

Przemysław Adrich
Narodowe Centrum Badań Jądrowych
ul. Andrzeja Sołtana 7
05-400 Otwock

Załącznik nr 2 do Wniosku z dnia 27 czerwca 2017 r. o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego w dziedzinie nauk fizycznych w dyscyplinie fizyka.

Autoreferat

1. Imię i Nazwisko.

Przemysław Adrich

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

Stopień naukowy doktora nauk fizycznych w zakresie fizyki, uzyskany w Uniwersytecie Jagiellońskim w Krakowie, w 2005 r., na podstawie rozprawy doktorskiej pt. *Observation of Pygmy and Giant Dipole Resonances in ^{132}Sn and neighboring mass isotopes*.

Dyplom magistra fizyki, uzyskany w Uniwersytecie Jagiellońskim w Krakowie, w 2000 r., na podstawie pracy magisterskiej pt. *Spektroskopia fragmentów spontanicznego rozszczepienia ^{252}Cf* .

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.

- | | |
|-------------|---|
| Od 2011 r. | Narodowe Centrum Badań Jądrowych (NCBJ), Otwock,
starszy specjalista badawczo-techniczny |
| 2010 – 2011 | Instytut Problemów Jądrowych im. Andrzeja Sołtana, Otwock,
starszy specjalista badawczo-techniczny |
| 2009 – 2010 | Instytut Problemów Jądrowych im. Andrzeja Sołtana, Otwock,
fizyk |
| 2005 – 2008 | National Superconducting Cyclotron Laboratory (NSCL), East Lansing,
MI, USA,
research associate |
| 2001 – 2004 | Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI), Darmstadt, Niemcy,
stypendysta-doktorant |
| 2000 – 2005 | Uniwersytet Jagielloński, Wydział Fizyki Astronomii i Informatyki Sto-
sowanej, Kraków,
doktorant |

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.).

Jako osiągnięcie naukowe przedstawiam monografię pt.

Formowanie wiązek elektronowych. Nowe koncepcje układów formowania i rozwój metod ich projektowania w oparciu o narzędzia współczesnej fizyki subatomowej

wydaną nakładem Narodowego Centrum Badań Jądrowych, 2017, ISBN 978-83-941410-5-9, której jestem jedynym autorem.

Omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Akceleratory elektronów przyspieszające wiązki w zakresie energii od kilku do kilkunastu MeV znalazły w ostatnich dekadach bardzo liczne zastosowania w przemyśle, medycynie oraz badaniach naukowych i technologicznych. Szacuje się, że obecnie w użyciu na całym świecie jest ponad 20 tys. akceleratorów elektronów, z czego ok. połowy stanowią medyczne akceleratory liniowe. Znaczne korzyści społeczne i ekonomiczne ze stosowania technik akceleratorowych są motorem rozwoju wciąż nowych, coraz liczniejszych zastosowań, jak również rozwijania nowych i udoskonalania starszych konstrukcji.

Aby akcelerator był użyteczny do zastosowań praktycznych musi być wyposażony w odpowiedni układ formowania wiązki. Podstawowym zadaniem takiego układu jest przekształcenie wąskiej, pierwotnej wiązki przyspieszonej w akceleratorze (często określanej angielskim terminem *pencil beam*), w tzw. wiązkę szeroką (również zwaną *wiązką uformowaną*; od ang. *broad beam, formed beam*) zdatną do wykorzystania w praktyce. Celem jest uzyskanie równomiernego rozkładu dawki w obrębie wyznaczonego pola napromieniania, które jest zwykle dużo większe od rozmiarów poprzecznych wiązki pierwotnej. Cel ten można zrealizować na dwa sposoby: bądź poprzez periodyczne przemiatanie wiązki pierwotnej po obszarze pola, bądź poprzez odpowiednie rozproszenie wiązki pierwotnej. Pierwszy sposób realizowany jest w tzw. układach aktywnych, drugi w układach pasywnych, którym poświęcona jest moja monografia.

Układy aktywne, ze względu na bardzo wysoką wydajność i możliwość pracy z wiązkami pierwotnymi o bardzo dużych mocach, są podstawą licznych przemysłowych technologii radiacyjnych. Z kolei układy pasywne wykorzystywane są w zastosowaniach medycznych¹, gdzie mamy do czynienia z wiązkami o znacznie mniejszych mocach, ale za to jednym z głównych wymogów jest równomierność rozkładu dawki.

W pasywnym układzie formowania wiązka pierwotna jest najpierw odpowiednio rozpraszana za pomocą układu tzw. folii rozpraszających. Następnie, rozproszona wiązka jest kolimowana (przestrzennie ograniczana) do zadanego pola napromieniania. Układ

¹ Stosowania układów aktywnych w akceleratorach medycznych elektronów całkowicie zaprzestano w następstwie serii tragicznych wypadków radiacyjnych w latach 80. i 90. XX w., spowodowanych usterkami tych systemów.

kolimacji zwykle składa się z kolimatora wstępnego (lub kilku kolimatorów wstępnych) i kolimatora wymiennego, ostatecznie wyznaczającego kształt i rozmiary pola napromieniania. Ten ostatni, zwykle określany jest mianem „aplikatora”.

Elementy pasywnego układu formowania muszą być indywidualnie projektowane odpowiednio do specyficznych wymogów danego zastosowania, energii wiązki (lub wiązek w przypadku akceleratorów wieloenergetycznych), wielkości napromienianego pola, itp.

Znane metody projektowania i optymalizacji układów pasywnych bazują na prostym modelu analitycznym rozpraszania wiązki w foliach. Model ten pomija wiele istotnych procesów fizycznych, jak np. produkcja promieniowania wtórnego (Bremsstrahlung, delta elektrony), utrata energii w procesach nieradiacyjnych, rozpraszanie pod dużymi kątami, itd. Co więcej, model ten nie bierze pod uwagę wtórnego rozpraszania na elementach układu kolimacji, choć skądinąd wiadomo, że w istotnym stopniu zaburza to rozkład fluencji (dawki) uzyskiwany pod nieobecność układu kolimacji. O ile z upływem lat, coraz bardziej doskonalono stosowane modele fizyki oddziaływania wiązki, o tyle sam model analityczny nie został rozszerzony w kierunku bardziej realistycznej geometrii układu (wydaje się zresztą, że stopień komplikacji, takiego rozszerzonego modelu, uczyniłby go w zasadzie nieprzydatnym do zastosowań praktycznych).

