

Белорусский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе



А.Л.Толстик

2016 г.

Регистрационный № УД-3331 /уч.

## ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Учебная программа учреждения высшего образования  
по учебной дисциплине для специальности  
1-31 04 06 Ядерные физика и технологии

Минск 2016

Учебная программа составлена на основе образовательного стандарта специальности 1-31 04 06 «Ядерная физика и технологии» (ОСВО 1-31 04 06-2013), введенном с 1 сентября 2013 г., и учебного плана специальности 1-31 04 06 «Ядерная физика и технологии», утвержденном 30 мая 2013 г., регистрационный номер УП G31-142/уч.

**СОСТАВИТЕЛЬ:**

**И.Я. Дубовская**, доцент кафедры ядерной физики Белорусского государственного университета, канд. физ.-мат. наук, доцент;

**А.Р. Барткевич**, ассистент кафедры ядерной физики Белорусского государственного университета.

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой ядерной физики физического факультета Белорусского государственного университета  
(протокол № 12 от 1 июня 2016 г.);

Советом физического факультета  
(протокол № 10 от 9 июня 2016 г.)

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа дисциплины «Ядерные реакции» составлена для специализации 1-31 04 06 03 «Физика ядерных реакторов и атомных энергетических установок» специальности 1-31 04 06 «Ядерная физика и технологии» первой степени высшего образования. Программа разработана с учетом соответствующих требований образовательного стандарта специальности 1-31 04 06 «Ядерная физика и технологии» (ОСВО 1-31 04 06-2013).

Предмет ядерной физики и физики высоких энергий в значительной степени состоит в изучении реакций, происходящих с элементарными частицами и атомными ядрами. Именно осуществление столкновений одних частиц с другими и регистрация последствий этих столкновений является единственным экспериментальным методом исследования строения и структуры атомных ядер и элементарных частиц. Кроме того, изучение ядерных реакций лежит в основе понимания особенностей взаимодействия ионизирующего излучения с веществом, а также процессов, происходящих в активной зоне ядерных энергетических установок со специфическими для данных вопросов видом и диапазоном энергий взаимодействующих частиц. Понимание механизмов ядерных реакций является также важной составляющей представлений о нуклеосинтезе элементов в природе и построения модели развития Вселенной.

В дисциплине «Ядерные реакции», с одной стороны, излагаются вопросы, касающиеся общих закономерностей, характеризующих взаимодействие между частицами тех или иных энергий. Сюда относятся кинематика двухчастичной ядерной реакции, элементы квантовой теории рассеяния, а также достаточно глубокое и систематическое изложение основных механизмов и моделей протекания ядерных реакций. С другой стороны, в курсе уделяется большое внимание описанию особенностей ядерных процессов с участием  $\gamma$ -квантов, электронов, нейтронов, тяжелых ионов; рассматриваются реакции деления и синтеза.

*Цель учебной дисциплины:* изучить основные модели и механизмы протекания ядерных реакций; ознакомить с некоторыми типами ядерных превращений.

*Задачи учебной дисциплины:* ввести основные характеристики для описания ядерных реакций; изучить особенности кинематики двухчастичной ядерной реакции; изучить элементы квантовой теории рассеяния.

*Учебный материал дисциплины основан* на базовых знаниях и представлениях, заложенных в следующих общих курсах: «Теоретическая механика», «Квантовая механика», «Физика атома и атомных явлений», «Физика ядра и элементарных частиц».

*Учебный материал дисциплины будет использован* при преподавании следующих дисциплин специализации «Нейтронная физика», «Ядерный топливный цикл», «Вывод АЭС из эксплуатации и обращение с ра-

диоактивными отходами», «Действие излучений на материалы ядерной техники».

Перед преподавателем данной дисциплины ставятся следующие задачи:

- ознакомить обучающихся с методами теории рассеяния;
- систематически изложить основные теории протекания ядерных реакций;
- ознакомить обучающихся с некоторыми типами ядерных реакций;
- способствовать развитию научного мировоззрения обучающихся.

