

Санкт-Петербургский Государственный Университет  
Физический факультет

На правах рукописи

Нестеренко Дмитрий Александрович

**Измерение масс нуклидов сверхтяжёлых элементов  
в ловушке Пеннинга**

Специальность 01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2013

Работа выполнена в Санкт-Петербургском Государственном Университете

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
профессор  
Новиков Юрий Николаевич,  
Петербургский Институт Ядерной  
Физики им. Б.П. Константинова,  
Санкт-Петербург

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
профессор  
Дьяченко Александр Трофимович,  
Петербургский государственный  
университет путей сообщения,  
Санкт-Петербург

кандидат физико-математических наук  
Хлебников Сергей Васильевич,  
Радиевый институт им. В.Г. Хлопина,  
Санкт-Петербург

Ведущая организация: Физико-Технический Институт им. А.Ф.  
Иоффе, Санкт-Петербург

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201 г. в \_\_\_ часов на заседании дис-  
сертационного совета Д 212.232.16 при Санкт-Петербургском Государственном  
Университете, по адресу: 199004, Россия, Санкт-Петербург, Средний проспект  
В. О., д. 41/43, мультимедийная ауд. 304.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУ.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201 г.

Учёный секретарь диссертационного совета



Власников А.К.

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Данная работа посвящена измерению масс тяжёлых и сверхтяжёлых нуклидов прямым методом с использованием ионных ловушек Пеннинга.

Синтез и исследование сверхтяжёлых элементов означает выход науки в новую область исследований экзотических нуклидов, связанных с расширением Периодической системы элементов Д.И. Менделеева. Наряду с успехом в синтезе новых сверхтяжёлых элементов вплоть до изотопов с  $Z=118$ , в настоящий момент точное положение предсказанного "острова" стабильности остаётся неизвестным. Одним из прямых указаний на его положение может служить анализ массовой поверхности в области сверхтяжёлых элементов на нуклидной карте.

Массы ядер являются фундаментальными величинами, определяющими их энергии связи, и используются во многих областях науки. Точные массовые значения в широкой области сверхтяжёлых элементов являются ключевыми в понимании их структуры, позволяют судить о силе оболочечных эффектов в этих экзотических объектах и позволяют сделать заключения о положении острова стабильности. До недавнего времени не было прямых измерений масс ядер тяжелее урана. Массовые значения определялись через измерения энергий  $\alpha$ -распадов в  $\alpha$ -цепочках, связывающих сверхтяжёлые нуклиды с нуклидами, имеющими известные массы.

В последние два десятилетия успешно развивались и применялись для измерения масс нуклидов ионные ловушки Пеннинга, позволяющие удерживать в 3-х мерном пространстве заряженные частицы посредством магнитного и электростатического полей, и проводить с ними дальнейшие исследования. Для короткоживущих нуклидов с периодом полураспада 100 мс относительная массовая точность в ловушках Пеннинга достигает  $10^{-8}$ . Использование метода масс-спектрометрии в ловушках Пеннинга на установке SHIPTRAP, расположенной за сепаратором тяжёлых ионов SHIP (в GSI,

Германия), где в реакциях слияния-испарения получают нуклиды сверхтяжёлых элементов, позволило впервые измерить прямым способом массы трансурановых нуклидов. Эти измерения, которым посвящена данная диссертация, положили начало формированию ландшафта массовой поверхности сверхтяжёлых элементов.

### Цели работы

Целью диссертационной работы являлось получение точных экспериментальных данных по массовым значениям нуклидов сверхтяжёлых элементов, анализ полученных результатов и уточнение массовой поверхности в области исследуемых нуклидов. В соответствии с поставленной целью были выполнены следующие задачи:

- Оптимизация установки SHIPTRAP для длительных онлайн измерений, включающая в себя стабилизацию магнитного поля сверхпроводящего магнита, в котором находятся ловушки Пеннинга. Для этого были созданы система стабилизации температуры трубы магнита, программа управления температурной стабилизацией, система стабилизации давления паров гелия в гелиевом криостате магнита. Было выполнено тестирование и оптимизация работы систем стабилизации.
- Проведение серии экспериментов по прямым измерениям масс радионуклидов  $^{203-207}\text{Rn}$  и  $^{213}\text{Ra}$  на установке SHIPTRAP для проверки её работоспособности в онлайн режиме.
- Проведение онлайн эксперимента по прямым измерениям масс сверхтяжёлых радионуклидов  $^{252,254,255}\text{No}$  и  $^{255,256}\text{Lr}$  на установке SHIPTRAP. Погрешность измеренных масс была меньше 15 кэВ (кроме  $^{256}\text{Lr}$ ).
- Анализ полученных экспериментальных данных показал проявление предсказанной ранее нейтронной оболочки  $N=152$  для деформированных ядер нобелия ( $Z = 102$ ) и лоуренсия ( $Z = 103$ ).

