

## ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц Демина Дмитрия Львовича на диссертацию ИВШИНА Кузьмы Александровича «Разработка и создание экспериментальной установки для прецизионного измерения скорости захвата мюона дейтроном (эксперимент MuSun)», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики в диссертационный совет Д 520.009.01 на базе НИЦ «Курчатовский институт»

За это десятилетие произошел прорыв в области экспериментальной мюонной физики – планируются, разрабатываются и реализуются многие эксперименты в этой области знания, находящиеся на острие научной мысли (MuSun, Triton, MUSE, COMET, g-2, Mu2e и др.). Эксперименты по измерению скорости захвата отрицательных мюонов в среде изотопов водорода – хорошо проработанная тема. Эта «жемчужина» мюонной физики служит основным пробным камнем в физике слабых взаимодействий. Захват мюона дейтроном – наиболее сложный эксперимент в пределе легких ядер и тесно связан с явлением мюонного катализа ядерных реакций синтеза. Последнее еще не до конца изучено и до сих пор предоставляет новые экспериментальные результаты. Так в 2016 г. в Дубне впервые наблюдались два новых канала реакции в  $pt$ -синтезе с выходом электрон-позитронных пар и двойных гамма-квантов, а также получено первое указание на существование канала  $pd$ -синтеза с выходом двойных гамма-квантов. Следует отметить, что экспериментальная мюонная физика в приложении к синтезу легких элементов является источником наиболее точных данных в области параметров взаимодействия важных для астрофизики. Автору удалось выполнить свою диссертационную работу в имеющем глубокие корни активном и развивающемся направлении научно-экспериментального поиска. Таким образом, **актуальность темы диссертации** несомненна как с методической, так и с научной точки зрения.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Следует отметить, что в этой экспериментальной работе необходимы глубокие знания во многих разделах физики. К.А. Ившин, вне всяких сомнений, прошел хорошую научно-методическую школу, занимаясь едва ли не самой сложной экспериментальной задачей. Но только квалифицированный методологический подход и грамотная эксплуатация экспериментального оборудования помогли обеспечить достижение результата настоящего экспериментального исследования и сформулировать научные положения, выносимые на защиту. Основные результаты диссертации

докладывались на профильных международных конференциях – «NUCLEUS 2014», «ICCRT 2016», и таким образом прошли апробацию в научном сообществе.

**Достоверность и новизна научных положений и выводов** очевидна. Благодаря тому, что соискатель работал над своей диссертацией в уникальном коллективе опытных экспериментаторов, имеющих мировое признание и обладающих экспертными качествами в области экспериментальной мюонной физики, был проведен успешный эксперимент – долговременная бесперебойная экспозиция активной криогенной дейтериевой мишени на пучке мюонов. Это произошло потому, что были предприняты комплексные меры, нашедшие отражение в научных положениях и выводах настоящей диссертации. Научная новизна исследования заключается в том, что уровень чувствительности наиболее сложного из экспериментов по определению скорости захвата мюона (дейтроном) **впервые** приблизился к точности современных теоретических предположений.

**Соответствие диссертации и автореферата критериям** оценки ВАК можно отразить следующим образом.

Представленная к защите диссертация является научно-квалификационной работой высокого класса: создана уникальная система газообеспечения активной криогенной мишени, предназначенной для проведения ядерно-физического эксперимента по определению скорости захвата отрицательного мюона дейтроном в определенном спиновом состоянии квантовой системы и принят ряд мер для обеспечения бесперебойной работы оборудования при фиксации уникальных параметров экспериментальной установки. Таким образом, в данной диссертационной работе **решена актуальная научно-экспериментальная задача, имеющая значение для развития мюонной физики.**

Диссертация, представленная автором к защите, хорошо структурирована, обладает внутренним единством и содержит **новые научные результаты**, что свидетельствует о значительном научном вкладе автора в развитие приборной и методической базы экспериментальной мюонной физики.

**Практическая значимость работы** заключается в создании оборудования и методики работы с ним для проведения экспериментальной проверки теории эффективного поля (EFT) на недостижимом ранее уровне порядка 1%.

Предложенные автором диссертации технические и методические решения безусловно аргументированы и оценены в сравнении с другими известными решениями в области экспериментальной мюонной физики. В своей диссертации соискатель должным образом ссылался на авторов и печатные источники заимствования научных материалов, использованных для достижения целей диссертационной работы и её отдельных

результатов. При использовании в диссертации результатов научных работ, выполненных соискателем в соавторстве, соискатель отмечал в диссертации эти обстоятельства.

