączny czas nauki na podanych trzech stopniach kształcenia wynosi obecnie 11 lat [3].

Dzieci rozpoczynają naukę w szkole podstawowej w wieku sześciu lub siedmiu lat. Od trzeciego roku życia dzieci mogą korzystać z edukacji przedszkolnej. Pierw-

sze dwie klasy szkoły podstawowej mają na celu adaptację uczniów do dalszego funkcjonowania w systemie edukacyjnym. Lekcje w pierwszej klasie trwają 30 minut, a w następnych klasach 45 minut. Nauka w szkołach odbywa się najczęściej przez pięć dni w tygodniu i z powodu działań wojennych w wielu miejscach jest prowadzona zdalnie. Dominujące przedmioty nauczania w szkole podstawowej to: język ukraiński, matematyka, wychowanie fizyczne, język angielski i ogólna wiedza o świecie. Szkoła podstawowa kończy się egzaminem państwowym z języka ukraińskiego i matematyki.

W szkole średniej niższej odbywa się nauczanie takich przedmiotów jak: historia, język ukraiński, matematyka, informatyka, języki obce, fizyka, chemia, biologia, geografia, literatura światowa, podstawy wiedzy o zdrowiu oraz o sztukach pięknych i wychowanie fizyczne. Oprócz klas o profilu ogólnym są też klasy z poszerzonym programem nauczania: biologii, geografii, informatyki, matematyki, literatury światowej, fizyki i chemii. Realizacja poszerzonych programów nauczania wymienionych przedmiotów odbywa się w klasach 8 i 9, czyli w dwóch ostatnich klasach szkoły średniej niższej.

Na etapie szkoły średniej wyższej jest możliwe zróżnicowanie kształcenia dzięki temu, że działają szkoły, w których w szerszym zakresie są nauczane przedmioty o charakterze humanistycznym, ścisłym lub technicznym. Nauka w szkołach, realizujących szerszy zakres przedmiotów technicznych umożliwia przygotowanie do planowanego wyboru zawodu.

Oprócz ogólnokształcących szkół dziennych na tym etapie nauczania działają też szkoły wieczorowe. Ukończenie średniej szkoły wyższej pozwala na uzyskanie tzw. pełnego wykształcenia średniego. Wszystkich uczniów,

kończących średnią szkołę wyższą, obowiązuje niezależna ocena zewnętrzna. Oceny dokonuje Ukraińskie Centrum Oceny Jakości Kształcenia przy użyciu standaryzowanego testu, w którym obowiązkowymi przedmiotami są język ukraiński i literatura.

Oprócz tego uczniowie mogą wybierać przedmioty dodatkowe, które chcą zdawać podczas tego testu. Wybór zależy najczęściej od kierunku planowanych studiów. Liczba wybranych przedmiotów nie może przekroczyć czterech. Pozytywny wynik tej oceny zostaje potwierdzony otrzymaniem świadectwa dojrzałości, uprawniającego m.in. do starania się o przyjęcie na studia. Wyższe uczelnie państwowe, podlegające Ministerstwu Oświaty i Nauki Ukrainy, przyjmują kandydatów na studia na podstawie liczby punktów uzyskanych podczas oceny zewnętrznej. Każda uczelnia ma swobodę w zakresie ustalania minimalnej liczby punktów niezbędnych do przyjęcia.

Program nauczania fizyki

Fizyka jest jednym z obowiązkowych przedmiotów nauczania w ukraińskich szkołach. Jego realizacja rozpoczyna się w klasie siódmej, trwa przez trzy lata i umożliwia zapoznanie uczniów z podstawami tej nauki. Program nauczania fizyki przewiduje zdobywanie wiedzy na podstawie podręczników, obserwacji i doświadczeń, a także nabywanie umiejętności jej praktycznych zastosowań do rozwiązywania zadań obliczeniowych, przeprowadzania samodzielnych eksperymentów i do realizacji projektów edukacyjnych.

Obowiązujący wszystkich uczniów Program Nauczania Fizyki znajduje się na stronie Ministerstwa Edukacji i Nauki Ukrainy [4]. Poszczególne działy programu realizowane w kolejnych klasach i liczby godzin przeznaczone na ich realizację są zawarte w tab. 1.

Z danych zamieszczonych w tej tabeli wynika, że program nauczania uwzględnia najważniejsze działy fizyki klasycznej z elementami fizyki jądrowej, mającymi praktyczne znaczenie w energetyce. Wszystkie działy programu są rozwinięte przez podanie szczegółowych treści nauczania, osiągnięć uczniów oraz działań praktycznych, wskazanych podczas realizacji tych działów i prowadzących do zamierzonych osiągnięć.

Działania praktyczne mają formę doświadczeń pokazowych, ćwiczeń laboratoryjnych i projektów edukacyjnych. Przykład takiego rozwinięcia działu „Pole magnetyczne”, realizowanego w klasie 9 jest podany w tab. 2.

Realizacja programu

Liczby godzin przeznaczonych na realizację poszczególnych działów programu nauczania wymienionych w tab. 1 nie są sztywno ustalone. Ze względu na potrzebę uwzględnienia dostępnych metod i uwarunkowań dydaktycznych, nauczyciel ma prawo samodzielnie zmienić te liczby. Może też zmienić kolejność realizacji działów. Musi być tylko zachowana ogólna liczba godzin przewidzianych w programie na daną klasę. Ponadto, w każdym roku nauczyciel ma do dyspozycji cztery godziny rezerwowe, przeznaczone na lekcje z fizyki.

Po rozpoczęciu wojny w dniu 22 lutego 2022 r. postanowiono przeprowadzać Test Niezależnej Oceny Zewnętrznej w formie zdalnej. Ta forma testu była dostępna również dla uczniów, którzy jako dzieci uchodźców znaleźli się poza granicami Ukrainy. W Polsce zdanie tego testu było uznawane za uzyskanie świadectwa dojrzałości i umożliwiało staranie się o przyjęcie na wyższą uczelnię.

Ogólnie można przyjąć, że większość działów „Programu nauczania fizyki” w Ukrainie jest podobna lub nawet bardziej obszerna, niż odpowiednie działy w „Podstawach programowych” w Polsce [5]. Podobna jest też struktura celów nauczania, w której występują trzy zakresy, nazywane inaczej komponentami, takie jak: wiedza i dwa rodzaje umiejętności. Pierwszy z tych rodzajów, można nazwać umiejętnościami podstawowymi, a drugi umiejętnościami bardziej zaawansowanymi lub kompetencjami.

Umiejętności podstawowe polegają na wykorzystaniu wcześniej zdobytej wiedzy do rozwiązywania zadań i wykonywania doświadczeń bezpośrednio związanych z tematami poprzednich lekcji. Umiejętności bardziej zaawansowane, tzw. komponent wartości, wymagają poszerzenia i przetworzenia wcześniej zdobytej wiedzy i umiejętności w celu rozwiązywania nowych, często interdyscyplinarnych problemów. Dla przykładu, żeby ocenić „znaczenie pola magnetycznego Ziemi dla funkcjonowania organizmów żywych” (zob. tab. 2, nr 3) jest niezbędne poszerzenie wiedzy zdobytej na wcześniejszych lekcjach o informacje z geofizyki i astrofizyki (na temat promieniowania kosmicznego) oraz z biologii (o funkcjonowaniu organizmów żywych i ich wrażliwości na promieniowanie).

