

POSTĘPY FIZYKI

CZASOPISMO NAUKOWE POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO
POŚWIĘCONE UPOWSZECHNIANIU WIEDZY FIZYCZNEJ



M. M. Wójcik

Bezpośrednia detekcja cząstek ciemnej materii
– wyniki wybranych eksperymentów

I. Pacyniak, K. W. Fornalski, M. Kowalska

Alternatywne metody obliczania dawek pochłoniętych w biologicznej
dozymetrii promieniowania mieszanego $n + \gamma$

K. Turzyński

Anioły, demony, fizyka, czyli udająca powieść sensacyjną
najnowsza historia badań nad ciemną materią

Jak zmierzyć wzrok?

z profesorem R. Naskręckim rozmawiała M. Marciniak

ISSN 0032-5430



9 770032 543042 >

RADA REDAKCYJNA

Andrzej Kajetan Wróblewski (przewodniczący)
Mieczysław Budzyński
Andrzej Dobek
Witold Dobrowolski
Zofia Gołąb-Meyer
Józef Szudy

REDAKTOR HONOROWY

Adam Sobiczewski

ZESZYT ZREDAGOWAŁ ZESPÓŁ W SKŁADZIE

Maria Marciniak
Wawrzyniec Kaszub

ADRES REDAKCJI

Wydział Fizyki UAM
ul. Umultowska 85
61-614 Poznań
postepy@amu.edu.pl

KORRESPONDENCI ODDZIAŁÓW PTF

Anna Matwiejczyk (Białystok)
Aleksandra Wronkowska (Bydgoszcz)
Wojciech Gruhn (Częstochowa)
Tomasz Wąsowicz (Gdańsk)
Roman Bukowski (Gliwice)
Monika Richter (Katowice)
Aldona Kubala-Kukuś (Kielce)
Małgorzata Nowina-Konopka (Kraków)
Elżbieta Jartych (Lublin)
Michał Szanecki (Łódź)
Halina Pięta (Opole)
Arkadiusz Ptak (Poznań)
Małgorzata Pociask-Biały (Rzeszów)
Anna Kamińska (Słupsk)
Janusz Typek (Szczecin)
Michał Pawlak (Toruń)
Bernard Jancewicz (Wrocław)
Lidia Najder-Kozdrowska (Zielona Góra)

POLSKIE TOWARZYSTWO FIZYCZNE**ZARZĄD GŁÓWNY**

Katarzyna Chałasińska-Macukow (prezes), Bogdan Kowalski (sekretarz generalny), Piotr Rączka (skarbnik), Mariusz Dąbrowski, Maria Dobkowska, Henryk Figiel, Adam Gadomski, Jan Grabski, Dariusz Grech, Bernard Jancewicz, Andrzej Ślebarski, Zbigniew Trybuła, Witold Zawadzki, Andrzej Zięba, Elżbieta Zipper

ADRES ZARZĄDU

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

PRZEWODNICZĄCY ODDZIAŁÓW

Krzysztof Szymanski (Białystok), Adam Gadomski (Bydgoszcz), Stanisław Tkaczyk (Częstochowa), Jarosław Rybicki (Gdańsk), Jerzy Bodzenta (Gliwice), Janusz Gluza (Katowice), Małgorzata Wysocka-Kunisz (Kielce), Zdzisław Burda (Kraków), Jerzy Żuk (Lublin), Tadeusz Wibig (Łódź), Wiesław Olchawa (Opole), Alina Dudkowiak (Poznań), Andrzej Wal (Rzeszów), Mirosław Brozis (Słupsk), Mariusz P. Dąbrowski (Szczecin), Paweł Shroeder (Toruń), Radosław Przeniosło (Warszawa), Bernard Jancewicz (Wrocław), Van Cao Long (Zielona Góra).

Czasopismo ukazuje się od 1949 roku

Dofinansowanie zeszytu z roku 2015:

Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego

Wydawca: Polskie Towarzystwo Fizyczne

Korekta: Barbara Kostrzevska (bystreoko.pl)

Skład i łamanie: TeXtura (ntp-art.pl)

Druk i oprawa: Moś i Łuczak, Poznań

Nakład: 800 egzemplarzy

ISSN 0032-5430

Szanowni Państwo

Oddajemy w Państwa ręce kolejny zeszyt Postępów Fizyki. Wyjątkowy, ponieważ rok 2015 był dla Czasopisma także okresem wyjątkowym i burzliwym. Rozpoczynając dyskusję nad kształtem pisma na początku roku, zebraliśmy wszystkie pomysły, wybraliśmy te najciekawsze i rozpoczęliśmy poszukiwania autorów, którzy odpowiedzialiby na nie jak najatrakcyjniej. W ten sposób powstał obecny numer, w którym prezentujemy artykuły naukowe i pozanaukowe, wszystkie związane z fizyką i dla zainteresowanych tą dziedziną nauki. „Nauki życia” jak to ujął dr Paweł Janowski, jeden z laureatów Nagród PTF w 2014 roku, z którym wywiad publikujemy w niniejszym numerze.

Na łamach obecnego wydania proponujemy dwa ciekawe artykuły dotyczące badań nad ciemną materią, a także prezentujemy osiągnięcia związane z badaniami związanymi z oddziaływaniem tkanki biologicznej z promieniowaniem $n + \gamma$. W numerze znajdziecie Państwo wywiad z prof. Ryszardem Naskręckim, który odpowiada „jak zmierzyć wzrok”, a także opisuje początki Optyki Okularowej w Poznaniu i w Polsce.

Dzięki życzliwości korespondentów i wysiłkowi wkładanemu każdorazowo w przygotowanie tekstów do Kroniki, możemy Państwu przedstawić wspomnienia o prof. Jacku Hennelu i o prof. Januszu Wilczyńskim oraz przybliżyć sylwetkę prof. Briana C. J. Moore’a doktora honoris causa UAM w Poznaniu.

Zapraszamy do lektury!

Bezpośrednia detekcja cząstek ciemnej materii – wyniki wybranych eksperymentów 1

M. M. Wójcik

Alternatywne metody obliczania dawek pochłoniętych w biologicznej dozymetrii promieniowania mieszanego $n + \gamma$ 13

I. Pacyniak, K. W. Fornalski, M. Kowalska

Nieautoryzowana biografia profesora Jacka Hennela (z przymrużeniem oka) 22**Anioły, demony, fizyka, czyli udająca powieść sensacyjną najnowsza historia badań nad ciemną materią 23**

K. Turzyński

Polskie Towarzystwo Fizyczne patronem synchrotronu SOLARIS 26**Jak zmierzyć wzrok? Rozmowa z prof. dr. hab. Ryszardem Naskręckim 27**

M. Marciniak

Kronika Polskiego Towarzystwa Fizycznego 33**Brian C. J. Moore doktorem honoris causa Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu 34**

A. Sęk

Profesor dr hab. Jacek Hennel (1925–2014) 37

S. Kwieciński

Wspomnienie o Januszu Wilczyńskim (1938–2015) 39

A. Sobiczewski

Fizyka jest nauką życia 41

P. Janowski

USA oczami postdoca 43

Z. Malecha

Nowi profesorowie 45**Ulica Mariana Mięśowicza 46****Polskie Towarzystwo Wzrostu Kryształów 48****Książki nadesłane 38, 49**

POSTĘPY FIZYKI TOM 66 ZESZYT 1–4 ROK 2015

Bezpośrednia detekcja cząstek ciemnej materii

– wyniki wybranych eksperymentów

Marcin Marian Wójcik

Instytut Fizyki Uniwersytet Jagielloński

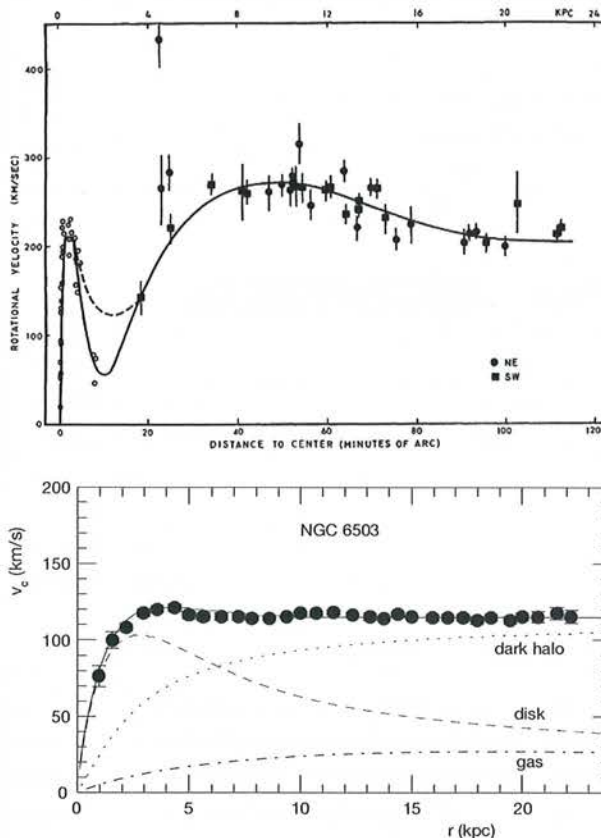
Wyniki obserwacji astronomicznych z ostatnich stu lat oraz obliczeń modelowych wskazują, iż ponad 80% masy Wszechświata ma postać ciemnej materii. Przyjmuje się, że tworzą ją głównie neutralne cząstki spoza Modelu Standardowego, oddziałujące grawitacyjnie ze zwykłą materią i prawdopodobnie niezwykle słabo w innych procesach.

Materia widoczna w formie świecących gwiazd i obłoków gazu stanowi zaledwie część całkowitej masy galaktyk. Materia ciemna, której istnienie stwierdzamy jedynie dzięki wywołanym przez nią efektom grawitacyjnym, stanowi jedną z największych zagadek współczesnej astronomii. Dysponujemy przekonującymi argumentami za jej występowaniem w galaktykach i gromadach galaktyk. Ciemna materia nie może być bezpośrednio zaobserwowana przy użyciu np. teleskopów, ponieważ nie emituje ona ani nie absorbuje promieniowania elektromagnetycznego na zauważalnym poziomie. Jest ona rodzajem hipotetycznej materii w kosmologii i astrofizyce, która ma uzupełnić brakującą we Wszechświecie masę.

Astrofizycy „zmuszeni byli” do postawienia hipotezy zakładającej istnienie ciemnej materii w wyniku zaobserwowanych rozbieżności pomiędzy masą wielkich obiektów astronomicznych, wyznaczaną w oparciu o ich oddziaływanie grawitacyjne, a masą szacowaną na podstawie materii świecącej. Jej istnienie jest dedukowane z grawitacyjnego oddziaływania ciemnej materii na zwykłą materię, na promieniowanie oraz formowanie się struktur wielkoskalowych we Wszechświecie. W długiej historii obserwacji astronomicznych wskazujących na istnienie ciemnej materii wymienić należy:

Krzywe rotacji galaktyk Najwcześniejsze i ciągle najbardziej sugestywne wskazania na istnienie ciemnej materii są wynikiem obserwacji krzywych rotacji galaktyk, czyli zależności średniej prędkości rotacji gwiazdy wokół centrum galaktyki od odległości

gwiazdy od centrum. Jako pierwszy istnienie ciemnej materii postulował holenderski astronom Jan Oort w 1932 r., analizując prędkości orbitalne gwiazd w Drozdzie Mlecznej. Do podobnego wniosku doszedł rok później pracujący w USA szwajcarski astronom Fritz Zwicky. Pod koniec lat 60. ubiegłego wieku amerykańska astronom Vera Rubin wykonała dokładne pomiary prędkości gwiazd w Galaktyce Andromedy [1] i przez obserwację jej płaskiej krzywej rotacji (rys. 1) doszła do wniosku, że rozciąga się ona dalej niż jest widoczna i składa się w dużej części z ciemnej materii. Prędkość rotacji jest mierzona głównie poprzez



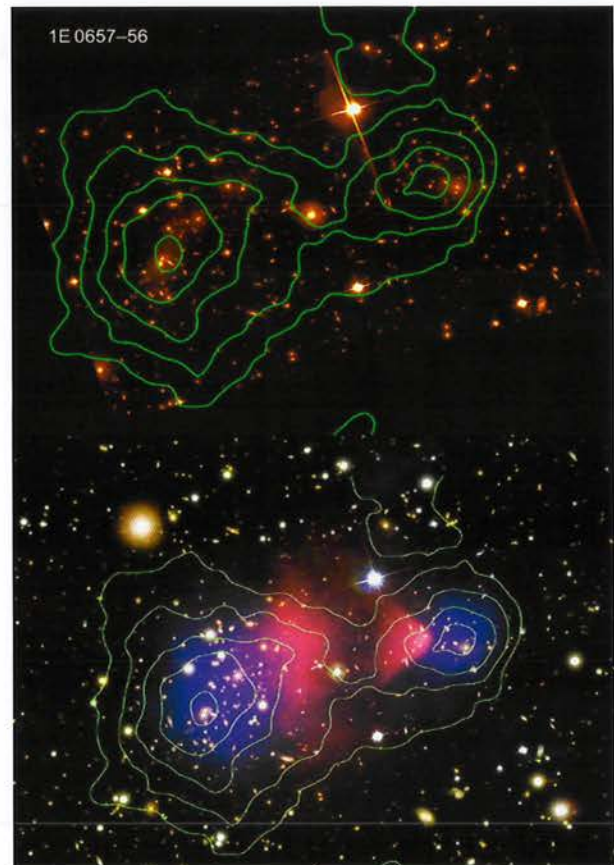
Rys. 1. Krzywa rotacji Galaktyki Andromedy [1] oraz galaktyki NGC 6503 [2]

obserwację przesunięcia dopplerowskiego linii widmowych. Prędkość rotacji gwiazd galaktyki, zwłaszcza poza obszarem, w którym skupiona jest widzialna materia, powinna być odwrotnie proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego z odległości gwiazdy od centrum: $v(r) \sim (r)^{-0,5}$. Natomiast krzywa dopasowana do wartości mierzonych przebiega praktycznie poziomo (rys. 1) i odbiega daleko od krzywej wynikającej z rozkładu masy widzialnych gwiazd. Sprawia to wrażenie, jakby gwiazdy nie obiegały widocznego centrum galaktyki, lecz krążyły wokół wielu oddziałujących grawitacyjnie centrów. Jako przykłady można wymienić galaktyki: NGC 2403, NGC 2841, NGC 2903, NGC 3196, NGC 6503, NGC 6603 i NGC 7331. Istnieje niepewność rozkładu masy ciemnej materii w pobliżu centrum galaktyki, lecz poza tym obszarem jest on dedukowany w oparciu o obserwowane prędkości gwiazd i jest opisany zależnością Navarro–Frenk–White’a (profil gęstości NFW) [3]. Szacowana masa ciemnej materii w galaktyce jest 10–100 razy większa od masy świecącej materii.

Podjęmowane są próby innego opisu obserwowanych krzywych rotacji galaktyk spiralnych, który nie wymaga istnienia znaczącej ilości ciemnej materii w ich dyskach [4], w szczególności w dysku naszej Drogi Mlecznej.

Prędkości orbitalne galaktyk w klastrach W 1933 r. Fritz Zwicky, obserwując gromadę galaktyk Coma, zauważył, że galaktyki w pewnych zgrupowaniach poruszały się z prędkością większą niż wynikało to z siły grawitacji, utrzymującej te galaktyki w zgrupowaniach, obliczonej na podstawie masy galaktyk w oparciu o ich jasność [5]. Do wyjaśnienia tego problemu Zwicky zaproponował istnienie ciemnej materii.

Klaster Bullet Obserwacja oddalonego o 3,5 mld lat świetlnych klastra galaktyk Bullet dostarcza najbardziej bezpośrednich danych wskazujących na istnienie ciemnej materii. Zderzenie dwóch klastrów galaktyk spowodowało prawdopodobnie rozseparowanie materii barionowej oraz ciemnej materii. Obserwacje gazu o temperaturze 10^7 – 10^8 K i plazmy w widmie rentgenowskim wskazują na lokalizację materii barionowej głównie w centrum klastra Bullet (rys. 2). Oddziaływania elektromagnetyczne pomiędzy cząstkami gazu zderzających się galaktyk spowodowały ich zahamowanie i niemal zatrzymanie w obszarze kolizji. Natomiast obserwacje słabego soczewkowania grawitacyjnego tego samego klastra wskazują na główną koncentrację masy poza centralnym obszarem z gazem barionowym, emitującym promieniowanie rentgenowskie. Ponieważ ciemna materia nie oddziałuje



Rys. 2. Klaster Bullet. Zdjęcie u góry wykonano przy użyciu teleskopu Hubble’a, na którym zielone kontury przedstawiają miejsca o jednakowym potencjale grawitacyjnym, wyznaczone w oparciu o soczewkowanie grawitacyjne. Natomiast zdjęcie u dołu w widmie rentgenowskim wykonał satelita Chandra. Widoczna jest charakterystyczna fala uderzeniowa świecącego gazu (kolor różowy), będącego dominującym składnikiem materii świecącej klastrów. Rozkład potencjału grawitacyjnego (kolor niebieski, zielone kontury) nie jest zgodny z rozkładem świecącego gazu.

elektromagnetycznie, nie została ona zahamowana, tak jak to miało miejsce w przypadku gazu. Ciemna materia w czasie 200 mln lat, jaki upłynął od kolizji, oddaliła się z miejsca zderzenia na większą odległość niż gaz.

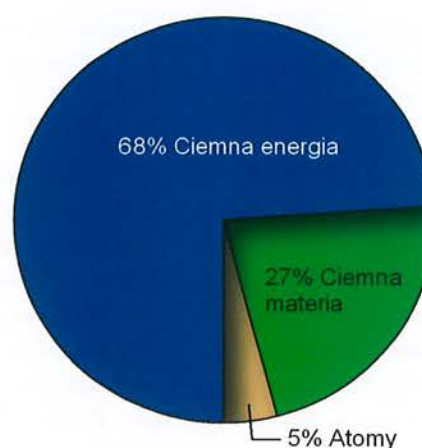
Inaczej niż w przypadku krzywych rotacji galaktyk, to *bezpośrednie wskazanie* na istnienie ciemnej materii nie jest zależne od szczegółów (zmodyfikowana dynamika) newtonowskiej teorii grawitacji. Mniej popularne są próby innej interpretacji obserwowanego w tym przypadku soczewkowania grawitacyjnego.

Promieniowanie mikrofalowe tła Najsilniejsze wskazanie istnienia ciemnej niebarionowej materii wynika jednak z obserwacji prowadzonych początkowo na orbicie Ziemi przez Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) [6], później Sloan Digital Sky Survey (SDSS) [7] oraz ostatnio w eksperymencie Planck [8]. Badano anizotropię mikrofalowego promieniowania tła, które odłączyło się od materii 380 000 lat po Wiel-

kim Wybuchu. Ponieważ fotony mikrofalowego promieniowania tła były ściśle związane z barionami bezpośrednio przed odłączeniem (przed rekombinacją) i od tego czasu nie były zakłócone, niosą one informację o stanie materii w chwili ich odłączenia. Widmo mocy anizotropii promieniowania mikrofalowego tła, zarejestrowanego najpierw przez WMAP, natomiast ostatnio przez zespół Planck, w sferycznych harmonicznych, posiada bardzo charakterystyczną strukturę. Przy użyciu modelu kosmologicznego zawierającego tylko sześć parametrów można bardzo dobrze opisać to widmo mocy. Bardzo dobra zgodność wyników obserwacyjnych WMAP i modelu kosmologicznego jest jednym z największych osiągnięć ostatniego stulecia. Uwzględniając wyniki pomiarów z WMAP, SDSS oraz Planck, otrzymano, iż gęstości względne materii barionowej, ciemnej materii i ciemnej energii wynoszą odpowiednio: $\Omega_b = 4,9\%$, $\Omega_{CDM} = 26,8\%$ i $\Omega_\Lambda = 68,3\%$ (rys. 3).

Pierwotna nukleosynteza Po Wielkim Wybuchu, kiedy temperatura spadła poniżej 1 keV, niewiędzone w jądrach neutrony rozpadły się, natomiast bariony pozostały jako wolne protony, ^4He i mniej niż 1% innych jąder. Ponieważ znamy wyniki pomiarów przekrojów czynnych dla odpowiednich procesów oraz wiemy, jak gęstość materii i temperatura ewoluowały w czasie, to – w oparciu o ogólną teorię względności i równania Friedmana – możemy wyznaczyć względne abundancje poszczególnych pierwiastków z pierwotnej nukleosyntezy w oparciu o całkowitą gęstość materii barionowej [9]. Dlatego pomiar pierwotnych gęstości pierwiastków (przed nukleosyntezą w gwiazdach) pozwala określić całkowitą średnią gęstość materii barionowej we Wszechświecie. Pomiar pierwotnych gęstości pierwiastków dokonywany jest na drodze obserwacji względnej absorpcji światła z odległych galaktyk, przechodzącego przez pył międzygwiazdny. Dokładne wyniki pomiarów stosunku wodoru do deuteru pozwalają w oparciu o „pierwotną nukleosyntezę” wyznaczyć całkowitą gęstość materii barionowej na poziomie $\Omega_b = 4,0\%$. Ten wynik jest zgodny z rezultatami otrzymanymi w oparciu o pomiary promieniowania relikтового i jest on kolejnym niezależnym argumentem za tym, że materia barionowa stanowi zaledwie małą część gęstości Wszechświata.

Formowanie się struktur wielkoskalowych Galaktyki i klastry galaktyk są największymi związanymi układami. Włókna gromad i supergromad galaktyk, Wielkie Ściany z superklastrow i „puste” przestrzenie pomiędzy nimi są największymi strukturami obserwowanymi we Wszechświecie. Ciemna materia jest



Rys. 3. Gęstości materii barionowej, ciemnej materii i ciemnej energii

kluczem do zrozumienia ewolucji i obecnej struktury galaktyk, klastrow galaktyk i pustek pomiędzy nimi [10]. Fluktuacje w skalach galaktycznych byłyby zniwelowane w przypadku cząstek ciemnej gorącej materii, poruszających się z prędkościami zbliżonymi do prędkości światła. Struktury byłyby większe niż obserwowane i utworzyłyby się później na skali ewolucji Wszechświata. Natomiast fluktuacje o rozmiarach galaktyk nie byłyby „rozmyte”, gdyby cząstki ciemnej materii były „ciepłe”. W symulacjach fluktuacje kosmologiczne zostają zachowane i formowanie się galaktyk występuje odpowiednio wcześniej, jeżeli Wszechświat wypełniony jest wolno poruszającymi się cząstkami ciemnej zimnej materii.

Postać ciemnej materii

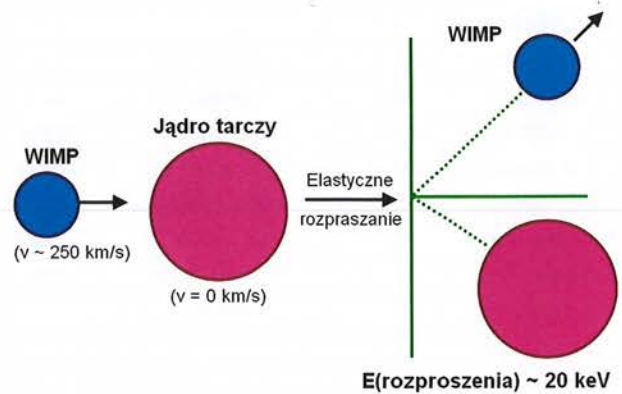
Małą część ciemnej materii może stanowić materia barionowa: nieświecący gaz, małe obiekty astronomiczne, np. MACHOs (Massive Compact Halo Objects), zbudowane ze zwykłej materii, które słabo lub w ogóle nie emitują promieniowania elektromagnetycznego, oraz brunatne karły i superciężkie czarne dziury. Jednak badania nukleosyntezy w Wielkim Wybuchu dostarczają górnego ograniczenia na ilość materii barionowej we Wszechświecie, które wskazuje, że zdecydowana większość ciemnej materii nie jest materią barionową i nie mogą to być atomy. Neutrino posiadające relatywistyczne prędkości nie odegrały istotnej roli w ewolucji struktur we Wszechświecie. One uniemożliwiłyby tworzenie się zgęszczeń gazu we Wszechświecie, opóźniając pojawienie się pierwszych gwiazd, co byłoby sprzeczne z danymi z misji satelitarnych WMAP, SDSS oraz Planck. Neutrino nie mogą również być istotnym składnikiem ciemnej materii ze względu na ich niewielką masę (suma mas wszystkich rodzajów neutrin $< 0,9 \text{ eV}/c^2$ – w dalszej czę-

ści artykułu przyjęto $c = 1$). Kandydatami na ciemną materię są hipotetyczne cząstki – aksjony i cząstki supersymetryczne.

Aksjony Aksjony są hipotetycznymi cząstkami elementarnymi, zaproponowanymi, aby wyjaśnić istnienie zerowego, elektrycznego momentu dipolowego neutronu [11, 12]. Aksjon nie ma ładunku elektrycznego, nie ma spinu i oddziałuje bardzo słabo ze zwykłą materią. Jeżeli istnieje, aksjon powinien posiadać niewielką masę. Aksjony mogły być produkowane w Wielkim Wybuchu w dużych ilościach. Reliktowe aksjony są bardzo dobrymi kandydatami na ciemną materię we Wszechświecie. Znając lokalną gęstość halo galaktycznego, możemy oszacować liczbę aksjonów na ok. 10^{13} cm^{-3} .

Weakly Interacting Massive Particles (WIMP) Najbardziej interesującym „kandydatem na ciemną zimną materię” są masywne, słabo oddziałujące cząstki występujące w wielu teoriach wychodzących poza Model Standardowy. Jeżeli WIMP-y stanowiłyby ciemną materię w naszej Galaktyce, to można by było obserwować ich elastyczne rozpraszanie na jądrach w obszarze czynnym detektorów cząstek. W większości eksperymentów poszukujących bezpośrednio ciemnej materii podejmuje się próby wykrycia oddziaływań WIMP-ów z jądrami detektora na poziomie słabych oddziaływań lub poniżej. Poszukuje się WIMP-ów o masach w granicach 1 GeV–1 TeV. Przyjmuje się, że WIMP-y uwięzione w polu grawitacyjnym Galaktyki są „zimne”, nie oddziałują i tworzą sferycznie symetryczne halo. Zakładając maxwellowski rozkład prędkości WIMP-ów w układzie odniesienia związanym z halo galaktycznym, obcięcie tego rozkładu dla galaktycznej prędkości ucieczki WIMP-ów równej $544 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, gęstość ciemnej materii w pobliżu Ziemi na poziomie $0,3 \text{ GeV} \cdot \text{cm}^{-3}$, średnią prędkość rotacji Ziemi wokół centrum Galaktyki zbliżoną do $250 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, masę WIMP równą 100 GeV, przekrój czynny na oddziaływanie WIMP-nukleon na poziomie 10^{-45} cm^2 oraz na przykład argon jako tarczę, otrzymuje się liczbę oddziaływań WIMP-ów z tarczą na poziomie $10^{-4} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ (d – dzień) Rejestracja WIMP-ów nie jest zatem problemem. Główną trudnością jest identyfikacja wywołanych przez nie zdarzeń w obecności nieuniknionego tła.

Według nowej propozycji zakłada się istnienie podgrupy silniej oddziałujących cząstek ciemnej materii sDM, które w wyniku zderzeń tracą energię podobnie jak bariony [13]. Ta podgrupa cząstek może mieć gęstość energii Ω_{sDM} , podobną do gęstości materii barionowej. Jeżeli ich dynamika jest dysypatywna,



Rys. 4. Rozpraszanie WIMPów na jądrach detektora

to cząstki te będą tracić energię i tworzyć dysk wewnątrz Galaktyki podobnie jak materia barionowa. Nasza Droga Mleczna może zawierać struktury złożone z oddziałujących cząstek ciemnej materii, analogiczne do struktur w świecie widzialnym, w postaci dysku równoległego do naszego dysku galaktycznego. Dwa efekty mogą utrudnić bezpośrednią detekcję tych cząstek. Ziemia może znajdować się poza dyskiem ciemnej materii (dysk ciemnej materii nie pokrywa się z dyskiem Drogi Mlecznej lub dysk ciemnej materii jest zbyt cienki). Jeżeli nawet dyski przenikają się, to mają one tendencję do poruszania się ze zbliżonymi prędkościami obrotowymi, co spowoduje, iż względne prędkości cząstek ciemnej materii i jąder detektora będą niewielkie. Energia kinetyczna przekazana w zderzeniu z jądrem będzie niższa od progów detekcji obecnych eksperymentów.

Próby wykrycia cząstek ciemnej materii

W ostatnich kilkadziesiąt lat zbudowano szereg detektorów, których zadaniem była rejestracja cząstek ciemnej zimnej materii. Najczęściej poszukiwano cząstek supersymetrycznych. Jeden z detektorów, odpowiednio zaprojektowany, został użyty do prób rejestracji aksjonów. Natomiast w innych eksperymentach poszukiwano cząstek ciemnej zimnej materii niezależnie od modelu. Spośród ponad trzydziestu obecnie prowadzonych lub planowanych eksperymentów przedstawionych zostanie kilka, których wyniki są najczęściej dyskutowane.

