

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 520.009.01 НА БАЗЕ  
НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА «КУРЧАТОВСКИЙ  
ИНСТИТУТ» (ПРИНАДЛЕЖНОСТЬ – ПРАВИТЕЛЬСТВО РФ) ПО  
ДИССЕРТАЦИИ ИВШИНА КУЗЬМЫ АЛЕКСАНДРОВИЧА «РАЗРАБОТКА И  
СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО  
ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ЗАХВАТА МЮОНА ДЕЙТРОНОМ (ЭКСПЕРИМЕНТ  
MUSUN)» НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ФИЗИКО-  
МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 16.05.2019 г., № 5

О присуждении ИВШИНУ Кузьме Александровичу, гражданину РФ, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Разработка и создание экспериментальной установки для прецизионного измерения скорости захвата мюона дейтроном (эксперимент MUSUN)» по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики» принята к защите 24.01.2019 г. протокол № 1 диссертационным советом Д 520.009.01 на базе Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), 123182 г. Москва, пл. академика И.В. Курчатова, д. 1 (утвержден Приказом Минобрнауки России № 1925-1018 от 08.09.2009 г. и переутверждён приказом Минобрнауки России № 105/нк от 11.04.2012г.).

**Соискатель** Ившин Кузьма Александрович, 1989 года рождения.

Соискатель в 2012 году окончил Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого с присуждением степени «магистр техники и технологии» по направлению «Проектирование и технология электронных средств». Диплом о высшем образовании Н № 02214.

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов по дисциплинам «История и философия науки (физико-математические науки)» и «Иностранный язык (английский)» № 2478 от 23.06.2014 г. выдано Новгородским государственным университетом имени Ярослава Мудрого. Справка о сдаче кандидатского экзамена по дисциплине «Специальная дисциплина (01.04.01 – Приборы и методы

экспериментальной физики)» № 07-1040 от 30.11.2015 выдана НИЦ «Курчатовский институт».

В период подготовки диссертации соискатель работал в должности стажёра-исследователя, младшего научного сотрудника и научного сотрудника в лаборатории криогенной и сверхпроводящей техники Отделения физики высоких энергий Федерального государственного бюджетного учреждения «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт».

С 2017 года и по настоящее время Ившин К.А. работает в лаборатории криогенной и сверхпроводящей техники Отделения физики высоких энергий Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт» в должности научного сотрудника.

Научный руководитель – Взнуздаев Марат Евгеньевич, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории криогенной и сверхпроводящей техники Отделения физики высоких энергий Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт».

Научный консультант – Воропаев Николай Иванович, кандидат физико-математических наук старший научный сотрудник лаборатории физики элементарных частиц Отделения физики высоких энергий Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт».

Официальные оппоненты:

- Карпешин Федор Федорович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д.И. Менделеева, г. Санкт-Петербург;

- Демин Дмитрий Львович, кандидат физико-математических наук, начальник сектора лаборатории ядерных проблем им. В.П. Джелепова Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна

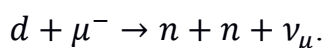
дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН), г. Новосибирск, в своём положительном заключении, подписанном главным научным сотрудником лаборатории №2 ИЯФ СО РАН,

доктором физико-математических наук Топорковым Д.К.; ученым секретарём ИЯФ СО РАН, кандидатом физико-математических наук Аракчеевым А.С. и утвержденном директором ИЯФ СО РАН, академиком РАН, доктором физико-математических наук Логачевым П.В., указала, что представленная диссертационная работа обладает высокой актуальностью. Из наиболее важных научных результатов и достижений, полученных в диссертационной работе, в отзыве ведущей организации отмечают:

1. «В эксперименте изучается реакция захвата мюона ядром дейтерия (дейтроном):



