

Kraków, 5. czerwca 2013

dr Jacek Zejma
Instytut Fizyki
Uniwersytet Jagielloński
ul. Reymonta 4
30-059 Kraków

AUTOREFERAT

Spis treści

INFORMACJE O WNIOSKODAWCY	2
Przebieg zatrudnienia	2
Współpraca z innymi ośrodkami naukowymi	2
Wystąpienia konferencyjne	3
Lista zajęć dydaktycznych	3
Działalność naukowa i organizacyjna	4
Odznaczenia nagrody	4
Projekty badawcze	4
OSIĄGNIĘCIE STANOWIĄCE PODSTAWĘ POSTĘPOWANIA HABILITACYJNEGO	5
OPIS DZIAŁALNOŚCI NAUKOWEJ	6
Systemy kilku nukleonów	6
Słabe prądy prawoskrętne w rozpadzie beta	7
Egzotyczne sprzężenia w rozpadzie mionów	7
Pomiar parametru R w rozpadzie beta	8
Rozpad spolaryzowanych jąder ${}^8\text{Li}$	9
Rozpad spolaryzowanych jąder ${}^{16}\text{N}$	9
Rozpad swobodnych neutronów	9
Pomiar elektrycznego momentu dipolowego neutronu oraz pomiary stowarzyszone	10
Źródło ultrazimnych neutronów w PSI	13
Świat zwierciadlany	14
Niezmienność transformacji Lorentza	14
Korelacje spinowe w rozpraszaniu Møllera	15
Podsumowanie	15

INFORMACJE O WNIOSKODAWCY

Przebieg zatrudnienia

- 1988 uzyskanie tytułu magistra fizyki na Uniwersytecie Jagiellońskim w Krakowie.
- 1988-1989, Uniwersytet Jagielloński, samodzielny fizyk
- 1989-1994, Uniwersytet Jagielloński oraz Politechnika Federalna (ETH) w Zurychu, doktorant
- 1994-1995, Uniwersytet Jagielloński, starszy referent techniczny
- 1995 uzyskanie tytułu doktora na Uniwersytecie Jagiellońskim
- 1995-2002, Uniwersytet Jagielloński, asystent
- 2002-2013, Uniwersytet Jagielloński, adiunkt

Współpraca z innymi ośrodkami naukowymi

- Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) w Zurychu w Szwajcarii
Trzy i pół roczny pobyt na stypendium doktoranckim od lutego 1991 do lipca 1994, **roczny** pobyt od kwietnia 2000 do marca 2001 jako Post-doc oraz wielokrotne kilkutygodniowe pobyty podczas eksperymentów (1995-2003).
- Paul Scherrer Institut (PSI) w Villigen w Szwajcarii
Wielokrotne kilkutygodniowe pobyty podczas eksperymentów, przygotowań do nich oraz spotkań naukowych od 1995 do chwili obecnej. Średnio 7 tygodni rocznie.
- Kernfysich Versneller Intituut (KVI) w Groningen w Holandii
Kilka jedno- lub dwutygodniowych pobytów podczas eksperymentów i przygotowań do nich (1996-2011).
- Institut Laue-Langevin (ILL) oraz Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie (LPSC) w Grenoble we Francji
Wielokrotne jedno- lub dwutygodniowe pobyty podczas pomiarów testowych oraz przygotowań do nich (2006-2012).
- Laboratoire de Physique Corpusculaire (LPC) w Caen, we Francji
Kilka tygodniowych pobytów dotyczących przygotowań do eksperymentu nEDM (2010-2012).
- Fribourg group for Atomic Physics, Université de Fribourg w Szwajcarii
Kilka tygodniowych pobytów przygotowujących eksperyment nEDM (2006-2011).
- Institute for Nuclear Chemistry in Mainz oraz Technische Universität München, Germany
Kilka krótkich pobytów poświęconych dyskusjom na temat eksperymentu nEDM.

Wystąpienia konferencyjne

1. 15th European Conference on Few-Body Problems in Physics, 1995, Peñíscola, Hiszpania.
2. Workshop on Precision Measurements at Low Energy, 2007, PSI Villigen, Szwajcaria (plakat).
3. 2nd International Workshop on the Physics of fundamental Symmetries and Interactions at low energies and the precision frontier, 2010, PSI Villigen, Szwajcaria (plakat).
4. The 5th International Symposium on Symmetries in Subatomic Physics. 2012, Groningen, Holandia.

Lista zajęć dydaktycznych

Na Uniwersytecie Jagiellońskim w Krakowie (1995-2012)

- Wykłady
 1. Systemy czasu rzeczywistego
- Opieka nad studentami
 1. 4 tutoriale
 2. 1 licencjat
 3. 4 magistrantów
 4. 6 recenzji prac magisterskich, w tym 2 z informatyki i 4 z fizyki.
- Ćwiczenia rachunkowe
 1. Ćwiczenia do wykładu Podstawy Fizyki: Mechanika
 2. Ćwiczenia do wykładu Podstawy Fizyki: Termodynamika
 3. Ćwiczenia do wykładu Podstawy Fizyki: Elektryczność i Magnetyzm
 4. Ćwiczenia do wykładu Wstęp do Fizyki Jądrowej
 5. Zajęcia wyrównawcze z matematyki
- Laboratoria
 1. I pracownia fizyczna
 2. II pracownia fizyczna (pracownia jądrowa)
 3. Pracownia specjalistyczna dla studentów specjalności fizyka jądrowa
 4. Pracownia do wykładu: Systemy czasu rzeczywistego
 5. Informatyka dla fizyków
- Demonstracje do wykładów
 1. Podstawy Fizyki: Mechanika
 2. Podstawy Fizyki: Elektryczność i Magnetyzm
 3. Fizyka dla chemików

Na Politechnice Federalnej w Zurychu (1992-1995, 2000-2001)

- Ćwiczenia rachunkowe
 1. Ćwiczenia do wykładu Fizyka Jądrowa i Cząstki Elementarne
 2. Ćwiczenia do wykładu Podstawy Fizyki
 3. Ćwiczenia do wykładu Moment Pędu w Fizyce Cząstek

Działalność naukowa i organizacyjna

1. Członek Grupy Roboczej: *Elektronika i DAQ* Centrum Cyklotronowego Bronowice w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie.
2. Przedstawiciel niesamodzielných pracowników naukowych do Rady Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, 2009-2012.
3. Przedstawiciel niesamodzielných pracowników naukowych do Dyrekcji Instytutu Fizyki UJ, od 2010.
4. Organizowanie finansowania wydziałowej, akademickiej licencji na oprogramowanie firmy National Instruments (LabVIEW, LabWindows) oraz dystrybucja tego pakietu.
5. Współtworzenie części P68 grantu infrastrukturalnego „Rozbudowa i modernizacja infrastruktury dydaktycznej na kierunkach ścisłych i przyrodniczych UJ”.
6. Współtworzenie wniosku na konkurs na „kierunki zamawiane” dla kierunków Zaawansowane Materiały i Nanotechnologia (ZMIN) oraz Studia Matematyczno-Przyrodnicze (SMP).

