

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета Д 720.001.06
в Международной межправительственной организации
Объединенный институт ядерных исследований

№251 от 11 февраля 2019 года

Присутствовали:

Председатель совета:	Оганесян Ю.Ц.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Зам. председателя совета:	Аксенов В.Л.	доктор физ-мат. наук	01.04.07
Ученый секретарь совета:	Попеко А.Г.	кандидат физ-мат. наук	01.04.16

Члены совета:

Авдеев М.В.	доктор физ-мат. наук	01.04.07
Апель П.Ю.	доктор хим. наук	01.04.01
Белушкин А.В.	доктор физ.-мат. наук	01.04.07
Гикал Б.Н.	доктор тех. наук	01.04.01
Гледенов Ю.М.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Головков М.С.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Джолос Р.В.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Дмитриев С.Н.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Изосимов И.Н.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Пенионжкевич Ю.Э.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Плакида Н.М.	доктор физ.-мат. наук	01.04.07
Скуратов В.А.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Тер-Акопьян Г.М.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Утенков В.К.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Шабалин Е.П.	доктор физ.-мат. наук	01.04.01

Оганесян Ю.Ц.: Рассматриваем защиту диссертации Фомичёвым Андреем Сергеевичем, «Экспериментальные исследования экзотических ядер с $Z < 20$ на ускорительном комплексе DRIBs» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики. Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флёрова.

Официальные оппоненты: Сакута Станислав Борисович, доктор физико-математических наук, начальник лаборатории ядерных реакций НИЦ "Курчатовский институт" (г. Москва), и Недорезов Владимир Георгиевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией фотоядерных реакций, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (г. Москва) присутствуют на защите. Алхазов Георгий Дмитриевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физики элементарных частиц, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский Институт" (г. Гатчина) не смог приехать по причине болезни. Он прислал положительный отзыв.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (г. Санкт-Петербург).

Присутствуют 18 из 23 членов совета, в том числе 6 докторов наук по профилю диссертации. Предоставляю слово ученому секретарю для оглашения личного дела соискателя.

Попеко А.Г.: Соискатель Фомичёв Андрей Сергеевич родился в 1963 году. В 1986 году окончил Московский государственный университет, физический факультет. В 1996 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидат физико-математических наук в нашем диссертационном совете Д 047.001.05. Все необходимые документы соискателем представлены, размещены на официальном интернет портале диссертационного совета, автореферат разослан, диссертация и автореферат представлены в библиотеке ОИЯИ.

Оганесян Ю.Ц.: Слово предоставляется соискателю.

Фомичёв А.С.: Добрый день дамы и господа. Позвольте предоставить Вашему вниманию диссертационную работу «Экспериментальные исследования экзотических ядер с $Z < 20$ на ускорительном комплексе DRIBs» по специальности 01.04.01 Приборы и методы экспериментальной физики. Комплекс DRIBs (Dubna Radioactive Ion Beams), схематично показанный на слайде позволяет получать пучки радиоактивных ядер в реакциях фрагментации тяжелых ионов на легкой мишени, методом in-flight, и с помощью так называемого ISOL-метода, когда работают два ускорителя. У-400М используется

для ускорения ионов ${}^7\text{Li}$ ($E = 33$ МэВ/нуклон) и облучения толстой графитовой мишени, где образуется ${}^6\text{He}$; ионы ${}^6\text{He}$ извлекаются, ионизируются и транспортируются в У-400 с целью пост-ускорения до энергии 10 МэВ/нуклон.

Цели и задачи работы представлены на следующем слайде.

1. Создание экспериментальных условий для проведения экспериментов с пучками радиоактивных изотопов на ускорительном комплексе DRIBs.
2. Развитие новых методик для регистрации продуктов ядерного взаимодействия, возникающих при столкновении радиоактивных и стабильных ядер с 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 ядер ${}^6\text{He}$ (гало структура) и ${}^6\text{Li}$ (кластерная структура); 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 gp -процессе нуклеосинтеза; поиск неизвестного изотопа ${}^{26}\text{S}$ и исследование его основных свойств $T_{1/2}$, Q_p , Q_{2p} (время жизни и энергии при распадах одним и двумя протонами).
5. Разработка и реализация долгосрочной программы исследований с использованием пучков радиоактивных изотопов на новом фрагмент-сепараторе АКУ-ЛИНА-2.
6. Разработка и тестирование детекторных систем, создаваемых для совместного использования в рамках проекта EXPERT (EXotic Particle Emission and Radioactivity by Tracking) коллаборации Super-FRS (NuSTAR, FAIR).

Структура и объем диссертации.

Работа состоит из Введения, 3-х глав, Заключение, двух Приложений и списка цитируемой литературы (111 страниц, 52 рисунка, 8 таблиц и список из 133 библиографических источников).

Введение даёт представление о предмете исследований вблизи и за границами ядерной стабильности, а также об особенностях ядерной структуры экзотических систем и некоторых типах радиоактивности. Подчёркнута актуальность проводимых исследований и развиваемых методик.

