

Załącznik nr 2

## AUTOREFERAT

**Badanie nuklidów w okolicy  $^{78}\text{Ni}$  mających znaczenie  
astrofizyczne**

Chiara Mazzocchi

Zakład Fizyki Jądrowej Instytutu Fizyki Doświadczalnej,

Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

## Spis treści

<b>1</b>	IMIĘ I NAZWISKO	3
<b>2</b>	POSIADANE DYPLOMY, STOPNIE NAUKOWE	3
<b>3</b>	INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH	3
3.1	STYPENDIA	4
<b>4</b>	WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA WYNIKAJĄCEGO Z ART. 16 UST. 2 USTAWY Z DNIA 14 MARCA 2003 R. O STOPNIACH NAUKOWYCH I TYTULE NAUKOWYM O STOPNIACH I TYTULE W ZAKRESIE SZTUKI (Dz. U. NR 65, POZ 595 ZE ZM.).	4
4.1	TYTUŁ OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO	4
4.2	PUBLIKACJE WYBRANE DLA HABILITACJI	4
4.3	OMÓWIENIE CELU NAUKOWEGO WW. PRAC I OSIĄGNIĘTYCH WYNIKÓW WRAZ Z OMÓWIENIEM ICH EWENTUALNEGO WYKORZYSTANIA	5
<b>5</b>	OMÓWIENIE POZOSTAŁYCH OSIĄGNIĘĆ NAUKOWO-BADAWCZYCH	15
5.1	ZAINTERESOWANIA NAUKOWE PRZED UKOŃCZENIEM STUDIÓW DOKTORANCKICH	15
5.2	ZAINTERESOWANIA NAUKOWE PO ZAKOŃCZENIU STUDIÓW DOKTORANCKICH	17
5.3	DALSZE PLANY I PERSPEKTYWY BADAŃ	24
5.4	RECENZOWANIE PUBLIKACJI W CZASOPISMACH	25
5.5	KOORDYNACJA PROJEKTÓW	25
5.6	LISTA REFERATÓW	27
5.6.1	REFERATY NA ZAPROSZENIE	27
5.6.2	REFERATY	28
5.6.3	SEMINARIA	30
5.6.4	INNE REFERATY	31
5.6.5	PLAKATY	33

## 1 IMIĘ I NAZWISKO

Chiara Mazzocchi

## 2 POSIADANE DYPLOMY, STOPNIE NAUKOWE

- 18 lipca 2002 r.: Stopień naukowy doktora nauk przyrodniczych (*Doktor der Naturwissenschaften*), specjalność fizyka jądrowa, Uniwersytet w Mainz (Johannes Gutenberg - Universität Mainz), Niemcy. Praca doktorska: “*Decay studies of nuclei near the proton drip-line*” (Badanie rozpadów jąder w okolicy linii odpadania protonów). Promotor Prof. Ernst Roeckl.
- 13 października 1998 r.: mgr fizyki (*Laurea in Fisica*), Uniwersytet w Mediolanie (Università degli Studi di Milano), Mediolan, Włochy. Praca magisterska: “*Il decadimento esotico del  $^{242}\text{Cm}$  per emissione di cluster di silicio*” (Rozpad egzotyczny  $^{242}\text{Cm}$  z emisją klastra krzemu). Opiekun: Prof. Roberto Bonetti.

## 3 INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH

- Od stycznia 2011 r.: adiunkt na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego (FUW), Warszawa, Polska.
- Październik 2010 r. – grudzień 2010 r.: nauczyciel akademicki na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego (FUW), Warszawa, Polska.
- Listopad 2006 r. – wrzesień 2010 r.: staż po-doktorski (*assegno di ricerca*) na Wydziale Fizyki Uniwersytetu w Mediolanie, Mediolan, Włochy.
- Wrzesień 2003 r. – październik 2006 r.: staż po-doktorski na Wydziale Fizyki i Astronomii Uniwersytetu w Tennessee, Knoxville, TN, USA.
- Lipiec 2002 r. – maj 2003 r.: staż po-doktorski w Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI), Darmstadt, Niemcy.
- Czerwiec 1999 r. – lipiec 2002 r.: doktorantka w GSI-Darmstadt oraz na Uniwersytecie w Mainz, Niemcy.
- Październik 1998 r. – maj 1999 r.: współpracownik naukowy w Instytucie Fizyki Stosowanej Ogólnej (IFGA) Uniwersytetu w Mediolanie, Mediolan, Włochy.
- 2007 – 2014: kilka dłuższych pobytów (od 1 tygodnia do 1 miesiąca) w najważniejszych międzynarodowych laboratoriach, takich jak Oak Ridge National Laboratory - USA; National Superconducting Cyclotron Laboratory, Michigan State University - USA; GSI-Darmstadt - Niemcy; CERN-ISOLDE - Szwajcaria;

Institut Laue-Langevin w Grenoble - Francja; Japanese Atomic Energy Agency w Tokai - Japonia; JINR-Dubna - Rosja.

### 3.1 STYPENDIA

- Czerwiec 1999 r. - maj 2001 r. : stypendium Uniwersytetu w Mediolanie na pobyt w GSI - Darmstadt, Niemcy i kształcenie w dziedzinie doświadczalnej fizyki jądrowej.

## 4 WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA WYNIKAJĄCEGO Z ART. 16 UST. 2 USTAWY Z DNIA 14 MARCA 2003 R. O STOPNIACH NAUKOWYCH I TYTULE NAUKOWYM O STOPNIACH I TYTULE W ZAKRESIE SZTUKI (DZ. U. NR 65, POZ 595 ZE ZM.).

### 4.1 TYTUŁ OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO

#### **Badanie nuklidów w okolicy $^{78}\text{Ni}$ mających znaczenie astrofizyczne**

### 4.2 PUBLIKACJE WYBRANE DLA HABILITACJI

- (A) **C. Mazzocchi**, R. Grzywacz, J.C. Batchelder, C.R. Bingham, D. Fong, J.H. Hamilton, J.K. Hwang, M. Karny, W. Królas, S.N. Liddick, A.F. Lisetskiy, P.F. Mantica, A.C. Morton, W.F. Mueller, K.P. Rykaczewski, M. Steiner, A. Stolz and J.A. Winger,  
“*Low energy structure of even-even Ni isotopes close to  $^{78}\text{Ni}$* ”,  
2005, Phys. Lett. B **622**, 45.
- (B) **C. Mazzocchi**, K.P. Rykaczewski, R. Grzywacz, P. Bączyk, C. Bingham, N.T. Brewer, C.J. Gross, C. Jost, M. Karny, A. Korgul, M. Madurga, A.J. Mendez II, K. Miernik, D. Miller, S. Padgett, S.V. Paulauskas, D.W. Stracener, M. Wolińska-Cichocka,  
“ *$\beta$ -decay properties of the very neutron-rich isotopes  $^{86}\text{Ge}$  and  $^{86}\text{As}$* ”,  
2015, Phys. Rev. C. **92**, 054317.
- (C) **C. Mazzocchi**, R. Surman, R. Grzywacz, J.C. Batchelder, C.R. Bingham, D. Fong, J.H. Hamilton, J.K. Hwang, M. Karny, W. Królas, S.N. Liddick, P.F. Mantica, A.C. Morton, W.F. Mueller, K.P. Rykaczewski, M. Steiner, A. Stolz,

J.A. Winger and I.N. Borzov,  
“*New half-lives of very neutron-rich iron isotopes*”,  
2013, Phys. Rev. C **88**, 064320.

- (D) **C. Mazzocchi**, K.P. Rykaczewski, A. Korgul, R. Grzywacz, P. Bączyk, C. Bingham, N.T. Brewer, C.J. Gross, C. Jost, M. Karny, M. Madurga, A.J. Mendez II, K. Miernik, D. Miller, S. Padgett, S.V. Paulauskas, D.W. Stracener, M. Wolińska-Cichocka and I.N. Borzov,  
“*New half-life measurements of the most neutron rich arsenic and germanium isotopes*”,  
2013, Phys. Rev. C **87**, 034315.
- (E) **C. Mazzocchi**, R. Grzywacz, J.C. Batchelder, C.R. Bingham, D. Fong, J.H. Hamilton, J.K. Hwang, M. Karny, W. Królas, S.N. Liddick, P.F. Mantica, A.C. Morton, W.F. Mueller, K.P. Rykaczewski, M. Steiner, A. Stolz and J.A. Winger,  
“*Beta-delayed  $\gamma$ -and neutron emission near the double shell closure at  $^{78}\text{Ni}$* ”,  
2005, Eur. Phys. J. **A25**, s01, 93.
- (F) **C. Mazzocchi**, A. Korgul, K.P. Rykaczewski, R. Grzywacz, P. Bączyk, C.R. Bingham, N.T. Brewer, C.J. Gross, C. Jost, M. Karny, M. Madurga, A.J. Mendez II, K. Miernik, D. Miller, S. Padgett, S.V. Paulauskas, D.W. Stracener, M. Wolińska-Cichocka,  
“*Beta decay of the most neutron-rich isotopes close to  $^{78}\text{Ni}$* ”,  
2015, Acta Phys. Pol. **B46**, 713.

Od tego miejsca, publikacje wybrane dla habilitacji będą oznaczane literami (A), ..., (F).

### 4.3 OMÓWIENIE CELU NAUKOWEGO WW. PRAC I OSIĄGNIĘTYCH WYNIKÓW WRAZ Z OMÓWIENIEM ICH EWENTUALNEGO WYKORZYSTANIA

**Motywacja** Od 10-15 lat nuklidy z obszaru  $^{78}\text{Ni}$  cieszą się dużym zainteresowaniem fizyków jądrowych. Ciągłe jednak struktura jąder z tego obszaru nie została dobrze poznana. Z jednej strony, wiele badań doświadczalnych dostarcza dowodów, że  $^{78}\text{Ni}$  jest jądrem podwójnie-magicznym. Z drugiej strony jest to obszar, gdzie są obserwowane efekty typowe dla jąder zdeformowanych. Modele teoretyczne opisujące własności jąder w tej części mapy nuklidów przewidują, że znaczny nadmiar neutronów w układzie jądrowym może wpływać na oddziaływanie nukleon-nukleon i w konsekwencji zmienić układ przerw energetycznych i wartości liczb magicznych ustalonych dla jąder bliskich

ścieżki trwałości. Źródłem tych efektów może być szczególna postać oddziaływań resztkowych w bardzo asymetrycznych układach protonowo-neutronowych<sup>1)</sup>. Obserwowany w ostatnich latach postęp w badaniach eksperymentalnych jąder z okolic  $^{78}\text{Ni}$  był możliwy dzięki dostępności intensywnych wiązek wytwarzanych w laboratoriach wykorzystujących metodę fragmentacji oraz w układach opartych o technikę ISOL. Dalsza eksploracja tego obszaru mapy nuklidów w kierunku jąder o coraz większym nadmiarze neutronów w obecnie istniejących laboratoriach jest coraz trudniejsza. Istotny postęp w tego typu badaniach będzie możliwy po uruchomieniu, obecnie budowanych, nowoczesnych laboratoriów produkcji jąder egzotycznych. Z tego powodu, obecnie prowadzone badania eksperymentalne skupiają się na szczegółowym poznawaniu struktury jądrowej, umożliwiającym lepsze zrozumienia zjawisk fizycznych kształtujących budowę jąder w obszarze  $^{78}\text{Ni}$ .

Nowe dane eksperymentalne dla tego typu egzotycznych nuklidów pozwalają testować zdolności przewidywania modeli teoretycznych. Do opisu własności nuklidów z obszaru podwójnie magicznego jądra  $^{78}\text{Ni}$  wykorzystywany jest model powłokowy. Jedną z trudności na jakie napotykają obliczenia modelu powłokowego prowadzone dla jąder o  $N \leq 50$  i  $Z \leq 28$  jest duża liczba neutronów walencyjnych w rachunkach prowadzonych w przestrzeni orbitali *fp**g*. Złożoność tych obliczeń powoduje, że ich weryfikacja eksperymentalna staje się jeszcze bardziej istotna<sup>2),3),4),5)</sup>. Dobrymi wzorcami do sprawdzenia przewidywań teoretycznych są nuklidy sąsiadujące z podwójnie magicznym  $^{78}\text{Ni}$ .

W parzysto-parzystych jądrach blisko podwójnie-magicznych powłok, sekwencja wzbudzonych stanów yrast może być wyjaśniona jako prosta konsekwencja krótkozasięgowej natury oddziaływań jądrowych. Jądra, które mogą być opisane jako układ dwóch identycznych cząstek/dziur poza zamkniętą powłoką, na orbitalu o wysokim *j*, powinny się charakteryzować podobnym widmem energii stanów wzbudzonych, z maksymalnym spinem równym  $J=2j-1$ . W jądrach tych oczekuje się istnienia mikrosekundowych stanów izomerycznych, których wydłużony czas życia jest spowodowany niewielką różnicą energii wzbudzenia poziomów o spinach *J* i *J*-2 i stanowi wskazanie zamknięcia powłoki. Tego rodzaju stany izomeryczne są obserwowane w jądrach o  $N = 50$  w rejonie  $^{100}\text{Sn}$ , w których protony zapełniają orbitę  $\pi g_{9/2}$ <sup>6)</sup>. Podobnie w parzysto-parzystych izotopach niklu o  $40 < N < 50$ , w których neutrony obsadzają orbital  $\nu g_{9/2}$ , oczekuje się występowania stanów izomerycznych o spinie  $J^\pi=8^+$ . Przewidywanie to znalazło potwierdzenie doświadczalne. Badania struktury nisko leżących stanów wzbudzonych izotopów niklu mogą być prowadzone nie tylko poprzez spektroskopię stanów izome-

<sup>1</sup>T. Otsuka et al., Eur. Phys. J. A 13 (2002) 69.

<sup>2</sup>K. Langanke et al., Phys. Rev. C 63 (2001) 032801(R)

<sup>3</sup>T. Otsuka et al., Acta Physica Polonica 36 (2005) 1213.

<sup>4</sup>T. Papenbrock et al., Phys. Rev. C 69 (2004) 024312

<sup>5</sup>K. Sieja and F. Nowacki, Phys. Rev. C 81, 061303(R) (2010)

<sup>6</sup>R. Grzywacz et al., Phys. Lett. B 355 (1995)439.

rycznych, ale także poprzez badania przemiany  $\beta$  neutrono-nadmiarowych izotopów kobaltu (publikacja (A) ).

