

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе Джилавяна Леонида Завеновича «Фотоядерные исследования в области гигантских резонансов в прямых и обратных реакциях», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Диссертационная работа Л.З. Джилавяна посвящена исследованиям прямых и обратных фотоядерных реакций в области гигантских резонансов (ГР) и преодолению существенных сложностей в таких исследованиях. В наиболее доступных и интенсивных источниках фотонов для исследований ГР их получают от торможения в мишенях-радиаторах ускоренных электронов (e^-). Но у таких источников есть две проблемы, затрудняющие исследования ГР и связанные с определением спектров тормозных фотонов и с решением обратной задачи: извлечение из измеренных с такими спектрами выходов информации о сечениях изучаемых фотоядерных реакций. Частичная альтернатива исследованиям с тормозными фотонами и проверка корректности решений проблем при применении таких фотонов – использование «монохроматических» фотонов («моно- γ »), которые для сравнительно недорогих импульсных ускорителей электронов (при энергиях электронов до ~ 100 МэВ) можно получать от аннигиляции позитронов (e^+) на лету в тонких мишенях с низким атомным номером Z . К сожалению, при такой «монохроматизации» имеется снижение потоков используемых частиц на много порядков при конверсии и ($e^- \rightarrow e^+$), и ($e^+ \rightarrow$ «моно- γ »). В то же время, наличие пучков и электронов, и позитронов позволяет проводить в тонких мишенях исследования электрон- и позитрон-ядерных реакций и использовать отличия спектров виртуальных фотонов и друг от друга, и от спектров реальных тормозных фотонов, обогащая доступные способы исследований мультипольных ГР. Пути преодоления указанных сложностей получения корректных результатов с тормозными и аннигиляционными фотонами могут быть также частично проверены при

изучении обратных реакций с возможным расширением исследований и на ГР, построенные на возбужденных состояниях синтезируемых ядер.

В диссертации прямые реакции исследовались на импульсных ускорителях электронов с максимальной энергией ускоренных электронов до ~100 МэВ (прежде всего, на линейном ускорителе электронов на бегущей волне ЛУЭ-100 ИЯИ РАН) на пучках электронов и позитронов под действием образуемых ими реальных тормозных и аннигиляционных фотонов, а также виртуальных фотонов. Обратные реакции изучались на пучках ионов на ускорителе-тандеме в Леньяро (Италия). Такие исследования актуальны, поскольку ГР (особенно низших мультипольностей) — одни из основных типов коллективных движений в ядрах, так что выверенные и разносторонние сведения о них по-прежнему важны для проверки и развития представлений о строении ядер.

Многие представленные в диссертации результаты получены впервые и среди тех из них, которые прямо связаны с собственно исследованиями ГР, следует выделить: выяснение роли различий тормозных спектров от электронов (современных (Сельцер и Бергер), и используемых ранее (Шифф)) на получаемые сечения E1 ГР в прецизионных измерениях с тормозными фотонами; на квазимонохроматических аннигиляционных фотонах на ЛУЭ-100 при энергии фотонов $E_\gamma \cong 10$ МэВ и её разбросе $\Delta E_\gamma \cong 300$ кэВ измерено с прямой регистрацией осколков деления в поликарбонатных плёнках при автоматическом счёте треков сечение реакции $^{238}\text{U}(\gamma, F)$; предложен и осуществлен метод выделения вклада изовекторного E2 ГР при сопоставлении заселений высокоспиновых метастабильных состояний ядер в фото- и электро- ядерных реакциях на основе анализа полученных изомерных отношений выходов заселения метастабильного ($J^\pi=12^-$) и основного ($J^\pi=2^-$) состояний ^{196}Au в реакциях $^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196\text{m,g}}\text{Au}$ и $^{197}\text{Au}((e^-), (e^-)'n)^{196\text{m,g}}\text{Au}$; предложены оригинальные варианты метода выделения изовекторного E2 ГР при измерении асимметрии вылета нейтронов в (γ, n) -реакции на свинце, основанные на использовании

регистрации нейтронов с помощью пороговых активационных детекторов нейтронов, а также в реакции $^{208}\text{Pb}(\gamma, n_0)$ с помощью сцинтилляционных спектрометров; дано модельное описание фотоядерного $^{13}\text{C}(\gamma, p)^{12}\text{B}$ активационного детектирования углерода.

Результаты работы могут быть использованы: для баз данных по фотоядерным реакциям; для медицинских приложений; для разработки (^{12}N , ^{12}B)-активационного детектирования скрытых взрывчатых веществ и наркотиков.