Nauczycielom pozostawia się znaczną swobodę w doborze metod, środków i organizacji lekcji z fizyki. Zwykle na początku semestru odbywają się zajęcia o charakterze

Tabela 1. Podział materiału nauczania fizyki i czas przeznaczony na jego realizację.

Nr	Klasa	Liczba godzin tygodniowo	Działy programu
1	7	2	Fizyka jako nauka przyrodnicza, Poznanie przyrody, Ruch mechaniczny, Oddziaływanie ciała, Siła, Praca mechaniczna i energia
2	8	2	Zjawiska cieplne, Zjawiska elektryczne, Prąd elektryczny
3	9	3 pierwszy semestr 2,5 drugi semestr	Zjawiska magnetyczne, Zjawiska świetlne, Fale mechaniczne i elektromagnetyczne, Fizyka atomu i jądra atomowego, Podstawy fizyczne energetyki jądrowej, Ruch i oddziaływania, Zasady zachowania

Źródło [4], tłumaczenie i opracowanie graficzne autorzy.

Tabela 2. Zestawienie szczegółowych treści nauczania i osiągnięć uczniów na przykładzie działu „Zjawiska magnetyczne”.

9 klasa		
Nr	Zjawiska magnetyczne	
	Osiągnięcia ucznia	Treści szczegółowe
1	W zakresie wiedzy i rozumienia (komponent wiedzy): • rozumie mechanizmy oddziaływania magnetycznego, indukcji elektromagnetycznej, lewitacji magnetycznej • rozumie materialność pola magnetycznego oraz hipotezę Ampère’a • zna pojęcie i formułuje definicję wielkości fizycznej indukcja pola magnetycznego i jej jednostki • wyjaśnia: doświadczenia Oersteda, Faradaya, zasadę działania elektromagnesu, silnika elektrycznego, przyrządów pomiarowych • zna przejawy działania pola magnetycznego Ziemi	Tematy: 1. Zjawiska magnetyczne, doświadczenie Oersteda 2. Pole magnetyczne 3. Pole magnetyczne przewodnika z prądem, oddziaływanie pola magnetycznego na przewodnik z prądem 4. Indukcja pola magnetycznego, siła elektrodynamiczna 5. Właściwości magnetyczne substancji i ich zastosowanie 6. Hipoteza Ampère’a 7. Magnesy stałe, oddziaływanie magnesów, pole magnetyczne Ziemi 8. Elektromagnesy, lewitacja magnetyczna 9. Silniki elektryczne, głośniki 10. Przyrządy pomiarowe elektryczne 11. Zjawisko indukcji elektromagnetycznej, doświadczenia Faradaya, prąd indukcyjny 12. Generatory prądu indukcyjnego, przemysłowe źródła energii elektrycznej 13. Prace laboratoryjne: 14. Budowa i testowanie elektromagnesu 15. Obserwacja zjawiska indukcji elektromagnetycznej 16. Doświadczenia pokazowe: 17. Magnesy stałe 18. Konfiguracje pól magnetycznych 19. Pole magnetyczne Ziemi 20. Doświadczenie Oersteda 21. Elektromagnes 22. Oddziaływanie pola magnetycznego na prąd elektryczny 23. Silnik elektryczny 24. Zjawisko indukcji elektromagnetycznej 25. Generatory prądu indukcyjnego
2	W zakresie umiejętności (komponent działań): • stosuje wzór na siłę elektrodynamiczną podczas rozwiązywania różnych typów zadań • przedstawia graficznie pole magnetyczne • określa kierunki wektora indukcji pola magnetycznego, siły elektrodynamicznej i prądu indukcyjnego • konstruuje elektromagnes.	
3	W zakresie oceny (komponent wartości): • ocenia znaczenie pola magnetycznego Ziemi dla funkcjonowania organizmów żywych • ocenia ważność, zalety i wady rozwoju różnych kierunków elektroenergetyki • docenia rolę wybitnych uczonych w rozwoju wiedzy o elektromagnetyzmie.	
4	Projekty edukacyjne i ich obrona	
5	Proponowane obszary zagadnień przekrojowych: • ćwiczenia sytuacyjne i zadania dotyczące wpływu pól magnetycznych • zasady bezpieczeństwa przy eksploatacji urządzeń gospodarstwa domowego, silników elektrycznych itp.	

Źródło [4], tłumaczenie i opracowanie graficzne autorzy.

organizacyjnym, podczas których uczniowie są informowani, czego będą się uczyli, jakie będą tematy zajęć praktycznych, z jakich materiałów dydaktycznych i przyrządów będą korzystali oraz jakie będą tematy projektów edukacyjnych. Zapoznają się również z zasadami bezpieczeństwa podczas używania przyrządów i wykonywania doświadczeń z działów fizyki realizowanych w danym semestrze.

Ważną rolę w nauczaniu fizyki odgrywają projekty edukacyjne. Tematy tych projektów są podawane zwykle na początku realizacji danego działu programu, a także umieszczane w podręcznikach. Ma to na celu zapewnienie uczniom odpowiedniej ilości czasu na zebranie mate-

riałów i ich wykonanie. Na ostatnich zajęciach z danego działu odbywa się obrona projektów, polegająca na ich prezentacji i dyskusji.

W celu utrwalania i poszerzania wiedzy zdobytej podczas lekcji oraz rozwoju umiejętności są zdawane prace domowe, które polegają na udzieleniu odpowiedzi na pytania, dotyczące tematów omawianych na lekcjach, rozwiązywaniu zadań, a czasem także na przeprowadzaniu obserwacji i doświadczeń. Osiągnięcia uczniów są sprawdzane przy użyciu samodzielnie pisanych, bieżących prac kontrolnych. Na zakończenie semestru uczniów obowiązuje tzw. semestralna praca kontrolna, dotycząca wszystkich tematów zrealizowanych w tym semestrze.

W pracach kontrolnych są stosowane pytania otwarte, pytania zamknięte, testy wyboru i zdania. Ilość tych środków kontroli w danej pracy bywa różna i zależy od specyfiki działu programu nauczania. Dlatego w niektórych pracach kontrolnych mogą być tylko same pytania, a w innych same zadania obliczeniowe. Z powodu wojny lekcje i prace kontrolne często odbywają się online, głównie na platformie Google Classroom [6].

Podczas zajęć praktycznych są wykorzystywane specjalnie w tym celu napisane zbiory zadań oraz zeszyty do prac laboratoryjnych. Przykłady tego rodzaju publikacji przedstawiają fot. 1 i 2 [7, 8]. Zeszyty do prac laboratoryjnych są wykorzystywane m.in. w ten sposób, że nauczyciel pokazuje doświadczenie i wykonuje pomiary. Uczniowie obserwują wskazania przyrządów, zapisują wyniki pomiarów w odpowiednich tabelkach tych zeszytów. Następnie wykorzystują wiedzę zdobytą wcześniej podczas teoretycznej części zajęć oraz zapisane wyniki pomiarów do przeprowadzenia obliczeń, żeby na podstawie końcowych wyników obliczeń wyciągnąć wnioski oraz dokonać podsumowania. W miarę dostępnych obecnie możliwości uczniowie wykorzystują też zeszyty do prac laboratoryjnych w celu zapisywania i opracowywania wyników doświadczeń przeprowadzanych samodzielnie.