Próba detekcji aksjonów – Axion Dark Matter Experiment (ADMX) Na potrzeby eksperymentu przyjmuje się istnienie sprzężenia aksjon-foton. Pozwala to na konwersję aksjonu na fotony w obecności silnego pola magnetycznego w oparciu o tak zwany efekt Primakoffa.

Najlepszą techniką poszukiwania aksjonów tworzących galaktyczną ciemną materię jest użycie strojonej, mikrofalowej wnęki rezonansowej. Energia fotonów jest równa masie spoczynkowej aksjonu z niewielkim przyczynkiem od jego energii kinetycznej. Dla dolnej wartości masy, z przedziału mas dla aksjonów, częstotliwość fotonów odpowiada promieniowaniu mikrofalowemu. Wnęka rezonansowa o wysokiej dobroci, dostrojona do masy aksjonu, powinna być znakomitym detektorem fotonów konwersji.

W eksperymencie ADMX [14,15] zastosowano tę ideę, budując cylindryczną wnękę o średnicy 50 cm i długości 100 cm. Dobroć tej wnęki jest rzędu $2 \cdot 10^5$, natomiast częstotliwość rezonansowa (460 MHz dla pustej wnęki) jest regulowana do 860 MHz przy użyciu prętów metalowych i prętów wykonanych z dielektryka. Schemat aparatury pokazano na rys. 5. Wnęka znajduje się w polu nadprzewodzącego magnesu o natężeniu 7,6 T, wywołującym konwersję aksjon/foton.

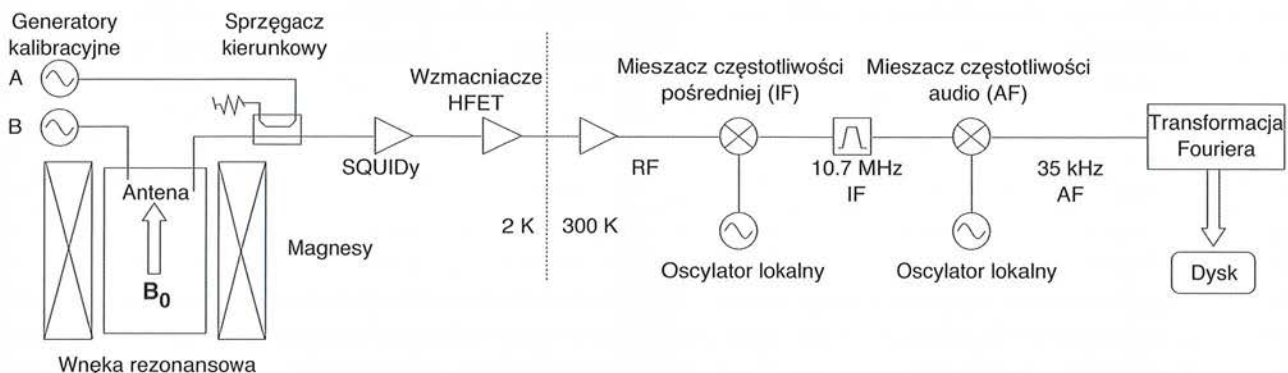
Dotychczas w eksperymencie ADMX wykluczono modele zakładające istnienie aksjonów o masach w przedziale od 1,9 do 3,53 μeV jako głównych składników galaktycznego halo [15]. Niezależny kanał aparatury przeznaczony jest do poszukiwania struktury subtelnej sygnału aksjonowego. Zespół ADMX ma nadzieję, iż w następnych 10 latach odkryje lub wykluczy istnienie aksjonów o masach do 20 μeV .

Eksperyment DAMA/LIBRA (Dark Matter Search)

Eksperyment DAMA/LIBRA został zlokalizowany w laboratorium podziemnym w Gran Sasso, gdzie systemy detekcyjne osłonięte są przed promieniowaniem kosmicznym warstwą skał o grubości 1400 m. Strumień mionów w laboratorium ($1 \text{ m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) jest o 10^6 razy mniejszy niż na powierzchni. Dane w eksperymencie DAMA zbierane były początkowo przez kil-

ka lat przy użyciu dziewięciu detektorów. Natomiast później (od 2003 r. DAMA/LIBRA) używano dwudziestu pięciu scyntylatorów NaI(Tl), każdy o masie 9,7 kg, umieszczonych w obudowach z czystej pod względem zawartości izotopów promieniotwórczych miedzi elektrolitycznej. Każdy scyntylator wyposażony był w dwa światłowody o długości 10 cm, połączone optycznie do jego dwóch przeciwległych ścian. Taka konstrukcja powoduje oddalenie fotopowielaczy od kryształu i zmniejsza prawdopodobieństwo rejestracji kwantów gamma emitowanych przez zanieczyszczenia promieniotwórcze zawsze obecne w szkłe i innych komponentach fotopowielacza. Dwa niskotłowe fotopowielacze, połączone ze światłowodami i kryształem NaI(Tl), pracują w koincydencji, co eliminuje tło generowane przez każde urządzenie z osobna. Niski poziom szumów oraz niskie tło promieniowania umożliwiają rejestrację pojedynczych fotonów i zdarzeń o energiach równych lub większych od 2 keV.

Dwadzieścia pięć tak zbudowanych detektorów umieszczono we wspólnej komorze, która znajduje się wewnątrz wielowarstwowej osłony pasywnej, wykonanej z niskoaktywnej miedzi (najbliżej detektorów), ołowiu niskoaktywnego, folii kadmowej, polietylenu i parafiny. Neutrony z rozszczepienia U i Th zawartego głównie w ścianach laboratorium, a także neutrony generowane przez resztkowe promieniowanie kosmiczne (miony) są spowalniane w parafinie i polietylenie, a następnie absorbowane w kadmie. Wnętrze komory detektorów wypełnione jest wolnym od Rn azotem, czerpanym z butli stalowych przechowywanych dłuży czas (aby rozpadł się Rn) przed użyciem w laboratorium podziemnym. Dodatkowo cała osłona znajduje się w atmosferze czystego azotu ze stabilizowaną temperaturą, której wahania mogłyby mieć wpływ na wyniki pomiarów.



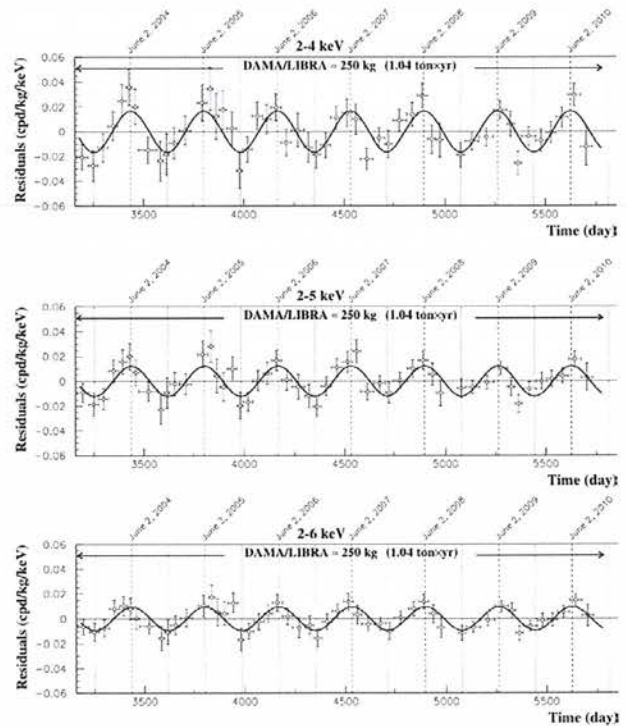
Rys. 5. Schemat eksperymentu ADMX [15]. Fotonów powstających we wnęcie rezonansowej w wyniku konwersji aksjonów, są rejestrowane przez antenę. Sygnał jest wzmacniany przez SQUID (nadprzewodzący interferometr kwantowy) i HFETs (wzmacniacz z hetero-strukturalnymi tranzystorami polowymi), a następnie mieszany i filtrowany przy użyciu podwójnej heterodyny. W kolejnym stopniu sygnał jest digitalizowany i analizowany przez zoptymalizowaną dla aksjonów FFT (szybka transformata Fouriera).

Celem eksperymentu DAMA/LIBRA jest poszukiwanie cząstek ciemnej zimnej materii w oparciu o sygnaturę związaną z ruchem Układu Słonecznego wokół centrum Galaktyki i ruchem Ziemi wokół Słońca. Zgodnie z modelem halo galaktycznego, jego cząstki (np. WIMP-y) mają maxwellowski rozkład prędkości. Te cząstki ciągle bombardują Ziemię. WIMP-y, zderzając się sprężyste z jądrami detektora, przekazują energię rzędu keV. Część tej energii jest emitowana przez NaI(Tl) w postaci światła rejestrowanego przez fotopowielacze. Rejestrowane jest widmo energetyczne takich zdarzeń powyżej 2 keV i dokonywana jest analiza czasu narastania impulsów, co pozwala skutecznie eliminować zdarzenia tła. Bardzo dobrą sygnaturą WIMP-ów byłaby roczna modulacja rejestrowanego sygnału, związana z oczekiwanym większym strumieniem tych cząstek w czerwcu, kiedy to składowa prędkość orbitalnej Ziemi dodaje się do prędkości Układu Słonecznego. Natomiast mniejszy strumień jest oczekiwany w grudniu, kiedy prędkości te się odejmują. Sygnał generowany przez WIMP-y musi spełniać następujące warunki:

- modulowany jest sygnał z pojedynczych detektorów (jest mało prawdopodobne, aby WIMP wytworzył sygnał w dwóch detektorach równocześnie),
- modulowany jest sygnał w dobrze określonym przedziale energii,
- modulacja jest sinusoidalna z rocznym okresem (T),
- maksimum sinusoidy przypada na 2 czerwca,
- amplituda modulacji $\leq 7\%$ w optymalnym przedziale energii.

W eksperymencie DAMA/LIBRA analizowano niezależną od modelu, roczną modulację sygnału w oparciu o zmienność czasową ilości pojedynczych zdarzeń w najniższym ograniczonym przez szumy detektorów przedziale energii (≥ 2 keV) w czasie czterech rocznych cykli (ogólna ekspozycja równa 1,33 ton · lat) [16]. Jeżeli do danych zebranych w przedziale energii 2–6 keV w ciągu 14 lat dopasujemy sinusoidę $A = A_0 \cos \omega(t - t_0)$ ze wszystkimi wolnymi parametrami, to otrzymujemy $A_0 = (0,0112 \pm 0,0012)$ cpd/kg/keV, $t_0 = (144 \pm 7)$ dni, $T = 2\pi/\omega = (0,998 \pm 0,002)$ roku. Uzyskano bardzo dobre dopasowanie do danych eksperymentalnych – na poziomie $9,3\sigma$ [16].

Na rys. 6. przedstawiono modulację rejestrowanej szybkości zliczeń w funkcji czasu dla układu detekcyjnego o masie 250 kg i ekspozycji wynoszącej 1,04 ton · lat. Do wyników doświadczalnych, gromadzonych w latach 2003–2010, dopasowano sinusoidę o okresie 1 rok i maksimum przypadającym na 2 czerwca. Z dopasowania danych taką sinusoidą otrzymano amplitudy A_0 modulacji, równe:



Rys. 6. Sygnał rejestrowany w eksperymencie DAMA/LIBRA dla 3 przedziałów energii [16]

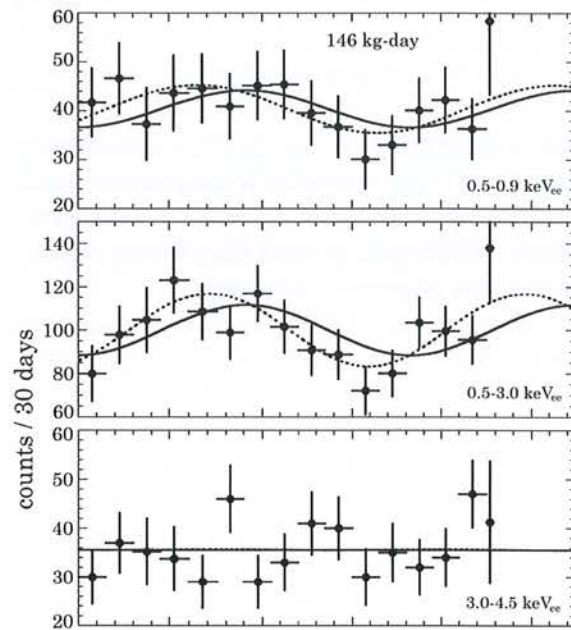
- $(0,0167 \pm 0,0022)$ cpd/kg/keV dla przedziału energii 2–4 keV,
- $(0,0122 \pm 0,0016)$ cpd/kg/keV dla przedziału energii 2–5 keV,
- $(0,0096 \pm 0,0013)$ cpd/kg/keV dla przedziału energii 2–6 keV.

Porównano również oscylacje dla dwóch różnych przedziałów energii: 2–6 keV oraz 6–14 keV. W przedziale 6–14 keV nie stwierdzono występowania oscylacji, co wyklucza neutrony jako źródło zmiennego w czasie sygnału. Dodatkowo nie obserwowano modulacji sygnału w przedziale energii 2–6 keV dla wielokrotnych zdarzeń (sygnał w dwóch lub więcej detektorach równocześnie), które mogłyby wywołać neutrony termiczne lub szybkie neutrony. Obliczono, że zmienny w czasie strumień neutronów obserwowany w LNGS nie wpływa na modulację w stopniu większym niż $0,5\% A_0$. Oceniono, że zmienny w czasie strumień mionów nie może wywołać modulacji większej niż $0,3\% A_0$. Ewentualne zmiany w czasie wydajności rejestracji systemów detekcyjnych i kalibracji energetycznej nie mają większego udziału niż $2\% A_0$. Wpływ zmiennych w czasie szumów/zakłóceń jest mniejszy od $1\% A_0$. Roczne wahania temperatury nie wnoszą do obserwowanej modulacji więcej niż $0,5\% A_0$. Zmieniające się w cyklu rocznym stężenie R_n w powietrzu laboratorium ma znikomy wpływ na modulację sygnału, nieprzekraczający $0,2\% A_0$.

Modulacja sygnału rejestrowanego przez detektor NaI(Tl) w przedziale energii 2–6 keV spełnia zatem wszystkie kryteria dla standardowego halo galaktycznego. Niezależna od modelu analiza danych z eksperymentu DAMA/LIBRA, zebranych w czternastu rocznych okresach, dostarcza, według autorów, ewidencji na istnienie ciemnej materii w galaktycznym halo na poziomie $9,3 \sigma$ [16].

Eksperyment Coherent Germanium Neutrino Technology (CoGeNT) Eksperyment CoGeNT prowadzony jest w stosunkowo płytkim laboratorium podziemnym Soudan Underground Laboratory w Minnesocie, na głębokości 780 m (2090 m równoważnika wodnego), zlokalizowanym w nieczynnej już kopalni żelaza. Strumień mionów kosmicznych zredukowany jest przez warstwę skał o czynnik $5 \cdot 10^4$. W pierwszej fazie eksperymentu zastosowano pojedynczy detektor półprzewodnikowy typu BEGe (Broad Energy Germanium – detektor germanowy może rejestrować promieniowanie o energii powyżej ułamka eV) o masie kryształu 0,44 kg, zbudowany z wykorzystaniem niskotłowych technologii [17]. Wewnętrzne elementy detektora wykonano z miedzi elektrolitycznej OFHC (Oxygen Free High Conductivity) oraz teflonu. Części kriostatu znajdujące się w bezpośrednim sąsiedztwie kryształu germanu również wykonane są z miedzi OFHC. Osłona bierna detektora wykonana jest z trzech rodzajów ołowiu. Pierwsza warstwa, sąsiadująca bezpośrednio z detektorem, zbudowana jest ze starożytnego ołowiu, zawierającego zaledwie $0,02 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ promieniotwórczego izotopu ^{210}Pb . Warstwa ta absorbuje promieniowanie hamowania generowane przez ^{210}Pb , ^{210}Bi w drugiej warstwie, zbudowanej z ołowiu o zawartości ^{210}Pb na poziomie $100 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$. Dzięki temu osiągnięto bardzo niski indeks tła w obszarze niskich energii. Trzecia zewnętrzna warstwa zbudowana jest z normalnego ołowiu. Łączna grubość osłony z ołowiu jest nie mniejsza niż 25 cm. Osłona z ołowiu obłożona jest płytami z polietylenu zawierającego bor. Zadaniem tej warstwy o grubości 2,5 cm jest absorpcja neutronów termicznych. Ołów łącznie z polietylenem jest zamknięty w hermetycznej aluminiowej obudowie, której wnętrze jest w sposób ciągły „przepłukiwane” czystym, parującym z dewara azotem celem usuwania generowanego we wnętrzu radonu. Całość ze wszystkich stron otoczona jest 18-centymetrową warstwą twardego polietylenu, stanowiącego moderator neutronów. Na wewnątrz moderatora zainstalowano dziesięć dużych paneli plastikowych z fotonowielaczami, które stanowią detektor weta mionowego.

Dokonano starannej analizy składników tła oraz analizy kształtu impulsów mierzonego sygnału. Umo-



Rys. 7. Sygnał rejestrowany w eksperymencie CoGeNT. Linia ciągła odpowiada obliczeniom modelowym. Linia przerywana została dopasowana do zarejestrowanych danych doświadczalnych [18]

żliwia to prowadzenie pomiarów z progiem energetycznej dyskryminacji równym 0,5 keV. Mogą zatem być rejestrowane zdarzenia (energia odrzutu) wywołane poprzez rozpraszanie WIMP-ów o stosunkowo małej masie, na jądrach detektora. Zastosowane rozwiązania umożliwiły po raz pierwszy próbę detekcji WIMP-ów o masach w obszarze 10 GeV, który jest interesujący ze względu na wyniki innych eksperymentów. Na początku 2011 r. zakończono trwający 442 dni pierwszy okres zbierania danych o całkowitej ekspozycji 146 kg-dni. Mierzony niskoenergetyczny sygnał wykazuje roczne oscylacje przedstawione na rys. 7. Linia ciągła na tym rysunku odpowiada obliczeniom modelowym przy założeniu masy WIMP-ów równej 7 GeV oraz maxwellowskiemu rozkładowi prędkości WIMP-ów w galaktycznym halo. Linia przerywana została dopasowana do zarejestrowanych danych doświadczalnych. Autorzy konkludują, iż zaobserwowana modulacja sygnału dosyć dobrze zgadza się z przewidywaniem modelowym oraz że obserwowany sygnał jest być może generowany przez WIMP-y [18]. Planowane jest uruchomienie kolejnej fazy eksperymentu z użyciem czterech podobnych detektorów umieszczonych w głębszym laboratorium podziemnym.

Eksperyment CDMS (Cryogenic Dark Matter Search) Eksperyment CDMS II (lub CDMS Soudan) prowadzony jest w tym samym laboratorium podziemnym Soudan, w którym zlokalizowany był ekspery-

ment CoGeNT, aby zredukować tło od promieniotwórczości naturalnej i promieniowania kosmicznego. Zespół CDMS wykorzystuje detektory krzemowe i germanowe do rejestracji WIMP-ów poprzez ich elastyczne rozpraszanie na jądrach Ge i Si [19]. Celem eksperymentu CDMS II jest wyznaczenie lub podanie ograniczenia na niezależny od spinu przekrój czynny na rozpraszanie WIMP-jądro poprzez długotrwałą ekspozycję detektorów półprzewodnikowych.

W eksperymencie CDMS II użyto zestawu detektorów Ge (każdy z 19 detektorów Ge o masie 230 g) i Si (każdy z 11 detektorów Si o masie 105 g) typu ZIP (Z-dependent Ionization and Phonon), chłodzonych do temperatury < 40 mK, umieszczonych w osłonie pasywnej. Osłona pasywna detektorów zbudowana jest z miedzi o grubości 0,5 cm, ołowiu o grubości 22,5 cm oraz 50-centymetrowej warstwy polietylenu, które redukują tło od zewnętrznych fotonów i neutronów. System antykoincydencji w postaci scyntyлятора o grubości 5 cm pozwala identyfikować naładowane cząstki (także niektóre cząstki nienaładowane) przechodzące przez osłonę. Materiały znajdujące się w pobliżu detektorów były starannie selekcionowane, aby zminimalizować produkcję neutronów w rozpadach promieniotwórczych. Neutrony powstające na zewnątrz osłony są wystarczająco spowolnione w polietylenie i mogą w zderzeniach z jądrami Ge i Si przekazać jedynie niewielką energię, niższą od energii progowej detektora. Neutrony generowane w osłonie przez wysokoenergetyczne miony są eliminowane przez osłonę antykoincydencyjną z wydajnością $> 99\%$. Natomiast tło neutronowe w tym eksperymencie generowane jest głównie przez miony w ścianach komory w bezpośrednim sąsiedztwie detektorów. Część zdarzeń wywołanych przez te neutrony może być wyeliminowana, gdyż generują one sygnał równocześnie w dwóch lub więcej detektorach z podobnym prawdopodobieństwem dla detektorów Si i Ge. Natomiast WIMP-y nie produkują równocześnie sygnału w dwóch detektorach (niezwykle małe prawdopodobieństwo), lecz powinny oddziaływać około sześć razy częściej z Ge niż z Si.

Równoczesny pomiar sygnału pochodzącego od jonizacji półprzewodnika (Ge, Si) i sygnału fononowego pozwala znakomicie odseparować tło pochodzące od cząstek beta i kwantów gamma. Te cząstki tła rozpraszają się na elektronach w detektorze, podczas gdy WIMP-y i neutrony rozpraszają się na jądrach. Detektory typu ZIP pozwalają odróżnić rozproszenia na jądrach od rozprożeń na elektronach w oparciu o dwa efekty. Po pierwsze, dla danej energii jonizacja rozproszonych elektronów jest wyższa od jonizacji wywołanej przez jądra, co powoduje, że sygnał jonizacyjny jest co najmniej dwa razy większy od sygnału fononowego.

Po drugie, sygnał fononowy wywołany rozproszeniem na jądrze ma dłuższy czas narastania i pojawia się później niż sygnał fononowy z rozprożeń na elektronach.

Zespół CDMS II zbierał dane od października 2006 do września 2008 r. przy użyciu ośmiu detektorów Ge i opublikował wyniki analizy dla łącznej ekspozycji równoważnej 121,3 kg · dni Ge naturalnego, po dokonaniu cięć dla zdarzeń z udziałem rozprożeń na jądrach i przekazem energii w przedziale 2–100 keV. Nie zaobserwowano zdarzeń, które mogłyby być wywołane przez WIMP-y. Według autorów, opublikowane rezultaty wykluczają interpretację rocznej modulacji sygnału DAMA/LIBRA jako wyniku niezależnych od spinu oddziaływań WIMP-ów o małych masach. Wyniki te są również sprzeczne z interpretacją niskoenergetycznego sygnału obserwowanego przez CoGeNT w kategoriach oddziaływań WIMP-ów o małych masach [20].

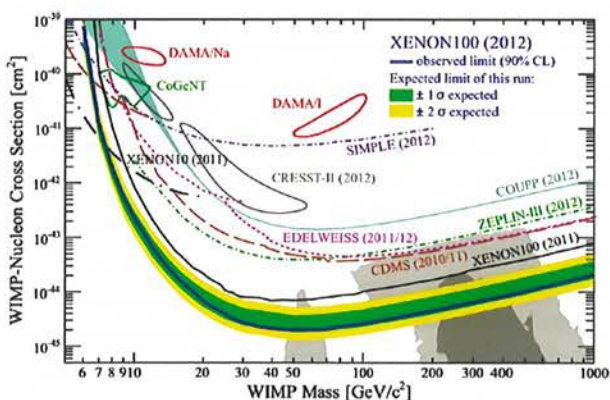
Pod koniec 2013 r. zespół CDMS II opublikował nowe wyniki analizy danych zbieranych od lipca 2007 do września 2008 r. przy użyciu ośmiu detektorów Si i łącznej ekspozycji równej 140,2 kg · dni [21]. Niska masa atomowa Si generalnie powoduje, iż Si jest mniej czułą tarczą dla niezależnych od spinu oddziaływań WIMP-ów w porównaniu z cięższymi jądrami, dla których przekroje czynne na rozpraszanie ulegają zwiększeniu w wyniku koherentnego wzmocnienia. Z drugiej strony, mniejsza masa jądra krzemu jest korzystniejsza w przypadku poszukiwania WIMP-ów o mniejszych masach (~ 10 GeV), ze względu na korzystniejszą kinematykę rozpraszania. Ponowne zainteresowanie WIMP-ami o takich masach jest spowodowane najnowszymi wynikami eksperymentów, m.in. DAMA/LIBRA i CoGeNT, które mogłyby być interpretowane jako skutek oddziaływań WIMP-ów o małych masach. Po zastosowaniu odpowiednich cięć do danych z przedziału 7–100 keV zidentyfikowano trzy zdarzenia o energiach 8,2, 9,5 i 12,3 keV. W oparciu o analizę metodą największego prawdopodobieństwa otrzymano masę WIMP-ów równą 8,6 GeV oraz przekrój czynny na oddziaływanie WIMP-nukleon rzędu $1,9 \times 10^{-41}$ cm² [21].

Planowane jest uruchomienie eksperymentu SuperCDMS z ulepszonymi detektorami typu iZIP (interleaved Z-sensitive Ionization Phonon) o łącznej masie rzędu 100 kg. Zespół CDMS będzie kontynuował badania w podziemnym laboratorium Sudbury w Kanadzie, które jest zlokalizowane głębiej niż laboratorium Soudan, co zapewni mniejszy wpływ promieniowania kosmicznego na tło systemu detektorów.

Nie można wykluczyć, że oddziaływanie WIMP-ów z jądrami jest zależne od spinu. Takie oddziaływanie daje nowe możliwości interpretacji wyników

eksperymentów, które ograniczałyby zarówno modele WIMP-ów, jak i alternatywne interpretacje doniesień o pozytywnym sygnale generowanym przez WIMP-y [22]. W oparciu o wyniki CDMS otrzymuje się ograniczenie na zależny od spinu przekrój czynny dzięki obecności w materiale detektorów dwóch izotopów o nieparzystej liczbie neutronów: ^{29}Si (4,68% w naturalnym Si) i ^{76}Ge (7,73% w naturalnym Ge).

Eksperyment XENON100 Eksperyment XENON100 został uruchomiony w podziemnym laboratorium w Gran Sasso w 2011 r. W tym eksperymencie używany jest ciekły ksenon (LXe) jako tarcza dla WIMP-ów oraz równocześnie jako substancja czynna detektora. System fotopowielaczy rejestruje zarówno jonizację, jak i scyntylację wywołane przez cząstki w objętości czynnej. Detektor jest typową cylindryczną komorą projekcji czasowej (TPC) z tarczą w postaci 62 kg LXe. Dodatkowo 99 kg LXe optycznie odseparowanego od tarczy i wyposażonego w fotopowielacze służy jako jej osłona antykoincydencyjna. Komora TPC wraz z detektorem weta umieszczona jest w kriostacie ze stali nierdzewnej, który posiada bardzo dobrą osłonę pasywną z miedzi elektrolitycznej, polietylenu, ołowiu, warstw wody i polietylenu. Wnętrze osłony jest ciągle przepłukiwane czystym azotem gazowym z parującego ciekłego azotu, aby zredukować stężenie radonu. Temperatura LXe jest utrzymywana na poziomie -91°C przy użyciu specjalnej chłodziarki umieszczonej na zewnątrz osłony. Rejestrowano energię odrzutu jąder Xe w przedziale 6,6–43,3 keV. Analiza danych zebranych w czasie 225 dni nie wskazuje na istnienie preferowanych cząstek ciemnej materii w postaci WIMP-ów [23]. Wyselekcjonowane dwa zdarzenia są statystycznie konsyistentne z oczekiwanym jednym zdarzeniem tła. Obniżono górną granicę na przekrój czynny na elastyczne niezależne od spinu rozpraszanie WIMP-ów o masie 55 GeV na nukleonie do poziomu $2,0 \cdot 10^{-45} \text{ cm}^2$ (rys. 8).



Rys. 8. Limity na przekrój czynny, uzyskane w eksperymencie Xenon100 na tle wyników innych eksperymentów [23]

Wyznaczono nowe ograniczenie na przekroje czynne dla WIMP-ów o masach $> 8 \text{ GeV}$, wykluczając możliwość rejestrowania tych cząstek w eksperymentach DAMA/LIBRA, CoGeNT, CDMS II-Si, CREST II [24] i innych. Przygotowywany jest nowy eksperyment XENONIT o znacznie większej czułości na rejestrację WIMP-ów. Nowy kriostat będzie zawierał 2,2 tony LXe, z którego światło rejestrowane będzie przez specjalne niskotłowe fotopowielacze. Kriostat zanurzony będzie w wodzie, która stanowić będzie część weta mionowego w postaci detektora Czerenkowa. Przewiduje się osiągnięcie ograniczenia przekroju czynnego na poziomie $2 \cdot 10^{-47} \text{ cm}^2$ na oddziaływanie WIMP/nukleon dla masy WIMP-ów równej 50 GeV [25].