O ile badania i zrozumienie struktury neutrono-nadmiarowych izotopów niklu mają istotne znaczenie dla potwierdzeniu magiczności  $^{78}\text{Ni}$ , to badania jąder o  $N > 50$  i  $Z > 28$  pozwalają przetestować jakość przewidywań teoretycznych dla układów, w których do rdzenia  $^{78}\text{Ni}$  dodano nukleony walencyjne. Zostało to zilustrowane w publikacjach (B) i (F).

Jądra z okolic  $^{78}\text{Ni}$  są interesujące nie tylko ze względu na swoją strukturę jądrową, ale także ze względu na ich znaczenie w modelowaniu astrofizycznego procesu syntezy pierwiastków na drodze szybkiego wychwytu neutronów, czyli tzw. procesu  $r$ . Proces ten, który zachodzi podczas wybuchu gwiazd, rozpoczyna się od wielokrotnego wychwytu neutronów przez jądra żelaza z pobliza  $^{78}\text{Ni}$ . Wychwyty neutronów są kontynuowane aż do momentu wystąpienia przemiany  $\beta$ , co prowadzi do zmiany liczby atomowej, następnie zachodzą kolejne wychwyty neutronu, kolejna przemiana  $\beta$  itd. W procesie  $r$  jest produkowana około połowa jąder cięższych od żelaza <sup>7),8),9)</sup>. Środowisko astrofizyczne, w którym proces  $r$  może się rozwijać nie zostało jeszcze jednoznacznie zidentyfikowane. Jasne jest jednak, że ścieżka procesu  $r$  przebiega poprzez sekwencję wychwyty neutronów i rozpadów  $\beta$  jąder neutrono-nadmiarowych, znacznie odległych od ścieżki trwałości  $\beta$ . Pomiar podstawowych własności takich jak masa, czas życia oraz prawdopodobieństwo emisji opóźnionych neutronów dla setki nuklidów leżących na ścieżce procesu  $r$  nie jest możliwy. Wiele z nich jest zbyt egzotycznych, aby mogły być zbadane eksperymentalnie. Dlatego do określenia ich własności jądrowych muszą być zastosowane wiarygodne modele teoretyczne. Ograniczenie niepewności przewidywań modeli jądrowych wykorzystywanych w opisie procesu  $r$  pozwoli na lepsze rozróżnienie pomiędzy różnymi astrofizycznymi scenariuszami przebiegu tego procesu (publikacje (C), (D) oraz (E) ).

Modele używane w obliczeniach sieci reakcji/przemian jądrowych, takich jak np. obliczenia przebiegu procesu  $r$ , są modelami globalnymi. Jednym z nich jest tzw. *Gross Theory* opisująca przemiany  $\beta$  jąder atomowych. Innym szeroko stosowanym modelem jest model masowy *Finite-Range Droplet Model* (FRDM) uzupełniony o obliczenia prowadzone w przybliżeniu QRPA z empirycznym rozmyciem funkcji nasilenia dla przejść  $\beta$  typu Gamowa-Tellera (*GT*) oraz *Gross Theory* do opisu przejść wzbronionych pierwszego rzędu (FRDM+QRPA) <sup>10)</sup>. Obliczenia typu FRDM+QRPA są jednymi z najczęściej wykorzystywanych do przewidywania własności stanów podstawowych jąder neutrono-nadmiarowych. Wartości czasów życia przewidywane przez ten model dla jąder leżących na ścieżce procesu  $r$  różnią się jednak od wartości zmierzonych przynajmniej o czynnik 5. Kolejnym modelem wykorzystywanym do przewidywania wła-

<sup>7</sup>E. M. Burbidge, G. R. Burbidge, W. A. Fowler, and F. Hoyle, *Rev. Mod. Phys.* 29, 547 (1957).

<sup>8</sup>M. Arnould, S. Goriely, and K. Takahashi, *Phys. Rep.* 450, 97 (2007).

<sup>9</sup>K. Langanke and G. Martínez-Pinedo, *Rev. Mod. Phys.* 75, 819 (2003).

<sup>10</sup>P. Möller et al., *Phys. Rev. C* 67 (2003) 055802.

sności stanów podstawowych, nasilenia przejść  $GT$  i przejść wzbronionych pierwszego rzędu dla jąder neutrono-nadmiarowych są obliczenia samozgodne oparte o funkcjonal gęstości energii oraz przybliżenie continuum-QRPA (CQRPA)<sup>11)</sup>. Ostatnio tego typu obliczenia zostały wykorzystane do prognozowania czasów życia silnie neutrono-nadmiarowych izotopów cynku i galu. W rachunkach tych wykorzystano nowy funkcjonal gęstości energii DF3a<sup>12)</sup>, zoptymalizowany dla neutrono-nadmiarowych izotopów z okolic  $N = 50$  i  $N = 82$ . Obliczenia procesu  $r$  wykonane z wykorzystaniem modelu DF3a-CQRTPA wykazują znaczną poprawę zgodności przewidywanego rozpowszechnienia izotopów o  $A > 140$  z danymi obserwacyjnymi<sup>13)</sup>. Warunki astrofizyczne, w których produkowane są lżejsze jądra ( $A \sim 80$ ) nie zostały dobrze zidentyfikowane<sup>14)</sup>. Przypuszcza się, że powstają one w tzw. słabym procesie  $r$ <sup>15)</sup>. Analiza procesu  $r$  w tym obszarze jest dodatkowo skomplikowana przez niepewności własności jądrowych egzotycznych nuklidów uczestniczących w tym procesie. Zagadnienia te zostały przedyskutowane w pracach (C), (D) oraz (E).

Cykl publikacji stanowiący podstawę habilitacji dotyczy przedstawionej powyżej problematyki. W pracy (A) zweryfikowano i wyjaśniono pojawianie się i zanikanie izomerów  $8^+$  w izotopach  $^{72,74,76}\text{Ni}$  oraz zbadano strukturę nisko leżących stanów wzbudzonych tych jąder zasilanych w rozpadach  $\beta$  izotopów kobaltu. W pracach (B) i (F) po raz pierwszy zbadano strukturę nisko leżących stanów wzbudzonych  $^{86}\text{As}$  populowanych w rozpadzie  $\beta$   $^{86}\text{Ge}$ . Uzyskano również nowe informacje o rozpadzie  $^{86}\text{As}$ . W pracach (A), (C) i (D) po raz pierwszy wyznaczono czasy życia silnie neutrono-nadmiarowych izotopów  $^{72}\text{Fe}$ ,  $^{74}\text{Co}$  i  $^{86}\text{Ge}$ , przeprowadzono dokładniejsze pomiary czasów życia  $^{71-73}\text{Co}$ ,  $^{84,85}\text{Ge}$  oraz  $^{84-87}\text{As}$ . W pracy (E) po raz pierwszy wyznaczono prawdopodobieństwa emisji opóźnionych neutronów w rozpadzie  $\beta$  izotopów  $^{71-74}\text{Co}$ .

**Osiągnięcia** Głównym osiągnięciem zaprezentowanym w cyklu publikacji (A)-(F) było scharakteryzowanie własności jąder w okolicy  $^{78}\text{Ni}$ . Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone w laboratoriach oferujących najlepsze warunki prowadzenia pomiarów: w *National Superconducting Cyclotron Laboratory* (NSCL) w *Michigan State University* (East Lansing, MI, USA) oraz w *Holifield Radioactive Ion Beam Facility* (HRIBF) w *Oak Ridge National Laboratory* (Oak Ridge, TN, USA). W laboratoriach tych wykorzystywane są różne metody produkcji (odpowiednio reakcja fragmentacji i rozszczepienie) oraz separacji egzotycznych izotopów (separacja “w locie” oraz metoda ISOL).

Poszczególne eksperymenty zaplanowano tak, aby zapewnić optymalne warunki prowadzenia pomiarów tzn. uzyskać odpowiednią intensywność i czystość separowa-

<sup>11</sup>I.N. Borzov, Phys. Rev. C 67 (2003) 025802.

<sup>12</sup>S.V. Tolokonnikov and E.S. Saperstein, Phys. At. Nucl. 73 (2010) 1684.

<sup>13</sup>M. Madurga, ..., C. Mazzocchi, ..., Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 112501.

<sup>14</sup>A. Arcones and F. Montes, Astrophys. J. 731, 5 (2011).

<sup>15</sup>R. Surman et al., Astrophys. J. 679 (2008) L117



nej wiązki pożądaných izotopów oraz wysoką wydajność układu detekcji. Neutrono-nadmiarowe izotopy pierwiastków o  $Z < 28$  charakteryzują się małym prawdopodobieństwem produkcji w procesie rozszczepienia ciężkiej tarczy (np.  $^{238}\text{U}$ ). Dlatego jądra  $^{72}\text{Fe}$ ,  $^{71-74}\text{Co}$  oraz  $^{76}\text{Ni}$  były wytwarzane w reakcji fragmentacji wiązki  $^{86}\text{Kr}$  o energii 140 A·MeV na grubej tarczy  $^9\text{Be}$  i separowane przy użyciu separatora fragmentów A1900 w NSCL. Szczegóły zostały opisane w pracach (A), (C) oraz (E). Izotopy germanu i arsenu o liczbach masowych  $A \sim 80$  leżą w obszarze maksimum produkcji w reakcji rozszczepienia i są produkowane w tym procesie ze znacznie większą wydajnością niż w reakcji fragmentacji. Z tego powodu badania rozpadów  $\beta$  jąder  $^{84-86}\text{Ge}$  i  $^{84-87}\text{As}$  przeprowadzono w laboratorium HRIBF, w którym do produkcji tych izotopów wykorzystano reakcję rozszczepienia  $^{238}\text{U}$ , indukowanego oddziaływaniem z wiązką protonów. Kluczowe znaczenie dla powodzenia tych badań miała opracowana w HRIBF metoda separacji czystych izotopowo wiązek germanu, w której wykorzystano procesy chemiczne zachodzące w źródle jonów oraz dwustopniową separację masową. Wiązka protonów uderzała w tarczę  $^{238}\text{UC}_x$  umieszczoną wewnątrz źródła jonów do którego dodany był siarkowodór ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Izotopy  $^A\text{Ge}$  oraz  $^A\text{As}$  dyfundowały na zewnątrz materiału tarczy w postaci molekuł  $^A\text{Ge}^{32}\text{S}^+$  i  $^A\text{As}^{32}\text{S}^+$ , podczas gdy inne produkty rozszczepienia (np. izotopy bromu i selenu) nie tworzyły molekuł siarczku. Na pierwszym etapie separacji masowej wybierana była masa  $A + 32$ . W ten sposób eliminowane były zanieczyszczenia izobarami o liczbie masowej  $A$  tych pierwiastków, które nie tworzą molekuł siarczku. Następnie wiązka izotopów o liczbie masowej  $A + 32$  przechodziła przez komorę wymiany ładunkowej w której następowało rozbicie molekuł siarczku germanu. Drugi stopień separacji masowej selekcionował masę  $A$ . Dzięki temu eliminowane były zanieczyszczenia izobarami o  $A + 32$  (np. izotopami srebra intensywnie produkowanymi w reakcji rozszczepienia) obecnymi w wiązce po pierwszym etapie separacji masowej. Stosowana w HRIBF metoda separacji czystych izotopowo wiązek germanu i arsenu została szczegółowo opisana w pracach (B), (D) oraz (F).

Zarówno w laboratorium NSCL jak i w HRIBF wykorzystywano wydajne układ detekcji promieniowania jądrowego. W NSCL zidentyfikowane jądra badanych izotopów były zatrzymywane w dwustronnie segmentowanym, krzemowym detektorze paskowym (DSSSD) otoczonym przez układ germanowych detektorów promieniowania  $\gamma$  (SeGA). Czasowe i przestrzenne korelacje pomiędzy zaimplantowanym jónem i jego rozpadem  $\beta$  pozwalały narzucić warunek koincydencyjny na widma promieniowania  $\gamma$  rejestrowane przez układ detektorów SeGA. W HRIBF monoizotopowa wiązka badanych jąder była zatrzymywana na powierzchni taśmy transportującej, która cyklicznie odsuwała zebraną aktywność. Punkt implantacji był otoczony przez dwa detektory scyntylicyjne, które służyły do rejestracji cząstek  $\beta$  oraz cztery detektory germanowe typu clover ustawione w geometrii zapewniającej maksymalną wydajność rejestracji promieniowania  $\gamma$ .

W NSCL poszukiwano mikrosekundowych stanów izomerycznych parzysto-parzystych izotopów niklu oraz badano strukturę nisko leżących stanów wzbudzonych tych

jąder. Po raz pierwszy zidentyfikowano stan izomeryczny  $^{76}\text{Ni}$  o spinie  $8^+$  i czasie życia  $T_{1/2}=590_{-110}^{+180}$  ns. Zaobserwowano cztery przejścia  $\gamma$  związane z rozpadem tego izomeru, które zidentyfikowano jako przejścia pomiędzy stanami  $0^+-2^+-4^+-6^+-8^+$  w paśmie zbudowanym na stanie podstawowym  $^{76}\text{Ni}$ . W izotopach  $^{72,74}\text{Ni}$  analogiczne stany nie zostały zaobserwowane. Strukturę niskoenergetyczną tych izotopów zbadano wykorzystując rozpady  $\beta$   $^{72,74}\text{Co}$  do nisko wzbudzonych stanów w jądrach końcowych. Poprzednio znany schemat rozpadu  $^{72}\text{Co}$  <sup>16)</sup> został potwierdzony poprzez pomiar koincydencji  $\beta - \gamma - \gamma$ . W badaniach rozpadu  $\beta$   $^{74}\text{Co}$  zidentyfikowano poprzednio nieznanne stany  $2^+$  i  $4^+$  należące do pasma stanu podstawowego  $^{74}\text{Ni}$ . Zaobserwowane widma energii wzbudzenia zostały porównane z wynikami obliczeń modelu powłokowego przeprowadzonych z dwoma różnymi oddziaływaniami szczytkowymi: S3V <sup>17)</sup> oraz NR78 <sup>18)</sup>. Szczegóły tych obliczeń zostały omówione w pracy (A). Obliczenia wykonane z oddziaływaniami S3V przewidują istnienie izomerów  $8^+$  w parzystych izotopach  $^{70-76}\text{Ni}$  a także w  $^{78}\text{Zn}$ . Dominującym składnikiem funkcji falowej tych stanów jest wzbudzenie pary neutronów  $(g_{9/2})^2$ . Wyniki obliczeń przeprowadzonych z oddziaływaniem S3V nie są zgodne z danymi eksperymentalnymi <sup>16)</sup>. Obliczenia z empirycznie dopasowanym oddziaływaniem NR78 <sup>18)</sup> dobrze opisują dane eksperymentalne dla  $^{72}\text{Ni}$  oraz  $^{74}\text{Ni}$ .

