

**КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ**

**Физико-технический факультет**

**Кафедра теоретической и ядерной физики**

**Согласовано**

Декан факультета

\_\_\_\_\_ Давлетов А.Е.  
" \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2016 г.

**Утверждено**

На заседании Научно-методического  
Совета университета

Протокол № \_\_\_\_ « \_\_\_\_ » \_\_\_\_ 2016 г.

Первый Проректор

\_\_\_\_\_ Ахмед-Заки Д.Ж.  
" \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2016 г.

**«Механизм ядерных реакций с учетом процессов кластеризации»**  
(наименование дисциплины)

Специальность **«6D060500-Ядерная физика»**  
(шифр, название)

Форма обучения дневная, 1 курс, 2 семестр  
(дневная, заочная)

**Алматы 2016 г**

**УМК дисциплины составлен Жаугашева С.А., доцент, к.ф.-м.н.,**  
(Ф.И.О., должность, ученая степень и звание составителя(ей))

На основании учебного плана дисциплины, ГОСО по специальности  
**«6D060500-Ядерная физика»**  
(на основании каких документов)

---

Рассмотрен и рекомендован на заседании кафедры

---

от «» \_\_\_\_\_ 2016 г., протокол №  
Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ Абишев М.Е.  
(роспись)

**Рекомендовано методическим Советом (бюро) факультета**  
«» \_\_\_\_\_ 2016 г., протокол №

Председатель \_\_\_\_\_ Габдуллина Г.Л.  
(роспись)

**КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. аль-Фараби**  
**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**  
**Образовательная программа по специальности «6D060500-Ядерная физика»**

Утвержде  
на заседании Ученого совета \_\_\_\_\_  
факультета  
Протокол № \_\_\_\_\_ от « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016  
*Декан факультета* \_\_\_\_\_  
*Давлетов А.Е.*

**СИЛЛАБУС\***  
**основному элективному**  
**модулю 1 «Механизм ядерных реакций с учетом процессов**  
**кластеризации» 3 кредита**  
**1 курс, р/о**

**СВЕДЕНИЯ** о преподавателе:

**Жаугашева Сауле Аманбаевна, к.ф.-м.н., доцент:**

e-mail: [Zhaugasheva.Saule.kaznu.kz](mailto:Zhaugasheva.Saule.kaznu.kz)

каб.: 204

**ПАСПОРТ модуля:**

**Цель преподавания курса** является пояснить, каким образом математический формализм помогает понять наблюдаемые явления. Согласно современной точке зрения, основными структурными единицами материи являются кварки и лептоны, взаимодействующие с обменом квантами полей Янга - Миллса (если не учитывать гравитацию). Это значит, что вид того или иного взаимодействия полностью определяется алгебраической структурой соответствующей группы внутренней симметрии. В частности, сильные взаимодействия описываются квантовой хромодинамикой - калибровочной теорией, базирующейся на группе SU(3). С электрослабыми взаимодействиями, которые описываются вне стандартной моделью Вайнберга - Салама, связана группа SU(3) x U(1),

**Задачи курса** после изучения курса докторант должен хорошо представлять современную картину микромира- мира ядер, внутриядерных процессов, мира элементарных частиц.

При освоении курса **«Механизм ядерных реакции с учетом процессов**

**кластеризации»** докторантам необходимо **знать**:

- структуру и свойства ядер, ядерные силы, закон сохранения энергии при ядерных взаимодействиях и т.д.

▪ **Пререквизиты, постреквизиты.** Ядерная физика, Физика атомного ядра и элементарных частиц, Введение в физику атомного ядра.

**7. Пререквизиты:** физика и математика в объеме общих курсов, высшая математика.

**8. Постреквизиты:** квантовая механика, общий курс ядерной физики, физика ядерных реакций.

**9. Краткое содержание курса:** В последнее время калибровочным полям уделяется большое внимание. Объясняется это тем, что в рамках квантовой теории калибровочных полей удалось достигнуть существенного прогресса в решении ряда важных проблем теории поля и физики элементарных частиц. Задачи изучения дисциплины сводятся к следующему: В результате изучения курса магистранты должны иметь представление: о законах симметрии и сохранение при взаимодействиях элементарных частиц; о классификации элементарных частиц;  $SU(2)$ ,  $SU(3)$ , о мультиплетях, о новых квантовых числах: изоспине, странности, гиперзаряде, чарме, ботонном и топном и др. В ходе курса рассматриваются калибровочные поля, промежуточные мезоны, нарушение симметрии, механизм Хиггса, угол Вайнберга, константы электрослабых частиц и структура пространства времени.