Odznaczenia nagrody

1. Nagroda JM Rektora Uniwersytetu Jagiellońskiego za pracę doktorską, Kraków, 1995 rok.
2. Nagroda JM Rektora Uniwersytetu Jagiellońskiego za serię publikacji dotyczących badań nad neutronami, Kraków, 2008 rok.

Projekty badawcze

1996-2012:

główny wykonawca –	4 granty
wykonawca –	2 granty
koordynator tematu –	1 grant (COPIN, międzynarodowy)
kierownik projektu –	1 grant (habilitacyjny)

w tym w latach 2008-2011:

Granty finansowane ze środków MNiSzW

1. Projekt badawczy własny KBN nr 1 P03B 014 28.
Czas trwania: 05.2005 – 05.2008.
Tytuł: Optymalizacja metod dla nowego pomiaru elektrycznego momentu dipolowego neutronu.
Funkcja: główny wykonawca.
2. Projekt specjalny COPIN/283/2006.
Czas trwania: 05.2007 – 05.2010.
Tytuł: Badania we współczesnej fizyce cząstek i fizyce jądrowej we współpracy z jednostkami IN2P3 we Francji.
Funkcja: wykonawca.

3. Projekt specjalny DPN/N159/COPIN/2010.
Czas trwania: 2010 – 2014.
Tytuł: Badania w ramach fizyki cząstek i fizyki jądrowej we współpracy z jednostkami IN2P3 we Francji.
Funkcja: koordynator współpracy 05-120 oraz 12-146.
4. Projekt badawczy własny N N202 065436.
Czas trwania: 07.2009 – 07.2012.
Tytuł: Pomiar Elektrycznego Momentu Dipolowego neutronu.
Funkcja: wykonawca.
5. **Projekt badawczy habilitacyjny N N202 055540.**
Czas trwania: 05.2011 – 05.2013.
Tytuł: Pomiar Elektrycznego Momentu Dipolowego neutronu.
Funkcja: kierownik projektu.

Granty finansowane ze środków zagranicznych

1. Projekt międzynarodowy ACCORD DE COOPERATION ENTRE L'IN2P3 ET LES LABORATOIRES POLONAIS.
Czas trwania: 05.2007 – (koniec nie jest określony).
Tytuł: Search for the neutron dipole moment (nEDM).
Funkcja: koordynator ze strony polskiej współpracy
05-120 (2005-2011)
12-146 (2012-)

OŚIĄGNIĘCIE STANOWIĄCE PODSTAWĘ POSTĘPOWANIA HABILITACYJNEGO

Osiągnięciem naukowym zdefiniowanym w art. 17 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 r. Nr 65, poz. 595; z 2005 r. Nr 164, poz. 1365.) jest praca habilitacyjna pod tytułem „Experimental Quest for the Neutron Electric Dipole Moment”, ISBN 978-83-60391-76-1.

OPIS DZIAŁALNOŚCI NAUKOWEJ

Niniejszy opis zawiera opis mojej działalności naukowej od czasu uzyskania tytułu doktora nauk fizycznych do chwili obecnej. Ponieważ zajmowałem się różnymi tematami opis ten nie będzie chronologiczny, lecz tematyczny. Pierwszym omawianym zagadnieniem będą systemy kilku nukleonów i są związane z badaniem oddziaływania jądrowego. Następne tematy są związane z weryfikacją Modelu Standardowego i jego rozszerzeń: pomiaru parametru R w rozpadzie beta, pomiar słabych prądów prawoskrętnych i egzotycznych sprzężeń w rozpadzie beta. Pozostałe tematy dotyczą weryfikacji teorii istnienia świata zwierciadlanego, badania niezmienniczości transformacji Lorentza oraz testowania twierdzenia Bella w pomiarze korelacji spinowych elektronów. Głównym tematem, którym zajmuję się przez ostatnie lata jest pomiar elektrycznego momentu dipolowego neutronu, co jest tematem mojej rozprawy habilitacyjnej.

Główne słowa kluczowe: neutron, elektryczny moment dipolowy, niezachowanie symetrii \mathcal{T} i \mathcal{CP} w elementarnych oddziaływaniach, rozpad beta, rozszerzenia Modelu Standardowego, układy kilku nukleonów, systemy detekcyjne, systemy akwizycji danych.

Systemy kilku nukleonów

Moja praca doktorska, obroniona w 1995 roku, dotyczyła badania oddziaływania w układzie trzech nukleonów: zmierzyłem różniczkowe przekroje czynne i wektorowe zdolności analizujące dla reakcji rozszczepienia deuteronu wywołanej spolaryzowanymi protonami $d(\mathbf{p}, pp)n$, których energia wynosiła 65 MeV. Powodem, dla którego ten pomiar był, i w dalszym ciągu jest ważny, jest umożliwienie weryfikacji teorii oddziaływań między nukleonami opierającej się na ścisłym rozwiązaniu równań Faddeeva. Równania te opisują dynamikę oddziaływania w systemach trzech ciał. Korzystając z realistycznych potencjałów oddziaływania można policzyć w ścisły sposób obserwable dla układów związanych (^3H , ^3He) jak i dla reakcji w układzie nukleon + deuteron. W ten sposób uzyskano możliwość bezpośredniego badania potencjałów oddziaływania. Potencjały te (Bonn, Nijmegen, Argonne i inne) posiadają pewne ilości parametrów, które zostały wybrane poprzez globalny fit do wszystkich danych w układach dwóch nukleonów, a następnie użyte do policzenia obserwabli w układach trzech nukleonów bez żadnych, dodatkowych wolnych parametrów. W ten sposób można badać poszczególne zależne i niezależne od spinu cechy oddziaływania trzynukleonowego. W szczególności udział tak zwanej siły trzeciałowej, czyli nieredukowalnej do sumy oddziaływań dwuciałowych części hamiltonianu oddziaływania, jest bardzo interesujący. Konieczność istnienia takiej siły oraz jej forma zależy od danego modelu oddziaływania. Dawniejsze obliczenia były jedynie nierelatywistyczne i pomijały oddziaływanie kulombowskie. Obecnie liczone są już konieczne poprawki. Istnieją również obliczenia bazujące na symetrii chiralnej. Badania te mają znaczenie i dla opisu jądra atomowego, i dla opisu oddziaływania silnego, i wreszcie dla opisu zjawisk astrofizycznych.