Na rysunku 1 została przedstawiona systematyka znanych eksperymentalnie nisko leżących stanów wzbudzonych parzystych izotopów  $^{70-76}\text{Ni}$  wraz z przewidywaniami modelu powłokowego z oddziaływaniami S3V i NR78. Istnienie stanu izomerycznego  $J=8^+$   $^{76m}\text{Ni}$  z różnicą energii poziomów  $E(8^+)-E(6^+)=144$  keV oraz małym  $B(E2,8^+\rightarrow 6^+)=0.7_{-0.1}^{+0.2}$  W.u., wskazuje na dużą czystość stanów  $8^+$  i  $6^+$ . Oznacza to, że  $N = 50$  jest zamkniętą powłoką w obszarze  $^{78}\text{Ni}$ . Obliczenia teoretyczne wykonane z oddziaływaniem NR78 dobrze opisują energie wzbudzenia stanów  $2^+$  i  $4^+$  w jądrach  $^{70-76}\text{Ni}$ . Te same obliczenia wyjaśniają nieobecność stanu izomerycznego  $8^+$  w jądrach  $^{72,74}\text{Ni}$ . Obniżenie energii drugiego stanu  $6^+$  z dwoma rozerwanymi parami neutronów  $g_{9/2}$  (seniority  $\nu=4$ ) poniżej pierwszego stanu  $8^+$  ( $\nu=2$ ), do energii bliskiej energii wzbudzenia pierwszego stanu  $6^+$  ( $\nu=2$ ) otwiera równoległy i szybszy kanał deekscytacji stanu  $8^+$ . W obliczeniach przeprowadzonych z oddziaływaniem S3V, stan  $6^+(\nu=2)$  jest położony około 200 keV powyżej stanu  $8^+$  (rysunek 1), który pozostanie izomerem. Szczegóły zostały przedstawione w pracy (A). Kontynuując te badania, zaproponowałam wspólnie ze współpracownikami <sup>19)</sup> oraz samodzielnie <sup>20)</sup> eksperymenty mające na celu lepsze poznanie własności innych neutrono-nadmiarowych izotopów niklu. Pierwszy z nich dostarczył nowych informacji o nisko leżących stanach wzbudzonych

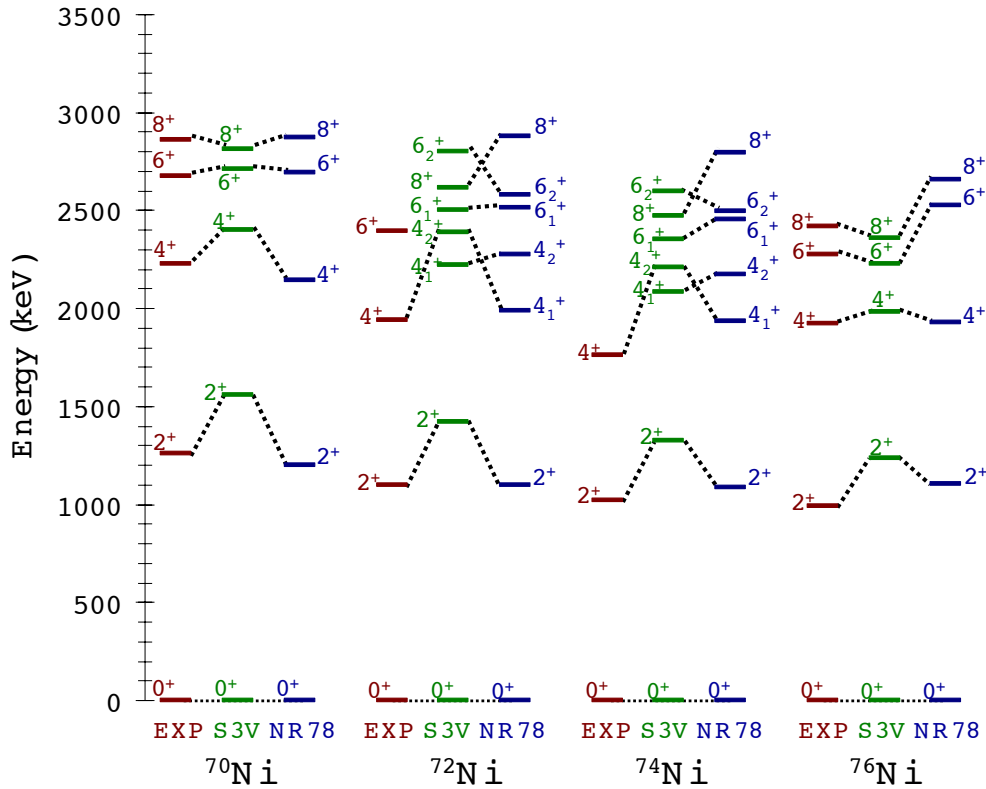
<sup>16)</sup>M. Sawicka et al., Phys. Rev. C 68 (2003) 044304.

<sup>17)</sup>H. Grawe, Nucl. Phys. A704 (2002) 211c.

<sup>18)</sup>A.F. Lisetskiy et al., Phys. Rev. C 70 (2004) 044314.

<sup>19)</sup>“Neutron single-particle states and  $\beta$ -delayed neutron branching ratios near  $^{78}\text{Ni}$ ”, proposal number E05020 at NSCL (MSU), 2005

<sup>20)</sup>“Identification of excited states in  $^{75}\text{Ni}$ ”, proposal number E10027 at NSCL (MSU), 2010.



Rysunek 1: Systematyka eksperymentalnych energii nisko leżących stanów wzbudzonych parzysto-parzystych izotopów niklu (EXP) wraz z przewidywaniami modelu powłokowego z oddziaływaniem S3V<sup>17)</sup> oraz NR78<sup>18)</sup>.

<sup>71,73</sup>Ni<sup>21)</sup> oraz <sup>72</sup>Ni<sup>22)</sup>. Drugi eksperyment, wykonany w 2014 roku i obecnie nadal analizowany, miał na celu identyfikację nieznanych dotychczas stanów wzbudzonych <sup>75</sup>Ni populowanych w przemianie  $\beta$  <sup>75</sup>Co.

W celu zbadania jak zmieniają się własności jądrowe wraz z oddalaniem się od zamkniętej powłoki  $Z = 28$ , zaproponowałam zbadanie rozpadu  $\beta$  neutrono-nadmiarowego izotopu <sup>86</sup>Ge<sup>23)</sup>. Eksperyment, który został przeprowadzony w HRIBF, dostarczył pierwszych informacji o własnościach rozpadu  $\beta$  jąder <sup>86</sup>Ge oraz o stanach wzbudzonych <sup>86</sup>As. Udało się również rozszerzyć istniejący schemat stanów wzbudzonych <sup>86</sup>Se.

<sup>21</sup>M.M. Rajabali, R. Grzywacz, S.N. Liddick, C. Mazzocchi, ..., Phys. Rev. C **85** 2012 034326.

<sup>22</sup>M.M. Rajabali, R. Grzywacz, S.N. Liddick, C. Mazzocchi, ..., J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **41** (2014) 115104.

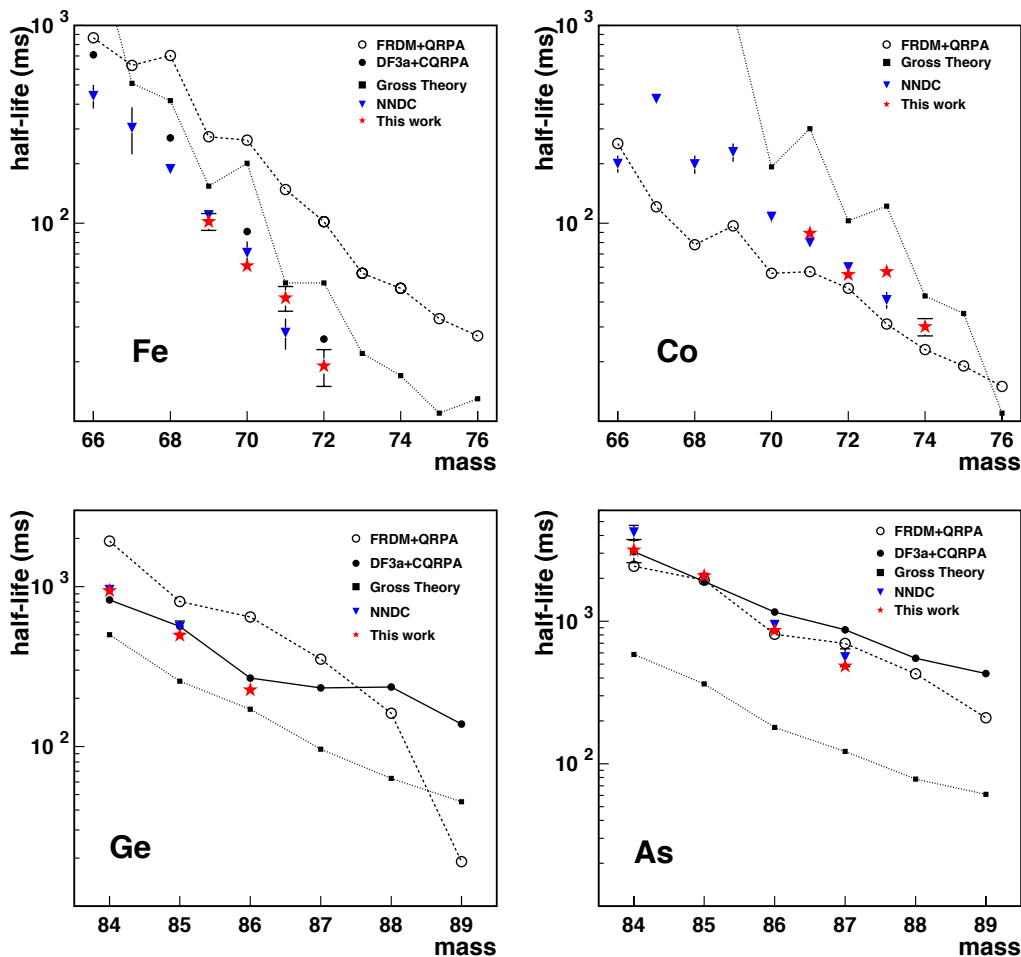
<sup>23</sup>“Decay spectroscopy of accelerated beam components: A test of the sensitivity of the ranging-out technique - Half-life measurement of <sup>86,87</sup>Ge”, proposal number RIB128 at HRIBF (ORNL), 2004.

Część analizy danych została wykonana w ramach pracy magisterskiej p. Pawła Bączyka na Wydziale Fizyki UW pod moją opieką<sup>24)</sup>. Wyniki badania  $^{86}\text{As}$  i  $^{86}\text{Se}$  zostały zinterpretowane w ramach zaawansowanego modelu powłokowego. Stwierdzono, że obliczenia poprzednio dobrze opisujące strukturę  $^{84}\text{Ge}$  i  $^{85}\text{Ge}$  nie były w stanie odtworzyć wszystkich eksperymentalnie określonych cech schematów rozpadu  $^{86}\text{As}$  i  $^{86}\text{Se}$ . Prawdopodobnie zastosowane w obliczeniach oddziaływanie nie opisuje poprawnie ewolucji struktury układów, w których kolejne protony i neutrony są dodawane do rdzenia  $^{78}\text{Ni}$ . W ramach modelu powłokowego przeprowadzono również obliczenia rozpadu  $GT$  jąder  $^{86}\text{Ge}$  i  $^{86}\text{As}$ . Te silnie neutrono-nadmiarowe izotopy charakteryzują się dużymi wartościami energii rozpadu  $Q_\beta$  i małymi energiami separacji neutronu  $S_n$  w jądrach potomnych. Rozpad  $GT$  tych jąder może zachodzić jedynie pomiędzy neutronami na orbitalach  $fp$  i odpowiadającymi im stanami protonowymi o tych samych wartościach orbitalnego momentu pędu. W obrazie jednocząstkowym, walencyjne neutrony obsadzające orbitale  $d_{5/2}$  i  $s_{1/2}$  nie mogą rozpadać się na drodze przemiany  $GT$  z powodu ograniczenia wartości  $Q_\beta$ . Ponieważ neutronowe orbitale  $fp$  uczestniczące w rozpadzie są silnie związane, przejścia  $GT$  zasilają głównie wysoko wzbudzone stany w jądrze potomnym. Nisko leżące stany są zasilane poprzez przejścia wzbronione. Wyniki obliczeń teoretycznych porównane z danymi eksperymentalnymi otrzymanymi w ramach tej pracy, pokazują, że do poprawnego opisu własności badanych jąder konieczna jest modyfikacja obecnie stosowanych oddziaływań efektywnych. Szczególnie istotne znaczenie w opisie własności tych jąder odgrywają oddziaływania resztkowe protonów i neutronów. Szczegóły zostały przedstawione w pracach (B) i (F).

