

## Ядерная физика

В соответствии с «дорожной картой» ОИЯИ в 2010–2016 гг. сохранятся следующие основные направления исследований в области ядерной физики низких и промежуточных энергий: синтез и изучение физических и химических свойств сверхтяжелых элементов с использованием тяжелых ионов, фундаментальные исследования с нейтронами, прикладные исследования.

Уникальные возможности ускорителей тяжелых ионов ОИЯИ и экспериментальных установок обусловили создание широких международных коллабораций с научными центрами стран-участниц ОИЯИ, а также с научными центрами в других странах, ориентирующихся на проведение исследований в Дубне.

### 1. Эксперименты на ускорителях ЛЯР

#### **Синтез и изучение ядерно-физических свойств сверхтяжелых элементов**

В 2010–2016 гг. усилия будут концентрироваться на дальнейшем, более детальном изучении уже открытых изотопов сверхтяжелых элементов, а также на поиске новых методов синтеза более тяжелых элементов. Значительное внимание будет уделено синтезу элемента с  $Z=117$ . Планируются как эксперименты по изучению ядерно-физических свойств новых изотопов, так и эксперименты по изучению химических свойств сверхтяжелых элементов с  $Z=111, 113$  и, возможно,  $115$  и  $117$ .

#### **Изучение характеристик спонтанного и вынужденного деления ядер**

Механизмы образования и распада тяжелых и сверхтяжелых ядер в реакциях с тяжелыми ионами будут исследоваться на спектрометрах, позволяющих изучать массово-энергетические распределения осколков деления, предравновесные до- и послеразрывные нейтроны, а также множественности и энергии  $\gamma$ -квантов.

#### **Масс- и ядерная спектрометрия изотопов тяжелых и трансфермиевых элементов**

Для прецизионного измерения масс и изучения физических и химических свойств этих элементов будет использован сепаратор MASHA на пучке модернизированного циклотрона У400М. Будет продолжена реализация проекта GABRIELA по  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -спектроскопии трансфермиевых изотопов.

#### **Изучение механизмов реакций со стабильными и радиоактивными ядрами**

Регулярные эксперименты с ускоренными ионами радиоактивных изотопов, полученными на комплексе DRIBs (Dubna Radioactive Ion Beams), начались в декабре 2004 года. Эти эксперименты будут продолжены на установках, оборудованных криогенными мишенями и многопараметрическими детектирующими системами.

Для полномасштабной реализации научных планов подготовлен проект DRIBs-III, включающий в себя модернизацию существующих ускорителей и экспериментальных установок, создание высокоэффективных экспериментальных установок нового поколения, создание новых экспериментальных площадей и универсального ускорителя для получения высокоинтенсивных пучков ионов как стабильных, так и радиоактивных изотопов.

### 2. Ускорительный комплекс DRIBs-III

Целью проекта является расширение набора ускоряемых ионов как стабильных, так и радиоактивных изотопов, существенное повышение интенсивности и качества пучков. Реализация проекта DRIBs-III предусматривает:

- завершение модернизации циклотронов У400, У400М;
- создание нового экспериментального зала ЛЯР;
- создание экспериментальных установок нового поколения;
- создание высокоинтенсивного универсального ускорителя тяжелых ионов.

### 3. Создание нового экспериментального зала ЛЯР

Планируется строительство нового экспериментального зала площадью  $\approx 2500\text{м}^2$ . Он будет использован для работы с пучками радиоактивных и экзотических ядер и размещения новых экспериментальных установок, в том числе установок из других исследовательских центров.

#### Финансирование (тыс. долл. США)

Работы	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Модернизация действующих ускорителей тяжелых ионов:							
комплектация оборудования и изготовление систем У400Р	2 000						
монтаж, наладка систем, запуск У400Р		1 000					
Поддержка экспериментов	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000
Создание нового экспериментального зала ЛЯР:							
техническое задание, проект	1 000						
строительные работы		5 000	5 000				
галерея, каналы пучков				2 000			
Разработка и создание экспериментальных устройств постоянного действия:							
физические и химические сепараторы, системы сбора и транспорта продуктов реакций, радиохимическая лаборатория II класса и др.	1 000	3 000	2 000	2 000	3 000	2 000	2 000
Создание высокоинтенсивного ускорителя тяжелых ионов ( $A \leq 100$ , $E \leq 10$ МэВ·А, $I \geq 10$ мкА·ч):							
техническое задание, проект		1 000					
изготовление			3 000	6 000	10 000		
монтаж, каналы пучков, запуск					2 000		
<b>Итого</b>	<b>5 000</b>	<b>11 000</b>	<b>11 000</b>	<b>11 000</b>	<b>16 000</b>	<b>3 000</b>	<b>3 000</b>