- На основе полученных экспериментальных данных по известным  $Q_{\alpha}$ -величинам  $\alpha$ -распадов были определены массы сверхтяжёлых нуклидов Rf ( $Z = 104$ ), Db ( $Z = 105$ ), Sg ( $Z = 106$ ), Hs ( $Z = 108$ ) и Ds ( $Z = 110$ ).

#### Научная новизна работы

Прямые измерения масс (что равнозначно полным энергиям связи ядер) сверхтяжёлых нуклидов были выполнены впервые в мировой практике.

1. Был проведен эксперимент по прямому измерению масс сверхтяжёлых нуклидов изотопов нобелия и лоуренсия на установке SHIPTRAP.

а) Были измерены массы изотопов  $^{252,254,255}\text{No}$  и  $^{255,256}\text{Lr}$ , при этом измерения масс  $^{255}\text{No}$  и  $^{255,256}\text{Lr}$  прямым методом были выполнены впервые. Погрешность измеренных масс составляет меньше 15 кэВ (кроме  $^{256}\text{Lr}$ ). Нуклид  $^{256}\text{Lr}$  является самым тяжёлым и имеющим наименьшее сечение образования, из когда-либо наблюдавшихся нуклидов в ловушках Пеннинга.

б) Экспериментально было подтверждено существование предсказанной ранее теоретически нейтронной деформированной оболочки  $N = 152$ .

в) Были определены массы сверхтяжёлых нуклидов Rf ( $Z = 104$ ), Db ( $Z = 105$ ), Sg ( $Z = 106$ ), Hs ( $Z = 108$ ) и Ds ( $Z = 110$ ) на экспериментальном базисе выполненных исследований.

2. Была проведена серия экспериментов по измерениям масс тяжёлых ридионуклидов  $^{203-207}\text{Rn}$  и  $^{213}\text{Ra}$  на установке SHIPTRAP. При этом:

а) Впервые были измерены прямым методом массы  $^{203-207}\text{Rn}$  и  $^{213}\text{Ra}$ . При этом были улучшены табличные значения масс  $^{205}\text{Rn}$ ,  $^{206}\text{Rn}$  и  $^{213}\text{Ra}$ .

б) Было подтверждено наличие магического числа  $N = 126$  для изотопов Ra.

#### Практическая значимость результатов работы

В данной работе были впервые получены прямым экспериментальным методом массовые значения для нуклидов  $^{203-207}\text{Rn}$ ,  $^{213}\text{Ra}$ ,  $^{252,254,255}\text{No}$ ,  $^{255,256}\text{Lr}$ . Также были определены массы нуклидов Rf, Db, Sg, Hs и Ds на основе измеренных масс изотопов нобелия и лоуренсия и спектроскопических данных.

Полученные экспериментальные значения масс позволяют уточнить соответствующие табличные значения масс нуклидов, которые могут быть использованы для различных целей. Массы сверхтяжёлых нуклидов могут быть использованы для уточнения ядерных моделей и массовых формул, предсказывающих положение "острова" стабильности нуклидов, обладающих повышенной энергией связи. В работе дан список нуклидов, входящих в рассматриваемые  $\alpha$ -цепочки с изотопами нобелия и лоуренсия,  $Q\alpha$ -величины для которых неизвестны, но необходимы для уточнения массовой поверхности в этой области, что указывает направление для дальнейших спектроскопических исследований, необходимых для построения неизвестного ландшафта Сверхтяжёлых.

#### Личный вклад автора

Представленные результаты диссертации получены автором или при его активном участии. Личный вклад автора включил:

1. Создание системы стабилизации магнитного поля на установке SHIPTRAP. Эта работа включила в себя:
  - а) Создание системы стабилизации температуры.
  - б) Создание программы управления стабилизирующей системой.
  - в) Создание системы стабилизации давления.
  - г) Тестирование и оптимизация работы систем стабилизации.
2. Подготовка и проведение эксперимента по прямым измерениям масс радионуклидов  $^{203-207}\text{Rn}$  и  $^{213}\text{Ra}$  на установке SHIPTRAP. Обработка и анализ полученных данных.
3. Подготовка и проведение эксперимента по прямым измерениям масс сверхтяжёлых нуклидов  $^{252,254,255}\text{No}$  и  $^{255,256}\text{Lr}$  на установке SHIPTRAP. Обработка и анализ полученных данных. Определение масс сверхтяжёлых нуклидов Rf ( $Z = 104$ ), Db ( $Z = 105$ ), Sg ( $Z = 106$ ), Hs ( $Z = 108$ ) и Ds ( $Z = 110$ ) на основе полученных экспериментальных данных.