Ograniczenia modelu analitycznego sprawiają, że bazujące na nim metody projektowania, mimo wielu poprawek i wprowadzanych przez lata udoskonaleń, w zasadzie nie nadają się do projektowania układów zdolnych sprostać współczesnym wymaganiom - szczególnie wysokich w obszarze zastosowań medycznych. Odzwierciedleniem tego faktu są liczne, udokumentowane w literaturze przedmiotu, niedoskonałości istniejących aparatów.

Z kolei najnowsze, najbardziej zaawansowane zastosowania, jak np. radioterapia śródoperacyjna wiązką elektronów², stawiają szereg zupełnie nowych wyzwań, nie tylko w odniesieniu do metod projektowania, ale również w stosunku do ugruntowanych koncepcji, zasad i schematów rozwiązań konstrukcyjnych.

W ww. monografii przedstawiłem wyniki moich badań nakierowanych na rozwiązanie zarysowanych problemów. Badania te zaowocowały, m.in.

- opracowaniem nowej, uniwersalnej metody projektowania układu folii rozpraszających, która, uwzględniając kompletną fizykę oraz realistyczną geometrię zagadnienia, usuwa wszystkie wady metod poprzednich generacji, oraz stwarza szereg nowych, wcześniej niedostępnych, możliwości głębokiej optymalizacji układów pasywnych (np. nowa metoda umożliwiła mi wykazanie, że w pewnych warunkach odpowiednio zoptymalizowany układ pasywny może być równie wydajny co układ aktywny, będąc jednocześnie znacznie prostszym i ekonomiczniejszym),
- opracowaniem szeregu nowych koncepcji rozwiązań pasywnych układów formowania dla zastosowań medycznych i badawczych. W szczególności, nowego, optymalnego rozwiązania układu kolimacji dla pierwszego polskiego mobilnego ak-

² Radioterapia śródoperacyjna jest jedną z najnowocześniejszych metod terapii chorób nowotworowych. Polega ona na połączeniu zabiegu chirurgicznej resekcji guza z radioterapią wykonywaną na sali operacyjnej. Zwłaszcza w ostatnich latach technika ta w coraz większym stopniu wychodzi poza obszar badań i testów w stronę rutynowego stosowania.

celeratora do radioterapii śródoperacyjnej, uniwersalnego algorytmu optymalizacji układu formowania (w szczególności tzw. aplikatora półkowego) dla akceleratora do teleradioterapii wiązką elektronów oraz układu do napromieniowań badawczych z dużą mocą dawki w warunkach kriogenicznych.

Pobocznym, niemniej istotnym, zamiarem przyświecającym mi przy pisaniu ww. monografii była chęć wypełnienia uciążliwej luki w istniejącej literaturze przedmiotu polegającej na braku całościowego opracowania zagadnienia pasywnych układów formowania (prace podejmujące interesujące nas tutaj zagadnienia są fragmentaryczne i rozsiępane w różnych źródłach z okresu co najmniej ostatnich 40 lat).

Moje prace i wyniki przedstawione w ww. monografii są ściśle związane z realizowanymi w ostatnich latach w Narodowym Centrum Badań Jądrowych programami rozwoju innowacyjnych akceleratorów liniowych elektronów do zastosowań medycznych i przemysłowych. Znaczna część przedstawionych wyników została uzyskana w ramach dwóch dużych, wieloletnich, projektów badawczo-rozwojowych:

- projektu nr POIG.01.01-14-012/08-00, pt. „Rozwój specjalizowanych systemów wykorzystujących akcelerator i detektory promieniowania jonizującego do terapii medycznej oraz wykrywania materiałów niebezpiecznych i odpadów toksycznych” (w skrócie „Akcelerator i Detektory” lub „AiD”) realizowanego w latach 2008 – 2013 w ramach narodowego Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, współfinansowanego przez Unię Europejską,
- projektu nr PBS2/B9/26/2014, pt. „Kompleksowy System do Radioterapii Śródoperacyjnej” (akronim „Intra-Dose”) realizowanego w latach 2014 – 2016 w ramach Programu Badań Stosowanych, współfinansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

Zrealizowane prace i osiągnięte wyniki przybliżyć omawiając układ materiału przedstawionego w monografii. Część wyników była już uprzednio publikowana w postaci artykułów w czasopismach naukowych oraz w wystąpieniach na międzynarodowych konferencjach naukowych, co również wyszczególniam w odpowiednich miejscach poniżej.

Zasadnicza część monografii poprzedzona jest rozdziałem wstępnym. Celem umiejscowienia pracy w szerszym kontekście oraz zarysowania potencjału przyszłego wykorzystania przedstawionych wyników, najpierw wyjaśniam obecną rolę i znaczenie oraz przewidywany w najbliższej przyszłości wzrost wykorzystania akceleratorów elektronów w przemyśle, medycynie oraz badaniach naukowych i technologicznych. Następnie, najpierw w sposób obrazowy, omawiam istniejące rozwiązania układów formowania wiązek i ich zastosowania, najwięcej uwagi poświęcając układom pasywnym, będącym głównym przedmiotem pracy. Zarysowuję istniejące problemy i wypracowane przeze mnie rozwiązania, którym poświęcone są kolejne rozdziały monografii. Omawiam także, poboczny, ale niepozbawiony znaczenia, cel pracy, jakim jest stworzenie pewnego rodzaju podręcznika dla fizyków projektujących pasywne układy formowania wiązek elektronowych (a jednocześnie przystępnego i przydatnego dla pozostałych członków interdyscyplinarnych zespołów rozwijających współczesne akceleratory elektronów).

Pierwszy rozdział monografii poświęcony jest przedstawieniu fizyki oddziaływania wiązki elektronowej z materią. Dobrze zrozumienie podstaw fizycznych jest warun-

kiem koniecznym dla pełnego zrozumienia funkcjonowania układów formowania wiązki, a zwłaszcza do podjęcia prac w kierunku rozwoju nowych konstrukcji czy metod projektowania. Materiał tego rozdziału starałem się przedstawić w sposób możliwie przystępny, także dla osób niebędących fizykami, ale równocześnie na tyle szczegółowo by móc odwoływać się do niego poprzez wszystkie kolejne rozdziały. Dla porządku rozdział otwiera słownik stosowanych pojęć i symboli. Dyskusja zagadnień fizycznych rozpoczyna się prostą, jakościową ilustracją propagacji wiązek elektronów o różnych energiach, w różnych materiałach. Uwaga skupiona jest tu na jakościowym opisie najistotniejszych zjawisk, które następnie omawiane są bardziej ilościowo. Nieodzowne jest wprowadzenie fundamentalnych dla opisu oddziaływania wiązki wielkości, takich jak zdolność hamowania, zdolność rozpraszania, zasięg, wydajność promieniowania, itd. Każdorazowo starałem się kłaść nacisk na wyjaśnienie sensu fizycznego omawianych wzorów, wielkości i ich wzajemnych relacji. Dyskusje ilustrowane są przykładami nawiązującymi do rzeczywistych układów formowania omawianych w dalszych rozdziałach.

