

POSTĘPY FIZYKI



CZASOPISMO NAUKOWE POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO
POŚWIĘCONE UPOWSZECHNIANIU WIEDZY FIZYCZNEJ

Czy fizyka jest nauką o materii?

Michał Heller

Fotony – Cząstki Światła

Iwo Białynicki-Birula, Zofia Białynicka-Birula

Mity o energetyce jądrowej

Adam Rajewski

Wykład noblowski z 2014 roku

o historii stworzenia diod LED emitujących niebieskie światło

Hiroshi Amano

4 / 2019
TOM 70





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
Mirostław Łoś
Maiej Maśka
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)
Artur Durajski (Częstochowa)
Jarosław Rybicki (Gdańsk)
Adam Michczyński (Gliwice)
Janusz Gluza (Katowice)
Małgorzata Wysocka-Kunisz (Kielce)
Józef Spałek (Kraków) Jerzy Żuk (Lublin)
Wibig (Łódź)
Ewa Pawelec (Opole)
Henryk Drozdowski (Poznań)
Gaweł Żyła (Rzeszów)
Mirostław Brozis (Słupsk)
Mariusz P. Dąbrowski (Szczecin)
Franciszek Rozpłoch (Toruń)
Andrzej Wysmołek (Warszawa)
Ewa Dębowska (Wrocław)
Van Cao Long (Zielona Góra)

POSTĘPY FIZYKI (PF)

CZASOPISMO NAUKOWE POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO
POŚWIĘCONE UPOWSZECHNIANIU WIEDZY FIZYCZNEJ

czasopismo ukazuje się od 1949 roku
www.ptf.net.pl

RADA REDAKCYJNA

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

KORRESPONDENCI ODDZIAŁÓW PTF

Krystyna Perzyńska (Białystok)
Beata A. Pietrewicz (Bydgoszcz)
Piotr Gębara (Częstochowa)
Tomasz Wąsowicz (Gdańsk)
Lucyna Grządził (Gliwice)
Zenon Kukuła (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
Wawrzyniec Kaszub

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

Czekamy na przystępnie napisane artykuły przeglądowe i monograficzne. Układ pracy powinien odpowiadać formie przyjętej w czasopiśmie (patrz ostatnio wydane numery PF). Teksty złożone w systemie LATEX (plik źródłowy + pdf) lub w programie Word wraz z ilustracjami o rozdzielczości co najmniej 300 dpi w osobnych plikach prosimy nadsyłać e-mailem na adres: postepy.fizyki@gmail.com

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 www.ptf.net.pl na podstawie licencji Creative Commons.

PRENUMERATA

dla osób/instytucji niebędących członkami Polskiego Towarzystwa Fizycznego prenumeratę oferuje Garmond Press (www.garmondpress.pl).

Prenumeratory, którzy nie chcą korzystać z usługi pośrednika, proszeni są o wpłacenie odpowiedniej kwoty na główne konto bankowe PTF nr 74 1030 0019 0109 8530 0046 3033, a następnie przesłanie e-mailowo potwierdzenia wpłaty na adres postepy.fizyki@gmail.com podając, którego rocznika PF lub których numerów PF wpłata dotyczy oraz adres, na który czasopismo ma być przesyłane.

Pojedynczy numer PF kosztuje 12 zł, rocznik 48 zł. **Koszty wysyłki pokrywa zamawiający:** do 2 egz. – 7.00 zł, 3 do 5 egz. – 10 zł, przy zamówieniu powyżej 5 egz. prosimy o przystanie zamówienia na wyżej wskazany adres e-mail, a w odpowiedzi potwierdzimy przyjęcie zamówienia i podamy koszty wysyłki.

© Copyright by Polskie Towarzystwo Fizyczne
Wydawca: Polskie Towarzystwo Fizyczne
Skład i łamanie: Fixpoint Krzysztof Rudnik
Nakład: 850 egzemplarzy; ISSN 0032-5430

Szanowni Czytelnicy,

to ostatni numer *Postępów Fizyki* (PF) jubileuszowego tomu 70 (2019), wszak 70 lat temu ukazał się pierwszy numer naszego czasopisma. W związku z tym przypominamy istotne artykuły i wywiady z historycznych zeszytów PF: Aleksander Jabłoński *Fotoluminescencja kryształów* (PF 1/2019), a teraz *Rozmowa ze Szczepanem Szczeniowskim*, Henryk Niewodniczański *Rozszczepianie ciężkich jąder atomowych wywołane fotonami* (artykuł opublikowany w pierwszym numerze PF w 1949 roku). Zapraszamy do lektury.

Profesorowie Iwo Białynicki Birula i Zofia Białynicka Birula przedstawiają w artykule *Fotony – Cząstki Światła* swoją wersję kwantowej teorii bezmasowego fotonu na wzór mechaniki kwantowej cząstek elementarnych obdarzonych masą spoczynkową.

W cyklu związanym z 45. ZFP w obecnym numerze przedstawiamy artykuł prof. Michała Hellera pod intrygującym tytułem *Czy fizyka jest nauką o materii?*

Energetyka jądrowa stała się ostatnio w Polsce tematem ożywionej debaty publicznej zarówno w mediach tradycyjnych, jak i społecznościowych. Wiąże się to z zmianami klimatycznymi, prezentacją planów dotyczących budowy elektrowni jądrowych w naszym kraju, a także emisji popularnego serialu telewizyjnego dotyczącego katastrofy czarnobylskiej. Publikujemy w PF artykuły dotyczące tych zagadnień: Piotr Kociński *O tworzeniu energetyki jądrowej w Polsce* (PF 3/2019), Adam Rajewski *Mity o energetyce jądrowej*.

Dzięki finansowemu wsparciu Fundacji Pro Physica kontynuujemy publikację tłumaczeń wykładów noblowskich w dziedzinie fizyki. Tym razem jest tekst laureata z 2014 roku Hiroshi Amano o historii stworzenia diod LED emitujących niebieskie światło, bez których nie byłoby nowoczesnych technologii.

Pragniemy przypomnieć Państwu, że w kwietniu 2020 roku w Warszawie odbędzie się **nadzwyczajny, jubileuszowy Zjazd Fizyków Polskich** z okazji setnej rocznicy powstania Polskiego Towarzystwa Fizycznego; zapraszamy do śledzenia wciąż uaktualnianej i rozbudowywanej strony tego wydarzenia 100lat.ptf.net.pl/

Czytelników i sympatyków naszego czasopisma zachęcamy do korzystania 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/

Czy fizyka jest nauką o materii?

M. Heller 2

Fotony – Cząstki Światła

I. Białynicki-Birula, Z. Białynicka-Birula 6

Mity o energetyce jądrowej

A. Rajewski 12

Hodowanie kryształu azotku galu (GaN) na szafirze dzięki odłożonej w niskiej temperaturze warstwie buforowej i stworzenie GaN typu *p* poprzez domieszkowanie i następnie napromieniowywanie wiązką niskoenergetycznych elektronów

H. Amano 20

Rozmowa ze Szczepanem Szczeniowskim 27

Rozszczepianie ciężkich jąder atomowych wywołane fotonami

H. Niewodniczański 35

50 lat Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego

L. Markowski 40

Badania w NCPS SOLARIS przybliżają elektronikę przyszłości

opracowała E. Król 44



Obraz Ziemi nocą
(udostępnione przez NASA)

45. ZJAZD FIZYKÓW POLSKICH

Czy fizyka jest nauką o materii?*

Michał Heller

Uniwersytet Jagielloński
Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych

Streszczenie. Często mówi się, że fizyka jest nauką o materii. Ale jeżeli zgodzić się, że terminy fizyczne to takie terminy, które odnoszą się do czegoś, co da się zmierzyć, to termin „materia” nie jest terminem fizycznym (nie ma jednostek materii). Chociaż prawdą jest, że fizycy często posługują się terminem „materia”, podobnie jak wielu innymi terminami zaczerpniętymi z języka potocznego. Jednakże pojęcie materii ma także genezę filozoficzną, obrosło ono wieloma odniesieniami do filozofii. Prześledzenie tej genezy i tych odniesień jest wielce pouczające. Termin fizyczny najbliższy terminowi „materia” to „masa” (istnieją jednostki masy). Termin ten ma wspólny z pojęciem materii rodowód filozoficzny. Ważniejsze jednak od językowych subtelności jest pytanie: o czym właściwie – jeżeli nie o materii – mówi fizyka? „Byłoby *cudem*, niemal na skalę kosmiczną, gdyby teorie dokonywały tak wiele i tak dokładnych empirycznych predykcji jak, powiedzmy, ogólna teoria względności lub fotonowa teoria światła i gdyby to, co one mówią na temat fundamentalnej struktury świata, było nieprawdziwe lub ‘istotnie’ czy ‘zasadniczo’ nieprawdziwe” (John Worrall). W jakim sensie „prawdziwe” lub „nieprawdziwe”? Odpowiedź na to pytanie wyłania się z dokładnej analizy teorii fizycznych.

1. Terminy fizyczne

Czy fizyka jest nauką o materii? Chyba nie ma co do tego wątpliwości. Wszyscy tak mówimy. A jednak...

W 1927 roku ukazała się książka Percy Williamsa Bridgmana, laureata nagrody Nobla z fizyki, pt. *The Logic of Modern Physics*². Zapoczątkowała ona nowy kierunek w filozofii fizyki, zwany operacjonizmem. Kierunek był nowy, ale kodyfikował poglądy od dawna funkcjonujące w fizyce. Zdaniem Bridgmana, terminy używane w fizyce mają znaczenie fizyczne, czyli są terminami fizycznymi, tylko wtedy, gdy można je zdefiniować z pomocą definicji operacyjnych, to znaczy takich, które podają sposób pomiaru wielkości, odpowiadających tym terminom. Bezpośrednią inspiracją dla Bridgmana były szczególnie teoria względności i mechanika kwantowa, których sukcesy wyraźnie zależą od ścisłego powiązania pojęć z pomiarami. Widać to bardzo wyraźnie w metodzie, jaką kierował się Einstein, tworząc szczególną teorię względności: każde używane pojęcie (np. równoczesności) wiązał z bezpośrednimi wskazaniami przyrządów pomiarowych (np. zegarów).

A więc „materia” nie jest terminem fizycznym, ponieważ materii nie da się zmierzyć (nie ma jednostek materii). Można zmierzyć masę lub energię (w odczuciu językowym są to terminy bliskoznaczne z terminem „materia”), ale materii nie. Oczywiście, fizyk może mówić

o materii. W swoim uniwersyteckim wykładzie używa on bardzo wielu słów zaczerpniętych z języka potocznego, które nie są terminami fizycznymi, a słowo „materia” jest niewątpliwie poprawnym słowem języka potocznego. Co więcej, jest to termin obciążony wieloma znaczeniami filozoficznymi, a – jak wiadomo – fizyka i filozofia mają sobie wiele do powiedzenia. Spróbujmy ten problem podrażnić.

2. Ewolucja pojęcia

Zacznijmy od etymologii. W rodowodach słów kryje się często wiele mądrości. W filozofii jest prawie regułą, że terminy uważane dziś za wysoce „techniczne”, były kiedyś w potocznym użyciu i znaczyły coś zupełnie innego niż obecnie – coś, co musiało przebyć długą drogę przeobrażeń, by się wcielić w dzisiejsze filozoficzne pojęcie. W języku starogreckim słowo *hylé*, co tłumaczymy „materia”, znaczyło pierwotnie drewno, las, w sensie czegoś ożywionego. Prawdopodobnie ten słowny rodowód sprawił, że gdy potem filozofowie greccy przyswoili to słowo filozofii, nie sformułowali niczego w rodzaju „zasady zachowania materii”. Już w filozofii Arystotelesa termin „materia” nabrał technicznego zabarwienia. To właśnie „materia pierwsza”, według tego myśliciela, jako potencjalny składnik wszystkich bytów, umożliwia zmienność. W zmienności (ruch jest jej szczególnym przypadkiem) musi bowiem istnieć niezmiennie podłoże – materia pierwsza właśnie – mogące przyjmować różne formy.

* Wykład wygłoszony na 45. Zjeździe Fizyków Polskich w Krakowie, w dniu 15 września 2019 roku.

2. Macmillan, New York.

Od początku, choć pierwotnie raczej nieśmiało, z materią wiązano pojęcie ilości. Na pytanie „ile czegoś?” można było odpowiadać albo odwołując się do objętości (np. garniec mąki), albo do ciężaru (funt mięsa). Znowu przeniknęło to do filozofii. Późniejsi arystotelicy za miarę ilości materii przyjmowali przestrzenną rozciągłość, nie bez wpływu definicji ciała, podanej przez Euklidesa w jego *Elementach*: „ciałem jest to, co ma długość, szerokość i głębokość”. Stoicy polemizowali z tym stanowiskiem, twierdząc, że pojęcia ciała nie da się zredukować do geometrii. Ciała bowiem, oprócz rozciągłości, mają także ciężar i zdolność stawiania oporu.

Następny ważny krok³ w ewolucji pojęcia materii dokonał się w średniowieczu. Uczeń Tomasza z Akwinu, Egidiusz Rzymski, w trakcie teologicznych sporów dotyczących Eucharystii (!), wyróżnił dwie ilości, jakie ciało posiada: objętość i „ilość materii”. Jego zdaniem, o istnieniu tej ostatniej świadczy zjawisko zgęszczania i rozrzedzania, kiedy to objętość ulega zmianie, a „ilość materii” pozostaje ta sama (dalekie echo późniejszej zasady zachowania!).

Pojęcie ilości materii wkrótce przyjęło się w ówczesnej filozofii przyrody, głównie w związku z problemem ruchu. Arystoteles utrzymywał, że ciało może poruszać się tylko tak długo, jak długo jest poruszane przez inne ciało. Wyłom w tej doktrynie zrobił czternastowieczny filozof, Jan Burydan swoją teorią impetu (pędu). Gdy ciało zostaje popchnięte, otrzymuje pewną porcję impetu i porusza się tak długo (już bez interwencji ciała popychającego), jak długo impet się nie wyczerpie. A impet, według Burydana, jest proporcjonalny do ilości materii. Jak widzimy, intuicja była dobra (pęd jest istotnie proporcjonalny do masy), ale brak było jeszcze dobrze określonych, operacyjnych pojęć.

Twórcy nowej nauki, Galileusz i Kepler, byli już bardzo blisko współczesnego pojęcia masy. Galileusz w *Dialogu o dwu najważniejszych układach świata*⁴ w usta Salviatiego, który reprezentował jego własne poglądy, włożył następujące słowa: „Ciało ruchome, poza naturalną skłonnością do odwrotnego kierunku, ma jeszcze przyrodzoną mu właściwość, wywołującą opór przeciwko ruchowi”. Widzimy, jak trudno wyzwolić się z Arystotelesowskiej idei „naturalnych skłonności”! Kepler, uważnie analizując ruch ciał niebieskich, doszedł do wniosku,

że „materia musi posiadać bezwładność, wyjaśniającą różnice w ich ruchach”⁵. Uważał też, że „jeżeli umieścić dwa kamienie w pobliżu siebie, poza sferą wpływu jakiegoś trzeciego ciała, to te dwa kamienie – na podobieństwo magnesów – spotkają się ze sobą, zbliżając się do siebie na odległość proporcjonalną do ich masy”. W łacińskim oryginale „masa” jest oddana przez *moles*, a więc raczej ciężar niż masa. Gdyby nie to, byłibyśmy już blisko Newtonowskiego pojęcia masy i prawa ciężenia.

Kartezjusz, który w geometrii był prekursorem, zapoczątkował wielki projekt geometryzacji fizyki, ale program ten okazał się przedwczesny. Głosząc, że fizykę należy uprawiać *more geometrico* (na sposób geometrii), Kartezjusz doszedł do wniosku, iż pojęcie masy jest zbędne, gdyż pojęcie ciała da się sprowadzić do jego przestrzennej rozciągłości.

Dopiero u Newtona pojawia się genialna idea: nie należy definiować słów, lecz określać miary, czyli coś, co da się zmierzyć i wyrazić w liczbach. Oto jego słynne definicje z początkowego *Scholium* w *Principiach*: „Ilość materii czyli masa (*quantitas materiae seu massa*) jest to przysługująca jej miara, proporcjonalna do jej gęstości i objętości” (gęstość i objętość dają się mierzyć). „Ilość ruchu (*quantitas motus*, dziś pęd) jest to przysługująca ruchowi miara proporcjonalna do prędkości i masy”⁶. I tak już w fizyce zostało: jeżeli coś nie da się zmierzyć, nie należy do fizyki.

W dziele Newtona można wyróżnić dwie, przeplatające się ze sobą, warstwy. Z warstwy matematyczno-fizycznej pojęcie materii zostało *de facto* wyeliminowane i zastąpione pojęciem masy. W warstwie filozoficznej – a jest ona bogata w dziele Newtona – pojęcie materii nie tylko pozostało, ale odgrywa tam ważną rolę. Newton uważał, że materia jest podłożem własności pierwotnych, czyli takich, które przysługują wszystkim ciałom (rozciągłość, nieprzenikliwość, podleganie ruchowi...).

Następstwa dzieła Newtona były ogromne i wielowątkowe. Szczególnie jeden wątek okazał się brzemienne w skutki dla nowożytnej myśli. Jak widziliśmy, pojęcie materii zostało wyeliminowane przez Newtona z fizyki i zastąpione pojęciem masy (która potem, w fizyce teoretycznej, została zredukowana do roli parametru w równaniach), jednakże filozofowie Oświecenia i ich następcy nie zauważyli tego procesu. Twierdząc, że opierają się na nauce, uczynili z pojęcia

3. Ważność tę oceniamy z punktu widzenia naszej obecnej znajomości fizyki. W tym szkicu pomijamy cały szereg wątków – na przykład wkład filozofów arabskich – ważnych dla historyka nauki. Warto tu odwołać się do klasycznej pozycji: M. Jammer, *Concepts of Mass in Classical and Modern Physics*, Harvard University Press, Cambridge Mass., 1961.

4. Przekład E. Ligocki, PWN, Warszawa 1962, s. 231.

5. J. Kepler, *Opera omnia*, redakcja C. Frish, tom 6, 1896, s. 342

6. Przekład własny. Polskiego przekładu dzieła Newtona dokonał Jarosław Wawrzycki, : *Matematyczne zasady filozofii przyrody*, Copernicus Center Press, Kraków, 2011. „Definicje” na ss. 185-196. Zwracam uwagę na doskonały, uwspółcześniający komentarz tłumacza.

materii podstawę nowożytnego materializmu. Nowożytny materializm – to temat tak obszerny, że chcąc utrzymać rozmiary tego eseju w rozsądnych granicach, musimy pozostawić go na boku. Postawmy więc raczej pytanie:

3. Fizyka jest nauką... o czym?

Nowożytna fizyka w pełni ukonstytuowała się jako samodzielna nauka z chwilą, gdy jej matematyczno-empiryczna metoda zaczęła przynosić wyniki. W samym fakcie, że metoda ta jest tak niezwykle skuteczna, mieści się pewna informacja o świecie. Jaka to informacja? Nasuwa się następująca odpowiedź: ponieważ w fizyce struktury matematyczne wykorzystuje się do modelowania świata, więc świat odkrywany przez fizykę jest światem struktur.

Reakcja filozofów na to stwierdzenie jest – jak można się tego spodziewać – ostro spolaryzowana. Jedni utrzymują, że rola struktur matematycznych jest czysto pomocnicza: są jak rusztowanie, które służy podczas budowy, a potem się je odrzuca. Inni, wręcz przeciwnie, widzą w nich nie tyle rusztowanie, ile raczej szkielet, który nadaje wewnętrzny kształt całości. Filozof, John Worrall w bardzo wpływowym artykule⁷ stwierdza: „Byłoby cudem, niemal na skalę kosmiczną, gdyby teorie, takie jak, powiedzmy, ogólna teoria względności lub fotonowa teoria światła, dokonywały tak wiele i tak dokładnych empirycznych predykcji i gdyby to, co one mówią na temat fundamentalnej struktury świata, było nieprawdziwe, lub ‘istotnie’ czy ‘zasadniczo’ nieprawdziwe...”

Przyjrzyjmy się pod tym względem praktyce fizyków. Rozpatrzmy na przykład proces, w którym węgla 14 przemienia się w azot 14, emitując przy tym elektron i antyneutrino. Jest to przykład tak zwanego rozpadu β^- (beta minus). Jądro węgla 14 składa się z sześciu protonów i ośmiu neutronów. A więc w rozpadzie β^- jeden neutron zamienia się na jeden proton, jeden elektron i jedno antyneutrino:



To istotnie wygląda jak opis tego, co zachodzi w tym doświadczeniu, ale wnikiwniej głębiej w struktury matematyczne, „opisujące” ten proces. Oczywiście, struktury matematyczne, żeby „opisywać” cokolwiek, muszą zostać odpowiednio zinterpretowane, ale chodzi tu o interpretację w pewnym sensie minimalną, przyporządkowującą symbolom matematycznym odniesienia do wielkości fizycznych. Otóż struktury matema-

tyczne, składające się na teorię oddziaływań słabych (zinterpretowane w ten sposób), stwierdzają, że proces, przedstawiony równaniem (1), zachodzi, ponieważ dolny kwark, który jest składnikiem neutronu, przekształca się w kwark górny, emitując bozon pośredniczący W^- , który z kolei rozpada się na elektron i antyneutrino.

Czy to jest opis, czy coś więcej? Gdy poeta opisuje zachód słońca, ujmuje w słowa to, co roztacza się przed jego oczami i zwykle mocno zabarwia to wyobraźnią. Gdy śledczy sporządza raport z miejsca zbrodni, stara się jak najdokładniej opisać to, co zobaczył, wykluczając, na ile to możliwe, działalność swojej wyobraźni. Ale ani poeta, ani śledczy nie są w stanie tak spreparować swój opis, aby wynikały z niego (i to niekiedy z ogromną dokładnością) przyszłe wydarzenia, związane z tym, co się opisuje. Ich opisy są pozbawione mocy sprawczej w fizycznym świecie.

Matematyczne modele współczesnej fizyki działają na zupełnie innej zasadzie. Posługując się analogią – ale tylko analogią – z komputerami, możemy powiedzieć, że kanały rozpadu cząstki elementarnej w rozpadzie *beta minus* są zadane przez *software* wszechświata, czyli przez pewną strukturę matematyczną, ale nie tę, którą z takim mozolem wymyślamy, lecz tę, która tworzy strukturę wszechświata, a którą nasze modele jedynie przybliżają. Rozpad *beta* nie jest więc *opisywany* przez pewną strukturę matematyczną, lecz raczej przez nią *zadawany*.

Skoro już odwołaliśmy się do analogii z *softwarem*, to może warto tę analogię potraktować bardziej dosłownie i zastanowić się, czy fizyka nie jest nauką o informacji zawartej we wszechświecie. Zauważmy, że informację możemy rozumieć jako przechodzenie od zbioru bardziej chaotycznego do zbioru bardziej uporządkowanego. Każdy napis, z którego wyczytujemy jakąś informację, stanowi uporządkowany ciąg liter wybrany z wszystkich możliwych ich zestawów (a więc z zestawu całkowicie chaotycznego). Podobnie, każde prawo fizyki jest pewnym ograniczeniem nałożonym na wszystkie możliwe zachowania wszechświata, a więc jest pewną informacją. Zatem, istotnie, fizykę można rozumieć jako naukę, odkodującą informację zakodowaną we wszechświecie i przekładającą ją na język zrozumiały dla nas, czyli na język praw fizyki.

Jak wiadomo, według obowiązującej dziś definicji informacji (Shannona), jej miarą jest ujemna entropia (im mniejsza entropia, tym większa informacja). Ale ujemna informacja jest także miarą budowania struktury. A zatem na innej drodze dochodzimy do tego samego – fizyka bada struktury, będące częściami, lub –

7. “Structural Realism: The Best of Both Worlds”, *Dialectica* 43, 1989, 97–124.

lepiej – aspektami, jednej wielkiej superstruktury, którą nazywamy wszechświatem.

4. Wielka przygoda

Sabine Hossenfelder w swojej najnowszej książce⁸ pisze: „To, jak matematyka wiąże się z rzeczywistością, jest tajemnicą, która prześladowała filozofów na długo przed pojawieniem się naukowców, i dziś wcale nie jesteśmy mądrzejsi. Na szczęście możemy używać matematyki bez rozwikłania tej tajemnicy.” I tak robimy w codziennej praktyce. Ale właśnie ta praktyka każe nam myśleć o wszechświecie jako o wielkiej strukturze, którą

nasze struktury matematyczne przybliżają zadziwiająco dobrze.

Czymże jest więc ostatecznie fizyka? Nauką o materii? o strukturze? o informacji? Jest przede wszystkim wielką przygodą, i całej ludzkości (choć ogromna jej większość nie ma o tym najmniejszego pojęcia), i tych wybrańców, którzy w tej przygodzie bezpośrednio uczestniczą.

Fizyka jest wielką przygodą, ponieważ jest również wielkim wyzwaniem, jakie człowiek rzucił wszechświatowi. I człowiek to wyzwanie rozegrał z niebywałym sukcesem. Ale jeżeli sukces ma trwać, to nie wolno zapominać, że nawet najpiękniejsze teorie muszą być kontrolowane eksperymentem.

8. *Zagubione w matematyce. Fizyka w pułapce piękna*, przekł. T. Miller, CC Press, Kraków 2019, s. 80.

Fotony – Cząstki Światła

Iwo Białynicki-Birula*, Zofia Białynicka-Birula**

*Centrum Fizyki Teoretycznej PAN

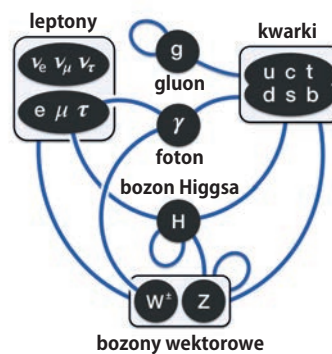
**Instytut Fizyki PAN

Historia wprowadzenia do fizyki pojęcia fotonu obejmuje okres 27 lat. Rozpoczął ją Max Planck w roku 1900 postulując istnienie kwantów energii promieniowania ciała doskonale czarnego. Pięć lat później Albert Einstein wykorzystał ideę Plancka do wyjaśnienia fotoefektu. W 1924 roku Arthur Compton wprowadził pojęcie zlokalizowanych kwantów światła do opisu oddziaływania światła z elektronami. Nazwę *foton* zaproponował Gilbert Lewis dopiero w 1926 roku. Historię tę wieńczy artykuł Paula Diraca o kwantowej teorii pola elektromagnetycznego z roku 1927. Ta ciekawa historia została opisana szerzej w rocznicowym numerze Postępów Fizyki z 2005 roku (<http://pf.ptf.net.pl/PF-2005-6/>).

1. Foton jako cząstka elementarna

Foton jest jedną z 17 cząstek elementarnych (nie licząc antycząstek). Po odkryciu zjawiska mieszania się neutrino, które w efekcie oznacza, że neutrino mają jednak masę spoczynkową, foton pozostał jedyną cząstką bezmasową. Fotony mają własny moment pędu równy 1 (w jednostkach \hbar), są zatem bozonami. Prawoskrętne (lewoskrętne) fotony charakteryzują się dodatnią (ujemną) wartością rzutu własnego momentu pędu na kierunek ruchu. W pustej przestrzeni prawoskrętne i lewoskrętne fotony są odrębnymi cząstkami, nie można bowiem przeprowadzić fotonu prawoskrętnego w lewoskrętny przez obrót jego własnego momentu pędu, tak jak to ma miejsce w przypadku cząstek obdarzonych masą spoczynkową oraz własnym momentem pędu (spinem). Jednakże fotony poruszające się w ośrodku materialnym mogą zmieniać swoją skrętność w wyniku oddziaływania z ośrodkiem.

Fotony towarzyszą prawie wszystkim reakcjom z udziałem cząstek elementarnych. Najczęściej są to reakcje, w których fotony nie odgrywają dominującej roli i ich udział sprowadza się jedynie do niewielkiej modyfikacji procesu. Na przykład tak jest przy rozpadzie mionu $\mu \rightarrow e + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$. Oprócz tego podstawowego kanału rozpadu, mamy także rozpad promienisty z udziałem fotonu $\mu \rightarrow e + \nu_\mu + \bar{\nu}_e + \gamma$. Współczynnik



Rys. 1. Foton zajmuje centralną pozycję ponieważ oddziałuje ze wszystkimi naładowanymi cząstkami elementarnymi

rozgałęzienia dla takich promienistych rozpadów jest jednak rzędu jednej setnej, gdyż jest on proporcjonalny do stałej subtelnej struktury α , charakterystycznej dla poprawek elektromagnetycznych. Są rozpady promieniste, w których foton odgrywa równorzędną rolę. Do takich należą na przykład rozpad $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ oraz promieniste rozpady hiperonów i cząstki J/ψ ,

$$\begin{aligned} \Xi^0 &\rightarrow \Sigma^0 + \gamma, & \Xi^0 &\rightarrow \Lambda + \gamma, \\ \Sigma^0 &\rightarrow \Lambda + \gamma, & J/\psi &\rightarrow \pi^+ + \pi^- + \gamma. \end{aligned}$$

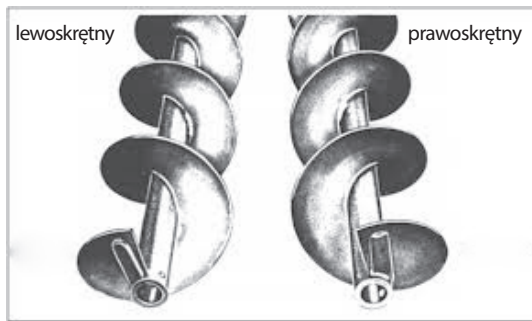
Kluczową rolę odgrywa jednak foton w zjawiskach atomowych i molekularnych. Zjawiska te, przede wszystkim widma atomowe i cząsteczkowe, były szczególnie badane zanim jeszcze odkryto fotony. Teoria oddziaływania fotonu z elektronami i jądrami w atomach pozwala zrozumieć własności tych widm. Badania te odegrały decydującą rolę w powstaniu mechaniki kwantowej atomu (model Bohra), choć początkowo widma były interpretowane na gruncie klasycznej teorii pola elektromagnetycznego.