По всем этим причинам актуальность работы Л.З. Джилавяна не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, двух приложений и списка литературы.

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована ее цель и дано краткое изложение ее содержания.

Первая глава посвящена получению на импульсных резонансных ускорителях электронов (прежде всего, на ЛУЭ-100) прецизионных пучков электронов как для исследований электрон-ядерных реакций с ними, так и для целей получения прецизионных пучков тормозных и аннигиляционных фотонов для исследований ядер в области ГР, а также для некоторых дополнительных задач в исследованиях физики ядра и космических лучей.

Вторая глава посвящена получению пучков позитронов как для проведения исследований позитрон-ядерных реакций с ними, так и для получения квазимонохроматических аннигиляционных фотонов для исследований ГР в ядрах. Даны результаты исследований дифференциального коэффициента ($e^- \rightarrow e^+$)-конверсии в оптимальных конвертерах и динамики ускорения позитронов в резонансных ЛУЭ.

Третья глава посвящена проведенным исследованиям свойств и оптимальных условий получения прецизионных пучков реальных фотонов от тормозного излучения электронов и позитронов и от аннигиляции позитронов на лету, а также виртуальных фотонов в электрон- и позитрон-

ядерных реакциях. Показано гипертрофирование узких (с характерными ширинами ~ 100 кэВ) структур в сечениях фотоядерных реакций в области E1 ГР из-за различий используемых спектров тормозного излучения (с одной стороны, Шиффа, а с другой стороны, Сельцера и Бергера). Приведен разработанный метод расчета потоков и спектров тормозных фотонов от электронов для толстых радиаторов, нужных для исследования фотоядерных реакций с малыми сечениями. Приводятся результаты расчетов по разработанной методике потоков и спектров квазимонохроматических фотонов от аннигиляции позитронов на лету в их сопоставлении с полученными на ЛУЭ-100. Рассмотрены особенности спектров виртуальных фотонов при электрон- и позитрон- ядерных реакциях.

Четвертая глава посвящена проведенным исследованиям изовекторных E1 ГР в ядрах в реакциях с квазимонохроматическими аннигиляционными реальными фотонами. Для квазимонохроматических аннигиляционных фотонов описаны проведенные на ЛУЭ-100 измерения сечений парциальных реакций $^{63}\text{Cu}(\gamma, n)$ и $^{238}\text{U}(\gamma, f)$ с использованием низкофоновых методов регистрации продуктов этих реакций (соответственно активационного с помощью двухкристального NaI(Tl) спектрометра и трекового детектора осколков на основе тонких поликарбонатных пленок). Получено хорошее согласие с имеющимися экспериментальными данными и результатами других авторов.

Пятая глава посвящена проведенным исследованиям изовекторного E1 ГР в ядрах, а также изовекторного E2 ГР в реакциях с тормозными (полного спектра) фотонами и с виртуальными фотонами в электрон-ядерных реакциях. На основе разработанной модели γ' -каскадов в атомных ядрах дан анализ возможностей исследования ядер в реакциях с заселением изомерных состояний. Описаны исследования заселения различных изомерных состояний для In и Au под действием реальных (тормозных полного спектра) и виртуальных (в электрон-ядерных реакциях) фотонов. Для ядер ^{115}In исследовано поведение низкоэнергетической части E1 ГР, а также показано