### Основные положения, выносимые на защиту:

1. Создание системы стабилизации магнитного поля на установке SHIPTRAP. Системы стабилизации температуры внутри магнита и давления паров гелия в гелиевом криостате позволили значительно уменьшить временные флуктуации магнитного поля, вследствие изменения температуры и давления окружающей среды. Это методическое внедрение позволило повысить прецизионность установки в результате существенного сокращения систематической ошибки измерений резонансных частот и напрямую связанных с ними значений масс.

2. Проведение серии экспериментов по измерениям масс тяжёлых радионуклидов  $^{203-207}\text{Rn}$  и  $^{213}\text{Ra}$  на установке SHIPTRAP. На защиту выносятся:

а) Измерение масс радионуклидов  $^{203-207}\text{Rn}$  и  $^{213}\text{Ra}$ .

Массы данных радионуклидов были впервые нами измерены прямым методом на установке SHIPTRAP. При этом были улучшены табличные значения масс  $^{205}\text{Rn}$ ,  $^{206}\text{Rn}$  и  $^{213}\text{Ra}$ .

б) Подтверждение магического числа  $N = 126$ .

Результаты измерений для нуклидов, находящихся вблизи замкнутой нейтронной оболочки, свидетельствуют о том, что хорошо известное магическое число нейтронов  $N = 126$ , заметно проявляющееся в изотопах свинца, остаётся магическим и для изотопов Ra.

3. Проведение эксперимента по измерению масс сверхтяжёлых нуклидов  $^{252,254,255}\text{No}$  и  $^{255,256}\text{Lr}$  на установке SHIPTRAP. На защиту выносятся:

а) Измерение масс изотопов nobelium и lawrencium.

В эксперименте, в котором участвовал диссертант, были измерены массы  $^{252,254,255}\text{No}$  и  $^{255,256}\text{Lr}$ . Погрешность измеренных масс составляет меньше 15 кэВ (кроме  $^{256}\text{Lr}$ ). Нуклид  $^{256}\text{Lr}$  является самым тяжёлым и с наименьшим сечением образования нуклидом, исследованным в ловушках Пеннинга.

б) Измерение масс  $^{255}\text{No}$  и  $^{255,256}\text{Lr}$ , выполненные впервые.

в) Экспериментальная идентификация магического числа нейтронов  $N = 152$ .

Полученные данные напрямую указывают на существование предсказанной ранее нейтронной деформированной оболочки  $N = 152$ .

г) Определение масс сверхтяжёлых нуклидов Rf ( $Z = 104$ ), Db ( $Z = 105$ ), Sg ( $Z = 106$ ), Hs ( $Z = 108$ ) и Ds ( $Z = 110$ ) на экспериментальном базисе выполненных диссертантом исследований.

### Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на следующих международных конференциях:

- The XVIIIth "Colloque GANIL", Port-en-Bessin, Normandy, France, 23-28 September, 2013.
- 25th International Nuclear Physics Conference (INPC 2013), Firenze, Italy, 2 - 7 June, 2013.
- XXXII Mazurian Lakes Conference on Physics, Piaski, Poland, 11 – 18 September, 2011.
- The 4th International Conference on the Chemistry and Physics of the Transactinide Elements, Sochi, Russia, 5 - 11 September, 2011.
- Advances in Radioactive Isotope Science - ARIS 2011, Leuven, Belgium, May 29 – June 3, 2011.
- DPG Spring Meeting, Münster, Germany, 21-25 March, 2011.
- Zakopane Conference on Nuclear Physics, August 30 - September 5, 2010.

По теме диссертации опубликованы 4 статьи [1, 2, 3, 4].

### Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы; содержит 148 страниц, 59 рисунков и 11 таблиц. Приведённый список литературы включает 95 источников.

### **Содержание работы**

Во **введении** сформулированы цели и задачи работы, обосновывается актуальность исследований, отмечены научная новизна и практическая ценность результатов, кратко излагается содержание отдельных глав.



В **первой главе** рассмотрено применение значений масс ядер в области ядерной физики, физики элементарных частиц, астрофизики, и отдельно рассмотрено их использование для изучения сверхтяжёлых ядер.