2. Mechanika kwantowa fotonu

Ze względu na to, że foton jest cząstką elementarną, można oczekiwać, iż uda się sformułować kwantową teorię fotonu na wzór mechaniki kwantowej cząstek obdarzonych masą spoczynkową. Bezmasowość fotonu stwarza jednak poważne trudności przy budowaniu takiej

teorii. Z tego powodu mechanika kwantowa fotonu nie jest powszechnie znana. Celem tego artykułu jest przedstawienie naszej wersji tej teorii.

Podobnie jak w przypadku wszystkich innych cząstek kwantowych, stan fotonu powinien być opisany funkcją falową. W przypadku fotonu, w odróżnieniu od cząstek z masą, podstawową rolę odgrywa funkcja falowa w przestrzeni pędów, a nie w przestrzeni położeń. Ponieważ mamy dwa rodzaje fotonów: prawoskrętne i lewoskrętne, potrzebne są dwie funkcje falowe $f_+(\mathbf{k})$ i $f_-(\mathbf{k})$, gdzie \mathbf{k} jest wektorem falowym. Funkcje falowe $f_{\pm}(\mathbf{k})$ mają standardową interpretację probabilistyczną: kwadrat modułu funkcji falowej jest gęstością prawdopodobieństwa wykrycia fotonu z pędem $\hbar\mathbf{k}$.



Rys. 2. Lewoskrętne i prawoskrętne fotony są odrębnymi cząstkami

Odrębność fotonów prawoskrętnych i lewoskrętnych uwidacznia się [1, 2, 3] w prawach transformacyjnych funkcji falowych $f_{\pm}(\mathbf{k})$. Funkcje te zgodnie z klasyfikacją Wignera [4] stanowią dwie różne jednowymiarowe reprezentacje grupy Poincarégo (niejednorodnej grupy Lorentza). Z tego powodu funkcje falowe $f_+(\mathbf{k})$ i $f_-(\mathbf{k})$ nie można ze sobą superponować, podobnie jak nie można do siebie dodawać składowych wektora w różnych kierunkach. Ogólny (czysty) stan fotonu można opisać następującą dwuskładnikową funkcją falową

$$\mathbf{f}(\mathbf{k}) = \begin{pmatrix} f_+(\mathbf{k}) \\ f_-(\mathbf{k}) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

spełniającą warunek unormowania

$$\int \frac{d^3k}{k} |\mathbf{f}(\mathbf{k})|^2 = 1. \quad (2)$$

Podzielenie elementu objętości w tym wzorze przez moduł wektora falowego podyktowane jest wymogami teorii relatywistycznej. Tak unormowany element objętości jest niezmienniczy względem przekształceń Lorentza. Można też użyć innej notacji wprowadzając funkcję $f(\mathbf{k}, \lambda)$, w której parametr λ przebiega dwie wartości \pm . Podobnie postępujemy w przypadku funkcji falowych cząstek o spinie 1/2, których dwie składowe możemy ustawić w kolumnę albo ponumerować wskaźnikiem.

Z dwuskładnikowych funkcji falowych (1) używając macierzy Pauliego można zbudować cztery rzeczywiste parametry opisujące stan polaryzacji fotonu,

$$\begin{aligned} S_0 &= \mathbf{f}(\mathbf{k})^\dagger \mathbf{f}(\mathbf{k}), & S_1 &= \mathbf{f}(\mathbf{k})^\dagger \sigma_x \mathbf{f}(\mathbf{k}), \\ S_2 &= \mathbf{f}(\mathbf{k})^\dagger \sigma_y \mathbf{f}(\mathbf{k}), & S_3 &= \mathbf{f}(\mathbf{k})^\dagger \sigma_z \mathbf{f}(\mathbf{k}). \end{aligned} \quad (3)$$

W dalszym ciągu pokażemy, że tak zdefiniowane wielkości są parametrami Stokesa opisującymi polaryzację fali elektromagnetycznej.

Generatory grupy Poincarégo (translacji w czasie \hat{H} i w przestrzeni $\hat{\mathbf{P}}$, obrotów $\hat{\mathbf{J}}$ i szczególnych przekształceń Lorentza $\hat{\mathbf{N}}$) mają postać:

$$\hat{H} = \hbar\omega, \quad (4)$$

$$\hat{\mathbf{P}} = \hbar\mathbf{k}, \quad (5)$$

$$\hat{\mathbf{J}} = -i\hbar [\mathbf{k} \times (\partial_{\mathbf{k}} - i\hat{\lambda}\boldsymbol{\alpha}(\mathbf{k}))] + \hbar\hat{\lambda}\mathbf{k}/k, \quad (6)$$

$$\hat{\mathbf{N}} = i\hbar\omega (\partial_{\mathbf{k}} - i\hat{\lambda}\boldsymbol{\alpha}(\mathbf{k})), \quad (7)$$

gdzie $\hat{\lambda} = \sigma_z$, zaś $\boldsymbol{\alpha}(\mathbf{k}) = \{-k_y k_z, k_x k_z, 0\}/(kk_{\perp}^2)$. Występowanie w tych wzorach kombinacji $\mathbf{D}_{\mathbf{k}} = \partial_{\mathbf{k}} - i\hat{\lambda}\boldsymbol{\alpha}(\mathbf{k})$ wynika z własności geometrii na stożku świetlnym. Nie jest to geometria płaska, zaś $\mathbf{D}_{\mathbf{k}}$ jest pochodną kowariantną. Rotacja wektora $\boldsymbol{\alpha}(\mathbf{k})$ wynosi $\nabla \times \boldsymbol{\alpha}(\mathbf{k}) = -\mathbf{k}/k^3$ i wyznacza krzywiznę na stożku świetlnym, która jest źródłem *fazy Berry'ego* dla fotonów.

Operatory (4-7) w działaniu na funkcje falowe fotonu (1) reprezentują podstawowe wielkości fizyczne: energię \hat{H} , pęd $\hat{\mathbf{P}}$, moment pędu $\hat{\mathbf{J}}$ i moment energii $\hat{\mathbf{N}}$. Na uwagę zasługuje fakt, że moment pędu składa się z dwóch części: z części prostopadłej do pędu i części do niego równoległej. Część prostopadła reprezentuje orbitalny moment pędu fotonu, część równoległa zaś może być interpretowana jako własny moment pędu fotonu. Wynika stąd, że występuje zasadnicza różnica między własnym momentem pędu fotonu a spinem cząstek obdarzonych masą. W przypadku tych ostatnich spin może być skierowany w dowolnym kierunku.

3. Zasady nieoznaczoności dla fotonu

W nierelatywistycznej mechanice kwantowej zasada nieoznaczoności Heisenberga w trzech wymiarach ma postać:

$$\Delta \mathbf{R} \Delta \mathbf{P} \geq \frac{3}{2} \hbar, \quad (8)$$

gdzie $\Delta \mathbf{R} = \sqrt{\langle (\mathbf{R} - \langle \mathbf{R} \rangle)^2 \rangle}$ oraz $\Delta \mathbf{P} = \sqrt{\langle (\mathbf{P} - \langle \mathbf{P} \rangle)^2 \rangle}$. Zasada ta nie przenosi się automatycznie na przypadek fotonu. Głównym źródłem trudności jest brak operatora położenia fotonu, który posiadałby wszystkie własności, których oczekivalibyśmy od takiego operatora. W nierelatywistycznej mechanice kwantowej operator położenia \mathbf{R} w reprezentacji pędowej ma postać

$i\hbar\partial_p$. Zastosowanie tego prostego przepisu w mechanice kwantowej fotonu (dla fotonu $i\hbar\partial_p = i\hbar\partial_k$) nie uwzględnia jednak krzywizny na stożku świetlnym; jedynie pochodna kowariantna \mathbf{D}_k ma sens geometryczny. Sens fizyczny \mathbf{D}_k można odczytać z wzoru (7) na moment energii, z którego wynika, że $\mathbf{R} \equiv i\mathbf{D}_k$ jest operatorem środka energii fotonu. Operator ten spełnia standardowe reguły przemienności,

$$[R_i, P_j] = i\hbar\delta_{ij}. \quad (9)$$

Operator położenia fotonu \mathbf{R} , zdefiniowany poprzez moment energii (foton jest tam, gdzie jego energia) ma jednak istotną wadę: jego składowe są nieprzemienne. Jest to ogólna cecha relatywistycznej mechaniki kwantowej, występująca również dla cząstek obdarzonych masą, niemniej, można było sformułować zasadę nieoznaczoności [5], która określa granicę dokładności jednoczesnego pomiaru położenia i pędu fotonu,

$$\Delta\mathbf{R} \Delta\mathbf{P} \geq \frac{3}{2}\hbar\sqrt{1 + \frac{4\sqrt{5}}{9}}, \quad (10)$$

Wynik ten oznacza, że foton trudniej jest jednocześnie zlokalizować w przestrzeni położenia i w przestrzeni pędów w porównaniu z cząstkami nierelatywistycznymi.

4. Klasyczne pole elektromagnetyczne a kwantowa funkcja falowa fotonu

Pole elektromagnetyczne rozchodzące się w próżni (bez źródeł) opisane jest czterema wektorowymi funkcjami spełniającymi równania Maxwella

$$\partial_t \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t), \quad (11)$$

$$\partial_t \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = -\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t), \quad (12)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = 0 \quad (13)$$

oraz związki

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \epsilon_0 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t), \quad (14)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mu_0 \mathbf{H}(\mathbf{r}, t). \quad (15)$$

W celu wyznaczenia relacji między klasycznym polem elektromagnetycznym a funkcją falową fotonu posłużymy się [2] wektorem Riemanna–Silbersteina $\mathbf{F}(\mathbf{r}, t)$,

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)}{\sqrt{2\epsilon_0}} + i \frac{\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\sqrt{2\mu_0}}. \quad (16)$$

Równania Maxwella wyrażone przez wektor Riemanna–Silbersteina (RS) redukują się do dwóch równań

$$i\partial_t \mathbf{F}(\mathbf{r}, t) = c \nabla \times \mathbf{F}(\mathbf{r}, t), \quad (17)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{F}(\mathbf{r}, t) = 0, \quad (18)$$

gdzie c oznacza prędkość światła. Także energia i pęd pola elektromagnetycznego wyrażone przez wektor RS

mają prostą postać,

$$E = \int d^3r \left[\frac{\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) \cdot \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)}{2\epsilon_0} + \frac{\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{2\mu_0} \right] \\ = \int d^3r \mathbf{F}^*(\mathbf{r}, t) \cdot \mathbf{F}(\mathbf{r}, t), \quad (19)$$

$$\mathbf{P} = c \int d^3r \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) \times \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) \\ = -i \int d^3r \mathbf{F}^*(\mathbf{r}, t) \times \mathbf{F}(\mathbf{r}, t). \quad (20)$$

Rozwiązanie równań Maxwella można przedstawić w postaci transformaty Fouriera wektora RS czyli superpozycji fal monochromatycznych:

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}, t) = \int_{-\infty}^{\infty} d\omega e^{-i\omega t} \mathbf{F}(\mathbf{r}, \omega). \quad (21)$$

Całkę tę można przedstawić w równoważnej postaci zawierającej całkowanie jedynie po dodatnich wartościach ω ,

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}, t) = \int_0^{\infty} d\omega \left[e^{-i\omega t} \mathbf{F}_+(\mathbf{r}, \omega) + e^{i\omega t} \mathbf{F}_-(\mathbf{r}, \omega) \right]. \quad (22)$$

Rozbicie całki Fouriera (21) na dwie części okaże się przydatne w dalszych rozważaniach. Oznaczenie drugiej części całki przez zespoloną sprzężoną funkcję $\mathbf{F}_-(\mathbf{r}, \omega)$ zostanie uzasadnione później. Pola wektorowe $\mathbf{F}_{\pm}(\mathbf{r}, \omega)$, na mocy równań Maxwella, spełniają równania

$$c \nabla \times \mathbf{F}_{\pm}(\mathbf{r}, \omega) = \pm \omega \mathbf{F}_{\pm}(\mathbf{r}, \omega). \quad (23)$$

Dla transformaty Fouriera $\tilde{\mathbf{F}}_{\pm}(\mathbf{k}, \omega)$ względem współrzędnych przestrzennych,

$$\mathbf{F}_{\pm}(\mathbf{r}, \omega) = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^{3/2}} e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} \tilde{\mathbf{F}}_{\pm}(\mathbf{k}, \omega), \quad (24)$$

równania (23) stają się układem trzech równań algebraicznych

$$i c \mathbf{k} \times \tilde{\mathbf{F}}_{\pm}(\mathbf{k}, \omega) = \pm \omega \tilde{\mathbf{F}}_{\pm}(\mathbf{k}, \omega). \quad (25)$$

Ze znikania dywergencji (18) wynika, że $\mathbf{k} \cdot \tilde{\mathbf{F}}_{\pm}(\mathbf{k}, \omega) = 0$ oraz, że rozwiązanie istnieje tylko wtedy gdy $\omega = c|\mathbf{k}|$. Rozwiązania równań (25) można przedstawić w postaci:

$$\tilde{\mathbf{F}}_{\pm}(\mathbf{k}, \omega) = A_{\pm} \mathbf{e}_{\pm}(\mathbf{k}) f_{\pm}(\mathbf{k}), \quad (26)$$

gdzie A_{\pm} są amplitudami określającymi natężenie fali, $f_{\pm}(\mathbf{k})$ są dowolnymi unormowanymi funkcjami, zaś zespolone wektory $\mathbf{e}_{\pm}(\mathbf{k})$ spełniają równanie

$$i c \mathbf{k} \times \mathbf{e}_{\pm}(\mathbf{k}) = \pm \omega \mathbf{e}_{\pm}(\mathbf{k}). \quad (27)$$

Będziemy używać wektorów unormowanych według wzoru $\mathbf{e}_{\pm}^*(\mathbf{k}) \cdot \mathbf{e}_{\pm}(\mathbf{k}) = 1$. Bez ograniczenia ogólności można przyjąć, że wektory $\mathbf{e}_{\pm}(\mathbf{k})$ spełniają związek $\mathbf{e}_{-}^*(\mathbf{k}) = \mathbf{e}_{+}(\mathbf{k})$, ponieważ równanie (27) i warunek unormowania wyznaczają te wektory z dokładnością do fazy. Fazę tę można zawsze przerzucić na dowolne funkcje $f_{\pm}(\mathbf{k})$.

Z przeprowadzonej powyżej analizy wynika, że ogólne rozwiązanie równań Maxwella jest następującą superpozycją monochromatycznych fal płaskich:

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}, t) = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^{3/2}} \mathbf{e}(\mathbf{k}) \cdot [A_+ f_+(\mathbf{k}) e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} - i\omega t} + A_- f_-^*(\mathbf{k}) e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} + i\omega t}]. \quad (28)$$

Pole elektromagnetyczne spełniające równania Maxwella można zatem w pełni opisać podając dwie amplitudy A_\pm oraz dwie zespolone funkcje wektora falowego $f_\pm(\mathbf{k})$. Własności tych funkcji wynikają z kolei z własności pola elektromagnetycznego $\mathbf{F}(\mathbf{r}, t)$. Przede wszystkim, można w ten sposób wyznaczyć własności transformacyjne tych funkcji. Przy translacji czasu $t \rightarrow t - t_0$ i przestrzeni $\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{r} - \mathbf{r}_0$ funkcje $f_\pm(\mathbf{k})$ zostają pomnożone przez czynniki fazowe,

$$f_\pm(\mathbf{k}) \rightarrow e^{i\omega t_0} f_\pm(\mathbf{k}), \quad f_\pm(\mathbf{k}) \rightarrow e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}_0} f_\pm(\mathbf{k}). \quad (29)$$

Takim samym przekształceniom podlegają funkcje falowe fotonu. Przekształcenia funkcji $f_\pm(\mathbf{k})$ przy obrotach i szczególnych przekształceniach Lorentza, wynikające z własności transformacyjnych wektorów pola elektromagnetycznego, są również takie same jak dla funkcji falowych fotonu. Nie przypadkiem więc użyliśmy tych samych oznaczeń, gdyż własności transformacyjne funkcji falowych i współczynników w rozkładzie fourierowskim klasycznego pola elektromagnetycznego (28) są identyczne. Bezpośrednie powiązanie funkcji falowej fotonu z polem elektromagnetycznym jest matematycznym sformułowaniem *dualizmu korpuskularno-falowego*.

Monochromatyczne fale płaskie występujące w rozkładzie Fouriera (28) poza wektorem falowym i częstością charakteryzują się także polaryzacją. Jeżeli w tym rozkładzie występuje tylko jedna funkcja falowa prawoskrętnego lub lewoskrętnego fotonu, to pole elektromagnetyczne jest spolaryzowane kołowo lewoskrętnie lub prawoskrętnie.¹ Ogólny stan polaryzacji fali wymaga obecności obu składowych funkcji falowej. Pole elektryczne w takim przypadku dla monochromatycznej fali płaskiej ma postać ($A_\pm = 1$):

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) &= \text{Re}[\mathbf{e}(\mathbf{k}) (f_+(\mathbf{k}) e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} - i\omega t} + f_-^*(\mathbf{k}) e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} + i\omega t})], \\ &= \text{Re}[\mathbf{e}(\mathbf{k}) (f_+(\mathbf{k}) + f_-^*(\mathbf{k})) e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} - i\omega t}]. \end{aligned} \quad (30)$$

Gdy oś z pokrywa się z kierunkiem \mathbf{k} , wektor $\mathbf{e}_\pm(\mathbf{k})$

można wybrać jako

$$\mathbf{e} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (31)$$

Parametry Stokesa (3) dane są wzorami [6, 7]:

$$\begin{aligned} S_0 &= |f_+|^2 + |f_-|^2, \quad S_1 = 2|f_+||f_-| \cos(\delta_- - \delta_+), \\ S_2 &= 2|f_+||f_-| \sin(\delta_- - \delta_+), \quad S_3 = |f_+|^2 - |f_-|^2, \end{aligned} \quad (32)$$

gdzie

$$f_+ = |f_+| e^{i\delta_+}, \quad f_- = |f_-| e^{i\delta_-}. \quad (33)$$

W ogólnym przypadku, gdy obie amplitudy f_\pm są różne od zera mamy polaryzację eliptyczną. Wektor pola elektrycznego zakreśla elipsę, której długości osi są wyznaczone przez $|f_\pm|$, zaś różnica faz określa orientację.

Z uwagi na to, że wektor RS jest związany z funkcjami falowymi fotonu transformatą Fouriera (28), można uważać go za odpowiednik *funkcji falowej fotonu w reprezentacji położeniowej*. Równanie (17) przyjmuje postać równania Schrödingera,

$$i\hbar \partial_t \mathbf{F}(\mathbf{r}, t) = H \mathbf{F}(\mathbf{r}, t), \quad (34)$$

gdzie

$$H = c \left(\mathbf{s} \cdot \frac{\hbar}{i} \nabla \right), \quad (35)$$

zaś \mathbf{s} są macierzami dla cząstek o spinie 1,

$$\mathbf{s} = \left\{ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 & i \\ 0 & 0 & 0 \\ -i & 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right\}. \quad (36)$$

Hamiltonian H przypomina Hamiltonian Weyla H_W dla neutrin:

$$H_W = c \left(\boldsymbol{\sigma} \cdot \frac{\hbar}{i} \nabla \right), \quad (37)$$

w którym zamiast \mathbf{s} występują macierze Pauliego.

Podobnie jak w równaniu Diraca, Hamiltonian H ma widmo rozciągające się od $-\infty$ do $+\infty$. Część wektora $\mathbf{F}(\mathbf{r}, t)$ o dodatnich energiach,

$$\Psi_+(\mathbf{r}, t) = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^{3/2}} \mathbf{e}(\mathbf{k}) f_+(\mathbf{k}) e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} - i\omega t}, \quad (38)$$

interpretujemy jako funkcję falową fotonu prawoskrętnego, zaś część wektora $\mathbf{F}(\mathbf{r}, t)$ o ujemnych energiach, interpretujemy jako *zespolono sprzężoną* funkcję falową fotonu lewoskrętnego

$$\Psi_-(\mathbf{r}, t) = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^{3/2}} \mathbf{e}^*(\mathbf{k}) f_-(\mathbf{k}) e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} - i\omega t}. \quad (39)$$

Tak więc wektor RS opisuje łącznie fotony prawoskrętne i lewoskrętne w przestrzeni położeniowej. Tak samo, jak

1. Skrętność fali jest odwrotna do skrętności fotonu ponieważ fale opisuje się z punktu widzenia obserwatora, który widzi nadbiegającą falę [6].

w reprezentacji pędowej funkcje falowe w reprezentacji położeniowej opisujące fotony prawoskrętne albo fotony lewoskrętne można ustawić w kolumnę albo zastąpić dwie funkcje jedną funkcją $\Psi(\mathbf{r}, t, \lambda)$ wprowadzając dodatkowy parametr λ .

5. Fotony – elementarne wzbudzenia kwantowego pola elektromagnetycznego

Energia pojedynczego fotonu dana jest wzorem: $E = 1.986 \times 10^{-25} \text{ J/l}$, gdzie długość fali l mierzona jest w metrach. Dla długości fal występujących w życiu codziennym, od fal radiowych do fal rentgenowskich, jest to wielkość bardzo mała w porównaniu z typowymi energiami, z jakimi mamy do czynienia. Z tego powodu liczba fotonów w naszym otoczeniu jest ogromna. Ze Słońca na sekundę pada około 1000 dzuży energii na metr kwadratowy. W grubym przybliżeniu daje to 10^{18} fotonów. Kuchenka mikrofalowa produkuje około 10^{27} fotonów na sekundę. Wielki Wybuch wypełnił cały Kosmos fotonami, których gęstość obecnie wynosi średnio 400 na cm^3 . W tej sytuacji potrzebne jest sformułowanie, w którym nie koncentrujemy się na pojedynczym fotonie, ale potrafimy opisać też stany złożone z wielu fotonów.

Stan N fotonów opisany jest funkcją falową zależną od N zespołów parametrów opisujących fotony. W reprezentacji pędowej funkcja ta ma postać:

$$f(\mathbf{k}_1, \lambda_1; \mathbf{k}_2, \lambda_2; \dots; \mathbf{k}_i, \lambda_i; \dots; \mathbf{k}_N, \lambda_N; t). \quad (40)$$

Funkcja ta musi być funkcją symetryczną (nie zmieniać się przy zamianie każdej pary argumentów \mathbf{k}_i, λ_i i \mathbf{k}_j, λ_j) ponieważ fotony są bozonami.

W przypadku dużej liczby fotonów, a przede wszystkim w sytuacji nieokreślonej ich liczby, formalizm oparty na funkcji falowej zależnej o współrzędnych wszystkich fotonów jest wręcz niemożliwy do zastosowania. Zastępujemy go formalizmem opartym na *metodzie drugiej kwantyzacji* [8]. Metoda ta polega na zastąpieniu funkcji falowych operatorami anihilacji $a(\mathbf{k}, \lambda)$ zaś funkcji falowych zespolono sprzężonych operatorami kreacji $a^\dagger(\mathbf{k}, \lambda)$. Z powodu relatywistycznej normalizacji funkcji falowych fotonu, w regułach komutacyjnych dla operatorów kreacji i anihilacji funkcję delta należy pomnożyć przez k ,

$$[a(\mathbf{k}, \lambda), a^\dagger(\mathbf{k}', \lambda')] = \delta_{\lambda\lambda'} k \delta^{(3)}(\mathbf{k} - \mathbf{k}'). \quad (41)$$

Po podstawieniu operatorów anihilacji i kreacji fotonu do wzoru (28) w miejsce funkcji falowych fotonu otrzymujemy operator pola elektromagnetycznego w postaci:

$$\hat{\mathbf{F}}(\mathbf{r}, t) = \sqrt{\hbar c} \int \frac{d^3 k}{(2\pi)^{3/2}} \mathbf{e}(\mathbf{k}) \cdot [a(\mathbf{k}, +) e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} - i\omega t} + a^\dagger(\mathbf{k}, -) e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} + i\omega t}]. \quad (42)$$

Fotony w tym formalizmie są wzbudzeniami (kwantami) tego pola. Amplitudy A_\pm kwantowego operatora pola dobraliśmy w ten sposób ($A_\pm = \sqrt{\hbar c}$), aby otrzymać poprawny wzór na operator energii \hat{H} (Hamiltonian) pola elektromagnetycznego (19) wyrażony przez operator gęstości liczby fotonów w przestrzeni pędów $N(\mathbf{k})$,

$$N(\mathbf{k}) = a^\dagger(\mathbf{k}, +) a(\mathbf{k}, +) + a^\dagger(\mathbf{k}, -) a(\mathbf{k}, -), \quad (43)$$

$$\hat{H} = \int \frac{d^3 k}{k} \hbar \omega N(\mathbf{k}). \quad (44)$$

W wyniku traktowania *całego pola elektromagnetycznego* (a nie pojedynczych fotonów) jako układu kwantowego możemy znacznie rozszerzyć przestrzeń stanów. W odróżnieniu od przestrzeni stanów N -fotonowych zawierającej funkcje falowe (40), rozszerzona przestrzeń, zwana przestrzenią Focka, zawiera stany o dowolnej liczbie fotonów. Przestrzeń tę można obrazowo przedstawić w postaci odwróconej piramidy (45).

$$\begin{aligned} & \dots\dots\dots \\ & a^\dagger(\mathbf{k}_1, \lambda_1) a^\dagger(\mathbf{k}_2, \lambda_2) a^\dagger(\mathbf{k}_3, \lambda_3) a^\dagger(\mathbf{k}_4, \lambda_4) |0\rangle \\ & a^\dagger(\mathbf{k}_1, \lambda_1) a^\dagger(\mathbf{k}_2, \lambda_2) a^\dagger(\mathbf{k}_3, \lambda_3) |0\rangle \\ & a^\dagger(\mathbf{k}_1, \lambda_1) a^\dagger(\mathbf{k}_2, \lambda_2) |0\rangle \\ & a^\dagger(\mathbf{k}_1, \lambda_1) |0\rangle \\ & |0\rangle \end{aligned} \quad (45)$$

“Wierzchołek” tej piramidy to stan próżni $|0\rangle$, zaś n -ty poziom, opisujący stany n -fotonowe, jest generowany przez działanie n operatorów kreacji. Ogólny stan (czyli) kwantowego pola elektromagnetycznego $|\Psi\rangle$ jest kombinacją liniową wektorów bazy Focka,

$$\begin{aligned} |\Psi\rangle = & f_0 + \sum_{\lambda_1} \int \frac{d^3 k_1}{k_1} f_1(\mathbf{k}_1, \lambda_1) a^\dagger(\mathbf{k}_1, \lambda_1) |0\rangle \\ & + \sum_{\lambda_1, \lambda_2} \int \frac{d^3 k_1}{k_1} \frac{d^3 k_2}{k_2} f_2(\mathbf{k}_1, \lambda_1; \mathbf{k}_2, \lambda_2) \\ & \cdot a^\dagger(\mathbf{k}_1, \lambda_1) a^\dagger(\mathbf{k}_2, \lambda_2) |0\rangle + \dots \end{aligned} \quad (46)$$

Wśród tych stanów szczególną rolę odgrywają *stany koherentne*, które dobrze opisują światło wysyłane przez lasery. Są to superpozycje stanów o różnej liczbie takich samych fotonów,

$$\begin{aligned} |\Psi_{\text{coh}}\rangle & = e^{-\langle N \rangle / 2} \left(|0\rangle + \frac{\langle N \rangle^{1/2}}{1!} a_f^\dagger |0\rangle + \frac{\langle N \rangle}{2!} (a_f^\dagger)^2 |0\rangle + \dots \right) \\ & = e^{-\langle N \rangle / 2} \exp(\langle N \rangle^{1/2} a_f^\dagger) |0\rangle, \end{aligned} \quad (47)$$

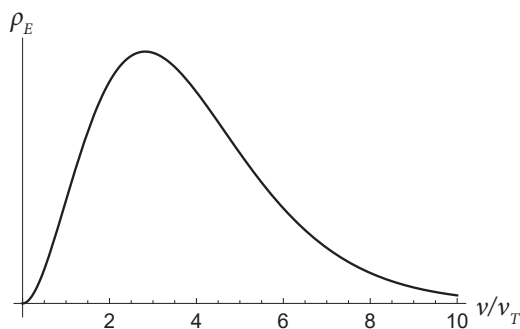
gdzie a_f^\dagger jest operatorem kreacji fotonu o funkcji falowej $f(\mathbf{k}, \lambda)$,

$$a_f^\dagger = \sum_s \int \frac{d^3 k_1}{k} f(\mathbf{k}, \lambda) a^\dagger(\mathbf{k}, \lambda), \quad (48)$$

$\langle N \rangle$ zaś jest średnią liczbą fotonów w tym stanie. Stany koherentne kwantowego pola elektromagnetycznego są łącznikiem między teorią kwantową i klasyczną. Średnia wartość operatora pola elektromagnetycznego (42) w stanie koherentnym odtwarza wzór (28), w którym amplituda zależy od natężenia (średniej liczby fotonów) stanu koherentnego $A = \sqrt{\langle N \rangle \hbar c}$. Ze stanami koherentnymi mamy więc do czynienia zawsze tam, gdzie klasyczne pole elektromagnetyczne daje poprawny opis promieniowania. Dotyczy to przede wszystkim fal używanych w telekomunikacji. Niezerowa średnia wartość pola w stanie koherentnym jest wynikiem superpozycji stanów o różnej liczbie fotonów. W stanie o określonej liczbie fotonów średnie pole jest zawsze równe zero.