### СТРУКТУРА, ОБЪЕМ И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

№	Задания	Форма проведения	Методические рекомендации	Рекомендуемая литература
1	Экзотические ядра. Свойство и основные характеристики	Индивидуальная письменная работа (ИПР)	По Интернету и по обзорной публикации	Журналы
2	Переход к системе центр масс для трехтельной системы	Индивидуальная письменная работа (ИПР)	Изучать журналы и статьи	Книги по Few-Body systems
3	О форме потенциала нуклон – нуклонное взаимодействия	Дискуссия	Спиновый и изоспиновый инвариантности	Бор Мотельсон
4	Вычисление энергетического	Индивидуальная письменная	Использования квантово	Учебник по квант -

	спектра для потенциала параболического конфаймента	работа (ИПР)	механические знания для двухтельной системы	механики
5	Нейтрон избыточного ядра	Дискуссия	Экспериментальные результаты	Журналы и статьи
6	Вычисление энергетического спектра трехтельной системы	Индивидуальная письменная работа (ИПР)	Использования адиабатические приближения	Книги по Few-Body systems
7	Вычисление магнитного момента протона и нейтрона	Дискуссия	Экспериментальные и теоретические результаты	Учебник по ядерной физике
8	O E1 переходы и волновые функции ядра	Индивидуальная письменная работа (ИПР)	Использования учебников по квант-механики	Учебник по ядерной физике
9	Дипольные и октупольные моменты ядра	Индивидуальная письменная работа (ИПР)	Отклонение от сферической симметрии	Учебник по ядерной физике
10	Потенциал Вуд-Саксона и энергетический спектр ядра	Индивидуальная письменная работа (ИПР)	Использования квантово-механические знания	Учебник по ядерной физике (Бор Мотельсон)

## 10. Литература

### *Основная литература:*

1. С. Газирович, “Физика элементарных частиц”, перевод с английского, М., Наука, 1969 г., 741 стр.
2. Н.П. Коноплева, В.Н. Попов, “Калибровочные поля”, М. атомиздат, 1980 г.
3. Л.Б. Окунь “Физика элементарных частиц”, М. Наука, 1988 г.
4. Ф. Клоуз “Кварки и протоны: введение в теорию”, М., Мир, 1982 г.

### *Дополнительная литература:*

1. М. Динейхан, Н. Қойшыбаев, Элементар бөлшектер, КазНУ, Алматы, 2002 ж. – 192 б.
2. Флюгге З. Задачи по квантовой механике. М.: Мир, 1978.-643 с.
3. В. Де Альфаро, С. Фубини, Г. Фурлан, К. Росетти “Токи в физике адронов”, изд. Мир, 1976г.

**12. Формы рубежного контроля и экзамена.** Контрольные работы, устный экзамен, письменный экзамен (по выбору магистранта).

**13. Политика выставления оценок.** Рубежный контроль I – 30%, (7 неделя); Рубежный контроль II – 30%, (14 неделя); Экзамен – 40 %.

**Политика курса.** Обязательное посещение занятий и активность на практических занятиях, активность на СРМП. Шкала оценок:

- A – 95-100% - отлично;
- A – 90-94% - отлично;
- B – 75-89% - хорошо;
- C – 60-74% - удовлетворительно;
- D – 50-59% - удовлетворительно;
- F – 0-49% - неудовлетворительно.