отсутствие большого пика в кривой сечения реакции $^{115}\text{In}(\gamma,\gamma')^{115\text{m}}\text{In}$ при энергии фотонов около 27 МэВ, упоминаемого в более ранних работах. Рассмотрены возможности исследования поведения полного сечения ядерного фотопоглощения для среднетяжелых ядер при энергиях до порогов реакций (γ,n) путем измерения сечений реакций $(\gamma,\gamma')^m$ и использования рассчитанных значений изомерных отношений. Для ядер ^{197}Au проведено выделение вклада изовекторного E2 ГР путем сопоставления выходов реакций $^{197}\text{Au}(\gamma,n)^{196\text{m,g}}\text{Au}$ и $^{197}\text{Au}((e^-),(e^-)n)^{196\text{m,g}}\text{Au}$ с помощью метода, использующего: а) значительно увеличенный «эффективный порог» из-за необходимости для заселения состояния $^{196\text{m}}\text{Au}$ набрать в γ' -каскаде высокий спин; б) возрастание изомерного отношения в ~ 10 раз при переходе в фотопоглощении от E1 к E2; в) отношение количеств «работающих» виртуальных квадрупольных и дипольных γ -квантов ≈ 3 ; г) уменьшение погрешностей при использовании относительных измерений. Рассмотрены возможности исследования изовекторных E2 ГР при измерениях асимметрии испускания быстрых нейтронов от реакций (γ,n) с регистрацией нейтронов либо сцинтилляционными спектрометрами, либо пороговыми детекторами. На основе измеренных 89105164833 выходов проанализированы особенности парциальных фотонуклонных реакций на изотопах титана, существенные для разработки моделей таких реакций при описании диссипации энергии и девозбуждения в атомных ядрах при фото-возбуждении в них E1 ГР. Показаны недостатки широко используемых моделей ядерных реакций TALYS и EMPIRE при описаниях реакций $^{14}\text{N}(\gamma,2n)^{12}\text{N}$, $^{14}\text{N}(\gamma,2p)^{12}\text{B}$ и $^{13}\text{C}(\gamma,p)^{12}\text{B}$ (а также в случаях реакций с наличием изотопического расщепления E1 ГР в (γ,p) -реакциях на ^{49}Ti , ^{50}Ti и ^{68}Zn).

Шестая глава посвящена проведенным на тандеме в Legnaro с использованием разработанных NaI и BGO γ -спектрометров реакций, обратных фотоядерным. На основе анализа измеренных угловых распределений фотонов от реакции $^2\text{H}(d,\gamma)^4\text{He}$ получены указания на вклад

D-волны в волновой функции основного состояния ${}^4\text{He}$. На основе обработки измеренных спектров вторичных фотонов от реакций синтеза ускоренных ядер ${}^{32}\text{S}$ с ядрами мишени ${}^{27}\text{Al}$ проведено исследование ширин E1 ГР, построенных на возбужденных состояниях ${}^{59}\text{Cu}$ при умеренно больших значениях энергий возбуждения (до $E_x \approx 77$ МэВ) и спинов (до $J \approx 38 \hbar$).

В Заключении приведены результаты работы, из которых следует выделить:

- Впервые в нашей стране создана установка для генерации на импульсном линейном ускорителе электронов ЛУЭ-100 ИЯИ РАН прецизионных пучков электронов, позитронов, тормозных и квазимонохроматических аннигиляционных фотонов в широких динамических диапазонах их параметров для исследований ГР. Получены пучки позитронов и квазимонохроматических аннигиляционных фотонов с коэффициентами конверсии ($e^- \rightarrow e^+$) и ($e^+ \rightarrow \langle \text{моно-}\gamma \rangle$) экстра-класса.
- Проанализированы расчетные спектры реальных тормозных фотонов от электронов и позитронов, а также виртуальных фотонов различной мультипольности в электрон- и позитрон- ядерных реакциях с целью изучения влияний различий этих спектров. Разработан метод расчета потоков и спектров тормозных фотонов от электронов и решения прямой и обратной задач в фотоядерных экспериментах с толстыми радиаторами и мишенями при исследованиях реакций с малыми сечениями.
- На квазимонохроматических аннигиляционных фотонах измерены сечения реакции ${}^{63}\text{Cu}(\gamma, n){}^{62}\text{Cu}$ (при энергиях фотонов $(12 \div 25)$ МэВ с использованием двухкристальной «совпадательной» активационной методики, выделяющей конкретные парциальные реакции) и реакции ${}^{238}\text{U}(\gamma, f)$ (при энергии фотонов 10 МэВ впервые с использованием прямой трековой регистрации осколков деления).

