

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



Филянин Павел Евгеньевич

**Измерение малых энергий β -распада нуклидов
с использованием ионных ловушек Пеннинга**

Специальность 01.04.16 —
Физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2018

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

Научный руководитель: **Новиков Юрий Николаевич**, доктор физико-математических наук, профессор Федерального государственного бюджетного учреждения «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Гатчина.

Официальные оппоненты: **Карпешин Фёдор Фёдорович**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева», г. Санкт-Петербург,

Лубашевский Алексей Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Объединённого института ядерных исследований, г. Дубна.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе» Российской академии наук, г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 21 июня 2018 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.232.16 при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 199004, Санкт-Петербург, Средний проспект В. О., д. 41/43, Институт наук о Земле, ауд. 304.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте СПбГУ <http://disser.spbu.ru>

Автореферат разослан «_____» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Власников А. К.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. На сегодняшний день ионные ловушки играют важную роль во множестве научных экспериментов, нацеленных на исследование фундаментальных законов природы. Внедренные в физику ещё в конце прошлого столетия и активно развивающиеся в последнее время, ионные ловушки доказали свою состоятельность в определении основополагающих свойств атомных систем и элементарных частиц, а особенно в определении такого их свойства, как масса. Наилучшим показателем по точности измерения масс заряженных частиц обладает такой тип ловушки, в которой частица удерживается в комбинации квадрупольного электрического и однородного магнитного полей – так называемая ловушка Пеннинга. Именно этот тип ионных ловушек использовался для определения масс нуклидов, рассматриваемых в данной диссертации.

Масса, являясь фундаментальным свойством атомов и элементарных частиц, позволяет решить широкий круг физических задач. Так, важнейшей задачей в области нейтринной физики является определение массы нейтрино. Являясь нейтральной частицей, нейтрино не может быть удержано и напрямую исследовано в ионных ловушках. В то же время нейтрино может рождаться в процессе слабого взаимодействия – β -распаде, а детальное изучение спектра β -распада является наименее модельно-зависимым способом определения массы нейтрино. В этом случае наибольший интерес вызван к нуклидам с малой энергией β -распада – до ~ 100 кэВ. Таким образом, поиск нуклидов с соответствующими критериями для разных типов β -превращений является актуальной задачей. С этой целью нами были выполнены онлайн-измерения массы ^{202}Tl , на основании которых были сделаны выводы о том, является ли ^{202}Pb альтернативным кандидатом для изучения спектра его ϵ -захвата с целью определения массы нейтрино.

Нуклидом с наименьшей энергией распада $Q = 2,5$ кэВ в секторе β^- -распада является ^{187}Re . За последние 50 лет было выполнено семь экспериментов по набору его β^- -спектра, в каждом из которых было получено граничное значение энергии спектра. Не все полученные результаты, однако, согласуются между собой. С целью разрешения данной проблемы нами были предприняты прямые независимые измерения Q -значения ^{187}Re , то есть разницы масс $^{187}\text{Re} - ^{187}\text{Os}$. Полученный нами результат разрешил этот актуальный вопрос и показал перспективность использования криогенных микрокалориметров в дальнейших исследованиях для определения массы нейтрино.

Обозначенные выше проблемы нейтринной физики касаются определения массы активного нейтрино, подчиняющегося слабому взаимодействию, описываемому Стандартной моделью элементарных частиц. Однако в последнее время активно обсуждается возможность существования так называемого стерильного нейтрино с массой в диапазоне от ~ 1 до

нескольких десятков кэВ¹. Существование таких частиц могло бы объяснить наличие тёмной материи во Вселенной. Нами был предложен способ обнаружения стерильных нейтрино в спектре ϵ -захвата при помощи метода криогенной микрокалориметрии с использованием результатов ионной масс-спектрометрии. Важным критерием к нуклидам для изучения их спектра ϵ -захвата является все та же малая (до ~ 100 кэВ) энергия их распада.

Определение путей протекания астрофизических процессов нуклеосинтеза и исследование свойств этих процессов является еще одной актуальной проблемой современной физики. Так, при определении пути протекания s -процесса (медленного захвата нейтронов) к нуклидам с малыми энергиями распада уделяется особое внимание. Путь s -процесса зависит от баланса между сечением захвата нейтронов и вероятностью β -распада каждого из рассматриваемых нуклидов. Проблема заключается в том, что для нуклидов с малыми энергиями распада вероятность их β -переходов может существенно изменяться при больших температурах, то есть сильно отличаться от той, которая измерена в лабораторных условиях. Введение соответствующих поправок на высокотемпературный эффект основывается в том числе и на точном и достоверном знании полной энергии распада таких нуклидов, что на сегодняшний день могут обеспечить только ионные ловушки Пеннинга.