Рассматриваются основные экспериментальные методы определения масс ядер. К ним относятся не прямые методы определения масс в ядерных реакциях,  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадах; и прямые методы с использованием магнитного масс-спектрометра, времяпролётного масс-спектрометра и накопительного кольца. Одной из особенностей современных методик измерения масс является переход от измерения кинетических энергий, как в случае определения Q-величин, или отношений напряжений в случае обычной масс-спектрометрии, к определению времени и частоты. Последняя величина может быть измерена с непревзойдённой точностью. Наибольшая точность измерения масс стабильных и радиоактивных нуклидов достигнута с помощью ионных ловушек. Относительная массовая точность на накопительных кольцах достигает  $2 \cdot 10^{-7}$ , а с помощью ловушек Пеннинга точность может достигать  $10^{-8}$  и лучше для короткоживущих нуклидов с периодом полураспада 100 мс и  $10^{-11}$  для стабильных нуклидов.

Во **второй главе** рассмотрена работа ионной ловушки Пеннинга и её использование для измерения масс ионов. В ловушке Пеннинга суперпозиция сильного однородного магнитного поля и слабого электростатического квадрупольного поля обеспечивает 3-х мерное пространственное удержание заряженной частицы. Движение иона в ловушке Пеннинга представляет собой суперпозицию аксиального движения вдоль линии магнитного поля и двух радиальных движений - модифицированного циклотронного и магнетронного. Манипуляции и измерения, проводимые с ионами в ловушке Пеннинга, осуществляются путём возбуждения их собственных движений радиочастотным (РЧ) электромагнитным полем. В наших измерениях использовались дипольное и квадрупольное возбуждения.

Путём измерения собственной циклотронной частоты иона  $\omega_c = 2\pi\nu_c = \frac{q}{m}B$ , определяют отношение заряда к массе  $q/m$  исследуемого иона в ловушке,

где  $B$  - модуль вектора магнитной индукции. Существуют две основные методики измерения циклотронной частоты захваченного иона: времяпролётный ионный циклотронный резонанс (ВПИЦР) [5] и Фурье-трансформ ионный циклотронный резонанс (ФТИЦР) [6]. Также недавно был разработан фазовый метод определения циклотронной частоты [7].

В наших измерениях мы использовали метод ВПИЦР, в котором за счёт разницы в энергиях между резонансными и нерезонансными ионами, проявляющейся в разнице времён пролёта ионов, определяется циклотронная частота  $\nu_c$ . Метод заключается в конвертации изначального магнетронного движения иона в модифицированное циклотронное движение, при котором радиальная энергия иона максимальна, путём приложения РЧ квадрупольного поля. После приложения РЧ поля ловушка Пеннинга открывалась, и ионы попадали в пространство дрейфа, где на них действовал градиент магнитного поля, под действием которого радиальная энергия ионов полностью переходила в аксиальную. Ионы долетали до детектора, находящемся снаружи магнита, при этом фиксировалось их время прибытия, относительно времени открытия ловушки. Производились возбуждения РЧ полем на разных частотах около расчетного значения  $\nu_c$ . В резонансном случае, когда частота РЧ поля совпадала с собственной циклотронной частотой иона  $\nu_c$ , конвертация магнетронного движения в модифицированное циклотронное была полной, следовательно энергия радиального движения была максимальной, и время пролёта ионов до детектора было минимальным. По минимуму резонансной кривой определялась циклотронная частота ионов  $\nu_c$ , связанная с их массой  $m$  (см. рис. 2). Ширина резонанса обратно пропорциональна времени прикладываемого возбуждения РЧ полем.

В **третьей главе** описана экспериментальная установка SHIPTRAP (GSI, Германия), на которой были выполнены измерения в рамках данной работы. Установка SHIPTRAP является высокопрецизионным масс-спектрометром, построенным для прямых измерений масс тяжёлых и сверхтяжёлых элементов. Она установлена позади сепаратора тяжёлых ионов SHIP в GSI, где ионы

производятся в реакциях слияния-испарения в результате взаимодействия ядер мишени с ядрами первичного пучка. Продукты реакции останавливаются в газонаполненной камере. Далее ионы в виде непрерывного пучка через извлекающий радиочастотный квадруполь (РЧК) попадают в газонаполненный РЧК, где они охлаждаются и накапливаются в группы. Затем они транспортируются к системе, состоящей из двух ловушек Пеннинга, находящихся в сверхпроводящем магните в поле 7 Тл. Первая ловушка Пеннинга предназначена для охлаждения движения ионов и выделения ионов одного вида. Вторая ловушка предназначена для прецизионных измерений масс. Для регистрации ионов используются кремниевые и МКП (микроканальные пластинки) детекторы.

Магнитное поле калибруется ионами с хорошо известной табличной массой. В наших экспериментах использовались ионы  $^{133}\text{Cs}^+$  и  $^{208}\text{Pb}^+$ . В эксперименте определяется отношение частоты эталонного иона к частоте исследуемого иона  $r = \frac{\nu_{c,ref}(t)}{\nu_c(t)}$ . Масса атома  $m_{atom}$  выражается через массу эталонного атома  $m_{atom,ref}$  и отношение частот  $r$  следующим образом:  $m_{atom} = \frac{x}{x_{ref}} \cdot (m_{atom,ref} - x_{ref}m_e) \cdot r + xm_e$ , где  $x$  и  $x_{ref}$  - зарядовые состояния исследуемого и эталонного ионов, соответственно, и  $m_e$  - масса электрона.

