

ИОННЫЕ ЛОВУШКИ-МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПРИБОР ДЛЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основополагающая теория мироздания

В основе современной теории микромира лежит так называемая Стандартная модель элементарных частиц, триумфальное шествие которой за последние десятилетия ознаменовалось открытием бозона Хиггса. Однако эта всеобъемлющая модель всё же имеет ограничения, не учитывая одну из четырёх сил в природе — гравитацию (Рис. 1).



Рис. 1

Задачей исследований будущего является объяснение явлений, лежащих за её пределами. Такие исследования обычно связывают с развитием базы высокоэнергетических экспериментов. В то же время, имеется и другой, прямо противоположный путь движения в сторону сверхмалых энергий. Оба пути, освещая различные грани Стандартной модели (Рис. 2), хорошо дополняют друг друга. (см., например, К. Blaum, Yu.N. Novikov and G. Werth. *Contemporary Physics (London)*, **51** (2010) 149). Однако низкоэнергетический путь, подчас стремящийся к энергиям, близким к энергиям покоя частиц, требует сверхчувствительных и ультрапрецизионных измерений. Такие измерения в области масс-спектрометрии обеспечиваются в настоящее время *только ионными ловушками*.



Рис. 2

Что такое ионная ловушка?

В ионных ловушках типа Пеннинга охлаждённые частицы и ядра удерживаются скрещенными магнитным и электрическим полями в малом объёме в течение длительного времени. Возбуждением и измерением

резонансной частоты их вращения в ловушке можно прецизионно определить массы частиц в широком диапазоне, от сверхтяжёлых химических элементов до элементарных частиц (нуклонов и электронов).

Сами ловушки очень небольших размеров (Рис. 3). Вся установка помещается в небольшом зале. Такие приборы намного менее капиталозатратны, чем грандиозные комплексы для исследований с высокоэнергетичными частицам.

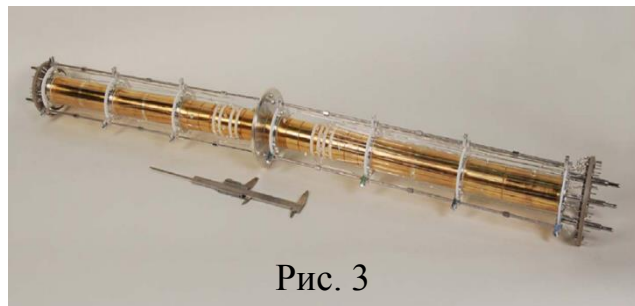


Рис. 3



Рис. 4

В мире имеется несколько установок, включающих ионные ловушки Пеннинга (Рис. 4), и во всех европейских проектах участвуют сотрудники лаборатории Физики Экзотических Ядер (ЛФЭЯ) Отделения Физики Высоких Энергий Петербургского Института Ядерной Физики (ПИЯФ).

Чем занимаются и планируют заниматься сотрудники ЛФЭЯ в ПИЯФ и в зарубежных научных центрах?

1. Исследование сверхтяжёлых элементов

Периодическая система элементов Д. Менделеева имеет продолжение в виде сверхтяжёлых нуклидов с большими значениями порядкового номера. «География» карты нуклидов в координатах чисел протонов и нейтронов показана на известной картинке академика Г. Флёрова (Рис. 5).

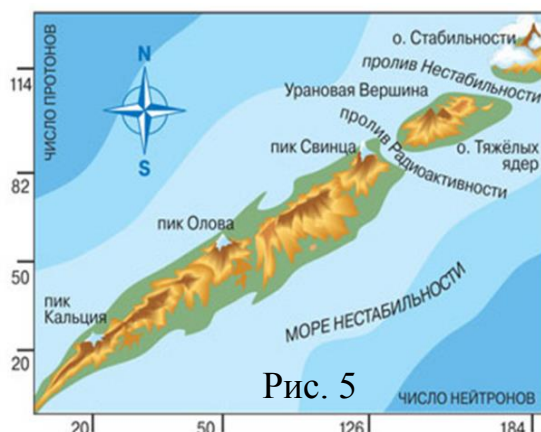


Рис. 5

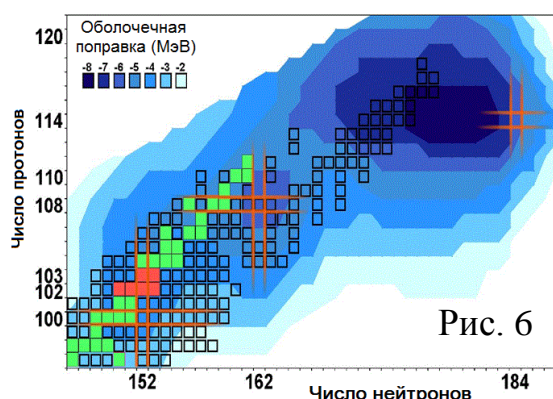


Рис. 6

На Рис. 6, представляющем фрагмент карты нуклидов, показан предсказанный «остров» сверхтяжёлых, характеризующийся наибольшей стабильностью и показанный темносиним цветом. Для надёжной идентификации этого загадочного острова требуется знание ланд-

