

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
ФИЛИАЛ МГУ В Г. ДУБНЕ



УТВЕРЖДАЮ  
И.о. директора  
филиала МГУ в г.Дубне  
/ Э.Э. Боос /  
« 04 » 2022 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**Наименование дисциплины:**

Статистическая теория ядерных реакций

---

**Уровень высшего образования:**

Магистратура

---

**Направление подготовки:**

03.04.02 Физика

---

**Направленность (профиль) ОПОП:**

Физика элементарных частиц

---

**Форма обучения:** Очная форма обучения

---

Дубна 2022 г.

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки программы магистратуры 03.04.02 «Физика».

Год (годы) приема на обучение \_\_\_\_\_

**Авторы–составители:**

1. доктор физ.-мат. наук, Платонов Сергей Юрьевич, профессор физического факультета МГУ

Руководитель магистерской программы:

Доктор физ.-мат. наук, профессор академик РАН В.А. Матвеев, заведующий кафедрой физического факультета МГУ

## **Аннотация к рабочей программе дисциплины «Статистическая теория ядерных реакций»**

В курсе дается описание базового формализма статистической теории ядерных реакций. Обсуждаются основные выражения для описания наблюдаемых ядерных реакций: сечения, энергетические спектры и угловые распределения продуктов, времена протекания и т.д. Понятие плотности уровней. Описание плотности уровней ядра в рамках модели Ферми-газа. Методы экспериментального определения плотности уровней ядра. Феноменологическое описание плотности уровней атомных ядер. Влияние на величину плотности уровней оболочечной структуры одночастичного спектра. Влияние корреляционных эффектов сверхпроводящего типа на статистические свойства атомных ядер. Феноменологическое описание влияния коллективных степеней свободы на плотность уровней ядра. Понятие  $\Gamma$ -ширины распада. Конкуренция каналов распада. Сечения реакций, основные положения оптической модели. Каскадные испарительные процессы.

### **Разделы рабочей программы**

1. Место дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы высшего образования (ОПОП ВО).
2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (при наличии)
3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями
4. Формат обучения.
5. Язык обучения.
6. Содержание дисциплины.
7. Объем дисциплины
8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий
9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.
10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).
11. Шкала оценивания.
12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.
13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.
14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

Дисциплина «Статистическая теория ядерных реакций» реализуется на 1-ом курсе в 1-ом семестре магистратуры и входит в состав вариативной части.

## 2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия

Базовые знания в области общей и теоретической физики в объеме классических университетских курсов

## 3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора (индикаторов) достижения компетенции	Результаты обучения
<b>МПК-1</b> Способен решать практические задачи профессиональной деятельности в области физики элементарных частиц на основе фундаментальных знаний	<b>ИМПК-1.1</b> Знает основные разделы физики элементарных частиц: сильные, электромагнитные, слабые взаимодействия, симметрии в физике частиц	<b>З-1</b> Знать: основные модели атомного ядра и их особенности, теорию Хаузера-Фешбаха <b>У-1</b> Уметь: статистически описывать процессы в ядерных реакциях <b>В-1</b> Владеть: способностью описывать и оценивать параметры энергетических уровней атомного ядра

4. **Форма обучения:** очная.

5. **Язык обучения:** русский.

6. **Содержание дисциплины**

*Тема 1. Модель составного ядра.*

Необходимость применения статистических методов при описании ядерных реакций. Характеристики статистического механизма реакций. Гипотеза составного ядра Бора. Факторизованная форма сечения рассеяния через стадию образования составного ядра. Проницаемость, связь с S- матрицей. Формула Бете для интегрального сечения. Вывод соотношения. Понятие проницаемости. Способы расчета проницаемости для различных каналов реакции.