Nie wszystkie stany pola elektromagnetycznego, z którymi mamy na co dzień do czynienia są stanami czystymi. Nie można w ten sposób opisać promieniowania rozgrzanych ciał. Do opisu takiego promieniowania trzeba użyć stanów mieszanych. Stany te reprezentują zbiory fotonów o różnych wektorach falowych. Żaden kierunek tych wektorów nie jest wyróżniony, zaś gęstość energii $\rho_E(\nu)$ takiego promieniowania zależy od temperatury źródła i opisana jest wzorem Plancka [9],

$$\begin{aligned} \rho_E(\nu) &= \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1} \\ &= \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \left(\exp\left(-\frac{h\nu}{k_B T}\right) + \exp\left(-2\frac{h\nu}{k_B T}\right) \right. \\ &\quad \left. + \exp\left(-3\frac{h\nu}{k_B T}\right) + \dots \right). \end{aligned} \quad (49)$$



Rys. 3. Uniwersalny kształt krzywej Plancka. Gęstość energii promieniowania (w dowolnych jednostkach) w funkcji bezwymiarowej częstości $\nu_T = k_B T/h$

Szereg zbudowany z czynników Boltzmannia $e^{-E_n/k_B T}$, gdzie E_n jest wielokrotnością energii $h\nu$, doskonale ilustruje tezę Plancka, że promieniowanie składa się z porcji (kwantów) energii. Gęstość (49) dąży do zera zarówno dla dużych jak i dla małych częstości (rys. 3). Położenie maksimum² jest liniową funkcją temperatury, $\nu_{\text{Max}} = 2.82 k_B T/h$. Całkowita gęstość energii dana jest

wzorem:

$$\int_0^\infty d\nu \rho_E(\nu) = \frac{8\pi^5 h c}{15} \left(\frac{k_B T}{h c} \right)^4. \quad (50)$$

Gęstość energii różni się od gęstości fotonów $\rho_N(\nu)$ jedynie o czynnik $h\nu$ a zatem całkowita gęstość dana jest wzorem:

$$\int_0^\infty d\nu \rho_N(\nu) = 16\pi \zeta(3) \left(\frac{k_B T}{h c} \right)^3. \quad (51)$$

gdzie $\zeta(3) = 1.202$ jest wartością funkcji zeta Riemanna. Temperatura kosmicznego promieniowania tła wynosi 2.7 K, co oznacza, że całkowita gęstość wynosi 400 fotonów na centymetr sześcienny, zaś $\nu_{\text{Max}} = 159$ GHz. Temperatura powierzchni Słońca wynosi 5778 K. Całkowita gęstość fotonów słonecznych jest więc prawie dziesięć miliardów razy większa, zaś maksimum leży w zakresie widzialnym.

Literatura

- [1] Iwo Białynicki-Birula i Zofia Białynicka-Birula, *Quantum Electrodynamics*, Pergamon Press Oxford - PWN Warszawa (1975), dostępna pod adresem <http://www.cft.edu.pl/birula/>
- [2] Iwo Białynicki-Birula i Zofia Białynicka-Birula, The role of the Riemann-Silberstein vector in classical and quantum theories of electromagnetism, *J. Phys. A: Math. Theor.* **46**, 053001 (2013).
- [3] Iwo Białynicki-Birula i Zofia Białynicka-Birula, Quantum numbers and spectra of structured light, *Phys. Scr.* **93**, 104005 (2018).
- [4] Eugene P. Wigner, On unitary representations of the inhomogeneous Lorentz group, *Ann. of Math.* **40**, 149 (1939).
- [5] Iwo Białynicki-Birula i Zofia Białynicka-Birula, Quantum numbers and spectra of structured light, *Phys. Scr.* **93**, 104005 (2018).
- [6] John D. Jackson *Classical Electrodynamics* 3rd ed., Wiley New York 1999, p. 301.
- [7] Iwo Białynicki-Birula, Helicity amplitudes, polarization of EM waves and Stokes parameters: classical versus quantum theory, *J. Opt.* **21**, 094002 (2019).
- [8] Leonard I. Schiff, *Mechanika Kwantowa*, PWN Warszawa 1977, rozdz. 14.
- [9] Max Planck, Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum, *Verhandlungen der Deutschen physikalischen Gessellschaft* **2** 237 (1900).

2. Często przedstawia się gęstość energii promieniowania w funkcji długości fali, a nie w funkcji częstości. Wówczas położenie maksimum funkcji $\rho_E(\lambda)$ przesuwa się w kierunku większych częstości (krótszych fal) o czynnik 1.76.

Mity o energetyce jądrowej

Adam Rajewski

Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Warszawska

Streszczenie. W ostatnich miesiącach, wskutek splotu szeregu okoliczności, w tym intensyfikacji dyskusji na temat zmian klimatu, prezentacji planów polskiego rządu dotyczących budowy elektrowni jądrowych oraz kampanii wyborczej, w której tematyka klimatyczna była obecna w dużo większym stopniu niż w latach poprzednich, a także emisji popularnego serialu dotyczącego katastrofy czarnobylskiej, energetyka jądrowa stała się w Polsce tematem ożywionej debaty publicznej, zarówno w mediach tradycyjnych, jak i społecznościowych. Niestety przy tej okazji w obiegu publicznym pojawił się cały szereg mitów dotyczących tej branży i technologii jądrowych w ogóle. Niniejszy artykuł przedstawia wybrane z nich, które na podstawie doświadczenia autora, pojawiają się w dyskusjach szczególnie często, wraz z informacjami na temat stanu faktycznego.

Drugi Czarnobyl

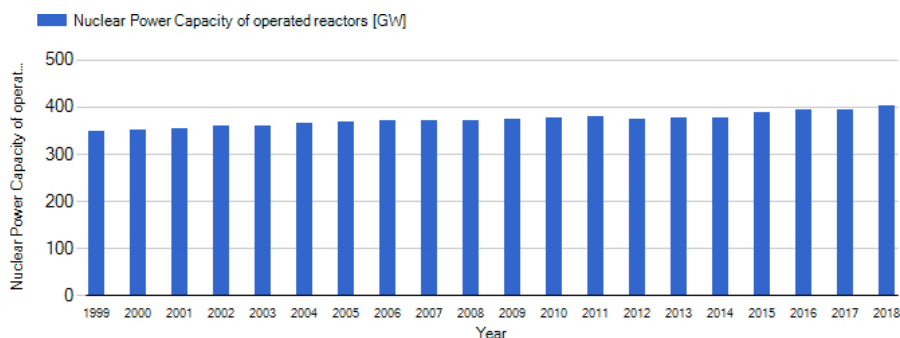
Jednym z najczęstszych a jednocześnie najbardziej pozbawionych podstaw faktycznych stwierdzeń dotyczących współczesnej energetyki jądrowej są różnego rodzaju ostrzeżenia przed „drugim Czarnobylem”. Niemal za każdym razem, kiedy pojawiają się informacje o jakiegokolwiek sytuacji awaryjnej w zagranicznej elektrowni jądrowej, w obiegu publicznym pojawia się fraza „drugi Czarnobyl”, na ogół w postaci pytania „Czy grozi nam...?” [I][II][III][IV]. Podobne odwołania pojawiają się także notorycznie w artykułach dotyczących niektórych nowych inwestycji, w tym szczególnie Elektrowni Jądrowej Ostrowiec, która budowana jest na Białorusi [V][VI][VII].

Z jednej strony oczywiście zrozumiałe jest publicystyczne używanie Czarnobyla jako symbolu katastrofy jądrowej – jest to symbol, który niezwykle silnie wrósł w kulturę. Jednocześnie jednak trzeba podkreślić z całą stanowczością: powtórka katastrofy czarnobylskiej nie jest możliwa w żadnym obecnie pracującym cywilnym reaktorze jądrowym; nie pozwalają na to prawa fizyki. W Czarnobylu doszło bowiem do szczególnego przypadku nagłego wzrostu mocy reaktora, możliwego tylko w konstrukcji o wysokim dodatnim współczynniku temperaturowym reaktywności (tj. takiej, dla której wzrost temperatury prowadzi do szybkiego samoczynnego wzrostu mocy), a sytuację dodatkowo skomplikowały błędy konstrukcyjne, w tym w szczególności dotyczące prętów służących do awaryjnego wyłączenia reaktora oraz błędne decyzje operatorów. Nagły niekontrolowany wzrost mocy doprowadził do wzrostu ciśnienia wewnątrz kanałów chłodziwa i ich rozerwania oraz całej konstrukcji reaktora w czasie jego pracy [1][2][3]. Charakterystyki umożliwiające taką sekwencję zdarzeń

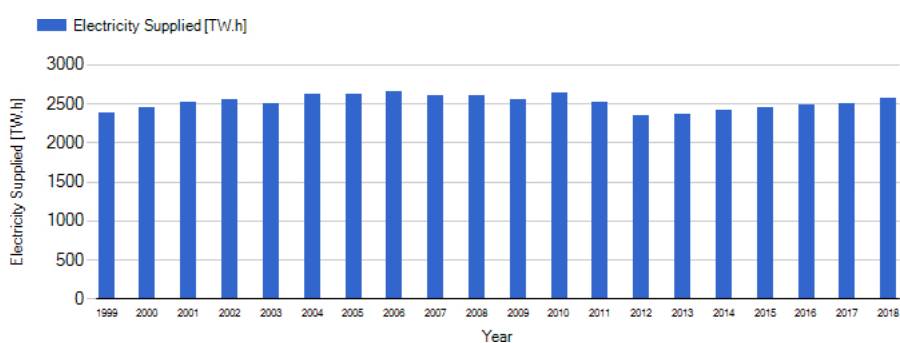
nie miał i nie ma żaden typ reaktora inny, niż zastosowany w Czarnobylskiej Elektrowni Jądrowej wodnografitowy reaktor RBMK-1000. Dodatkowo wszystkie pozostające w eksploatacji reaktory tego typu – jest ich 13, na terenie Federacji Rosyjskiej [4] – zostały zmodyfikowane tak, aby uniemożliwić ponowne zaistnienie warunków, w których mogłoby dojść do podobnego zdarzenia [1]. Olbrzymia większość pracujących obecnie na świecie reaktorów, w tym wszystkie jednostki budowane aktualnie w Europie (a więc także nowe rosyjskie reaktory budowane na Białorusi, w Finlandii i w Rosji, a także wszystkie reaktory radzieckiej i rosyjskiej konstrukcji pracujące obecnie poza Rosją), należą do zupełnie innej klasy reaktorów lekkowodnych, w których współczynnik temperaturowy reaktywności jest ujemny. Takie reaktory w wypadku wzrostu temperatury samoczynnie obniżają moc [4][5]. W tego typu jednostkach (przynajmniej niektórych), oczywiście w skrajnie niesprzyjających warunkach także może dojść do sytuacji awaryjnych (zob. awaria w Elektrowni Three Miles Island w roku 1979 oraz katastrofa w Fukushima w 2011), ale mają one w praktyce związek z odprowadzaniem ciepła powyłączeniowego, a nie ze zniszczeniem pracującego reaktora, a ich skutki są dużo mniej poważne. Warto też podkreślić, że energetyka jądrowa to statystycznie najbezpieczniejszy sposób wytwarzania energii elektrycznej [6][7][8], w związku z czym automatyczne postrzeganie jej przez pryzmat potencjalnych poważnych awarii jest słabo uzasadnione.

Świat odchodzi od energetyki jądrowej

Stwierdzenie o odchodzeniu od energii jądrowej jest dość powszechne w dyskursie publicznym [VIII].



Ryc. 1. Zmiany łącznej mocy elektrowni jądrowych na całym świecie. Dane od roku 2011 uwzględniają także długoterminowo wyłączone instalacje japońskie, które są oficjalnie deklarowane jako czynne [4]



Ryc. 2. Zmiany łącznej produkcji energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych na całym świecie. Widoczny spadek w latach 2011-2012 wywołany skutkami katastrofy w Fukuszymie – czasowym odstawieniem wszystkich instalacji japońskich oraz, w mniejszym stopniu, nagłym wyłączeniem części instalacji niemieckich [4]

Trudno uznać tak postawioną kwestię za prawdę, choć sytuacja jest nieco bardziej zniuansowana. W rzeczywistości moc wytwarzana w sprawnych elektrowniach jądrowych powoli rośnie i dziś jest najwyższa w historii na poziomie niemal 400 000 MW (rys. 1), choć należy zauważyć, że wśród reaktorów oficjalnie deklarowanych jako „pracujące” jest też szereg instalacji japońskich, których wiele jest faktycznie długoterminowo wyłączonych z użytkowania, a część z nich zapewne już nie wróci do pracy. Produkcja energii elektrycznej w blokach jądrowych utrzymuje lekki trend wzrostowy od 2012 roku, jednak w 2018 roku była wciąż o niespełna 4% niższa, niż w rekordowym roku 2006 (rys. 2) [4]. Utrzymywanie się z grubsza stałego poziomu przy jednoczesnym istotnym wzroście wytwarzania energii elektrycznej w skali świata oznacza, że następuje stopniowy spadek udziału energetyki jądrowej w globalnym bilansie energetycznym. Jeśli chodzi o dalszą perspektywę, sytuacja jest zróżnicowana w zależności od regionu świata. W budowie znajdują się 53 nowe bloki jądrowe o łącznej mocy blisko 54 000 MW [4]. Duża część z tych jednostek budowana jest w krajach Azji, w których energetyka jądrowa dopiero powstaje, albo jest cały czas rozbudowywana (jak Chiny i Indie). Jednocześnie w świecie zachodnim obserwowany jest od lat 90. ubiegłego stulecia zastój – tam prawdziwy boom na nowe elektrownie miał miejsce w latach 70. i 80., od tego czasu

nowe inwestycje były rzadkie. Do chwili obecnej kilka państw zdecydowało się na niezastępowanie istniejących reaktorów nowymi, natomiast jedno – Niemcy – rezygnuje z elektrowni jądrowych, które z powodzeniem mogłyby być eksploatowane jeszcze przez wiele lat. Jednostkowe przypadki tego typu mają też miejsce w USA, tam jednak uwarunkowane są specyficzną sytuacją na lokalnych rynkach energii w poszczególnych stanach. Jednocześnie większość krajów zadawała się przedłużaniem eksploatacji posiadanych już bloków, odkładając bardziej kategoryczne decyzje na przyszłość [10][11]. Jedynymi krajami, które starają się programowo prowadzić wymianę starszych reaktorów na jednostki nowego pokolenia, są Wielka Brytania oraz Rosja, przy czym w Wielkiej Brytanii proces ten napotkał na znaczne trudności, wynikające w dużej mierze z likwidacji w latach 90. własnego przemysłu zdolnego do realizacji takich inwestycji.

Energia jądrowa sprzyja proliferacji broni jądrowej

W obiegu publicznym bywa podnoszony argument o tym, że rozwój energetyki jądrowej prowadzi do rozpowszechniania broni jądrowej [IX][X]. Twierdzenie to trudno jednak obronić zarówno na gruncie historyczno-empirycznym, jak i technicznym.

Z technicznego punktu widzenia cywilna energetyka jądrowa oraz programy zbrojeniowe mają bar-

dzo niewiele elementów wspólnych, albowiem wspólne w nich jest tylko fundamentalne zjawisko rozszczepiania na poziomie mikroskopowym. Zakładów cywilnej energetyki jądrowej nie można łatwo wykorzystać do produkcji materiałów rozszczepialnych dla broni jądrowej. Absolutną większość paliwa dla elektrowni jądrowych stanowi uran niskowz bogaczony w izotop rozszczepialny U-235 (do 4,5-5,0%) [9]. Tymczasem do produkcji uranowej głowicy jądrowej konieczne jest uzyskanie wzbogacenia na poziomie ok. 80% albo wyższego, co sprawia, że zakłady cywilne wzbogacające paliwo jądrowe nie mogą posłużyć do produkcji paliwa do broni jądrowej, a samo paliwo jest zupełnie nieprzydatne. Hipotetycznie możliwe jest wykorzystanie reaktora energetycznego do produkcji plutonu-239, będącego zresztą dużo wygodniejszym materiałem do budowy broni. Istotnie, w każdym reaktorze wykorzystującym paliwo zawierające nierozszczepialny uran-238 (a w standardowym paliwie większość uranu stanowi ten właśnie izotop) w wyniku bombardowania neutronami powstaje Pu-239. Jednak efektywne wykorzystanie go do celów zbrojeniowych wymagałoby to bardzo specyficznej (a zatem łatwej do zaobserwowania z perspektywy monitorujących energetykę jądrową instytucji międzynarodowych) gospodarki paliwem jądrowym. Jest tak dlatego, że przy zbyt długim wykorzystaniu paliwa w reaktorze, powstają w niewielkich ilościach także inne niemożliwe w praktyce do odseparowania izotopy plutonu (Pu-238, Pu-240), które czynią uzyskany materiał mało przydatnym do produkcji głowic jądrowych (możliwe byłoby uzyskanie wybuchu, ale o bardzo słabych parametrach). Aby pluton wytworzony w reaktorze (dowolnego rodzaju) nadawał się do celów zbrojeniowych, element paliwowy musi zostać usunięty z reaktora po relatywnie krótkim czasie – około jednego miesiąca [12][13]. W większości reaktorów energetycznych, które są reaktorami typu zbiornikowego, jest to skrajnie niepraktyczne, albowiem przeładunek paliwa wymaga co najmniej kilku czy kilkunastodniowego wyłączenia reaktora – zatem wykorzystanie go do produkcji zbrojeniowej silnie zakłócałoby realizację podstawowej funkcji elektrowni, jednocześnie prowadząc do marnowania paliwa jądrowego (typowe paliwo dla reaktorów lekkowodnych eksploatowane jest około trzech lat). Wyjątek mogą tu stanowić rzadkie typy reaktorów, w których przeładunek paliwa prowadzi się w trakcie pracy, aczkolwiek w chwili obecnej nowe tego typu jednostki powstają wyłącznie w Indiach (które broń jądrową i tak już mają). W praktyce większość plutonu przeznaczanego do głowic jądrowych powstała w prostszych reaktorach służących tylko temu celowi. Są to dość proste konstrukcje, których pierwsze egzemplarze powstały już w połowie lat 40. – realizacja takiej instalacji jest

łatwiejsza, tańsza i prostsza do ukrycia, niż wykorzystanie do produkcji zbrojeniowej cywilnych elektrowni jądrowych.

Oczywiście pewne ogólne synergie pomiędzy wojskowym i cywilnym programem jądrowym mogą się pojawić, na przykład możliwość wykorzystania do obu celów częściowo wspólnego zaplecza badawczego i edukacyjnego, jednak tylko na dość ogólnym poziomie. Braku istotnego związku energetyki z proliferacją broni jądrowej dowodzi zresztą historia. Na 8 lub 9 krajów posiadających obecnie broń jądrową (niepewność dotyczy Izraela, który oficjalnie nie przyznaje, że taką broń posiada, ale jest dość powszechnie o to podejrzewany):

- 1 lub 2 (Korea Północna i wspomniany Izrael) w ogóle nie dysponuje energetyką jądrową,
- 5 (Rosja – traktowana jako spadkobierca ZSRR, USA, Wielka Brytania oraz Chiny) uzyskało broń jądrową przed zbudowaniem elektrowni jądrowych,
- tylko 3 – Francja, Indie i Pakistan – uruchomiły pierwsze reaktory energetyczne przed przeprowadzeniem prób broni jądrowej, przy czym we Francji oba programy były prowadzone praktycznie równoległe, natomiast w Indiach i Pakistanie pierwsze reaktory powstały znacznie wcześniej.

Jednocześnie pozostałe 23 z 31 krajów posiadających obecnie energetykę jądrową (i 25 z 33 jakie kiedykolwiek ją posiadały – doliczając Włochy i NRD) broni jądrowej nie miało i nie ma, przy czym o starania w tym kierunku na poważnie podejrzewany jest tylko jeden (Iran, w przeszłości programy na różnym stopniu zaawansowania prowadziły także Argentyna, Brazylia, Korea Płd., RPA i Tajwan). Zatem większość krajów eksploatujących elektrownie jądrowe nie czyni z nich żadnego militarnego użytku, a większość krajów, które broń jądrową posiadają, uzyskała ją wcześniej, niż cywilną energetykę jądrową [4][14].

Ocieplający się klimat uniemożliwi stosowanie atomu z uwagi na brak wody do chłodzenia

W ostatnim czasie często pojawia się argument o niedostosowaniu energetyki jądrowej do zmian klimatu z uwagi na zapotrzebowanie na wodę chłodzącą. Często popierany jest on doniesieniami, skądinąd prawdziwymi, o konieczności wyłączenia bloków z uwagi na zbyt wysoką temperaturę wody rzecznej lub morskiej używanej do chłodzenia [XI]. Czasami przy okazji pojawia się zupełnie nieprawidłowe stwierdzenie, że chodzi o wodę służącą rzekomo do chłodzenia reaktorów [XII].

Rzeczywiście, w istniejących blokach jądrowych występują ograniczenia związane z temperaturą wody

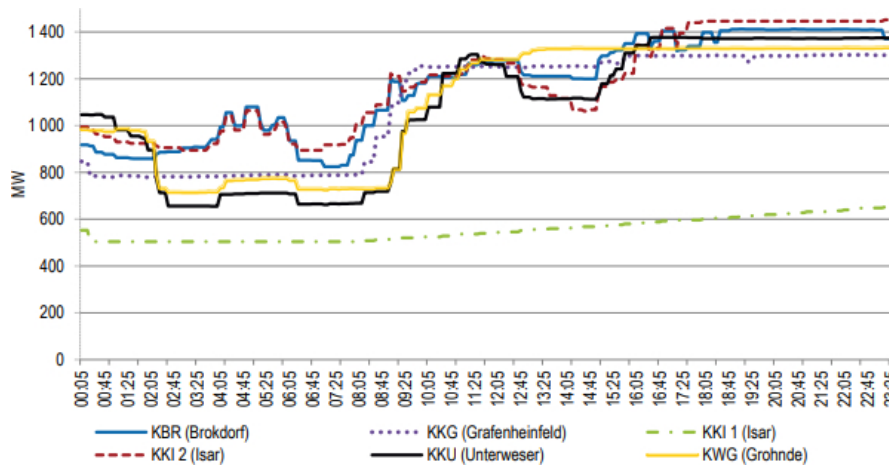
chłodzącej. Nie mają one jednak charakteru technicznego, a prawnego. Każda elektrownia chłodzona wodami powierzchniowymi ma określone warunki, na jakich z owych wód może korzystać. W przypadku elektrowni chłodzonych w obiegu otwartym (tj. pobierających do chłodzenia skraplacza wodę z rzeki, jeziora lub morza oraz zrzucających ją z powrotem do tego samego zbiornika po odebraniu ciepła), warunki te na ogół obejmują ograniczenie na temperaturę wody zrzucanej, czasami także na maksymalny pobór wody, określony jako udział w przepływie rzeki. To drugie ograniczenie może dotyczyć także bloków chłodzonych w obiegu zamkniętym z chłodnią kominową, które pobierają znacznie mniejszy strumień wody (dla skompensowania parowania w chłodni), ale za to nie zwracają go do zbiornika. Ograniczenia te podyktowane są względami ochrony środowiska – zbyt intensywne podgrzewanie wody w rzece, jeziorze czy lokalnie przy brzegu morskim, albo obniżenie przepływu rzeki w porze suchej mogłoby być szkodliwe dla lokalnych ekosystemów. Zdarza się zatem, że w warunkach wysokich temperatur, kiedy wody nagrzewają się naturalnie, nie jest możliwe dotrzymanie wymaganych parametrów, co najpierw prowadzi do konieczności ograniczenia poboru wody (a więc zmniejszenia mocy elektrowni), a ostatecznie zaprzestania pracy [15][16]. Podobne ograniczenia dotyczą zresztą i innych elektrowni wykorzystujących obieg parowy, na przykład polskiej elektrowni węglowej w Kozienicach. Oczywiście w miarę postępowania ocieplenia klimatu takie sytuacje, które występują na ogół w pojedynczych dobach roku, mogą się stawać częstsze, utrudniając pracę istniejących instalacji.

Jednocześnie jednak zupełnie bezzasadny jest argument, iż globalne ocieplenie spowoduje brak możliwości stosowania technologii jądrowych jako takich. Z technicznego punktu widzenia kwestia temperatur wody nie jest żadnym problemem – skraplacz można chłodzić wodą o dowolnej temperaturze. Możliwe jest też wykorzystanie wody w obiegu całkowicie zamkniętym, albo też nawet chłodzenie skraplacza powietrzem [17]. Są to rozwiązania termodynamicznie nieco mniej efektywne, ale doskonale znane i sprawdzone. W wielu przypadkach jednak nie będzie konieczne ich stosowanie, wystarczy odpowiednie dostosowanie projektu układu otwartego. W przypadku elektrowni chłodzonych wodą morską sprowadzać się to będzie np. do poboru wody z większej odległości od brzegu (a więc mniej podatnej na nagrzewanie), albo też do zwiększenia przepływu wody (co zmniejszy przyrost temperatury). W żadnym wypadku jednak zbyt wysokie temperatury otoczenia nie doprowadzą do braku możliwości zastosowania technologii jądrowych.

Elektrownie jądrowe nie mogą elastycznie zmieniać mocy

Większość elektrowni jądrowych pracuje jako instalacje podstawowe – pracując zasadniczo nieprzerwanie przez cały okres kampanii paliwowej (tj. pomiędzy przeładunkami paliwa, typowo realizowanymi co 12, 18 lub nawet 24 miesiące) z mocą bliską znamionowej. Nie wynika to jednak z braku technicznej możliwości innego trybu pracy. Główną przyczyną takiego stanu rzeczy jest ekonomia: elektrownie jądrowe to instalacje o relatywnie wysokich kosztach stałych (wynikających z wysokiego kosztu inwestycyjnego) i bardzo niskich kosztach zmiennych (wynikających z taniego – w odniesieniu do jednostki energii – paliwa). W związku z tym najbardziej opłacalne jest ich maksymalne wykorzystanie. W większości krajów moc elektrowni jądrowych wpisuje się dobrze w zapotrzebowanie podstawowe na energię (tj. minimalną moc pobieraną z systemu niezależnie od pory dnia czy roku), stąd nie istnieje realna potrzeba częstych zmian mocy. Do tego w szczególnym przypadku Stanów Zjednoczonych, a więc kraju, w którym pracuje zdecydowanie najwięcej reaktorów, instalacje jądrowe nie mogą być sterowane zdalnie, a więc w szczególności nie mogą w sposób samoczynny reagować na zmiany obciążenia w systemie. Z tych faktów wypływa jednak często błędne przekonanie, że technologie jądrowe w ogóle nie są zdolne do pracy ze zmienną mocą, z czego miałyby wynikać ich niezdolność do efektywnej współpracy z odnawialnymi źródłami energii charakteryzującymi się szybkimi zmianami mocy w zależności od warunków otoczenia (siły wiatru czy zachmurzenia) [XIV].

Taki pogląd jest jednak błędny. Jest faktem, że obecnie stosowane technologie jądrowe, wykorzystujące parowy obieg roboczy, nie mają elastyczności tak wysokiej, jak instalacje gazowe oparte o silniki tłokowe wielkiej mocy albo turbiny gazowe. W szczególności elektrownie jądrowe nie są zdolne do bardzo szybkich rozruchów – rozruch typowego bloku ze stanu zimnego zajmuje około doby. Jednocześnie jednak pracujące elektrownie jądrowe jak najbardziej mogą dostawiać swoją moc do bieżących potrzeb systemowych w szerokim zakresie, a także realizować automatyczną regulację częstotliwości w systemie elektroenergetycznym. W rzeczywistości taka eksploatacja ma miejsce w szeregu krajów świata, szczególnie we Francji (gdzie udział elektrowni jądrowych jest tak wysoki, że nie ma innej możliwości) i w Niemczech (gdzie duży udział źródeł odnawialnych wymusza pracę regulacyjną wszystkich innych źródeł – zob. rys. 3) [19][20]. Dodatkowo w nowszych konstrukcjach reaktorów specjalnie zaplanowano możliwości pracy regulacyjnej, obniżając



Ryc. 3. Przykład dobowego przebiegu zmienności mocy wybranych niemieckich bloków jądrowych [20]

minimum techniczne (czyli minimalną moc, przy której jednostka jest w stanie pracować w sposób ciągły) oraz podnosząc możliwą szybkość zmian mocy [20].

Nierozwiązany problem odpadów

Zagadnienie odpadów promieniotwórczych jest jednym z najczęściej poruszanych w debacie o zasadności stosowania energetyki jądrowej. W tym przypadku trudno jednoznacznie powiedzieć, że kwestia „nierozwiązania problemu” jest „mitem”, gdyż to stwierdzenie jest dość nieprecyzyjne. Szczególnie dlatego warto doprecyzować jaki jest aktualny stan tego zagadnienia.

Jest niezaprzeczalnym faktem, że energetyka jądrowa produkuje bardzo specyficzny typ odpadów w postaci odpadów promieniotwórczych. Jest także faktem, że jakkolwiek większość (pod względem masy/objętości) z odpadów klasyfikowanych jako promieniotwórcze nie odbiega istotnie od odpadów promieniotwórczych pochodzących z innych dziedzin działalności człowieka, istnieje szczególna kategoria długożyciowych odpadów wysokoaktywnych, czyli przede wszystkim wypalonego paliwa jądrowego. Tego rodzaju materiały, bez żadnych osłon, byłyby śmiertelnie niebezpieczne dla przebywających w pobliżu organizmów żywych, przede wszystkim z uwagi na wysoką emisję promieniowania. Drugim problemem jest czas, przez jaki odpady zachowują wysoką aktywność, ponieważ powrót do poziomu porównywalnego ze świeżym paliwem potrwa około 100 tysięcy lat. Z drugiej strony są pewne cechy pozytywne. Przede wszystkim takich odpadów jest, w porównaniu do odpadów generowanych przez inne technologie energetyczne, bardzo mało. Typowa instalacja o mocy elektrycznej 1000 MW z reaktorem chłodzonym wodą wytwarza 30-50 ton wypalonego paliwa rocznie. Według szacunków Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej do roku 2008 powstało między 230-250 tys. ton wypalonego paliwa [21].

