



Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования

**МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА  
(МГУ)**

Ленинские горы, ГСП-1, Москва, 119991  
Тел.: (495) 939 1000, Факс: (495) 939 0126

10.06.2019 № 254-19/013-02

На № \_\_\_\_\_

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор

Московского государственного  
университета имени М. В. Ломоносова  
профессор А.А. Федянин



2019 г.

### О Т З Ы В

ведущей организации - Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» на диссертацию **ЗИНАТУЛИНОЙ Дании Раушановны «Исследование мюонного захвата в ядрах  $^{48}\text{Ti}$ ,  $^{76}\text{Se}$ ,  $^{82}\text{Kr}$ ,  $^{106}\text{Cd}$  и  $^{150}\text{Sm}$ », представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.**

Диссертация Д.Р. Зинатулиной посвящена исследованию ядерного захвата отрицательных мюонов с изотопически обогащенными мишенями  $^{48}\text{Ti}$ ,  $^{76}\text{Se}$ ,  $^{82}\text{Kr}$ ,  $^{106}\text{Cd}$  и  $^{150}\text{Sm}$ . Захват отрицательных мюонов атомными ядрами исследуется уже несколько десятилетий. На ранних этапах этот процесс привлекал внимание прежде всего в связи с определением характеристик и свойств слабого взаимодействия, ответственного за ядерное поглощение мюонов. В дальнейшем основное внимание при изучении ядерного мю-захвата сместилось на задачи, связанные с физикой атомного ядра (спектры возбуждения ядер, механизмы вылета нейтронов и др.). В настоящее время особый интерес представляет изучение мю-захвата на ядрах с зарядом на две единицы больше, чем заряд такого ядра, в котором возможен двойной бета-распад. Тогда конечное ядро после мю-захвата соответствует промежуточному ядру при двухступенчатом двойном бета-распаде. Это позволяет получить информацию о структуре возбужденных состояний промежуточного ядра, которая необходима, в частности, при расчетах ядерных матричных элементов двойного бета-распада. В свою очередь, возможное наблюдение безнейтринного двойного бета-распада и измерение его характеристик является исключительно важной задачей, направленной на решение фундаментальных проблем природы нейтрино (майорановское или

дираковское) и отклонений от Стандартной модели. В экспериментах, на которых основана диссертация Д.Р. Зинатулиной, использовались мишени, обогащенные изотопами  $^{48}\text{Ti}$ ,  $^{76}\text{Se}$ ,  $^{82}\text{Kr}$ ,  $^{106}\text{Cd}$  и  $^{150}\text{Sm}$ . Мю-захват именно на этих ядрах интересен в связи с проблемой двойного безнейтринного бета-распада ядер  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{106}\text{Cd}$  и  $^{150}\text{Nd}$ . Поэтому тема рассматриваемой работы является безусловно актуальной.

Наряду с изучением мю-захвата в процессе выполнения экспериментов были измерены спектры рентгеновского излучения мюонных атомов для различных мишеней. Это позволило расширить табличные данные и создать на их основе обширный электронный атлас. Эта информация полезна для идентификации энергетических спектров в различных экспериментах на мюонных пучках, использовании отрицательных мюонов для элементного анализа вещества и др.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 92 страницы, включая 38 рисунков и 17 таблиц. Список литературы содержит 78 наименований.

*Первая глава* имеет обзорный характер. В ней дано описание особенностей двойного  $\beta$ -распада, а также экспериментов по безнейтринному двойному бета-распаду. Затем обсуждается проблема теоретических расчетов ядерных матричных элементов для безнейтринного двойного бета-распада и описывается их связь с обычным мюонным захватом (ОМЗ). Приводятся примеры расчета ядерных матричных элементов в различных теоретических моделях и описание уникальных особенностей мюонного захвата, приводится обсуждение результатов, получаемых в подобных экспериментах.

Во *второй главе* дается описание экспериментальной установки и методики измерений с газовыми и твердыми мишенями. В этой же главе дана информация о разработке газовой мишени, приведены параметры калибровки и эффективности детекторов. Описан первичный анализ энергетических и временных спектров излучения, получаемых в результате сортировки данных.

*Третья глава* содержит подробное описание процедуры идентификации и отбора полезных гамма-линий, методики получения полных скоростей и парциальных вероятностей мюонного захвата, а также выходов продуктов реакции, сопровождающих мюонный захват в ядре.

