

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе
Фомичева Андрея Сергеевича
«Экспериментальные исследования экзотических ядер
с $Z < 20$ на ускорительном комплексе DRIBs»,
представленной на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук по специальности
01.04.01—Приборы и методы экспериментальной физики

С прогрессом техники ускорения тяжелых ионов и методов сепарации короткоживущих изотопов стало возможным использование для физического эксперимента пучков радиоактивных ядер, что многократно расширило число доступных для исследований изотопов за счет ядер, расположенных вблизи и даже за границами нуклонной стабильности. Исследования в этой области привели к ряду удивительных открытий. Оказалось, что удаленные от долины стабильности ядра могут быть супердеформированными уже в основных состояниях и иметь магические числа, отличные от значений для стабильных ядер. Они могут иметь нейтронное или протонное гало, состоящее из слабосвязанных нуклонов. С приближением к границам стабильности появляются новые виды распадов с испусканием запаздывающих нуклонов и кластеров после предшествующего β -распада. Указанные факты требуют существенной коррекции стандартных теоретических моделей и кардинально меняют наши представления об эволюции Вселенной. Неудивительно, что исследование атомных ядер вдали от долины стабильности является одним из приоритетных и интенсивно развивающихся направлений в ядерной физике. Тем не менее, свойства пограничных ядерных систем все еще остаются малоизученными, и, нет сомнения, здесь будет получено еще много новых и неожиданных результатов. Диссертационная работа А.С. Фомичева, посвященная экспериментальному исследованию легких экзотических ядер с $Z < 20$ вблизи границы протонной стабильности, как раз и способствует развитию этого направления и, несомненно, является актуальной.

По мере приближения к границам стабильности времена жизни нуклидов быстро спадают, что значительно усложняет экспериментальные исследования. Поэтому для получения информации о свойствах короткоживущих изотопов необходимы совершенно новые методы и подходы. Прежде всего, требуются высококачественные пучки радиоактивных изотопов. К сожалению, все установки, дающие радиоактивные пучки, находятся в дальнем зарубежье. Дубненский комплекс DRIBs при ускорителе У-400М является единственным в СНГ и в Восточной Европе центром, позволяющим проводить эксперименты с

радиоактивными пучками. Помимо этого, требуются эффективные детектирующие системы и электроника для сбора и визуализации данных. Для выполнения диссертационной работы А.С. Фомичев располагал богатым арсеналом технических средств – это кольцевые и квадратные кремниевые сегментированные телескопы, массивы детекторов для регистрации нейтронов (нейтронная стенка) и гамма-квантов (Ge+BGO), позиционно-чувствительные многопроволочные камеры и, наконец, Оптическая Время-Проекционная Камера для изучения процессов эмиссии запаздывающих протонов. Указанные системы позволили провести ряд тонких экспериментов по двойным и тройным совпадениям методом инвариантной и комбинированной массы. В разработку и реализацию новых детекторных систем и электроники, используемых при проведении экспериментов с радиоактивными и стабильными пучками на комплексе DRIBs, Фомичев А.С. внес определяющий вклад. Из методических успехов следует отметить также применение в ряде экспериментов криогенной водородной мишени. По своей технической оснащенности комплекс DRIBs не имеет аналогов в Восточной Европе. Редко можно встретить в одной диссертационной работе такое обилие экспериментальных методик. Их высочайший уровень свидетельствует о высоком профессионализме докторанта как экспериментатора-методиста. Без развитых благодаря А.С. Фомичеву методик было бы невозможно провести исследования свойств короткоживущих изотопов на границе нуклонной стабильности.

В диссертацию включены пять экспериментов, выполненных за последние десять лет на комплексе DRIBs с использованием фрагмент-сепаратора АКУЛИНА. Первый относится к измерению сечений полного и неполного слияния ядер. Конкретно, были проведены кинематически полные эксперименты с пучками слабосвязанных ядер ${}^6\text{He}$ и ${}^6\text{Li}$ при их взаимодействии с ядрами эрбия-166 и гольмия-165. Идентификация составного ядра осуществлялась по дискретным гамма переходам с выделением выходного канала реакций по тройным совпадениям γ - γ -заряженная частица и γ - γ -нейtron. Анализ полученных экспериментальных данных на основе комплекса программ EMPIRE позволил извлечь значения критического углового момента и диффузности. Был определен вклад неполного слияния $\alpha + {}^{166}\text{Er}$ при взаимодействии ${}^6\text{He}({}^6\text{Li}) + {}^{166}\text{Er}$ на уровне 10%. Развитая в данной работе методика может быть использована и в других экспериментах на радиоактивных пучках.