- Выполнены исследования вкладов изовекторного E2 ГР в сечение фотоядерных реакций. Разработана программа расчетов ядерных γ' -каскадов в фотоядерных реакциях. Показано, что при большой разнице спинов основного и возбужденного состояний изомерные отношения выходов возрастают для E2-возбуждений примерно на порядок по сравнению с E1-возбуждениями. Активационной методикой с использованием Ge γ -спектрометров измерено сечение реакции $^{115}\text{In}(\gamma,\gamma')^{115\text{m}}\text{In}$ при энергии фотонов (4÷46) МэВ, в этом сечении обнаружен только один сравнительно большой пик при $E_\gamma \cong 9$ МэВ, аккуратные измерения которого позволяют, в принципе, получить информацию о поведении полного сечения до порога (γ, n) реакции, а при больших энергиях – о соотношении радиационной и нейтронной ширин. Впервые выделен вклад изовекторного E2 ГР при заселении высокоспиновых изомерных состояний ядра ^{196}Au в фото- и электрон-нейтронных реакциях. Рассмотрены возможности развития метода выделения вкладов изовекторного E2 ГР при измерениях асимметрии испускания нейтронов в (γ, n) -реакции на ядрах Pb. Дан обзор способов выделения вкладов изовекторного E2 ГР на основе как собственных работ, так и результатов других исследователей.
- Активационной методикой с использованием HPGe γ -спектрометра исследована (γ, p) -реакция на изотопах Ti для E1 ГР. Показана неадекватность при больших числах нейтронов N описания этой реакции в претендующей на универсальность модели ядерных реакций TALYS. Использование разработанной в НИИЯФ МГУ комбинированной модели фотонуклонных реакций, учитывающей изотопическое расщепление E1 ГР в этих случаях значительно улучшает согласие с экспериментом.
- На ускорителе-тандеме в Legnaro (Италия) с разработанными NaI и BGO γ -спектрометрами измерены энергетические спектры и угловые распределения фотонов из обратной фотоядерной реакции $^2\text{H}(d,\gamma)^4\text{He}$.

Получены указания на вклад D-волны в основном состоянии ядра ${}^4\text{He}$.

- На основе обработки измеренных спектров вторичных фотонов от реакций синтеза ускоренных ядер ${}^{32}\text{S}$ с ядрами мишени ${}^{27}\text{Al}$ проведено исследование ширин E1 ГР, построенных на возбужденных состояниях ${}^{59}\text{Cu}$ при умеренно больших значениях энергий возбуждения (до $E_x \approx 77$ МэВ) и спинов (до $J \approx 38 \hbar$).
- Исследованы фотоядерные методы наработки радиоизотопов на ускорителях электронов для медицины и (${}^{12}\text{N}$; ${}^{12}\text{B}$)-активационного детектирования скрытых взрывчатых веществ и наркотиков.

Все результаты диссертационной работы являются обоснованными и их достоверность не вызывает сомнения.

Основные результаты диссертации опубликованы в 49 опубликованных работах, в том числе в 27 рецензируемых изданиях, входящих в «перечень ВАК». Они широко обсуждались на российских и международных конференциях.

В работе Л.З. Джилавяна предложено и реализовано, как уже говорилось, много оригинальных и остроумных экспериментальных методов, часто направленных на получение результатов, либо извлеченных более простым способом, либо более полных, чем ранее. Диссертация Л.З. Джилавяна выполнена на высоком научном уровне, автором получены важные результаты, многие из которых являются пионерскими и представляют собой крупные достижения для исследований в области физики ГР в атомных ядрах.

Содержание диссертации соответствует пунктам 5 «Слабые и электромагнитные процессы в ядерной физике, ядерная нейтринная физика» и 10 «Создание экспериментальных установок и приборов для исследовательских работ по изучению структуры ядер и взаимодействию ядер с пучками ядер и элементарных частиц» паспорта специальности 01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц».

Тем не менее, диссертационная работа не лишена определенных недостатков.

Автор иногда слишком много внимания уделяет методическим и даже технологическим вопросам эксперимента (особенно в первых трех главах) и недостаточное внимание – анализу физических результатов. Например, в четвертой (самой короткой) главе, описаны результаты измерения сечения реакции $^{63}\text{Cu}(\gamma, n)$, но отсутствует количественный анализ интегральных характеристик $E1$ ГР – исчерпывания правила сумм, средней энергии, ширины на изученном энергетическом интервале. Складывается впечатление, что автор полностью удовлетворен разумным согласием с результатами других хороших работ, что является, видимо, необходимым, но все-таки недостаточным для полноценного физического анализа результатов.

Следует специально отметить недостаточно полное изложение автором современных результатов и обзоров, прежде всего фундаментальной монографии M.N. Harakeh, A. van der Woude. “Giant Resonances: Fundamental High-frequency Modes of Nuclear Excitation”. Clarendon Press, Oxford, 2001, в которой ярко отражены результаты «ренессанса» физики гигантских резонансов после 1990 года.

Имеются также досадные небрежности в оформлении рисунков, например, разнобой в обозначениях энергетических осей в диссертации и в автореферате.

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку работы.

Автореферат диссертационной работы Л.З. Джилавяна в целом полно и правильно отражает положения, выводы и рекомендации, содержащиеся в диссертации. Диссертационное исследование Джилавяна Леонида Завеновича на тему «Фотоядерные исследования в области гигантских резонансов в прямых и обратных реакциях» выполнено на высоком уровне,

соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а сам Леонид Завенович Джилавян заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 (физика атомного ядра и элементарных частиц).