Po drugie wpływ odpadów wytwarzanych w elektrowni jądrowej ogranicza się do emisji promieniowania, które bardzo łatwo zablokować warstwą materiału nieprzepuszczającego promieniowanie gamma, np. betonu. Pozostaje jednak kwestia fizycznego składowania takich odpadów przez bardzo długi czas.

Wypalone paliwo może być przedmiotem składowania w całości, może jednak zostać też poddane przeróbce. Przeróbka ma na celu odzyskanie użytecznych materiałów rozszczepialnych (nieużytego uranu oraz wytworzonego plutonu), a także separację izotopów wysokoaktywnych i długożyciowych od pozostałych. Taki proces pozwala na zmniejszenie objętości odpadów przeznaczonych do długoterminowego składowania. Przy zastosowaniu współczesnych technologii przeróbki, z tony wypalonego paliwa powstaje około 0,4 m³ odpadu wysokoaktywnego w postaci zwitryfikowanej (czyli stopionej w blok ze specjalnym gatunkiem szkła) [21], co daje 12–20 m³ rocznie dla instalacji o mocy 1000 MW.

Oprócz odpadów wysokoaktywnych, w elektrowni jądrowej powstają także odpady nisko- i średnioaktywne. Ich ilość silnie zależy od typu reaktora. Dla najpopularniejszych bloków z reaktorami wodnymi ciśnieniowymi (PWR) jest to łącznie ok. 250 m³ rocznie dla instalacji o mocy 1000 MW [21].

Współcześnie panuje konsensus, iż ostatecznym sposobem składowania odpadów wysokoaktywnych (oraz długożyciowych odpadów średnioaktywnych) powinno być umieszczenie ich w głębokim (powyżej 250 m pod powierzchnią terenu) podziemnym składowisku geologicznym, położonym w stabilnych formacjach skalnych i w tym sensie kwestia jest rozwiązana [22]. Tu niestety pojawia się największy problem, który wykracza poza technologię – a mianowicie polityczna decyzja o lokalizacji i budowie składowiska. Większość krajów odkłada tę decyzję na przyszłość, co jest tym

łatwiejsze, że objętości składowanych odpadów nie przysparzają praktycznych problemów. Jedynie Finlandia jest krajem bliskim ukończenia swojego ostatecznego składowiska odpadów wysokoaktywnych z energetyki jądrowej. W pozostałych krajach, paliwo po okresie kilkuletniego przechowywania w przyreaktorowych basenach, transportowane jest do składowisk średnioterminowych lub składowane jest w suchych pojemnikach na terenie samych elektrowni (tak jest w przypadku USA). Pod tym względem można zatem uznawać zagadnienie za aktualnie nierozwiązane.

Krótkożyłowe odpady średnioaktywne oraz odpady niskoaktywne składa się w składowiskach naziemnych lub płytkich składowiskach podziemnych, na głębokościach rzędu kilkudziesięciu metrów, które istnieją już w wielu krajach - dla potrzeb energetyki jądrowej w Czechach, Finlandii, Francji, Hiszpanii, Holandii, Japonii, Szwecji, USA i Wielkiej Brytanii [22]. Takie same (albo te same) instalacje wykorzystywane są do składowania odpadów promieniotwórczych wytwarzanych przez inne branże.

Warto wspomnieć, że jakkolwiek procesu rozpadu promieniotwórczego produktów rozszczepienia i ich pochodnych zatrzymać się nie da, istnieją możliwości przyspieszenia go w odniesieniu do niektórych składników wypalonego paliwa. Niektóre rodzaje reaktorów IV generacji mogłyby być zdolne do prowadzenia takiego procesu. Prototypowe instalacje tego rodzaju zostały poddane próbom wiele lat temu, jednak do dziś nie zostały wdrożone do komercyjnej eksploatacji i nie jest to planowane w najbliższych latach. Obecnie ich wykorzystanie na istotną skalę pozostaje zagadnieniem hipotetycznym.

Podsumowanie

Zagadnienia związane z energetyką jądrową są skomplikowane pod względem naukowym i technicznym, a szczegółowa wiedza o nich nie jest powszechna. Jednocześnie energetyka jądrowa jest i będzie przedmiotem szerokiej debaty publicznej w krajach demokratycznych, szczególnie w czasie, gdy zmiany klimatyczne wymuszają szybką redukcję emisji gazów cieplarnianych wynikających ze spalania paliw kopalnych. Rzecz jasna technologie jądrowe – jak każdy wytwór techniki – nie są wolne od wad i ograniczeń, w tym wynikających bezpośrednio z praw fizyki i rozwiązań technicznych. Istotne jest jednak, by w dyskusji publicznej na ten temat posługiwać się sprawdzonymi informacjami mającymi oparcie w faktach – niestety, jak widać z przytoczonych tu przykładów, poziom merytoryczny debaty prowadzonej aktualnie w środkach masowego przekazu, w tym takich o ugruntowanej renomie, pozostawia nieco do życzenia.

Bibliografia

Bibliografia niniejszego artykułu została podzielona na dwie części w celu wyraźnego oddzielenia publikacji zawierających informacje merytoryczne od pozycji zawierających kwestionowane stwierdzenia – mity, których nie należy traktować jako źródeł jakiegokolwiek wartościowej wiedzy, ale które dla porządku zostają wymienione dla potwierdzenia faktycznego występowania w debacie publicznej.

Materiały źródłowe merytoryczne

- [1] *Chernobyl Accident 1986*. World Nuclear Association, Information Library, aktualizacja z czerwca 2019 [<https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/chernobyl-accident.aspx>]
- [2] *Frequently Asked Chernobyl Questions*. Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej, b.d. [<https://www.iaea.org/newscenter/focus/chernobyl/faqs>]
- [3] *Chernobyl: Assessment of Radiological and Health Impacts. 2002 Update of Chernobyl: Ten Years On*. Nuclear Energy Agency, OECD, Issy-les-Moulineaux 2002 [<https://www.oecd-neo.org/rp/chernobyl/>]
- [4] *Power Reactor Information System*. Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej, dostęp 21 listopada 2019 [<https://pris.iaea.org/PRIS/>]
- [5] M. Hyland, Risley, *Reactivity Coefficients in Nuclear Reactors*. Europhysics News vol. 18, nr 11/12, 1987, s. 133-137 [<https://www.europhysicsnews.org/articles/eprn/pdf/1987/11/eprn19871811p133.pdf>]
- [6] *Comparing Nuclear Accident Risks with Those from Other Energy Sources*. Nuclear Energy Agency, OECD, Issy-les-Moulineaux, 2010 [<https://www.oecd-neo.org/ndd/reports/2010/nea6861-comparing-risks.pdf>]
- [7] *Externalities of Electricity Generation*. World Nuclear Association, Information Library, aktualizacja z marca 2017 [<https://www.world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/externalities-of-electricity-generation.aspx>]
- [8] Barry W. Brook i in., *Why nuclear energy is sustainable and has to be part of the energy mix*. Sustainable Materials and Technologies, 1-2 (2014), s. 8-16, DOI 10.1016/j.susmat.2014.11.001
- [9] *The Nuclear Fuel Cycle*. Information Library, World Nuclear Association, aktualizacja z marca 2017 [<https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview.aspx>]
- [10] *Nuclear Power in a Clean Energy System*. Międzynarodowa Agencja Energetyczna, Paryż 2019

- [11] *Almost all U.S. nuclear plants require life extension past 60 years to operate beyond 2050*. U.S. Energy Information Administration, 8 grudnia 2014 r. [<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=19091>]
- [12] *Nonproliferation and arms control assessment of weapons-usable fissile material storage and excess plutonium disposition alternatives*. U.S. Department of Energy, Waszyngton 1997 [<https://www.osti.gov/biblio/425259-nonproliferation-arms-control-assessment-weapons-usable-fissile-material-storage-excess-plutonium-disposition-alternatives>]
- [13] *Plutonium*. Information Library, World Nuclear Association, aktualizacja z grudnia 2018 [<https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/plutonium.aspx>]
- [14] *Nuclear Weapons: Who Has What at a Glance*. Arms Control Association, aktualizacja z lipca 2019 [<https://www.armscontrol.org/factsheets/Nuclearweaponswhohaswhat>]
- [15] *Hot weather cuts French, German nuclear power output*. Reuters, 25 lipca 2019 [<https://www.reuters.com/article/us-france-electricity-heatwave/hot-weather-cuts-french-german-nuclear-power-output-idUSKCN1UK0HR>]
- [16] *Sweden's Ringhals-2 nuclear reactor offline due to high water temperature*. Reuters, 30 lipca 2018 [<https://www.reuters.com/article/sweden-nuclear-idAFL5NIUQ5X3>]
- [17] *Efficient Water Management in Water Cooled Reactors*. IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-2.6, Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej, Wiedeń 2012 [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PI569_web.pdf]
- [18] Jason Deign, *Why More Flexible Operation Won't Save US Nuclear Power Plants*. Serwis Greentechmedia, 30 października 2017 [<https://www.greentechmedia.com/articles/read/why-more-flexible-operation-wont-save-u-s-nuclear-plants>]
- [19] <https://www.greentechmedia.com/articles/read/why-more-flexible-operation-wont-save-u-s-nuclear-plants>
- [20] A. Lokhov, *Load-following with nuclear power plants*. NEA updates, NEA News 2011 – No. 29.2 [<https://www.oecd-neo.org/nea-news/2011/29-2/nea-news-29-2-load-following-e.pdf>]
- [21] *Technical and Economic Aspects of Load Following with Nuclear Power Plants*. Nuclear Energy Agency, OECD [<http://www.oecd-neo.org/ndd/reports/2011/load-following-npp.pdf>]
- [22] *Estimation of Global Inventories of Radioactive Waste and Other Radioactive Materials*. IAEA-TECDOC-1591, Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej, Wiedeń 2007 [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1591_web.pdf]
- [23] *Storage and Disposal of Radioactive Waste*. Information Library, World Nuclear Association, aktualizacja z października 2018 [<https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/storage-and-disposal-of-radioactive-wastes.aspx>]
- Materiały zawierające kwestionowane stwierdzenia**
- [I] Piotr Pałys, *Czy Polakom grozi drugi Czarnobyl? Sytuacja na Słowacji może być groźna...* Świat Rolnika, 9 lipca 2019 [<https://swiatrolnika.info/informacje/6016-czy-polakom-grozi-drugi-czarnobyl-sytuacja-na-slowacji-moze-byc-grozna>]
- [II] Jadwiga Hereta, *Drugi Czarnobyl?* Tygodnik Zamojski, 11 czerwca 2008 r. [<http://www.tygodnikzamojski.pl/artykul/8442/drugi-czarnobyl.html>]
- [III] *Czy grozi nam drugi Czarnobyl? Ukraina ostrzega!* Fronda.pl, b.d. [<https://www.fronda.pl/a/czy-grozi-nam-drugi-czarnobyl-ukraina-ostrzega,70292.html>]
- [IV] „Nowy Czarnobyl” jest tylko kwestią czasu. Interia Tech, b.d. [<https://nt.interia.pl/technauka/news-nowy-czarnobyl-jest-tylko-kwestia-czasu,nId,2279321>]
- [V] *Litwini boją się drugiego Czarnobyla*. Portal Niezależna, 1 października 2019 [<https://niezalezna.pl/290573-litwini-boja-sie-drugiego-czarnobyla>]
- [VI] *Jest obawa o „drugi Czarnobyl”*. Wykupionych będzie 4 mln tabletek z jodem. Portal Warszawa w pigułce, 29 czerwca 2019 [<https://warszawawpigulce.pl/jest-obawa-o-drugi-czarnobyl-wykupionych-bedzie-4-mln-tabletek-z-jodem/>]
- [VII] Jakub Cęglarz, *Litwini kupują 4 mln tabletek jodu. Boją się „drugiego Czarnobyla”*. Portal Money.pl, 28 czerwca 2019 [<https://www.money.pl/gospodarka/litwini-kupuja-4-mln-tabletek-jodu-boja-sie-drugiego-czarnobyla-6396909505493121a.html>]
- [VIII] *Feministki i działaczki ekologiczne: świat odchodzi od energii jądrowej*. Portal Wirtualny Nowy Przemyśl, 18 czerwca 2011 [<https://www.wnp.pl/energetyka/feministki-i-dzialaczki-ekologiczne-swiat-odchodzi-od-energii-jadrowej,143338.html>]
- [IX] *Greenpeace: nie będziemy bronić niemieckich jądrowek*. Atom nie ma przyszłości [WYWIAD]. Portal Energetyka24, 26 września 2019 [<https://www.energetyka24.com/greenpeace-nie-bedziemy-bronic-niemieckich-jadrowek-atom-nie-ma-przyszlosci-wywiad>]

- [X] Mark Z. Jacobson, *The 7 reasons why nuclear energy is not the answer to solve climate change*. Leonardo DiCaprio Foundation, 20 czerwca 2019 r. [<https://www.leonardodicaprio.org/the-7-reasons-why-nuclear-energy-is-not-the-answer-to-solve-climate-change/>]
- [XI] Christoph von Eichhorn, *Bill Gates is wrong. Nuclear power will not save the climate. Beyond Chernobyl and Fukushima there's too much speaking against it*. The German Times, październik 2019 [<https://www.money.pl/gospodarka/wiadomosci/artykul/elektrownia-jadrowa-lekiem-na-zmiany-klimatu,58,0,2423098.html>]
- [XII] Witold Ziomek, *Elektrownia jądrowa lekiem na zmiany klimatu? Eksperci: Nie ma energii obojętnej dla środowiska*". Portal Money.pl, 3 grudnia 2018 [<https://www.money.pl/gospodarka/wiadomosci/artykul/elektrownia-jadrowa-lekiem-na-zmiany-klimatu,58,0,2423098.html>]
- [XIII] *Nieelastyczne elektrownie jądrowe nie mają czego szukać w systemie elektroenergetycznym*. Portal Gram w zielone, 5 maja 2017 [<http://gramwzielone.pl/trendy/26482/nieelastyczne-elektrownie-nie-maja-czego-szukac-w-systemie-energetycznym>]
- [XIV] *Schneider: po co Polsce elektrownia atomowa? Rozmowa Ewy Dryjańskiej, Krytyka Polityczna*, 30 grudnia 2014 [<https://krytykapolityczna.pl/swiat/schneider-po-co-polsce-elektrownia-atomowa/>]



Hodowanie kryształu azotku galu (GaN) na szafirze dzięki odłożonej w niskiej temperaturze warstwie buforowej i stworzenie GaN typu p poprzez domieszkowanie i następnie napromieniowywanie wiązką niskoenergetycznych elektronów

Wykład noblowski Hiroshi Amano

(Department of Electrical Engineering and Computer Science, Venture Business Laboratory, Akasaki Research Center, Nagoya University, Japan), 8 grudnia 2014

Opublikowany w języku polskim za zgodą Nobel Foundation

©The Nobel Foundation 2017

Przekład opublikowany przy wsparciu finansowym Fundacji Pro-Physica

Streszczenie

Jest to osobista historia jednego z japońskich badaczy zaangażowanych w rozwijanie metod hodowania kryształów azotku galu (GaN) na podłożu szafirowym, torujących drogę do stworzenia inteligentnej telewizji i układów wyświetlaczy wykorzystujących niebieskie diody LED. Najważniejsza część pracy została wykonana od połowy do końca lat osiemdziesiątych XX w. Przypomiane zostaną okoliczności, w jakich autor prowadził badania i ciąg wydarzeń, w wyniku którego powstała technologia umożliwiająca hodowanie kryształów GaN i stworzenie GaN typu p .

1. Motywacja moich badań nad niebieskimi diodami LED

Aby wyjaśnić znaczenie diod LED emitujących niebieskie światło, dobrze jest podać przykłady tego, jak zmieniły one nasze życie. Przenośne automaty do gier, telefony komórkowe i smartfony są urządzeniami dobrze znanymi, zwłaszcza ludziom młodym. Pierwszy na świecie przenośny automat do gier pojawił się w roku 1979 [1], a telefony komórkowe stały się dostępne komercyjnie w roku 1984 [2]. Jednak aż do końca lat dziewięćdziesiątych wszystkie wyświetlacze tych urządzeń były monochromatyczne. Trzeba więc podkreślić, że młodsze pokolenie może obecnie cieszyć się przenośnymi automatami do gier, telefonami komórkowymi i smartfonami, które są w pełni wielobarwne, dzięki powstaniu niebieskich diod LED. Dziś ich zastosowania nie ograniczają się tylko do wyświetlaczy. W połączeniu z materiałami luminescencyjnymi (luminoforami) mogą one działać jako źródła światła białego [3] i są używane także jako oświetlenie w ogóle (np. jako latarki – przyp. red.).

W tym wstępie pozwolę sobie krótko wyjaśnić dlaczego ja sam zainteresowałem się rozwojem niebieskich

diod LED. Dwa działające w branży komputerowej wielkie koncerny: Microsoft i Apple zostały stworzone przez Billa Gatesa i Paula Allena w roku 1975 [4] oraz przez Steve Jobsa i Stephena Wozniaka w roku 1976 [5]. Od tego czasu rynek komputerów, a zwłaszcza osobistych systemów komputerowych (tzw. PC-tów) rozwinął się niepomiaralnie [6]. Kiedy te koncerny powstawały w powszechnym użyciu, w niemal wszystkich wyświetlaczach i systemach telewizji, były rury Brauna (rury katodowe). Były one zbyt duże, by można je było wykorzystać w laptopach. Wykorzystywanie zaś ich w telewizji miało tę wadę, że telewizory były zbyt duże, by wygodnie się mieścić w małych japońskich domach. Kiedy więc zobaczyłem w roku 1982 niebieskie diody LED, oparte na azotkach, jako temat możliwej do wykonania w Laboratorium im. Asakiego uniwersytetu w Nagoi pracy magisterskiej, bardzo się ucieszyłem. Powód jakim kierowałem się wybierając to laboratorium był taki, że jako naiwny magistrant sądziłem, iż problem opartych na azotkach niebieskich diod LED będzie łatwy do zrozumienia. Pomyślałem sobie, że jeśli uda mi się skonstruować niebieskie diody LED, przyczynię się do polepszenia jakości życia ludzi, pomagając stworzyć naścienne układy telewizyjne i eleganckie systemy

komputerów osobistych, tj. że zmienię świat. Nie byłem wtedy, oczywiście, świadom stopnia trudności tego problemu.

2. Trudności w stworzeniu opartych na GaN diod LED wysokiej jakości

Jeśli próbujemy wyhodować kryształ GaN z roztworu, potrzebujemy bardzo wysokiego ciśnienia i wysokiej temperatury - takich, jakie są konieczne do wyhodowania diamentu, lub nawet jeszcze wyższych [7,8]. Musimy więc wykorzystać reakcję chemiczną aby zredukować potrzebne do wyhodowania kryształu GaN ciśnienie i temperaturę. Musimy także użyć obcych podłoży. Aby zsyntetyzować GaN użyliśmy [9] amoniaku jako źródła azotu, ponieważ cząsteczki azotu są obojętne i nie wchodzi aktywnie w reakcje z metalicznym galem. Amoniak zaś jest bardzo aktywny w temperaturze około 1000°C, przy której można zsyntetyzować związek GaN. Paleta materiałów, które mogły być wykorzystane jako podłoże, była zatem ograniczona.

Szafir był jednym z najbardziej obiecujących materiałów mogących służyć za podłoże, gdyż jest stabilny w wysokich temperaturach i nie reaguje zbyt mocno z amoniakiem [10]. Jednak najpoważniejszym problemem przy wykorzystywaniu szafiru jest duże niedopasowanie struktur krystalicznych jego i azotku galu, dochodzące do 16% na każdą z krystalicznych płaszczyzn (0001). Niektórzy ludzie uważają, że hodowanie heteroepitaksjalne wymaga, by niedopasowanie nie było większe niż kilka procent [11]; szesnastoprocentowe niedopasowanie powinno więc czynić takie hodowanie niemożliwym.

W roku 1971 profesor Jacques Pankove otrzymał pierwsze niebieskie diody LED oparte na azotku galu. Były to diody typu metal-izolator-półprzewodnik (MIS, od ang. metal-insulator-semiconductor), wytworzone za pomocą epitaksji z wodoru w fazie gazowej (HVPE), na którą składała się reakcja chemiczna galu i chlorku wodoru prowadząca do powstania chlorku galu (GaCl) i amoniaku [12]. W owym czasie uważano, że z powodu samokompensacji nie jest możliwe wyhodowanie azotku galu typu *p* [13]. Samokompensacja polega na tym, że jeśli domieszkujemy akceptorami jako zanieczyszczeniami, to samorzutnie wygenerowana zostanie taka sama liczba donorów – nieobsadzonych stanów elektronowych w atomach azotu, które skompensują domieszkowe akceptory.

Innym powodem, dla którego jasne niebieskie diody LED są tak trudne do uzyskania, wiąże się z czułością ludzkiego oka. Jego czułość na czyste niebieskie światło wynosi tylko 3% czułości na światło żółto-zielone (o długości fali 555 nm) [14].

3. Sytuacja finansowa naszego laboratorium w połowie lat osiemdziesiątych i trudności w hodowaniu azotku galu na podłożu szafirowym

Pozwolę sobie wrócić do wczesnych lat osiemdziesiątych. Profesor Isamu Akasaki¹ swoje badania nad azotkami rozpoczął w roku 1967 [15] w Matsushita Research Institute w Tokio (MRTI), obecnie Panasonic od badania sproszkowanego azotku aluminium (AlN). Następnie jego zespół przystąpił do hodowania kryształów azotku galu (GaN) metodą epitaksji z wiązki molekularnej (MBE) i zaobserwował ich luminescencję katodową. Jego zespół przerzucił się później na metodę HVPE i w końcu lat siedemdziesiątych zdołał uzyskać niebieskie diody LED typu MIS o konfiguracji flip-chip [16]. Niestety instytut MRIT podjął decyzję o zarzuceniu badań prowadzonych nad niebieskimi diodami LED opartymi na azotku galu, więc profesor Akasaki przeniósł się w roku 1981 na uniwersytet w Nagoi. Ja dołączyłem do jego laboratorium jako magistrant w roku 1982.

Problem z wytworzeniem niebieskich diod LED typu MIS przy użyciu metody HVPE polegał na tym, że wzrost kryształu był tak szybki, iż utrudniał kontrolowanie grubości warstwy izolującej w strukturze typu MIS. Z tego powodu nie dawało się kontrolować roboczego napięcia. Profesor Akasaki zauważył także trudności w hodowaniu azotku galu metodą MBE. Postanowił więc przy hodowaniu kryształów azotku galu posłużyć się epitaksją z metalo-organicznej fazy gazowej (MOVPE). Ówczesne środki finansowe przeznaczone na badania naszego laboratorium były niewystarczające [17]. Ponadto nie było dostępnej komercyjnie aparatury przeznaczonej specjalnie do hodowania azotku galu metodą MOVPE. W związku z tym nie było jak nabyć takiej aparatury. Z tego to powodu w roku 1982 pewien starszy ode mnie o dwa lata magistrant sam zbudował pierwszy reaktor MOVPE typu pionowego [18]. W tamtym czasie szybkość przepływu (gazu w tym reaktorze – przyp. tłum.) była tak mała, że nie udawało się wyhodować azotku galu wykorzystując wodór jako nośnik gazowy. Próbowałem zobrazować charakter przepływu wykorzystując reakcję zachodzącą pomiędzy $TiCl_4$ i H_2O do otrzymania sproszkowanego TiO_2 i przekonałem się, że szybkość przepływu byłaby zbyt mała, gdybym jako nośnika gazowego użył wodoru.

W roku 1984 do laboratorium profesora Akasakiego dołączył doktorant, dziś doktor, Yasuo Koide i rozpoczął badania nad AlGaIn i AlN, podczas gdy ja skupiałem się na hodowaniu azotku galu. Z doświadczenia wiedziałem, że jeśli w reaktorze użyję starego zestawu rur doprowadzających gaz, szybkość przepływu będzie za mała.

1. Który otrzymał nagrodę Nobla wraz z autorem tego artykułu.

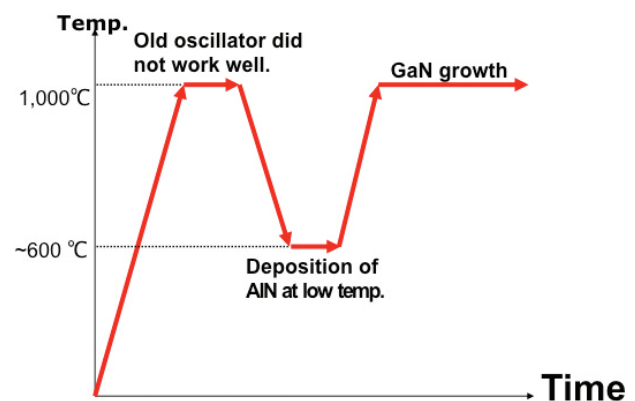
Połączyłem więc wszystkie strugi gazu w jedną i zwiększyłem szybkość przepływu z kilku centymetrów na sekundę do czterech metrów na sekundę [19]. Udało mi się wtedy wreszcie wyhodować kryształ azotku galu na podłożu szafiryowym, mimo iż korzystałem z wodoru jako nośnika gazowego. Powierzchnia jego była jednak dość szorstka, a jakość kiepska.

Wielokrotnie próbowałem wyhodować kryształ azotku galu zmieniając temperaturę, szybkość przepływu, rodzaj nośnika gazowego, konfigurację rur, kształt susceptora (pochłaniacza) i inne parametry. Wyhodować wysokiej jakości kryształu GaN o gładkiej powierzchni jednak nie mogłem. Problem z szesnastoprocentowym niedopasowaniem był zbyt trudny do przewyższenia dla magistranta. Prawie dwa lata mięły mi więc bez żadnego sukcesu.

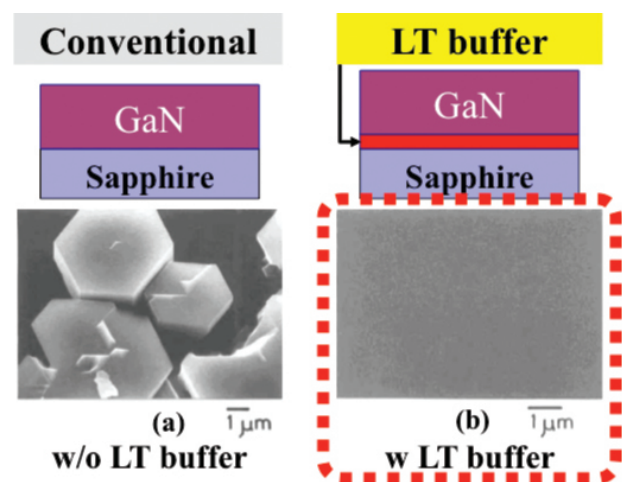
4. Warstwa buforowa odkładana w niskiej temperaturze

W lutym 1985 roku kończyłem już niemal moje studia magisterskie. Pewien student z zagranicy i ja zdecydowaliśmy się rozpocząć program studiów doktoranckich od kwietnia. Podczas gdy wszyscy inni japońscy studenci robili dyplomy, ja samotnie wykonywałem doświadczenia. W tym samym czasie dr Koide hodował azotki zawierające glin (Al), takie jak AlN, AlGaIn, a ja hodowałem kryształy azotku galu. Gdy porównaliśmy jego zawierające glin kryształy z moimi kryształami GaN, powierzchnie otrzymywanych przez niego kryształów wydawały się gładkie. Pomyślałem więc, że związek AlN może być wykorzystany do skutecznego hodowania kryształów GaN o lepszej morfologii powierzchni. Spróbowałem więc wyhodować cienką warstwę AlN na podłożu szafiryowym tuż przed rozpoczęciem hodowania GaN. Wiedziałem, że temperatura, w której zachodzi epitaksja AlN powinna być wyższa niż 1200° C. Ponieważ stary oscylator indukcyjny nie działał należycie, nie mogłem spowodować, żeby temperatura osiągnęła 1200° C. Nagle przypomniałem sobie jednak pewną rozmowę toczoną w laboratorium. Doktor Sawaki, który był wtedy profesorem nadzwyczajnym, tłumaczył proces hodowania fosforu boru (BP) na krzemie (Si) [20], których niedopasowanie też jest duże, rzędu 16%. Wyjaśniał skuteczność wstępnego przepływu fosforu jako gazu-źródła tuż przed rozpoczęciem hodowania kryształu BP i wspominał, że atomy fosforu wydają się odgrywać rolę zarodków. Wyobraziłem więc sobie, że jeśli dostarczę małą ilość AlN przy niskiej temperaturze, związek ten powinien stanowić zarodki. Sekwencja temperatur w trakcie hodowania kryształu jest pokazana na ryc. 1. Zwykle w trakcie wzrostu kryształu zaglądałem do wnętrza reaktora aby zobaczyć, czy na pod-

łożu jest ślad interferencyjny, dzięki któremu mógłbym sprawdzić, czy gaz-źródło dopływał prawidłowo. Wtedy jednak byłem zmęczony i zapomniałem o zrobieniu tego. Gdy potem wydobylem próbkę z reaktora, zobaczyłem, że ma ona doskonale gładkie i przezroczyste powierzchnie. Pomyślałem "O!, popełniłem jakiś błąd. Zapomniałem doprowadzić trójmetylogal ($\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$)!" Jednak po przemyśleniu sprawy uznałem, że błędu nie zrobiłem. Zbadałem więc powierzchnię pod mikroskopem Nomarskiego i stwierdziłem, że udało mi się wyhodować atomowo płaski kryształ GaN pokazany na ryc. 2. Idąc za radą profesora Akasakiego zbadałem też inne właściwości (otrzymanego kryształu – przyp. red.), krystaliczne, optyczne i elektryczne, które wszystkie, jak się okazało, przewyższały znane z wcześniejszych doniesień. Proces, którym się posłużyłem jest znany jako *technologia warstwy buforowej odkładanej w niskiej temperaturze*. Jest ona (obecnie – przyp. red.) wykorzystywana przez licznych badaczy na całym świecie [21–37].



