

POSTĘPY FIZYKI



CZASOPISMO NAUKOWE POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO
POŚWIĘCONE UPOWSZECHNIANIU WIEDZY FIZYCZNEJ

Jak powstały pierwiastki chemiczne we Wszechświecie?

Henryk Drozdowski

Świat u progu Drugiej Rewolucji Kwantowej

Tomasz Sowiński

Blżej ludzi, czyli mów prosto

Wiktor Niedzicki

Fizyka a oświata

Stanisław Głazek

1 / 2020
TOM 71



p



²H



³H



³He



⁴He



⁶Li



⁷Li



**POLSKIE
TOWARZYSTWO
FIZYCZNE (PTF)**

www.ptf.net.pl

ZARZĄD GŁÓWNY

Leszek Sirko (prezes)
Bogdan Kowalski (sekretarz generalny)
Jan Grabski (skarbnik)
Katarzyna Chałasińska-Macukow
Dariusz Grech
Bohdan Grządkowski
Zbigniew Kąkol
Stanisław Kistryn
Mirostaw Łoś
Maiej Maška
Beata Agnieszka Pietrewicz
Józef Spałek
Aneta Szczygielska
Andrzej Ślebarski
Zbigniew Trybuła

BIURO ZARZĄDU

ul. Pasteura 5
02-093 Warszawa
tel. (+22) 553 28 56 pok.4.56 (4. piętro)
e-mail: biuro@ptf.net.pl

PRZEWODNICZĄCY ODDZIAŁÓW

Krzysztof Szymański (Białystok)
Adam Gadomski (Bydgoszcz)
Ewa Mandowska (Częstochowa)
Jarosław Rybicki (Gdańsk)
Adam Michczyński (Gliwice)
Janusz Gluza (Katowice)
Małgorzata Wysocka-Kunisz (Kielce)
Józef Spałek (Kraków)
Jerzy Żuk (Lublin)
Stanisław Bednarek (Łódź)
Ewa Pawelec (Opole)
Henryk Drozdowski (Poznań)
Gaweł Żyła (Rzeszów)
Mirostaw Brozis (Słupsk)
Mariusz P. Dąbrowski (Szczecin)
Michał Pawlak (Toruń)
Andrzej Wysmołek (Warszawa)
Ewa Dębowska (Wrocław)
Van Cao Long (Zielona Góra)

POSTĘPY FIZYKI (PF)

**CZASOPISMO NAUKOWE POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO
POŚWIĘCONE UPOWSZECHNIANIU WIEDZY FIZYCZNEJ**

www.ptf.net.pl

czasopismo ukazuje się od 1949 roku

RADA REDAKCYJNA

Andrzej Kajetan Wróblewski (przewodniczący)
Mieczysław Budzyński
Witold Dobrowolski
Henryk Drozdowski
Józef Spałek
Józef Szudy
Arkadiusz Wójs

KORRESPONDENCI ODDZIAŁÓW PTF

Wojciech Olszewski (Białystok)
Beata A. Pietrewicz (Bydgoszcz)
Piotr Gębara (Częstochowa)
Tomasz Wąsowicz (Gdańsk)
Lucyna Grządziel (Gliwice)
Aleksandra Piórkowska-Kurpas (Katowice)
Maciej Rybczyński (Kielce)
Małgorzata Nowina-Konopka (Kraków)
Janusz Filiks (Lublin)
Janusz Kuliński (Łódź)
Katarzyna Książek (Opole)
Sławomir Mamica (Poznań)
Jacek Fal (Rzeszów)
Agnieszka Włodarkiewicz (Słupsk)
Janusz Typek (Szczecin)
Michał Pawlak (Toruń)
Grzegorz Siudem (Warszawa)
Bernard Jancewicz (Wrocław)
Lidia Najder-Kozdrowska (Zielona Góra)

REDAKCJA

Anna Szemberg (redaktor naczelna)
Krzysztof Turzyński

ADRES

Redakcja „Postępy Fizyki”
Wydział Fizyki UW
Pasteura 5, pok. 2.80 (2. piętro), 02-093 Warszawa
e-mail: postepy.fizyki@gmail.com

INFORMACJE DLA AUTORÓW

Przyjmujemy do publikacji przystępnie napisane artykuły przeglądowe i monograficzne w języku polskim i angielskim, które otrzymają pozytywne recenzje wydawnicze. Teksty należy przysyłać e-mailem na adres: postepy.fizyki@gmail.com, w formie przyjętej w czasopiśmie (www.ptf.net.pl/pl/postepy-fizyki/), w systemie LATEX (plik źródłowy + pdf) lub w programie Word; powinny zawierać afiliację i nr ORCID autora, streszczenie i słowa kluczowe w j. polskim oraz j. angielskim, bibliografię wyłącznie załącznikową, ilustracje w tekście, ale też w osobnych plikach o rozdzielczości co najmniej 300 dpi. Redakcja zastrzega sobie prawo do skracania i redagowania tekstów w tym wprowadzania niezbędnych zmian terminologicznych. Zgodnie z obowiązującym prawem autorskim autorzy będą mogli dokonać korekty autorskiej artykułu przygotowanego do druku. Opublikowanie artykułu w PF wiąże się z nieodpłatnym udostępnieniem go na stronie internetowej PTF na podstawie licencji Creative Commons.

PRENUMERATA

W 2020 roku **cena brutto pojedynczego numeru PF wynosi 29,70 PLN** (w tym 8% VAT), **rocznika (4 numery) (z 9% bonifikatą) – 108,00 PLN** (w tym 8% VAT). Wpłatę na konto należy powiększyć o koszty przesyłki, które wynoszą dla jednego zeszytu 7,00 PLN (w tym 23% VAT). Przy zamawianiu większej liczby egzemplarzy prosimy koszty wysyłki skonsultować e-mailowo z wydawcą. **Cena pojedynczego archiwalnego numeru PF** pozostaje bez zmian – **12,00 PLN brutto** + koszty wysyłki. Szczegółowe warunki prenumeraty PF znaleźć można na stronie internetowej PTF (www.ptf.net.pl/).

ISSN 2658-2422 (online)

© Copyright by Polskie Towarzystwo Fizyczne

Wydawca: Polskie Towarzystwo Fizyczne

Skład i łamanie: Fixpoint Krzysztof Rudnik

KONKURS

szczegóły: strona 44 oraz strona internetowa PTF

<http://www.ptf.net.pl/pl/aktualnosci/informacje-biezace/konkurs-na-najlepszy-artykul-upowszechniajacy-wiedze-fizyczna/>

Szanowni Czytelnicy,

w 2020 roku, który Senat RP ogłosił Rokiem Fizyki, rozpoczynamy edycję 71. tomu PF. Wśród prezentowanych artykułów znajdują Państwo interesującą historię powstania pierwiastków we Wszechświecie autorstwa prof. Henryka Drozdowskiego. Trzy inne teksty związane z edukacją są bardzo aktualne w świetle tego, co obecnie dzieje się w polskich szkołach: dr Tomasz Sowiński w swym tekście o Drugiej Rewolucji Kwantowej krytycznie odnosi się do treści, jakie w ramach przedmiotu fizyka przekazujemy polskim uczniom na przełomie drugiej i trzeciej dekady XXI wieku; znany popularyzator wiedzy fizycznej Wiktor Niedzicki pisze o tym, jak mówić o fizyce do uczniów, studentów, czy sympatyków dziedziny, by nie zniechęcać do jej zgłębiania; artykuł prof. Stanisława Głazka dotyczy problemów pracy nauczyciela i jej postrzegania przez społeczeństwo. Zapraszamy do lektury!

Już tylko dwa miesiące dzielą nas od **kwietniowego, nadzwyczajnego, jubileuszowego 46. Zjazdu Fizyków Polskich w Warszawie**, związanego z przypadającą w tym roku setną rocznicą powstania Polskiego Towarzystwa Fizycznego. Zachęcamy do śledzenia wciąż uaktualnianej i rozbudowywanej strony internetowej tego wydawnictwa 100lat.ptf.net.pl/ Do zobaczenia w Warszawie (rejestracja uczestników już się rozpoczęła)!

Przypominamy, że Czytelnicy i Sympatycy naszego czasopisma mogą bezpłatnie korzystać z wersji elektronicznej Postępów Fizyki (w formacie pdf):

numery archiwalne

www.ptf.net.pl/pl/towarzystwo/dzialalnosc/postepy-fizyki/roczniki/

numery bieżące www.ptf.net.pl/pl/postepy-fizyki/

Jak powstały pierwiastki chemiczne we Wszechświecie?

część 1 Pierwotna nukleosynteza kosmiczna

H. Drozdowski 2

Jak powstały pierwiastki chemiczne we Wszechświecie?

część 2 Geneza pierwiastków ciężkich

H. Drozdowski 10

Świat u progu Drugiej Rewolucji Kwantowej

T. Sowiński 21

Bliżej ludzi, czyli mów prosto

W. Niedzicki 24

Fizyka a oświata

S. D. Głazek 26

Profesor Zdzisław Pająk – Mistrz, uczonec, organizator nauki

S. Jurga 31

Pamięci Profesora Stanisława Kalandyka

L. Kubisz 37

Kronika Polskiego Towarzystwa Fizycznego 39

Nowi profesorowie nauk fizycznych 44

Konkurs 44

Jak powstały pierwiastki chemiczne we Wszechświecie?

część 1 Pierwotna nukleosynteza kosmiczna

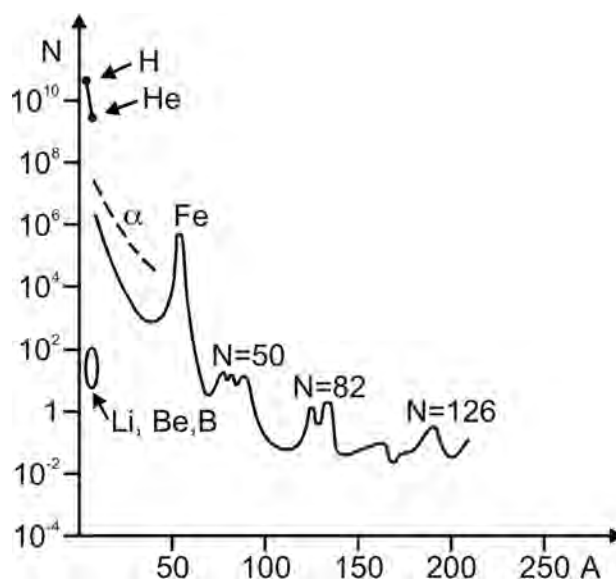
Henryk Drozdowski

Wydział Fizyki, Zakład Fizyki Dielektryków, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

Streszczenie. Artykuł przedstawia historię badań nad wyjaśnieniem genezy pierwiastków chemicznych we Wszechświecie. Powstawanie pierwiastków we wczesnej fazie życia Wszechświata, gdy nie było jeszcze gwiazd, nazywa się pierwotną nukleosyntezą kosmiczną. Zaprezentowałem fakty pokazujące, że współczesne pomiary obfitości lekkich pierwiastków (${}^4_2\text{He}$, ${}^2_1\text{D}$, ${}^3_2\text{He}$, ${}^7_3\text{Li}$) przemawiają za słusznością tezy o istnieniu początku Wszechświata i za prawdziwością kosmologii gorącego Wielkiego Wybuchu. Obserwacje astronomiczne zawartości we Wszechświecie ${}^4_2\text{He}$, ${}^2_1\text{D}$, ${}^3_2\text{He}$, ${}^7_3\text{Li}$ są dla nas najskuteczniejszym sposobem badania warunków panujących we Wszechświecie w okresie jednej sekundy po rozpoczęciu ekspansji. W procesie nukleosyntezy pierwotnej kluczową rolę odgrywały neutrina. Dokonałem rekonstrukcji tego procesu. Wyznaję pogląd, iż Kosmos jest ucieleśnieniem skrytych harmonii. Eksplikacją tej tezy jest fakt, iż podstawowe właściwości chemiczne Wszechświata są nieuniknioną konsekwencją jego wczesnej historii. Istnieje bowiem wzajemny wpływ i związek między zjawiskami pozornie tak odległymi, jak globalna ewolucja Kosmosu i jego określony skład chemiczny. Odpowiedź na pytanie: *Jak powstały pierwiastki chemiczne we Wszechświecie?* jest możliwa tylko w powiązaniu z całokształtem zagadnień kosmologii i astrofizyki.

1. Wstęp

Przez długie stulecia nie dostrzegano problemu powstawania pierwiastków chemicznych. Chemia dziewiętnastowieczna uważała pierwiastki chemiczne za obiekty wieczne i niezmiennie. Jednak od końca dziewiętnastego wieku – przez kilka dziesięcioleci – fizycy usiłowali wyjaśnić obserwowaną obfitość występowania pierwiastków chemicznych we Wszechświecie. Poszukiwania korelacji rozpowszechnienia pierwiastka z jego położeniem w układzie okresowym Mendelejewa zakończyły się niepowodzeniem. Przyczyna stała się zrozumiała dopiero po odkryciu jądra atomowego i jego składników: neutronu i protonu. Okazało się, że odpowiedzi należało poszukiwać w zrozumieniu mechanizmów reakcji jądrowych i ich związku z ewolucją Kosmosu. Jednocześnie metody obserwacyjne astronomii pozagalaktycznej pozwoliły penetrować coraz odleglejsze obszary Wszechświata i na tej podstawie wyznaczać względną częstotliwość rozpowszechnienia pierwiastków. Wyniki przedstawia krzywa określająca abundancję pierwiastków (rys. 1) [1]. Możemy wyróżnić trzy obszary. Pierwszy z nich obejmuje pierwiastki do boru ($A = 11$) włącznie. Większość materii stanowią



Rys. 1. Rozpowszechnienie pierwiastków chemicznych w zależności od liczby masowej A z zaznaczeniem lokalnych maksimum i minimum („rynnna”) dla pierwiastków Li-Be-B; N oznacza rozpowszechnienie względne

wodór i hel. Średnie rozpowszechnienie wodoru i helu sięga 10^{10} (w jednostkach względnych). Drugi obszar

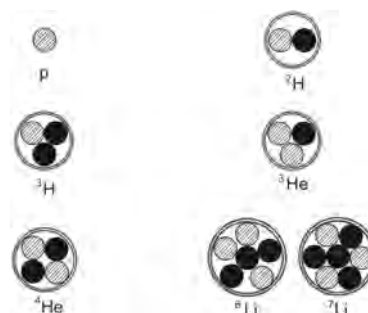
obejmuje pierwiastki kończące się w okolicach żelaza ($A = 56$). Ich średnie rozpowszechnienie jest znacznie mniejsze i wynosi około 10^4 . Trzeci obszar obejmuje pierwiastki do uranu ($Z = 92$) o średnim rozpowszechnieniu około 10^{-1} . Te trzy grupy cechuje różny stopień rozpowszechnienia. Jest to związane z tym, że jądra należące do poszczególnych grup powstają w różnych procesach. Pierwiastki należące do pierwszego obszaru produkowane są w pierwotnej nukleosyntezie, pierwiastki drugiego obszaru powstają w procesach syntezy w gwiazdach. Trzecia grupa pierwiastków związana jest z procesami wychwytu neutronów, które zachodzą na różnych etapach rozwoju gwiazd. Najcięższe jądra powstają w ostatniej fazie rozwoju masywnych gwiazd, w czasie wybuchu zwanego supernową.

Historia powstawania jąder atomowych rozpoczęła się w czasach, gdy cały Wszechświat składał się z gorącej plazmy. Podczas pierwszej milionowej części sekundy po Wielkim Wybuchu materia była w stanie plazmy kwarkowo-gluonowej. Wszechświat był magmą kwarków i gluonów. W warunkach temperatury $T > 10^{12}$ K i ogromnego ciśnienia pojedyncze hadrony nie mogły powstać. Żadne jądra istnieć nie mogły, ponieważ energia promieniowania gamma doprowadzała do ich rozpadu. Po około 10^{-5} s od Wielkiego Wybuchu, kiedy temperatura spadła poniżej 10^{12} K, kwarki i gluony zaczęły łączyć się w pierwsze nukleony: protony i neutrony. Kwarki grupowały się dwójkami, ale powstałe pary były niestabilne i szybko się rozpadały. Tylko dwa rodzaje trójek przetrwały: połączenie dwóch kwarków typu *up* i jednego typu *down* dało proton, a dwóch *down* i jednego *up* – neutron.

Obserwacje zawartości we Wszechświecie ${}^4_2\text{He}$, ${}^2_1\text{D}$, ${}^3_2\text{He}$, ${}^7_3\text{Li}$ stanowią ważne „okno” na wczesny Wszechświat, gdyż przynoszą informacje sięgające wieku Kosmosu $t \approx 3$ minut. Obserwacje astronomiczne obfitości lekkich pierwiastków pozwalają więc badać znacznie wcześniejszą epokę Kosmosu niż obserwacje mikrofalowego promieniowania tła!

Wszystkie jądra pierwiastków lekkich: deuteru, helu-3, helu-4 i litu-7 powstały tuż po Wielkim Wybuchu. Stanowią one kombinacje dwóch cząstek: neutronów i protonów (rys. 2). Aby więc przewidzieć obfitość tych pierwiastków lekkich, trzeba znać stosunek liczby neutronów do liczby protonów.

Neutrony odgrywały istotną rolę w budowie każdego pierwiastka (poza wodorem). Zmieniająca się obfitość neutronów była istotnym czynnikiem późniejszego procesu powstawania pierwiastków. Jądra atomów pierwszych pierwiastków (rys. 2) powstały w ewoluującym Wszechświecie. Musimy więc prześledzić wczesne etapy ewolucji Wszechświata.

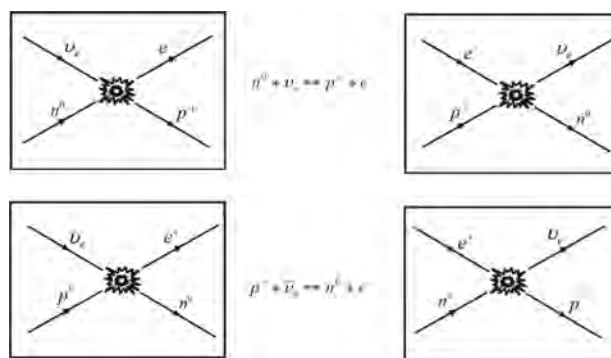


Rys. 2. Jądra pierwiastków lekkich

2. Równowaga termodynamiczna we wczesnym Wszechświecie

Aż do połowy XX wieku panowało powszechne przekonanie, że obfitość pierwiastków we wczesnej ewolucji Wszechświata zależała od początkowej względnej liczby protonów i neutronów. Astrofizyk japoński Chushiro Hayashi w 1950 roku [2] wykazał, że tak jednak nie jest. Zauważył, że rozwiązanie tego problemu umożliwiają słabe oddziaływania jądrowe. Założył, że Wszechświat na początku zawierał równą liczbę neutronów i protonów. Oznacza to, że transformacja neutronów w protony (i na odwrót) dokonywała się wskutek ich zderzeń z elektronami, pozytonami, neutronami i antyneutrinoami.

Neutrony i protony, „skąpane” w gęstym „morzu” neutrin i antyneutrin, znajdowały się w stanie równowagi termodynamicznej, gdyż wówczas niezwykle szybko zachodziły reakcje (rys. 3):



Rys. 3. Wzajemne transformacje neutronów i protonów we wczesnym, gorącym i gęstym Wszechświecie

Powyższe reakcje:

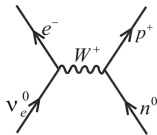
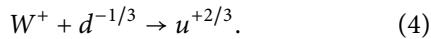
$$n^0 + \nu_e \leftrightarrow p^+ + e^- \quad (1)$$

$$p^+ + \bar{\nu}_e \leftrightarrow n^0 + e^+ \quad (2)$$

są przejawem słabych oddziaływań jądrowych, których przekroje czynne są małe. Zasięg tych oddziaływań jest bardzo krótki, zaledwie 10^{-15} cm, tj. mniejszy niż promień jądra atomowego. Oddziaływania te zapewniały równowagę termodynamiczną pomiędzy protonami, neutronami i neutronami, czyli reakcje (1) i (2) zachodziły w obie strony w tym samym tempie, a więc

wzajemnie się znosiły. Reakcja (1) pokazuje, że neutrino elektronowe ν_e przekształca neutron w proton i elektron. Antyneutrino elektronowe $\bar{\nu}_e$ z kolei przekształca proton w neutron i antyelektron (pozyton). Ilustruje to reakcja (2).

Zrozumienie mechanizmu reakcji (1) i (2) umożliwiła teoria kwantowa oddziaływania słabego. Rysunek 4 ilustruje mechanizm słabego oddziaływania jądrowego: zderzenie między neutrinem a neutronem, w którym neutrino wytwarza elektron i przekształca neutron w proton. Bozon W^+ równoważy zmianę ładunku elektrycznego towarzyszącą przekształceniu neutrina elektronowego w elektron. Następnie bozon W^+ bierze udział w rozpadzie kwarku dolnego $d^{-1/3}$ w neutronie przekształcając go w proton p^+ . Reakcja ta przebiega więc w dwóch etapach:



Rys. 4. Diagram Feynmana pokazujący oddziaływanie między neutrinem a neutronem, tak jak je opisuje elektrodynamika kwantowa

Wszystkie procesy fizyczne były w równowadze termodynamicznej na samym początku istnienia Wszechświata. Idea równowagi termodynamicznej we wczesnej historii Wszechświata ma głęboki sens: gorący stan równowagi zapewnił, że temperatura dokładnie określała względne obfitości neutronów i protonów. W dzisiejszym Wszechświecie względne proporcje neutronów i protonów zostały ustalone – niezależnie od wyboru warunków początkowych – w wyniku powstałej równowagi termodynamicznej. Stosunek liczby neutronów do liczby protonów w równowadze termodynamicznej wyraża, zgodnie z rozkładem Maxwella–Boltzmannia wzór:

$$\frac{N_n}{N_p} \approx \left(\frac{m_n}{m_p}\right)^{3/2} \exp\left[-\frac{(m_n - m_p)c^2}{k_B T}\right]. \quad (5)$$

Czynnik $(m_n/m_p)^{3/2} \approx 1$, ponieważ oba rodzaje cząstek mają podobne masy. Wyraz wykładniczy również jest bliski jedności, dopóki temperatura Wszechświata przekracza różnicę mas neutronu i protonu, która wynosi 1,293 MeV.¹ Tak więc, gdy $k_B T \gg (m_n - m_p)c^2$ liczby

1. Związek $E = k_B T$ (k_B – stała Boltzmann) łączy w sposób jednoznaczny temperaturę z energią, dlatego też w niektórych zastosowaniach wartość temperatury określa się w elektronowoltach z odpowiednim przedrostkiem (ściślej należałoby mówić o jednostce eV/ k_B) (przyp. red.)

neutronów i protonów we Wszechświecie były prawie identyczne; k_B jest stałą Boltzmann.

Fakt istnienia równowagi termodynamicznej ma dwie istotne konsekwencje. Po pierwsze tłumaczy, dlaczego reliktywne promieniowanie tła ma widmo promieniowania cieplnego – jest to skutek równowagi termodynamicznej we wczesnym okresie Wszechświata. Po drugie pozwala określić skład chemiczny i właściwości materii jako funkcję jej gęstości.

Gdy Wszechświat liczył mniej niż jedną sekundę, a jego temperatura przewyższała 10^{10} K, słabe oddziaływania jądrowe między protonami i neutronami odgrywały dominującą rolę. Przekształcały one jedne w drugie i utrzymywały doskonałą równowagę między protonami i neutronami. Zapewniały one stabilną równowagę, w której liczba neutronów przypadających na jeden proton zależała wyłącznie od temperatury. Bardzo wczesny Kosmos był tak gorący i panowały w nim tak duże energie, że protony i neutrony poruszały się za szybko, aby się ze sobą łączyć.

Aby zrozumieć fizykę nukleosyntezy pierwotnej, trzeba zbadać wpływ temperatury na czas trwania ekspansji Wszechświata i średni czas między reakcjami słabego oddziaływania jądrowego.

3. Termiczna ewolucja Wszechświata w fazie pierwotnej nukleosyntezy kosmicznej

Faza pierwotnej nukleosyntezy kosmicznej była „składową” erą promieniowania, w której gęstość energii promieniowania była większa od gęstości energii materii. Promieniowanie całkowicie kontrolowało ewolucję Wszechświata. We Wszechświecie istniała olbrzymia liczba fotonów. Na każdą cząstkę materii przypadało 10^9 fotonów. Początek ery radiacyjnej ($t \sim 1s$), to zdarzenie, któremu przypisujemy parametr przesunięcia ku czerwieni równy

$$z + 1 = \frac{R(t_0)}{R(t)} \approx 3 \cdot 10^9, \quad (6)$$

gdzie przesunięcie z jest miarą zmiany skali Wszechświata (od $R(t)$ przy emisji światła do $R(t_0)$ w chwili jego odbioru); parametr z mierzy w kosmologii przesunięcie.

Podczas ery promieniowania Wszechświat rozszerzał się proporcjonalnie do pierwiastka kwadratowego z czasu:

$$R(t) \sim \sqrt{t}. \quad (7)$$

Temperatura T systematycznie obniżała się w odwrotnej proporcji do odległości [3, 4]:

$$T \sim \frac{1}{R(t)} \sim \frac{1}{\sqrt{t}}. \quad (8)$$

Związek pomiędzy spadkiem temperatury Wszechświata a jego ekspansją można wyjaśnić odwołując się do pojęcia przemiany adiabatycznej gazu, bez wymiany energii z otoczeniem. Nieustanne rozszerzanie się Kosmosu stanowi ekspansję adiabatyczną. Zawarty we Wszechświecie gaz cząstek i promieniowanie muszą wykonywać pracę, zatem temperatura spada. Energia kwantu poruszającego się w przestrzeni Wszechświata samoczynnie (bez żadnego oddziaływania) obniża się. W miarę rozszerzania się Wszechświata fotony zwiększają swą długość fali.

Z równania (8) wynika, że czas trwania ekspansji Kosmosu t_{eksp} był wówczas odwrotnie proporcjonalny do kwadratu temperatury:

$$t_{eksp} \sim \frac{1}{T^2}. \quad (9)$$

Rozszerzanie się Wszechświata wpływa zarówno na gęstość energii materii (cząstek) ε_m oraz gęstość energii promieniowania ε_p . Ekspansja przestrzeni Wszechświata powoduje zmiany koncentracji cząstek wypełniających go, ale nie ma wpływu na energię spoczynkową cząstki materii E_m . Natomiast rozszerzanie się Wszechświata obniża energię kwantu promieniowania E_γ , proporcjonalnie do $1/R$, gdyż długość wyemitowanej fali λ , czyli odległość pomiędzy punktami przestrzeni w których znajdują się jej sąsiednie maksima, rośnie z czasem dokładnie tak samo, jak odległość między dowolnymi innymi punktami przestrzeni.

Gęstość energii materii ε_m zmniejszała się jak odwrotność objętości:

$$\varepsilon_m \sim \frac{1}{R^3(t)} \sim \frac{1}{\sqrt{t^3}}, \quad (10)$$

natomiast gęstość energii promieniowania ε_p malała jeszcze szybciej:

$$\varepsilon_p = \frac{1}{R^4} \sim \frac{1}{t^2}. \quad (11)$$

Jaki był wpływ temperatury na średni czas między reakcjami słabego oddziaływania jądrowego? Rozważmy proces wychwytu neutrina przez neutron opisany równaniem (1).

Dla zderzenia z udziałem neutrina i neutronu można zapisać drogę swobodną neutrina l_{ν_e} ze względu na ten proces następująco:

$$l_{\nu_e} = \frac{1}{\sigma_{\nu_e n^0} \rho_{n^0}}, \quad (12)$$

gdzie $\sigma_{\nu_e n^0}$ jest przekrojem czynnym reakcji, a ρ_{n^0} – gęstością (koncentracją) neutronów (cząstek-„tarcz”). Przekroje czynne reakcji i gęstość neutronów są funkcjami temperatury. Ze względu na bardzo mały przekrój

czynny na oddziaływanie z materią ($\sigma = 6 \cdot 10^{-44} \text{ cm}^2$) neutrina mają bardzo duże średnie drogi swobodne.

Prawdopodobieństwo reakcji (1) jest iloczynem przekroju czynnego i względnej prędkości pary cząstek wchodzących w reakcję. Uśredniając po prędkościach otrzymujemy $\langle \sigma v \rangle$. Przy oddziaływaniach jądrowych słabych, powodujących wychwyty neutrin, przekroje czynne są proporcjonalne do kwadratu temperatury. Wówczas mamy:

$$\langle \sigma v \rangle_{n+\nu \rightarrow p+e} \sim G_F^2 T^2, \quad (13)$$

gdzie G_F jest stałą Fermiego.

Gęstość neutronów w funkcji temperatury wyrażamy następująco:

$$\rho_{n^0}(T) \sim \frac{1}{R^3} \sim T^3. \quad (14)$$

Uwzględniając (10), (12), (13) otrzymujemy wzór na średni czas między każdym wychwytem neutrina przez neutron t_{reak} :

$$t_{reak} = \frac{1}{\langle \sigma v \rangle \rho_{n^0}(T)} \sim G_F^{-2} T^{-5}. \quad (15)$$

Z równania (15) wynika, że średni czas między kolejnymi wychwytemi neutrina przez neutron jest odwrotnie proporcjonalny do piątej potęgi temperatury.