Eksperyment LUX (Large Underground Xenon dark matter experiment) Zespół LUX używa zlokalizowanej w laboratorium podziemnym w Homestake w Południowej Dakocie na głębokości 1480 m dwufazowej komory projekcji czasowej (TPC), napełnionej 370 kg ciekłego ksenonu do detekcji cząstek ciemnej zimnej materii. Obszar czynny detektora stanowi ciekły ksenon o masie 118 kg. Detektor eksperymentu LUX pracuje w tym samym miejscu, w którym zbudowany był przez R. Davisa pierwszy radiochemiczny detektor neutronów słonecznych. Detektor LUX ma większą czułość niż detektor XENON100 ze względu na większą masę i mniejsze tło pochodzące od promieniowania kosmicznego. Depozycja energii w ciekłym ksenonie generuje natychmiastową scyntylację (sygnał S1), natomiast elektrony powstające w wyniku jonizacji dryfują w polu elektrycznym komory TPC do fazy gazowej, gdzie generują opóźniony w stosunku do S1 sygnał elektroluminescencyjny S2. Analiza sygnałów S1 i S2 pozwala na rekonstrukcję zdeponowanej energii oraz odróżnienie rozproszenia na jądrach Xe od rozproszenia na elektronach. Sygnał świetlny rejestrowany jest przez 61 fotopowielaczy rozmieszczonych w płaszczyźnie dolnej w cieczy pod obszarem czynnym i górnej w gazie nad obszarem czynnym. Pierwsze wyniki opublikowano po osiągnięciu ekspozycji równej 85,3 kg-dni w czasie od 21 kwietnia do 8 sierpnia 2013 r. Detektor był testowany przy użyciu trytu (cząstki β) oraz źródeł AmBe i ^{252}Cf (neutrony). Osiągnięto najlepsze górne ograniczenie na przekrój czynny na reakcję WIMP-nukleon, które osiąga minimum na poziomie $7,6 \cdot 10^{-46} \text{ cm}^2$ (rys. 9.) dla WIMP-ów o masach 33 GeV [26]. W lutym 2014 r. zespół LUX opublikował nowe wyniki przeprowadzonych testów, które dziesięciokrotnie zwiększają dokładność kalibracji detektora oraz potwierdzają wcześniej opublikowane wyniki [27].

Niski próg dyskryminacji energii w eksperymencie LUX pozwala testować hipotezę oddziaływań

stek ciemnej materii, krokiem milowym w fizyce byłoby odkrycie powiązanych ze sobą supersymetrii i właśnie ciemnej materii. Modyfikacja i budowa nowych detektorów ciemnej materii znajduje się na opublikowanej liście priorytetów ApPEC.

Literatura

- [1] Rubin V.C., Ford W.K., *Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions*, „Astrophysical Journal” 159/1970, s. 379–403.
- [2] Fuchs B., *NGC2613, 3198, 6503, 7184: Case studies against ‘maximum’ disks*, astro-ph/9812048 (1998).
- [3] Navarro J.F., Frenk C.S., White S.D.M., *The Structure of Cold Dark Matter Halos*, „Astrophysical Journal” 462/1996, s. 563.
- [4] Sikora S., Bratek L., Jalocha J., Kutschera M., *Gravitational microlensing as a test of a finite-width disk model of the Galaxy*, „Astronomy & Astrophysics” 546/2012, s. A126.
- [5] Zwicky F., *Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln*, „Helvetica Phys. Acta” 6/1933, s. 110–127.
- [6] Spergel D.N. et al., *First-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: cosmological parameter results*, „Astrophysical Journal Supplement Series” 1488/2003, s. 175–194.
- [7] Tagmark M. et al., *Cosmological parameters from SDSS and WMAP*, „Phys. Rev.” D 69/2004, s. 103501.
- [8] Ade P.A.R. et al., *Planck early results. I. The Planck mission*, „Astronomy & Astrophysics” 536/2011, s. A1.
- [9] Iocco F. et al., *Primordial nucleosynthesis: From precision cosmology to fundamental physics*, „Physics Reports-Review Section of Physics Letters” 472/2009, s. 1–76.
- [10] Springel V. et al., *Simulating the joint evolution of quasars, galaxies and their large-scale distribution*, „Nature” 435/2005, s. 629–636.
- [11] Weinberg S., *A new light boson?*, „PRL” 40/1978, s. 223.
- [12] Wilczek F., *Problem of strong P and T invariance in the presence of instantons*, „PRL” 40/1978, s. 279.
- [13] Fan J., Katz A., Randal L., Reece M., *Dark-Disk Universe*, „Phys. Rev. Lett.” 110/2013, s. 211302.
- [14] Asztalos S. et al., *Large-scale microwave cavity search for dark-matter axions*, „Phys. Rev.” D 64/2001, s. 092003.
- [15] Asztalos S. et al., *SQUID-Based Microwave Cavity Search for Dark-Matter Axions*, „Phys. Rev. Lett.” 104/2010, s. 041301.
- [16] Bernabei R. et al., *Final model independent result of DAMA/LIBRA-phase1*, „Eur. Phys. J.” C 73/2013, s. 2648.
- [17] Aalseth C.E. et al., *CoGeNT Collaboration, CoGeNT: A Search for Low-Mass Dark Matter using p-type Point Contact Germanium Detectors*, „Phys. Rev.” D 88/2013, s. 012002.
- [18] Aalseth C.E. et al., *CoGeNT Collaboration, Search for an Annual Modulation in a P-type Point Contact Germanium Dark Matter Detector*, „Phys. Rev. Lett.” 107/2011, s. 141301.
- [19] Ahmed Z. et al., *CDMS Collaboration, Dark Matter Search Results from the CDMS II Experiment*, „Science” 327/2010, s. 1619–1621.
- [20] Ahmed Z. et al., *CDMS Collaboration, Results from a Low-Energy Analysis of the CDMS II Germanium Data*, „Phys. Rev. Lett.” 106/2011, s. 131302.
- [21] Agnese R. et al., *CDMS Collaboration, Silicon Detector Dark Matter Results from the Final Exposure of CDMS II*, „Phys. Rev. Letters.” 111/2013, s. 251301.
- [22] Arbey A. et al., *Supersymmetry with light dark matter confronting the recent CDMS and LHC results*, „Phys. Rev.” D 88/2013, s. 095001.
- [23] Aprile E. et al., *XENON100 Collaboration, Dark Matter Results from 225Live Days of XENON100 Data*, „Phys.Rev.Lett.” 109/2012, s. 181301.
- [24] Angloher G. et al., *CRESST Collaboration, Results from 730 kg days of the CRESST-II Dark Matter Search*, „Eur. Phys. J.” C72/2012, s. 1971.
- [25] Aprile E. et al., *XENON100 Collaboration, The XENONIT Dark Matter Search Experiment*, arXiv:1206.6288.
- [26] Akrieh D.S. et al., *LUX Collaboration, First results from the LUX dark matter experiment at the Sanford Underground Research Facility*, „Phys. Rev. Lett.” 112/2014, s. 091303.
- [27] Akrieh D.S. et al., *LUX Collaboration, Radiogenic and Muon-Induced Backgrounds in the LUX Dark Matter Detector*, arXiv:1403.1299.
- [28] Alexander T., Wojcik M., Zuzel G. et al., *Light Yield in DarkSide-10: a Prototype Two-phase Liquid Argon TPC for Dark Matter Searches*, „Astropart. Phys.” 49/2013, s. 44–51.
- [29] Alexander T., Wojcik M., Zuzel G. et al., *DarkSide Collaboration, DarkSide search for dark matter*, „JINST” 8/2013, s. C11021.
- [30] Back H.O. et al., *First Large Scale Production of Low Radioactivity Argon From Underground Sources*, arXiv:1204.6024.
- [31] Mao Y.-Y. et al., *Halo-to-Halo Similarity and Scatter in the Velocity Distribution of Dark Matter*, „Astrophys. J.” 764/2013, s. 35.
- [32] Del Nobile E., *Halo-independent comparison of direct dark matter detection data: a review*, „Adv. High Energy Phys.” 2014/2014, s. 604914.

Artykuł przesłano do Redakcji w dniu 12 czerwca 2014 roku.

Alternatywne metody obliczania dawek pochłoniętych w biologicznej dozymetrii promieniowania mieszanego $n + \gamma$

Iwona Pacyniak ^{§, ‡}, Krzysztof W. Fornalski [‡], Maria Kowalska [§]

[§]Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, Warszawa

[‡]Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej

[§]PGE EJ 1 Sp. z o.o., Warszawa

Streszczenie. W niniejszej pracy zaproponowano kilka alternatywnych metod obliczania neutronowej i fotonowej składowej dawki pochłoniętej w ciele człowieka narażonego na działanie promieniowania mieszanego $n + \gamma$. W tym celu wykorzystano retrospektywną dozymetrię biologiczną, opartą na analizie częstości chromosomów dicentrycznych w limfocytach krwi obwodowej osoby narażonej. Powszechnie stosowaną metodą obliczania składowych dawek jest metoda iteracyjna, która niejednokrotnie potwierdziła swoją skuteczność w licznych przypadkach stosowania. Pozwala ona uzyskać wyniki częstości dicentryków indukowanych osobno przez promieniowanie gamma i promieniowanie neutronowe, a na ich podstawie obliczyć wartości odpowiadających im dawek pochłoniętych w każdym kolejnym kroku wykonywania obliczeń.

Jednak podchodząc do problemu od strony matematycznej, obliczenia te można wykonać dużo szybciej, uzyskując takie same rezultaty z wykorzystaniem analitycznego zapisu metody iteracyjnej. Dodatkowo rozważając sytuację, w której nie jest znany dokładny udział promieniowania gamma i promieniowania neutronowego w dawce całkowitej, dawki pochłonięte można oszacować, posługując się quasi-bayesowską (Q-B) metodą statystyczną. W tym celu należy zastosować rozkłady prawdopodobieństw opisujące wykorzystywany parametr.

Niniejsza praca ma charakter interdyscyplinarny z pogranicza biofizyki, radiobiologii, dozymetrii i statystyki.

1. Wstęp

Wytwarzanie i stosowanie promieniowania jonizującego w przemyśle, medycynie i nauce wiąże się z ryzykiem wystąpienia zdarzenia radiacyjnego, którego skutkiem może być poważne narażenie zdrowia człowieka. W takim przypadku bardzo ważna jest pewna i dokładna ocena dawki pochłoniętej ze względu na ewentualną konieczność leczenia choroby popromiennej lub innych skutków napromienienia. Szczególnie niebezpieczne są sytuacje związane z narażeniem na promieniowanie mieszane $n + \gamma$, które pochodzi głównie z reaktorów jądrowych. Wówczas organizm człowieka zostaje poddany działaniu dwóch rodzajów promieniowania, które mają zupełnie inną naturę fizyczną i radiobiologiczną. Dokładną i skuteczną metodę oceny dawki daje w takim przypadku retrospektywna dozymetria biologiczna, wykorzystująca

ca przeważnie analizę częstości chromosomów dicentrycznych (test dicentryczny) w limfocytach krwi obwodowej osoby narażonej [1–3]. Dzięki podobieństwu występowania częstości dicentryków po napromienieniu krwi *in vivo* i *in vitro* możliwe jest obliczenie dawek pochłoniętych w organizmie człowieka na podstawie uzyskanych wcześniej współczynników krzywych kalibracyjnych dawka–skutek [4]. Krzywe kalibracyjne uzyskiwane są w badaniach *in vitro* podczas kontrolowanych eksperymentów napromieniania ludzkiej krwi i po sprawdzeniu zależności częstości dicentryków od dawki. Krew pobiera się wówczas od kilku dawców, napromienia różnymi wartościami dawek określonego rodzaju promieniowania, przeprowadza hodowlę, a następnie analizuje powstałe pod wpływem promieniowania skutki – dicentryczne aberracje chro-

mosomowe w stymulowanych limfocytach krwi [4]. W przypadku promieniowania mieszanego $n + \gamma$ niezbędne jest opracowanie dwóch krzywych kalibracyjnych – osobno dla promieniowania gamma i osobno dla promieniowania neutronowego – w taki sposób, by jak najlepiej odpowiadały one dawkom, które otrzymał człowiek.

Promieniowanie mieszane $n + \gamma$ powstaje w rdzeniu reaktora jądrowego na skutek procesów rozszczepienia jąder atomowych paliwa. Powstałe w wyniku tej reakcji neutrony mogą być wykorzystywane m.in. do wytwarzania sztucznych radioizotopów do celów medycznych, przemysłowych i naukowych. Neutronom towarzyszy promieniowanie gamma. Jego źródłem są głównie reakcje rozszczepienia, czy też reakcje neutronów z jądrami atomowymi materiałów konstrukcyjnych i osłonowych, czyli procesy nazywane aktywacją materiałów neutronami [5].

Znajdujący się w Polsce reaktor badawczy MARIA wytwarza wysoki strumień neutronów. Gęstość strumienia neutronów termicznych wynosi ok. 10^{14} n/cm²s [6]. W obudowie reaktora MARIA znajduje się osiem kanałów poziomych, umożliwiających kontrolowane wyprowadzenie wiązek promieniowania. Badania radiobiologiczne, których dotyczy m.in. niniejsza praca, przeprowadza się zwykle przy kanale H8, gdzie utworzono stanowisko do napromieniania próbek krwi. Kanał ten jest ponadto przeznaczony do radiografii neutronowej i promieniowania gamma [6]. Warto podkreślić, że w dotychczasowej pracy reaktora MARIA nie odnotowano żadnych incydentów, które spowodowałyby zagrożenie radiacyjne pracowników, okolicznej ludności ani środowiska, co stanowi potwierdzenie jego bezpiecznej eksploatacji. Celem niniejszej pracy jest jednak przedstawienie potencjalnych zastosowań dozymetrii promieniowania mieszanego $n + \gamma$, co związane jest z retrospektywną oceną składowych dawek pochłoniętej w sytuacji przypadkowego narażenia człowieka.

Przykładem takiej awaryjnej sytuacji jest nagłe wyłączenie reaktora (tzw. SCRAM), z czym wiąże się przerwanie reakcji łańcuchowej. Po wyłączeniu produkty rozszczepienia naturalnie rozpadają się, gdyż wciąż są promieniotwórcze. Powoduje to nagrzewanie otaczających materiałów w reaktorze, czyli generację tzw. ciepła powyłłączeniowego, ponieważ wytwarza się ono jeszcze długo po wyłączeniu reaktora. Problem pojawia się w momencie utraty chłodziwa, czyli braku możliwości odbioru ciepła. Wówczas generowane ciepło może spowodować wyparowanie wody z basenu, topienie elementów paliwowych w rdzeniu reaktora, uszkodzenie jego zbiornika ciśnieniowego, a w skrajnym przypadku uszkodzenie obudowy bezpie-

czeństwa i niekontrolowane wydostanie się produktów rozszczepienia do otoczenia [7].

Inną bardzo niebezpieczną sytuacją awaryjną, która z kolei może mieć miejsce poza reaktorem jądrowym, jest przekroczenie masy krytycznej podczas produkcji wzbogaconego uranu lub plutonu. Dochodzi wówczas do niekontrolowanej reakcji łańcuchowej i natychmiastowej emisji ogromnej liczby neutronów i kwantów gamma. Wydzielają się przy tym bardzo duże ilości energii cieplnej, które trudno odprowadzać [7, 8]. Do takich awarii dochodziło już wielokrotnie od początku istnienia przemysłu jądrowego, ponieważ jego nieodłącznym elementem jest wzbogacanie paliwa jądrowego [9].

Oprócz przypadków przekroczenia masy krytycznej czy incydentów zaistniałych w reaktorach jądrowych prezentowana metodyka mogłaby znaleźć zastosowanie także do określania dawek rozproszonego promieniowania neutronowego w ciele pacjenta poddane go terapii borowo-neutronowej (ang. *Boron Neutron Capture Therapy* – BNCT). Jest to metoda leczenia niektórych typów nowotworów, w szczególności nowotworów mózgu, polegająca na wprowadzeniu związków boru ¹⁰B w miejsce występowania guza i bombardowaniu go wiązką neutronów. Neutrony oddziałują z borem i w wyniku tej reakcji powstają ⁷Li oraz silnie jonizujące cząstki alfa. Ze względu na swój krótki zasięg powodują niszczenie komórek nowotworu. Sąsiednie tkanki, które zawierają mniejsze ilości boru, są mniej narażone na promieniowanie alfa [6]. W Polsce stanowisko do badań nad terapią BNCT przygotowane jest przy reaktorze MARIA w Świerku.

Przypadki ekspozycji człowieka na promieniowanie $n + \gamma$ to bardzo złożone problemy do rozwiązania. W takich sytuacjach ważne jest oszacowanie nie tylko całkowitej dawki pochłoniętej, ale także dawek pochodzących osobno od promieniowania gamma i osobno od neutronów. Ponieważ neutrony i kwanty gamma znacząco różnią się mikroskopową strukturą torów jonizacji oraz sposobem oddziaływania z DNA komórek, mają one różną skuteczność biologiczną przy tej samej wartości dawki pochłoniętej. Zatem ich wpływ na organizm człowieka też jest różny.

W przypadku oddziaływania neutronów z materią organiczną wygodnie jest mówić o oddziaływaniu neutron-woda, co w praktyce przekłada się na rozpędzanie protonów (jąder wodoru) kosztem energii padających neutronów. Masa protonu jest dużo większa od masy elektronu, dlatego też proton, zderzając się z elektronami materii, prawie nie zmienia swojego kierunku i porusza się wzdłuż linii prostej, tracąc podczas każdego kolejnego zderzenia pewną niewielką część swojej energii [5]. Oddziałując z wieloma elektrona-

mi w materii, proton wytwarza wzdłuż swojego toru wiele par jonów, charakteryzując się przy tym wysokim współczynnikiem liniowego przekazywania energii (ang. *Linear Energy Transfer* – LET). Dla odróżnienia, kwanty gamma przekazują swoją energię elektronom za pośrednictwem efektu fotoelektrycznego, Comptona bądź tworzenia par e^-e^+ [5]. W dalszej kolejności wytworzone elektrony mogą generować fotony, fotony – elektrony i tak dalej, tworząc tzw. kaskadę fotonowo-elektronową. Elektrony charakteryzują się więc niskim współczynnikiem LET. Wartość liniowego współczynnika przekazywania energii wpływa na biofizyczny model indukcji chromosomów dicentrycznych przez promieniowanie jonizujące.

Promieniowanie jonizujące może wywoływać różne rodzaje uszkodzeń w DNA komórki. Mogą to być pęknięcia pojedynczo- lub podwójnoniciowe, uszkodzenia zasad albo cukrów, a także wiązania krzyżowe. Komórki wyposażone są jednak w wewnętrzne mechanizmy naprawcze, prowadzące do odbudowy powstałych uszkodzeń, a także uszkodzeń powstałych z innych przyczyn (przede wszystkim z uwagi na naturalny metabolizm komórki). Ponieważ procesy te nie są stuprocentowo sprawne, mogą się tworzyć zmiany w DNA, prowadzące do powstawania takich skutków biologicznych jak aberracje chromosomowe, mutacje lub śmierć komórki. Najtrudniejsze do naprawy są podwójnoniciowe uszkodzenia łańcucha DNA (ang. *double-strand breaks* – DSB DNA), które mogą prowadzić m.in. do utworzenia chromosomów dicentrycznych. Do powstania tego typu aberracji konieczne jest jednoczesne pojawienie się dwóch DSB DNA w dwóch sąsiadujących ze sobą chromosomach, po jednym na każdym pękniętym chromosomie [10]. Pary DSB DNA mogą powstawać w wyniku przejścia przez jądro jednej lub kilku cząstek jonizujących.

Częstość występowania dicentryków zależy od dawki promieniowania i od wartości LET [1, 2, 10]. W przypadku ekspozycji na promieniowanie o wysokim LET (neutrony, protony, cząstki alfa) prawdopodobieństwo powstania chromosomów dicentrycznych w wyniku przejścia jednej cząstki jonizującej jest liniowe dla małych i dużych wartości dawki. Zależność częstości dicentryków (iloraz znalezionej liczby dicentryków do liczby przeanalizowanych komórek – Y) od dawki pochłoniętej (D) można zatem wyrazić równaniem [1, 2]:

$$Y = \alpha D + c \quad (1)$$

gdzie: Y – częstość występowania dicentryków na komórkę [dic/kom], D – dawka pochłonięta [Gy], α – współczynnik proporcjonalności zależny od biologicznej skuteczności cząstek [dic/kom·Gy], c – częstość di-

centryków spontanicznych w nienapromienionej kontroli [dic/kom].

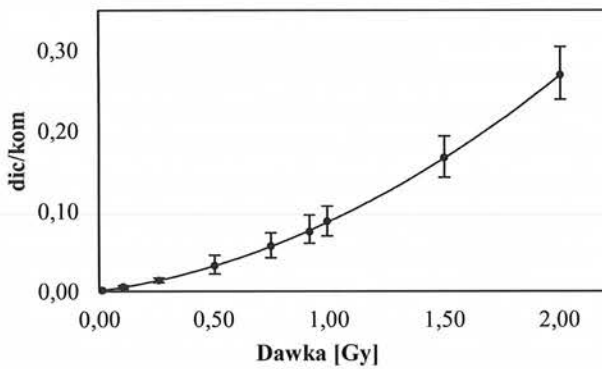
Natomiast w przypadku promieniowania o niskim LET (kwanty gamma, promieniowanie X, elektrony) w obszarze małych dawek prawdopodobieństwo jednoczesnego przejścia dwóch (lub więcej) cząstek jonizujących przez jądro komórki jest niewielkie. Zatem dicentryki powstają głównie w wyniku przejścia jednej cząstki jonizującej, ale z bardzo małym prawdopodobieństwem. Wzrost dawki powoduje wzrost liczby cząstek przechodzących przez jądro (kaskada fotonowo-elektronowa), przez co rośnie częstość dicentryków indukowanych poprzez przejście kilku cząstek [10]. W związku z tym w całym badanym zakresie dawek promieniowania o niskim LET zależność dawka–skutek przybiera postać [1, 2]:

$$Y = \beta D + \gamma D^2 + c \quad (2)$$

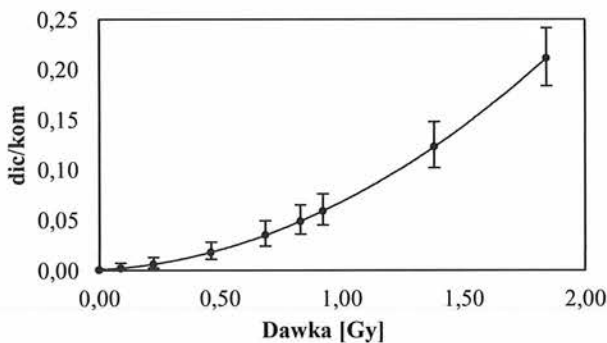
gdzie: β – współczynnik proporcjonalności zależny od rodzaju promieniowania [dic/kom·Gy], γ – współczynnik proporcjonalności zależny od dawki [dic/kom·Gy²], c – częstość dicentryków spontanicznych w nienapromienionej kontroli [dic/kom].

2. Metody

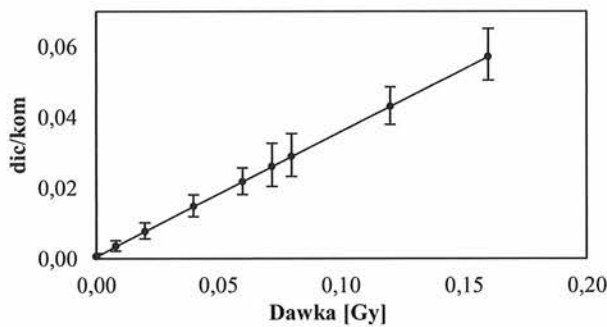
Do wyznaczenia dawek pochłoniętych metodą cytogenetycznej dozimetrii biologicznej niezbędna jest znajomość częstości dicentryków, współczynników krzywych wzorcowych dawka–skutek oraz stosunku dawek od neutronów i kwantów gamma. W przypadku niniejszej pracy wykorzystano krzywą kalibracyjną wykonaną dla promieniowania $n + \gamma$ pochodzącego z kanału H8 reaktora MARIA w ośrodku jądrowym w Świerku (rys. 1) oraz krzywą uzyskaną dla promieniowania gamma emitowanego z izotopu ⁶⁰Co (rys. 2). Na podstawie powyższych krzywych metodą najmniejszych kwadratów wyznaczono charakterystykę dawka–skutek dla neutronów termicznych (rys. 3), które dominowały w wiązce pochodzącej z kanału H8. Niepewności zaznaczone na rys. 1–3 oznaczają 95-procentowy przedział ufności zaobserwowanej częstości dicentryków. Na niepewność częstości chromosomów dicentrycznych wpływają dwa składniki. Pierwszym jest poissonowski rozkład powstałych aberracji chromosomowych w analizowanych próbkach, a drugim niepewności związane z krzywą kalibracyjną [2]. Krzywe kalibracyjne zostały wyznaczone w Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej (CLOR) w Warszawie w trakcie realizacji dwóch projektów badawczych (patrz rozdz. 6). Współczynniki krzywych przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 1. Krzywa kalibracyjna dawka–skutek dla promieniowania mieszanego $n + \gamma$



Rys. 2. Krzywa kalibracyjna dawka–skutek dla promieniowania gamma, Co^{60}



Rys. 3. Krzywa kalibracyjna dawka–skutek dla neutronów termicznych

Tab. 1. Współczynniki krzywych kalibracyjnych dawka–skutek

Rodzaj promieniowania	$c \pm SD$ [dic/kom]	$\alpha, \beta \pm SD$ [dic/kom · Gy] [dic/kom · Gy ²]	$\gamma \pm SD$
$n + \gamma$	$0,0010 \pm 0,0001$	$0,038 \pm 0,004$	$0,048 \pm 0,003$
gamma ^{60}Co	$0,0010 \pm 0,0010$	$0,012 \pm 0,003$	$0,056 \pm 0,002$
Neutrony termiczne	$0,0005 \pm 0,0001$	$0,354 \pm 0,003$	–

SD (ang. *Standard Deviation*) to niepewność wyniku wyrażona w formie odchylenia standardowego

Różnice w skuteczności biologicznej i sposobie oddziaływania neutronów i kwantów gamma z DNA komórek są przyczyną różnic w częstości dicentryków indukowanych przez te dwa rodzaje promieniowania [1, 2]. Rozróżnienie dicentryków powstałych w wyniku działania neutronów i promieniowania gamma nie jest możliwe na podstawie mikroskopowej analizy aberracji. Ich częstość można jednak oszacować, zakładając, że oba rodzaje promieniowania działały addytywnie w indukcji dicentryków [1, 2]:

$$Y_{\text{calk}} = Y_n(D_n) + Y_\gamma(D_\gamma) = Y_{n+\gamma}(D_n + D_\gamma) \quad (3)$$

Powyższe założenie pozwala na obliczenie dawek pochłoniętych od promieniowania gamma oraz od neutronów – odpowiednio D_γ i D_n .

2.1. Metoda iteracyjna Dawki pochłonięte w organizmie człowieka, pochodzące od promieniowania mieszanego, są jak dotąd powszechnie obliczane metodą iteracyjną [1–3]. Istotą tej metody jest, jak sama nazwa wskazuje, kilkukrotne wykonanie powtórzeń szacowania dawek od promieniowania neutronowego i od promieniowania gamma oraz odpowiadających im częstości indukowanych dicentryków. W każdym kolejnym kroku wielkości te są aktualizowane poprzez wykorzystanie wcześniej uzyskanych informacji. Proces ten powtarza się aż do osiągnięcia stabilnego wyniku.

Początkowo wszystkie dicentryki znalezione w analizowanej próbce krwi traktuje się jako pochodzące od neutronów. Korzystając ze wzoru (1), wyznacza się dawkę od neutronów:

$$D_n = \frac{Y_{\text{calk}} - c}{\alpha} \quad (4)$$

Dawkę od promieniowania gamma (D_γ) oblicza się, wykorzystując znany z pomiaru fizycznego stosunek dawki od neutronów i kwantów gamma ($\rho = D_n/D_\gamma$) oraz obliczoną wcześniej wartość D_n .

$$D_\gamma = \frac{D_n}{\rho} \quad (5)$$

Dla tak wyznaczonej dawki D_γ oblicza się częstość dicentryków pochodzących od promieniowania gamma za pomocą parametrów równania krzywej dawka–skutek ze wzoru (2).

W celu znalezienia częstości dicentryków pochodzących od promieniowania neutronowego (Y_n) wykorzystuje się wzór (3). Uzyskaną wartość częstości dicentryków (Y_n) ponownie przelicza się na dawkę pochodzącą od promieniowania neutronowego (D_n). W ten sposób aktualizuje się jej wartość, a także każdą kolejną obliczaną wielkość, wykonując serię powtó-

rzeń. Proces taki trwa aż do momentu znalezienia zbieżnego rozwiązania dla D_n i D_γ [1–3]. Liczba powtórzeń wpływa na dokładność wyników – im więcej iteracji zostanie wykonanych, tym wyniki będą bardziej precyzyjne.