Znaczącym osiągnięciem programu badań jąder z okolic  $^{78}\text{Ni}$  były pomiary czasów życia nuklidów z tego obszaru. W laboratorium NSCL zbadano rozpady neutrono-nadmiarowych izotopów żelaza i kobaltu, produkowanych w reakcji fragmentacji wiązki  $^{86}\text{Kr}$ . Po raz pierwszy zmierzono czas życia  $^{72}\text{Fe}$  ( $T_{1/2}=19\pm 4$  ms) i  $^{74}\text{Co}$  ( $T_{1/2}=30\pm 3$  ms). Ponownie wyznaczono czasy połowicznego zaniku  $^{71-73}\text{Co}$  i  $^{69-71}\text{Fe}$ . Rozpady  $\beta$  neutrono-nadmiarowych izotopów germanu i arsenu były badane w HRIBF, gdzie jądra te były produkowane w reakcji rozszczepiania  $^{238}\text{U}$  i separowane z wykorzystaniem techniki ISOL. Po raz pierwszy określono eksperymentalnie czas połowicznego zaniku  $^{86}\text{Ge}$  ( $T_{1/2}=226\pm 21$  ms). Ponownie wyznaczono szybkości rozpadu  $^{84,85}\text{Ge}$  i  $^{84-87}\text{As}$ . Wyznaczone w pracach (C) i (D) czasy życia  $^{69,70}\text{Fe}$ ,  $^{71,72}\text{Co}$  i  $^{84,85}\text{Ge}$  i  $^{84-87}\text{As}$  są zgodne z wynikami poprzednich pomiarów (NNDC<sup>25)</sup>), w przypadku izotopów  $^{71}\text{Fe}$ ,  $^{73}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Ge}$  i  $^{87}\text{As}$  znacznie zmniejszono niepewności szybkości rozpadów. Na rysunku 2 porównano wyniki pomiarów czasów życia z przewidywaniami Gross-Theory, obliczeń FRDM+QRPA oraz modelu DF3a+CQRPA. W przypadku nuklidów o  $Z>28$  i  $N>50$ , *Gross Theory* systematycznie zawyża szybkość rozpadu  $\beta$ . Przewidywania modeli opartych o przybliżenie QRPA wykazują generalnie lepszą zgodność z danymi doświadczal-

<sup>24</sup>P. Bączyk, "Beta decay of very neutron-rich germanium isotopes", Master thesis, University of Warsaw, 2013 (in English)

<sup>25</sup>[www.nndc.bnl.org](http://www.nndc.bnl.org)



Rysunek 2: Wartości czasu połowicznego zaniku dla neutrono-nadmiarowych izotopów żelaza, kobaltu germanu i arsenu. Wyniki eksperymentalne uzyskane w tej pracy (czerwone gwiazdy), porównano z danymi z literatury (NNDC<sup>25</sup>), niebieskie trójkąty), obliczeniami teoretycznymi FRDM+QRPA<sup>10</sup> (otwarte koła), DF3a+CQRPA<sup>11), 12)</sup> (koła) oraz *Gross Theory* (czarne kwadraty). Linie poprowadzono dla pokazania trendu.

nymi. W szczególności, obliczenia DF3a-CQRPA poprawnie przewidują czasy życia izotopów cynku, galu i germanu oraz, z mniejszą dokładnością, izotopów arsenu. Model DF3a-CQRPA działa poprawnie również w przypadku jąder leżących poniżej zamkniętych powłok  $Z=28$  i  $N=50$ . Pozytywnej weryfikacji tego modelu dostarczyły wyznaczone po raz pierwszy wartości czasów życia  $^{72}\text{Fe}$  oraz  $^{86}\text{Ge}$ , dobrze odtwarzane w ob-

liczeniach DF3a+CQRPA. Model FRDM-QRPA przeszacowuje czasy życia neutrono-nadmiarowych izotopów żelaza nawet o rząd wielkości, w lepszej zgodności z danymi doświadczalnymi są przewidywania *Gross Theory*. W przypadku izotopów kobaltu model FRDM+QRPA niedoszacowuje, a *Gross Theory* przeszacowuje czasy życia o czynnik 2-3. Systematyczne badania modeli teoretycznych pod kątem zdolności przewidywania własności stanów podstawowych egzotycznych nuklidów wskazują na konieczność dalszego ich udoskonalania. Konieczne jest zbudowanie modeli następnej generacji, umożliwiających przewidywanie własności zarówno jąder bliskich zamkniętej powłoki  $N = 50$  jak i nuklidów oddalonych od powłok magicznych.

Na obecnym etapie badań, za najbardziej wiarygodne należy uznać przewidywania modelu DF3a+CQRPA. Wielkości przewidywane przez ten model zostały wykorzystane jako parametry wejściowe w obliczeniach rozpowszechnienia pierwiastków produkowanych w astrofizycznym procesie  $r$ . Stwierdzono znacznie lepszą zgodność obliczonego rozpowszechnienia pierwiastków o  $A > 140$  z danymi doświadczalnymi, w porównaniu z wynikami obliczeń przeprowadzonych z wykorzystaniem przewidywań modelu FRDM-QRPA<sup>13)</sup>. Przeanalizowano wpływ nowych danych o czasach życia neutrono-nadmiarowych izotopów żelaza na wyniki symulacji tzw. słabego procesu  $r$  (*weak  $r$ -process*), odpowiedzialnego za produkcję jąder o  $A \sim 80$ . Niepewności znajomości czasów życia  $^{69-72}\text{Fe}$  wpływają nie tylko na niepewności przewidywania rozpowszechnienia tych izotopów, są również źródłem nieokreśloności obliczanego rozpowszechnienia cięższych nuklidów. Aby zbadać te zależności przeprowadzono obliczenia, w których wykorzystano pakiet programów do symulacji procesów nukleosyntezy opisanych w pracy Surman et. al.<sup>15)</sup> oraz parametryzację wiatru materii wywołanego neutronami, która dobrze opisuje rozpowszechnienie izotopów z obszaru  $A \sim 80$  w Układzie Słonecznym. Porównanie obliczeń wykonanych z teoretycznymi (FRDM+QRPA) wartościami czasów życia  $^{69-72}\text{Fe}$  i realistyczną oceną ich niepewności (czynnik 5) z symulacjami wykonanymi z eksperymentalnie wyznaczonymi czasami życia pokazują redukcję niepewności przewidywań rozpowszechnienia procesu  $r$  (praca (C)).

Badania własności stanów podstawowych neutrono-nadmiarowych nuklidów z obszaru  $^{78}\text{Ni}$  obejmowały również poszukiwania emisji neutronów opóźnionych w rozpadach jąder  $^{71-74}\text{Co}$ . Pierwsze wskazania obecności tego kanału rozpadu w przemianach  $\beta$  tych izotopów otrzymano analizując widma promieniowania  $\gamma$  emitowanego w przemianie  $\beta$  tych jąder. W widmach promieniowania  $\gamma$  rejestrowanego w koincydencji z cząstkami  $\beta$  oprócz znanych linii  $\gamma$ , odpowiadających przejściom w jądrach - produktach rozpadu  $\beta$ , zidentyfikowano przejścia w jądrach powstałych po emisji neutronu ze stanu wzbudzonego zasilanego w przemianie  $\beta$  rozpadającego się nuklidu. Analiza tych widm umożliwiła określenie dolnych ograniczeń prawdopodobieństw rozpadów z emisją neutronów opóźnionych (praca (E)). Kontynuując program badań emisji neutronów opóźnionych w obszarze mapy nuklidów leżącym tuż nad  $^{78}\text{Ni}$ , zaproponowałam dwa

eksperymenty w laboratorium ILL-Grenoble<sup>26),27)</sup>. Projekty te są w trakcie realizacji.

## 5 OMÓWIENIE POZOSTAŁYCH OSIĄGNIĘĆ NAUKOWO-BADAWCZYCH

### 5.1 ZAINTERESOWANIA NAUKOWE PRZED UKOŃCZENIEM STUDIÓW DOKTORANCKICH

**Praca magisterska.** Pracę magisterską w dziedzinie doświadczalnej fizyki jądrowej wykonałam w Instytucie Fizyki Stosowanej Ogólnej (IFGA) na Uniwersytecie w Mediolanie w grupie prof. Bonetti'ego. Tematem mojej pracy magisterskiej było badanie zjawiska rozpadu promieniotwórczego z emisją klastra, tzn. przemiany jądrowej polegającej na spontanicznej emisji ciężkiego jądra ze stanu podstawowego rozpadającego się nuklidu. W szczególności zajmowałam się badaniem eksperymentalnym i analizą teoretyczną rozpadu  $^{242}\text{Cm}$  do  $^{208}\text{Pb}$  poprzez emisję klastra  $^{34}\text{Si}$ . Klaster  $^{34}\text{Si}$  jest najcięższym dotychczas zaobserwowanym jądrem spontanicznie emitowanym ze stanu podstawowego rozpadającego się jądra. W porównaniu z innymi kanałami rozpadu  $^{242}\text{Cm}$ , tzn. rozpadem  $\alpha$  i spontanicznym rozszczepieniem, emisja klastra  $^{34}\text{Si}$  jest procesem niezwykle mało prawdopodobnym. Stosunki rozgałęzień wynoszą odpowiednio:  $^{34}\text{Si}/\alpha=10^{-16}$ ,  $^{34}\text{Si}/\text{SF}=6\times 10^{-8}$ . W eksperymencie, w którym zaobserwowano emisję klastra  $^{34}\text{Si}$  z  $^{242}\text{Cm}$  wykorzystano detektory śladowe. Detektory te charakteryzują się istnieniem minimalnej wartości ładunku jonu, który może być zarejestrowany oraz wysoką wydajnością rejestracji jonów o ładunkach wyższych niż progowy. W badaniach rozpadu  $^{242}\text{Cm}$  wykorzystano detektory śladowe wykonane ze szkła fosforanowego, które nie jest czułe na cząstki  $\alpha$ . Jony o wyższych liczbach atomowych poruszając się w materiale detektora wywołują trwałe zmiany w jego strukturze. Poprzez odpowiednią obróbkę chemiczną ślady zarejestrowanych cząstek mogą być powiększone do rozmiarów umożliwiających ich obserwację przy pomocy mikroskopu optycznego.

Moja praca magisterska<sup>28)</sup> obejmowała zarówno przeprowadzenie kalibracji układu detekcyjnego, analizę detektorów śladowych przy użyciu sterowanego komputerowo mikroskopu jak i wykonanie obliczeń teoretycznych umożliwiających interpretację otrzymanych wyników<sup>29)</sup>. Rachunki teoretyczne przeprowadziłam we współpracy z prof.

<sup>26)</sup>“Measurement of  $\beta$ -delayed neutron properties of fission fragments”, proposal number 3-01-584 at ILL Grenoble, 2011.

<sup>27)</sup>“Beta-delayed neutron properties of fission fragments”, proposal number 3-01-594 at ILL Grenoble, 2011.

<sup>28)</sup>A.A. Ogloblin, ..., C. Mazzocchi, ..., Phys. Rev. C61 (2000) 034301.

<sup>29)</sup>C. Mazzocchi *et al.*, Phys. Rev. C61 (2000) 047304.

Raj K. Gupta z Panjab University, Chandigarh, Indie. Porównanie prawdopodobieństw rozpadu z emisją klastra przewidywanych przez różne modele pokazało, że badania emisji ciężkich klastrów umożliwiającą ocenę przydatności stosowanych modeli teoretycznych: wydaje się, że modele kolektywne lepiej niż modele mikroskopowe przewidują prawdopodobieństwa rozpadów jąder z emisją ciężkich klastrów. Po zakończeniu pracy magisterskiej kontynuowałam współpracę z IFGA m.in. zaznajamiając kolejnego magistranta z techniką analizy danych z detektorów śladowych.

**Praca doktorska** Moja praca doktorska dotyczyła badania rozpadów bardzo egzotycznych neutrono-deficytowych nuklidów z okolic podwójnie magicznych jąder  $^{56}\text{Ni}$  i  $^{100}\text{Sn}$ : rozpadu  $\beta$   $^{50}\text{Ni}$  <sup>30</sup> i  $^{60}\text{Ga}$  <sup>31</sup> oraz rozpadu  $\alpha$   $^{114}\text{Ba}$  <sup>32</sup>.  $^{60}\text{Ga}$  jest najlżejszym związanym izotopem galu, natomiast  $^{114}\text{Ba}$  jest ciągle najlżejszym znanym eksperymentalnie izotopem baru. W mojej rozprawie doktorskiej po raz pierwszy zaobserwowane zostały rozpad  $^{50}\text{Ni}$  i  $^{60}\text{Ga}$ . Po raz pierwszy wyznaczony został czas życia  $^{50}\text{Ni}$ , zaobserwowano rozpad tego izotopu z emisją opóźnionych protonów i wyznaczono prawdopodobieństwo zachodzenia tego procesu. Badania rozpadu  $^{60}\text{Ga}$  dostarczyły pierwszych informacji o czasie życia tego izotopu oraz prawdopodobieństwie jego rozpadu z emisją opóźnionych protonów i opóźnionych cząstek  $\alpha$ . Pomiar promieniowania  $\gamma$  emitowanego po rozpadzie  $\beta$   $^{60}\text{Ga}$  umożliwiły identyfikację Izobarycznego Stanu Analogowego w  $^{60}\text{Zn}$ . Dzięki temu i znajomości (systematyki) energii przesunięcia kulombowskiego możliwe było półempiryczne wyznaczenie masy stanu podstawowego  $^{60}\text{Ga}$ . Znajomość czasu życia i masy  $^{60}\text{Ga}$  okazały się być istotne w analizie przebiegu astrofizycznego procesu szybkiego wychwytu protonów (proces  $rp$ ).

Przypuszcza się, że proces  $rp$  jest odpowiedzialny za syntezę protono-nadmiarowych izotopów pierwiastków leżących pomiędzy żelazem i tellurem. Jeśli czas życia nuklidu leżącego na ścieżce procesu  $rp$  jest długi, jego bieg zostaje spowolniony. Takie nuklidy nazywane są "punktami oczekiwania" (ang. "*waiting points*"). Istotnymi wielkościami determinującymi przebieg procesu  $rp$  są energie separacji protonu ( $S_p$ ) dla izotopów galu. Wielkości te określają: (i) dla którego izotopu cynku wychwycony proton nie jest natychmiast odrywany wskutek fotodysocjacji izotonu galu ze słabo związanym protonem oraz (ii) dla którego izotopu cynku proces  $rp$  może kontynuować swój bieg w kierunku cięższych pierwiastków poprzez szybki wychwyt protonów. W szczególności wartości  $S_p$  dla  $^{60}\text{Ga}$  i  $^{61}\text{Ga}$  określają do jakiego stopnia stosunkowo długożyjące jądro  $^{60}\text{Zn}$  ( $T_{1/2}=2.4$  min.), stanowiące potencjalnie "punkt oczekiwania" na ścieżce procesu  $rp$ , może być ominięte poprzez wychwyt protonu przez  $^{59}\text{Zn}$  lub  $^{60}\text{Zn}$ . Obliczenia wykonane z wartością  $S_p$  dla  $^{60}\text{Ga}$  bliską wartości wyznaczonej w mojej rozprawie doktorskiej pokazały, że z powodu niskiej wartości energii wiązania protonu w  $^{60}\text{Ga}$ , jedynie niewielka część syntezy pierwiastków w procesie  $rp$  przebiega poprzez  $^{60}\text{Ga}$ ,

<sup>30</sup>C. Mazzocchi *et al.*, Eur. Phys. J. A17 (2003) 519.

<sup>31</sup>C. Mazzocchi *et al.*, Eur. Phys. J. A12 (2001) 269.

<sup>32</sup>C. Mazzocchi *et al.*, Phys. Lett. B532 (2002) 29.



dominująca ścieżka wiedzie poprzez rozpad  $\beta$   $^{59}\text{Zn}$ .