4. Wpływ ekspansji przestrzeni Kosmosu na tempo zmian stosunku liczby neutronów do gęstości protonów

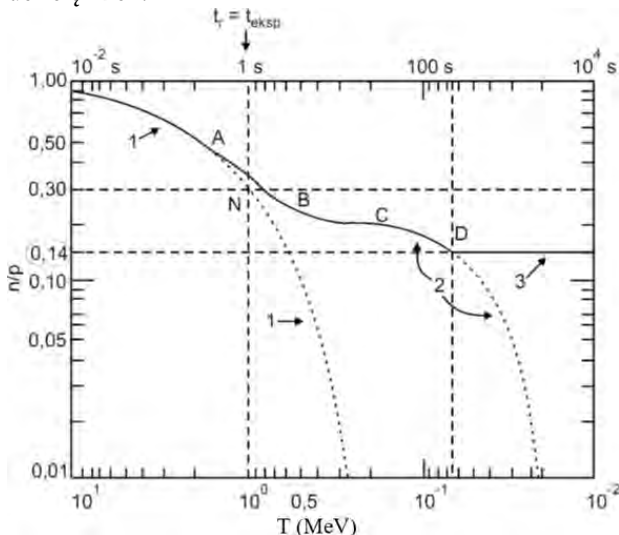
Stan równowagi termodynamicznej utrzymywał się dzięki temu, że reakcje (1) i (2) zachodziły znacznie szybciej, niż następowała ekspansja przestrzeni Wszechświata, która rozrzedzała plazmę i obniżała jej temperaturę. Jeżeli Wszechświat rozszerzał się niezbyt szybko, a cząstki oddziaływały intensywnie, to zanim odległości między nimi znacznie wzrosły i naruszenie równowagi termodynamicznej stało się duże, została ona niemal przywrócona. Związek (5) jest bardzo czułą funkcją temperatury. Gdy Wszechświat liczył około jednej sekundy, reakcje (1) i (2) zachodziły już bardzo wolno i równowaga termodynamiczna została zachwiana. Najpierw w reakcjach (1) i (2) odłączyły się neutrina i to ten proces prowadził do zmniejszenia szybkości reakcji i ich zaniku. Odłączenie zwane również odsprężaniem neutrin nastąpiło, gdy wydajność zderzeń (1) i (2) nie wystarczała do skompensowania zmian spowodowanych rozszerzaniem się Wszechświata. Po odłączeniu neutrina zaczynały się ochładzać adiabatycznie wskutek ekspansji Kosmosu, niezależnie od innych cząstek. Przy spadku temperatury i przy ekspansji Kosmosu neutrina traciły możliwość zderzania się z innymi cząstkami. Nieвозможна stała się ich anihilacja. Ich rozpad także był niemożliwy. Są zbyt mało masywne, aby rozpaść się na inne

cząstki. Jedynym wnioskiem z tych rozważań jest stwierdzenie, że we Wszechświecie istnieją reliktywne neutrino. Proces odprężania neutrin bazował na zerwaniu równowagi termodynamicznej, kiedy szybkość reakcji stała się (przy obniżaniu temperatury) mniejsza niż szybkość rozszerzania się Wszechświata. W temperaturze odprężania neutrin, czyli przy $T \approx 10^{10}$ K stosunek n/p osiągnął wartość 27/100.

Zrywanie równowagi termodynamicznej nie nastąpiło skokowo i przy $kT < 1$ MeV reakcje (1) i (2) częściowo jeszcze zachodziły. Ostatecznie przerywał je – też nie skokowo – proces nieodwracalnej anihilacji $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ przy $kT \approx 0,5$ MeV ($t \approx 4$ s). W czasie anihilacji par elektronowych e^-e^+ następowało przekazywanie energii elektronów tylko do gazu fotonowego, gdyż neutrino już się odłączyły.

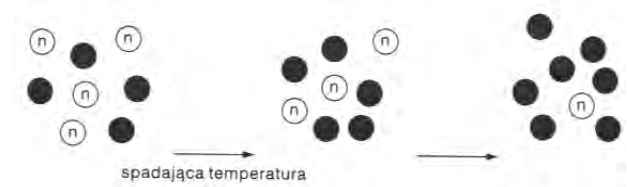
Proces zaniku reakcji (1) i (2) zachodził stopniowo w zakresie $kT \rightarrow \langle 1 \text{ MeV} \div 0,5 \text{ MeV} \rangle$, co dało $n/p \approx 1/7$.

Ważne jest zrozumienie faktu, że względna obfitość neutronów i protonów była wyznaczona przez temperaturę Wszechświata w momencie, gdy ustały między nimi słabe oddziaływania jądrowe. Rzeczywiste zmiany n/p ze spadkiem temperatury ilustruje rys. 5 [5]. Krzywa 1 ilustruje stosunek wyrażony równaniem (5), jeżeli reakcje (1) i (2) utrzymują równowagę termodynamiczną. Otoczenie punktu N na wykresie oznacza zrywaną równowagę. Po zerwaniu się tej równowagi, w $T \approx 1 \text{ MeV}$, stosunek n/p odpowiada krzywej 2. W fazie AB odłączają się neutrino: charakterystyczny czas reakcji t_{reak} jest rzędu charakterystycznego czasu ekspansji Wszechświata t_{eksp} . W fazie BC anihilują pary elektronowe e^-e^+ . Faza CD i linia przerywana reprezentują powolny rozpad swobodnych neutronów. Krzywa 3 przedstawia zamrożony (ustalony–przyp.red.) ostatecznie stosunek n/p ; część neutronów włącza się do jąder ciężkich.



Rys. 5. Przesuwanie się punktu równowagi neutronowo-protonowej w funkcji temperatury we wczesnym Wszechświecie (opis w tekście)

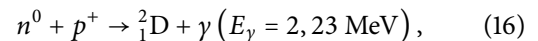
Rysunek 6 ilustruje stosunek liczby neutronów do protonów, jaki istniał na chwilę przed rozpoczęciem pierwotnej nukleosyntezy kosmicznej. Według obliczeń autora [6], gdy temperatura Wszechświata spadła do $T \approx 7 \cdot 10^9$ K istniało 7 razy więcej protonów niż neutronów.



Rys. 6. Zamrożony stosunek neutronów do protonów $n/p=1/7$; protony przedstawione są w postaci czarnych kółek, neutrony zaś jako białe kółka z literą n

5. Przebieg pierwotnej nukleosyntezy kosmicznej

Podstawową reakcją w pierwotnej nukleosyntezie kosmicznej jest proces:

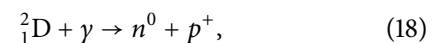


czyli synteza jąder deuteru ${}^2_1\text{D}$. Jądro deuteru zawiera nie tylko proton, ale również neutron, który zwiększa masę, lecz nie zmienia ładunku jądra. Energię wiązania deuteronu unosi foton γ . Energia fotonu E_γ jest równa energii wiązania neutronu z protonem w jądrze deuteru, czyli:

$$E_\gamma = \Delta E = (m_p + m_n - m_D) c^2 = 2,23 \text{ MeV}. \quad (17)$$

O wielkości tej energii daje pojęcie fakt, że foton promieniowania widzialnego (światła) posiada energię około 2,5 eV.

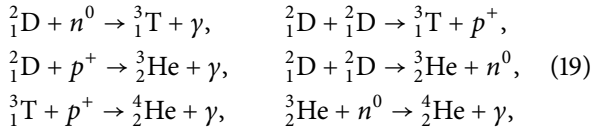
Proces syntezy deuteronu (16) był spowalniany przez konkurencyjny proces, czyli dysocjację, proces odwrotny do (16). Pochłonięcie przez jądro deuteru fotonu o odpowiedniej energii:



powoduje, że jądro deuteru rozpada się na składniki, czyli na neutron i proton. Okres dynamicznej równowagi miał duże znaczenie w pierwotnej nukleosyntezie. Spowalniał znacząco tworzenie jąder atomowych. Proces syntezy i dysocjacji jąder deuteru trwał tak długo, jak długo we Wszechświecie istniały fotony o energii 2,23 MeV. Proces budowania najbliższych pierwiastków zaczął się dopiero wtedy, gdy temperatura „ognistej kuli” spadła poniżej 10^{10} K, krytycznej wartości, którą Wszechświat osiągnął w pierwszej sekundzie istnienia.

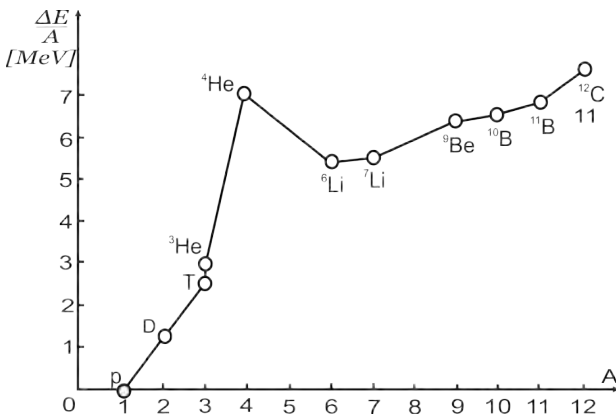
W 100 sekund po Wielkim Wybuchu temperatura we Wszechświecie spadła do $T \approx 10^9$ K. Tempo dysocjacji stało się tak małe, że jądra deuteru nie mogły się już

rozpadać. Nastąpił wzrost liczby jąder deuteru. Zaczęły intensywnie zachodzić następujące procesy:



przy czym jądra deuteru oznaczamy ${}^2_1\text{D}$, jądra trytu – ${}^3_1\text{T}$.

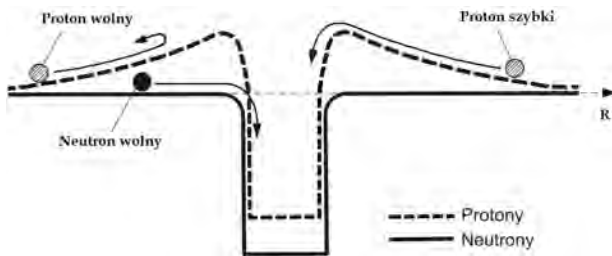
Reakcje (19) przedstawiają najważniejsze procesy prowadzące do powstania jąder helu. Najbardziej stabilny jest normalny izotop helu-4 z największą ze wszystkich energią wiązania (rys. 7); tryt i beryl-7 są radioaktywne.



Rys. 7. Średnia energia wiązania nukleonu w jądrach lekkich pierwiastków. Energię odpowiadającą deficytowi masy nazywamy energią wiązania

Na rysunku 7 widzimy, że przy przechodzeniu od jednego jądra do drugiego różnice deficytów mas są duże. Szczególnie trwały jest hel-4, którego defekt masy wynosi 7 MeV na nukleon.

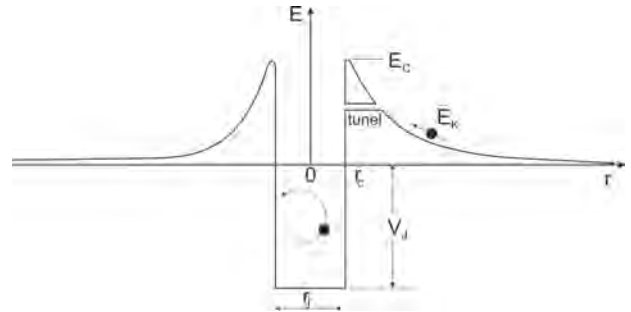
Jakie jest prawdopodobieństwo zajścia reakcji (19)? Wynik reakcji jądrowej zależy niemal całkowicie od gęstości i temperatury. Aby jądra atomowe mogły łączyć się ze sobą i tworzyć nowe jądra, muszą zbliżyć się do siebie na odległość rzędu 10^{-14} cm. Na tych odległościach zaczynają działać siły jądrowe. Neutrony z łatwością zbliżają się do protonu lub innego jądra atomowego na odległość 10^{-14} cm i zostają schwytane (rys. 8) [7].



Rys. 8. Zjawisko tunelowe

Protony i inne naładowane jądra atomowe muszą przezwyciężyć odpychanie spowodowane siłami Co-

ulomba. Cząstki naładowane napotykać na barierę Coulomba, która jest wynikiem współgrania oddziaływań jądrowych przyciągających i odpychających coulombowskich. Wysokość bariery Coulomba E_C jest proporcjonalna do $E_C \sim Z_1 e \cdot Z_2 e$ (rys. 9).



Rys. 9. Przebieg bariery Coulomba – energia oddziaływania między dwoma cząstkami naładowanymi w funkcji odległości: E_C – bariera Coulomba, r_j – zasięg oddziaływań jądrowych, r_C – odległość od środka jądra atomowego, przy której zaczynają działać siły jądrowe

Prawdopodobieństwo zajścia reakcji wywołanej przez naładowane cząstki jest funkcją dwu prawdopodobieństw: $n(E)$ i $P(E)$, które ilustruje rys. 10. Prawdopodobieństwo, że cząstki naładowane posiadają energię kinetyczną $n(E)$ wyrażamy za pomocą następującej zależności [8]:

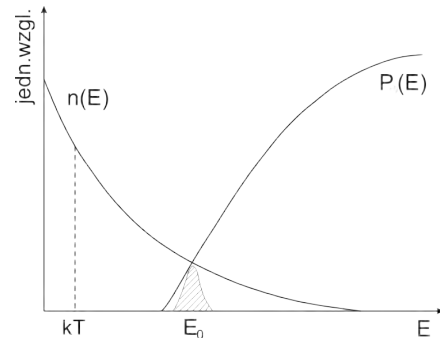
$$n(E) \sim E^{1/2} e^{-E/2kT}. \quad (20)$$

Prawdopodobieństwo przejścia cząstki przez barierę Coulomba $P(E)$ dane jest wyrażeniem [8]:

$$P(E) \sim e^{-\sqrt{E_G/E}}, \quad (21)$$

przy czym E_G jest energią Gamowa. Czynniki $P(E)$ znika przy niskich energiach.

Dwa czynniki, określone wzorami (20) i (21) decydują o szybkości reakcji termojądrowej. Ich iloczyn osiąga wartość maksymalną przy pewnej energii E_0 (rys. 10), która zazwyczaj przewyższa znacznie średnią energię kinetyczną kT .



Rys. 10. Prawdopodobieństwo zajścia reakcji między cząstkami naładowanymi elektrycznie; efekt tunelowy w warunkach rozkładu prędkości cząstek Maxwella. Powierzchnia zakreskowana określa prawdopodobieństwo zajścia reakcji. Jej wielkość zależy od iloczynu prawdopodobieństw $n(E)$ i $P(E)$. Efekt silnie zależy od temperatury

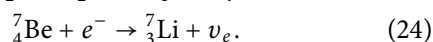
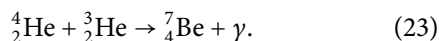
Przedstawione powyżej rozumowanie dotyczy wszystkich reakcji, o których była mowa w tym artykule.

Obfitość helu we Wszechświecie zależy od stosunku liczby neutronów do liczby protonów. Parametr O_{He} stosowany w tych obliczeniach ma przybliżoną formułę [9]:

$$O_{\text{He}} \approx \frac{2n/p}{1 + n/p}. \quad (22)$$

Pierwotna zawartość helu pochodzącego z nukleosyntezy pierwotnej zależała od wartości stosunku N_n/N_p , który wyznaczony był przez odwrotne reakcje (1) i (2). Parametr O_{He} zależy zarówno od szybkości przemiany neutronów w protony i protonów w neutrony (pod wpływem słabych oddziaływań jądrowych), jak i od szybkości ekspansji Wszechświata. Dla $N_n/N_p \approx 1/7$ wartość tego parametru wynosi $O_{\text{He}} \approx 25\%$.

Gdy jądro lżejszej odmiany helu ${}^3_2\text{He}$ z trudem przechodziło przez wysoką barierę coulombowską wokół helu-4 [reakcja (23)], powstało nietrwałe jądro berylu beryl-7, z którego po wychwycie elektronu z plazmy tworzył się trwały lit-7. Nadmiar energii unosiło neutrino elektronowe w reakcji (24).



Reakcja (24) ilustruje samorzutny rozpad jądra beryl-7 przez wychwyty elektronu.

Wszechświat rozszerzając się stygł, czyli średnia energia kinetyczna cząstek stale malała. Ten spadek energii nie dał żadnej możliwości na powstanie cięższego jądra niż jądra litu ${}^7_3\text{Li}$. Praktycznie nie było jąder cięższych, utworzonych w tym czasie w Kosmosie, niż ${}^7_3\text{Li}$. Skończył się łańcuch procesów pierwotnej syntezy pierwiastków.

Pramateria, z której powstały pierwsze gwiazdy i galaktyki, była złożona w około 77% z wodoru i w 23% z helu. Takie właśnie zawartości wodoru i helu (oraz odrobinę litu-7) obserwuje się w obłokach gazowych i w bardzo starych gwiazdach. Obfitość helu w najstarszych obiektach wynosi około 23%. Teoria Wielkiego Wybuchu jednoznacznie przewidywała, że żaden obiekt astronomiczny nie powinien mieć mniej niż 23% helu. Tymczasem teoria syntezy pierwiastków w gwiazdach i supernowych nie potrafiła wyjaśnić, dlaczego istnieje tak dużo helu i dlaczego jego obfitość jest wszędzie taka sama. Analiza częstotliwości występowania helu w różnych rodzajach gwiazd, nawet tych najstarszych, wykazała, że nie można całej ilości helu we Wszechświecie przypisać tylko procesom spalania wodoru w gwiazdach. Właściwie to jest tak, że większość jąder helu-4 powstała wraz z wodorem w 100 s po Wielkim Wybuchu w kolejnych reakcjach (19) i od razu wraz z wodorem

weszła w skład najstarszych gwiazd. Tak więc i wodór i większa część helu we Wszechświecie stanowią skamienia z początkowych faz ekspansji Kosmosu. Połączenie powstania helu z Wielkim Wybuchem rozwiązało więc istniejący przez długi czas problem i przekonało fizyków, że wiedza o pierwszych kilku sekundach kosmicznej historii ma solidne podstawy.

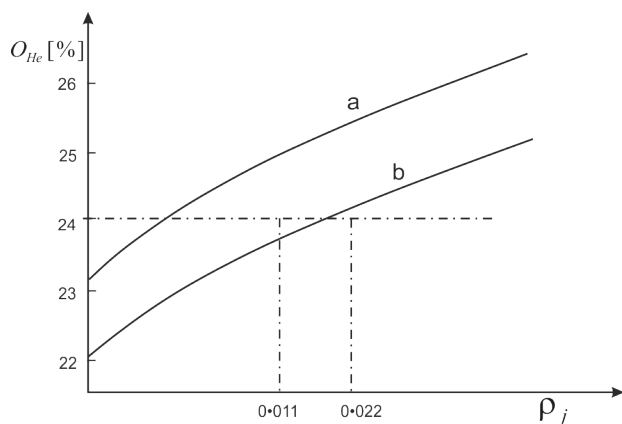
Przeszkodę w powstawaniu dalszych jąder stanowi fakt nieistnienia jakiegokolwiek, choćby krótko żyjącego jądra o liczbie masowej $A = 5$. Nic nie da się dołączyć do bardzo trwałego jądra helu ${}^4_2\text{He}$. Neutrony i protony odbijają się od tego jądra jak groch od ściany. Pierwotna synteza zatrzymała się na helu, ponieważ nie istnieją trwałe jądra o liczbach masowych 5 i 8. Tym samym zapobiegło to destrukcji wytworzonego helu. Powstało więc wąskie „gardło” w powstawaniu cięższych jąder.

Model gorącego Wielkiego Wybuchu podał pierwszą konkretną propozycję obrazu Wszechświata w jego stadium początkowym. Umożliwiło to przeprowadzenie analizy reakcji między cząstkami elementarnymi, w wyniku których powstawały różne jądra atomowe. Mechanizmy pierwotnej nukleosyntezy kosmicznej prowadzą do ilościowych przewidywań proporcji powstających jąder atomowych, co możemy porównać z zaobserwowaną obfitością występowania pierwiastków chemicznych we Wszechświecie. Obliczenia pokazują, że w tym chemicznym bilansie 75% całej masy materii barionowej (zwykłej materii) przypada na wodór, prawie 24% na hel, a reszta rozkłada się na kilka lekkich pierwiastków chemicznych: deuter – 10^{-4} , hel-3 – 10^{-5} oraz lit-7 – 10^{-10} całej masy Wszechświata.

Zgodność z obserwowanymi obfitościami pierwiastków można uzyskać tylko wtedy, gdy istnieją trzy rodzaje neutrin: elektronowe, mionowe i tau. Ale fizycy teoretycy nie wykluczali możliwości, że lista ta nie jest jeszcze pełna. Obecnie na podstawie eksperymentów LEP z rozpadem cząstki Z^0 przeprowadzonych w CERN pod Genewą wiemy, że innych rodzajów neutrin nie ma [10].

Rysunek 11 przedstawia ilość helu powstającego przy trzech lub czterech rodzajach neutrin. Obserwowana w Kosmosie ilość helu-4 zawarta jest w przedziale 22–24%. Astronomowie szacują średnią gęstość materii we Wszechświecie i porównują ją z gęstością krytyczną, która silnie zależy od wartości stałej Hubble’a! [1, 11]. Jeżeli gęstość materii mieści się pomiędzy 0,011 i 0,022 gęstości krytycznej, to przewidywane obfitości helu-3, deuteru i litu-7 są także zgodne z obserwowanymi. Taki przedział gęstości jest zgodny z obserwowaną gęstością materii zawartej w gwiazdach i galaktykach. Nato-

miast założenie istnienia czterech typów neutrin prowadzi do przewidywania zbyt wysokiej, w stosunku do największej dozwolonej przez obserwacje (24%) ilości helu-4. Założenia są zgodne z obserwacjami astronomicznymi tylko wówczas, gdy istnieją trzy rodzaje neutrin.



Rys. 11. Obfitość helu-4, który powstał we wczesnym Kosmosie w funkcji gęstości materii wyrażonej w jednostkach gęstości krytycznej; krzywa *a* odpowiada czterem typom neutrin, zaś krzywa *b* – trzem rodzajom neutrin. Linia przerywana pozioma oznacza największą dozwoloną obfitość helu

Pierwotna nukleosynteza kosmiczna skończyła się w czasie $t \approx 1000$ s ($kT \approx 0,03$ MeV), kiedy energia termiczna przypadająca na cząstkę stała się za mała do pokonania barier potencjału elektrostatycznego i jądra praktycznie przestały się łączyć.

Literatura

- [1] H. Drozdowski, *Fizyczny obraz świata*, Wydawnictwo Naukowe UAM 2007.
- [2] C. Hayashi, *Proton-Neutron Concentration Ratio in the Expanding Universe at the Stages Preceding the Formation of the Elements*, Prog. Theor. Phys. 5, 224-235 (1950).
- [3] R.C. Tolman, *Relativity Thermodynamics and Cosmology*, Clarendon Press 1934.
- [4] P.J.E. Peebles, *Physical Cosmology*, Princeton University Press 1971.
- [5] H. Reeves, *Dernières nouvelles du cosmos*, Editions du Seuil, 1994.
- [6] H. Drozdowski, *O pochodzeniu pierwiastków*, wykład habilitacyjny na Wydziale Fizyki UAM 24-05-2002 [w]: archiwum CKK 2002.
- [7] B.R. Martin, *Nuclear and Particle Physics*, Second Edition, John Wiley & Sons 2009.
- [8] A. Strzałkowski, *Wstęp do fizyki jądra atomowego*, PWN 1978.
- [9] J. Gribbin, *W poszukiwaniu wielkiego wybuchu. Kosmologia i fizyka kwantowa*, przekład Piotr Amsterdamski, Zysk i S-ka 2000.
- [10] M.L. Kutner, *Astronomy. A Physical Perspective*, 2nd ed., Cambridge University Press, 2012.
- [11] H. Drozdowski, *Skąd się wzięły pierwiastki chemiczne we Wszechświecie?* [w]: Wykład Otwarty na Wydziale Fizyki UAM 14.11.2018, DVD video; fizyka@amu.edu.pl Poznań 2018.

... z tak prostych elementów wyjściowych powstało w drodze ewolucji i powstaje nadal nieskończenie wiele najdoskonalszych i najbardziej osobliwych form.

ostatnie zdanie z dzieła Karola Darwina
Powstawanie gatunków w drodze doboru naturalnego (1859)

Jak powstały pierwiastki chemiczne we Wszechświecie? część 2 Geneza pierwiastków ciężkich

Henryk Drozdowski

Wydział Fizyki, Zakład Fizyki Dielektryków, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

Streszczenie. Określenie *ciężkie pierwiastki* użyłem w tytule części w takim sensie, w jakim stosują je astrofizycy, którzy dzielą wszystkie pierwiastki na wodór, hel, lit i ... ciężkie. W artykule omawiam związek między tempem ekspansji Kosmosu a powstaniem węgla, który zapoczątkował ścieżkę do wytworzenia niezbędnych pierwiastków do powstania życia. Niestabilność jądra berylu-8 oraz istnienie rezonansowego poziomu wzbudzonego o energii 7,65 MeV w jądrze węgla-12 odegrały decydującą rolę w rozkładzie gęstości występowania nuklidów ciężkich we Wszechświecie. Przedstawiam mechanizm nukleosyntezy pierwiastków ciężkich w reakcjach wychwytu neutronów. Kolejne wychwyty neutronów przez jądra, z następującym po tym rozpadem β^- , są procesem, w którym tworzą się wewnątrz gwiazd wszystkie pierwiastki od żelaza-56 do bizmutu-209 włącznie. Proces *slow* wytwarza jądra atomowe bogate w protony, natomiast proces *rapid* – jądra bogate w neutrony. Tor i uran powstają tylko w czasie wybuchów supernowych. Badając genezę pierwiastków chemicznych we Wszechświecie odnajdujemy ślady naszych prapoczątków. Chciałbym swoje zadziwienie misterną strukturą Wszechświata przekazać Czytelnikowi.

1. Przeszkoda na drodze do ciężkich jąder atomowych

W 1948 roku Ralph Alpher, Hans Bethe i George Gamow rozwinęli teorię powstawania jąder atomowych we wczesnych fazach ewolucji Wszechświata tuż po Wielkim Wybuchu (teoria alfa-beta-gamma) [1]. Założyli oni, że w początkowym stadium ewolucji Kosmos wypełniony był fotonami i neutronami. Wszechświat rozszerzał się, zaś temperatura i gęstość materii malały; neutrony rozpadały się na protony i elektrony (rozpad β^-). Potem oddziaływanie neutronów i protonów doprowadziło do powstania deuteru i trytu. Według teorii alfa-beta-gamma jądra cięższe miały powstawać w wyniku przyłączenia kolejnych neutronów i dalszych przemian β^- . We Wszechświecie nie występują jednak stabilne jądra atomowe o liczbach masowych 5 i 8. Zaproponowany mechanizm mógł więc wytłumaczyć tylko syntezę helu.

Pierwiastki cięższe od ${}^4_2\text{He}$ nie mogły powstać podczas Wielkiego Wybuchu z dwóch powodów. Po pierwsze, nic nie da się dołączyć do bardzo trwałego helu ${}^4_2\text{He}$. O trwałości tego jądra świadczy fakt, że podczas samorzutnej przemiany nie obserwuje się nigdy emisji protonów, deuteronów, jąder trytu lub ${}^3\text{He}$. Jeśli neutron

zbliży się do ${}^4\text{He}$, by utworzyć ${}^5\text{He}$, nie przyłącza się, lecz natychmiast z powrotem odbija. Neutrony i protony odbijają się od jądra helu-4, jak groch od ściany. Ścieżka prowadząca do cięższych jąder, zaczynająca się od dodania protonu lub neutronu do jądra helu-4 w celu stworzenia jądra z pięcioma nukleonami, okazała się zabroniona. Jądro o pięciu nukleonach jest zakazane. W tym miejscu proces syntezy jądrowej się zatrzymał. Po drugie, wyprodukowanie cięższych pierwiastków wymaga utrzymania wysokich temperatur przez czas dłuższy niż trwała początkowa faza Wielkiego Wybuchu. Temperatura Kosmosu spadała tak szybko, że po kilku minutach protony nie miały już energii wystarczającej do zderzenia z siłą wystarczającą do przyłączenia się.

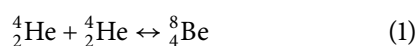
Problem powstania ciężkich pierwiastków zniknąłby, gdyby jądro helu-4 zaabsorbowało jednocześnie neutron i proton, przeskakując niestabilność pięciu nukleonów i bezpośrednio przekształcając się w stabilne jądro litu z sześcioma nukleonami (3 protony i 3 neutrony). Ale szansa na to, że proton i neutron jednocześnie uderzą w odpowiedni sposób w jądro helu, jest niewyobrażalnie mała.

Inny sposób ominięcia etapu pięciu nukleonów mógł polegać na połączeniu się dwóch jąder helu i utworzeniu jądra z ośmioma nukleonami, ale takie jądro również jest z natury niestabilne i rozpada się ponownie na dwa jądra helu. Wszechświat w „złośliwy” sposób postanowił zablokować te dwie najbardziej oczywiste ścieżki prowadzące od jąder lekkich do ciężkich.

Jest to dobre miejsce do refleksji filozoficznej. Warto zauważyć, iż brak stabilnej masy 5 ma zasadnicze znaczenie dla naszego istnienia opartego na węglu. Przypuśćmy jednak, że mamy stabilną masę 5. Wówczas podczas pierwszych minut istnienia Wszechświata, który był w tym czasie wypełniony olbrzymią liczbą protonów, proces tworzenia się jąder mógłby zachodzić poprzez wzrost masy o 1, po „jądrowej drabinie”, aż do żelaza. W ten sposób ilości węgla (masa 12) i tlenu (masa 16) nie wyróżniałyby się na tle innych pierwiastków. Fakt, iż potrzeba dużo czasu, aby wytworzyć cięższe pierwiastki, w sposób decydujący zależy od nieistnienia stabilnego jądra o masie 5!

2. Wąskie „gardło berylowe” czyli „feralna ósemka”

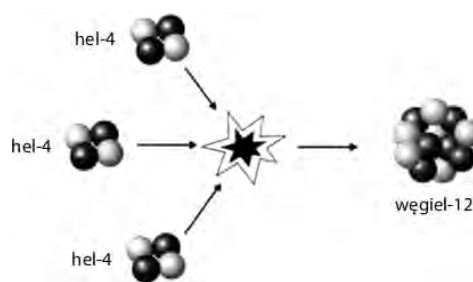
Zderzenie dwóch jąder helu-4 o odpowiednich energiach powinno spowodować utworzenie również bardzo trwałego jądra berylu-8. Ale połączenie dwóch jąder helu jest nietrwałe, gdyż w procesie syntez:



występuje „wąskie gardło”, ponieważ utworzone w ten sposób jądro berylu-8 jest wyjątkowo niestabilne. Ulega niemal natychmiast rozpadowi na lżejsze cząstki α z połowicznym czasem życia 10^{-17} s. Nie było wystarczająco długiego czasu, aby dołączyć do niego jeszcze jedną cząstkę α i utworzyć jądro węgla-12. Podejmowano różne, nawet „desperackie” próby wyjaśnienia tego problemu, ale były one mało wiarygodne [2]. Cała „sprawa berylu” pozostawała w impasie.