**Четвёртая глава** посвящена стабилизации магнитного поля на установке SHIPTRAP. В ионной ловушке Пеннинга измерение массы иона производится определением его циклотронной частоты  $\nu_c$ , которая пропорциональна величине магнитного поля  $B$ . Флуктуации магнитного поля ведут к флуктуациям циклотронной частоты и накладывают предел на точность определения массы нуклида. Особое значение это имеет при длительных измерениях масс редких нуклидов, имеющих малые выходы и требующих, следовательно, больших времён набора статистики. Поэтому необходимо уменьшить временные флуктуации магнитного поля. К таким флуктуациям могут приводить различные факторы, в частности изменения температуры и давления окружающей среды, которые и были рассмотрены.

Для уменьшения флуктуаций температуры в трубе магнита была разработана, собрана и протестирована система стабилизации температуры. Эта работа включила следующие этапы: а) сборка системы стабилизации температуры; б) создание программного обеспечения, для работы и управления стабилизирующей системой; в) экспериментальная оптимизация процедуры стабилизации. Температура магнита варьируется при помощи потока нагретого воздуха, вдуваемого вентилятором в пространство зазора между магнитом и вакуумной трубой, в которой располагаются ловушки Пеннинга. Для нагревания потока воздуха используется нагревательный элемент, подключенный к источнику питания, который управляется контрольной программой, написанной в LabVIEW. Мультиметр измеряет сопротивление резистора RT 100, закреплённого на трубе магнитного зазора. Сопротивление резистора RT 100 зависит от температуры и очень чувствительно к её изменениям. Программа сравнивает эту температуру с заданной температурой и посылает сигнал на источник питания, который выдаёт соответствующее нагревательное напряжение. Таким образом, реализуется отрицательная обратная связь между температурой магнита и температурой потока воздуха. Использование такой стабилизации позволило уменьшить дневные флуктуации температуры (несколько °C) до флуктуаций не больше  $\pm 0,02$  °C.

Давление в гелиевом криостате магнита также оказывает влияние на магнитное поле. Это давление было стабилизировано путём регулирования вылетающих паров гелия из криостата с помощью электронного клапана, который управлялся регулятором, работающим на основе пропорционально-дифференциально-интегрального цикла. Использование системы стабилизации давления позволило уменьшить флуктуации давления (типично - несколько мбар) до  $\pm 0,1$  мбар относительно среднего значения.

Измерения с калибровочными ионами  $^{133}\text{Cs}^+$  показали влияние температуры и давления на магнитное поле. Относительная погрешность, вносимая изменением магнитного поля во время измерений в отсутствие стабилизации, составила  $\delta_B = 3,54(17) \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$ . При работающих системах

стабилизации температуры и давления она составила  $\delta_B = 7,6(64) \cdot 10^{-11} \text{ ч}^{-1}$ . Таким образом, стабилизация магнитного поля позволила уменьшить погрешность, связанную с флуктуациями магнитного поля, более чем в 460 раз.

В пятой главе описывается серия экспериментов, посвященных прямым измерениям масс  $^{203-207}\text{Rn}$  и  $^{213}\text{Ra}$  на установке SHIPTRAP. Массы приведённых нуклидов впервые были измерены прямым методом. Для  $^{203}\text{Rn}$  была измерена масса изомерного состояния с энергией 362(5) кэВ и спином  $13/2^+$ , а для остальных нуклидов - массы основных состояний.

В таблице 1 приведены экспериментальные значения для атомных масс  $m_{atom}$  и избытков масс  $ME_{\text{экспер}}$  ( $ME = m_{atom} - A$ ). Для сравнения приведены литературные значения избытков масс  $ME_{AME}$ , взятые из AME2012 [8]. В результате измерений на SHIPTRAP были улучшены точности массовых значений нуклидов  $^{205}\text{Rn}$ ,  $^{206}\text{Rn}$  и  $^{213}\text{Ra}$  по сравнению с литературными значениями AME2012, примерно в 6, 1,5 и 2 раза, соответственно.

Таблица 1. Атомные массы измеренных нуклидов  $^{203-207}\text{Rn}$  и  $^{213}\text{Ra}$  и сравнение экспериментальных значений избытка массы  $ME_{\text{экспер}}$  и литературных  $ME_{AME}$ . В скобках указаны погрешности последних цифр.