Na rys. 4 przedstawiono wartości dawek uzyskane w kolejnych iteracjach, osobno dla D_n i D_γ . Po kilkukrotnym wykonaniu obliczeń wyniki stabilizują się.

Ponieważ zazwyczaj nie wykonuje się obliczeń dla jednej próbki krwi, a dla wielu o bardzo różnych wartościach dawek pochłoniętych, czas obliczeń wykonywanych metodą iteracyjną znacznie się wydłuża. W celu ich przyspieszenia autorzy proponują przekształcenie metody iteracyjnej w zapis analityczny [11].

2.2. Metoda analityczna Zaletą analitycznego zapisu metody iteracyjnej jest to, że nie trzeba wykonywać serii obliczeń do osiągnięcia poszukiwanego wyniku, a tylko obliczyć odpowiednie wartości wyprowadzonych poniżej równań. W tym celu niezbędna jest znajomość wartości oznaczającej stosunek dawki od neutronów do promieniowania gamma, który dany jest wzorem (5).

Zamiast posługiwać się parametrem ρ , wygodniej jest używać wielkości θ , która jest wyrażona jako stosunek dawki pochodzącej od promieniowania gamma do dawki całkowitej [12]:

$$\theta = \frac{D_\gamma}{D_\gamma + D_n} = \frac{1}{\rho + 1} \quad (6)$$

Zapis ten umożliwia unormowanie zakresu rozpatrywanego parametru θ do przedziału $[0, 1]$.

Zakładając podobnie jak poprzednio addytywność dawek oraz wstawiając do wzoru (3) równania na częstość dicentryków od neutronów (1) i od promieniowania gamma (2), całkowitą częstość aberracji można przedstawić poniższym wzorem [11, 13]:

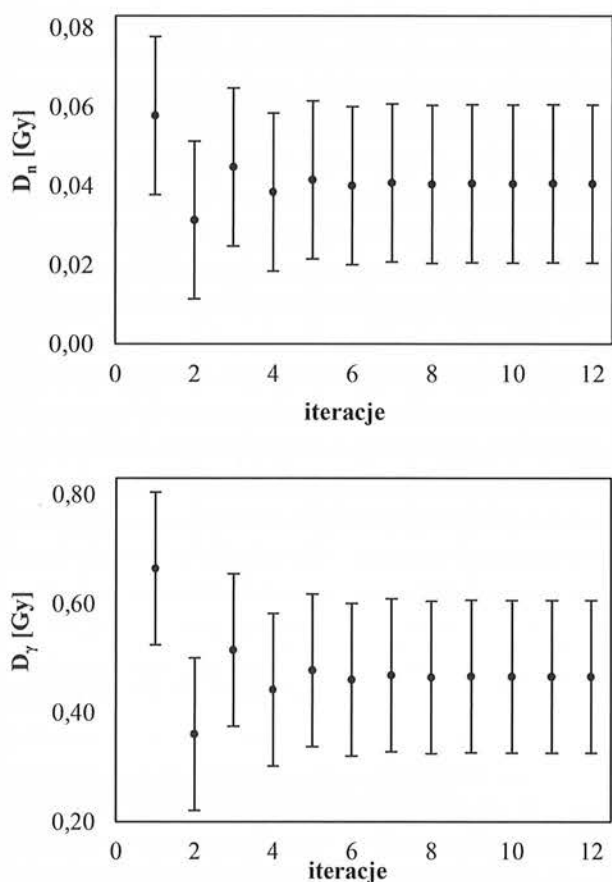
$$Y_{\text{calc}} = c + \alpha D_n + \beta D_\gamma + \gamma D_\gamma^2 \quad (7)$$

Traktując równania (6) i (7) jako układ równań z dwiema niewiadomymi: D_γ i D_n oraz dokonując prostych przekształceń, otrzymuje się ostateczne wyrażenia pozwalające obliczyć wartości dawek pochłoniętych [11]:

$$\begin{cases} D_\gamma(\theta) = \frac{\sqrt{(\alpha \frac{1-\theta}{\theta} + \beta)^2 + 4\gamma(Y_{\text{calc}} - c)} - (\alpha \frac{1-\theta}{\theta} + \beta)}{2\gamma} \\ D_n(\theta) = \frac{1-\theta}{\theta} D_\gamma(\theta) \end{cases} \quad (8a, b)$$

W celu obliczenia niepewności dawki D_n i D_γ stosuje się metodę różniczki zupełnej, która pozwala wziąć pod uwagę zarówno niepewności pochodzące od parametrów krzywych dawka–skutek, jak i niepewność związaną z liczbą przeanalizowanych komórek i znalezionych dicentryków [11].

Metoda analityczna, a tym samym iteracyjna, może być stosowana w przypadku, gdy stosunek dawki pochodzącej od promieniowania neutronowego do dawki od promieniowania gamma jest znany z pomiarów fizycznych. Natomiast problemy z obliczeniem dawek pochodzących oddzielnie od tych dwóch rodzajów promieniowania pojawiają się wtedy, gdy charakterystyka mieszanej wiązki nie jest dokładnie znana. Sytuacja taka może zająć choćby podczas przypadkowego napromienienia człowieka, gdy w miejscu pracy nie były aktualnie prowadzone pomiary mocy dawki i/lub gdy dana osoba nie posiadała dawkomierza osobistego. W sytuacji nieznaności dokładnej wartości parametru θ autorzy proponują zastosowanie quasi-bayesowskiej metody (Q-B), opartej na przyjęciu statystycznego rozkładu prawdopodobieństwa opisującego nieznaną parametr [11].



Rys. 4. Wyniki dawek uzyskane w kolejnych iteracjach dla próbki nr 2: 1000 komórek i 33 dicentryki, gdzie zaznaczona niepewność oznacza przedział niepewności rozszerzonej dawki przy poziomie ufności 95% i współczynniku rozszerzenia $k = 1,96$

2.3. Metoda quasi-bayesowska Metodę opartą na rozkładzie prawdopodobieństwa można uzyskać z przekształcenia metody analitycznej, wychodząc z równań (6) i (7). W metodzie tej ważne jest przejście od konkretnych wartości do rozkładu prawdopodobieństwa, co wiąże się ze znalezieniem równań odwrotnych do (8a, b), tj. $\theta(D_x)$ (dzięki temu może być ona stosowana wtedy, gdy stosunek dawek nie jest precyzyjnie znany) [11].

$$\begin{cases} \theta_\gamma(D_\gamma) = \frac{D_\gamma}{D_\gamma + \frac{1}{\alpha}(Y_{\text{całk}} - c - \beta D_\gamma - \gamma D_\gamma^2)} \\ \theta_n(D_n) = \frac{\sqrt{\beta^2 - 4\gamma(c + \alpha D_n - Y_{\text{całk}}) - \beta}}{\sqrt{\beta^2 - 4\gamma(c + \alpha D_n - Y_{\text{całk}}) - \beta + 2\gamma D_n}} \end{cases} \quad (9a, b)$$

Ponieważ zakłada się, że wartość θ nie jest znana (stąd jej dwie formalne postaci: osobno dla promieniowania gamma i dla neutronów), należy zastosować dla niej bayesowski rozkład prawdopodobieństwa – *prior*, $P(\theta)$. Zakładając, że $P(\theta)$ dany jest jakąś formułą (np. rozkładem Gaussa), rozkład prawdopodobieństwa dawki D_x wynosi [11]:

$$\begin{aligned} P(\theta)\theta'(D) &= P(\theta_x(D_x))\theta'_x(D_x) \\ &\equiv \text{const} \cdot P(D_x) \end{aligned} \quad (10)$$

gdzie: $x = \{\gamma, n\}$. W praktyce wzory (9a, b) podstawia się za θ w formule opisującej *prior*, $P(\theta)$, co z kolei uzależnia go od dawki, $P(\theta(D_x))$ [11].

Rezultatem jest rozkład prawdopodobieństwa szukanej dawki, a jej ostateczną wartość stanowi maksimum rozkładu (10), które można obliczyć np. przy wykorzystaniu wzoru na ekstremum rozkładu:

$$\frac{dP(D_x)}{dD_x} = 0 \quad (11)$$

Dla tak znalezionej wartości dawki oblicza się następnie jej niepewność, korzystając w tym celu z formuły Rao–Cramera [11]:

$$\sigma_{D_x} \geq \frac{1}{\sqrt{\left| \frac{d^2 \ln P}{dD_x^2} \right|}} \quad (12)$$

gdzie: $\ln P$ to logarytm naturalny z $P(D_x)$.

Wyboru rozkładu apriorycznego $P(\theta)$ dokonuje się na podstawie pewnych założeń i przesłanek, które badacz posiada najczęściej z innych eksperymentów. W przypadku ekspozycji na mieszane promieniowanie jonizujące pochodzące z reaktorów jądrowych mogą to być na przykład parametry uzyskiwane podczas jego normalnej eksploatacji. Przyjęcie odpowiedniego rozkładu oraz jego wartości oczekiwanej umożliwi otrzymanie poprawnych, zbliżonych do rzeczywistych re-

zultatów. Przypadkowy rozkład aprioryczny może z kolei negatywnie wpłynąć na ostateczne wyniki. Jednak odpowiedni dobór apriorycznego rozkładu prawdopodobieństwa jest osobnym zagadnieniem i nie będzie tutaj szczegółowo omawiany. Zakładając najprościej, że jest to rozkład normalny, rozkłady prawdopodobieństwa, $P(D_\gamma)$ i $P(D_n)$, przybierają następującą postać:

$$\begin{cases} P(D_\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\theta} \\ \times \exp \left[-\frac{\left(\frac{D_\gamma}{D_\gamma + \frac{1}{\alpha}(Y_{\text{całk}} - c - \beta D_\gamma - \gamma D_\gamma^2)} - \hat{\theta} \right)^2}{2\sigma_\theta^2} \right] \\ P(D_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\theta} \\ \times \exp \left[-\frac{\left(\frac{\sqrt{\beta^2 - 4\gamma(c + \alpha D_n - Y_{\text{całk}}) - \beta}}{\sqrt{\beta^2 - 4\gamma(c + \alpha D_n - Y_{\text{całk}}) - \beta + 2\gamma D_n}} - \hat{\theta} \right)^2}{2\sigma_\theta^2} \right] \end{cases} \quad (13a, b)$$

3. Wyniki

Przedstawione poniżej wyniki pochodzą z eksperymentu polegającego na napromienieniu próbek ludzkiej krwi promieniowaniem $n + \gamma$, który symulował rzeczywiste napromienienie w polu promieniowania mieszanego.

Proces napromieniania próbek krwi był przez cały czas kontrolowany i monitorowany przez dwie niezależne metody pomiarowe [14, 15]. Dały one praktycznie identyczne wyniki stosunku kermy promieniowania gamma do kermy całkowitej. Stosunek dawki od kwantów gamma do całkowitej dawki pochłoniętej (θ) został więc precyzyjnie wyznaczony i wynosił $0,92 \pm 0,02$, a całkowita moc kermy tkankowej w przyjętym punkcie napromieniania próbek wynosiła 577 mGy/h.

Fizyczne wartości dawek uzyskane podczas napromieniania wyznaczono w Pracowni Dozymetrii Promieniowania Mieszanego (PDPM) w Świerku na podstawie mocy dawki pochłoniętej na stanowisku do napromieniania. Szczegółowe informacje dotyczące warunków eksperymentu i uzyskanych wyników zawarte są w literaturze [14].

W tabeli 2 przedstawiono wartości dawek otrzymane w wyniku napromienienia próbek krwi promieniowaniem $n + \gamma$.

Wyniki analizy częstości chromosomów dicentrycznych w napromienionych *in vitro* limfocytach krwi obwodowej oraz obliczone na ich podstawie wartości dawki pochłoniętej promieniowania $n + \gamma$ dla podanych próbek krwi umieszczono w tabelach 3 i 4. Obliczenia zostały wykonane przy użyciu

Tab. 2. Dawki pochłonięte w trzech próbkach krwi, wyznaczone metodami dozymetrii fizycznej w PDPM

Numer próbki	$D_c \pm U$ [Gy]	$D_\gamma \pm U$ [Gy]	$D_n \pm U$ [Gy]
1	$0,20 \pm 0,01$	$0,184 \pm 0,009$	$0,016 \pm 0,001$
2	$0,50 \pm 0,03$	$0,460 \pm 0,028$	$0,040 \pm 0,002$
3	$0,85 \pm 0,04$	$0,782 \pm 0,037$	$0,068 \pm 0,003$

Niepewność rozszerzona U przy poziomie ufności 95% i współczynniku rozszerzenia $k = 1,96$

Tab. 3. Wyniki analizy częstości dicentryków (testu dicentrycznego) w trzech próbkach krwi

Numer próbki	Liczba komórek	Liczba dicentryków	Częstość dic. Y [dic/kom]	PN dla Y
1	3000	23	0,008	[0,005–0,012]
2	1000	33	0,033	[0,023–0,046]
3	500	35	0,070	[0,049–0,097]

Przedział niepewności rozszerzonej przy poziomie ufności 95% i współczynniku rozszerzenia $k = 1,96$

Tab. 4. Wyniki obliczeń dawki całkowitej na podstawie krzywej dla promieniowania mieszanego $n + \gamma$ (tab. 1)

Numer próbki	PN dla D_c [Gy]	D_c [Gy]	U [Gy]
1	[0,10–0,23]	0,16	0,07
2	[0,39–0,66]	0,52	0,14
3	[0,68–1,08]	0,87	0,21

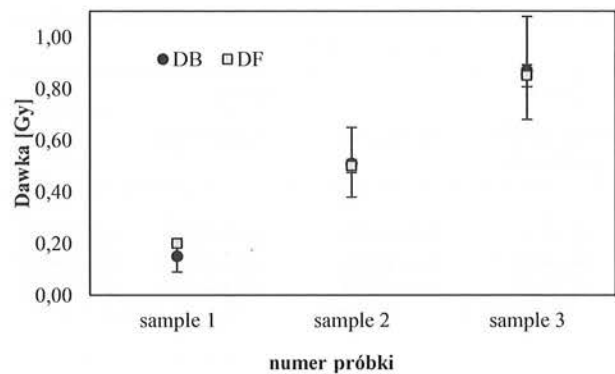
Przedział niepewności rozszerzonej dawki przy poziomie ufności 95% i współczynniku rozszerzenia $k = 1,96$

Niepewność rozszerzona dawki U , wyrażona jako większy z dwóch przedziałów niepewności [16]

współczynników krzywej kalibracyjnej dla promieniowania $n + \gamma$, zgodnie z tabelą 1.

Wyniki dawek całkowitych, uzyskane metodami dozymetrii fizycznej i dozymetrii biologicznej, przedstawiono na rys. 5. Do wyznaczenia dawek całkowitych w próbkach krwi została wykorzystana komora rekombinacyjna równoważna tkance, pracująca przy maksymalnym napięciu, w warunkach bliskich nasyceniu. W celu odtworzenia tych dawek wykorzystano analizę częstości dicentryków w limfocytach krwi.

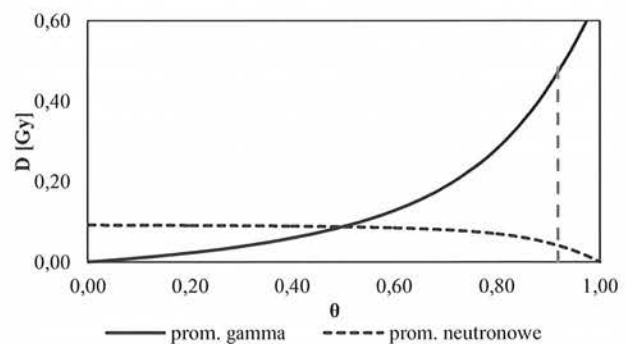
Wartości niepewności dawek pochłoniętych w przypadku szacowania metodą biologiczną są zależne od ilości przeanalizowanych komórek. Im mniej komórek wzięto pod uwagę w analizie, tym wynik obarczony jest większą niepewnością. W przypadku próbki nr 2 liczba przeanalizowanych komórek wyniosła 1000, natomiast w próbce nr 3 było ich 500. Dla porównania – w pierwszej próbce przeanalizowano



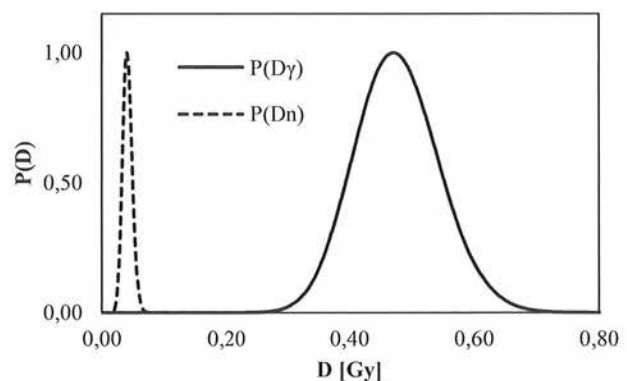
Rys. 5. Porównanie dawek całkowitych uzyskanych metodą biologiczną (DB) i fizyczną (DF)

aż 3000 komórek, gdzie niepewność jest znacząco mniejsza.

Dla stosunku dawki od neutronów i dawki od kwantów gamma (współczynnik ρ), równego 0,087 (w przypadku metody iteracyjnej i analitycznej), oraz dla przyjętego rozkładu gaussowskiego z wartością oczekiwaną równą 0,92 (dla quasi-bayesowskiej metody rozkładu prawdopodobieństwa) uzyskano wyniki zaprezentowane w tabeli 5. Rozkłady dawek przedstawiono odpowiednio na rys. 6 i 7.



Rys. 6. Rozkłady dawek uzyskane metodą analityczną dla próbki nr 2

Rys. 7. Rozkłady dawek uzyskane metodą Q-B dla gaussowskiego rozkładu apriorycznego z $\theta = 0,92$ dla próbki nr 2

Tab. 5. Wyniki dawek pochłoniętych, oszacowane trzema metodami

Dawki w kolejnych próbkiach	Metoda		
	Iteracyjna	Analityczna	Q-B
1			
D_γ [Gy]	0,13±0,06	0,13±0,06	0,14±0,04
D_n [Gy]	0,01±0,01	0,01±0,01	0,01±0,01
D_c [Gy]	0,14±0,07	0,14±0,07	0,15±0,05
2			
D_γ [Gy]	0,47±0,14	0,47±0,14	0,47±0,07
D_n [Gy]	0,04±0,02	0,04±0,02	0,04±0,02
D_c [Gy]	0,51±0,16	0,51±0,16	0,51±0,09
3			
D_γ [Gy]	0,79±0,20	0,79±0,20	0,80±0,08
D_n [Gy]	0,07±0,03	0,07±0,03	0,07±0,03
D_c [Gy]	0,86±0,23	0,86±0,23	0,87±0,11

Dawki całkowite, uzyskane metodą iteracyjną i Q-B, obliczone zostały jako sumy dawek od składowej fotonowej i neutronowej, przy założeniu addytywności obu rodzajów promieniowania [1, 2].

Wartość ocenianej dawki zależy od liczby przeanalizowanych komórek metafazowych oraz liczby zaobserwowanych dicentryków. Z kolei na liczbę komórek i dicentryków wpływa jakość preparatów chromosomowych oraz przyjęte w danym laboratorium kryteria identyfikacji chromosomów dicentrycznych. W celu potwierdzenia spójności wyników otrzymanych metodą biologiczną i fizyczną (tab. 6 i 7) posłużono się wskaźnikiem E_n , będącym statystycznym parametrem oceny uzyskanych danych ilościowych [17]:

$$E_n = \frac{x - X}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \quad (14)$$

gdzie: x – wynik pomiaru uzyskany metodą biologiczną w CLOR, X – wartość przypisana, czyli wynik pomiaru przeprowadzonego przez PDPM jako laboratorium odniesienia, U_{lab} – niepewność wyniku pomiaru CLOR, U_{ref} – niepewność wartości przypisanej wyznaczonej w PDPM.

Dla parametru E_n przyjęto następujące kryteria [17]:

- $|E_n| \leq 1$ – wynik zadowalający,
- $|E_n| > 1$ – wynik niezadowalający.

Wartość parametru $|E_n|$ jest w każdym przypadku mniejsza od 1, co wskazuje na zgodność uzyskanych wyników (tab. 6 i 7) i według przyjętego kryterium [17] pozwala uznać wynik za zadowalający.

Porównując dawki całkowite wyznaczone bezpośrednio z krzywej dawka–skutek dla promieniowania $n + \gamma$ z dawkami uzyskanymi metodą iteracyjną i Q-B (tab. 8), można stwierdzić, że różnice w wartościach

Tab. 6. Porównanie dawek obliczonych metodą iteracyjną (x) i metodą pomiaru fizycznego (X) przy pomocy parametru $|E_n|$

Numer próbki	$x \pm U_{lab}$ [Gy]	$X \pm U_{ref}$ [Gy]	$ E_n $	
D_c	1	0,14 ± 0,07	0,20 ± 0,01	0,57
	2	0,51 ± 0,16	0,50 ± 0,03	0,14
	3	0,86 ± 0,23	0,85 ± 0,04	0,09
D_γ	1	0,13 ± 0,06	0,18 ± 0,01	0,82
	2	0,47 ± 0,14	0,46 ± 0,03	0,07
	3	0,79 ± 0,20	0,78 ± 0,04	0,05
D_n	1	0,01 ± 0,01	0,02 ± 0,01	0,78
	2	0,04 ± 0,02	0,04 ± 0,01	0,06
	3	0,07 ± 0,03	0,07 ± 0,01	0,04

Tab. 7. Porównanie dawek obliczonych metodą QB (x) i metodą pomiaru fizycznego (X) przy pomocy parametru $|E_n|$

Numer próbki	$x \pm U_{lab}$ [Gy]	$X \pm U_{ref}$ [Gy]	$ E_n $	
D_c	1	0,15 ± 0,05	0,20 ± 0,01	0,98
	2	0,51 ± 0,09	0,50 ± 0,03	0,11
	3	0,87 ± 0,11	0,85 ± 0,05	0,17
D_γ	1	0,14 ± 0,04	0,18 ± 0,01	0,97
	2	0,47 ± 0,07	0,46 ± 0,03	0,13
	3	0,80 ± 0,08	0,78 ± 0,04	0,20
D_n	1	0,01 ± 0,01	0,02 ± 0,01	0,60
	2	0,04 ± 0,02	0,04 ± 0,01	0,00
	3	0,07 ± 0,03	0,07 ± 0,01	0,07

są niewielkie i nieistotne statystycznie. Wskazują na to otrzymane wartości parametru statystycznego E_n (np. $0,2 \leq 1$ z porównania z metodą iteracyjną), zgodne z przyjętym kryterium [17], oraz wartości niepewności.

Obserwowana rozbieżność wynika głównie z zastosowania krzywej kalibracyjnej pochodzącej od izotopu ^{60}Co przy obliczaniu składowej fotonowej. Widmo energetyczne tego izotopu nie jest identyczne z widmem energetycznym promieniowania gamma pochodzącego z rdzenia reaktora MARIA. Są one jednak zbliżone, co powoduje, że ^{60}Co jest powszechnie wykorzystywanym izotopem w dozymetrii promieniowania mieszanego $n + \gamma$ [1, 2].

Tab. 8. Porównanie dawek całkowitych uzyskanych za pomocą krzywej dla promieniowania mieszanego (x) i odpowiednio metodą iteracyjną (X) i Q-B (X) przy użyciu parametru $|E_n|$

Numer próbki	$x \pm U_{lab}$ [Gy]	$X \pm U_{ref}$ [Gy]	$ E_n $	
Iteracyjna	1	0,16 ± 0,07	0,14 ± 0,07	0,20
	2	0,52 ± 0,14	0,51 ± 0,16	0,05
	3	0,87 ± 0,21	0,86 ± 0,23	0,03
Q-B	1	0,16 ± 0,07	0,15 ± 0,05	0,12
	2	0,52 ± 0,14	0,51 ± 0,09	0,06
	3	0,87 ± 0,21	0,87 ± 0,11	0,00

4. Dyskusja wyników

Stosując współczynniki mieszanej krzywej kalibracyjnej do obliczenia dawek całkowitych, uzyskuje się bardzo dobrą zgodność tych wartości z rzeczywistymi dawkami, otrzymanymi w wyniku napromienienia próbek krwi. Ma to potwierdzenie zwłaszcza w zakresie większych dawek. Taki sam wniosek można sformułować, obliczając dawkę całkowitą na podstawie sumy składowych dawek od neutronów i promieniowania gamma, liczonych metodą iteracyjną lub analityczną. Obie te metody prowadzą ostatecznie do takich samych wyników, są więc sobie równoważne. Skoro tak, to w przypadku wykonywania wielu obliczeń dla dużej ilości próbek krwi nie ma konieczności stosowania serii obliczeń metodą iteracyjną, ponieważ metoda analityczna daje te same rezultaty w znacznie krótszym czasie. Co więcej, metoda iteracyjna jest zawsze ograniczona skończoną liczbą powtórzeń, co jest jej wadą i może negatywnie wpłynąć na wyniki. Oczywiście, obie metody mogą być stosowane wyłącznie w przypadku precyzyjnej znajomości stosunku dawek składowych.

Wyniki uzyskane quasi-bayesowską metodą rozkładu prawdopodobieństwa z gaussowskim rozkładem apriorycznym dla wartości oczekiwanej równej 0,92 są bardzo zbliżone do dawek obliczonych metodą iteracyjną. Poprawność tej metody jest zależna od użytego rozkładu oraz od dokładności wartości oczekiwanej. Im dokładniejsza wartość, tym wynik bardziej zbliżony jest do rzeczywistego. Ponieważ metoda umożliwia wyrażenie wielkości oznaczającej stosunek dawek składowych w postaci rozkładu prawdopodobieństwa tej wartości, może być wykorzystana w sytuacji przypadkowego narażenia, gdy parametr θ nie jest precyzyjnie znany. Wówczas można go oszacować na podstawie wcześniejszych pomiarów prowadzonych w miejscu, w którym doszło do przypadkowego napromienienia, i zastosować do obliczeń. W odróżnieniu od metody iteracyjnej i analitycznej, quasi-bayesowska metoda rozkładu prawdopodobieństwa może być stosowana nawet w przypadku nieznanego stosunku dawek składowych, jednakże wyniki będą obciążone bardzo dużą niepewnością.

Jak pokazano w niniejszej pracy, wszystkie zaproponowane metody w ostateczności prowadzą do takiego samego rezultatu, co potwierdza ich skuteczność oraz poprawność wykonanych obliczeń i uzyskanych wyników.

Podziękowania

Autorzy składają podziękowania dr. A. M. Gryzińskiemu oraz dr. P. Tulikowi za przeprowadzone napromie-

nianie próbek krwi w reaktorze MARIA w Świerku i za wykonane pomiary dozymetryczne. Badania były finansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach grantu badawczego nr SP/J/16/143339/8 pt. „Technologie wspomagające rozwój bezpiecznej energetyki jądrowej”, w ramach którego zrealizowane zostało zadanie badawcze pt. „Przystosowanie metody oznaczania częstości występowania chromosomów dicentrycznych dla potrzeb awaryjnej dozymetrii neutronów reaktorowych”.

Badania finansowało także Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach projektu celowego nr 6 T11 0051 2002 C/05 826 pt. „Tworzenie bazy danych z funkcjami opisującymi standardowe krzywe wzorcowe do cytogenetycznej oceny indywidualnych dawek promieniowania jonizującego o różnych wartościach LET dla potrzeb Ośrodka Dyspozycyjnego Służby Awaryjnej w CLOR”.

Przedstawiona tematyka jest częścią pracy magisterskiej pt. „Biologiczna ocena dawek mieszanego promieniowania jonizującego z zastosowaniem metod statystyki bayesowskiej”, wykonanej w 2014 r. przez studentkę Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej, I. Pacyniak, we współpracy z Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej.

Literatura

- [1] IAEA, Technical Reports 405, *Biological dosimetry: Chromosomal aberration analysis for dose assessment*, Wiedeń 2001.
- [2] IAEA, *Cytogenetic Dosimetry: Applications in preparedness for and response to radiation emergencies*, Wiedeń 2011.
- [3] Szłuińska M., Edwards A.A., Lloyd D.C., *Chromosomal Alterations: Statistical Methods for Biological Dosimetry*, Springer Berlin Heidelberg, 2007, s. 351–370.
- [4] Kowalska M., *Symetryczne aberracje chromosomowe jako biologiczny dozymetr promieniowania jonizującego*, „Postępy Techniki Jądrowej” tom 45, zeszyt 1, Warszawa 2002, s. 33–41.
- [5] Dziunikowski B., *O fizyce i energii jądrowej*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2001.
- [6] <http://www.ncbj.gov.pl> (link aktywny: 02/2015).
- [7] Koszuc L., *Najczęściej popełniane błędy w relacjach prasowych*, „Forum Atomowe” 2/2014, s. 9.
- [8] Janiak M., Wójcik A., *Medycyna zagrożeń i urazów radiacyjnych*, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa 2005.
- [9] Hopper C.M., *Nuclear criticality. Mitigating the consequences of an accident*, ISO Focus+ 2012.
- [10] Kellerer A.M., Rossi H.H., *A generalized formulation of dual radiation action*, „Radiation Research” 75/1978, s. 471–488.
- [11] Fornalski K.W., *Alternative statistical methods for cytogenetic radiation biological dosimetry*, Cornell University Library, arXiv.org/abs/1412.2048, 2014.

