

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук  
Антоненко Н.В. на диссертацию **Дмитрия Евгеньевича Любашевского**  
«Описание характеристик двойного и тройного деления ядер при  
использовании методов квантовой теории многоступенчатых  
ядерных распадов и реакций»,  
представленную на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук  
по специальности 1.3.15 – «Физика атомных ядер и элементарных частиц,  
физика высоких энергий».

Несмотря на многолетнее изучение процесса деления атомных ядер, требуется развитие теоретических подходов, позволяющих объяснять имеющиеся экспериментальные данные и делать предсказания наблюдаемых характеристик деления. Помимо исследований различных мод деления и процесса образования предразрывной конфигурации значительное внимание уделяется образованию третьей частицы в области контакта тяжелых фрагментов деления, анализу угловых распределений продуктов деления, а также асимметрии с различными Р- и Т- чётностями этих распределений. Для понимания механизма тройного деления и формирования угловых распределений необходимо развитие теории многоступенчатых ядерных реакций. Широко используемые теоретические подходы к описанию деления во многом носят макроскопический характер и не имеют последовательного квантово-механического звучания. В то же время когерентные интерференционные эффекты, связанные с единообразным поведением угловых и энергических распределений продуктов деления во всех наблюдаемых каналах, требуют использования для их описания последовательной квантово-механической теории деления. Диссертация Д.Е.Любашевского, посвященная квантово-механическому описанию характеристик двойного и тройного деления ядер, является актуальной.

Наряду с развитием новых теоретических представлений, связанных с физикой деления ядер, в диссертации объясняются результаты экспериментов по  $2p$  - и  $2\beta$  - распадам ядер с участием виртуальных состояний промежуточных ядер, а также по  $P$ -четным  $T$ -нечетным асимметриям в угловых распределениях продуктов спонтанного и вынужденного двойного и тройного низкоэнергетического деления ядер, с вылетом легких частиц, включая мгновенные нейтроны и  $\gamma$ -кванты.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и содержит 34 рисунка, а также список цитируемой литературы из 182 наименований.

Во введении приведен обзор работ по теме диссертации, обоснована её актуальность и продемонстрирована новизна и практическая значимость полученных результатов.

В начале первой главы рассмотрены многоступенчатые ядерные реакции и распады в рамках формализма диаграмм Фейнмана. Как и ожидалось, в общем случае ширина рассматриваемого  $n$ -ступенчатого распада  $\Gamma_{A, b_1 \dots b_n}^{A_0}$  составного делящегося ядра  $(A, Z)$  является суммой ширин, отвечающих композициям, связанным с разными реальными и виртуальными распадами.

Используя эти результаты, далее в первой главе рассмотрены двухпротонные распады (ДПР) ядер. В настоящее время для их описания используется подход, в котором двухпротонный распад трактуется как трехчастичный процесс, отвечающий переходу родительского ядра  $(A, Z)$  в дочернее ядро  $(A - 2, Z - 2)$  и два протона и использующий формализм трехчастичных гиперсферических функций с учетом трехчастичных потенциалов взаимодействия указанных частиц. В диссертации двухпротонный распад также представляется как трехчастичный процесс, амплитуда которого рассчитывается через представление об основном вкладе двухчастичных потенциалов взаимодействий вылетающих протонов между собой и с промежуточным и дочерним ядрами при учете появления виртуального состояния промежуточного ядра  $(A - 1, Z - 1)$ . Был проведен расчет двухпротонных ширин, а также

угловых и энергетических распределений вылетающих протонов, которые оказались в разумном согласии с соответствующими экспериментальными значениями.

В третьем разделе первой главы проведен анализ экспериментальных характеристик двойного  $\beta^-$  – распада ядер при использовании представления о виртуальности этих  $2\beta^-$  - распадов по аналогии с подобным представлением для двухпротонного распада ядер. Амплитуда двойного  $\beta^-$  - распада ядра  $(A, Z)$  рассчитывается также через представление о вылете из этого ядра пары электрон и антинейтрино с образованием виртуального состояния промежуточного ядра  $(A, Z + 1)$ , которое затем распадается с вылетом второй пары электрон и антинейтрино с рождением дочернего ядра  $(A, Z + 2)$ . Для большинства ядер, испытывающих двойной бета – распад, экспериментальные  $T_{1/2}^{exp}$  и теоретические  $T_{1/2}^{th}$  значения периодов полураспада достаточно хорошо согласуются между собой. Попутно проведено исследование двух последовательных реальных  $\beta^-$  -распадов ядер. Показано, что экспериментальные ширины распадов для ядер  $^{48}\text{Ca}$  и  $^{96}\text{Zr}$  с хорошей степенью точности описываются теоретически.