Pomiar, o którym powyżej wspomniałem, był przeprowadzony w Instytucie Paula Scherrera w Szwajcarii. Mierzyłem kilka konfiguracji kinematycznych: przede wszystkim tak zwaną konfigurację gwiazdy przestrzennej, gdzie pędy wylatujących nukleonów leżą w płaszczyźnie prostopadłej do wiązki i układają się w symetryczną gwiazdę, jeżeli reakcja jest rozważana w układzie środka masy. Był to bardzo precyzyjny, kinematycznie kompletny pomiar, wymagający zasto-

sowania wyrafinowanych metod analizy danych [7 oraz 10,14]¹. Jest on ciągle cytowany, co świadczy o istotności uzyskanych wyników. Zwłaszcza istotne są wyniki uzyskane dla konfiguracji gwiazdy przestrzennej, które przez ponad dziesięć lat były w niezgodności z obliczeniami teoretycznymi – okazało się, że konieczne jest uwzględnienie poprawek relatywistycznych, które w tej konfiguracji odgrywają istotną rolę.

Tematyka ta ciągle jest obecna w mojej pracy naukowej, co ma swój wydzźwięk w ilości publikacji z nią związanej (23/59). Wcześniej uczestniczyłem w pomiarze konfiguracji kolinearnej oraz QFS [1,4,5]. Natomiast później pomiarami objęliśmy znacznie większy obszar przestrzeni fazowej. W Instytucie Akceleratorowej Fizyki Jądrowej (KVI) w Groningen, w Holandii, zmierzaliśmy przekroje czynne i zdolności analizujące w szerokim zakresie kątów cząstek rejestrowanych [15,16,19,25,26,28,32,33,34,40,47,52,53,59]. W tych pomiarach zaprojektowałem, wykonałem i przetestowałem hodoskop ΔE wraz z układem do kalibracji detektorów scyntylacyjnych, współdziałałem w tworzeniu systemu akwizycji danych oraz uczestniczyłem w analizie danych pomiarowych. Wykonane zostały również pomiary rozszczepienia deuteronu dla bardzo małych kątów wylotu cząstek dzięki użyciu detektora germanowego GeWall w Instytucie Badań Naukowych (FZ) w Jülich, w Niemczech [36,50,57,60].

Słabe prądy prawoskrętne w rozpadzie beta

Pomiar ten miał na celu poszukiwanie słabych prądów prawoskrętnych w rozpadach spolaryzowanych jąder ^{12}N [6,9]. Mierzona była korelacja pomiędzy spinem jądra oraz pędem i skrętnością pozytonów pochodzących z rozpadu beta tegoż jądra. W ten sposób testowane były teorie rozszerzające Model Standardowy i zakładające istnienie prawoskrętnych prądów w oddziaływaniu elektroślabym. Oszacowano ograniczenie na prądy prawoskrętne w modelach lewo-prawo symetrycznych. Szczegóły tych modeli (*Left-right symmetric models*) zaprezentowane są w rozdziale 3.1.2 pracy habilitacyjnej.

W pomiarach użyta została wiązka spolaryzowanych protonów, która poprzez reakcję $^{12}\text{C}(\text{p},\text{n})^{12}\text{N}$ produkowała spolaryzowane jądra azotu-12. Pozytony pochodzące z rozpadu ^{12}N były mierzone przy użyciu spektrometru magnetycznego oraz detektorów scyntylacyjnych BaF_2 , co umożliwiło na policzenie odpowiednich asymetrii i korelacji. Moim udziałem była instalacja polarymetru mierzącego polaryzację wiązki protonowej, pomoc w instalacji układu detekcyjnego pozytonów oraz udział w pomiarach.

Egzotyczne sprzężenia w rozpadzie mionów

Celem tego, również już zakończonego projektu był pomiar poprzecznej polaryzacji pozytonów e^+ pochodzących z rozpadu dodatnich mionów μ^+ . Był to pierwszy pomiar szukający efektu niezachowania symetrii względem odbicia upływu czasu (*TRV*) w czystym rozpadzie leptonowym [12,13,20,21,22]. Model Standardowy zakłada istnienie wektorowych i pseudowektorowych (*V-A*) sprzężeń w oddziaływaniu elektroślabym. Fakt, że te oddziaływania są dominujące zostało wywnioskowane m.in. z badania rozpadu mionów. Dlatego też, proces rozpadu mionu jest szczególnie interesujący przy poszukiwaniu udziału innych

¹ Wszystkie odnośniki dotyczące publikacji odnoszą się do **Tabeli 1.** w dokumencie „Lista publikacji”.

sprzężeń (P , S , T), a w szczególności sprzężenia skalarnego (S). Rozważmy wpierw poprzeczną polaryzację pozytonów P_{T_1} , która jest prostopadła do ich pędu i równoległa do polaryzacji mionów. Według Modelu Standardowego wielkość ta powinna być równa zero dla dużych energii pozytonów oraz dążyć do $-1/3$ dla energii dążących do zera. Ta składowa polaryzacji jest związana z parametrem rozpadu η , który z kolei zależy od rzeczywistej części stałej sprzężenia g_{RR}^S reprezentującej skalarne, zmieniające ładunek oddziaływanie z prawoskrętnymi leptunami. Dodatkowo, może się w ogólności pojawić druga składowa polaryzacji poprzecznej P_{T_2} , która jest prostopadła zarówno do polaryzacji podłużnej P_L jak i do P_{T_1} . Jest ona zależna od urojonej części stałej sprzężenia g_{RR}^S . Dlatego też niezerowa wartość poprzecznej polaryzacji pozytonów pochodzących z rozpadu mionów jest znakiem udziału sprzężenia S w procesie rozpadu. Co więcej, dokładny pomiar wartości P_{T_1} umożliwi zwiększenie dokładności stałej sprzężenia Fermiego G_F natomiast niezerowa polaryzacja P_{T_2} jest miarą niezachowania symetrii względem odbicia czasu w oddziaływaniu słabym.

