



важным достоинством ловушек является достоверность полученных результатов о массах нуклидов, определённых в прямых измерениях с привязкой к принятому эталону – массе нуклида  $^{12}\text{C}$ . Этот набор преимуществ выдвигает ионные ловушки Пеннинга в категорию самых востребованных приборов для прецизионной масс-спектрометрии объектов микромира.

**Преимущества ловушек были использованы в диссертационной работе П.Е. Филянина для приложений к двум важным проблемам современной физики: ядерной астрофизики и физики нейтрино. Автор использовал самые последние методические разработки, достигнутые с его непосредственным участием, модифицировал методы измерений долгоживущих нуклидов на ионных ловушках в режиме “off-line”. Это позволило с высокой точностью и достоверностью определить массу  $^{202}\text{Tl}$ , а также энергии распадов нуклидов  $^{123}\text{Te}$ ,  $^{187}\text{Re}$ , и  $^{202}\text{Pb}$ . Нуклиды Te и Re интересны для астрофизики, Re и Pb представляют интерес для возможностей определения массы нейтрино, а Te и Pb связаны с другой актуальнейшей проблемой современной физики – поиском кэВных стерильных нейтрино.**

Диссертация состоит из пяти глав, разбитых на отдельные параграфы, Введения и Заключения, включающего основные выводы и положения, выносимые на защиту, а также Приложения, содержащего иллюстративный и справочный материал. В диссертации помещены 51 рисунок и 7 таблиц, исчерпывающе иллюстрирующие содержание текста, а также список литературы, состоящий из 130 ссылок.

Результаты исследований, выносимые на защиту, опубликованы в 5 статьях в различных реферируемых журналах, в том числе высокорейтинговых, а также обсуждались на различных конференциях.

### **Основные результаты, их научная новизна и личный вклад диссертанта**

**С целью достижения прецизионности измерения масс на уровне нескольких единиц от  $10^{-10}$  автору пришлось модифицировать некоторые узлы установки SHIPTRAP в немецком национальном центре ГСИ (Дармштадт), на которой им был получен основной массив экспериментальной информации. Это касалось, главным образом, лазерно-оптической системы, предназначенной для ионизации исследуемых нуклидов, образования и доставки ионного пучка к ловушке в режиме “off-line” её работы. Автор хорошо разобрался и использовал авангардный метод регистрации**



**циклотронной частоты вращения ионов в ловушке**, напрямую связанной с массой иона, сулящий многократное улучшение разрешения прибора, которое и было достигнуто.

Благодаря этим усовершенствованиям **были измерены отношения циклотронных частот  $^{123}\text{Te}/^{123}\text{Sb}$  и  $^{187}\text{Re}/^{187}\text{Os}$** , позволившие получить **прецизионные и достоверные значения энергий бета-превращений  $^{123}\text{Te}$  и  $^{187}\text{Re}$** .

#### **Результаты:**

- Полученное для  $^{123}\text{Te}$  значение  $Q = 51.912(67)$  кэВ является в 24 раза более точным результатом по сравнению с известным из литературы. Показано, что нуклид  $^{123}\text{Te}$  имеет намного меньшее время жизни в высокотемпературных звездных условиях по сравнению с земными условиями, отличаясь вплоть до 14 порядков величины. Это приводит к необходимости пересмотра характеристик процесса медленного нейтронного захвата (так называемого s-процесса) в области массовых чисел  $A \approx 120$ ,
- Для распада нуклида  $^{187}\text{Re}$  было получено значение  $Q = 2.492(33)$  кэВ. Этот нуклид в связке с дочерником  $^{187}\text{Os}$  является космохронометром, то есть часами Вселенной. Тщательный анализ, приведённый в диссертации, показывает необходимость учёта обратного процесса превращения  $^{187}\text{Os}$  в  $^{187}\text{Re}$ , что приводит к необходимости пересмотра использования нуклида  $^{187}\text{Re}$  в космохронометрии,
- Так как нуклид  $^{187}\text{Re}$  имеет самую маленькую из всех известных бета-излучателей энергию распада (около 2.5 кэВ), он может претендовать быть кандидатом на определение абсолютной массы нейтрино. Однако до измерений диссертанта в литературе существовал большой разброс значений энергий распада, полученных разными методами. Полученный автором диссертации результат об энергии распада  $^{187}\text{Re}$  подтвердил правильность определения этой величины с помощью метода криогенной микрокалориметрии. Этот результат привёл к весьма важному выводу о возможности использования последней для определения массы нейтрино в сочетании с прецизионными прямыми измерениями масс  $^{187}\text{Re}$  и  $^{187}\text{Os}$  в ловушке.

