

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 /
« 14 » 09 2022 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование дисциплины:

Теория ядерных реакций

Уровень высшего образования:

Магистратура

Направление подготовки:

03.04.02 Физика

Направленность (профиль) ОПОП:

Фундаментальная и прикладная ядерная физика

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. Шнейдман Тимур Маркович, кандидат физ.-мат. наук, почасовик МГУ

Руководитель магистерской программы:

Доктор физ.-мат. наук, академик РАН Г.В. Трубников, по совместительству заведующий кафедрой физического факультета МГУ

Аннотация к рабочей программе дисциплины «Теория ядерных реакций»

Задачами данного курса являются: формирование базовых знаний в области теоретической ядерной физики; обучение студентов современным методам теоретического описания различных процессов сильного взаимодействия и навыкам решения сопутствующих задач; формирование подходов к выполнению студентами исследований в области теоретической ядерной физики в рамках итоговой аттестации.

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 «Теория ядерных реакций» реализуется на 1-ом курсе во 2-ом семестре магистратуры и входит в состав профессионального блока 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
МПК-1 Способен решать практические задачи профессиональной деятельности в области фундаментальной и прикладной ядерной физики на основе фундаментальных знаний	ИМПК-1.3 Умеет выполнять следующие операции в рамках решения задач профессиональной деятельности: модельные расчеты свойств атомных ядер и сечений ядерных реакций, моделирование экспериментальных установок, проведение измерений и анализ экспериментальных данных	Знать: различные модели математического описания состояния и свойств ядер и ядерных реакций. Уметь: проводить модельные расчеты свойств атомных ядер и сечений ядерных реакций. Владеть: способностью оценивать характеристики явлений и качественно анализировать результаты.
МПК-3 Способен самостоятельно (или) в составе научного коллектива применять математические методы для исследования физических явлений и процессов в области фундаментальной и прикладной ядерной физики при решении задач профессиональной деятельности.	ИМПК-3.2 Знает основные математические методы, применяемые при исследованиях в области фундаментальной и прикладной ядерной физики	Знать: основные математические методы и границы их применимости, используемые в ядерной физике в рамках теоретического описания. Уметь: обосновано выбирать наиболее подходящий метод численного или функционального описания явления. Владеть: знаниями основных используемых способах численного и иного моделирования явлений ядерных реакций.

2. **Форма обучения:** очная.

3. **Язык обучения:** русский.

4. **Содержание дисциплины**

Тема 1. Введение.

Обзор экспериментальных данных по структуре ядра. Электрические дипольные и квадрупольные моменты. Низкоэнергетические спектры ядер. Классификация экспериментальных данных на основе коллективных представлений о ядре – вращательные и колебательные степени свободы. Коллективные координаты, используемые для описания поверхностных колебаний и колебаний плотности. Канонически сопряженные импульсы и операторы рождения и уничтожения фононов.

Тема 2. Жидкокапельная модель ядра.

Формула Вайцеккера. Условия сохранения объема и неподвижности центра масс. Роль квадрупольных колебаний поверхности ядра. Классическая энергия поверхностных колебаний вблизи сферически-равновесной формы. Квантование классического выражения для кинетической энергии.

Тема 3. Структура коллективного ядерного гамильтониана.

Общий вид коллективного ядерного гамильтониана. Мультипольные операторы и оператор углового момента в пространстве коллективных переменных. Квадрупольные гармонические колебания поверхности ядра. Построение собственных функций оператора углового момента. Генеалогические коэффициенты. Среднеквадратичные радиусы распределения заряда. Квадрупольные моменты и электромагнитный распад вибрационных состояний.

Тема 4. Потенциальная энергия коллективных колебаний ядра.

Симметрия деформации и вращательные степени свободы. Внутренняя координатная система. Углы Эйлера. Свойства симметрии потенциальной энергии квадрупольных колебаний. Схематическая модель для потенциальной энергии квадрупольных колебаний. Случаи сферических и деформированных ядер.

Тема 5. Обобщенная модель ядра (часть 1).

Квантовая механика ротатора. Составляющие оператора углового момента относительно лабораторной и внутренней систем координат. Коллективная кинетическая энергия как функция углов Эйлера и внутренних переменных. Матричные элементы операторов углового момента. D-функции Вигнера как собственные функции операторов углового момента. Симметричный волчок. Асимметричный ротатор – приближение больших угловых моментов.

Тема 6. Обобщенная модель ядра (часть 2).

