

## Отзыв

научного руководителя на диссертацию «Измерение малых энергий  $\beta$ -распада нуклидов с использованием ионных ловушек Пеннинга», представленную **Павлом Евгеньевичем Филяниным** на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц»

Представленная П.Е. Филяниным диссертация отражает итог его обучения в аспирантуре физического факультета С.Петербургского Государственного Университета. Она посвящена изучению малых, а в некоторых случаях самых малых из всех известных энергий  $\beta$ -превращений, которые можно высокопрецизионно определить измерением масс нуклидов ионными ловушками.

Масс-спектрометрия с использованием ионных ловушек Пеннинга приобретает всё большее приложение к изучению вопросов современной физики микромира. Привлекательность этого метода определяется различными преимуществами по сравнению с другими существующими методами масс-спектрометрии. Это, прежде всего, прецизионность определения масс нуклидов благодаря измерению частот, точности определения которых на порядки величины превышают другие стандартные методы. Далее, измерения с ловушками являются прямыми, так как привязаны к массе нуклида углерода, который является эталоном масс, а поэтому они считаются достоверными. И, наконец, ловушкой можно измерять массы единичных ионов (атомов), то есть метод обладает непревзойдённой чувствительностью.

Интерес к малым энергиям  $\beta$ -превращений нуклидов (слабым процессам электронного распада и захвата ядром орбитального электрона) вызван наличием наилучших условий для исследований в нейтринной физике: определения абсолютной массы активного нейтрино и поиска стерильных нейтрино в диапазоне масс нескольких кэВ. Действительно, чем меньше энергия слабого распада нуклида, тем больший вклад в энергетику распада вносит масса покоя активного нейтрино, и поэтому легче её определить. Это же относится и к вероятности обнаружения кэВного стерильного нейтрино, которое позиционируется как «тёплая» тёмная материя Вселенной.

Другим привлекательным аспектом изучения распадов с малым энерговыделением является исследование эффектов, могущих привести к значительному сокращению в звёздах больших времён жизни нуклидов, определённых в земных условиях, которые существенно отличаются от высокотемпературных звёздных.

Сформулировав набор фундаментальных физических проблем, которые связаны с низкоэнергетичными распадами, и обладая мощной экспериментальной базой, приспособленной для решения поставленных задач, диссертант провёл свои исследования, отраженные в представленной работе.

Экспериментальный материал был набран на установке ISOLTRAP в ЦЕРНе (Женева) в on-line эксперименте по измерению массы  $^{202}\text{Tl}$  и комплексе SHIPTRAP в ГСИ (Дармштадт) в off-line экспериментах по измерению разностей масс  $^{123}\text{Te}$ - $^{123}\text{Sb}$  и  $^{187}\text{Re}$ - $^{187}\text{Os}$ .

Следует отметить, что эксперименты на обеих названных установках были спланированы и выполнены диссертантом самостоятельно, что потребовало от него большого

экспериментального мастерства, имея в виду сложность и нестандартность аппаратуры. В ЦЕРНе это потребовало настройки двух ловушек в работе on-line для выделения и измерения изотопа талия, тогда как в ГСИ надо было приспособить имеющуюся ловушку SHIPTRAP, предназначенную главным образом для on-line измерения масс сверхтяжёлых элементов, для измерений тугоплавких элементов в режиме off-line. С этой целью диссертантом был использован лазерный ионизатор, который был смонтирован им в фокусирующую оптическую систему, предназначенную для проводки ионов от лазерной абляции. Диссертантом собственноручно была создана система удалённого управления мишенным устройством, на котором располагались мишени, поочерёдно подаваемые для ионизации.

Измеренное и проанализированное диссертантом значение массы  $^{202}\text{Tl}$  в сравнении с полученной ранее нашей группой величиной массы  $^{202}\text{Pb}$  позволило определить энергию распада  $^{202}\text{Pb}$   $Q=38.8(43)$  кэВ, что делает этот нуклид, вопреки ожиданиям, мало подходящим для экспериментов по определению абсолютной массы нейтрино.