Количество публикаций, в которых излагаются основные научные результаты диссертации, в рецензируемых изданиях **соответствует** необходимым критериям.

Автореферат диссертации К.А. Ившина оформлен в соответствии с требованиями ВАК, написан четким и ясным языком. Он достаточно полно представляет содержание диссертации, включает в себя необходимые формулировки целей и задач исследования, выносимых на защиту положений, научной новизны и практической значимости.

Таким образом, диссертация и автореферат диссертации К.А. Ившина **соответствуют критериям**, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением №842 Правительства РФ от 24.09.2013.

Диссертация К.А. Ившина состоит из введения, восьми глав и заключения, содержит 111 страниц текста. Список литературы содержит 66 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, показана ее научная новизна, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** рассматривается концепция активной мишени, как методическая основа проведения эксперимента по нахождению скорости захвата мюона дейтроном. Делается исторический обзор методических подходов к решению проблемы взаимодействия мюонов с изотопами водорода. От камерной методики к генетически связанному с ней методу активной мишени, который нашел теперь широкое применение. Отличительной особенностью этого метода является наличие координатной информации о процессах в мишени, что позволяет эффективно отстраиваться от фонов, а в ряде случаев получать дополнительные физические данные о самих процессах.

**Вторая глава** посвящена описанию кинетики поведения мюона в холодном дейтерии (мюоны из пучка останавливаются в газообразном дейтерии), и на основании детального рассмотрения физических процессов, происходящих с мюоном в мишени, делается вывод об адекватной постановке экспериментальной задачи (эксперимент MuSun).

В **третьей главе** дается техническое обоснование принципиальной схемы эксперимента, а также содержится описание конструкции и методических особенностей центрального детектора - криогенной время-проекционной камеры (активной мишени) и процедуры нахождения остановок мюонов внутри неё.

В **четвертой главе** описана криогенная часть экспериментальной установки. Затронуты вопросы теплопереноса, термоизоляции и термометрии центрального детектора. Криогенный цикл охлаждения организован с помощью крио-рефрижератора и промежуточного хладагента (неона) на основе тепловой трубы. Термометрия основана на

применении конденсационных термометров, заполненных водородом и благородными газами (как наиболее удобных и точных вторичных приборов в криогенной термометрии). Тепловая труба снабжена платиновыми датчиками сопротивления, которые тарировались по показаниям конденсационных термометров. Описано оборудование для криогенной калибровки и процедура калибровки датчиков температуры. Меры, принятые при калибровке, достаточны для обеспечения требуемой точности определения температуры внутри экспериментальной установки. Описаны криогенные предусилители сигналов от криогенной время-проекционной камеры, использующие возможности криогенной системы для улучшения качества сигналов от центрального детектора.

В **пятой главе** описана система химической очистки дейтерия. Криогенная циркуляционная система сверхвысокой очистки водорода, основанная на адсорбции примесей с помощью охлаждаемого адсорбента, обеспечивает непрерывную работу центрального детектора (скорость обмена газовой среды до 5 л/мин при стабилизации давления не хуже 0,1% на уровне 5 атм). Извлечение примесей с  $Z > 1$  критически необходимо для минимизации побочного канала кинетики отрицательного мюона в дейтериевой среде – «перехвата мюона на примесь».

В **шестой главе** описана система изотопной очистки дейтерия. Очистка производилась методом криогенной ректификации. Извлечение примеси критически необходимо для минимизации побочного канала кинетики отрицательного мюона в дейтериевой среде – мюонного катализа реакции синтеза дейтрона на молекуле HD. Аналогичная система применялась в опытах по захвату мюона в водороде для подавления такого же паразитного канала. Применение ректификационной колонны для разделения изотопов водорода в совокупности с хроматографическим методом контроля позволило наполнять мишень дейтерием, очищенным от молекул HD на уровне 1 ppb, что необходимо для подавления паразитного канала  $pd$ -синтеза.

В **седьмой главе** описаны методы контроля химической и изотопной чистоты дейтерия. Контроль чистоты газа осуществляется с помощью модернизированного хроматографа. Дается детальный анализ работы микроконтроллера DAQ32 и электроники хроматографа, а также рассматриваются меры по уменьшению шумов при оцифровке сигналов от дифференциальных датчиков температуры.