Podjęte w mojej rozprawie doktorskiej badania rozpadu  $^{114}\text{Ba}$  doprowadziły do identyfikacji rozpadu  $\alpha$  tego izotopu i następującej po nim sekwencji przemian  $\alpha$   $^{110}\text{Xe} \rightarrow ^{106}\text{Te} \rightarrow ^{102}\text{Sn}$ . Pomiary energii cząstek  $\alpha$  oraz prawdopodobieństwa zachodzenia tej przemiany dla  $^{114}\text{Ba}$  umożliwiły wyznaczenia zredukowanej szerokości ( $W_\alpha$ ) dla rozpadu  $\alpha$  tego izotopu. Zwiększona, w stosunku do oczekiwań, wartość  $W_\alpha$  wskazała na “superdozwolony” charakter rozpadu  $\alpha$   $^{114}\text{Ba}$ . Pod koniec studiów doktoranckich, wspólnie ze współpracownikami, zaproponowałam eksperyment będący kontynuacją programu badań rozpadu  $\alpha$  w rejonie  $^{100}\text{Sn}$  <sup>33</sup>). Uzyskane wyniki dostarczyły nowych informacji o rozpadach  $\alpha$   $^{110}\text{Xe}$  oraz  $^{106}\text{Te}$  i pozwoliły na lepsze zrozumienia własności rozpadów  $\alpha$  w obszarze  $^{100}\text{Sn}$  <sup>34</sup>).

Jądro  $^{114}\text{Ba}$  było wymieniane jako kandydat do obserwacji rozpadu z emisją klastra  $^{12}\text{C}$ . Prawdopodobieństwo tej egzotycznej przemiany bardzo silnie zależy od energii dostępnej w rozpadzie. Obliczenia teoretyczne wykorzystane do określenia tej wielkości przewidywały znacznie różniące się wartości. Pomiary energii rozpadów  $\alpha$  w łańcuchu  $^{114}\text{Ba} \rightarrow ^{110}\text{Xe} \rightarrow ^{106}\text{Te} \rightarrow ^{102}\text{Sn}$  umożliwiły eksperymentalne wyznaczenie energii dostępnej w rozpadzie  $^{114}\text{Ba}$  z emisją klastra  $^{12}\text{C}$ . Znajomość tej wielkości umożliwiła weryfikację modeli przewidujących prawdopodobieństwo zachodzenia tego niezwykle egzotycznego procesu.

W trakcie studiów doktoranckich uczestniczyłam w większości eksperymentów prowadzonych w tym czasie na separatorze masowym w GSI, brałam także udział w szeregu eksperymentów wykonywanych na separatorze fragmentów FRS. Wszystkie eksperymenty były prowadzone w ramach współpracy międzynarodowych grup badawczych. Praca na różnych urządzeniach badawczych, układzie ISOL i separatorze FRS, dała mi możliwość zaznajomienia się z różnorodnymi technikami eksperymentalnymi wykorzystywanymi w badaniach własności egzotycznych jąder atomowych. Mój udział w eksperymentach obejmował przygotowania układów detekcyjnych wraz z elektroniką, ich kalibrację oraz udział we właściwych pomiarach. W eksperymentach wykonywanych na separatorze FRS wykonywałam obliczenia optyki jonowej, byłam w grupie osób odpowiedzialnych za ustawienia separatora.

## 5.2 ZAINTERESOWANIA NAUKOWE PO ZAKOŃCZENIU STUDIÓW DOKTORANCKICH

**Badania struktura jąder w okolicy  $^{100}\text{Sn}$ .** W rejonie mapy nuklidów leżącym tuż powyżej  $^{100}\text{Sn}$  istnieje wyspa nuklidów wykazujących promieniotwórczość  $\alpha$  oraz promieniotwórczość protonową. Jej obecność jest związana z bliskim umiejscowieniem

<sup>33</sup>“Alpha decay studies beyond  $^{100}\text{Sn}$ ”, proposal number U202 at the GSI-ISOL facility, 2002.

<sup>34</sup>Z. Janas, C. Mazzocchi, et al, Eur. Phys. J. A23 (2005) 197.

linii odpadania protonu oraz zamknięciem magicznych powłok  $N = Z = 50$ . Badania rozpadu protonowego i rozpadu  $\alpha$  pozwalają uzyskać informacje o funkcjach falowych stanów jądrowych zaangażowanych w przejścia. Ponadto, energia emitowanych cząstek, poprawiona na efekt odrzutu, pozwala określić masę rozpadającego się jądra lub jądra potomnego, jeśli masa jednego z nich jest znana. W obszarze powyżej  $^{100}\text{Sn}$  walencyjne protony i neutrony obsadzają te same orbitale ( $d_{5/2}$  i  $g_{7/2}$ ) co prowadzi do silnego przekrywania się funkcji falowych i wzmocnienia oddziaływania proton-neutron. Oczekuje się, że prowadzi to do zwiększenia prawdopodobieństwa preformacji cząstki  $\alpha$  w rozpadających się jądrach, czego skutkiem powinna być obserwacja tzw. "superdozwolonego" rozpadu  $\alpha$ . Uczestniczyłam w intensywnych badaniach nuklidów z obszaru  $^{100}\text{Sn}$ , które doprowadziły do odkrycia nowych izotopów:  $^{109}\text{Xe}$  i  $^{105}\text{Te}$  oraz obserwacji łańcucha rozpadów  $\alpha$   $^{109}\text{Xe} \rightarrow ^{105}\text{Te} \rightarrow ^{101}\text{Sn}$  <sup>35</sup>). Jądra  $^{109}\text{Xe}$  były produkowane w reakcji fuzji-wyparownia  $^{54}\text{Fe}(^{58}\text{Ni}, 3n)$  a następnie odseparowywane od innych produktów reakcji przy pomocy separatora masowego Recoil Mass Spectrometer (RMS) w HRIBF, ORNL. Wyselekcjonowane w ten sposób jądra odrzutu były implantowane w detektorze DSSSD umieszczonym w płaszczyźnie ogniskowej spektrometru. Do odczytu sygnałów z detektora DSSSD wykorzystano, pionierską wówczas, elektronikę cyfrową <sup>36</sup>). W wyniku pomiarów wyznaczono dotychczas nieznaną czas połowicznego rozpadu  $^{109}\text{Xe}$  ( $13 \pm 2$  ms) i  $^{105}\text{Te}$  ( $620 \pm 70$  ns) <sup>35</sup>). Te informacje wraz ze znajomością wartości  $Q_\alpha$  pozwoliły określić zredukowane szerokości rozpadu  $\alpha$  ( $W_\alpha$ ) dla badanych izotopów. W przypadku  $^{105}\text{Te}$  zaobserwowano 2,7-krotne wzmocnienie wartości  $W_\alpha$  w stosunku do wartości  $W_\alpha$  dla  $^{213}\text{Po}$ , charakteryzującego się taką samą strukturą walencyjną jak  $^{105}\text{Te}$ . Wskazuje to na superdozwolony charakter rozpadu  $\alpha$   $^{105}\text{Te}$ . Badając rozpad  $\alpha$   $^{109}\text{Xe}$  obok przejścia do stanu podstawowego zaobserwowano również przejście  $\alpha$  do stanu wzbudzonego  $^{105}\text{Te}$  (struktura subtelna) i określono energię wzbudzenia tego stanu. W kolejnym eksperymencie strukturę subtelną zaobserwowano także w rozpadzie  $\alpha$   $^{105}\text{Te} \rightarrow ^{101}\text{Sn}$ . Analiza tych danych pozwoliła ustalić spin i parzystość stanu podstawowego  $^{101}\text{Sn}$  jako  $(7/2^+)$  <sup>37</sup>). Jest to konsekwencja obniżenia orbitalu  $\nu g_{7/2}$  względem  $\nu d_{5/2}$  przy przejściu od  $^{103}\text{Sn}$  do  $^{101}\text{Sn}$ .

Pomiary czasów życia i mas jąder z okolic  $^{100}\text{Sn}$  mają istotne znaczenia dla opisu procesów nukleosyntezy. Na przykład przewiduje się, że astrofizyczny proces  $rp$  wygasa w cyklu obejmującym izotopy Sn–Sb–Te leżące w bliskim sąsiedztwie  $^{100}\text{Sn}$  <sup>38</sup>). Wartości czasów życia oraz mas jąder są wyjątkowo ważnymi parametrami wejściowym w analizie sieci rozpadów i reakcji jądrowych odpowiedzialnych za przebieg procesu  $rp$ : różne wartości otrzymywane przez różne modele teoretyczne wpływają na przewidywania lokalizacji końca ścieżki procesu  $rp$  zachodzącego podczas wybuchów supernowych. W szczególności, niewiadomą stanowiła wartość energii separacji protonu ( $S_p$ ) dla  $^{105}\text{Sb}$ ,

<sup>35</sup>S.N. Liddick, R. Grzywacz, C. Mazzocchi, et al., Phys. Rev. Lett. 97 (2006) 082501

<sup>36</sup>R. Grzywacz, ..., C. Mazzocchi, ..., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Research B261 (2007) 1103.

<sup>37</sup>I.G. Darby et al., Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 162502

<sup>38</sup>H. Schatz et al., Phys. Rev. Lett. 86 (2001) 3471.

który należy do cyklu Sn–Sb–Te. W pracy<sup>39)</sup> jądro  $^{105}\text{Sb}$  zostało zidentyfikowane jako emiter protonów o wartości  $Q_p = -S_p = 483 \pm 15$  keV. Jednakże, liczne eksperymentalne próby podjęte w ciągu kolejnych 20 lat, wykorzystujące różne techniki pomiarowe, nie potwierdziły promieniotwórczości protonowej  $^{105}\text{Sb}$ <sup>40),41),42),43),44),45)</sup>. Alternatywną metodą wyznaczenia wartości  $S_p$  dla  $^{105}\text{Sb}$  byłaby obserwacja rozpadu  $\alpha$   $^{109}\text{I}$ . Jądra  $^{109}\text{I}$  rozpadają się z czasem połowicznego zaniku równym  $100 \pm 5$   $\mu\text{s}$ , emitując głównie protony i, z niewielkim prawdopodobieństwem, cząstki  $\alpha$ . Pomiar nieznannej energii rozpadu  $\alpha$   $^{109}\text{I}$  umożliwiłby określenie wartości  $S_p$  dla  $^{105}\text{Sb}$  poprzez wykorzystania związku  $Q_\alpha(^{109}\text{I}) + Q_p(^{105}\text{Sb}) = Q_p(^{109}\text{I}) + Q_\alpha(^{108}\text{Te})$ . Stosowny eksperyment został przeprowadzony na separatorze RMS w HRIBF z wykorzystaniem techniki pomiarowej stosowanej z dużym powodzeniem przy odkryciu i badaniu rozpadu  $^{109}\text{Xe}$ . Brałam udział w przygotowaniu i ustawieniu układu eksperymentalnego, analizie zebranych danych oraz przygotowaniu publikacji<sup>46)</sup>. Obserwacja bardzo mało prawdopodobnego rozpadu  $\alpha$   $^{109}\text{I}$  ( $b_\alpha = 1.4 \pm 0.4 \times 10^{-4}$ ) i pomiar energii tego rozpadu, pozwoliły ustalić wartość  $Q_p(^{105}\text{Sb})$  jako  $356 \pm 22$  keV<sup>46)</sup>. Niższa niż poprzednio przypuszczano wartość energii rozpadu protonowego dla  $^{105}\text{Sb}$  praktycznie wyklucza możliwość bezpośredniej obserwacji promieniotwórczości protonowej tego jądra. W tym samym eksperymencie wyznaczono również górną granicę energii rozpadu protonowego  $^{104}\text{Sb}$ ,  $Q_p(^{104}\text{Sb}) < 378$  keV. Z punktu widzenia obliczeń astrofizycznych, eksperymentalnie wyznaczona wartość  $Q_p$  dla  $^{105}\text{Sb}$  wyklucza możliwość zachodzenia cyklu Sn–Sb–Te z udziałem  $^{104}\text{Sn}$  i wyklucza wzrost produkcji energii i jasności gwiazdy w zakresie promieniowania X pod koniec rozbłysku X. Jednakże, jeśli uwzględnić nowe ograniczenie na  $Q_p(^{104}\text{Sb})$  i przyjąć, że rzeczywista wartość  $Q_p$  jest znacznie mniejsza niż to ograniczenie, to możliwy byłby rozwój cyklu Sn–Sb–Te z udziałem  $^{103}\text{Sn}$ . Warunkiem jest jednak znacznie większa wartość szybkości reakcji  $^{104}\text{Sb}(p,\gamma)^{105}\text{Te}$  niż obecnie przewidywana.

Aby rozstrzygnąć, czy cykl Sn–Sb–Te może rozwijać się z udziałem  $^{103}\text{Sn}$ , konieczny był pomiar energii separacji protonu dla  $^{104}\text{Sb}$ . Zaproponowałam eksperyment, który umożliwił określenie tej wielkości poprzez obserwację rozpadu  $\alpha$   $^{112}\text{Cs}$ , dobrze znanego emitera protonów<sup>47)</sup>. Wyniki analizy pomiarów przeprowadzonych przy użyciu separatora RMS w HRIBF umożliwiły określenie dolnych ograniczeń na wartości  $Q_p(^{104}\text{Sb})$  oraz  $Q_p(^{108}\text{I})$ <sup>48)</sup>. Tym samym eksperymentalnie określone zostały dopusz-

<sup>39</sup>R. Tighe et al., Phys. Rev. C 49 (1994) R2871.

<sup>40</sup>M. Shibata et al., Phys. Rev. C 55 (1997) 1715.

<sup>41</sup>Z. Liu, ..., C. Mazzocchi, ..., Phys. Rev. C 72 (2005) 047301.

<sup>42</sup>G. Berthes, GSI Report No. GSI-87-12, 1987, p. 80 - 89.

<sup>43</sup>J. Friese, Proceedings of the XXIV Hirschegg Workshop (GSI Report ISSN 0720-8715, 1996), p. 123.

<sup>44</sup>K. Rykaczewski et al., Phys. Rev. C 52 (1995) R2310.

<sup>45</sup>A. Gillitzer et al., Z. Phys. A 326 (1987) 107.

<sup>46</sup>C. Mazzocchi et al., Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 212501.

<sup>47</sup>“Search for  $\alpha$  decay of  $^{112}\text{Cs}$ ”, proposal number RIB163 at HRIBF (ORNL), 2006.