Современный уровень развития теории слабых взаимодействий позволяет рассчитать скорость этой реакции  $\Lambda_d$  с точностью 1.5%. Под скоростью реакции понимается величина, отражающая вероятность этой реакции в обратных секундах. Эксперимент MuSun имеет цель достигнуть точности ~1.5%, соответствующей уровню теоретических предсказаний и улучшить экспериментальную точность в несколько раз. Результат такого уровня позволит экспериментально подтвердить современную модель слабого взаимодействия – теорию эффективного поля. Аппарат теории при достоверном знании  $\Lambda_d$  позволит вычислить с высокой точностью параметры некоторых двухнуклонных реакций, связанных со слабым ядерным взаимодействием:  $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$ ,  $\nu_e + d \rightarrow e^- + p + p$ ,  $\nu + d \rightarrow \nu + p + n$ . Реакция синтеза с участием двух протонов идёт на Солнце и является основным источником солнечной энергии и электронных нейтрино (этот факт определил название эксперимента MuSun). Другие реакции используются для регистрации нейтрино. Перечисленные процессы связаны с важной для современной физики темой нейтринных осцилляций. Таким образом, научная актуальность эксперимента MuSun заключается в повышении точности данных, необходимых для исследований в области астрофизики и термоядерного синтеза.»

2. «Разработка и создание систем подавления каналов реакций, вносящих неопределённость в основной результат эксперимента, позволило впервые получить объём экспериментальных данных, дающих основу для вычисления  $\Lambda_d$  с точностью, соответствующей современной теории. Научная новизна настоящей работы определяется успешным достижением этого результата.»

В конце отзыва содержится утверждение: «Личное участие автора в получении результатов, составляющих основу диссертации, является определяющим. Тем не менее, очевидно, что работа Ившина К.А. является частью работы большого коллектива исследователей, о чём свидетельствует большое количество соавторов во всех публикациях соискателя.». В заключение отзыва отмечено: «Диссертация К.А. Ившина на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 является научно-квалифицированной работой, в которой содержится решение задачи разработки, создания и эксплуатации установки для прецизионного измерения скорости захвата мюона дейтроном в эксперименте MuSun, имеющего существенное значение для теоретических и экспериментальных исследований в области астрофизики и термоядерного синтеза. Это соответствует требованиям пп. 9 и 10 «Положения о присуждении учёных степеней» ВАК РФ, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики».

Соискатель имеет 6 научных работ в периодических изданиях из Перечня ВАК по теме диссертации:

1. Ivshin K.A, Alekseev I.A., Arkhipov E.A, Bondarenko S.D., Fedorchenko O.A, Ganzha V.A, Kammel P., Kravtsov P.A, Petitjean C., Trofimov V.A., Vasilyev A.A., Vasyanina T.V., Vorobyov A.A., Vznuzdaev M.E. Cryogenic Distillation Facility for Isotopic Purification of Protium and Deuterium // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. P. 125102.

2. Ivshin K.A. et al. (MuSun Coll.) Cryogenic Time-Projection Chamber for Measurement of Muon Capture Rate on the Deuteron // Book of Abstracts of the LXIV Int. Conf. NUCLEUS 2014 (Fundamental Problems of Nuclear Physics, Atomic Power Engineering and Nuclear Technologies), Minsk, Belarus, July 2014. P. 218.

3. Ившин К. А., Соловьев А. Н., Соловьев И. Н., Безымянных О. Б., Васильев А. А., Взнудзаев М. Е., Киселев С. С., Коченда Л. М., Кравченко П. В., Коченда О. Л., Кравцов П. А., Трофимов В. А., Фотьев В. Д. Криогенная установка для прецизионной калибровки датчиков температуры // Научн.-техн. вестн. инф. техн., мех. и опт. 2016. Т. 16. № 5. С. 856–863.

4. Ivshin K.A. Cryogenic Systems in MuSun Experiment, Refrigeration Science and Technology // Proc. of the 1st IIR Int. Conf. Cryogenics and Refrigeration Technology ICCRT 2016, Bucharest, Romania, June 2016. P. 199–204.

5. Ivshin K.A., Ganzha V.A., Kammel P., Kravchenko P.V., Kravtsov P.A., Petitjean C., Trofimov V.A., Vasilyev A.A., Vorobyov A.A., Vznuzdaev M.E., Wauters F. Measurement of Trace Impurities in Ultra Pure Hydrogen and Deuterium at the Parts-Per-Billion Level Using Gas Chromatography // NIM A. 2018. V. 880. P. 181–187.

6. Ившин К. А., Кравцов П. А., Трофимов В. А., Киселев С. С. Программно-аппаратный комплекс хроматографического детектора теплопроводности для эксперимента MuSun // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 11. С. 1088–1091.