Гамильтониан обобщенной модели (Гамильтониан Бора). Решения для случая аксиально-симметричных ядер. Энергетические спектры и правила интенсивностей в аксиально-симметричных ядрах. Взаимодействие между вращательным и внутренним движением в аксиально-симметричных ядрах. Взаимодействие Кориолиса. Эффекты первого и второго порядков по взаимодействию Кориолиса.

Тема 7. Обобщенная модель ядра (часть 3).

Обобщенная модель на случай ядер с нечетным числом нуклонов. Модель частица-ротатор. Пределы слабой и сильной связи. Гамильтониан модели сильной связи. Структура и симметрии волновых функций в модели сильной связи. Спектры ядер с нечетным числом нуклонов. Учет неадиабатических эффектов.

Тема 8. Анализ ядерных спектров.

Правила сумм для мультипольной силы осциллятора. Классические осцилляторные суммы. Моменты, зависящие только от пространственных координат. Мультипольные моменты. Сила осциллятора вибрационного перехода в единицах правила сумм. Сферические ядра. Несферические ядра. Тензорные суммы. Зарядово-обменный вклад в осцилляторную сумму.

Тема 9. Октупольная деформация в ядрах.

Коллективные деформации, нарушающие пространственную четность. Октупольная деформация. Обсуждение экспериментальных спектров актинидов и ядер редкоземельной области. Гармонические октупольные колебания. Гамильтониан обобщенной модели в случае октупольной деформации. Октупольные колебания квадрупольно-деформированного ядра. Стабильная октупольная деформация.

Тема 10. Альфа-распад.

Обзор экспериментальных данных. Закон Гейгера-Нетолла. Квазистационарные состояния. Расчет ядро-ядерного взаимодействия с эффективными зависящими от плотности ядерными силами. Вероятности альфа-распада в квазиклассическом приближении. Спектроскопические факторы. Альфа-распад в возбужденные состояния дочерних ядер – факторы запрета.

Тема 11. Кластерная модель ядра.

Кластерные степени свободы. Модель двойной ядерной системы (ДЯС). Применение модели для расчета спектроскопических факторов кластерных распадов. Связь альфа - распада с октупольной деформацией ядра. Применение модели ДЯС для описания полос отрицательной четности в спектрах актинидов.

Тема 12. Гидродинамическая модель ядра (часть 1).

Обзор экспериментальных данных по фотоядерным реакциям. Уравнения гидродинамической модели. Классические дипольные решения гидродинамических уравнений для случая сферического ядра. Сечение фотопоглощения в классической гидродинамической модели. Классификация собственных колебаний плотности. Полная энергия гигантских мультипольных резонансов.

Тема 13. Гидродинамическая модель ядра (часть 2).

Квантовая гидродинамика. Квантование гигантских мультипольных резонансов. Мультипольные операторы в пространстве коллективных координат. Сечение фотопоглощения в квантовой гидродинамической модели. Микроскопическое обоснование гидродинамической модели ядра.

Тема 14. Коллективное движение при делении ядер.

Обзор экспериментальных данных. Адиабатические и статистические модели деления. Макроскопические свойства поверхности потенциальной энергии, барьер деления. Расчет оболочечных поправок по методу Струтинского. Влияние оболочечной структуры на поверхность потенциальной энергии, изомеры формы. Движение относительно седловой точки, каналы деления. Проявление кластерные степени свободы в делении.

Тема 15. Микроскопические теории коллективного движения в ядрах (часть 1).

Модель принудительного вращения. Формула Инглиса для момента инерции. Зависящий от времени метод Хартри-Фока. Уравнения движения. Адиабатическое приближение и обоснование его применимости. Уравнения движения в адиабатическом приближении. Коллективная энергия. Квантование кинетической энергии. Самосогласованная крэнкинг-формула. Приближение случайных фаз. Коллективное движение большой амплитуды.

Тема 16. Микроскопические теории коллективного движения в ядрах (часть 2).

Метод генераторных координат. Пробная волновая функция метода генератора координат. Уравнение Хилла-Уиллера. Коллективный образ оператора. Приближение гауссова перекрытия. Коллективное уравнение Шредингера. Квантовые поправки к коллективной потенциальной энергии. Сравнение метода генераторных координат и зависящего от времени метода Хартри-Фока.

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		
Теория ядерных реакций	3	108	34	17	17	74	

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

Изучение курса «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.

