

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

*На правах рукописи*

*ФОМИЧЁВ*

*Андрей Сергеевич*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКЗОТИЧЕСКИХ  
ЯДЕР С  $Z < 20$  НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ DRIBs

01.04.01 Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук

Дубна 2017

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций  
им. Г.Н. Флёрва  
Объединённого института ядерных исследований

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук С.Б. Сакута, Национальный  
Исследовательский Центр "Курчатовский институт", г. Москва

доктор физико-математических наук Г.Д. Алхазов, Федеральное  
государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт  
ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального Исследо-  
вательского Центра "Курчатовский Институт", г. Гатчина

доктор физико-математических наук В.Г. Недорезов, Федеральное  
государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных  
исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), г. Москва

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской  
академии наук (ФТИ РАН), г. Санкт-Петербург

Защита состоится « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г. в \_\_\_\_\_ часов  
на заседании диссертационного совета Д.720.001.06 при  
Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка и  
Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флёрва  
Объединённого института ядерных исследований по адресу:  
141980, ул. Жолио Кюри 6, г. Дубна, Московская область.

С работой можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ОИЯИ.

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Учёный секретарь  
Диссертационного совета

А.Г. Попеко

## Актуальность темы.

На сегодняшний день лишь для самых лёгких ядер, представленных на Рис. 1, достигнуты границы стабильности, а свойства лёгких ядер вблизи этих границ ( ${}^7\text{H}$ ,  ${}^{9,10}\text{He}$ ,  ${}^{11,13}\text{Li}$ ,  ${}^{16}\text{Be}$  и др.) продолжают интенсивно изучаться. Для более тяжёлых изотопов ( $Z > 5$ ) информация о ядерной структуре и каналах распадов экзотических ядер оказывается весьма скудной и противоречивой, особенно с экспериментальной точки зрения. Принято считать, что границы ядерной стабильности определяются теми нуклидами, для которых энергия отделения ядерных фрагментов (одного нуклона, нескольких нуклонов, альфа-частицы, более тяжёлого кластера) становится положительной.

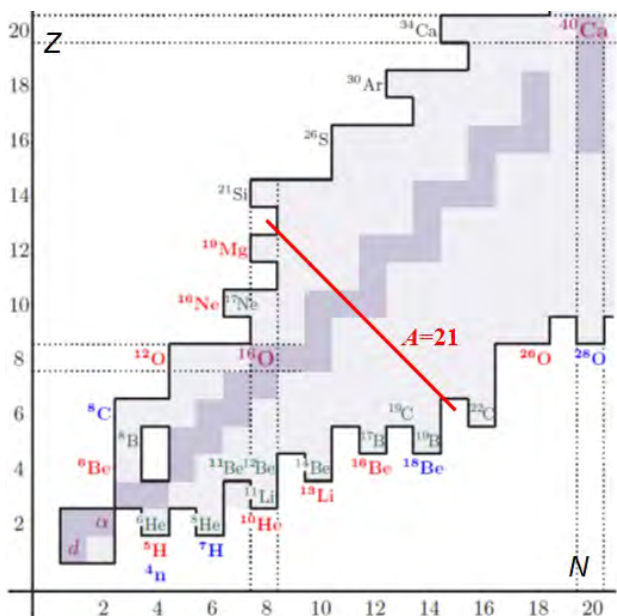


Рис. 1. Границы ядерной стабильности для ядер с зарядом менее 20.

Для ядер вблизи границ стабильности типичное время жизни составляет  $\sim 10^{-21}$  с. Наиболее эффективным инструментом для исследования таких короткоживущих систем является использование ядерных реакций с пучками радиоактивных изотопов с применением самых современных экспериментальных методик. Данная работа посвящена изучению экзотических систем, принадлежащих области изотопов с зарядом  $Z < 20$ . Это нейтронно-избыточное ядро  ${}^6\text{He}$  и нейтронно-дефицитные изотопы  ${}^6\text{Be}$ ,  ${}^{17}\text{Ne}$ ,  ${}^{26}\text{P}$ ,  ${}^{26}\text{S}$  и  ${}^{27}\text{S}$ . Для этих ядер была получена новая информация, что позволило внести коррекции в имеющиеся литературные данные.

Актуальность исследований, проводимых на комплексе DRIBs (Dubna Radioactive Ion Beams), определяется следующими обстоятельствами:

- для лёгких систем ( $Z < 20$ ) границы ядерной стабильности более доступны для их экспериментального достижения, но несмотря на это, свойства этих систем остаются малоизученными;
- даже самые короткоживущие экзотические ядерные системы, нестабильные относительно испускания нескольких нуклонов (например,  ${}^{15}\text{F}$ ,  ${}^{16}\text{Ne}$ ,  ${}^{29}\text{Cl}$  и др.), всё ещё обладают структурой с индивидуальными квантовыми состояниями, а свойства таких систем существенно отличаются от свойств стабильных ядер, и они изучены крайне недостаточно;
- проводимые исследования представляют повышенный интерес не только для фундаментальной ядерной физики, но и для ядерных

- приложений астрофизики, материаловедения и др.;
- ускорительный комплекс DRIBs в ЛЯР ОИЯИ является единственной функционирующей экспериментальной площадкой в России, предоставляющей условия для исследований с радиоактивными пучками на высоком уровне;
  - для получения новой экспериментальной информации о свойствах экзотических ядер необходимо разрабатывать и применять новые методы и подходы, *именно этому обстоятельству уделено особое внимание в данной работе*;
  - тесное сотрудничество автора работы с теоретиками позволило эффективно планировать и моделировать постановку опытов, а также анализировать и интерпретировать получаемые результаты;
  - сотрудничество с коллаборацией Super-FRS @ FAIR (в рамках проекта EXPERT) является перспективным для совместных исследований изотопов вблизи и за границами ядерной стабильности (для изотопов с  $Z > 20$ , включительно).

### **Цели и задачи работы.**

1. Создание экспериментальных условий, необходимых для проведения опытов с пучками радиоактивных изотопов на ускорительном комплексе DRIBs в ЛЯР ОИЯИ.
2. Развитие новых экспериментальных методик и подходов для регистрации продуктов ядерного взаимодействия при столкновении радиоактивных и стабильных ядер с ядром-мишенью.

3. Развитие алгоритмов анализа сложных корреляционных спектров и их использование для получения новой информации о структуре и свойствах экзотических ядер.
4. Исследование реакций с участием ядра  ${}^6\text{He}$ , имеющего гало структуру; изучение спектра возбуждений  ${}^6\text{Be}$ ; получение новых данных о слабых ветках распада возбуждённых состояний ядер  ${}^{17}\text{Ne}$ ,  ${}^{26}\text{P}$ ,  ${}^{27}\text{S}$ , участвующих в астрофизическом  $rp$ -процессе нуклеосинтеза; поиск неизвестного изотопа  ${}^{26}\text{S}$  и исследование его основных свойств  $T_{1/2}$ ,  $Q_p$ ,  $Q_{2p}$ .
5. Разработка и реализация долгосрочной программы исследований с использованием пучков радиоактивных изотопов на новом фрагмент-сепараторе АКУЛИНА-2.
6. Разработка и тестирование детекторных систем, создаваемых для совместного использования в рамках проекта EXPERT коллаборации Super-FRS (NuSTAR, FAIR).

### **Научная новизна и практическая ценность работы.**

1. Созданы базовые условия для проведения экспериментов с радиоактивными пучками на комплексе DRIBs в ЛЯР ОИЯИ – системы получения, очистки и мониторинга пучка радиоактивных ядер, детектирующие системы, системы сбора и визуализации данных.
2. Разработаны и реализованы новые методики экспериментов с радиоактивными и стабильными пучками в диапазоне энергий  $E \sim 10 \div 35$  МэВ/нуклон. Среди них: а) реализованная на пучке ядер  ${}^6\text{He}$

и  ${}^6\text{Li}$  методика получения эксклюзивных данных о тяжёлых продуктах ядерных реакций; б) методика исследования континуума высокой энергии в спектре возбуждения ядра  ${}^6\text{Be}$ ; в) метод определения выходов редких каналов протонного распада возбуждённых состояний ядер, находящихся на пути астрофизического  $rp$ -процесса нуклеосинтеза, предложенный и реализованный для поиска ветви  $2p$ -распада первого возбуждённого состояния  ${}^{17}\text{Ne}$ ; г) адаптация и применение оптической время-проекционной камеры для изучения процессов эмиссии запаздывающих протонов ядрами  ${}^{26}\text{P}$ ,  ${}^{27}\text{S}$ ; д) методика поиска ранее неизвестных ядер на границе протонной стабильности, применённая для получения данных о радиоактивном распаде изотопа  ${}^{26}\text{S}$ . На основании полученных результатов были сделаны существенные коррекции имеющихся литературных данных.