Из множества эффективных педагогических методик и технологий, которые способствуют вовлечению обучающихся в поиск и управление знаниями, приобретению опыта самостоятельного решения разнообразных задач, следует выделить: технологии проблемно-модульного обучения; технологии научно-исследовательской деятельности; проблемно-ориентированный междисциплинарный подход; интенсивное обучение; моделирование проблемных ситуаций и их решение.

Для формирования современных социально-профессиональных компетенций выпускника вуза в практику проведения занятий целесообразно внедрять методики активного обучения и дискуссионные формы.

В результате усвоения дисциплины обучающийся должен

**знать:**

- основные характеристики описания ядерных реакций;
- законы сохранения и правила отбора в ядерных реакциях;
- методы теории рассеяния;
- основные модели и механизмы протекания ядерных реакций.

**уметь:**

- применять законы сохранения при анализе ядерной реакции;
- пересчитывать кинематические характеристики и сечения реакции с участием нерелятивистских частиц из системы центра масс в лабораторную систему и наоборот;
- рассчитывать сечения ядерной реакции в рамках той или иной модели.

**владеть:**

- методами теории рассеяния;
- методами расчета сечений ядерных реакций.

В результате изучения учебной дисциплины «Нейтронная физика» у обучающегося должны быть сформированы следующие **компетенции**:

- Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач.
- Владеть системным и сравнительным анализом.
- Владеть исследовательскими навыками.
- Уметь работать самостоятельно.
- Иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером.

- Иметь лингвистические навыки (устная и письменная коммуникация).

- Обладать качествами гражданственности.

- Быть способным к социальному взаимодействию.

- Обладать способностью к межличностным коммуникациям.

- Владеть навыками здорового образа жизни.

- Применять знания теоретических и экспериментальных основ ядерной физики и ядерных технологий, ядерно-физических методов исследования, методов измерения физических величин, методов автоматизации эксперимента, методов планирования, организации и ведения научно-производственной, научно-педагогической, производственно-технической, опытно-конструкторской работы в области ядерно-физических технологий и атомной энергетики.

- Применять полученные знания фундаментальных положений физики, экспериментальных, теоретических и компьютерных методов исследования, планирования, организации и ведения научно-технической работы.

- Вести переговоры, разрабатывать планы сотрудничества с другими организациями.

- Пользоваться глобальными информационными ресурсами.

- Пользоваться государственными языками Республики Беларусь и иными иностранными языками как средством делового общения.

- Реализовывать методы защиты производственного персонала и населения в условиях возникновения аварий, катастроф, стихийных бедствий и обеспечения радиационной безопасности при осуществлении научной, производственной и педагогической деятельности.

- Осуществлять поиск, систематизацию и анализ информации по перспективным направлениям развития отрасли, инновационным технологиям, проектам и решениям.

- Определять цели инноваций и способы их реализации.

- Оценивать конкурентоспособность и экономическую эффективность разрабатываемых технологий.

- Определять цели инноваций и способы их реализации.

- Оценивать конкурентоспособность и экономическую эффективность разрабатываемых технологий.

- Применять методы анализа и организации внедрения инноваций в научно-производственной, научно-педагогической и научно-технической деятельности.

Форма получения высшего образования — очная, дневная.

Общее количество часов – 90, количество аудиторных часов – 32.

Аудиторные занятия проводятся в виде лекций и управляемой самостоятельной работы (УСР). На проведение лекционных занятий отводится 26 часов, на УСР — 6 часов.

Занятия проводятся на 4-м курсе в 7-м семестре.

Формы текущей аттестации по учебной дисциплине — экзамен (7 семестр).

## СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

### 1. Введение

Основные понятия и терминология при рассмотрении ядерных реакций. Виды и механизмы ядерных реакций. Каналы реакции. Выход реакции. Вероятность и сечение ядерной реакции.

### 2. Кинематика ядерных реакций

Законы сохранения и правила отбора в ядерных реакциях. Экзоэнергетические и эндоэнергетические реакции. Порог ядерной реакции. Законы сохранения зарядов, четности, момента количества движения, изотопического спина. Связь между кинематическими характеристиками и сечением реакции в лабораторной системе координат и системе центра масс.