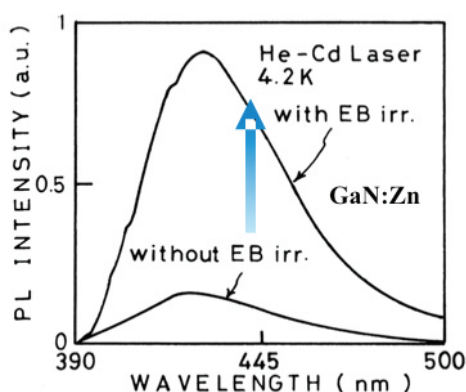
Ryc. 1. Sekwencja temperatur susceptora (pochłaniacza) podczas hodowania kryształu azotku galu na podłożu szafiryowym przy użyciu buforowej warstwy AlN odłożonej w niskiej temperaturze



Ryc. 2. Otrzymywany za pomocą mikroskopu elektronowego obraz kryształu GaN na szafiryowym podłożu (0001): a) bez oraz b) z odłożoną w niskiej temperaturze buforową warstwę AlN [19]

5. Uzyskanie kryształu GaN typu *p*

Następnym naszym zadaniem było otrzymanie kryształu GaN typu *p*. Wielokrotnie hodowałem domieszkowany cynkiem (Zn) kryształ GaN, jednak wszystkie otrzymywane próbki wykazywały dużą oporność lub były typu *n*. W roku 1987, w trakcie realizowania programu mojego doktoratu, zobserwowałem bardzo silną emisję ekscytonów z takiego domieszkowanego cynkiem azotku galu wyhodowanego na płaszczyźnie *c* lub *a* szafiru w kriogenicznych temperaturach [22]. Zmierzyłem także potencjał deformacji takiego kryształu. Wyniki te bardzo mnie podekscytowały, więc próbowałem je przedstawić na dorocznym jesiennym posiedzeniu Japońskiego Towarzystwa Fizyki Stosowanej odbywającym się na uniwersytecie w Nagoi. Ze zdziwieniem zobaczyłem jednak, że moje wystąpienie zgromadziło w sali tylko cztery osoby: przewodniczącego sesji, profesora Akasakiego, jeszcze jednego uczestnika i mnie. W tamtym okresie pozostali badacze byli zainteresowani innymi złożonymi półprzewodnikami, takimi jak GaAs i ZnSe, a ci którzy badali azotek galu stanowili mniejszość. Także w roku 1988, podczas stażu stanowiącego część programu moich studiów doktoranckich odkryłem, iż spowodowana obecnością cynku (Zn) niebieska emisja zostaje nieodwracalnie wzmocniona podczas pomiarów katodoluminescencyjnych, tak jak to pokazuje wykres na ryc. 3 [38]. Nazwałem więc ten proces kuracją przez napromieniowywanie wiązką niskoenergetycznych elektronów (LEEBI). Nawet jednak po takiej kuracji, domieszkowany cynkiem azotek galu nie wykazywał przewodnictwa typu *p*. Zjawisko to było już wcześniej opublikowane przez badaczy radzieckich [39].



Ryc. 3. Zmiana natężenia niebieskiej fotoluminescencji wskutek napromieniowania domieszkowanego cynkiem azotku galu wiązką elektronów

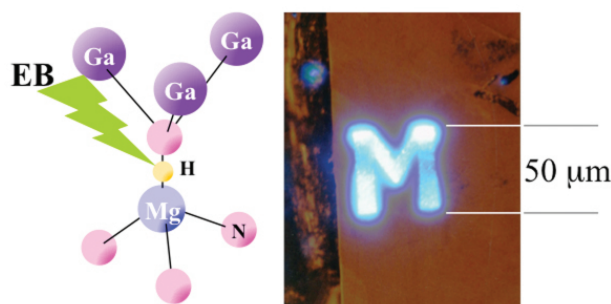
W roku 1989 zostałem zatrudniony jako pracownik naukowy w laboratorium Akasakiego uniwersytetu w Nagoi. Gdy studiowałem podręcznik *Bonds and bands in semiconductors* (Wiązania i pasma w nadprzewodnikach) napisany przez J.C. Phillipsa [40] zamieszczone w nim

wykresy wydały mi się szczególnie interesujące. Pokazywały, że w aktywowaniu akceptorów od cynku lepszy jest magnez (Mg). Źródło magnezu, bis-Cp₂Mg, było jednak za drogie. Błagałem więc profesora Akasakiego, żeby mi pozwolił zakupić jedno. Profesor łaskawie udzielił mi zgody i po wielomiesięcznym oczekiwaniu na jego dostarczenie mogłem wraz z moim partnerem w laboratorium, Masahiro Kito, który był wtedy magistrantem, zacząć hodować wiele próbek domieszkowanych magnezem.

Chciałbym tu wspomnieć pochodzącą z 1972 roku pionierską pracę dr. H.P. Maruski [41], który w owym czasie był studentem na uniwersytecie Stanforda. Udało mu się wytworzyć, przy użyciu domieszkowanego magnezem azotku galu, pierwsze na świecie fioletowe diody LED typu MIS.

Wszystkie nasze domieszkowane magnezem próbki GaN, gdy były badane takimi, jakie zostały wyhodowane, miały dużą oporność. Jednak po kuracji LEEBI niektóre próbki wykazywały zachowanie typu *p*, gdy były poddawane pomiarom za pomocą gorących sond. Wiedziałem, że takie sondy nie są zbyt godne zaufania i że nikt mi nie uwierzy, że uzyskane zostało przewodnictwo typu *p*. Dlatego pan Kito poddał próbki pomiarom efektu Halla i wtedy ostatecznie uznaliśmy, że uzyskaliśmy po raz pierwszy na świecie kryształy azotku galu typu *p*. Wytworzyliśmy także działające jak złącze *p-n* ultrafioletowe diody LED, pokazane na ryc. 4 [42–45]. Wkrótce potem zespół dr. Shuji Nakamury również wykorzystał kurację LEEBI [46, 47]. W 1992 roku dr. Nakamura ogłosił, że można otrzymać azotek galu typu *p* poprzez zwykłe termiczne wyżarzanie [48]. Dziś niemal wszystkie koncerny produkujące diody LED stosują termiczne wyżarzanie.

Profesor J.A. van Vechten [49] zauważył jako pierwszy, że do mechanizmu przewodnictwa typu *p* przyczynia się desorpcja wodoru w pobliżu akceptorów magnezowych, jak pokazano na ryc. 4. Zostało to potwierdzone eksperymentalnie przez dr. Nakamurę [48].



Ryc. 4. Schematyczny rysunek aktywacji pasywowanego magnezem wodoru w azotku galu [48] oraz charakter elektroluminescencji diody LED, w której tylko obszar tworzący literę „M” został napromieniowany wiązką elektronów [41]

6. Próby wyhodowania kryształu InGaN

Dla nas następnym ważnym zadaniem było uzyskanie prawdziwej niebieskiej emisji przy wykorzystaniu przejść pomiędzy pasmami. Spróbowaliśmy więc wyhodować kryształ InGaN. Było to jednak także bardzo trudne, więc udało nam się jedynie wyhodować kryształ, w którym ind stanowił mniej niż 1,7% składu [50].

W roku 1989 zespół dr. Takashi Matsouki z NTT doniósł, że udało im się wyhodować kryształ InGaN przy bardzo wysokim stężeniu dostarczanego amoniaku i jednoczesnym wykorzystywaniu azotu jako gazu-nośnika [51]. Ogłosili też, że uzyskali niebiesko-fioletową fotoluminescencję o temperaturze 77 K, co wskazywało na występowanie indu wśród składników. W temperaturze pokojowej obserwowana była żółta emisja (emisja światła żółtego – przyp. red.) z głębokich poziomów. Mechanizm włączania indu do kryształu GaN został wyjaśniony przez profesora Akinori Koukitu i innych [53,54] za pomocą analizy termodynamicznej.

Wreszcie, łącząc technologię hodowania wysokiej jakości kryształów, wykorzystującą warstwę buforową odkładaną w niskiej temperaturze, z technologią hodowania kryształów typu *p* i technologią hodowania InGaN, koncern Nichia zdołał w roku 1993, jako pierwszy na świecie skomercjalizować niebieskie diody LED typu podwójnej heterostruktury na kryształach InGaN [55]. Koncern ten wytworzył też w roku 1995 diody LED o strukturze pojedynczej studni kwantowej [56], które są także ważnym elementem technologii zwiększającej wydajność azotkowych diod LED, ponieważ bardzo wąska studnia kwantowa tłumí kwantowy efekt Starka [57], zwiększając tym samym prawdopodobieństwo zajęcia przejścia [58].

7. Przyczynianie się niebieskich diod LED typu InGaN do oszczędzania energii

Kończąc pozwolę sobie wytłumaczyć, jak diody LED typu InGaN przyczyniają się do poprawy sytuacji z energią elektryczną, zwłaszcza w Japonii. Wielu ludzi pamięta wielkie trzęsienie ziemi we wschodniej części Japonii z roku 2011 i stopienie się w jego wyniku reaktorów elektrowni jądrowych. Obecnie w Japonii nie działa żaden z 48 wytwarzających energię elektryczną reaktorów [59]. Reaktory te przed rokiem 2011 wytwarzały 30% japońskiej energii elektrycznej. Musimy więc znaleźć jakiś sposób przystosowania się do 30% spadku wytwarzania mocy. Amerykański Departament Energii oszacował, że aby zredukować w Stanach zużycie energii elektrycznej o 7%, trzeba będzie do roku 2030 zastąpić ponad 70% żarówek układami oświetleniowymi opartymi na technologii LED [60]. W przypadku Japonii oczekuje się, iż rozpowszechnienie się na rynku układów oświetlenio-

wych typu LEDE będzie znacznie szybsze. Jedna z instytucji badawczych działających w Japonii przewiduje, że do roku 2020 ponad 70% wszystkich systemów oświetleniowych zostanie zastąpione systemami LED [61].

Co ważniejsze, możemy zbudować kompaktowe układy oświetleniowe i dostarczać młodzieży, zwłaszcza dzieciom, mieszkającej w miejscach odległych bez dostępu do elektryczności. Rycina 5 pokazuje udostępniony przez NASA widok Ziemi w nocy [62]. Korzystając z układu oświetleniowego typu LED zaopatrzonego w panel baterii słonecznych i baterię, dzieci będą mogły czytać książki i uczyć się w nocy, tak jak to pokazują okienka zamieszczone na ryc. 5.



Ryc. 5. Obraz Ziemi nocą (udostępnione przez NASA [62])

Na koniec chciałbym się zwrócić do młodszych badaczy. Kiedy stworzyliśmy niskotemperaturową (LT) warstwę buforową byłem 24-letnim magistrantem, a kiedy pierwszy raz uzyskaliśmy kryształ GaN typ *p* miałem 28 lat. Oczywiście miałem szczęście prowadzić badania pod zakomitą opieką profesora Akasakiego i wielu wybitnych kolegów. Dziś aparatura i finansowanie są o wiele lepsze niż w latach osiemdziesiątych XX w. Chciałbym więc widzieć młode pokolenie atakujące zagadnienia, które przyczynią się do poprawy warunków ludzkiego życia. Czyniąc tak młodzi mogą stworzyć dla siebie samych znacznie lepszy świat.

Podziękowania

Chciałbym podziękować następującym osobom: Isamu Akasaki, Nobuhiko Sawaki, Kazumasa Hiramatsu, Shigeru Tamura, Atsushi Shimizu, Yasuo Koide, Kenji Itoh, Takahiro Tozawa, Masahiro Kito, Kouichi Naniwae; dawnym studentom Laboratorium Akasakiego Uniwersytetu w Nagoi: Satoshi Kamiyama, Tetsua Takeuchi i Motoaki Iwaya; dawnym studentom Laboratorium Akasakiego i Amano Uniwersytetu w Meijo: Masahito Yamaguchi, Yoshio Honda, Guangju Ju, Kaddour Lekhal oraz Siyoung Bae; studentom Laboratorium Amano,

Yamaguchi i Hondy uniwersytetu w Nagoi: Aki Eguchi, Masako Yasui, Yoko Tatsumi, Tomoko Hosoe, Michinari Hamaguchi, Hideyo Kunieda, Youshihito Watanabe, Yasuo Suzuoki i Seiichi Matsuo; pracownikom Uniwersytetu w Nagoi: Koichi Ota, Naok Shibata, Nobuo Okazaki, Katsushide Manabe, Michinari Sassa, Hisaki Kato, Masahiro Kotaki i Tadashi Arashima; pracownikom Toyoda Gosei: Masafumi Hashimoto, Akira Hirano, Masamichi Ipponmatsu, Cyril Pernot, Hidemasa Tomosawa i Toshihiko Kai, a także pracownikom UVCR i Nikkisa.

Na koniec chciałem wyrazić serdeczną wdzięczność moim rodzicom Yoshiko i Tatsuji Amano, memu bratu Takashi Amano i mojej rodzinie: Kasumi, Aya i Mitsuru Amano.

LITERATURA

- http://gaming.wikia.com/wiki/History_of_handheld_game_consoles
- http://en.wikipedia.org/wiki/Mobile_phone
- P. Schlotter, R. Schmidt and J. Schneider, *Appl. Phys.*, **A64** (1997) 417.
- <http://news.bbc.co.uk/2/hi/business/5085630.stm>
- <http://www.notablebiographies.com/Ho-Jo/Jobs-Steve.html>
- <http://www.maximizingprogress.org/2012/03/platform-wars-history-of-emergent.html>
- S. Porowski and I. Grzegory, *J. Cryst. Growth*, **178** (1997) 174.
- F. P. Bundy, H. T. Hall, H. M. Strong and R. H. Wentorf, *Nature*, **176** (1955) 51.
- W. C. Johnson, J. B. Parsons and M. C. Crew, *J. Phys. Chem.*, **6** (1932) 7.
- H. P. Maruska and J. J. Tietjen, *Appl. Phys. Lett.*, **15** (1969) 327.
- For example, F. C. Frank and J. H. van der Merwe, *Proc. R. Soc. London, Ser. A* **198** (1949) 205.
- J. I. Pankove, E. A. Miller, D. Richman and J. E. Berkeleyheiser, *J. Lumin.*, **4** (1971) 63.
- For example, G. Mandel, *Phys. Rev. A*, **134** (1964) 1073.
- For example, photopic $V(\lambda)$ modified by Vos (1978) [http://www.cvrl.org/Copyright © 1995"=2015 Color and Vision Research Labs](http://www.cvrl.org/Copyright%20%26%201995%3D2015%20Color%20and%20Vision%20Research%20Labs).
- I. Akasaki and M. Hashimoto, *Solid State Commun.*, **5** (1967) 851.
- Y. Ohki, Y. Toyoda, H. Kobayashi and I. Akasaki, *Inst. Phys. Conf. Ser.*, **63** (1982) 479.
- For example, <http://www.mext.go.jp/english/whitepaper/1302651.htm>
- M. Hashimoto, H. Amano, N. Sawaki and I. Akasaki, *J. Cryst. Growth*, **68** (1984) 163.
- H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki and Y. Toyoda, *Appl. Phys. Lett.*, **48** (1986) 353.
- T. Nishinaga and T. Mizutani, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **14** (1975) 753.
- H. Amano, I. Akasaki, K. Hiramatsu, N. Koide and N. Sawaki, *Thin Solid Films*, **163** (1988) 415.
- H. Amano, K. Hiramatsu and I. Akasaki, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **27** (1988) L1384.
- I. Akasaki, H. Amano, Y. Koide, K. Hiramatsu and N. Sawaki, *J. Cryst. Growth*, **98** (1989) 209.
- H. Amano, T. Asahi and I. Akasaki, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **29** (1990) L205.
- K. Hiramatsu, H. Amano, I. Akasaki, H. Kato, N. Koide and K. Manabe, *J. Cryst. Growth*, **107** (1991) 509.
- K. Hiramatsu, S. Itoh, H. Amano, I. Akasaki, N. Kuwano, T. Shiraishi and K. Oki, *J. Cryst. Growth*, **115** (1991) 628.
- N. Kuwano, T. Shiraishi, A. Koga, K. Oki, K. Hiramatsu, H. Amano, K. Itoh and I. Akasaki, *J. Cryst. Growth*, **115** (1991) 381.
- S. Nakamura, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30** (1991) 1620.
- H. Murakami, T. Asahi, H. Amano, K. Hiramatsu, N. Sawaki and I. Akasaki, *J. Cryst. Growth*, **115** (1991) 648.
- J. N. Kuznia, M. A. Khan, D. T. Olson, R. Kaplan and J. Freitas, *J. Appl. Phys.*, **73** (1993) 4700.
- S. T. Kim, H. Amano, I. Akasaki and N. Koide, *Appl. Phys. Lett.*, **64** (1994) 1535.
- T. Sasaoka and T. Matsuoka, *J. Appl. Phys.*, **77** (1995) 192.
- Y.M. Le Vaillant, R. Bisaro, J. Oliver, O. Durand, J.Y. Duboz, S. Ruffenach-Clur, O. Briot, B. Gil and R.L. Aulombard, *Mater. Sci. Eng.*, **B50** (1997) 32.
- M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Yamaguchi, C. Wetzel, H. Amano and I. Akasaki, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37** (1998) L316.
- Y.M. Le Vaillant, R. Bisaro, J. Olivier, O. Durand, J-Y. Duboz, S. Ruffenach-Clur, O. Briot, B. Gil, and R.L. Aulombard, *J. Cryst. Growth*, **189/190** (1998) 282.
- Y. Kobayashi, T. Akasaki and N. Kobayashi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37** (1998) L1208.
- T. Ito, K. Phtsuka, K. Kuwahara, M. Sumiya, Y. Takano and S. Fuke, *J. Cryst. Growth*, **205** (1999) 20.
- H. Amano, I. Akasaki, T. Kozawa, K. Hiramatsu, N. Sawaki, K. Ikeda and Y. Ishii, *J. Lumin.*, **40-41** (1988) 121.
- G.V. Saporin, S.K. Obyden, M.V. Chukichev, S.J. Popov, *J. Lumin.* **31 & 32** (1984), 684.
- J. C. Phillips, *Bonds and Bands in Semiconductors*, 1st edition, Academic Press 1973.

41. H. P. Maruska, W. C. Rhines and D. A. Stevenson, *Mater. Res. Bull.*, **7** (1972) 777.
42. H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu and I. Akasaki, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28** (1989) L2112.
43. H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu and I. Akasaki, *J. Electrochem. Soc.*, **137** (1990) 1639.
44. I. Akasaki, H. Amano, M. Kito and K. Hiramatsu, *J. Lumin.*, **48** & **49** (1991) 666.
45. I. Akasaki, H. Amano, H. Murakami, M. Sassa, H. Kato and K. Manabe, *J. Cryst. Growth*, **128** (1993) 379.
46. S. Nakamura, M. Senoh and T. Mukai, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30** (1991) L1708.
47. S. Nakamura, N. Iwasa, M. Senoh and T. Mukai, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31** (1992) 1258.
48. S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh and N. Iwasa, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31** (1992) L139.
49. J. A. Van Vechten, J. D. Zook, R. D. Horning and B. Goldenberg, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31** (1992) 3662.
50. T. Kozawa, Master's Thesis, Nagoya University, 1987.
51. T. Matsuoka, H. Tanaka, T. Sasaki and A. Katsui, *Inst. Phys. Conf. Ser.*, **106** (1990) 141.
52. N. Yoshimoto, T. Matsuoka, T. Sasaki and A. Katsui, *Appl. Phys. Lett.*, **59** (1991) 2251.
53. A. Koukitu, N. Takahashi, T. Taki and H. Seki, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35** (1996) L673.
54. A. Koukitu, T. Taki, N. Takahashi and H. Seki, *J. Cryst. Growth*, **197** (1999) 99.
55. S. Nakamura, M. Senoh and T. Mukai, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32** (1993) L8.
56. S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa and S. Nagahama, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34** (1995) L797.
57. H. Amano and I. Akasaki, Ext. Abst. Int. Conf. Solid State Devices and Materials, V-7 (1995) 683.
58. T. Takeuchi, S. Sota, M. Katsuragawa, M. Komori, H. Takeuchi, H. Amano and I. Akasaki, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36** (1997) L382.
59. http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/001/pdf/001_02_001.pdf (in Japanese)
60. U.S. Department of Energy, *Energy Savings Potential of Solid-State Lighting in General Illumination Applications*, Jan. 2012, (2012) 4. (http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_energy-savings-report_jan-2012.pdf)
61. Fuji Chimera Research Institute, Inc., *2014 LED Related Market Survey*, (2014) 41.
62. <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/NightLights/page3.php>

Przekład Piotr Chankowski

Rozmowa ze Szczepanem Szczeniowskim*

Rozmowa dn. 22 czerwca 1977 r.

KS (Krzysztof Szymborski) – Jaki był klimat tych lat, kiedy Pan chodził jeszcze do szkoły? Jaka literatura, jakie kontakty, jakie wpływy sprawiły, że Pan się zainteresował fizyką?

SS (Szczepan Szczeniowski) – Proszę Pana, to jest sprawa szkoły i rodziny. Ojciec był inżynierem technologiemi, kończył Instytut Technologiczny w Petersburgu, był to dobry instytut, o dużej tradycji. Na przykład, kończył wykładać Lenz – ten od prawa Lenza¹. Potem w kraju – tutaj w Warszawie – ojciec pracował początkowo u Lilpopa. Lilpop, Rau i Loewenstein to była duża firma metalowa. Potem pracował w Zarządzie Miejskim. Zaczął pracować za czasów Starynkiewicza. Starynkiewicz był Rosjaninem. Sokrates Starynkiewicz był prezydentem miasta oczywiście mianowanym, narzuconym, ale on się dobrze bardzo sprawował, zostawił po sobie dobrą pamięć. Na przykład, jeszcze została nazwa – Plac Starynkiewicza – nadana w okresie międzywojennym. Postarał się o wodociąg Lindleyowski. I ojciec za jego czasów zaczął pracować, miał zacięcie naukowe. To znaczy, w czym się to wyrażało? Ojciec założył laboratorium wytrzymałościowe – miejskie. Jeszcze ten budynek, w którym było laboratorium ostał się. Jeszcze wi-

* 1) Przedruk rozmowy, która ukazała się w *Postęпах Fizyki* 35, 405, 1984 (zachowana oryginalna stylistyka, pisownia, interpunkcja).

2) Rozmowa niniejsza zaczerpnięta jest z materiałów gromadzonych z inicjatywy Komisji Historii Fizyki PTF, której przewodniczy prof. R. S. Ingardein. Z materiałów tych korzystaliśmy już trzykrotnie, publikując urywki rozmowy z prof. Aleksandrem Jabłońskim (*Postępy Fizyki* 33, 69 (1982)) oraz rozmowy z prof. Janem Wesołowskim (*Postępy Fizyki* 34, 499 (1983)) i z prof. Arkadiuszem Piekarczykiem (*Postępy Fizyki* 35, 287 (1984)).

phantom* Niniejsza rozmowa jest skrótem dwóch wywiadów, jakie przeprowadził z prof. Szczeniowskim dr Krzysztof Szymborski z Instytutu Historii Nauki, Oświaty i Techniki PAN. Taśma z nagraniem tych wywiadów przechowywana jest w tym Instytucie, Warszawa, ul. Nowy Świat 72 (przyp. Red.).

1. H. F. E. Lenz, który w r. 1833 sformułował zasadę określania kierunku indukowanego prądu, zmarł w 1865 r. Później we wspomnianym Instytucie wykładał jego syn. O niego tu chyba chodzi (przyp. Red.)

działem go po wojnie na Dobrej, niedaleko Karowej. Tam, to laboratorium postawione było na dobrym poziomie. Powstało w 1894, to jest dawno. Ale ojciec tego pilnował, żeby wszystkie materiały budowlane, jakie szły na budowę pod patronatem miejskim w Warszawie, były badane czy odpowiadają wymaganiom jakościowym.

KS – No tak, wtedy materiały były lepsze niż dzisiaj.

SS – Oczywiście, że dzisiaj nie ma czegoś takiego. Jak ojciec poszedł na emeryturę, to się laboratorium rozchwiało. Wówczas ojciec tego pilnował. Moim zdaniem, sprawy budowlane stały dużo lepiej w tym czasie. Szybkość budów była dużo lepsza. Nie wiem, czy Pan się orientuje, że np. Filharmonia, ten gmach, który został spalony w czasie powstania, od czasu rozpoczęcia do pierwszego koncertu budowany był rok! Gmachy Politechniki, tzn. gmach główny, gmach fizyczny i gmach chemiczny, jako pierwsze, budowano dwa lata z kawałkiem.

KS – Nową „Elektronikę” znacznie dłużej, zdaje się cztery lata.

SS – Troszkę dłużej. Na przykład, Teatr Polski budowano z 1912 na 1913 rok, od kamienia węgielnego do pierwszego przedstawienia, z tym, że w Teatrze Polskim wprowadzono scenę rotacyjną, co było nowością wówczas. Niech Pan porówna z tym, co dzisiaj się robi. A materiały były wówczas dobre. Może Pan przecież popatrzeć na te stare budynki, chociażby na gmachy Politechniki.

KS – Ojciec prowadził to laboratorium, do którego roku?

SS – Do roku, o ile dobrze pamiętam, 1924–25 (urodził się w 1860 r.) i wtedy szedł już na emeryturę. . .

KS – Pan Profesor chodził do szkoły średniej w Warszawie?

SS – Tak, do Konopczyńskiego.

KS – W jakich latach?

SS – 1908–16.

KS – Ciekaw jestem, czy już wówczas Pan zaczął interesować się fizyką?

SS – Owszem, owszem. Szkoła była dobra, a fizyka była dobrze postawiona. Uczył Moycho. Nie wiem, czy Pan słyszał. Był taki wówczas podręcznik dla szkół średnich fizyki: Moycho i Zienkowski. Zienkowski pracował jeszcze po wojnie w Politechnice. Moycho już chyba nie żył. A w Szkole była pracownia dobrze wyposażona. Demonstracje były, nie bardzo skomplikowanych, ale prostych doświadczeń. Ja się tym nawet zainteresowałem, bo Moycho potrafił zainteresować fizyką. Pomagałem nawet trochę przy tych demonstracjach. To było jedno źródło zainteresowań. Poza tym była chemia dobrze postawiona. Jakościowa. Ja prawie całą „jakościówkę” w szkole przerobiłem. Można to porównać z dzisiejszą szkołą. To była szkoła prywatna, bez praw maturalnych, tzn. jak się kończyło taką szkołę, to trzeba było potem składać maturę jako ekstern.

KS – Gdy Pan tak ok. 1910 roku chodził do liceum i zaczął interesować się fizyką, to czego Pan wówczas od fizyki oczekiwał, jaki obraz fizyki Pan sobie wytworzył?

SS – Była to jeszcze fizyka klasyczna, jeszcze się nawet nie zaczynała teoria Bohra. To było o promieniach Röntgena, o promieniotwórczości. Takie rzeczy mnie interesowały, ale w ogóle podejście do fizyki mnie interesowało dlatego, że bywałem u ojca w laboratorium i tam oglądałem wszystko. A wytrzymałość bardzo blisko się wiąże z fizyką. Ojciec miał nastawienia naukowe, był członkiem takiego międzynarodowego stowarzyszenia wytrzymałościowców. Jeździł na kongresy, zjazdy. W Paryżu był, w Kopenhadze. Jeździł do Szwajcarii, do Amslera – to jest stara firma – która obecnie jeszcze dostarcza maszyn wytrzymałościowych. Potem ojciec zainteresował się samochodami, ok. 1902–04 r. Z ramienia Zarządu Miejskiego miał opiekę nad samochodami w Warszawie, tzn. były przeglądy samochodów, składało się egzamin. Coś jak teraz, na prawo jazdy.

KS – Wracając do fizyki, tak jak rozumiem, Pana interesowała fizyka od strony doświadczalnej. Czy Pan miał wtedy tę świadomość, że jest jeszcze bardzo wiele problemów, które trzeba rozwiązać, czy raczej sądził Pan, że...

SS – Tak bym nie powiedział, interesowała mnie fizyka jako fizyka, sposób poznania zjawisk i zrozumienia na czym to wszystko polega, dlaczego tak jest a nie inaczej.

KS – Czyli to była raczej ciekawość zrozumienia zjawisk świata. Pytam o to tak dokładnie, bo istnieje przekonanie, że w końcu XIX wieku wśród fizyków było dość powszechne mniemanie, że fizyka już jest prawie nauką skończoną.

SS – Proszę Pana, to było przed moimi czasami.

KS – To już minęło wtedy?

SS – Z tym się nie spotkałem.

KS – Czy Pan już wtedy odczuwał, że w fizyce następuje jakiś ferment?

SS – Ferment, to początek lat dwudziestych.

KS – Model Bohra.

SS – Model Bohra, oczywiście. Jeżeli chodzi o stan sprzed I wojny, to wtedy fizycy polscy mieli dobre kontakty z zagranicą. Po 1905 r., po rewolucji, nastąpił ze strony Polaków bojkot szkół oraz Uniwersytetu i Politechniki. Wtedy też wielu słuchaczy wyższych szkół wyjechało za granicę, zwłaszcza do Galicji, Krakowa, ale i dalej do Paryża, do Brukseli. Pieńkowski np. wyjechał do Belgii.

KS – On wyjechał po 1905 r.?

SS – Nie powiem Panu dokładnie, ale Pieńkowski urodził się w 1883, więc miał dwadzieścia parę lat. Wyjechał do Belgii, siedział w Liege, i tam był znany. Nawiązał szerokie kontakty wśród Belgów. Potem był u Lenarda w Heidelbergu. Z innych fizyków, do Warszawy przyjechał Weyssenhoff, który kształcił się w Zurychu.