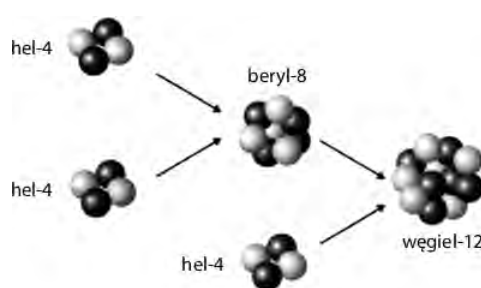
Największą trudnością było pokonanie przeszkody spowodowanej niestabilnością berylu-8. Jak połączyć trzy jądra helu, by utworzyć węgiel, nie przechodząc wcześniej przez stadium dwóch? Mogło to się stać tylko w jeden sposób: przyjmując, że zachodzą zderzenia trzech cząstek alfa, w wyniku czego powstaje jądro węgla-12 (rys. 1). Jednak nie można było skorzystać z tego mechanizmu, ponieważ jest to zdarzenie bardzo mało prawdopodobne. Nawet kilka minut po Wielkim Wybuchu gęstość i temperatura materii były już zbyt małe, aby częstotliwość takich zderzeń była dostatecznie duża i można było w ten sposób wyjaśnić pochodzenie ciężkich pierwiastków.

Mechanizm przejścia przez „feralną ósemkę” zaproponowali na początku lat 50. XX w. niezależnie od siebie:



Rys. 1. Hipotetyczna możliwość powstania węgla, czyli jednoczesne zderzenie trzech jąder helu-4

astrofizyk z Północnej Irlandii, Estończyk z pochodzenia, E. J. Öpik [3] oraz amerykański astrofizyk Edward Salpeter [4]. Stwierdzili oni, że chociaż beryl-8 jest niestabilny, może być obecny w wystarczających ilościach w gorącym i gęstym rdzeniu czerwonych olbrzymów, stanowiąc środowisko do utworzenia się węgla-12. Wówczas jednoczesne zderzenie trzech jąder helu można przedstawić jako proces dwuetapowy (rys. 2): najpierw zachodzi proces (1), przy czym powstające jądro berylu-8 jest wprawdzie nietrwałe, ale we wnętrzu czerwonych olbrzymów, przy wielkiej gęstości i temperaturze odbywa się tyle zderzeń między cząstkami alfa, że jądra berylu-8 stale ulegają odtworzeniu i dochodzi w końcu do ustalenia pewnej równowagi między helem-4 i berylem-8.



Rys. 2. Powstawanie węgla-12 rozpoczynające się od zderzenia dwóch jąder helu-4 i utworzenia berylu-8; z kolei jądro berylu-8 łączy się z jądrem helu-4. Zanim jądro utworzone w fuzji dwóch cząstek α rozpadnie się, zderza się ono z trzecią cząstką α . Taka reakcja jest bardziej prawdopodobna niż równoczesne zderzenie się trzech cząstek

3. Niezwykle gwiazdy – czerwone olbrzymy

Jeżeli masa gwiazdy jest dostatecznie duża, to temperatura osiągnie odpowiednio dużą wartość. W fazie rozwoju, polegającej na spalaniu wodoru, gwiazdy znajdują się na głównym ciągu diagramu Hertzsprunga–Russella. Natomiast w miarę zmiany składu chemicznego gwiazdy, przy wzrastającej w jej jądrze zawartości helu, zaczyna ona schodzić z ciągu głównego diagramu w stronę czerwonych olbrzymów. W fazie olbrzymia jądro gwiazdy kurczy się i rozgrzewa, natomiast zewnętrzna powłoka rozszerza się.

Protony i neutrony tworzące jądra są poddane działaniu przyciągającej siły jądrowej, która ujawnia się na bardzo małych odległościach. Jest to oddziaływanie jądrowe silne, dzięki któremu jądra atomowe są mocno związane. Natomiast między protonami jąder działa bariera potencjału Coulomba, której rola rośnie wraz ze wzrastającą liczbą atomową.

Wynik jakiegokolwiek reakcji jądrowej zależy niemal całkowicie od gęstości i temperatury. Kiedy temperatura jądra gwiazdy wzrośnie do $12 \cdot 10^7$ K, a jego gęstość osiągnie 10^5 g/cm³ (czyli 100 tysięcy razy więcej niż wynosi gęstość wody), przekroczona zostaje bariera coulombowska, czyli zostaje przezwyciężona siła elektrostatycznego odpychania między dwoma jądrami helu. Przy takich wartościach temperatury plazmy i gęstości materii zaczynają się nowe procesy: fuzja jąder helu, opisana równaniem (1). Reakcja ta wymaga wyższych temperatur, gdyż jądra helu, ze względu na dwukrotnie większy ładunek elektryczny, oddziałują silniej niż jądra wodoru – potrzeba zatem wyższych energii, aby pokonać ich elektrostatyczne odpychanie i doprowadzić do fuzji. W temperaturze $12 \cdot 10^7$ K jądra helu-4 pokonują siły wzajemnego odpychania i łączą się tworząc jądro berylu ⁸Be. Jednak ⁸Be nie jest jądrem trwałym i rozpada się ponownie na dwa jądra helu. Beryl ma bardzo krótki czas połowicznego rozpadu (około 10^{-17} s), ale nawet w ciągu tak krótkiego czasu dochodzi do dodatkowego zderzenia i pochłonięcia cząstki alfa. W wyniku tego powstanie jądro ¹²C. Ten proces spalania helu nazywa się potrójnym procesem alfa, ponieważ jądro ⁴He jest także nazywane cząstką alfa oraz ten proces wymaga praktycznie równoczesnego zderzenia tych trzech cząstek (rys. 2). Wewnątrz gwiazd materia pozostaje w stanie o bardzo dużej gęstości i temperaturze przez wiele milionów lat, a zatem nawet w stosunkowo rzadkich zderzeniach trzech cząstek α powstała znacząca ilość węgla.

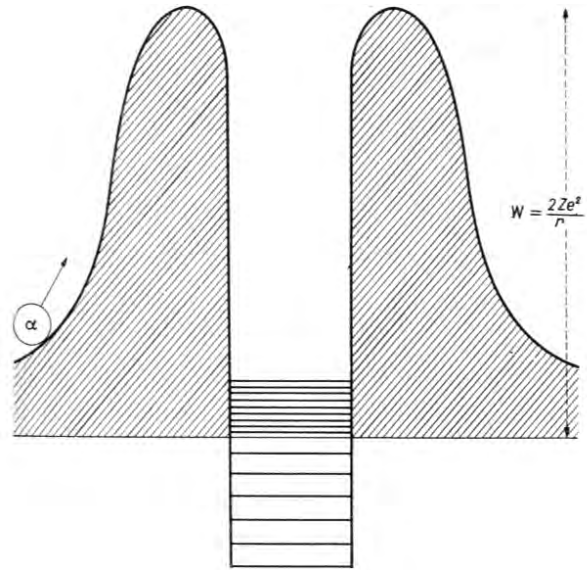
Proces łączenia się berylu z helem (rys. 2) nie może zachodzić w gwiazdach takich jak nasze Słońce, gdyż temperatura w ich wnętrzu jest zbyt niska. Produkcja węgla we wnętrzach masywnych gwiazd jest procesem, który dotyczy nas bezpośrednio. Proces ten wymaga niezwykle precyzyjnego zgrania silnego oddziaływania jądrowego i oddziaływania elektromagnetycznego. Między nadlatującą cząstką a jądrem istnieje coulombowska bariera potencjału, od której wysokości zależy możliwość przeniknięcia cząstki do jądra. Dla ciężkich jąder bariera potencjału jest znacznie większa od energii kinetycznej cząstki α .

Wartość bariery potencjału W (rys. 3) obliczamy z równania:

$$W = \frac{q \cdot Ze}{r}, \quad (2)$$

gdzie: q – ładunek cząstki „atakującej”, Ze – ładunek ją-

dra, r – promień jądra, W – energia potencjalna cząstki względem jądra.



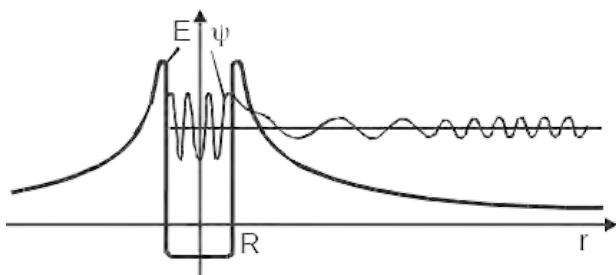
Rys. 3. Bariera potencjału między nadlatującą cząstką α a jądrem atomowym

Jak to jest możliwe, że reakcje jądrowe przebiegają we wnętrzu gwiazdy, choć średnia energia cząstek naładowanych jest znacznie mniejsza od wysokości bariery potencjału? Według fizyki klasycznej procesy takie są niemożliwe, ponieważ cząstka oddziałująca musiałaby mieć energię większą od wysokości bariery potencjału. Atomy, jądra atomowe i cząstki mikroświata podlegają jednak prawom mechaniki kwantowej, które różnią się od praw mechaniki klasycznej, rządzącej zjawiskami świata makroskopowego. Zachodzi tu efekt tunelowy, czyli przeniknięcie cząstki przez barierę potencjału nawet wówczas, gdy energia cząstki jest od tej bariery znacznie mniejsza. Szybkość przebiegu reakcji jądrowych we wnętrzu gwiazd zależy w zasadniczy sposób od efektu tunelowego. W 1928 roku George Gamow podał kwantową teorię zjawiska tunelowego. Dla wyjaśnienia tego zjawiska trzeba cząstce poruszającej się z pewną prędkością przyporządkować falę, która ją reprezentuje. Funkcja falowa ψ cząstki o energii większej od zera, ale mniejszej od maksymalnej wysokości potencjału, która przebywa w obszarze dozwolonym z punktu widzenia fizyki klasycznej, powinna być dopasowana do funkcji falowej cząstki znajdującej się wewnątrz bariery potencjału. Funkcja falowa musi więc przebiegać w sposób ciągły w obu obszarach (rys. 4).

Reakcje syntezy termojądrowej w gwiazdach, zachodzące w temperaturach pomiędzy 10^7 K a 10^9 K, są zjawiskiem kwantowym – zachodzą dzięki przenikaniu bariery coulombowskiej w efekcie tunelowym.

Falowy obraz zjawisk świata mikroskopowego dopuszcza zatem przejście fali przez obszar, w którym jej

przebywanie jest z punktu widzenia fizyki klasycznej zabronione. Prawdopodobieństwo przejścia fali określone jest przez stosunek strumienia cząstek przechodzących do strumienia cząstek padających.



Rys. 4. Funkcja falowa cząstki przenikającej przez barierę potencjału (E – energia, ψ – funkcja falowa cząstki, R – promień jądra, r – odległość)

Kwantowe tunelowanie przez barierę potencjału elektrostatycznego zachodzi z zauważalnym prawdopodobieństwem wtedy, gdy energia kinetyczna zderzających się jąder jest dana wzorem [5]:

$$E_k = 1,22 \cdot 10^{-4} \left(Z_1^2 Z_2^2 \frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2} \right)^{1/3} T^{2/3} \text{ keV.} \quad (3)$$

Jest to wzór na względną energię kinetyczną oddziałujących dwóch jąder. Z równania (3) widać, że E_k rośnie z temperaturą jak $T^{2/3}$.

4. Zjawisko rezonansu w reakcjach jądrowych

Każde jądro atomowe istnieje w pewnych ściśle określonych i skwantowanych poziomach energetycznych, które można sobie wyobrazić jako „drabiny ze szczeblami” ustawionymi w różnej odległości. Może ono zajmować różne poziomy energetyczne, czyli „przeskakiwać” z jednego „szczebla” na inny, pochłaniając albo emitując skwantowane porcje energii, ale nie może zająć pozycji między tymi „szczeblami”. W momencie zderzenia dwóch jąder helu-4 ich całkowita energia jest równa sumie energii odpowiadającej łącznej masie ich jąder oraz energii kinetycznej, z jaką zderzają się one w temperaturze wnętrza gwiazdy. Jeśli jest ona mniejsza od najbliższego dostępnego poziomu, to fuzja obu zderzających się jąder nie nastąpi, jeśli zaś jest większa, to nowo powstałe jądro usuwa jej nadmiar przez wypromieniowanie odpowiedniej porcji energii lub nawet nukleonu. W obu przypadkach konieczność taka zmniejsza prawdopodobieństwo reakcji syntezy.

Masy zderzających się jąder nie można zmienić, jeśli jednak istnieją właściwe warunki termodynamiczne, to całkowita energia nowo powstałego jądra może dokładnie odpowiadać jednemu z jego poziomów energetycznych i wtedy reakcja syntezy nowego jądra przebiega szczególnie wydajnie. Na tym polega zjawisko rezonansu w reakcjach jądrowych [6].

W pobliżu poziomu rezonansowego przekrój czynny określamy za pomocą równania Breit-Wignera [7]:

$$\sigma(x, y) = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot \frac{1}{(E - E_r)^2 + (\Gamma/2)^2} \cdot \Gamma_x \Gamma_y, \quad (4)$$

gdzie λ jest długością fali de Broglie’a cząstki padającej, E – energią reakcji syntezy Be-8 i He-4, E_r – energią rezonansową (energia odpowiadająca maksimum przekroju czynnego), Γ_x zaś jest szerokością cząstkową utworzenia jądra złożonego w reakcji termojądrowej, Γ_y – cząstkową szerokością poziomu ze względu na emisję cząstki y lub promieniowania γ , natomiast Γ jest szerokością poziomu energetycznego jądra wzbudzonego. Ze wzoru (4) wynika, że wartości przekrojów czynnych zależą od energii cząstki uderzającej oraz od ładunku i masy jąder bombardowanych. Pierwszy czynnik w tym równaniu jest miarą prawdopodobieństwa utworzenia jądra złożonego i jest proporcjonalny do λ^2 . Czynnik drugi

$$\frac{1}{(E - E_r)^2 + (\Gamma/2)^2} \quad (5)$$

jest czynnikiem rezonansowym i wyraża właściwości rezonansowe. Dla $E = E_r$ mianownik tego wyrażenia ma najmniejszą wartość, a przekrój czynny $\sigma(x, y)$ osiąga maksimum. W miarę wzrostu różnicy między E i E_r mianownik wzrasta, zaś czynnik rezonansowy i przekrój maleją. Trzeci czynnik przedstawia prawdopodobieństwo określonego sposobu rozpadu jądra złożonego i wyraża się za pomocą szerokości cząstkowych Γ_x oraz Γ_y . Przekrój czynny jest miarą prawdopodobieństwa zajścia określonej reakcji jądrowej.

5. Hipoteza Hoyle’a o istnieniu rezonansowego poziomu energii w węglu-12

W 1952 roku Salpeter opublikował pracę na temat syntezy węgla z helu w potrójnym procesie alfa, w której wykazał, że rdzeń czerwonego olbrzyma zawiera jedno jądro berylu-8 na każdy miliard jąder helu. Ponadto stwierdził, że przekrój czynny na powstanie węgla-12 jest zbyt mały, aby mogła powstać duża jego ilość.

Fred Hoyle szczegółowo zbadał proces 3α na podstawie pomiarów spektroskopowych proporcji ciężkich pierwiastków w gwiazdach i obliczył, jak szybko musi zachodzić reakcja z udziałem trzech cząstek alfa. Stwierdził, że zachodzi ona o wiele za wolno, aby potrójny proces alfa – w takiej postaci, jak przedstawił Salpeter – mógł wyprodukować znaczne ilości węgla, które istnieją we Wszechświecie. Obliczono metodami fizyki jądrowej ilość węgla-12, tworzącą się podczas ewolucji gwiazdy, a w następstwie oszacowano kosmiczne rozpowszechnienie węgla. Okazało się jednak, iż jest ono

o rząd wielkości niższe od rzeczywistego. I wtedy właśnie Fred Hoyle w 1953 roku wysunął genialną hipotezę o istnieniu rezonansowego poziomu wzbudzonego jądra węgla-12 w tym przedziale energii, w którym zachodzi efektywne oddziaływanie między jądrami berylu-8 i helu-4 we wnętrzu gwiazdy.

Hoyle pierwszy zrozumiał, że w jądrze węgla-12 musi istnieć stan energetyczny na poziomie dokładnie odpowiadającym stanowi energetycznemu w sytuacji, kiedy jądro ^8Be „absorbuje” inną cząstkę α . Zasugerował, że reakcja syntezy węgla może zachodzić w sposób rezonansowy, czyli musi istnieć wzbudzona postać węgla-12 o takiej masie, która dokładnie odpowiada łącznej masie berylu-8 i helu-4.

Hoyle zdał sobie sprawę, że aby węgiel mógł istnieć we Wszechświecie, musiał powstać we wnętrzu gwiazd i że mogło się to zdarzyć tylko wtedy, gdy precyzyjne „dostrojenie” pozwalało na natychmiastowe „zlanie się” trzech jąder ^4He w jedno jądro węgla-12 w stanie wzbudzonym (jądro węgla-12 na pewnym poziomie energetycznym wyższym niż podstawowy). Co więcej, jest to jedyny sposób, by w gwiazdach mogła dokonać się synteza węgla.

Hipoteza Hoyle’a o istnieniu odpowiedniego stanu wzbudzonego jądra węgla bazowała na następującym rozumowaniu. Człowiek istnieje we Wszechświecie. Życie oparte jest na węglu. Dlatego i węgiel istnieje we Wszechświecie, a więc w jakiś sposób musiał powstać. Ale jedyna droga prowadząca do uformowania się węgla wymaga istnienia specyficznego stanu wzbudzenia jego jądra. A zatem taki stan musi istnieć.

Hipoteza Hoyle’a oparta była na argumentach antropocentrycznych: wiązała fakt istnienia człowieka z istnieniem nieznanego wówczas stanu węgla-12 o ściśle określonej energii. W swoim argumentach Hoyle stwierdził, że człowiek częściowo jest zbudowany z węgla, więc odpowiedni stan wzbudzony jądra tego pierwiastka musi istnieć, gdyż w przeciwnym razie nie byłoby ani węgla-12, ani człowieka. Jądro węgla musi mieć jakąś szczególną właściwość, która umożliwia mu powstanie mimo niestabilności jądra berylu-8, co, dzięki czemu węgiel jest tak powszechny we Wszechświecie. Gdyby takie jądro węgla istniało, hel-4 mógłby reagować szybciej z berylem-8, tworząc węgiel-12.

W czasie, kiedy Hoyle podał swoją hipotezę nie było żadnych danych, by stwierdzić, że jądro węgla-12 może istnieć w stanie wzbudzonym.

6. Odkrycie nieznanego poziomu energetycznego węgla-12

W obliczu nieugiętej opozycji wobec hipotezy o istnieniu rezonansowego poziomu energii w węglu-12 Hoyle

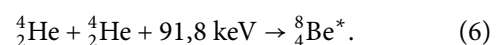
nękał fizyków doświadczalnych z Kellogg Radiation Laboratory (California Institute of Technology) w Pasadenie tak długo, aż wreszcie Willy Fowler ze swoim zespołem podjęli poszukiwania tego stanu. Analizowali oni przebieg zderzeń między jądrami deuteru i azotu-14, w których powstaje węgiel-12 i cząstka alfa. Okazało się, że poziom wzbudzony rzeczywiście istnieje, ale jego energia była o 0,2882 MeV większa od przewidywanej przez Hoyle’a. Fizycy z Caltech zmierzili poziomy energetyczne jądra ^{12}C i znaleźli stan wzbudzony dla wartości 7,6549 MeV. Łączna energia jądra berylu ^8Be oraz cząstki α wynosi 7,3667 MeV. Dodatkowe 0,2882 MeV to właśnie energia kinetyczna jaką wnosi do zderzenia trzecia cząstka α , wprowadzając gładko cały tryplet na odpowiedni poziom energetyczny. Całkowita masa wzbudzonego jądra $^{12}\text{C}^*$ jest więc tylko o 0,2882 MeV wyższa od masy trzech jąder helu.

Fowler, razem z Charlesem Cookiem i C. Lauritsem, potwierdzili eksperymentalnie, że w oddziaływaniach trzech cząstek alfa powstaje jądro węgla w stanie wzbudzonym. Wyprodukowali wzbudzone jądro $^{12}\text{C}^*$ z rozpadu boru-12. Wykazali oni, że część wzbudzonych jąder węgla wraca do stanu podstawowego, ale część rozpada się na trzy cząstki alfa. Takie reakcje jądrowe są odwracalne. Oznacza to, że skoro wzbudzone jądro $^{12}\text{C}^*$ może rozpaść się na trzy cząstki alfa, to również trzy cząstki alfa mogą się połączyć i utworzyć jądro $^{12}\text{C}^*$.

Fowler ze swoim zespołem udowodnił, że w gwiazdach następuje nie tylko przemiana wodoru w hel, ale także helu w węgiel. W 1983 roku Szwedzka Akademia Nauk przyznała Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki Williamowi Alfredowi Fowlerowi za teoretyczne i doświadczalne badania reakcji jądrowych, które miały kluczowe znaczenie w kosmicznej syntezie pierwiastków. Fowler uważany jest za twórcę eksperymentalnej astrofizyki jądrowej [8].

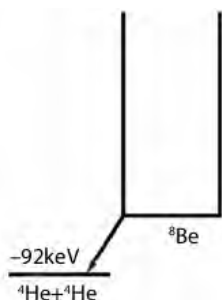
7. Potrójny proces alfa (3α)

Tempo wytwarzania węgla-12 w dwustopniowym potrójnym procesie alfa (rys. 2) zależy od ilości berylu-8, który stanowi tarczę dla cząstek α . Wytwarzanie jądra berylu w tym procesie przedstawia następująca reakcja:



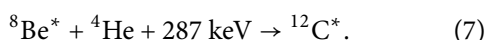
Jest to reakcja endotermiczna o energii progowej rzędu 91,8 keV (rys. 5). Ta reakcja zachodzi tylko wtedy, gdy względna energia kinetyczna obu jąder He – zgodnie ze wzorem (3) – jest równa 91,8 keV.

Jaką rolę odgrywa reakcja (6) w procesie 3α ? Jedyne w warunkach ziemskich jądro ^8Be ma tylko jedną możliwość zaniku: rozpad na dwie cząstki α . W warunkach zaś bardzo gęstej materii wnętrza gwiazdy oraz w wysokiej temperaturze zachodzi tyle zderzeń między ją-

Rys. 5. Powstawanie berylu-8 w procesie 3α

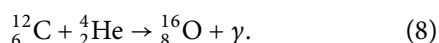
drami helu, że w końcu ustala się pewna równowaga między procesami powstawania i rozpadu berylu, a więc i równowaga między stężeniami helu i berylu. Równowaga ta zależy od gęstości i temperatury.

Przy gęstości 10^5 g/cm^3 i w temperaturze $12 \cdot 10^7 \text{ K}$ przypada – jak wykazał Salpeter – jedno jądro ^8Be na miliard jąder ^4He . W warunkach tak ogromnego stężenia cząstek α jakie istnieje wewnątrz gwiazdy, zanik nietrwałego jądra ^8Be może następować również przez wychwyt cząstki α (zanim beryl zdąży się rozpaść). W ciągu swojego bardzo krótkiego życia jądro berylu-8 może więc wychwycić jądro helu-4 i utworzyć jądro $^{12}\text{C}^*$ w stanie silnie wzbudzonym:

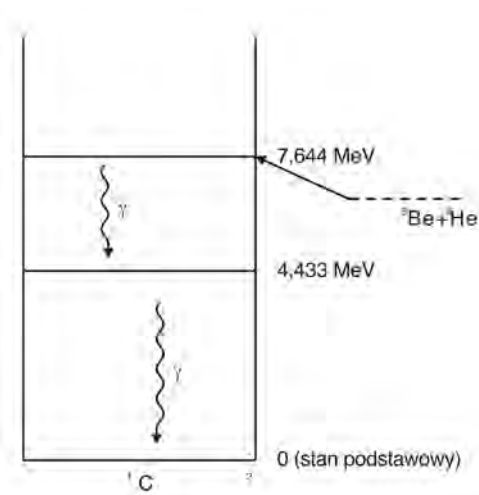


Gwiazdka oznacza tutaj stan wzbudzony jądra węgla, a zatem stan o energii wyższej niż ta, w której to jądro zwykle znajduje się. Reakcje termojądrowe opisane wzorami (6) i (7) zachodzą wówczas, gdy temperatura plazmy helowej wynosi $T = 12 \cdot 10^7 \text{ K}$. Względna energia kinetyczna oddziałujących dwóch jąder Be i He, zgodnie z równaniem (3) wynosi około 287 keV. Ta reakcja również wymaga dostarczenia energii z zewnątrz i jest to energia kinetyczna zderzających się cząstek. W wyniku reakcji (7) powstaje jądro węgla wzbudzone do drugiego poziomu energetycznego ponad stan podstawowy (rys. 6). Reakcja (7) jest więc reakcją rezonansową w przedziale wartości energii, jakimi dysponują jądra ^4He i ^8Be wewnątrz gwiazd spalających hel. Przekrój czynny na tę reakcję jest tak duży, że jądra węgla powstają z dużą wydajnością, mimo niewielkiego stężenia jąder berylu.

Jednocześnie możliwe stało się przyłączanie dalszych cząstek α do wytworzonych już jąder węgla; w tej reakcji powstaje tlen-16:



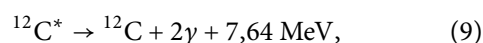
Poziom wzbudzony 7,6549 MeV w jądrze węgla-12 przyspiesza oddziaływanie niestabilnego jądra berylu-8 z trzecią cząstką alfa. Gdyby nie ten poziom, powstawanie jądra węgla przebiegałoby na tyle wolno, że zdążyłby

Rys. 6. Powstawanie wzbudzonego jądra węgla w procesie 3α

on przereagować z kolejną cząstką alfa tworząc tlen-16 w reakcji (8), w wyniku czego obfitość węgla we Wszechświecie byłaby o wiele niższa od tej, którą faktycznie obserwujemy.

Hoyle wykazał, że reakcja (8) musi przebiegać ze ściśle określoną szybkością. Uwarunkowane jest to tym, że jądro tlenu nie ma poziomu energetycznego odpowiadającego rezonansowi reakcji. Posiada natomiast poziom wzbudzenia bardzo bliski punktu krytycznego, wyznaczonego przez sumę energii węgla-12 i helu-4, odpowiadającego energii 7,1616 MeV [9]. Eksperymentalnie potwierdzona energia poziomu wzbudzenia jądra tlenu wynosi 7,1187 MeV, czyli jest tylko o 0,0429 MeV mniejsza od energii reakcji syntezy tlenu. Rezonans energii więc nie występuje. Wysoka temperatura panująca wewnątrz czerwonego olbrzyma może jedynie dodać energię kinetyczną do całkowitej energii obu jąder, lecz nie może zmniejszyć ich łącznej energii; suma energii węgla-12 i helu-4 w żaden sposób nie może „zejść” do wartości 7,1187 MeV. Gdyby energia stanu wzbudzonego tlenu-16 była nieco większa niż 7,1187 MeV, a nie mniejsza od 7,1616 MeV, reakcja węgla-12 i helu-4 byłaby rezonansowa i cały węgiel w gwiazdach przemieniłby się niezwłocznie w tlen-16. Węgiel został ocalony w ostatniej chwili! W gwiazdach zaistniała bardzo delikatna równowaga, która zapewniła, że tlen nie powstał za szybko w zbyt dużych ilościach, a węgiel za wolno w zbyt małych.

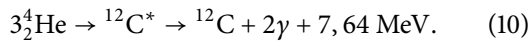
Jedynie niewielka część jąder węgla ulega deekscytacji, czyli przechodzi do stanu podstawowego:



emitując kolejno dwa fotony γ (rys. 6).

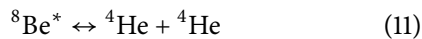
W rzeczywistości do utworzenia stabilnego jądra węgla potrzeba aż trzech jąder helu, które łączą się tworząc stan wzbudzony jądra węgla, który następnie oddaje

energii i przechodzi do swego stanu podstawowego:



Trzy reakcje Salpetera opisane równaniami (6), (7) i (10) tworzą potrójny proces alfa (3α).

Z teorii budowy gwiazd wynikało, że gdyby jądro berylu-8 było trwałe cały hel uległby natychmiastowej transformacji w węgiel. Przemiana helu w węgiel miałaby niezwykle gwałtowny przebieg (uwolnienie ogromnych ilości energii jądrowej). Gwiazda, w której zachodzi spalanie helu, uległaby rozerwaniu, a tym samym niemożliwa byłaby synteza dalszych pierwiastków, takich jak magnez, siarka, wapń i żelazo. Jądro Be-8 jest jednak niestabilne i rozpada się szybko na dwa jądra helu, spalanie helu zaś przebiega spokojnie i powoli. W rzeczywistości zatem mamy do czynienia z reakcją odwracalną:



W procesie trzech alfa dodanie do nietrwałego jądra $\text{}^8\text{Be}$ trzeciej cząstki α (rys. 2) dostarcza odpowiedniej porcji energii, aby spowodować przejście takiego kombinowanego jądra w stan wzbudzonego węgla $\text{}^{12}\text{C}^*$. Przypomina to sytuację, w której atom absorbuje foton i przechodzi na wyższy stan energetyczny.

8. Refleksja filozoficzna: kosmiczne koincydencje są subtelnie dostrojone

Niezwykły zbieg właściwości trzech rodzajów jąder biorących udział w reakcji: berylu-8, węgla-12 i tlenu-16, zadecydował o tym, że we Wszechświecie wytworzyło się ponad 20 pierwiastków niezbędnych do powstania życia.