W rozdziale 2. szczegółowo omawiam zasadę działania układu pasywnego, jak również istniejące metody projektowania tego typu układów, z licznymi odniesieniami do literatury przedmiotu. Na tym gruncie wprowadzam, najpierw od strony formalnej, nową, autorską metodę projektowania układu folii rozpraszających. Metoda ta, dzięki uwzględnieniu w sposób spójny wszystkich istotnych procesów fizycznych, usuwa wszelkie niedogodności i ograniczenia metod wcześniej istniejących, a przede wszystkim, po raz pierwszy, daje fizykowi pełny wgląd w zachowanie kompletnego układu w funkcji wszystkich jego istotnych parametrów. To z kolei, po pierwsze umożliwia wykonanie w pełni świadomej i kompletnej optymalizacji układu, a także podjęcie niektórych istotnych problemów szczegółowych, praktycznie nierozwiązywalnych za pomocą metod wcześniejszych generacji. Po drugie, co do tej pory również było praktycznie niewykonalne, umożliwia, w sposób jednoznaczny, udokumentowanie, że opracowane rozwiązanie jest istotnie najlepsze z pośród wszystkich skądinąd możliwych. Po trzecie, nowa metoda jest uniwersalna, tzn. może być stosowana bez względu na stopień złożoności projektowanego układu. Ponadto zakres jej stosowalności nie jest ograniczony wyłącznie do wiązek elektronowych. Nowa metoda może być łatwo zaadaptowana np. na potrzeby protonowej radioterapii nowotworów gałki ocznej (co wzbudziło zainteresowanie naukowców z Instytutu Fizyki Jądrowej im. H. Niewodniczańskiego PAN w Krakowie - jedyne go w Polsce ośrodka prowadzącego tego typu radioterapię. Pozycja III H 2a w wykazie dorobku, załącznik 4).

Nowa metoda wymaga obliczenia, w przestrzeni dyskretniej, pewnych funkcji opisujących działanie rzeczywistego układu. Jest to możliwe tylko z użyciem zaawansowanych narzędzi badawczych współczesnej fizyki subatomowej, takich jak np. biblioteka Geant4 służąca do modelowania metodą Monte Carlo transportu promieniowania w materii, pierwotnie zbudowana dla potrzeb eksperymentów fizyki wysokich energii. Powstaje jednak obawa czy ze względu na złożoność i czasochłonność obliczeń, nowa metoda jest możliwa do zastosowania w praktyce?

Dla rozwiania tej obawy oraz dla ilustracji potencjału nowej metody, w rozdziale 3., omawiam zastosowanie mojej metody do zaprojektowania rzeczywistego układu formowania. Jako przykład służy eksperymentalny układ do napromieniania wiązką elek-

tronów z akceleratora LILLYPUT 3 zbudowanego w NCBJ i zainstalowanego w Laboratorium Badań Nieniszczących Wrocławskiego Parku Technologicznego. Jak pokazałem, nowa metoda nie tylko jest możliwa do zastosowania w praktyce, ale co więcej, pozwala kapitalnie skrócić czas projektowania układu, gwarantując przy tym osiągnięcie najlepszego możliwego rezultatu. Na tym przykładzie wykazałem także, że układ pasywny zoptymalizowany z użyciem nowej metody może w niektórych sytuacjach być co najmniej tak samo wydajny jak, znacznie bardziej złożony, układ aktywny. Ponadto, w rozdziale 3., szczegółowo omówiłem różne aspekty praktyczne zastosowania nowej metody, w tym pokazałem zbudowane przeze mnie doświadczalne narzędzia obliczeniowe, które umożliwiają zastosowanie metody do dowolnie złożonego układu.

Materiał przedstawiony w rozdziałach 2. i 3. w znacznej mierze oparty jest o cykl moich publikacji w anglojęzycznych czasopismach naukowych (pozycje II A 1, II A 2, II A 4 w wykazie dorobku, załącznik 4). Jestem jedynym autorem dwóch najważniejszych w tym cyklu publikacji i pierwszym autorem trzeciej. Prace te prezentowałem również w formie referatów na międzynarodowych konferencjach naukowych (pozycje II H 1, II H 3 w wykazie dorobku, załącznik 4). Za opracowanie nowej metody i wspomniany powyżej cykl publikacji Dyrektor Instytutu wyróżnił mnie Dyplomem Narodowego Centrum Badań Jądrowych za osiągnięcia naukowe w 2016 r.

Rozdział 4. poświęcony jest zagadnieniu wstępnej kolimacji wiązki rozproszonej w układzie folii. Zwykle nie jest to zagadnienie sprawiające szczególne trudności. W standardowych zastosowaniach kolimator wykonany ze stopu ciężkich metali sprawdza się bardzo dobrze. Tu jednak zajmuję się przypadkiem wymagającym przemyślenia zagadnienia od podstaw i wypracowania zupełnie nowej koncepcji. Chodzi o układ kolimacji dla zbudowanego w NCBJ, w ramach projektu „Intra-Dose”, prototypu pierwszego polskiego mobilnego akceleratora do radioterapii śródoperacyjnej. Aparat ten ma pracować w warunkach sali operacyjnej, gdzie będzie używany do podawania jednorazowo dawki promieniowania rzędu 10 Gy, bezpośrednio w chirurgicznie otwartą ranę po usuniętych tkankach nowotworowych. Stawia to przed urządzeniem cały szereg zupełnie nowych wyzwań. Jednym z nich jest konstrukcja układu kolimacji, który powinien być bardzo lekki i niewielki (aby urządzenie nie straciło na mobilności), ale jednocześnie powinien zapewniać bardzo niski poziom promieniowania X ubocznego wokół pracującego aparatu (by chronić pacjenta, personel, oraz osoby postronne mogące znajdować się w sąsiednich pomieszczeniach). Wydaje się, że są to wymagania całkowicie ze sobą sprzeczne. Jak jednak pokazałem, odchodząc od utartych schematów budowy układów kolimacji, można te dwie sprzeczności ze sobą pogodzić. Wymaga to jednak dogłębnego przemyślenia zagadnienia, w tym znalezienia i eliminacji najistotniejszych źródeł promieniowania ubocznego.