По своему содержанию все работы посвящены разработке и созданию систем и методов, применённых при проведении ядерно-физического эксперимента MuSun.

На автореферат поступили 3 отзыва. Все отзывы положительные.

- 1) Отзыв из Федерального государственного бюджетного учреждения «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт», г. Гатчина. Отзыв подписан кандидатом физико-математических наук, заместителем руководителя отделения физики высоких энергий по науке Васильевым А.А. Замечаний не содержит.
- 2) Отзыв из Федерального государственного бюджетного учреждения «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт», г. Гатчина. Отзыв подписан кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником лаборатории мезонной физики конденсированных сред Микиртычьянцем С.М. Замечаний не содержит.
- 3) Отзыв из отделения физики университета Вашингтона, колледж искусств и науки, г. Сиэтл. Отзыв подписан профессором физики, сопредседателем экспериментов MuSun и AlCap Питером Каммелем. Замечаний не содержит.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д.И. Менделеева Капершин Фёдор Фёдорович является признанным специалистом мирового уровня в областях мюонной физики и физики элементарных частиц.

Кандидат физико-математических наук, начальник сектора лаборатории ядерных проблем им. В.П. Джелепова Объединенного института ядерных исследований Демин Дмитрий Львович является авторитетным учёным в области молекулярной и ядерной физики, а также имеет обширный экспериментальный опыт в области исследования мюонного катализа. Многие работы Демина Д.Л. посвящены исследованиям, связанным с взаимодействиями мюонов с изотопами водорода.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН) проводит фундаментальные и прикладные научные исследования в области ядерной физики. ИЯФ СО РАН - один из ведущих мировых центров по ряду областей физики высоких энергий и ускорителей, физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза. В Институте проводятся крупномасштабные эксперименты по физике элементарных частиц на электрон-позитронных коллайдерах и уникальном комплексе открытых плазменных ловушек, разрабатываются современные ускорители, интенсивные источники синхротронного излучения и лазеры на свободных электронах. По большинству своих направлений Институт является единственным в России.

Диссертационный совет на основании выполненных соискателем исследований отмечает, что:

Все работы диссертанта выполнены в рамках международного эксперимента MuSun, направленного на измерение скорости захвата мюона дейтроном с точностью, в семь раз превышающей существующий мировой уровень. Впервые в мире для определения скорости захвата используется методика измерения разницы времени жизни отрицательного и положительного мюона,

остановленного в рабочем теле (дейтерии) активной мишени – время-проекционной камеры.

В рамках эксперимента по прецизионному измерению скорости захвата мюона дейтроном (эксперимент MuSun) **разработаны** следующие системы и методы, позволившие достигнуть рекордный на сегодняшний день уровень точности:

- Система охлаждения криогенной время проекционной камеры CryoTPC до температуры 31К, построенная на принципе неоновой тепловой трубы с гелиевым криогенератором Мак-Магона в качестве источника холода. Система предназначена для подавления каналов реакции образования  $dd\mu$ -молекулы, являющийся основным каналом реакций с мюоном в дейтерии (Мю-катализ).

- Криогенная циркуляционная система, предназначенная для очистки рабочего газа CryoTPC от примесей с зарядовым числом  $Z > 1$  до уровня ниже 1 ppb. Установка предназначена для подавления канала реакции захвата мюона примесью с зарядовым числом  $Z > 1$ . Подобная химическая чистота рабочего газа активной мишени находится на мировом уровне и позволяет уменьшить систематическую ошибку, связанную с перехватом мюона на тяжелую примесь ниже, чем статистическая погрешность эксперимента.

- Компактная криогенная ректификационная колонна, построенная на базе криогенератора – система, способная производить изотопно-чистый дейтерий с содержанием HD~100 ppb и предназначенная для подавления канала реакции образования  $rd\mu$ -молекулы.

- Модернизированная методика анализа химической и изотопной чистоты дейтерия на основе газовой хроматографии с применением криогенного обогащения пробы. Впервые криогенная ректификационная колонна была использована не только для изотопной очистки дейтерия, но и для последующей концентрации протия в дейтерии. Это позволило повысить чувствительность хроматографической методики при разделении изотопов водорода до 100 ppb.