В конце первой главы показано, что процесс тройного деления составного делящегося ядра  $(A, Z)$  с вылетом альфа-частицы также можно рассматривать по аналогии с процессами  $2p$ - и  $2\beta^-$  - распадов ядер, как виртуальный процесс, в котором заметная часть кинетической энергии вылетающей альфа-частицы связана с виртуальностью состояния, появляющегося ядра  $(A - 4, Z - 2)$ , энергия которого лежит существенно ниже энергии основного состояния этого ядра и связана через закон сохранения энергии с уменьшением кинетической энергии вылетающих фрагментов двойного деления виртуального состояния промежуточного ядра  $(A - 4, Z - 2)$  по сравнению с двойным делением его основного состояния.

В первом разделе второй главы сделано предположение о том, что в делящемся ядре перед разрывом возбуждаются лишь коллективные дефор-

мационные состояния, соответствующие переходному делительному состоянию О. Бора. Это приводит к появлению в окрестности точки разрыва только нулевых поперечных *wriggling* и *bending* – колебаний.

Далее во второй главе говорится, что спиновые распределения фрагментов двойного деления холодными нейтронами в отличие от представления ряда работ не связаны с процессом термализации этих фрагментов, а обусловлены одновременным влиянием нулевых *wriggling*- и *bending*-колебаний делящегося ядра в окрестности точки разрыва.

В третьем разделе второй главы обсуждается природа угловых распределений фрагментов двойного деления ядер холодными нейтронами. В силу принципа неопределенности гипотеза О. Бора о вылете фрагментов двойного деления вдоль или против оси симметрии составного делящегося ядра реализуется, если амплитуда указанного деления является когерентной суперпозицией относительных орбитальных моментов  $L$  фрагментов деления, и отвечает их большим средним значениям. Механизм появления подобных амплитуд в диссертации связывается с учетом нулевых *wriggling*-колебаний в окрестности точки разрыва. Проведена оценка средних значений  $\bar{L}$  относительных орбитальных моментов  $L$  фрагментов деления, которые имеют большие значения  $\bar{L} = 14.4$ , что обеспечивает хорошую точность реализации гипотезы О.Бора.

В начале третьей главы проведен анализ структуры дифференциальных сечений  $\frac{d\sigma_{nf,p}(\theta)}{d\Omega}$  реакций деления неориентированных ядер-мишеней холодными поляризованными нейтронами с вылетом предразрывных и испарительных легких частиц. Р-четные компоненты сечения  $\frac{d\sigma_{nf,p}(\theta)}{d\Omega}$  при использовании представления об изотропности пространства и сохранении четности, можно представить суммой, первый член которой  $\frac{d\sigma_{nf,p}^{(0)}(\theta)}{d\Omega}$  отвечает Р-четному Т-четному дифференциальному сечению исследуемой реакции при участии холодных неполяризованных падающих нейтронов ( $\sigma_n = 0$ ), а второй

член  $\frac{d\sigma_{nf,p}^{\{1\}}(\theta)}{d\Omega}$  включает Р-четные Т-нечетные компоненты сечения, линейно зависящие от вектора  $\sigma_n$ , которые могут быть выражены суммой тройных и пятерных корреляторов  $\left(\frac{d\sigma_{nf,p}^{\{1\}}(\theta)}{d\Omega}\right)_{3(5)}$ , которые являются четными (*ev*) и нечетными (*odd*) относительно преобразования  $\theta \rightarrow \pi - \theta$  соответственно. Эти корреляторы выразить через величины  $\left(\beta_{nf,p}(\theta)\right)_{ev(odd)}$ , не зависящие от плотности потока падающих нейтронов, а их значения восстанавливаются из экспериментальных значения коэффициентов асимметрии  $D_{nf,p}(\theta)$  и рассчитанных угловых распределений  $P_p^{\{0\}}(\theta)$ .

Во втором разделе третьей главы Р-четные Т-нечетные асимметрии в реакциях деления ядер-актинидов холодными поляризованными нейтронами с вылетом легких частиц  $p$  рассмотрены в рамках квазиклассического метода траекторных расчетов. Определение углов поворота  $\Delta_{LF}$  между направлениями вылета легкой частицы  $p$  и легкого фрагмента деления проводится с учетом кориолисова взаимодействия коллективного вращения делящейся системы вокруг оси, перпендикулярной оси симметрии ядра, и вращения вокруг оси симметрии, которое возможно благодаря нарушению аксиальной симметрии из-за коллективных поперечных колебаний, с орбитальными моментами легких частиц и фрагментов деления. В случае предразрывных альфа-частиц были найдены значения величин  $\left(\beta_{nf,\alpha}(\theta)\right)_{5(3)}$ , которые разумно согласуются со значениями, восстановленными из эксперимента. Подобная ситуация наблюдается и для ядра-мишени  $^{235}\text{U}$  в случае испарительных нейтронов и гамма-квантов, когда рассчитанные величины  $\left(\beta_{nf,n'(\gamma)}(\theta)\right)_5$  оказываются в удовлетворительном согласии с экспериментальными величинами. Однако для согласования экспериментальных и рассчитанных теоретически величин  $\left(\beta_{nf,n'(\gamma)}(\theta)\right)_5$  в случае ядра-мишени  $^{233}\text{U}$  с вылетом испарительных

нейтронов и гамма-квантов требуется отрицательное значение угла поворота  $\Delta_{LF}$ , что противоречит идеологии квазиклассического подхода, в котором указанный угол может иметь только положительные значения.