Opracowane przeze mnie rozwiązanie, w całości bazujące na lekkich stopach aluminium, zostało zrealizowane w zbudowanym, w ramach projektu „Intra-Dose”, prototypie akceleratora śródoperacyjnego. Wyniki wstępnych pomiarów wskazują, że przy zachowaniu bardzo dobrych parametrów wiązek terapeutycznych, poziom promieniowania ubocznego spełnia wszystkie wymagania odpowiedniej normy dla urządzeń medycznych. Co więcej, zmierzone w różnych punktach wokół akceleratora dawki od promieniowania X ubocznego są albo niższe albo zbliżone do, znanych z literatury, wyników

pomiarów dla akceleratora Mobetron. Warto zaznaczyć, że spośród dostępnych na rynku aparatów do radioterapii śródoperacyjnej wiązką elektronów, aparat Mobetron wyróżnia się najniższym poziomem promieniowania ubocznego, co jednak zostało osiągnięte za pomocą masywnych kolimatorów, których ciężar znacząco ogranicza mobilności tegoż aparatu. W przeciwieństwie do aparatu Mobetron, niewielka masa nowego układu kolimacji prototypowego akceleratora zbudowanego w NCBJ (poniżej 6 kg), umożliwiła zastosowanie konstrukcji mechanicznej o doskonałej mobilności i niespotykanej dużej przestrzeni roboczej głowicy terapeutycznej - cechach kluczowych w radioterapii śródoperacyjnej.

Nowatorska konstrukcja opracowanego w NCBJ akceleratora oraz ww. wstępne wyniki pomiarów dozymetrycznych tak wiązek terapeutycznych jak i promieniowania ubocznego wzbudziły duże zainteresowanie potencjalnych przyszłych użytkowników, na czele z Wielkopolskim Centrum Onkologii w Poznaniu - partnerem NCBJ w projekcie „Intra-Dose” i wiodącym w kraju ośrodkiem w dziedzinie stosowania radioterapii śródoperacyjnej wiązką elektronów. Dobrze to rokuje podjętym już pracom zmierzającym do komercjalizacji akceleratora i uruchomienia w ośrodku w Świerku produkcji tego typu aparatów.

Materiał przedstawiony w rozdziale 4. częściowo bazuje na wynikach badań wykonanych w projekcie „AiD” i wcześniej publikowanych w postaci artykułów (pozycje II A 3, II B 1, II B 2, II B 4, II C 1 w wykazie dorobku, załącznik 4) i referatów na licznych konferencjach naukowych (pozycje II H 2, II H 4, II H 5, II H 6 w wykazie dorobku, załącznik 4). Zasadniczą część rozdziału stanowi jednak przedstawienie nowej autorskiej koncepcji, opracowanej przeze mnie w ramach projektu „Intra-Dose”, która tutaj jest publikowana po raz pierwszy.

W rozdziale 5. przedstawiam opracowany przeze mnie algorytm optymalizacji aplikatorów półkowych stosowanych w teleradioterapii wiązką elektronów. Temat optymalizacji aplikatora półkowego jest również bezpośrednio związany z prowadzonymi w NCBJ pracami zmierzającymi do zbudowania nowoczesnego, wieloenergetycznego akceleratora pozwalającego na realizację zaawansowanych technik radioterapeutycznych, zarówno wiązkami elektronów jak i megawoltowego promieniowania X (w skrócie „akceleratora wysokospecjalistycznego”).

Praca ta została wykonana w ramach projektu „AiD”, niemniej nie była wcześniej szerzej publikowana (nie licząc krótkiej wzmianki w Raporcie Rocznym Instytutu za rok 2010 i serii wygłoszonych przeze mnie seminariów wewnętrznych). O ile, odwrotnie niż w przypadku radioterapii śródoperacyjnej, tutaj mamy do czynienia z dość typowym układem wstępnej kolimacji, o tyle wymienne aplikatory wiązki terapeutycznej wymagają znacznie większej uwagi.

Co ciekawe, pomimo że sama koncepcja aplikatora półkowego jest znana i stosowana w różnych wariantach od stosunkowo długiego czasu, to jednak większość konstrukcji posiada różnorakie, dobrze udokumentowane w literaturze przedmiotu, wady. Często są one związane z nadmiernym poziomem dawki od promieniowania ubocznego i/lub znaczną masą aplikatora, co jest bardzo nieergonomiczne. Zadziwia przy tym brak w literaturze dogłębnego i kompletnego studium zasad optymalizacji tego typu aplikatorów. Przystępując do pracy nad projektem układu formowania dla konstruowanego

w NCBJ akceleratora wysokospecjalistycznego postanowiłem tę lukę wypełnić, czego rezultatem jest kompletny, uniwersalny algorytm optymalizacji przedstawiony w rozdziale 5.

Jak pokazałem w tym rozdziale, optymalizacja aplikatora półkowego (jak i całego układu formowania wiązki elektronów) nie jest trywialna. Co prawda w literaturze przedmiotu można znaleźć prace dotyczące różnych zagadnień szczegółowych, to jednak nie był wcześniej znany ogólny algorytm optymalizacji aplikatora. Taki stan rzeczy skutkuje wspomnianymi już niedoskonałościami dostępnymi na rynku urządzeń.

W rozdziale 5., przedstawiłem opracowany przeze mnie algorytm optymalizacji aplikatora wraz z przykładem jego zastosowania do wykonania projektu zestawu aplikatorów dla budowanego w NCBJ demonstratora akceleratora wysokospecjalistycznego. Następnie, na podstawie wyników szczegółowych symulacji Monte Carlo pokazałem, że układ formowania zoptymalizowany wg. nowego algorytmu, pozwala uzyskać wiązki terapeutyczne o parametrach dorównujących, a nawet w niektórych przypadkach przewyższających, parametry wiązek najnowocześniejszego obecnie dostępnego na rynku akceleratora medycznego do teleradioterapii, tj. akceleratora TrueBeam firmy Varian (największego na świecie producenta akceleratorów medycznych). Przy czym masy poszczególnych aplikatorów są w obu wypadkach zbliżone (i znacznie mniejsze niż masy porównywalnych aplikatorów produkowanych przez drugiego największego na świecie wytwórcę akceleratorów medycznych, firmę Elekta). Co ważne, stworzony przeze mnie algorytm jest uniwersalny, tzn. może być z powodzeniem wykorzystany do optymalizacji aplikatora półkowego niezależnie od konstrukcji pozostałych elementów głowicy terapeutycznej.

Wartym wzmianki faktem jest, że prace nad algorytmem optymalizacji aplikatorów półkowych podjęto niezależnie w Uniwersytecie Stanu Luizjana (LSU) w Baton Rouge w Stanach Zjednoczonych, ośrodku znanym z licznych dokonań w zakresie doskonalenia technik i urządzeń do radioterapii wiązkami elektronów.