Первая глава посвящена анализу особенностей проведения экспериментов с пучками радиоактивных изотопов. В ней кратко описаны методы получения изотопов, перечислены основные центры, где ведутся эксперименты с радиоактивными пучками, включая комплекс DRIBs в ЛЯР ОИЯИ, а также описаны наиболее распространённые подходы в экспериментальных исследованиях с радиоактивными пучками.

Вторая глава состоит из 5 разделов, в каждом из которых описаны детали экспериментов с радиоактивными и стабильными пучками на комплексе DRIBs, представлены новые результаты по структуре изотопов ${}^6\text{He}$, ${}^6\text{Be}$, ${}^{17}\text{Ne}$, ${}^{26}\text{P}$, ${}^{26,27}\text{S}$.

Третья глава посвящена реализуемым и планируемым проектам. В ней кратко изложена перспективная программа исследований на сепараторах АКУЛИНА, АКУЛИНА-2 и Super-FRS (в рамках проекта EXPERT), показаны перспективы исследований с использованием радиоактивных пучков в широком диапазоне энергий в ЛЯР ОИЯИ и ГСИ (Дармштадт, Германия).

Приложение 1 даёт представление о современном статусе исследований радиоактивных изотопов с $Z < 20$, находящихся вблизи и за границами нуклонной стабильности. Приложение 2 содержит информацию о блок-схемах электроники и принципах работы детектирующей аппаратуры. В конце приложения есть список используемых в работе сокращений и аббревиатур.

На сегодняшний день лишь для самых лёгких ядер, представленных на следующем слайде, 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.

Глава 1 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, а также описаны наиболее распространённые подходы в экспериментальных исследованиях с радиоактивными пучками в широком диапазоне энергий, подробности описаны в обзоре УФН.

Глава 2. Методы и изучаемые изотопы (${}^6\text{He}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^6\text{Be}$, ${}^{17}\text{Ne}$, ${}^{26}\text{P}$, ${}^{26,27}\text{S}$). Этот слайд

содержит краткое описание используемых методов и полученных результатах. Хронология событий соответствует приведённой временной шкале для интервала 2006 – 2017 гг. Позвольте детально изложить каждый из 5 пунктов таблицы в обратной последовательности, т.е. двигаясь от 2017.

С использованием метода имплантации продуктов реакции фрагментации ^{32}S (50.3 МэВ/нуклон) + Ве в оптическую время-проекционную камеру (ОВПК) были исследованы редкие ветки бета-задержанной эмиссии протона и двух протонов для нейтронно-дефицитных изотопов ^{26}P и ^{27}S . Экспериментально были установлены новые более точные значения для вероятностей ветвления по каналам βp , $\beta 2p$ и β_{tot} при распаде изотопов ^{26}P и ^{27}S , которые заметно (в 3 и более раз) отличаются от литературных данных. Итоговые значения приведены в Таблице, а детали этого эксперимента описаны в работе Phys. Rev. C 95 (2017) 034315.

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}P , ^{27}S и всех заряженных продуктов их распада с временной привязкой событий. В ряде случаев методика ОВПК может конкурировать с так называемой “активной мишенью”.

На установке АКУЛИНА был проведён поисковый эксперимент по обнаружению изотопа ^{26}S методом имплантации продуктов реакции фрагментации ^{32}S (50.3 МэВ/нуклон) + Ве (92.4 мг/см²) в кремниевый телескоп. Сечения были определены при помощи выражений для расчётов сечений образования и трансмиссии. Результаты фитирования данных, изображенных на слайде, были получены в предположении об экспоненциальной зависимости выходов и сечений от Q-реакции. Экстраполяции систематик показывают, что ожидаемые количества ядер ^{26}S и ^{25}P составляют 16 и 360, соответственно, в то время как не было наблюждено ни одного события этих изотопов серы и фосфора. Учитывая полное время пролёта ядер ^{26}S и ^{25}P от производящей мишени до детектора 314 и 322 нс, а также распределение Пуассона для ожидаемых событий, были

получены следующие значения пределов периодов полураспада: $T_{1/2}(^{26}\text{S}) < 79$ нс (достоверность 63%) и $T_{1/2}(^{26}\text{S}) < 157$ нс (достоверность 98%); $T_{1/2}(^{25}\text{P}) < 38$ нс (достоверность 63%) и $T_{1/2}(^{25}\text{P}) < 50$ нс (достоверность 98%).

Уровень достоверности 63% и 98% определялся из расчёта одного наблюденного события или четырёх событий вместо нуля. Следует заметить, что оценка $T_{1/2}(^{25}\text{P}) < 38$ нс неплохо согласуется с пределом 30 нс, установленным в работе F. Pougheon (частное сообщение 1993).