Второй эксперимент посвящен исследованию реакции перезарядки ${}^1\text{H}({}^6\text{Li}, {}^6\text{Be})n$ с образованием ядра ${}^6\text{Be}$. Интерес заключается в том, что это ядро является изобарическим аналогом ${}^6\text{He}$, имеющим нейтронное гало из двух слабосвязанных нейтронов. Кроме того, ${}^6\text{Be}$ – это самое легкое ядро с двухпротонным распадом. Для исследования был предложен и реализован эффективный метод регистрации тройных совпадений α - p - p в кинематически полном эксперименте, что позволило измерить спектр инвариантной массы ядра ${}^6\text{Be}$. В спектре были наблюдены известные ранее резонансы, соответствующие основному 0^+ ($E_T = 1.37$ МэВ) и первому возбужденному 2^+

($E_T = 3.05$ МэВ) состояниям, и в дополнении к ним впервые наблюдалась структура при энергии возбуждения $E_T > 4$ МэВ, отвечающая изовекторной мягкой дипольной моде. Впервые было получено не только хорошее описание всего спектра возбуждений ${}^6\text{Be}$, но и двумерных профилей полного набора кинематических переменных в зависимости от энергии во всем диапазоне $E_T < 16$ МэВ.

В третьем эксперименте выполнен поиск изотопа ${}^{26}\text{S}$ среди продуктов фрагментации ${}^{32}\text{S}$ с энергией 50.3 МэВ/нуклон на бериллиевой мишени. Относительно этого изотопа в настоящее время существуют довольно противоречивые данные. Предсказанные энергии двухпротонного распада также имеют большой разброс. Идентификация заряженных частиц осуществлялась имплантацией радиоактивного изотопа в кремниевый телескоп. Измерялись двухмерные спектры ΔE -ToF и ΔE - E . В результате анализа был установлен новый предел времени жизни ${}^{26}\text{S}$: $T_{1/2} < 79$ нс, отличающийся от известных литературных данных почти на 5 порядков (≈ 10 мс). Надежность выполненных измерений подтверждается оценкой периода полураспада ${}^{25}\text{P}$ ($T_{1/2} < 38$ нс), согласующейся с уже известными литературными данными. Выполненные измерения позволили сделать оценку и для величины $Q_{2p}({}^{26}\text{S})$: $Q_{2p} > 640$ кэВ, на основании которой высказано предположение, что наиболее вероятным каналом распада ядра ${}^{26}\text{S}$ является одновременное испускание двух протонов.

Следующий эксперимент был посвящен изучению β -распада изотопов ${}^{26}\text{P}$ и ${}^{27}\text{S}$, сопровождающегося задержанной эмиссией протонов и γ -квантов. Пучки радиоактивных изотопов ${}^{27}\text{S}$ и ${}^{26}\text{P}$ получались в реакции фрагментации ${}^{32}\text{S}$ (50.3 МэВ/нуклон) на бериллиевой мишени. Для регистрации редких событий распада использовалась современная методика на основе оптической время-проекционной камеры. Изотопы ${}^{26}\text{P}$ и ${}^{27}\text{S}$ поступали в газовый объем камеры, где полностью останавливались. Этот метод имеет большое преимущество по сравнению с имплантацией в кремниевый телескоп, позволяя изучать редкие виды распадов изотопов с временами жизни в широком диапазоне $T_{1/2} = 1 \div 500$ мс. В результате для изотопа ${}^{26}\text{P}$ была получена оценка суммарной вероятности β -задержанной эмиссии одного и двух протонов ($P = 35\%$) и вероятности вылета двух протонов ($P = 1.5\%$). Для изотопа ${}^{27}\text{S}$ найденный период полураспада $T_{1/2} = 15.5$ мс в точности совпал с измеренным ранее значением. Были также получены более точные значения вероятностей задержанной эмиссии одного и двух протонов. Использованный метод впервые позволил построить энергетический спектр протонов в процессе испускания одной частицы. Среди различных вариантов распада ${}^{27}\text{S}$ не было обнаружено ни одного события с одновременной эмиссией трех протонов. Верхний предел этого процесса оценен на уровне $< 0.08\%$. Полученные новые данные о способах распада изотопов ${}^{26}\text{P}$ и ${}^{27}\text{S}$ имеют большое значение для астрофизики, так как позволяют дать более точную оценку для наработки изотопа ${}^{26}\text{Al}$ в процессе нуклеосинтеза.