№ темы	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации

		Всего часов	Лекции	Семинары	Учебно-практические занятия (лабораторные или практические занятия)	Самостоятельная работа	
1	Введение.	6	1	1		4	
2	Жидкокапельная модель ядра.	6	1	1		4	
3	Структура коллективного ядерного гамильтониана.	6	1	1		4	
4	Потенциальная энергия коллективных колебаний ядра.	6	1	1		4	
5	Обобщенная модель ядра (часть 1).	8	1	1		6	
6	Обобщенная модель ядра (часть 2).	8	1	1		6	
7	Обобщенная модель ядра (часть 3).	6	1	1		4	
8	Анализ ядерных спектров.	6	1	1		4	
9	Октупольная деформация в ядрах.	6	1	1		4	
10	Альфа-распад.	6	1	1		4	
11	Кластерная модель ядра.	6	1	1		4	
12	Гидродинамическая модель ядра (часть 1).	6	1	1		4	
13	Гидродинамическая модель ядра (часть 2).	6	1	1		4	
14	Коллективное движение при делении ядер.	6	1	1		4	
15	Микроскопические теории коллективного движения в ядрах (часть 1).	6	1	1		4	
16	Микроскопические теории коллективного движения в ядрах (часть 2).	8	2	2		4	
	Промежуточная аттестация	6				6	экзамен
ИТОГО:		108	17	17		74	

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

9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «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 широта используемых теоретических знаний.

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
Оценочные средства текущего контроля		
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
Оценочные средства промежуточной аттестации		
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: различные модели математического описания состояния и свойств ядер и ядерных реакций. ИМПК-1.3 З-1	Отсутствие знаний различных моделей математического описания состояния и свойств ядер и ядерных реакций.	В целом успешные, но не систематические знания различных моделей математического описания состояния и свойств ядер и ядерных реакций.	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы знания различных моделей математического описания состояния и свойств ядер и ядерных реакций.	Успешные и систематические знания различных моделей математического описания состояния и свойств ядер и ядерных реакций.
ЗНАТЬ: основные математические методы и границы их применимости, используемые в ядерной физике в рамках теоретического описания. ИМПК-3.2 З-1	Отсутствие знаний основных математических методов и границ их применимости, используемых в ядерной физике в рамках теоретического описания.	В целом успешные, но не систематические знания основных математических методов и границ их применимости, используемых в ядерной физике в рамках теоретического описания.	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы знания основных математических методов и границ их применимости, используемых в ядерной физике в рамках теоретического описания.	Успешные и систематические знания основных математических методов и границ их применимости, используемых в ядерной физике в рамках теоретического описания.
УМЕТЬ: проводить модельные расчеты свойств атомных ядер и сечений ядерных реакций. ИМПК-1.3 У-1	Отсутствие умения проводить модельные расчеты свойств атомных ядер и сечений ядерных реакций.	В целом успешное, но не систематическое умение проводить модельные расчеты свойств атомных ядер и сечений ядерных реакций.	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы умение проводить модельные расчеты свойств атомных ядер и сечений ядерных реакций.	Успешное и систематическое умение проводить модельные расчеты свойств атомных ядер и сечений ядерных реакций.

<p>УМЕТЬ: обосновано выбирать наиболее подходящий метод численного или функциональн ого описания явления. ИМПК-3.2 У-1</p>	<p>Отсутствие умения обосновано выбирать наиболее подходящий метод численного или функционально го описания явления.</p>	<p>В целом успешное, но не систематическо е умение обосновано выбирать наиболее подходящий метод численного или функционально го описания явления.</p>	<p>В целом успешно е, но содержащее отдельные пробелы умение обосновано выбирать наиболее подходящий метод численного или функционально го описания явления.</p>	<p>Успешное и систематическое умение обосновано выбирать наиболее подходящий метод численного или функционально го описания явления.</p>
<p>ВЛАДЕТЬ: способностью оценивать характеристик и явлений и качественно анализировать результаты. ИМПК-1.3 В-1</p>	<p>Отсутствие/фра гментарное владение способностью оценивать характеристики явлений и качественно анализировать результаты.</p>	<p>В целом успешное, но не систематическо е владение способностью оценивать характеристики явлений и качественно анализировать результаты.</p>	<p>В целом успешно е, но содержащее отдельные пробелы способностью оценивать характеристики явлений и качественно анализировать результаты. вла дение</p>	<p>Успешное и систематическое владение способностью оценивать характеристики явлений и качественно анализировать результаты.</p>
<p>ВЛАДЕТЬ: знаниями основных используемых способах численного и иного моделирования явлений ядерных реакций. ИМПК-3.2 В-1</p>	<p>Отсутствие/фра гментарное владение знаниями основных используемых способах численного и иного моделирования явлений ядерных реакций.</p>	<p>В целом успешное, но не систематическо е владение знаниями основных используемых способах численного и иного моделирования явлений ядерных реакций.</p>	<p>В целом успешно е, но содержащее отдельные пробелы владение знаниями основных используемых способах численного и иного моделирования явлений ядерных реакций.</p>	<p>Успешное и систематическое владение знаниями основных используемых способах численного и иного моделирования явлений ядерных реакций.</p>

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

Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся

Задачи можно найти по адресу:

Пример:

Вопросы по теории:

1.