Кроме времени жизни ^{26}S в работе исследовались энергии распада Q_p и Q_{2p} (при испускании одного и двух протонов, соответственно). На основании данных эксперимента и теоретических расчётов 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 и высказано предположение о высокой вероятности истинного $2p$ -распада для изотопа ^{26}S . Для $1p$ -распада установлен предел $Q_p(^{26}\text{S}) > 120$ кэВ. В качестве предложения по дальнейшему изучению короткоживущего изотопа ^{26}S предложена реакции передачи $2n - ^{28}\text{S}(p,t)$ на установке АКУЛИНА-2 или так называемый метод 'распад на лету' на установке SuperFRS.

Для исследования $2p$ -распада первого возбуждённого уровня ядра $^{17}\text{Ne} (3/2^-)$ был предложен и осуществлён новый эффективный метод, схематично изображённый на слайде и получивший название метод «комбинированной массы»; он обеспечивал достаточно высокое энергетическое разрешение при высокой светимости эксперимента. 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. Знание соотношения $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma$, полученное экспериментально, позволяет судить о возможности обхода точки ожидания gp -процесса путём двухпротонного захвата в реакции $^{15}\text{O}(2p,\gamma)^{17}\text{Ne}$.

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}Ne , был получен новый предел отношения $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma < 1.6(3) \times 10^{-4}$, который оказался в ~ 50 раз ниже, чем литературные данные. Этот предел ещё далёк от предсказанного теоретиками значения

$\sim 10^{-6}$. Однако, было показано [Phys. Rev. C 96 (2017) 025807], что метод комбинированной массы имеет перспективы для его дальнейшего развития и достижения этого теоретического значения.

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 соответствующая методика. Схема опыта, проведённого на установке АКУЛИНА, показана на слайде. Правая панель: схема эксперимента по изучению ${}^6\text{Be}$ в реакции ${}^1\text{H}({}^6\text{Li}, {}^6\text{Be})n$. Левая панель: установка АКУЛИНА, адаптированная для получения монокроматического первичного пучка ${}^6\text{Li}$ нужной энергии. В плоскости F1 вместо производящей мишени устанавливался углеродный поглотитель энергии; в плоскости F2 зазор щелей составлял ± 1.5 мм, клин не использовался. В итоге были получены экспериментальные данные с большой статистикой.

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 ($\sim 60\%$ 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 [Physics of Particles and Nuclei Lett., Vol. 6 (2009) 118]. На слайде также показан 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 $\theta_{\text{Be}} - E_T$ для данных, наблюдаемых в эксперименте (с).

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, проведённого на комплексе DRIBs при работе двух ускорителей У400 и У-400М, показана на этом слайде.

Дальнейшее развитие экспериментальных методов продемонстрировано на следующих трех вставках: 1) показана двухступенчатая схема измерения времяпролетных n - γ спектров (ToF), обеспечивающая итоговое временное разрешение 3 нс (ПШПВ) при работе с источником ^{252}Cf , когда стартовая отметка осуществлялась от детектора из сверхчистого германия, а сигнал ‘стоп’ приходил от нейтронного детектора DEMON; 2) реализована визуализация сигналов от BGO-детекторов, окружающих детектор из сверхчистого германия и выполняющих функцию антикомптоновской защиты; 3) опыт анализа сложных гамма спектров при изучении осколков деления ^{252}Cf был адаптирован для анализа высоко спиновых состояний составного ядра ^{166}Yb .

Экспериментальные данные анализировались с помощью кода EMPIRE, в результате чего была получена информация о параметрах l_{crit} , D_l и сечениях σ_{xn} , σ_{fus} для двух реакций. Итоговые значения этих величин приведены в Таблице. Сделано заключение, что 1) процессы неполного слияния более вероятны для реакции $^6\text{He}(64 \text{ МэВ}) + ^{166}\text{Er}$ по сравнению с $^6\text{Li}(58 \text{ МэВ}) + ^{165}\text{Ho}$; их вклад в полное сечение реакции существенный (более 10%); 2) в случае ^6He сечение слияния $\sigma_{\text{fus}} \sim 1600 \text{ мб}$ в 1.5 раза ниже расчётного. Видимо это произошло за счёт проявления каналов неполного слияния; не исключается также неполный учёт всех процессов в коде EMPIRE, т.е. открывающихся каналах при достаточно большой энергии возбуждения составного ядра $\sim 60 \text{ МэВ}$.

Третья глава посвящена реализуемым и планируемым проектам. В ней кратко изложена долгосрочная программа исследований на сепараторах АКУЛИНА, АКУЛИНА-2 и SuperFRS в рамках проекта EXPERT (EXotic Particle Emission and Radioactivity by Tracking), показаны перспективы совместных исследований на пучках радиоактивных изотопов в ЛЯР ОИЯИ и GSI FAIR (Дармштадт, Германия). На слайде показаны основные элементы нового фрагмент сепаратора АКУЛИНА-2, первые эксперименты на котором были начаты в 2017 году.