Нуклид	Атомная масса, а. е. м.	$ME_{\text{экспер}}$ , кэВ	$ME_{AME}$ , кэВ	$ME_{\text{экспер}} - ME_{AME}$ , кэВ
$^{203m}\text{Rn}$	202,993792(30)	-5783(28)	-5797(24)	-15(37)
$^{204}\text{Rn}$	203,991445(16)	-7969(15)	-7983(15)	-14(21)
$^{205}\text{Rn}$	204,991736(9)	-7698(8)	-7714(50)	-16(51)
$^{206}\text{Rn}$	205,990189(11)	-9139(10)	-9115(15)	23(18)
$^{207}\text{Rn}$	206,990677(28)	-8685(26)	-8635(8)	50(27)
$^{213}\text{Ra}$	213,000367(12)	342(11)	358(21)	16(23)

На рис. 1 показаны энергии  $S_{2n}$  для изотопов Rn и Ra с числом нейтронов  $N$  от 116 до 130, полученные из экспериментов, включая рассмотренные

измерения на SHIPTRAP. Энергия отделения двух нейтронов  $S_{2n}$  плавно убывает, приближаясь к магическому числу  $N = 126$ . Как только нейтронная оболочка становится полностью заполненной, энергия  $S_{2n}$  при дальнейшем изменении числа нейтронов резко падает, вследствие уменьшения энергии связи нейтронов сверх заполненной оболочки. Таким образом, перегиб кривых зависимости  $S_{2n}$  от  $N$  говорит о наличии замкнутой нейтронной оболочки при  $N = 126$ . Этот вывод следует и из наших измерений, включающих массу  $^{213}\text{Ra}$ .

Проведённые измерения на пучке радиоактивных нуклидов  $^{203-207}\text{Rn}$  и  $^{213}\text{Ra}$  на SHIPTRAP явились проверкой готовности установки перед измерениями масс сверхтяжёлых нуклидов.

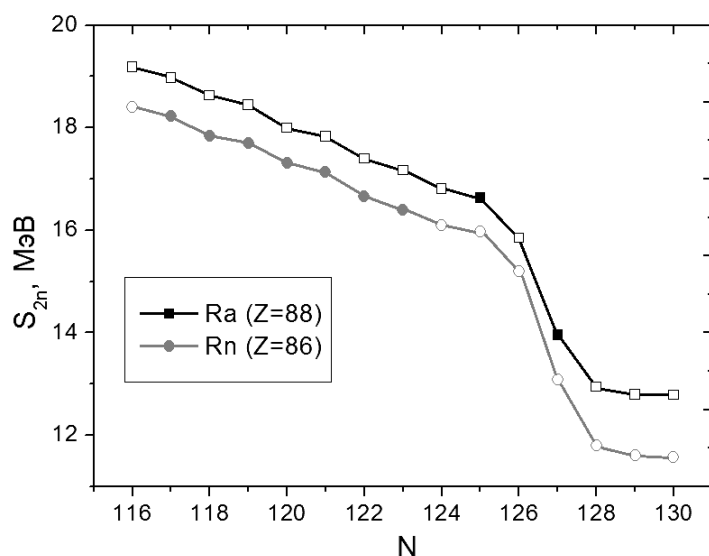


Рисунок 1. Энергии отделения двух нейтронов  $S_{2n}$  в зависимости от числа нейтронов  $N$  для изотопов Rn (кружки) и Ra (квадратики). Заполненными точками отмечены  $S_{2n}$ , рассчитанные с использованием результатов экспериментов на SHIPTRAP.

Незаполненные точки показывают значения  $S_{2n}$ , взятые из AME2012. Погрешности измерений заключены в точках.

**Шестая глава** посвящена измерениям масс изотопов нобелия и лоуренсия. В эксперименте на установке SHIPTRAP, проведённом диссертантом, были измерены массы  $^{252,254,255}\text{No}$  и  $^{255-256}\text{Lr}$ . Массы исследуемых нуклидов определялись методом ВПИЦР (пример резонансной кривой для ионов  $^{255}\text{Lr}^{2+}$  показан на рис. 2). Измерения циклотронной частоты проводились с двукратно

заряженными ионами изотопов нобелия и лоуренсия. Для калибровки магнитного поля использовались ионы  $^{133}\text{Cs}^+$ .