Экзаменационная оценка по дисциплине определяется из итогового показателя из успеваемости в соответствии со следующей таблицей:

A	95-100%	Отлично
A-	90-94%	
B+	85-89%	Хорошо
B	80-84%	
B-	75-79%	
C+	70-74%	Удовлетворительно
C	65-69%	
C-	60-64%	
D+	55-59%	
D	50-54%	
F	0-49%	Неудовлетворительно

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

**ТИПОВАЯ УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА**

---

**Механизмы ядерных реакций с учетом процессов кластеризации**

---

(код и наименование дисциплины)

**«6D060500-Ядерная физика»**

---

(код и наименование специальности)

Объем 3 кредита

Алматы 2014  
**ПРЕДИСЛОВИЕ**

**1 РАЗРАБОТАНА И ВНЕСЕНА КазНУ им. аль-Фараби**

Авторы:

Буртебаев Насрулла Таханович, д.ф.-м.н., профессор кафедры теоретической и ядерной физики физико-технического факультета КазНУ им.аль-Фараби;

**2 РЕЦЕНЗЕНТЫ**

Дуйсебаев Альнур Дуйсебаевич, д.ф.-м.н., профессор кафедры теоретической и ядерной физики физико-технического факультета КазНУ им.аль-Фараби;

**3 УТВЕРЖДЕНА И ВВЕДЕНА В ДЕЙСТВИЕ** приказом  
Министерства образования и науки Республики Казахстан  
от «\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 года № \_\_\_\_

**4** Типовая учебная программа разработана в соответствии с  
государственным общеобязательным стандартом образования специальности  
«6D060500-Ядерная физика»  
( наименование специальности)

**5 РАССМОТРЕНА** на заседании Республиканского Учебно-методического совета от «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 года Протокол № \_\_\_\_



## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Рассмотрен физический механизм ядерных реакций при низких энергиях, обусловленный пространственной протяженностью электрона. В случае атомного ядра используют различные модели, которые называют *механизмами реакции*. Существует множество различных механизмов. Изучение реакций, в которых передается дейтрон, тритон и частица, может, кроме всего, прояснить ситуацию с ассоциированием в ядрах. Она рассчитана на подготовку специалистов физико-технического профиля специализаций «6D060500-Ядерная физика».

**Перечень дисциплин, усвоение которых необходимо для изучения данного курса (пререквизиты дисциплины):**

Для изучения данной дисциплины необходимо знание курсов:

Метод функции Грина, Квантовая механика, Квантовая теория поля

## ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН ДИСЦИПЛИНЫ

№	Название тем
1	Введение
2	Общие понятия
3	Экзотические ядра. Свойство и основные характеристики
4	Переход к системе центр масс для трехтельной системы
5	О форме потенциала нуклон –нуклонное взаимодействия
6	Вычисление энергетического спектра для потенциала параболического конфаймента
7	Нейтрон избыточного ядра
8	Вычисление энергетического спектра трехтельной системы
9	Вычисление магнитного момента протона и нейтрона
10	О E1 переходы и волновые функции ядра
11	Дипольные и октупольные моменты ядра
12	Потенциал Вуд-Саксона и энергетический спектр ядра

## СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### Введение

**Целью** данного курса является изучение физического механизма ядерных реакций при низких энергиях, обусловленный пространственной протяженностью электрона. В случае атомного ядра используют различные модели, которые называют *механизмами реакции*. Существует множество различных механизмов. Изучение реакций, в которых передается дейтрон, тритон и частица, может, кроме всего, прояснить ситуацию с ассоциированием в ядрах.

**Задачи.** В результате изучения дисциплины докторанты овладеют следующими компетенциями:

- знать *механизмы ядерных реакций*;
- *освоить* метод реакции передачи с легкими кластерными ядрами;
- *иметь* четкие понятия об объектах, к которым применима теория неабелевых калибровочных полей.
- *уметь* производить вычисления в физике адронов.

Роль данной области науки огромна и ее место находится на переднем крае фундаментальных исследований. Коллоборации всего мира участвуют в грандиозных научно-исследовательских проектах по общей эгидой ЦЕРНа результаты, которых и дают почву для дальнейших размышлений и открытий в этой области науки.