Компоненты EXPERT внутри фрагмент-сепаратора SuperFRS и вовлечённые в проект институты представлены на следующем слайде. Это: (i) Система прецизионного трекинга на основе микростриповых Si детекторов (GSI); (ii) Гамма-детектор мишенной зоны GADAST (ОИЯИ, GSI); (iii) Детектор нейтронов высокого углового разрешения NeuRAD (GSI, ОИЯИ); (iv) Радиационно стойкие кремниевые детекторы (ФТИ,

GSI, ОИЯИ); (v) Время-проекционная камера (Варшавский университет, ОИЯИ). Детальное описание подсистем приводится в двух работах [NIM B 376 (2016) 111; JINST 12 (2017) 1].

В работе есть два приложения. Приложение 1 даёт представление о современном состоянии исследований свойств ядер вблизи границ нуклонной стабильности. Приведены карты ядер для $Z < 17$ с указанием времён жизни и видов радиоактивных распадов, на которых размещены изучаемые изотопы. Приложение 2 содержит дополнительную информацию о блок-схемах электроники и детекторах, используемых в опытах на комплексе DRIBs. Эта информация представлена на слайде; показаны принципы работы блок-схемы электроники и системы сбора данных, детали описаны в статье [ПТЭ № 5 (2012) с.1-6].

Основные положения, выносимые на защиту представлены на слайде.

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) безфоновое изучение каналов βp , $\beta 2p$ и β_{tot} при распаде изотопов ${}^{26}\text{P}$ и ${}^{27}\text{S}$ в рабочем объёме оптической время-проекционной 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 ${}^{17}\text{Ne}$.

2. Физические результаты, полученные с использованием новых методов:

а) эксклюзивные данные о сечениях реакций слияния ${}^6\text{He}(64 \text{ МэВ}) + {}^{166}\text{Er}$ и ${}^6\text{Li}(58 \text{ МэВ}) + {}^{165}\text{Ho}$;

б) спектр возбуждения ${}^6\text{Be}$, свидетельствующий о наблюдении нового явления – изовекторной мягкой дипольной моды возбуждения;

в) новые данные для времени жизни состояния ($J^\pi=3/2^-$, $E=1288$ кэВ) изотопа ^{17}Ne по каналу $2p$ -распада, полученный методом комбинированной массы;

г) новые данные о радиоактивном распаде изотопов ^{26}P , ^{26}S , ^{27}S .

3. Программа 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 (^7H , ^{13}Li , ^{11}O , ^{17}Ne , ^{26}S и др.).

4. Разработка и испытание новых инновационных детекторных систем (микростриповые кремниевые телескопы, радиационно-стойкие быстродействующие кремниевые детекторы, гамма-детекторы, нейтронный детектор высокого углового разрешения) для проведения первых экспериментов на фрагмент-сепараторе Super-FRS в рамках проекта EXPERT.

Научная новизна и практическая ценность работы таковы:

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 пучках ядер ^6He и ^6Li методика получения эксклюзивных данных о тяжёлых продуктах ядерных реакций; б) методика исследования континуума высокой энергии в спектре возбуждения ядра ^6Be ; 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}Ne ; г) адаптация и применение оптической время-проекционной камеры для изучения процессов эмиссии запаздывающих протонов ядрами ^{26}P , ^{27}S ; д) методика поиска ранее неизвестных ядер на границе протонной стабильности, применённая для получения данных о радиоактивном распаде изотопа ^{26}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.

Результаты исследований, представленные в диссертации, опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных журналах, всего 31 публикация. На слайде представлены лишь некоторые из них. Личное участие автора в работах, составляющих основу диссертации, является определяющим.

Благодарю Вас за внимание!

Оганесян Ю.Ц.: Спасибо. Пожалуйста, вопросы, замечания.

Джолос Р.В.: У меня вопрос по спектру ${}^6\text{Be}$. Чисто экспериментальный аспект. Вот после того как хорошо выделяются два пика основное состояние $0+$ и $2+$, а выше наблюдается пологий спектр и там совсем не видно структуры. Есть ли какая-то возможность сделать эксперимент лучше или сейчас это за рамками возможностей? Почему я спрашиваю: если есть коллективные состояния отрицательной чётности, то это как-то должно проявиться, а если эффект чисто оболочечный, то видимо нет.

Фомичёв А.С.: Энергетический спектр состояний с отрицательной чётностью имеет широкое распределение и там нет ярко выраженного пика. Разрешение установки было достаточно высоким для обнаружения какой-либо дискретной структуры при энергии выше 4 МэВ. Более того, мы видим, что это макроскопическое явление, которое составляет около 60% всех событий в спектре ${}^6\text{Be}$.

Джолос Р.В.: Т.е., если бы была тонкая структура, то вы бы её увидели. Ок. А теперь, о зеркальном ядре, там такая же картина? Что можно сказать о подобном эксперименте для ${}^6\text{He}$?