Algorytm stworzony przeze mnie oraz algorytm opracowany w LSU (i przedstawiony w niedawnej rozprawie doktorskiej G. Pitchera) mają wiele cech wspólnych. Niemniej algorytm tu przedstawiony jest o tyle bardziej kompletny, że uwzględnia i rozwiązuje problem równoległej optymalizacji układu folii rozpraszających, czego brakuje w algorytmie Pitchera. Z kolei Pitcher bardziej szczegółowo przebadał (choć nie zrealizował w wykonanym modelu) możliwość pewnych dodatkowych, drobnych udoskonaleń w konstrukcji aplikatora, które tutaj zostały tylko zasygnalizowane. Wydaje się zatem, że istnieje jeszcze pewna przestrzeń do wzajemnie inspirowanych ulepszeń obu algorytmów, choć w przypadku algorytmu przedstawionego przeze mnie raczej nie należy spodziewać się by mogły one być znaczące.

Ostatni, 6. rozdział, zawiera zwięzłe podsumowanie najważniejszych wyników przedstawionych w monografii.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych.

Najbardziej znaczące z moich pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych dotyczą eksperymentalnej fizyki jądrowej, w szczególności badań tzw. jąder egzotycznych –

niewystępujących w warunkach normalnych na ziemi, nietrwałych izotopów o stosunku liczby neutronów (N) do liczby protonów (Z) bardzo odległym (stąd „egzotyczne” w nazwie) od wartości charakterystycznych dla jąder izotopów stabilnych. Badania struktury jądrowej i reakcji z udziałem jąder egzotycznych umożliwiają poznanie tych własności oddziaływań jądrowych oraz materii jądrowej, które nie manifestują się w przypadku izotopów występujących na ziemi w warunkach naturalnych. Dodatkowo, ponieważ jądra egzotyczne pełnią istotną rolę w wielu procesach astrofizycznych (nukleosynteza w wybuchach supernowych), poznanie ich własności jest kluczowe dla zrozumienia tych procesów.

Sztuczne wytwarzanie i badania własności jąder egzotycznych wymagają bardzo skomplikowanej aparatury, dostępnej jedynie w kilku ośrodkach na świecie, oraz dużych, zwykle międzynarodowych, zespołów badawczych. Z tego też względu, prace, które omówię poniżej w znacznej mierze wykonywałem podczas długotrwałych pobytów naukowych w dwóch laboratoriach zagranicznych: Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) w Darmstadt w Niemczech oraz National Superconducting Cyclotron Laboratory (NSCL) w East Lansing w Stanach Zjednoczonych (oba należą do ścisłej światowej czołówki ośrodków naukowych prowadzących badania w dziedzinie fizyki jądrowej). Prace te prowadziłem w okresie przed zatrudnieniem w Narodowym Centrum Badań Jądrowych. Choć nie były one bezpośrednio związane z tematyką rozprawy habilitacyjnej, to jednak stanowiły doskonałe przygotowanie do podjęcia samodzielnych badań układów formowania wiązek elektronowych.

Okres studiów doktoranckich

Stopień doktora nauk fizycznych w zakresie fizyki nadała mi Rada Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie, uchwałą z dnia 29 września 2005 r., na podstawie rozprawy doktorskiej pt. *Observation of Pygmy and Giant Dipole Resonances in ^{132}Sn and Neighboring Mass Isotopes* (tytuł w języku polskim „Obserwacja pigmejskich i gigantycznych rezonansów dipolowych w ^{132}Sn i jądrach o zbliżonych masach”). Promotorem w przewodzie doktorskim był prof. dr hab. Władysław Waluś. Recenzentami w przewodzie doktorskim byli prof. dr hab. Adam Maj oraz prof. dr hab. Tomasz Matulewicz.

Moja rozprawa doktorska dotyczyła doświadczalnych badań wzbudzeń kolektywnych o charakterze dipolowym w egzotycznych jądrach atomowych z obszaru liczb masowych $A \approx 130$ i atomowych $Z \approx 50$, wraz z podwójnie magicznym jądrem ^{132}Sn .

Jądra te charakteryzują się znacznie większą liczbą neutronów niż w najcięższych stabilnych izotopach tych pierwiastków. Przykładowo, podwójnie magiczne jądro ^{132}Sn posiada aż o 8 neutronów więcej niż najcięższy stabilny izotop cyny ^{124}Sn . Nadmiar neutronów, czyniąc te jądra niestabilnymi, determinuje również ich niezwykle własności. Zgodnie ze współczesnymi modelami teoretycznymi, nadmiarowe neutrony powinny znajdować się głównie w zewnętrznych obszarach jądra, formując warstwę materii jądrowej niemal całkowicie pozbawioną protonów. Obszar ten zwykle określa się mianem „skórki neutronowej” (ang. *neutron skin*). W tych peryferyjnych obszarach jądra, stopniowo maleje centralny średni potencjał jądrowy, co prowadzi do spadku gęstości oraz

energii wiązania przebywających tam nukleonów. Kluczowego znaczenia zaczynają nabierać oddziaływania resztkowe pomiędzy neutronami walencyjnymi. Dzięki temu, skórka neutronowa staje się układem słabo związanym z rdzeniem jądra. To z kolei powinno umożliwić istnienie nowego rodzaju wzbudzenia kolektywnego, (nieobserwowanego w jądrach stabilnych), tj. oscylacji skórki neutronowej względem rdzenia jądra. Wzbudzenia tego rodzaju przyjęło się określać mianem rezonansu pigmejskiego (ang. *pygmy dipole resonance*, PDR). Określenie to nawiązuje do dobrze poznanych gigantycznych rezonansów dipolowych (ang. *giant dipole resonance*, GDR) będących jednym z uniwersalnych rodzajów kolektywnych wzbudzeń jądrowych. Rezonans GDR polega na koherentnej oscylacji o charakterze dipolowym, materii protonowej względem neutronowej w jądrze atomowym. Przewidywane teoretycznie średnie energie oraz prawdopodobieństwa wzbudzeń rezonansów typu PDR są znacznie mniejsze niż rezonansów GDR (stąd określenie „pigmejskie” w nazwie tych pierwszych).

Głównym celem mojej pracy doktorskiej było eksperymentalne potwierdzenie istnienia rezonansów typu PDR w jądrze ^{132}Sn oraz izotopach o zbliżonym stosunku N/Z , jak również wyznaczenie ich podstawowych parametrów (średnia energia wzbudzenia, szerokość rezonansu, przekroje czynne, itp.). Praca była ważną częścią większego programu badawczego międzynarodowej kolaboracji FRS-LAND skupionej wokół instytutu Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) w Darmstadt w Niemczech. Eksperyment wraz z analizą danych pomiarowych i interpretacją wyników wykonałem w trakcie 3 letniego pobytu naukowego w tymże instytucji, w latach 2001 – 2004.