3. Создана и продолжает развиваться методическая база для проведения экспериментов на ускорительных комплексах У-400М/АКУЛИНА-2 и SIS-100/Super-FRS с целью изучения экзотических ядер на качественно новом уровне.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработка и применение новых методов проведения экспериментов с радиоактивными и стабильными пучками с целью получения новой информации об экзотических ядрах, а именно:

а) изучение реакций полного и неполного слияния для систем  ${}^6\text{He}(64 \text{ МэВ}) + {}^{166}\text{Er}$  и  ${}^6\text{Li}(58 \text{ МэВ}) + {}^{165}\text{Ho}$  с идентификацией

составного ядра в выходном канале посредством регистрации двойных и тройных совпадений  $\gamma\text{-}\gamma$ ,  $\gamma\text{-}\gamma\text{-}n$ ,  $\gamma\text{-}\gamma\text{-}p$ ,  $\gamma\text{-}\gamma\text{-}d$ ,  $\gamma\text{-}\gamma\text{-}\alpha$ ;

б) корреляционный анализ экспериментальных данных для продуктов распада ядерной системы  ${}^6\text{Be}$ , полученной в реакции перезарядки  ${}^1\text{H}({}^6\text{Li}, {}^6\text{Be})n$ ;

в) прямая проверка теоретических предсказаний о времени жизни  ${}^{26}\text{S}$  из данных эксперимента по имплантации радиоактивного пучка в кремниевый телескоп;

г) изучение редких каналов ( $\beta p$ ,  $\beta 2p$ ,  $\beta 3p$ ) при распаде изотопов  ${}^{26}\text{P}$  и  ${}^{27}\text{S}$  в рабочем объёме оптической время-проекции камеры;

д) метод комбинированной массы, применённый для регистрации продуктов реакции  ${}^1\text{H}({}^{18}\text{Ne}, d){}^{17}\text{Ne}^*$ , позволивший получить новый предел соотношения  $\Gamma_{2p}/\Gamma_{\gamma} < 1.6(3)\times 10^{-4}$  для уровня ( $3/2^-$ ) ядра  ${}^{17}\text{Ne}$ .  
*Все перечисленные методы для изучаемых ядер на комплексе DRIBs были применены впервые.*

2. Физические результаты о структуре ядер с  $Z < 20$  ( ${}^6\text{He}$ ,  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^6\text{Be}$ ,  ${}^{17}\text{Ne}$ ,  ${}^{26}\text{P}$ ,  ${}^{26}\text{S}$ ,  ${}^{27}\text{S}$ ), полученные с использованием развитых методик и оригинальных подходов.

3. Разработка долгосрочной программы исследований на комплексе У-400М/АКУЛИНА-2. Это поиск и изучение новых видов распада – одновременная эмиссия 4-х нейтронов ( $4n$ ), двух протонов ( $2p$ ) и двух нейтронов ( $2n$ ) для ядерных систем, находящихся за границей стабильности ( ${}^7\text{H}$ ,  ${}^{13}\text{Li}$ ,  ${}^{11}\text{O}$ ,  ${}^{17}\text{Ne}$ ,  ${}^{26}\text{S}$ ).



4. Формирование перспективной научной программы с учётом применения новых детекторных систем (микростриповые кремниевые телескопы, радиационно-стойкие быстродействующие кремниевые детекторы, гамма-детекторы, нейтронный детектор высокого углового разрешения) при проведении экспериментов на фрагмент-сепараторе Super-FRS в рамках проекта EXPERT.

#### **Апробация диссертационной работы.**

Результаты диссертации были представлены автором более чем на 20 международных и национальных конференциях, сессиях ПКК ОИЯИ, совещаниях и семинарах, в том числе:

- R3B/EXL Calorimeter Working Group meeting, February 2-3, 2006, Orsay, France
- Международная конференция «ЯДРО-2006», 4-8 сентября 2006, Саров, Россия
- Int. Conference EURORIB'08, June 9-13, 2008, Giens, France
- The Fifth Int. Conference on Exotic Nuclei and Atomic Masses (ENAM), September 7-13, 2008, Ryn, Poland
- Int. Conference “New Opportunities in the Physics Landscape at CERN”, May 10-14, 2009, Geneva, Switzerland
- Dubna NuSTAR meeting, October 5-10, 2009, Dubna
- Int. Seminar at iThemba Labs, 22 октября 2009, ЮАР
- Int. Conf. “Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy”, June 7 - 12, 2010, Kyiv, Ukraine

- Int. Conference on Advances in Radioactive Isotope Science (ARIS – 2011) May 29 – June 3, 2011, Leuven, Belgium
- KLFTP-BLTP Joint Workshop on Nuclear Physics, 6-8 сентября 2011, Пекин, Китай
- Int. Conf. EURORIB'2012, 20-26 мая 2012, Абано Терме, Италия
- Int. Conf. on Nuclear Struct. & Related Topics, July 2-7, 2012, Dubna
- VIII TOURS Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics, September 1-8, 2012, Black Forest, Germany
- 6-th APCTP-BLTP JINR Joint workshop, October 8-10, 2012, Pohang, Korea
- R3B Collaboration meeting, Dec. 10-15, 2012, CSIC, Madrid, Spain
- 7-th APCTP-BLTP JINR Joint Baikal workshop, 14-19 июля 2013, Большие Коты, Россия
- NuSTAR week 2013, October 6-10, 2013, Helsinki, Finland
- 5-th Int. Expert Meeting of Fragment Separators, December 10-12, 2013, RIKEN, Japan
- Super-FRS Coll. Meeting, October 23-25, 2013, Walldorf, Germany
- Super-FRS Coll. Meeting, February 27-28, 2014, Walldorf, Germany
- Int. Symp. on Exotic Nuclei (EXON-2014), 8-13 сентября 2014, Калининград, Россия
- Int. Conf. on Nuclear Struct. & Related Topics, July 14-18, 2015, Dubna
- JINR PAC for Nuclear Physics, January 21, 2016 and June 14, 2017, Dubna

Всего автором по теме диссертации опубликованы более 30 работ в изданиях, рекомендованных ВАК, из которых 15 работ вынесены на защиту.

### **Личный вклад автора.**

Личное участие автора в работах, составляющих основу диссертации, является определяющим. Автор принимал непосредственное участие в разработке и реализации новых методов, используемых при проведении экспериментов с радиоактивными и стабильными пучками на комплексе DRIBs. Автор участвовал в планировании, организации и проведении экспериментов, обработке и интерпретации экспериментальных данных. Большой вклад был сделан в развитие различных детекторных систем и электроники, а также в систему сбора данных в стандарте VME. Под непосредственным руководством автора была построена новая установка фрагмент-сепаратор АКУЛИНА-2, физический пуск которой состоялся в 2016 году; разработана программа исследований с радиоактивными пучками на этой установке. Автор принимал активное участие в развитии международного сотрудничества, в частности в рамках коллаборации Super-FRS была подготовлена техническая документация (TDR) для проекта EXPERT (документ утверждён экспертным советом FAIR в июле 2017).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из Введения, 3-х глав, Заключения, двух Приложений и списка

использованной литературы. В конце каждой главы сформулированы отдельные выводы. Полный объем работы составляет 111 страниц и включает в себя 52 рисунка, 8 таблиц, 2 приложения и список из 133 библиографических источников (из них 126 статей и 15 электронных ресурсов со свободным доступом).

### Содержание работы

**Введение** даёт представление о предмете исследований ядер вблизи и за границами ядерной стабильности, а также об особенностях ядерной структуры экзотических систем. Подчёркивается актуальность проводимых исследований и развиваемых методик.

Таблица 1. Основные характеристики фрагмент-сепараторов комплекса DRIBs в сравнении с некоторыми зарубежными установками. Символами обозначены:  $\Delta\Omega$  – угловой акцептанс;  $\delta_p = \Delta p/p$  – импульсный акцептанс;  $p/\Delta p$  – разрешающая способность по импульсу частиц;  $B_p$  – максимальная жёсткость,  $L$  – длина от производящей мишени до финального фокуса,  $E_{\min}$  и  $E_{\max}$  означают границы энергетического диапазона в МэВ/нуклон для получаемых радиоактивных пучков.

Уст-ка Инст-т	ACC FLNR, JINR	ACC-2 JINR	COM- BAS GANIL	LISE GANIL	A- 1900 MSU	RIPS RIKEN	Big- RIPS RIKEN	FRS GSI	Super FRS GSI
$\Delta\Omega$ , msr	0.9	5.8	6.4	1.0	8.0	5.0	8.0	0.32	5.0
$\delta_p$ , %	2.5	6.0	20	5.0	5.5	6.0	6.0	2.0	5.0
$p/\Delta p$ , a.u.	1000	2000	4360	2200	2915	1500	3300	8600	3050
$B_p$ , Tm	3.2	3.9	4.5	4.3	6.0	5.76	9.0	18	18
$L$ , m	21	38	14.5	42	35	21	77	74	140
$E_{\min}$	10	5	20	40	110	50		220	
$E_{\max}$	40	50	80	80	160	90	350	1000	1500

**Первая глава** посвящена анализу особенностей проведения экспериментов с пучками радиоактивных изотопов. В ней кратко описаны методы получения радиоактивных изотопов, перечислены основные центры, где ведутся эксперименты с радиоактивными пучками, включая комплекс DRIBs в ЛЯР ОИЯИ (Таблица 1), а также описаны наиболее распространённые подходы в экспериментальных исследованиях с радиоактивными пучками в широком диапазоне энергий, подробности в обзоре [1].