Целью данной работы является высокопрецизионное измерение как абсолютных значений масс нуклидов, так и их разностей при помощи ловушек Пеннинга для задач нейтринной физики и ядерной астрофизики.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие технические и методические **задачи**:

- переоборудование и настройка масс-спектрометра SHIPTRAP для работы в офлайн-режиме,
- подготовка и настройка масс-спектрометра ISOLTRAP для измерений в режиме онлайн.

Научная новизна заключается в проведении полномасштабного офлайн-эксперимента по прямому измерению масс нуклидов с использованием фазового метода регистрации PI-ICR на установке SHIPTRAP, изначально предназначенной для онлайн-исследований. Впервые была измерена разница масс ^{123}Te — ^{123}Sb и ^{187}Re — ^{187}Os , а на установке ISOLTRAP — абсолютное значение массы ^{202}Tl . На примере нуклида ^{123}Te показано значительное, на много порядков величины, уменьшение времени жизни нуклида в высокотемпературных астрофизических условиях по сравнению с земными условиями. Впервые продемонстрирована возможность метода совместного использования калориметров и ловушек Пеннинга для поиска стерильного нейтрино.

¹*Kusenko A. Sterile Neutrinos: the Dark Side of the Light Fermions / A. Kusenko // Physics Reports. 2009. Vol. 481. P. 1.*

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что

- 1) подтверждена правильность измерений малой граничной энергии β -распада методом микрокалориметрии, что свидетельствует об отсутствии значимых систематических сдвигов этих значений и открывает зелёную дорогу для использования этого метода в экспериментах по определению абсолютной массы нейтрино;
- 2) продемонстрированный эффект изменения времени жизни ^{123}Te в высокотемпературных звёздных условиях в дальнейшем был использован для описания процесса ядерного синтеза изотопов теллура $^{122-124}\text{Te}$ в ходе s -процесса в звёздах². Этот результат, так же как и в случае нуклида ^{187}Re , свидетельствует о необходимости проверки наличия такого сильного эффекта сокращения времени жизни и у других долгоживущих нуклидов с целью создания в будущем карты времён их жизни в астрофизических условиях;
- 3) полученное значение полной энергии распада ^{202}Pb позволило исключить этот нуклид из рассмотрения его как альтернативного кандидата для определения массы нейтрино;
- 4) продемонстрированная на качественном уровне чувствительность предложенного нами способа к детектированию присутствия стерильного нейтрино в дальнейшем может помочь в проектировании соответствующего эксперимента для обнаружения этой частицы;
- 5) полученные в данной работе масс-спектроскопические значения включены в общую базу ядерных данных³.

Достоверность полученного значения энергии распада ^{187}Re подтверждается тем, что это значение хорошо согласуется с тремя последними более точными (однако косвенными) измерениями этой энергии методом криогенной микрокалориметрии. Достоверность полученного значения энергии распада ^{123}Te подтверждается тем, что эти измерения производились на установке SHIPTRAP, которая в ряде предыдущих экспериментов уже доказала свою надёжность и работоспособность как в режиме онлайн, так и офлайн. Достоверность полученного абсолютного значения массы ^{202}Tl подтверждается тем, что в измерениях использовались три различных калибровочных источника, совокупность которых минимизирует вклад возможной систематической ошибки.

Апробация работы. Результаты работы были доложены на следующих конференциях и рабочих совещаниях:

² *Takahashi K.* Synthesis of the s -Only $^{122,123,124}\text{Te}$ Isotopes and the Selective Depletion of ^{123}Te by Electron Capture Process in Massive Stars / K. Takahashi, K. Blaum, Yu. Novikov // *The Astrophysical Journal*. 2016. Vol. 819. P. 118.

³ *The AME2016 Atomic Mass Evaluation (I). Evaluation of Input Data and Adjustment Procedures / W. Huang [et al.] // Chinese Physics C*. 2017. Vol. 41. P. 030002.