Podstawą zastosowanej techniki eksperymentalnej jest proces elektromagnetycznego wzbudzenia, poruszających się z relatywistycznymi prędkościami, jąder pocisków na jądrach tarczy o dużej liczbie atomowej (ołów, uran). Przy energiach relatywistycznych proces ten jest czuły głównie na dipolowe przejścia o charakterze elektrycznym $E1$, z niewielką domieszką przejść kwadropolowych $E2$. Całkowite przekroje czynne są znaczne, rzędu setek milibarnów. Mierzony różniczkowy przekrój czynny ($d\sigma/dE^*$) umożliwia obliczenie funkcji nasilenia dipolowego, $S_1(E^*)$, semiklasyczną metodą fotonów wirtualnych. Zmierzona funkcja nasilenia może następnie posłużyć do weryfikacji przewidywań różnych współczesnych modeli teoretycznych. Energia wzbudzenia, E^* , odtwarzana jest tzw. metodą masy niezmienniczej na podstawie identyfikacji i kinematycznie kompletnego pomiaru czteropędów padającego na tarczę jądra pocisku oraz wszystkich produktów rozpadu stanu wzbudzonego tego jądra, tj. neutronów, kwantów promieniowania γ oraz jądra rezydualnego pozostałego po emisji neutronu(-ów).

Do wytworzenia wiązki badanych izotopów użyto mechanizmu elektromagnetycznie indukowanego rozszczepienia jąder ^{238}U . Pierwotna wiązka uranu była przyspieszana do energii 550 MeV/nukleon w synchrotronie SIS, a następnie kierowana na berylową tarczę produkcyjną. Powstałą w rozszczepieniu wiązkę wtórną oczyszczano z niepożądanych izotopów separatorem fragmentów FRS i kierowano do stanowiska pomiarowego.

Pomiar wykonywany był z użyciem bardzo złożonej aparatury. Jądra pociski były identyfikowane przez pomiar liczby atomowej Z (metodą pomiaru strat energii w detektorze półprzewodnikowym typu „PIN diode”) oraz masy, wyznaczanej z pomiaru pędu (metodą pomiaru trajektorii w polu magnetycznym separatora fragmentów) i prędkości

(metodą pomiaru czasu przelotu na odcinku ponad 80 metrów pomiędzy separatorem fragmentów a stanowiskiem doświadczalnym). Ładunek ciężkiego jądra fragmentu po reakcji mierzony był analogicznie jak ładunek jądra pocisku. Masa fragmentu wyznaczana była metodą śledzenia trajektorii w polu magnetycznym. W tym celu za tarczą ustawiono magnes dipolowy ALADIN. Położenie fragmentów mierzono przed magnesem, za pomocą pozycyjnie czułych detektorów półprzewodnikowych, oraz za magnesem, za pomocą komory wielodrutowej oraz pozycyjnie czułych detektorów z włókien scyntylacyjnych. Czas lotu ciężkiego fragmentu mierzony był detektorem scyntylacyjnym. Czteropęd emitowanych neutronów mierzony był pozycyjnie czułym detektorem neutronów LAND (od ang. Large Area Neutron Detector), umieszczonym około 11 m za tarczą. Emitowane promieniowanie γ mierzone było, w geometrii 4π , detektorem Crystal Ball zbudowanym ze 162 kryształów NaI.

W wyniku wykonanej przeze mnie analizy zebranych danych pomiarowych odtworzyłem funkcje nasilenia dipolowego w jądrach ^{130}Sn i ^{132}Sn w zakresie energii wzbudzenia od progu na emisję neutronu do 25 MeV. Po raz pierwszy wyznaczone eksperymentalnie, funkcje te mają przebieg odmienny niż w izotopach stabilnych. W szczególności znacząca część całkowitego nasilenia dipolowego skoncentrowana jest w obszarze poniżej rezonansu dipolowego. Wynik ten jest jednoznacznym potwierdzeniem istnienia w tych jądrach wzbudzeń typu PDR, choć nie przesądza o ich naturze (w szczególności czy wzbudzenia te odpowiadają kolektywnym drganiom skórki neutronowej, czy też może innym mechanizmom postulowanym w niektórych pracach teoretycznych).

Równolegle z rozprawą doktorską, najważniejsze wyniki, w tym zmierzone funkcje nasilenia dipolowego w jądrach ^{130}Sn i ^{132}Sn , opublikowałem w prestiżowym anglojęzycznym czasopiśmie Physical Review Letters (pozycja II A 13 w wykazie dorobku, załącznik 4). Praca ta, której jestem pierwszym autorem, była jak do tej pory cytowana ponad 270 razy. Wyniki prezentowałem również podczas międzynarodowych konferencji naukowych (pozycje II H 11 – II H 14 w wykazie dorobku, załącznik 4).

Analiza i interpretacja funkcji nasilenia dipolowego w jądrach o nieparzystych liczbach atomowych, zmierzonych w tym samym eksperymencie, została opublikowana w kolejnych pracach, których również jestem współautorem, opublikowanych w anglojęzycznych czasopismach o wysokich współczynnikach wpływu (IF) (pozycje II A 6, II A 10 w wykazie dorobku, załącznik 4) oraz jako materiały konferencyjne (pozycje II B 5 – 7 w wykazie dorobku, załącznik 4). Również te prace doczekały się podobnej liczby cytowań.

Pracując w GSI Darmstadt brałem również aktywny udział w wielu innych pracach eksperymentalnych poświęconych badaniu jąder egzotycznych. Prace te zaowocowały licznymi artykułami w czasopismach naukowych, których jestem współautorem (pozycje II A 14 – 15, II A 19, II A 26 – 27, II A 29 – 30, II A 37, II A 41 – 46, II B 8 – 11, II B 13, II B 15 – 22 w wykazie dorobku, załącznik 4), choć mój wkład w te eksperymenty często był oczywiście znacznie mniejszy niż w wyżej opisane badania wzbudzeń kolektywnych jąder ^{130}Sn i ^{132}Sn .

Okres po uzyskaniu stopnia naukowego doktora

Bezpośrednio po uzyskaniu stopnia naukowego doktora z sukcesem aplikowałem o staż podoktorski w National Superconducting Cyclotron Laboratory (NSCL) w East Lansing, w stanie Michigan w USA. Staż ten odbywałem w okresie 10.2005 – 6.2008.