**Вторая глава** состоит из 5 разделов, в каждом из которых описаны детали экспериментов с радиоактивными и стабильными пучками на комплексе DRIBs. В каждом опыте были применены оригинальные методы и подходы, позволившие получить новую информацию о структуре и свойствах изотопов  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^6\text{Be}$ ,  ${}^{17}\text{Ne}$ ,  ${}^{26}\text{P}$ ,  ${}^{26,27}\text{S}$ .

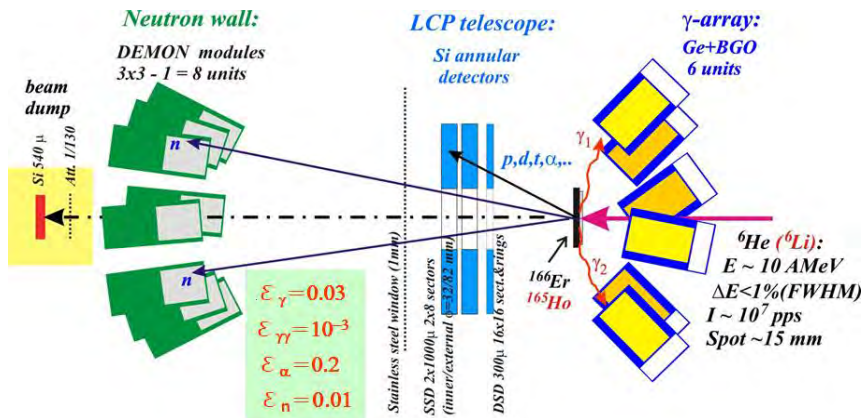


Рис. 2. Схема экспериментов по изучению свойств слабосвязанных ядер  ${}^6\text{He}$  и  ${}^6\text{Li}$  в реакциях полного и неполного слияния, ведущих к образованию составного ядра  ${}^{166}\text{Yb}$ .

В экспериментах по изучению реакций полного и неполного слияния для систем  ${}^6\text{He}(64 \text{ МэВ}) + {}^{166}\text{Er}$  и  ${}^6\text{Li}(58 \text{ МэВ}) + {}^{165}\text{Ho}$  была реализована методика идентификации образовавшегося составного ядра по дискретным гамма переходам и выделением выходного канала реакций по совпадениям с заряженными частицами и нейтронами. Схема опыта, проводимого на комплексе DRIBs при работе двух ускорителей У400 и У-400М [2,3], показана на Рис. 2.

Таблица 2. Результаты анализа экспериментальных данных с использованием кода EMPIRE, на основе которого была получена информация о величине критического углового момента  $l_{\text{crit}}$ , параметре диффузности  $D_l$  и сечениях  $\sigma_{\text{xn}}$ ,  $\sigma_{\text{fus}}$  для двух реакций. Так называемый фактор подавления процесса полного слияния для  ${}^6\text{He}$ , определённый из соотношения  $F = 2490 / 731 \cong 3.41$ , оказался в 1.42 раза больше, чем для  ${}^6\text{Li}$  ( $F = 2.40$ ). Это объясняется ббльшей вероятностью неполного слияния в реакции  ${}^6\text{He} + {}^{166}\text{Er}$ , чем в  ${}^6\text{Li} + {}^{165}\text{Ho}$ .

Реакция @ Энергия пучка (МэВ)	$\sigma_{\text{fus}} \text{ (мб)} / l_{\text{crit}} \text{ (ед. } \hbar)$		F - фактор подавл. полного слияния	$\sigma_{\text{xn}} / D_l \text{ (мб)} / \text{(ед. } \hbar)$	
	Значения по умолчанию	Результат $\chi^2$ фит-я		Значения по умолч.	Результат $\chi^2$ фит-я
${}^{166}\text{Er}({}^6\text{He}, 6n)$ ${}^{166}\text{Yb} @ 64$	2490 / 39.0	731 / 19.3	3.41	881 / 1.5	254 / 1.5
${}^{165}\text{Ho}({}^6\text{Li}, 5n)$ ${}^{166}\text{Yb} @ 58$	1770 / 32.5	737 / 18.6	2.40	656 / 0.2	244 / 0.4

Экспериментальные данные анализировались с помощью кода EMPIRE, в результате чего была получена информация о параметрах  $l_{\text{crit}}$ ,  $D_l$  и сечениях  $\sigma_{\text{xn}}$ ,  $\sigma_{\text{fus}}$  для двух реакций. Итоговые значения этих величин приведены в Таблице 2.

С целью детального изучения спектра возбуждённых состояний  ${}^6\text{Be}$  в реакции перезарядки  ${}^1\text{H}({}^6\text{Li}, {}^6\text{Be})n$  при энергии 32.5 МэВ/нуклон была разработана и реализована методика [4,5]. Схема опыта, проведённого на установке АКУЛИНА, показана на Рис. 3.

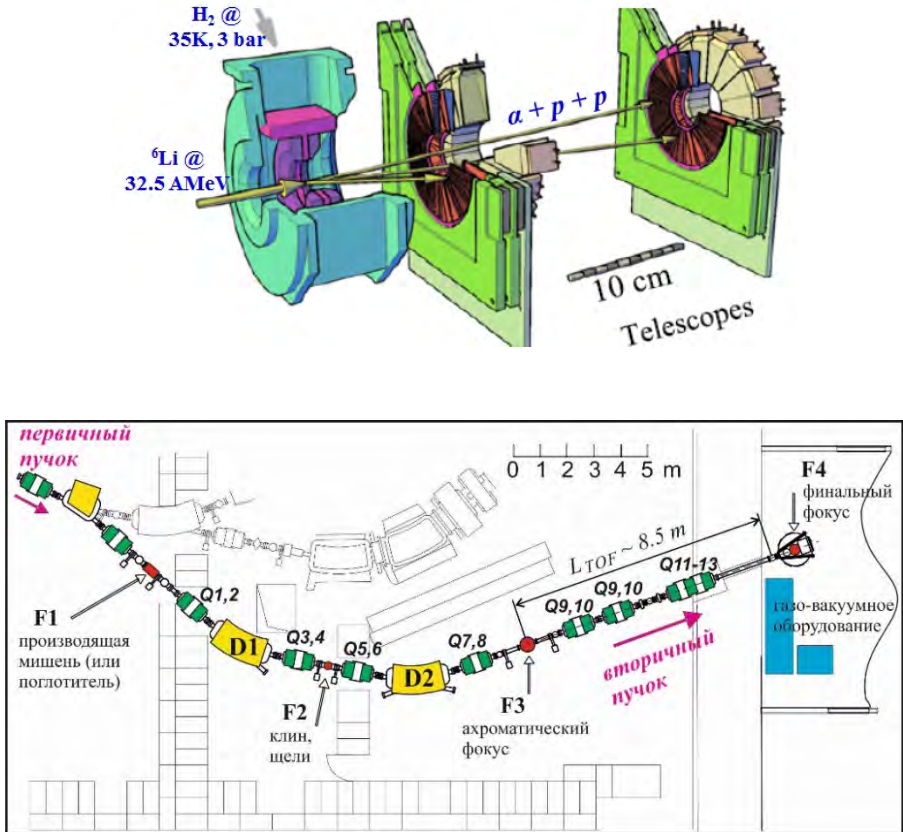


Рис.3. Верхняя панель: схема эксперимента по изучению  ${}^6\text{Be}$  в реакции  ${}^1\text{H}({}^6\text{Li}, {}^6\text{Be})n$ . Нижняя панель: установка АКУЛИНА, адаптированная для получения монохроматического первичного пучка  ${}^6\text{Li}$  нужной энергии. В плоскости F1 вместо производящей мишени устанавливался углеродный поглотитель энергии; в плоскости F2 зазор щелей составлял  $\pm 1.5$  мм, клин не использовался.