Głównym wyzwaniem w tym eksperymencie był pomiar polaryzacji pozytonów. Pomiar ten został wykonany w następujący sposób: Pozytony emitowane podczas rozpadu zahamowanych w tarczy berylowej mionów były śledzone przez wielodrutowe komory dryftowe, następnie anihilowały w zderzeniu ze spolaryzowanymi elektronami w namagnesowanej folii żelaznej. Powstałe kwanty γ były rejestrowane przez pozycyjnie czuły kalorymetr zbudowany ze scyntylatorów BGO. Zarejestrowane rozkłady kątowe promieniowania γ zależały od poprzecznej polaryzacji pozytonów. Otrzymano następujące wartości polaryzacji: $P_{T_1} = (6.3 \pm 7.7 \pm 3.4) \cdot 10^{-3}$, $P_{T_2} = (-3.7 \pm 7.7 \pm 3.4) \cdot 10^{-3}$, a stąd $\text{Re}[g_{RR}^S] = (-4.2 \pm 14.0 \pm 2.0) \cdot 10^{-3}$ oraz $\text{Im}[g_{RR}^S] = (5.2 \pm 14.0 \pm 2.4) \cdot 10^{-3}$ czyli wielkości zgodne z zerem w granicach niepewności pomiarowej. Moją rolą był współudział w tworzeniu i testowaniu systemu detektorów scyntylacyjnych (BGO), systemu elektroniki bazującej na magistrali FERA wraz z akwizycją danych oraz udział w przeprowadzaniu pomiarów.

Pomiar parametru R w rozpadzie beta

Brałem udział w trzech eksperymentach, których celem był pomiar parametru R w rozpadzie beta spolaryzowanych jąder ^8Li , ^{16}N oraz neutronu. W przypadku rozpadu neutronu mierzony był również parametr N . Parametry R oraz N określają udział w prawdopodobieństwie rozpadu W czynników związanych odpowiednio z potrójną i podwójną korelacją pomiędzy średnią polaryzacją rozpadających się cząstek (jąder lub neutronów) $\langle \vec{J} \rangle$ oraz pędem \vec{p}_e i spinem $\vec{\sigma}_e$ elektronów pochodzących z tegoż rozpadu:

$$W \propto R \vec{\sigma}_e \cdot (\langle \vec{J} \rangle \times \vec{p}_e) + N \vec{\sigma}_e \cdot \langle \vec{J} \rangle.$$

Niezerowa wartość parametru R świadczy o obecności procesów niezachowujących symetrię względem odwrócenia strzałki czasu (TRV) w rozpadzie beta. W minimalnej wersji Modelu Standardowego obecne są tylko wektorowe (V) i osiowe (A) części oddziaływania, natomiast pozostałe sprzężenia (S , T , P) znikają. Z tymi założeniami oba parametry, R i N , są równe zero. Niemniej jednak, istnieje możliwość znaczącego rozszerzenia standardowej teorii, które może się pojawić poprzez domieszkę egzotycznych skalarnych (S) i tensorowych (T) części oddziaływania, dozwolonych przez niezmienniczość Lorentza. Pomiarów parametrów R i N są szczególnie istotne, gdyż są one czułe odpowiednio na urojone i

rzeczywiste części sprzężeń S i T. Z eksperymentalnego punktu widzenia, parametry N i R są współczynnikami korelacji związanymi odpowiednio z P_{T_1} and P_{T_2} , gdzie P_{T_2} jest poprzeczną składową polaryzacji elektronów, która jest prostopadła do płaszczyzny rozpiętej przez spin rozpadającego się obiektu oraz pęd elektronu, natomiast P_{T_1} jest poprzeczną składową spinu zawartą w tej płaszczyźnie. Minimalny Model Standardowy przewiduje wartość zerową parametrów R i N , aczkolwiek oddziaływanie w stanie końcowym (*FSI*) powoduje, że wartość mierzona eksperymentalnie jest różna od zera.

Rozpad spolaryzowanych jąder ^8Li

Pierwszy eksperyment mierzył poprzeczną polaryzację elektronów powstałych w rozpadzie β spolaryzowanych jąder ^8Li . Uzyskana wartość parametru potrójnej korelacji R jest zgodna z zerem $R = (0.9 \pm 2.2) \cdot 10^{-3}$. Jest to, jak dotąd, najdokładniejsza wartość zmierzona dla rozpadu jąder atomowych [2,3,11,18]. W ramach tego eksperymentu byłem odpowiedzialny za polarymetr mierzący wektorową polaryzację wiązki deuteronowej - spolaryzowane jądra ^8Li były tworzone z wykorzystaniem zjawiska transferu polaryzacji w reakcji $^7\text{Li}(\mathbf{d},\text{p})^8\text{Li}$. Uczestniczyłem w konstruowaniu i testowaniu potrójnego teleskopu detektorów scyntylacyjnych $\delta E-\Delta E-E$ użytego do pomiaru polaryzacji elektronów we wstecznym rozpraszaniu Motta oraz, częściowo, w analizie danych pomiarowych.

