

«УТВЕРЖДАЮ»



В. И. О. директора федерального государственного
бюджетного учреждения науки

Института ядерных исследований

Российской академии наук (ИЯИ РАН),

Кравчук Л. В.

7 октября 2014г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – Института ядерных исследований Российской академии наук о диссертации Свирина Михаила Ивановича «Особенности спектров мгновенных нейтронов деления актинидных ядер», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Диссертация Свирина М.И. является итогом решения экспериментальных и расчетно-теоретических проблем, возникающих при делении тяжелых ядер под действием нейтронов с энергиями E_n до 20 МэВ. Актуальность работы, выполненной соискателем, обусловлена тем, что получена новая экспериментальная информация по спектрам мгновенных нейтронов деления, которая существенно обогащает представления о механизме эмиссии нейтронов, сопровождающих деление актинидных ядер. Научный аспект проведенных исследований связан с обнаружением неизвестных или недостаточно изученных ранее изменений формы энергетических распределений вторичных нейтронов при увеличении E_n за порог реакции $(n, n'f)$, когда процесс деления становится эмиссионным. Новый факт был установлен при совместном экспериментальном изучении отношений: спектров нейтронов вынужденного деления ядер-мишеней тория-232, урана-235, урана-238, нертуния-237 нейтронами с энергией 2.9 и 14.7 МэВ к спектру нейтронов спонтанного деления калифорния-252, принятого в качестве стандарта. В измеренных распределениях при энергии первичных нейтронов $E_n=14.7$ МэВ в сравнении с распределениями для $E_n=2.9$ МэВ эти изменения проявляются в характерном увеличении выхода нейтронов в двух областях энергии E вторичных нейтронов. В жесткой части спектра наблюдается достаточно резкий край в виде «ступеньки» при $E \cong 8.7$ МэВ, а в мягкой – подъем, приводящий к существенному избытку нейтронов при 2 МэВ по сравнению с расчетами по статистической теории в рамках модели двух источников вторичных нейтронов. Отметим, что с избытком мягких нейтронов столкнулись в других работах по эмиссионному делению без должной физической интерпретации этого явления. Вопрос о природе указанных отступлений в первом случае был выяснен и само свойство понято как следствие неравновесной эмиссии нейтронов из возбужденного ядра A с последующим делением остаточного ядра $A-1$ вблизи энергетического порога $E = E_{th} = E_n - E_{fA-1}$ (E_{fA-1} – барьер деления). Энергия E_{th} определяет верхнюю границу спектра предделительных нейтронов, наблюдаемую на фоне спектра постделительных нейтронов из полностью ускоренных возбужденных осколков деления. Впервые этот результат был представлен диссертантом и соавторами в 1989 г. на Международной конференции «Деление ядер – 50 лет». Во втором случае, включение в модельный расчет третьего источника, связанного с возможной эмиссией нейтронов из сформировавшихся осколков до их разделения (неускоренные осколки), позволило диссертанту описать наблюдаемую форму энергетических распределений в области низких энергий $E < 2$ МэВ. При этом удалось достигнуть согласия расчета с данными эксперимента по средней множественности мгновенных

нейтронов деления (МНД) $\langle v \rangle$ для $E_n > 9$ МэВ.

В диссертации приводятся результаты всего цикла исследований, который объединяет экспериментальные данные, полученные в едином подходе при разных энергиях первичных нейтронов для четырех ядер-мишеней. Это торий-232, измеренный для энергий первичных нейтронов $E_n = 2.9, 14.6, 14.7, 17.7$ МэВ, уран-235 (2.9; 14.7 МэВ), уран-238 (2.9; 5; 6; 7; 13.2; 14.7; 16; 17.7 МэВ), нептуния-237 (2.9; 14.7 МэВ).

В первой главе в диссертации рассмотрены эксперименты, в которых был последовательно реализован относительный способ измерений, являющийся эффективным средством для преодоления различных трудностей, возникающих при решении поставленной задачи. Например, подавления нестабильности, связанной с долговременными измерениями спектров, определения эффективности регистрации вторичных нейтронов. Он опирался на две важные методические предпосылки, которые позволили надежно выделить компоненту предделительных нейтронов (ПРН) на фоне постделительных нейтронов (ПСН) в интегральных спектрах эмиссионного деления, не прибегая к традиционному разделению их по угловым распределениям.

1. Измерения проводились относительно хорошо известного спектра мгновенных нейтронов спонтанного деления калифорния-252 при этом исследуемый и опорный спектры изучались одновременно. Это достигалось с помощью специальной конструкции многослойной ионизационной камеры деления, три секции которой содержали исследуемый нуклид в виде двухсторонних слоев по 12 слоев в секции, а четвертая секция состояла из двух односторонних слоев из того же нуклида с равномерно внедренными по их толщине ядрами калифорния-252. При этом опорный и исследуемый спектры нейтронов изучались одновременно. Вес конструкционных материалов камеры был минимально возможным. Это способствовало значительному уменьшению фона случайных совпадений, что, в конечном счете, позволило получить результаты высокого качества и наблюдать эффекты в экспериментальных спектрах при энергии $E_n > 13$ МэВ, которые не удавалось ранее выявить.