Фомичёв А.С.: Мы специально анализировали литературные данные, в частности данные по заселению спектра ${}^6\text{He}$ в реакции электромагнитной диссоциации на свинце и в реакции перезарядки ${}^6\text{Li}({}^7\text{Li}, {}^7\text{Be}){}^6\text{He}$. И там и там наблюдался спектр с более выраженной структурой при $E > 2$ МэВ. Как раз предложенная нами модель позволила описать эти данные в терминах мягкой дипольной моды и изовекторной мягкой дипольной моды.

Пенионжкевич Ю.Э.: Какие приборы были развиты в рамках этой работы (про методы понятно), в чем здесь изюминка, и какое сравнение можно сделать с другими центрами GANIL, MSU?

Фомичёв А.С.: Каждый из перечисленных здесь экспериментов – это отдельный подход. Почти все эксперименты объединяет детекторная часть. Я считаю, что в нашем коллективе были разработаны уникальные детекторы для регистрации заряженных частиц (полупроводниковые и сцинтилляционные) разной конфигурации, с рекордными характеристиками. Например, известная фирма Micronsemiconductor до недавнего времени не производила двухсторонние кремниевые детекторы толщиной 1 мм, мы это сделали в еще 2006 году. Что касается тяжелого оборудования. Здесь следует отметить эксперимент на комплексе DRIBs, имеется в виду ISOL-метод с работой ускорителей У-400М и У-400, когда была задействована аппаратура двух секторов. Эксперимент был нацелен на регистрацию всех возможных продуктов ядерных реакций: дискретных гамма-квантов, нейтронов и заряженных частиц. Считаю, что это был весомый вклад в развитие техники физического эксперимента.

Джолос Р.В.: У меня теперь вопрос, касающийся возможностей метода имплантации фрагментов в оптическую время-проекционную камеру. Вот допустим меня интересует такой процесс: деление, один из осколков образуется в каком-то состоянии и затем происходит какой-то экзотический распад. Можно ли применять эту методику для такого случая? Т.е., если такой осколок имплантируется в камеру можно ли наблюдать экзотический распад? Время жизни осколка допустим 10^{-8} или даже 10^{-9} секунды.

Фомичёв А.С.: Метод хорошо работает во временном диапазоне от долей миллисекунды до нескольких секунд. Т.е. временной диапазон этого метода ограничен из-за невысокого быстродействия оптической камеры, делающей снимки треков. Время жизни осколка 10^{-8} секунды находится за пределами этого диапазона. Принцип работы метода: изучаемые фрагменты тормозятся в газовом объёме камеры, желательно в центре, и претерпевают распад. Газ – это сцинтиллятор, по длине трека определяется энергия частиц с разрешением 5-7%, по толщине трека её сорт, разрешение невысокое, т.е. вряд ли можно отделить изотопы ^3He от ^4He . Думаю, что для изучения осколков деления метод не подходит.

Оганесян Ю.Ц.: Ещё? Ели нет вопросов, прошу учёного секретаря совета огласить поступившие отзывы.

Попеко А.Г.: Имеется заключение научно технического совета Лаборатории ядерных реакций, подписанное директором Лаборатории С.Н. Дмитриевым, заключение положительное. Имеется отзыв ведущей организации Физико-технического института им.

А.Ф. Иоффе, подписанный временно исполняющим обязанности директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки ФТИ РАН профессором С.В. Лебедевым, отзыв положительный. Есть некоторые замечания, точнее их два. Так, например, при описании эксперимента ${}^6\text{Be}$ недостаточно чётко изложена новизна и специфика используемого метода, его преимущества и недостатки по сравнению с другими методиками. Это также относится к опыту по изучению изотопа ${}^{26}\text{S}$. В таблицах 2 и 3 для полноты картины не хватает характеристик комплекса DRIBs (интенсивности некоторых радиоактивных пучков) для сравнения с зарубежными аналогами RIKEN, GANIL, NIE-ISOLDE и др. Отмеченные замечания не умаляют научную и практическую значимость работы.

Оганесян Ю.Ц.: При описании эксперимента ${}^6\text{Be}$ недостаточно чётко изложена новизна и специфика используемого метода, его преимущества и недостатки по сравнению с другими методиками. Это также относится к опыту по изучению изотопа ${}^{26}\text{S}$. Ну это как посмотреть. Пропустим. В таблицах 2 и 3 для полноты картины не хватает некоторых характеристик комплекса DRIBs - интенсивностей радиоактивных пучков для сравнения с другими центрами. Что-то мешало это сделать?

Фомичёв А.С.: Да, замечания справедливые. Здесь действительно надо было это сделать, чтобы почувствовать где мы находимся по сравнению с нашими зарубежными коллегами, скорее конкурентами. Это явная недоработка.

Пенионжkevич Ю.Э.: Вот же есть таблица в автореферате, где перечислены основные характеристики сепараторов в сравнении с зарубежными центрами.

Фомичёв А.С.: Всё так, только там нет интенсивностей. Я согласен с замечанием.

Оганесян Ю.Ц.: Давайте перейдём к отзывам оппонентов. Владимир Георгиевич Недорезов, пожалуйста.