- 1) «Ультрапрецизионное измерение разности масс ^{187}Re – ^{187}Os и ядерная космохронология». «КМУС-2014», Гатчина;
- 2) «Измерение энергии распада ^{123}Te и его распад в звёздных условиях». «КМУС-2015», Гатчина;
- 3) «Низкоэнергетичная ядерная изомерия в астрофизике и космохронологии». Международная молодёжная конференция «Физика.СПб», Санкт-Петербург, 2016 г.;
- 4) Penning Trap Mass Spectrometry for Neutrino Physics. EURORIB-15, Honenda, Germany, 2015;
- 5) «Масс-спектрометр PENTATRAP для задач нейтринной физики». Семинар отделения физики высоких энергий в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, 2017 г.;
- 6) «Измерения малых энергий распада нуклидов для задач фундаментальной физики». Семинар отделения физики высоких энергий в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, 2018 г.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Результат эксперимента на SHIPTRAP по прямому измерению разности масс ^{187}Re – ^{187}Os : $Q = 2,492(33)$ кэВ. Полученный результат разрешил давнюю загадку плохо согласующихся Q -значений ^{187}Re , полученных в разных экспериментах и разными методами, показывая таким образом перспективность использования метода криогенной микрокалориметрии для определения массы нейтрино.
2. Результат эксперимента на ISOLTRAP по измерению массы ^{202}Tl , на основании которого определена разница масс ^{202}Pb – ^{202}Tl : $Q = 38,8(43)$ кэВ. Полученный результат позволил выявить, что β -спектр ^{202}Pb не обладает высокой чувствительностью к массе нейтрино, а потому использование ^{202}Pb для определения массы нейтрино не является целесообразным.
3. Результат эксперимента на SHIPTRAP по прямому измерению разности масс ^{123}Te – ^{123}Sb : $Q = 51,912(67)$ кэВ. С использованием полученного значения показано сильное, на несколько порядков величины, сокращение периода полураспада ^{123}Te в высокотемпературных звёздных условиях.
4. Предложение и анализ возможностей поиска сигнала от кэВных стерильных нейтрино в спектре ϵ -захвата при помощи совместных экспериментов, использующих метод болометрии и ионной масс-спектрометрии.

Личный вклад автора.

1. Модернизация системы SHIPTRAP для измерения в офлайн-режиме малых значений разностей масс нуклидов (малых энергий распадов), позволившая выполнить измерения с долгоживущими нуклидами:

- установка и настройка Nd:YAG-лазера совместно с фокусирующей оптической системой для получения ионов путем лазерной абляции;
 - установка и настройка шагового электромотора для удалённого управления манипулятором держателя столика с мишенными образцами.
2. Непосредственное участие в настройке и проведении эксперимента на SHIPTRAP по измерению разности масс ^{187}Re – ^{187}Os с последующей обработкой полученных данных и соответствующими выводами.
 3. Подготовка, проведение и обработка полученных данных в эксперименте по измерению разницы масс ^{123}Te – ^{123}Sb , произведённых лично автором.
 4. Проведение эксперимента на установке ISOLTRAP по измерению массы нуклида ^{202}Tl и обработка полученных данных, а также вывод о малой перспективности использования нуклида ^{202}Pb для определения абсолютной массы нейтрино.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в пяти рецензируемых печатных изданиях [1–5], индексируемых в базах данных РИНЦ, Web of Science и Scopus.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Полный объём диссертации составляет 99 страниц текста с 51 рисунком и 7 таблицами. Список литературы содержит 130 наименований.

Содержание диссертации

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена описанию ряда физических задач, где малые энергии распада нуклидов играют важную роль. Одной из них является определение массы такой элементарной частицы, как нейтрино. Наименее модельно-зависимый метод определения массы нейтрино основан на анализе кинематики β -распада. Ненулевая масса нейтрино вносит искажение в β -спектр, которое больше всего проявляется вблизи граничной энергии этого спектра (рис. 1). Так, совместные усилия метода криогенной микрокалориметрии для набора β -спектра и высокопрецизионное измерение полной энергии распада (разницы масс материнского и дочернего нуклидов, то есть Q -значения) с помощью ионной ловушки Пеннинга в

будущем позволит достичь суб-эВ-чувствительности к массе нейтрино. Однако на пути к решению этой глобальной задачи требуется решение ряда сопутствующих вопросов.

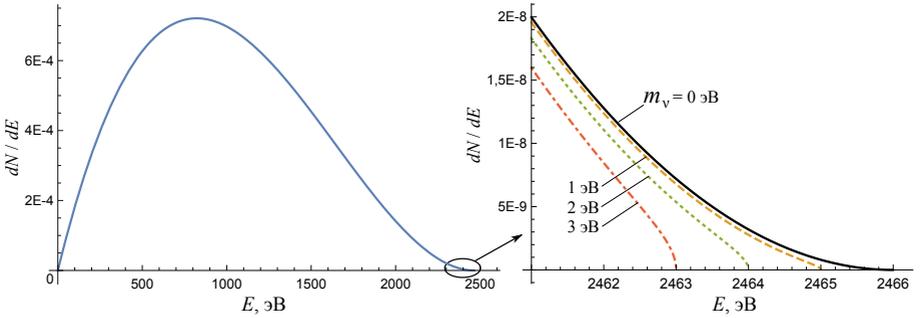


Рис. 1. β -спектр ^{187}Re : полный спектр (слева); область спектра вблизи его граничной энергии для различных значений массы нейтрино m_ν (справа)

Одним из таких вопросов является принципиальная проверка применимости метода криогенной микрокалориметрии для определения массы нейтрино. Граничную энергию β -распада можно получить из самого спектра. С другой стороны, пренебрегая массой нейтрино, эта энергия должна быть в точности равна Q -значению, которое можно измерить в ловушке Пеннинга. Таким образом, прямое независимое измерение Q -значения в ловушке Пеннинга является хорошим способом проверки применимости криогенных микрокалориметров как детекторов набора β -спектра и определения из этого спектра массы нейтрино.