Rozpad spolaryzowanych jąder ^{16}N

Celem następnego eksperymentu był pomiar parametru R w rozpadzie spolaryzowanych jąder ^{16}N znajdujących się w stanie podstawowym, a utworzonych poprzez wychwyty spolaryzowanych mionów μ^- w atomach ^{16}O [8]. Podłużnie spolaryzowane miony były przechwytywane na jedną z orbit atomu tlenu, następnie migrowały na orbitę najniższą, gdzie zachodziła reakcja z neutronem wewnątrz jądra azotu $\mu^- + n \rightarrow \mathbf{p} + \nu_\mu$. W ten sposób następował transfer polaryzacji z mionu do powstałego jądra ^{16}N , które znajdowało się w stanie podstawowym. Do analizy polaryzacji powstałego promieniowania z rozpadu jąder ^{16}N zastosowano wyrafinowaną metodę korzystającą z wielowarstwowych napyłanych tarcz, które były przesuwane, co umożliwiała na przestrzenne oddzielenie obszarów aktywacji i rozpadu oraz perfekcyjnie działającą technikę koincydencji β - γ . Powodzenie tego eksperymentu zależało od znajomości współczynnika transferu polaryzacji z mionów do jąder tlenu. Niestety, mimo uzasadnionych nadziei na niezależny pomiar tej wielkości przez wyspecjalizowaną grupę z Louvain w Belgii, jak dotąd nie udało się zmierzyć tej wielkości. Dlatego też pomiar ten nie został dokończony – jego realizacja czeka na wykonanie wymaganych pomiarów polaryzacyjnych w fizyce ciała stałego. Moim głównym zadaniem w tym projekcie był udział w stworzeniu układu detektorów scyntylacyjnych do pomiaru elektronów z rozpadu ^{16}O . Zaprojektowałem również część aparatury pomiarowej oraz brałem aktywny udział w przeprowadzeniu pomiarów oraz w analizie danych pomiarowych.

Rozpad swobodnych neutronów

Następny, zakończony z sukcesem projekt, jest pomiarem parametrów R i N w rozpadzie swobodnych neutronów [17,23,24,27,37,39,44,51,56,58]. Oddziaływanie *FSI* znacząco zwiększa mierzoną wartość parametru N do $N_{exp} = 0.068$ (w przypadku parametru R efekt *FSI* wynosi jedynie $R_{exp} = 0.006$). Dzięki temu, pomiar parametru N_{exp} pozwala również na weryfikację jakości działania systemu

pomiarowego. Wyniki naszego eksperymentu są cytowane przez Particle Data Group, jako jedyne pomiary parametrów R i N zmierzone w rozpadzie neutronu:

$$R = 0.004 \pm 0.012 \pm 0.005,$$

$$N = 0.067 \pm 0.011 \pm 0.004.$$

Trudność tego pomiaru ma dwa źródła: po pierwsze koniecznym jest wyeliminowanie bardzo dużego tła pochodzącego od elektronów powstałych w procesach wychwytu neutronów oraz na skutek konwersji kwantów γ . Po drugie, trzeba zmierzyć poprzeczną polaryzację elektronów z rozpadu neutronu, a więc elektronów o bardzo niskiej energii. Nic więc dziwnego, że pomiar ten nie został przeprowadzony przez pięćdziesiąt lat od momentu, gdy został po raz pierwszy zaproponowany w latach pięćdziesiątych dwudziestego wieku. Zminimalizowaliśmy tło poprzez wykonanie aparatury z lekkich (o niskiej liczbie atomowej) materiałów i wypełnienie przestrzeni, w której rozpadają się neutrony helium. Polaryzacja elektronów mierzona była w następujący sposób: elektrony powstałe w rozpadzie spolaryzowanych neutronów były rozpraszane na folii ołowianej; wykorzystaliśmy wsteczne rozpraszanie Motta do analizy poprzecznej polaryzacji elektronów – należało więc zmierzyć asymetrię wstecznego rozpraszania elektronów. Asymetrię tę znajduje się znając tor lotu elektronu przed i po rozpraszaniu Motta, co uzyskuje się korzystając z wielodrutowych komór proporcjonalnych. Elektron po rozpadzie musiał trzykrotnie przejść przez komory proporcjonalne zanim został zarejestrowany w hodoskopie plastikowych scyntylatorów. Oznacza to, że folie oraz mieszanka gazowa musiały mieć minimalną grubość, by zminimalizować straty energii elektronów. Uniemożliwiało to prowadzenie neutronów w próżni oraz wymagało przeprowadzenia badań na prototypowych komorach w celu optymalizacji ich geometrycznej budowy oraz składu mieszanki gazowej. Koniecznym było również zoptymalizowanie grubości folii Motta oraz rozmiarów hodoskopu. Wykonanie większości tych prac optymalizujących było moim zadaniem podczas rocznego pobytu na stypendium naukowym na Politechnice Federalnej w Zurychu (ETHZ) w latach 2000/2001 [17]. Podczas tego pobytu zbudowałem również z materiałów o niskiej liczbie atomowej konstrukcję umożliwiającą precyzyjny montaż prototypowego układu eksperymentalnego. Moja praca nad tym projektem została niestety przerwana przez półroczne zwolnienie chorobowe. W późniejszej fazie projektu zostałem odpowiedzialny za diagnostykę wiązki neutronowej, a w szczególności za pomiar polaryzacji neutronów [23]. Dodatkowo współtworzyłem system akwizycji danych, system kolimatorów neutronowych wraz z komorą prowadzenia wiązki neutronowej oraz częściowo uczestniczyłem w analizie danych pomiarowych. Pomiar ten został bardziej szczegółowo przedstawiony w rozdziale 2.3.2 pracy habilitacyjnej.

Pomiar elektrycznego momentu dipolowego neutronu oraz pomiary stowarzyszone

Pomiar elektrycznego momentu dipolowego (EDM) neutronu stanowi główną dziedzinę mojej działalności od 2005 roku i został szczegółowo opisany w pracy habilitacyjnej. Tutaj znajduje się jedynie krótki opis eksperymentu.

Niezerowa wartość EDM świadczy o naruszeniu parzystości \mathcal{P} oraz symetrii względem odwrócenia kierunku płynięcia czasu \mathcal{T} przez oddziaływania odpowiedzialne za istnienie danej cząstki. Co więcej, niezachowanie symetrii \mathcal{T} związane jest, w obliczu twierdzenia o zachowaniu symetrii złożonej \mathcal{CPT} , z niezachowa-

niem symetrii \mathcal{CP} , a to oznacza, że elektryczny moment dipolowy testuje różne aspekty oddziaływań elementarnych odpowiedzialnych za łamanie symetrii \mathcal{CP} . Znajomość tych procesów jest konieczna, by stworzyć spójne teorie oddziaływań elementarnych i wytłumaczyć takie zagadki, jak niezgodność pomiędzy zmierzonym, a wynikającym z obliczeń teoretycznych ilorazem liczby barionów do liczby fotonów promieniowania tła we wszechświecie, która sięga dziesięciu rzędów wielkości.

