

ОТЗЫВ

Официального оппонента, доктора физико-математических наук Карпешина Ф. Ф., о диссертации Ившина Кузьмы Александровича «Разработка и создание экспериментальной установки для прецизионного измерения скорости захвата мюона дейтроном (эксперимент MuSun)», представленной в диссертационный совет Д 520.009.01 на базе НИЦ «Курчатовский институт» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация посвящена физической проблеме изучения ядерных реакций, происходящих в недрах звезд. Создана установка, которая функционирует в рамках международного проекта MuSun на мезонной фабрике в международном институте PSI в Виллигене (Швейцария). Проект посвящен изучению базовой реакции захвата мюона ядром дейтерия : $d + \mu^- \rightarrow 2n + \nu_\mu$. Определение параметров этой реакции с точностью лучше, чем 1.5% позволит рассчитать неизвестные на сегодняшний день сечения других основных реакций нуклеосинтеза, представляющих большой интерес для астрофизики. Эксперимент MuSun, в рамках которого проводились работы, описанные в диссертации Ившина К. А. «Разработка и создание экспериментальной установки для прецизионного измерения скорости захвата мюона дейтроном (эксперимент MuSun)», выполняется в тесном сотрудничестве НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ и научно-исследовательского центра института имени Пауля Шеррера (PSI), расположенного в Швейцарии. Конечный результат эксперимента позволит оценить скорость захвата мюона ядром дейтерия (Λ_d) на уровне точности на порядок превосходящем предшествовавшие ему экспериментальные измерения. Такой результат во многом стал возможен благодаря реализации описанных в представляемой диссертационной работе экспериментальных систем и методик.

Основные результаты, полученные автором, состоят в следующем:

Представленная диссертация направлена на описание основных систем и методик, использованных при разработке и создании экспериментальной установки MuSun для эксперимента по прецизионному измерению скорости ядерного захвата мюона дейтроном. Измеряемая в эксперименте величина позволяет оценить одну из фундаментальных констант в физике слабого взаимодействия нуклонов с требуемой точностью. Для этого необходимо произвести измерение скорости захвата мюона ядром дейтерия с точностью 1.5%, что на порядок выше достигнутой в мире точности. На момент написания

диссертационной работы произведён набор экспериментальных данных в необходимых объёмах и производится их обработка.

Центральным детектором системы выступает криогенная время-проекционная камера (CrystoTPC), в то же время наполненная рабочим веществом в виде газа дейтерия. Таким образом, камера выполнена в концепции «активной мишени», и для её корректной работы требуется поддерживать оптимальные термодинамические условия газа детектора. Термодинамические, химические и изотопные характеристики рабочего газа связаны со спецификой эксперимента и, в первую очередь, направлены на подавление каналов попутных реакций захвата мюона на ядрах примесей, мюонного катализа термоядерного синтеза, которые могли бы внести погрешность в результаты измерений. Таким образом, можно выделить основные характеристики газа центрального детектора, которые необходимо поддерживать при проведении эксперимента:

- оптимальные термодинамические условия в камере, а именно давление дейтерия 5 атм при температуре газа 31 К,
- химическая чистота газа от примесей на уровне 10^{-9} ,
- изотопная чистота дейтерия от протия на уровне $< 10^{-4}$.

Диссертация посвящена созданию комплекса криогенных систем, позволивших выполнить предъявляемые к эксперименту требования, что явилось определяющим в успехе данного эксперимента. Автором проведена работа по разработке и созданию элементов экспериментальной установки, обеспечивших соблюдение термодинамических условий эксперимента и поддержание изотопной и химической чистоты газа. Автором разработана методика хроматографических измерений химических примесей в дейтерии на уровне 10^{-9} . Чувствительность методики подтверждена созданной системой высокоточной калибровки, основанной на методе динамического смешивания газов.

Научная новизна:

Имеется ряд теоретических работ, предсказывающих величину Λ_d . Наиболее актуальная работа дает искомое значение с неопределенностью около 1,5 %. Эта оценка задает уровень точности для эксперимента MuSun. До настоящего времени измерения на таком уровне точности не проводились.

Разработка и создание систем подавления каналов реакций, вносящих дополнительную неопределенность в основной результат эксперимента, позволили впервые получить объем экспериментальных данных, дающих основу для вычисления Λ_d с точностью на уровне 1.5%, соответствующей требованиям современной теории. Это обеспечивает решающий прогресс по сравнению с предыдущими измерениями, наилучшее из которых имеет погрешность 25%.

