

## ПРЕЦИЗИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ МАСС НУКЛИДОВ В ИОННЫХ ЛОВУШКАХ (проекты, в которых участвует Лаборатория Физики Экзотических Ядер)

Одной из основных величин, характеризующих свойства любой квантовомеханической системы, является масса, то есть полная энергия связи этой системы. На протяжении всей истории развития физики микромира масс-спектрометрия занимала видное место в стремлении достичь максимальной точности и, тем самым, выйти на новые рубежи фундаментальной физики. В настоящее время свойствами высочайшей точности, надёжности и беспрецедентной чувствительности (на уровне детектирования одной частицы) обладают ионные ловушки Пеннинга, в которых один ион удерживается магнитным и электрическим полями в малом объёме в состоянии почти покоя. По точности такие ловушки уже превосходили на много порядков величины измерения в накопительных кольцах релятивистских частиц, которые до недавнего времени были наиболее точными в ядерной и атомной физике радиоактивных нуклидов. В мире имеется не более десяти таких исследовательских ловушек, из которых пять функционируют в Европе, и в работе каждой из европейских установок участвует Лаборатория Физики Экзотических ядер ОФВЭ НИЦ КИ - ПИЯФ.

### Проект SHIPTRAP

Ионная ловушка SHIPTRAP базируется на линейном ускорителе UNILAC в ГСИ/ФАИР (Дармштадт, ФРГ). В качестве предсепаратора служит селектор скоростей SHIP, разделяющий продукты реакции «слияние+испарение». Основными направлениями исследований являются:

- **Сверхтяжёлые элементы.** Измерения масс трансурановых и, прежде всего, сверхтяжелых элементов таблицы Д. Менделеева является основной задачей ловушки SHIPTRAP-единственной в мире системы, способной это делать. За несколько лет работы удалось измерить массы девяти нуклидов элементов No(Z=102), Lr(Z=103), Rf(Z=104) с относительной точностью до  $10^{-8}$ , позволившие по цепочкам альфа-распадов определить массы ещё около 30 нуклидов сверхтяжёлых элементов вплоть до Ds(Z=110). Полученный ландшафт масс привёл к выводу о наличии двух небольших островков стабильности около нуклидов с нейтронными числами  $N=152$  и  $N=162$ , расположенных на подступах к предполагаемому большому острову стабильности Сверхтяжёлых (см. PNPI-activities 2007-2012).
- **Двойной электронный захват.** Поиск нуклидов, в которых выполняются резонансные условия в двойном электронном захвате, возникающие при равенстве разности масс материнского и дочернего атомов, с одной стороны, и энергии, высвобождаемой при двойном захвате, с другой. При выполнении этого условия безнейтринный процесс будет резонансно усилен и может быть идентифицирован. Его наличие означает нарушение закона сохранения лептонного заряда и наличие Майорановского типа нейтрино. Из девятнадцати пар нуклидов, для которых были измерены разности масс с высокой точностью, только пары  $^{152}\text{Gd}$ - $^{152}\text{Sm}$  и  $^{190}\text{Pt}$ - $^{190}\text{Os}$  имеют реальные шансы продемонстрировать наличие безнейтринного характера распада в длительном крупномасштабном эксперименте (см. PNPI-activities 2007-2012.).
- **Релятивистский эффект в QED.** Точное измерение массы  $^{48}\text{Ca}$  до величины  $4 \times 10^{-10}$  позволило наряду с измерением Ларморовской частоты определить g-фактор

электрона в литий-подобном ионе этого нуклида и в сравнении этой величины у нуклида  $^{40}\text{Ca}$  исследовать изотоп-эффект, как следствие, QED-свойства многоэлектронной системы, связанные с релятивистским эффектом. в присутствии магнитного поля (см. PNPI-activities, 2013-2018, p.256).

- **На пути к измерению массы нейтрино.** Полная энергия бета-превращения (разница масс атомов) является основным параметром, используемом при определении массы нейтрино в исследованиях спектров разрядки (атомном или электронном). Для исследований на SHIPTRAP были выбраны нуклиды, обладающие самыми малыми из известных энергий распада:  $^{187}\text{Re}$  в бета-распадном канале и  $^{163}\text{Ho}$  – в захватном канале. Полученные значения, соответственно,  $Q_\beta = 2492 \pm 32$  эВ и  $Q_{\text{EC}} = 2833 \pm 34$  эВ (см. PNPI-activities 2013-2018, pp.250-255) являются самыми надёжными и открывают дорогу для использования криогенной микро-калориметрии в нейтринной программе (см. проект ECHO ниже). Для определения массы нейтрино на уровне  $< 1$  эВ требуется аналогичная точность в определении разности масс атомов. Эта проблема адресуется установке PENTATRAP (см. ниже)

### **Проекты ISOLTRAP и JYFLTRAP**

**ISOLTRAP.** Ловушка ISOLTRAP установлена после масс-сепаратора ISOLDE в ЦЕРНе (Женева). Совместные работы посвящены прецизионному измерению разностей масс  $^{194}\text{Hg}$  -  $^{194}\text{Au}$ ,  $^{202}\text{Pb}$  -  $^{202}\text{Tl}$  и  $^{131}\text{Cs}$  -  $^{131}\text{Xe}$  для возможности их использования в определении массы нейтрино и изучении бета-переходов с очень малыми энергиями распадов для исследований особенностей слабого взаимодействия в этих распадах. (см. Eur. Phys. J. A (2017) **53**: 153. и Hyperfine Interact. **240** (2019) no.1, 61)

**JYFLTRAP.** На этой ловушке в циклотронной лаборатории университета Jyväskylä (Финляндия) была измерена разность масс  $^{102}\text{Pd}$  -  $^{102}\text{Ru}$ , подтвердившая измерения SHIPTRAP, существенно отличающихся от данных распадной спектроскопии, и, тем самым, показавшая надёжность измерений с использованием ловушек. (см. International Journal of Mass Spectrometry **435** (2019) 204–208).