Недорезов В.Г.: Оглашает отзыв. Отзыв положительный. Текст прилагается.

Результаты имеют важное значение как для развития техники физического эксперимента, так и для изучения свойств экзотических ядер, диссертация по всем параметрам соответствует требованиям ВАК к докторским диссертациям. Её автор А.С. Фомичёв достоин присуждения степени доктор-физико-математических наук по указанной специальности.

Хотелось бы особо выделить следующий физический результат, который мог бы послужить развитию целого направления исследований. Речь идет об использовании

электронов и фотонов для изучения свойств экзотических ядер. В работе утверждается, что впервые в спектре ${}^6\text{Be}$ обнаружено заселение изовекторной мягкой дипольной моды с энергией возбуждения больше 4 МэВ. Есть ряд аргументов, позволяющих считать данное утверждение служит лишь базой для дальнейших исследований. Как известно из фотоядерных исследований, максимум этого резонанса в легких ядрах лежит при энергии около 30 МэВ, что примерно на порядок выше, чем получено в настоящей работе. Это требует пояснений. Следует отметить, что при низких энергиях фотонов в последние годы также обнаружены новые моды коллективных возбуждения ядер, которые получили название "пигми-резонансов". Однако, сравнения и анализа данных, полученных в разных реакциях, в диссертации не приводится. Даже терминология ("мягкая" мода и "пигми" резонансы) существенно различаются. Использование термина «континуум» для описания резонансной кривой некорректно. Сила E1-перехода в фотоядерных реакциях определяется через радиационную силовую функцию и т.д. Приведённые данные по кулоновской диссоциации релятивистских ионов ${}^6\text{Be}$ также вызывают много вопросов с точки зрения фотоядерной постановки задачи (непрерывный спектр виртуальных фотонов).

Фомичёв А.С.: В целом я согласен с замечаниями оппонента, данное явление в спектре возбуждений ${}^6\text{Be}$ требует дальнейших исследований именно разными методами.

Оганесян Ю.Ц.: Хотелось бы разобраться в терминологиях, что такое гигантский резонанс, мягкая мода, "пигми" резонанс и т.д. Пожалуйста...

Фомичёв А.С.: Классификация дипольных возбуждений для ядер с массой 6 представлена на схеме. Есть кластерные возбуждения или моды, к которым относятся: мягкая дипольная мода (soft dipole mode - SDM) и изовекторная мягкая дипольная мода (isovector soft dipole mode - IVSDM). Есть коллективные возбуждения, т.е. резонансы: гигантский дипольный резонанс (giant dipole resonance - GDR) и спин-дипольный резонанс (spin-dipole resonance - SDR). Для каждого процесса характерным является изменение спина $\Delta S = 0$, $\Delta S = 1$ или $\Delta S = 0,1$. В нашем случае из анализа угловых и энергетических распределений мы установили спин-четность всех уровней в спектре возбуждений ${}^6\text{Be}$. Именно это позволило утверждать о наблюдении изовекторной мягкой дипольной моды для ${}^6\text{Be}$, заселяемой в реакции перезарядки ${}^1\text{H}({}^6\text{Li}, {}^6\text{Be})n$ при энергии $E > 4$ МэВ.

Оганесян Ю.Ц.: Так имеет ли отношение гигантский дипольный резонанс к данному

процессу?

Недорезов В.Г.: Для обсуждения всех деталей необходим научный семинар, поскольку вопрос сложный и у нас нет полного согласия.

Оганесян Ю.Ц.: Хорошо, у нас будет ещё время для обсуждений. А теперь второе замечание оппонента“. Поскольку одной из задач являлось изучение мультифрагментации ядер, в частности, одновременного испускания нескольких протонов, то следовало бы упомянуть для сравнения результаты, например, полученные и опубликованные недавно по этой теме на пучках фотонов в эксперименте GRAAL. Особо следовало бы отметить проекты по изучению структуры нестабильных экзотических ядер на встречных пучках электронов и релятивистских ионов (ELISe и др.). Таким образом, автору следовало бы продемонстрировать более широкий кругозор по изучаемой теме.”

Фомичёв А.С.: Абсолютно корректное замечание. Полученные данные требуют перепроверки разными методами. Реакции фрагментации один из способов изучения данного явления. Что лучше покажет эксперимент.

Оганесян Ю.Ц.: Так, идём дальше. Станислав Борисович Сакута.

Сакута С.Б.: Оглашает отзыв. Отзыв положительный. Текст прилагается. Работа представляет собой завершённый оригинальный научный труд и её можно квалифицировать как новое крупное научное достижение в ядерной физике. Диссертация полностью отвечает требованию ВАК, а её автор заслуживает присуждения степени доктор-физико-математических наук.