И, наконец, выполнен эксперимент по исследованию распада первого возбужденного состояния $J^\pi = 3/2^-$ с энергией 1288 кэВ ядра ^{17}Ne , расположенного на границе протонной стабильности. Это состояние интересно тем, что оно лежит выше порога двухпротонной эмиссии $^{17}\text{Ne} \rightarrow ^{15}\text{O} + 2p$ и конкурирует только с γ -переходом в основное $J^\pi = 1/2^-$ состояние. Вероятность испускания двух протонов определяет сечение интересной для астрофизики реакции радиационного захвата $^{15}\text{O}(2p, \gamma)^{17}\text{Ne}$, которая может повлиять на ход rp -процесса при синтезе новых элементов во Вселенной. Ранее для заселения этого состояния использовалась реакция с подхватом трех нейтронов $^{20}\text{Ne}(^3\text{He}, ^6\text{He})$, идущая с очень малым сечением, а информация о возбужденных состояниях ^{17}Ne получалась методом инвариантной массы. В этих измерениях фоновые условия оказались очень плохими. В диссертационной работе А.С. Фомичева были сделаны два принципиальных улучшения. Во-первых, для заселения состояний ^{17}Ne выбрана реакция подхвата одного нейтрона $^1\text{H}(^{18}\text{Ne}, d)^{17}\text{Ne}$ на вторичном пучке ^{18}Ne с использованием криогенной водородной мишени. Преимущество реакции в том, что она идет с несравненно большим сечением. Во-вторых, в эксперименте впервые был использован метод комбинированной массы. Это значительно улучшило фоновые условия и позволило определить новый верхний предел для отношения $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma < 1.6 \times 10^{-4}$, что в ~ 50 раз ниже ранее полученного значения.

Оценивая диссертацию в целом, отмечу, что работа, проделанная А.С. Фомичевым, выполнена на очень высоком профессиональном уровне. В ней удачно сочетаются разработки современных экспериментальных методик, включающих радиоактивные пучки, многодетекторные системы, системы электроники, обеспечивающие сбор и анализ информации, с конкретными физическими экспериментами по исследованию свойств короткоживущих изотопов ^6He , ^6Be , ^{26}S , ^{26}P , ^{27}S , ^{17}Ne вблизи границы ядерной стабильности. Получены новые и интересные результаты об энергиях и вероятностях их распада. Разработанные экспериментальные методики могут в дальнейшем быть использованы при проведении экспериментов на ускорительном комплексе У400М-АКУЛИНА-2 и в проекте EXPERT в рамках коллaborации Super-FRS.

Достоверность полученных результатов обеспечена, помимо современной методики эксперимента, их сопоставлением с существующими данными, использованием надежных и хорошо апробированных методов теоретического анализа.

Среди недостатков диссертации, которых, кстати, немного, отмечу, прежде всего, отсутствие в ней полноценного обзорного параграфа к третьей главе с изложением современной ситуации в области экспериментальных исследований легких ядер на границе протонной стабильности. Это позволило бы диссидентанту 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.

Сделанные критические замечания, конечно, не ставят под сомнение полученные результаты и выводы работы и не изменяют ее общей положительной оценки.

Диссертационная работа А.С. Фомичева представляет собой завершенный оригинальный научный труд и ее можно квалифицировать как новое крупное научное достижение в области ядерной физики. Она написана ясным языком, содержит большой объем информации и, вместе с тем, лаконична. Все материалы опубликованы в виде научных статей и докладов на международных конференциях. Автореферат и опубликованные работы достаточно полно отражают содержание диссертации.

Диссертация полностью отвечает критериям ВАК и «Положению о порядке присуждения ученых степеней» в редакции Постановления №842 Правительства РФ от 24.09.2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Считаю, что Фомичев Андрей Сергеевич по уровню квалификации достоин присуждения ему искомой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент

Начальник лаборатории ядерных реакций
НИЦ «Курчатовский институт»
доктор физ.-мат. наук

С.Б. Сакута

Адрес: 123182, Москва,
пл. Академика Курчатова, д. 1
тел.: +7 (499) 1969309
e-mail: sbsakuta@mail.ru

Подпись Сакуты С.Б. заверяю

Главный ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт»



С.Ю. Стремоухов

«18» июня 2018