Zalecane jest również urozmaicenie nauczania niestandardowymi lekcjami, np. w formie wycieczek, dyskusji na tematy interdyscyplinarne związane z fizyką oraz wykonywanie doświadczeń grupowych i gier interaktywnych o tematyce fizycznej. Uczniowie interesujący się fizyką i mający odpowiednie predyspozycje do jej uczenia się są zachęceni do dalszego rozwoju w tym kierunku, m.in. przez udział w konkursach o różnym stopniu trudności i zasięgu oraz w olimpiadzie fizycznej. Zawody tej olimpiady odbywają się na czterech etapach. Są to kolejno etapy: szkolny, miejski lub powiatowy, obwodowy (wojewódzki) i finałowy (ogólnoukraiński). Spośród uczniów, mających najlepsze wyniki w czwartym etapie jest wybierana drużyna, która następnie bierze udział w Międzynarodowej Olimpiadzie Fizycznej. W celu lepszego przygotowania dla tej drużyny są organizowane obozy i szkolenia.

Podsumowanie

Oprócz konkursów organizowanych przez władze oświatowe, ukraińscy nauczyciele podejmują też własne inicjatywy w celu poprawy wyników nauczania oraz poszukiwania uczniów zdolnych i zainteresowanych fizyką. Jedną z nich jest interesujące i udane przedsięwzięcie grupy nauczycieli zatrudnionych w Fizyczno-Matematycznym Liceum przy Uniwersytecie Lwowskim im. Iwana Franki, które polegało na zorganizowaniu dość trudnego konkursu fizycznego. Początkowo był to konkurs dla uczniów z Ukrainy [9]. Wkrótce nauczyciele zaproponowali rozszerzenie tego konkursu i udział w nim uczniów z Polski. Dzięki temu polscy uczniowie w 2003 r. po raz pierwszy wzięli udział w tym konkursie, a jego nazwa została zmieniona i przez pewien czas był to Polsko-Ukraiński Konkurs Fizyczny „Lwiatko” [10]. W następnych latach konkurs stał się znany i obecnie też jest organizowany



Fot. 1. Wygląd pierwszej strony okładki zbioru zadań z fizyki dla klasy 7, źródło [7].



Fot. 2. Wygląd pierwszej strony okładki zeszytu do prac laboratoryjnych z fizyki w klasie 7, źródło [8].

w wielu polskich szkołach przez Fundację Akademia Młodych Fizyków [11, 12].

Kończąc pozostaje mieć nadzieję, że informacje zwarte w tym artykule pozwolą nauczycielom nieco lepiej poznać i zrozumieć przygotowanie uczniów z Ukrainy oraz okazać się pomocne w osiągnięciu celów nauczania fizyki zawartych w Podstawie Programowej, obowiązującej w polskich szkołach. Ponieważ znaczna liczba tych uczniów po ukończeniu szkół średnich rozpoczyna studia wyższe w Polsce, to lepsze przygotowanie może im ułatwić kształcenie na kierunkach ścisłych i technicznych, na których powinni zaliczyć fizykę [13, 14].

Oleksandra Liaschenko, Stanisław Bednarek,
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Łódzkiego

LITERATURA

- [1] <https://www.rp.pl/edukacja-i-wychowanie/art41280451-ilu-uczniow-z-ukrainy-jest-w-polskim-systemie-edukacji-nowe-dane>, (dostęp: 21.03 2025).
- [2] <https://wszystkoonajwazniejsze.pl/pepites/ile-dzieci-i-mlodziezy-z-ukrainy-uczy-sie-w-polskich-szkolach/>, (dostęp: 21.03 2025).
- [3] <https://www.nowaera.pl/system-szkolnictwa-i-podstawy-programowe-w-ukrainie>, (dostęp: 21.03 2025).
- [4] https://uk.wikipedia.org/wiki/Освіта_в_Україні, (dostęp: 21.03 2025).
- [5] <https://www.gov.pl/web/edukacja/uszczuplone-podstawy-programowe--rozporzadzenia-podpisane> (dostęp: 21.03 2025).
- [6] <https://mon.gov.ua/osvita-2/zagalna-serednya-osvita/vidpovidi-na-poshireni-zapitannya-shchodo-organizatsii-osvitnogo-protsesu-v-umovakh-voennogo-stanu>, (dostęp: 21.03 2025).
- [7] <https://books-shop.com.ua/product/fizyka-7-klas-zbirnyk-zadach/>, (dostęp: 21.03 2025).
- [8] <https://www.ranok.com.ua/info-fizika-7-klas-zosit-dlia-laboratornix-robit-44798.html>, (dostęp: 21.03 2025).
- [9] <https://lwiatko.org/o-konkursie#informacje>, (dostęp: 22.03 2025).
- [10] https://pl.wikipedia.org/wiki/Konkurs_Fizyczny_Lwiatko, (dostęp: 22.03 2025).
- [11] W. Zawadzki, Polsko-Ukraiński Konkurs Fizyczny „Lwiatko”, „Foton” Pismo dla nauczycieli i studentów fizyki oraz uczniów, nr 123, Zima 2013, s. 62.
- [12] <https://famf.org.pl/>, (dostęp: 22.03 2025).
- [13] O. Liaschenko, S. Bednarek, Nadzieje i przyczyny niepowodzeń, Studenci ukraińscy w polskich uczelniach, „Forum Akademickie, Ogólnopolski miesięcznik społeczności akademickich”, Roczn. XXVIII, Nr 5, (366), 2024, s. 24-27.
- [14] O. Liaschenko, S. Bednarek, Niepowodzenia studentów z Ukrainy w polskich uczelniach, w: „Bezpieczeństwo na co dzień. Zarządzanie w codziennosci”, redakcja naukowa: Katarzyna Górecka, Natalia Majchrzak, Anna Kurkiewicz, Wydawnictwo Wyższej Szkoły Bezpieczeństwa w Poznaniu, 2024 r., s. 191-203.

Wybrane zagadnienia astrofizyki gwiazdowej

cz. II

Marcin Wesołowski

Nasza obecna wiedza o budowie wewnętrznej struktury gwiazd opiera się w głównej mierze na obserwacjach astronomicznych, które dotyczą Słońca – jedynej gwiazdy w Układzie Słonecznym. Do tych obserwacji należy przygotować się z dużą stronnością, ponieważ obserwowana wielkość gwiazdowa Słońca jest równa $m_s = -26.7$ magnitudo. Oznacza to, że Słońce jest bardzo jasnym ciałem niebieskim i obserwacje jego tarczy bez specjalistycznego zabezpieczenia naszego wzroku mogą być przyczyną uszkodzenia lub w ekstremalnych sytuacjach utraty wzroku nawet na całe życie. Podkreślimy, że wielkość gwiazdowa danego obiektu zależy od mocy promieniowania, czyli jego jasności oraz od odległości od Ziemi. Zauważmy, że skala jasności stosowana powszechnie w astronomii jest odwrócona. Oznacza to, że im wielkość gwiazdowa obserwowanego obiektu jest matematycznie mniejsza, tym jego jasność jest większa.