Powstanie węgla i ponad dwudziestu niezbędnych do istnienia życia ciężkich pierwiastków zależało od następujących nieoczekiwanych, delikatnych dostrojzeń: odpowiednio wysoka temperatura plazmy helowej $12 \cdot 10^7 \text{ K}$ we wnętrzu czerwonego olbrzyma była niezbędna, aby w reakcjach termojądrowych między $\text{}^8\text{Be}^*$ i $\text{}^4\text{He}$ powstały we wnętrzu gwiazdy mierzalne ilości jąder węgla-12. Reakcje termojądrowe zachodzą wówczas, gdy przy danej temperaturze plazmy względna energia kinetyczna oddziałujących dwóch jąder $\text{}^8\text{Be}^*$ i $\text{}^4\text{He}$ wynosi około 287 keV. Temperatura plazmy wewnątrz czerwonego olbrzyma jest dopasowana do energii progowej (około 287 keV) reakcji termojądrowej $\text{}^8\text{Be}^*$ i $\text{}^4\text{He}$. Przy takim zestrojeniu energia ruchu obu tych jąder podnosi ich łączną energię i następuje przejście do poziomu wzbudzonego jądra $\text{}^{12}\text{C}^*$. Z kolei energia stanu wzbudzonego $\text{}^{12}\text{C}^*$ jest dokładnie dopasowana do energii, w której zachodzą efektywne oddziaływania między jądrami $\text{}^8\text{Be}^*$ i $\text{}^4\text{He}$ we wnętrzu rdzenia helowego czerwonego olbrzyma. Wówczas ogromnie wzrasta przekrój

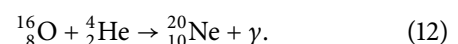
czynny na powstanie $\text{}^{12}\text{C}^*$ w zderzeniu trzech cząstek alfa. Przekształcenie trzech jąder $\text{}^4\text{He}$ w jądro węgla jest wtedy bardzo przyspieszone. Rezonans jądrowy stwarza niezwykle wąskie „okno”, trwające 10^{-17} s , podczas którego cały proces musi się dokonać. Bez tego „okna” nie byłoby szans na nasze zaistnienie. Bez zjawiska rezonansu węglowego nie byłoby we Wszechświecie ciężkich pierwiastków i nie byłoby nas. Hoyle mówił, iż odkrycie rezonansu węglowego było dlań takim wstrząsem, że zachwiało jego ateizmem. W 1981 roku w California Institute of Technology powiedział: *Jeśli podczas zachodzącej w gwiazdach nukleosyntezy chcemy produkować węgiel i tlen w przybliżeniu w takich samych ilościach, to trzeba ustalić właśnie te dwie wartości i to na dokładnym poziomie, na jakim – jak się okazuje – rzeczywiście istnieją. (...) Interpretacja zdroworozsądkowa tych faktów sugeruje, że nie ma w przyrodzie ślepo działających sił, o których warto by mówić. Liczby, jakie można otrzymać opierając się na faktach, wydają mi się tak przytłaczające, że sprawiają, iż taka konkluzja pozostaje prawie poza wszelką wątpliwością [10].*

Energia stanu wzbudzonego jądra $\text{}^{12}\text{C}^*$ zależy od intensywności siły jądrowej, która wiąże ze sobą protony i neutrony. Gdyby poziom rezonansowy węgla był zaledwie o 4% niższy, atomy węgla nie powstałyby. Gdyby zaś był zaledwie o 0,5% wyższy, to cały węgiel zostałby „wypłukany”, to znaczy, że połączyłby się z helem dając tlen.

Prawa rządzące Wszechświatem w zastanawiającym stopniu sprzyjają powstaniu węgla, a więc życia. Proces powstawania węgla w masywnych gwiazdach wymagał niezwykle precyzyjnego zgrania silnego oddziaływania jądrowego i oddziaływania elektromagnetycznego.

9. Proces alfa i dalsze jądra alfowe

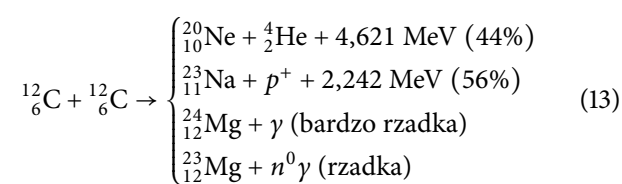
Proces budowy pierwiastków polegający na dodawaniu cząstek α , został nazwany *procesem alfa* [8]. Spalanie helu nie kończyło się na wytworzeniu węgla. Wraz z nagromadzeniem się węgla, coraz większą rolę odgrywała przemiana (8). Do wytworzonego z kolei na tej drodze trwałego jądra izotopu tlenu $\text{}^{16}_8\text{O}$ „wbijało się” następne jądro helu tworząc jądro neonu:



Oprócz tlenu-16 i neonu-20 powstały dzięki procesowi alfa jądra: $\text{}^{24}\text{Mg}$, $\text{}^{28}\text{Si}$, $\text{}^{32}\text{S}$, $\text{}^{36}\text{Ar}$, $\text{}^{40}\text{Ca}$.

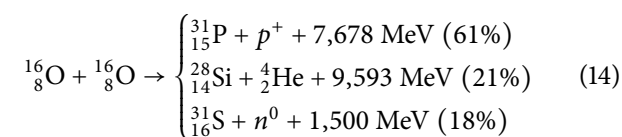
Kiedy hel w jądrze gwiazdy został wyczerpany i pozostał głównie węgiel i tlen, wtedy i te „popioły” pozostałe po helu uległy „zapaleniu”. Gdy temperatura wzrosła ponad $8 \cdot 10^8 \text{ K}$, rozpoczęło się „spalanie” („zapłon”)

węgla głównie poprzez reakcje [8]:



W reakcjach (13) produkowane są: neon-20 i jądro ${}^4_2\text{He}$ lub sód-23 i proton albo rzadko magnez-24 oraz magnez-23 i neutron.

Powyżej temperatury $2 \cdot 10^9$ K rozpoczęło się „spalanie” tlenu [9]:



W nawiasach przy reakcjach (13) i (14) podano częstotliwość występowania poszczególnych procesów w warunkach gwiazdnych. Częstotliwość tę ustala się z wyników przeprowadzenia danej reakcji w laboratorium.

Dalszy wzrost temperatury i gęstości prowadził do zwiększenia szybkości zachodzących reakcji rozszczepiania już istniejących i syntezy cięższych jąder. Ustawiła się wówczas równowaga odpowiadająca zwiększeniu liczby najsilniej związanych jąder; w ten sposób wyjaśniamy występowanie lokalnego maksimum na krzywej rozpowszechnienia pierwiastków dla $A \approx 60$ (rys. 1, część 1 artykułu).

W analizowanych dotychczas procesach, poza coraz cięższymi pierwiastkami produkowana jest również ogromna ilość energii. Synteza jąder cięższych niż żelaza i niklu wymagała dostarczenia energii. Przez wiele lat nikt nie rozumiał, skąd wzięły się takie pierwiastki jak platyna, złoto czy uran. Są one cięższe od żelaza i musiałyby powstać przez sukcesywne dodawanie nukleonów do jądra żelaza.

Taka koncepcja natrafiła jednak na dwa poważne problemy. Pierwszy problem z powstawaniem bardzo ciężkich pierwiastków wiązał się ze stabilnością gwiazd. Jądra grupy żelaza stanowią najsilniej związane jądra w Kosmosie; przekształcenie w cięższe jądra jest równoznaczne z dostarczeniem im energii. Problem polega na tym, że fundamentem stabilności gwiazd są reakcje jądrowe, które wydzielają energię. Powstałe w ich wyniku ciepło wytwarza ciśnienie, które przeciwstawia się grawitacji. Trudno więc było zrozumieć, dlaczego gwiazdy miałyby realizować reakcje, które wiążą się z pochłanianiem energii.

Drugi problem wiązał się z temperaturą. Utworzenie ciężkiego pierwiastka wymaga „sklejenia” ze sobą ciężkich jąder. Im jądra są cięższe, tym większe mają ładunki

elektryczne, a więc tym silniejsze jest elektryczne odpychanie.

Powyższe dwa problemy stanowiły fundamentalną granicę, poza którą budowa pierwiastków nie mogła zachodzić przez zderzenie ze sobą elektrycznie naładowanych jąder. Najcięższe pierwiastki we Wszechświecie nie mogły w ten sposób powstać.

10. Nukleosynteza pierwiastków ciężkich w reakcjach wychwyty neutronów

Zanim utworzyły się pierwsze gwiazdy, ośrodek międzygwiazdowy zawierał jedynie oba trwałe izotopy wodoru, również dwa izotopy helu, znikome ilości litu i żadnych cięższych pierwiastków. W czasie, gdy gwiazdy pierwszego pokolenia o największej masie zakończyły swoją ewolucję, w ośrodku międzygwiazdowym występowały już pierwiastki cięższe od helu, aż do żelazowców włącznie. Gdy powstawały nowe gwiazdy (drugiego pokolenia), to już od początku swego istnienia zawierały w sobie pewną domieszkę pierwiastków cięższych aż do $Z \leq 30$. Jedyną różnicą pomiędzy ewolucją gwiazdy pierwszego a ewolucją gwiazdy drugiego pokolenia, z punktu widzenia nukleosyntezy pierwiastków ciężkich, jest wykorzystanie neutronów.

Jaki był los neutronu, gdy pojawił się w wyniku reakcji jądrowej w gwieździe pierwszego pokolenia? Obecne były tylko jądra kilku pierwszych pierwiastków lekkich o małych przekrojach czynnych na wychwyt neutronu. Neutrony rozprasały się na jądrach, aż wreszcie doszło do rozpadu - z neutronu powstał proton.

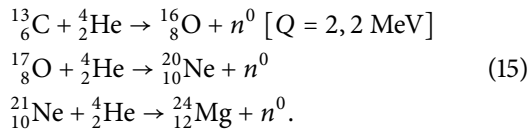
Odmienne były losy neutronów w gwiazdach drugiego pokolenia. Jądra żelazowców mają duże przekroje czynne na wychwyt neutronów. Wszystkie jądra cięższe łatwo wychwytywały neutrony zanim zdążyły się rozpaść. Na tej drodze doszło do powstawania jąder pierwiastków cięższych.

W 1957 roku Margaret i Geoffrey Burbidge, William Fowler i Fred Hoyle ogłosili teorię (tak zwana teoria B^2FH) [5] powstawania pierwiastków cięższych. Rozwinęli oni koncepcje Hansa Bethego [11], który uważał syntezę helu z wodoru za źródło energii gwiazd, i przyjęli, że jądra pierwiastków cięższych od wodoru powstawały w reakcjach jądrowych zachodzących wewnątrz gwiazd i wyrzucane były w przestrzeń kosmiczną w czasie wybuchów supernowych. Autorzy teorii B^2FH przeanalizowali podstawowe reakcje podając warunki ich występowania i oceniając czasy ich trwania. Wykorzystali ówczesną wiedzę o strukturze jąder atomowych i mechanizmach reakcji jądrowych (informacje o energiach wiązania, czasach życia i przekrojach czynnych na reakcje wychwyty neutronu lub protonu). W ten sposób odtworzyli krzywą rozpo-

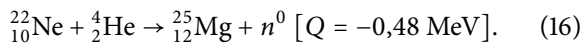
wszechnienia ciężkich izotopów (rys. 1, część pierwsza artykułu).

W teorii B²FH autorzy rozwiązali problem powstania jąder ciężkich wykorzystując zjawisko wychwytu neutronów. Neutrony są cząstkami nietrwałymi ($T_{1/2} \approx 10,8$ min) i pozbawionymi ładunku, nie podlegają zatem odpychaniu coulombowskiemu.

Źródłami swobodnych neutronów są następujące reakcje jądrowe, zachodzące podczas „spalania” helu:

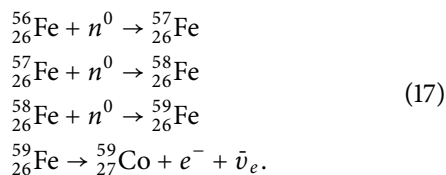


Węgiel-13 stanowi rzadką formę węgla; wytwarzany jest w cyklu węglowo-azotowo-tlenowym CNO: ${}^{13}\text{N} = {}^{13}\text{C} + e^+$ [11]. Reakcje (15) są powszechnie uważane za źródło neutronów niezbędnych do budowy pierwiastków ciężkich w czerwonych olbrzymach o masach mniejszych niż ośmiokrotna masa Słońca. W czerwonych nadolbrzymach, gwiazdach o masach większych od ośmiokrotnej masy Słońca, źródło swobodnych neutronów stanowi reakcja rzadkiego izotopu neonu-22 oraz helu, w wyniku której powstaje magnez-25 i neutron [12]:

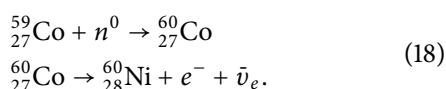


Procesy opisane reakcjami (15) i (16) zachodzą w powłoce czerwonych olbrzymów. Gęstości neutronów powstałych w tych reakcjach osiągają w gwiazdach tylko wartości 10^8 g/cm^3 . Neutrony są wychwytywane przez jądra atomowe różnych pierwiastków, w wyniku czego powstają cięższe izotopy.

Jeżeli jądro żelaza ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ pochłonie trzy neutrony, stanie się nietrwałe. Powstałe jądro ${}^{59}_{26}\text{Fe}$ stało się jądrem o nadmiarze trzech neutronów i wówczas zachodzi rozpad promieniotwórczy β^- , który powoduje przemianę jądra ${}^{59}_{26}\text{Fe}$ w znajdujący się bezpośrednio wyżej w układzie pierwiastków Mendelejewa kobalt ${}^{59}_{27}\text{Co}$:



W ten sposób jądro neutrononadmiarowe staje się jądrem stabilnym. Jeśli jądro kobaltu-59 przyłączy neutron, stanie się nietrwałe i również nastąpi rozpad β^- . Jądro kobaltu-59 przekształci się w jądro niklu-60:

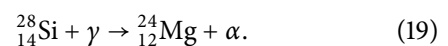


Aby proces powolnego „wdrapywania się” jąder ku coraz wyższym wartościom Z i N wzdłuż ścieżki stabilności był skuteczny, jądra nie mogą się zbyt szybko rozpaść w procesie β^- . Musi istnieć możliwość wychwytu następnego neutronu. Podczas trwania tego procesu jądra atomowe oddalają się od ścieżki stabilności o jedną, dwie lub trzy wartości liczby neutronów N ; gdy tylko się od ścieżki stabilności oddalą, przemiana β^- sprowadza je z powrotem na tę ścieżkę. Mimo dużych przekrojów czynnych na reakcje (17) i (18) wychwytywanie neutronu zachodzi średnio w odstępach dni, lat a nawet kilkudziesięciu lat. Procesy wychwytywania neutronów, które analizujemy (17) i (18) nazywamy *procesami typu s* (slow – powolny) i to nie dlatego, że neutrony poruszają się powoli, ale że wychwytywanie neutronów zachodzi zbyt rzadko. Neutrony w gwiazdach mają dostatecznie dużą energię (od kilku do kilkuset keV), aby być wychwytywane. Odstęp czasu między poszczególnymi wychwytywaniami jest tak długi, że nowo powstałe jądro ulega przemianie β^- zanim wychwyci następny neutron.

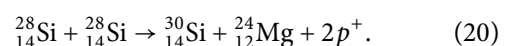
Kolejne wychwytywanie neutronów przez jądra, z następującym po tym rozpadem β^- , są procesami, w których tworzą się wewnątrz gwiazd wszystkie pozostałe pierwiastki do bizmutu-209 włącznie. Bizmut ${}^{209}_{83}\text{Bi}$ jest najcięższym jądrem, które może powstać w procesie *s*. Ten proces nie może przebiegać dalej, ponieważ następne pierwiastki (za bizmutem) są wyłącznie promieniotwórcze; polon i astat są krótkożyciowe. Polon rozpada się do ołowiu. Im cięższe są jądra atomowe, tym czasy życia ze względu na rozpad β^- stają się coraz krótsze. Procesy *s* są zbyt wolne. Nie było możliwości wytworzenia na tej drodze pierwiastków cięższych od bizmutu. Kiedy wystąpiły zatem warunki umożliwiające powstanie najcięższych pierwiastków?

11. Wybuchy supernowych

Tylko gwiazdy masywne mogły utworzyć w swoim głębokim wnętrzu odpowiednią ilość „popiołu jądrowego”, czyli krzemu. Gdy ta odpowiednia ilość „popiołu” została osiągnięta nastąpiło jego zapalenie. Wzrost masy tego „popiołu” w centrum gwiazdy spowodował jego zgniatanie pod wpływem sił ciężkości. W zgniecionym „popiele” wzrosła temperatura oraz gęstość, a więc istniało podwyższone ciśnienie. Gdy temperatura w centrum gwiazdy osiągnęła około $4 \cdot 10^9 \text{ K}$ rozpoczęła się olbrzymia liczba różnych reakcji termojądrowych. Zachodziły również reakcje fotorozszczepiania jąder krzemu:



Nastąpiło spalanie krzemu:

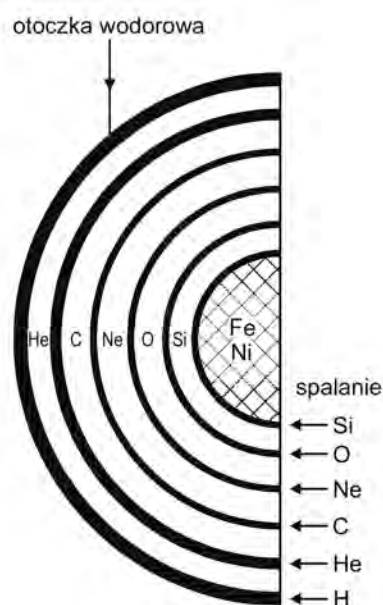


Dzięki cząstkom α pojawiającym się w reakcji (19) izotop $^{28}_{14}\text{Si}$ przekształcił się w $^{30}_{14}\text{Si}$. Wynikiem spalania krzemu jest produkcja jąder z obszaru żelaza, o liczbach masowych A z przedziału $30 \div 60$.

Gwiazda masywna kończy żywot jako struktura warstwowa (rys. 7) [13, 14]. Posiada wówczas żelazno-niklowe (Fe-Ni) jądro otoczone współśrodkowymi warstwami stopniowo coraz lżejszych pierwiastków. W rdzeniu czerwonego nadolbrzyma o masie około 1,5 mas Słońca panują warunki ekstremalne. Temperatura w centrum osiąga $T \approx 7 \cdot 10^9$ K, gęstość zaś wynosi $\rho \approx 5\,000\,000$ kg/cm³. Rdzeń Fe-Ni jest plazmą złożoną z jąder żelaza, niklu i elektronów.

Plazma żelazno-niklowa stanowi ostateczny produkt nukleosyntezy. Zapalenie tej plazmy jest niemożliwe; „popiół” Fe-Ni nie może się zapalić. Ponieważ w ekstremalnych warunkach temperatury i gęstości zachodzą dwa ważne procesy: dysocjacja jąder Fe i Ni oraz wychwyty elektronów w odwrotnym rozpadzie β^+ . Dysocjacja jąder Fe i Ni jest reakcją endotermiczną. Oba te procesy prowadzą do obniżenia ciśnienia plazmy i neutronizacji materii [13].

W konsekwencji zostaje naruszona równowaga między siłami grawitacji i ciśnienia: siły grawitacji zwyciężają i rdzeń Fe-Ni ulega gwałtownej implozji. Na ten niezwykle gęsty rdzeń gwiazdy spadają pod wpływem siły ciężkości kolejne jej warstwy. Pod ich ciężarem rdzeń ulega lekkiemu ściśnięciu, a następnie gwałtownie „sprężynuje” odbijając od siebie stykającą się z nim bezpośrednio warstwę materii. Implozja rdzenia gwiazdy zamienia się w wybuch jej otoczki [13].



Rys. 7. Struktura rdzenia czerwonego nadolbrzyma bezpośrednio przed implozją

Następuje katastroficzny „zawał” gwiazdy, który trwa krócej niż sekundę [9]. Gwiazda masywna rozpada się w gigantycznej eksplozji, zwanej eksplozją supernowej. W wyniku wielkiej implozji ogromna część materii wyrzucana jest na zewnątrz. Gwiazda w zależności od swojej masy staje się czarną dziurą lub gwiazdą neutronową. W krótkim czasie trwania wybuchu supernowej powstaje też olbrzymia ilość neutronów: 10^{20} cm⁻³. Bardzo duże gęstości neutronów powodują, iż wychwyty neutronów stają się bardzo częste. Zachodzą gwałtowne procesy, w wyniku których produkowane są – w bardzo krótkich odstępach czasu – najcięższe znane pierwiastki. Są to procesy typu *r* (*rapid* – szybki) wychwyty szybkich neutronów; ich energia zawiera się w obszarze 10–20 MeV! Proces ten jest tak szybki, że neutrony są gwałtownie chwytywane przez jądra ołowiu i bizmutu, czemu towarzyszy wytwarzanie wszystkich najcięższych pierwiastków [8]. Pierwiastki nietrwałe między bizmutem i torem (polon, astat, radon, frans, rad i aktyn) nie mają czasu na rozpad. Tor i uran powstają tylko w czasie wybuchów supernowych.

12. Podsumowanie

Z przedstawionej historii pojawienia się pierwiastków chemicznych we Wszechświecie wynika, że powstawały one w następujących procesach: najlżejsze (jednoprotonowe jądro wodoru, deuter, hel-3, hel-4, lit-7) w pierwotnej nukleosyntezie kosmicznej po Wielkim Wybuchu; wewnątrz gwiazd w reakcjach jądrowych prowadzących do syntezy jąder do żelaza włącznie; w procesach wychwyty neutronów *slow* i *rapid* (pierwiastki cięższe od żelaza), przy czym neutrony powstawały w różnych stadiach ewolucji gwiazd lub w wyniku wybuchu supernowej. W omawianych procesach powstały 264 stabilne izotopy tworzące 92 pierwiastki.

Pojawienie się takich pierwiastków jak tlen, którym oddychamy, żelazo będące elementem ludzkiej krwi, uran używany w reaktorach, nastąpiło w czasie aktywnego życia gwiazd i kończących to życie wybuchów. Co więcej, sam człowiek zbudowany jest z materii, która powstała w gwiazdach. Każdy atom naszego ciała, z wyjątkiem pierwotnego wodoru, został wytworzony we wnętrzu gwiazdy.

Literatura

- [1] R. A. Alpher, H. Bethe, G. Gamow, *The Origin of Chemical Elements*, Phys. Rev. 73, 803–804 (1948).
- [2] A. H. Guth, *Wszechświat Inflacyjny. W poszukiwaniu nowej teorii pochodzenia Kosmosu*, Prószyński i S-ka 2000.

- [3] E. J. Öpik, Proc. Roy. Iris Acad. A54, 49 (1951).
- [4] E. E. Salpeter, Astrophys. J. 115, 326 (1952); Ann. Rev. Nuclear Sci. 2, 41 (1953).
- [5] E. M. Burbidge, G.R. Burbidge, W.A. Fowler, F. Hoyle, *Synthesis of the Elements in Stars*, Rev. Mod. Phys. 29, 547–650 (1957).
- [6] B. R. Martin, *Nuclear and Particle Physics*, Second Edition, John Wiley & Sons Ltd 2009.
- [7] A. Strzałkowski, *Wstęp do fizyki jądra atomowego*, PWN 1978.
- [8] C. R. Cowley, *An Introduction to Cosmochemistry*, Cambridge University Press 1995.
- [9] B. E. J. Pagel, *Nucleosynthesis and the Chemical Evolution of Galaxies*, Cambridge University Press 1997.
- [10] F. Hoyle, *The Universe: Past and Present Reflections*, Engineering & Science, 11, 12 (1981).
- [11] H. Bethe, *Energy Production in Stars*, Phys. Rev. 55, 434 (1939).
- [12] D. D. Clayton, *Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis*, McGraw-Hill 1968.
- [13] H. Drozdowski, *Fizyczny Obraz Świata*, Wydawnictwo Naukowe UAM 2007.
- [14] H. Drozdowski, *O pochodzeniu pierwiastków*, wykład habilitacyjny na Wydziale Fizyki UAM 24-05-2002 [w]: archiwum CKK.

Świat u progu Drugiej Rewolucji Kwantowej

Tomasz Sowiński

Instytut Fizyki PAN

Streszczenie. Rozwój fizyki w XX wieku był w dużej mierze zainspirowany i zdominowany przez próby zrozumienia mechaniki kwantowej - teorii fizycznej opisującej materię i promieniowanie na poziomie subatomowym. Gdy pierwsze niezręczne próby sformułowania mechaniki kwantowej były podejmowane, nikt sobie nie zdawał sprawy, że już niespełna sto lat później może ona doprowadzić do nadzwyczajnego postępu technologicznego wpływającego niemal na każdy element codziennego życia. Nie da się ukryć, że dziś żyjemy w czasach Rewolucji Kwantowej, bo każdy z nas ma w domu dziesiątki urządzeń, które działają dzięki jej zdobyczom. Mało kto jednak zdaje sobie sprawę, że wszyscy zbliżamy się nieuchronnie do kolejnego przełomowego momentu, który w perspektywie jednego pokolenia jeszcze bardziej odmieni znany nam świat. **Już wkrótce nastąpi Druga Rewolucja Kwantowa**, której jednym ze skutków będzie powstanie urządzeń rozwiązujących abstrakcyjne problemy przy wykorzystaniu zjawisk kwantowych. **Czy jesteśmy na nią przygotowani?**

Poprzednie rewolucje oparte na wiedzy

Zacznijmy od próby wyjaśnienia czym jest wspomniana Druga Rewolucja Kwantowa. Najlepiej na to pytanie odpowiedzieć poprzez porównanie do innych rewolucji naukowo-technicznych, których kiedyś doświadczyła nasza cywilizacja. Nie zagłębiając się zbyt mocno w historię, zacznijmy od rewolucji związanej z opanowaniem przez ludzkość przepływu prądu elektrycznego i jego wytwarzania, czyli tzw. Pierwszej Rewolucji Elektrycznej. Dziś chyba nikt nie ma wątpliwości, że ta spektakularna umiejętność opanowana jedynie w celu zaspokojenia ludzkiej ciekawości doprowadziła do dynamicznych zmian społecznych (na przestrzeni zaledwie jednego pokolenia), których nikt się nie spodziewał. Bardzo szybko okazało się, że ciężka praca fizyczna, którą do tej pory wykonywał człowiek, zwierzęta lub olbrzymie i mało wydajne silniki parowe, może być znacznie efektywniej wykonywana przez urządzenia zasilane prądem elektrycznym. Wszelkiego rodzaju silniki elektryczne, duże i małe, szybkie i wolne, błyskawicznie zadomowiły się we wszystkich gałęziach gospodarki. Choć „zmuszenie” prądu elektrycznego do *wykonywania pracy* było spektakularną zdobyczą cywilizacyjną, to w swej istocie rewolucja elektryczna przyniosła nam jeszcze jeden, znacznie ważniejszy wynalazek – bardzo wydajne sztuczne oświetlenie. Wielu uważa go za najważniejsze odkrycie od czasu wynalezienia koła przez ludzi pierwotnych. To właśnie od tamtego momentu, nie jesteśmy już bezwzględnie związani naturalnym cyklem dnia i nocy narzucanym nam przez przyrodę. Choć wcześniej mieliśmy dostęp do świec, lamp naftowych czy gazowych, to nie ma żadnej wątpliwości, że dopiero wprowadzenie pod strzechy oświetlenia elek-

trycznego było krokiem naprawdę przełomowym i jednym z filarów drugiej rewolucji przemysłowej, jaka przetoczyła się przez świat na przełomie XIX i XX wieku.

I choć rewolucja elektryczna zmieniła nasz świat nie do poznania, to przyszłość okazała się jeszcze bardziej zaskakująca. Opanowanie przepływu prądu było bowiem tylko pierwszym krokiem, swego rodzaju preludium do Drugiej Rewolucji Elektrycznej, która dopiero miała nastąpić. Jej źródłem znów należy poszukiwać w ludzkiej naturze sprawdzania, jak bardzo Przyroda jest podatna na manipulację. Tym razem celem było sterowanie przepływem prądu elektrycznego „na żądanie innego prądu”. Gdy już stało się jasne, że ten cel można osiągnąć nawet na poziomie pojedynczych elektronów, pojawiły się zupełnie nowe możliwości, o których marzyło wielu futurologów, ale właściwie nikt się nie spodziewał, że mogą okazać się prawdziwe. Tak narodziła się elektronika.

Dlaczego właściwie narodziny elektroniki nazywamy Drugą Rewolucją Elektryczną, a nie jedynie kontynuacją tej Pierwszej? Powód jest fundamentalny. Druga Rewolucja przyniosła nam nie tylko jeszcze bardziej sprawne i jeszcze bardziej wydajne urządzenia elektryczne, które mogą wykonywać dla nas pracę, ale doprowadziła do stworzenia urządzeń, które mogą rozwiązywać dla nas zadania abstrakcyjne - czyli takie, które do tej pory potrafił postawić (i niekiedy nawet rozwiązać) jedynie człowiek siłą swojego rozumu. To wraz z opanowaniem technologii półprzewodnikowej i stworzeniem diody oraz tranzystora stało się możliwe sterowanie przepływem prądu w taki sposób, aby przepływ ten odpowiadał logicznemu cyklowi decyzyjnemu

prowadzącemu do uzyskania logicznej odpowiedzi na abstrakcyjne pytanie. Dzięki temu powstawały coraz wydajniejsze maszyny liczące. Maszyny, które jak się szybko okazało, nie tylko pozwoliły nam wysłać człowieka na Księżyc i doprowadziły do „wymyślenia” internetu, ale również całkowicie zmieniły nasze codzienne życie praktycznie w każdym aspekcie – od zwykłych zakupów w sklepie zaczynając, a na zmianach różnych zachowań społecznych kończąc.