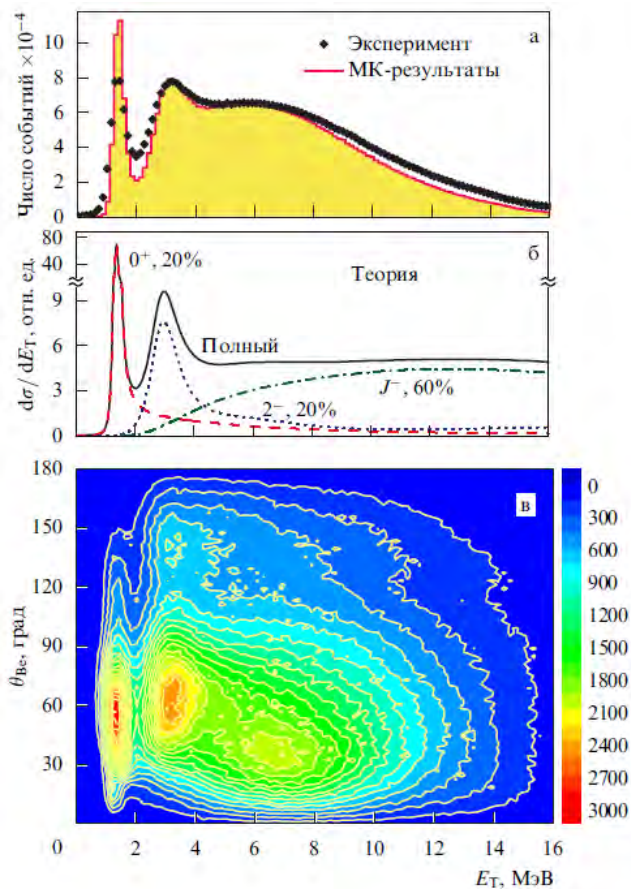


Рис.4. Спектр состояний  ${}^6\text{Be}$ : точки – эксперимент, гистограмма – результат симуляции методом Монте-Карло теоретической формы спектра с учётом эффективности установки (а). Результаты теоретических расчётов, которые послужили входными данными для МК-симуляций (б). Контурная диаграмма в координатах  $\theta_{Be}$ - $E_T$  для данных, наблюдаемых в эксперименте (в).

В итоге были получены экспериментальные данные с большой статистикой (см. Рис. 4). Данные кинематически полные в диапазоне углов  $\theta_{\text{ЦМ}} = 0 \div 180^\circ$ , получены с высоким энергетическим



разрешением и в широком энергетическом диапазоне  $E_T < 16$  МэВ ( $E_T$  - энергия над порогом распада  ${}^6\text{Be}$ ). Важным результатом анализа данных стало утверждение о наблюдении изовекторной мягкой дипольной моды. Это нерезонансные переходы с отрицательной чётностью  $J^\pi = \{0^-, 1^-, 2^-\}$ , заселяющиеся в диапазоне энергий  $E_T > 4$  МэВ с высоким сечением (~60% от всех событий в спектре  $E_T$ ). Теоретический подход для описания данного явления, наблюдавшегося ранее для изотопов  ${}^{6,8}\text{He}$ , был развит в работе [6].

На установке АКУЛИНА был проведён поисковый эксперимент по обнаружению изотопа  ${}^{26}\text{S}$  методом имплантации продуктов реакции фрагментации  ${}^{32}\text{S}$  (50.3 МэВ/нуклон) + Be (92.4 мг/см<sup>2</sup>) в кремниевый телескоп [7]. Кроме времени жизни  ${}^{26}\text{S}$  в работе исследовались энергии распада  $Q_p$  и  $Q_{2p}$  (при испускании одного и двух протонов, соответственно). Экспериментально был установлен новый предел на время жизни  ${}^{26}\text{S}$ :  $T_{1/2} < 79$  нс, отличающийся от известных литературных данных более чем на 5 порядков ( $\approx 10$  мс по данным NNDC 2011). На основании данных эксперимента и теоретических расчётов [7] в приближении релятивистского среднего поля, связывающих ширину и время жизни с энергией  $2p$ -распада, была сделана оценка для величины  $Q_{2p}({}^{26}\text{S})$ :  $Q_{2p} > 640$  кэВ (см. Рис. 5) и высказано предположение о высокой вероятности истинного  $2p$ -распада для изотопа  ${}^{26}\text{S}$ . Для  $1p$ -распада установлен предел  $Q_p({}^{26}\text{S}) > 120$  кэВ.

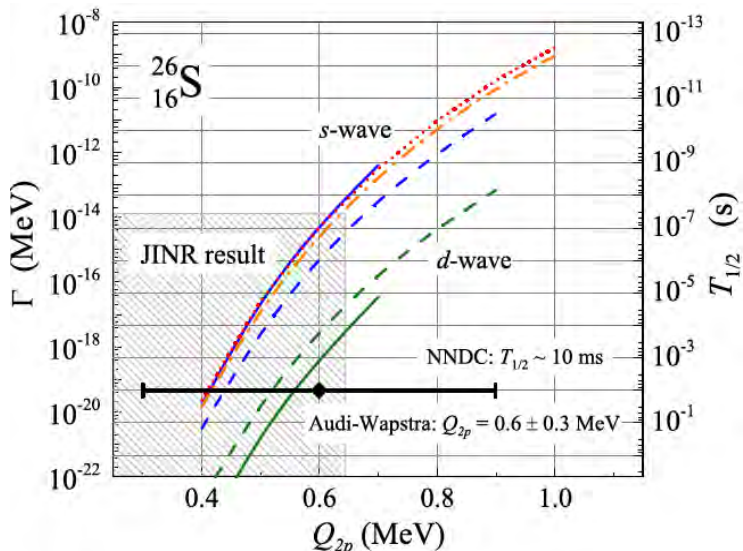


Рис.5. Расчёты границ ширины  $\Gamma$  и времени жизни  $T_{1/2}$  как функции энергии  $2p$ -распада. Сплошные и пунктирные линии соответствуют расчётам по модели квазиклассической спонтанной эмиссии и трех-частичной модели " $l^2$ ", соответственно, детали описаны в работе [7]. Заштрихованная зона, как следствие анализа данных, исключает возможный диапазон значений  $Q_{2p}$  и  $T_{1/2}$ . Символом с ошибками обозначены ранее принятые значения  $Q_{2p} = 0.6 \pm 0.3$  МэВ и  $T_{1/2} \sim 10$  мс.

С использованием метода имплантации продуктов реакции фрагментации  $^{32}\text{S}$  (50.3 МэВ/нуклон) + Ве в оптическую время-проекционную камеру (ОВПК) [8,9] были исследованы редкие ветки бета-задержанной эмиссии протона и двух протонов для нейтронно-дефицитных изотопов  $^{26}\text{P}$  и  $^{27}\text{S}$ . Экспериментально были установлены новые более точные значения для вероятностей ветвления по каналам  $\beta p$ ,  $\beta 2p$  и  $\beta_{tot}$  при распаде изотопов  $^{26}\text{P}$  и  $^{27}\text{S}$ , которые заметно (в 3 и более раз) отличаются от литературных

данных [32\*,33\*]. Итоговые значения приведены в Таблице 3, а детали этого эксперимента описаны в работе [10].

Таблица 3. Сравнение результатов экспериментов с использованием ОВПК и литературных данных с применением кремниевого телескопа (нижняя строка) по изучению процессов  $\beta p$ ,  $\beta 2p$  и  $\beta_{tot}$  при распаде изотопов  $^{26}\text{P}$  [32\*] и  $^{27}\text{S}$  [33\*]; в круглых скобках указаны ошибки.

$^{26}\text{P}$				$^{27}\text{S}$			
$P_{\beta p}$ 415 кэВ	$P_{\beta p}$ ~800 кэВ	$P_{\beta 2p}$	$P_{tot}$	$P_{\beta p}$ 320 кэВ	$P_{\beta p}$ 710 кэВ	$P_{\beta 2p}$	$P_{tot}$
10.4(9)% ÷ 13.8(10) %	1.1(3) %	1.5(4) %	35(2) %	24(3)% ÷ 28(2)%	> 6.7(8) %	3.0(6) %	64(3) %
17.96(90) %	2.5(3) %	2.2(3) %	39(2) %	2.3±0.9%		1.1± 0.5%	~ 4%

Метод имплантации изотопов в ОВПК, адаптированный к радиоактивному пучку невысокого качества на установке АКУЛИНА, показал свои преимущества по сравнению с методом имплантации изотопов в кремниевый телескоп, а именно: а) отсутствие фона в диапазоне энергий протонов, начиная с  $E_p > 100$  кэВ, т.е. возможность регистрации короткопробежных протонов; б) одновременная визуализация имплантированных изотопов  $^{26}\text{P}$ ,  $^{27}\text{S}$  и всех заряженных продуктов их распада с временной привязкой событий. В ряде случаев методика ОВПК может конкурировать с так называемой 'активной мишенью' [11,12].

Нами был предложен и осуществлён новый эффективный метод исследования редких ветвей протонного и двухпротонного распада возбуждённых состояний ядер на границе протонной стабильности [13,14]. Метод, схематично изображённый на Рис. 6 и получивший название метод «комбинированной массы», обеспечивал достаточно высокое энергетическое разрешение при высокой светимости эксперимента.