Задачи:

1.

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

Экзамен проводится в письменной форме с последующим собеседованием.

Материалы промежуточной аттестации обучающихся

Вопросы к экзамену:

1. Симметрия деформации. Следствия аксиальной симметрии. Деформации, нарушающие временную и пространственную четность.
2. Мультипольные операторы и оператор углового момента в пространстве коллективных координат. Вероятности электромагнитных переходов.
3. Жидкокапельная модель ядра. Формула Вайцзеккера.
4. Квантование в криволинейных координатах. Гармонические квадрупольные колебания.
5. Построение собственных функций оператора углового момента. Генеалогические коэффициенты.
6. Общий вид коллективного ядерного гамильтониана. Поверхность потенциальной энергии в случае поверхностных колебаний.
7. Гамильтониан обобщенной модели. Решение для аксиально-симметричных ядер.
8. Энергетические спектры и правила интенсивностей в аксиально-симметричных ядрах.
9. Взаимодействие между вращательным и колебательным движением. Взаимодействие Кориолиса.
10. Вращательные спектры неаксиальных систем. Системы с малой асимметрией. Состояния с большим угловым моментом.
11. Модель частица-ротатор. Адиабатическое приближение. Неадиабатические эффекты.
12. Правила сумм для мультипольной силы осциллятора. Сила осциллятора вибрационного перехода в единицах правила сумм. Тензорные правила сумм. Зарядово-обменный вклад в осцилляторную сумму.
13. Гамильтониан обобщенной модели в случае октупольной деформации. Октупольные колебания квадрупольно-деформированного ядра. Стабильная октупольная деформация.
14. Закон Гейгера-Нетолла для альфа-распада. Распад квазистационарных состояний. Вероятности альфа-распада в квазиклассическом приближении.
15. Расчет ядро-ядерного взаимодействия с эффективными зависящими от плотности ядерными силами.
16. Расчет спектроскопические факторов и факторов запрета для альфа-распада в рамках модели двойной ядерной системы.
17. Уравнения гидродинамической модели. Классические дипольные решения гидродинамических уравнений для случая сферического ядра. Классификация

- собственных колебаний плотности.
18. Сечение фотопоглощения в классической гидродинамической модели. Полная энергия гигантских мультипольных резонансов.
 19. Квантование гигантских мультипольных резонансов. Сечение фотопоглощения в квантовой гидродинамической модели.
 20. Расчет оболочечных поправок по методу Струтинского. Барьер деления.
 21. Модель принудительного вращения. Формула Инглиса.
 22. Метод генераторных координат. Уравнение Хилла_Уиллера.

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

Основная литература

1. О. Бор и Б. Моттelson, Структура атомного ядра,(том 1), Издательство “Мир”, Москва, 1971.
2. О. Бор и Б. Моттelson, Структура атомного ядра,(том 2), Издательство “Мир”, Москва, 1977.
3. Judah M. Eisenberg and W. Greiner, Nuclear Models (Collective and Single-Particle Phenomena), Volume 1, Elsevier Science Publishers B.V., 1987.
4. Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц, Теоретическая физика (Том III): Квантовая механика (нерелятивистская теория), Москва, “Наука”, 1989.
5. К. Вильдермут и Я.Тан, Единая теория ядра, “Мир”, Москва, 1980.
6. Igal Talmi, Simple Models of Complex Nuclei: The shell model and interaction boson model, Harwood Academic Publishers GmbH, 1993.
7. Варшалович Д.А., Москалев А.Н., Херсонский В.К., Квантовая теория углового момента, Ленинград, “Наука”, 1975.
8. Л. Уилетс, Теория ядерного деления, Москва, “Атомиздат”, 1967.
9. M. Baranger and M. Veneroni, An adiabatic time-dependent Hartree-Fock Theory of Collective Motion in Finite Systems, Annals of Physics, 114, 123-200 (1978).
10. P.G. REINHARD AND K. GOEKE, THE GENERATOR COORDINATE METHOD AND QUANTIZED COLLECTIVE MOTION IN NUCLEAR SYSTEMS, REP. PROG. PHYS. 50, 1-64, 1987.

При реализации дисциплины может быть использовано следующее программное обеспечение:

1. Операционная система Astra Linux (<https://astralinux.ru/>) или аналог, с офисным пакетом.

Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем

1. База данных РИНЦ (российский индекс научного цитирования) <http://www.elibrary.ru>

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.