Среди недостатков диссертации, которых, кстати немного, отмечу отсутствие в ней полного обзорного параграфа к третьей главе с изложением современных ситуации в области экспериментальных исследований легких ядер на границе протонной стабильности. Это позволило бы диссертанту более четко выявить место своих работ в данном направлении исследований. Несмотря на очень качественные цветные иллюстрации, следует отметить несоответствие, за редким исключением, подписей к рисункам на русском языке с надписями на самих рисунках на английском. Кроме того, в тексте диссертации содержатся опечатки и даже грамматические ошибки, что, однако, не мешает восприятию содержания.

Фомичёв А.С.: Действительно есть опечатки и недоработки. Замечания оппонента справедливы, я с ними полностью согласен. Спасибо за внимательное прочтение и анализ материала.

Оганесян Ю.Ц.: Алхазова Г.Д. нет, его отзыв, изложенный на трёх страницах, положительный. Текст прилагается. Существенных замечаний он не сделал. Диссертантом развиты оригинальные методики и внесён крупный вклад в изучение лёгких экзотических ядер. Научные результаты, полученные диссертантом, имеют существенное значение для физики ядра и для астрофизики. Результаты являются новыми, обоснованными и достоверными. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Разработанные диссертантом методики могут эффективно использоваться в планируемых исследованиях экзотических ядер на комплексе У-400М/АКУЛИНА-2 и в совместных работах на фрагмент сепараторе SuperFRS (FAIR, Дармштадт). Диссертационная работа отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор, Фомичёв Андрей Сергеевич заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Хорошо. А теперь мы имеем время на дискуссию. Все присутствующие имеют на это право, пожалуйста.

Пенионжкевич Ю.Э.: Мне очень приятно, что у нас произошла защита по экспериментальной методике. Это одна из немногих диссертаций, которая посвящена приборам и методам экспериментальной физики, уже это положительное событие. Во многих зарубежных центрах MSU, GANIL, RIKEN и др. этому уделяется очень много внимания, порой специалисты перестают заниматься физикой и посвящают себя только методике. И в этом нет ничего плохого. Если бы я не знал лично о работе А.С. Фомичёва, я бы сильно удивился, прочитав этот автореферат. Много места уделено физике, которую по этой специальности не стоило бы так детально обсуждать. Мне непонятна 'жадность' соискателя, когда приводится 31 работа, а по специальности я насчитал их порядка 6. Некоторые из них, например, информационный журнал Nuclear Physics News, не входит в перечень ВАК. На мой взгляд этого не следовало бы делать. В заключении своего несколько сумбурного выступления я хотел бы присоединиться к мнению оппонентов, что соискатель безусловно заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности «Приборы и методы экспериментальной физики». Чего я желаю соискателю, так это продолжать двигаться в этом направлении.

Оганесян Ю.Ц.: Кто ещё? Пожалуйста.

Григоренко Л.В.: Критика прозвучала, она требует комментариев. Мне приятно отметить, что Андрей Сергеевич не только умеет крутить гайки, но стремится понять физику и углубляться в суть явлений. Таких специалистов мало, немногие в современной науке совмещают эти две черты.

Хотелось бы высказать своё собственное мнение о проделанной работе в секторе А.С. Фомичёва. Мне как теоретику было интересно наблюдать за происходящим. Все поставленные эксперименты очень разноплановые, каждый раз к каждому из них подбирался индивидуальный подход или метод, происходила активная дискуссия, затем пробные тесты и т.д.; ребята под руководством Андрея Сергеевича блестяще справились с этим. Наконец, хотелось бы сделать краткий комментарий относительно мягкой дипольной моды, поскольку это тема не даёт покоя. На приведённой картине достаточно хорошо все видно, вернее не совсем все. Если бы спектр ${}^6\text{Be}$ продлевался далее в область 25 МэВ, то можно было бы ожидать проявление гигантского дипольного резонанса и сделать количественную оценку о вероятности его возбуждения. Это было бы желательно сделать и надо сделать, т.к. позволит прояснить картину в целом. Относительно изовекторной мягкой дипольной моды. Сомнений в определении спин-четности нет, результат следует из угловых и энергетических распределений. Коллективное это возбуждение или нет? В каком-то смысле да, движение валентных нуклонов относительно альфа-кора можно назвать коллективным.

Джолос Р.В.: Поскольку диссертация хорошая и это должно отразиться в дискуссии, то хотелось бы высказаться. Если диссертация 'не очень', то и дискуссии нет. По моим представлениям докторская диссертация экспериментатора должна содержать: разработку методики - раз, выполнение эксперимента – два, извлечение физической информации - три, все это здесь есть. И, используя какую-либо из теоретических моделей, сделать анализ данных, но он не обязан их разрабатывать. После этого, он (экспериментатор) садится в удобное кресло и с интересом наблюдает за дискуссией теоретиков. Все это здесь присутствует. Я призываю учёный совет поддержать эту работу и проголосовать положительно. Спасибо.