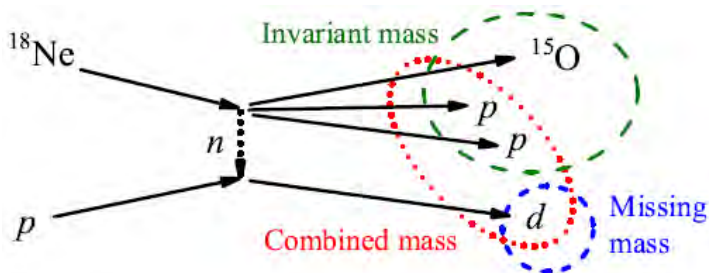


Рис. 6. Схематичное изображение методов изучения ядерных реакций с радиоактивными пучками на примере  $^{18}\text{Ne} + ^1\text{H} \rightarrow ^2\text{H} + ^{17}\text{Ne}^* (\rightarrow ^{15}\text{O} + p + p)$ . Цветами обозначены различные способы измерения спектра возбуждения и  $2p$ -распада состояний  $^{17}\text{Ne}^*$ .

Для астрофизики огромный интерес представляет первое возбуждённое состояние  $^{17}\text{Ne}$  ( $J^\pi=3/2^-$ ) с энергией  $E^* = 1288$  кэВ. Эта энергия всего на 344 кэВ превышает порог двухпротонного распада  $^{17}\text{Ne} \rightarrow ^{15}\text{O} + 2p$ , причём канал распада одним протоном энергетически запрещён, см. Рис. 7. Знание соотношения  $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma$ , полученное экспериментально, позволяет судить о возможности обхода точки ожидания  $rp$ -процесса путём двухпротонного захвата в реакции  $^{15}\text{O}(2p,\gamma)^{17}\text{Ne}$  [35\*].

В эксперименте  ${}^1\text{H}({}^{18}\text{Ne},d){}^{17}\text{Ne}^*$ , проведённом на установке АКУЛИНА, для ветки  $2p$ -распада первого возбуждённого состояния ( $J^\pi = 3/2^-$ ) изотопа  ${}^{17}\text{Ne}$ , был получен новый предел отношения  $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma < 1.6(3)\times 10^{-4}$ , который оказался в  $\sim 50$  раз ниже, чем литературные данные [34\*]. Этот предел ещё далёк до предсказанного теоретиками значения  $\sim 10^{-6}$  [35\*]. Однако, было показано [14], что метод комбинированной массы имеет перспективы для дальнейшего развития и достижения этого теоретического значения.

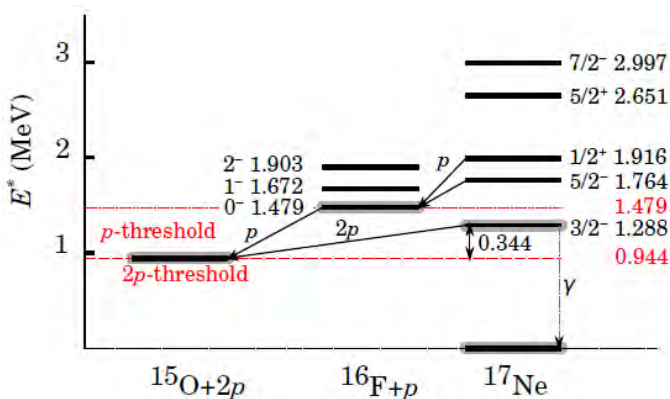


Рис.7. Схема уровней изотопа  ${}^{17}\text{Ne}$  и его подсистемы  ${}^{16}\text{F}$ . Стрелками показаны способы распада возбуждённых состояний  ${}^{17}\text{Ne}$ : последовательный распад протонами уровней  $5/2^-$  и  $1/2^+$ , испускание  $\gamma$ -квантов и  $2p$ -распад уровня  $3/2^-$  ( $E=1288$  кэВ).

Дублет вышележащих состояний  $5/2^-$  и  $1/2^+$  с вероятностью, близкой к 100%, испытывает двухпротонный распад с переходом в основное состояние  ${}^{15}\text{O}$  через промежуточные состояния ядра  ${}^{16}\text{F}$ . Близость по энергии этих протонов к искомым протонам из распада

состояния  $3/2^-$  накладывает жёсткие требования к энергетическому разрешению эксперимента, при этом в опыте необходимо набрать как можно большую статистику. На Рис. 8 показан двухмерный спектр  $E_{\text{mis}} - E_{\text{comb}}$ , который позволил локализовать зоны физических и фоновых событий. В результате анализа с использованием Монте-Карло симуляции было получено новое значение предела отношения парциальных ширин для первого возбуждённого состояния  $^{17}\text{Ne}$  ( $J^\pi=3/2^-$ ):  $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma < 1.6(3)\times 10^{-4}$ .

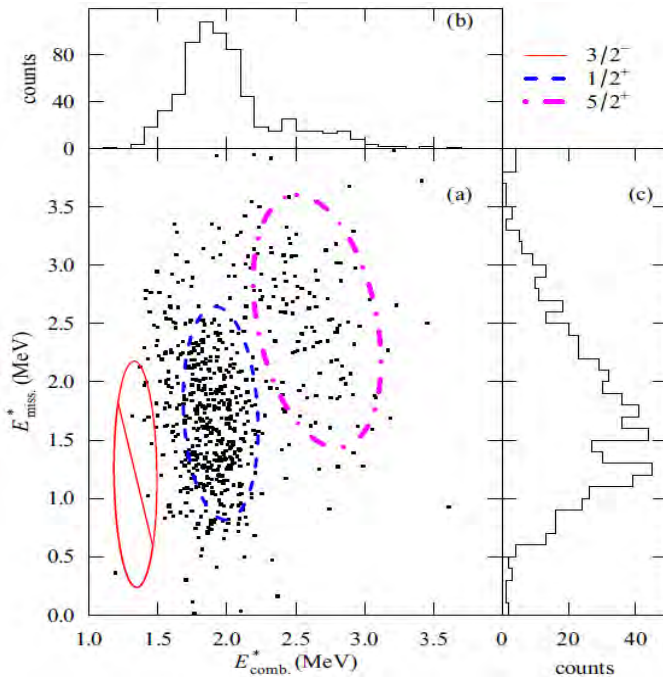


Рис. 8. Распределение событий тройных совпадений  $d-p-p$  в представлении  $E_{\text{mis}} - E_{\text{comb}}$ . События, локализованные в красном эллипсе с достоверностью 68%, взяты для определения верхнего предела соотношения  $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma$ : 9 событий в верхней правой части эллипса и ни одного события в нижней левой части эллипса.

В экспериментах, проводимых на комплексе DRIBs, также развивались и применялись новые методики, детально описанные в работах [15-21].

**Третья глава** посвящена реализуемым и планируемым проектам. В ней кратко изложена долгосрочная программа исследований на сепараторах АКУЛИНА, АКУЛИНА-2 [20-26] и Super-FRS (в рамках проекта EXPERT) [27-31], показаны перспективы совместных исследований на пучках радиоактивных изотопов в ЛЯР ОИЯИ и GSI FAIR (Дармштадт, Германия).

**Приложение 1** даёт представление о современном состоянии исследований свойств ядер вблизи границ нуклонной стабильности.

**Приложение 2** содержит дополнительную информацию о блок-схемах электроники и детекторах, используемых в опытах на комплексе DRIBs; в конце приложения есть список используемых сокращений.

### **В заключении сформулированы основные результаты:**

1. На комплексе DRIBs были проведены эксперименты со слабосвязанными ядрами  ${}^6\text{Li}$  и  ${}^6\text{He}$ , в результате которых изучались каналы полного и неполного слияния при образовании составного ядра  ${}^{166}\text{Yb}$ . Показано, что выходной канал реакции эффективно выделяется при организации тройных совпадений: гамма-гамма-заряженная частица и гамма-гамма-нейтрон. Специально разработанные методики позволили получить информацию о критическом угловом моменте, коэффициенте диффузности,

сечениях испарения нейтронов и сечении слияния для реакций  $^{165}\text{Ho}(^6\text{Li},5n)^{166}\text{Yb}$  и  $^{166}\text{Er}(^6\text{He},6n)^{166}\text{Yb}$ .

2. В реакции перезарядки  $^1\text{H}(^6\text{Li},^6\text{Be})n$  был реализован эффективный метод регистрации трёх частиц  $\alpha$ - $p$ - $p$ , продуктов распада  $^6\text{Be}$ , позволивший получить качественно новые экспериментальные данные для спектра возбуждений  $^6\text{Be}$ . Данные получены с высокой статистикой и хорошим энергетическим разрешением, являются кинематически полными в диапазоне углов  $\theta_{\text{цм}} = 0 \div 180^\circ$ . Впервые было получено не только хорошее описание всего спектра возбуждений  $^6\text{Be}$ , но и двумерных профилей всего набора кинематических переменных, для которых были получены зависимости профилей от энергии в диапазоне  $E_T < 16$  МэВ.

3. Впервые в спектре возбуждений  $^6\text{Be}$  обнаружено заселение изовекторной мягкой дипольной моды (ИВМДМ) с энергией возбуждения  $E_T > 4$  МэВ. Явление ИВМДМ отвечает заселению широкого спектра состояний со спином/чётностью  $J^\pi = \{0^-, 1^-, 2^-\}$ .