Rozważając fizyczną ewolucję gwiazd posłużymy się Słońcem. W oparciu o prawa fizyki można przedstawić model ewolucji Słońca, który uwzględnia warunki panujące we wnętrzu naszej dziennej gwiazdy. Używając sformułowania „nasza dzienna gwiazda” mamy na myśli Słońce. Analizując dane obserwacyjne można zauważyć, że w dużej mierze odnoszą się one do trzech podstawowych parametrów takich jak: masa gwiazdy (M), promień gwiazdy (R) oraz ilość energii emitowanej przez gwiazdę w jednostce czasu (L). Dodatkową informacją wynikającą

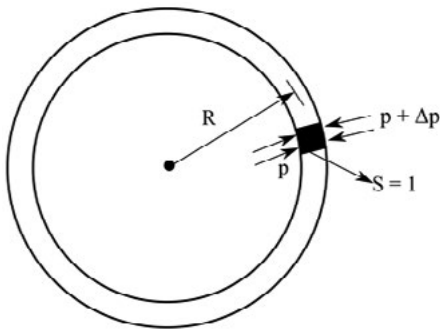
z bezpośrednich obserwacji jest skład chemiczny atmosfery gwiazdy.

Model gwiazdy

Konstruując model fizyczny gwiazdy dla uproszczenia naszych rozważań założmy, że gwiazda stanowi idealną kulę gazu doskonałego dla którego obowiązują prawa gazowe. Wówczas musimy założyć, że:

- Gwiazda pozostaje w równowadze hydrostatycznej (ciśnienie gazu, a w jądrze również ciśnienie promieniowania, równoważone przez siły grawitacji) i termodynamicznej w długim okresie. Oznacza to, że nie ulegają zmianie promień gwiazdy oraz moc promieniowania, a cała energia, która została wytworzona we wnętrzu gwiazdy jest wypromieniowana przez warstwy zewnętrzne.
- Emitowana energia jest zastępowana energią, produkowaną we wnętrzu gwiazdy (jest to tzw. zasada równowagi termicznej: poszczególne warstwy gwiazdy mają stałe temperatury).
- Transport energii w gwieździe następuje poprzez promieniowanie i konwekcję (unoszenie).
- Gaz zawarty w gwieździe w tym również w jej środku w przybliżeniu spełnia równanie stanu gazu doskonałego.

Konstruując model gwiazdy założmy, że nasze rozważania będą dotyczyły Słońca. W celu wyprowadzenia równań opisujących warunki panujące w wnętrzu Słońca o promieniu R , zakładamy, że zbudowane jest ono z koncentrycznych warstw o grubości Δr . Poprzez koncentryczność warstwy należy rozumieć warstwy, które



Rys. 1. Fragment (prostopadłościan) materii we wnętrzu gwiazdy (np. Słońca), zauważmy, że wysokość boku prostopadłościanu jest równa Δr .

mają wspólny środek i są ułożone wokół niego, jak okręgi lub sfery. Grubość takiej warstwy jest na tyle mała, że we wnętrzu takiej gwiazdy nie zachodzą istotne zmiany w warunkach fizycznych przy przejściu od wewnętrznej do zewnętrznej granicy warstwy.

Załóżmy, że w odległości R od środka rozważanej gwiazdy (Słońca) zlokalizowany jest bardzo mały prostopadłościan, którego wysokość wynosi Δr i powierzchnia podstawy ma wartość równą $S = 1$. Wówczas objętość takiego prostopadłościanu (wycinka materii gwiazdowej) jest równa:

$$V = S \cdot \Delta r = \Delta r. \quad (1)$$

Niech gęstość materii gwiazdowej będzie równa $\rho(r)$ i jest ona zależna od odległości od centrum (środku) Słońca. Wówczas można obliczyć, że masa tego prostopadłościanu (wycinka materii gwiazdowej) jest równa:

$$M = \rho(r) \cdot V. \quad (2)$$

Wykorzystując równanie (1), zależność (2) można zapisać jako:

$$M = \rho(r) \cdot \Delta r. \quad (3)$$

Ponieważ w naszych rozważaniach założyliśmy, że gwiazda jest idealną kulą wówczas w oparciu o prawo grawitacji Newtona, przyspieszenie grawitacyjne $g(r)$ w miejscu położenia prostopadłościanu jest wywołane przez masę $M(r)$, która zawarta jest w kuli o promieniu r jest równe:

$$g(r) = G \frac{M(r)}{R^2}, \quad (4)$$

gdzie G oznacza stałą grawitacji.

Zauważmy, że nasz prostopadłościan będzie przyciągany do środka Słońca z siłą $F(r)$, która jest równa:

$$F(r) = M(r) g(r) = G \frac{M(r)}{R^2} \rho(r) \Delta r. \quad (5)$$

Jeżeli w danej gwiazdzie nie występowałyby siły, która równoważy siłę ciężkości to rozważany element (nasz hipotetyczny prostopadłościan) w bardzo szybkim tempie opadłby w kierunku środka gwiazdy. Oznacza to, że gwiazda zaczęłaby się gwałtownie kurczyć – zapadać się pod wpływem grawitacji (kolaps grawitacyjny). W tym miejscu wyjaśnimy, że kolaps grawitacyjny zaliczany jest do powszechnych procesów zachodzących w całym

Wszechświecie i dotyczy różnych skali przestrzennych i czasowych począwszy od powstawania gromad galaktyk, galaktyk aż do narodzin, ewolucji i śmierci gwiazdy. Ze zjawiskiem tym mamy do czynienia, kiedy niemożliwe jest zachowanie równowagi hydrostatycznej tzn., kiedy ciśnienie gazu nie jest w stanie zrównoważyć oddziaływań grawitacyjnych zachodzących wewnątrz gwiazdy. Obraz taki występuje wtedy, gdyż skupisko materii przekroczy masę krytyczną (masę Jeansa).