Pierwsza Rewolucja Kwantowa

Gdy w roku 1961 amerykański prezydent obiecywał wysłanie człowieka na Księżyc, a rewolucja elektroniczna była u szczytu swojego dynamicznego rozwoju, to w cichych laboratoriach fizyków już tlił się płomyk kolejnej. Tym razem rewolucja miała być oparta o zjawiska, których nie możemy doświadczyć w codziennym życiu, gdyż zachodzą one jednie w skali subatomowej. Niemniej jednak ich istnienie i kontrolowanie może zmienić nasze codzienne życie. Jak to jest możliwe? Chyba najbardziej przemawiającym przykładem jest wytworzenie przez człowieka światła laserowego. O tym czym jest światło laserowe rozpisują się (lepiej lub gorzej) różne podręczniki szkolne i akademickie. Ale w każdym z nich próżno szukać informacji, że takie światło, będące strumieniem zupełnie identycznych fotonów, jest w istocie wytworem ludzkiej wyobraźni! Przyroda sama z siebie nigdzie we Wszechświecie światła laserowego spontanicznie nie wytwarza, a przynajmniej nic nam o tym nie wiadomo. To człowiek siłą swojego umysłu, przeprowadzając wnikliwą abstrakcyjną analizę teorii opisującej zjawiska kwantowe, przewidział, że można stworzyć warunki, w których nastąpi akcja laserowa – kaskadowe uwolnienie identycznych fotonów z odpowiednio przygotowanego ośrodka. I choć zjawisko jest czysto kwantowe, to jego efekt jest ewidentnie makroskopowy. Skrzętnie to wykorzystujemy niemalże każdego dnia w medycynie, telekomunikacji czy budownictwie, nie wspominając już o zastosowaniach militarnych.

Taka jest właśnie Pierwsza Rewolucja Kwantowa, która na dobre gości w naszym codziennym życiu od niemal 40 lat. Stała się możliwa dzięki dwóm fundamentalnym umiejętnościom opanowanym niemal do perfekcji przez fizyków dla zaspokojenia swojej naukowej ciekawości:

- precyzyjnemu kontrolowaniu podstawowego zjawiska kwantowego emisji i absorpcji pojedynczych fotonów,
- kontrolowaniu stanu kwantowego pojedynczych atomów.

Obecnie już za kilkanaście złotych w każdym kiosku możemy kupić wspomniany laser, czyli urządzenie do wytwarzania unikatowej w skali Wszechświata wiązki światła. Niewiele droższy jest pendrive (64 GB) pozwalający błyskawicznie i bezpiecznie zachować dane cyfrowe, do których przechowania zaledwie 30 lat temu potrzebowalibyśmy prawie 200 tysięcy dyskietek. To właśnie te umiejętności stały się podstawą transformacji teleinformatycznej społeczeństw i ostatecznie doprowadziły do przekształcenia naszej Planety w prawdziwą Globalną Wioskę, w której niewielkie znaczenie mają strefy czasowe, granice państwowe czy języki.

Świat kwantowej informacji

Opanowanie podstawowych zjawisk kwantowych było jednak tylko początkiem nowoczesnych zmian. Mechanika kwantowa ukazuje bowiem całe swoje piękno, a zarazem niewykorzystany dotychczas potencjał, gdy jej opis wychodzi poza opis jednociałowy. Teoria kwantowa dopuszcza bowiem sytuacje, w których dwie lub więcej cząstek są ze sobą skorelowane w taki sposób, że żadna klasyczna teoria prawdopodobieństwa nie jest w stanie tych korelacji prawidłowo opisać. Co ważniejsze korelacje te są globalne, tzn. istnieją niezależnie od tego, czy cząstki znajdują się blisko siebie czy dzielą je duże odległości. Pierwszy tę możliwość zauważył Albert Einstein, który uważał ją za dowód na to, iż mechanika kwantowa jest wciąż źle sformułowaną teorią naukową, bo wierzył, że każda rozsądna teoria powinna być teorią lokalną. Gdy wraz z B. Podolskim i N. Rosenem w latach 30. poprzedniego wieku przedstawili słynny eksperyment myślowy ukazujący, w czym tkwi problem, doprowadzili do zintensyfikowanych badań w tym kierunku i... na szczęście nie mieli racji! Mechanika kwantowa jest teorią nielokalną i, jak zostało to teoretycznie wykazane przez Bella w latach 60., może zostać także doświadczalnie potwierdzone (co faktycznie zostało zrobione). Jeśli układ kwantowy jest przygotowany w stanie skorelowanym swoich podukładów (w kwantowym sensie), to pomiary wykonywane na jednym z nich zmieniają wyniki pomiarów wykonywanych na pozostałych. A zjawisko to nie ma swojej analogii w świecie klasycznym.

Pomyślmy przez chwilę, jak ta dodatkowa możliwość nieklasycznego korelowania podukładów może zmienić sposób, w jaki przetwarzamy informację. Wyobraźmy sobie np., że dane zapisane na dysku naszego komputera są nierozzerwalnie skorelowane z danymi na dysku innego użytkownika. Wynik odczytu tych danych zależy od tego, czy dane z innego dysku zostały już wcześniej odczytane czy też nie! Co ważniejsze, dzieje się to wszystko bez jakiegokolwiek przesyłania informacji

pomiędzy komputerami. Klasyczna informatyka takich cudów nie uznaje, ale Przyroda je dopuszcza, a fizycy w swoich laboratoriach potrafią już to zrobić. Jest tylko kwestią czasu, kiedy urządzenia oparte o takie fenomenalne zjawiska kwantowe staną się codziennością.

Jak możemy się przygotować?

Współczesny globalny świat stoi u progu Drugiej Rewolucji Kwantowej, która już wkrótce całkowicie zmieni nasz sposób życia. Gdy za kilkanaście lat dzisiejsi dziesięciolatekowie staną się głównym motorem rozwoju naszej cywilizacji, będą każdego dnia używali urządzeń, które ta rewolucja przyniesie i tylko od nas zależy czy będą potrafili w pełni wykorzystać ich potencjał. Nie możemy społeczeństwa do tego przygotować nieustannie spierając się o rzeczy w swej istocie mało ważne, zapominając o tym, nad czym przede wszystkim powinniśmy się pochylić. Jak długo my fizycy (naukowcy, wykładowcy i nauczyciele) będziemy się jeszcze milcząco zgadzać, aby nauczanie fizyki w szkole kończyło się na roku 1920? Jak długo jeszcze fundamentalnym problemem naukowym na lekcjach fizyki (z tak wielką pasją tłumaczonym na tysiące sposobów) będzie zagadnienie równi pochyłej i drgań na sprężynce? Czy my naprawdę jesteśmy przekonani, że wiedza o wyznaczaniu kierunków świata za pomocą gnomonu, to oczywisty niezbędny w jakiej szkole powinna wyposażać każdego ucznia? Czy w taki sposób szkoła ma przygotować przyszłe pokolenia do wyzwań z jakimi zmierzą się w XXI wieku, skoro w szkole uczeń nie może dowiedzieć się niczego na temat zasady działania przedmiotów, których używa każdego dnia? Dlaczego tzw. nowa podstawa programowa z fizyki wciąż koncentruje się na tłumaczeniu podstaw Pierwszej Rewolucji Elektrycznej i kończy swoją opowieść na czasach, w których powstawało Polskie Towarzystwo Fizyczne?

Inni już bieżą!

Około 2016 roku, w czasie, gdy w Polsce głęboko i z wielką pasją zastanawialiśmy się nad wyimaginowanymi problemami polskiej edukacji (np. istnienia bądź likwidacji gimnazjów, problemie sześciolatek w szkole itp.) wpływowe firmy technologiczne, a wraz z nimi odpowiedzialni politycy w najbardziej rozwinię-

tych gospodarkach świata zdali sobie sprawę, że rewolucja, do której doprowadziło opanowanie zjawisk kwantowych, dopiero się rozpoczyna. Już nie tylko w naukowych laboratoriach mamy urządzenia, które wykorzystując te niezwykle i całkowicie nieznanne klasycznemu światu korelacje wykonują abstrakcyjne zadania do tej pory uważane za nierozwiązywalne. Oto największe giganty technologiczne, takie jak Google, IBM czy D-Wave, ścigają się w ogłaszaniu skonstruowania coraz to bardziej wydajnych maszyn, których operacyjność jest oparta o przetwarzanie informacji kwantowej. Na te urządzenia można patrzeć jak na bardzo wczesne prototypy przyszłych komputerów kwantowych – można je śmiało porównać do prototypowego komputera ABC z lat trzydziestych.

W naszym rejonie świata znakiem tej kwantowej transformacji było ogłoszenie Quantum Manifesto (<http://quope.eu/manifesto>) – apelu europejskich fizyków do władz zjednoczonej Europy o podjęcie niezbędnych działań zmierzających do tego, by kontywent pozostał wśród liderów kwantowych technologii. Manifest ostatecznie doprowadził do bezprecedensowej decyzji Unii Europejskiej o uruchomieniu specjalnego programu finansowania projektów Drugiej Rewolucji Kwantowej. Finansowania na niespotykanym dotąd w Europie poziomie w wysokości jednego miliarda euro w ciągu dziesięciu lat. Od roku 2020 rusza analogiczny program w Chinach z finansowaniem na poziomie dziesięciokrotnie wyższym. Czy w Polsce te jasne sygnały zostały gdziekolwiek poza środowiskiem naukowców zauważone lub choćby wyartykułowane? Od trzech lat wdramy zmiany (czasami nazywane reformami) edukacji i nauki. Robimy to niestety w najgorszy możliwy sposób, tzn. całkowicie ignorując moment w jakim się znajdujemy, a co gorsza sytuację w jakiej będzie się znajdowała ludzkość za 30 lat! Naszym priorytetem powinno być rozpoczęcie nauczania podstaw nowoczesnej mechaniki kwantowej w szkołach. **Tak jak w powojennej szkole wprowadzono nowy sposób nauczania przedmiotów ścisłych i zaczęto uczyć termodynamiki, podstaw elektryczności i magnetyzmu, czy budowy atomu, tak w nowoczesnej szkole XXI wieku powinniśmy na lekcjach fizyki zacząć uczyć podstaw Drugiej Rewolucji Kwantowej.**

Blżej ludzi, czyli mów prosto

Wiktor Niedzicki*

„Jak ja nie lubię fizyki!” – takie wyznanie słyszał chyba każdy fizyk. Małe dzieci chętnie obserwują i wykonują proste doświadczenia. Z radością biorą udział w piknikach naukowych czy festiwalach nauki. I dobrze się bawią do momentu, gdy w szkole zaczynają się lekcje fizyki. Wtedy rodzi się niechęć. Dlaczego? Przyczyn jest zapewne wiele, ale jedną z nich może być język i sposób mówienia.

Popatrzmy na specjalistów z innych dziedzin. Wystarczy, że lekarz użyje specjalistycznego języka. Trachykardia, ablacja, antykoagulacja, otorynolaryngochirurgia. Już boli nas wszystko. A jeśli dorzuci do tego koronarografię, fakotrabekektomię, tracheotomię czy uwulopalatofaryngoplastykę...? Pacjent ma ochotę uciec ze szpitala. Oczywiście, fachowym żargonem posługują się także inżynierowie różnych branż, programiści i pracownicy korporacji, których dziwny język został nawet nazwany „ponglis”. Z kolei w języku pracowników startupów istnieją określenia bootstrapping, B2B, B2C, preseed lub buzzword. To ostatnie jest słowem, które co prawda brzmi skomplikowanie, ale niewiele oznacza. Wcale nierzadko prawie wszyscy używamy takich słów.

Urzędy też mają wiele na sumieniu. Dlatego Urząd Gminy w Strawczynie opublikował nawet *Słowniczek żargonu specjalistycznego* (<https://strawczyn.pl/pliki/przejrzysta/slowniczek.pdf>) dla obywateli, którzy mają do załatwienia sprawę w urzędzie lub obserwują pracę samorządu.

Język naukowy dla wielu osób jest szczególnie trudny do przyswojenia. Niezrozumiałe pojęcia często budzą obawy. Jeszcze większe niż terminy lekarskie. Do tego dochodzi żonglowanie nazwami praw i zjawisk, które są oczywiste dla naukowca, a nawet dla studenta. Tymczasem większość osób już dawno zapomniała, co oznaczają te hasła. Czasem aż prosi się, by zdanie uczo-

nego zostało przetłumaczone na język polski. **Jeśli zatem nauka ma być bliżej ludzi, musimy mówić tak, by odbiorcy rozumieli. Zawsze!** Nie tylko na festiwalu lub pikniku naukowym.

Na świecie uczy się zrozumiałego mówienia o nauce. Jakich używać słów, jak dobierać argumenty, by nie zrażać laików, a wręcz zachęcić do zainteresowania się nauką. Chodzi o to, by odbiorcy rozumieli uczonych. Jeśli nie rozumiemy, nie będą chcieli, by ich podatki były wydawane na naukę.

Domyślam się, że niektórym moim kolegom-fizykom nie spodoba się ten tekst. Wielokrotnie słyszałem „jeśli ludzie nie rozumieją, niech się uczą”. Problem polega na tym, że „oni” nie muszą. Jeśli nie rozumieją, będą przeciw. Zaprotestują przeciw nowym technologiom w łączności (5G), przeciw nanomateriałom, energii jądrowej, nowym źródłom światła, telewizji holograficznej lub innym rozwiązaniom proponowanym przez fizyków, ale wtedy będzie już za późno na tłumaczenie.

Poza odpowiednim doбором słów i przygotowaniem zrozumiałego wyjaśnienia jest jeszcze problem dobrej prezentacji. Tego nie zastąpi program PowerPoint. Lubimy, gdy ktoś nam ciekawie opowiada. Kogoś, kto zaskakuje nas kolejnymi historiami, zadziwia przykładami i działa na nasze emocje. Ale opowiadanie to nie jest czytanie z kartki lub dukanie z wyświetlanych slajdów. Opowiadanie to nie jest także recytowanie wyuczonych treści, ani mówienie do swoich butów. Dobre opowiadanie wymaga dłuższych przygotowań. Trzeba przygotować ciekawostki, opisać niezwykle zastosowania, znaleźć historie o odkrywca i ludziach, którzy tworzyli naukę. To poważna praca. Dziś w marketingu operuje się określeniem „storytelling”. Czyż to nie brzmi znacznie „mądrzej” niż zwyczajne opowiadanie? Są już w tej dziedzinie specjaliści, którzy prowadzą bardzo drogie szkolenia. Dobra reklama powinna zatem przedstawiać pewną historię. W ten sposób tworzone są dziś najlepsze reklamy. Zamiast zachwalać produkt opowiadają historię. Produkt jest w niej ważnym elementem. Całość przyciąga uwagę odbiorców.

*Wiktor Niedzicki, z wykształcenia fizyk, były pracownik Instytutu Fizyki Jądrowej PAN, pasjonat promocji prac i osiągnięć polskich naukowców; popularyzator nauki od 45 lat, m.in. jest autorem ponad tysiąca programów radiowych, ponad 520 telewizyjnych programów „Laboratorium”, a także „Kuchni” dla najmłodszych; prezentuje też naukę na scenie i w ponad 150 filmach.

Jak zbudować ciekawe opowiadanie? Przede wszystkim musimy znaleźć bohatera. Dobrze, jeśli potrafimy opisać jego cechy. Powinien być konkretny, mieć swoje zalety i wady. Najlepiej, jeśli w trakcie opowieści zmienia się. Oczywiście, ten bohater musi mieć cel. Dążenie do celu jest osią opowiadania. Na drodze bohatera powinny pojawiać się przeszkody. Pokonywanie przeszkód, a czasem nawet porażki sprawiają, że u odbiorców włączają się emocje. To bardzo ważny moment. Jeśli utożsamiamy się z bohaterem, mocniej przeżywamy jego historię. Czekamy, co będzie dalej. Na początku opowieści powinniśmy czymś zaskoczyć odbiorców. Dobrze jest wciągnąć ich w rozwiązywanie zagadki. Będą czekali na to, jak bohater rozwiąże pojawiające się problemy.

Fachowcy radzą, by unikać pouczania odbiorców (i bohatera) oraz **posługiwać się możliwie prostym i zrozumiałym językiem**. Opowiadanie wymaga także mówienia bezpośrednio do słuchaczy. Patrząc im w oczy. Prostymi słowami i prostymi zdaniami, a nie cytatai z podręcznika. To również melodia głosu, która odbiorcom kojarzy się z bajkami z dzieciństwa, to budowanie napięcia przez pauzy, zawieszenia głosu, a może czasem szept. To także żarty i anegdoty, które ułatwiają zapamiętanie treści. I zrozumienie tego, czym żyje nasz odbiorca. Tego, co go naprawdę interesuje lub boli.

Czy można tak opowiadać o fizyce? To przecież poważna nauka, a nie opowiadanie bajek! **A dlaczego nie?** Są wykładowcy fizyki (na świecie i w Polsce), którzy potrafią w sposób fascynujący przekazać trudne treści. Tacy, którzy głosem budują napięcie i pokazują rozwiązania problemów. Być może ich słuchacze nie będą pamiętali współczynników we wzorach (i tak zapomną po kilku latach), być może nie będą potrafili dokładnie powtórzyć, jak brzmi odpowiednie prawo. Prawdopodobnie będą jednak lepiej rozumieli fizykę. I będą ją lubili.

W taki sposób można opowiedzieć znaną wszystkim historię życia i odkryć Michaela Faradaya. Od bardzo biednego pomocnika introligatora bez wykształcenia do profesora Oxfordu i członka Royal Society. Pokonywanie naturalnych przeszkód i odkrycia, które w części zostały uznane dopiero po jego śmierci, to gotowe, fascynujące opowiadanie.

Niezwykłe dzieje życia Jana Czochralskiego mogą być osią innego opowiadania. Życie tego profesora metalurgii było ciekawsze niż przygody Agenta 007. Wystarczy poszukać w Internecie.

A Ignacy Łukasiewicz? Był to przecież nie tylko konstruktor lampy naftowej, ale twórca przemysłu petrochemicznego. Dlaczego dziś według encyklopedii angielskich pierwsze produkty z ropy naftowej pojawiły się dopiero w 1872 r. podczas, gdy Łukasiewicz otrzymał naftę 20 lat wcześniej? Przykłady można mnożyć.

Oczywiście, bohaterem nie zawsze musi być człowiek. Może nim być urządzenie do pomiaru pewnej wielkości fizycznej, które próbowali zbudować uczeni z różnych krajów. A na przykład problem miary i historia metra? Aż prosi się o ciekawą opowieść. Kolejnym bohaterem może być sama elektryczność. Jak to się stało, że dziś jesteśmy wręcz uzależnieni od prądu elektrycznego? Przecież jeszcze 150 lat temu wiedzieli o nim tylko uczeni.

Politycy rozumieją, że nie istnieje coś, co nie zostało opowiedziane. Dobrze opowiedziane i dobrze zaprezentowane także w mediach. Wiedzą, jak ważne są odpowiednie operowanie głosem, proste słowa, które trafiają do odbiorców i rozpoznanie potrzeb słuchaczy. Oni się tego uczą. A dlaczego nie uczą się tego naukowcy i nauczyciele?

Jeśli dobrze opanujemy umiejętność mówienia prosto i atrakcyjnie, mówienia o tym, czym żyją ludzie, może się zdarzyć, że słuchacze polubią fizykę. A przecież wszystkim nam na tym zależy.

Fizyka a oświata

Stanisław D. Głazek

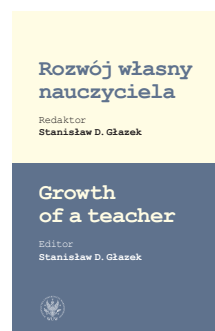
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

Sreszczenie. Punktem wyjścia niniejszego artykułu są eseje autorstwa doświadczonych nauczycieli z Polski i USA zebrane w tomie *Rozwój własny nauczyciela*. Z treści publikacji można wysnuć wnioski, że głównym zadaniem szkoły jest stworzenie warunków do wszechstronnego rozwoju uczniów poprzez nauczanie zasad demokratycznego myślenia i tłumaczenie na czym ono polega w praktyce. Realizacja tego celu wymaga prowadzenia przez nauczycieli w ich klasach badań nad tym, jak faktycznie uczniowie się uczą i jak im w tym skutecznie pomagać. Nauczyciele potrzebują do tego swojej własnej organizacji badawczej, podobnej do tej, jaką fizycy już mają. Rozwój szkoły i tym samym nasza przyszłość zależą od współpracy fizyków i nauczycieli przy tworzeniu analogicznej nauczycielskiej organizacji badawczej.

W 2019 roku ukazał się drukiem zbiór esejów *Rozwój własny nauczyciela*¹ autorstwa doświadczonych nauczycieli z Polski i z USA, pod redakcją autora niniejszego artykułu. Ich wypowiedzi pokazują, że wychowywanie i kształcenie uczniów na mądrych i kompetentnych obywateli jest trudnym zadaniem, którego wykonywanie jest sztuką i wymaga od nauczycieli umiejętności własnego rozwoju. Jednak praca nauczyciela nie jest obecnie rozumiana i doceniana zgodnie z jej faktyczną rolą. Zmiana tego stanu rzeczy wymaga nowego trybu porozumienia i współpracy nauczycieli wszystkich szczebli.

Opublikowany zbiór składa się z trzech polskich i trzech amerykańskich esejów oraz wypowiedzi redaktora tomu. Regina Kostkiewicz, dyrektor szkoły w Wiewie w powiecie leszczyńskim, pisze o rozwoju własnym nauczyciela przyrody w szkole podstawowej. Andrzej Janowski, zasłużony instruktor harcerstwa polskiego i wiceminister edukacji narodowej w pierwszym rządzie III Rzeczypospolitej, podkreśla złożoność profesjonalnego rozwoju nauczyciela z punktu widzenia profesora pedagogiki. Krystyna Starczewska, filozof i reformator, porównuje sytuację nauczyciela we współczesnym

1. *Rozwój własny nauczyciela – Growth of a teacher*, red. S. D. Głazek Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, 2019. Tytuł publikacji jest dwujęzyczny, ponieważ zbiór jest zorganizowany w duchu *Orbis Pictus* Jana Amosa Komeńskiego z 1658. Każda lewa strona (parzysta) rozłożonej książki zawiera tekst w j. polskim, a prawa (nieparzysta) – ten sam tekst w j. angielskim, więc czytane razem mogą służyć do poznawania języka obcego w interesującym kontekście.



systemie edukacji z wizją nauczyciela przyszłości, opierając tę wizję na przykładzie współtworzonego przez nią zespołu szkół „Bednarska”. Marion Appelquist przedstawia swoją karierę nauczycielki fizyki z wieloletnim stażem pracy w jednym z czołowych prywatnych liceów w USA. Eric Nadelstern dzieli się swoimi wnioskami z pracy w Wydziale Edukacji Urzędu Miasta Nowy Jork, w którym kierował procesem doskonalenia zawodowego nauczycieli ponad tysiąca szkół nowojorskich. Debora Meier, lider postępowego ruchu reformowania szkolnictwa w Stanach Zjednoczonych, przedstawia rozwój nauczyciela jako twórcy postaw demokratycznych u uczniów. Redaktor zbioru zauważa, że nauczyciele nie mają własnej organizacji, w której mogliby systematycznie i skutecznie budować swoją profesję.

Profesor Andrzej Białas, wieloletni prezes Polskiej Akademii Umiejętności, napisał, że zbiór *da się czytać*². Szczególnie podobał mu się esej Debory Meier o kształceniu postawy demokratycznej. Jej esej podaje przykład programowego kształcenia takiej postawy przez wyrażanie w uczniach nawyku stawiania sobie pytań:

- Skąd to wiem i jakie są na to dowody?
- Czy wszyscy się z tym zgadzają, czy też mają inne poglądy i jakie one są?
- Jak ten element łączy się z resztą mojej wiedzy? Czy jest w tym jakaś prawidłowość? Czy wi-

2. A. Białas, *Profesja: nauczyciel*, PAUza Akademicka 484, 4 (2019); pauza.krakow.pl/484_4_2019.pdf.

dzę jakieś korelacje albo związki przyczynowo-skutkowe?

- Zakładając, że to czy tamto byłoby inne, co jeszcze by się zmieniło? Jak się tego dowiem?
- Kogo to obchodzi? Czy to ważne? Dlaczego?

Nauczyciel musi sam nabyć nawyku zadawania sobie takich pytań, żeby móc go kształcić u uczniów. Nabywa go w wyniku własnego rozwoju i odpowiedniej praktyki szkolnej, wspierającej ten rozwój. Właściwa praktyka prowadzi do zrozumienia powodów, roli i konsekwencji stawiania sobie takich pytań, odkrywania na nie odpowiedzi, a potem stosowania wynikających z nich wniosków w pracy z uczniami. Słowa profesora Białasa: *To wygląda naprawdę rozsądnie. Nawyk zadawania pytań to rzeczywiście istotna umiejętność, jaką trzeba osiągnąć, aby być świadomym obywatelem w demokratycznym państwie. Wszak gdybyśmy wszyscy posiadli ten nawyk, rzeczywistość polityczna wyglądałaby zupełnie inaczej, a „fejkniusy” czy „trolle” nie byłyby tak groźne.* Należałoby jeszcze dodać, że proces stawiania sobie takich pytań w połączeniu z szukaniem i znajdowaniem realistycznych odpowiedzi jest drogą tworzenia własnego obrazu świata. Podobny sposób rozumowania charakteryzuje fizyków.

W rozmowach na temat treści zawartych w esejach spotkałem się z różnym ich odbiorem. Skrajnym przykładem jest stwierdzenie, że lepiej *trzymać się od oświaty z daleka i przeżyć*. Na szczęście nie wszyscy fizycy tak myślą³ i nie chodzi tu o jakąś źle pojętą działalność, uchodzącą za oświatową, ale o rolę szkoły w społeczeństwie. Krótko można powiedzieć nie tylko, że szkoła jest miejscem, w którym dzieci i młodzież poznają podstawy i zasady życia społecznego, ale także znacznie mocniej stwierdzić, że nie ma demokracji bez edukacji⁴, bo demokracja wymaga szkoły myślenia.

Pozwolę sobie przytoczyć z własnego doświadczenia przykład sugerujący, że rozumowanie stosowane w fizyce może być pomocne nauczycielom w kształtowaniu postaw. Prowadziłem kiedyś zajęcia dla nauczycieli szkół podstawowych na temat prądu elektrycznego, wykorzystując do tego celu podręcznik, który bazuje na samodzielnym wykonywaniu doświadczeń przez uczniów w klasie podzielonej na kilkusobowe zespoły i na dyskusji otrzymanych wyników z in-

struktoorem⁵. W pewnym momencie nauczycielka angielskiego wykrzyknęła *To wcale nie chodzi o fizykę!* Z rozmowy w zespole o przyczynie tego archimedesowego okrzyku wynikało, że nagle stało się jasne, iż nasz tok rozumowania na temat prądu elektrycznego miał uniwersalne cechy. Prowadząc podobne zajęcia spotkałem się ze stwierdzeniami nauczycieli różnych przedmiotów, że gdyby byli uczeni metodą McDermott *et al.* jeszcze jako uczniowie w szkole, to *pewnie poszliby na studia na fizykę*. Fizyka, jako zaawansowana nauka przyrodnicza, jest uważana przez wielu profesjonalistów za wzór do naśladowania w sprawie metodologii poznawania świata.

W sytuacjach społecznych mamy jednak do czynienia z bardzo skomplikowanymi sprawami, których nie potrafimy lub nie możemy rozstrzygnąć za pomocą doświadczenia i rozumowania tak, jak to się robi w fizyce. Jak wtedy odróżnić realistyczne uzasadnienie decyzji od opinii lub demagogii? Po czym poznać, że faktycznie nikt nie wie, co zrobić, a dokonując wyboru musimy zdać się na łut szczęścia? Czym się kierować, gdy w niepewności dochodzi do głosowania? Co robić, gdy mniejszość ma inne zdanie niż większość, a nie jest jasne, że większość ma rację? Gdzie leży granica między postępowaniem racjonalnym a nieracjonalnym? Czego w tej sprawie ma uczyć szkoła? Jak?

Zdaniem redaktora zbioru, eseje prowadzą do pewnej konkluzji. W celu jej wyjaśnienia najłatwiej jest posłużyć się modelem. Myślą przewodnią modelu jest wstępne określenie, co to znaczy uczyć się⁶ i na czym polega wielkie znaczenie pracy nauczyciela. Literatura na ten temat jest ogromna, więc potrzebne jest daleko idące uproszczenie.

Przyjmijmy, że ludzki mózg rośnie podobnie do drzewa, które z czasem z malutkiego nasienia zamienia się w wielką strukturę. Ta analogia wprowadza ogromne uproszczenie⁷, ale wystarczy do naszych celów. Zamiast konarów, gałęzi i liści musimy myśleć o bardzo złożonej sieci komórek nerwowych w całym ciele, zwanych neuronami. „Gałązka”, wyrastająca z jednego neuronu, łączy się z innym neuronem za pomocą specjalnego styku, zwanego synapsą. Ten styk przekazuje impulsy elektryczne z jednego neuronu do drugiego. W ten sposób impulsy rozchodzą się po sieci neuronów. Myślenie i koordynacja w działaniu ludzkiego ciała polega na po-

3. M. Smoluchowski, *Znaczenie nauk ścisłych w wykształceniu ogólnym*, Muzeum: czasopismo wydawane przez Towarzystwo Nauczycieli Szkół Wyższych, tom XXXII, czerwiec 1917, str. 286; przemówienie podczas Zjazdu Członków, 27 maja 1917 r., Uniwersytet Jagielloński; matwbn.icm.edu.pl/ksiazki/pms/pms3/pms319.pdf

4. W. Golding, *Lord of the Flies*, Penguin Books, 1954; przekład na j. polski: Władca much, Czytelnik, 1967.

5. L. C. McDermott, P. S. Shaffer, M. L. Rosenquist oraz Zespół Dydaktyki Fizyki Uniwersytetu Stanu Waszyngton, przekład na j. polski *W poszukiwaniu praw fizyki*, Prószyński i S-ka, 2000.

6. S. B. Sarason, *And what do YOU mean by learning?*, Heinemann 2004.

7. Na przykład Z. Molnar et al. *New insights into the development of the human cerebral cortex*, J. Anat. 235, 432 (2019).

wstawaniu i rozchodzeniu się tych impulsów. Według naszego modelu ludzki umysł uczy się, gdy wzmacniają się w nim już istniejące i powstają nowe synapsy. Tworzą się wtedy nowe obwody i obiegi impulsów, które wiążemy z pamięcią i myśleniem – chwilowe zapamiętywanie nie wiąże się z trwałymi zmianami w strukturze i działaniu mózgu.