Другим из таких сопутствующих вопросов является поиск нуклидов с малыми энергиями β -превращений. На сегодняшний день существуют три наиболее перспективных кандидата: ^3H , ^{163}Ho и ^{187}Re с энергиями распада 18,6; 2,8 и 2,5 кэВ соответственно. Однако возможно существование других кандидатов, энергии распада которых могли бы быть еще меньше, а значит, спектр таких нуклидов мог бы иметь еще большую чувствительность к m_ν . Таким образом, поиск нуклидов с малыми энергиями β -переходов является актуальной и востребованной задачей.

Ещё одной задачей в области нейтринной физики, где нуклиды с малыми энергиями распада могут сыграть важную роль, является поиск стерильных нейтрино. Обнаружение этих пока что гипотетических частиц с массой в диапазоне от ~ 1 до нескольких десятков кэВ может объяснить существование так называемой тёплой тёмной материи во Вселенной. Так же как и обычное «активное» нейтрино, стерильное может вносить искажения в β -спектр. В частности, эти искажения могут быть обнаружены в

спектре ϵ -захвата благодаря совместным усилиям в области микрокалориметров и ионных ловушек Пеннинга.

Малые энергии распада нуклидов играют не последнюю роль и в области ядерной астрофизики, ключевой задачей которой является определение путей протекания процессов нуклеосинтеза в звёздах. Так, путь s -процесса (процесса медленного захвата нейтронов) определяется балансом вероятностей захвата нейтрона и β -распада. Вероятность β -распада, в свою очередь, в высокотемпературных звёздных условиях становится зависимой от температуры. Особенно этот эффект проявляется для нуклидов с малыми, до ~ 100 кэВ, энергиями распада. Полную эффективную вероятность β -распада таких нуклидов в звёздных условиях можно хорошо оценить, если достоверно и точно известно их Q -значение. Для определения же Q -значений ловушки Пеннинга подходят наилучшим образом.

Вторая глава посвящена описанию основ работы ловушки Пеннинга. Заряженная частица в такого типа ионных ловушках удерживается комбинацией квадрупольного электрического и однородного магнитного полей. Результирующее движение иона в таком случае является комбинацией трёх независимых движений с частотами ω_z , ω_- и ω_+ – аксиальной, магнетронной и модифицированной циклотронной частотами соответственно. На рисунке 2 показан возможный вариант движения иона в ловушке Пеннинга, соответствующий некоторым значениям амплитуд собственных колебаний.

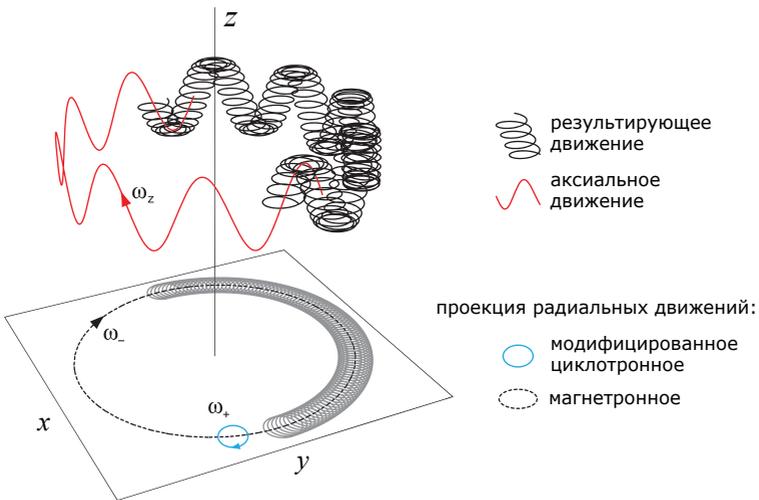


Рис. 2. Пример траектории движения заряженной частицы в идеальной ловушке Пеннинга. Траектория является суперпозицией трёх собственных колебаний с частотами ω_z , ω_- и ω_+

В однородном магнитном поле \vec{B} и при отсутствии электрических полей ион двигался бы по круговой или спиральной траектории с истинной циклотронной частотой ω_c , пропорциональной отношению заряда иона q к его массе m :

$$\omega_c = B \cdot q/m.$$

Наложение электрического поля позволяет удерживать ион в аксиальном направлении, однако делает его движение более сложным, как, например, показано на рис. 2. Тем не менее благодаря соотношениям

$$\omega_c^2 = \omega_+^2 + \omega_-^2 + \omega_z^2,$$

$$\omega_c \simeq \omega_+ + \omega_-$$

истинную циклотронную частоту можно восстановить. Произведя измерения собственных частот реперного иона, масса которого хорошо известна, можно «откалибровать» прибор, то есть определить величину магнитного поля. Зная магнитное поле и измеренные собственные частоты неизвестного иона, можно определить его массу. В качестве реперного можно использовать ионы углерода или его кластеров. В этом случае привязка к эталону масс, каковым является углерод, делает прямой метод определения масс ионной ловушкой в высокой степени достоверным.