Równowaga hydrostatyczna – pierwszy przypadek

W przypadku gwiazd siłą równoważącą siłę grawitacji jest ciśnienie gazu (siła parcia) związana z materią gwiazdową (materią słoneczną). Zauważmy, że ciśnienie gazu działa zarówno na zewnętrzną jak i wewnętrzną podstawę prostopadłościanu. W przypadku zewnętrznej strony ciśnienie różni się o wartość Δp od ciśnienia oddziałującego na stronę wewnętrzną, przy czym Δp ma znak ujemny, ponieważ wartość ciśnienia przy oddalaniu się od środka maleje (Rys.1). Różnica tych ciśnień, czyli parę równoważy siłę ciężkości, co można zapisać jako:

$$p - (p + \Delta p) = G \frac{M(r)}{R^2} \rho(r) \Delta r. \quad (6)$$

Rozpisując lewą stronę równania (6) otrzymujemy:

$$p - p - \Delta p = G \frac{M(r)}{R^2} \rho(r) \Delta r. \quad (7)$$

Wykonując redukcję wyrazów podobnych oraz mnożąc równanie (7) obustronnie przez (-1) mamy:

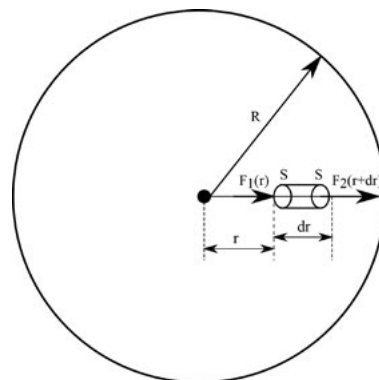
$$\Delta p = -G \frac{M(r)}{R^2} \rho(r) \Delta r. \quad (8)$$

Otrzymane równanie (8) stanowi pierwsze z równań dotyczące budowy wewnętrznej gwiazdy i przedstawia równowagę hydrostatyczną w jej wnętrzu. Jeżeli spełnione są powyższe założenia to równanie (8) możemy wyrazić w postaci różniczkowej:

$$\frac{dp}{dr} = -G \frac{M(r)}{R^2} \rho(r), \quad (9a)$$

lub

$$\frac{dp}{dr} = -g(r) \rho(r). \quad (9b)$$



Rys.2. Rozkład sił działających na mały wycinek masy we wnętrzu gwiazdy.

Zauważmy, że równanie (9b) powstało przy wykorzystaniu zależności (4).

Równowaga hydrostatyczna – drugi przypadek

Załóżmy, że w gwieździe panują warunki równowagi hydrostatycznej tzn. siły grawitacji dążą do przyspieszenia rozważnego wycinka masy gwiazdy ku jej centrum są równoważone przez siły związane z hydrostatycznym parciem gazu (rys.2).

Wówczas słuszne jest następujące równanie:

$$F_g = F_1(r) - F_2(r + dr). \quad (10)$$

Wykorzystując wzór na siłę grawitacji ($F_g = mg(r)$) i siłę parcia ($F_p = pS$) równanie (10) przyjmuje postać:

$$dm g(r) = p(r)S - p(r + dr)S. \quad (11)$$

Następnie wykorzystajmy zależność, że:

$$dm = \rho(r) V, \quad (12)$$

$$dm = \rho(r) S dr. \quad (13)$$

Wówczas równanie (11) przyjmuje następującą postać:

$$\rho(r) S g(r) dr = p(r)S - p(r + dr)S. \quad (14)$$

Dzieląc obustronnie równanie (14) przez S mamy:

$$\rho(r) g(r) dr = p(r) - p(r + dr). \quad (15)$$

Pomnożmy obustronnie teraz równanie (15) przez (-1) i jednocześnie podzielmy go przez dr , wówczas mamy:

$$-\rho(r) g(r) = \frac{p(r + dr) - p(r)}{dr}. \quad (16)$$

Zauważmy, że prawa strona równania (16) jest granicą ilorazu różnicowego, czyli pochodną funkcji dp/dr , wówczas mamy, że:

$$-\rho(r) g(r) = \frac{dp(r)}{dr}. \quad (17a)$$

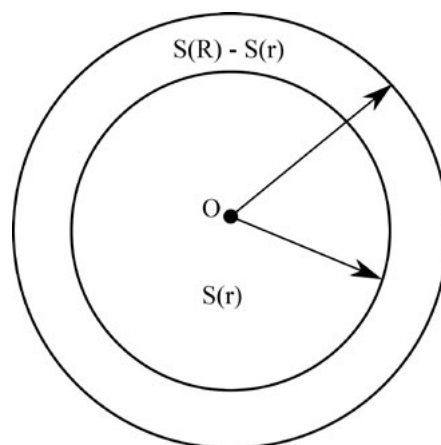
Zastosujemy teraz ponownie równanie (4) do lewej strony zależności (17a) wówczas otrzymamy, że:

$$-\rho(r) G \frac{M(r)}{r^2} = \frac{dp(r)}{dr}. \quad (17b)$$

Wykorzystując równania (8) i (9a) oraz (17a) i (17b) można oszacować zmianę ciśnienia we wnętrzu rozważanej gwiazdy przy przejściu z jednej warstwy koncentrycznej do kolejnej. W takim przypadku jako znane parametry należy przyjąć: masę M zawartą we wnętrzu kuli o ustalonym promieniu R oraz gęstość ρ , która występuje w tej warstwie. W większości przypadków parametry te nie są znane, dlatego też do ich określenia konieczne jest zdefiniowanie dodatkowych zależności.

Niech $S(r)$ oznacza powierzchnię kuli o promieniu r , dla której środek pokrywa się ze środkiem gwiazdy zgodnie z rysunkiem 3.

Niech $M(r, t)$ oznacza masę zawartą w kuli $S(r)$, wówczas masę tę możemy określić poprzez całkę objęściową daną jako:



Rys.3. Przekrój gwiazdy i kuli $S(r)$.

$$M(r, t) = \int_{S(r)} \rho(r, t) dV. \quad (18)$$

Ponieważ we wstępnych założeniach przyjęliśmy symetryczność gwiazdy, dlatego też różniczkę dV można wyrazić za pomocą różniczki dr , wówczas mamy, że:

$$dV = 4\pi r^2 dr. \quad (19)$$

Podstawiając równanie (19) do zależności (18) otrzymujemy, że:

$$M(r, t) = \int_0^r 4\pi \rho(r, t) r^2 dr. \quad (20)$$

Różniczkując równanie (20) otrzymujemy relację pomiędzy $M(r, t)$ oraz $\rho(r, t)$.

$$\frac{\partial M(r, t)}{\partial r} = 4\pi \rho(r, t) r^2. \quad (21)$$

Postępując w analogiczny sposób jak w przypadku równowagi hydrostatycznej we wnętrzu gwiazdy równanie (21) w formie różniczkowej wynosi:

$$\frac{dM(r)}{dr} = 4\pi \rho(r) r^2. \quad (22)$$

Zauważmy, że w równaniu (22) wykorzystaliśmy stacjonarność gwiazdy tzn., że zarówno masa M jak i gęstość ρ gwiazdy nie zależą od czasu. Ponadto równania (9a) i równoważne jemu równanie (9b) wraz z równaniem (22) stanowią pierwsze dwa równania związane z budową wewnętrzną gwiazdy.