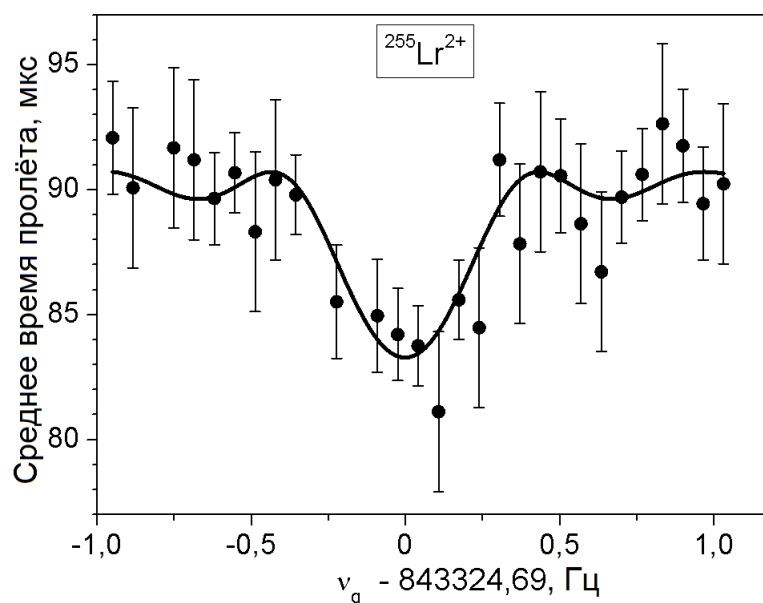


Рисунок 2. Полученный в эксперименте времяпролётный циклотронный резонанс ионов  $^{255}\text{Lr}^{2+}$ . Время возбуждения  $T_{exc} = 2$  с.

Таблица 2. Атомные массы измеренных нуклидов  $^{252-255}\text{No}$  и  $^{255,256}\text{Lr}$  и сравнение экспериментальных значений избытка массы  $ME_{экспер}$  и литературных  $ME_{AME}$  (AME2003). В скобках указаны погрешности последних цифр. Знак # означает, что приведенные массовые величины были вычислены на основе систематических трендов.

Нуклид	Атомная масса, а. е. м.	$ME_{экспер}$ , кэВ	$ME_{AME}$ , кэВ	$ME_{экспер} - ME_{AME}$ , кэВ
$^{252}\text{No}$	252,088960(15)	82866(14)	82881(13)	-15(19)
$^{253}\text{No}$	253,090560(14)	84356(13)	84470#(100#)	-114(101)
$^{254}\text{No}$	254,090963(11)	84731(10)	84724(18)	7(20)
$^{255}\text{No}$	255,093193(15)	86809(14)	86854(10)	-45(17)
$^{255}\text{Lr}$	255,096565(13)	89950(12)	90060#(210#)	-110(210)
$^{256}\text{Lr}$	256,098505(74)	91757(69)	91870#(220#)	-113(231)

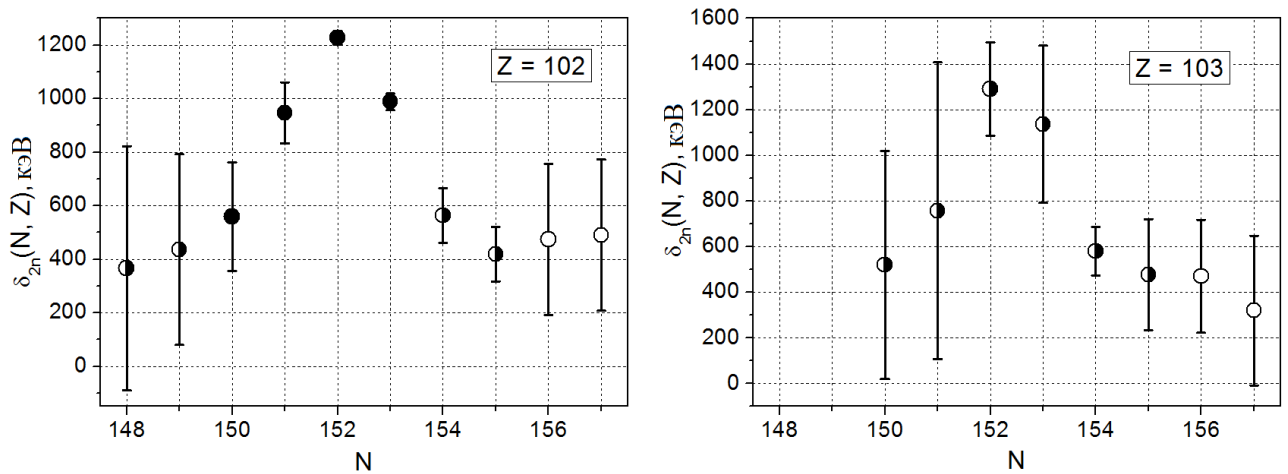


Рисунок 3. Двухнейтронные щели  $\delta_{2n}$  для изотопов нобелия и лоуренсия.