Założmy dalej, że proces zmian w mózgu zachodzi zgodnie z zasadą Hebba^{8,9}. W uproszczeniu, ta zasada mówi, że jeśli elektryczna aktywność neuronu A wywołuje elektryczną aktywność neuronu B, to synapsa, łącząca neuron A z neuronem B, wzmacnia się, rozrasta lub neuronowi A wyrasta dodatkowa synapsa do komunikacji z B. Tę zasadę można porównać do zjawiska, które jest znane nauczycielom na każdym poziomie systemu kształcenia. Kiedy nauczyciel mówi do słuchaczy, to widzi, że część z nich wyraźnie słucha, część zdaje się nie mieć pewności, że wiedzą o co chodzi, a niektórzy nawet nie starają się udawać, że uważają. Mówca łapie się na tym, że mówi głównie do tych pierwszych. Podobnie neuron rośnie w kierunku tych neuronów, które na niego reagują. W życiu codziennym znamy podobne zjawisko – rozwijamy stosunki z tymi, którzy reagują zgodnie z naszymi oczekiwaniami.

W modelu potrzebny jest nam jeszcze jeden element: źródło informacji niezbędnej do budowy sieci neuronowej. W każdym neuronie znajduje się kopia naszego kodu genetycznego. Białko do utworzenia nowej synapsy jest tworzone według wzoru tej kopii. Lecz dostępne elementy wzoru do skopiowania są bardzo ciasno spakowane, zwinięte. Muszą powstać odpowiednie warunki w komórce, żeby te elementy rozkręciły się, rozwinęły i udostępniły swoją treść do skopiowania. Gdy powstaje nowe białko, mówimy, że dochodzi do wyrażenia odpowiednich fragmentów kodu, nazywanych genami. Gdy kod jest zwinięty, nowe białko nie może powstać i geny nie wyrażają się. Tak właśnie jest, gdy neurony nie wykazują aktywności. Synapsy nie rosną. Natomiast wtedy, gdy neuron jest aktywny elektrycznie i jego aktywność wiąże się z aktywnością innego neuronu, z którym może się lepiej połączyć, to w wyniku tej dodatnio sprzężonej aktywności powstają takie warunki chemiczne, w których kod do skopiowania z konieczności rozkręca się, zachodzi kopiowanie i w konsekwencji wzrost białka do budowy synapsy. W skrócie, gdy neurony wielokrotnie intensywnie współdziałają, to łączą się na stałe. Potem współdziałają już płynnie i od razu.

Na osiągnięciu tej szybkości i płynności działania polega nauka. Proces uczenia się jest więc podobny do wzrostu mięśni sportowca, który musi się dobrze odżywiać i systematycznie ćwiczyć, żeby rosły tkanka, siła i sprawność jego mięśni.

Napęd procesu rozwoju mózgu lub mięśni jest tożsamy w naszym modelu z napędem życia zlokalizowanym w kodzie genetycznym. Nie rozumiemy tego napędu w pełni, ale wiemy, że istnieje. Jest silny za młodu. Potem świetnie działa w sile wieku, gdy dorosły organizm jest zdolny do tworzenia nowego życia. Lecz mechanizmy kopiowania stopniowo zużywają się i psują, aż w końcu zamierają.

Mając ten model do dyspozycji możemy powiedzieć, że z punktu widzenia uczniów praca nauczyciela polega na tworzeniu warunków, w których w mózgu uczniów rozwija się aktywność neuronów do tego stopnia, że powstają w nich nowe stabilne obwody. Od pracy nauczyciela zależy, jakie będą te obwody.

Zauważmy, że aby uczniowie odpowiednio silnie zaangażowali się w naukę, muszą chcieć się uczyć, bo nie daje się wykonać pracy niezbędnej do budowy nowego białka bez silnej woli własnej. Świadczy o tym np. fakt, że specjaliści potrzebują około dziesięciu tysięcy godzin praktyki w swojej dziedzinie, żeby stać się w niej mistrzami^{10,11}. Zawód nauczyciela nie jest w tej kwestii wyjątkiem. Nauczyciel musi poznawać tajniki tworzenia warunków, w których uczniowie chcą się uczyć, jeśli według naszego modelu ma być dobrym nauczycielem z punktu widzenia uczniów.

Z nauczycielem dzieje się tak samo jak z uczniami: musi chcieć pracować nad własnym rozwojem, żeby był w stanie rzeczywiście pomagać uczniom, zwłaszcza tym, których warunki rodzinne nie stymulują intensywnego rozwoju. Podobnie przebiega nauka w mózgu fizyków. Potrafią rozumować w sposób zależny od treningu.

Nasz model pozwala teraz określić wyjątkowość roli nauczycieli w społeczeństwie¹². Ta wyjątkowość bierze się z wywierania przez nich ustawicznego wpływu na działanie neuronów w szybko rosnących mózgu uczniów. Od postępowania nauczycieli zależą struktura i funkcja połączeń, które wyrosną w mózgu uczniów. Od tego jakie te połączenia wyrosną zależy, jak będą dalej działały u dorosłych, a tym samym jakie będą losy społeczeństwa, które ci dorośli będą potrafili stworzyć.

8. D. O. Hebb, *The organization of behavior: A neuropsychological theory*, John Wiley & Sons, 1949.

9. Na przykład: I. Antonov et al., *Activity-Dependent Presynaptic Facilitation and Hebbian LTP Are Both Required and Interact during Classical Conditioning in Aplysia*, *Neuron* 37, 135 (2003).

10. K.A. Ericsson, *Acad. Med.* 79, S70 (2004).

11. M. Gladwell, *Outliers: The Story of Success*, Little, Brown and Co., 2008; rozdz. 2.

12. J. Dewey, *Democracy and education: an introduction to the philosophy of education*, Macmillan (New York, 1916); www.gutenberg.org/files/852/852-h/852-h.htm

W systemie totalitarnym, warunki pracy zmuszają nauczycieli, żeby w mózgach uczniów tworzyli przede wszystkim struktury strachu i lojalności wobec przywódców. Neurony uczniów będą połączone synapsami powstałymi w wyniku odpowiedniego musztrowania. Jako dorośli już niewiele zmienią w swoim sposobie myślenia, bo obwody, które im wyrosły za młodu, musiałyby być zastąpione nowymi.

W systemie kapitalistycznym¹³ nauczyciel postrzegany jako pracownik na taśmie produkcyjnej, zatrudniony do przerobienia z uczniami konkretnego podręcznika w przeznaczonym na to czasie i miejscu, nie będzie mógł brać serio pod uwagę zainteresowań wszystkich uczniów i różnic między nimi. Jednak nasz model mówi, że jeśli uczniowie nie są zainteresowani tematem i nie chcą się nim zajmować, to nie podejmują wysiłku potrzebnego do wzrostu synaps w zaplanowanym kierunku.

Po zdaniu obowiązkowego egzaminu szybko zapomną o czym była mowa, bo nie będą mieli odpowiednich obwodów myśli. Tym samym czas ich młodego życia potrzebny na rozwój synaps zostanie przepaszczone. Używając naszej analogii mózg–drzewo, można powiedzieć, że tak szkolone umysły będą rosły jak drzewka *bonsai*, a będzie im się zdawało, że rosną najlepiej jak można. Przykładem współczesnego ograniczenia koncepcyjnego tego typu jest nabywane w szkole przekonanie, że podtrzymywanie systemu edukacji w obecnym stanie, w którym mechanizm uczenia się przez ludzki mózg jest sztucznie ograniczony, nie jest przestępstwem.

Powyższe dwa przykłady systemowe nie wyczerpują wszystkich możliwości. Historycznie ukształtowana sytuacja współczesnej szkoły jest bardzo złożona¹⁴. Liczba ludzi na Ziemi w końcu osiągnie maksimum w dostępnych warunkach. Jeśli wierzyć przestrogom¹⁵, warunki klimatyczne mogą nas zaskoczyć siłą raptownych zmian. Ucieczka na Księżyc i Marsa nie odpowie nam na pytanie jak kształcić ludzi. Propaganda uprawiana w sprawach edukacji w skali tysiącleci, wieków czy od wyborów do wyborów, nie zmieni naszej woli życia, która jest zapisana w naszych genach w wyniku bardzo wielu milionów lat ewolucji^{16,17}. Współcześnie zaczynamy coraz

szerszej sami odpowiadać sobie na pytanie komu i po co służymy swoją pracą, na czym polega zadanie, któremu poświęcamy większość dnia. W przypadku nauczycieli w szkołach, wymuszane sytuacją kompromisy dotyczą treści i sposobów nauczania, środków do dyspozycji, warunków zatrudnienia i roli do spełnienia¹⁸.

Z treści książki *Rozwój własny nauczyciela* czytelnik może wysnuć wniosek, że nadchodzi czas myślenia nauczycieli o swojej pracy podobnie jak to robią fizycy. W tym celu nauczyciele musieliby jednak podjąć systematyczne badania, jak ich uczniowie faktycznie się uczą i jak im w tym systemowo skutecznie pomagać. Fizycy będą w tym dziele przydatni tylko o tyle, o ile znajdą drogę do nawiązania współpracy z nauczycielami na podobnie głębokim poziomie. Nauczyciele wszystkich przedmiotów, a szczególnie fizyki, mogą mobilizować do pomocy takich fizyków, z którymi współpraca okazuje się owocna z punktu widzenia nauczyciela. Trzeba jednak pamiętać, że oświata jest trudniejsza niż fizyka^{19,20}. Przykłady ograniczone do fizyki same z siebie nie wystarczają²¹. W szkole przyszłości nauczyciel będzie poznawać człowieka i uczyć się, jak mu pomagać we wszechstronnym rozwoju²². Dlatego fizykom potrzebne jest głębokie zrozumienie sytuacji nauczyciela z powołania, który oprócz trudności merytorycznych i dydaktycznych musi pokonywać trudności psychiczne, w jakich często stawia go system nastawiony obecnie na testowanie i zaspakajanie oczekiwań organów prowadzących i nadzorujących, nie zawsze w pełni świadomych złożoności procesu kształcenia.

Wyniki nauczania zależą od tak wielu czynników, że trudno dzisiaj upierać się przy jakiejś uniwersalnej recepcie. Znamy wiele przykładów programów edukacyjnych, które odniosły zauważalny sukces. Można je naśladować, rozwijać i ulepszać. Wszystkie złożyły się na dzisiejszą postać doktryn edukacyjnych. Współczesna forma obligatoryjnej szkoły, która dominuje wśród systemów edukacji na świecie, liczy sobie co najmniej trzysta sześćdziesiąt dwa lata, mierząc czas jej życia od roku publikacji w Amsterdamie dzieła Jana Amosa Ko-

13. P. Drucker, *Post-Capitalist Society*, Harper Business, 1993.

14. K.G. Wilson, *Additional Sources for Physics Research Funding in the Future?* Konwersatorium Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, 18 listopada 2010; www.fuw.edu.pl/~lfqcd/KGWilson-UWColloquium

15. A.E. Kardaś, M. Popkiewicz, S. Malinowski, *Nauka o klimacie*, Sonia Draga, 2019.

16. C. Darwin, *The Origin of Species* oraz *The Descent of Man*, Encyclopedia Britannica, Inc. Great Books, Vol. 49 (1993).

17. R. Dawkins, *The selfish gene*, Oxford University Press, 1976).

18. T.R. Sizer, *Horace's compromise: The dilemma of the American High School*, HoughtonMifflin Co., 2004 s. 232 "Get teaching conditions right, and Americans will discover thousands of Curtises [great teachers] it never knew it had."; s. 235 „We must empower and enhance the abler folk within it [teaching force]”.

19. K.G. Wilson, prywatna rozmowa, OSU 1995.

20. S.D. Głazek, S.B. Sarason, *Productive Learning: Science, Art and Einstein's Relativity in Educational Reform*, Corwin Press, 2006.

21. Na przykład: *Physical Review Physics Education Research*, journals.aps.org/prper/about, jest koncepcyjnie zbyt ograniczone, a to ograniczenie wymaga wyjaśnienia.

22. S.D. Głazek, *Edukacja XXI*, PAUza Akademicka 108, 1 (2011); pauza.krakow.pl/108_12_2011.pdf

meńskiego *Didactica Magna*²³. W tym dziele jest podany plan systemu szkolnego, takiego jak nasz. Rola nauczyciela jest w swej istocie sprowadzona do roli lektora podręcznika i weryfikatora jego treści odtwarzanej z pamięci przez uczniów. Tymczasem nasz prosty model ilustruje, że nie tędy droga. A zatem którą?

Poszukiwanie odpowiedzi, naśladując fizyków, zaczęłoby się od pytania jakie mamy dane, które chcemy zrozumieć, jakie jeszcze dane chcemy zebrać, itd. Nie możemy zaglądać pod czaszki i liczyć synaps. Mózg ludzki jest tak skomplikowany w strukturze i działaniu, że obecnie nie mamy możliwości rozkładania go na ułamki proste. Z etycznego punktu widzenia musimy liczyć się z jego własnym zdaniem.

Jedynymi ludźmi, którzy mają bezpośredni dostęp do kluczowych danych, są nauczyciele i uczniowie. Jeszcze ważniejszy jest fakt, że nikt oprócz nauczycieli nie spędza znacznej części każdego dnia szkoły na obcowaniu z uczniami. Wszyscy inni znawcy tematu obserwują szkołę z zewnątrz. Nauczyciele są też faktycznymi twórcami procesu szkolnego. Są jedynymi ludźmi, którzy wiedzą, co się w tym procesie dzieje zgodnie z ich własną intencją, planem i jego wykonaniem, a co nie. Nikt oprócz nauczyciela nie wie, co on sam myśli i co robi, szczególnie wtedy, gdy jest sam z uczniami. Nikt nie poznaje uczniów tak, jak nauczyciel, który sprawdza ich prace domowe i klasówki, albo pracuje razem z nimi, żeby zarobili na wycieczkę do Centrum Nauki Kopernik w Warszawie, gdy rodziców nie stać na pokrycie kosztów takiej wyprawy z odległej wioski do stolicy.

Ten stan rzeczy prowadzi do konkluzji, że tylko nauczyciele mają dostęp do danych, z których może wynikać jak uczyć. Odkrycia czekają, jak w przypadku Fleminga czy Becquerela. Trzeba tylko pozwolić nauczycielom badać, porównywać, rozmawiać z uczniami, śledzić ich losy, stawiać hipotezy, sprawdzać je, dyskutować, publikować, recenzować, wykluczać błędne poglądy i budować teorie.

Czy nauczyciele chcą to wszystko robić? Z badań socjologicznych wynika²⁴, że większość nauczycieli pracujących w szkołach chciałaby prowadzić jakieś badania, ale sami z siebie w ogromnej większości nie wiedzą, jak się za to zabrać i co by im to dało, a przecież pracy mają i tak ogromnie dużo. Co więcej, nauczyciele z powołania są zajęci nauczaniem. Nie chcą prowadzić badań *nie wiadomo po co*, kosztem owocnej pracy z uczniami. To wła-

śnie ta praca ich wciąga, daje im poczucie sensu w życiu, daje im satysfakcję, płynącą ze spojrzenia lub uśmiechu dziecka, które zrozumiało, o co chodzi, poczuło wdzięczność i dało jej wyraz. Wtedy czują się jak fizyk, który przeżywa moment Aha!

Żeby rozpoczął się proces faktycznego badania, jak uczyć w szkole, ktoś musi pomóc nauczycielom zrozumieć, że ich praca z uczniami wymaga ustawicznych badań i tylko oni mają dostęp do kluczowych danych. To od nich zależy, w jakim stopniu te dane będą poznane i rozumiane. Do odkryć, jak uczyć dojdzie w wyniku dokumentowania przez nauczycieli wyników własnych działań, sprawdzania zauważalnych prawidłowości przez innych nauczycieli na zasadzie odtwarzalności wyników, tworzenia przez nauczycieli własnych miar postępów w pracy z uczniami i eliminowania fałszywych tropów²⁵. W tym celu potrzebna jest odpowiednia organizacja²⁶. Współpraca nauczycieli szkolnych z fizykami, gdy ci drudzy już tworzą organizację badawczą o światowym zasięgu²⁷, może obie strony zbliżyć do celów, którym służą.

Profesor Białas napisał w PAUzie²⁸, że obywatelom trzeba tłumaczyć, że *demokracja się opłaca*. Kto oprócz nauczycieli mógłby to robić? Nauczyciele musieliby sami zorganizować się w tej sprawie. Fizycy mogą jedynie próbować dzielić się z nauczycielami swoim rozumieniem na czym polega historycznie uwarunkowana organizacja ich pracy badawczej.

Mówiąc najkrócej, fizyka jest już w znacznym stopniu demokratyczna. Jeśli owocne tłumaczenie opłacalności demokracji obywatelom przez nauczycieli wymaga sprawnych kombinacji neuronów i synaps wyrosłych za młodu, to fizycy mogą wnieść znaczący wkład w sprawę, dzieląc się z nauczycielami swoją naturalną ciekawością świata i zasadami organizacji pracy badawczej. Odpowiednia organizacja uwolniłaby nauczycieli koncepcyjnie od respektowania autorytarnych poglądów w sprawach kształcenia i dała im niezłomne poparcie rodziców w dbaniu o interes uczniów.

23. *Wielka Dydaktyka Jana Amosa Komeńskiego*, tł. H. Wernic, Przegład Pedagogiczny, 1883; pbc.up.krakow.pl/dlibra/docmetadata?id=689&from=publication

24. D.C. Lortie, *Schoolteacher: A Sociological Study, with a new preface*, University of Chicago Press, 2002.

25. S.D. Głazek, *Edukacja XXI wieku – Zawód nauczyciela w świecie wartości, wiedzy i umiejętności*, Rocznik Leszczyński 16, 151 (2016); www.archiwum.leszno.pl/new/container/rocznik-leszczynski-16-2016.pdf

26. Szczególną rolę twórczą w powstawaniu takiej organizacji mogą odegrać organizacje nauczycielskie, które już istnieją, związki zawodowe i inne, np. Związek Nauczycielstwa Polskiego, Społeczne Towarzystwo Oświatowe czy Krajowe Forum Oświaty Niezależnej.

27. Wydziały i instytuty fizyki w polskich instytucjach akademickich i badawczych oraz Polskie Towarzystwo Fizyczne są przykładami członków tej światowej organizacji.

28. A. Białas, *Choć naszą przyszłość cofnęli wstecz...*, PAUza Akademicka 483, 4 (2019); pauza.krakow.pl/483_4_2019.pdf

Profesor Zdzisław Pająk

– Mistrz, uczony, organizator nauki

Stefan Jurga

Wydział Fizyki, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu



Profesor Zdzisław Pająk, urodzony w 1924 roku w Warszawie, należał do grona najwybitniejszych polskich uczonych, uprawiających badania naukowe na światowym poziomie. Na Uniwersytecie Adama Mickiewicza zainicjował i rozwinął badania związane z fizyką fazy skondensowanej. Stworzył znaczącą w Polsce i poza granicami szkołę radiospektroskopii, obejmującą magnetyczne rezonanse jądrowe. Jako profesor emerytowany utrzymywał bliskie, serdeczne więzi z licznymi swoimi wychowankami i uczniami, do których piszący te słowa ma zaszczyt się zaliczać.

Zdzisław Pająk wykonał pracę dyplomową z fizyki w 1952 roku na Politechnice Gdańskiej pod kierunkiem prof. Arkadiusza Piekary, na podstawie badań – w aktualnej wówczas dziedzinie – promieniotwórczości naturalnej. W tym samym roku, na zaproszenie władz Uniwersytetu Poznańskiego prof. Arkadiusz Piekara wraz ze swym utalentowanym asystentem Zdzisławem Pająkiem przeniósł się na 14 lat do Poznania, by tutaj, mimo trudnych powojennych warunków, z ogromnym entuzjazmem zorganizować i odbudować laboratoria umożliwiające uprawianie nowoczesnych badań w dziedzinie fizyki doświadczalnej.

30 sierpnia 2019 zmarł w 96. roku życia prof. dr hab. Zdzisław Pająk, profesor zwyczajny Wydziału Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Wybitny uczony, fizyk o światowej sławie, jeden z pionierów spektroskopii rezonansów jądrowych. Osiągnął znakomite wyniki naukowe w dziedzinie badań materii skondensowanej, które zdobyły uznanie fizyków w Polsce i na świecie.

Kierował Zakładem Radiospektroskopii, był dziekanem Wydziału Matematyki, Fizyki i Chemii, długoletnim członkiem Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów Naukowych, członkiem wielu Rad i Komitetów Naukowych. Wykształcił kilka pokoleń fizyków poznańskich.

Po powrocie prof. A. Piekary na rodzimym Uniwersytecie Warszawskim w 1966 roku, ówczesny docent dr hab. Zdzisław Pająk stał się jego naturalnym następcą w Katedrze Fizyki Doświadczalnej UAM. W 1969 roku Katedra została przekształcona w Zakład Radiospektroskopii, który stał się elementem nowej struktury Instytutu Fizyki UAM. Profesor Pająk był kierownikiem Zakładu Radiospektroskopii od 1969 do 1994 roku, a w latach 1969-1975 pełnił funkcje dyrektora i wicedyrektora ds. nauki w Instytucie Fizyki UAM.

Zainteresowania badawcze Zdzisława Pająka na początku Jego drogi naukowej w Poznaniu koncentrowały się wokół zjawiska ferroelektryczności, które choć wykryte w latach 20. XX wieku nabrało szczególnego znaczenia w czasie II wojny światowej. Chodziło o miniaturyzację sprzętu wojskowego, w tym o kondensatory o bardzo dużej pojemności i niewielkich rozmiarach. W tym kierunku rozwinęła się praca doktorska Z. Pająka napisana pod kierunkiem prof. A. Piekary i obroniona w 1959 roku, ze szczególnym odniesieniem do zjawiska ferroelektryczności w tytanianie baru. Podjęte wówczas badania ferroelektryczności w różnych kryształach stały się motorem napędowym wielu nowych

technologii, w tym nowoczesnej mikroelektroniki. Te prace badawcze, przez pewien czas „uśpione” po uzyskaniu habilitacji w 1962 roku w związku z zaangażowaniem w rozwój nowych badań w obszarze rezonansów jądrowych, odżyły z nową siłą w okresie „wolnym od funkcji organizacyjnych” przed przejściem i po przejściu Profesora na emeryturę w 1994 roku.

Warto podkreślić, że koniec lat 50. i początek lat 60. ub. wieku to czas, gdy w Katedrze Fizyki Doświadczalnej IF UAM nakreślono wizję rozwoju badań NMR w Poznaniu, w tym badań tego zjawiska w cieczech i ciałach stałych.

Sygnały NMR w cieczech i ciałach stałych zmierzili w 1946 roku niezależnie dwaj amerykańscy uczeni Felix Bloch na Uniwersytecie Stanforda i Edward M. Purcella z MIT, za co otrzymali nagrodę Nobla w 1952. Tak więc w roku 1962 badania nad rezonansem jądrowym były dopiero u początku swego burzliwego rozwoju, którego rezultatem jest dziś, między innymi, znana nam wszystkim aplikacja – narzędzie diagnostyczne popularnie nazywane „rezonansem”, służące do obrazowania organów wewnętrznych pacjentów.

Podjęcie badań radiospektroskopowych w Polsce wymagało stworzenia odpowiedniej bazy badawczej. Pierwszy spektrometr NMR w Polsce skonstruowali prof. Andrzej Hrynkiewicz i prof. Jacek Hennel w Instytucie Fizyki Jądrowej w Krakowie. W Poznaniu trud ten podjęli doktoranci Profesora Pajaka w Katedrze Fizyki Doświadczalnej, a później w Zakładzie Radiospektroskopii, rozwijając bardziej zaawansowane impulsowe spektrometry magnetycznego rezonansu jądrowego. W roku 1961 Jerzy Angerer wraz z Narcyzem Piślewskim, skonstruowali spektrometr fali ciągłej do wyznaczania czasów relaksacji w cieczech metodą Hrynkiewicza–Hennela. Pozwoliło to na rozwój badań cieczy, ich dynamiki, związku z lepkością i poszukiwanie opisujących je modeli. Badania NMR w cieczech dotyczyły przesunięć chemicznych i relaksacji, w tym relaksacji grup chemicznie przesuniętych, separacji dipolowych oddziaływań wewnątrz- i międzymolekularnych w celu uzyskania informacji na temat ruchów rotacyjnych i translacyjnych oraz ich anizotropii, określenia mechanizmów relaksacji, w tym szczególnie mechanizmu spinowo-rotacyjnego oraz badania dyfuzji. Prace te pod kierunkiem Profesora Pajaka realizowali Barbara Błaszkiwiczowa, Jerzy Angerer, Narcyz Piślewski, Kazimierz Jurga, Jan Jurga, Wiesław Suchański, Eugeniusz Szcześniak, Lidia Latanowicz, Barbara Peplińska. Separacja oddziaływań molekularnych i mechanizmów relaksacji stała się możliwa dzięki rozwojowi metod pomiarowych na jądrach innych niż jądro ^1H , takich jak jądra ^{19}F , ^{14}N , ^{13}C , zaś zastosowanie cewek gradientowych do wytwarzania najpierw gradientu stałego, a póź-

niej znacznie silniejszego gradientu impulsowego pola magnetycznego, umożliwiło badanie procesów dyfuzji molekuł w cieczy. Szczególnie zaangażowani w te badania byli Jerzy Angerer, Wiesław Suchański, Barbara Peplińska i Marek Kempka.

Kolejny ważny krok w badaniach NMR cieczy był związany ze zbudowaniem w 1965 roku przez Kazimierza Jurgę pierwszego w Polsce spektrometru fali ciągłej o dużej zdolności rozdzielczej, a następnie przystosowanie go do badania relaksacji grup chemicznie przesuniętych. Pierwsze widmo alkoholu etylowego o rozdzielczości 7Hz pomiędzy liniami w grupie CH_3 , przy częstotliwości pracy spektrometru 25 MHz, było dużym osiągnięciem w tamtych czasach.

Badania NMR ciała stałego zostały zapoczątkowane przez Profesora Pajaka wraz z pojawieniem się autodynowego spektrometru skonstruowanego przez Andrzeja Graję i Romana Goca. Później Kazimierz Jurga podjął ogromne wyzwanie i zbudował w 1972 roku pierwszy w Polsce impulsowy spektrometr NMR do badania ciała stałego, w tym do pomiarów czasów relaksacji w laboratoryjnym i rotującym układzie współrzędnych. W późnych latach 70. i na początku lat 80. powstawały spektrometry bardziej specjalistyczne, m.in. spektrometr NMR do badania magnetyków. Niezwykle ważnym elementem inspiracji naukowej Zdzisława Pajaka był nacisk na rozwój aktualnych metod pomiarowych. Wśród nich szczególnie istotne znaczenie dla badań ciała stałego miały metody wieloimpulsowe, jak również metody badania efektywnych czasów relaksacji oraz techniki związane ze skracaniem czasów martwych po to, by można było rejestrować sygnały precesji swobodnej NMR w ciałach stałych.

Badania ciała stałego to początkowo próby zrozumienia teorii Redfielda, która w latach 70. tamtego wieku była przełomową teorią dotyczącą zachowania się spinów w rotującym układzie współrzędnych, określenia charakterystycznego dla wolnych ruchów molekularnych czasu $T1\rho$, zrozumienia takich pojęć jak temperatura spinowa, przejścia adiabaticzne. To była domena działalności Stefana Jurgi. Przedmiotem badań szerokości linii i relaksacji w ciałach stałych były kryształy, dielektryki i magnetyki, prowadzone przez Romana Goca, Stefana Jurgę, Barbarę Szafrąską, Asję Kozak, Jacka Radomskiego, Ryszarda Konieczkę, Jana Wąsickiego, Małgorzatę Grottel, Joannę Kapturczak, Marię Połomską, Wojciecha Kaczmarka, Stanisława Lewickiego, Janusza Hankiewicza. Podstawą analizy były badania szerokich linii NMR oraz ich struktury, pomiary czasów relaksacji w układzie laboratoryjnym i rotującym, które pozwalały badać relaksację układu dipolowego i wiążącą ją z ruchami molekularnymi, i wreszcie badania ciał stałych metodami o dużej zdolności roz-

dzielczej. Obok typowych ciał stałych podjęto także badania polimerów. Jedną z pierwszych prac wykonaną pod kierunkiem Profesora dotyczyła wpływu wydłużenia elastomeru na relaksację jądrową. Badano uporządkowanie w polimerach, ich mikrostrukturę i dynamikę molekularną. Przedmiotem badań były polimery w przeróżnych stechiometrycznych układach, polimery przewodzące, jak również roztwory polimerów. W badaniach te głównie zaangażowany był Stanisław Głowinkowski, a później Stefan Jurga.

W 1994 roku po przejściu Profesora na emeryturę, z Zakładu Radiospektroskopii został wydzielony nowy Zakład Fizyki Makromolekularnej kierowany przez Stefana Jurę, w którym skoncentrowano się na badaniach układów materii miękkiej nie tylko metodami NMR na jądrami wodoru, ale także na jądrami deuteru oraz innych jądrami (C^{13}) o niskiej abundancji, a ponadto także metodami spektroskopii dielektrycznej, reologii, dyfrakcji rentgenowskiej i mechanicznej, metodami kalorymetrycznymi, a także metodami obliczeniowymi. Kierownikiem Zakładu Radiospektroskopii i kontynuatorem badań NMR ciała stałego został uczeń Profesora – prof. Jan Wąsicki.

Działalność Profesora zaowocowała opublikowaniem kilkuset prac naukowych, uzyskaniem kilku patentów i przyczyniła się znacznie do rozwoju kadry naukowej, w tym wypromowaniu 36 doktorów, z których wielu zostało profesorami na UAM lub w innych polskich instytucjach naukowych, w tym między innymi Czesław Lewa został profesorem na Politechnice Gdańskiej, Kazimierz Jurga na UAM, Narcyz Piślewski w Instytucie Fizyki Molekularnej PAN, Stefan Jurga na UAM, Jan Jurga na Politechnice Poznańskiej, Krystyna Hołderna-Natkaniec na UAM, Jan Wąsicki na UAM, Lidia Latanowicz na Uniwersytecie Zielonogórskim, Eugeniusz Szcześniak na UAM, Roman Goc na UAM, Maria Połomska w Instytucie Fizyki Molekularnej PAN.

Należy przy okazji wspomnieć, że jeden z doktorów i habilitantów Profesora – dr hab. Wojciech Kaczmarek został pierwszym Prezydentem Poznania po przemianach roku 1989.