Краткий исторический очерк науки дисциплины. Начиная с 1896 года с экспериментов Рентгена и фундаментальных экспериментов по рассеянию альфа-частиц естественного природного радиоактивного источника на тонкой золотой фольге, поставленных Эрнестом Резерфордом и его планетарной модели атома, предложенной в 1911 году было сделано много открытий по уточнению и дополнению новыми теориями, как самого атома так и его структуры ядра. За этот небольшой по времени период знания о атоме, а особенно о его ядре претерпели много изменений. К настоящему моменту наука располагает многочисленными моделями структуры ядра, но все они не описывают в полном понимании его структуру, а лишь только некотором приближении.

### **Основные свойства нейтрона.**

**Нейтрон** - элементарная частица, не имеющая заряда. Нейтрон принадлежит к классу барионов.

### **Открытие**

Открытие нейтрона (1932) принадлежит физику Дж. Чедвику, за которое он получил Нобелевскую премию по физике в 1935 году.

В 1930 Вальтер Боте и Г. Бекер, работавшие в Германии, обнаружили, что если высокоэнергетичные альфа-частицы, испускаемые полонием-210, попадают на некоторые лёгкие элементы, в особенности на бериллий или

литий, образуется излучение с необычно большой проникающей способностью. Сначала считалось, что это — гамма-излучение, но выяснилось, что оно обладает гораздо большей проникающей способностью, чем все известные гамма-лучи, и результаты эксперимента не могут быть таким образом интерпретированы. Важный вклад сделали в 1932 Ирен и Фредерик Жолио-Кюри. Они показали, что если это неизвестное излучение попадает на парафин или любое другое соединение, богатое водородом, образуются протоны высоких энергий. Само по себе это ничему не противоречило, но численные результаты приводили к нестыковкам в теории.

### **Основные характеристики**

Масса:  $939,565360(81)$  МэВ ( $1,6749485.10^{-24}$  г,  $1,00866491560(55)$  а.е.м.), что примерно на 0,14 % больше, чем масса протона Спин:  $1/2$  (фермион) Время жизни в свободном состоянии:  $885,7 \pm 0,8$  секунды (период полураспада — 614 секунд) Магнитный момент:  $-1,91304273(45)$  ядерного магнетона

Несмотря на нулевой электрический заряд, нейтрон не является истинно нейтральной частицей. Античастицей нейтрона является антинейтрон, который не совпадает с самим нейтроном.

### **Строение и распад**

Считается установленным, что нейтрон является связанным состоянием трёх кварков: одного «верхнего» (u) и двух «нижних» (d) кварков (кварковая структура udd). Поразительная близость масс протона и нейтрона обусловлена свойством приближённой изотопической инвариантности: в протоне (кварковая структура uud) один d-кварк заменяется на u-кварк, но поскольку массы этих кварков очень близки, такая замена слабо сказывается на массе составной частицы. Поскольку нейтрон всё же тяжелее протона, то он может распадаться в свободном состоянии. Единственным каналом распада, разрешённым законом сохранения энергии и законами сохранения электрического заряда, барионного и лептонного квантовых чисел, является бета-распад нейтрона на протон, электрон и электронное антинейтрино (а также, возможно, гамма-квант). Поскольку этот распад идёт с образованием лептонов и изменением аромата кварков, то он обязан происходить только за счёт слабого взаимодействия.

### **Источники нейтронов**

Нейтронные источники, источники нейтронных пучков. Применяются в ядерно-физических исследованиях и в практических приложениях (см., например, Нейтронный картаж, Нейтронография). Все Нейтронные источники характеризуются: мощностью (число нейтронов, испускаемых в 1 сек), энергетическим и угловым распределением, поляризацией нейтронов и режимом испускания (непрерывным или импульсным). В первых Нейтронные источники для получения нейтронов использовались ядерные реакции (a, n) на ядрах  $^7\text{Be}$  или  $^{10}\text{B}$ , а также фоторасщепление дейтрона или ядра Be, т. е. реакция (g, n). В первом случае Нейтронные источники представляет собой равномерную механическую смесь порошков  $^7\text{Be}$  и радиоактивного изотопа, испускающего a-частицы (Ra, Po, Pu и др.),