*Тема 2. Теория Хаузера-Фешбаха.*

Приближение изолированных компаунд-состояний. Понятие полной ширины и парциальной ширины распада составного ядра по определенному каналу. Усреднение сечений ядерной

реакции по энергии и квантовым числам компаунд — состояний. Формула Хаузера-Фешбаха. Понятие силовой функции. Радиационная, нейтронная, S-волновая, P-волновая силовая функция. Формула Хаузера-Фешбаха и ее аналог в терминах усредненных ширин. Связь с проницаемостью. Формула Хаузера — Фешбаха — Молдауэра. Поправка на флуктуации ширин. Понятие корреляционной функции. Матрица переходов в представлении моментов. Дифференциальные сечения рассеяния. Форма угловых распределений. Гипотеза составного ядра и теория Хаузера — Фешбаха для перекрывающихся уровней компаунд-состояний. Распределение Портера — Томаса. Интерференция между парциальными амплитудами во входном и выходном каналах реакции. Приложения статистической теории ядерных реакций. Анализ экспериментальных сечений по теории Хаузера — Фешбаха — Молдауэра. Анализ временных характеристик ядерных реакций.

### Тема 3. Плотность уровней атомных ядер.

Понятие плотности уровней. Описание плотности уровней ядра в рамках модели Ферми-газа. Оценка параметров плотности уровней в рамках квазиклассического приближения. Зависимость плотности уровней от энергии возбуждения и углового момента ядер. Методы экспериментального определения плотности уровней ядра. Феноменологическое описание плотности уровней атомных ядер (систематики параметров плотности уровней). Влияние на величину плотности уровней оболочечной структуры одночастичного спектра. Влияние корреляционных эффектов сверхпроводящего типа на статистические свойства атомных ядер. Феноменологическое описание влияния коллективных степеней свободы на плотность уровней ядра. Зависимость коэффициента ротационного наращивания плотности уровней от типа симметрии формы ядра. Учет возбуждений вибрационной природы в рамках фононной модели и модели жидкой капли.

### Тема 4. Статистическое описание процессов распада составных ядер.

Понятие Г-ширины распада ядра. Конкуренция каналов распада. Сечения реакций, основные положения оптической модели. Каскадные испарительные процессы. Описание делимости ядер. Систематики отношения нейтронной и делительной Г-ширин распада. Предравновесные процессы. Стадия установления термодинамического равновесия в ядерной системе. Временная шкала. Обзор существующих моделей. Экситонная модель. Методы расчета угловых распределений и энергетических спектров продуктов предравновесных реакций. Многоступенчатые прямые процессы и многоступенчатые компаунд-процессы.

## 7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в ак. часах					Самостоятельная работа студентов
		Общая трудоемкость	в том числе ауд.занятий			Учебно-практические занятия	
			Общая аудиторная нагрузка	Лекций	Семинаров		
Статистическая теория ядерных реакций	2	72	36	18	18	36	

**8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий**

Изучение курса «Статистическая теория ядерных реакций» включает в себя лекции, на которых рассматривается теоретическое содержание курса; семинарские занятия, предусматривающие углубленное изучение и обсуждение вопросов, обозначенных в темах дисциплины; самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к лекционным и семинарским занятиям. Темы, рассматриваемые на лекциях и изучаемые самостоятельно, закрепляются на семинарских занятиях, по вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации.

№ тем ы		Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы					Са мо ст оя тель на я ра бо та	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации
		Вс его ча со в	Л е к ц и и	С е м и на р ы	Учебно-практические занятия (лабораторные или практические занятия)			
1	Модель составного ядра	15	4	4		7	Оп	
2	Теория Хаузера-Фешбаха	15	4	4		7	КР	
3	Плотность уровней атомных ядер	15	4	4		7	КР	
4	Статистическое описание процессов распада составных ядер	21	6	6		9	Оп	
	Промежуточная аттестация	6				6	экзамен	
<b>ИТОГО:</b>		72	18	18		36		

ДЗ- домашнее задание, Оп- опрос, КР- контрольная работа, Т- тестирование, Реф - реферат

**9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.**

Текущий контроль по дисциплине «Статистическая теория ядерных реакций» осуществляется на лекциях и семинарских занятиях и заключается в оценке активности и качества участия в опросах и собеседованиях по проблемам, изучаемых в рамках тем лекционных занятий, аргументированности позиции; оценивается ширина используемых теоретических знаний.

Промежуточная аттестация по дисциплине «Статистическая теория ядерных реакций» проводится в первом семестре в форме экзамена.