В *четвертой главе* дано описание измерений с мишенями  $^{48}\text{Ti}$ ,  $^{76}\text{Se}/^{nat}\text{Se}$ ,  $^{82}\text{Kr}/^{nat}\text{Kr}$ ,  $^{106}\text{Cd}/^{nat}\text{Cd}$  и  $^{150}\text{Sm}$ , представлены результаты измерений и их обсуждение, а также сравнение с теоретическими предсказаниями.

В *Заключении* приведены основные результаты и выводы работы.

*Все приведенные в Заключении положения являются полностью обоснованными и подтвержденными.*

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в шести статьях в ведущих российских и зарубежных журналах, входящих в список ВАК и международные базы данных Web of Science и Scopus, и доложены на одиннадцати международных конференциях.

Диссертант выполнил большой объем работы на современном уровне, который характеризует его как физика-экспериментатора высокой квалификации. Достоверность результатов, представленных в диссертации, не вызывает сомнений.

**Научная новизна и практическая ценность** настоящей диссертации состоят в том, что

- получены на порядок более точные значения полных скоростей мюонного захвата для  $^{48}\text{Ti}$ ,  $^{150}\text{Sm}$  и различных изотопов Cd, Se и Kr;
- впервые измерены парциальные вероятности мюонного захвата ядрами  $^{48}\text{Ti}$ ,  $^{76}\text{Se}$  и  $^{106}\text{Cd}$  на связанные состояния  $^{48}\text{Sc}$ ,  $^{76}\text{As}$  и  $^{106}\text{Ag}$ ;
- впервые определены выходы продуктов реакции мюонного захвата в изотопах  $^{76}\text{Se}$  и  $^{150}\text{Sm}$ ;
- впервые создан атлас мю-атомных рентгеновских спектров излучения 75 химических элементов, включающий данные как для К-серии, так и для серий L, M, N и др.

**Значимость** полученных автором диссертации результатов определяется актуальностью задачи диссертации. Основные результаты работы позволяют определить возможность использования той или иной теоретической модели по расчетам ядерных матричных элементов. Каталог мю-рентгеновских спектров излучения безусловно весьма полезен при планировании и проведении экспериментов по мюонному захвату.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация Д.Р. Зинатулиной оставляет впечатление законченного исследования, выполненного на высоком научном уровне. Диссертация хорошо структурирована и написана ясным языком.

*Результаты диссертации заслушаны, обсуждены и одобрены на заседании семинара «Физика нано, атомных и ядерных систем и их взаимодействий» Отдела физики атомного ядра НИИЯФ МГУ 6 июня 2019 г.*

Среди недостатков работы можно отметить отсутствие результатов по парциальным вероятностям мюонного захвата в  $^{82}\text{Kr}$ , а также некоторые технические неточности и опечатки, не влияющие на смысл и качество текста диссертации. Некоторые стилистические шероховатости. Так, например, представляется неудачным выражение «... для измерения газовых мишеней ...». Помимо грамматической ошибки в слове «мишеней», непонятно что значит измерять газовую мишень (стр. 27). Кроме того, пояснения на рисунках, представленных в результатах диссертации, сделаны на английском языке.

В целом диссертация Д.Р. Зинатулиной «Исследование мюонного захвата в ядрах  $^{48}\text{Ti}$ ,  $^{76}\text{Se}$ ,  $^{82}\text{Kr}$ ,  $^{106}\text{Cd}$  и  $^{150}\text{Sm}$ » соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утверждённом постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 с дополнениями от 21 апреля 2016 год № 335, а сама Дания Раушановна Зинатулина, безусловно, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц.

Директор НИИЯФ МГУ,

доктор физико-математических наук, профессор



Панасюк М. И.

Заведующий Отделом физики атомного ядра НИИЯФ МГУ,

доктор физико-математических наук, профессор

Чеченин Н.Г.

Отзыв составил

Ведущий научный сотрудник Отдела физики атомного ядра НИИЯФ МГУ,

доктор физико-математических наук, доцент

Коренман Г.Я.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына).

Адрес: 119991, ГСП -1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2

Телефон: +7(495)9391818; e-mail: info@sinp.msu.ru