Strumień energii przepływający przez gwiazdę

Rozważmy ponownie warstwę kulistą, która znajduje się w odległości r od środka rozważanej gwiazdy. Niech $L(r)$ oznacza ilość energii opuszczającej w ciągu 1 sekundy kulę o powierzchni $S(r)$. Energia $L(r)$ musi być równa ilości energii wyprodukowanej w ciągu 1s w wyniku zachodzących we wnętrzu gwiazdy reakcji termojądrowych. Ponadto energia $\Delta L(r)$ zależy od wydajności ϵ danego cyklu reakcji termojądrowych, jaka zachodzi w tej warstwie w jednostce masy oraz od całkowitej masy materii, która

zawarta jest w warstwie o grubości Δr , promieniu r i gęstości ρ . Wówczas możemy zapisać:

$$L(r) = \int_{S(r)} \rho(r) \epsilon dV = 4\pi \int_0^r \rho r^2 \epsilon dr = \frac{4}{3} \pi \rho \epsilon r^3. \quad (23)$$

Zauważmy, że w równaniu (23) czynnik $4\pi r^2$ drożnacza objętość warstwy kulistej. Różniczkując równanie (23) możemy zapisać, że:

$$\frac{dL(r)}{dr} = 4\pi r^2 \epsilon \rho(r). \quad (24)$$

Równanie (24) stanowi kolejną zależność związaną z opisem struktury wewnętrznej gwiazdy.

Transport energii w gwieździe

W strefie równowagi konwektywnej energia we wnętrzu gwiazdy jest transportowana przez konwekcję (unoszenie) a także promieniowanie. Bąble gorącego gazu unoszą się do powierzchni gwiazdy niosąc ze sobą energię wytworzoną w jej wnętrzu. Aby energia mogła być transportowana przez konwekcję to we wnętrzu gwiazdy muszą utrzymywać się pionowe ruchy materii. W tym celu rozważamy następującą sytuację. Niech pewien element masy, który znajduje się w warstwie A w odległości r od centrum (środku) gwiazdy został uniesiony ku górze o bardzo mały odcinek δr do warstwy B zgodnie z rysunkiem (rys.4). Element ten zachowując ciepło w nim obecne rozpręża się ponieważ w ośrodku otaczającym go (warstwy B) występuje niższe ciśnienie. Ponieważ element nasz ulega adiabatycznemu rozprężeniu poszukujemy warunku, aby energia przenoszona była wraz z materią. Jeżeli gęstość rozważanego elementu jest mniejsza niż gęstość otaczającego go ośrodka to na podstawie prawa Archimidesa element będzie unosił się do góry samorzutnie. W przeciwnym razie, jeżeli jego gęstość będzie większa

niż gęstość otaczającego go ośrodka opadanie do początkowego położenia.

Aby mogła zajść konwekcja we wnętrzu gwiazdy musi być spełniona zależność, że:

$$\rho^* < \rho(r + \delta r). \quad (25)$$

Równanie (25) pociąga za sobą spełnienie następujących dwóch zależności odpowiednio dla ciśnienia (równości ciśnień) i temperatury, co można wyrazić jako następujący układ:

$$p^* = p(r + \delta r), \quad (26a)$$

$$T^* > T(r + \delta r) = T(r) + \frac{dT(r)}{dr} \delta r. \quad (26b)$$

W następnym kroku wykorzystajmy równanie (26b):

$$T^* > T(r) + \frac{dT(r)}{dr} \delta r. \quad (27)$$

Podzielmy obustronnie równanie (27) przez $T(r)$, wówczas otrzymamy, że:

$$\frac{T^*}{T(r)} > 1 + \frac{\frac{dT(r)}{dr} \delta r}{T(r)} = 1 + \frac{d \ln T(r)}{dr} \delta r. \quad (28)$$

Zauważmy, że lewą stronę nierówności (28) można obliczyć analizując zmiany temperatury w rozważanym elemencie. W przypadku przemiany adiabatycznej słuszną jest następująca zależność:

$$\frac{T^*}{T(r)} = \left(\frac{p^*}{p(r)} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}, \quad (29)$$

gdzie γ oznacza stosunek dwóch rodzajów ciepła właściwego: $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$, c_p oznacza ciepło właściwe przy stałym ciś-

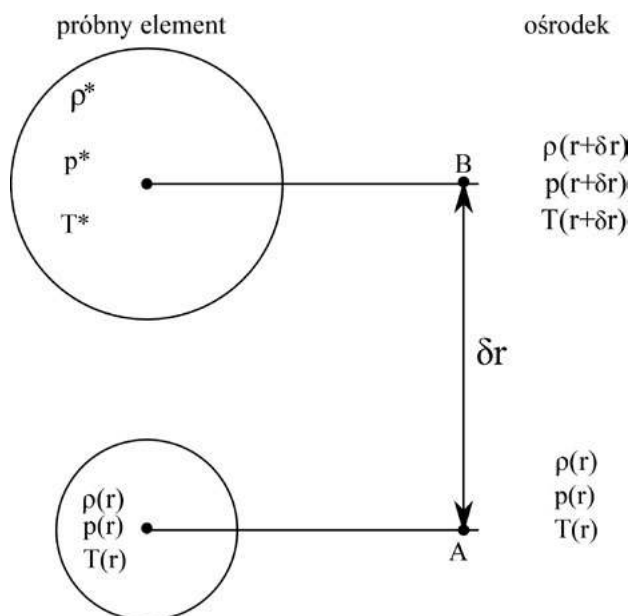
nieniu, a c_v oznacza ciepło właściwe przy stałej objętości. Wykorzystując równanie (26a) możemy równanie (29) wyrazić jako:

$$\begin{aligned} \frac{T^*}{T(r)} &= \left(\frac{p(r + \delta r)}{p(r)} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{p(r) + \frac{dp(r)}{dr} \delta r}{p(r)} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \\ &= \left(1 + \frac{d \ln p(r)}{dr} \delta r \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \approx \left(1 + \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{d \ln p(r)}{dr} \delta r \right). \end{aligned} \quad (30)$$

Porównajmy teraz prawą stronę równania (28) z prawą stroną równania (30) wówczas otrzymamy, że:

$$1 + \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{d \ln p(r)}{dr} \delta r > 1 + \frac{d \ln T(r)}{dr} \delta r. \quad (31)$$

Analiza numeryczna równań wewnętrznej struktury gwiazdy prowadzi do wniosku, że gdyby spełniona była nierówność prosta to ruchy konwektywne wewnątrz gwiazdy byłyby bardzo gwałtowne i nastąpiłoby szybkie



Rys. 4. Schemat warunek na istnienie konwekcji.



Foto – Adobe Stock

wyrównanie temperatur w danej warstwie. Zatem nierówność (31) należy w dalszej części rozpatrywać jako równość. Przekształćmy teraz nierówność daną zależnością (31) w taki sposób, aby obliczyć wartość wyrażenia $\frac{d \ln T(r)}{dr}$. W tym celu wyraz wolny, czyli liczbę 1 odejmujemy stronami i po redukcji mamy:

$$\frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{d \ln p(r)}{dr} \delta r = \frac{d \ln T(r)}{dr} \delta r. \quad (32)$$

Podzielmy jeszcze obustronnie równanie (32) przez δr :

$$\frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{d \ln p(r)}{dr} = \frac{d \ln T(r)}{dr}. \quad (33)$$

