



---

**федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова**

**ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**кафедра физики элементарных частиц**

**Курсовая работа по теме**

**«Исследование и получение экзотических ядер. Моделирование  
процессов синтеза и распада ядра»**

**Выполнил студент 2 курса:**

**Скулкин Антон Дмитриевич**

**Преподаватель:**

**Доцент кафедры ФЭЧ, к.ф.-м.н**

**Фотина Ольга Владиленовна**

**Содержание**



Фундаментальная проблема ядерной физики - получение и изучение свойств ядер, находящихся в экстремальном состоянии - экзотических ядер. Это ядра,

- имеющие большой угловой момент ("бешено" вращающиеся ядра),
- высокую энергию возбуждения ("горячие" ядра),
- сильнодеформированные ядра (супер- и гипердеформация,
- ядра с необычной конфигурацией),
- ядра с аномально высоким числом нейтронов или протонов (нейтроноизбыточные и протоноизбыточные ядра),
- сверхтяжёлые ядра с числом протонов  $Z > 110$ .

## Получение экзотических ядер

Искусственный синтез экзотических ядер - сложная задача, требующая нетрадиционных методов решения. Для этого используются ускорители тяжелых ионов с энергиями от десятков мегаэлектронвольт до сотен гигаэлектронвольт (для преодоления кулоновской энергии отталкивания и выше). При энергиях выше кулоновского барьера возможны различные каналы реакции, вероятность которых зависит от энергии ядра-снаряда, от свойств самих взаимодействующих ядер, а также от расстояния, на котором сталкиваются два ядра (радиус взаимодействия). На рис.2 схематически представлены различные процессы, происходящие с двумя сталкивающимися ядрами, в зависимости от радиуса взаимодействия. При лобовых столкновениях с энергиями ниже порога фрагментации двух ядер ( $\sim 30$  МэВ/нуклон), когда происходит полный развал, фрагментация ядер частицы и мишени, в основном протекают реакции полного слияния ядер мишени и бомбардирующего иона с образованием нового составного ядра, имеющего заряд и массу, близкую к сумме зарядов и масс двух взаимодействующих ядер. Это новое составное ядро имеет очень высокую температуру, так как вся кинетическая энергия бомбардирующей частицы

переходит во внутреннюю энергию возбуждения нового ядра, и большой угловой момент, то есть большую скорость вращения. В таком состоянии это экзотическое ядро существует всего лишь  $10^{-16}$  секунды и затем переходит в менее экзотическое состояние, "остывая" и уменьшая скорость вращения. Релаксация может происходить по-разному. Тепловая энергия кипящего ядра сбрасывается в основном из-за испарения нейтронов и заряженных частиц (по аналогии с горячей водяной каплей), а энергия вращения благодаря испусканию гамма-квантов. После этого ядро переходит в основное состояние, уменьшая массу на число испарившихся нейтронов, которое может достигать значительной величины (до 18-22 нейтронов).

## Легчайшие экзотические ядра

Наиболее стабильными являются ядра с близким числом нейтронов и протонов, так как в них осуществляется максимальное число (n-p)-взаимодействий. Чистые (n-n)-системы являются нестабильными. Нестабильные ядра (с отрицательной энергией связи) могут существовать в виде ядерных систем, в которых взаимодействие нуклонов приводит к появлению некоторых ядерных состояний, хотя и чрезвычайно короткоживущих ( $\sim 10^{-21}$  секунды). Исследование таких короткоживущих ядерных состояний дает важнейшую информацию о возможности дальнейшего продвижения к островкам стабильности, которые предположительно существуют в "море" нестабильности. Первый такой островок может существовать для чисто нейтронных ядер с числом нейтронов около 20. Однако в настоящее время экспериментально синтезировать такие нейтронные ядра невозможно. Пока удалось исследовать стабильность динейтрона ( $2n$ ), тринейтрона ( $3n$ ), тетранейтрона ( $4n$ ). Они оказались нестабильными, однако динейтрон оказался "почти стабилен".