- [12] Brame R.S., Groer P.G., *Bayesian methods for chromosomal dosimetry following a criticality accident*, „Radiation Protection Dosimetry” 104/2003, s. 61–63.
- [13] Pacyniak I., Fornalski K.W., Kowalska M., *Employment of Bayesian and Monte Carlo methods for biological dose assessment following accidental overexposures of people to nuclear reactor radiation*, Materiały pokonferencyjne: The Second International Conference on Radiation and Dosimetry in Various Fields of Research (RAD 2014), Serbia: Uniwersytet w Nisz, 2014, s. 49–52.
- [14] Golnik N., Gryziński M.A., Kowalska M., Meronka K., Tulik P., *Characterisation of radiation field for irradiation of biological samples at nuclear reactor – comparison of twin-detectors and recombination methods*, Radiation Protection Dosimetry (published online), DOI: 10.1093/rpd/nct341, 2013.
- [15] Zielczyński M., Gryziński M.A., Golnik N., *Method for determination of gamma and neutron dose components in mixed radiation fields using a high-pressure recombination chamber*, „Radiation Protection Dosimetry” 126 (1–4)/2007, s. 306–309.
- [16] EA-04/16, *Wytyczne EA dotyczące wyrażania niepewności w badaniach ilościowych*, 2003.
- [17] Norma PN-EN ISO/IEC 17043:2011. *Ocena zgodności. Ogólne wymagania dotyczące badania biegłości*, 2011.

Nieautoryzowana biografia profesora Jacka Hennela (z przymrużeniem oka)

Podczas seminarium w ramach podziękowania Profesorowi oraz z okazji zbliżających się urodzin został przekazany poemat ku czci Profesora Jacka Hennela (nieautoryzowana biografia)

W grudniowy wieczór, w mieście Chorzowie
Drobniutki Jacek staje na głowie
W ten dziwny sposób, drogi kolego
Śledzi precesję bąka małego

W takim układzie trochę komicznym
Myśli o kacie prawie magicznym
I nie jest tutaj całkiem bez racji
Wnioski zależą od obserwacji

Gdy na stadionie biegał z kumplami
W połowie drogi krzyknął: „Wracamy”
Koledzy wiedzą, to pomysł nowy
Bo on przy echu już był spinowym

Jadł chlebek z miódkiem, wszak cukier krzepi
A Jego myśli błądzą przy EPI
To niesłychane, masz babo placek
Wszystko wymyślił Hennel W. Jacek

Profesor nie miał szczęścia przy kartach
Papieża uczył jeździć na nartach
Rezonans też mu chodził po głowie
I nie poprzestał tylko na słowie

Wraz z Hrynkiewiczem i Daszkiewiczem
Teorie MRu wcielali w życie
Pewnego razu w ranek majowy
Wpadli na pomysł, dość odlotowy

Wzięli ceweczki, mostek, magnesik
Každy przy sobie miał swój notesik
Włączyli pole i modulację
Mogli w zasadzie iść na kolację

Gdzie tam, kręcili wciąż amplitudą
Tak między nami, trochę za długo

I nagle ciszę przerwały krzyki
Nareszcie mamy dwa ostre piki!!!

Z radości poszli zaraz do kina
Ale wrócili, to nie ich wina
Chcieli potwierdzić, mieć problem z głowy
Sygnał to pikuś, lecz czy Jądrowy?

Mistrz Jacek Hennel, mówiąc o spinie
Lubił teorie podpierać winem
Czas relaksacji, To nie byle co!
Po transformacie z kieliszkiem Bordeaux

Ciecze i ruchy w roztworze białek
Opisał w „Nature” z pomocą całek
Wykazał odwrotność relaksacji
Zależy z grubsza od koncentracji

Auf Deutsch, In English, Pa Ruskij tożę
Wszystkie języki znał nienajgorzej
Czasem miał problem jak przetłumaczyć
Pd zależny? Co to ma znaczyć?

Hennel był zawsze losu wybrańcem
Onegdaj został nawet Posłańcem
Mężem Posłanki - ujmując krótko
I politykiem był też cichutko

Organizował miłe spotkania
Z początkiem grudnia - jak super niania
Czterdzieści razy - no o trzy więcej
Do Krakowa zapraszał goręcej

Wychował uczniów zastęp dość spory
Doktorzy, Docenci, Profesory
Jesteśmy dumni i jest nas wielu
I dziękujemy NAUCZYCIELU

Anioły, demony, fizyka, czyli udająca powieść sensacyjną najnowsza historia badań nad ciemną materią

Krzysztof Turzyński

Instytut Fizyki Teoretycznej, Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

Streszczenie. Poszukiwania ciemnej materii w ziemskich laboratoriach przyniosły w ostatnich latach liczne inspirujące, ale niejednokrotnie sprzeczne rezultaty. W niniejszej pracy przedstawiono krótkie omówienie najciekawszych wyników.

Kiedy pewna dwudziestoletnia absolwentka żeńskiego kolegium Vassar wysyłała w 1948 roku podanie o przyjęcie na studia doktoranckie na Uniwersytecie w Princeton, nie robiła sobie zapewne wielkich nadziei. Nic dziwnego, równouprawnienie płci dotarło na ten szczybel edukacji dopiero w roku 1975. Nie zniechęciło to naszej bohaterki, która ostatecznie zdecydowała się kształcić na Uniwersytetach Cornella i Georgetown pod kierunkiem takich tuzów współczesnej fizyki jak Hans Bethe, Richard Feynman czy George Gamow. Po uzyskaniu stopnia naukowego Vera Rubin, bo o niej tu mowa, została astronomem w Instytucie Carnegiego. Tam poznała Kenta Forda, konstruktora niezwykle czułego spektrofotometru, czyli przyrządu pozwalającego rozdzielać światło gwiazd na poszczególne kolory.

Kiedy źródło zmiennych, ale powtarzalnych w czasie zaburzeń, takich jak światło (zaburzenie pola elektromagnetycznego) czy dźwięk (zaburzenie ciśnienia), oddala się od obserwatora, obserwuje on zmniejszenie częstotliwości tych zaburzeń w porównaniu z sytuacją, gdy źródło jest nieruchome. Podobnie przybliżanie się źródła zaburzeń do obserwatora prowadzi do zwiększenia częstotliwości odbieranych przez niego zaburzeń. Zjawisko to nazywamy efektem Dopplera. Gdy źródłem jest gwiazda, wysyłane przez nią światło zawiera pewien zakres częstotliwości, występują w nim jednak małe przerwy (linie absorpcyjne), będące skutkiem pochłaniania światła przez materiał, z którego gwiazda jest zbudowana. Ponieważ częstotliwości linii absorpcyjnych spoczywającej gwiazdy są dobrze określone, ich zwiększenie bądź zmniejszenie będzie świadczyć o ruchu gwiazdy. Oznacza to, że – mie-

rząc zmianę częstotliwości linii absorpcyjnych – można wyznaczyć prędkość oddalania się bądź przybliżania gwiazdy.

Mając dostęp do odpowiednio czułego sprzętu, Vera Rubin rozpoczęła program pomiaru prędkości, z jakimi gwiazdy w pobliskich galaktykach obiegają ich centra. Hipotezę badawczą, którą testowała, da się w uproszczeniu przedstawić następująco. Sądząc po intensywności świecenia galaktyk, można przypuścić, że w zasadzie cała ich masa skupiona jest w niewielkim (w galaktycznej skali) centralnym zgrubieniu; oznaczmy jego masę przez M . Rozważmy pojedynczą gwiazdę o masie m , obiegającą to zgrubienie w sporej (w porównaniu z jego rozmiarami) odległości r . Siła grawitacji wywierana na tę gwiazdę przez zgrubienie i równa $F_g = GMm/r^2$, gdzie G jest newtonowską stałą grawitacyjną, powinna powodować jej jednostajny ruch po okręgu, czyli stanowić siłę dośrodkową, określoną wzorem $F_r = mv^2/r$, gdzie v jest prędkością gwiazdy. Porównanie tych dwóch wyrażeń prowadzi do wniosku, że prędkość v powinna być odwrotnie proporcjonalna do pierwiastka z odległości r , a więc w szczególności maleć przy zwiększającej się odległości gwiazdy od centralnego zgrubienia. Tymczasem uzyskiwane od lat 60. XX wieku pomiary Very Rubin przeczyły tej intuicji – prędkość stabilizowała się na pewnym poziomie i wcale nie myślała spadać ze wzrostem r .

Mijały lata. Ilość danych zgromadzonych przez Verę Rubin rosła, jej pomiary zostały powtórzone przez innych badaczy i środowisko astronomów uświadomiło sobie, że opisaną wyżej niezgodność trzeba jakoś wyjaśnić. Przy okazji przypomniano sobie o pewnych starych obserwacjach, które w chwili ich opublikowa-

nia zostały zlekceważone. Ich autorem był Fritz Zwicky, urodzony w Warnie syn szwajcarskiego kupca; wysłany do Zurychu w celu studiowania prawa i handlu, dziedzic wiedzy potrzebnych do kontynuacji rodzinnego interesu, poświęcił się jednak zgłębianiu matematyki i fizyki, po czym wyjechał do Kalifornii, gdzie uzyskał angaż w zespole Roberta Millikana. Ten ostatni był już odkrywcą elementarnego ładunku elektronu i laureatem Nagrody Nobla z fizyki; współpracownicy robili sobie po cichu żarty z jego nazwiska, mówiąc, że jeden kan to najmniejsza, niepodzielna ilość skromności, jaką może charakteryzować się człowiek. Zwicky potrafił wszakże oświadczyć swojemu pryncypałowi, że nigdy nie miał on (to znaczy pryncypał) żadnego ciekawego pomysłu na fizykę i dopiero on (to znaczy Zwicky) mu pokaże. Millikan tolerował jakoś wybryki swojego asystenta, trudno jednak się dziwić, że inni koledzy traktowali Zwicky'ego jako lekko szalonego oryginała, co przekładało się także na odbiór jego badań naukowych (których zakres rozciągał się od kosmologii do konstrukcji silników odrzutowych). Dlatego pewnie nikt nie potraktował dość poważnie uzyskanego przez Zwicky'ego w latach 30. XX wieku wyniku, że galaktyki w gromadzie obserwowanej w gwiazdozbiornie Warkocza Bereniki nie poruszają się tak, jakby tego chciała grawitacja newtonowska, wspomagana dodatkowym, rozsądnym, zdawało się, założeniem, że rozkład intensywności świecenia odzwierciedla rozkład masy.

Wyniki Rubin i Zwicky'ego świadczyły o tym, że jeśli chciało się uratować wiarę w newtonowską grawitację (a dodać należy, że efekty wynikające z teorii względności powinny być w tym przypadku znikomo małe), należało przyjąć, że w kosmosie znajduje się jakaś materia, która nie świeci i nie pochłania światła, stanowiąc jedynie dodatkowe źródło przyciągania grawitacyjnego. Gdyby znajomość klasycznej łaciny i greki należała jeszcze w owym czasie do ogólnego wykształcenia, nadano by pewnie owej substancji jakąś uczoną nazwę, a tak zaczęto mówić po prostu o ciemnej materii. Powołanie – na razie na poziomie spekulacji – do życia takiego bytu sprowokowało astronomów i fizyków do zadawania dalszych pytań o jego naturę. Czy istnieją niezależne od pomiarów prędkości gwiazd i galaktyk argumenty na rzecz istnienia ciemnej materii? Czy odpowiednia jej ilość mogła powstać podczas ewolucji wszechświata? Wreszcie, czy dałoby się stanowiące ją cząstki jakoś „złapać” w laboratorium i zbadać?

Na pierwsze z tych pytań można było – po dziesiątkach lat badań – udzielić odpowiedzi twierdzącej. Okazuje się bowiem, że własności wypełniającego wszechświat mikrofalowego promieniowania tła oraz rozkład

wielkich struktur, takich jak galaktyki czy gromady galaktyk, we wszechświecie zgadzają się z używanymi przez fizyków i kosmologów modelami tylko pod warunkiem uwzględnienia w nich sporej ilości ciemnej zimnej materii, tj. nieoddziałujących ze światłem cząstek poruszających się wolno w porównaniu z prędkością światła. Także drugie pytanie doczekało się odpowiedzi twierdzącej, w tym wypadku obudowanej dodatkowymi warunkami. Przypuśćmy bowiem, że możliwe są procesy, w których dwie cząstki ciemnej materii o masach porównywalnych z masami najcięższych znanych cząstek, tj. kwarka top lub bozonów W i Z, znikają (anihilują) i powstają dwie znane cząstki (na przykład para elektron – pozyton), przy czym prawdopodobieństwo zachodzenia tych procesów jest zbliżone do prawdopodobieństwa zachodzenia jądrowych przemian beta. Wówczas, w miarę jak wszechświat stygł i się rozszerzał, spotkanie dwóch cząstek ciemnej materii, prowadzące do ich anihilacji, stawało się coraz mniej prawdopodobne, aż w końcu procesy te praktycznie ustały, a ilość ciemnej materii ustabilizowała się właśnie na takim poziomie, jaki jest potrzebny do wyjaśnienia zarówno obserwacji Rubin i Zwicky'ego, jak i własności mikrofalowego promieniowania tła [1].

Jeśli wyrażone wyżej przypuszczenia mają coś wspólnego z rzeczywistością, pozwala to na ostrożny optymizm w kwestii udzielenia odpowiedzi twierdzącej na trzecie pytanie – skoro bowiem ciemna materia może anihilować w parę cząstka – antycząstka, to zgodnie z prawami mechaniki kwantowej może także zderzać się z cząstkami. Jak jednak wykryć takie zderzenia w laboratorium? Przylatująca z kosmosu cząstka ciemnej materii mogłaby oddziaływać z atomem substancji wypełniającej detektor i – pod warunkiem, że będzie to odpowiednia substancja i odpowiedni detektor – zjonizować ten atom, uwalniając swobodne ładunki elektryczne, pobudzić do świecenia lub wprawić w drgania zawierającą ten atom sieć krystaliczną. Trzeba jednak pamiętać, że istnieje wiele czynników utrudniających rozpoznanie takiego zjawiska: promieniowanie kosmiczne, czyli przylatujące na Ziemię z kosmosu wysokoenergetyczne cząstki zwykłej materii, oraz promieniowanie radioaktywne otoczenia detektora i materiału samego detektora. Z niedogodnościami tymi można walczyć, zakopując detektor głęboko pod ziemią, w szybkiej nieczynnej kopalni, obudowując go grubą osłoną oraz stosując wielostopniowy proces oczyszczania materiału detektora z radioaktywnych domieszek. Prowadzone przez naukowców symulacje wskazują, że przy współczesnych możliwościach technologicznych można liczyć na zbudowanie detektora dostatecznie czułego, by dało się w nim wykryć cząstki ciem-

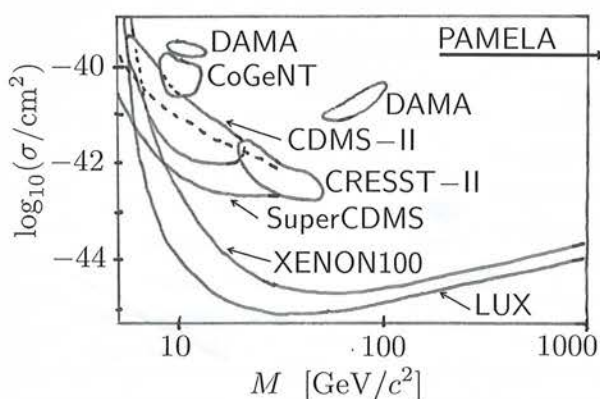
nej materii pomimo występowania tła pochodzącego od innych cząstek.

Co ciekawe, ruch obiegowy Ziemi wokół Słońca stanowi znaczną dodatkową pomoc dla łowców ciemnej materii. Słońce obiega bowiem centrum naszej Galaktyki z prędkością około 220 km/s. Prędkość Ziemi, wynosząca około 30 km/s, jest latem skierowana mniej więcej zgodnie z tą prędkością, zimą zaś – w stronę przeciwną. Powoduje to, że latem Ziemia „przeciska się” przez ciemną materię z większą prędkością niż zimą i efekt tego powinien być możliwy do zaobserwowania jako roczna zmienność liczby oddziaływań cząstek ciemnej materii w detektorze.

Co na to eksperymentatorzy? Od 2001 roku zespół eksperymentu DAMA/LIBRA konsekwentnie twierdzi, że zliczenia błysków światła w wypełnionym jodkiem sodu (NaI) detektorze wykazują odpowiednią modulację roczną wskazującą na oddziaływania cząstek ciemnej materii [2]. Zaufanie do tych wyników zmniejsza jednak fakt, że badacze owi nie udostępnili ogółowi fizyków swoich surowych danych, a zjawisk występujących w cyklu rocznym nawet zupełny laik będzie w stanie wskazać niemało. W 2009 roku zespół eksperymentu CoGeNT, używającego wielkiej „diody germanowej” do rejestracji potencjalnych oddziaływań z ciemną materią, również ogłosił [3] obserwację rocznej zmienności częstości zliczeń potencjalnych oddziaływań ciemnej materii – okazało się, niestety, że parametry cząstek mogących wywoływać odpowiedzi w DAMA/LIBRA i CoGeNT musiałyby być znacząco inne. W 2011 roku badacze używający detektora CRESST-II ogłosili podczas – *o tempora! o mores!* – konferencji prasowej, że także zobaczyli w swoim detektorze, rejestrującym błyski światła i drgania sieci krystalicznej, niewyjaśnione oddziaływania, najprawdopodobniej pochodzące od ciemnej materii [4]. Korzystnie wyglądał przy tym fakt, że mając bardzo niewielkie tło w detektorze, nie musieli się odwoływać do obserwacji zmienności rocznej, problemem było wszakże to, że ewentualna cząstka ciemnej materii, zgodna z wynikami doświadczenia, musiałyby mieć własności jeszcze inne niż te wyjaśniające dwa poprzednie eksperymenty. Trzy niewyjaśnione oddziaływania zostały też zaobserwowane w 2013 roku w eksperymencie CDMS-II, wykorzystującym wielki kryształ krzemu [5]; oczywiście, wyniki były w zasadzie niezgodne z dowolnym innym z omówionych dotąd eksperymentów. Całą sprawę zaciemniało zaś to, że kilka innych zespołów doświadczalnych (w tym XENON100 i LUX) poszukujących oddziaływań cząstek ciemnej materii nie zaobserwowało [6,7] praktycznie nic, co wykluczałoby własności cząstek ciemnej mate-

rii zgodne z DAMA/LIBRA, CoGeNT, CRESST-II lub CDMS-II.

Skoro oparte na prostym pomysle, wykonywane na Ziemi eksperymenty doprowadziły do takiego pomieszania, należało zabrać się za obserwację jakichś innych procesów z udziałem cząstek ciemnej materii. Centrum naszej Galaktyki jest źródłem potężnych sił grawitacyjnych, które mogą efektywnie „wyłapywać” cząstki ciemnej materii, co powinno prowadzić do zwiększenia ich koncentracji w tym rejonie i wznowienia procesów anihilacji, w których produkowane są cząstki antymaterii o energiach zbliżonych do energii spoczynkowej cząstek ciemnej materii. Jeśli udało by się dostrzec takie cząstki na tle antymaterii wytwarzanej przez pulsary i wybuchy supernowych – a nie jest to łatwe, gdyż kierunek ruchu takich cząstek jest co rusz zmieniany przez niejednorodne pole magnetyczne naszej Galaktyki – można by mieć dodatkowe informacje pozwalające na rozstrzygnięcie wyników ziemskich eksperymentów. W 2008 roku zespół satelitarnego detektora PAMELA poinformował o zaobserwowaniu w dochodzącym do Ziemi promieniowaniu kosmicznym nadwyżki wysokoenergetycznych pozytonów, która mogłaby być śladem po anihilacji ciemnej materii [8] (wysławszy wyniki do publikacji w prestiżowym czasopiśmie „Nature”, badaczom



Dopiero w 2014 roku sytuacja zaczęła się nieco (?) wyjaśniać. Ponowna analiza danych z eksperymentu CoGeNT (np. [10]), wykonana niezależnie przez trzy zespoły naukowców, wskazała na zaniżenie błędów systematycznych, co doprowadziło do fałszywie pozytywnych wniosków. Analiza ulepszonego eksperymentu SuperCDMS, uwzględniająca także dane CDMS-II, wykluczyła możliwość, że obserwacje tego ostatniego detektora były czymś więcej niż fluktuacją statystyczną [11]. Zespół eksperymentu CRESST-II zebrał zaś dodatkowe dane w ulepszonej i lepiej oczyszczonej, ale mniejszej wersji detektora [12], wykluczając swoje wcześniejsze konkluzje. Pozostałe konflikty interpretacyjne nie zostały, jak dotąd, wyjaśnione pomimo konstruowania i projektowania kolejnych generacji detektorów. Starożytna chińska klątwa „Obyś żył w ciekawych czasach!” niewątpliwie odnosi się dziś szczególnie do fizyków zajmujących się poszukiwaniem ciemnej materii.

zespołu PAMELA nie wolno było ich przed publikacją udostępniać kolegom, ale nie mogli wytrzymać: zdecydowali się w końcu pokazać je na konferencji naukowej, nie przewidzieli jednak, że jeden ze słuchaczy ich wykładu, Alessandro Strumia, przyjdzie z aparatem fotograficznym; następnego dnia ukazała się bazująca na danych PAMELA praca [9] Cirellego i Strumii, który został okrzyknięty „fizycznym paparazzo”). Nie zdziwimy zapewne czytelników, stwierdzając, że własności cząstek ciemnej materii niezbędne do wyjaśnienia obserwacji PAMELA były całkiem inne niż te wywiedzione z omówionych wcześniej doświadczeń.

Literatura

- [1] E.W. Kolb, M.S. Turner, *The Early Universe*, Front. Phys. 69 (1990) 1.
- [2] R. Bernabei et al., Eur. Phys. J. C 73 (2013) 2648.
- [3] C.E. Aalseth et al., Phys. Rev. D 88 (2013) 012002.
- [4] G. Angloher et al., Eur. Phys. J. C 72 (2012) 1971.
- [5] R. Agnese et al., Phys. Rev. Lett. 111 (2013) 251301.
- [6] E. Aprile et al., Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 181301.
- [7] D.S. Akerib et al., Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 091303.
- [8] O. Adriani et al., Nature 458 (2009) 607.
- [9] M. Cirelli, A. Strumia, PoS IDM2008 (2008) 089.
- [10] C.E. Aalseth et al., preprint arXiv:1401.6234.
- [11] R. Agnese et al., Appl. Phys. Lett. 103 (2013) 16405.
- [12] G. Angloher et al., Eur. Phys. J. C 74 (2014) 3184.

Polskie Towarzystwo Fizyczne patronem synchrotronu SOLARIS

Poszukiwanie nowych kierunków badawczych, popularyzacja metod i technik badawczych oferowanych przez SOLARIS dla przemysłu, a także promocja Narodowego Centrum Promieniowania Synchrotronowego SOLARIS w Krakowie w środowisku fizyków i szeroko rozumiana współpraca – takie zadania wyznaczyło sobie Polskie Towarzystwo Fizyczne, obejmując swój patronat nad Centrum.

Wszystko po to, aby rozwijać i odpowiednio wykorzystywać potencjał jednego z najpotężniejszych narzędzi badawczych fizyki doświadczalnej w Polsce, jakim jest źródło promieniowania synchrotronowego SOLARIS.

Umowę patronatu z ramienia Polskiego Towarzystwa Fizycznego podpisała prof. Katarzyna Chałasińska-Macukow, prezes PTF, a w imieniu SOLARIS prof. Stanisław Kistryn, prorektor Uniwersytetu Jagiellońskiego. Profesor Katarzyna Chałasińska-Macukow podczas uroczystości mówiła, iż dla Polskiego Towarzystwa Fizycznego to duże wyróżnienie, bo SOLARIS jest ważnym miejscem na polu interdyscyplinarnych badań naukowych.

– Chociaż synchrotron będzie dostępny dla badaczy dopiero w 2016 r., to powstającym w Krakowie ośrodkiem już teraz interesują się naukowcy nie tylko z kraju, ale także z Europy Środkowowschodniej, którzy badania przy użyciu synchrotronu do tej pory realizowali w Europie Zachodniej, USA i na Dalekim Wschodzie – mówi prof. Marek Stankiewicz, dyrektor Narodowego Centrum Promieniowania Synchrotronowego SOLARIS.



Podpisanie umowy, fot. Anna Wojnar

Obecni podczas uroczystości przedstawiciele Polskiego Towarzystwa Fizycznego oraz zaproszeni goście mieli także okazję zwiedzić SOLARIS i z bliska zobaczyć poszczególne elementy urządzenia: 40-metrowy akcelerator liniowy (o energii 600 MeV), tunel technologiczny, pierścień akumulacyjny o obwodzie 96 metrów z 12 achromatami elektromagnetycznymi (o energii 1,5 GeV) oraz dwie linie badawcze: PEEM/XAS i UARPES.

Koszt budowy Narodowego Centrum Promieniowania Synchrotronowego SOLARIS (budynku, synchrotronu oraz dwóch linii badawczych) wyniósł blisko 200 mln zł. Projekt finansowany jest ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka na lata 2007–2013.

Jak zmierzyć wzrok?

z prof. dr. hab. Ryszardem Naskręckim rozmawiała Maria Marciniak

Maria Marciniak: *Panie profesorze, przez wiele lat był Pan w zespole stworzonym przez niedawno zmarłego profesora Franciszka Kaczmara, twórcę poznańskiej szkoły laserowej. Jak Pan do niego trafił?*

Ryszard Naskręcki: To był trudny moment. Kończyłem studia w 1983 roku, kiedy jeszcze trwał stan wojenny. Studia doktoranckie były zawieszane, nie było też na uczelni nowych etatów. Dla absolwentów, nawet tych najzdolniejszych, nie było żadnych propozycji. Obowiązywała też rygorystyczna służba wojskowa. W tej sytuacji profesor Kaczmarek wpadł na pomysł, aby zatrudnić mnie na etacie pracownika technicznego, wręcz warsztatowego. A nasze drogi przecięły się, kiedy na początku czwartego roku studiów pojawiłem się w Zakładzie Elektroniki Kwantowej. W tamtych czasach magistrant pojawiał się w Zakładzie codziennie, był wciągnięty w bieżące sprawy i prace naukowe Zakładu. Ja miałem to szczęście, że z mojego roku studiów byłem jedynym, który trafił do Zakładu Elektroniki Kwantowej. Rozpocząłem współpracę z dr Teresą Wróżową. Była opiekunką mojej pracy magisterskiej, a oficjalnym promotorem był prof. Kaczmarek. Jako student czwartego i piątego roku terminowałem więc w tym Zakładzie, równoległe ze studiami. To terminowanie to była fantastyczna okazja do wzajemnego poznania. Zakład Elektroniki Kwantowej budował w tamtych czasach bardzo dużo aparatury naukowej. To była ogromna szansa, aby wykazać się swoimi umiejętnościami. Tu liczyła się niekoniecznie wiedza teoretyczna, ale umiejętność zrobienia czegoś, w tamtych czasach, praktycznie z niczego. Przypominam, że w latach 80. wydatki dewizowe na uczelniach były praktycznie zerowe. W efekcie 90% aparatury budowaliśmy właściwie sami. Kupowało się elementy absolutnie niezbędne, czyli przede wszystkim przyrządy pomiarowe i diagnostyczne, takie jak oscyloskopy czy generatory. Natomiast naszą aparaturę, tzw. układy pomiarowe, budowaliśmy sami. Dla mnie – muszę to wyraźnie podkreślić – ogromnie ważna była współpraca



z dr Teresą Wróżową, dlatego że była ona przykładem tradycyjnego doświadczalnika, który wnikał bardzo dogłębnie w istotę badań oraz metody pomiarowe. Miała ogromną intuicję i determinację w dążeniu do zbudowania czegoś nowego i na takim podejściu ogromnie korzystałem. Początek mojej pracy przypadł też na okres, kiedy zaczęły pojawiać się komputery. Z dr. Wróżową, jako pierwsi na wydziale i jako jedni z pierwszych w Polsce, próbowaliśmy sprzęgać aparaturę pomiarową z komputerem. Komputer miał ułatwiać pomiar, zbierać dane, sterować poszczególnymi etapami eksperymentu. To była dla mnie ogromna szansa. Byłem z tej młodszej generacji, która znacznie łatwiej wchodziła w te sprawy komputerowe, bardziej je czuła niż moi starsi koledzy i koleżanki. To spowodowało, że bardzo szybko „zdobyliśmy markę”, że nasze układy pomiarowe się skomputeryzowały, a to już była nowa jakość. Profesor Kaczmarek to wszystko widział i obserwował, bardzo nam kibicował. Po skończeniu studiów musiałem jeszcze odbyć bardzo długą służbę wojskową, bo, jak mówiłem, to były trudne czasy. Rok spędziłem w Szkole Podchorążych Rezerwy w Toruniu, a później wielokrotnie mnie wzywano na jakieś szkolenia, treningi i poligony. Mam wiele szacunku i wdzięczności dla determinacji prof. Kaczmara, który szukał efektywnego rozwiązania sprawy mojego zatrudnienia i stąd pomysł etatu technicznego. Tak spędziłem pierwszych sześć lat.