Практическая значимость работы:

EFT (effective field theory – теория эффективного поля), в особенности ее раздел, называемый киральной эффективной теорией сильных взаимодействий (ChPT, Chiral Perturbation Theory), в настоящее время широко используется физиками как инструмент для описания слабых взаимодействий. Экспериментальная проверка EFT необходима для ее подтверждения и может составить основу для дальнейшего развития этой теории. Получение необходимых экспериментальных данных стало возможным благодаря установке, создание которой и легло в основание диссертации. По своим параметрам данная установка намного превосходит использованные прежде. Это стало возможным благодаря использованию и дальнейшему развитию комплекса устройств, выполненных на современном техническом уровне.

В список достижений включены следующие позиции.

1. Система охлаждения CryoTPC, предназначенная для подавления канала реакции образования $dd\mu$ -молекулы и построенная на принципе неоновой тепловой трубы с гелиевым криогенератором Мак-Магона в качестве источника холода.
2. Криогенная циркуляционная система, предназначенная для подавления канала реакции захвата мюона примесью с зарядовым числом $Z > 1$, в которой низкотемпературная адсорбция используется как для организации потока газа, так и для его очистки.
3. Криогенная ректификационная колонна – система, предназначенная для подавления канала реакции образования $pd\mu$ -молекулы, способная производить изотопно-чистый дейтерий с содержанием HD ~ 100 ppb.
4. Метод анализа химической и изотопной чистоты дейтерия на основе газовой хроматографии с применением криогенного обогащения пробы.
5. Система охлаждения зарядочувствительных предусилителей сигнала, обеспечившая повышение чувствительности и стабильность их работы.

Первая глава диссертации описывает основные аспекты ядерной физики мюонного захвата. Дается исторический обзор развития детектирования распадных частиц. На основе анализа делается вывод о необходимости создания нового экспериментального оборудования, и дается обоснование системе детекторов, разработанной для решения задач проекта MuSun. Приводится подробное обоснование необходимости и актуальности на данном этапе осуществления эксперимента, подтверждаются научная актуальность эксперимента и резюмируется новизна методов его реализации.

Вторая глава раскрывает физические основы экспериментального метода. На основе этой информации сформулированы основные требования к рабочему

газу центрального детектора. Выработаны оптимальные физические параметры рабочего газа: давление 5 атм и температура 31 К. Перечислены основные источники неопределенностей в результатах измерений. Одной из основных проблем борьбы с фоном является подавление мюонного катализа $d-d$ синтеза. Эта задача решена в диссертации путем поддержания низкой температуры рабочего газа в центральном детекторе – 31К, его тщательной изотопической очистки до 10 ppb и химической очистки до 1 ppb и поддержания этих условий путем непрерывной циркуляции в системе. Реализация этих требований подробно изложена в последующих главах диссертации.

В третьей главе описана общая стратегия эксперимента, которая опирается на концепцию «активной мишени». Согласно этой концепции, часть элементов детектирующей системы – время-проекционная камера детектирования трека мюона, располагается непосредственно в объеме рабочего газа. **Четвертая глава** содержит описание систем охлаждения центрального детектора, криогенных предусилителей сигнала анодного сигнала центрального детектора, а также отдельной установки для калибровки температурных датчиков. Рабочая температура газа в центральном детекторе поддерживается с помощью специально разработанной системы на основе неоновой тепловой трубы. Охлаждение производится с торцов алюминиевого корпуса детектора. Контроль осуществляется пятью температурными датчиками: четырьмя сборками резистивных термометров и одним конденсационным.

Химическая очистка объема рабочего газа описана в **пятой главе**. Подробно изложена конструкция криогенной циркуляционной системы сверхвысокой очистки водорода. Циркуляция создается абсорбционным насосом, специально разработанным для этой цели. Таким путем подавляется канал реакции, связанный с перехватом мюона на примесь с зарядовым числом $Z > 1$. Химическая очистка достигается путем циркуляции через цеолитовые фильтры. **В шестой главе** описана установка для изотопной очистки дейтерия. Очистка происходит в ректификационной колонке. Ее основными узлами являются конденсатор, спирально-призматическая насадка и нагревательный куб. Разделение изотопов основано на физическом принципе разности температур кипения жидкостей разных изотопов. Контроль как химической, так и изотопной очистки проводится в газохроматографической установке, описанной в **седьмой главе**. С этой целью модернизирована промышленная модель ЛХМ-8М с целью повышения ее рабочих характеристик до требуемого в эксперименте MuSun уровня. Модернизированная установка применяется для химического и изотопного анализа дейтерия. Необходимая для калибровки хроматографического метода установка на основе динамического газосмешения описывается в **восьмой главе**. Там же описана и реализованная с ее помощью процедура калибровки.

На защиту выносятся семь положений.