В третьем разделе третьей главы для описания величин  $(\beta_{nf,p}(\theta))_{3(5)}$  используется квантовый подход, учитывающий влияние кориолисова взаимодействия полного спина делящейся системы, вращающейся вокруг оси перпендикулярной её оси симметрии, на угловые распределения фрагментов деления и легких частиц  $p$ . Из-за сложности расчета углов поворота  $\Delta_{p,3(5)}$  с учетом интерференционных эффектов в квантовом подходе для их определения используется метод максимального правдоподобия. Рассчитанные величины  $(\beta_{nf,p}(\theta))_5$  в случае  $\alpha$ -частиц и испарительных нейтронов и  $\gamma$ -квантов оказались в удовлетворительном согласии с соответствующими величинами  $(\beta_{nf,p}^{\text{exp}}(\theta))_5$  для положительных значений углов  $\Delta_{p,5}$  в случае ядер-мишеней  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239,241}\text{Pu}$  и отрицательных значений этих углов для  $^{233}\text{U}$ . Было показано, что величины  $(\beta_{nf,n'(\gamma)}(\theta))_3$  равны нулю, поскольку угловые распределения  $P_{n'(\gamma)}^{\{0\}}(\theta)$  в случае испарительных нейтронов и  $\gamma$ -квантов зависят от  $\cos^2(\theta)$ , т.е. симметричны. Теоретические величины  $(\beta_{nf,\alpha}(\theta))_3$  оказались в удовлетворительном согласии с соответствующими величинами  $(\beta_{nf,\alpha}^{\text{exp}}(\theta))_3$  для ядер-мишеней  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239,241}\text{Pu}$ . В случае же ядра-мишени  $^{233}\text{U}$  подобное согласие достигается при введении дополнительного члена  $(\tilde{\beta}_{nf,\alpha})_3$ , не зависящего от угла  $\theta$ . Появление этого члена может быть связано с вращением делящейся системы вокруг оси симметрии из-за нарушения аксиальной симметрии.

В заключении перечислены основные результаты диссертации.

Полученные в диссертационной работе Д.Е. Любашевского результаты являются новыми, интересными и обеспечивают хороший базис для даль-

нейших теоретических и экспериментальных исследований физики деления. Обсуждаемые результаты, несомненно, могут быть использованы, в учебном процессе при разработке лекций для студентов старших курсов, обучающихся по специальности ядерная физика.

Результаты диссертации Д.Е. Любашевского представляются достоверными, поскольку в основе диссертационной работы лежат современные теоретические методы ядерной физики, а также проведено сравнение с экспериментальными данными.

Автореферат достаточно подробно передает содержание диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых журналах и докладывались на международных и всероссийских конференциях.

В качестве замечаний по диссертации отмечу следующие:

1. Рассуждения о том, что делящаяся система перед разрывом является холодной, для меня выглядят неубедительно, поскольку не подкреплены расчетами потенциальной поверхности. Я думаю, что после этих расчетов диссертант убедился бы, что это положение можно рассматривать лишь в качестве предположения в рассматриваемых ядрах.
2. Диссертация и автореферат изобилуют примерами «корявых» предложений и опечатками.
3. Во многих таблицах нет указания единиц, в которых представлены величины.

Указанные замечания не снижают высокую оценку научных результатов диссертации. Диссертация содержит значительные достижения в описании наблюдаемых характеристик деления. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к научно-квалификационным работам. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.15 - «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий» (физико-математические

науки), а также критериям, определенным пп.2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Автор работы – Любашевский Дмитрий Евгеньевич, несомненно заслуживает присвоения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.15 - физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Официальный оппонент,  
доктор физико-математических наук,  
заместитель директора  
Лаборатории теоретической физики  
им. Н.Н.Боголюбова ОИЯИ  
141980 Дубна, Московская обл., Россия  
тел. +7 49621 65134  
e-mail: antonenk@theor.jinr.ru

  
25.11.2022  
Антоненко Николай Викторович

Даю согласие на обработку моих персональных данных любым законодательно разрешенным способом.

Подпись Антоненко Н.В. заверяю.  
Ученый секретарь ЛТФ



  
А.В.Андреев