<sup>48</sup>L. Cartegni, C. Mazzocchi, et al., Phys. Rev. C 85 (2012) 014312.

czalne zakresy zmienności tych wielkości. Wykluczają one możliwość inicjowania cyklu Sn–Sb–Te z udziałem  $^{103}\text{Sn}$ . Ostatni z niepewnych parametrów wejściowych używanych do obliczeń procesu  $rp$ , energia separacji protonu  $^{106}\text{Sb}$ , został wyznaczony eksperymentalnie w niezależnym pomiarze mas jąder. W ten sposób definitywnie wykluczono możliwość formowania się cyklu Sn–Sb–Te, proces  $rp$  wygasa po osiągnięciu izotopów Sn–Sb<sup>49</sup>).

**Badania reakcji jądrowych o znaczeniu astrofizycznym** W latach 2006–2010 odbywałam staż podoktorski na Wydziale Fizyki Uniwersytetu w Mediolanie. Miałam tam możliwość rozwijania moich zainteresowań astrofizyką jądrową w nieco innym niż dotychczas kierunku. Zajmowałam się badaniem reakcji termojądrowych towarzyszących procesom astrofizycznym zachodzącym we wczesnym Wszechświecie i w gwiazdach. Niezwykle przydatne okazało się przy tym doświadczenie w stosowaniu różnorodnych technik jądrowych, które zdobyłam pracując w innych laboratoriach. Badania reakcji jądrowych o znaczeniu astrofizycznym prowadziłam w ramach projektu LUNA (*Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics*). LUNA jest unikalną w skali światowej instalacją zlokalizowaną w podziemnym laboratorium w Gran Sasso. Dzięki silnemu osłabieniu promieniowania kosmicznego mogą w nim być prowadzone pomiary, które z powodu obecności tła nie mogą być wykonywane na powierzchni ziemi. Laboratorium wyposażone jest w akcelerator elektrostatyczny typu Cockcroft-Walton z maksymalnym napięciem przyspieszającym 400 kV, układy detektorów promieniowania  $\gamma$  oraz cząstek naładowanych (detektory HPGe, BGO, krzemowe) oraz system tarcz (pozbawione okien tarcze gazowe oraz tarcze w postaci stałej) używanych do pomiarów reakcji  $(p,^*)$ ,  $(\alpha,^*)$ . Program badawczy współpracy LUNA skupiony jest na badaniach reakcji jądrowych szczególnie ważnych w opisie procesów astrofizycznych, zachodzących przy energiach, bliskich energii piku Gamowa (od dziesiątek do setek keV w układzie środka masy, zależnie od typu reakcji i temperatury środowiska, w którym reakcja zachodzi). Mój udział we współpracy LUNA obejmował:

- opracowanie studium wykonalności pomiarów nowych reakcji, które mogłyby być badane w LUNA. Prace te obejmowały np. ocenę szybkości zliczania reakcji, testy laboratoryjne układu pomiarowego, badanie efektów tła związanego z obecnością wiązki oraz optymalizację materiałów użytych w komorze tarczy. Spośród badanych reakcji najważniejszą była reakcja  $^2\text{H}(^4\text{He},\gamma)^6\text{Li}$ , mająca kluczowe znaczenie dla zrozumienia produkcji litu podczas Wielkiego Wybuchu oraz dla wyjaśnienia obserwowanego stosunku rozpowszechnienia  $^6\text{Li}/^7\text{Li}$ . Dostępne w literaturze dane dotyczące przekrojów czynnych przy niskich energiach dla reakcji  $^2\text{H}(^4\text{H},\gamma)^6\text{Li}$  zostały otrzymane metodami pośrednimi i nie są zgodne z danymi przy wyższych energiach, otrzymanymi w pomiarach bezpośrednich. Stąd też konieczność wykonania bezpośrednich pomiarów przekroju czynnego przy niskich

<sup>49</sup>V.-V. Elomaa et al., Phys. Rev. Lett. 102 (2009) 252501.

energiach. Dla energii odpowiadających warunkom astrofizycznym takie pomiary mogły być wykonane jedynie w laboratorium podziemnym, na powierzchni ziemi poziom tła uniemożliwia ich przeprowadzenie. Wynik pomiarów wykluczył standardowy scenariusz nukleosyntezy podczas Wielkiego Wybuchu jako możliwe wyjaśnienie obserwowanego rozpowszechnienia  ${}^6\text{Li}$ . Wydaje się, że wyjaśnienie obserwowanego stosunku rozpowszechnienia  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$  wymagać będzie uwzględnienia niestandardowych procesów (astro)fizycznych <sup>50),51)</sup>.

- Badania reakcji  ${}^{15}\text{N}(p,\gamma){}^{16}\text{O}$  z cyklu CNO. Jest to reakcja istotna dla produkcji tlenu i dla wszystkich podcykli cyklu CNO ponieważ łączy ona podcykl CN z podcyklem NO i wszystkimi kolejnymi cyklami. Badania tej reakcji zostały przeprowadzone przy użyciu detektora BGO o wysokiej wydajności i stałej tarczy wzbogaconej w  ${}^{15}\text{N}$ . Poza przygotowaniem i ustawieniem układu eksperymentalnego oraz udziałem w wielomiesięcznych pomiarach, byłam odpowiedzialna za jedną z dwóch niezależnych analiz danych. Byłam współopiekunem pracy magisterskiej (lic. Valentina Capogrosso), w której przeprowadzona została analiza części danych <sup>52),53),54),55)</sup>.
- brałam udział w przygotowaniu listu intencyjnego zawierającego propozycję umieszczenia w podziemnym laboratorium w Gran Sasso nowego akceleratora o maksymalnej energii  $\sim 3$  MeV (projekt LUNA-MV). Propozycja budowy nowego akceleratora została zaakceptowana i uzyskała finansowanie. Nowy akcelerator, którego zakup jest obecnie finalizowany, oraz kontynuacja obecnie realizowanego programu badawczego, pozwolą na zbadanie przekrojów czynnych reakcji w cyklu CNO a także reakcji wyprowadzających poza ten cykl, które tworzą załączki dla procesów wolnego ( $s$ ) i szybkiego ( $r$ ) wychwytu neutronów oraz szybkiego wychwytu protonów ( $rp$ ). Reakcje te decydują o przebiegu syntezy pierwiastków w gwiazdach i pomiary ich przekrojów czynnych przy odpowiednich energiach mają kluczowe znaczenie dla rozumienia obserwowanego rozpowszechnienia pierwiastków we Wszechświecie.

**Badania egzotycznych przemian jąder atomowych** Opracowanie detektora OTPC (z ang. *Optical Time Projection Chamber*) na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego otworzyło prawie dekadę temu nowe możliwości badania egzotycznych przemian

<sup>50</sup>M. Anders, ..., C. Mazzocchi, ..., Phys. Rev. Lett. 113 (2014) 042501

<sup>51</sup>D. Trezzi, ..., C. Mazzocchi, ..., to be submitted to Astroparticle Physics

<sup>52</sup>A. Caciolli, C. Mazzocchi, et al., Astronomy and Astrophysics 533 (2011) A66

<sup>53</sup>C. Mazzocchi for the LUNA Collaboration, Proceedings of the 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Nuclear Reaction Mechanisms, Varenna, Italy, 2009, CERN-Proceedings-2010-001, p. 495.

<sup>54</sup>Chiara Mazzocchi for the LUNA Collaboration, Acta Phys. Pol. 42 (2011) 785.

<sup>55</sup>V. Capogrosso, "Measurement of the cross section for the reaction  ${}^{15}\text{N}(p,\gamma){}^{16}\text{O}$  at astrophysical energies", Master thesis, University of Milan, 2009 (*in italian*)

promieniotwórczych jąder leżących daleko od ścieżki trwałości<sup>56)</sup>. Detektor OTPC charakteryzuje niezwykle wysoka czułość - obserwacja nawet jednego zdarzenia umożliwia jednoznaczną identyfikację poszukiwanego rozpadu i określenie prawdopodobieństwa jego występowania. Detektor OTPC działa jako komora jonizacyjna z projekcją czasu, w której (w obecnej wersji) do wzmocnienia pierwotnego ładunku jonizacyjnego zastosowano układ folii GEM (Gas Electron Multiplier) oraz optyczny układ odczytu sygnałów składający się z kamery CDD i fotopowielacza (PMT). Połączenie obrazu śladów cząstek naładowanych rejestrowanego przez kamerę CCD oraz rozkładu czasowego światła docierającego do fotopowielacza umożliwia trójwymiarową rekonstrukcję torów cząstek<sup>56),57),58)</sup>. Detektor OTPC ustawiony na wiązce separatora produktów fragmentacji okazał się być szczególnie skutecznym narzędziem do badania rozpadów bardzo egzotycznych nuklidów poprzez emisję wielu cząstek naładowanych takich jak np. promieniotwórczość dwuprotonowa ( $2p$ ) lub emisja kilku cząstek naładowanych po rozpadzie  $\beta$ .

- Proces spontanicznej emisji dwóch protonów ze stanu podstawowego jądra atomowego jest najnowszym zaobserwowanym i najsłabiej poznanym typem przemiany promieniotwórczej. Może on zachodzić w jądrach o parzystej liczbie protonów, położonych poza linię odpadania protonu dla których, wskutek działania sił dwójkiowania pomiędzy protonami, emisja pojedynczego protonu nie jest energetycznie możliwa, natomiast możliwy jest rozpad z jednoczesną emisją dwóch protonów. Dla jąder, dla których wartość energii przemiany dla rozpadu  $2p$  ( $Q_{2p}$ ) jest dostatecznie duża, rozpad dwuprotonowy może wygrać konkurencję z przemianą  $\beta^+$  i stać się dominującym kanałem rozpadu. Badania promieniotwórczości dwuprotonowej umożliwiają uzyskanie informacji zarówno o mechanizmie procesu emisji cząstek i jego trójciałowym charakterze jak i o strukturze niezwykle egzotycznych nuklidów, leżących na granicy istnienia jąder. Dla tak skrajnie egzotycznych nuklidów może to być jedyna droga do uzyskania informacji o ich własnościach i budowie wewnętrznej. Modele masowe, w oparciu o które przewidywano wartości  $Q_{2p}$  wskazywały na izotopy  $^{45}\text{Fe}$ ,  $^{48}\text{Ni}$  oraz  $^{54}\text{Zn}$  jako na najlepszych kandydatów do obserwacji promieniotwórczości  $2p$ <sup>59),60),61)</sup>. Rozpad  $2p$  został po raz pierwszy eksperymentalnie zaobserwowany w 2002 roku, dla izotopu  $^{45}\text{Fe}$ <sup>62),63)</sup>. Brałam udział w jednym z dwóch eksperymentów których dokonano tego odkrycia i jestem współautorką pracy, w której przedstawione zostały wyniki tego

<sup>56</sup>M. Ćwiok et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 52 (2005) 1895.

<sup>57</sup>K. Miernik et al., Phys. Rev. Lett 99 (2007) 192501.

<sup>58</sup>M. Pomorski, ..., C. Mazzocchi, ..., Phys. Rev. C 90, 014311 (2014).

<sup>59</sup>B.A. Brown, Phys. Rev. C 43 (1991) R1513.

<sup>60</sup>W.E. Ormand, Phys. Rev. C 55 (1997) 2407.

<sup>61</sup>B.J. Cole, Phys. Rev. C 54 (1996) 1240.

<sup>62</sup>M. Pfützner, ..., C. Mazzocchi, ..., Eur. Phys. J. A 14 (2002) 279.

<sup>63</sup>J. Giovinazzo et al., Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 102501.

pomiaru <sup>62</sup>). Wkrótce po odkryciu promieniotwórczości  $2p$  <sup>45</sup>Fe pojawiło się doniesienie o obserwacji rozpadu  $2p$  innego nuklidu - <sup>54</sup>Zn <sup>64</sup>).

Detektor OTPC po raz pierwszy umożliwił bezpośrednią obserwację rozpadu  $2p$  <sup>45</sup>Fe oraz zbadanie korelacji energetycznych i kątowych pomiędzy emitowanymi protonami <sup>57</sup>). W 2011 roku przy pomocy detektora OTPC po raz pierwszy bezpośrednio i jednoznacznie zidentyfikowano rozpad  $2p$  <sup>48</sup>Ni <sup>65),58)</sup>. Byłam zaangażowana w przygotowaniu i przeprowadzeniu tego eksperymentu.

Ostatnio, ten sam układ doświadczalny został wykorzystany do poszukiwania nowego izotopu <sup>59</sup>Ge oraz zbadania rozpadu <sup>60</sup>Ge w laboratorium NSCL. Obydwa te izotopy są rozważane jako kandydaci na emitery  $2p$ . W eksperymencie przeprowadzonym 10 lat temu w NSCL na spektrometrze A1900 zidentyfikowano jedynie trzy jony <sup>60</sup>Ge, dotychczas nie zaobserwowano <sup>59</sup>Ge <sup>66</sup>). Udało się to w eksperymencie przeprowadzonym w 2015 r. w którym po raz pierwszy zidentyfikowano <sup>59</sup>Ge <sup>67</sup>) oraz uzyskano pierwsze informacje o rozpadzie <sup>60</sup>Ge. Analiza tych danych jest prowadzona pod moim kierunkiem, wyniki będą stanowiły część pracy doktorskiej mgr Aleksandry Ciemny (z d. Lis).

- Charakterystyczną cechą nuklidów leżących w pobliżu linii odpadania protonu jest duża wartość energii uwalnianej w ich przemianie  $\beta$ . W konsekwencji, w rozpadzie  $\beta$  populowane są wysoko wzbudzone i niewiązane stany jądra potomnego, które rozpadają się m.in. emitując protony zwane protonami opóźnionymi. Od czasu pierwszej obserwacji emisji protonów opóźnionych blisko 50 lat temu i odkrycia emisji dwóch protonów opóźnionych w 1983 roku, badania tego typu przemian dostarczyły wielu istotnych informacji o strukturze jąder neutronowodeficytowych leżących daleko od ścieżki trwałości. Dane te umożliwiają testowanie modeli jądrowych i stanowią źródło informacji niezbędnych do opisu astrofizycznego procesu  $rp$  <sup>68),69)</sup>.

W 2007 roku po raz pierwszy jednoznacznie zidentyfikowano niezwykle egzotyczny proces emisji trzech protonów po rozpadzie  $\beta$  ( $\beta 3p$ ) izotopów <sup>45</sup>Fe <sup>70</sup>) i <sup>43</sup>Cr <sup>71</sup>). Odkrycie to było możliwe dzięki zastosowaniu detektora OTPC. Innym kandydatem do obserwacji tego typu przemiany był izotop <sup>31</sup>Ar. Pierwsze doniesienie o obserwacji rozpadu  $\beta 3p$  <sup>31</sup>Ar <sup>72</sup>) zostało negatywnie zweryfikowane

<sup>64</sup>B. Blank et al., Phys. Rev. Lett. 94 (2005) 232501.