Положение первое: подавление канала реакции, связанного с образованием $dd\mu$ -молекулы, благодаря созданию системы охлаждения и стабилизации температуры CryoTPC на основе неоновой тепловой трубы и обеспечению с ее помощью долговременной непрерывной работы камеры при температуре 31 К и давлении 5 бар со стабильностью $\pm 0,1$ К и $\pm 0,01$ бар соответственно.

Положение второе: создание на базе конденсационного термометра установки для прецизионной калибровки криогенных датчиков температуры в диапазоне 20–212 К.

Положение третье: подавление канала реакции образования $p\bar{d}\mu$ -молекулы за счет создания криогенной ректификационной колонны для получения изотопно-чистого дейтерия с содержанием HD ~ 100 ppb. Использование колонны для предварительного обогащения пробы в рамках хроматографической методики измерения изотопной чистоты полученного газа.

Положение четвертое: подавление канала реакции захвата мюона химической примесью с зарядовым числом $Z > 1$ за счет создания криогенной циркуляционной системы для непрерывной очистки рабочего газа центрального детектора (дейтерия) от химических примесей на уровне ~ 1 ppb.

Положение пятое: создание программно-аппаратного комплекса на базе микроконтроллера для чтения и анализа хроматографических данных.

Положение шестое: создание на основе принципа динамического смешения газов системы калибровки хроматографических измерений химической чистоты дейтерия на уровне ~ 1 ppb.

Положение седьмое: создание системы охлаждения для предусилителей центрального детектора, которая обеспечивает их работу при стабильной температуре 140 К, что существенно повышает чувствительность измерительной системы.

Вклад автора в получение представленных результатов. Содержание диссертации и выносимые на защиту результаты отражают личный вклад автора в опубликованные работы. Измерения скорости захвата мюона дейтерием были проведены международной группой при непосредственном активном участии автора диссертации. Были реализованы системы поддержания термодинамических условий работы центрального детектора CryoTPC, система химической очистки дейтерия, система изотопной очистки дейтерия, программно-аппаратный комплекс высокоточного считывания хроматографических данных. Разработана методика хроматографических измерений химических примесей в

дейтерии на уровне 10^{-9} , калибровки хроматографических измерений методом динамического смещения газов. Проведены работы по метрологическому обеспечению термометрии центрального детектора эксперимента. В результате этих работ стало возможным проведение измерений скорости реакции захвата мюона дейтроном на уровне точности 1,5%, заявленном в Предложении эксперимента MuSun.

Вместе с тем, по содержанию диссертации имеются следующие замечания.

1. В тексте не обосновываются преимущества и недостатки используемого метода охлаждения центрального детектора с помощью криогенератора и неоновой тепловой трубы по сравнению с часто используемым охлаждением жидким гелием.
2. На рис. 10 стрелка, обозначающая направление электрического поля, нарисована в противоположном направлении.
3. В списке иллюстраций пропущен рисунок 6, что приводит к нарушению нумерации рисунков.

Сделанные замечания не являются принципиальными и не снижают ценность диссертационной работы.


Заключение

Диссертация Ившина К.А. «Разработка и создание экспериментальной установки для прецизионного измерения скорости захвата мюона дейтроном (эксперимент MuSun)» является самостоятельной научно-исследовательской работой. Методы, предложенные в данной диссертации, и полученные в ней результаты являются новыми, оригинальными. Вклад автора является значительным. Результаты, полученные в диссертации, докладывались на международных и российских научных конференциях. Они в полной мере опубликованы в ведущих российских и зарубежных рецензируемых научных журналах, входящих в список ВАК. Таким образом, диссертационная работа прошла широкую апробацию.

Диссертация соответствует паспорту специальности 01.04.01. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Материалы диссертации могут быть использованы для дальнейших исследований в составе международных коллабораций в CERN, PSI в Виллигене, в экспериментах с мюонными атомами для решения загадки протонного радиуса в НИЦ Курчатовский Институт, а также в других институтах и научных центрах в области атомной и ядерной физики.

Из всего сказанного выше следует вывод, что диссертационная работа Ившина Кузьмы Александровича на тему «Разработка и создание экспериментальной установки для прецизионного измерения скорости захвата мюона дейтроном (эксперимент MuSun)» полностью соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней» вместе с «Положением о присуждении ученых степеней», и утвержденным постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 в ред. от 28.08.2017, а ее автор безусловно заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Официальный оппонент:



Карпешин Федор Федорович

25.04.2019

ведущий научный сотрудник
Федерального государственного унитарного
предприятия «Всероссийский научно-исследовательский
институт метрологии им. Д. И. Менделеева»,
доктор физико-математических наук
адрес: 190005 Санкт-Петербург, Московский пр., 19
тел.: +7 (953) 359-2311
e-mail: f.f.karpeshin@vniim.ru, fkarpeshin@gmail.com

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