4. Методы идентификации заряженных частиц ( $\Delta E$ -ToF,  $\Delta E$ -E) были развиты и применены для задачи поиска изотопа  $^{26}\text{S}$  среди продуктов реакции фрагментации  $^{32}\text{S}(50.3 \text{ МэВ/нуклон})+\text{Be}$ . В результате исследований был экспериментально установлен новый предел на время жизни  $^{26}\text{S}$ :  $T_{1/2} < 79$  нс, отличающийся от известных литературных данных более чем на 5 порядков ( $\approx 10$  мс). На основании данных эксперимента и теоретических расчётов была сделана оценка для величины  $Q_{2p}(^{26}\text{S})$ :  $Q_{2p} > 640$  кэВ. Высказано



предположение, что наиболее вероятным каналом распада изотопа  $^{26}\text{S}$  является истинное испускание двух протонов.

5. Метод ОВПК получил дальнейшее развитие за счёт модернизации систем идентификации частиц и сбора данных, что позволило эффективно работать с пучком РИ невысокого качества очистки от примесей. Проведено изучение редких веток распада изотопов  $^{26}\text{P}$  и  $^{27}\text{S}$ , имеющих отношение к астрофизике; получены новые более точные значения для вероятностей ветвления по каналам  $\beta p$ ,  $\beta 2p$  и  $\beta_{tot}$ , которые оказались в 3 и более раз отличными от литературных значений. Показаны преимущества метода имплантации исследуемых изотопов в ОВПК по сравнению с методом телескопа, состоящего из кремниевых детекторов.

6. Предложен и реализован новый эффективный метод исследования  $2p$ -распада первого возбуждённого уровня ядра  $^{17}\text{Ne}$ , образующегося в реакции  $^1\text{H}(^{18}\text{Ne}, d)^{17}\text{Ne}^*$  при энергии  $E(^{18}\text{Ne}) = 35$  МэВ/нуклон. Метод, получивший название комбинированной массы, позволил получить достаточно высокое энергетическое разрешение в эксперименте при высокой светимости. Для ветки  $2p$ -распада  $^{17}\text{Ne}$  ( $3/2^-$ ) был получен новый предел отношения  $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma < 1.6(3) \times 10^{-4}$ , который оказался в  $\sim 50$  раз ниже, чем литературные данные. Метод может быть применим к другим изотопам, находящимся вблизи точек ожидания  $rp$ -процесса ( $^{20}\text{Mg}$ ,  $^{38}\text{Ca}$  и др.).

7. Созданы условия для продолжения исследований с пучками РИ на ускорительном комплексе У-400М/АКУЛИНА-2. Предложена программа исследований, нацеленная на поиск новых видов радиоактивного распада ядер вблизи границ стабильности -  $2n$ ,  $2p$ ,  $4n$ . Предложен также план долгосрочного сотрудничества в рамках проекта EXPERT коллаборации Super-FRS, который открывает широкие перспективы для исследований изотопов вблизи и за границами ядерной стабильности (для ядер с  $Z > 20$ , включительно).

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность дирекции ЛЯР и научному руководителю Ю.Ц. Оганесяну, ускорительному отделу, всему коллективу сектора АКУЛИНА. Персонально хотелось бы отметить следующих коллег, без помощи которых получение материала и написание данной работы было бы затруднительным. Это: Г.М. Тер-Акопьян, Л.В. Григоренко, С.В. Степанцов, И.Г. Муха, М.С. Головков, П.Г. Шаров, А.В. Горшков, С.А. Крупко, Р.С. Слепнев. Отдельная благодарность В.В. Авдейчикову и Е.Ю. Никольскому, за внимательное прочтение работы и сделанные замечания.

Автор выражает признательность зарубежным коллегам - Х. Симону, К. Шайденбергеру, М. Пфютцнеру, В. Доминик, З. Яносу, Р. Вольски, Г. Каминьски, В. Худобе, М.В. Жукову за поддержку и развитие сотрудничества с ЛЯР ОИЯИ, а также О.Б. Тарасову за включение ионно-оптических элементов установки АКУЛИНА-2 в программный пакет LISE++.

Автор благодарен А.А. Коршенинникову, А.Н. Васильеву, В.Л. Варенцову, В.К. Еремину, О.А. Киселеву и Б.Ю. Шаркову за помощь в продвижении проекта EXPERT @ FAIR.

Результаты исследований, представленные в диссертации, опубликованы в следующих работах:

1. Григоренко Л.В., Головков М.С., Крупко С.А., Сидорчук С.И., Тер-Акопьян Г.М., Фомичев А.С., Худоба В., *Исследования легких экзотических ядер вблизи границы стабильности в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ*, Успехи физических наук **186** №4 (2016) 337-386.

2. A.S. Fomichev, V. Chudoba, A.V. Daniel, M.S. Golovkov, V.A. Gorshkov, S.A. Krupko, Yu.Ts. Oganessian, G.S. Popeko, S.I. Sidorchuk, R.S. Slepnev, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, V.I. Chepigin, D.E. Katrsev, O.N. Malyshev, A.I. Svirikhin, A.V. Yeremin, Ch. Briançon, K. Hauschild, A. Korichi, M.-H. Ha, F. Hanappe, O. Dorvaux, and L. Stuttge, *Study of complete and incomplete fusion for loosely bound projectiles  ${}^6\text{He}$  and  ${}^6\text{Li}$  on  ${}^{165}\text{Ho}$  and  ${}^{166}\text{Er}$  targets*, Physics of Particles and Nuclei Letters, Vol. 9, No. 6–7, (2012) 496-501.

3. S.A. Krupko, A. V. Daniel, A.S. Fomichev, M.S. Golovkov, V.A. Gorshkov, Yu.Ts. Oganessian, G.S. Popeko, S.I. Sidorchuk, G.M. Ter-Akopian, R.S. Slepnev, V. Chudoba, L. Standylo, R. Wolski, V.I. Chepigin, D.E. Katrsev, O.N. Malyshev, A.I. Svirikhin, A.V. Yeremin, Ch. Briançon, K. Hauschild, A. Korichi, M.-H. Ha, F. Hanappe, O.

Dorvaux, and L. Stuttge, Ch. Goodin, J.H. Hamilton, A.V. Ramayya, *Complete and incomplete fusion of  ${}^6\text{He}$  and  ${}^6\text{Li}$  projectiles with medium mass targets at energy  $\sim 10$  AMeV*, AIP Conf. Proc. v.**1098** (2009) 245-252; FUSION08, Chicago, Sept. 22-26, 2008.

4. A.S. Fomichev, V. Chudoba, I.A. Egorova, S.N. Ershov, M.S. Golovkov, A.V. Gorshkov, V.A. Gorshkov, L.V. Grigorenko, G. Kaminski, S.A. Krupko, I.G. Mukha, Yu.L. Parfenova, S.I. Sidorchuk, R.S. Slepnev, L. Standyła, S.V. Stepantsov, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, M.V. Zhukov, *Isovector soft dipole mode in  ${}^6\text{Be}$* , Phys. Lett. B **708** (2012) 6-13.

5. A.S. Fomichev, A.A. Bezbakh, V. Chudoba, I.A. Egorova, S.N. Ershov, M.S. Golovkov, A.V. Gorshkov, L.V. Grigorenko, P. Jaluvkova, G. Kaminski, S.A. Krupko, E.A. Kuzmin, E.Yu. Nikolskii, I.G. Mukha, Yu.L. Parfenova, P.G. Sharov, S.I. Sidorchuk, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, M.V. Zhukov, A.A. Yukhimchuk, S.V. Filchagin, A.A. Kirdyashkin, I.P. Maksimkin, and O.P. Vikhlyantsev, *Recent results to excited states of  ${}^6\text{Be}$  and  ${}^{10}\text{He}$* , EPJ Web of Conference **38** (2012) 15002, pp.1-6.

6. L.V. Grigorenko, M.S. Golovkov, G.M. Ter-Akopian, A.S. Fomichev, Yu.Ts. Oganessian, V.A. Gorshkov, S.A. Krupko, A.M. Rodin, S.I. Sidorchuk, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, R. Wolski, D.Y. Pang, V.Chudoba, A.A. Korshennikov, E.A. Kuzmin, E.Yu. Nikolskii, B.G. Novatskii, D.N. Stepanov, P. Roussel-Chomaz, W. Mittig, A. Ninane, F.

Hanappe, L. Stuttge, A.A. Yukhimchuk, V.V. Perevozchikov, Yu.I. Vinogradov, S.K. Grishechkin, S.V. Zlatoustovskiy, *Soft dipole mode in  $^8\text{He}$* , Physics of Particles and Nuclei Lett., Vol. **6** (2009) 118-125.