KS – Weyssenhoff był z Warszawy? Bo później przebywał w Krakowie.

SS – Rzeczywiście później przebywał w Krakowie oraz w Wilnie. Kształcił się tam². Znał Einsteina i innych. A np. Wolfke kształcił się [także] w Szwajcarii i tam też zrobił pracę habilitacyjną. Tam miał duże znajomości.

KS – Wolfke to lata późniejsze.

SS – Owszem. Do Polski Wolfke przyjechał w 1922. Inne przykłady: pani Curie, Smoluchowski czy Natanson był bardzo znany. W ogóle galicyjscy fizycy mieli duże kontakty wśród naukowców niemieckich.

KS – A jaki był kontakt między Warszawą a Krakowem?

SS – Naukowy był o tyle słabszy, że w Warszawie nie było silnego ośrodka naukowego. Jak był bojkot Uniwersytetu, to na Politechnice został tylko Biernacki... Ale np. w Warszawie kształcił się Weiberg, ten krystalograf. I ciekawostka *à propos* niego... W *Prirodie* czytałem artykuł krystalografa rosyjskiego, który zaliczył Weiberga do fizyków rosyjskich tylko dlatego, że kształcił się w Warszawie na uniwersytecie rosyjskim i napisał po rosyjsku jakąś broszurę czy jakieś wydawnictwo na temat krystalografii.

KS – Panie Profesorze, przed I wojną światową w Warszawie zdaje się było Muzeum Przemysłu i Rolnictwa?

2. To znaczy w Krakowie i w Zurychu, gdzie studiował w latach 1909–16. Doktorat uzyskał w Zurychu w r. 1916 na tamtejszym Uniwersytecie (przyp. Red.).

SS – Tak, była to inicjatywa prywatna, powstała po 1905 r.³ Tutaj działał Kalinowski.

KS – Czy Pan się zetknął z tym Muzeum?

SS – Owszem, znałem Kalinowskiego i wiem jak to było. Zaczął swoją działalność jeszcze przed I wojną. Zajmował się wtedy magnetyzmem i popularyzacją nauki. Zdołał zebrać 100 tys. rubli na budowę obserwatorium magnetycznego w Świdrze. Społeczeństwo dało te pieniądze. Świadczyło to o zrozumieniu dla działalności naukowej. W okresie przed I wojną powstał Wawelberg i Rotwand – wyższa szkoła techniczna, która była na dobrym poziomie. Tak, że była tu pewna atmosfera zainteresowań naukowo-technicznych.

KS – Czy jakieś świeże wiadomości ze świata nauki docierały za pośrednictwem prasy? Czy na przykład Pan Profesor w tym okresie czytywał jakieś czasopisma, gdzie były dyskusje popularnonaukowe?

SS – W tym okresie, to nie. Czytywałem raczej książki.

KS – A jakie to były książki?

SS – Było trochę wydawnictw popularnych. Wie Pan, co mnie zainteresowało? Wells. Wellsa czytałem bardzo dużo.

KS – Wells był naukowcem, prawda?

SS – Tak, biologiem. Jeszcze *à propos* tego. Jak porównuję szkołę ówczesną ze szkołą obecną, więc ja miałem rosyjski w dużym wymiarze. Jak to wyglądało? Oczywiście rosyjski język był obowiązkowy, literatura rosyjska i to wszystko. To znaczy, ja biegle w szkole średniej czytałem po rosyjsku. Wtedy było rosyjskie wydawnictwo, które wydawało komplet dzieł Wellsa po rosyjsku. Ja miałem prawie komplet tego. Czyta Pan biegle po rosyjsku?

KS – Nie bardzo. Muszę powiedzieć, że ja musiałem się trochę nauczyć, ale już sam, po ukończeniu szkoły, na studiach, ale ze szkoły się tego nie wynosi.

SS – Ile jest tego rosyjskiego w szkole?

KS – Siedem lat chyba.

SS – No właśnie, uczą tego rosyjskiego i co z tego? Potem miałem historię powszechną i historię Rosji, po rosyjsku obowiązkowo, i geografię. Inne przedmioty były po polsku. Ale prócz tego była nieoficjalnie historia Polski z podręczników galicyjskich. Ja się w szkole nauczyłem po niemiecku, tzn. jak była okupacja niemiecka mogłem czytać gazety niemieckie. Miałem francuski i jeszcze miałem łacinę. Jak ja czytam, że mło-

dziez jest przeciążona, mogę się tylko śmiać. Młódzież jest niedociążona. A niedociążenie męczy, bo wie Pan, jak Pan nie podąży za życiem to jest to męczące. A później na rozmaite głupstwa traci się mnóstwo czasu.

KS – Teraz chyba na telewizję młodzież musi dużo patrzeć i dlatego nie ma czasu.

SS – To jest inna rzecz. Obciążenie szkolne jest minimalne. I to jest taka rzecz, że nie ma dolnej granicy głupoty, jakkolwiek nisko Pan ten poziom ustawi, zawsze się znajdzie ktoś, dla kogo będzie ten poziom za wysoki.

KS – A jak fizyki uczyli Pana w szkole?

SS – Właśnie mówiłem o Moychu. On dobrze uczył.

KS – Czy on jako nauczyciel miał możliwość dostępu do jakiejś literatury bieżącej?

SS – Nie rozumiem właściwie Pana pytania, bo nie było żadnych trudności, żeby sprowadzać książki z zagranicy.

KS – Czy takie czasopismo jak *Kosmos*, *Wszechświat* jakąś rolę wtedy odgrywały?

SS – Odgrywały, ale nie myślę, żeby zbyt wielką, bo nie było zbyt trudno wyjechać choćby do Krakowa i sprowadzić czasopisma. Można było również zamówić przez księgarnie, przez Gebethnera czy coś w tym rodzaju i po prostu sprowadzić. W pracowni Röntgena kształcili się ludzie, byli tam na stażu naukowym. Tak, że kontakty były. No, dlaczego np. pani Skłodowska pojechała do Paryża? No właśnie dzięki takim kontaktom. Zainteresowała się promieniotwórczością... dostała się do Becquerela... zaczęła współpracować z późniejszym mężem... Pan już zna tę historię. Najpierw wykryli polon, który silnie promieniował. Ponieważ bardzo silnie promieniował, dlatego właśnie pani Curie zaproponowała dać mu nazwę polonu, a później okazało się, że polon nie miał tego znaczenia co rad. Chociaż silnie promieniował, był krótkożyłowy. Wiemy dzisiaj, dlaczego. Ale to wszystko ilustruje Panu, że kontakty były wówczas żywe.

KS – Teraz chciałbym się dowiedzieć, jak Pan trafił na studia i jak wyglądały studia uniwersyteckie w tym czasie.

SS – No, to trzeba rozróżnić. Uniwersytet otworzyli Niemcy w 1915 r. i Politechnikę, już jako polskie. Ja przyszedłem w 1916 r. na Uniwersytet, po maturze. Wtedy profesorem fizyki był Wierusz-Kowalski. Przyjechał z Fryburga. Prowadził zajęcia wspólnie dla Politechniki i Uniwersytetu. I to wtedy prowadziło się częściowo na Politechnice, w gmachu fizyki, a częściowo w gmachu chemii na terenie Uniwersytetu. Właściwie wtedy wszystko jeszcze było bardzo słabe... Była tylko zmontowana pracownia. Dość słabe pokazy. Tak było do 1918 roku.

3. Muzeum to powstało w 1875 r. ze składek społecznych, z inicjatywy i przy poparciu finansowym J. T. Lubomirskiego, jako jedna z nielicznych polskich placówek naukowych na terenie zaboru rosyjskiego. W jednej z jego pracowni (fizycznej) pracowała w latach 1890–91 Maria Skłodowska-Curie (przyp. Red.).

KS – Fizyka uniwersytecka była wtedy w jakim gmachu? Na Krakowskim Przedmieściu?

SS – Na Krakowskim Przedmieściu, a wykłady niektóre były prowadzone w gmachu fizyki.

KS – Na Politechnice?

SS – Na Politechnice. Ten gmach ocalał, tylko był pusty. Biblioteki właściwie nie było. Dość trudno było wtedy, bo to był okres wojenny, ale z Krakowem kontakty były silne, tak że wykładowcy fizyki w 1917–18 roku byli kształceni w Krakowie. Ci, co byli kształceni w Krakowie, potem prowadzili fizykę. Prowadził wtedy fizykę: Sachs, [Wacław] Dziewulski... Ja miałem przed 1918 rokiem propozycję na zastępcę asystenta na Uniwersytecie.

KS – U kogo? U Kowalskiego?

SS – U Kowalskiego, który w 1918 r. odszedł, a w 1919 r. przyszedł Pieńkowski...

KS – Do końca studiów Pana, jak przebiegały sprawy?

SS – Do 1922 roku byłem na Politechnice. Wtedy zastępcą kierownika fizyki na Politechnice był Marian Grotowski z Wolnej Wszechnicy, potem przeszedł na Politechnikę. Ale to był zastępca profesora i odszedł, kiedy przyszedł Wolfke. Zajmował się przepływem cieczy, mianowicie warunkami powstawania przepływu turbulentnego. Miał nawet zupełnie prostą aparaturę. A potem pracował w Łodzi. Tam też była Wolna Wszechnica. A w Warszawie istniała wtedy Pracownia Radiologiczna ufundowana przez Kernbauma. Tam kierownikiem był Wertenstein, uczeń pani Curie.

KS – Czy pani Curie była kierowniczką nominalną?

SS – Była patronem pracowni. Był jeszcze twór, który się nazywał Instytut Radowy. Ona była na uroczystości poświęcenia, była opiekunką tego. Darowała gram radu, co było dużo na owe czasy. U niej przez dwa lata przebywał Cezary Pawłowski. Potem pracował u Pieńkowskiego na Hożej⁴, a po wojnie na Politechnice. Spotkał się Pan z tym nazwiskiem?

KS – Tak.

SS – On jest już dawno na emeryturze. Potem poszedłem do Pieńkowskiego i tam pracowałem jako asystent. Na Uniwersytet. Najpierw w pierwszej pracowni. Robiłem wtedy doktorat, bo nie robiło się wtedy magisterium. Wtedy jeszcze przed 1926 nie istniało magisterium tylko robiło się od razu doktorat. Według obyczaju sprzed pierwszej wojny. I robiłem doktorat u Pieńkowskiego. Skończyłem w 1926 r.

KS – Już Pan pracował kończąc studia?

SS – Tak. Z początku byłem asystentem. Później byłem starszym asystentem. A jak skończyłem doktorat, to zostałem adiunktem. I wtedy zacząłem zajmować się wydajnością fluorescencji. Wtedy zacząłem się zajmować tymi rzeczami z mechaniki kwantowej.

KS – Chciałbym jeszcze zatrzymać się na tym okresie przed 1926 r. Pan robił doktorat z fizyki doświadczalnej?

SS – Tak.

KS – Jakie były Pana warunki pracy?

SS – Warunki pracy już wtedy zaczynały się polepszać. Robiłem pomiary fluorescencji, tzn. musiałem mierzyć natężenie fluorescencji, rozłożone spektralnie. Miałem wtedy już spektrometr. Mierzyłem natężenie komórką fotoelektryczną, co było wtedy nowością. Komórki fotoelektryczne były sprowadzane z zagranicy. A elektrometr, którym robiłem pomiary, był budowany w warsztacie. Warsztat był dobrze postawiony, był mechanik bardzo dobry – Brandel.

KS – To było już na Hożej?

SS – Na Hożej. Brandel był inteligentnym człowiekiem i jemu nie trzeba było, jak się to robi dzisiaj, narysować dokładnie wszystko. Wystarczył szkic i uzgodnienie szczegółów. Jak mu się powiedziało o co chodzi, to on sam dokładał swojej inwencji do tego. Zupełnie przyzwoite, czułe elektrometry budował. Na Politechnice był też mechanik tego samego rzędu co Brandel, tzn. Skłodowski i on też robił bardzo subtelne przyrządy. Inaczej wyglądała pracownia. Miał on swoich uczniów, którzy u niego praktykowali, ale był bardzo samodzielny. W przyrządy tak budowane wkładał dużo inwencji. Teraz to wszystko idzie przez wnioski racjonalizatorskie, takimi drogami bardziej oficjalnymi. A wtedy to się robiło nieoficjalnie. Był bezpośrednim współpracownikiem przy budowie przyrządów.

KS – Czy profesor interesował się postępami prac?

SS – Pieńkowski bardzo się interesował. Prawie codziennie robił obchód. Przychodził wcześniej i jeżeli kogoś nie zastał, to pisał „SP”. Pieńkowski prowadził seminarium. Wyznaczał każdemu, kiedy ma co mówić, dawał pracę do zreferowania. Wtedy literatura niemiecka była silnie reprezentowana. Trzeba było przeczytać i zreferować artykuł. Po seminarium zawsze była wspólna herbata. W trakcie, dyskutowało się różne rzeczy z fizyki współczesnej.

KS – Kto jeszcze należał do grona pracowników poza Pieńkowskim?

SS – Prawą ręką Pieńkowskiego był Kucz [?]. Zaczął swoje wykształcenie w Odessie i po rewolucji przyjechał do kraju. W Odessie też był prof. Witkowski, astronom. Potem był w Krakowie u Banachiewicza. Spośród starszych pracowników była pani Bobrówna, która

4. Jeszcze przed wyjazdem do Paryża Pawłowski pracował na Hożej. Por. wspomnienie B. A. Gwiazdowskiej o Cezarym Pawłowskim, *Postępy Fizyki* 34, 177 (1983) (przyp. Red.).

w Petersburgu kończyła wyższe kursy żeńskie. Wtedy kobiety nie kształciły się na uniwersytetach. To były wyższe kursy żeńskie na poziomie uniwersyteckim. Później pracowała u Joffego i Golicyna⁵, zajmowała się sejsmologią. Następnie przyjechała do Warszawy i była u Pieńkowskiego. Kto wtedy pracował z kolegów? [Witold] Majewski, ten z Politechniki, [Edward] Stenz (meteorolog), Sołtan, Kapuściński (był potem profesorem w Akademii Medycznej), [Henryk] Jeżewski (brat prof. [Mieczysław] Jeżewskiego), który dość wcześnie zmarł. Henryk Jeżewski dobrze się zapowiadał. Potem była cała plejada tych młodszych. Trzeba powiedzieć, że Pieńkowski był dobrym organizatorem... Potrafił wydostawać pieniądze, rozwijać laboratorium, Zakład Fizyki. Zakład był znany. W latach 30. był to Zakład na poziomie europejskim, jeżeli chodzi o wyposażenie [i] jeżeli chodzi o poziom prac. Myśmy mieli ludzi, którzy przyjeżdżali do Warszawy kształcić się. Na przykład w Warszawie kształcił się Swings. Swings pracuje jeszcze w Liege; jest profesorem astrofizyki, ale on u nas kończył studia⁶. Jak Pieńkowski potrafił się starać? Mogę taki przykład przytoczyć: jak Pan stoi dzisiaj na Hożej przed budynkiem, to jest tak: jest korpus centralny i dwa skrzydła: prawe i lewe. Otóż pierwotny budynek to był tylko ten korpus i prawe skrzydło, lewego nie było. Ten korpus wybudowali jeszcze Rosjanie, ale nie zdążyli go wyposażyć i tak byłby zresztą pusty po ewakuacji. Więc w 1915–16 to był pusty gmach, mury były tylko i tak nie zakończone. Do kryzysu, tzn. do 1930–31 roku było tylko prawe skrzydło. W okresie kryzysu wydawało się, że bardzo trudno jest coś zrobić, ale Pieńkowski jakoś wywahał, że w ministerstwie są kredyty na popieranie działalności towarzystw naukowych i te kredyty były nie wykorzystane. Pieńkowski był wtedy prezesem Towarzystwa [Polskiego Towarzystwa Fizycznego]. Stwierdził, że Towarzystwo nie ma lokali i wy dostał te pieniądze. A przed tym nawiązał kontakty z Fundacją Rockefellera. Ja np. jeździłem na stypendium Fundacji Rockefellera do Comptona do Chicago. Sołtan też jeździł [w ramach] Fundacji Rockefellera do Paryża. Wtedy przez znajomości z Fundacją Rockefellera zaczął się starać o dotacje na przyrządy... Od Rockefellera dostał 50 tys. dolarów...

Rozmowa dn. 9 lipca 1977 r. (mieszkanie Profesora w Warszawie na ul. Lwowskiej)

KS – Kto w Polsce rozwijał, w jaki sposób była przez poszczególnych fizyków przyjmowana teoria względności

i teoria kwantów. Może byśmy zaczęli od pierwszego tematu. O środowisku fizyków. Z czym startowaliśmy i jak poszczególne osoby były uplasowane?

SS – Start był raczej trudny dlatego, że kraj był bardzo zniszczony. Wbrew temu, co się mówi dzisiaj, że po drugiej wojnie to Polska była rzeczywiście zniszczona, a po pierwszej to właściwie...

KS – Wcześniej było sto lat rozbiorów, więc była zafana również.

SS – Przed pierwszą wojną zafanie nie było takie duże. W Galicji, Uniwersytet Lwowski i Uniwersytet Krakowski działały na niezłym zupełnie poziomie. We Lwowie działał Smoluchowski. W Krakowie był prof. [Władysław] Natanson. To był dużej klasy fizyk. Nie był człowiekiem energicznym i ekspansywnym. Miał mało uczniów. Jego uczniem był prof. Gumiński. Mało pisał, ale jego rzeczy były znane. Pracował w fizyce klasycznej. Zajmował się termodynamiką. Jego prace były trochę pionierskie w dziedzinie termodynamiki procesów nierównowagi. Uniwersytet Warszawski zaczął działać dopiero w okresie okupacji niemieckiej. Tak samo Politechnika. To znaczy, wcześniej Uniwersytet istniał i Politechnika też, ale były to rosyjskie placówki, z tym, że były ewakuowane do Rosji w 1915 r. z ludźmi i z wyposażeniem. Tak, że zostały tylko mury. Politechnika powstała ok. roku 1900. Powstała z funduszy krajowych. Była zbiórka, która dała ok. miliona rubli. Na Politechnice powstały trzy budynki: główny, chemia i fizyka. Nie wiem, czy Pan miał w ręku *Historię Politechniki Warszawskiej*?

KS – Tak, przeglądałem.

SS – Tam wszystko jest opisane. Budowa trwała 2–2,5 roku. Kraków działał z pewnymi opóźnieniami dlatego, że w Krakowie w czasie wojny okres nie był sprzyjający. W czasie wojny Smoluchowski przeszedł do Krakowa. Miał iść do Wiednia, tylko że tam natknął się na opozycję. Ale w 1917 r. zmarł na czerwonkę. Miał czterdzieści kilka lat. Na jego miejsce przyszedł Natanson⁷. A na doświadczalnej fizyce był Witkowski, później Zakrzewski. We Lwowie po Smoluchowskim katedrę fizyki teoretycznej wziął Loria. Doświadczalna fizyka to był prof. Negrusz. Jego interesowała precyzja pomiarów. Miał osobliwe pojęcie o fizyce. Na przykład, nie wierzył w ugięcie promieni Röntgena. Lubił konstruować sam przyrządy, był dobrym mechanikiem. Był dziwakiem. Zmarł... pod koniec lat dwudziestych.

5. Borys Borysewicz Golicyn (1862–1916), fizyk i geofizyk rosyjski, dyrektor Głównego Obserwatorium Geofizycznego w Pawłowsku, członek Petersburskiej Akademii Nauk (przyp. Red.).

6. Swings był na rocznym stażu u Pieńkowskiego po ukończeniu studiów w Liege (przyp. Red.).

7. Jest to pomyłka. Smoluchowski, który od 1899 r. był profesorem fizyki teoretycznej Uniwersytetu Lwowskiego, przeszedł w 1913 r. do katedry fizyki doświadczalnej Uniwersytetu Jagiellońskiego. Władysław Natanson zaś był od 1891 r. docentem, a od 1894 r. profesorem w katedrze fizyki teoretycznej tego Uniwersytetu (przyp. Red.).

Uniwersytet w Wilnie powstał w roku 1921, jak również Uniwersytet Poznański.

KS – Skąd brano kadrę do tych Uniwersytetów?

SS – Kadrę w dużej mierze brano z Krakowa i ze Lwowa. Prócz tego Wolna Wszechnica była pewnym źródłem kadry. Wolna Wszechnica istniała jeszcze przed I wojną. Ze szkół średnich ludzie przyszli. Szkoły średnie stały na dobrym poziomie, przeciętnie na lepszym niż teraz. Zwłaszcza szkoły prywatne, w których uczyli ludzie nawet na poziomie uniwersyteckim. [Przez] pierwsze lata po pierwszej wojnie na Uniwersytecie Warszawskim i Politechnice był prof. Wierusz-Kowalski.

KS – Czy Pan słuchał jego wykładów?

SS – Słuchałem jeszcze w okresie wojennym. Był we Fryburgu szwajcarskim. Miałem przerwę od roku 1918 do końca 1920. Przerwa nie była kompletna dlatego, że były urlopy. W listopadzie 1918 r. większość studentów poszła do wojska na ochotnika. Zaczęła się formować armia. Działalność Uniwersytetu i Politechniki została przerwana. To samo było w Krakowie i we Lwowie. Jeszcze Kraków miał najbardziej normalne stosunki. Uniwersytet Poznański nie istniał jeszcze wtedy, ani Wileński...

KS – Ciekaw jestem, czy w okresie niepodległości zaczęło powstawać spójne środowisko fizyków polskich, czy może przez powstanie PTF? Jak wyglądała hierarchia tego środowiska? Kto miał największy autorytet jako fizyk? Jakie były wzajemne stosunki na płaszczyźnie naukowej? Czy były jakieś kontrowersje, spory?

SS – Zawsze czuło się pewne napięcie między Krakowem a Warszawą. Kraków miał swoją linię postępowania, Warszawa miała swoją. Jeżeli chodzi o Warszawę, to tu największym autorytetem naukowym był Wolfke. Pieńkowski był raczej organizatorem. Rzeczywiście, postawił Zakład Fizyki na bardzo dobrym poziomie. Stał się on ośrodkiem rozwoju fotoluminescencji... Organizacyjnie Instytut był na poziomie europejskim, jeżeli chodzi o wyposażenie [i] organizację pracy. Myśmy mieli tu stażystów zagranicznych. Były kontakty z fundacją Rockefellera, ja sam byłem na stypendium w Chicago... Można w pewnym sensie mówić, że była szkoła Pieńkowskiego. Z biegiem czasu uczniowie Pieńkowskiego objęli profesury.

KS – Wolfke [zaś] chyba szkoły nie stworzył.

SS – Wolfke nie utworzył szkoły. Białobrzęski też nie. Profesor [Włodzimierz] Ścisłowski jest uczniem Białobrzęskiego. W pewnym sensie szkoła powstała u Pieńkowskiego. Dlatego, że to było robione z rozmachem, na dużą skalę. Jednak tematyka – to właściwie fotoluminescencja.

KS – Czy inne ośrodki skoncentrowały się na jakiejś określonej tematyce?

SS – W ośrodku lwowskim działał Rubinowicz. Poza tym trochę luminescencją zajmował się Loria. Ale to się nie rozwinęło specjalnie. No i Infeld, który zajmował się ogólną teorią względności. Szczególnie później zajął się ruchem osobliwości pola grawitacyjnego. Główny wyczyn Infelda to jest praca wspólna: Einstein, Infeld, Hoffmann; chodziło o to, że w tym starszym ujęciu względności ogólnej, jeżeli chodzi o ruch w polu grawitacyjnym jakiegoś punktu materialnego, to tam było potrzebne specjalne założenie, że tor takiej cząstki w polu jest po krzywej geodezyjnej. A w tej pracy było wykazane, że nie trzeba żadnych założeń. Z tego, że to są równania nieliniowe wynika, że osobliwość musi się poruszać po linii geodezyjnej. Potem, jak Infeld wrócił do Polski, rozwijał to dalej. Miał uczniów, ale to są późniejsze historie, już powojenne.

KS – Pan Profesor z którymi z tych fizyków miał najbliższy kontakt, którzy z nich w jaki sposób wpłynęli na rozwój Pana kariery naukowej?

SS – Mnie wciągnął do fizyki Dziewulski. Na początku, jeszcze w czasach studenckich.

KS – Pan miał z nim jakieś kontakty osobiste?

SS – Tak, w Warszawie w 1917/18 roku on wykładał fizykę doświadczalną. Wciągnął mnie na zastępcę asystenta. Potem to się urwało, bo on poszedł do Wilna. Jeżeli chodzi o bliższe kontakty to miałem oczywiście z Lorią, z Pieńkowskim. Byłem uczniem Pieńkowskiego i u Pieńkowskiego robiłem doktorat. We Lwowie to był Loria i Infeld. Z kim jeszcze? Z Weyssenhoffem i z Niewodniczańskim.

KS – Czy na wybór Pana zainteresowań mieli oni jakiś wpływ bezpośredni? Czy Pan miał własne, skryzystalizowane?

SS – Dlaczego ja się potem skłoniłem w stronę teorii i mechaniki kwantowej? Jak byłem w Chicago, tam był profesorem zaproszonym Heisenberg. Miał przez jeden semestr wykłady z początków mechaniki kwantowej. Było to w roku 1929. To mnie skłoniło, że zająłem się mechaniką kwantową.

KS – Przed wyjazdem do Chicago jeszcze Pan nie śledził tych wydarzeń?

SS – Zajmowałem się tym poczynając już od prac de Broglie'a. Mnie bardzo trafiły do przekonania te prace o falowej naturze elektronów. W 1927 r. ukazała się moja krótka notatka „Ugięcie elektronów przez odbicie od kryształów”. Zanim to opublikowałem, to upłynął rok. Było to doświadczalnie. Pod wpływem wykładów Heisenberga zająłem się stroną teoretyczną. Jak Pan widzi, miałem dużo kontaktów osobistych z szeregiem ludzi.

Z Comptonem miałem też, przecież u Comptona pracowałem w Chicago. Compton był bardzo przyjemnym człowiekiem. Bardzo bezpośrednim w obejściu i ten styl Comptona bardzo mi się podobał.

KS – Pan wybrał sobie Comptona jako opiekuna, czy to przypadek?

SS – Tak, ja go sobie wybrałem jako opiekuna.

KS – Pan mógł sobie wybrać ośrodek, do którego Pan jechał?

SS – Tak, oczywiście. On musiał wyrazić zgodę na to. Z tego okresu mam przyjemne bardzo wspomnienia. Na przykład Pieńkowski. Pieńkowski miał zupełnie inny styl. Styl Pieńkowskiego jest właściwie wzorowany na stylu Lenarda.

KS – On znał Lenarda?

SS – Jakiś czas tam pracował. Lenard miał taki bardzo oficjalny styl. Robił bardzo uroczyste obchody. Później ten styl przejął Pieńkowski... Pieńkowski urządzał praktycznie co dzień obchód tych swoich magistrantów. Na przykład, chciał mieć referat, to zostawiał karteczkę: „Zechce Pan zreferować na seminarium taką a taką pracę”. Compton inaczej. Ja pracowałem w takim półpodziemiu, tak że okna wychodziły jeszcze na wierzch, to on zachodził tam i pytał: „Czy Pan nie zechciałby...”

KS – W Polsce raczej jesteśmy bliżsi temu stylowi sztywnemu.

SS – Na przykład, jak tam wyglądało? Compton zainteresował się, jak przyjechałem. Pytał się, jak ja finansowo stoję, może trzeba jakichś pieniędzy pożyczyć na początek, może trzeba pomóc mieszkanie wyszukać? Potem dostałem taki „master key”, klucz do otwierania wszystkich pokoiów. Mogłem sobie siedzieć, kiedy chciałem.

KS – Ale przed wojną na uniwersytecie jeszcze chyba nie było takich obyczajów?

SS – Jeżeli chodzi o bibliotekę, to nie było tak prosto jak tam.

KS – Czy mógłby Pan przypomnieć historię doświadczeń z ugięciem elektronów, które Pan przeprowadzał?

SS – Czytałem i tłumaczyłem prace Davissona i Germera. Chciałem to zrobić inaczej niż Germer, bo on doświadczenie Lauego powtarzał, a ja chciałem przez odbicie selektywne elektronów od powierzchni kryształu. Wymagało to zmontowania przyrządów.

KS – Interesują mnie szczegóły techniczne, jak takiego rodzaju doświadczenie się montowało?

SS – Podałem, jak aparatura ma wyglądać. Musiał być kryształ w gazoszczelnym kranie, żeby można było mierzyć te kąty. Aparatura była metalowa, a ponieważ nie

była wygrzewana, trzeba było cały czas pod pompą pracować. Dwie pompy dyfuzyjne do tego. Samą aparaturę wykonał warsztat. Ojciec, który był inżynierem, zrobił rysunek. Montowanie tej aparatury zajęło ok. pół roku.

KS – Co było źródłem elektronów?

SS – Źródłem elektronów był żarzony drucik – działo elektronowe, tzn. nadawanie szybkości przez różnicę potencjałów.

KS – Później kolimator.

SS – Kolimator, właściwie to jeszcze nie było tych kolimatorów w sensie soczewek elektronowych, to jest późniejsze.

KS – Dziurki.

SS – Dziurki po prostu były. Wybierało się wiązkę elektronów padających pod odpowiednim kątem i potem ramię odbierające elektrony nastawiało się pod kątem odbicia.

KS – Jaka była detekcja?

SS – Detekcja była galwanometrem.

KS – Mnie raczej interesują szczegóły, o których się nie pisze. Pan Profesor wcześniej miał doświadczenie, które Panu pomogło w tym.

SS – W pracy o wydajności fluorescencji. Robiłem to komórką fotoelektryczną. To była moja praca doktorska.

KS – Opiekunem tej pracy był prof. Pieńkowski?

SS – Te prace robiłem już po doktoracie. Sam sobie wybrałem ten temat. Nie Pieńkowski mi podsunął.