### **Проект PENTATRAP**

Система, запущенная в 2018 году в институте М.Планка по ядерной физике в Гайдельберге (ФРГ) с участием Лаборатории физики экзотических ядер ОФВЭ НИЦ КИ - ПИЯФ, состоит из пяти ионных ловушек Пеннинга, позволяющих привязывать к одному и тому же времени процессы измерения искомого нуклида и калибранта. Это существенно подавляет систематическую неопределённость, что позволило определить полную относительную ошибку измерения массы нуклида до рекордной величины  $10^{-11}$  (см Phys. Rev. Lett. **124** (2020) 113001-6).

В настоящее время проект охватывает следующие проблемы:

- **Полное энерговыделение «нейтринных» нуклидов.** Измерения полного энерговыделения (разности масс) материнских нуклидов  $^{187}\text{Re}$  и  $^{163}\text{Ho}$  с точностью 1 эВ для определения массы антинейтрино и нейтрона, соответственно. Для  $^{187}\text{Re}$  такие измерения с точностью 3 эВ уже выполнены. Долговременные измерения  $^{163}\text{Ho}$  начаты.
- **Новое явление- атомная изомерия.** При измерении циклотронной частоты для иона  $^{187}\text{Re}^{29+}$  было обнаружено долгоживущее метастабильное состояние с энергией  $202 \pm 2$  эВ, живущее дольше суток (см. Nature **581** (2020) 42-46). и, как показано, возникающее в результате попадания спина внешнего электрона в «спиновую ловушку».

Подтверждением правильности интерпретации явления послужило обнаружение аналогичного состояния в ионе  $^{187}\text{Os}^{30+}$  с энергией  $207\pm 3$  эВ, имеющего ту же изоэлектронную структуру. Обнаруженные изомеры обладают большим значением частотного фактора разрядки, превосходящего на много порядков эту величину для всех известных эталонов частоты. Поэтому найденные изомерные уровни, наряду с другими долгоживущими ионными состояниями, которые ещё предстоит открыть, могут рассматриваться как самые точные частотомеры (эталонные часы). Выполненный эксперимент закладывает начало новому направлению – долгоживущей высокоэнергетичной атомной изомерии.

### **Проект ЕСНО**

**Масса электронного нейтрино.** Проект ЕСНО (Electron Capture in Holmium) ставит целью измерение эффективной массы электронного нейтрино в спектре атомной разрядки после захвата орбитального электрона ядром  $^{163}\text{Ho}$ . Этот спектр измеряется методом криогенной микрокалориметрии на установке в институте Кирхгофа университета Хайдельберга (ФРГ), и для определения массы нейтрино используется измеренная ловушкой полная энергия захвата  $^{163}\text{Ho}$ . Программа разбита на два этапа:

На *первом этапе* используется слабый источник хольмия, около ста пикселей детектирования и измеренная на установке SHIPTRAP полная энергия захвата хольмия. Пилотный эксперимент, выполненный в альпийской подземной лаборатории Modane, показал добротные качества установки и позволил определить предел на массу нейтрино, в два раза уменьшающий известную величину 265 эВ (см. Eur. Phys. J. **C79** (2019) 1026).

На *втором этапе* запланировано использование более сильного источника  $^{163}\text{Ho}$ , более тысячи пикселей криогенного детектора и на один-два порядка более точного измерения энергии захвата, выполненного на установке PENTATRAN. Ожидается, что на этом этапе удастся получить предел на массу покоя нейтрино на уровне 1 эВ.

- **Стерильные и реликтовые нейтрино.** В дальнейших планах проекта ЕСНО - идентификация стерильных нейтрино в энергетическом диапазоне масс нескольких кэВ, наличие которых может отвечать за тёплую Тёмную материю во Вселенной, и поиск нуклидов, в которых выполняются резонансные условия для обнаружения реликтовых нейтрино, например, в  $^{157}\text{Tb}$  (см. J. Phys. G-Nuclear and Particle Phys. **41**, 2014, 12500)

### **Проект ПИТРАП**

В разработанном проекте ПИТРАП предлагается установить ионную ловушку на выходе радиоактивных пучков от внутренней облучаемой мишени на реакторе ПИК, используя, тем самым, преимущества высокого потока нейтронов и непревзойдённой чувствительности ловушки. Полученный на основании измерений масс ландшафт нейтроноизбыточной области можно использовать для определения пути астрофизического процесса быстрого захвата нейтронов (r-process), который отвечает за образование элементов в природе. Произведённые оценки ожидаемых выходов экзотических нуклидов в предложенной системе показывают, что в экспериментах можно достичь ядер, которые укладываются на предполагаемый путь r-процесса. Проект технического задания представлен в виде Отчёта ПИЯФ Ф-310 (2016) и опубликован (см. Atomic Energy, **118** (2015) 419-424. DOI 10.1007/s10512-015-0017-3).