Ryszard Naskręcki i Jacek Kubicki w Zakładzie Elektroniki Kwantowej. W tle jeden z pierwszych komputerów PC (rok 1986)

Gdyby profesor Franciszek Kaczmarek nie zdobył się na tak skuteczne działanie w znalezieniu jakiegoś rozwiązania, prawdopodobnie by mnie tu nie było. Tym bardziej że moje związki z Poznaniem były raczej symboliczne. Pochodzę z Ostrowa Wielkopolskiego, gdzie ukończyłem Technikum Kolejowe Ministerstwa Komunikacji, które w tamtych czasach było szkołą elitarną, ze znakomitą kadrą nauczycieli i świetną infrastrukturą. Kiedy dostałem pracę na UAM w 1983 r., to nawet nie miałem gdzie mieszkać. Przez kilka lat wynajmowaliśmy z żoną mieszkanie, ale dla młodego małżeństwa było to znaczne obciążenie. W końcu, w 1987 r., udało nam się uzyskać pokój w hotelu asystenta. Warunki były skromne. Pokój o metrażu 19 m², w którym musiało się zmieścić wszystko związane z codziennym życiem powiększającej się rodziny. Natomiast z punktu widzenia socjalnego i towarzyskiego to miejsce było nadzwyczajne. Panował tam fantastyczny intelektualny ferment: rozmowy i twórcze dyskusje przenosiły się z korytarzy do kuchni i pokoiów. Z osób, które tam wtedy z nami mieszkały, około dwudziestu jest dzisiaj profesorami poznańskich uczelni; ludzie ci piastowali i piastują ważne funkcje.

Jesienią 1989 roku otrzymałem etat asystenta i w 1992 roku obroniłem pracę doktorską. Praca dotyczyła badania zjawiska rozpraszania światła w wybranych cieczach organicznych. Myślę, że jej największym walorem była naprawdę unikatowa aparatura do pomiarów widma światła rejlajowsko rozproszonego, bardzo skomputeryzowana, którą zbudowaliśmy wspólnie z dr. Teresą Wróźową. 12 października, w dniu obrony, wcześniej rano, poszedłem do fryzjera, gdzie włączone było radio. Strzygąc mnie, powtarzał: „Panie, patrz pan, jaki mamy dzisiaj wielki dzień!”. Jak się okazało, była to rocznica odkrycia Ameryki, dokładnie 500 lat od wielkiego dnia dla Krzysztofa Kolumba.

Wielki dzień. Tylko że dla Pana z nieco innego powodu.

Tak (śmiech). Po doktoracie, w 1993 roku, wyjechałem do Francji, do centrum badawczego CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique) w Saclay pod Paryżem. To była konsekwencja wcześniejszych kontaktów pracowników Zakładu Elektroniki Kwantowej z tym ośrodkiem. Przez wiele lat przebywał tam profesor Andrzej Dobek. To było wówczas jedno z najnowocześniejszych miejsc badawczych w Europie. Powstało w wyniku decyzji generała de Gaulle'a zaraz po wojnie. Podczas mojego pobytu pracowało tam ok. 4 tys. osób niemal z całego świata. Ja trafiłem do bardzo silnej grupy, kierowanej wówczas przez dr. Jean-Claude Mialocq'a. Dołączyłem do badań, które były prowadzone na absolutnie najwyższym, światowym poziomie. Budowaliśmy, jeden z nielicznych na świecie, układ do badań dynamiki molekularnej z czasową rozdzielczością rzędu femtosekund. Wówczas byłem jednym z nielicznych Polaków, którzy zajmowali się technikami femtosekundowymi. Bezwzględnie pierwszym był, nieodżałowanej pamięci, profesor Włodzimierz Jarzęba z Uniwersytetu Jagiellońskiego, który przez kilka lat pracował w Stanach Zjednoczonych w grupie prof. Paula F. Barbary'ego.

Różnica w podejściu do badań w Polsce i w Saclay była ogromna. Dla mnie to był duży szok. Po pierwsze – praktycznie nikt nie liczył pieniędzy, bo budżet był ogromny. Kupowano nie to, na co było nas stać, tylko to, co w danej chwili było potrzebne i najlepsze na świecie. Dlatego do Saclay przyjeżdżali najlepsi naukowcy niemal z całego świata. Pracowałem w dużej międzynarodowej grupie: byli oczywiście Francuzi, ale również Szwedzi, Grecy, Holendrzy, Niemcy, Rosjanie, Litwini, Wietnamczycy: *crème de la crème* tej grupy zawodowej we Francji. Młodzi, zdolni i bardzo ambitni. Druga sprawa to podejście do pracy. Nie umiem znaleźć innego określenia jak pracoholizm. Praca od 8.30, z przerwą na południowy lunch, do późnego wieczora, zwykle do 20.30. Ale na szczęście weekendy były wolne.

We Francji spędziłem w sumie ponad trzy lata na kontraktach długoterminowych i dwa lata na kontraktach krótkoterminowych. Zatem prawie pięć lat w różnych ośrodkach – Saclay, Lille, Rennes. Było to ogromne doświadczenie, które pozwoliło mi także poznać inne metody zarządzania nauką i szkolnictwem wyższym.

Czy powrót do Polski był zmianą „na gorsze”?

Absolutnie nie. Wydział Fizyki w Poznaniu miał już nową, komfortową siedzibę na Morasku.

Wokół prof. Mariana Szymańskiego zaczęła się tworzyć grupa ambitnych ludzi, często tak jak ja



Zakład Elektroniki Kwantowej, rok 1990. Siedzi: prof. Franciszek Kaczmarek, stoją (od prawej): dr Teresa Wróż, prof. Ryszard Parzyński, mgr Ryszard Naskręcki, dr Jerzy Karolczak

wracających z zagranicy. Pojawiły się też duże pieniądze, głównie dzięki Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej. My otrzymaliśmy grant, w tamtych czasach ogromny, dzięki któremu zbudowaliśmy tu w Poznaniu pierwszy w Polsce układ do femtosekundowej absorpcji przejściowej. To wszystko spowodowało, że mój powrót z Francji był stosunkowo „miękki”.

Jest powiedzenie, że „biednemu zawsze wiatr w oczy, a bogatemu w plecy”. Kiedy pojawiła się doskonała aparatura i nowe obszary badań, pojawili się też świetni studenci-magistranci: dr Maciej Lorenc (obecnie ceniony badacz w Uniwersytecie w Rennes we Francji), prof. Marcin Ziólek (UAM), prof. Gotard Burdziński (UAM), prof. Jacek Kubicki (UAM), że wymienię tylko kilku. Pracował z nami również znakomity fotochemik z Wydziału Chemii UAM – prof. Andrzej Maciejewski. To wszystko spowodowało, że pojawił się świetny klimat do pracy naukowej. Niewątpliwie nasz styl pracy zmienił się dzięki wzorcom przywiezionym z zagranicy. I wielka w tym zasługa przedwcześnie zmarłego prof. Szymańskiego.

Profesor Franciszek Kaczmarek patronował temu wszystkiemu?

Tak. Zakład Elektroniki Kwantowej miał zawsze strukturę federacyjną. Panowała duża wolność naukowa. Jeżeli ktoś miał pomysły, chciał robić nowe rzeczy, to mógł to robić. To przetrwało w tym Zakładzie do dziś. ZEK jest jednym z najstarszych zakładów na naszym wydziale i nadal doskonale funkcjonuje. Nazwa, która jest już nieadekwatna do tego, co robimy, ma już głównie historyczne znaczenie, ale jest znakomitą marką do afiliacji naszych prac. Zakład ma fantastyczną kadrę: czterech profesorów tytularnych, czterech nadzwyczajnych, kilku adiunktów – jak mały instytut.

Profesor Kaczmarek bardzo nam wtedy kibicował i to kibicowanie było równie ważne jak nasz zapal. W efekcie naszych prac i publikacji zaczęła się intensywna współpraca krajowa i międzynarodowa, w efekcie której już nie tylko my jeździliśmy na Zachód i tam robiliśmy badania, ale też do nas zaczęli przyjeżdżać inni na pomiary i wspólne badania.

Jak rozumiem, wyjazd do Francji zaprocentował wielowymiarowo?

Jak najbardziej. Najważniejsze, co „importowałem”, to: styl pracy, otwartość, uniwersalna wymiana intelektualna w języku angielskim oraz interdyscyplinarność. Praca w grupie osób o wykształceniu z różnych dziedzin – fizyków, chemików, biologów i inżynierów. Tym, co nas łączyło, był problem do rozwiązania i zdrowa rywalizacja w dążeniu do celu. To był okres niezwykle dla mnie ważny, który skutkuje do dzisiaj. Pobyt w tak prestiżowym ośrodku badawczym musi zmienić każdego. Miał wpływ również na sposób, w jaki pełniłem później różne funkcje kierownicze na Uniwersytecie.

Zaczął Pan jako prodziekan do spraw kształcenia i był bardzo popularny wśród studentów.

W 2002 r. ówczesny dziekan, prof. Andrzej Dobek, zaproponował mi tę funkcję. To był niezwykle czas gwałtownego przyspieszenia i zmian w szkolnictwie wyższym. Dwa lata później, w roku akademickim 2004/2005, mieliśmy w Polsce najwięcej studentów i prawdziwy boom kandydatów na studia. W całej Polsce było wówczas prawie dwa miliony studentów! Funkcja powierzona mi przez prof. Dobka była ogromnym wyzwaniem. Zaczęliśmy tworzyć nowe kierunki studiów i porządkować programy studiów. Umocniły się na naszym Wydziale studia o zawodowym charakterze – protetyka słuchu, reżyseria dźwięku, optyka okularowa i optometria, a także studia informatyczne. Polska stuknęła już do drzwi Unii Europejskiej i mieliśmy przecucie, że za tymi drzwiami są realne fundusze, które pomogą wesprzeć te zmiany i pomysły, które chcieliśmy realizować.

W 2005 r. objął Pan funkcję dziekana Wydziału Fizyki. Zaczął się nowy okres, nowe wyzwania.

Byłem stosunkowo młody, w chwili wyboru miałem 46 lat i towarzyszyła mi chęć zmian. Wiedziałem, że nasz Wydział ma bardzo dużo silnych stron. Ale naszą słabością był przede wszystkim system finansowania, oparty prawie wyłącznie na środkach budżetowych. One pozwalały nam w miarę dobrze egzystować, ale na rozwój, na nowe inicjatywy środków już nie starczało. Dlatego przystąpienie Polski do Unii



Ryszard Naskręcki przy femtosekundowym układzie do absorpcji przejściowej. CEA Saclay, 1997

Europejskiej potraktowałem jako szansę dla nas. Wkrótce pojawiły się duże programy operacyjne, np. Program Operacyjny Kapitał Ludzki – niedawno zakończyliśmy projekt, który był jednym z pierwszych, jakie uczelnie dostały. Nasz Wydział otrzymał ponad 9 mln zł. To były naprawdę duże pieniądze, które pozwoliły sfinansować bardzo wiele nowych aktywności – studia doktoranckie, staże podoktorskie, kształcenie ustawiczne czy pracownie studenckie. Umiejętność efektywnego wykorzystania tych środków to było kluczowe zadanie dla dziekana. Pokazać, że można, że trzeba, że należy te środki pozyskiwać i właściwie wykorzystywać. To odmieniło nasz Wydział.

Jaki jest koszt piastowania funkcji kierowniczych, administracyjnych?

Co tu dużo mówić, ten koszt jest ogromny. Kiedy byłem prodziekanem, to na początku jeszcze jakoś łączyłem nauczanie, pracę naukową i funkcję administracyjną. Ale decydując się na funkcję dziekana, kompletnie nie miałem świadomości, jak wysoką cenę trzeba będzie za to zapłacić. 90% mojego czasu pochłaniały sprawy organizacyjne, sprawy osobowe, praca administracyjna czy poszukiwanie środków na funkcjonowanie Wydziału.

Duże środki zostały zainwestowane w zbudowanie zaplecza dla kierunku: optyka okularowa i optometria, który znakomicie przygotowuje do zawodu.

Ten obszar kształcenia powstał pod koniec lat dziewięćdziesiątych z inicjatywy ówczesnego rektora, prof. Stefana Jurgi, dziekana, prof. Wojciecha Nawrocika i dyrektora Instytutu Fizyki, prof. Andrzeja Dobka. Miały to być „porządne” studia uniwersyteckie w systemie dwustopniowym, we współpracy z Uniwersytem Medycznym w Poznaniu. W tym samym czasie na Politechnice Wrocławskiej rozpoczęto kształcenie

optyków inżynierów, a na poznańskim Uniwersytecie Medycznym prowadzono studia podyplomowe z optometrii.

Pierwsze lata były skromne, a nasze chęci były większe niż możliwości. Nie mieliśmy kadry, nie mieliśmy też sprzętu. Stąd moje starania, aby pozyskać sprzęt i niezbędną literaturę przede wszystkim ze Stanów Zjednoczonych, które są kolebką optometrii.

Kiedy pojawiły się możliwości aplikowania o środki finansowe, natychmiast z nich skorzystaliśmy, aby stworzyć nowe pracownie, nowe laboratoria dla studentów. No i przede wszystkim zainwestowaliśmy w kadre. Świetnie wykształceni młodzi ludzie byli znakomitą wizytówką tych studiów, a niektórzy z nich u nas zostawali, robili doktoraty, prowadzili zajęcia dydaktyczne.

Ostatnim etapem rozwoju, na miarę kamienia milowego, było powstanie, z inicjatywy prof. Stefana Jurgi, Centrum Nanobiomedycznego w Poznaniu. W Centrum znajduje się m.in. Pracownia Fizyki Widzenia i Neuronauki – znakomicie wyposażona, naprawdę na światowym poziomie. Pozwala nam prowadzić prace badawcze z szeroko rozumianej nauki o widzeniu, z silnym akcentem na neuronaukę. Pytanie „jak zmierzyć nasz wzrok”, nie pozostaje już więc w Poznaniu bez odpowiedzi.

W środowisku optyków okularowych, optometrystów i lekarzy okulistów w Polsce jest Pan osobą znaną i rozpoznawalną.

To proste: jeżeli chcesz prowadzić studia, na których chcesz kształcić dla konkretnego zawodu, dla rynku pracy, to nie możesz odwracać się od tego rynku. Już pod koniec lat dziewięćdziesiątych, kiedy zostałem koordynatorem tego kierunku studiów, natychmiast nawiązałem współpracę z Jeleniogórskimi Zakładami Optycznymi. Tam co roku organizowaliśmy seminaria wyjazdowe dla studentów, a JZO istotnie nas wspierało i wspiera do dzisiaj. Nawiązaliśmy również dobry kontakt z Krajową Rzemieślniczą Izbą Optyczną. Wszystko to zaowocowało nowymi, bardzo spektakularnymi przedsięwzięciami: regularnym udziałem w kongresach optycznych z sesją naukową, za którą jestem merytorycznie odpowiedzialny. Z udziałem pracowników nauki, ale – podkreślam – również studentów. W Poznaniu odbywają się co dwa lata Targi Optyczne, którym towarzyszy jednodniowa konferencja naukowa „Optyka”. Udział w niej biorą ludzie nauki, optycy, optometryści, lekarze okuliści, ale również ludzie biznesu. Ostatnią z inicjatyw było utworzenie Środowiskowej Komisji Akredytacyjnej Optyki Okularowej i Optometrii, której jestem przewodniczącym od chwili jej powstania. Skupia ona wszyst-

kie środowiska: szkoły wyższe, szkoły średnie, Polskie Towarzystwo Optyki i Optometrii oraz Krajową Rzemieślniczą Izbę Optyczną. To jest reprezentatywne forum, gdzie wiążące decyzje dla środowisk optyków okularowych i optometrystów mogą być podejmowane. A to wszystko buduje prestiż tych zawodów, a więc także prestiż naszych absolwentów na rynku pracy.

To jest właściwie gotowy przepis na sukces studiów.

Tak. Nie można tworzyć dobrych studiów zawodowych bez dobrych kontaktów ze środowiskiem, do którego absolwenci takich studiów trafiają. Te bardzo dobre kontakty zaowocowały tym, że środowiska te zaczęły nas bardzo wspierać. Na początku finansowo i sprzętowo, następnie coraz bardziej merytorycznie. Pozyskanie tych środowisk dla wsparcia procesu kształcenia uważam za swój duży sukces.

W najbliższym czasie rozpoczynamy ogólnopolski program badań przesiewowych dzieci. Z naszej inicjatywy firma Essilor i JZO podpisały z UAM, Politechniką Wrocławską i Wrocławskim Uniwersytetem Medycznym porozumienie o wspólnej realizacji tego unikatowego przedsięwzięcia. Będziemy badać przesiewowo wzrok dzieciom rozpoczynającym naukę szkolną, ale także testować procedury wykonywania badań przesiewowych u dzieci wczesnoszkolnych. I to wszystko przy licznych udziałach naszych studentów optometrii. W Polsce nowoczesnych badań przesiewowych wzroku na dużych grupach, niestety, nie prowadzi się często.

To będzie robione w szkołach?

Jedziemy do poznańskich i podpoznańskich szkół, gdzie za pomocą nowoczesnych narzędzi badamy kondycję układu wzrokowego dzieci wczesnoszkolnych, tych, które właśnie zaczynają naukę szkolną. Dlaczego u takich dzieci? Bo dzisiaj obserwujemy u dzieci coś, co nazywa się epidemią krótkowzroczności, bo radykalnie zmienia się środowisko pracy wzrokowej, bo wreszcie chcemy tę grupę monitorować przez dłuższy czas. I chcemy także pokazać decydentom, jak ważne są takie badania i że warto je finansować, również z budżetu państwa.

Dbaj Pan o niezwykle wysoki poziom nauczania.

Obecnie nasze programy nauczania swoim zakresem i treściami kształcenia nie odbiegają od programów uczelni amerykańskich. Od lat mamy kontakty ze Stanami Zjednoczonymi, które są kolebką optometrii. Z wykładami przyjeżdżali i przyjeżdżają amerykańscy optometryści, m.in. prof. W.C. Maples z Southern College of Optometry w Memphis, dr James

Winnick i dr Maciej Kowalski z Kalifornii. No i ciężka praca moich współpracowników z Pracowni Fizyki Widzenia i Optometrii, z którymi przez całe lata te programy doskonaliliśmy. Cieszy nas ogromnie, że programy te zostały bardzo wysoko ocenione przez Polską Komisję Akredytacyjną. Studia zarówno z optyki okularowej, jak i z optometrii uzyskały ocenę wyróżniającą PKA, a także związaną z tym wyróżnieniem dotację projakościową. Nie było łatwo, ale zespoły oceniające dostrzegły nie tylko naszą ciężką pracę, ale także jej skutki. Musimy pamiętać, że jesteśmy na Wydziale Fizyki, gdzie takie „niefizyczne” obszary kształcenia nie zawsze były akceptowane. Pamiętam, jeszcze nie tak dawno, stwierdzenia, że robimy z uczelni technikum. Nieustannie musimy więc udowadniać, że jesteśmy naprawdę bardzo dobrzy. Przez te lata udało mi się zgromadzić wokół siebie znakomity zespół, autentycznych zawodowców i jednocześnie pasjonatów, nie tylko kształcenia, ale również pracy naukowej. Publikujemy coraz więcej i, co ważne, w coraz lepszych czasopiśmie naukowych. Ostatnio udało nam się opublikować artykuł w bardzo prestiżowym czasopiśmie *Journal of Vision* (40 punktów na liście MNiSW). To naprawdę duży sukces naszej małej i bardzo zapracowanej dydaktycznej grupy. Mamy znakomitych młodych ludzi, z którymi można budować naukowy prestiż. Wiemy dobrze, że jesteśmy na uniwersytecie, na Wydziale Fizyki, i chcemy być postrzegani przez środowisko fizyków jako równorzędni partnerzy. Nie możemy bazować tylko na tym, że kształcimy świetnych studentów, a nasi absolwenci szybko znajdują pracę. Rozwijamy nowe obszary badań naukowych, mając dzisiaj świetne zaplecze w postaci infrastruktury Centrum Nanobiomedycznego i dobrą współpracę międzynarodową. I dlatego jestem optymistą.

Spojrzenie na układ wzrokowy z punktu widzenia fizyki, jej metodologii, możliwości wykonywania złożonych pomiarów i możliwości modelowania układu wzrokowego daje niewyobrażalne nowe możliwości. To jest dzisiaj ogromna szansa dla nas, ale także nowe możliwości dla pacjentów. Lekarze patrzą na układ wzrokowy z punktu widzenia anatomii, fizjologii czy patologii. To jest kompletnie inny obraz układu wzrokowego. My patrzymy z punktu widzenia możliwości zmierzenia czegoś, co wielu wydaje się niemierzalne. Co bowiem znaczy „zmierzyć wzrok”? Jak należy sparametryzować układ wzrokowy, żeby można było go ilościowo ocenić? Jakie przyrządy pomiarowe (diagnostyczne) trzeba skonstruować, żeby te parametry mierzyć? A przecież widzenie jest procesem psychofizycznym, czyli duża jego część odbywa się w mózgu. Jak mierzyć te procesy, które dzieją się w mózgu?

Prowadzę wykład „Fizyka procesu widzenia”, w którym pragnę przedstawić studentom spojrzenie na proces widzenia z punktu widzenia fizyki. To jest naprawdę coś niesamowicie fascynującego, kiedy obiektem naszych badań nie jest dobrze zdefiniowana próbka, którą wkładam do aparatury, ale ludzkie widzenie. Nie oko, ale ludzkie widzenie, rozumiane jako proces psychofizyczny. No i jeszcze jak wspomóc to ludzkie widzenie, kiedy pojawiają się problemy.

Pełnił Pan funkcję dziekana przez dwie kadencje.

Tak, ale tej funkcji towarzyszyło moje zaangażowanie w innych przestrzeniach. Przez dwie kadencje byłem przewodniczącym Ogólnopolskiego Forum Dziekanów Wydziałów Fizyki i Dyrektorów Instytutów. To jest znakomita inicjatywa, chyba jedna z najlepszych inicjatyw środowiska fizyków w Polsce. Bardzo kreatywna i opiniotwórcza, chociaż trudno przecenić naszą skuteczność. Kierowanie tym Forum było dla mnie ogromnym wyróżnieniem i niezwykle doświadczeniem, bo wśród zwykle ponad 50 jego uczestników zawsze było wiele silnych osobowości.

W tym samym czasie przez prawie półtora roku pełniłem funkcję społecznego doradcy przy wiceministrze właściwym do spraw szkolnictwa wyższego. To chyba najlepsza „szkoła MBA”, jaką mogłem ukończyć. W tym okresie dane mi było blisko współpracować z wieloma osobami, które zajmowały się zarządzaniem szkolnictwem wyższym w Polsce. To było dla mnie ogromne wyzwanie. Spojrzenie na szkolnictwo wyższe i naukę z zupełnie innej perspektywy – z poziomu ministra, wiceministra, dyrektora departamentu, szefa Rady Głównej Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Wtedy też rodziły się wielkie zmiany, których dzisiaj doświadczamy.

Czy jest Pan z tych zmian zadowolony?

Szkolnictwo wyższe miało wówczas wiele potrzeb. Główna, wymuszona trochę przez nasze wejście do Unii Europejskiej, to było dostosowanie struktury szkolnictwa wyższego w Polsce do struktury, którą preferowały państwa UE, czyli do systemu bolońskiego. Należy pamiętać, że jeszcze 10 lat temu w Polsce prowadziliśmy niemal wyłącznie jednolite studia magisterskie. Tylko niektóre studia techniczne, tzw. inżynierskie, realizowane były w systemie 3,5 + 1,5.

Niestety, te zmiany średnio nam się udały. Szczególnie widać to teraz, w warunkach ogromnego niżu demograficznego. Dzisiaj największym problemem jest to, że liczba kandydatów na studia II stopnia jest dużo, dużo mniejsza niż liczba miejsc oferowanych przez uczelnie. I chociaż prognozy demograficzne były znane wcześniej, to, niestety, nasze śro-

dowiska nie do końca się przygotowały do takich wyzwań. Widzę to także jako ekspert Polskiej Komisji Akredytacyjnej. Wydziały fizyki mają bardzo mało studentów, bardzo mało kandydatów na studia, co, niestety, skutkuje także niską jakością tych kandydatów. Szuka się więc, często dość chaotycznie, nowych obszarów kształcenia, otwiera się ciągle nowe kierunki studiów i nowe specjalności, zapominając, że sama nazwa, nawet bardzo atrakcyjna, już nie wystarczy.

Ciągle też na wydziałach słyszy się stwierdzenie: minister nie dał pieniędzy rektorowi, rektor nie dał dziekanowi, dziekan nie dał dyrektorom instytutów, dyrektorzy nie dali kierownikom zakładów, więc co my możemy zrobić. Tymczasem nowy system finansowania badań zorientowany jest silnie na system grantowy, czyli na pieniądze „mało pewne”. Najpierw musisz więc zaaplikować, być rzetelnie ocenionym, a dopiero później możesz prowadzić swoje badania.

No i wreszcie, co należy mocno podkreślić, kandydaci na studentów na ofertę edukacyjną głosują coraz częściej „nogami”. Wybierają te kierunki, po których rynek pracy daje im jakieś szanse na zatrudnienie. Nasze mówienie, że po fizyce można pracować, wszędzie już ich nie przekonuje. To, że dzisiaj mamy u nas boom na optykę okularową i na optometrię, wynika przede wszystkim z faktu, że absolwenci tych studiów niemal w 100% znajdują zatrudnienie. Mój największy problem jest taki: jak zatrzymać bardzo dobrego studenta, żeby zechciał robić u nas doktorat. Rynek pracy kusi go dzisiaj warunkami znacznie lepszymi od tych, które jesteśmy w stanie mu zaferować na uczelni.

Jakie są więc nowe wyzwania?

Przebudowa oferty edukacyjnej uczelni następowała, ale w taki sposób, że zostawialiśmy stare i ciągle tworzyliśmy nowe obszary kształcenia. W efekcie mamy taką dwójłomną ofertę. Nadal chcemy masowo kształcić w obszarach, które zawsze na uniwersytecie były, ale dzisiaj nie mają wystarczającej liczby kandydatów na studia, mają za to duże znaczenie w postaci dorobku naukowego osób, które tam wykładają. Mamy też nowe obszary kształcenia, gdzie wykładowcy mają może gorszy dorobek naukowy, ale mają świetnych studentów, często w dużych ilościach. Trudno jest bowiem stworzyć nowy obszar kształcenia akademickiego i aktywności naukowej w ciągu kilku lat.

To jest dzisiaj ogromne wyzwanie stojące przed wydziałami fizyki. Trzeba odważnie sobie powiedzieć, na co wydział dzisiaj stawia w obszarze nauki, a na co w obszarze dydaktyki akademickiej. Nie da się bowiem tego wszystkiego prowadzić tak szerokim frontem. To

jest duże wyzwanie, które wymaga od osób zarządzających wydziałami, ale także od całego środowiska fizyków, podejmowania wielu trudnych decyzji. Tymczasem dzisiaj mamy w szkolnictwie wyższym kryzys przywództwa – lubimy się chować za decyzje administracyjne, za ustawy, zarządzenia, uchwały. Potrzebujemy w nauce i szkolnictwie wyższym liderów na każdym poziomie – kierownika zakładu, dyrektora instytutu, dziekana, rektora czy ministra. Potrzebujemy liderów, którzy są w stanie powiedzieć” „ja biorę za tę decyzję odpowiedzialność”.

A w optyce i optometrii?

Bardzo mi zależy na formalnym uznaniu zawodu optometrysty za zawód zaufania publicznego, który posiada silny samorząd zawodowy, strzeże reguł wykonywania tego zawodu, kontroluje warunki wejścia do zawodu, kontroluje też jakość usług oraz aspekty etyczne. Ustanowienie optometrysty jako zawodu zaufania publicznego byłoby zwieńczeniem moich wieloletnich działań w tym obszarze. A potem mógłbym chyba pójść na emeryturę (śmiech), chociaż nadal jestem bardzo aktywny na forum Senatu UAM. Ale zawodowo czuję się naprawdę człowiekiem spełnionym.

Czy Pan w ogóle odpoczywa? Wiadomość potwierdzająca dzisiejsze spotkanie znalazła się w mojej skrzynce o godzinie 3:10. Kładł się Pan spać czy wstawał?