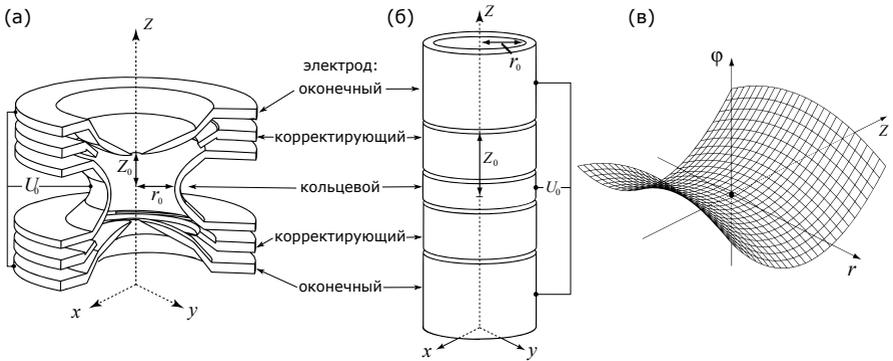


Рис. 3. Эскиз ловушки Пеннинга гиперболического (а) и цилиндрического (б) типов. Оба типа позволяют создать квадрупольный электрический потенциал в центре ловушки, эквипотенциальная поверхность которого изображена справа (в)

Сначала в данной главе рассматривается принцип работы идеальной ловушки Пеннинга. Далее описываются различные эффекты, с которыми приходится сталкиваться при работе с реальной ловушкой. Эти эффекты

устанавливают минимальные технические требования, предъявляемые к различным составляющим частям спектрометра для достижения желаемой точности измерений.

В конце данной главы на качественном уровне описаны три различных метода определения истинной циклотронной частоты вращения иона ω_c : времяпролетный метод ToF-ICR, метод фазового отображения PI-ICR и метод фурье-преобразования FT-ICR.

Третья глава посвящена описанию двух масс-спектрометров SHIPTRAP (GSI, Дармштадт, Германия) и ISOLTRAP (CERN, Женева). Приведены основные характеристики и рассмотрены узловые элементы каждого из них.

На рисунке 4 схематично изображены основные элементы спектрометра SHIPTRAP для офлайн-измерений: лазерный ионный источник, тандем из первой подготовительной и второй измерительной ловушек, позиционно-чувствительный детектор.

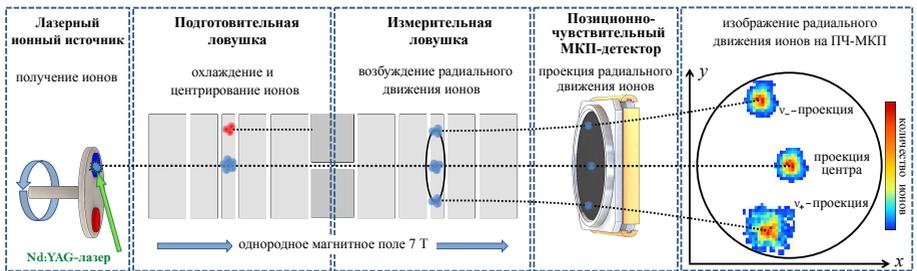


Рис. 4. Схематичное представление офлайн части установки SHIPTRAP и проекция радиальных движений иона на позиционно-чувствительном детекторе

Для измерения истинной циклотронной частоты вращения иона в ловушке использовался новый метод фазового отображения PI-ICR⁴. По измеренным отношениям частот материнского и дочернего ядер определялась разница их масс.

В **четвёртой главе** приводится процедура подготовки и измерений масс нуклидов на спектрометрах SHIPTRAP и ISOLTRAP. На рисунке 5 представлены результаты прямых измерений Q -значений ^{187}Re [1] и ^{123}Te [4]. На рисунке 6 представлены измерения отношения R циклотронных частот ионов $^{202}\text{Tl}^+$ и $^{133}\text{Cs}^+$ на ISOLTRAP [2]. Из полученного отношения R определено абсолютное значение массы ^{202}Tl , которое в терминах дефекта массы равно $\Delta M = -25980,2(16)$ кэВ.