запаянную в ампулу. Соотношение количеств Вe и, например, Ra  $\sim 1/5$  (по весу). Их мощность определяется допустимым количеством  $\alpha$ -активного препарата. Обычно активность  $\sim 10$  кюри, что соответствует испусканию  $\sim 10^7$ — $10^8$  нейтронов в 1 сек (см. табл.). Нейтронные источники со смесью Ra + Вe и Am + Вe являются одновременно источниками интенсивного  $\gamma$ -излучения ( $10^4$ — $10^5$   $\gamma$ -квантов на 1 нейтрон). Нейтронные источники со смесью Po + Вe и Pu + Вe испускают только 1  $\gamma$ -квант на 1 нейтрон.

В случае фотонейтронного ампульного источника ампула содержит полный цилиндр или шар из Вe или с тяжёлой водой D<sub>2</sub>O, внутри которого размещается источник  $\gamma$ -излучения. Энергия  $\gamma$ -квантов должна быть выше пороговой энергии фоторасщепления ядер D или Вe (см. Фотоядерные реакции). Недостаток таких нейтронных источников — интенсивное  $\gamma$ -излучение; применяется в тех случаях, когда нужны простыми средствами получить моноэнергетические нейтроны. В ампульных нейтронных источниках используется также спонтанное деление тяжёлых ядер (см. Ядра атомного деления). После появления ускорителей заряженных частиц для получения нейтронов стали использоваться реакции (p, n) и (d, n) на лёгких ядрах, а также реакции (d, pn). В специальных ускорительных трубках протоны и дейтроны ускоряются в электрическом поле, создаваемом напряжением  $\sim 10^5$ — $10^7$  в. Такие нейтронные генераторы разнообразны по размерам и характеристикам (см. рис.). Некоторые из них размещаются на площади 50—100 м<sup>2</sup> и обладают мощностью —  $10^{12}$ — $10^{13}$  нейтронов в 1 сек (энергию можно варьировать от  $10^5$  до  $10^7$  эв). Существуют и миниатюрные ускорительные трубки (диаметры 25—30 мм), испускающие  $10^7$ — $10^8$  нейтронов в 1 сек, которые используются в нейтронном каротаже.

Для получения нейтронов с энергиями 2—15 Мэв наиболее употребительны реакции D (d, n)<sup>3</sup>He и T (d, n)<sup>4</sup>He. Мишенью служит гидрид металла (обычно Zr или Ti) с дейтерием или тритием. В реакции D + d значительный выход нейтронов наблюдается уже при энергии дейтронов  $\sim 50$  кэв. Энергия нейтронов при этом  $\sim 2$  Мэв и растёт с ростом энергии протонов. Для нейтронов с энергией 13—20 Мэв предпочтительнее реакция T + d, дающая больший выход нейтронов. Например, при энергии дейтронов 200 кэв из толстой тритиево-циркониевой мишени вылетают нейтроны с энергией  $\sim 14$  Мэв в количестве  $10^8$  в 1 сек на 1 мкк дейтронов.

### **Регистрация нейтронов.**

**Нейтронные детекторы**, приборы для регистрации нейтронов. Действие Н. д. основано на регистрации вторичных частиц, образующихся в результате взаимодействия нейтронов с атомными ядрами. Для регистрации *медленных нейтронов* используются ядерные реакции расщепления лёгких ядер под действием нейтронов [ $^{10}\text{B} (n, \alpha) ^7\text{Li}$ ,  $^6\text{Li} (n, \alpha) ^3\text{H}$  и  $^3\text{He} (n, p)^1\text{H}$ ] с регистрацией  $\alpha$ -частиц и протонов; деления тяжёлых ядер с регистрацией осколков деления (см. *Ядра атомного деления*); *радиационный захват* нейтронов ядрами (n,  $\gamma$ ) с регистрацией  $\gamma$ -квантов, а также возбуждения искусственной радиоактивности. Для регистрации  $\alpha$ -частиц, протонов и осколков деления применяются *ионизационные камеры* и *пропорциональные*

*счётчики*, которые заполняют газообразным BF<sub>3</sub> и др. газами, содержащими В или <sup>3</sup>Н, либо покрывают их стенки тонким слоем твёрдых В, Li или делящихся веществ. Конструкция и размеры таких камер и счётчиков разнообразны. Пропорциональные счётчики могут достигать 50 мм в диаметре и 2 м длины (СНМ-15).