#### **4. Создание экспериментальных установок длительного действия**

В Лаборатории ядерных реакций начато проектирование следующих экспериментальных установок:

- универсальный газонаполненный сепаратор для синтеза и изучения свойств сверхтяжелых элементов;
- криогенный детектор для изучения химических свойств сверхтяжелых элементов;
- пресепаратор для радиохимических и масс-спектрометрических исследований;
- системы сбора и получения однозарядных ионов в газовой среде (gas catcher) для масс-спектрометрии и получения радиоактивных ядер для комплекса DRIBs;
- радиохимическая лаборатория II класса;
- сепаратор радиоактивных нейтронообогащенных ядер для DRIBs;
- универсальный спектрометр для изучения реакций, вызываемых экзотическими ядрами на пучке сепаратора;
- широкоапертурный спектрометр осколков спонтанного и вынужденного деления ядер;
- электромагнитный сепаратор для изучения реакций с пучками комплекса DRIBs;
- система детектирования мгновенных нейтронов для комплекса DRIBs;
- детекторы гамма-квантов.

Все представляемые проекты находятся в высокой степени проработки, и их реализация может быть начата через 1–3 месяца после принятия решения о финансировании.

#### **5. Создание высокоинтенсивного ускорителя тяжелых ионов**

Новый ускоритель значительно расширит возможности существующего ускорительного комплекса ЛЯР и будет обеспечивать высокоинтенсивными пучками ускоренных тяжелых ионов средних масс экспериментальные установки в новом экспериментальном зале ЛЯР. На основании проведенного анализа выбран ускоритель циклического типа — циклотрон DC200. Подготовлены технические условия, задание и начато проектирование ускорителя. Новый циклотрон будет обеспечивать ускорение ионов от углерода до ксенона до энергий 5–10 МэВ/нуклон с возможностью ступенчатой и плавной вариации. Для ионов с массами  $A < 90$  интенсивность пучков должна быть не ниже  $5 \cdot 10^{13}$  1/с.

Таким образом, модернизация действующих ускорителей (У-400, У 400М) и создание нового циклического ускорителя обеспечит возможность проведения экспериментов с ускоренными ионами от дейтерия до урана в широком диапазоне энергий.

Реализация программы научных исследований Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова на период 2010–2016 гг. на базе ускорительного комплекса DRIBs-III позволит расширить тематику решаемых задач, синтезировать новые сверхтяжелые элементы и обеспечит ОИЯИ сохранение лидирующего положения на главных направлениях ядерно-физических исследований с тяжелыми ионами низких и промежуточных энергий на ближайшие 25–30 лет.

#### **6. Нейтронная ядерная физика**

Традиционные исследования ОИЯИ в области нейтронной ядерной физики будут выведены на новый уровень благодаря высокому разрешению нового источника нейтронов — установки ИРЕН, которая будет в течение планового периода развиваться. Основная задача развития первой очереди установки ИРЕН — достижение проектных параметров ускорителя ЛУЭ-200 и обеспечение стабильной работы на физический эксперимент.

### План развития установки ИРЕН

**2009 г.:** начало работы в двухсменном режиме с мощностью пучка 1,4 кВт (частота 50 Гц, длительность импульса по быстрым нейтронам 200 нс, средняя энергия электронов 50 МэВ, импульсный ток 2,8 А, выход нейтронов  $10^{12} \text{ с}^{-1}$ ).

**2010 г.:** развитие радиочастотной системы с новым клистроном. Это позволит увеличить мощность пучка примерно в 2 раза за счет увеличения средней энергии электронов и увеличить выход нейтронов примерно до  $3 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ .

**2011–2012 гг.:** дальнейшее развитие радиочастотной системы и начало работы со второй ускоряющей секцией. Это позволит довести энергию ускоренных электронов до проектного значения 200 МэВ и мощность пучка до 5,5 кВт, при этом выход нейтронов ожидается на уровне  $7 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ .

**2012–2015 гг.:** модернизация модуляторов с целью увеличения частоты до проектного значения 150 Гц. Разработка и создание неразмножающей урановой мишени. Доведение мощности пучка до 10–15 кВт и обеспечение выхода нейтронов с мишени на уровне нескольких единиц на  $10^{13} \text{ с}^{-1}$ , что поставит установку ИРЕН в один ряд с наиболее интенсивными источниками нейтронов данного типа.

### Финансирование (тыс. долл. США)

Работы по развитию ИРЕН	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Техническое обслуживание и эксплуатация	70	130	200	250	350	350	400
Совершенствование радиочастотной системы	200						
Дальнейшее совершенствование радиочастотной системы, сборка второго модулятора и ускорительной секции		320	100				
Модернизация модуляторов, разработка и создание неразмножающей урановой мишени			360	670	670	580	400
Развитие систем установки, экспериментальной и инженерной инфраструктуры	70	180	220	200	250	300	730
<b>Итого</b>	<b>340</b>	<b>630</b>	<b>880</b>	<b>1 120</b>	<b>1 270</b>	<b>1 230</b>	<b>1 530</b>

### Нейтронные эксперименты

Также будут проводиться эксперименты на реакторе ИБР-2М — в основном это работы, для которых необходимы более высокие потоки нейтронов, на установке ЭГ-5 — эксперименты с быстрыми нейтронами, низкофоновые измерения и прикладные исследования, а также на внешних источниках нейтронов.

Работы будут проводиться по трем основным направлениям:

- (1) фундаментальные исследования ядерных реакций под действием нейтрона,**
- (2) исследования фундаментальных свойств нейтрона и физика УХН,**
- (3) прикладные и методические работы.**

### (1) Фундаментальные исследования ядерных реакций под действием нейтрона

Проведение первых экспериментов на ИРЕН	2009 г.
Уточнение константы слабого взаимодействия в экспериментах по измерению нарушения Р-четности. Определение величины асимметрии на уровне $10^{-8}$	2012 г.
Поиск редких мод деления ядер. Определение вероятностей экзотических мод распада	2013–2014 гг.
Получение полных, парциальных и дифференциальных сечений (n,p)-, (n, $\alpha$ )-реакций на различных изотопах	2010–2016 гг.
Поиск нейтронных резонансов с различной структурой волновых функций, для разных изотопов	2012–2016 гг.
Поиск синглетного состояния дейтрона. Определение его времени жизни или установление верхнего предела	2012 г.
Получение ядерных данных для реакторных и конструкционных материалов	2012–2016 гг.

### (2) Исследования фундаментальных свойств нейтрона, физика УХН

Прямое определение амплитуды n-n-рассеяния с точностью 5–10%	2012 г.
Изучение эффекта ускоренного вещества, в том числе в опыте с гигантским ускорением $10^5$ g	2013 г.
Проверка слабого принципа эквивалентности для нейтрона с точностью на первом этапе $10^{-4}$ и перспективой $10^{-5}$	2014–2016 гг.
Измерение дважды дифференциальных сечений рассеяния УХН, ОХН на нанообразованиях. Разработка источников УХН нового типа	2015–2016 гг.
Измерение длины n,e-рассеяния новыми методами. Определение длины n,e-рассеяния с точностью $\sim 2$ –3%	2012 г.

### (3) Прикладные и методические работы

Создание детекторной системы для гамма-активационного анализа на ИРЕН. Проведение экспериментов	2010/ 2011–2016 гг.
Создание стенда прикладных исследований на установке ИРЕН. Эксперименты по наработке изотопов	2010/ 2011–2016 гг.
Проведение биомониторинга различных территорий России и ряда стран-участниц ОИЯИ с использованием нейтронно-активационного анализа; анализ новых материалов, поверхностей, качества продуктов питания, биомедицинские исследования	2010–2016 гг.

### Финансирование (тыс. долл. США)

#### Научные исследования

Работы	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Фундаментальные исследования ядерных реакций под действием нейтрона	35	80	125	170	185	255	280
Исследования фундаментальных свойств нейтрона, физика УХН	45	80	90	95	95	100	155
Прикладные и методические работы	65	110	155	210	255	275	315
<b>Итого</b>	<b>145</b>	<b>270</b>	<b>370</b>	<b>475</b>	<b>535</b>	<b>630</b>	<b>750</b>