⁴A Phase-Imaging Technique for Cyclotron-Frequency Measurements / S. Eliseev [et al.] // Applied Physics B: Lasers and Optics. 2014. Vol. 114. P. 107.

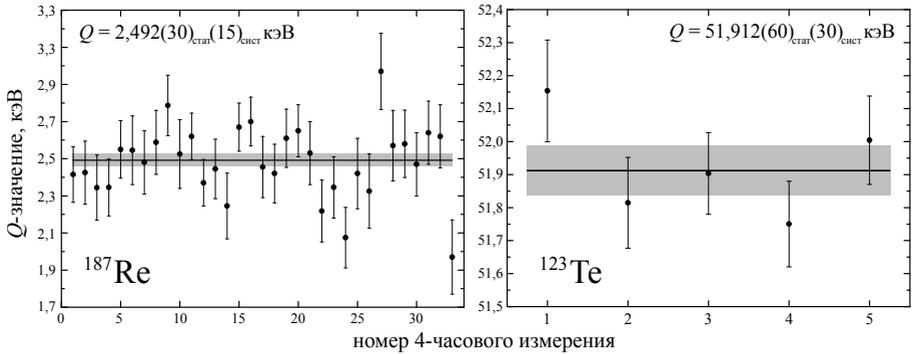


Рис. 5. Q -значения ^{187}Re [1] и ^{123}Te [4], полученные в ходе измерительных кампаний на SHIPTRAP. Черная линия и серая полоса показывают среднее Q -значение и полную ошибку измерения соответственно

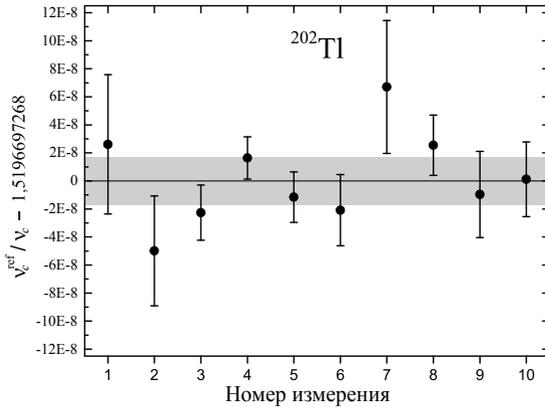


Рис. 6. Измеренные отношения R циклотронных частот ионов $^{202}\text{Tl}^+$ и $^{133}\text{Cs}^+$ на ISOLTRAP [2]. Черная линия и серая полоса показывают среднее Q -значение со своей ошибкой измерения соответственно

В **пятой главе** приводятся результаты исследования и делаются соответствующие выводы.

В разделе 5.1 описывается эффект зависимости времён жизни нуклида от температуры звёздной среды. Представлен список нуклидов с малыми энергиями распада, период полураспада которых подвержен влиянию высокой температуры. Для каждого нуклида из этого списка приводятся низколежащие возбуждённые ядерные состояния и их заселённость при $kT = 30$ кэВ, характерной величины для s -процесса, а также приведены значения $\log ft$ и энергии наиболее значимых β -переходов. Из

этих данных следует, что наиболее интересными случаями, в которых заселённость уровней (указана в скобках) достаточно высока, являются нуклиды ^{40}K (22 %), ^{107}Ag (15 %), ^{157}Gd (16 %), ^{157}Tb (16 %), ^{163}Dy (10 %), ^{205}Pb (24 %). Делается вывод, что для более достоверной оценки периода полураспада этих нуклидов в высокотемпературных звёздных условиях их малые Q -значения необходимо измерить прямым способом с высокой точностью и достоверностью, для чего ловушки Пеннинга подходят наилучшим образом.

В разделе 5.2 приводится результат измерения Q -значения ^{123}Te [4]. Оно оказалось равным $Q = 51,912(67)$ кэВ. На основании этого результата и вышеуказанного эффекта зависимости времён жизни нуклида от высокой температуры делается вывод о том, что при типичной температуре s -процесса в $3 \cdot 10^8$ К период полураспада ^{123}Te может сократиться вплоть до 10^3 лет, что более чем на 14 порядков величины отличается от его периода полураспада в земных условиях (рис. 7).