Na szczególną uwagę zasługują także prace Profesora dotyczące dynamiki molekularnej i jej związku z polimorficznymi przejściami fazowymi w kryształach jonowo-molekularnych. W pracach tych pokazano, że za pomocą różnych metod badawczych, w tym w szczególności magnetycznego rezonansu jądrowego, można zidentyfikować typ reorientacji molekularnych i oszacować wartości czasów korelacji dla stochastycznych reorientacji fragmentów lub całych molekuł. Szczegółowa analiza dynamiki molekuł czy jonów dostarczyła cennych informacji dotyczących między innymi mechanizmu przejść fazowych.

W przypadku kryształów jonowo-molekularnych szczególnie interesujące dane otrzymano analizując reorientacje molekularne obu podsieci: kationowej i anionowej. Dla kilku soli pirydyniowych (dla których podsić anionowa zawierała jądra fluoru np. $X = BF_4^-, PF_6^-, SbF_6^-$) zaobserwowano ciekawy efekt zbieżności rotacyjnych czasów korelacji obu jonów w przejściu fazowym, który wskazał na istnienie nowego typu sprzężenia rotacyjnych modów dwu podsieci jonowych. Podobny efekt zaobserwowano dla złożonych reorientacji wewnątrz-molekularnych zarówno w kryształach molekularnych, jak i jonowo-molekularnych. Badania wielu soli pirydyniowych dowodzą, że reorientacje kationu pirydyniowego (C_5H_5NH) w fazie niskotemperaturowej odbywają się przez nierównoważne bariery (potencjał asymetryczny) natomiast w fazie wysokotemperaturowej przez bariery równoważne (potencjał symetryczny). Dla kilku soli pokazano, że parametr asymetrii Δ (różnica pomiędzy minimami energii potencjalnej) zależy od temperatury. Symetryzacja barier energetycznych wydaje się być, obok sprzężenia modów rotacyjnych, mechanizmem spustowym przemian fazowych w kryształach.

Profesor Pająk zainicjował także nowatorskie badania dynamiki molekularnej w kryształach jonowo-molekularnych w funkcji wysokiego ciśnienia, w szczególności badania wpływu ciśnienia hydrostatycznego na czasy magnetycznej relaksacji jądrowej. Kontynuując tematykę, prof. Jan Wąsicki zbudował aparaturę do badania czasów relaksacji NMR pod wpływem wysokiego ciśnienia hydrostatycznego (do 800 MPa). Dla układów jonowo-molekularnych źródłem barier energetycznych hamujących reorientacje kationów są międzymolekularne oddziaływania jonowe i oddziaływania van der Waalsa. Modyfikacji oddziaływań molekularnych najwygodniej dokonywać podając układ działaniu wysokiego ciśnienia hydrostatycznego. Spowodowana nim zmiana odległości międzymolekularnych wpływa na wysokość i kształt barier hamujących reorientacje dostarczając tym samym cennych o nich informacji. Wykonane pomiary czasów relaksacji spin-siatka w funkcji temperatury i ciśnienia dla jodku, azotanu i nadchloranu pirydyniowego dostarczyły ciekawych informacji na temat kształtu i wysokości barier hamujących reorientacje kationu.

W latach 1994-2006 Profesor powrócił do badań nad ferroelektrycznością. Jak już wspomniano, ferroelektryki stanowią klasę materiałów, które są interesujące zarówno ze względu na ich zastosowania w technice, jak i pod względem poznawczym. Mimo dużej liczby materiałów ferroelektrycznych wciąż nie

ustają prace w poszukiwaniu nowych ferroelektryków. Zjawisko ferroelektryczne obserwuje się w ciałach stałych o bardzo różnorodnej budowie wewnętrznej i różnych typach oddziaływań międzycząsteczkowych, a mianowicie w kryształach jonowych, molekularnych, molekularno-jonowych lub polimerach. Zwykle poszukiwanie nowych materiałów ferroelektrycznych ogranicza się do wąskiej grupy materiałów o podobnej budowie pod względem struktury krystalicznej lub molekularnej, bądź innych własności takich jak dynamika molekularna czy typ oddziaływań. Profesor Pająk od początku lat osiemdziesiątych badał sole pirydyniowe wykorzystując metodę NMR. Sole te należy zaliczyć do kryształów molekularno-jonowych, w których występuje nieuporządkowanie kationu pirydyniowego, a niekiedy także anionów. Technika NMR pozwoliła zbadać zmianę dynamiki kationu pirydyniowego w funkcji temperatury. Okazało się, że przejście ze stanu nieuporządkowanego do uporządkowanego następuje w wyniku jednej lub wielu przemian fazowych. Było to podstawą do ewentualnego poszukiwania własności ferroelektrycznych w grupie soli pirydyniowych. Profesorom Janowi Wąsickiemu i Piotrowi Czarneckiemu udało się wyhodować monokryształ czterofluoroboranu pirydyniowego o wymiarach wystarczających do badań dielektrycznych. Zaobserwowanie pętli histerezy elektrycznej było dowodem wykrycia w tym materiale własności ferroelektrycznych. Odkrycie nieznanego do tychczas ferroelektryka spowodowało, że przebadano kilkadziesiąt soli pirydyniowych i odkryto własności ferroelektryczne w trzech następnych kryształach pirydyniowych: nadchloranie, nadjodanie i nadrenianie. Stwierdzono, że własności ferroelektryczne występują w solach pirydyniowych z anionami o budowie tetraedrycznej (BF_4 , ClO_4 , IO_4 , Re_4) natomiast nie występują w solach z anionami prostymi (Cl , Br , I), a także jeżeli anion jest oktaedryczny (PF_6). Odkrycie całej rodziny ferroelektryków było oczywistym osiągnięciem naukowym. Profesor Pająk wytrwale poszukiwał dalszych ferroelektryków w grupie soli pirydyniowych. Odkryto własności ferroelektryczne we fluorosulfonianie (PyFSO_3) oraz fluorochromianie (PyCrSO_3). Niestrudzony Profesor rozpoczął poszukiwania ferroelektryczności w grupie soli imidazoliowych. Zaowocowało to odkryciem własności ferroelektrycznych w czterofluoroboranie imidazoliowym (ImBF_4) oraz nadchloranie imidazoliowym (ImClO_4). Za odkrycie wraz z profesorami Piotrem Czarneckim, Wojciechem Nawrocikiem i Janem Wąsickim nowych kryształów ferroelektrycznych w układach organicznych soli pirydyniowych, Zdzisław Pająk został wyróżniony nagrodą naukową Ministra

Edukacji Narodowej w 1995 roku. Należy podkreślić, że pasją z jaką poszukiwał nowych ferroelektryków jest godna podziwu; niekiedy wspominał, że początek jego kariery naukowej był związany z badaniem ferroelektryków i po przejściu na emeryturę powrócił do „starej miłości” po wielu latach swojej aktywności naukowej.

Na podkreślenie zasługuje także aktywność Profesora na rzecz organizacji badań naukowych. Poza wspomnianym już kierownictwem Zakładu Radiospektroskopii i Katedry Fizyki Doświadczalnej, pełnieniem funkcji wicedyrektora i dyrektora Instytutu Fizyki UAM w latach 1969–1975, Profesor Zdzisław Pająk – ciesząc się ogromnym autorytetem, szacunkiem i zaufaniem wspólnoty akademickiej – był Dziekanem Wydziału Matematyki, Fizyki i Chemii UAM w latach 1975–1981 oraz pełnił odpowiedzialne funkcje w komisjach uniwersyteckich. Był także wieloletnim członkiem Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów Naukowych (ówczesnej CKK) oraz zasiadał z głosem doradczym w wielu gremiach naukowych polskich instytucji, a także w europejskich towarzystwach naukowych, w tym w stowarzyszeniu naukowym Groupement AMPERE.

Profesor doskonale rozumiał potrzebę międzynarodowej współpracy naukowej. Sam odbył szereg staży zagranicznych, poza wspomnianą już paryską Sorboną, także między innymi w laboratorium prof. J. Powlesa w University of Canterbury, Kent, (którego wychowankiem był przyszły laureat Nagrody Nobla Sir Peter Mansfield, twórca metody obrazowania rezonansem magnetycznym dla potrzeb diagnostyki medycznej), University of London, Bangor University (tam poznał prof. E. R. Andrew – doktora honoris causa UAM, który blisko współpracował z grupą Profesora Pajaka), w Uniwersytecie w Lipsku, gdzie nawiązał kontakty naukowe z profesorami Arturem Loesche i Harry Pfeiferem, w Moskwie w Akademii Nauk ZSRR. Popierał współpracę międzynarodową swoich uczniów, był autentycznym promotorem współpracy międzynarodowej. Jego uczniowie odbyli szereg co najmniej jednorocznych staży naukowych w laboratoriach zagranicznych, w tym w USA (University of Illinois at Chicago and Urbana-Champaign, University of Kansas at Lawrence, University of Florida, Gainesville, New York State University, Albany, University of Wisconsin, Madison), w Niemczech (Moguncja, Lipsk, Halle), w Belgii (Liege, Bruksela), w Rosji (Dubna, Moskwa), w Słowenii (Lubljana).

Profesor Zdzisław Pająk jest autorem lub współautorem ponad 150 publikacji naukowych w indeksowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym i setek innych publikacji dotyczących NMR. Prace Profesora charakteryzowały się aktualnością naukową i osiągały wysokie parametry bibliometryczne.

Jako wybitny autorytet naukowy, autor znaczących publikacji naukowych, promotor kadr akademickich, w tym ponad 10 profesorów, ponad 30 doktorów, ponad 300 magistrów, świetny organizator życia naukowego na UAM, przez 66 lat służył swojej Uczelni, dzieląc się swą wiedzą, promieniując ogromną kulturą osobistą, skromnością i serdecznymi relacjami ze swoimi współpracownikami. To wszystko sprawia, że Jego uczniowie i współpracownicy znaleźli w osobie Profesora prawdziwego Mistrza i Przyjaciela.

Wybrane publikacje związane z wczesnym okresem badań ferroelektryczności

1. A. Piekara, Z. Pająk, *Thermal Pseudohysteresis of the Dielectric Constant of Ferroelectric Titanates*, Acta Phys. Polon., **11**, 256 (1952).
2. A. Piekara, Z. Pająk, *Effect of Electric Field on the Dielectric Constant of Ferroelectric Titanates*, Acta Phys. Polon., **12**, 170 (1953).
3. Z. Pająk, A. Piekara, *Thermal Independence of Permittivity of Ferroelectric Heterogeneous Systems*, Bull. Ac. Polon. Sci. Cl. III, **4**, 83 (1956).
4. Z. Pająk, F. Kaczmarek, J. Jastrzębski, *Delay-Effect in Ferroelectric Titanates Below the Curie Point*, Bull. Ac. Polon. Sci. Cl. III, **4**, 457 (1956).
5. Z. Pająk, *Die Verschiebung des Curiepunktes beim Altern der Ferroelektrika*, Festkoerperphysik und Physik der Leuchtstoffe, Berlin, 198 (1958).
6. Z. Pająk, J. Stankowski, *Polarization Changes during the Process of Ageing in Ferroelectrics of BaTiO₃ Type*, Proc. Phys. Soc., **72**, 1144 (1958).
7. Z. Pająk, *Dielectric Investigation of Perovskite Type Ferroelectrics, Part I. Ferroelectric Systems with Small Temperature Coefficient of Permittivity*, Acta Phys. Polon., **19**, 473 (1959).
8. Z. Pająk, *Dielectric Investigation of Perovskite Type Ferroelectrics, Part II. Ageing Process in Ferroelectrics*, Acta Phys. Polon., **19**, 507 (1959).
9. M. Połomska, W. Kaczmarek and Z. Pająk, *Electric and magnetic-properties of (BI-XLAX)FEO₃ solid-solutions*, Phys. Stat. Solidi A-Applications and Materials Science., **23**, 567 (1974).
10. L. Latanowicz and Z. Pająk *Negative solvation of diamagnetic ions in methanol*, Chem. Phys. Lett., **38**, 166 (1976).
11. Z. Pająk and E. Szczesniak, *Structure and microdynamic behavior of liquid formic-acid*, Chem. Phys. Lett., **49**, 269 (1977).
12. K. Jurga, *Pulse NMR spectrometer for local dipolar field measurements in solids*, Journal of Physics E: Scientific Instruments, **14**, 555 (1981).
13. S. Jurga, K. Jurga and Z. Pająk, *NMR-study of molecular-motion in solid trimethyloxosulfonium halides*, Journal of Physics C-Solid State Physics, **14**, 4433(1981).
14. S. Jurga, K. Jurga and Z. Pająk, *NMR-study of molecular-motion in solid trimethyloxosulfonium halides*, Journal of Physics C-Solid State Physics, **14**, 4433(1981).
15. S. Jurga, K. Jurga and Z. Pająk, *Composite motion of molecular groups in solid triethylphosphine oxide as studied by NMR*, Journal of Magnetic Resonance, **50**, 175 (1982).
16. W. Suchanski, M. Kempka, B. Peplińska and Z. Pająk, *Magnetic relaxation and molecular motions in liquid 3 -dimethylpyridine*, Berichte der Bunsen-Gedellschaft-Physical Chemistry Chemical Physics, **98**, 804 (1994).
17. J. Hankiewicz and Z. Pająk, *Nuclear magnetic resonance in BaCu₂-xZnxFe₁₆O₂₇*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, **140**, 2095 (1995).

Wybrane publikacje związane z badaniem przejść fazowych, struktury i dynamiki molekularnej w fazie skondensowanej

1. Z. Pająk, *Résonance magnétique nucléaire du proton dans les complexes CHX₃ + donneur aromatique*, Comptes rendus Ac. Sc. Paris, **249**, 1211 (1959).
2. Z. Pająk, F. Pellan, *Résonance magnétique nucléaire du proton dans les complexes CHX₃+ donneur hétéro-aromatique*, Comptes rendus Ac. Sc. Paris, **251**, 79 (1960).
3. Z. Pająk, *Effet pi intermoléculaire des composés aromatiques et hétérocycliques*, Proc. IX Colloque AMPERE, 527 (1960).

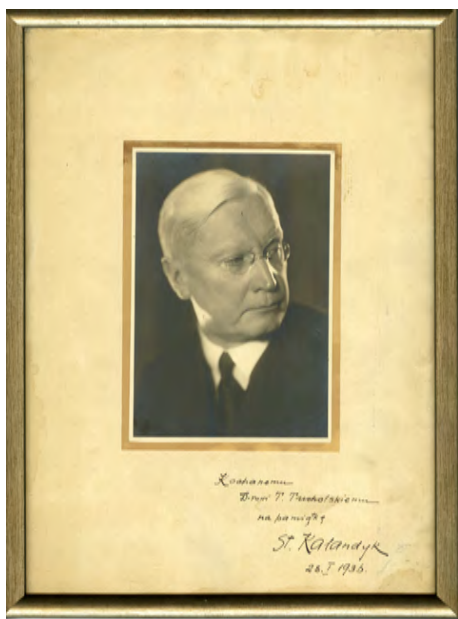
Wybrane publikacje związane z odkryciem nowych ferroelektryków

1. P. Czarnecki, W. Nawrocik, Z. Pająk and J. Wąsicki, *Ferroelectric Properties of Pyridinium Tetrafluoroborate*, Phys. Rev., **B49**, 1511 (1994).
2. P. Czarnecki, W. Nawrocik, Z. Pająk and J. Wąsicki, *"Ferroelectric Properties of Pyridinium Perchlorate*, J.Phys. Condens. Matter, **6**, 4955 (1994).
3. J. Wąsicki, P. Czarnecki, Z. Pająk, W. Nawrocik, and W. Szczepański, *Ferroelectric Properties of Pyridinium Perrhenate*, J. Chem. Phys., **107**, 576 (1997).
4. Z. Pająk, P. Czarnecki, J. Wąsicki, W. Nawrocik, *Ferroelectric Properties of Pyridinium Periodate*, J. Chem. Phys., **109**, 6420 (1998).
5. Z. Pająk, P. Czarnecki, H. Małuszyńska, B. Szafrńska and M. Szafran, *Ferroelectric properties of pyridinium fluorosulphonate*, J. Chem. Phys., **113**, 848 (2000).
6. Z. Pająk, H. Małuszyńska, B. Szafrńska and P. Czarnecki *Crystal structure, molecular dynamics, and polar properties of pyridinium fluorochromate*, J. Chem. Phys., **117**, 5303 (2002).
7. Z. Pająk, P. Czarnecki, B. Szafrńska, H. Małuszyńska, and Z. Fojud, *Ferroelectric order in highly disordered molecular-ionic crystals*, Phys. Rev., B **69**, 132102 (2004).
8. Z. Pająk, P. Czarnecki, B. Szafrńska, H. Małuszyńska, and Z. Fojud, *Ferroelectric ordering in imidazolium perchlorate*, J. Chem.Phys., **124**, 144502 (2006).

Pamięci Profesora Stanisława Kalandyka

Leszek Kubisz

Katedra Biofizyki, Uniwersytet Medyczny im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu



Profesor Stanisław Kalandyk

28 stycznia 2020, w 80. rocznicę tragicznej śmierci profesora Stanisława Kalandyka odbyła się sesja naukowa poświęcona Jego pamięci.

Profesor Stanisław Kalandyk był fizykiem, stworzył na przełomie lat 1921/1922 Katedrę Fizyki na Wydziale Lekarskim Uniwersytetu Poznańskiego, pierwszą tego typu katedrę i jedyną w przedwojennej Polsce, a także jedną z pierwszych w Europie

Profesor był ostatnim przedwojennym dziekanem Wydziału Lekarskiego Uniwersytetu Poznańskiego, wybranym na kadencję 1939–1940. Aresztowany przez Niemców pod zarzutem posiadania radiowego aparatu nadawczego, został rozstrzelany w nocy z 28 na 29 stycznia 1940 roku na dziedzińcu Fortu VII w Poznaniu. To właśnie w 80. rocznicę tej męczeńskiej śmierci, złożeniem kwiatów pod tablicą umieszczoną w holu Collegium Maius, dawnej siedzibie Wydziału Lekarskiego i Katedry Fizyki, upamiętniającą Stanisława Kalandyka, rozpoczęto sesję naukową poświęconą jego dokonaniom na tle problemów, z którymi musieli borykać się twórcy Uniwersytetu Poznańskiego. Tę wybitną postać uczczono także w miejscu tragicznej śmierci, składając

kwiaty pod Ścianą Śmierci w Forcie VII – miejscu eksterminacji poznańskiej i wielkopolskiej inteligencji. Inicjatorami upamiętnienia postaci prof. Kalandyka są pracownicy Katedry Biofizyki Uniwersytetu Medycznego – spadkobiercy spuścizny naukowej i dydaktycznej przedwojennej Katedry Fizyki na Wydziale Lekarskim.

Sesję otworzył prorektor Uniwersytetu Medycznego w Poznaniu prof. dr hab. Michał Musielak, nakreślając postać prof. Stanisława Kalandyka na tle ówczesnych wydarzeń. Postać Profesora przybliżył uczestnikom sesji prof. dr hab. Leszek Kubisz, Kierownik Katedry Biofizyki i Zakładu Biofizyki Uniwersytetu Medycznego w Poznaniu.

Profesor Stanisław Kalandyk urodził się w 1885 roku w Kamieńcu Podolskim, tam też ukończył gimnazjum. Studiował na Wydziale Fizyczno-Matematycznym Uniwersytetu w Kijowie, gdzie rozpoczął błyskotliwą karierę naukową uzyskując habilitację w wieku 26 lat. Za namową prof. Wrzoska w 1921 roku przybył do Poznania, żeby objąć Katedrę Fizyki Lekarskiej na tworzonej właśnie Uniwersytecie Poznańskim. Mając 37 lat został profesorem (1922). Był autorem wielu publikacji poświęconych głównie zagadnieniom jonizacji w płomieniu, w eksplozjach oraz emisji termojonowej metali w atmosferze gazów. Był członkiem Komisji Matematyczno-Przyrodniczej Poznańskiego Towarzystwa Przyjaciół Nauk oraz brał czynny udział w pracach Polskiego Towarzystwa Fizycznego. Był wybitnym dydaktykiem, a z jego *Podręcznika fizyki dla medyków i biologów*, pierwszego w Polsce, korzystały kolejne roczniki studentów także po II wojnie światowej. Był oddany swojej pracy, bardzo dbał o studentów fundując tym uboższym prywatne stypendia. Został wybrany dziekanem Wydziału Lekarskiego na rok 1939/40. Funkcji tej nie zdążył objąć. Wybuch II Wojny Światowej, który przyniósł bezwzględne metody terroru stosowane przez okupanta hitlerowskiego, stał się przyczyną tragicznej śmierci Profesora. Tablica umieszczona w holu Collegium Maius nie pozwoli o tym zapomnieć...

O osiągnięciach fizyków poznańskich na tle fizyki światowej lat międzywojennych mówił podczas sesji prof. dr hab. Henryk Drozdowski Przewodniczący Po-

znańskiego Oddziału Polskiego Towarzystwa Fizycznego z Wydziału Fizyki UAM. Profesor dr hab. Anita Magowska, kierownik Katedry i Zakładu Historii i Filozofii Nauk, omówiła niełatwe początki tworzenia Wydziału Lekarskiego Uniwersytetu Poznańskiego zarówno w sensie materialnym, jak i w kontekście relacji międzyludzkich, a także o roli prof. Adama Wrzowska w tym dziele. Kustosze Muzeum Martyrologii Wielkopolan – Fort VII, Przemysław Jurkiewicz wygłosił referat *Umysł politycznie niebezpieczny – profesor Stanisław Kalandyk jako ofiara intelligenzaktion*. Wiceprzewodniczący Komisji Kultury i Nauki Rady Miasta Poznania mgr Andrzej Rataj zaproponował upamiętnienie postaci prof. Stanisława Kalandyka poprzez nadanie jego imienia ulicy lub skweru w mieście.



10 maja 1957 Profesor Stanisław Kalandyk został pośmiertnie odznaczony Krzyżem Komandorskim z Gwiazdą Orderu Polonia Restituta

Kronika Polskiego Towarzystwa Fizycznego

Opracowana na podstawie informacji nadesłanych przez korespondentów oddziałów PTF

Łódź. 17 grudnia 2018 odbyło się walne zebranie sprawozdawczo-wyborcze Oddziału Łódzkiego PTF. Na zebraniu wybrano nowe władze Oddziału w składzie: Przewodniczący dr hab. Stanisław Bednarek, prof. UŁ, Członek Zarządu dr Piotr Skurski, Sekretarz Oddziału mgr Ireneusz Jakubowski. W późniejszym terminie Skarbnikiem Oddziału został mgr inż. Janusz Kuliński, a Przewodniczącym Komisji Rewizyjnej jest nadal dr hab. Andrzej Korejwo.

MAJ 2019

Łódź. 7 maja odbył się dzień otwarty na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej UŁ współorganizowany przez przewodniczącego OŁ PTF dr hab. Stanisława Bednarka i doktorantów UŁ pod hasłem *Zaprogramuj się 6.0 z Rossmann*. Jest to program szkoleń przygotowany dla każdego, kto chce zostać programistą lub testerem w Centrum Informatycznym Rossmann.

CZERWIEC 2019

Łódź. 12 czerwca pod hasłem *Podróż-od-magii-do-wiedzy* na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej UŁ 49 osobowa grupa uczniów szkół podstawowych, gimnazjów i liceów regionu łódzkiego przeniosła się w świat niezwykłych doświadczeń z obszaru fizyki i informatyki. Podczas interaktywnych pokazów uczestnicy poznali proste wyjaśnienia złożonych zagadnień takich jak tajemnice wirującego koła, zagadki wyładowań elektrycznych i zjawisk z zakresu elektrostatyki, zagadka lewitacji nadprzewodnika w polu magnetycznym, a także paradoksalnych zjawisk wizualizacji świata niewidzialnego i ukrycia widzialnego z wykorzystaniem światła spolaryzowanego, podczerwieni i ultrafioletu. Pokazy uzupełnione były wykładami.

Warszawa. W dniach 17–18 czerwca na Politechnice Warszawskiej odbyła się kolejna edycja Sympozjum

SFINKS (sfinks.fizyka.pw.edu.pl/), czyli coroczne spotkanie młodych naukowców zainteresowanych interdyscyplinarnymi zastosowaniami fizyki. Poza zwyczajowymi referatami uczestniczek i uczestników tematem przewodnim sympozjum była w tym roku *Nauka w oparach absurdu*, a podczas dyskusji panelowej głos w dyskusji zabrali dr inż. Tomasz Miller (Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych), dr hab. Marcin Napiórkowski (Instytut Kultury Polskiej UW, autor książek, publicysta), Łukasz Sakowski (biolog, dziennikarz naukowy, twórca bloga totylkoteoria.pl) i red. Aleksandra Stanisławska (dziennikarka, Tok FM, blogerka crazynauka.pl).

Trzebnica. W dniach 24–28 czerwca odbyły się dziewiąte *Międzynarodowe Warsztaty Fizyki Powierzchni IWSP (International Workshop on Surface Physics)* organizowane przez Instytut Fizyki Doświadczalnej UW (www.iwsp2019.ifd.uni.wroc.pl/), poświęcone badaniom powierzchni ciał stałych. Warsztaty stanowią kontynuację Międzynarodowych Seminariów Fizyki Powierzchni (*International Seminars on Surface Physics*), które odbywają się od 1976 roku. W 2019 roku warsztaty IWSP stanowiły 87 konferencję Międzynarodowej Unii Nauki, Techniki i Zastosowań Próżniowych IUVSTA (*International Union for Vacuum Science, Technique and Applications*) oraz satelitarną konferencję 21 Międzynarodowego Kongresu Próżniowego IVC-21 (*International Vacuum Congress*), który odbył się w Malmö w Szwecji.

Tematem przewodnim konferencji IWSP były powierzchnie nanostrukturyzowane (ang. *nanostuctured-surfaces*), a wykłady dotyczyły obecnego stanu badań w tej dziedzinie, najnowszych osiągnięć i perspektyw w nauce o powierzchni. Program naukowy obejmował takie zagadnienia jak: adsorpcja, desorpcja, dyfuzja atomów i cząsteczek na powierzchniach, samoorganizacja molekuł organicznych i nieorganicznych, wzrost cienkich warstw, nanostrukturyzacja, struktura elektronowa

i atomowa funkcjonalizowanych materiałów oraz interfejsów, układy niskowymiarowe, układy fazowe gaz – ciało stałe i ciecz – ciało stałe, a także metody charakteryzacji nanostruktur. Wystąpienia dotyczyły aspektów zarówno teoretycznych, jak i doświadczalnych. Przedstawione zostały również inne obszary pionierskich badań związane ze zrozumieniem i kontrolowaniem właściwości fizycznych i chemicznych powierzchni. Wysoki poziom naukowy wykładów stymulował dyskusje zarówno podczas sesji wykładowych, jak i w kuluarach. Warsztaty umożliwiły efektywny transfer wiedzy i doświadczenia między zaproszonymi ekspertami o światowej renomie oraz doktorantami i badaczami na wczesnym etapie kariery naukowej, którzy przedstawiali wyniki swoich prac badawczych w postaci krótkich referatów i plakatów.

Zaproszonymi wykładowcami byli naukowcy reprezentujący różne dziedziny nauki: Grażyna Antczak (Uniwersytet Wrocławski, Polska), Soma Vesztergom (University of Bern, Szwajcaria), Alessandro Fortunelli (CNR-ICCOM & IPCF, Włochy), Mieczysław Jałochowski (UMCS, Polska), Takashi Kumagai (FHI-MPG, Niemcy), Nian Lin (The Hong Kong University of Science and Technology, Chiny), Olaf Magnussen (Universität zu Kiel, Niemcy), Gareth Parkinson (Technische Universität Wien, Austria), Talat Rahman (University of Central Florida, USA), Frances M. Ross (Massachusetts Institute of Technology, USA) będąca laureatką nagrody profesora T.E. Madeya, Moritz Sokolowski (Universität Bonn, Niemcy), Martin Sterrer (Universität Graz, Austria) oraz Christian Tusche (Forschungszentrum Jülich GmbH, Niemcy).

Konferencja IWSP umożliwiła wymianę doświadczeń i nawiązanie współpracy naukowej z czołowymi ośrodkami naukowymi na świecie. Liczny udział doktorantów i młodych pracowników naukowych odzwierciedlił aktualność problematyki nanostrukturyzacji powierzchni oraz duże zainteresowanie metodami doświadczalnymi umożliwiającymi prowadzenie badań w skali nanometrowej. Konferencję sponsorowała IUVSTA oraz firma EDVAC.

LIPIEC 2019

Odolanów k. Ostrowa Wielkopolskiego. 5 lipca pod patronatem Instytutu Fizyki Molekularnej PAN w Poznaniu została zorganizowana Sesja Jubileuszowa XXXV Warsztatów Naukowych Lato z Helem *Hel w Odolanowie – nauka, przemysł, edukacja* poświęcona Profesorowi Janowi Stankowskiemu w 10. rocznicę śmierci. Więcej informacji o Sesji można znaleźć na stronie IFM PAN w Poznaniu.

WRZESIEŃ 2019

Chorzów. W dniach 1-6 września odbyła się XLIII Międzynarodowa Konferencja Fizyki Teoretycznej z cyklu *Matter to the Deepest. Recent Developments In Physics Of Fundamental Interactions* zorganizowana przez Instytut Fizyki (ParticlePhysicsgroup oraz Astrophysics and Cosmologygroup) Uniwersytetu Śląskiego. Tematyka konferencji obejmowała następujące zagadnienia: precision tests of the Standard Model, lowenergyphysics, methods in multi-loopcalculations, extensions of the Standard Model, neutrinos, astrophysics and cosmology. W konferencji wzięło udział 62 uczestników (w tym około 42 spoza Uniwersytetu Śląskiego). Szczegółowe informacje można znaleźć na stronie konferencji: indico.if.us.edu.pl/event/5/

Lublin. W dniach 5–27 września odbyły się w Instytucie Fizyki UMCS 60. *Pokazy z Fizyki*. Widzowie mogli się zapoznać z prezentacjami przedstawianymi przez wymienionych poniżej demonstratorów: *Ruch obrotowy* Andrzej Drożdżel, Krzysztof Pyszniaik; *Uff, jak gorąco...*, Bożena Zgardzińska, Zbigniew Surowiec; *Prąd elektryczny* Marek Gorgol, Paweł Wnuk; *Rezonanse* Marcin Turek, Artur Wójtowicz.