2. Измерения проводились для двух характерных областей энергий – выше и ниже порога эмиссионного деления, что дало возможность непосредственно сопоставлять спектры (ПРН+ПСН) со спектрами ПСН. Последние в спектре нейтронов, сопровождающих эмиссионное деление ядер, служили как бы «фоном», на котором разыгрываются эффекты, связанные с испусканием ПРН.

Во второй главе диссертации представлен анализ энергетической зависимости нейтронных сечений деления исследуемых актинидных ядер, основанный на усовершенствованном теоретическом аппарате. С ростом энергии бомбардирующих нейтронов процесс деления приобретает эмиссионный характер. Наряду с исходным составным ядром A становится энергетически возможным деление его более легких изотопов – остаточных ядер ($A-x$) после испускания x предделительных нейтронов. Реакция $(n, xn'f)$ с разным числом предделительных нейтронов часто называют шансами деления. Вступление в игру очередного шанса деления сопровождается подъемом сечения деления. Без знания отношений сечений каждого шанса к полному сечению не возможен корректный анализ характеристик процесса деления. Впервые на базе микроскопических расчетов плотности уровней в зависимости от деформации ядра в рамках модели двугорбого барьера реализовано описание сечения деления актинидных ядер. Использовался строгий многошансовый расчет по Хаузеру-Фешбаху с учетом равновесного и неравновесного механизмов распада возбужденных ядер, образующихся при бомбардировке тория-232, цепочки изотопов урана 233-238, ядер нептуния-237 нейтронами с энергиями до 20 МэВ. Эти расчеты убедительно свидетельствуют о возрастающем влиянии с увеличением энергии первичных нейтронов, неравновесного механизма эмиссии нейтронов на сечения деления. Впервые диссертантом было

исследовано влияние динамических эффектов на описание сечения деления и средней множественности предделительных нейтронов при высоких энергиях возбуждения.

Ввиду важности функционала плотности уровней при описании различных ядерно-физических характеристик, включая сечение деления, эмиссию нейтронов, в третьей главе диссертации проведено тестирование обобщенной сверхтекучей модели (ОСМ) плотности уровней. Диссертантом разработана комбинированная «экспериментально-теоретическая» систематика плотности уровней средних и тяжелых ядер на основе обобщенной модели сверхтекучего ядра. В рамках данной систематики впервые получено удовлетворительное описание экспериментальных данных о спектрах нейтронов из отдельных осколков спонтанного деления калифорния-252. Впервые выполнена экспериментальная проверка представлений о затухании ротационной моды для переходного состояния. Анализ данных об энергетической зависимости вероятности деления сферических ядер в районе свинца, экспериментальных массовых распределений для деления талия-201, спектров нейтронов показал, что феноменологический вариант ОСМ согласуется с результатами микроскопических расчетов. Это согласие показывает, что все основные представления о структуре возбужденных состояний ядер достаточно полно отражены в феноменологическом варианте ОСМ плотности ядерных уровней.