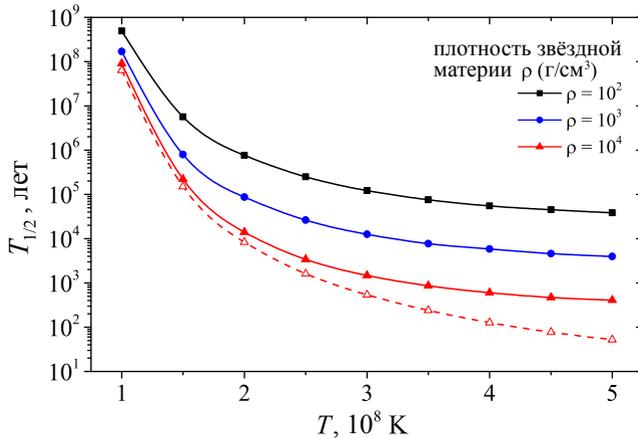


Рис. 7. Оцененный период полураспада для ^{123}Te в зависимости от температуры T и плотности звёздной материи ρ . Штриховой линией обозначен $T_{1/2}$ с учетом захвата свободных электронов при $\rho = 10^4$ г/см³

В разделе 5.3 описываются способы датирования астрофизических объектов при использовании пары ^{187}Re – ^{187}Os . Указывается на наличие эффекта изменения периода полураспада ^{187}Re в звёздах [1], что нужно учитывать при использовании пары ^{187}Re – ^{187}Os как космохронометра.

В разделе 5.4 обсуждается использование нуклида ^{187}Re для определения массы нейтрино. Описывается проблема несогласованности результатов измерений граничной энергии β -спектра ^{187}Re , полученных при экстраполяции графика Ферми к оси абсцисс. Так, на рисунке 8 представлены ранее полученные значения граничной энергии β -спектра ^{187}Re ,

из которого явно видно, что они разделяются на две не согласующиеся между собой группы. Из того же рисунка видно, что произведенные нами на установке SHIPTRAP прямые измерения Q -значения ^{187}Re хорошо согласуются с последними измерениями с помощью криогенных микрокалориметров, тем самым демонстрируя перспективность их использования для исследования β -спектра и определения из него массы нейтрино [1].

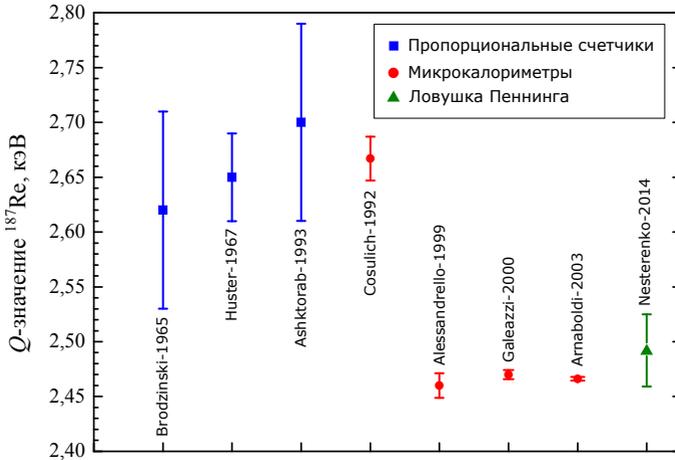


Рис. 8. Граничная энергия β -спектра ^{187}Re , полученная в ряде экспериментов. Треугольником обозначен результат $Q = 2,492(33)$ кэВ, полученный в данной работе с помощью ионной ловушки Пеннинга [1]

В разделе 5.5 на основе полученного нами на установке ISOLTRAP абсолютного значения массы ^{202}Tl ($\Delta M = -25980,2(16)$ кэВ) было определено Q -значение ^{202}Pb [2]:

$$Q = \Delta M(^{202}\text{Pb}) - \Delta M(^{202}\text{Tl}),$$

$$Q = -25941,4(40) + 25980,2(16) = 38,8(43) \text{ кэВ.}$$

На рисунке 9 представлены все известные случаи ε -захвата с $Q < 100$ кэВ. Из него видно, что известное до этого Q -значение ^{202}Pb не позволяло сделать однозначного вывода о его $(Q - B_i)$ -значении, которым определяется чувствительность спектра ε -захвата ^{202}Pb к массе нейтрино. Полученный нами результат $Q - B_{LI} = 23,5(43)$ кэВ однозначно указал на то, что ^{202}Pb как альтернативный кандидат для определения массы нейтрино сильно уступает по своим возможностям нуклиду ^{163}Ho , у которого $Q - B_{MI} = 0,79(2)$ кэВ и который на сегодняшний день остается наилучшим кандидатом в секторе ε -захвата.