7. A.S. Fomichev, I.G. Mukha, S.V. Stepantsov, L.V. Grigorenko, E.V. Litvinova, V. Chudoba, I.A. Egorova, M.S. Golovkov, A.V. Gorshkov, V.A. Gorshkov, G. Kaminski, S.A. Krupko, Yu.L. Parfenova, S.I. Sidorchuk, R.S. Slepnev, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, M.V. Zhukov, *Lifetime of  $^{26}\text{S}$  and a limit for its  $2p$  decay energy*, Int. Journal of Modern Phys. E **20** (2011) 1-18.

8. K. Miernik, W. Dominik, H. Czyrkowski, R. Dabrowski, A. Fomichev, M. Golovkov, Z. Janas, W. Kusrmierz, M. Pfyztner, A. Rodin, S. Stepantsov, R. Slepnev, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, *Optical Time Projection Chamber for imaging nuclear decay*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **581** (2007) 194-197.

9. S. Mianowski, H. Czyrkowski, R. Dabrowski, W. Dominik, Z. Janas, K. Miernik, M. Pfyztner, A.S. Fomichev, M.S. Golovkov, L.V. Grigorenko, S.A. Krupko, S.I. Sidorchuk, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, G.M. Ter-Akopian, *Imaging the decay of  $^8\text{He}^*$* , Acta Physica Polonica B **41** (2010) 449-456.

10. Ł. Janiak, N. Sokołowska, A.A. Bezbakh, A.A. Ciemny, H. Czyrkowski, R. Dabrowski, W. Dominik, A.S. Fomichev, M.S. Golovkov, A.V. Gorshkov, Z. Janas, G. Kaminski, A.G. Knyazev, S.A. Krupko, M. Kuich, C. Mazzocchi, M. Mentel, M. Pfütznner, P. Plucinski,

M. Pomorski, R.S. Slepniev, and B. Zalewski, *Beta-delayed proton emission from  $^{26}\text{P}$  and  $^{27}\text{S}$* , Phys. Rev. C **95** (2017) 034315, pp.1-9.

11. C.E. Demonchy, M. Caamano, H. Wang, W. Mittig, P. Roussel-Chomaz, H. Savajols, M. Chartier, D. Cortina-Gil, A. Fomichev, G. Fremont, P. Gangnant, A. Gillibert, L. Giot, M.S. Golovkov, B. Jurado, J.F. Libin, A. Obertelli, E. Pollaco, A. Rodin, Ch. Spitaels, S. Stepantsov, G. Ter-Akopian, R. Wolski, *MAYA: An active-target detector for binary reactions with exotic beams*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **583** (2007) 341-349.

12. W. Mittig, C.E. Demonchy, H. Wang, P. Roussel-Chomaz, B. Jorado, M. Gelin, H. Savajols, A. Fomichev, A. Rodin, A. Gillibert, A. Obertelli, D. Cortina-Gil, M. Gaamano, M. Chartier, and R. Wolski, *Reactions induced beyond the dripline at low energy by secondary beams*, Eur. Phys. J. A **25** (2005) 263-266.

13. M.S. Golovkov, P.G. Sharov, A.A. Bezbakh, S.A. Rymzhanova, V. Chudoba, A.S. Fomichev, A.V. Gorshkov, L.V. Grigorenko, G. Kaminski, A.G. Knyazev, S.A. Krupko, M. Mentel, Yu.Ts. Oganessian, Yu.L. Parfenova, P. Pluchinski, S.I. Sidorchuk, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, I.A. Egorova, E.Yu. Nikolskii, *Search for  $2p$  decay of the first excited state of  $^{17}\text{Ne}$* , Proc. Int. Symp. on Exotic Nuclei, EXON-2014 (Eds Yu. E. Penionzhkevich, Yu. G. Sobolev) Singapore: World Scientific, 2015, ISBN 978-981-469945-7, pp.171-182.

14. P.G. Sharov, A.A. Bezbakh, V. Chudoba, I.A. Egorova, A.S. Fomichev, M.S. Golovkov, T.A. Golubkova, A.V. Gorshkov, L.V. Grigorenko, G. Kaminski, A.G. Knyazev, S.A. Krupko, M. Mentel, E.Yu. Nikolskii, Yu.L. Parfenova, P. Pluchinski, S.A. Rymzhanova, S.I. Sidorchuk, R.S. Slepnev, S.V. Stepanov, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, M.V. Zhukov, *Search for  $2p$  decay of the first excited state of  $^{17}\text{Ne}$* , Phys. Rev C **96** (2017) 025807, pp.1-8.
15. A.A. Yukhimchuk, V.V. Perevozchikov, V.A. Apasov, V.S. Aryutkin, Yu.I. Vinogradov, M.D. Vikharev, N.S. Ganchuk, A.N. Golubkov, S.K. Grischekin, A.M. Demin, S.V. Zlatoustovskiy, G.I. Karyakin, V.A. Klisch, A.A. Kononenko, A.A. Kukolkin, A.V. Kuryakin, V.N. Lobanov, I.L. Malkov, S.S. Matveev, V.Ya. Rozhkov, V.A. Safronov, V.M. Solyankin, V.V. Travkin, D.P. Tumkin, S.V. Fil'chagin, Yu.Ts. Oganessian, A.M. Rodin, D.D. Bogdanov, M.S. Golovkov, A.S. Fomichev, S.I. Sidorchuk, R.S. Slepnev, S.V. Stepanov, G.M. TerAkopian, R. Wolski, *Tritium target for research in exotic neutron-excess nuclei*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **513**, (2003) 439-447.
16. V. Avdeichikov, A.S. Fomichev, B. Jakobsson, A.M. Rodin, G.M. Ter-Akopian, *Range-energy relation, range straggling and response function of CsI(Tl), BGO and GSO(Ce) scintillators for light ions*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **439** (2000) 158-166.

17. V. Avdeichikov, A.S. Fomichev, B. Jakobsson, A.M. Rodin, G.M. Ter-Akopian, *Reaction losses of light charged particles in CsI, BGO and GSO scintillators*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **437** (1999) 424-431.
18. R.S. Slepnev, A.A. Bezbakh, V. Chudoba, A.V. Daniel, M.S. Golovkov, A.S. Fomichev, A.V. Gorshkov, V.A. Gorshkov, S.A. Krupko, G. Kaminski, M. Mentel, P. Pluciński, S.I. Sidorchuk, *VME based DAQ in the experiments at ACCULINNA*, Instruments and Experimental Techniques, Vol. **55**, No. 6, (2012) pp. 645–650; *Система сбора данных в стандарте VME для многопараметровых измерений*, Приборы и Техника Эксперимента, № **5** (2012) с.1-6.
19. R.S. Slepnev, A.A. Bezbakh, A.S. Fomichev, V. Chudoba, M.S. Golovkov, A.V. Gorshkov, V.A. Gorshkov, G. Kaminski, S.A. Krupko, M. Mentel, P. Pluchinski, S.I. Sidorchuk, G.M. Ter-Akopian, *Development of neutron detectors for the studies on the ACCULINNA and ACCULINNA-2 facilities*, Proc. Int. Symp. on Exotic Nuclei, EXON-2014 (Eds Yu. E. Penionzhkevich, Yu. G. Sobolev) Singapore: World Scientific, 2015, ISBN 978-981-469945-7, pp.619-624.
20. V. Eremin, A. Bezbakh, I. Eremin, N. Egorov, A. Fomichev, M. Golovkov, A. Gorshkov, A. Galkin, O. Kiselev, A. Knyazev, D. Kostyleva, S. Krupko, D. Mitina, R. Slepnev, P. Sharov and E. Verbitskaya, *Beam test of full prototypes of silicon detectors for TOF*



*heavy-ions diagnostics in Super-FRS*, Journal of Instrumentations, Vol. **12** (2017) C03001, pp.1-8.

21. P.I. Zarubin, I. G. Zarubina, D.A. Artemenkov, A.A. Bezbakh, V. Bradnova, M.S. Golovkov, A. V. Gorshkov, Al-Z. Farrag, G. Kaminsky, N. K. Kornegrutsa, S. A. Krupko, K. Z. Mamatkulov, R. R. Kattabekov, V. V. Rusakova, R.S. Slepnev, R. Stanoeva, S.V. Stepantsov, A.S. Fomichev, V. Chudoba,  *$^8\text{He}$  nuclei stopped in nuclear track emulsion*, Eur. Phys. J. Web of Conf. **66** (2014) 11044, pp.1-4.

22. L.V. Grigorenko, A.S. Fomichev and G.M. Ter-Akopian, *Light Exotic Nuclei at JINR: ACCULINNA and ACCULINNA-2 Facilities*, Nuclear Physics News, Vol. **24**, №4 (2014) pp.22-27.

23. A.S. Fomichev, A.A. Bezbakh, V. Chudoba, I.A. Egorova, M.S. Golovkov, A.V. Gorshkov, L.V. Grigorenko, G. Kaminski, S.A. Krupko, Yu.Ts. Oganessian, Yu.L. Parfenova, S.I. Sidorchuk, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, P.G. Sharov, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, S.N. Ershov, V.K. Lukyanov, A.A. Korshennikov, E.A. Kuzmin, E.Yu. Nikolskii, V.Z. Goldberg, M. Pfützner, I.G. Mukha, H. Simon, O.B. Tarasov, N.K. Timofeyuk, A.A. Yukhimchuk, and M.V. Zhukov, *Long-range plans for research with radioactive ion beam at JINR*, JINR Communication, pp.1-20, E7-2012-73, Dubna, 2012.