Наибольшей эффективностью к тепловым нейтронам обладают Н. д., содержащие <sup>10</sup>В или <sup>3</sup>Не. Для регистрации медленных нейтронов используются также *сцинтилляционные счётчики* (на кристаллах LiI с примесью Eu, на сцинтиллирующих литиевых стеклах, либо смеси борсодержащих веществ и сцинтиллятора ZnS). Эффективность регистрации тепловых нейтронов в этом случае может достигать 40—60%. В *Объединённом институте ядерных исследований* создан сцинтилляционный Н. д., в котором регистрируются акты радиационного захвата. Он предназначен для нейтронов с энергией до 10 кэВ и имеет эффективность — 20—40%. Эффективность регистрации быстрых нейтронов перечисленными детекторами в сотни раз меньше, поэтому быстрые нейтроны предварительно замедляют в парафиновом блоке, окружающем Н. д. (см. *Замедление нейтронов*). Специально подобранные форма и размеры блоков позволяют получить практически постоянную эффективность регистрации нейтронов в диапазоне энергии от нескольких кэВ до 20 МэВ (всеволновой счётчик). При непосредственном детектировании нейтронов с энергиями ~ 100 кэВ обычно используется упругое рассеяние нейтронов в водороде или гелии или регистрируются ядра отдачи. Так как энергия последних зависит от энергии нейтронов, то такие Н. д. позволяют измерять энергетический спектр нейтронов. Сцинтилляционные Н. д. также могут регистрировать быстрые нейтроны по протонам отдачи в органических и водородсодержащих жидких сцинтилляторах. Некоторые тяжёлые ядра, например <sup>238</sup>U и <sup>232</sup>Th, делятся только под действием быстрых нейтронов. Это позволяет создавать пороговые Н. д., служащие для регистрации быстрых нейтронов на фоне тепловых. Для регистрации продуктов ядерных реакций нейтронов с ядрами В и Li, протонов отдачи и осколков деления используются также *ядерные фотографические эмульсии*. Этот метод особенно удобен в *дозиметрии*, так как позволяет определить суммарное число нейтронов за время облучения. При делении ядер энергия осколков столь велика, что они производят заметные механические разрушения. На этом основан один из способов их обнаружения: осколки деления замедляются в стекле, которое затем травится плавиковой кислотой; в результате следы осколков можно наблюдать под микроскопом. Возбуждение искусственной радиоактивности под действием нейтронов используется для регистрации нейтронов, особенно при измерениях плотности потока нейтронов, так как число распадов (активность) пропорционально потоку нейтронов, прошедшему через вещество (измерение активности можно производить после прекращения облучения нейтронами). Существует большое количество различных изотопов, применяемых в качестве радиоактивных индикаторов нейтронов разных энергий *E*. В тепловой области энергий наибольшее распространение

имеют  $^{55}\text{Mn}$ ,  $^{107}\text{Ag}$ ,  $^{197}\text{Au}$ : для регистрации резонансных нейтронов применяют  $^{55}\text{Mn}$  ( $E = 300$  эв),  $^{59}\text{Co}$  ( $E = 100$  эв),  $^{103}\text{Rh}$ ,  $^{115}\text{In}$  ( $E = 1,5$  эв),  $^{127}\text{I}$  ( $E = 35$  эв),  $^{107}\text{Ag}$ ,  $^{197}\text{Au}$  ( $E = 5$  эв). В области больших энергий используют пороговые детекторы  $^{12}\text{C}$  ( $E = 20$  Мэв),  $^{32}\text{S}$  ( $E = 0,9$  Мэв) и  $^{63}\text{Cu}$  ( $E = 10$  Мэв)

### **Деление ядер под действием нейтронов.**

Деление атомных ядер может быть вызвано различными частицами, однако практически наиболее выгодно использовать для этой цели нейтроны. Отсутствие кулоновского отталкивания позволяет нейтронам со сколь угодно малой кинетической энергией приблизиться к ядру на расстояние меньше радиуса действия ядерных сил. Захват ядром нейтрона приводит к возбуждению ядра, и, если энергия возбуждения достаточна, происходит деление. Величина сечения деления дел всегда меньше величины сечения захвата захв, так как существуют другие каналы распада возбужденных ядер.