KS – Czy Pieńkowski się tym interesował?

SS – Trochę się interesował, ale jego zainteresowaniem głównym była fotoluminescencja.

KS – Czy on nie stawiał przeszkód tej natury, że Pan uszczuplał grono ludzi, którzy się zajmowali jego tematem?

SS – Nie. Za tę pracę dostałem nagrodę Towarzystwa Fizycznego – 1000 zł. Organizacja w Chicago była odmienna niż ta nasza. Dużo luźniejsza. Uniwersytet Chicagowski już wtedy był dobrym uniwersytetem.

KS – W książce A. Teskego czytałem o tym, jak Smoluchowski był u Kelvina. Tam też były stosunki swobodniejsze, ale to miało tę złą stronę, że Kelvin miał zwyczaj zaczynać sporo prac, liczył na to, że szybko otrzyma interesujące wyniki, ale już nie wgłębiał się w temat. Jeżeli nie było szybko efektów, to on to zostawiał i zajmował się czymś innym.

SS – Compton na przykład w tym czasie, gdy ja u niego pracowałem, zajął się promieniami kosmicznymi. Wtedy przygotowywał na szerszą skalę badania

promieniowania kosmicznego w różnych miejscach powierzchni Ziemi. Było to dość systematycznie opracowane. Opracowano specjalne komory jonizacyjne, elektrometry. Same prace rozwinęły się później. Ja się też trochę tą tematyką zainteresowałem. Między innymi brałem udział w przygotowaniach tego nieudanego lotu balonem w 1938 r. w Polsce⁸. Mam nawet książkę, która się ukazała w związku z tym. Na owe czasy była to próba, jak się przygotowuje sputniki teraz. Amerykanie wcześniej urządzili taki lot do stratosfery i myśmy mieli też coś takiego przygotować. Był to duży balon (125 tys. m³). Wzlot wyglądał tak, że napełniało się tylko 4 tys. m³ wodoru, a cały balon zwiisał do wysokości 70 m. Kompania wojska trzymała liny przy zapuszczeniu i to wymagało spokojnego powietrza, tzn. wiatr nie mógł przekraczać 2–3 m/s, bo inaczej bardzo szarpało. Na takiej powierzchni nacisk wiatru jest już bardzo duży, tzn. nie można utrzymać. Pierwszy lot się nie udał, bo w trakcie puszczenia balonu podniósł się wiatr. Trzeba było cofnąć wszystko i wypuścić gaz. Przy wypuszczaniu gazu na skutek wyładowania elektrostatycznego w pyłach talkowych, zajęła się powłoka i ok. 150 m² się spaliło. Spowodowało to przełożenie próby na następny rok. Były przygotowane rozmaite pomiary: działanie na emulsję, działanie jonizacyjne, pomiary licznikowe, tzn. pomiary kompleksowe promieniowania kosmicznego na dużych wysokościach, do 25 km i wyżej. Miało lecieć dwóch ludzi w kabinie zamkniętej (kula o średnicy 2 m).

KS – Tak jak balon Pickarda.

SS – Była to większa kula niż Pickarda. Był to lekki metal – hydronal. Stop magnezu [i] aluminium. Pomalowana na pasy biało-czarne. We wnętrzu wszystko możliwie lekkie. Na przykład była używana balsa. Następny lot miał być na początku września 1939 r. Hel był już sprowadzony. Pojechałem do Francji i Anglii porozmawiać z ludźmi, którzy zajmowali się badaniem promieniowania kosmicznego. Zrobiłem objazd, przygotowałem sprawozdanie z tego. Mówiłem m. in. z Wegenerem, który robił takie pomiary balonami – sondami w Niemczech w 1937–38 roku.

KS – Kiedy się Pan habilitował?

SS – Habilitację zrobiłem w grudniu 1930 r.

KS – Na jaki temat?

8. Por. rozmowę z Marianem Mięśowiczem, *Postępy Fizyki* 35, 47 (1984) (przyp. Red.).

SS – Temat teoretyczny: zachowanie się wiązki elektronów w polu elektrostatycznym, z punktu widzenia mechaniki kwantowej. Potem przechodzenie przez warstwę pola elektrostatycznego elektronów. Ponieważ nie doszło do skutku przejście Rubinowicza na Uniwersytet [Lwowski], to mnie pan Loria zaprosił. Nie mógł prze-forsować Infelda na wydziale. Nie chcieli. Infeld był przy Katedrze. Ja byłem kierownikiem Katedry, jeszcze jako zastępca profesora – przez 6 lat. Prowadziłem kursowe wykłady. Infeld wyjechał w 1936 r. do Princeton, gdzie Einstein wystarał się mu o stypendium – 500 dolarów. Jak się stypendium skończyło, Infeld, aby zdobyć pieniądze, wydał książkę. Wszystko napisał Infeld, Einstein dał „firmę” (obaj byli autorami). Książka ta poszła dobrze. Infeld na tym zarobił, tak, że mógł się przez jakiś czas utrzymać. Później był w Kanadzie. Był drugi docent – Myron Mathisson⁹. Mathisson też był Żydem z pochodzenia, był bardzo zdolny... Myślał bardzo samodzielnie. Współpracował z Białobrzeskim. Zajął się ruchem dipola masowego w polu grawitacyjnym. Opublikował pracę, która wzbudziła zainteresowanie. Później kontynuował to Weysenhoff. Potem się wydostał do Francji, przed wojną jeszcze. Z Paryża wydostał się do Londynu. W Londynie umarł. Jego ostatnią pracę, już pośmiertnie, wydał Dirac. Z tego widać jak jego prace były cennie. Był samotnikiem. Sam pracował. Mało publikował...

KS – Czy z prof. Natansonem miał Pan jakiś kontakt?

SS – Z nim miałem mało do czynienia. Piekara miał z nim stosunki, bo Piekara jest docentem krakowskim. W swojej książce wspomina Natansona jako swojego nauczyciela. Natanson był dużym stylistą. Pisał pięknie po polsku.

KS – Z prof. Piekarą w okresie, kiedy on był studentem, Pan się zetknął? Potem on przeszedł do Rydzyny.

SS – Bardzo dobrze postawił tę Szkołę. Druga taka szkoła powstała w Wilnie w 1938 r. Tam został dyrektorem Staszewski. Szkoła ta się nie rozwinęła. Była bezpośrednio związana z Uniwersytetem. Miało to być w stylu Krzemieńca. Krzemieniec był pod opieką Uniwersytetu Wileńskiego w latach przed powstaniem listopadowym. Wyciągnę trochę materiałów. Możemy się stelefonować...¹⁰

9. Por. artykuł B. Średniawy o Myronie Mathissonie, *Postępy Fizyki* 33, 373 (1982) (przyp. Red.).

10. Niestety, dalszej rozmowy już nie było. Prof. Szczeniowski zmarł w lutym 1979 r. Por. wspomnienie o nim H. Cofty, *Postępy Fizyki* 31, 253 (1980) (przyp. Red.).

Rozszczepianie ciężkich jąder atomowych wywołane fotonami

Henryk Niewodniczański

II Zakład Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Jagiellońskiego
Odczyt wygłoszony na Zjeździe P. T. Fizycznego dnia 8 maja 1948 r.*

1. Pierwsze doświadczenia

Już w najbliższych miesiącach po opublikowaniu przez Hahna i Strassmanna (6) w styczniu 1939 r. pierwszych komunikatów o wykryciu rozszczepiania jąder uranu, wywołanego neutronami, została teoretycznie przewidziana możliwość wywołania rozszczepiania najcięższych jąder za pomocą promieni γ o dostatecznej energii (2, 4). Jednocześnie też niemal zostały podjęte prace doświadczalne mające na celu wykrycie tego zjawiska.

Historycznie pierwszymi są dwie prace: Heyna, Atena i Bakker (10) w laboratorium Fizycznym firmy Philips w Eindhoven oraz praca Robertsa, Meyera i Hafstada w Departamencie Magnetyzmu Ziemi Carnegie Institution of Washington. W pierwszej z tych prac naświetlano uran promieniami γ (o maksymalnej energii ok. 17 MeV) z litu bombardowanego protonami. W drugiej do naświetlania uranu i toru używano promieni γ z litu (maks. energia 17 MeV) i z fluoru (maks. energia 6,3 MeV) bombardowanych protonami o energii 1 MeV i natężeniu wiązki $3 \mu\text{A}$. W obydwóch tych pracach nie uzyskano żadnych pozytywnych wyników, co tłumaczono raczej zbyt małym natężeniem stosowanych promieni γ aniżeli ich zbyt małą energią.

2. Ogólne uwagi teoretyczne

Teoria rozszczepiania ciężkich jąder, oparta na modelu kropkowym jądra atomowego i przyjmująca jako siły decydujące o rozszczepieniu napięcie powierzchniowe jądra-kropki i coulombowskie odpychanie pomiędzy

protonami, została podana w połowie 1939 roku przez Bohra i Wheelera (2). Zgodnie z tą teorią rozszczepianie jąder najcięższych pierwiastków spowodowane neutronami odbywa się w dwóch stadiach, następujących po sobie w czasie nie większym niż 10^{-14} – 10^{-13} sek.:

1. Utworzenie jądra pobudzonego przez doprowadzenie do niego energii przekraczającej krytyczną wartość charakterystyczną dla każdego typu jądra (energię progową pęknięcia E_f), która do chwili rozszczepienia jądra pozostaje rozdzielona pomiędzy różne stany energetyczne nukleonów zawartych w jądrze, i 2. takie przekształcenie dostatecznej części tej energii na energię potencjalną przy deformacjach kształtu jądra, które prowadzi do jego rozszczepienia na dwa (a niekiedy na trzy, lub nawet więcej) ciężkie fragmenty (odłamki).

Bohr i Wheeler podają wzór na obliczenie energii E_f tego proggu potencjału, który ma być przekroczony przy rozszczepieniu jądra, oparty na obliczeniu wypadkowego efektu zwiększania się energii powierzchniowej podczas deformacji przy wzroście powierzchni jądra-kropki i jednoczesnego malenia energii elektrostatycznej jądra przez zmniejszanie się coulombowskiego odpychania bardziej oddalonych od siebie protonów.

W związku z rozważaniem rozszczepiania spowodowanego neutronami Bohr i Wheeler obliczyli wartość krytyczną energii E_f dla kilku najcięższych jąder złożonych (compound nuclei) powstałych po wchłonięciu jednego neutronu przez jądro. Jeżeli przy tworzeniu się takiego jądra złożonego energia wiązania neutronu E_n i jego energia kinetyczna, które razem stanowią energię doprowadzoną do jądra, przekraczają wartość energii progowej E_f tego nowoutworzonego jądra złożonego,

*Przedruk z *Postępów Fizyki* 1 (1949), zeszyt 1–2, s. 21–31 (zachowana oryginalna stylistyka, pisownia, interpunkcja i opracowanie edytorские – przyp. red. PF 2019).

to wówczas może nastąpić rozszczepienie jądra (obok możliwości reemisji neutronu oraz powrotu jądra do stanu normalnego połączonego z emisją γ). W razie niedostatecznego wzbudzenia nowoutworzone jądro wzbudzone może np. przejść do stanu podstawowego przy emisji jednego lub kilku fotonów promieniowania γ .

Z jąder naturalnych tylko jądro $^{235}_{92}\text{U}$ posiada energię wiązania neutronu $E_n > E_f$ jądra złożonego $^{236}_{92}\text{U}$ (E_n wynosi 6,4 MeV, E_f zaś tylko 5,3 MeV), a więc może podlegać rozszczepieniu przez wchłanianie termicznych neutronów.

Obliczone na podstawie pracy Bohra i Wheelera wartości energii progowej E_f przedstawione są w tabl.1. Dla wywołania rozszczepienia ciężkiego jądra przez foton promieni γ energia pochłoniętego przez jądro fotonu winna przekraczać energię krytyczną rozszczepienia tego jądra E_f . W wypadku tym rozszczepieniu ulega jądro, pochłaniające foton, a nie jądro złożone — izotop jądra pierwotnego o liczbie masowej o jednostkę większej, jak w wypadku rozszczepienia spowodowanego neutronami. Są to dwa dość różne zjawiska¹⁾.

Bohr i Wheeler (2) podają wzór na przekrój czynny σ_f , który jądro posiada dla rozszczepienia wywołanego przez fotony promieni γ . Wzór ten pozwala na ilościowe porównanie przekroju czynnego σ_f z przekrojem czynnym σ_n tego samego jądra dla efektu fotojądrowego (γ, n). Stosunek obu tych przekrojów czynnych ma być równy Γ_f/Γ_n , gdzie Γ_f/\hbar i Γ_n/\hbar ($\hbar = h/2\pi$) oznaczają odpowiednie prawdopodobieństwa procesów rozszczepienia i emisji neutronu w przeciągu jednostki czasu (1 sek.). A więc: $\sigma_f = (\Gamma_f/\Gamma_n)\sigma_n$.

Tablica 1.

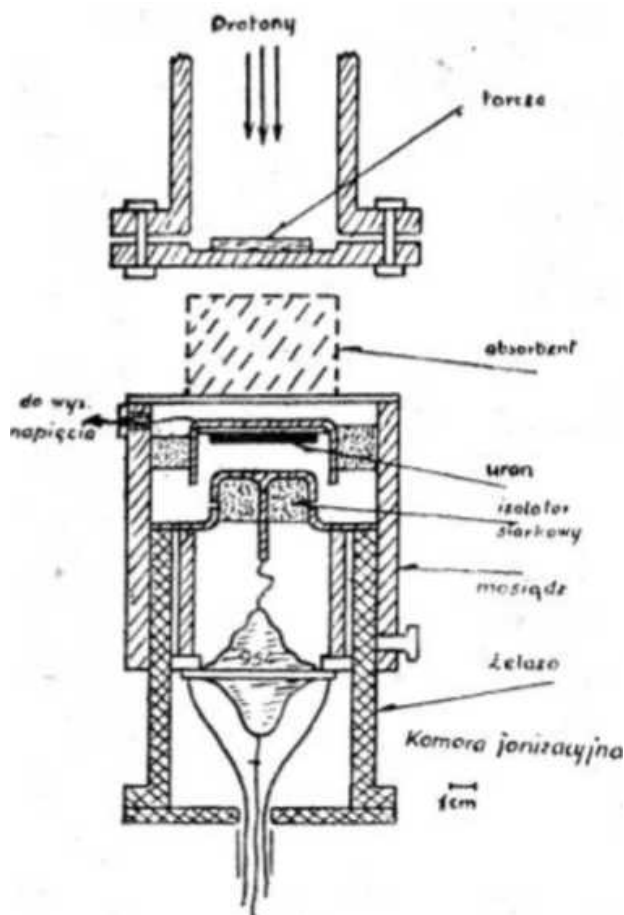
Jądro złożone	Energia krytyczna E_f w MeV
$^{235}_{92}\text{U}$	5,0
$^{236}_{92}\text{U}$	5,3
$^{239}_{92}\text{U}$	5,9
$^{232}_{91}\text{Pa}$	5,4
$^{231}_{90}\text{Th}$	6,5
$^{232}_{90}\text{Th}$	6,9

Przyjmując na σ_n około 10^{-26} cm², wartość otrzymaną przez Bothégo i Gentnera (3) dla ciężkich jąder naświetlanych promieniami γ o energii 17 MeV z re-

akcji $\text{Li}(p, \gamma)$. Bohr i Wheeler oszacowują σ_f dla „fotorozszczepienia” $^{238}_{92}\text{U}$ na około 10^{-27} cm² i dla $^{233}_{90}\text{Th}$ na około 10^{-28} cm².

3. Odkrycie przez Haxby i współpracowników rozszczepiania wywołanego fotonami Haxby. Shoupp, Stephens i Wells (9, 10) byli pierwszymi, którym udało się w roku 1940 wykryć możliwość rozszczepiania ciężkich jąder wywołanego fotonami promieni γ .

Autorowie ci wytwarzali promienie γ bombardując protonami, przyspieszonymi w polu wytworzonym przez ciśnieniowy generator elektrostatyczny, tarczę z krystalicznego fluorytu (CaF_2). Stosowali oni napięcia od 1 do 3,4 MeV przy prądzie protonów do 0,5 μA . Powstają przy tym promienie γ o energii 6,3 MeV. Promieniami tymi poprzez różne absorbenty naświetlali płytkę z metalicznego uranu o pow. 12 cm², która umieszczona była wewnątrz komory jonizacyjnej (zob. ryc. 1). Ko-



Ryc. 1

mora jonizacyjna, o głębokości 1 cm, wypełniona była powietrzem o ciśnieniu atmosferycznym i posiadała napięcie przyłożone do kolektora 2.000 V. Kolektor komory połączony był przez wzmacniacz proporcjonalny z oscyloskopem, na którego ekranie obserwowano wizualnie wychYLENIA spowodowane przez produkty rozszczepienia uranu, znacznie większe od wychyleń spowodowanych przez przejście przez komorę cząstek α .

1. Haxby, Shoupp, Stephens i Wells (9) zaproponowali nawet dla odróżnienia tych zjawisk terminem „fission” oznaczać tylko rozszczepianie spowodowane neutronami, „foto-rozszczepianie” zaś nazywać terminem „phission” co się zresztą nie przyjęło.

Notowane były przy pomocy licznika ręcznego tylko takie wychylenia, które przeszło dwukrotnie przekraczały tło spowodowane przez cząstki α nawet w tych wypadkach, kiedy przez przypadkową koincydencję dwóch cząstek była wytworzona silniejsza jonizacja α . Sprawdzono przy tym, że obecność intensywnego promieniowania γ nie wpływała na liczbę i rozkład impulsów, pochodzących od cząstek α . Natężenie promieniowania γ było mierzone przy pomocy licznika G.-M. odpowiednio osłoniętego ołowiem.

Dla potwierdzenia tego, że jonizujące odłamki rozszczepionych jąder uranu, które dawały wychylenia obserwowane na ekranie oscyloskopu, powstawały w związku z promieniami γ a nie z neutronami, zostało w szeregu systematycznie i starannie przeprowadzonych doświadczeń sprawdzone, że:

1. z tarczy bombardowanej protonami wychodziło zbyt mało neutronów, ażeby mogły one spowodować obserwowane rozszczepienia;

2. liczba rozszczepień w jednostce czasu była proporcjonalna do natężenia promieniowania γ ;

3. absorpcja promieniowania powodującego rozszczepianie była podobna do absorpcji promieni γ o dużej energii, a nie do absorpcji neutronów.

1. Neutrony, powstające przy bombardowaniu protonami tarczy z CaF_2 , wykrywane były przy pomocy komory jonizacyjnej wypełnionej BF_3 i połączonej ze wzmacniaczem liniowym. Liczone były neutrony wytworzone w jednostce czasu w zależności od napięcia przyspieszającego protony. Stwierdzono przy tym istnienie progu produkcji neutronów dla energii protonów około 1,8 MeV. Wydajność tego procesu była około 800 razy mniejsza od wydajności reakcji $\text{Li}(p, n)$ (7). Neutrony liczone pochodziły prawdopodobnie z reakcji $\text{Ca}(p, n)$ (lub może także od małych zanieczyszczeń litem). Jednakże nie obserwowano wcale rozszczepiania uranu naświetlanego w identycznych warunkach doświadczalnych, kiedy płytką z metalicznego wapnia była bombardowana protonami. Ponadto rozszczepianie było obserwowane przy energii protonów bombardujących CaF_3 już od 1 MeV, a więc znacznie niższej od 1,8 MeV — progu energii dla wytwarzania neutronów. Jako dalsze potwierdzenie, przy użyciu tarczy z AlF_3 obserwowano rozszczepienia, których nie było wcale gdy używano tarczy z czystego metalicznego glinu.

2. Natężenie promieniowania γ autorowie zmieniali w zależności od energii bombardujących protonów; przy czym przy zmianie jej od 1 MeV do 3,4 MeV natężenie promieni γ wzrastało 70-krotnie (równocześnie natężenie prądu protonów też się zmieniało). Zmieniali oni także natężenie promieni γ w zależności od natężenia prądu protonów przy ich stałej energii. We wszyst-

kich tych przypadkach mierzone natężenie promieniowania γ zmieniało się w tym samym stosunku, co liczba rozszczepień jąder uranu obserwowanych w jednostce czasu.

3. Współczynniki absorpcji promieniowania powodującego rozszczepienie w parafinie, glinie, żelazie, i ołowiu, mierzone dla warstw pochłaniających o różnych grubościach, porównane zostały z obliczonymi teoretycznie współczynnikami absorpcji promieniowania γ o energii 6 MeV. Wyniki przedstawione są na tablicy 2.

Tablica 2.

Absorbent	Współczynnik absorpcji w cm^{-1}	
	Obserwowany	obliczony dla promieni γ o energii 6 MeV
Parafina	$0,01 \pm 0,07$	0,04
Aluminium	$0,14 \pm 0,07$	0,07
Żelazo	$0,28 \pm 0,07$	0,20
Ołów	$0,53 \pm 0,08$	0,50

Możliwość innych wtórnych reakcji, które by mogły istotnie wpływać na przebieg i wyniki doświadczeń, autorowie szczegółowo dyskutują i wykluczają po szeregu przeprowadzonych doświadczeń kontrolnych.

Stwierdzone więc zostało w tej pracy rozszczepianie jąder uranu spowodowane fotonami promieni γ o energii 6,3 MeV. Autorowie nie czynią żadnych uwag co do tego, czy to wszystkie izotopy uranu ${}_{92}^{238}\text{U}$, ${}_{92}^{235}\text{U}$ i ${}_{92}^{234}\text{U}$ obecne w naturalnym uranie, czy też tylko niektóre z nich, ulegają przy tym rozszczepieniu.

Po zastąpieniu płytki uranowej płytką z toru stwierdzone zostało w podobny sposób także rozszczepianie jąder ${}_{90}^{232}\text{Th}$, wywołane fotonami promieniowania γ o energii 6,3 MeV.

Haxby, Shoupp, Stephens i Wells w pracy swej obliczyli także przekrój czynny jąder atomów uranu (licząc średnio dla wszystkich izotopów uranu) i toru (${}_{90}^{232}\text{Th}$) dla rozszczepienia spowodowanego promieniami γ z reakcji $\text{F}(p, \gamma)$ o energii 6.3 MeV. Na przekroje te otrzymali liczby następujące:

$$\begin{aligned} \text{dla uranu } \sigma_f &= (3,5 \pm 1,0) \cdot 10^{-27} \text{ cm}^2 \\ \text{dla toru } \sigma_f &= (1,7 \pm 0,5) \cdot 10^{-27} \text{ cm}^2. \end{aligned}$$

Liczby te, szczególnie dla toru, są nieco większe od przewidzianych przez Bohra i Wheelera. Niezgodność tę autorowie tłumaczą tym, że Bohra i Wheeler (2) przyjęli za punkt wyjścia w obliczaniu σ_f przekrój czynny dla reakcji (γ, n) dla ciężkich jąder wartości 10^{-26} cm^2 , a więc rzędu wielkości znalezionej przez Bothego i Gentnera dla promieni γ z reakcji $\text{Li}(p, \gamma)$ o energii 17 MeV.

Przy tak znacznych energiach pobudzenia jądra emisja neutronu jest znacznie prawdopodobniejsza aniżeli powrót jądra do stanu niewzbudzonego przy emisji fotonu. Dla promieni γ z reakcji F (p, γ) o energii mniejszej 6,3 MeV tak nie jest. Przekrój czynny jądra na emisję neutronu dla tych promieni γ należy przyjąć wobec tego odpowiednio mniejszy aniżeli podany przez Bohra i Wheelera. Prócz tego winien on być jeszcze dodatkowo zredukowany, ponieważ prawdopodobieństwo fotonowego pobudzenia jądra (w przedziale ciągłego widma poziomów energetycznych) zmienia się w przybliżeniu proporcjonalnie do sześciastu energii fotonu, a więc w danym przypadku jak $(6,3/17)^3$; daje to na σ_f :

$$\sigma_f = \frac{\Gamma_f}{\Gamma_f + \Gamma_n + \Gamma_\gamma} \left(\frac{6,3}{17} \right)^3 \cdot 5 \cdot 10^{26} \text{ cm}^2.$$

(gdzie Γ_γ/\hbar oznacza prawdopodobieństwo pobudzenia jądra dla emisji promieniowania γ obliczone na jedną sekundę).

Dla $^{238}_{92}\text{U}$, gdzie można przyjąć $\Gamma_f/(\Gamma_f + \Gamma_n + C) \approx 1$ znajdujemy wartość $\sigma_f = 2,5 \cdot 10^{-27} \text{ cm}^2$, dla jądra zaś $^{232}_{90}\text{Th}$, gdzie liczba $\Gamma_f/(\Gamma_f + \Gamma_n + \Gamma_\gamma)$ zawarta jest między 0 a 1, wartości na σ_f od 0 do $2,5 \cdot 10^{-27} \text{ cm}^2$, co w pierwszym przypadku jest dość bliskie znalezionej doświadczalnie dla uranu wartości $(3,4 \pm 1,0) \cdot 10^{-27} \text{ cm}^2$ na σ_f .

Co do wysokości barier potencjałowych na rozszczepienie E_f , to zdaniem Haxby, Shouppa, Stephensa i Welsa, na podstawie dokonanych również przez nich nowych pomiarów progowych wartości energii neutronów powodujących rozszczepienie (7,8), na które znaleźli dla $^{238}_{92}\text{U} - 0,3 \text{ MeV}$ i dla $^{232}_{90}\text{Th} - 1,1 \text{ MeV}$, (energia tych neutronów jest równa $E_n - E_f$ gdzie E_f jest energią krytyczną rozszczepienia, a E_n – energią wiązania neutronu w jądrze złożonym, powstałym po wchłonięciu neutronu), krzywą

Bohra i Wheelera a należy obniżyć o około 0,5 MeV, czyli również zmniejszyć o tyleż wszystkie wartości energii krytycznej rozszczepienia E_f obliczone ze wzoru Bohra i Wheelera.

Wydaje się zresztą, że doświadczalne wyniki Haxby'ego i współpr. można pogodzić z liczbami uzyskanymi ze wzoru Bohra i Wheelera, jeśli się uwzględni, że w tym wzorze E_f oznacza całkowitą wysokość bariery potencjałowej jądra na rozszczepienie, oraz że najniższy możliwy energetyczny stan jądra może wynosić połowę kwantu energii wibracyjnej jądra, co się równa około 0,4 MeV. A więc energia, która ma być dostarczona jądro dla przekroczenia progu energii na rozszczepienie, może być mniejsza o tę wartość zerowej energii jądra, Zresztą, niepewność w oznaczaniu energii wiązania neutronu w ciężkich jądrach, wynosi w rozważaniach Bohra i Wheelera około 0,2 MeV.

Po poprawieniu wartości energii krytycznej rozszczepienia E_f obliczonej ze wzoru Bohra i Wheelera przez obniżenie jej o 0,5 MeV, na krytyczną energię pękania E_f znajdujemy dla jądra $^{238}_{92}\text{U}$ 5,2 MeV, dla $^{232}_{90}\text{Th}$ zaś 6,1 MeV. Obydwie te wartości są mniejsze od wynoszącej 6,3 MeV, energii promieni γ z reakcji F (n, γ), które powodują rozszczepianie jąder uranu i toru.

3. Praca Baldwina i Kocha

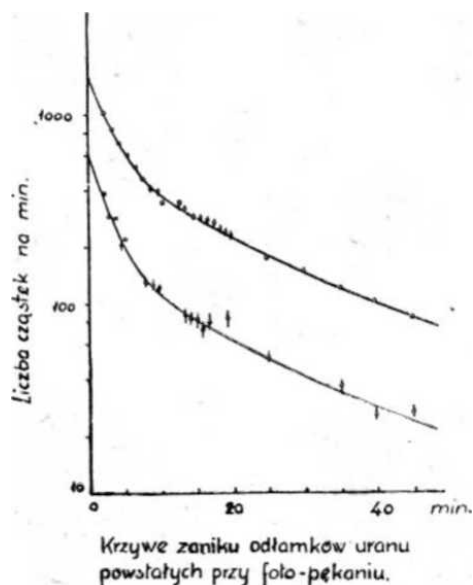
Do końca 1947 roku w literaturze fizycznej brak dalszych prac doświadczalnych, poświęconych specjalnie rozszczepianiu jąder najcięższych pierwiastków, wywołanemu fotonami. Pracą, która między innymi tymi zagadnieniami się zajmuje, jest praca Baldwina i Kocha (1) dotycząca pomiaru progowych wartości energii dla zjawiska foto-jądrowego (γ, n).

W pracy tej promienie X o dużej energii z betatronu, w którym elektrony mogły być przyspieszane do energii około 20 MeV, używane były do wyznaczania progów reakcji (γ, n) dla szeregu pierwiastków do $Z = 47$. Praca zawiera rozdział dotyczący przeprowadzonych przez autorów doświadczeń nad foto-rozszczepianiem. Tlenek uranu był rozmieszczony na zewnętrznej powierzchni kształtu cylindrycznego. Odrzucone produkty rozszczepienia uranu zbierane były na wewnętrznej powierzchni papierowego cylindra otaczającego cylinder pierwszy w odległości 1 mm od powierzchni warstwy tlenku uranu. Uran był naświetlany po 10 minut przy różnych maksymalnych energiach promieni X; aktywność osadu odrzuconych odłamków była mierzona przy pomocy cylindrycznych liczników G.-M, na które były nakładane papierowe cylindry.