### 3. Элементы теории рассеяния

Задача рассеяния. Асимптотические состояния. Функция Грина свободной частицы. Асимптотическое поведение волновой функции на больших расстояниях. Амплитуда рассеяния. Дифференциальное сечение. Амплитуда рассеяния в борновском приближении.

Движение частицы в сферических координатах с нулевым потенциалом. Асимптотика волновой функции на больших расстояниях. Сферические волны свободной частицы. Разложение волны де Бройля по парциальным волнам. Матрица рассеяния. Парциальные амплитуды рассеяния и их связь с фазовыми сдвигами. Парциальные сечения и оптическая теорема.

Неупругие столкновения. Сечения реакций. Полное сечение неупругих каналов и оптическая теорема для полного сечения рассеяния. Теорема взаимности.

### 4. Боровский механизм ядерных реакций

Резонансные реакции. Упругий канал. Формула Брейта-Вигнера. Интерференция потенциального и резонансного рассеяния. Нерезонансные реакции через составное ядро.

### 5. Прямые ядерные реакции

Эйкональное приближение и его условия применимости. Дифракционное рассеяние при высоких энергиях. Оптическая модель ядерных реакций. Реакции подхвата и срыва.

## **6. Особенности протекания различных видов ядерных реакций**

Свойства фотоядерных реакций. Гигантский резонанс. Резонансное поглощение и рассеяние гамма-квантов. Реакции под действием электронов. Особенности протекания реакций, вызванных тяжелыми ионами. Генерация сверхтяжелых ядер. Низкоэнергетическое рассеяние нейтрона на протоне. Поляризация частиц при рассеянии с учетом спин-орбитального взаимодействия в ядерном потенциале.

## **7. Реакции деления**

Общие закономерности реакции деления. Энергетические условия. Энергия активации. Цепная ядерная реакция. Коэффициент размножения. Реактивность. Подкритический ядерный реактор.

## **8. Реакция синтеза**

Основные закономерности. Критерий Лоусона. Условия протекания реакции синтеза в подбарьерном режиме. Первичный нуклеосинтез. Синтез элементов в звездах.



## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА ДИСЦИПЛИНЫ

Номер раздела, темы, занятия	Название раздела, темы, занятия; перечень изучаемых вопросов	Количество аудиторных часов					Литература	Формы контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Управляемая самостоятельная работа студента		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>1</b>						
1.1	Классификация ядерных реакций. Основная терминология. Виды и механизмы ядерных реакций. Каналы реакции. Выход реакции. Вероятность и сечение ядерных реакций.	1					[2-5], [9], [11]	1
<b>2</b>	<b>Кинематика ядерных реакций</b>	<b>3</b>				<b>1</b>		
2.1	Экзотермические и эндотермические реакции. Порог ядерной реакции. Связь между кинематическими характеристиками и сечением реакции в лабораторной системе координат и системе центра масс.	3				1	[1], [3-5], [9]	1-3
<b>3</b>	<b>Элементы теории рассеяния</b>	<b>5</b>				<b>2</b>		
3.1	Задача рассеяния. Функция Грина свободной частицы. Асимптотическое поведение волновой функции на больших расстояниях. Амплитуда рассеяния. Дифференциальное сечение. Амплитуда рассеяния в борновском приближении.	2				1	[2-8], [3д]	1-3
3.2	Сферические волны свободной частицы. Разложение волны де Бройля по парциальным волнам. Матрица рассеяния. Парциальные амплитуды рассеяния и их связь с фазовыми сдвигами. Парциальные сечения и оптическая теорема.	2				1	[2-8], [11], [12], [3д]	1-3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3.3	Неупругие столкновения. Сечения реакций. Полное сечение неупругих каналов и оптическая теорема для полного сечения рассеяния. Теорема взаимности.	1					[2-7]	1,2
<b>4</b>	<b>Боровский механизм ядерных реакций.</b>	<b>4</b>				<b>1</b>		
4.1	Резонансные реакции. Упругий канал. Формула Брейта-Вигнера.	2				1	[2-7], [10-12], [1д]	1-3
4.2	Нерезонансные реакции через составное ядро.	2					[2-7], [10-12]	
<b>5</b>	<b>Прямые ядерные реакции</b>	<b>4</b>						
5.1	Эйкональное приближение. Дифракционное рассеяние.	2					[2], [10]	1
5.2	Оптическая модель ядерных реакций. Реакции срыва и подхвата.	2					[1], [4], [5] [2д], [3д]	1
<b>6</b>	<b>Особенности протекания различных видов ядерных реакций</b>	<b>4</b>				<b>1</b>		
6.1	Реакции с тяжелыми ионами. Фотоядерные реакции. Генерация сверхтяжелых ядер.	2					[1], [14], [4д]	1
6.2	Поляризационные эффекты.	2				1	[2], [5-7], [9], [11]	1-3
<b>7</b>	<b>Реакции деления</b>	<b>3</b>				<b>1</b>		
7.1	Общие закономерности реакции деления. Энергетические условия. Энергия активации.	2				1	[1], [14]	1-3
7.2	Цепная ядерная реакция. Коэффициент размножения.	1					[1], [14]	1,2
<b>8</b>	<b>Реакция синтеза</b>	<b>2</b>						
8.1	Основные закономерности. Критерий Лоусона. Синтез элементов в звездах.	2					[1], [15]	1

## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Рекомендуемая литература

#### *Основная*

1. Давыдов А.С. Теория атомного ядра. М.: Физматгиз, 1958.
2. Ситенко А.Г. Теория ядерных реакций. М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Окунев В.С. Основы прикладной ядерной физики и введение в физику ядерных реакторов. М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015.

#### *Дополнительная*

1. Маляров В.В. Основы теории атомного ядра. М.: Наука, 1967.
2. Бор О., Мотельсон Б. Структура атомного ядра. Мир, 1977.
3. Ишханов Б.С., Кэбин Э.И. Экзотические ядра. М.: Изд-во Московского университета, 2002.
4. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. Санкт-Петербург-Москва-Краснодар: Лань, 2009. Тт. 1–3.
5. Давыдов А.С. Квантовая механика. М.: Наука, 1973.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика (нерелятивистская теория). М.: Физматлит, 2004.
7. Балдин А.М., Гольданский В.И., Максименко В.М., Розенталь И.Л. Кинематика ядерных реакций. М.: Атомэнергоиздат, 1968.
8. Ситенко А.Г. Лекции по теории рассеяния. Киев: Высшая школа, 1976.
9. Немец О.Ф., Тернецкий К.О. Ядерные реакции. Киев: Высшая школа, 1977.
10. С. Де Бенедетти Ядерные взаимодействия. М.: Атомиздат, 1968.
11. Мотт Н., Месси Г. Теория атомных столкновений. М.: Мир, 1969.
12. Экспериментальная ядерная физика. Тт. 1-3. Под ред. Сегре Э. М., 1955-1961.
13. Лейн А., Томас Р. Теория ядерных реакций при низких и средних энергиях. М.: ИЛ, 1960.
14. Ходгсон П.Е. Оптическая модель упругого рассеяния. М.: Атомиздат, 1966.
15. Левинджер Дж. Фотоядерные реакции. М.: ИЛ, 1962.
16. Кеслер Г. Ядерная энергетика. М.: Энергоатомиздат, 1986.
17. Крамаровский Я.М., Чечев В.П. Синтез элементов во Вселенной. М.: Наука, 1987.

## **Перечень используемых средств диагностики результатов учебной деятельности**

В качестве средств диагностики и контроля знаний рекомендуется использовать:

1. Выборочный контроль на лекциях;
2. Проверка домашних заданий;
3. Проведение коллоквиумов и контрольных работ;
4. Проведение экзамена по дисциплине.

### **Примерный перечень мероприятий для контроля качества усвоения знаний по учебной дисциплине**

#### *Темы коллоквиумов и контрольных работ*

1. Законы сохранения в ядерных реакциях. Нерелятивистская кинематика двухчастичной ядерной реакции. Квантовая теория рассеяния.
2. Модели и механизмы ядерных реакций. Основные типы ядерных реакций.

### **Рекомендации по контролю качества усвоения знаний и проведению аттестации**

Текущий контроль знаний в семестре проводится как управляемая самостоятельная работа (УСР) на лекциях и осуществляется в форме двух письменных коллоквиумов и двух контрольных работ по вопросам программы. Форма текущей аттестации – экзамен в 7 семестре. Система оценивания – рейтинговая.