<sup>65</sup>M. Pomorski, ..., C. Mazzocchi, ..., Phys. Rev. C 83 (2011) 061303(R).

<sup>66</sup>A. Stolz et al., Phys. Lett. B 627, 32 (2005).

<sup>67</sup>A.A. Ciemny, ..., C. Mazzocchi, ..., Phys. Rev. C 92 (2015) 014622.

<sup>68</sup>B. Blank and M.J.G. Borge, Prog. Part. Nucl. Phys. 60 (2008) 403.

<sup>69</sup>M. Pfützner et al., Rev. Mod. Phys. 84 (2012) 567.

<sup>70</sup>K. Miernik et al., Phys. Rev. C 76 (2007) 041304(R).

<sup>71</sup>M. Pomorski et al., Phys. Rev. C 83 (2011) 014306.

<sup>72</sup>D. Bazin et al., Phys. Rev. C 45, 69 (1992).

w kolejnym eksperymencie, w którym określono górne ograniczenie prawdopodobieństwa zachodzenia tego procesu  $b_{\beta 3p} < 0.11\%$  <sup>73</sup>). Niepowodzenia w poszukiwaniu rozpadu  $\beta 3p$  były związane z niską statystyką zarejestrowanych zdarzeń oraz niedoskonałością wykorzystywanych układów detekcyjnych, w których wykorzystywano detektory krzemowe. Znakomitym narzędziem do identyfikacji rozpadu  $\beta 3p$  okazał się być detektor OTPC. W eksperymencie wykonanym w GSI na separatorze fragmentów FRS jony  $^{31}\text{Ar}$  były produkowane w reakcji fragmentacji wiązki  $^{36}\text{Ar}$ , separowane od pozostałych produktów reakcji i zatrzymywane w gazie wypełniającym aktywną część detektora OTPC. Zaimplantowano około 21000 jonów  $^{31}\text{Ar}$  i obserwowano ich rozpady <sup>74</sup>),<sup>75</sup>). Jednoznacznie zidentyfikowano 13 zdarzeń odpowiadających emisji trzech protonów po rozpadzie  $\beta$   $^{31}\text{Ar}$  i wyznaczono prawdopodobieństwo zachodzenia tej przemiany  $b_{\beta 3p} = (7 \pm 2) \cdot 10^{-4}$  <sup>75</sup>),<sup>76</sup>). Wartość ta jest w granicach niepewności pomiarowych zgodna z wynikiem otrzymanym w pracy Koldste <sup>77</sup>). Mój udział w badaniu rozpadu  $\beta 3p$   $^{31}\text{Ar}$  obejmował przygotowanie i optymalizację ustawień układu detekcyjnego, koordynowanie oraz nadzorowanie analizy danych prowadzonej przez moją magistrantkę (Aleksandra Ciemny (z d. Lis) ) <sup>75</sup>),<sup>76</sup>).

Od 2010 roku jestem silnie zaangażowana w utrzymanie, modernizację oraz pełną charakteryzację detektora OTPC. Praca ta polegała m.in. na proponowaniu i prowadzeniu pomiarów niezbędnych do lepszej charakteryzacji detektora <sup>78</sup>), pomiarach prędkości dryfu elektronów i badaniu emisji światła przez mieszanki gazowe wykorzystywane w detektorze OTPC. Badania te są niezbędne do optymalizacji mieszanki gazowej wykorzystywanej w czasie eksperymentów. Pomiarzy były wykonywane pod moim kierunkiem przez p. Aleksandrę Ciemny (z d. Lis), w ramach jej pracy licencjackiej <sup>79</sup>).

### 5.3 DALSZE PLANY I PERSPEKTYWY BADAŃ

Zainteresowania naukowe, które rozwijałam podczas mojej dotychczasowej pracy zawodowej zaowocowały nowymi projektami. W średniookresowej skali czasu planuję kontynuowanie badań egzotycznych przemian jądrowych. W laboratoriach Teksas A&M, College Station TX (USA) oraz RIKEN w Tokio (Japonia) przygotowywane są eksperymenty, w których badane będą rozpady  $\beta$  z emisją wielu cząstek opóźnionych z jąder

<sup>73</sup>H. Fynbo et al, Phys. Rev. C 59 (1999) 2275

<sup>74</sup>M. Pfützner et al., GSI-SR2012-PHN-ENNA-EXP-17, GSI Report 2013-1 (2012).

<sup>75</sup>A.A Lis, C. Mazzocchi, ..., Phys. Rev. C 91 (2015) 064309

<sup>76</sup>A.A. Ciemny, "Study of  $\beta$  decay of  $^{31}\text{Ar}$ ", Master thesis, University of Warsaw, 2015 (*in Polish*).

<sup>77</sup>G.T. Koldste et al., Phys. Rev. C 89 (2014) 064315

<sup>78</sup>"Characterisation of the Optical Time Projection Chamber (OTPC)", proposal number HIL051 at the Heavy Ion Laboratory, University of Warsaw, 2014.

<sup>79</sup>A.A. Lis, "Study of light emission in the OTPC detector", Bachelor thesis, University of Warsaw, 2013 (*in Polish*)



ważnych dla przebiegu procesów astrofizycznych takich jak procesu  $p$  i  $rp$ . Jednocześnie jestem zaangażowana w projekty, których celem jest kontynuowanie badań rozpadów  $\beta$  silnie neutrono-nadmiarowych jąder z okolicy z  $^{78}\text{Ni}$ . Ten program naukowy będzie realizowany w laboratoriach RIKEN oraz CERN-ISOLDE, odpowiednie eksperymenty zostały już zaplanowane.

Doświadczenie jaki zdobyłam w pracy z detektorem OTPC, a także doświadczenie w prowadzeniu pomiarów przekrojów czynnych reakcji termojądrowych o znaczeniu astrofizycznym, otworzyło mi możliwość aktywnego zaangażowania się w niezwykle ambitny projekt pomiarów przekrojów czynnych o kluczowym znaczeniu dla astrofizyki z wykorzystaniem wiązki promieniowania  $\gamma$ . Możliwość prowadzenia tego typu badań otworzy się wraz z uruchomieniem nowego europejskiego laboratorium *Extreme Light Infrastructure* (ELI) w Magurele (Rumunia). Już wkrótce w laboratorium tym będzie wytwarzana monochromatyczna wiązka promieniowania  $\gamma$  o energii do 19 MeV i rekordowej intensywności. Realizacja planowanego programu badań będzie wiązała się z koniecznością zbudowania nowej komory TPC z innowacyjnym systemem odczytu sygnałów, działającej jako aktywna tarcza w której zachodzić będą reakcje fotojądrowe. Jednym z najważniejszych badanych procesów będzie reakcja  $^{16}\text{O}(\gamma,\alpha)^{12}\text{C}$ . Pomiar przekroju czynnego tej reakcji przy odpowiednich energiach wiązki  $\gamma$  umożliwi, dzięki zastosowaniu zasady równowagi szczegółowej, wyznaczenie przekrojów czynnych reakcji odwrotnej w zakresie energii, w którym wielkości te są tak niskie, że niemożliwy jest ich pomiar w reakcji bezpośredniej, nawet w niskotłowych laboratoriach podziemnych. Podobnie badane będą reakcje fotojądrowe na  $^{21,22}\text{Na}$  oraz  $^{19}\text{F}$  i odwrotne do nich reakcje o znaczeniu astrofizycznym. Jestem współautorką projektu technicznego (Technical Design Report) zawierającego zarówno program proponowanych badań jak i szczegółowe opracowanie układu doświadczalnego, który umożliwi ich realizację<sup>80</sup>). Projekt został pozytywnie oceniony przez Międzynarodowy Naukowy Komitet Doradczy ELI.

#### 5.4 RECENZOWANIE PUBLIKACJI W CZASOPISMACH

Recenzowałam prace dla Physics Letters B, European Physical Journal A, Acta Physica Polonica B oraz Il Nuovo Cimento B.

#### 5.5 KOORDYNACJA PROJEKTÓW

PO ZAKOŃCZENIU DOKTORATU

- Projekty badawcze

---

<sup>80</sup>RA4-TDR4 “Charged Particle Detection at ELI-NP - Technical Design Report”, April 2015.

- Kierownik projektu “Spektroskopia jądrowa na granicach stabilności”, finansowany przez Narodowe Centrum Nauki (NCN) (od początku 2016 r., projekt No. 2015/17/B/ST2/00581) - konkurs OPUS9.
- Kierownik projektu “Badania rozpadu beta i struktury jąder z obszaru  $^{78}\text{Ni}$ ”, finansowany przez Narodowy Centrum Nauki (grudzień 2011–grudzień 2014, Projekt No. 2011/01/B/ST2/02476) - konkurs OPUS1.
- Co-Edytor projektu technicznego (Technical Design Report) RA4-TDR4 “*Charged Particles Detection at ELI-NP*” (Extreme Light Infrastructure - Nuclear Physics (ELI-NP, Magurele, Romania)), kwiecień 2015 r.
- Projekty dydaktyczne
  - Kierownik projektu “Badanie fluorescencji rentgenowskiej - ćwiczenie laboratoryjne”, finansowanego przez Fundusz Innowacji Dydaktycznych UW (FID2014) (kontynuacja projektu FID2012).
  - Kierownik projektu “Badanie fluorescencji rentgenowskiej - ćwiczenie laboratoryjne”, finansowanego przez Fundusz Innowacji Dydaktycznych UW (FID2012)
- Organizacja konferencji międzynarodowych
  - Edytor materiałów konferencyjnych “XXXII Mazurian Lakes Conference on Physics” opublikowanych w Acta Physica Polonica B43, 2012.
  - Edytor materiałów konferencyjnych “XXXIII Mazurian Lakes Conference on Physics” opublikowanych w Acta Physica Polonica B45, 2014.
  - Członek komitetu organizacyjnego “XXXIII Mazurian Lakes Conference on Physics”, Piaski, Polska, wrzesień 1-7, 2013 r..
  - Sekretarz naukowy “XXXIV Mazurian Lakes Conference on Physics”, Piaski, Polska, wrzesień 6-13, 2015 r.
- Spokesperson eksperymentów zaakceptowanych przez komitety programowe (Program Advisory Committee):
  - “*Characterisation of the Optical Time Projection Chamber (OTPC)*”, proposal numer HIL051, Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów Uniwersytetu Warszawskiego, 2014.
  - “*Measurement of beta-delayed neutron properties of fission fragments*”, proposal numer 3-01-584, ILL Grenoble, 2011;
  - “*Beta-delayed neutron properties of fission fragments*”, proposal numer 3-01-594, ILL Grenoble, 2011;
  - “*Identification of excited states in  $^{75}\text{Ni}$* ”, proposal numer E10027, NSCL (MSU), 2010;
  - “*Search for  $\alpha$  decay of  $^{112}\text{Cs}$* ”, proposal numer RIB163, HRIBF (ORNL), 2006;

- “*Beta-decay studies of very neutron rich Fe and Mn isotopes*”, proposal numer E06030, NSCL (MSU), 2006;
- “*Decay spectroscopy of accelerated beam components: A test of the sensitivity of the ranging-out technique - Half-life measurement of  $^{86,87}\text{Ge}$* ”, proposal numer RIB128, HRIBF (ORNL), 2004;
- Co-spokesperson eksperymentów zaakceptowanych przez komitety programowe (Program Advisory Committee):
  - “*Neutron single-particle states and beta-delayed neutron branching ratios near  $^{78}\text{Ni}$* ”, proposal numer E05020, NSCL (MSU), 2005;
  - “*Alpha decay studies beyond  $^{100}\text{Sn}$* ”, proposal numer U202, GSI-ISOL, 2002 (przed zakończeniem doktoratu).
- Lokalny koordynator eksperymentów
  - “*Proton decay studies of heavy nuclei produced by projectile fragmentation reaction*”, proposal numer S235, FRS, GSI-Darmstadt.
  - “*Identification of the decay of the  $T_z=+1/2$  nucleus  $^{113}\text{Ba}$* ”, proposal numer RIB045, HRIBF-ORNL;

#### PRZED I PO ZAKOŃCZENIU DOKTORATU

- Co-spokesperson kilku eksperymentów zaakceptowanych przez komitety programowe (Program Advisory Committee): GSI-Darmstadt, Niemcy; HRIBF-ORNL, USA; NSCL, USA; ILL-Grenoble, Francja; CERN-ISOLDE, Szwajcaria; LNL-Legnaro, Włochy; LNS-Catania, Włochy; LNGS-L'Aquila, Włochy; TRIUMF-Vancouver, Kanada; JAEA-Tokai, Japonia; RIKEN, Japonia.

## 5.6 LISTA REFERATÓW

### 5.6.1 REFERATY NA ZAPROSZENIE

#### PO ZAKOŃCZENIU DOKTORATU

1. “*Nuclear reactions at astrophysical energies with gamma-ray beams: a novel experimental approach*”, referat na zaproszenie na 5<sup>th</sup> International Conference on Collective Motion in Nuclei under Extreme Conditions (COMEX5), Kraków, Polska, wrzesień 2015 r.
2. “*Beta-decay studies near  $^{78}\text{Ni}$  at the HRIBF*”, referat na zaproszenie na XXXIII Mazurian Lakes Conference, Piaski, Polska, wrzesień 2013 r.

3. “*Beta Decay of Most Neutron-Rich Ge and As Isotopes Discovered at LeRIBSS*”, referat na zaproszenie na 5<sup>th</sup> International Conference on Fission and Properties of Neutron-Rich Nuclei’, Sanibel Island (FL), USA, listopad 2012 r.
4. “*Nuclear astrophysics deep underground: the LUNA experiment*”, referat na zaproszenie na XLVIII International Winter Meeting on Nuclear Physics, Bormio, Włochy, styczeń 2010 r.
5. “*Alpha and proton decay above  $^{100}\text{Sn}$* ”, referat na zaproszenie na Fifth International Conference on Exotic Nuclei and Atomic Masses ENAM’08, Ryn, Polska, wrzesień 2008 r.
6. “*On the alpha decay of  $^{109}\text{I}$  and its implications for the proton decay of  $^{105}\text{Sb}$* ”, referat na zaproszenie na Int. Conf. on Proton Emitting Nuclei and Related Topics, Lizbona, Portugal, czerwiec 2007 r.
7. “*Alpha decay studies in the  $^{100}\text{Sn}$  region*”, referat na zaproszenie na ECT\* Workshop “Experiment–Theory Intersections in Modern Nuclear Structure”, Trento, Włochy, kwiecień 2007 r.
8. “*Beta-decay near the double shell closure at  $^{78}\text{Ni}$* ”, referat na zaproszenie na HRIBF Workshop - Nuclear Measurements for Astrophysics, Oak Ridge-TN, USA, październik 2006 r.
9. “*Doubly magic character of  $^{78}\text{Ni}$  – complex studies of simple nuclei*”, referat na zaproszenie na American Physical Society (APS) Spring Meeting, Tampa-FL, USA, kwiecień 2005 r.