### **Особенности применения**

К числу лучших замедлителей, широко используемых в ядерной физике и ядерной технике для превращения быстрых нейтронов в тепловые, относятся вода, тяжёлая вода, бериллий, графит.

#### **Вода**

Достоинства обычной воды как замедлителя — её доступность и дешевизна. Недостатками воды являются низкая температура кипения ( $100$  °С при давлении  $1$  атм) и поглощение тепловых нейтронов. Первый недостаток устраняется повышением давления в первом контуре. Поглощение тепловых нейтронов водой компенсируют применением ядерного топлива на основе обогащённого урана.

#### **Тяжёлая вода**

Тяжёлая вода по своим химическим и теплофизическим свойствам мало отличается от обычной воды. Она практически не поглощает нейтронов, что даёт возможность использовать в качестве ядерного топлива природный уран в реакторах с тяжеловодным замедлителем. Недостатком тяжёлой воды является её высокая стоимость.

#### **Графит**

Природный графит содержит до  $20$  % различных примесей, в том числе и бор, хороший поглотитель. Поэтому природный графит непригоден как замедлитель нейтронов. Реакторный графит получают искусственно из смеси нефтяного кокса и каменноугольной смолы. Сначала из смеси прессуют блоки, а затем эти блоки термически обрабатывают при высокой температуре. Графит имеет плотность  $1,6$ — $1,8$  г/см $^3$ . Он сублимирует при температуре  $3800$ — $3900$  °С. Нагретый в воздухе до  $400$  °С графит загорается. Поэтому в энергетических реакторах он содержится в атмосфере инертного газа (гелий, азот).

#### **Бериллий**

Бериллий один из лучших замедлителей. Он имеет высокую температуру плавления ( $1282$  °С) и теплопроводность, совместим с углекислым газом,

водой, воздухом и некоторыми жидкими металлами. Однако, в пороговой реакции  ${}^9\text{Be}(n, 2n){}^2\alpha$  возникает гелий, поэтому при интенсивном облучении быстрыми нейтронами внутри бериллия накапливается газ, под давлением которого бериллий распухает. Применение бериллия ограничено также его высокой стоимостью. Из бериллия изготавливают отражатели и вытеснители воды в активной зоне исследовательских реакторов.

### **ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ ПРАКТИЧЕСКИХ (СЕМИНАРСКИХ) ЗАНЯТИЙ**

- 1 Экзотические ядра. Свойство и основные характеристики
- 2 Переход к системе центр масс для трехтельной системы
- 3 О форме потенциала нуклон –нуклонное взаимодействия
- 4 Вычисление энергетического спектра для потенциала параболического конфинмента
- 5 Нейтрон избыточного ядра
- 6 Вычисление энергетического спектра трехтельной системы
- 7 Вычисление магнитного момента протона и нейтрона

### **СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

#### ***Основная литература:***

5. С. Газирович, “Физика элементарных частиц”, перевод с английского, М., Наука, 1969 г., 741 стр.
6. Н.П. Коноплева, В.Н. Попов, “Калибровочные поля”, М. атомиздат, 1980 г.
7. Л.Б. Окунь “Физика элементарных частиц”, М. Наука, 1988 г.
8. Ф. Клоуз “Кварки и протоны: введение в теорию”, М., Мир, 1982 г.

#### ***Дополнительная литература:***

1. М. Динейхан, Н. Қойшыбаев, Элементар бөлшектер, КазНУ, Алматы, 2002 ж. – 192 б.
4. Флюгге З. Задачи по квантовой механике. М.: Мир, 1978.-643 с.
5. В. Де Альфаро, С. Фубини, Г. Фурлан, К. Росетти “Токи в физике адронов”, изд. Мир, 1976г.