Wstawałem (śmiech). Cała sztuka to umieć szybko się relaksować po intensywnej pracy. Stosuję zasadę, aby nie przynosić pracy do domu, może oprócz pisanie recenzji. Unikam też rozmów na tematy służbowe w domu. Chociaż rozmów o nauce nie unikniemy – jesteśmy bardzo interdyscyplinarną rodziną: żona jest filozofem, syn matematykiem, a córka studiuje medycynę.

Podróże i kulinaria to moje dwie wielkie pasje. Kiedy jadę w jakąkolwiek podróż, z przyjemnością degustuję lokalne specjały, a później adaptuję je do polskich możliwości. Sam wyspecjalizowałem się w domowym wypieku chleba. Znam chyba wszystkie gatunki mąki i, co ważne – wiem, gdzie można je w Polsce kupić. Często więc moich domowników budzi zapach świeżych bochenków.

No i jest jeszcze Harold (West Highland White Terrier), niezwykle pies, który w naszej rodzinie ma specjalny status.

Dziękuję za spotkanie i rozmowę.

Poznań, 25.09.2015

KRONIKA POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO

/Poznań/ W dniach 21–24 czerwca 2015 r. w Centrum Kongresowym Międzynarodowych Targów Poznańskich w stolicy Wielkopolski odbyła się 7th International Conference on Scanning Probe Spectroscopy and Related Methods (SPS'15).

SPS'15 była kolejną z cyklu konferencji organizowanych naprzemiennie w Polsce i w Niemczech od 1997 r. Organizowana jest wspólnie przez Wydział Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej oraz Interdyscyplinarne Centrum Nanonauki Uniwersytetu w Hamburgu. Podczas konferencji omówione zostały najnowsze osiągnięcia w rozwoju metod instrumentalnych i doświadczalnych, koncepcji teoretycznych i zastosowań spektroskopii próbnikowej oraz metod pokrewnych.

Zakres tematyczny konferencji obejmował skaningową spektro-

skopię tunelową, spektroskopię sił atomowych, skaningową spektroskopię bliskiego pola, a także teorię i symulację metod spektroskopowych i materiałów.

/Katowice/ W grudniu 2014 roku Instytut Fizyki Uniwersytetu Śląskiego wspólnie z Katowickim Oddziałem Polskiego Towarzystwa Fizycznego zorganizował dziesiątą dyskusję panelową z cyklu „Oblicza fizyki: między fascynacją a niepokojem”. Tematem jubileuszowego spotkania były związki fizyki z innymi naukami i ogólnie – obszarami działalności człowieka. Corocznie, począwszy od Światowego Roku Fizyki 2005, dyskusje w IF UŚ przyciągają osoby chcące zobaczyć fizykę w szerszym kontekście. Wykładowcami

często są wybitni polscy fizycy, ale także przedstawiciele innych dziedzin, czasem wydawałoby się bardzo odległych, jak filologia, psychologia, teologia czy nawet filmoznawstwo. Podczas ostatniej dyskusji panelowej wykłady wygłosili prof. Janusz Janeczek z Wydziału Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego, prof. Michał Kurzyński z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Adama Mickiewicza w Poznaniu, prof. Ryszard Kutner z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, prof. Paweł Olko z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie oraz prof. Krystian Roleder z Instytutu Fizyki Uniwersytetu Śląskiego. Streszczenia wykładów, programy oraz inne informacje o dyskusjach panelowych, zarówno ostatniej jak i wcześniejszych, można znaleźć na stronie <http://obliczafizyki.us.edu.pl/>.

Brian C. J. Moore

doktorem honoris causa Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

Aleksander Sęk

Instytut Akustyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

9 listopada 2015 roku w Sali Lubrańskiego w Collegium Minus odbyła się uroczystość nadania tytułu doktora honoris causa UAM Profesorowi Brianowi C. J. Moore'owi, wybitnemu badaczowi w dziedzinie akustyki psychofizjologicznej.

Sylwetka profesora Briana C.J. Moore'a

Brian Cecil Joseph Moore urodził się w Londynie w 1946 r. Studia na Uniwersytecie w Cambridge w zakresie fizyki i psychologii ukończył w 1972 r., wykonując pracę doktorską pod kierunkiem prof. Marka Haggarda. Początkowo podjął pracę na Uniwersytecie w Reading (UK) i przebywał na rocznym stażu naukowym w Nowym Jorku, by ostatecznie w 1974 r. przenieść się do Cambridge (UK), gdzie zaczął swoją wielką karierę naukową. W tym też czasie związał się z nowo powstałym Wolfson College, którego członkiem jest do dziś. Od początku pobytu w Cambridge założył swoje własne laboratorium (Hearing Laboratory) na Wydziale Psychologii Eksperymentalnej tamtejszego uniwersytetu, które wyposażył w najnowszą wówczas aparaturę, dzięki uzyskanym grantom z Medical Research Council. W laboratorium, którym prof. Moore kieruje do dziś, zatrudnionych było jego trzech stałych współpracowników do września br., którzy współpracują z nimi do dziś. Ponadto w skład grupy badawczej prof. Moore'a wchodzi zwykle kilkoro doktorantów i liczne grono gości z zagranicy, wśród których dość ważne miejsce zajmują zarówno studenci, jak i pracownicy naukowcy Instytutu Akustyki UAM.

Najistotniejszymi momentami kariery naukowej Briana C.J. Moore'a było mianowanie go profesorem percepcji słuchowej na Uniwersytecie w Cambridge (UK) w 1996 r. oraz wybór na członka Królewskiej Akademii Nauk (The Royal Society of London) w roku 2003.



Od lewej: prof. dr hab. Antoni Wójcik – dziekan Wydziału Fizyki UAM, prof. Brian C. J. Moore – Department of Experimental Psychology University of Cambridge, prof. dr hab. Bronisław Marciniak – rektor UAM, prof. dr hab. Aleksander Sęk – Instytut Akustyki UAM, promotor doktoratu (zdj.: Arkadiusz Józefczak)

Zainteresowania naukowe prof. Moore'a to percepcja dźwięku przez osoby normalnie słyszące oraz osoby z uszkodzeniami słuchu. Percepcja dźwięku jest dziedziną niezmiernie szeroką. Słuch jest doskonałym analizatorem dźwięku, umożliwiającym identyfikację praktycznie nieskończonej ilości różnych dźwięków. Różnorodność dźwięków, które zazwyczaj opisywane są licznym zbiorem ich parametrów, dowodzi istnienia wielu różnorodnych zjawisk percepcji słuchowej. Niezależnie od różnorodności tej tematyki i od licznych możliwych zagadnień, które można rozważać w percepcji słuchowej, prof. Moore „dotknął” w swych pracach niemalże wszystkich aspektów słyszenia. Rozpoczął cyklem prac na temat dyskryminacji częstotliwości i natężenia, by następnie zająć się niezwykle ważnym zjawiskiem, jakim jest maskowanie. To właśnie prace dotyczące maskowania i efektu towarzyszącego dźwiękom umożliwiły mu pełną analizę psychofizycznych krzywych strojenia i zjawiska off-frequency listening oraz przedstawienie nieliniowych aspektów słuchu, obserwowanych w ramach tzw. supresji dwuton-

wej. Wielkie zasługi ma również prof. Moore w dziedzinie metod wyznaczania i analizy charakterystyki filtrów słuchowych. Jest on nie tylko współautorem do dziś w zasadzie głównej koncepcji funkcjonowania układu słuchowego, tj. koncepcji filtrów słuchowych, ale także autorem metod wyznaczania ich charakterystyki.

U schyłku lat 80. ubiegłego stulecia prof. Moore coraz więcej uwagi poświęcał uszkodzeniom słuchu i ich percepcyjnym konsekwencjom. Szczegółowa analiza efektu wyrównania głośności u osób z odbiorczym uszkodzeniem słuchu, a w szczególności wpływu tego zjawiska na rozumienie mowy, pozwoliła mu dostrzec wagę i potrzebę kompresji sygnału akustycznego tak, by dostosowywać jego dynamikę do resztkowego pola słyszenia. Ma to bowiem duże znaczenie dla zrozumiałości mowy, zwłaszcza mowy prezentowanej na tle szumu. Zagadnienie to stało się wiodącym tematem prac jego zespołu, zwłaszcza w odniesieniu do wielokanałowych cyfrowych aparatów słuchowych i implantów ślimakowych. Analizował on ogromną różnorodność algorytmów pracy cyfrowych aparatów słuchowych w najróżniejszych sytuacjach, zwłaszcza w kontekście poprawy zrozumiałości mowy prezentowanej na tle szumu. Na początku lat 90. prof. Moore był jednym z pierwszych badaczy, którzy dostarczyli pełnej interpretacji zjawisk komodulacyjnego odmaskowania (CMR) oraz zaburzenia detekcji/dyskryminacji modulacji (MDI). Interpretacja tych zjawisk umożliwiła mu w późniejszym czasie czynny udział w pracach nad różnymi aspektami koncepcji filtrów modulacyjnych, której jest współautorem.

Od lat 90. prof. Moore poświęcił się analizie i metodom diagnostycznym tzw. martwych obszarów w ślimaku ucha wewnętrznego. Martwy obszar to jego propozycja nazwy specyficznego ubytku słuchu, która przyjęła się w literaturze i któremu poświęcana jest coraz większa liczba prac. Profesor Moore jest autorem jednej z metod wyznaczania martwych obszarów (tzw. Threshold Equalizing Noise Method) i wziął czynny udział w opracowaniu i analizie tzw. szybkiej metody wyznaczania psychofizycznych krzywych strojenia (Sweeping Noise Method), służącej do wyznaczania częstotliwościowych granic martwych obszarów. Ostatnich dziesięć lat jego pracy naukowej poświęcone jest opracowywaniu nowych strategii przetwarzania sygnałów akustycznych, by poprawić zrozumiałość mowy przez osoby z martwymi obszarami.

Na przełomie wieków profesor Moore poświęcił wiele miejsca w swych pracach modelowi głośności. Jego wcześniejsze odkrycia dotyczące charakterystyki częstotliwościowej filtrów słuchowych, a zwłaszcza zależności szerokości ich pasma przepustowego od

częstotliwości środkowej, pozwoliły mu na znaczące rozwinięcie i udoskonalenie modelu głośności Zwicker, zwłaszcza dla dźwięków zmiennych w czasie oraz niosących energię głównie w paśmie niskich częstotliwości.

Jednym z najnowszych obszarów akustyki psychofizjologicznej, rozwijanym ostatnio niezwykle intensywnie przez prof. Moore'a, jest zagadnienie kodowania częstotliwości dźwięku w układzie słuchowym za pomocą tzw. synchroniczności fazowej. Profesor Moore zakwestionował przyjmowaną powszechnie w literaturze granicę tego precyzyjnego mechanizmu, tj. 5 kHz. W pracach, które opublikował z wieloma współpracownikami, w tym również z Instytutu Akustyki UAM, udowodnił wielokrotnie, że dyskryminacja wysokości wirtualnej, zrozumiałość mowy czy też dyskryminacja wielotonów harmonicznnych nie byłaby możliwa, gdyby ta granica nie przekraczała 5 kHz.

Na początek obecnego stulecia przypada również opracowanie przez prof. Moore'a procedury dopasowania cyfrowych aparatów słuchowych CAM2. Procedura ta, oparta na wcześniej opracowanym przez niego modelu głośności, stanowi alternatywę do wykorzystywanej wcześniej australijskiej procedury NAL-NL2. Metoda prof. Moore'a zapewnia pełne zrównoważenie głośności dźwięku w różnych sytuacjach, tzn. umożliwia symulację głośności dźwięków tak, jak odczuwają to osoby ze słuchem normalnym. Zauważalna przy tym poprawa zrozumiałości mowy, nawet w sytuacjach, gdy mowa ta prezentowana jest na tle sygnałów zakłócających, stawia tę metodę w rzędzie najpopularniejszych i najczęściej wykorzystywanych metod tego typu, co jest niewątpliwie doniosłym osiągnięciem tej dziedziny wiedzy.

Przedstawiona powyżej krótka charakterystyka naukowych zainteresowań prof. Moore'a nie jest, rzecz jasna, pełna, jako że w swych pracach eksperymentalnych poruszył on niemalże wszystkie aspekty funkcjonowania słuchu – zarówno prawidłowego, jak i słuchu z najróżniejszymi dysfunkcjami. Jest on uznanym autorytetem w dziedzinie nauk o słuchu i słyszeniu na całym świecie. Jest zapraszany na wszystkie najważniejsze konferencje dotyczące problematyki psychofizjologii słuchu jako gość honorowy. Jest recenzentem i członkiem komitetów naukowych najważniejszych i najwyżej punktowanych czasopism z tej dziedziny oraz członkiem komitetów naukowych fundacji wspierających badania słuchu. Jest członkiem Królewskiej Akademii Nauk (The Royal Society of London) od 2003 roku. Jego dorobek naukowy to 16 książek dotyczących problemów percepcji słuchowej. Jedną z nich jest szczególnie – *An Introduction to the Psychology of Hearing*. Jej szóste wydanie opublikowano w ubiegłym

roku, a już w latach 90. ubiegłego wieku została przetłumaczona na język japoński i polski. Profesor Moore jest autorem 114 rozdziałów w książkach, w tym również wydawanych w Polsce, oraz blisko 500 artykułów w najważniejszych czasopismach. Jest on niekwestionowanym i wybitnym liderem w świecie nauki o słuchu i słyszeniu, a jego międzynarodowa reputacja ugruntowana w najwyższym stopniu.

Osoby, które wykonywały pod jego kierunkiem prace doktorskie (a jest ich ponad 30), sięgają dziś najwyższych naukowych laurów, piastując niejednokrotnie bardzo wysokie stanowiska w hierarchii akademickiej (np. Adrew Oxenham kieruje Laboratorium Percepcji Słuchowej na Uniwersytecie w Minnesocie, Christopher Plack jest kierownikiem Katedry Audiologii na Uniwersytecie w Manchester, a Robert Carlyon kieruje Neuroscience Centre w Cambridge), i prowadzą własne laboratoria, których główną tematyką jest badanie funkcjonowania słuchu. To liczne grono jego wychowanków, do których zaliczyć można również osoby z Instytutu Akustyki UAM, a które w dalszym ciągu rozwijają wiele koncepcji zapoczątkowanych pracami prof. Moore'a, jest dowodem na to, że stworzył on własną szkołę nauki o słuchu i słyszeniu.

Na szczególną uwagę zasługują jego kontakty międzynarodowe i wielka otwartość na współpracę z ośrodkami zajmującymi się podobną tematyką badawczą. W tym kontekście współpraca z polskimi kolegami, głównie pracownikami naukowymi Instytutu Akustyki, Wydziału Fizyki UAM, jest najistotniejsza, najbardziej rozwinięta i pielęgnowana do dziś zarówno przez prof. Moore'a, jak i przez pracowników Instytutu Akustyki. Ta owocna i bogata współpraca, umożliwiająca pracownikom Instytutu Akustyki UAM wielokrotne i długoterminowe pobyty w jego słynnym laboratorium, zapoczątkowana została już w 1986 r. przez prof. Urszulę Jorasz. Następnym krokiem tej współpracy była jego pierwsza wizyta w Polsce, w Instytucie Akustyki UAM, w 1988 r., z cyklem wykładów na temat filtrów słuchowych i stałej czasowej słuchu. To dzięki jego ogromnemu zaangażowaniu w popieranie, podtrzymywanie i nieustanny rozwój tej współpracy oraz znajdowanie środków finansowych wielu pracowników naukowych Instytutu Akustyki UAM i studen-

tów Wydziału Fizyki UAM wielokrotnie miało możliwość uczestniczenia w długoterminowych stażach naukowych w jego laboratorium oraz udziału w wielu projektach naukowych. W ramach tej współpracy prof. Moore wielokrotnie odwiedził Instytut Akustyki, a ostatnia jego wizyta miała miejsce w 2012 r. Długoterminowe staże naukowe pracowników i studentów Instytutu, niejednokrotnie wieloletnie, umożliwiły realizację 12 projektów badawczych finansowanych przez Deafness Research United Kingdom i Welcome Trust czy też The Royal Society, ukończenie jednej rozprawy doktorskiej oraz opublikowanie ponad 50 prac naukowych, których współautorami są pracownicy bądź studenci z Instytutu Akustyki UAM. Te projekty badawcze pozwoliły również na znaczące wzbogacenie zaplecza technicznego Instytutu Akustyki UAM w aparaturę naukowo-badawczą, której łączna wartość sięga ok 400 tys. zł i umożliwiła prowadzenie wielu unikatowych badań w Instytucie Akustyki UAM. Nie będzie przesadą twierdzenie, że to dzięki niemu psychoakustyka nie tylko w Instytucie Akustyki, ale także w Polsce stała się liczącą dyscypliną naukową.

W ciągu swej całej kariery naukowej prof. Moore był wykładowcą Cambridge University. Wykładał głównie akustykę psychofizjologiczną, a także psychologię ogólną (tzw. Part 1 i Part 2) i statystykę, był też promotorem znacznej liczby prac magisterskich i ponad 30 prac doktorskich.

W trakcie uroczystości udało się zadać prof. B. Moore'owi dwa krótkie pytania:

Jak dbać o słuch? Czy jest to w ogóle możliwe?

Niestety, nie ma metody na zachowanie słuchu w dobrej formie do zaawansowanego wieku. Podobnie jak nie ma idealnego aparatu słuchowego. To zawsze będzie tylko proteza.

Słuch ułatwia nam życie, porozumiewanie się. A jakie wskazałby pan profesor „przyjemności” wynikające z umiejętności słyszenia?

Odpowiedź jest prosta: słuchanie muzyki i głosu żony (ujmujący uśmiech)!

Profesor dr hab. Jacek Hennel (1925–2014)

Stanisław Kwieciński

Instytut Fizyki Jądrowej PAN

Profesor Jacek Hennel urodził się 20 grudnia 1925 r. w Chorzowie. W 1945 r. zdał maturę, a następnie podjął studia na Uniwersytecie Jagiellońskim na kierunku fizyka, zakończone uzyskaniem dyplomu magistra w 1950 r.

W ramach pracy magisterskiej zbudował komorę Wilsona, na której jeszcze przez dziesiątki lat studenci fizyki wykonywali ćwiczenia w ramach pracowni jądrowej.

Po studiach rozpoczął pracę w Instytucie Odlewnictwa, a w 1953 r. przeniósł się do Ośrodka Fizyki Jądrowej, z którego w wyniku kolejnych przekształceń powstał Instytut Fizyki Jądrowej, i z nim to związany był do ostatnich swoich dni.

W maju 1953 r. wspólnie z Andrzejem Hrynkiwiczem (wówczas doktorem) jako pierwsi w Polsce uzyskali sygnał magnetycznego rezonansu na zbudowanej wg ich projektu aparaturze. To wydarzenie niewątpliwie zaważyło na dalszych losach profesora, który z rezonansem magnetycznym związał całą swoją karierę naukową. W 1960 r. obronił pracę doktorską, a w 1967 r. przedłożył rozprawę habilitacyjną o relaksacji w cieczech. W tym samym roku zorganizował pierwszą ogólnopolską konferencję na temat magnetycznego rezonansu i jego zastosowań, zapoczątkowując cykl konferencji, które co roku w początkach grudnia gromadziły w Krakowie elitę naukowców z Polski, a z czasem zaproszonych gości z zagranicy. Sympozja te, przez znajomych fizyków nazywane „Henneliadą”, to nie były sztywne, sztamkowe konferencje, ale prawdziwie rodzinne spotkania, których tradycja kontynuowana jest do dziś. Od czterech lat odbywają się co dwa lata i w 2014 r. odbyły się po raz 45. Niestety, zabrakło na nich uśmiechniętego profesora Hennela, który ręcznym dzwonkiem „zaganiał” kolegów naukowców na kolejną sesję.

Jacek Hennel został profesorem w 1974 r. Był naukowcem z duszą konstruktora. Pamiętam widok profesora, który co rano, ubrany w biały fartuch, stał przed



deską kreślarską i cały czas poprawiał, ulepszał elementy aparatury rezonansowej. Inspirował teoretyków, a jednocześnie był otwarty na nowe pomysły związane z wykorzystaniem zjawiska magnetycznego rezonansu do diagnostyki medycznej. To on wprowadził do polskiego nazewnictwa pojęcie „tomografia magnetyczno-rezonansowa”, a z Zakładu Radiospektroskopii Jądrowej wyodrębniła się grupa obrazowania MR, założona i kierowana przez jego ucznia, prof. Andrzeja Jasińskiego, zaś po jego śmierci przez dr. hab. Władysława Węglarza.

Rodzinna atmosfera spotkań zakładowych była przedłużeniem ojcowskiego stosunku naszego mistrza do każdego ze współpracowników. Założyciel i wie-

oletni kierownik Zakładu Radiospektroskopii Jądrowej (NZ8) dbał, by każdy pracownik dobrze się tutaj czuł. 10 rano, pora herbatki zakładowej, to była godzina święta, po prostu nie wyobrażano sobie, żeby ktoś mógł się spóźnić. Poruszano na nich sprawy związane z aktualnymi badaniami naukowymi prowadzonymi w Zakładzie, ale rozmowy często schodziły na tematy polityczne i rodzinne. Pamiętam, z jaką dumą profesor Hennel mówił o narodzinach swojego wnuka, Szymona, stwierdzając, że on zajmuje się rezonansem, syn (dr Franciszek Hennel) zajmuje się rezonansem, to i wnuk Szymek też musi (Szymon Hennel ukończył studia z fizyki na ETH w Zurichu).

Profesor Hennel jest autorem książki „Wstęp do teorii magnetycznego rezonansu jądrowego”, wydanej przez PWN w 1966 r. Książka ta została później poszerzona i przetłumaczona na język angielski pod tytułem „Fundamentals of Magnetic Resonance”. Współautorem tej pozycji jest prof. Jacek Klinowski, a książka ukazała się w 1993 r. nakładem wydawnictwa Longman Scientific and Technical, stając się od razu „biblią” każdego szanującego się fizyka rezonansowego. W 1995 r. profesor Jacek Hennel wraz z prof. Teresą Kryst-Widźgowską opublikowali książkę „Na czym polega tomografia magnetyczno-rezonansowa?”, na której wychowało się pokolenie studentów fizyki medycznej i radiologów.

Profesor Jacek Hennel cały czas dbał o rozwój naukowy swojego zespołu. Grafik referatów w NZ8 był planowany z dużym wyprzedzeniem, a jakiegokolwiek próby zmiany ustaleń spotykały się z dużym oporem naszego szefa. Podsuwał ciekawe książki, dbał, by każdy z nas czytał literaturę światową. Sam płynnie posługiwał się językiem angielskim i niemieckim. Był bardzo precyzyjny i celny w swoich wypowiedziach. Komentarze do wypowiedzi prelegentów – np. „Panie kolego, ja Panu zaraz wytłumaczę, o co Panu chodzi” – weszły na stałe do kanonu powiedzonek zakładowych.

Po przejściu na emeryturę nie zwolnił tempa, zaskakując nas w 2010 r. kolejną książką napisaną razem z dr. Zbigniewem Olejniczakiem „Jak zrozumieć falki. Podstawy falkowej analizy sygnałów”. Publikacja tej książki była okazją do świętowania 85. rocznicy urodzin profesora oraz ostatniego ogólnopolskiego seminarium na temat magnetycznego rezonansu i jego zastosowań, któremu przewodniczył szanowny jubilat. Wspomnienie tego wydarzenia można odnaleźć pod adresem <http://www.ifj.edu.pl/wyd/mrj/?lang=pl>.

Będzie nam bardzo brakowało mistrza, przyjaciela, mentora i przede wszystkim wspaniałego człowieka, pełnego dobroci i poczucia humoru.

2 czerwca 2014 r.

K S I A Ź K I N A D E S Ł A N E



Jim Al-Khalili

Kwanty. Przewodnik dla zdezorientowanych

Pruszyński i S-ka, Warszawa 2015

Mechanika kwantowa jest piękną, precyzyjną i logiczną konstrukcją matematyczną, doskonale opisującą Naturę. Z tym że właściwie nikt nie wie, jak należy ją rozumieć. Próbując pojąć świat kwantów, wkraczamy

na niezwykle terytorium, gdzie do objaśnienia poczynionych obserwacji możemy, jak się wydaje, dowolnie wybierać jedną z szeregu możliwych interpretacji, z których każda jest zdumiewająco niesamowita. Jakim cudem teoria naukowa może pozostawać tak niejasna, trudna do zrozumienia? Profesor Jim Al-Khalili przyznaje, że spędził wiele czasu na rozmyślaniach na temat mechaniki kwantowej, zarówno z punktu widzenia profesjonalisty i aktywnego badacza, jak też z pozycji człowieka żywo zainteresowanego głębszym znaczeniem teorii. Jednak wciąż – po dwudziestu latach pracy – nie udało mu się z nią dojść do ładu. W swojej najnowszej książce „Kwanty” opowiada o próbach zrozumienia, co mechanika kwantowa mówi nam o prawdziwej naturze rzeczywistości, i zabiera czytelników w podróż przez fizykę cząstek

elementarnych i teorie dotyczące wyższych wymiarów przestrzeni, a nawet jeszcze dalej.

Profesor Jim Al-Khalili, Oficer Orderu Imperium Brytyjskiego, jest naukowcem i pisarzem, szefem katedry fizyki teoretycznej na Uniwersytecie w Surrey, gdzie wykłada mechanikę kwantową i prowadzi własne badania z tej dziedziny. Napisał wiele książek popularnonaukowych, które przełożono do tej pory na dwadzieścia języków. W 2007 roku Towarzystwo Królewskie w Londynie uhonorowało go medalem Michaela Faradaya, a w 2011 roku Instytut Fizyki przyznał mu medal Kelvina. W obydwu przypadkach doceniono jego osiągnięcia w popularyzowaniu nauki. W Polsce ukazała się jego książka „Paradoks. Dziewięć największych zagadek fizyki”.

Wspomnienie o Januszu Wilczyńskim (1938–2015)

Adam Sobiczewski

Narodowe Centrum Badań Jądrowych w Warszawie

Prof. dr hab. Janusz Wilczyński urodził się 27 sierpnia 1938 r. w Gnieźnie. Jeszcze przed wybuchem wojny, razem z rodzicami, siostrą i bratem, przeniósł się do Częstochowy, gdzie spędził dzieciństwo i lata szkolne, aż do matury. Maturę otrzymał w Liceum im. Henryka Sienkiewicza w Częstochowie w roku 1956.

Studia wyższe odbył w Krakowie na Wydz. Matematyki, Fizyki i Chemii Uniwersytetu Jagiellońskiego w latach 1956–61. Już na studiach sprecyzowały się jego zainteresowania naukowe: doświadczalna fizyka jądrowa. Bezpośrednio po studiach rozpoczął pracę na Uniwersytecie Jagiellońskim.

Dokładna tematyka jego badań naukowych wynika z jego pierwszego stażu naukowego, który odbył w Laboratorium Reakcji Jądrowych Zjednoczonego Instytutu Badań Jądrowych (ZIBJ) w Dubnej w latach 1963–66 w grupie prof. W.W. Wołkowa. Prowadzono tam wtedy badania reakcji jądrowych z użyciem ciężkich jonów jako pocisków. Były to jedne z pierwszych, pionierskich badań tych reakcji. Z tematyką tą Janusz Wilczyński związał całą swą karierę naukową.

Ponieważ badania doświadczalne nad tymi reakcjami można było prowadzić tylko w ośrodkach wyposażonych w odpowiednie urządzenia (przede wszystkim odpowiedni cyklotron), a w Polsce takich urządzeń wówczas nie było, Janusz Wilczyński znaczną część życia spędził w laboratoriach zagranicznych, biorąc udział w prowadzonych tam doświadczeniach. Były to laboratoria: ZIBJ w Dubnej, Instytut Nielsa Bohra w Kopenhadze (Dania), Instytut Fizyki Jądrowej w Orsay (Francja), Instytut Fizyki Jądrowej w Groningen (Holandia), National Superconducting Cyklotron Laboratory w East Lansing (USA), Lawrence Berkeley National Laboratory w Berkeley (USA) oraz Narodowy Instytut Fizyki Jądrowej w Katanii na Sycylii (Włochy). W sumie staże te trwały ok. 15 lat.

Równoległe z badaniami doświadczalnymi, Wilczyński prowadził ambitne, oryginalne i pomysłowe



Janusz Wilczyński w czasie wycieczki w Parku Narodowym Yosemite (USA) w roku 2010

badania interpretacyjne. Taka kompleksowa praca pozwalała nie tylko na odkrywanie nowych zjawisk, ale i na głębokie ich zrozumienie.

Przykładem takiego działania może być analiza ograniczeń przekroju czynnego na tworzenie jądra złożonego (tj. połączenia się dwu zderzających się jąder w jedną całość). Wprowadził on wtedy pojęcie „siły kontaktowej”, tj. siły przyciągania się jąder, gdy stykają się one powierzchniami. Oszacowanie wielkości tej siły na podstawie modelu kropkowego jądra dało bardzo dobry wynik na wartość krytycznego momentu pędu, tj. momentu pędu, powyżej którego dwa zderzające się jądra nie mogą się połączyć. Uogólnienie pojęcia siły kontaktowej przez W.J. Świąteckiego i współpracowników w Berkeley na tzw. siły zbliżenia (*proximity forces*) jest szeroko stosowane w fizyce jądrowej do dnia dzisiejszego.