03 мая 2017 г.

Доктор физ.-мат. наук, профессор,
старший научный сотрудник
НИЦ «Курчатовский институт»,
«Курчатовский ядерно-физический комплекс»,
Отдел теоретической физики
тел. (499) 196-95-86; 8 910 516 4833
e-mail: kaev@obninsk.com

Камерджиев
Сергей Павлович

Подпись Камерджијева
Сергея Павловича заверяю:

Главный ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт»

С.Ю. Стремоухов

Камерджи́ев Серге́й Па́влович,

доктор физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика
атомного ядра и элементарных частиц,
профессор.

Список основных публикаций за последние 5 лет:

1. S.V. Tolokonnikov, S. Kamerdzhiev, D. Voitenkov, S. Krewald, E.E. Saperstein. Quadrupole moments of spherical semi-magic nuclei within the self-consistent Theory of Finite Fermi Systems. *European Physical Journal A* (2012) 48:70
2. D. Voitenkov, S. Kamerdzhiev, S. Krewald, E.E. Saperstein, S.V. Tolokonnikov. Self-consistent calculations of quadrupole moments of the first 2^+ states in Sn and Pb isotopes. *Physical Review C* 85 (2012) 054319
3. E.E. Saperstein, S. Kamerdzhiev, S. Krewald, J. Speth, S.V. Tolokonnikov. A model for phonon coupling contributions to electromagnetic moments of odd spherical nuclei. *European Physical Letters* 103, №4 (2013), 42001.
4. E.E. Saperstein, S.P. Kamerdzhiev, S. Krewald, J. Speth, S.V. Tolokonnikov. Selfconsistent calculation of phonon gyromagnetic ratios in ^{208}Pb . *JETP Letters* 98, №9, (2013), 631-636.
5. A. Avdeenkov, S. Kamerdzhiev. Phonon coupling and the single-particle characteristics of Sn isotopes. *50 Years of Nuclear BCS*, eds. R. Broglia and V. Zelevinsky, Singapore, 2012, ch.20, p.274-283
6. С.П. Камерджи́ев, О.И. Ачаковский, Д.А. Войтенков, С.В. Толоконников. Самосогласованные подходы в микроскопической теории ядра. Статические моменты нечетно-нечетных ядер. *Ядерная физика* 77, №1 (2014), 70–78.
7. E.E. Saperstein, O. Achakovskiy, S.P. Kamerdzhiev, S. Krewald, J. Speth, S.V. Tolokonnikov. Phonon coupling effects in magnetic moments of magic and semi-magic nuclei. *Physics of Atomic Nuclei* 77, № 8 (2014), 1033–1056.
8. С.П. Камерджи́ев, А.В. Авдеенков, О.И. Ачаковский. О некоторых проблемах описания и использования радиационных силовых функций. *Ядерная физика* 77, №10 (2014), 1367–1375.
9. O. Achakovskiy, S.P. Kamerdzhiev, E.E. Saperstein, S.V. Tolokonnikov. Magnetic moments of odd-odd spherical nuclei. *European Physical Journal A* (2014) 50:6
10. O. Achakovskiy, A. Avdeenkov, S. Goriely, S. Kamerdzhiev, S. Krewald. Impact of the phonon coupling on the photon strength function. *Physical Review C* 91 (2015) 034620
11. С.П. Камерджи́ев, О.И. Ачаковский, А.В. Авдеенков. Микроскопическая природа радиационной силовой функции:

- структуры , связь с фононами. Письма в ЖЭТФ 101, №11 (2015), 819-826.
12. S.P. Kamerdzhiyev, O.I. Achakovskiy, A.V. Avdeenkov, S. Goriely. On microscopic theory of radiative nuclear reaction characteristics. *Physics of Atomic Nuclei* 79, № 4 (2016), 567-580.
 13. С.П. Камерджи́ев, Д.А. Войтенков. E2 переходы между возбужденными одно-фононными состояниями. Роль корреляций в основном состоянии. *Ядерная Физика*, 79, №6 (2016), 609-614.
 14. О.И. Ачаковский, С.П. Камерджи́ев, В.И. Целяев. Радиационная силовая функция и пигми-дипольный резонанс в ^{208}Pb и ^{70}Ni . Письма в ЖЭТФ 104, №6 (2016), 387-392.