Результаты сдачи экзамена оцениваются по шкале «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично». Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

#### 10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

Перечень оценочных средств, применяемых на каждом этапе проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине, представлены в таблице

Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Представление оценочного средства в фонде
<b>Оценочные средства текущего контроля</b>		
Тематический опрос (в форме ответов на вопросы)	Средство контроля, организованное как специальная беседа по тематике предыдущей лекции и рассчитанное на выяснение объема и качества знаний, усвоенных обучающимися по определенному разделу, теме, проблеме.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Собеседование (в форме беседы, дискуссии по теме)	Средство контроля, организованное как свободная беседа, дискуссия по тематике изучаемой дисциплины, рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по всем изученным разделам, темам; свободного использования терминологии для аргументированного выражения собственной позиции.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Тестирование	Средство контроля, позволяющее получить оценку уровня фактических знаний аспиранта по изученной теме.	Образцы тестов
<b>Оценочные средства промежуточной аттестации</b>		
Письменная работа	Средство, позволяющее оценить сформированность систематических представлений о методах научно-исследовательской деятельности.	Перечень вопросов к экзамену
Собеседование	Средство, позволяющее получить экспертную оценку знаний, умений и навыков по для оценивания и анализа различных фактов и явлений в своей профессиональной области.	Требования к порядку проведения собеседования

## 11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	2/ не зачтено	3/ зачтено	4/ зачтено	5/ зачтено
ЗНАТЬ: основные модели атомного ядра и их особенности, теорию Хаузера-Фешбаха ИМПК-1.1	Отсутствие знаний основных моделей атомного ядра и их особенностей, теории Хаузера-Фешбаха	В целом успешные, но не систематические знания основных моделей атомного ядра и их особенностей, теории Хаузера-Фешбаха	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания основных моделей атомного ядра и их особенностей, теории Хаузера-Фешбаха	Успешные и систематические знания основных моделей атомного ядра и их особенностей, теории Хаузера-Фешбаха
УМЕТЬ: статистически описывать процессы в ядерных реакциях ИМПК-1.1	Отсутствие умения статистически описывать процессы в ядерных реакциях	В целом успешное, но не систематическое умение статистически описывать процессы в ядерных реакциях	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение статистически описывать процессы в ядерных реакциях	Успешное и систематическое умение статистически описывать процессы в ядерных реакциях
ВЛАДЕТЬ: способностью описывать и оценивать параметры энергетических уровней атомного ядра ИМПК-1.1	Отсутствие/фрагментарное владение способностью описывать и оценивать параметры энергетических уровней атомного ядра	В целом успешное, но не систематическое владение способностью описывать и оценивать параметры энергетических уровней атомного ядра	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение способностью описывать и оценивать параметры энергетических уровней атомного ядра	Успешное и систематическое владение способностью описывать и оценивать параметры энергетических уровней атомного ядра

## 12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

### *Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся*

#### Вопросы по теории:

- 1) Какие реакции, идущие через стадию образования составного ядра, называются **резонансными и нерезонансными?**
- 2) На основе формулы Брейта-Вигнера получить выражение для сечения образования составного ядра  $\sigma_{ac}$  в области изолированного резонанса.
- 3) Как на основе экспериментальных данных можно выделить вклад процессов, идущих через стадию образования составного ядра?
- 4) Используя приближение изолированных ядерных резонансов получить формулу Брейта-Вигнера с выражениями для парциальных ширин.
- 5) Какова форма угловых распределений продуктов ядерных реакций, протекающих через стадию образования составного ядра?



- 6) Какова форма угловых распределений продуктов предравновесных ядерных реакций?
- 7) Получить выражение дифференциального сечения рассеяния для равновесных процессов через T-матрицу в импульсном представлении.
- 8) Как можно учесть корреляции в каналах образования и распада компаунд-состояний?
- 9) Как модифицируется формула Хаузера-Фешбаха-Молдауэра с ростом энергии налетающей частицы?