Organizatorami Pokazów z Fizyki są: Oddział Lubelski Polskiego Towarzystwa Fizycznego, Instytut Fizyki UMCS oraz Stowarzyszenie Lubelskie Towarzystwo Edukacyjno-Naukowe. Lubelskie Pokazy z Fizyki są najstarszą wciąż trwającą aktywnością tego typu w Polsce; ich inicjatorami byli: prof. Wacław Staszewski i prof. Stanisław Ziemecki. Pierwsze Pokazy odbyły się w lutym 1953 roku w budynku ówczesnego Gimnazjum Staszica, gdzie mieściły się Zakłady Fizyki UMCS. Charakter i forma Pokazów z Fizyki zmieniały się na przestrzeni lat i obecnie prowadzone są w formie czterech półgodzinnych demonstracji doświadczeń fizycznych przy aktywnym uczestnictwie widowni. Przeznaczone są dla uczniów szkół podstawowych i ponadpodstawowych wraz z nauczycielami, a także dla wszystkich zainteresowanych fizyką. Kadra nauczycieli akademickich i specjalistów techniczno-naukowych dokłada starań, by przygotować je każdego roku na bardzo wysokim poziomie. Odbywają się corocznie we wrześniu. Od początku istnienia Pokazów wzięło w nich udział ponad 500 tys. widzów z Lublina, Lubelszczyzny i sąsiednich województw.

Ideą Pokazów jest popularyzacja fizyki i pomoc w jej nauczaniu poprzez prezentację tematycznie dobranych, interesujących, a nieraz wręcz fascynujących eksperymentów. Przedstawiane są zarówno eksperymenty trudne lub wręcz niemożliwe do wykonania w warunkach szkolnych, jak również takie, które za pomocą naj-

prostszych środków można powtórzyć w domu. W atmosferze wspólnej zabawy z fizyką, każdego roku nasze Pokazy ogląda prawie 20 tysięcy widzów. W opinii uczestników Pokazy uznawane są za doskonałe uzupełnienie wiedzy szkolnej z fizyki oraz nauk pokrewnych: chemii, geografii i biologii. Taka forma kontaktu z naukami przyrodniczymi cieszy się niegasnącym zainteresowaniem wśród uczniów i nauczycieli, ale przyciąga również widzów niezwiązanych z edukacją. Klasyczne tematy z zakresu nauk ścisłych są stale rozwijane w celu przybliżenia aktualnych trendów rozwoju techniki oraz wskazania powiązań fizyki z innymi naukami.

9 grudnia 2019 w Instytucie Fizyki UMCS odbyły się obchody Jubileuszu Pokazów z Fizyki. W programie uroczystości, której przewodniczył dr hab. Jerzy Żuk (przewodniczący Oddziału Lubelskiego PTF), wykłady wygłosili: prof. dr hab. Tomasz Goworek, dr Janusz M. Zinkiewicz oraz dr hab. Bożena Zgardzińska. Prelegenci przedstawili zgromadzonym początki Pokazów z Fizyki, ich rozwój, a także obecną formę. W spotkaniu wzięły udział osoby, które na przestrzeni lat brały udział w Pokazach z Fizyki oraz pracownicy i studenci Wydziału Matematyki, Fizyki i Informatyki. Wiele ciepłych słów usłyszeliśmy od prof. Radosława Dobrowolskiego – Prorektora ds. Nauki i Współpracy Międzynarodowej UMCS. Na uroczystości obecna była także prof. Alina Orłowska - Prorektor ds. Kształcenia UMCS. Pamiątkowe dyplomy uznania organizatorom Pokazów z Fizyki przekazał pan Andrzej Figura, z-ca Dyrektora Departamentu Kultury, Edukacji i Dziedzictwa Narodowego w Urzędzie Marszałkowskim Województwa Lubelskiego. Wykładowcy oraz osoby wspierające organizację Pokazów z Fizyki otrzymali jubileuszowe medale oraz dyplomy uznania za popularyzację fizyki, zaangażowanie oraz wkład w promocję i rozwój lubelskich Pokazów z Fizyki.

Kraków. W dniach 13-18 września dr hab. Stanisław Bednarek reprezentował Oddział Łódzki PTF na 45. Zjeździe Fizyków Polskich w Krakowie. Na tym samym Zjeździe, po dziesięcioletniej przerwie, przedstawiciel Łodzi, został Laureatem Nagrody PTF dla Wyróżniających się Nauczycieli Fizyki. Jest nim dr inż. Dariusz Krzyżański, nauczyciel w Liceum Ogólnokształcącym Politechniki Łódzkiej, którego wychowankowie odnoszą sukcesy w konkursach fizycznych zarówno krajowych jak i zagranicznych.

Chorzów. 15 września w Śląskim Międzyuczelnianym Centrum Edukacji i Badań Interdyscyplinarnych odbyła się IV ogólnopolska konferencja studentów i doktorantów *Pomiędzy naukami – zjazd fizyków i chemików* zorganizowana przez Wydziałową Radę Samo-

rządu Doktoranckiego Instytutu Fizyki i Instytutu Chemii Uniwersytetu Śląskiego. Podczas spotkania wykłady inauguracyjne wygłosili: dr hab. Irena Jankowska-Sumara z Instytutu Fizyki Wydziału Matematyczno-Fizyczno-Technicznego Uniwersytetu Pedagogicznego im. KEN w Krakowie oraz dr hab. Piotr Młynarz z Zakładu Chemii Bioorganicznej Wydziału Chemicznego Politechniki Wrocławskiej. Uczestnicy wydarzenia zaprezentowali wyniki swoich badań w postaci komunikatów ustnych i plakatów naukowych. Szczegółowe informacje znajdują się na stronie konferencji: www.pomiedzynaukami.us.edu.pl

PAŹDZIERNIK 2019

Poznań. 16 październikaw sali wykładowej Centrum NanoBioMedycznego UAM oraz w Sali Rady Wydziału Fizyki UAM odbyła się Sesja Naukowa poświęcona Profesor Krystynie Hołdernej-Natkaniec (1946-2019). Otwarcia Sesji dokonał Dziekan Wydziału Fizyki Prof. Maciej Krawczyk, zaś pionierskie badania w dziedzinie spektroskopii wibracyjnej Profesor Krystyny Hołdernej-Natkaniec przedstawił Prof. Stefan Jurga. W Sesji wystąpiło łącznie 10. mówców.

Warszawa. 23 października w Hotelu Marriott odbyła się konferencja *Polska Encyklopedia Nauki – encyklopedyzacja nauki polskiej jako bodziec i miernik rozwoju nauki – etap I* zorganizowana przez Fundację Ubisocietas, ibiuis oraz Stowarzyszenie Scientia. Przewodniczącym Komitetu Naukowego konferencji był prof. Brunon Hołyst, zaś Komitetowi organizacyjnemu przewodniczył Jerzy Strzeżek, Prezes Zarządu Fundacji „Ubisocietas, ibiuis”, inicjator *Polskiej Encyklopedii Nauki*. Strategię i założenia do *Polskiej Encyklopedii Nauki – Fizyka* opracowali: profesorowie Stefan Jurga i Henryk Drozdowski z Wydziału Fizyki UAM. Więcej informacji o materiałach konferencji można znaleźć pod adresem: www.wikipen.pl/konferencja

Poznań. 7 listopada w sali wykładowej Centrum NanoBioMedycznego UAM odbyła się Sesja Naukowa poświęcona pamięci Profesora Zdzisława Pajaka (1924-2019), jednego z pionierów radiospektroskopii fazy skondensowanej. Sesji przewodniczył prof. Stefan Jurga – dyrektor CNBM.

Poznań. W dniach 14–18 listopada Wydział Fizyki UAM zorganizował *QuTecNOMM'19 – The Fifth Poznań Symposium on Quantum Technologies, Nonlinear Optics, Magnonics, and Metamaterials*.

Poznań. 18 listopada w Auli Lubrańskiego, Collegium Minus UAM odbyła się uroczystość odnowienia prof.

Leonowi Kowalewskiemu z Wydziału Fizyki UAM stopnia doktora nauk fizycznych w 59 rocznicę jego nadania. Profesor L. Kowalewski jest współtwórcą fizyki magnetyzmu w Polsce. Uroczystości przewodniczył Rektor UAM prof. Andrzej Lesicki. Inicjatywę i przeprowadzenie procedury zawdzięczamy b. Dziekanowi Wydziału Fizyki UAM prof. Antoniemu Wójcikowi. Laudację wygłosił obecny Dziekan Wydziału Fizyki UAM prof. Maciej Krawczyk, zaś profesorowie: Roman Micnas i Michał Kurzyński byli *spiritus movens* całej uroczystości. Dwa dni później na Wydziale Fizyki UAM odbyła się Sesja Naukowa związana z uroczystością odnowienia prof. Leonowi Kowalewskiemu stopnia doktora nauk fizycznych. Sesję prowadził prof. Roman Micnas. Część pierwsza Sesji obejmowała tematykę badań naukowych uczniów Profesora, natomiast część druga była zatytułowana: *Od fal spinowych do nadprzewodnictwa*. Więcej informacji o Sesji można znaleźć na stronie głównej Wydziału Fizyki UAM.

Warszawa. 21 listopada w Zespole Szkół Samochodowych i Licealnych nr 3 im. Ignacego Jana Paderewskiego odbył się finał V. *Warszawskiego Konkursu Fizycznego*, organizowanego pod patronatem Oddziału Warszawskiego Polskiego Towarzystwa Fizycznego. Komisja konkursowa w składzie: mgr Bożena Janisiewicz, mgr Mirosław Galikowski i dr hab. Katarzyna Grabowska, wyłoniła laureatów konkursu:

I Barbara Rey, Szkoła Podstawowa nr 303 im. Fryderyka Chopina; nauczyciel: Marcin Bińkowski
 II Stanisław Rylski, Szkoła Podstawowa nr 303 im. Fryderyka Chopina; nauczyciel: Marcin Bińkowski
 III Pola Tyszkiewicz, Szkoła Podstawowa nr 16 im. Tony Halika; nauczycielka: Wioletta Karczewska (*ex aequo*)
 III Piotr Malinowski, Szkoła Podstawowa nr 355 im. Jana Wedla; nauczycielka: Ewa Kulczycka (*ex aequo*)

GRUDZIEŃ 2019

Wrocław. 13 grudnia odbyło się sprawozdawczo-wyborcze zebranie Oddziału Wrocławskiego PTF (OWr PTF). W imieniu ustępującego Zarządu Oddziału jego przewodnicząca Ewa Dębowska przedstawiła sprawozdanie z działalności. W latach 2018–2019 Oddział Wrocławski liczył 61 członków. W ciągu ostatnich dwóch lat jego stan liczebny powiększył się o 8 nowych członków. Oddział tworzą fizycy pracujący w trzech głównych ośrodkach naukowych: Uniwersytet Wrocławski, Politechnika Wrocławska, Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN, które organizują liczne własne seminaria. W przeszłości ustalono, że OWr PTF nie organizuje własnych spotkań naukowych, lecz wybiera szczególnie interesujące seminaria i czyni je po-

siedzeniami naukowymi Oddziału Wr PTF dla całego środowiska, w tym fizyków zatrudnionych w Międzynarodowym Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych, na Uniwersytecie Medycznym i Uniwersytecie Przyrodniczym. W minionej kadencji odbyło się 15 takich spotkań. Poza tym działalność Oddziału skupiła się na popularyzacji fizyki wśród nauczycieli i młodzieży szkolnej. We współpracy z Zakładem Nauczania Fizyki IFD UWr, w ramach Seminarium Środowiskowego *Problemy dydaktyki fizyki* zorganizowano 6 wykładów dla dolnośląskich nauczycieli fizyki, dotyczących problematyki nauczania fizyki, w tym najnowszych trendów; 14 wykładów popularnonaukowych dla młodzieży szkół ponadgimnazjalnych we współpracy z Instytutami Fizyki Uniwersytetu Wrocławskiego, a także wspólnie z Instytutem Fizyki Politechniki Wrocławskiej zorganizowano 3 wykłady popularnonaukowe dla uczniów, nauczycieli oraz innych zainteresowanych.

Przy OWr PTF działa Komitet Okręgowy Olimpiady Fizycznej, którego Sekretarzem, we wrześniu 2018, został członek Zarządu Oddziału Wrocławskiego PTF dr Jacek Brona. Komitet zorganizował zawody 67. i 68. Olimpiady Fizycznej dla uczniów szkół z województwa dolnośląskiego. Wrocławscy uczniowie znaleźli się wśród laureatów 67. Olimpiady Fizycznej: Łukasz Majsiak z III LO we Wrocławiu, Jan Sobków z Akademickiego LO Politechniki Wrocławskiej oraz Adrian Czuchaj z XIV LO im. Polonii Belgijskiej we Wrocławiu, natomiast Piotr Masajada z XIV LO we Wrocławiu został jednym z laureatów 68. Olimpiady Fizycznej.

W latach 2018–2019 OWr PTF objął patronatem lub finansował następujące imprezy:

Ogólnopolski Półfinał Turnieju Młodych Fizyków 2018

Szkolne Warsztaty Fizyczne

Otwarty Międzyszkolny Konkurs Fizyczny im. Bożeny Koronkiewicz

Ogólnopolska Studencka Fizyczno-Optyczna Konferencja (Foka)

Zarząd Główny PTF przyznał pięciu osobom nagrody finansowe za szczególne zaangażowanie w organizację 44. ZFP (Wrocław 2017), finansowane z nadwyżki finansowej Zjazdu oraz wyróżnił dyplomem Janusza Miśkiewicza, skarbnika OWr za bardzo sprawne i terminowe dokonywanie wszelkich operacji finansowych związanych z organizacją Zjazdu.

Wrocławscy fizycy wzięli czynny udział w 45. Zjeździe Fizyków Polskich (Kraków 2019) wygłaszając wykłady, a także prowadząc warsztaty podczas towarzyszącej Zjazdowi Konferencji dydaktycznej. Na Walnym Zebraniu PTF, które odbyło się podczas Zjazdu, Oddział Wrocławski reprezentowało ośmioro delegatów. Członkowie Oddziału uczestniczyli w pracach PTF na szczeblu krajowym. Bernard Jancewicz jest przewodniczącym Komisji Nazewnictwa Fizycznego, a Dariusz Grech od kilku kadencji członkiem Zarządu Głównego PTF.

W czasie trwania kadencji ustępującego Zarządu OWr wydał trzykrotnie gazetkę *Co się wydarzyło*, zawierającą informacje o bieżącej działalności Oddziału, które można znaleźć również na stronie internetowej www.ptf.pwr.wroc.pl na której na bieżąco ukazują się ogłoszenia o seminariach fizycznych odbywających się we wrocławskich ośrodkach naukowych.

Walne Zebranie OWr PTF udzieliło absolutorium ustępującemu Zarządowi i wybrało nowy Zarząd Oddziału Wrocławskiego PTF w składzie: przewodnicząca: Ewa Dębowska (UWr), wiceprzewodniczący: Tomasz Greczyło (UWr), sekretarz: Wojciech Rudno-Rudziński (PWr), skarbnik: Janusz Miśkiewicz (UWr), członkowie: Jacek Brona (UWr), Bernard Jancewicz (UWr), Adam Pikul (INTiBS), Krzysztof Rogacki (INTiBS), Piotr Sitarek (PWr).

SEMESTR ZIMOWY ROKU SZKOLNEGO 2019/2020

Warszawa. Pracownia Fizyczna dla uczniów. Pierwszą część projektu stanowiły zajęcia w pracowni fizycznej dla grup szkolnych; zgłosiło się 38 grup. W realizacji zadania wzięli udział uczniowie z różnych klas z następujących szkół warszawskich: SP z Oddziałami Integracyjnymi nr 2, SP nr 52, SP nr 225, SP nr 312, Katolicka SP im. ks. P. Skargi, Społeczna SP nr 14 STO, Społeczna SP nr 26, SP Heliantus, Prywatna SP nr 62, Szkoła Otwarta, VII LO im. J. Słowackiego, XIII LO im. płk L. Lisa-Kuli, XVIII LO im. J. Zamoyskiego, XXI LO im. H. Kołłątaja, XLIV LO im. S. Banacha, XLIX LO im. J. W. Goethego, LXVII LO im. J. Nowaka-Jeziorańskiego, CXXXVII LO z Oddziałami Dwujęzycznymi im. Roberta Schumana, CLVII LO im. M. Skłodowskiej-Curie, Zespół Szkół im. Bohaterów Narwiku. W trakcie zajęć nauczyciele wybrali ćwiczenia z różnych działów fizyki.

Drugą częścią były zajęcia w pracowni fizycznej dla uczniów indywidualnych szczególnie zainteresowanych pogłębianiem wiedzy w dziedzinie nauk przyrodniczych. Podczas zajęć uczniowie wykonywali specjalnie dla nich dobrane doświadczenia pod opieką pracownika naukowego Wydziału Fizyki UW. Ćwiczenia przygotowano i zorganizowano w taki sposób, aby rozwijać w uczniach samodzielne myślenie i umiejętność samodzielnego rozwiązywania różnych zagadnień, co

ma pomóc kształtować postawę młodego wynalazcy i żeby każdy uczeń zapoznał się z ćwiczeniami z różnych działów fizyki. W zajęciach regularnie uczestniczyło 18 uczniów z następujących szkół warszawskich: SP nr 211, Szkoły Benedykta, SP Fundacji Varsovia, Wyspa JP2, ASW Bielawa, Akademia Dobrej Edukacji, II LO im. Stefana Batorego, V LO im. Księcia J. Poniatowskiego, IX LO im. K. Hoffmanowej, XI LO im. M. Reja, XII LO im. H. Sienkiewicza, XIV LO im. S. Staszica, XIX LO im. Powstańców Warszawy, LXV LO z Oddziałami Integracyjnymi im. gen. J. Bema, CLVIII O im. M. Skłodowskiej-Curie, Zespół Szkół nr 36 im. Kasprzaka, Technikum Mechatroniczne nr 1.

Warszawa. Wykłady otwarte z fizyki. Program obejmował trzy obszary:

W wybrane soboty semestru zimowego 2019/2020, w dużej sali wykładowej Wydziału Fizyki UW przeprowadzono 12 wykładów z fizyki doświadczalnej, bogato ilustrowanych pokazami, dla uczniów klas siódmych i ósmych szkół podstawowych oraz szkół licealnych. Uczniowie zobaczyli interesujące doświadczenia niemożliwe lub trudne do przeprowadzenia w pracowni szkolnej. W wykładach wzięło udział ponad 2300 uczniów, z czego prawie 1500 w wykładach przeznaczonych dla szkół podstawowych i ponad 800 uczniów w wykładach przeznaczonych dla licealistów.

Podczas środowych zajęć dla uczniów szczególnie zainteresowanych fizyką oraz ich nauczycieli prezentowano proste i efektywne sposoby przedstawiania zjawisk fizycznych. Zgodnie z planem, w dużej sali wykładowej Wydziału Fizyki UW odbyło się 6 wykładów (3 wykłady dla szkół podstawowych 3 dla licealistów). W wykładach wzięło udział ponad 1200 uczniów.

Trzecią część projektu stanowiło 5 wykładów przeprowadzonych poza terenem Wydziału Fizyki UW dla uczniów warszawskich szkół podstawowych i licealnych. Wykładowcy podsumowali omawiane na lekcjach fizyki tematy, a także zapoznali uczniów z nowinkami z zakresu nowoczesnych technologii, współczesnych problemów i osiągnięć fizyki. W wykładach wzięło udział ponad 250 uczniów z dwóch szkół warszawskich: SP nr 172, SP nr 234 oraz IV Liceum Ogólnokształcącego im. Adama Mickiewicza.

NOWI PROFESOROWIE NAUK FIZYCZNYCH

z rąk Prezydenta RP nominacje profesorskie otrzymali:

2019

Ryszard BUCZYŃSKI Uniwersytet Warszawski (13.02.2019)
Marian CHOLEWA Uniwersytet Rzeszowski (17.05.2019)
Tomasz CZYSZANOWSKI Politechnika Łódzka (27.06.2019)
Zbigniew FICEK King Abdulaziz City for Science and Technology, Rijad Arabia Saudyjska (17.05.2019)
Izabella GRZEGORY Instytut Wysokich Ciśnień Polskiej Akademii Nauk w Warszawie (27.06.2019)
Tomasz KLIMCZUK Politechnika Gdańska (02.04.2019)
Krzysztof KUREK Narodowe Centrum Badań Jądrowych w Otwocku (02.04.2019)
Jolanta PRYWER Politechnika Łódzka (06.11.2019)
Janusz ROSIEK Uniwersytet Warszawski (06.11.2019)
Piotr SZYMCZAK Uniwersytet Warszawski (02.04.2019)
Ireneusz WEYMANN Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu (27.05.2019)

2018

Paweł BILSKI Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk w Krakowie (21.06.2018)
Roman CIURYŁO Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu (21.06.2018)
Andrzej GRUDKA Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu (25.04.2018)
Krzysztof KEMPA Boston College, USA (06.02.2018)
Franciszek KROK Uniwersytet Jagielloński w Krakowie (14.03.2018)
Danuta KRUK Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie (06.02.2018)
Robert KUDRAWIEC Politechnika Wrocławska (14.11.2018)
Jan NOWIŃSKI Politechnika Warszawska (07.03.2018)
Anna PERELOMOVA Politechnika Gdańska (07.03.2018)
Katarzyna PERNAL Politechnika Łódzka (06.02.2018)
Boudewijn ROUKEMA Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu (21.06.2018)
Marek RUBEL Królewski Instytut Technologiczny, Szwecja (25.04.2018)
Grzegorz SĘK Politechnika Wrocławska (18.10.2018)
Maciej SYPEK Politechnika Warszawska (06.02.2018)
Bogusław TOMANEK Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk w Krakowie (03.10.2018)
Andrzej WAWRO Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie (14.03.2018)

KONKURS

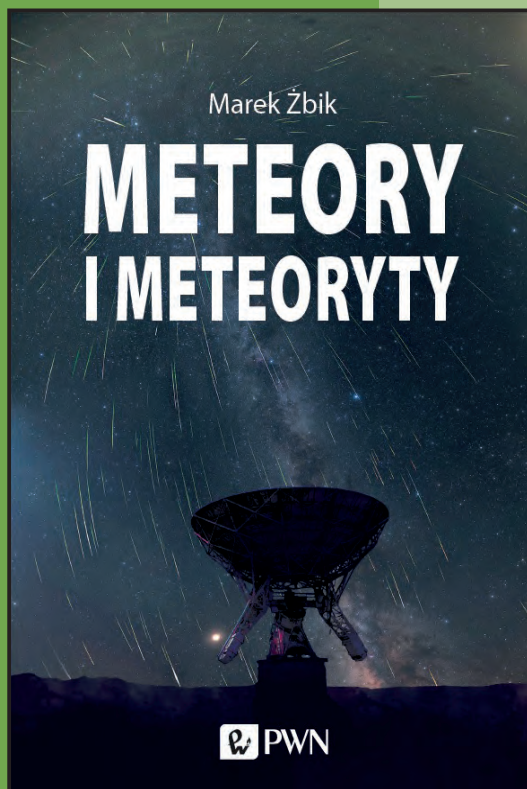
Polskie Towarzystwo Fizyczne ogłasza

Konkurs na najlepszy artykuł upowszechniający wiedzę fizyczną

autorstwa młodego fizyka* zgłoszony do publikacji w czasopiśmie POSTĘPY FIZYKI PF:

- Termin nadsyłania artykułów na Konkurs upływa **21.04.2020**.
- Zgłoszenia należy nadsyłać na adres: postepy.fizyki@gmail.com
- W temacie e-maila przesyłającego zgłaszany artykuł należy napisać: **KONKURS**.
- Jury Konkursu dokona oceny zgłoszonych artykułów.
- Jury Konkursu przyzna nagrody finansowe autorom trzech najlepszych artykułów.
- Nagrodzone artykuły zostaną opublikowane PF.
- Nagrody zostaną ufundowane przez Fundację Pro Physica.
- Nienagrodzone artykuły nadesłane na Konkurs zostaną opublikowane w PF po pozytywnie zakończonym procesie recenzyjnym.
- Regulamin Konkursu dostępny jest na stronie internetowej PTF [www.ptf.net.pl/pl/aktualnosci/informacje-biezace/konkurs-na-najlepszy-artykul-upowszechniajacy-wiedze-fizyczna/]

*Zgodnie z duchem ustawy z dnia 20 lipca 2018 *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*, na użytek niniejszego Konkursu przyjmujemy, że *zemłodym fizykiem* jest osoba prowadząca działalność naukową i/lub dydaktyczną, która jest nauczycielem, doktorantem lub nauczycielem akademickim albo nieposiadającym stopnia doktora, albo posiada stopień doktora, od uzyskania którego nie upłynęło 7 lat.



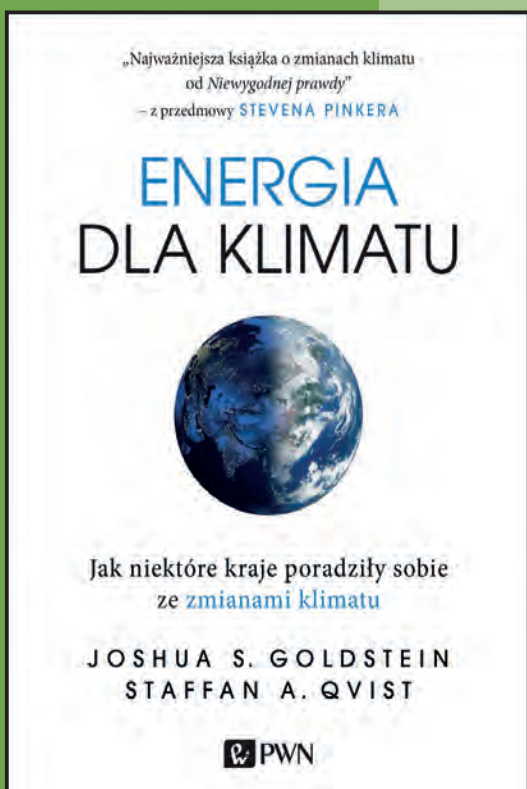
Meteory to zjawiska świetlne na nocnym nieboskłonie znane ludziom od zarania dziejów, **meteoryty** zaś to dziwaczne kamienie lub bryły żelazne, które spadły z nieba i w wielu kulturach są do dziś traktowane jako obiekty sakralne, czasem magiczne.

Meteoryty stanowią jedyne naturalne źródło informacji o składzie drobnych ciał kosmicznych będących najbardziej pierwotną materią, z której uformowane zostały planety skaliste. Bez wyników badań meteorytów nie byłibyśmy w stanie zrozumieć początkowych etapów ewolucji Układu Słonecznego, jak też mechanizmów formowania się planet. Autor szczegółowo przedstawił klasyfikację, budowę i genezę meteorytów. Zawarł w niej wyniki badań przeprowadzonych zgodnie z nowoczesnymi metodami geochemii elektronicznej.

Publikacja jest doskonałym przewodnikiem dla fanów kosmosu oraz poszukiwaczy, kolekcjonerów, miłośników i badaczy meteorytów. Ponadto stanowi przydatny materiał dla studentów tych wydziałów szkół wyższych, gdzie wykładana jest wiedza o badaniach, eksploracji oraz eksploatacji przestrzeni kosmicznej i jej zasobów.

Książka przejrzysto ukazuje sposób powstawania meteoroidów: pierwotnych, planetoidalnych, kometarnych i utworzonych w wyniku uderzeń w planety, księżycy i planetoidy. Zawiera bardzo szczegółowy opis wszystkich typów meteorytów oraz procesy ich powstawania. Przedstawione informacje są oparte na wynikach najnowszych badań, a wnioski dobrze uzasadnione.

z recenzji prof. dr hab. Stanisława Schillaka
Centrum Badań Kosmicznych PAN
Obserwatorium Astrogeodynamiczne w Borówcu



PWN poleca

Klimat Ziemi zmienia się gwałtownie – zmierza w niebezpiecznym kierunku, ale na szczęście rozwiązanie leży w zasięgu ręki. Kilka krajów z powodzeniem zastąpiło paliwa kopalne niskoemisyjnymi źródłami energii dzięki odnawialnym źródłom energii i szybkiemu rozwojowi energetyki jądrowej. Idąc za ich przykładem świat może radykalnie ograniczyć zużycie paliw kopalnych do połowy obecnego stulecia, pomimo ciągle rosnącego zapotrzebowania na energię. Autorzy wyjaśniają, w jaki sposób energia pochodząca z niskoemisyjnych źródeł błyskawicznie zastąpiła paliwa kopalne w Szwecji, Francji i kanadyjskiej prowincji Ontario, a jednocześnie umożliwiła rozkwit ekonomiczny i ochronę środowiska naturalnego.

Książka napisana z zaangażowaniem, poparta badaniami naukowymi, zachęca do spojrzenia na kwestie energetyki i zmian klimatycznych w nowy sposób. Stawką jest nasza planeta, a czasu na działanie – coraz mniej. Ta przekonująca publikacja może zainicjować zmiany w polityce energetycznej tak potrzebne Polsce i dzisiejszemu światu.

Fizyka

dla szkół wyższych

„Fizyka dla szkół wyższych” to polska adaptacja nowoczesnego podręcznika „University Physics”, opracowanego przez OpenStax, fundację non profit działającą przy Uniwersytecie Rice w Houston w Stanach Zjednoczonych.

Trzytomowy podręcznik, zawierający kompletny kurs fizyki ogólnej, można bezpłatnie pobrać jako plik PDF lub korzystać z niego online na stronie www.openstax.pl.

Podręcznik jest dostępny od roku akademickiego 2018/19 i został wpisany do sylabusów 47 uczelni w Polsce. Zaletą publikacji jest jej praktyczny wymiar - nauczyciele akademicki znajdują w niej ponad 4 tys. zadań i przykładów. Jednoczesny dostęp do polsko- i anglojęzycznej wersji podręcznika pozwala na umiędzynarodowienie procesu kształcenia.

Wykładowców, którzy polecają studentom podręcznik „Fizyka dla szkół wyższych” zachęcamy do poinformowania o tym wydawcy poprzez formularz dostępny na stronie www.openstax.pl.

3 000 stron

3 tomy

4 000 zadań

Partnerzy polskiej adaptacji podręcznika:



Dostępny bezpłatnie
www.openstax.pl