В дополнение в разделе 5.5 приводится список нуклидов, энергии перехода которых из основного в возбуждённое ядерное состояние с учётом

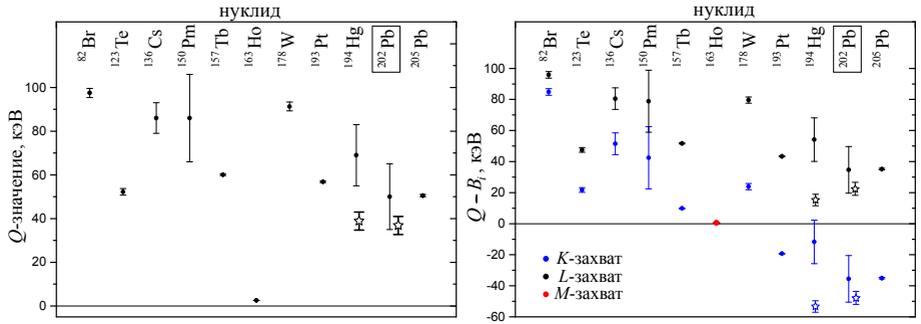


Рис. 9. Нуклиды с энергией β -перехода между основными состояниями до 100 кэВ в секторе ϵ -захвата. Справа для тех же нуклидов представлены Q -значения за вычетом энергии связи электрона на K -, L - или M -атомной оболочке. Именно малость $(Q - B_i)$ -значений означает высокую чувствительность соответствующего β -спектра к массе нейтрино. Значения, полученные с помощью ловушек Пеннинга, обозначены звёздочками

известной на сегодняшний день погрешности могли бы быть близки к нулю. Дополнительным критерием отбора являлась не слишком большая степень запрещения β -перехода ($\Delta J \leq 2$).

В разделе 5.6 изложена впервые предложенная нами идея [3] поиска сигнала от присутствия стерильных нейтрино в спектре ϵ -захвата с помощью сочетания метода болометрии и ионной масс-спектрометрии. Приведены оценки чувствительности метода к обнаружению стерильного нейтрино.

В **заклучении** подытожены результаты и обозначены дальнейшие перспективы развития ловушек Пеннинга для решения задач фундаментальной физики. В частности, говорится, что проект ECHO⁵ при детальном изучении спектра ϵ -захвата ^{163}Ho в конечном счете планирует достижение чувствительности к массе нейтрино в 0,2 эВ. Для этого, однако, необходимо ультрапрецизионное измерение Q -значения ^{163}Ho с относительной точностью 10^{-11} или лучше, что в скором будущем станет возможно на масс-спектрометре PENTATRAP, к созданию которого автор имеет непосредственное отношение⁶.

В **приложении** представлены схемы β -распадов всех нуклидов, обсуждавшихся в разделе 5.1, времена жизни которых сильно подвержены влиянию высокотемпературных звёздных условий. На схемах обозначены все разрешённые β -переходы между низколежащими ядерными уровнями.

⁵Recent Results for the ECHO Experiment / C. Hassel [et al.] // Journal of Low Temperature Physics. 2016. Vol. 184. P. 910.

⁶Recent Developments at the High-Precision Mass Spectrometer PENTATRAP / R. Schüssler [et al.] // JPS Conference Proceedings. 2017. Vol. 18. P. 011020.

Публикации автора по теме диссертации

1. Direct Determination of the Atomic Mass Difference of ^{187}Re and ^{187}Os for Neutrino Physics and Cosmochronology / D.A. Nesterenko, S. Eliseev, K. Blaum, M. Block, S. Chenmarev, A. Dörr, C. Droese, **P. Filianin**, M. Goncharov, E. Minaya Ramirez, Yu.N. Novikov, L. Schweikhard, V.V. Simon // *Physical Review C*. 2014. Vol. 90. P. 042501.
2. Precision Electron-Capture Energy in ^{202}Pb and Its Relevance for Neutrino Mass Determination / A. Welker, **P. Filianin**, N.A.S. Althubiti, D. Atanasov, K. Blaum, T.E. Cocolios, S. Eliseev, F. Herfurth, S. Kreim, D. Lunney, V. Manea, D. Neidherr, Yu. Novikov, M. Rosenbusch, L. Schweikhard, F. Wienholtz, R.N. Wolf, K. Zuber // *The European Physical Journal A*. 2017. Vol. 53. P. 153.
3. On the keV Sterile Neutrino Search in Electron Capture / **P.E. Filianin**, K. Blaum, S.A. Eliseev, L. Gastaldo, Yu.N. Novikov, V.M. Shabaev, I.I. Tupitsyn, J. Vergados // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*. 2014. Vol. 41. P. 095004.
4. The Decay Energy of the Pure *s*-Process Nuclide ^{123}Te / **P. Filianin**, S. Schmidt, K. Blaum, M. Block, S. Eliseev, F. Giacoppo, M. Goncharov, F. Lautenschlaeger, Yu. Novikov, K. Takahashi // *Physics Letters B*. 2016. Vol. 758. P. 407.
5. Низкоэнергетичная ядерная изомерия / Н. С. Мартынова, С. А. Елисеев, Ю. Н. Новиков, **П. Е. Филянин** // *Вестник СПбГУ. Серия 4: Физика. Химия*. 2017. № 3. С. 236.