Оганесян Ю.Ц.: Ещё кто желает? Хорошо, если нет, то тогда надо подвести некий итог. Хотелось бы взглянуть на проделанную работу со стороны. Здесь следует напомнить, что впервые запаздывающие протоны были наблюдаемы здесь в ЛЯР В.А. Карнауховым и Г.М. Тер-Акопяном более 50 лет тому назад. Сейчас техника позволяет

наблюдать спектр этих протонов. В шестидесятые годы В.И. Гольданским был предсказан новый вид радиоактивности – двухпротонный распад. Видно, что сейчас это нашло экспериментальное подтверждение. Вот об этом в докладе можно было бы сказать пару слов. Диссертация состоит из двух частей: 1) это подготовка и постановка опытов; 2) анализ полученных результатов. Одно перетекает в другое. Иногда не понятно, всё ли сделано, где и когда будет делаться дальше. Сейчас наступает вторая волна. С учётом запуска нового фрагмент-сепаратора АКУЛИНА-2 и запланированной модернизацией ускорителя у экспериментаторов появятся новые возможности. Очень важен итог того, что мы сделали и знать куда следует двигаться дальше. В этом безусловно есть ценность данной работы. Что касается физики, а именно вопроса о ${}^6\text{Be}$, то мне кажется, что здесь есть с чем разбираться. Казалось бы, в системе ${}^6\text{Li}$ всего три протона и три нейтрона, при образовании ${}^6\text{Be}$ нельзя исключить коллективного движения и образования гигантского дипольного резонанса. Что колеблется относительно чего вопрос к теоретикам, пусть разбираются, совершенствуют модели. Что касается реакций полного слияния с участием ${}^6\text{He}$ и ${}^6\text{Li}$, то мне кажется это не очень показательно для изучения их свойств. А вот периферийные процессы – реакции неполного слияния, идущие с передачей двух нейтронов или дейтрона, позволяют дать количественную оценку. Впрочем, это и было показано. За экспериментами подобного типа будущее, их надо безусловно делать. Я думаю, что всеобщее мнение – это большой труд, много лет работали, полученные результаты дали толчок двигаться дальше. Это краткий итог. Если есть ещё замечания, дополнения – милости прошу. Если нет желающих выступить, предоставляю заключительное слово диссертанту.

Фомичёв А.С.: Мне было очень приятно доложить о проделанной работе и выслушать ваши замечания как критические, так и хвалебные. Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность дирекции ЛЯР и научному руководителю Ю.Ц. Оганесяну, ускорительному отделу, всему коллективу сектора №6 за постановку задачи и за предоставленные условия для проведения данных исследований. Персонально хотелось бы отметить следующих коллег, внёсших заметный вклад в получение/анализ материала данной работы. Это: Г.М. Тер-Акопян, Л.В. Григоренко, С.В. Степанцов, И.Г. Муха, М.С. Головков, В. Худоба, П.Г. Шаров, Г. Каминьски, А.В. Горшков, С.А. Крупко, А.А. Безбах, Р.С. Слепнев. Отдельная благодарность В.В. Авдейчикову и Е.Ю.

Никольскому, за внимательное прочтение работы и полезные замечания. Автор выражает признательность зарубежным коллегам -- Х. Симону, К. Шайденбергеру, М. Пфютцнеру, О.А. Киселеву, М.В. Жукову и О.Б. Тарасову за развитие сотрудничества с ЛЯР ОИЯИ.

Большое спасибо оппонентам и ведущей организации.

Оганесян Ю.Ц.: Спасибо. Так, мы переходим к голосованию. Предлагаю выбрать счетную комиссию, для проведения тайного голосования для решения вопросов о соответствии рассматриваемой работы требованиям Положения и о присуждении ученой степени доктора физико-математических наук Фомичёву Андрею Сергеевичу: Апель П.Ю., Авдеев М.В., Шабалин Е.П.

ПОСТАНОВИЛИ: Избрать счётную комиссию в составе: Апель П.Ю., Авдеев М.В., Шабалин Е.П.

СЛУШАЛИ: Утверждение протокола счетной комиссии по проведению тайного голосования о присуждении ученой степени доктора физико-математических наук Фомичёву А.С.: состав совета утвержден в количестве 23 человек, присутствовали на заседании 18 членов совета, роздано бюллетеней - 18, оказалось в урне для голосования - 18, при этом с отметкой "за" - 18, подано с отметкой "против" - нет, недействительных бюллетеней - нет.

Оганесян Ю.Ц.: Прошу утвердить протокол счетной комиссии. Протокол счетной комиссии утвержден единогласно. На основании изложенного диссертационный совет Д 720.001.06 в Объединенном институте ядерных исследований принял решение о присуждении ученой степени доктора физико-математических наук Фомичёву А.С. Переходим к обсуждению заключения совета по диссертации Фомичёва А.С. Проект заключения есть у всех членов совета.

Оганесян Ю.Ц.: Есть замечания? Если замечаний нет, то мы за него проголосуем. Все «за». Против - нет. Единогласно утверждено.

Председатель диссертационного совета,
академик РАН

Ученый секретарь диссертационного совета




Оганесян Ю.Ц.


Попеко А.Г.