- Впервые построена система калибровки хроматографических измерений на основе принципа динамического газосмешения. Впервые в мире

получен стабильный поток дейтерия с постоянной примесью азота с известной и воспроизводимой величиной в диапазоне 1-5 ppb.

- Программно-аппаратный комплекс на базе микроконтроллера для чтения и анализа хроматографических данных.

- Система прецизионной калибровки криогенных датчиков температуры на основе конденсационного термометра в диапазоне 20 – 212 К.

- Система охлаждения зарядочувствительных предусилителей, предназначенная для повышения чувствительности и стабильности их работы.

**С помощью созданных методов и систем получены следующие результаты:**

- Обеспечены необходимые термодинамические условия в камере центрального детектора (давление дейтерия 5 атм при температуре 31 К).

- Подавлены каналы реакции образования  $dd\mu$ -молекулы.

- Произведена глубокая очистка дейтерия до уровня  $\sim 1$ ppb, что позволило полностью подавить канал реакции захвата мюона на примеси с зарядовым числом  $Z > 1$ .

- Произведены измерения примеси с зарядовым числом  $Z > 1$  на уровне  $\sim 1$  ppb.

- Произведена глубокая изотопная очистка дейтерия от протия, что позволило подавить каналы реакций, связанных с образованием  $pd\mu$ -молекулы.

- Впервые проведена калибровка хроматографических измерений в диапазоне от 1 до 5 ppb.

- Применение системы охлаждения зарядочувствительных предусилителей позволило повысить их чувствительность.

Разработанные методы и системы позволили провести эксперимент по измерению скорости захвата мюона дейтерием с точностью, в семь раз превышающей существующий мировой уровень.



**Теоретическая и практическая значимость** работы заключается в том, что впервые достигнут уровень точности измерений скорости захвата мюона дейтроном, соответствующий теоретическим предсказаниям. Этот результат позволит значительно повысить точность величины константы низкоэнергетического взаимодействия  $D_R$ , что необходимо для моделирования ряда важных астрофизических процессов, таких как синтез дейтрона протекающий на Солнце, а также некоторых реакций, связанных с темой осцилляции нейтрино. Проведение эксперимента MuSun стало возможным благодаря внедрению систем и методик, описанных в диссертации Ившина К.А.

**Оценка достоверности** результатов исследования выявила, что работа выполнялась в тесном сотрудничестве с международным коллективом опытных экспериментаторов, имеющих мировое признание и обладающих экспертными качествами в области экспериментальной мюонной физики. Материалы диссертации докладывались автором на научных семинарах, а также были представлены в рамках российских и международных конференций и опубликованы в рецензируемых научных журналах.

**Личный вклад** соискателя состоит в непосредственном участии в разработке, создании и применении систем и методов, которые легли в основу экспериментальной методики измерения скорости захвата мюона ядром дейтерия, а также представлении результатов на конференциях и подготовке публикаций по выполненным работам.

Результаты диссертационной работы найдут применение в широком спектре физических и астрофизических исследований, связанных с физикой элементарных частиц, проводимых в НИЦ «Курчатовский институт» и НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ.

В соответствии с п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней» результаты, полученные в диссертации Ившина К.А., следует квалифицировать как существенный вклад в развитии мюонной физики.

Диссертационный совет пришел к выводу, что диссертационная работа Ившина К.А. «Разработка и создание экспериментальной установки для

прецизионного измерения скорости захвата мюона дейтроном (эксперимент MUSUN)» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842.

На заседании 16 мая 2019 г. Диссертационный совет принял решение присудить Ившину Кузьме Александровичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 4 доктора наук по специальности диссертации, участвовавших в заседании из 23 человек, входящих в состав совета, проголосовал:

за присуждение ученой степени – 17,  
против присуждения ученой степени – 0,  
недействительных бюллетеней – 0.

Протокол счетной комиссии утвержден открытым голосованием **единогласно.**

Заместитель председателя  
диссертационного совета,

Ученый секретарь  
диссертационного совета, к.ф.н.

16.05.2019 г.



*Handwritten signature of P.K. Kashkarov*

*Handwritten signature of A.V. Merzlyakov*

П.К. Кашкаров

А.В. Мерзляков