Интригующая ситуация существует со свойствами сверхтяжелых изотопов

водорода и гелия. Сначала была обнаружена так называемая "гелиевая аномалия", когда стабильность ядер с увеличением числа нейтронов при приближении к линии стабильности не уменьшалась, а даже увеличивалась (ядро  ${}^8\text{He}$  оказалось более стабильным, чем ядро  ${}^6\text{He}$ ). Такую же зависимость обнаружили и для несвязанных изотопов гелия: гелия-5, гелия-7, гелия-9, гелия-10. В системе гелия-10 (два протона и восемь нейтронов) был обнаружен резонанс, который свидетельствовал, что это ядро не связано всего лишь на 1 мегаэлектронвольт. Впоследствии такая же аномалия наблюдалась и для тяжелых несвязанных изотопов водорода (водород-6 оказался более стабильным, чем водород-4), проявляющихся также в виде резонансных состояний. Эти закономерности в поведении энергии связи тяжелых изотопов позволили более оптимистически взглянуть на проблему существования острова стабильных легких элементов.

## Пучки ускоренных экзотических ядер

Исследование свойств ядер, сильнообогащенных нейтронами, позволило обнаружить еще одно интересное явление - существование так называемых "нейтронных гало". Это явление появляется у ядер, находящихся у границы стабильности, таких, как  ${}^8\text{He}$ ,  ${}^{11}\text{Li}$ ,  ${}^{14}\text{Be}$ ,  ${}^{17}\text{B}$ . В этих ядрах было экспериментально обнаружено высокое значение нуклонного радиуса. Оказалось, что у  ${}^{11}\text{Li}$  два слабосвязанных нейтрона находятся на большом удалении от основного остова, представляющего из себя ядро  ${}^9\text{Li}$ . Радиусы этих ядер в несколько раз превышают радиусы соседних ядер ( ${}^{11}\text{Li}$  радиус оказался равным 12 Фм, тогда как для  ${}^9\text{Li}$  он равен 2.5 Фм). Необычная структура этих ядер проявляется в увеличении вероятности протекания ядерных реакций с такими ядрами, поскольку она пропорциональна радиусу взаимодействующих ядер. Эта особенность ядер с гало сыграла немаловажную роль в развитии нового направления ядерной физики - физики пучков ускоренных экзотических ядер.

Для исследования свойств экзотических ядер во многих случаях нужны их пучки, ускоренные до энергий выше кулоновского барьера взаимодействия. Это необходимо для того, чтобы могла протекать соответствующая ядерная реакция между экзотическим ядром и ядром мишени. Тогда, исследуя продукты таких реакций, можно делать выводы о свойствах самих взаимодействующих ядер. Проблема использования пучков экзотических ядер для физических исследований сводится, в основном, к трем задачам: получение пучков экзотических ядер нужной интенсивности, ускорение их до необходимой энергии и регистрация продуктов ядерных реакций.

## Сверхтяжелые ядра

Последний элемент, существующий в природе, - это уран, заряд которого или порядковый номер в периодической таблице Д.И. Менделеева составляет 92. Все элементы с  $Z > 92$  синтезированы искусственно с использованием интенсивных потоков нейтронов или пучков ускоренных тяжелых ионов. Нейтронный метод синтеза новых элементов, использующий потоки нейтронов из реакторов или ядерных взрывов, дал возможность синтезировать новые элементы вплоть до фермия ( $Z = 100$ ). Однако ядра тяжелее 100-го элемента - фермия нейтронным методом синтезировать не удалось. Принципиальное ограничение на синтез новых элементов таким способом связано с существованием других типов распада в цепочке образующихся ядер, например, спонтанного деления, которое разрывает цепочку ядер, образующихся после захвата нейтронов. Дальнейшее продвижение в область трансфермиевых элементов стало возможным лишь с появлением ускорителей тяжелых ионов. При слиянии двух ядер может образоваться новое ядро с зарядом, равным сумме зарядов двух ядер.

Элемент под номером 114 был получен в 2000 году путем бомбардировки на циклотроне У-400 мишени из плутония-242 ядрами кальция-48, а 116-й элемент - в 2004 году в реакции кальция-48 и кюрия-245.

114 и 116 элементы названы "первыми птицами с острова стабильности".

## Литература

- 1) **Ю. Э. Пенионжкевич** Ядерные реакции с тяжелыми ионами и синтез новых ядер  
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/mirrors/synt.html>
- 2) **Ю. Э. Пенионжкевич** Физика экзотических ядер  
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/mirrors/exot.htm>

### Ознакомительная литература

- 1) **Р. А. Еремин** МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В АНАЛИЗЕ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ ОРГАНИЧЕСКИМИ РАСТВОРАМИ (Автореферат, 2014)
- 2) **Ю.Э. Пенионжкевич** Пучки радиоактивных ядер. "Физика элементарных частиц и атомного ядра". 1994. Т.25, вып.4
- 3) **Л. Валентэн** Субатомная физика: ядра и частицы. Т.2. М.: Мир, 1986.