W owym czasie ośrodek ten dysponował dużą i ciągle rozbudowywaną infrastrukturą badawczą. Na wyposażeniu laboratorium znajdował się m.in. zespół cyklotronów nadprzewodzących, nadprzewodzący separator fragmentów A1900, spektrometr magnetyczny S800, macierz pozycyjnie czułych detektorów germanowych (HPGe) promieniowania γ - SeGA. Aparatura ta tworzy jeden z najlepszych na świecie układów do badań na wiązkach jąder egzotycznych.

Pracując w NSCL kontynuowałem eksperymentalne badania podstawowe w obszarze fizyki jądrowej. Byłem jednocześnie członkiem dwóch grup badawczych kierowanych odpowiednio przez prof. T. Glasmachera oraz przez prof. K. Starostę. Tematyka prac pierwszego zespołu obejmowała spektroskopię γ jąder egzotycznych oraz badania reakcji jądrowych. Drugi zespół zajmował się m.in. rozwojem metody Recoil Distance Method (RDM; metoda odległości przelotu wzbudzonych jąder odrzutu) w kierunku jej zastosowania do pomiarów czasów życia, w zakresie pikosekundowym, stanów wzbudzonych jąder egzotycznych.

Aktywnie uczestnicząc w pracach dwóch prężnie działających grup badawczych jestem współautorem wielu prac opublikowanych w recenzowanych czasopismach naukowych z listy filadelfijskiej (pozycje II A 5, II A 7 – 9, II A 11 – 12, II A 16 – 18, II A 20 – 25, II A 28, II A 31 – 36, II A 38 – 40, II B 12, II B 14 w wykazie dorobku, załącznik 4). Poniżej skupię się na omówieniu tylko wybranych z tych prac, tzn. tych, w których mój udział był dominujący lub bardziej znaczący niż w pozostałych.

Ważnym osiągnięciem mojego stażu w NSCL były wyniki pracy eksperymentalnej mającej na celu badanie struktury neutrononadmiarowych jąder egzotycznych żelaza i chromu, o liczbie neutronów $N \approx 40$ (pozycja II A 9 w wykazie dorobku, załącznik 4). W przypadku tej pracy mój udział był bardzo duży. Byłem odpowiedzialny za przeprowadzenie eksperymentu, całość analizy zebranych danych pomiarowych oraz w znacznej mierze za ich interpretację. Jestem również pierwszym autorem wymienionego powyżej artykułu. Uzyskane w tej pracy wyniki prezentowałem również na międzynarodowych konferencjach naukowych (pozycje II H 7 – 9 w wykazie dorobku, załącznik 4).

W pracy tej po raz pierwszy udało się zmierzyć promieniowanie γ towarzyszące deekscytacji stanów wzbudzonych jądra ^{68}Fe oraz zaproponować przypisanie energii pierwszego stanu wzbudzonego (2_1^+) tego jądra. Wyniki te zostały potwierdzone w późniejszych eksperymentach.

Drugim ważnym wynikiem, który opublikowałem w tej samej pracy, był pomiar przekrojów czynnych na reakcję wybicia (ang. *knockout*) dwóch protonów z jąder ^{68}Ni , ^{70}Ni oraz ^{66}Fe padających na tarczę ^9Be , z energią ok. 70 MeV/nukleon. W reakcjach tych były produkowane, i identyfikowane z użyciem spektrometru magnetycznego S800, odpowiednio jądra ^{66}Fe , ^{68}Fe oraz ^{64}Cr . W tym ostatnim przypadku, zmierzony przekrój czynny okazał się być znacznie mniejszy od spodziewanego na podstawie obliczeń w modelu z przestrzenią walencyjną ograniczoną do podpowłoki *pf*. Wynik ten zinterpre-

towaliśmy jako sygnaturę istnienia w tym obszarze tablicy izotopów tzw. wyspy inwersji (ang. *island of inversion*) – rejonu, w którym dochodzi do zmiany kolejności orbitali w stosunku do kolejności występującej w jądrach stabilnych. Pierwsza taka wyspa została odkryta nieco wcześniej, również w NSCL, w okolicy izotopu ^{31}Na . Istnienie wysp inwersji jest manifestacją słabo poznanej części tensorowej oddziaływania jądrowego. Badania zmian struktury jądrowej w obszarach wysp inwersji dostarczają cennych danych pozwalających dokładniej poznać, m.in., te części oddziaływania jądrowego.

Wyniki opublikowane w ww. pracy (pozycja II A 9 w wykazie dorobku, załącznik 4), będące jednymi z pierwszych empirycznych przesłanek wskazujących na istnienie wyspy inwersji w okolicach jądra ^{64}Cr , wzbudziły niemałe zainteresowanie odzwierciedlone ponad 60 cytowaniami tej pracy. Wyniki te zostały w kolejnych latach potwierdzone i uściślone wieloma obserwacjami uzyskanymi w innych eksperymentach.

Z kolei uczestnicząc w pracach zespołu prof. K. Starosty, wniosłem warty wspomnienia wkład w opracowanie narzędzi do projektowania eksperymentów oraz metody interpretacji danych pomiarowych z pomiarów metodą RDM na wiązkach jąder egzotycznych. Metoda ta pozwala bezpośrednio zmierzyć czasy życia stanów wzbudzonych deekscytujących poprzez emisję promieniowania γ . Czasy życia tych stanów są z kolei bezpośrednio związane z prawdopodobieństwami przejść elektromagnetycznych, które niosą ważne informacje nt. struktury badanych jąder jak i szczegółów oddziaływań jądrowych.

Zastosowanie metody RDM w przypadku wtórnych wiązek sztucznie produkowanych jąder egzotycznych jest nietrywialne. Zarówno właściwe przygotowanie eksperymentu jak i interpretacja wyników pomiaru wymagają bardzo szczegółowych symulacji kompletnego układu pomiarowego. Będąc członkiem grupy prof. Starosty brałem udział w budowie odpowiedniego narzędzia dedykowanego do pomiarów w NSCL. Skonstruowane narzędzie oparte jest o biblioteki kodów Geant4 oraz Root, służące odpowiednio modelowaniu Monte Carlo transportu promieniowania w materii oraz analizie statystycznej danych pomiarowych. Szczególnie wniosłem wkład w opracowanie metody interpretacji danych pomiarowych bazującej na porównaniu, z pomocą odpowiednich testów statystycznych, rejestrowanych i symulowanych widm energii promieniowania γ . Symulator, jak i opracowana metoda analizy zostały opisane w pracy, której jestem pierwszym autorem (pozycja II A 8 w wykazie dorobku, załącznik 4). Praca ta jest do dnia dzisiejszego wykorzystywana do projektowania nowych eksperymentów oraz analizy danych z wykonanych w NSCL pomiarów czasów życia. Jak do tej pory praca ta była cytowana ponad 20 razy.