В заключительной четвертой главе представлены результаты анализа полученных экспериментальных данных по спектрам МНД актинидных ядер. Совокупность экспериментальных отношений $R(E, E_n) = N(E, E_n) / N_{CF}(E)$ спектров изучаемого нуклида урана-238 к опорному при энергиях $E_n = 2.9, 5, 6, 7, 13.2, 14.7, 16, 17.7$ МэВ позволяют наблюдать качественную картину изменения формы распределений $R(E, E_n)$ с ростом энергии возбуждения составного ядра урана-239. На фоне почти линейной зависимости $R(E, E_n)$ для постделительных нейтронов, которая имеет место для 2.9 и 5 МэВ, отчетливо проявляется вклад предделительных нейтронов в виде максимумов в низкоэнергетической части распределений для 6 и 7 МэВ. Таким образом, в диссертации показано, что, ограничиваясь измерениями интегральных спектров $N(E, E_n)$ и обеспечивая необходимую точность относительных измерений их формы, можно получить экспериментальную информацию, существенно обогащающую представления о ПРН. Наблюдаемые энергетические распределения нейтронов для $E_n = 6$ и 7 МэВ воспроизводятся результатами расчета в рамках традиционной модели двух источников нейтронов. В рамках этой модели было установлено, что верхняя граница спектра предделительных нейтронов реакции $(n, n'f)$ при низких E_n связана с обрезанием испарительной компоненты нейтронов реакции (n, n') при пороговой энергии $E_{th} = E_n - E_{fA-1}$, а при высоких E_n с обрезанием спектра жестких предравновесных (неравновесных) нейтронов. Диссертантом показано, что ступенчатое изменение экспериментальной зависимости средней множественности нейтронов на акт деления $\langle \nu \rangle$ при изменении энергии первичных нейтронов от 6 до 7 МэВ связано с появлением источника предделительных нейтронов при $E_n \geq 6$ МэВ. Автор впервые объяснил, почему эффект от ПРН сильнее проявляется в $\langle \nu \rangle$ при переходе от 6 до 7 МэВ для ядра тория-232. Диссертантом установлено, что модель двух источников МНД согласуется с экспериментальной зависимостью $\langle \nu \rangle$ для исследуемых ядер вплоть до энергии $E_n = 8-9$ МэВ, но при более высоких энергиях $E_n > 9$ МэВ экспериментальные точки располагаются выше расчетной кривой. Впервые на основе систематического анализа экспериментальных распределений нейтронов при $E_n > 13$ МэВ выявлено, что форма экспериментальных распределений в низкоэнергетической части не описывается результатами расчета в рамках модели двух источников. Наблюдается избыточный выход мягких нейтронов в экспериментальных спектрах по сравнению с тем, что дает расчет. Автором показано, что систематика средних энергий мгновенных нейтронов деления $\langle E \rangle$, основанная на соотношениях традиционной модели двух источников нейтронов согласуется с экспериментальными данными $\langle E \rangle$ для $E_n = 6$ и 7 МэВ, но дает более высокие значения средней энергии по сравнению с результатами эксперимента для $E_n > 13$ МэВ. Как отмечалось выше, учет третьего источника нейтронов

позволил объяснить наблюдаемую форму энергетических распределений, а также согласовать $\langle E \rangle$ и $\langle v \rangle$ при $E_n > 13$ МэВ для всех исследуемых ядер.

Замечания к содержанию работы заключаются в следующем. Образование долгоживущей системы сформировавшихся осколков до их разделения, которые могут испускать нейтроны, трудно поддается строгому физическому обоснованию. Это скорее феноменологический прием используемый в диссертации для объяснения избытка мягких нейтронов в измеренных спектрах МНД для $E_n > 13$ МэВ. К сожалению не получена экспериментальная информация о спектрах МНД в области энергий первичных нейтронов от 8 до 13 МэВ.

Диссертация написана хорошим языком, но в её тексте встречаются неисправленные опечатки. Указанные недостатки не снижают общей высокой оценки выполненной работы и не ставят под сомнение надежность полученных автором результатов.

Достоверность и обоснованность научных положений диссертации определяется использованием общеизвестных экспериментальных методов спектрометрии по времени пролета для измерения энергетических распределений нейтронов и регистрации осколков деления с помощью многослойной ионизационной камеры деления, последовательной реализации способа измерения относительно хорошо изученного спектра мгновенных нейтронов спонтанного деления калифорния-252, применение в разработанной автором методике для анализа экспериментальных данных научно-обоснованных теоретических моделей.

Апробация диссертации и публикации. Материалы, вошедшие в диссертацию, опубликованы в 20 статьях в журнале «Ядерная физика», в 2 научных обзорах в журнале «Физика элементарных частиц и атомного ядра», в 1 статье в журнале «Атомная энергия», входящих в перечень ведущих рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК, в 2 статьях в зарубежных журналах «Z. Phys. A» и «Ann. Nucl. Energy», в сборниках докладов международных конференций.

Заключение. Представленная диссертационная работа является законченной исследовательской работой. В ней последовательно реализован экспериментальный метод прецизионного измерения спектров МНД актинидных ядер относительно опорного спектра нейтронов спонтанного деления калифорния-252. Это позволило впервые наблюдать в измеренных распределениях проявление неравновесного механизма эмиссии предделительных нейтронов. В работе впервые реализован физически обоснованный подход к описанию сечений деления исследуемых ядер, что в свою очередь позволило провести корректный анализ полученной экспериментальной информации и сделать физически значимые выводы. Диссертационная работа Свирина М.И. выполнена на высоком научном уровне и полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК РФ к докторским диссертациям. Свирин М.И. заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц. Диссертация обсуждалась на семинаре Отдела экспериментальной физики ИЯИ РАН «07.10.2014г.». Отзыв утвержден на заседании научно-технического совета ОЭФ ИЯИ «07.10.2014г.», протокол №. 4

Отзыв составил:

Старший научный сотрудник

Лаборатории исследования редких процессов ЛИНР
ОЭФ ИЯИ РАН, доктор физико-математических наук

Григорьев Ю.В.

Председатель научно-технического совета
ОЭФ ИЯИ РАН, член-корреспондент РАН

Ткачев И.И.