Zarówno Model Standardowy, jak i modele go rozszerzające (przede wszystkim modele supersymetryczne, Higgsa oraz lewo-prawo symetryczne) przewidują różne wartości elektrycznych momentów dipolowych. W przypadku neutronu różnice te sięgają ośmiu rzędów wielkości, a nawet osiemnastu, jeżeli wziąć pod uwagę przewidywania wynikające z chromodynamiki kwantowej przy założeniu, że czynnik θ (niezachowujący ani parzystości, ani symetrii względem odwrócenia czasu) jest w przybliżeniu równy jeden – ta niezgodność, to tak zwany „*strong CP-problem*”. Dlatego też pomiary EDM pozwalają na weryfikację różnych aspektów oddziaływań silnego i elektroslabego, biorących udział w konstrukcji cząstek elementarnych. Pomiary te są komplementarne do pomiarów rozpadu beta (parametrów R , D i czasu życia) oraz do pomiarów słabych prądów prawoskrętnych, gdzie testowane jest oddziaływanie elektroslabe. Znaczenie tych pomiarów dla rozwoju fizyki oddziaływań elementarnych jest porównywane do wysokoenergetycznych eksperymentów badających te oddziaływania w aspekcie produkcji cząstek.

Eksperyment, w który jestem zaangażowany, jest wykonywany we współpracy czterdziestu naukowców z trzynastu europejskich, renomowanych grup badawczych [29,42,48]. Jest on kontynuacją pomiaru RAL/Sussex/ILL, który dostarczył najdokładniejszego jak dotąd wyniku, i został przeprowadzony w Instytucie Laue-Lagevin (ILL) w Grenoble przez fizyków z Uniwersytetu w Sussex oraz z *Rutherford Appleton Laboratory* w Wielkiej Brytanii. Nasz pomiar również wykorzystuje rezonansową metodę Ramsaya dla ultrazimnych neutronów (UCN) swobodnych przechowywanych w próżni, ale jest wykonywany na nowym, dedykowanym dla tego pomiaru, intensywnym źródle zbudowanym w Instytucie Paula Scherrera (PSI) w Villigen w Szwajcarii. Obecny układ pomiarowy jest znacząco zmodernizowaną wersją układu stosowanego przez kolaborację RAL/Sussex/ILL:

- Użyte zostały nowsze materiały wyścielające komorę pomiarową, posiadające wysoką barierę potencjału Fermiego i dużo mniejsze prawdopodobieństwo strat neutronów przy zderzeniach ze ściankami komory. Dzięki temu ultrazimne neutrony mogą być przechowywane w komorze nawet przez 200 s, co umożliwia znaczące zwiększenie dokładności metody rezonansowej Ramseya.
- Magnetometry cezowe umożliwiają pomiar gradientów pola magnetycznego, co ma kapitalne znaczenie dla zmniejszenia niepewności systematycznych pomiaru.
- Nowe materiały izolujące pozwalają na zastosowanie silniejszego pola elektrycznego, co zwiększa siłę oddziaływania z elektrycznym momentem dipolowym neutronu i zwiększa czułość pomiaru.
- Nowy układ detekcyjny neutronów charakteryzuje się lepszą separacją sygnału neutronowego od sygnału tła oraz większą odpornością na przeciążenia. Co więcej, planowany w bliskiej przyszłości jednoczesny pomiar obu składowych spinu neutronów umożliwi zmniejszenie błędów systematycznych wynikających ze skończonej wydajności przerzutników spinu (spin-flipperów) oraz z wychwytem neutronów w pionowym neutronowodzie.

- Nowy algorytm analizy danych przeprowadzanych w trybie *on-line* został zaimplementowany w system akwizycji danych, co pozwala na zmniejszenie błędów systematycznych związanych z niestałością pola magnetycznego na zewnątrz i wewnątrz komory pomiarowej. Umożliwia to na przeprowadzenie pomiarów w warunkach maksymalnej jego czułości związanej z kształtem krzywej rezonansowej Ramseya.

W następnej fazie pomiaru wykorzystana będzie całkowicie nowa aparatura, która już obecnie jest budowana lub projektowana w oparciu o wyniki przeprowadzonych przez nas badań. Przewidywana dokładność wartości nEDM w obecnej fazie eksperymentu wynosi około $5 \cdot 10^{-27}$ e·cm, czyli sześciokrotnie dokładniej od najlepszego obecnie wyniku. W następnej fazie eksperymentu, po wybudowaniu nowej aparatury, dokładność pomiarów powinna być o następny rząd wielkości lepsza.

Moim głównym zadaniem, które zostało mi powierzone w eksperymencie nEDM jest zarządzanie pracami związanymi z systemem akwizycji danych oraz analizą danych, głównie tą, przeprowadzaną w trybie *on-line*. Oczywiście, uczestniczę również w pomiarach testowych oraz regularnych cyklach pomiarowych nEDM.

System akwizycji danych składa się z wielu podsystemów. Pewne niezależne układy, jak stabilizacja jasności wiązki światła odczytującej precesję atomów komagnetometru rtęciowego, czy kompensacja zmian zewnętrznego pola magnetycznego przy użyciu dedykowanego zestawu zewnętrznych cewek, jest zupełnie niezależna od cyklu pomiarowego i dlatego też jest kontrolowana niezależnymi programami typu *slow-control*. Inne systemy, jak kontrola magnetometrów cezowych, czy pomiar prądów upływu w układzie wysokiego napięcia, również działają niezależnie od cyklu pomiarowego, jednak zebrane przez te systemy dane muszą posiadać znakowanie czasowe, gdyż są używane w analizie danych pomiarowych. Ta grupa również jest kontrolowana przez niezależne programy typu *slow-control*. I wreszcie trzecia grupa, to programy kontrolujące elementy związane z cyklem pomiarowym: albo bezpośrednio, jak kontrola zaworów i zasuw neutronowych oraz generowanie impulsów oscylujących pól magnetycznych koniecznych do przeprowadzenia procedury Ramseya, albo związane pośrednio, jak zbieranie danych z komagnetometru rtęciowego i detektora neutronowego. Oprogramowanie związane z cyklem pomiarowym jest częścią szybką, która częściowo powinna funkcjonować w reżymie czasu rzeczywistego. Stworzone programy muszą działać w środowiskach posiadających zsynchronizowany czas; muszą w większym, lub mniejszym stopniu przekazywać sobie informacje, jak numer aktualnie mierzonego pomiaru oraz zapisywać dane mające wspólną strukturę. Ja jestem autorem kluczowego elementu całego systemu, czyli części szybkiej systemu akwizycji, odpowiedzialnej za sterowanie cyklem pomiarowym oraz systemem wysokiego napięcia. Napisałem również część programów typu *slow-control*, jak na przykład precyzyjny program kontrolujący przełącznik neutronów. Koordynuję również wszystkie inne prace związane z systemem DAQ.