шафта масс (полных энергий связи) нуклидов, начало которому положено измерениями на уникальной ионной ловушке SHIPTRAP (в немецком национальном центре GSI в городе Дармштадт), не имеющей аналогов в мировой практике. На Рис. 6 выделены красными и зелёными квадратиками первые полученные значения масс нуклидов. Как видно, ещё предстоят кропотливые измерения для «обрисовки» полного ландшафта большой области на пути к Сверхтяжёлым.

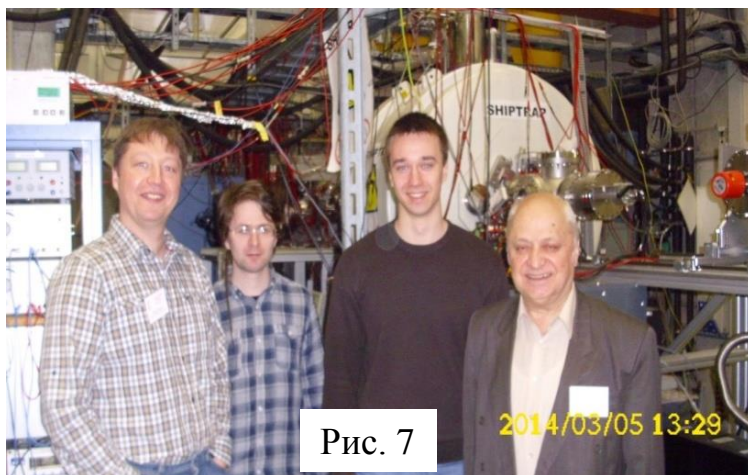


Рис. 7

На Рис. 7 запечатлена группа ЛФЭЯ во время экспериментального сеанса на фоне установки SHIPTRAP (слева направо: С. Елисеев, Д. Нестеренко, П. Филянин и Ю. Новиков). Основные результаты опубликованы с участием ЛФЭЯ в высокорейтинговых журналах: М. Block, D. Ackermann, *et al. Nature*, **463** (2010) 785; и

Е. Minaya Ramirez, D. Ackermann *et al. Science*, **337** (2012) 1207. Работа была удостоена в 2013 г. международной премии им. Г. Флёрва.

2. Астрофизика экзотических ядер

Экзотические ядра образуются в огромных количествах в различных астрофизических процессах. На схематической карте нуклидов (Рис. 8) показаны пути различных процессов в звёздных условиях, приводящих к образованию химических элементов в природе. Почти всю нуклидную карту в её нейтроноизбыточной области охватывает г-процесс быстрого множественного захвата нейтронов при вспышках Сверхновых звёзд (Рис. 9). Путь этого процесса, оценённого по теоретическим моделям, определяется напрямую измерением масс нуклидов. Эти нейтроноизбыточные нуклиды генерируются в реакции деления в реакторах.

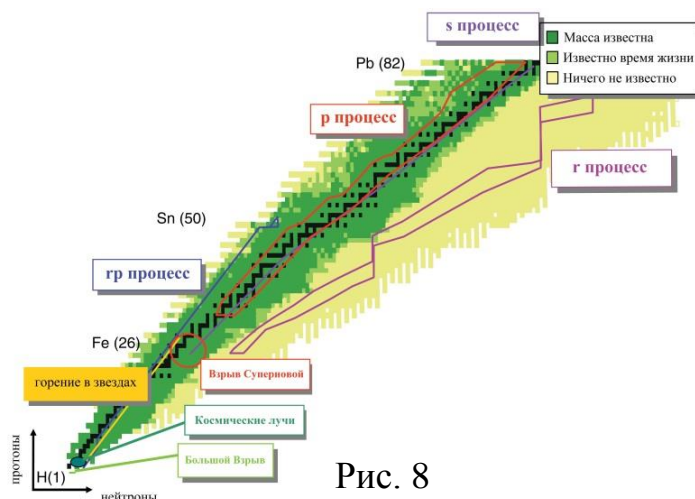


Рис. 8



Рис. 9

Сочетание высокопоточного реактора ПИК в ПИЯФ с высокочувствительной ионной ловушкой создаёт уникальные возможности для измерений этих ещё неизвестных или плохо исследованных нуклидов.

ЛФЭЯ работает над проектом ПИТРАП ионной ловушки в ПИЯФ. Схема установки, которая может функционировать в режиме on-line с реактором, или off-line с ним, показана на Рис. 10.