24. Г.М. Тер-Акопьян, А.А. Безбах, Р. Вольски, М.С. Головков, А.В. Горшков, В.А. Горшков, Л.В. Григоренко, И.А. Егорова, Г. Каминьски, С.А. Крупко, Ю.Ц. Оганесян, Ю.Л. Парфенова, С.И.

Сидорчук, Р.С. Слепнев, Л. Стандыло, С.В. Степанцов, А.С. Фомичев, В. Худоба, *Программа исследований на радиоактивных пучках сепаратора АКУЛИНА-2*, Известия РАН Серия Физическая, том **76** (2012) с.1311-1315.

25. E.Yu. Nikolskii, A.A. Korshennikov, H. Otsu, H. Suzuki, K. Yoneda, H. Baba, K. Yamada, Y. Kondo, N. Aoi, A.S. Denikin, M.S. Golovkov, A.S. Fomichev, S.A. Krupko, M. Kurokawa, E.A. Kuzmin, I. Martel, W. Mittig, T. Motobayashi, T. Nakamura, M. Niikura, S. Nishimura, A. A. Ogloblin, P. Roussel-Chomaz, A. Sanchez-Benitez, Y. Satou, S. I. Sidorchuk, T. Suda, S. Takeuchi, K. Tanaka, G. M. Ter-Akopian, Y. Togano, and M. Yamaguchi, *Search for  $^7\text{H}$  in  $^2\text{H}+^8\text{He}$  collisions*, Phys. Rev. C **81** (2010) 064606, pp.1-5.

26. G.M. Ter-Akopian, A.A. Bezbakh, V. Chudoba, A.S. Fomichev, M.S. Golovkov, A.V. Gorshkov, L.V. Grigorenko, G. Kaminski, A.G. Knyazev, S.A. Krupko, M. Mentel, E.Yu. Nikolskii, Yu.L. Parfenova, P. Pluczinski, S.A. Rymzhanova, S.I. Sidorchuk, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, R. Wolski, B. Zalewski, *Problems to be clarified by means of radioactive ion beams provided by the ACCULINNA-2 separator*, Proceedings of Int. Symp. on Exotic Nuclei, EXON-2016 (Eds Yu.E. Penionzhkevich and Yu.G. Sobolev) Singapore: World Scientific, 2017, ISBN 978-981-3226-53-1, pp.380-389.

27. J. Äystö, K.-H. Behr, J. Benlliure, A. Bracco, P. Egelhof, A. Fomichev, S. Galès, H. Geissel, T. Grahn, L.V. Grigorenko, M.N.

Harakeh, R. Hayano, S. Heinz, K. Itahashi, A. Jokinen, N. Kalantar-Nayestanaki, R. Kanungo, H. Lenske, I. Mukha, G. Münzenberg, C. Nociforo, H.J. Ong, S. Pietri, M. Pfützner, W. Plaß, A. Prochazka, S. Purushothaman, T. Saito, C. Scheidenberger, H. Simon, I. Tanihata, S. Terashima, H. Toki, L. Trache, H. Weick, J.S. Winfield, M. Winkler, V. Zamfir, *Experimental program of the Super-FRS Collaboration at FAIR and developments of related instrumentation*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B **376** (2016) 111-115.

28. Mukha I., Summerer K., Acosta L., Alvarez M.A.G., Casarejos E., Chatillon A., Cortina-Gil D., Espino J., Fomichev A., Garcia-Ramos J.E., Geissel H., Gomez-Camacho J., Grigorenko L.V., Hofmann J., Kiselev O., Korshennikov A., Kurz N., Litvinov Yu., Martel I., Nociforo C., Ott W., Pfutzner M., Rodriguez-Tajes C., Roeckl E., Stanoiu M., Weick H., Woods P.J., *Observation of Two-Proton Radioactivity of  $^{19}\text{Mg}$  by Tracking the Decay Products*, Phys. Rev. Lett. **99** (2007) 182501.

29. I. Mukha, K. Summerer, L. Acosta, M.A.G. Alvarez, E. Casarejos, A. Chatillon, D. Cortina-Gil, I.A. Egorova, J.M. Espino, A. Fomichev, J.E. Garcia-Ramos, H. Geissel, J. Gomez-Camacho, L. Grigorenko, J. Hofmann, O. Kiselev, A. Korshennikov, N. Kurz, Yu.A. Litvinov, E. Litvinova, I. Martel, C. Nociforo, W. Ott, M. Pfutzner, C. Rodriguez-Tajes, E. Roeckl, M. Stanoiu, N.K. Timofeyuk, H. Weick, and P.J. Woods, *Spectroscopy of proton-unbound nuclei by tracking their decay products in-flight. One- and two-proton decays of  $^{15}\text{F}$ ,  $^{16}\text{Ne}$ , and  $^{19}\text{Na}$* , Phys. Rev. C **82** (2010) 054315, pp.1-14.

30. I. Mukha, L. Grigorenko, X. Xu, L. Acosta, E. Casarejos, A. A. Ciemny, W. Dominik, J. Duenas-Diaz, V. Dunin, J. M. Espino, A. Estrade, F. Farinon, A. Fomichev, H. Geissel, T. A. Golubkova, A. Gorshkov, Z. Janas, G. Kaminski, O. Kiselev, R. Knobel, S. Krupko, M. Kuich, Yu. A. Litvinov, G. Marquinez-Duran, I. Martel, C. Mazzocchi, C. Nociforo, A. K. Ordúz, M. Pfutzner, S. Pietri, M. Pomorski, A. Prochazka, S. Rymzhanova, A. M. Sanchez-Benitez, C. Scheidenberger, P. Sharov, H. Simon, B. Sitar, R. Slepnev, M. Stanoiu, P. Strmen, I. Szarka, M. Takechi, Y. K. Tanaka, H. Weick, M. Winkler, J. S. Winfield, M. V. Zhukov, *Observation and spectroscopy of new proton-unbound isotopes  $^{30}\text{Ar}$  and  $^{29}\text{Cl}$ : an interplay of prompt two-proton and sequential decay*, Phys. Rev. Lett. **115** (2015) 202501, pp.1-7.

31. A. A. Lis, C. Mazzocchi, W. Dominik, Z. Janas, M. Pfützner, M. Pomorski, L. Acosta, S. Baraeva, E. Casarejos, J. Duénas-Díaz, V. Dunin, J. M. Espino, A. Estrade, F. Farinon, A. Fomichev, H. Geissel, A. Gorshkov, G. Kaminski, O. Kiselev, R. Knöbel, S. Krupko, M. Kuich, 11 Yu. A. Litvinov, G. Marquinez-Durán, I. Martel, I. Mukha, C. Nociforo, A. K. Ordúz, S. Pietri, A. Prochazka, A. M. Sánchez-Benítez, H. Simon, B. Sitar, R. Slepnev, M. Stanoiu, P. Strmen, I. Szarka, M. Takechi, Y. Tanaka, H. Weick, and J. S. Winfield,  *$\beta$ -delayed three-proton decay of  $^{31}\text{Ar}$* , Phys. Rev. C **91** (2016) 064309, pp.1-5.

Цитируемые источники, отмеченные символом \*:

32\*. J.-C. Thomas, L. Achouri, J. Äysto, R. Beraud, B. Blank, G. Canchel, S. Czajkowski, P. Dendooven, A. Ensalleem, J. Giovinazzo, N. Guillet, J. Honkanen, A. Jokinen, A. Laird, M. Lewitowicz, C. Longour, F. de Oliveira Santos, K. Perajarvi, and M. Stanoiu, *Beta-decay properties of  $^{25}\text{Si}$  and  $^{26}\text{P}$* , Eur. Phys. J. A **21**, (2004) 419-435.

33\*. G. Canchel, L. Achouri, J. Aysto, R. Beraud, B. Blank, E. Chabanat, S. Czajkowski, P. Dendooven, A. Emsalleem, J. Giovinazzo, *The  $\beta$ -delayed one- and two-proton emission of  $^{27}\text{S}$* , Eur. Phys. J. A **12**, (2001) 377-380.

34\*. M.J. Chromik, P.G. Thirolf, M. Thoennessen, B.A. Brown, T. Davinson, D. Gassmann, P. Heckman, J. Prisciandaro, P. Reiter, E. Tryggestad, and P.J. Woods, *Two-proton spectroscopy of low-lying states in  $^{17}\text{Ne}$* , Phys. Rev. C **66** (2002) 024313, pp.1-12.

35\*. L.V. Grigorenko and M.V. Zhukov, *Three-body resonant radiative capture reactions in astrophysics*, Phys. Rev. C **72**, (2005) 015803, pp.1-10.