Другой результат, связанный с нейтринной физикой, касается измерений энергии распада нуклида  $^{187}\text{Re}$ , которая ожидается самой малой среди всех известных  $\beta$ -распадчиков, но до измерений диссертанта не была достоверно известна, так как измерения разными методами давали сильно отличающиеся значения. Полученное в диссертации значение  $Q=2492(33)$  эВ подтверждает правильность данных, полученных методом микрокалориметрии, что позволяет считать этот метод вполне приемлемым для определения абсолютной массы антинейтрино из кинематического анализа сплошного электронного спектра распада  $^{187}\text{Re}$ . Астрофизический аспект этого измерения проявляется в том, что в высокотемпературных звёздных условиях заселяется первое возбуждённое состояние нуклида  $^{187}\text{Os}$  с энергией около 10 кэВ, которое обеспечивает обратный процесс заселения нуклида  $^{187}\text{Re}$  и изменения баланса вероятностей веток распадов, который надо учитывать при использовании этой пары для космохронологии (определения возраста Вселенной).

Другое астрофизическое приложение работы связано с измерением энергии распада нуклида  $^{123}\text{Te}$ , который считается объектом процесса медленного захвата нейтронов в звёздах (s - процесса). Как было оценено диссертантом, в высокотемпературных звёздных условиях может с большой вероятностью заселяться первое возбуждённое состояние ядра  $^{123}\text{Te}$  с энергией 159 кэВ, которое открывает канал разрешённого  $\beta$ -распада с этого уровня в дочернее ядро  $^{123}\text{Sb}$ . Это, в свою очередь, приводит к резкому падению, на много порядков величины, эффективного времени жизни  $^{123}\text{Te}$  в условиях s-процесса, что сказывается, как уже отмечено в литературе, на балансе интенсивностей в этом процессе. Отметим здесь, что достоверное и точное измерение автором диссертации величины  $Q=51.912(67)$  кэВ позволило определить тип электронного захвата и вероятность распада состояния 159 кэВ, находящегося в равновесии с основным состоянием.

Прецизионные возможности масс-спектрометрии с ловушками и большой потенциал криогенной микрокалориметрии в измерении спектра атомной разрядки, происходящего после электронного захвата с выбросом нейтрино, привели автора диссертации к выводу о возможности комбинирования этих двух методов для поиска стерильного нейтрино в диапазоне масс 1-100 кэВ в  $\beta$ -превращениях с малым энерговыделением. Полученные выражения и оценки возможного вклада стерильных нейтрино в энергетику электронного захвата привели к выбору соответствующих кандидатов для поисков этих гипотетических частиц.

Следует отметить, что все экспериментальные данные, приведённые в диссертации, получены автором впервые, что характеризует *новизну* работы.

*Достоверность* этой информации основана на измерениях с помощью ионных ловушек, которые зарекомендовали себя как лучшие приборы масс-спектрометрии в настоящее время.

*Актуальность* предпринятых исследований очевидна в силу их таргетирования на фундаментальные проблемы нейтринной физики и ядерной астрофизики.

Полученные автором результаты открывают новые пути в развитии этих областей физики, внося тем самым вклад в *практическое использование* полученных в диссертации данных.

*Личный вклад* диссертанта заключается в умелом приспособлении им метода ионных ловушек к специфическим задачам высопрецизионного и достоверного измерения малых энерговыделений, в самостоятельном проведении экспериментов, анализе полученных данных и представления материала на конференциях и в публикациях. Им лично были апробированы данные диссертации в различных выступлениях. Он является первым автором двух статей, опубликованных в высорейтинговых журналах.

П.Е. Филянин стажировался в отделе сверхтяжёлых элементов ГСИ (Дармштадт, Германия) и в институте Макса Планка в Гейдельберге (Германия), а также принял участие в экспериментах на установке ISOLTRAP в ЦЕРНе (Женева), получив большой опыт работы на действующих установках высокого класса и завидного уровня оснащённости. Это, безусловно, способствовало получению им неординарных навыков физика-экспериментатора, которое в сочетании с высококачественной теоретической подготовкой, полученной на кафедре Ядерно-физических методов исследования СПбГУ, способствовало становлению его как разностороннего зрелого физика-исследователя.

В заключение можно сделать вывод, что диссертация «Измерение малых энергий  $\beta$ -распада нуклидов с использованием ионных ловушек Пеннинга» отвечает всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Филянин Павел Евгеньевича безусловно заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16- «Физика атомного ядра и элементарных частиц».

Автореферат диссертации полностью отражает её содержание.

Научный руководитель,  
доктор физико-математических наук, профессор

Ю.Н. Новиков

2 апреля 2018 г.