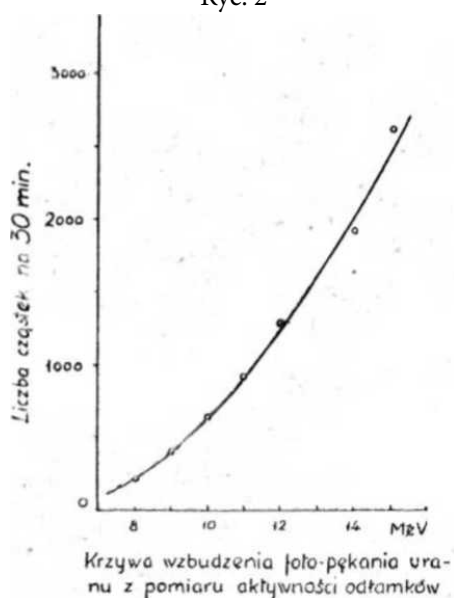
Próby wykonane z naświetlaniem promieniami X czystego papieru (na którym zbierano odrzucone odłamki jąder uranu) wykazywały próg aktywności przy energii promieni X wynoszącej $(16,3 \pm 0,4) \text{ MeV}$. Była to aktywność $^{15}_8\text{O}$ o czasie połowicznego zaniku 2,1 min., wytworzonego w reakcji $^{16}_8\text{O}(\gamma, n) ^{15}_8\text{O}$.

Zanik aktywności odłamków rozszczepienia mierzony był przez 45 min. po naświetlaniach promieniami X o energiach 13 i 15 MeV. Krzywe pokazane na ryc. 2 pozwalają na stwierdzenie występowania nałożonych na siebie dwóch wykładniczych zaników o czasach połowicznego zaniku wynoszących 2,2 i 18 minut. Cała krzywa zaniku jest bardziej skomplikowana, jednakże zbyt mała aktywność nalotów nie pozwalała na jej dokładniejsze rozdzielenie na inne obecne w nalocie składniki o zanikach wykładniczych.

Na ryc. 3 przedstawiona jest krzywa wyrażająca zależność liczby policzonych w przeciągu 30 minut cząstek β (po odjęciu tła, które wynosiło 500 cząstek), przeliczonej na natężenie promieni X wynoszące 1 R na minutę



Ryc. 2



Ryc. 3

(co odpowiadało dawce 10 R), od maksymalnej energii promieni X z betatronu. Poniżej energii promieni X wynoszącej 8 MeV aktywność zbieranych nalołów stawała się zbyt słaba, ażeby można było ją mierzyć.

Z przebiegu krzywej widoczne jest, że próg energii rozszczepiania leży poniżej 7 MeV. Jest to zgodne z wynikami pracy Haxby, Shouppa, Stephensa i Wellsa oraz z teoretycznie przewidywaną wartością dla $^{238}_{92}\text{U}$: $E_f - 0,4 \approx 5,2$ MeV.

Baldwin i Koch czynili przy pomocy tej metody próby zaobserwowania foto-rozszczepiania jąder ołowiu. Jednakże aż do energii promieni X wynoszącej 16 MeV. przy której aktywowany był bezpośrednio kolektor papierowy, próby te były bezskuteczne.

Literatura

1. G. C. Baldwin i h. W. Koch. *Phys. Rev.* 67. 1 (1945).
2. N. Bohr i J. A. Wheeler. *Phys. Rev.* 56, 426 (1939).
3. W. BOTHE i W. Gentner, *ZS. f. Phys.* 112, 45 (1939).
4. E. Feenberg. *Phys. Rev.* 55, 504 (1939).
5. S. Frankel i N. Metropolis, *Phys. Rev.* 72. 914 (1947).
6. O. Hahn i F. Strassmann. *Naturwiss.* 27, 11, 89 (1939).
7. R. O. Haxby, W.E. Shoupp, W.E. Stephens i W.H. Wells, *Phys. Rev.* 57, 348 (1940).
8. R. O. Haxby, W.E. Shoupp, W.E. Stephens i W.H. Wells, *Phys. Rev.* 57, 1088; 58. 199 (1940).
9. R. O. Haxby, W.E. Shoupp, W.E. Stephens i W.H. Wells, *Phys. Rev.* 58, 92 (1940).
10. R.O. Haxby, W.E. Shoupp, W.E. Stephens i W.H. Wells, *Phys. Rev.* 59, 57 (1940).
11. F. A. Heyn, H.H.W. Aten jun. i C.J. Bakker, *Nature* 143, 576 (1939).
12. R.B. Roberts, R.C. Mayer i L.R. Hafstad. *Phys. Rev.* 55, 416 (1939).

50 lat Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego

Leszek Markowski

Instytut Fizyki Doświadczalnej
Wydział Fizyki Uniwersytetu Wrocławskiego

27 września 2019 roku minęło równo 50 lat od dnia pierwszego posiedzenia Rady nowo utworzonego Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego (IFD UW). Ustalono na nim m.in. strukturę – liczbę, nazwy i rodzaje zakładów dydaktycznych i zespołów naukowych oraz agend dydaktycznych Instytutu, a także ich skład osobowy.

Początek wrocławskiej fizyki doświadczalnej datowany jest na czas tuż po zakończeniu II Wojny Światowej, gdy powstał Wydział Matematyki, Fizyki i Chemii instytucjonalnie wspólny dla Uniwersytetu Wrocławskiego i Politechniki Wrocławskiej do roku 1951 (kiedy nastąpiło rozdzielenie administracyjne tych dwóch uczelni). Ze względu na istniejące braki osobowe, lokalowe, aparaturowe i finansowe początki pracy wrocławskich fizyków doświadczalnych były niezmiernie trudne. W pierwszym okresie badania prowadzone były w zespole tworzącym Zakład Fizyki Doświadczalnej, a od 1952 roku już przez fizyków uniwersyteckich, w ramach Katedry Fizyki Doświadczalnej. W tym czasie w wymienionej Katedrze funkcjonowały trzy niezależne grupy badawcze kierowane przez prof. dr. hab. Jana Nikliborca, doc. dr. hab. Bogdana Sujaka i prof. dr. Jana Wesołowskiego, które po reorganizacji przeprowadzonej w 1966 roku formalnie zostały przekształcone w trzy katedry: Fizyki Doświadczalnej, Fizyki Ciała Stałego i Fizyki Jądrowej. Wspomniane trzy katedry były podstawą powstałego we wrześniu 1969 roku Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego.

Pierwsza z nich była prekursorem prowadzonych w Instytucie badań z zakresu fizyki powierzchni – kierunku pionierskiego w Polsce we wczesnych latach 70. minionego wieku, a zarazem dopiero na początku swojego rozwoju w nauce światowej. Pierwotnie kierunek ten, ze względu na istniejące ograniczenia, oparty był przede wszystkim na dwóch technikach pomiarowych – polowej mikroskopii elektronowej i polowej mikroskopii jonowej, co już wtedy umożliwiało obrazowania powierzchni z rozdzielczością atomową. Pracownicy Instytutu bardzo szybko osiągnęli światowy poziom prowa-

dzonych badań, nawiązując jednocześnie liczne bezpośrednie kontakty z naukowcami z zagranicy. Wybrany kierunek badań i stosowane techniki wymuszały ciągle poszerzanie wiedzy i umiejętności w zakresie wytwarzania ultrawysokiej próżni i budowy aparatur ultrapróżniowych.

Wraz ze zwiększającymi się możliwościami finansowymi wprowadzano stopniowo kolejne techniki badawcze, np.: dyfrakcję powolnych elektronów, spektroskopię augerowską, skaningową mikroskopię tunelową, spektroskopię sił atomowych, spektroskopię fotoelektronów w zakresie ultrafioletu i promieniowania rentgenowskiego, spektrometrię czasu przelotu, czy w ostatnich latach elektrochemiczną spektroskopię tunelową. Przedmiotem badań były i są właściwości powierzchni materii skondensowanej (w tym materiałów nanostrukturizowanych i obiektów biologicznych) oraz procesy w skali atomowej lub nanometrycznej, m.in. adsorpcji i wzrostu cienkich warstw na powierzchniach metali, półprzewodników i izolatorów, aktywowane termicznie (np. dyfuzja powierzchniowa, segregacja, desorpcja, fasetkowanie), emisyjne (jonów, elektronów), powierzchniowe reakcje chemiczne (w tym właściwości katalityczne i zjawiska korozji) na granicy ośrodków: ciało stałe-próżnia oraz ciało stałe-ciecz. Badania eksperymentalne są skutecznie wspomagane przez prowadzone w Instytucie badania teoretyczne (w szczególności dotyczące elektronowej i atomowej struktury powierzchni metali, tlenków metali, półprzewodników, różnych układów adsorpcyjnych, w tym adsorpcji molekuł organicznych).

Obecnie w IFD UW badania zjawisk powierzchniowych z powodzeniem uprawia już trzecie pokolenie fizyków. Śmiało można twierdzić, że w całej dotychczasowej działalności IFD UW miał w zakresie tej tematyki niezwykle silny wpływ na inne ośrodki naukowe w Polsce, szczególnie w początkowym okresie, gdy ekspansja ośrodków zajmujących się nanotechnologią była znaczna. Jedną z pierwszych platform tej emanacji były organizowane w późniejszym okresie (od 1976) Między-

narodowe Seminaria Fizyki Powierzchni, skupiające nie tylko naukowców z Polski, ale również wielu znamienitych badaczy nieomal z całego świata. Obecnie badania z zakresu fizyki powierzchni i nanotechnologii są prowadzone w Polsce przez co najmniej 20 grup badawczych. Z perspektywy minionych lat wybór fizyki powierzchni jako wiodącego kierunku badań okazał się niezwykle celny i owocny – kierunek ten jest nadal dominujący, a osiągnięcia Instytutu w tym obszarze, zarówno w Polsce jaki i za granicą, są wciąż znaczące.

Katedra Fizyki Ciała Stałego, a potem jej następcy – Zakład Fizyki Ciała Stałego, a od 1974 do 1994 roku Zakład Kriofizyki Fizyki Ciała Stałego – zajmowały się badaniami właściwości powierzchni ciał stałych głównie przy wykorzystywaniu ich zdolności elektroemisyjnych, w tym wzbudzonej emisji elektronów, a także opracowywania technologii wytwarzania niskich temperatur i ich wykorzystywania w nauce. W szczególności badano fizykę defektów warstw powierzchniowych i przypowierzchniowych ciał stałych, rozwijano techniki detekcji cząstek jonizujących o małej energii kinetycznej (poczynając od ułamków eV) tak pod ciśnieniem atmosferycznym, jak i w próżni, prowadzono badania wzbudzonej emisji elektronów i jonów oraz pokrewnych zjawisk relaksacyjnych (np. luminescencja, prądy stymulowane termicznie lub optycznie), prowadzono badania zjawisk egzoemisyjnych towarzyszących przemianom fazowym zachodzącym pod ciśnieniem atmosferycznym lub w próżni. Wraz z opanowaniem umiejętności wytwarzania niskich temperatur i wzrostem zaplecza kriogenicznego zaczęto prowadzić badania w zakresie kriofizyki, w szczególności dotyczyły one właściwości fizycznych kriokondensatów, czy nadprzewodników w szerokim zakresie temperatur, poczynając od temperatur helowych.

Pracownicy Katedry Zastosowań Fizyki Jądrowej, a od chwili powołania Instytutu – Zakładu Fizyki Jądrowej, następnie Zakładu Zastosowań Fizyki Jądrowej (w latach 1974–2016) i Zakładu Fizyki Medycznej i Zastosowań Fizyki Jądrowej (od 2016), zajmowali się zagadnieniami detekcji promieniowania jądrowego i jego zastosowań do badań struktury elektronowej ciał stałych i cieczy, wykorzystując w szczególności metody korelacji kierunkowej fotonów anihilacyjnych, czasów życia pozytonów i spektroskopii mössbauerowskiej – metody te są z powodzeniem stosowane do dziś. Aktualnie Zakład dysponuje trzema spektrometrami czasów życia pozytonów oraz nowoczesnym dwudetektorowym koincydencyjnym spektrometrem do badania tzw. dopplerskiego poszerzenia linii anihilacyjnej.

Obok istotnych prac dotyczących badań właściwości różnych materiałów (w tym m.in. ciał stałych i mieszanin wodno-organicznych), w szczegól-

ności ich struktury elektronowej, obecności i rodzajów defektów strukturalnych, na wspomnienie zasługuje prowadzenie badań losu pozytonów w substancji. Ciekawsze wyniki z tego obszaru to jedne z pierwszych w świecie eksperymentalnych oszacowań długości dyfuzji pozytonów w metalach oraz zapostulowanie i eksperymentalne potwierdzenie istnienia nowych efektów kontaktowych polegających na kierunkowym działaniu złącz metal-metal na dyfuzyjny ruch pozytonów.

Kolejną grupą naukową, wyodrębnioną z chwilą utworzenia Instytutu, był Zakład Fizyki dla Przyrodników, a następnie (od 1974) Zakład Fizyki Dielektryków. Grupa ta zajmowała się badaniami materiałów dielektrycznych, w szczególności statycznych i dynamicznych (głównie w trakcie przemiany fazowej) właściwości ferroelektrycznych struktur domenowych i ich wpływu na procesy polaryzowania i przepolaryzowania ferroelektryków. Badanymi materiałami były głównie sól Seignette'a, siarczanu trójglicyny oraz materiały ceramiczne na bazie ceramiki PLZT.

Nowym etapem działalności Zakładu było objęcie jego kierownictwa przez prof. Zbigniewa Czaplę. W ramach Zakładu utworzono Laboratorium Hodowli Kryształów, w którym samodzielnie lub we współpracy z innymi ośrodkami naukowymi hodowano kryształy całkiem nowego rodzaju. To tutaj wytwarzane były, między innymi, kryształy: RbHSeO_4 , $[\text{Gly}]\text{H}_2\text{PO}_3$ (GPI), $[2\text{-NH}_2\text{PyH}]\text{H}_2\text{PO}_4$, $[(\text{CH}_3)_3\text{NH}]_3\text{Sb}_2\text{Cl}_9$ (TMACA), $(\text{PyH})\text{ClO}_4$, $(\text{PyH})\text{IO}_4$, $[(\text{CH}_3)_2\text{CHNH}_3]_4\text{Cd}_3\text{Cl}_{10}$.

Wraz z zakupem kolejnych nowoczesnych aparatów Zakład rozwijał nowe metody badawcze, równocześnie nawiązując liczną i owocną współpracę międzynarodową. Wymienić tutaj należy badania: propagacji ultradźwięków w materiałach krystalicznych w obszarach przemian fazowych, zmian dwójłomności kryształów, dyfrakcji światła na strukturach ferroelastycznych i kryształach zbliźnionych, pól elektrostatycznych nad strukturami ferroelektrycznymi, ?? właściwości termicznych kryształów związanych z przemianami fazowymi, w tym polaryzację spontaniczną i jej zmiany w polach elektrycznych podczas ogrzewania i chłodzenia. Badania materiałów ferroelektrycznych są kontynuowane, dając istotny wkład do dalszego rozumienia procesów zachodzących w kryształach dielektrycznych i wpisując się w poszukiwania nowych materiałów o potencjalnych zastosowaniach praktycznych.

Utworzono także grupę zaangażowaną w kształcenie nauczycieli fizyki, których brak (nie tylko na Dolnym Śląsku) był bardzo dokuczliwy. Równoległe, obok pracy naukowej i dydaktycznej prowadzono rozliczne działania popularyzatorskie. Wspomnieć tu można bardzo popularny Cyrk Fizyczny, Wykłady z pokazami,

czy Dolnośląski Festiwal Nauki. Dotychczasowa liczba uczestników (dzieci w wieku przedszkolnym i szkolnym, jak i osób dorosłych) różnego rodzaju wydarzeń może być śmiało liczona w dziesiątkach tysięcy.

W historii Instytutu zdarzały się również dramatyczne momenty – w roku 1997 we Wrocławiu wystąpiła powódź stulecia i niestety, mimo bardzo dobrej osłony, Instytut ucierpiał w tym czasie dość poważnie – woda wdarła się przez niezabezpieczone pomieszczenia piwniczne sąsiadującego z Instytutem Archiwum Państwowego.

W chwili powołania IFD UWr pracowało w nim 2 profesorów tytularnych, 6 docentów, 9 adiunktów, 1 wykładowca, 14 starszych asystentów, 12 asystentów, 3 asystentów-stażystów. Z biegiem czasu zarówno liczebność pracowników Instytutu, jak i jego zasoby aparaturowe zwiększały się. Ewolucji ulegały także struktura Instytutu (powstawały kolejne grupy naukowe prowadzące badania zarówno doświadczalne, jak i teoretyczne) oraz tematyka prowadzonych badań.

Przez cały okres istnienia w Instytucie pracowało ponad 410 osób, a liczba ich publikacji osiągnęła ponad 2800 pozycji.

Pełna lista artykułów autorstwa uniwersyteckich fizyków doświadczalnych, obejmująca również lata 1945–1969 przed powołaniem Instytutu, kiedy to ukazało się 314 prac, znajduje się pod adresem: http://www.ifd.uni.wroc.pl/docs/Publikacje_1945-.pdf). Do dziś w Instytucie wypromowano 166 doktorów, 31 osób uzyskało stopień doktora habilitowanego, 22 osobom nadano tytuł profesora. Od 1969 roku Instytut zorganizował ponad sto różnego rodzaju konferencji, w których uczestniczyło co najmniej 5 tysięcy osób.

Pracownicy Instytutu prowadzili i prowadzą zajęcia dydaktyczne nie tylko dla studentów Wydziału Fizyki i Astronomii, ale również tzw. zajęcia usłугоwe dla studentów innych wydziałów Uniwersytetu, a także dla uczniów licznych szkół wrocławskich. Ich liczba jest dziś trudna do określenia, ale zapewne już dawno przekroczyła 20 tysięcy. Liczba wykonanych w Instytucie prac inżynierskich, licencjackich lub magisterskich według ostrożnych szacunków już dawno przekroczyła tysiąc. Wszystkie dotychczasowe osiągnięcia Instytutu oraz jego obecna pozycja to nie tylko zasługa kolejnych dyrektorów Instytutu: prof. Bohdana Sujaka (1969–1974 oraz 1984–1987), prof. Zbigniewa Sidorskiego (1974–1984), prof. Stefana Mroza (1987–1991) prof. Mariana Szuszkiewicza (1991–1996), prof. Jana Kołaczkiwicza (1996–1999 oraz 2012–2016), prof. Zbigniewa Czapli (1999–2002), prof. Antoniego Ciszewskiego (2002–2016) oraz autora niniejszego artykułu (od 2016), ale przede wszystkim jego pracowników.



Podczas spotkania głos zabrał JM Rektor UWr prof. dr hab. Adam Jeziński i ze znaną sobie poetycką swadą przeczytał wiersz, jak zwykle cechujący się naukowym kolorytem i zawierający filozoficzną puente. Tym razem był to wiersz o pudełku z napisem „pudełko”. Po JM Rektorze prof. Wójs wspominał swoje kontakty z wrocławskimi fizykami uniwersyteckimi.

W 50. rocznicę utworzenia IFD UWr dyrekcja i pracownicy Instytutu zorganizowali uroczystości jubileuszowe, na których specjalnymi gośćmi byli m.in.:

JM Rektor UWr prof. dr hab. Adam Jeziński, prof. dr hab. Arkadiusz Wójs – dziekan Wydziału Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej, prof. dr hab. Andrzej Jeżowski – dyrektor Instytutu Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych im. Włodzimierza Trzebiatowskiego Polskiej Akademii Nauk we Wrocławiu. Podczas tego spotkania dyrekcja przedstawiła dotychczasową działalność Instytutu oraz omówiła dorobek naukowy, popularyzatorski,



Okładka książki jubileuszowej *50 lat Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego 1969–2019*, na której pokazano używane w IFD UWr atomowo rozdzielcze obrazy wybranych powierzchni ciała stałego

dydaktyczny i organizacyjny jego pracowników. Jej pełny i wszechstronny opis przedstawiony został w specjalnej księdze jubileuszowej (*50 lat Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego 1969–2019* Oficyna Wydawnicza ATUT Wrocławskie Wydawnictwo Oświatowe, Wrocław 2019 (s. ISBN: 978-83-7977-437-1), opracowanej przez jej byłych i obecnych pracowników, której egzemplarze rozdano uczestnikom uroczystości. Książka ta niebawem będzie rów-

nież dostępna w większości bibliotek instytutów fizyki w Polsce.

Będąc dumnym z dotychczasowego dorobku IFD UWr żywię szczerą nadzieję, że jego przyszła działalność będzie równie owocna, przyczyniając się przez to do naukowego o kulturowego oddziaływania Uniwersytetu Wrocławskiego nie tylko na społeczność dolnośląską, ale również na inne krajowe i zagraniczne środowiska naukowe.

Badania w NCPS SOLARIS przybliżają elektronikę przyszłości

informacja prasowa – opracowała Emilia Król NCPS SOLARIS

Polscy naukowcy budują podwaliny dla innowacyjnych rozwiązań w elektronice. Przeprowadzone przez nich badania nad nanodrutami półprzewodnikowymi to krok ku wysokowydajnym ogniwom słonecznym czy tranzystorom sterowanym polem magnetycznym.

W prestiżowym amerykańskim czasopiśmie naukowym *Nano Letters** ukazał się artykuł „Room-Temperature Ferromagnetism in InSb-Mn Nanowires” (dostępny pod adresem: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.nanolett.9b02690>) będący efektem badań przeprowadzonych w Narodowym Centrum Promieniowania Synchrotronowego SOLARIS oraz w jednostce macierzystej zespołu badawczego, czyli w Akademickim Centrum Materiałów i Nanotechnologii AGH.

Badania kierowane przez dr. inż. Katarzynę Hnida-Gut wykazały, że właściwości magnetyczne nanodrutów z antymonku indu domieszkowanego manganem (InSb-Mn) można kontrolować przez odpowiedni dobór stężenia domieszki. Przełomowe w badaniach było to, że po raz pierwszy w procesie elektrosyntezy pulsacyjnej w porach AAO (anodyzowanego tlenku glinu) uzyskano wysokiej jakości nanodrutu InSb-Mn, bazując na wybranych wcześniej optymalnych warunkach syntezy półprzewodnika, którym jest antymonek indu.

Część pomiarów w ramach projektu badawczego przeprowadzono z wykorzystaniem promieniowania synchrotronowego w krakowskim Centrum SOLARIS. Dzięki eksperymentowi na linii PEEM/XAS możliwe było zbadanie lokalnej struktury w otoczeniu atomów manganu. *Pozwolił on na potwierdzenie hipotezy, że atomy manganu w strukturze analizowanych nanodrutów tworzą małe klastry, np. Mn₃. To właśnie te klastry są źródłem magnetyzmu w temperaturze pokojowej* – objaśnia dr hab. inż. Marcin Sikora, jeden ze współautorów publikacji.

Wykonanie tych badań bez synchrotronu byłoby możliwe, ale wyniki byłyby znacznie mniej dokładne, a cały pomiar zająłby kilka dni, a może nawet tygodni – dodaje prof. Sikora. – *Zebranie dobrej jakości widma na stacji końcowej XAS synchrotronu SOLARIS zajęło około dwie godziny. W sumie badania synchrotronowe trwały dobę*

i objęły sześć próbek. Analiza wyników nie była skomplikowana i zakończyła się w ciągu kilku dni.

Pomiary w NCPS SOLARIS to zaledwie fragment projektu. Od pomysłu na badania i pierwszych prób wytworzenia magnetycznych nanodrutów do publikacji minęły cztery lata. *Najbardziej pracochłonną częścią przedsięwzięcia było opracowanie metody syntezy nanodrutów, a następnie korelacja wyników analizy dyfrakcyjnej i magnetometrii* – przyznaje główna autorka publikacji dr inż. Katarzyna Hnida-Gut. *Mogę śmiało powiedzieć, że pomiary synchrotronowe to był chyba najprzyjemniejszy element tych badań* – dodaje.

Nanodrutu półprzewodnikowe są materiałem wykorzystywanym w wysokowydajnych ogniwach słonecznych oraz sensorach. *Mogą też znaleźć zastosowanie w elementach elektroniki przyszłości, w których ładunki będą płynęły nie w ścieżkach krzemowych, ale [w] węglowych nanorurkach, grafenie i nanodrutach półprzewodnikowych. W półprzewodnikach magnetycznych przepływ elektronów zależy od orientacji ich spinów. Można za ich pomocą zbudować tranzystor sterowany polem magnetycznym. Powinien on być znacznie szybszy i bardziej energooszczędny od tranzystorów tradycyjnych* – uważa prof. Sikora.

Główna autorka badań przyznaje, że chociaż do zastosowań praktycznych jeszcze daleka droga, to nie zmienia faktu, że jej projekt jest pierwszym takim badaniem nad elektrochemicznie wytworzonymi nanodrutami InSb-Mn. Dodatkowo nanodrutu przygotowane zostały w taki sposób, że są magnetyczne nie tylko w ultraniskich temperaturach, ale również w temperaturze pokojowej i wyższej (do 200°C). Jest to ważna innowacja w badaniach nad materiałami dla elektroniki. *Od dłuższego czasu pracujemy nad tranzystorem, który bazuje na niedomieszkowanym InSb (czystej substancji antymonku indu), więc skonstruowanie takiego urządzenia sterowanego polem magnetycznym wydaje się naturalnym kolejnym krokiem* – uzupełnia dr inż. Katarzyna Hnida-Gut.

W skład zespołu badawczego weszli naukowcy z Akademickiego Centrum Materiałów i Nanotechnologii AGH: dr inż. Katarzyna Hnida-Gut, dr inż. Antoni Żywczak, dr hab. inż. Marcin Sikora, dr inż. Marianna Marciszko-Wiąckowska oraz prof. dr hab. inż. Marek Przybylski.

**Nano Letters* jest amerykańskim czasopismem naukowym specjalizującym się w publikowaniu wyników badań z zakresu teorii i praktyki nanonauki i nanotechnologii.



**Księgarnia
internetowa
Wydawnictw
Uniwersytetu
Warszawskiego
www.wuw.pl**

Marian Smoluchowski

Selected Scientific Works

Editor Bogdan Cichocki



Fizyka to wielkie wyzwanie, ale również świetna zabawa. To najciekawszy na świecie przedmiot, gdyż mówi o tym, jak świat naprawdę działa. Tymczasem większość podręczników fizyki jest niemal całkiem pozbawiona informacji o związkach fizyki z otaczającym nas światem. Cała przyjemność studiowania fizyki gdzieś więc umyka. JW

Jearl Walker – wykładowca, demonstrator i popularyzator fizyki, współautor kultowego amerykańskiego podręcznika *Podstawy fizyki* stał się prawdziwym kolekcjonerem przykładów, doświadczeń, ciekawostek, historyjek i faktów świadczących o tym, że „fizyka jest wszędzie”, że niemal wszystko, co dzieje się wokół nas, można wyjaśnić na podstawie wiedzy z zakresu fizyki. Otóż zebrane przez Autora przykłady, doświadczenia, ciekawostki i fakty oraz ich wyjaśnienia za pomocą pojęć i praw fizyki są zawarte w tej publikacji, która dzieli się na siedem części dotyczących ruchu, płynów, dźwięków, ciepła, elektryczności i magnetyzmu, optyki oraz widzenia.

Przedstawione tu historyjki są bardzo różne – jedne całkiem proste, a inne bardzo skomplikowane, jedne niezwykle pomysłowe, a inne cokolwiek wydumane. Wiele z nich dotyczy różnych dyscyplin sportu, ewolucji cyrkowych, katastrof budowlanych, lawin śniegowych i kamiennych, instrumentów muzycznych i akustyki, sopli lodowych i płatków śniegu, błyskawic i elektryczności statycznej, tęczy i kalejdoskopów oraz złudzeń optycznych.

Czytelnik znajdzie tu odpowiedzi na najdziwniejsze pytania, na przykład:

- Czy można rozpałci ogień za pomocą lodu?
- Dlaczego tuż przed uderzeniem tornada (trąby powietrznej) niebo robi się zielone?
- Dlaczego mokry piasek jest ciemniejszy od suchego?
- Co jest przyczyną mirażu oazy?
- Czy można jeździć samochodem po suficie?
- Dlaczego gwiazdy migoczą?



Lapidarnie o fizyce

Czy można w dzisiejszych czasach popularyzować fizykę nie popadając w fantazje ani w sensacyjne spekulacje? Czy wśród wszechobecnego wrzasku medialnego jest miejsce na rzeczową i spokojną narrację, w przystępny sposób mówiącą o trudnych pojęciach bez ich nadmiernego upraszczania?

Przykładem na to, że odpowiedź na postawione wyżej pytania może być twierdząca, jest książka Dona S. Lemonsa *Fizyka w rysunkach* wydana w 2018 roku przez PWN. To bardzo skromna pozycja, niewyróżniająca się ani luksusowym papierem, ani kolorową szatą graficzną, a jednak pozostająca na długo w pamięci czytelników.

Narracja wydaje się dostosowana do czytelnika zabieganego – książka składa się z 51 krótkich esejów, prezentujących fakty z historii fizyki od czasów starożytnych do najnowszych. Wbrew tytułowi, rysunki mają tu znaczenie drugorzędne i często pełnią rolę ornamentu ozdabiającego, a nie uzupełniającego tekst. Nic to jednak nie szkodzi, bo Lemons jest mistrzem krótkiej formy i w sposób przemyślany, klarowny i zrozumiały wprowadza pojęcia i fakty z fizyki, niejednokrotnie dość skomplikowane.

Wielkim atutem książki jest jej polskie tłumaczenie. Jego autor, Michał Tarnowski, jest młodym, ale już nagradzonym popularyzatorem fizyki. Starannie unika epatowania czytelnika niepotrzebnie zaawansowaną terminologią i zagmatwaną składnią. Niewątpliwym atutem polskiego wydania są przygotowane przez tłumacza przypisy, które uzupełniają kontekst kulturowy oraz precyzują niektóre sformułowania oryginalnego tekstu. To właśnie erudycja i kultura językowa Tarnowskiego sprawiają, że książkę Lemonsa czyta się lekko i przyjemnie. Można ją przy tym polecić każdemu, kto choć trochę interesuje się fizyką i chciałby dowiedzieć się czegoś więcej o ideach leżących u jej podstaw.

dr hab. Krzysztof Turzyński, Wydział Fizyki UW

PWN
poleca

www.pwn.pl