Заполненные кружки показывают  $\delta_{2n}$ , рассчитанные с использованием двух экспериментальных значений масс SHIPTRAP; полузаполненные – с использованием одного значения; пустые – полностью основанные на табличных массах AME2012.

Результаты проведенного эксперимента были объединены с результатами предыдущего эксперимента на SHIPTRAP, в котором были измерены массы  $^{252-254}\text{No}$ . В таблице 2 приведены экспериментальные значения для атомных масс  $m_{atom}$  и избытков масс  $ME_{\text{экспер}}$  и для сравнения литературные значения избытков масс  $ME_{AME}$ , взятые из AME2003 [9] (версия AME2012 уже включила наши результаты).

Исследуемые изотопы нобелия и лоуренсия находятся вокруг предсказанной нейтронной деформированной оболочки  $N = 152$ . Рассчет значений двухнейтронной щели  $\delta_{2n}$  для изотопов нобелия ( $Z = 102$ ) и изотопов лоуренсия ( $Z = 103$ ), с использованием наших результатов, показал наличие максимума при  $N = 152$ , что является прямым экспериментальным доказательством существования нейтронной оболочки  $N = 152$  для деформированных ядер.

Массы измеренных нуклидов, совместно со спектроскопическими данными по  $\alpha$ -распадам, позволили определить массы более тяжёлых нуклидов вплоть до Ds ( $Z = 110$ ), входящих в соответствующие  $\alpha$ -цепочки. При этом массы ряда нуклидов были уточнены.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы.



## Список публикаций по теме диссертации:

- [1] E. Minaya Ramirez, D. Ackermann, K. Blaum, M. Block, C. Droese, Ch. E. Düllmann, M. Dworschak, M. Eibach, S. Eliseev, E. Haettner, F. Herfurth, F. P. Heßberger, S. Hofmann, J. Ketelaer, G. Marx, M. Mazzocco, D. Nesterenko, Yu. N. Novikov, W. R. Plaß, D. Rodríguez, C. Scheidenberger, L. Schweikhard, P. G. Thirolf, C. Weber, *Direct Mapping of Nuclear Shell Effects in the Heaviest Elements* // Science 337, pp. 1207-1210 (2012).
- [2] C. Droese, D. Ackermann, L.-L. Andersson, K. Blaum, M. Block, M. Dworschak, M. Eibach, S. Eliseev, U. Forsberg, E. Haettner, F. Herfurth, F. P. Heßberger, S. Hofmann, J. Ketelaer, G. Marx, E. Minaya Ramirez, D. Nesterenko, Yu. N. Novikov, W. R. Plass, D. Rodríguez, D. Rudolph, C. Scheidenberger, L. Schweikhard, S. Stolze, P. G. Thirolf and C. Weber, *High-precision mass measurements of  $^{203-207}\text{Rn}$  and  $^{213}\text{Ra}$  with SHIPTRAP* // Eur. Phys. J. A 49, 13 (2013).
- [3] C. Droese, M. Block, M. Dworschak, S. Eliseev, E. Minaya Ramirez, D. Nesterenko, L. Schweikhard, *Investigation of the magnetic field fluctuation and implementation of a temperature and pressure stabilization at SHIPTRAP* // Nucl. Instr. Meth. A 632, pp. 157-163 (2011).
- [4] Dmitriy Nesterenko, *Temperature stabilization of the SHIPTRAP magnet* // GSI International Students Program 2008, Reports Book, pp. 99-102 (2008).

## Цитируемая литература:

- [5] M. König, G. Bollen, H.-J. Kluge, T. Otto, J. Szerypo, *Quadrupole excitation of stored ion motion at the true cyclotron frequency* // Int. J. Mass Spectrom. Ion Process 142, pp. 95-116 (1995).
- [6] A. G. Marshall, *Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry* // Acc. Chem. Res. 18, pp. 316-322 (1985).
- [7] S. Eliseev, K. Blaum, M. Block, C. Droese, M. Goncharov, E. Minaya Ramirez, D. A. Nesterenko, Yu. N. Novikov, and L. Schweikhard, *Phase-Imaging Ion-Cyclotron-Resonance Measurements for Short-Lived Nuclides* // Phys. Rev. Lett. 110, 082501 (2013).
- [8] M. Wang, G. Audi, A. H. Wapstra, F. G. Kondev, M. MacCormick, X. Xu, and B. Pfeiffer, *The AME2012 atomic mass evaluation. (II). Tables, graphs and references* // Chinese Physics C, Vol. 36, No. 12, pp. 1603-2014 (2012).
- [9] G. Audi, A. H. Wapstra and C. Thibault, *The AME2003 atomic mass evaluation. (II). Tables, graphs and references* // Nucl. Phys. A. 729, pp. 337-676 (2003).