Czynnik $\frac{d \ln T(r)}{dr} < 0$ ponieważ wraz z oddalaniem się od centrum gwiazdy temperatura maleje, natomiast $\frac{\gamma - 1}{\gamma} > 0$, więc równanie (33) po prostych przekształceniach upraszcza się do następującej postaci:

$$\frac{d \ln p(r)}{d \ln T(r)} = \frac{\gamma}{\gamma - 1}. \quad (34)$$

We wnętrzu Słońca znajdują się niemalże pojedyncze atomy, stosunek dwóch rodzajów ciepła właściwego $\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{5}{3}$, więc warunek na istnienie we wnętrzu Słońca ruchów konwektywnych dany jest jako:

$$\frac{d \ln p(r)}{d \ln T(r)} > \frac{5}{2}. \quad (35)$$

Wykorzystując równanie (34) oraz wcześniejsze nasze rozważania możemy zapisać, że:

$$\frac{\frac{1}{p(r)} \frac{dp(r)}{dr}}{\frac{1}{T(r)} \frac{dT(r)}{dr}} = \frac{\gamma}{\gamma - 1}, \quad (36)$$

co jest równoważne następującej zależności:

$$\frac{\frac{dp(r)}{dr} T(r)}{dT(r) p(r)} = \frac{\gamma}{\gamma - 1}. \quad (37)$$

Po dalszych przekształceniach mamy:

$$\frac{dT(r)}{dr} p(r) \gamma = \frac{dp(r)}{dr} T(r) (\gamma - 1). \quad (38)$$

Podzielmy teraz równanie (38) obustronnie przez następujący iloczyn: $p(r) \gamma$, wówczas otrzymamy:

$$\frac{dT(r)}{dr} = \frac{dp(r)}{dr} \frac{T(r)}{p(r)} \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} \right). \quad (39)$$

Do otrzymanego równania (39) podstawmy po prawej stronie równanie (9a) czyli równanie równowagi hydrostatycznej, wówczas otrzymamy, że:

$$\frac{dT(r)}{dr} = -G \frac{M(r)}{r^2} \rho(r) \frac{T(r)}{p(r)} \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} \right). \quad (40)$$

Aby uprościć równanie (40) wykorzystajmy jeszcze równanie stanu gazu doskonałego w postaci:

$$p(r) = \frac{R_g}{\mu} \rho(r) T(r), \quad (41)$$

wówczas po prostych przekształceniach mamy:

$$\frac{dT(r)}{dr} = -G \frac{M(r)}{r^2} \frac{\mu}{R_g} \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} \right), \quad (42)$$

gdzie R_g oznacza uniwersalną stałą gazową, a μ jest średnią masą cząsteczkową.

Aby wyprowadzić ostatnie równanie dotyczące struktury wewnętrznej gwiazdy należy zauważyć, że obowiązuje ono w warstwach położonych w strefie promienistej. W tym celu musimy rozważyć interakcję (oddziaływanie) zachodzącą pomiędzy strumieniem promieniowania a materią gwiazdową, która tworzy tę warstwę. Zasadniczo możemy wyróżnić trzy procesy, które są odpowiedzialne za absorpcję promieniowania zachodzącą wewnątrz gwiazd. Pierwszym z nich jest wywołana przez promieniowanie dalsza jonizacja jonów ośrodka. Drugi to absorpcja promieniowania w czasie tzw. swobodno-swobodnych przejść elektronów. Natomiast trzeci proces to rozprzesczenie na swobodnych elektronach w wyniku, którego zmiana ulega kierunek fotonów padającego promieniowania.

Niech $p(r)$ oznacza ciśnienie promieniowania. Następnie wykorzystajmy równanie równowagi hydrostatycznej (równanie (9b)), które możemy wyrazić w następującej formie:

$$\frac{dp(r)}{dr} = -g^*(r)\rho(r). \quad (43)$$

W równaniu (43) parametr $g^*(r)$ oznacza przyspieszenie gazu, które wywołane jest przez absorpcję promieniowania. Przez powierzchnię kuli $S(r)$ w ciągu czasu równego $t=1s$ przepływa energia, która jest równa $L(r)$. Zatem przez każdą jednostkową powierzchnię o wymiarach $1cm^2$ w ciągu $t=1s$ przepływa energia: $\frac{L(r)}{4\pi r^2}$. Wówczas w ciągu $t=1s$ każdy gram materii pochłania energię równą:

$$E = \chi \frac{L(r)}{4\pi r^2}. \quad (44)$$

Ponieważ pęd promieniowania elektromagnetycznego o energii E równa się E/c , gdzie c jest prędkością światła, więc pęd, który w ciągu sekundy przekazuje promieniowanie każdemu gramowi materii, czyli przyspieszenie dany jest jako:

$$g^*(r) = \chi \frac{L(r)}{4\pi r^2 c}. \quad (45)$$

Przyjmijmy, dla uproszczenia, że rozkład widmowy promieniowania zachodzącego wewnątrz gwiazdy jest taki sam jak rozkład promieniowania ciała doskonale czarnego. Wówczas ciśnienie promieniowania jest jednoznacznie określone przez temperaturę gazu, co można wyrazić jako:

$$p_r(r) = \frac{1}{3} a T^4(r). \quad (46)$$

Podstawiając teraz równania (46) i (45) do zależności (43) otrzymamy, że:

$$\frac{d\left(\frac{1}{3} a T^4(r)\right)}{dr} = -\chi \frac{L(r)}{4\pi r^2 c} \rho(r). \quad (47)$$

W ostatnim kroku po zróżniczkowaniu lewej strony równania (47) otrzymamy:

$$\frac{4}{3} a T^3(r) \frac{dT}{dr} = -\chi \frac{L(r)}{4\pi r^2 c} \rho(r). \quad (48)$$

Wówczas po prostych przekształceniach otrzymamy, że:

$$\frac{dT}{dr} = -\frac{3\chi L(r)\rho(r)}{16\pi a c r^2 T^3(r)}. \quad (49)$$

W równaniu (49) poszczególne symbole oznaczają: χ jest współczynnikiem absorpcji oraz a jest stałą która wiąże ciśnienie gazu fotonowego (ciśnienie promieniowania) z temperaturą. Zauważmy, że wyprowadzone równania (42) oraz (49) należy używać zamiennie w zależności od tego czy transport energii we wnętrzu rozważanej gwiazdy zachodzi przez konwekcję czy promieniowanie.

Podsumowanie

Analizując przedstawione w tym artykule zależności matematyczne dotyczące opisu struktury wewnętrznej gwiazdy można skonstruować następujące zestawienie:

Lp.	Zależność matematyczna	Numer równania	Nazwa równania
1.	$\frac{dp}{dr} = -G \frac{M(r)}{R^2} \rho(r)$	9a	Warunek równowagi hydrostatycznej
2.	$\frac{dM(r)}{dr} = 4\pi \rho(r) r^2$	22	Warunek ciągłości masy
3.	$\frac{dL(r)}{dr} = 4\pi r^2 \epsilon \rho(r)$	24	Warunek na tempo produkcji energii
4a.	$\frac{dT(r)}{dr} = -G \frac{M(r)}{r^2} \rho(r) \frac{T(r)}{p(r)} \left(\frac{\gamma-1}{\gamma} \right)$	42	Transport energii (konwekcja)
4b.	$\frac{dT}{dr} = -\frac{3\chi L(r)\rho(r)}{16\pi a c r^2 T^3(r)}$	49	Transport energii (promieniowanie)

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

LITERATURA:

- [1] Kreiner J. M., Astronomia z astrofizyką, Wydawnictwo Naukowe PWN 1988.
- [2] Kubiak M., Gwiazdy i materia międzygwiazdowa, Wydawnictwo Naukowe PWN 1994.
- [3] Rybka E., Astronomia ogólna, Wydawnictwo Naukowe PWN 1970.
- [4] Stodólkiewicz J., Astrofizyka ogólna z elementami geofizyki, Wydawnictwo Naukowe PWN 1978.
- [5] Wesołowski M., Wybrane zagadnienia z mechaniki nieba cz. I, 2023, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 1, str. 44-50.
- [6] Wesołowski M., Wybrane zagadnienia z mechaniki nieba cz. II, 2023, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 2, str. 46-50.
- [7] Wesołowski M., Wybrane zagadnienia z mechaniki nieba cz. III, 2023, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 3, str. 43-50.