В диссертации приводятся также данные измерений, выполненных диссертантом и на другой ионной ловушке ISOLTRAP в европейском центре ЦЕРН в Женеве. Там была измерена масса нуклида  $^{202}\text{Tl}$  в рамках программы поиска новых кандидатов на измерение абсолютной массы нейтрино. Полученное значение энергии распада нуклида  $^{202}\text{Pb}$  с использованием предыдущих измерений массы  $^{202}\text{Pb}$  и измерений массы  $^{202}\text{Tl}$  в настоящем эксперименте привело к выводу об ограниченных возможностях нуклида  $^{202}\text{Pb}$  в масс-спектрометрии, нацеленной на определение массы нейтрино.

**К числу совершенно новых результатов в мировой литературе следует отнести предложение автора диссертации использовать метод ионной масс-спектропии и**

**криогенной микрокалориметрии для поиска стерильных нейтрино в энергетическом диапазоне нескольких кэВ, рассматриваемых в качестве кандидатов на темную материю.** Это предложение, рассмотренное в деталях для наиболее вероятных нуклидов с малой энергией распада, вошло в «белую книгу», составленную международным коллективом физиков (с участием автора диссертации), которая посвящена поиску этих загадочных объектов.

Отмеченные выше личные достижения автора диссертации П.Е. Филянина являются оригинальными и представляют собой несомненный вклад в науку.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

**Полученные в работе результаты по разностям масс долгоживущих нуклидов  $^{123}\text{Te}$  и  $^{187}\text{Re}$  и сделанные выводы о существенном изменении времён жизни их в высокотемпературных звёздных условиях, закладывают базу под кропотливые расчёты теоретиков-астрофизиков.** Полученные достоверные данные об энергии распада  $^{187}\text{Re}$  могут быть использованы при измерении абсолютной массы нейтрино болометрическим методом. **Численные величины масс, полученные в диссертации, включены в международные базы данных нуклидов.**

### **Общие замечания**

Работа не лишена некоторых недостатков:

- 1) В работе отмечаются большие преимущества масс-спектрометрии с использованием ионных ловушек Пеннинга, однако не представлен обзор имеющихся в мире установок с кратким перечнем их функций и характеристик, а описаны только две установки, на которых работал диссертант.
- 2) При получении среднего значения отношения циклотронных частот по многим измерениям выборочно используется либо метод линейной интерполяции, либо метод полиномиального фитирования. Методика последнего не нашла описания в диссертации, хотя активно используется (см., например, Рис.4.1). Остаётся также не понятным, почему этот метод для единообразия не используется во всех случаях анализа, замещая собой менее чувствительный метод линейной интерполяции.
- 3) В разных местах работы подчёркивается, что масс-спектрометрия с ионными ловушками даёт достоверные данные, так как измерения являются прямыми. При этом напрашивается необходимость более детальной аргументации этой достоверности.

Отметим, что приведённые недостатки ни в коей мере не сказываются на высокой оценке работы.

## Заключение

Диссертационная работа П.Е. Филянина «Измерение малых энергий  $\beta$ -распада нуклидов с использованием ионных ловушек Пеннинга» выполнена на высоком научном уровне и включает новые, впервые полученные результаты, достоверность, актуальность и значимость которых не вызывает сомнений. Диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц, а ее автор Филянин Павел Евгеньевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация и Отзыв на неё обсуждены на научном семинаре циклотронной лаборатории ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН «24» мая 2018 г.

Заведующий циклотронной лабораторией,  
доктор физ.-мат. наук, профессор

  
Найденов Виктор Олегович