В **восьмой главе** описана методика калибровки хроматографа для измерения атмосферных примесей в дейтерии с точностью до 1 ppb. Дейтерий с такой степенью очистки от примесей необходим, например, при исследовании явления мюонного катализа (экспозиция дейтерия на пучке мюонов длительностью порядка 100 часов). Такая чистота газа получается с помощью систем диффузионной очистки (однократный цикл очистки с помощью палладиевых фильтров). Достижением настоящей диссертации является

получение требуемой степени чистоты газа в динамической системе, что позволяет экспонировать дейтериевую мишень на пучке необходимое количество времени. Когда как иначе, степень чистоты газа существенно бы деградировала, что повлекло бы за собой недопустимое увеличение перехвата на примеси.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

- Разработанная система CryoTPC обеспечила долговременную непрерывную работу детектора в стабильных рабочих условиях.
- Создана установка калибровки криогенных датчиков температуры с конденсационным термометром как образцовым прибором.
- Создана криогенная ректификационная колонна для получения изотопно-чистого дейтерия.
- Создана криогенная циркуляционная система непрерывной очистки рабочего газа. Впервые в экспериментах подобного рода удалось достигнуть уровня чистоты дейтерия 0,6 ppb при постоянном потоке 5 л/мин.
- Создан программно-аппаратный комплекс на базе микроконтроллера для чтения и анализа данных с хроматографа.
- Создана уникальная система калибровки, использующая принцип динамического газосмещения.
- Созданная система охлаждения для предусилителей сигналов CryoTPC обеспечила их работу при стабильной температуре 140 К.
- Комплекс мер по поддержанию термодинамических параметров детектора, химической и изотопной чистоты газа позволил впервые в мире набрать объем экспериментальных данных по захвату мюона дейтроном при минимальном влиянии параллельных каналов реакции на процесс измерения.

В качестве замечаний по диссертации можно отметить следующее.

Нумерация рисунков в диссертации не вполне соответствует списку иллюстраций (стр. 4-6 диссертации). На рис. 9 (стр. 30 диссертации) приведены не самые последние (наиболее полные) экспериментальные данные для мю-катализа в холодном дейтерии, а подпись к рис. 9 требует редактирования. В тексте диссертации фамилии некоторых исследователей проблемы взаимодействия мюонов с изотопами водорода приведены с ошибками. Отмечаются единичные случаи ошибочного написания в обозначениях и размерностях физических величин. Диссертацию несомненно украсили бы ссылки на современные обзоры по теме исследования, хотя автор приводит достаточно полную информацию (стр. 3-5 автореферата) о положении настоящей работы в канве мирового научного опыта по данной проблеме.

Сделанные в отзыве замечания не являются принципиальной критикой актуальности и практической значимости положений, выносимых автором на защиту.

Представляемая работа прошла серьезную апробацию, ее основные результаты докладывались на крупных международных конференциях, проводимых по теме диссертации, и были опубликованы в 6 печатных работах (из них 2 — статьи в рецензируемых научных изданиях, 2 — материалы международных конференций и 2 — специализированные научно-технические сборники издательства высшей школы).

В целом диссертация представляет собой законченное научное исследование — научно-квалификационную работу, в которой содержится решение задачи, имеющей существенное значение для физики взаимодействия мюонов с веществом.

Все вышесказанное позволяет утверждать, что представленная К.А. Ившиным диссертация «Разработка и создание экспериментальной установки для прецизионного измерения скорости захвата мюона дейтроном (эксперимент MuSun)» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Кузьма Александрович ИВШИН несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики.

Начальник Сектора №4 (исследования поведения мюонов в веществе),  
Научно-экспериментальный отдел  
множественных адронных процессов,  
Лаборатория ядерных проблем им. В.П. Джелепова,  
Объединенный институт ядерных исследований;  
Кандидат физ.-мат. наук;  
141980 Московская область,  
г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д.6.  
Тел.: 8(905)781-74-36, demin@jinr.ru

Д.Л. Демин

Подпись Д.Л. Демина заверяю  
Ученый секретарь ЛЯП ОИЯИ.  
Кандидат физ.-мат. наук



И.В. Титкова

«5» апреля 2019 г.