W następnych wydaniach polecamy m.in.

- Jak powstawała pompa ciepła?
- O korelacji treści nauczania i nie tylko...
- Kolorowe doświadczenia z polaryzatorami

Międzynarodowy Dzień Światła¹

Foto – NASA

Krzysztof Kowalczyk

Co roku 16 maja obchodzony jest Międzynarodowy Dzień Światła. Przypada w rocznicę pierwszego udanego użycia lasera w 1960 r. przez jego wynalazcę Theodore’a Maimana, którego niezwykła historia została potem opisana przez niego w książce „Odyseja laserowa”.²

Laser to urządzenie emitujące spójne światło w postaci wiązki o małej rozbieżności. Współczesne podręczne lasery przydają się często w planetariach do pokazywania gwiazd i planet na kopule podczas zwykłych pokazów, a te większe do pokazów laserowych z użyciem dymu scenicznego. Lasery są także wykorzystywane w wielkich teleskopach, takich jak VLT, w ramach optyki adaptatywnej. Pomagają uzyskać ostrzejsze obrazy kosmosu dzięki wytworzeniu – tuż obok obserwowanego obszaru nieba – sztucznego obrazu gwiazdy. Po co astronomom sztuczna gwiazda z promienia laserowego? Otóż promień laserowy o znanej mocy przydaje się w celu wychwycenia i następnie komputerowego usunięcia zakłóceń obrazu prawdziwych gwiazd, które migoczą pod wpływem ziemskiej atmosfery.

Takiego problemu z zakłóceniami obrazów kosmosu przez ziemską atmosferę nie ma Kosmiczny Teleskop Hubble’a, który krąży na niskiej orbicie okołoziemskiej już od 35 lat i przysyła zdjęcia na Ziemię drogą radiową. Tegoroczny Międzynarodowy Dzień Światła zbiegł się akurat w czasie z setną rocznicą urodzin Nancy Grace Roman (1925-2018), pracownicy NASA, którą wspominamy jako prekursorkę kosmicznych teleskopów. Choć w projekt Kosmicznego Teleskopu Hubble’a było zaangażowanych wielu naukowców, to Nancy Grace Roman już za życia była nazywana „matką Teleskopu Hubble’a” ze względu na jej nieocenioną rolę w koordynacji działań, które doprowadziły do opracowania teleskopu kosmicznego prowadzącego obserwacje w podczerwieni, świetle widzialnym i ultrafiolecie.

Międzynarodowy Dzień Światła jest także okazją do poruszania tematu tzw. zanieczyszczenia świetlnego. Astronomowie przypominają o konieczności ochrony ciemnego nieba przed nadmiarem sztucznego światła zwłaszcza w pobliżu dużych obserwatoriów astronomicznych, jak i o tym, że aż 30% mieszkańców Ziemi nie może już oglądać Drogi Mlecznej z powodu nadmiernego oświetlenia. Znana jest anegdota, że kiedy w 1994 r. w Los Angeles około 4:00 rano doszło do trzęsienia ziemi i wywołanej nim awarii sieci energetycznej, mieszkańcy dzwonili na policję i straż pożarną, że widzą jakąś lunę na niebie, nie zdając sobie sprawy, że widzą – często pierwszy raz w życiu – Drogę Mleczną. Tymczasem jaki jest poziom zanieczyszczenia świetlnego na terenie Polski, w szczególności dużych miast? Pierwszy szczegółowy raport w tej sprawie powstał w 2023 r. i można się z nim zapoznać na stronie Light Pollution Think Tank: <https://lptt.org.pl/dzialalnosc/raport/>

Zanieczyszczenie świetlne to realny problem, który dotyczy jednak nie tylko astronomów i miłośników astronomii liczących na dobre warunki do obserwacji nocnego nieba. Skutki nadmiernego oświetlenia negatywnie oddziałują na cykl dobowy człowieka i innych organizmów żywych (m.in. obniżona jakość snu, trudności z zasypianiem itp.). To również problem większego niż potrzeba z punktu widzenia bezpieczeństwa poziomu oświetlenia. Z powodu rosnących cen energii ma to także wymiar finansowy. Ważne jest zapewnienie odpowiedniego oświetlenia lamp ulicznych, tak aby strumień światła nie był kierowany do góry, a tam gdzie go realnie potrzeba. Naukowcy zajmujący się problemem zanieczyszczenia świetlnego zalecają wymianę starych lamp na energooszczędne, np. coraz bardziej popularne diody bursztynowe z luminoforem czy instalację oświetlenia wyposażonego w czujki ruchu w miejscach mniej uczęszczanych.

Na zdjęciu: obraz światel ziemskich miast z 2013 r. powstały ze zdjęć meteorologicznych satelitów Defense Meteorological Satellite (DMSP) oraz OLS, wykonanych w trakcie 312 okrążeń Ziemi.

¹ Tekst ukazał się pierwotnie na profilu Planetarium Centrum Nauki Kopernik, którego Autor jest pracownikiem: <https://www.facebook.com/planetariumkopernika/posts/1124007839761675>

² Polskie wydanie: Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2021.

Letni rabat do 80%!

ROCZNIK 2024 6 wydań – 60 zł!

PAKIET ARCHIWALNY 6 różnych wydań – 30 zł!

(w cenie są koszty wysyłki)
(oferta ważna do wyczerpania zapasów)



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

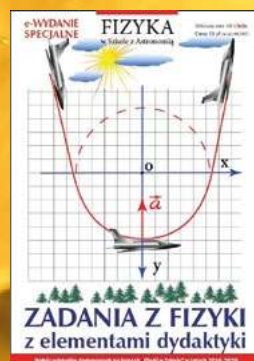
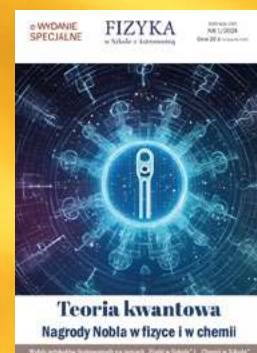
eprasa.pl 91fce9a461

Cyfrowe wydania specjalne

Fizyki w Szkole

Tylko w wersji PDF!

Już od 10 zł!
Wysyłamy na adres
mailowy!



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

eprasa.pl 91fce9a461