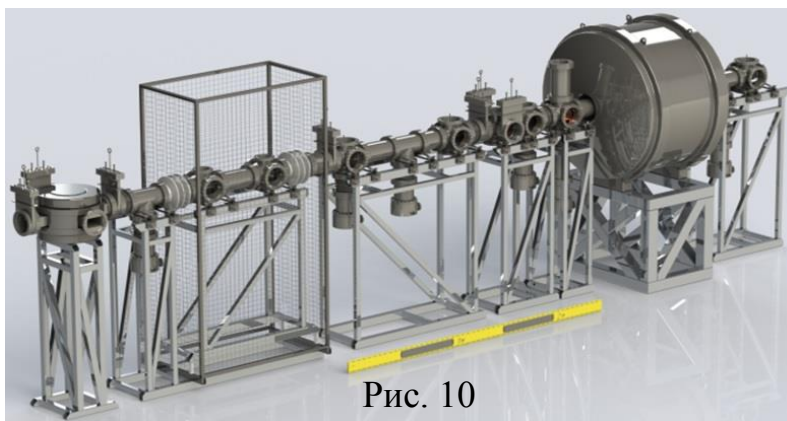


Рис. 10

Путь другого процесса – быстрого протонного захвата (гр-процесс) – исследовался на установке ISOLTRAP в ЦЕРНе (Женева) и на установке JYFLTRAP в Университете Ювяскюля (Финляндия) в рамках широкого международного сотрудничества с участием ЛФЭЯ.

На пути s-процесса (см. Рис. 8) была прямым методом измерена разность масс $^{187}\text{Re} - ^{187}\text{Os}$, играющая важную роль в проблеме космохронологии (D. Nesterenko, K. Blaum *et al.* *Phys. Rev. C* **90** (2014) 042501).

3. Исследования с ионными ловушками для целей нейтринной физики

Мельчайшая и загадочная частица нейтрино буквально взломала стройность Стандартной модели. Исследование её свойств представляет важнейшую задачу современной физики. Ионная ловушка с её чувствительностью регистрации единичного иона и высокой точностью определения масс, в сочетании с криогенной микрокалориметрией, предоставляет отличную возможность таких исследований (S. Eliseev, Y.N. Novikov, K. Blaum, *Ann. der Phys.* **525** (2013) P.707).

- Измерения, ориентированные на определение массы нейтрино, намного уступающей массе кварков (Рис. 11), проведены на установках ISOLTRAP и SHIPTRAP. Дальней-

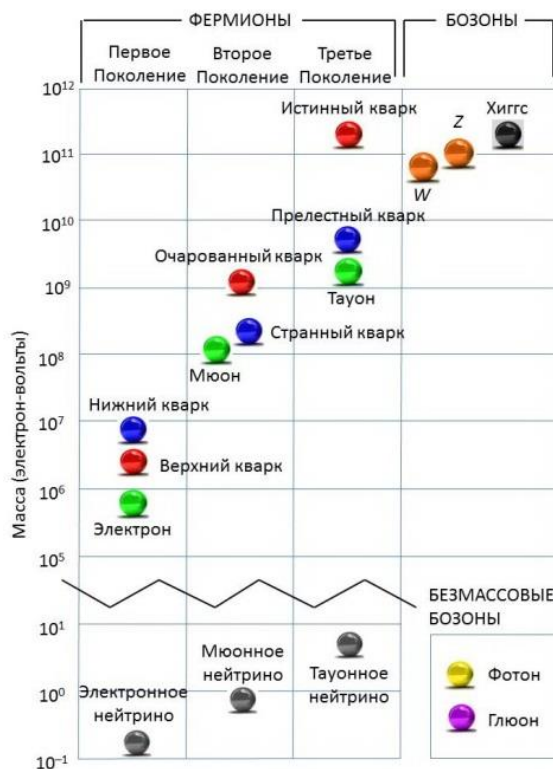


Рис. 11

шее развитие их будет осуществляться в рамках международного проекта ECHO.

- На установке SHIPTRAP проведён поиск кандидатов на безнейтринный двойной захват, изучение которого прольёт свет на выполнимость закона сохранения лептонного заряда в слабом взаимодействии и ответит на вопрос, о типе нейтрино (Майорановское или Дираковское?)
- Исследована возможность поиска реликтового и тяжёлого стерильного нейтрино в канале захвата электронов ядром (P. Filianin, K. Blaum *et al.* *J. Phys. G* **41** (2014) 095089).

Аналогичная программа предусмотрена и на установке ПИТРАП в «off-line» режиме функционирования ионной ловушки.

Решение перечисленных завораживающих проблем мироздания потребует неординарных усилий на протяжении многих лет. Это вызовет необходимость пополнения состава ЛФЭЯ молодыми пытливыми умами, желающими посвятить свою жизнь служению науке, ведь перед ними откроются неиссякаемые просторы увлекательного поля деятельности.