REFERATY NA ZAPROSZENIE (PRZED ZAKOŃCZENIEM DOKTORATU ALBO NA TEMAT PRACY DOKTORSKIEJ)

10. “*Decay of  $^{114}\text{Ba}$* ”, referat na zaproszenie na Int. Symposium on Proton Emitting Nuclei PRO-CON2003, Legnaro, Włochy, luty 2003 r.

### 5.6.2 REFERATY

PO ZAKOŃCZENIU DOKTORATU

1. “*Beta-decay of the most neutron-rich isotopes close to  $^{78}\text{Ni}$* ”, referat na 49<sup>th</sup> Zakopane Conference on Nuclear Physics, Zakopane, Polska, wrzesień 2014 r.

2. “*An active time-projection chamber to study nuclear reactions of astrophysical interest*”,  
referat na Workshop “Towards TDR of experiments with brilliant gamma-ray beams at ELI-NP”, Magurele, Rumunia, czerwiec 2013 r.
3. “*Precision half-life measurement of  $^7\text{Be}$  implanted in different materials*”,  
referat na XXXII Mazurian Lakes Conference on Physics, Piaski, Polska, wrzesień 2011 r.
4. “*Nuclear astrophysics deep underground: the LUNA experiment*”,  
referat na 45<sup>th</sup> Zakopane Conference of Nuclear Physics, Zakopane, Polska, wrzesień 2010 r.
5. “*Nuclear structure decay studies at and beyond  $^{78}\text{Ni}$* ”,  
referat na HRIBF, Upgrade for the FRIB Era: an HRIBF Users Workshop, Oak Ridge-TN, USA, listopad 2009 r.
6. “*Nuclear astrophysics deep underground: the case of the  $^{15}\text{N}(p,\gamma)^{16}\text{O}$  reaction at LUNA*”, referat na 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Nuclear Reaction Mechanisms, Varenna, Włochy, czerwiec 2009 r.
7. “*Alpha decay of  $^{109}\text{I}$  and the implications for the rapid-proton capture process*”,  
referat na 10<sup>th</sup> Symposium on Nuclei in the Cosmos, Mackinac Island, MI, USA, lipiec 2008 r.
8. “*Discovery of the alpha decay of  $^{109}\text{I}$* ”,  
referat na 2006 Division of Nuclear Physics (DNP) Annual Meeting, Nashville-TN, USA, październik 2006 r.
9. “*On the alpha decay of  $^{109}\text{I}$* ”,  
referat na Int. Conf. on Nuclei at the Limits, Nuclear Structure '06, Oak Ridge TN, USA, lipiec 2006 r.
10. “*Isomer and beta-decay studies of nuclei near  $^{78}\text{Ni}$* ”,  
referat na 71<sup>st</sup> Annual Meeting of the Southeastern Section of the APS (SESAPS), Oak Ridge-TN, USA, listopad 2004 r.
11. “*Beta-delayed  $\gamma$  and neutron emission near the double shell closure at  $^{78}\text{Ni}$* ”,  
referat na Int. Conference ENAM04, Pine Mountain-GA, USA, wrzesień 2004 r.
12. “*Isomer and  $\beta$ -decay studies of nuclei near  $^{78}\text{Ni}$* ”,  
referat na Int. Conference Nuclei at the Limits, Argonne National Laboratory, Argonne, USA, lipiec 2004 r.
13. “*Isomer and beta-decay studies near  $^{78}\text{Ni}$* ”,  
referat na APS Spring Meeting, Denver-CO, USA, maj 2004 r.

## PRZED ZAKOŃCZENIEM DOKTORATU ALBO NA TEMAT PRACY DOKTORSKIEJ

14. “*Alpha decay of  $^{114}\text{Ba}$* ”,  
referat na Int. Symposium on Nuclear Clusters, Rauischholzhausen, Niemcy, sierpień 2002 r.
15. “*Alpha decay of  $^{114}\text{Ba}$* ”,  
referat na Deutsche Physikalische Gemeinschaft -DPG, Münster, Niemcy, marzec 2002 r.
16. “*Decay studies at the proton drip-line:  $^{60}\text{Ga}$  and  $^{114}\text{Ba}$* ”,  
referat na Int. Workshop on Exotic Nuclei at the Proton Drip-line, Camerino, Włochy, wrzesień 2001 r.
17. “*Decay properties of  $N\sim Z$  nuclei below  $^{100}\text{Sn}$* ”,  
referat na Int. Workshop PINGST2000, Lund, Szwecja, czerwiec 2000 r.

**5.6.3 SEMINARIA**

## PO ZAKOŃCZENIU DOKTORATU

1. “*Nuclear reactions at astrophysical energies with gamma-ray beams*”,  
seminarium w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN, Kraków, Polska, marzec 2015 r.
2. “*Effect of external conditions on the half-life of  $^7\text{Be}$* ”,  
seminarium na Wydziale Fizyki i Astronomii, Uniwersytetu w Tennessee, Knoxville-TN, USA, luty 2013 r.
3. “*Beta-delayed neutron decay in the vicinity of  $^{78}\text{Ni}$* ”,  
seminarium w Instytucie Laue-Langevina, Grenoble, Francja, luty 2011 r.
4. “*Nuclear astrophysics deep underground: the LUNA experiment*”,  
seminarium na Wydziale Fizyki i Astronomii Uniwersytetu w Tennessee, Knoxville-TN, USA, sierpień 2009 r.
5. “*Astrofisica nucleare in laboratori sotterranei: l'esperimento LUNA*”,  
seminarium w Laboratori Nazionali del Sud, Catania, Włochy, lipiec 2009 r.
6. “*Nuclear structure measurements for astrophysics: from the Earth surface to underground laboratories*”,  
seminarium w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN, Kraków, Polska, maj 2007 r.

7. “*Doubly magic character of  $^{78}\text{Ni}$  – complex studies of simple nuclei*”, seminarium na Wydziale Fizyki Uniwersytetu w Mediolanie, Mediolan, Włochy, listopad 2005 r.
8. “*Recent measurements at the GSI On-line Mass Separator*”, seminarium w Zakładzie Spektroskopii Jądrowej, Uniwersytet Warszawski, Warszawa, Polska, listopad 2002 r.
9. “*Doubly magic character of  $^{78}\text{Ni}$  – complex studies of simple nuclei*”, seminar w Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge-TN, USA, luty 2005 r.
10. “*Doubly magic character of  $^{78}\text{Ni}$  – complex studies of simple nuclei*”, seminarium na Wydziale Fizyki i Astronomii Uniwersytetu w Tennessee, Knoxville-TN, USA, luty 2005 r.

## PRZED ZAKOŃCZENIEM DOKTORATU ALBO NA TEMAT PRACY DOKTORSKIEJ

11. “*Decay studies near the proton drip-line*”, seminarium na Wydziale Fizyki i Astronomii Uniwersytetu w Tennessee, Knoxville-TN, USA, październik 2003 r.
12. “*Decay studies of nuclei near the proton drip-line*”, seminarium na Wydziale Fizyki Uniwersytetu w Mainz, Mainz, Niemcy, kwiecień 2002 r.
13. “*Decay studies of nuclei near the proton-drip line: the cases of  $^{50}\text{Ni}$ ,  $^{60}\text{Ga}$  and  $^{114}\text{Ba}$* ”, seminarium w GSI-Darmstadt, Niemcy, marzec 2002 r.

**5.6.4** INNE REFERATY

## PO ZAKOŃCZENIU DOKTORATU

1. “*Characterisation of the Optical Time Projection Chamber (OTPC)*”, Zebranie komitetu programowego (Program Advisory Committee) Środowiskowego Laboratorium Ciężkich Jonów Uniwersytetu Warszawskiego: prezentacja propozycji eksperymentu, listopad 2014 r.
2. “*Alpha decay studies near  $^{100}\text{Sn}$  at the HRIBF*”, Wspólny ATLAS-HRIBF-NSCL-FRIB User Workshop, referat w imieniu współpracy UT/ ORNL/ UNIRIB/ ORAU/ Milan/ Liverpool/ Vanderbilt/ Warsaw/ KU Leuven/ Oslo/ Padua/ Naples/ NSCL/ Maryland/ Mississippi State Univ./ East Tenn. State Univ./ JHIR/ Kraków, sierpień 2011 r.

3. “*Preliminary results on spectroscopy of extremely neutron rich nickel isotopes*”, NSCL User Workshop, prezentacja wyników eksperymentu E05020 w imieniu współpracy UT/ NSCL/ Milan/ ORNL/ UNIRIB/ Warsaw/ Kraków/ Mississippi State Univ., sierpień 2007 r.
4. Zebranie współpracy UNIRIB , Oak Ridge (TN), USA, styczeń 2006 r.:
  - “*Report from two RMS measurements (RIB045) Identification of the decay of  $T_Z=+1/2$  nucleus  $^{113}\text{Ba}$* ”, referat w imieniu współpracy UT/ ORNL/ JIHIR/ UNIRIB/ Warsaw/ Kraków/ Mississippi State/ Vanderbilt/ Maryland;
  - “*Accepted proposal for an experiment at the HRIBF (RIB-128) Decay spectroscopy of accelerated beam components: a test of the sensitivity of the ranging-out technique. Half-life measurements of  $^{86,87}\text{Ge}$* ”, referat w imieniu współpracy UT/ ORNL/ Mississippi State/ LSU/ Warsaw/ Vanderbilt.
5. “*Decay Spectroscopy Studies at the HRIBF Recoil Mass Spectrometer in 2005*”, HRIBF-PAC12, referat w imieniu HRIBF Decay Spectroscopy Group, grudzień 2005 r.
6. “*Beta delayed gamma and neutron emission near the double shell closure at  $^{78}\text{Ni}$* ”, prezentacja na Fourth RIA Summer School on Exotic Beam Physics, Berkeley (CA), USA, sierpień 2005 r.
7. Zebranie współpracy UNIRIB, Oak Ridge (TN), USA, listopad 2004 r.:
  - “*Accepted proposal for an RMS experiment Identification of the decay of  $T_Z=+1/2$  nucleus  $^{113}\text{Ba}$* ”, wystąpienie w imieniu współpracy UT/ ORNL/ LSU;
  - “*Accepted proposal for an experiment at the HRIBF (RIB-128) Decay spectroscopy of accelerated beam components: a test of the sensitivity of the ranging-out technique. Half-life measurements of  $^{86,87}\text{Ge}$* ”, wystąpienie w imieniu współpracy UT/ ORNL/ MississippiState/ LSU/ Warsaw/ Vanderbilt.
8. “*Beta-delayed neutron and  $\gamma$ -rays from neutron-rich cobalt isotopes*”, NSCL User Workshop, prezentacja wyników eksperymentu E01027 w imieniu współpracy UT/ NSCL/ ORNL/ UNIRIB/ Warsaw/ Vanderbilt/ JIHIR/ Mississippi State Univ., październik 2004 r.
9. “*Test of production rates and background for  $^{45}\text{Fe}$* ”, NSCL User Workshop, prezentacja wyników eksperymentu E03513 w imieniu współpracy NSCL/ Warsaw/ CEN-Bordeaux/ UT/ ORNL, październik 2004 r.



10. Zebranie współpracy UNIRIB, Oak Ridge (TN), USA marzec 2004 r.:
- “*Identification of the decay of  $T_Z=+1/2$  nucleus  $^{113}\text{Ba}$* ”, referat w imieniu współpracy UT/ ORNL/ LSU.

#### PRZED ZAKOŃCZENIEM DOKTORATU

11. “*Alpha decay studies beyond  $^{100}\text{Sn}$* ”,  
Zebranie komitetu programowego (Program Advisory Committee) GSI: propozycji eksperymentu, czerwiec 2002 r.
12. Zebranie współpracy Warszawa-GSI-Valencia, Warszawa, Polska, kwiecień 2002 r.:
- “*Remeasurement of the alpha decay chain  $^{114}\text{Ba} \rightarrow ^{110}\text{Xe} \rightarrow ^{106}\text{Te} \rightarrow ^{102}\text{Sn}$* ”;
  - “*Decay Study of  $^{50}\text{Ni}$  at the FRS*”;
  - “*Proton decay studies of heavy nuclei produced by projectile fragmentation reactions*”.
13. “*Report from S202 and outlook on S235*”,  
GSI-FRS User Workshop, referat w imieniu współprac S202 -Warsaw/ Bordeaux/ GSI/ Edinburgh/ UT/ ORNL/ GANIL/ Liverpool- oraz S235 -GSI/ Warsaw/ Edinburgh/ ORNL/ Argonne, luty 2002 r.

#### 5.6.5 PLAKATY

##### PO ZAKOŃCZENIU DOKTORATU

1. “*Nuclear reactions at astrophysical energies with gamma-ray beams: a novel experimental approach*”,  
plakat na XXXIV Mazurian Lakes Conference on Physics, Piaski, Polska, wrzesień 2015 r.
2. “*On the alpha decay of  $^{109}\text{P}$* ”,  
plakat i referat na Int. Conf. on Nuclei at the Limits, Nuclear Structure '06, Oak Ridge (TN), USA, lipiec 2006 r.
3. “*Beta-delayed  $\gamma$  and neutron emission near the double shell closure at  $^{78}\text{Ni}$* ”,  
plakat i referat na Int. Conference ENAM04, Pine Mountain (GA), USA, wrzesień 2004 r.

PRZED ZAKOŃCZENIEM DOKTORATU

4. "*First measurement of  $\beta$ -decay properties of the proton drip-line nucleus  $^{60}\text{Ga}$* ",  
plakat na zebraniu DPG, Münster, Niemcy, marzec 2002 r.
5. "*Alpha decay of  $^{114}\text{Ba}$* ",  
plakat na Int. Conf. ENAM2001, Hämeenlinna, Finland, lipiec 2001 r.

Warszawa, 26 stycznia 2016 r.

*Chiara Mazzocchi*