Коллоквиумы проводятся в виде письменного ответа на ряд вопросов в рамках тем указанных в разделе о мероприятиях для контроля качества знаний. Каждый коллоквиум включает в себя 10 вопросов на основные определения, понятия и формулы дисциплины. Продолжительность самостоятельной работы 45 минут. Оценка за коллоквиум рассчитывается как сумма баллов, выставленных за каждое задание. Правильный ответ на один вопрос оценивается в 1 балл, неполный ответ – в 0.5 балла, за неправильный ответ или его отсутствие выставляется 0 баллов.

Письменные контрольные работы проводятся по темам коллоквиумов и представляют собой 4 расчетных задачи (продолжительность работы – 90 минут). Решение каждой задачи оценивается в максимум 2 или 3 балла (зависит от уровня сложности). Неполное решение или решение с незначительными ошибками оценивается в половину максимально возможного балла. За неправильное решение или его отсутствие выставляется 0 баллов. Итоговая оценка за контрольную работу рассчитывается как сумма баллов, набранных за решение каждой задачи.

Для студентов, получивших неудовлетворительные оценки хотя бы за одну контрольную работу, либо не явившихся по неуважительной причине, по согласованию с преподавателем и с разрешения заведующего кафедрой мероприятие может быть проведено повторно.

Оценка текущей успеваемости рассчитывается как средняя арифметическая оценка за коллоквиумы и контрольные работы.

Текущая аттестация по учебной дисциплине проводится в форме экзамена.

Экзаменационная оценка и оценка текущей успеваемости служат для определения итоговой оценки по дисциплине, которая рассчитывается как средневзвешенная оценка текущей успеваемости и экзаменационной оценки. Рекомендуемые весовые коэффициенты для оценки текущей успеваемости — 0,4; для экзаменационной оценки — 0,6.

**ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ  
ПО ИЗУЧАЕМОЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ  
С ДРУГИМИ ДИСЦИПЛИНАМИ СПЕЦИАЛЬНОСТИ**

Название дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы по изучаемой учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Нейтронная физика	Кафедра ядерной физики	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте Протокол № 12 от 01 июня 2016.
Ядерный топливный цикл	Кафедра ядерной физики	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте Протокол № 12 от 01 июня 2016.
Вывод АЭС из эксплуатации и обращение с радиоактивными отходами	Кафедра ядерной физики	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте Протокол № 12 от 01 июня 2016.
Действие излучений на материалы ядерной техники	Кафедра ядерной физики	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте Протокол № 12 от 01 июня 2016.

# ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ УВО

Ядерные реакции

на 2019 / 2020 учебный год

№№ пп	Дополнения и изменения	Основание
1.	В тексте преамбулы абзац об эффективных педагогических методиках и технологиях дополнить следующими технологиями и методами обучения: метод учебной дискуссии, методы и приемы развития критического мышления	Поручение Совета Министров Республики Беларусь от 6 марта 2019 г. № 05/209-114/2718р; распоряжение проректора по учебной работе и образовательным инновациям О.И.Чуприс от 13.05.2019 № 276-5512
2.	В перечень дополнительной литературы добавить монографию [18] А.И. Базь, А.М. Зельдович, А.М. Переломов «Рассеяние, реакции и распады в нерелятивистской квантовой механике», М. – 1971 г.	Решение кафедры ядерной физики, протокол № 15 от 27.06.2019 г.
3.	В учебно-методической карте дисциплины в графе «Литература» для тем под номерами 3.2, 3.3, 3.5; 4.1, 4.2; 5.1 – 5.3; 7.2 добавить пособие [18д]	Решение кафедры ядерной физики, протокол № 15 от 27.06.2019 г.

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры ядерной физики (протокол № 15 от 27.06.2019 г.)

Заведующий кафедрой  
ядерной физики  
к.ф.-м.н., доцент



А.И. Тимощенко

УТВЕРЖДАЮ  
Декан физического факультета БГУ  
к.ф.-м.н., доцент



М.С. Тиванов