Głównym problemem analizy danych w tak precyzyjnym eksperymencie jest bardzo wnikliwe rozpoznanie i oszacowanie wpływu źródeł niepewności systematycznych:

- Istotny wpływ mają gradienty pola magnetycznego oraz resztkowe, poziome składowe pól elektrycznego i magnetycznego. Wpływ tych czynników jest związany z ruchem neutronów wewnątrz komory pomiarowej. Po pierwsze, występuje efekt relatywistyczny polegający na tym, że neutron poruszający się z prędkością \vec{v} w polu elektrycznym \vec{E} odczuwa związane z tym ruchem

pole magnetyczne $B_v \propto \vec{v} \times \vec{E}$. Pionowa składowa tak wytworzonego pola magnetycznego zmienia znak wraz ze zmianą kierunku pola elektrycznego, co symuluje istnienie EDM. Po drugie, występuje tzw. efekt fazy geometrycznej polegający na tym, że neutron poruszający się wewnątrz zamkniętego pojemnika w swoim układzie odniesienia odczuwa horyzontalne składowe pola magnetycznego, jako pole rotujące, co powoduje zmianę częstości Larmora precesji spinu neutronu. Z kolei pionowy gradient pola magnetycznego powoduje, że średnie pole magnetyczne doświadczane przez neutrony oraz przez atomy rtęci jest różne, gdyż grawitacja przesuwa środek masy ultrazimnych neutronów 2.4 mm poniżej środka masy atomów rtęci. Dlatego pomiar pola magnetycznego wykonany przez komagnetometr rtęciowy musi zostać odpowiednio skorygowany.

- Innym źródłem błędów systematycznych są prądy upływu płynące pomiędzy elektrodami po powierzchni izolatora, które są źródłem małych, lokalnych pól magnetycznych we wnętrzu komory pomiarowej. Pionowe składowe tych pól dodają się do głównego pola magnetycznego i zmieniają znak wraz ze zmianą polaryzacji pola elektrycznego symulując w ten sposób obecność elektrycznego momentu dipolowego. Użycie silnego pola elektrycznego (do 12 kV/cm) powoduje również powstanie silnej, przyciągającej siły elektrostatycznej pomiędzy elektrodami, która powoduje delikatne zniekształcenie izolatora i zmianę odległości pomiędzy elektrodami, a w efekcie zmianę natężenia pola elektrycznego w komorze pomiarowej.
- Pomiar precesji atomów komagnetometru rtęciowego za pomocą silnej wiązki światła również wprowadza pewną niepewność związaną z polem magnetycznym wytwarzanym przez tę wiązkę, co powoduje przesunięcie częstotliwości precesji badanych atomów (efekt *light shift*).

Czułość eksperymentu zależy od dokładności analizy danych prowadzonej podczas działania eksperymentu (w trybie *on-line*) oraz od przyjętej metody analizowania danych związanych z rezonansową krzywą Ramsey'a (w trybie *off-line*). Analiza danych typu *on-line* została opracowana i zaimplementowana w system DAQ głównie przeze mnie. Natomiast wspomniana wyżej część analizy *off-line*, ze względu na jej podstawowe znaczenie, jest rozwijana niezależnie przez dwie grupy z naszej kolaboracji. Pierwszą tworzą fizycy z laboratoriów francuskich, a drugą jest grupa polsko-szwajcarska, którą tworzy nasza grupa z Uniwersytetu Jagiellońskiego oraz fizycy pracujący w PSI.

Wstępne pomiary testowe zostały wykonane jeszcze w ILL w Grenoble. Jesienią 2011 roku rozpoczęliśmy z sukcesem wykonywać testowe pomiary z nowym źródłem ultrazimnych neutronów w PSI w Villigen, w Szwajcarii. W 2012 roku wykonano pierwszy, dwutygodniowy pomiar elektrycznego momentu dipolowego neutronu. W 2013 roku przewidziane jest wykonanie dwustudniowego pomiaru EDM neutronu. Nasza obecna dokładność nie jest jeszcze konkurencyjna, co wynika z krótkiego czasu pierwszego pomiaru, i pozwala na ograniczenie EDM neutronu do $d_n < 1.25 \cdot 10^{-25} e \cdot \text{cm}$. Pod koniec 2013 roku powinniśmy otrzymać dokładność na poziomie wyniku grupy RAL/Sussex z eksperymentu w ILL, a w 2014 zakładaną dla obecnej fazy pomiaru dokładność $5 \cdot 10^{-27} e \cdot \text{cm}$.

Źródło ultrazimnych neutronów w PSI

Moja działalność nie ograniczała się jedynie do udziału w przygotowywaniu eksperymentu mierzącego EDM neutronu. Brałem również udział w zbudowaniu w PSI źródła ultrazimnych neutronów. W tym celu zbadanych zostało wiele mate-

riałów i metod produkcji UCN [31,35,45,46,54]. W szczególności badano metody tworzenia kryształów stałego deuteru będącego w stanie „orto”, w którym molekula D_2 posiada spin zerowy, co pozwala na super-termiczną produkcję UCN. Mój udział polegał na tworzeniu systemu akwizycji danych oraz na udziale w przeprowadzeniu pomiarów. Źródło zostało uruchomione w 2011 roku, jednak ciągle nie osiągnęło docelowej wydajności, co jest naturalne, gdyż zastosowana technika jest nowatorska w sensie rozwiązań technologicznych i proces optymalizacji działania źródła jest planowany na kilka lat.