Oprócz ww. prac, w trakcie stażu w NSCL, miałem także rzadką okazję brać aktywny udział w budowie nowego, dużego systemu detektorów promieniowania γ dla eksperymentów na relatywistycznych wiązkach jąder egzotycznych - CAESAR. Motywacją projektu była potrzeba uzupełnienia infrastruktury badawczej laboratorium o detektor dużej wydajności. O ile bowiem detektory germanowe typu HPGe istniejącej macierzy SeGA charakteryzują się bardzo wysoką zdolnością rozdzielczą energetyczną (rzędu 3% dla pomiarów na wiązkach egzotycznych), o tyle całkowita wydajność detekcji wynosi zaledwie kilka procent (w zależności od konfiguracji macierzy SeGA). Tak niska wydajność była jednym z „wąskich gardeł” uniemożliwiających badania szczególnie trudnych

w produkcji, najbardziej egzotycznych jąder (a tym samym częstokroć również najbardziej interesujących), dostępnych w postaci wiązek o bardzo niskiej intensywności.

Detektor CAESAR został pomyślany jako macierz detektorów scyntylacyjnych. Po rozważeniu różnych alternatyw, ostatecznie detektory zostały wykonane z popularnego scyntylatora CsI(Na). Ze względu na znacznie mniejsze, w stosunku do detektorów germanowych, koszty wytworzenia pojedynczych detektorów, możliwe było zbudowanie macierzy o geometrii bliskiej 4π (czyli pozwalającej na osiągnięcie bardzo wysokiej wydajności detekcji).

Uczestnicząc w projekcie budowy detektora CAESAR byłem odpowiedzialny za zbadanie wpływu geometrii detektora na wydajność zbierania fotonów scyntylacji w układzie scyntylator-światłowód-fotopowielacz. Zachodziła obawa, że niektóre rozważane w projekcie geometrie detektorów będą cechować się zbyt dużą niejednorodnością wydajności transportu światła w zależności od miejsca jego produkcji, co prowadziłoby do obniżenia zdolności rozdzielczej energetycznej. Odpowiednie badania wykonałem za pomocą symulacji typu Monte Carlo.

Zbudowana macierz CEASAR składa się ze 192 kryształów CsI(Na) o kształtach prostopadłościennych. Detektor ten został ukończony i uruchomiony w 2009 r. (krótko po tym jak zakończyłem staż w NSCL). Wydajność detekcji kompletnej macierzy wynosi 35%, zaś zdolność rozdzielcza energetyczna jest lepsza niż 10% (przy energii 1 MeV). Od czasu uruchomienia, detektor ten pełni ważną rolę w wielu eksperymentach prowadzonych w NSCL, umożliwiając, m.in., bardziej szczegółowe badania struktury jąder egzotycznych z rejonu, wspomnianej powyżej, wyspy inwersji w okolicy jądra ^{64}Cr . Praca poświęcona opisowi detektora i jego charakterystyce w warunkach rzeczywistych (której jestem współautorem; pozycja II A 5 w wykazie dorobku, załącznik 4) była cytowana już blisko 30 razy.

Doświadczenie zdobyte podczas stażu w NSCL, zwłaszcza to związane z wykorzystaniem metod symulacji Monte Carlo transportu promieniowania jonizującego w materii, okazało się dla mnie, już po powrocie do kraju i rozpoczęciu pracy w Narodowym Centrum Badań Jądrowych, bardzo cenną pomocą w podjęciu wyzwań związanych z rozwojem układów formowania wiązek elektronowych, opisanych w monografii wskazanej w punkcie 4. powyżej.

Okres po podjęciu pracy w ośrodku w Świerku

Z początkiem 2009 r. podjąłem pracę na stanowisku fizyka, a następnie starszego specjalisty badawczo-technicznego, w Instytucie Problemów Jądrowych im. Andrzeja Sołtana w Otwocku-Świerku (od 2011 r. pod nazwą Narodowe Centrum Badań Jądrowych), którą kontynuuję do chwili obecnej. Moje najważniejsze osiągnięcia tego okresu zawarłem w pracy przedstawionej w punkcie 4. powyżej. Niemniej, niejako na marginesie podstawowej działalności związanej z rozwojem układów formowania wiązek elektronowych, miałem też możliwość prowadzenia kilku innych prac, w tym badań na rzecz przemysłu krajowego.

Warta wspomnienia jest praca wykonana na rzecz i we współpracy z firmą KGHM Ecoren S.A. (wydzieloną jednostką organizacyjną czołowego polskiego koncernu

miedziowego). W pracy P. Gambal, P. Adrich i wsp., pt. „Żużel z pieca elektrycznego Huty Miedzi Głogów jako materiał do konstrukcji osłon przed promieniowaniem jonizującym” (pozycja II B 3 w wykazie dorobku, załącznik 4) zmierzaliśmy, w NCBJ, współczynniki pochłaniania różnych rodzajów promieniowania jonizującego, w tym promieniowania X ze źródła akceleratorowego w zakresie energii megawoltowych, przez próbki żużli z wytopu miedzi. Praca ta wykazała znaczny potencjał wykorzystania tego odpadowego materiału, np. jako zastępnika ciężkich betonów w konstrukcji osłon przed promieniowaniem jonizującym.

Z kolei na niwie edukacji, kilkakrotnie prowadziłem specjalistyczne zajęcia praktyczne dla studentów (pozycja III B 1 w wykazie dorobku, załącznik 4), byłem opiekunem kilku staży i praktyk zawodowych (pozycje III C 1 – 2 w wykazie dorobku, załącznik 4), współpromotorem trzech prac inżynierskich (które de facto w całości powstały pod moją opieką; pozycja III C 3 w wykazie dorobku, załącznik 4), oraz dwukrotnie wykładowcą szkoleń organizowanych przez Zakład Doświadczalnej Aparatury Jądrowej NCBJ dla techników i fizyków medycznych z krajowych ośrodków onkologicznych prowadzących radioterapię z wykorzystaniem źródeł akceleratorowych (pozycja III B 2 w wykazie dorobku, załącznik 4). Miałem też przywilej i przyjemność prezentować doświadczenie NCBJ w produkcji akceleratorów podczas międzynarodowego spotkania ekspertów w CERN poświęconego poszukiwaniu dróg rozwoju radioterapii w krajach rozwijających się (pozycja II H 2 w wykazie dorobku, załącznik 4). Od niedawna, w związku z narastającym problemem nieetycznych wydawnictw typu „predatory open access”, staram się upowszechniać wiedzę o tym groźnym dla nauki i społeczeństwa zjawisku (pozycja III B 3 w wykazie dorobku, załącznik 4).

Przemysław Achul