Задачи:

- 1) Определить энергию возбуждения составного ядра, образующегося при захвате  $\alpha$ -частицы с энергией  $T = 7$  МэВ неподвижным ядром  $^{10}\text{B}$ .
- 2) Оценить сечение образования составного ядра при взаимодействии нейтронов с кинетической энергией  $T_n = 1$  эВ с ядрами золота  $^{197}\text{Au}$ .
- 3) Оценить сечение образования составного ядра при взаимодействии нейтронов с кинетической энергией  $T_n = 30$  МэВ с ядрами золота  $^{197}\text{Au}$ .
- 4) Найти значение плотности уровней ядра  $^{238}\text{U}$  при энергии возбуждения  $E^* = 6$  МэВ и значении углового момента  $J = 10$ . Сопоставить полученное значение с данными из полуэмпирических систематик
- 5) Рассчитать предельные значения энергии возбуждения ядер  $^{238}\text{U}$  и  $^{236}\text{Fm}$ , при которых эффектами коллективного наращивания плотности уровней и оболочечными поправками к потенциальной энергии деформации можно пренебречь. Пояснить физическую природу наблюдаемых явлений

**13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.**

Экзамен проводится в виде письменной работы с последующим собеседованием по изучаемым темам.

*Материалы промежуточной аттестации обучающихся*

Вопросы к экзамену:

1. Основные положения модели жидкой капли. Энергия деформации.
2. Оценка энерговыделения в процессе деления.
3. Барьер деления, проницаемость барьера деления, оценка периодов спонтанного деления.
4. Формула Хаузер-Фешбаха. Понятие о  $\Gamma$ -ширине распада составного ядра. Сечение ядерных реакций, протекающих через стадию образования составного ядра.
5. Плотность уровней в модели Ферми-газа.
6. Экспериментальное определение плотности уровней. Систематики параметров плотности уровней.
7. Сверхтекучая модель плотности уровней.
8. Феноменологическое описание коллективных эффектов в плотности уровней.
9. Основные формулы статистической теории ядерных реакций.
10. Конкуренция каналов распада составного ядра.
11. Модель двугорбого барьера деления.
12. Следствия двугорбой формы барьера деления

#### **14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы**

##### Основная литература

1. К.Н. Мухин, Экспериментальная ядерная физика. Кн. 1, 2, М., Энергоатомиздат, 1993.
2. А.С. Давыдов, Теория атомного ядра, 2 изд., М., Энергоатомиздат, 1973.
3. В. Вайскопф, Статистическая теория ядерных реакций, пер. с англ., М., Энергоатомиздат, 1952.
4. Ю.В.Соколов, Плотность уровней атомных ядер. М., Энергоатомиздат. 1990.
5. А.В. Игнатюк, Статистические свойства возбужденных тяжелых ядер. М., Энергоатомиздат. 1983.

##### Дополнительная литература

1. Д. Блатт, В. Вайскопф, Теоретическая ядерная физика, пер. с англ., М., Наука, 1954.
2. Ю.М. Широков, Н.П. Юдин, Ядерная физика. М., Наука, 1980.
3. Л.Д. Ландау, Я.А. Смородинский, Лекции по теории атомного ядра, М., Наука, 1955.
4. Ф. А. Живописцев, Э. И. Кэбин, В. Г. Сухаревский, Предравновесные ядерные реакции. - М. : Изд-во МГУ, 1985.
5. О.Ф. Немец, К.О. Теренецкий. Ядерные реакции.- Киев: Вища школа, 1977.
6. Ф.А. Живописцев, Э.И. Кэбин. Модели предравновесных ядерных реакций М.: Изд-во МГУ, 1987.

При реализации дисциплины может быть использовано следующее программное обеспечение:

1. Операционная система Astra Linux ( <https://astralinux.ru/> ) или аналог, с офисным пакетом, с пакетами разработчика.
2. Программный продукт Java 8 (64-bit)

Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем

1. <http://www.edu.ru> – портал Министерства образования и науки РФ
2. <http://www.ict.edu.ru> – система федеральных образовательных порталов «ИКТ в образовании»
3. <http://www.openet.ru> - Российский портал открытого образования
4. <http://www.mon.gov.ru> - Министерство образования и науки Российской Федерации
5. <http://www.fasi.gov.ru> - Федеральное агентство по науке и инновациям

##### **Материально-техническое обеспечение**

В соответствии с требованиями п. 5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика», курс может быть прочитан в поточной аудитории при наличии: работающих электрических розеток, компьютера, проектора, экрана, учебной доски.