Świat zwierciadlany

Podczas testów aparatury pomiarowej przeprowadzanych w ILL w Grenoble dokonano pomiarów umożliwiających policzenie ciekawych, poszukiwanych ostatnio coraz intensywniej, obserwabli. A mianowicie, oszacowaliśmy ograniczenie na stałą czasową oscylacji $\tau_{nn'}$ pomiędzy zwykłymi neutronami, a neutronami z hipotetycznego świata zwierciadlanego: $\tau_{nn'} > 12$ s przy założeniu istnienia zwierciadlanego pola magnetycznego oraz $\tau_{nn'} > 103$ s bez tego założenia [30,41,43]. Pomysł istnienia świata zwierciadlanego powstał w latach pięćdziesiątych dwudziestego wieku, jako reakcja na odkrycie niezachowania parzystości w oddziaływaniu słabym. Aby uratować symetrię praw natury Lee i Yang, a później Kobzarev, Okun i Pomeranchuk postulowali istnienie świata słabo oddziałującego z naszym i posiadającego przeciwne własności symetrii. Pomysł ten na nowo znalazł wielu zwolenników w związku z poszukiwaniem ciemnej materii. Jeżeli ta hipoteza byłaby prawdziwa, to wtedy ilość ultrazimnych neutronów wewnątrz zamkniętego pojemnika powinna maleć nie tylko na skutek ich rozpadu i wychwytu, ale również poprzez ich oscylację pomiędzy światem zwykłym i zwierciadlanym. Takie procesy byłyby możliwe dzięki degeneracji stanów neutronów w obu światach możliwej przy braku zewnętrznego oddziaływania (grawitacja jest tu pomijana, jako zbyt słaba). Można również założyć, że układ pomiarowy znajduje się w zewnętrznym, kosmicznym, zwierciadlanym polu magnetycznym. Wtedy takie oscylacje powinny być skorelowane z ruchem obrotowym Ziemi oraz z wielkością normalnego pola magnetycznego, które musiałyby być niezerowe, by doprowadzić do degeneracji stanów neutronu zwykłego i zwierciadlanego. Uzyskane przez nas wyniki spowodowały wyraźne ożywienie, również eksperymentalne, w tym egzotycznym temacie.

Niezmienniczość transformacji Lorentza

Przetestowaliśmy również niezmienniczość transformacji Lorentza w oddziaływaniu cząstki z hipotetycznym polem elektromagnetycznym, którego źródłem jest postulowana przez Colladay'a i Kostelecky'iego w 1997 roku, fundamentalna anizotropia Wszechświata. Hipoteza ta zakłada, że obecne w pierwotnym Wszechświecie niezachowanie symetrii powinno pozostawić swój ślad w strukturze Wszechświata i powinno zakłócać jego jednorodność założoną w transformacji Lorentza. Z jednej strony skutki takich niejednorodności powinny być obserwowalne metodami kosmologicznymi. Z drugiej strony, eksperymenty badające zależność od wyróżnionego kierunku oddziaływania cząstek elementarnych z polem elektromagnetycznym takie jak: porównanie zegarów atomowych, czy wielkość elektrycznego i magnetycznego momentu dipolowego cząstki też powinny być czułe na ewentualne niezachowanie transformacji Lorentza. Potencjał oddziaływania badanej cząstki musi być w takim przypadku wzbogacony o wyrazy oddziaływania z kosmicznym elektrycznym lub magnetycznym polem osiowym oraz dipolowym, czyli z polem wyróżniającym kierunek w przestrzeni. Istnienie takich pól powinno powodować oscylacje mierzonych pa-

rametrów skorelowanych z rytmem dobowym lub rocznym. Nasze pomiary zostały przeprowadzone na testowej aparaturze w ILL, gdzie przeprowadziliśmy pierwszy pomiar EDM neutronu z ultrazimnymi neutronami oraz komagnetometrem rtęciowym. Oszacowaliśmy, że modulacja wartości EDM neutronu jest mniejsza od $1.0 \cdot 10^{-24}$ e·cm dla cyklu 12 godzinnego i $1.4 \cdot 10^{-24}$ e·cm dla cyklu 24-godzinnego [38,49]. Oszacowaliśmy również dobową niejednorodność zegara neutronowego w stosunku do zegara rtęciowego (^{199}Hg) na mniejszą od $0.4 \cdot 10^{-6}$ (96% CL) [55].

Korelacje spinowe w rozpraszaniu Møllera

Najnowszy projekt, w którym jestem zaangażowany poza eksperymentem nEDM oraz badaniami nad układami kilkuciałowymi jest pomiar funkcji korelacji spinowych w rozpraszaniu Møllera w regionie ultrarelatywistycznym. Celem jest weryfikacja twierdzenia Bella dotyczącego paradoksu Einsteina-Podolskiego-Rosena (EPR), którzy założyli istnienie tak zwanego realizmu lokalnego. Twierdzenie Bella stanowi, że konsekwencją realizmu lokalnego są statystyczne korelacje pomiędzy mierzonymi obserwabłami, które są sprzeczne z mechaniką kwantową. Zarejestrowanie takich korelacji byłoby więc dowodem na niekompletność mechaniki kwantowej. Dotychczas przeprowadzone eksperymenty potwierdziły przewidywania mechaniki kwantowej dla fotonów oraz ciężkich cząstek. Naszym zamiarem jest pomiar korelacji spinowych elektronów, a w szczególności zależność tych korelacji od energii elektronów w regionie relatywistycznym, gdzie spodziewane są znaczące i nieoczywiste efekty. Pomiar ma wykorzystywać wsteczne rozpraszanie Motta do analizy polaryzacji rozproszonych elektronów.

Podsumowanie

Reasumując, jestem specjalistą w zakresie fizyki doświadczalnej jądrowej i cząstek elementarnych niskich energii. W szczególności mam doświadczenie w przeprowadzaniu precyzyjnych pomiarów bardzo małych (tzw. „zerowych”) obserwabli odpowiadających efektom niezachowania podstawowych symetrii w przyrodzie, takich jak łamanie symetrii \mathcal{T} , czy \mathcal{CP} . Moje doświadczenie obejmuje zarówno budowę układów detekcyjnych (systemów detektorów scyntylacyjnych i półprzewodnikowych oraz komór drutowych), budowę systemów akwizycji danych korzystając z różnych języków programowania (C, C++, Fortran, LabVIEW, LabWindows) na różnych platformach (Microsoft Windows, Linux, VxWorks) w reżymie normalnym oraz czasu rzeczywistego, precyzyjną analizę danych pomiarowych, symulację procesów fizycznych, jak i zarządzanie zespołem badawczym. W sumie mam 60 publikacje recenzowanych, które były cytowane 585 razy oraz indeks Hirscha 16. Poza tym mam różnorodne i dobrze oceniane doświadczenie dydaktyczne obejmujące prowadzenie wykładów, ćwiczeń, laboratoriów i opieki nad studentami w zakresie fizyki i informatyki.