Do najważniejszych osiągnięć naukowych Janusza Wilczyńskiego można zaliczyć:

- współudział w odkryciu i pierwsze badania ciężkojonowych reakcji głęboko-nieelastycznych (1967–71);
- wykorzystanie tych reakcji do wytworzenia ok. 30 nowych, egzotycznych nuklidów o dużym nadmiarze neutronów i wykazanie, że mimo dużego nadmiaru

neutronów są one stabilne. Są to izotopy stosunkowo lekkich pierwiastków, od azotu do chloru (1970–71);

✦ wspomniane wyżej wyjaśnienie charakteru ograniczeń przekroju czynnego na reakcje syntezy jądrowej (krytyczny moment pędu w wejściowym kanale reakcji wyznaczony przez wprowadzenie pojęcia „siły kontaktowej” i realistyczne oszacowanie jej wartości) (1973);

✦ interpretacja reakcji głęboko-nieelastycznej i propozycja doświadczeń mających sprawdzić słuszność tej interpretacji. Wprowadzenie wykresu ilustrującego korelację energetyczno-kątową, który wszedł do literatury światowej pod nazwą „Wilczyński's plot” (1973);

✦ prace nad prostym jednowymiarowym potencjałem jądro-jądro z parametrami wyznaczonymi z modelu kropkowego i analiza reakcji głęboko-nieelastycznej na gruncie klasycznych równań ruchu. Wskazanie na ważną rolę deformacyjnych stopni swobody w tych reakcjach (1975–76);

✦ współudział w odkryciu niepełnej syntezy jądrowej i pierwsza jej interpretacja: koncepcja uogólnionego krytycznego momentu pędu (1979);

✦ systematyczne badania reakcji niepełnej syntezy i sformułowanie ilościowego modelu dwuciałowych reakcji ciężko-jonowych, tzw. modelu reguły sum (1980–82);

✦ badania reakcji z trzema cząstkami w stanie końcowym i pierwszy dowód dominującej roli procesów sekwencyjnych w tych reakcjach (1981–82);

✦ uogólnienie modelu optymalnego Q-reakcji na reakcje nieperyferyjne, tzw. l-dependent optimum Q-value (1983).

Intensywna praca doświadczalno-interpretacyjna i jednocześnie pionierski jej charakter pozwolił Januszowi Wilczyńskiemu stosunkowo szybko rozwijać swoją karierę naukową. Pracę doktorską obronił na Uniwersytecie Jagiellońskim w 1967 r., a pracę habilitacyjną w roku 1976, również na Uniwersytecie Jagiellońskim. W następnym roku, 1977, otrzymał nominację na docenta w Instytucie Fizyki Jądrowej w Krakowie, w którym był zatrudniony od roku 1966. Tytuł na-

ukowy profesora nadzwyczajnego otrzymał w 1981 r., a zwyczajnego w roku 1990. W roku 1980 przeniósł się z Krakowa do Warszawy, gdzie został zatrudniony w Instytucie Problemów Jądrowych im. Andrzeja Sołtana w Świerku.

Ważnym wydarzeniem w życiu prof. Wilczyńskiego było zawarcie małżeństwa z Krystyną Siwek-Dia-ment w 1967 r., która także uprawiała doświadczalną fizykę jądrową. W roku 1973 włączyła się ona do tematyki męża i od tej pory wiele staży odbywali razem oraz sporo prac publikowali wspólnie. W ostatnich latach wiele uwagi poświęcili oboje zagadnieniu obliczeń przekroju czynnego na reakcje syntezy najcięższych jąder w bliskiej współpracy z Władysławem Święteckim z Berkeley. Swoje modele testowali na reakcjach już znanych, a następnie stosowali je do przewidywania syntezy nowych jąder.

Prof. Wilczyński opublikował ponad 160 prac, w większości w głównych, bardzo dobrych czasopiśmiech jądrowych. Były one cytowane około 3 500 razy i nadal są cytowane. Indeks Hirscha wynosi obecnie 31. Był często zapraszany do wygłoszenia referatu w różnych ośrodkach fizyki jądrowej na świecie oraz na konferencjach jądrowych. Referaty te wygłaszał prostym, przystępnym, a jednocześnie precyzyjnym językiem.

Otrzymał wiele nagród i wyróżnień, m.in. indywidualną nagrodę Polskiego Towarzystwa Fizycznego (PTF) za prace w dziedzinie reakcji z ciężkimi jonami (1976), Nagrodę I stopnia (zbiorową) Rady Naukowej ZIBJ w Dubnej (1976), indywidualną Nagrodę II stopnia Państwowej Rady ds. Wykorzystania Energii Jądrowej (1978), Złoty Krzyż Zasługi (1989), Nagrodę PTF im. Wojciecha Rubinowicza (1992), Krzyż Kawalerski Orderu Odrodzenia Polski (2015).

Był jednym z najbardziej znanych na świecie polskich fizyków jądrowych.

Zmarł 22 października 2015 r. w Warszawie. Do końca życia zachował pełną sprawność umysłu pracując jeszcze w ostatnich dniach, wspólnie z żoną i doktorantem, nad ostatnią ich publikacją.

Fizyka jest nauką życia

Z mgr. inż. Pawłem Janowskim, wyróżnionym nagrodą PTF im. Krzysztofa Ernsta za popularyzację fizyki rozmawiał Wawrzyniec Kaszub

Wawrzyniec Kaszub: *Otrzymał Pan nagrodę PTF za 2014 rok za popularyzację fizyki. Czy zechciałby Pan odpowiedzieć czytelnikom, w jaki sposób dociera Pan ze swoimi pomysłami do szerokiego audytorium?*

Paweł Janowski: Jak sądzę, spektrum tej działalności jest szerokie, ale przede wszystkim to są pokazy doświadczeń fizycznych. Nie tylko te klasyczne, polegające na prezentowaniu danego zjawiska, ale również pokazy interaktywne, do przeprowadzenia przez samych uczestników. Pokazy są dla wszystkich: w jednym tygodniu pokazuję coś przedszkolakom, w drugim zaś mogę przedstawiać dokładnie to samo – tylko operując nieco innym językiem – słuchaczom Uniwersytetu Trzeciego Wieku, przy czym wtedy mogę dołożyć np. fizykę piwa, czego – jak wiadomo – dzieciom nie można by przybliżyć. Staram się także promować fizykę na inne sposoby, choćby przez prowadzenie internetowego forum „Ars Physica. Fizyka dla każdego”, bodaj największego w Polsce forum poświęconego fizyce, czy też przez projekt „Kartki z naukowego kalendarza”, związany właśnie z tym forum i posiadający odpowiednik na Facebooku, gdzie można subskrybować codzienne informacje o rocznicach z historii nauki. Dzisiaj, czyli 21 lutego 2015 r. na przykład jest 89. rocznica śmierci Heikego Kamerlingh-Onnesa, od którego akurat zaczęła się moja przygoda z popularyzacją fizyki na żywo, a dokładniej na wystawie: „LHC – jak to działa?”. Zdaje się, że jeden z eksponatów właśnie widzimy, tutaj, w gmachu Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Było to dokładnie 18 stycznia 2009 r. w Krakowie. Od tego momentu datuję już nie tylko wirtualną przygodę z popularyzacją, która w ciągu sześciu lat się rozrosła dosyć szeroko.

Na szczęście na polu popularyzacji dzieje się w Polsce bardzo wiele. Doskonale to widać po tłumach w Centrum Nauki Kopernik? A jednak nadal fizykę w szkole trzeba odczarować, bo – nie oszukujemy się – jest widziana nie najlepiej...

Niestety!

Co uważa Pan za najistotniejsze przy takiej działalności związanej z popularyzacją nauki w ogóle, a fizyki w szczególności?

Chciałoby się zacytować *primum non nocere* – przede wszystkim nie szkodzić. Nie zapomnieć o tym, że fizyka jest nauką doświadczalną z definicji, nie ma fizyki bez doświadczenia.

Naraża się Pan teraz osobom z zacięciem teoretycznym...

Teoretykom nie spodoba się, oczywiście, to, co teraz mówię, ale bez możliwości sprawdzenia tego, co oni znajdą na końcu swojego ołówka i kartce papieru, to jest nadal teoria, która nie ma potwierdzenia w rzeczywistości. Teoretyczne rozważania zawsze muszą skończyć się tak naprawdę doświadczeniem! Jeśli nie może być ono wykonane teraz, to znaczy tylko, że musimy jeszcze trochę poczekać na rozwój aparatury, możliwości technicznych. Młodym adeptom, nie tylko fizyki, ale nauki w ogóle, trzeba właśnie pokazać, że to doświadczenie jest tym, co „sprawdza”! Nie to, jak my sobie wymyślimy, że coś będzie przebiegało. Nie możemy przestać się dziwić. Dziecko potrafi się dziwić, dlatego zadaje pytania „A dlaczego to...? A dlaczego tamto...?”. Ważne jest, aby rodzice nie gasili tego zapału i nie mówili „To nie jest ważne” lub – co gorsza – oszukiwali swoje dziecko, wymyślając nieprawdziwą odpowiedź. Rozbudźmy tę ciekawość, próbujmy razem wyjaśniać, odsyłajmy do książek, do Internetu, do wszelkich innych źródeł, które są obecnie dostępne. Jeżeli jest tylko możliwość, to sami sprawdźmy, sami zróbmy doświadczenie. Zawsze lubię cytować Konfucjusza, któremu przypisywane jest powiedzenie: „Powiedz mi, a zapomnę, pokaż mi – zapamiętam, daj mi zrobić, wtedy zrozumiem”. I to powinno być jak najbardziej stosowane w polskich szkołach, gdzie uczy się fizyki, żeby nie przekazywać uczniom wizji tej nauki jako abstrakcji totalnej typu równia, bloczki i równania na tablicy. Nie! Oczywiście, teoria też musi być, jako uzupełnienie, ale przede wszystkim musi być jasne, że fizyka jest

Ulica Mariana Mięśowicza

Pod koniec kwietnia 2014 r. w Krakowie zakończono budowę nowej ulicy, łączącej ul. Sosnowiecką z Centrum Cyklotronowym Bronowice Instytutu Fizyki Jądrowej PAN. Miasto wzbogaciło się o cenny i niezwykle potrzebny fragment infrastruktury drogowej, absolutnie konieczny do sprawnego funkcjonowania tak ważnego ośrodka terapeutycznego, jakim jest CCB. To tędy będą dowożeni na leczenie wiązką protonową pacjenci z różnymi rodzajami nowotworów – zarówno dorośli, jak i dzieci. W dniu 23 maja 2014 r. nowa ulica otrzymała nazwę Mariana Mięśowicza.

Na zaproszenie prezydenta miasta Krakowa, prof. dr. hab. Jacka Majchrowskiego, oraz dyrektora Instytutu Fizyki Jądrowej im. H. Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk, prof. dr. hab. Marka Jeżabka, na uroczystość przybyli liczni dostojni goście: przewodniczący Rady Miasta Krakowa, Bogusław Kośmider, rektorzy: prof. Wojciech Nowak – UJ, prof. Tadeusz Słomka i prof. Ryszard Tadeusiewicz – AGH, a także prezes Polskiej Akademii Umiejętności, prof. Andrzej Biały, oraz fizycy z IFJ PAN, UJ i AGH. Szczególnie licznie reprezentowani byli pracownicy dawnego Instytutu Fizyki i Techniki Jądrowej AGH, może trochę zażenowani, że inicjatywa uszanowania ich wieloletniego dyrektora wyszła od IFJ, a nie AGH. Nie zabrakło, oczywiście, najbliższej rodziny profesora Mięśowicza, tzn. jego córek z rodzinami. Uprawianie fizyki jest wśród nich tradycją, podtrzymywaną sukcesami przedstawicieli kolejnych pokoleń.

Po krótkich przemówieniach prezydent miasta Krakowa oraz dyrektor IFJ rozcięli linki zasłony, a białe i niebieskie baloniki, napełnione helem, uniosły ją wysoko w powietrze, ukazując tablicę z nazwą nowej ulicy. Gromkie oklaski zebranych dały wyraz ich szczerzej radości z tego wydarzenia.

Uroczystość była włączona do programu Festiwalu Nauki, który odbywał się w Krakowie w dniach 21–24 maja 2014 r. Oprócz uhonorowania profesora Mariana Mięśowicza, człowieka o silnej osobowości i wielkim



Prezydent Miasta Krakowa J. Majchrowski wita zebranych (na drugim planie od lewej: M. Jeżabek, T. Słomka, W. Nowak, B. Kośmider), fot. S. Kwieciński

dorobku naukowym, stanowiła okazję do zareklamowania Instytutu Fizyki Jądrowej i badań w nim prowadzonych.

W auli IFJ zorganizowano sesję wykładów popularnonaukowych. Profesor Marek Jeżabek wygłosił referat pt. „Droga dla nauki”, w którym krótko przedstawił historię Instytutu Fizyki Jądrowej – od jego założenia w 1955 r. przez profesora Henryka Niewodniczańskiego (patrona tegoż Instytutu) do chwili obecnej. Podkreślił zasługi profesora Mięśowicza dla Instytutu. Z jego inicjatywy liczna grupa fizyków z AGH dołączyła do Instytutu w 1970 r., poszerzając jego spektrum badawcze o tematykę związaną z fizyką wysokich energii i cząstek elementarnych. Instytut, mający już ugruntowaną pozycję na świecie, pomógł w nawiązaniu współpracy z największym w Europie ośrodkiem, jakim jest CERN.

Wykład profesora Pawła Olko miał tytuł „Fizyka i terapia protonowa w Centrum Cyklotronowym Bronowice”. Autor przedstawił w nim program badań naukowych prowadzonych już w CCB na cyklotronie Proteus-235, a także najnowsze osiągnięcia w przygotowaniach do terapii protonowej. Dotychczas leczeniu

czerniaka oka tą metodą poddano 16 osób stanowiących grupę pilotażową. Leczenie kolejnych 55 osób jest już finansowane przez NFZ dzięki zawartej niedawno umowie z CCB. Przewiduje się, że ośrodek będzie przyjmował rocznie około 700 osób ze schorzeniami nowotworowymi zlokalizowanymi w różnych miejscach organizmu. Specjalną uwagą będą otoczone dzieci – dla nich są przygotowywane odpowiednio dostosowane warunki.

Trzeci referat, dr. hab. Jacka Niemca, był zatytułowany „W głąb kosmosu – *Cherenkov Telescope Array*” i dotyczył budowy prototypu nowego teleskopu, realizowanej w IFJ. Opracowane w IFJ teleskopy dla projektu CTA będą mogły rejestrować promieniowanie gamma wpadające z kosmosu w atmosferę ziemską. Im większa będzie ich powierzchnia zwierciadlana, tym więcej światła będą mogły zbierać. Zostaną wyposażone w niezwykle szybkie kamery rejestrujące nawet pojedyncze fotony. Dzięki użyciu wielu teleskopów obraz błysku pochodzącego od danego fotonu będzie można obserwować stereoskopowo, co pozwoli na dokładne określenie kierunku przyścia i energii fotonu.

Ostatnim punktem programu uroczystości było zwiedzanie Centrum Cyklotronowego Bronowice IFJ PAN, w tym cyklotronu Proteus C-235 i stanowisk radioterapii protonowej, w szczególności ramienia gantry.

Goście mogli również obejrzeć prototyp teleskopu największego na świecie obserwatorium badającego promieniowanie gamma wysokich i najwyższych



Zwiedzanie CCB: P. Olko pokazuje R. Tadeusiewiczowi i M. Majchrowskiemu nowe laboratorium terapii oka, fot. S. Kwieciński

energii – dla współpracy *Cherenkov Telescope Array*. Ważne osobistości uczestniczące w wydarzeniu dotrwały do tego punktu programu, wykazując tym samym poparcie i ogromne zainteresowanie dla obu przedsięwzięć IFJ PAN oraz szacunek dla całej społeczności Instytutu.

Profesor Marian Mięłowicz (ur. 21.II.1907 r. we Lwowie, zm. 5.04.1992 r. w Krakowie) studiował na Uniwersytecie Jagiellońskim, gdzie uzyskał magisterium i stopień doktora. W 1938 r. został zatrudniony jako fizyk w Akademii Górniczej (obecnie AGH), gdzie pracując aż do emerytury (w 1977 r.), osiągnął wszystkie szczeble kariery naukowej i najwyższe stanowiska uczelniane. W latach 30. XX wieku prowadził pionierskie badania dynamiki ciekłych kryształów. Rezultatem tych badań było odkrycie anizotropii lepkości ciekłych kryształów. Zdefiniował i zmierzył współczynniki ich lepkości, które później laureat Nagrody Nobla, Pierre-Gilles de Gennes, nazwał współczynnikami Mięłowicza – i pod taką nazwą weszły one do literatury. W czasie stażu naukowego w Holandii Marian Mięłowicz rozpoczął badania z zakresu fizyki jądrowej, które kontynuował po II wojnie światowej. Był twórcą krakowskiej szkoły fizyki cząstek elementarnych oraz pionierem zastosowań fizyki w geofizyce. Sławę przyniosły mu pierwsze badania oddziaływań promieniowania kosmicznego. W 1970 r. jako szef grupy fizyków wysokich energii AGH dołączył do IFJ, tworząc Zakład V tego Instytutu, gdzie był zatrudniony do końca życia. W 1959 r. został członkiem Polskiej Akademii Nauk, w latach 1969–1977 był wiceprezesem PAN, zaś w 1989 r. został członkiem Polskiej Akademii Umiejętności. Był prezesem Oddziału PAN w Krakowie, a w latach 1972–1980 posłem na Sejm PRL. W 1964 r. otrzymał nagrodę państwową I stopnia, a w 1979 r. nagrodę specjalną. W 1964 r. został laureatem nagrody Alfreda Jurzykowskiego. Miał trzy doktoraty honoris causa: Uniwersytetu Jagiellońskiego, Akademii Górniczo-Hutniczej i Uniwersytetu Warszawskiego.

Post scriptum. W Krakowie liczba fizyków – patronów ulic nie jest wielka. Do tej pory wynosiła ona zaledwie sześć osób: Maria Curie-Skłodowska, Władysław Natanson, Henryk Niewodniczański, Karol Olszewski, Marian Smoluchowski i Zygmunt Wróblewski. Profesor Marian Mięłowicz dołączył więc do bardzo dostojnego grona.

Więcej o profesorze M. Mięłowiczu patrz: *Stulecie urodzin Mariana Mięłowicza*, „Postępy Fizyki” 59 (4) (2008), 189.

Polskie Towarzystwo Wzrostu Kryształów

Polskie Towarzystwo Wzrostu Kryształów (PTWK) zostało powołane do życia podczas pierwszego Walnego Zebrania, jakie odbyło się 23 maja 1991 r. w Częstochowie. Walne Zebranie było częścią I Polskiej Konferencji Wzrostu Kryształów (*First Polish Conference on Crystal Growth*, PCCG-1), organizowanej w Wyższej Szkole Pedagogicznej w Częstochowie w dniach 23–24 maja 1991 r.

Od 1998 r. Polskie Towarzystwo Wzrostu Kryształów nosi imię Jana Czochralskiego.

Głównymi celami PTWK są:

- wspieranie współpracy między członkami PTWK, a przez to podnoszenie ogólnego poziomu wiedzy z dziedziny krystalizacji,
- upowszechnianie wśród społeczeństwa wyników polskich naukowców zajmujących się hodowlą kryształów oraz pobudzanie zainteresowania społecznego tą dziedziną nauki,
- aktywny udział w międzynarodowym ruchu związanym ze wzrostem kryształów, a szczególnie utrzymanie ścisłych kontaktów z Międzynarodową Organizacją Wzrostu Kryształów (*International Organisation for Crystal Growth*).

Polskie Towarzystwo Wzrostu Kryształów promuje wybitne prace naukowe dotyczące wzrostu i charakterystyki kryształów objętościowych, cienkich warstw i struktur niskowymiarowych. Ponadto raz na trzy lata przyznaje nagrodę naukową za najlepsze prace doktorskie z tej tematyki.

Zróżnicowanie zainteresowań naukowych członków PTWK doprowadziło do utworzenia pięciu sekcji naukowych:

- Kryształy Objętościowe,
- Mikrostruktury Krystaliczne,
- Biokrystalizacja,
- Nanokryształy,
- Charakterystyka materiałów.

Do głównych zasług PTWK należy zaliczyć aktywność PTWK w szerzeniu wiedzy o prof. Janie Czochralskim poprzez m.in.:

- współdziałanie przy przywróceniu pamięci o profesorze Janie Czochralskim,
- współdziałanie w wielu przedsięwzięciach, takich jak nadanie imienia J. Czochralskiego jednej ze szkół, ufundowanie pomnika profesora i izby pamięci poświęconej osiągnięciom profesora, organizacja konferencji i sympozjów związanych z rocznicami prof. Jana Czochralskiego,
- współfinansowanie medalu im. prof. Jana Czochralskiego wspólnie z *European Materials Research Society* (EMRS),
- współfinansowanie Nagrody im. Jana Czochralskiego w ramach konkursu organizowanego przez Politechnikę Warszawską,
- wystąpienie Zarządu PTWK <do Sejmu RP w sprawie ustanowienia roku 2013 Rokiem Jana Czochralskiego.

Prezes Towarzystwa, prof. dr hab. Anna Pajączkowska, w 2003 r. otrzymała tytuł „Honorowego Obywatela Gminy Kcynia”, a w 2007 r. – medal „Zasłużony dla Gminy Kcynia” za wieloletnią działalność na rzecz przywrócenia pamięci polskiego naukowca, profesora Jana Czochralskiego, oraz jego miejsca urodzenia, życia i spoczynku w mieście Kcynia.

PTWK wielokrotnie organizowało konferencje o zasięgu krajowym oraz międzynarodowym, na których prezentowane są najnowsze wyniki i osiągnięcia w dziedzinie wzrostu kryształów, m.in. *17th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy*, ICCG-17, w dniach 11–16 sierpnia 2013 r. w Warszawie, czy *German Polish Conference on Crystal Growth* (GPCCG 2011, *Crystalline Materials for Advanced Applications*) w dniach 15–18 marca 2011 r. we Frankfurcie nad Odrą / Słubicach.

Prezesa PTWK od 1991 r.:

- Anna Pajęczkowska (IF PAN, Warszawa) – 1991–1992,
- Stanisław Hodorowicz (UJ, Kraków) – 1993–1995,
- Marian A. Herman (Instytut Technologii Próżniowej, Warszawa) – 1995–1998,
- Keshra Sangwal (Politechnika Lubelska) – 1998–2001,
- Anna Pajęczkowska (ITME, Warszawa) – 2001–2004,
- Stanisław Krukowski (IBW Unipress, Warszawa) – 2004–2007,
- Wojciech Sadowski (Politechnika Gdańska) – 2007–2011,

- Ewa Talik (Instytut Fizyki, Uniwersytet Śląski) – 2011–2013,
- Dorota Pawlak (ITME, Warszawa) – 2013–2016,
- Dobrosława Kasprowicz (Politechnika Poznańska) – prezes elekt (prezes w kadencji 2016–2018).

Obecnie PTWK liczy 167 członków. Członkami wspierającymi PTWK są: CEMAT-SILICON SA, UNIPRESS, Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ITME, Uniwersytet Śląski w Katowicach i Politechnika Łódzka.

Strona internetowa Towarzystwa: <http://www.ptwk.org.pl/>.

K S I A Ź K I N A D E S Ł A N E



John Gribbin

Kubity i kot Schrödingera. Od maszyny Turinga do komputerów kwantowych

Pruszyński i S-ka, Warszawa 2015

Komputery kwantowe to jeden z najbardziej gorących tematów w fizyce drugiego dziesięciolecia XXI wieku.

Nie tylko dlatego, że cząstki znajdujące się – podobnie jak słynny kot Schrödingera – w superpozycji stanów stanowią źródło nieporównywalnie większej mocy obliczeniowej niż ta, którą dysponują klasyczne komputery. Przede wszystkim, już sama idea kwantowego komputera wiele wnosi do toczącej się od blisko stulecia dyskusji o naturze naszej rzeczywistości. Nie bez powodu jeden z najsłynniejszych współczesnych fizyków, David Deutsch, w swojej argumentacji, dotyczącej wszechświatów równoległych, odwołuje się właśnie do kwantowej maszyny.

Jak działają komputery kwantowe? Co łączy je z koncepcją nieskończonego multiświata Davida Deutscha? Czy wkrótce czeka nas technologiczna rewolucja na niespotykaną dotąd skalę? W książce

„Kubity i kot Schrödingera” John Gribbin odpowiada na te pytania z właściwą sobie lekkością pióra, błyskotliwością i pasją.

John Gribbin to jeden z najwybitniejszych współczesnych pisarzy popularnonaukowych, autor bestsellerów, m.in. „W poszukiwaniu Multiświata”, „Podróż do granic Wszechświata” i „Dlaczego jesteśmy?”. Słynie ze zdolności prostego wyjaśniania złożonych zagadnień. Twierdzi, że w twórczości pisarskiej – w znacznej mierze z udziałem żony, Mary Gribbin – stawia sobie za cel dzielenie się z czytelnikami swoim zachwytem nad osobliwościami Wszechświata. John Gribbin studiował astrofizykę w Cambridge, obecnie odbywa staż naukowy jako stypendysta Katedry Astronomii w University of Sussex.

Informacje dla autorów Czekamy na przystępnie napisane artykuły przeglądowe i monograficzne. Układ pracy (tytuł, autor, afiliacja, streszczenie po polsku, tytuł angielski, streszczenie po angielsku, słowa kluczowe polskie i angielskie, tekst, odnośniki literaturowe, podpisy pod ilustracjami itd.) powinien odpowiadać formie przyjętej w *Postępkach Fizyki* (patrz artykuły w ostatnich zeszytach). Prace złożone w systemie \LaTeX (Microsoft Office, OpenOffice) z ilustracjami o rozdzielczości co najmniej 300 dpi w osobnych plikach prosimy nadsyłać e-mailem pod adresem postepy@amu.edu.pl albo ptomczak@amu.edu.pl. Prace są

recenzowane. Redakcja zastrzega sobie prawo do skracania tekstów, ich opracowywania oraz niezbędnych zmian terminologicznych. Autorzy powinni wykonać korektę autorską złożonego artykułu. Publikowanie w *Postępkach Fizyki* wiąże się z nieodpłatnym udostępnieniem utworu autorskiego na stronie *Postępów Fizyki* na podstawie licencji Creative Commons.

Przenumeratę dla osób/institucji niebędących członkami Polskiego Towarzystwa Fizycznego prowadzi Ruch (<http://www.prenumerata.ruch.com.pl>). Prenumeratorzy, którzy nie chcą korzystać z usług pośredników, powinni wpłacić odpowiednią kwotę

na konto główne PTF w Banku Handlowym: 74 1030 0019 0109 8530 0046 3033, a następnie przesłać e-mailem kopię potwierdzenia wpłaty ZG PTF i do redakcji *Postępów Fizyki*, podając adres, pod który mają być przesyłane *Postępy Fizyki*. Proszę też określić, jakie numery lub jaki rocznik obejmuje wpłata. Pojedynczy numer kosztuje 12 zł, a rocznik 72 zł. Koszty przesyłki pokrywa redakcja.

Avances in Physics founded in 1949 is the magazine of the Polish Physical Society, addressed to the Polish community of physicists. Published bimonthly in Polish. For a subscription information visit www.prenumerata.ruch.com.pl.

Nowoczesny, przejrzyste napisany, kompletny podręcznik podstaw fizyki, który powstał na podstawie legendarnej już książki Resnicka i Hallidaya. Przedstawia aktualny stan wiedzy, zarówno w rozdziałach związanych z fizyką współczesną, jak i w tych dotyczących fizyki klasycznej. Prezentowany materiał jest bogato ilustrowany i poparty wieloma przykładami, a aparat matematyczny ograniczony do niezbędnego minimum. Uzupełnieniem książki są wykazy niektórych danych astronomicznych, współczynników zamiany jednostek, wzorów matematycznych, właściwości pierwiastków, wybranych stałych i właściwości fizycznych, a także układ okresowy pierwiastków oraz skorowidz pojęć.

Kultowy podręcznik NOWE WYDANIE!

HALLIDAY RESNICK • WALKER

PODSTAWY FIZYKI

tom
1-5



Drugie wydanie polskie opiera się na najnowszym, już dziesiątym, wydaniu amerykańskim.

Najważniejsze zmiany:

- podzielona na nowo treść książki, niektóre rozdziały napisano na nowo
- dodana lista celów nauczania oraz informacja o podstawowych faktach, które należy przyswoić
- 16 nowych przykładów oraz 250 nowych zadań i 50 pytań
- w Internecie na stronie książki dostępne pomoce dydaktyczne (np. animacje, wskazówki do zadań)

● Podstawowy podręcznik dla studentów i uczniów

● Nieoceniona pomoc dla wykładowców i nauczycieli