

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 атомных ядер и ядерные модели

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. Доктор физ.-мат. наук, Джолос Ростислав Владимирович, 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 атомных ядер и ядерные модели»

В ходе данного курса студент должен получить представление об экспериментальных методах измерения различных характеристик состояний ядер, усвоить такие понятия как среднее поле ядра, деформация ядер, парные корреляции нуклонов в ядрах, коллективные возбуждения ядер, освоить методы диагонализации гамильтонианов, представляющие различные модели ядра. Содержание дисциплины ориентировано на изложение материала с учетом современного состояния теории структуры атомных ядер. При этом студенты получают необходимую подготовку для того, чтобы научиться выполнять простые расчеты различных характеристик ядер.

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 атомных ядер и ядерные модели» реализуется на 1-ом курсе во 2-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
МПК-1 Способен решать практические задачи профессиональной деятельности в области фундаментальной и прикладной ядерной физики на основе фундаментальных знаний	ИМПК-1.2 Знает основные разделы фундаментальной и прикладной ядерной физики: модели атомного ядра и ядерных реакций, основы нейтронной физики и физики конденсированного состояния, базовые установки и приборы ядерно-физического эксперимента.	Знать: основные свойства атомных ядер и их взаимодействий с полями и частицами. Уметь: описывать состояние атомных ядер и процессы в них с использованием различных моделей. Владеть: аппаратами математики и квантовой физики, необходимыми для применения ядерных моделей.

2. **Форма обучения:** очная.

3. **Язык обучения:** русский.

4. Содержание дисциплины

Тема 1. Глобальные свойства ядер.

Энергия связи. Формула Бете—Вайцзеккера. Размеры ядер. Плотность ядер. Поверхность ядра. Радиоактивность. Альфа- и бета распад. Цепочки радиоактивного распада.

Тема 2. Взаимодействие с электромагнитным полем.

Магнитный дипольный и электрический квадрупольный моменты ядер. Взаимодействие ядер с электромагнитным полем окружающих электронов атомов и молекул.

Тема 3. Нуклон-нуклонные силы.

Нуклон—нуклонное взаимодействие. Симметрии. Влияние ядерной среды. Эффективные силы.

Тема 4. Модель Ферми-газа.

Длина свободного пробега нуклонов в ядре. Концепция среднего поля ядра. Модель ферми—газа. Плотность уровней ядра в модели ферми—газа.

Тема 5. Гидродинамическая модель ядра.

Гидродинамическая модель ядра. Описание поверхности ядра. Коллективные возбуждения сферических ядер. Квадрупольные и октупольные колебания. Фононы. Вибрационные спектры. Правила сумм для электромагнитных переходов. Оболочечные эффекты.

Тема 6. Обобщенная модель ядра.

Деформированные ядра. Вращательные возбуждения. Гамильтониан Бора. Момент инерции. Аксиальная симметрия. Асимметричный ротатор. Модель Давыдова—Филиппова. Супердеформация. Периодические орбиты.

Тема 7. Оболочечная модель ядра.

Оболочечная модель ядра. Экспериментальные данные. Средний потенциал. Спин—орбитальное взаимодействие. Оболочечный подход к описанию систем многих частиц. Новые магические числа. Оболочечная модель, учитывающая деформацию ядер. Анизотропный гармонический осциллятор. Гамильтониан Нильссона. Расчет энергии деформации. Метод Струтинского. Модель частица—ротатор. SU(3) модель Эллиота. Модель взаимодействующих бозонов. Динамические симметрии.

Тема 8. Микроскопические модели ядра.

Парные энергии. Парные корреляции сверхпроводящего типа в ядрах. Преобразование Боголюбова. Метод Хартри—Фока. Приближенное вторичное квантование. Вибрационные возбуждения ядер.

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 атомных ядер и ядерные модели	2	72	34	17	17	38	

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

Изучение курса «Теория атомных ядер и ядерные модели» 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					Само-стел-ья ра-бо-та	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации
		Всего часов	Лекции	Семинары	Учебно-практические занятия (лабораторные или практические занятия)			
1	Глобальные свойства ядер	8	2	2		4		
2	Взаимодействие с электромагнитным полем	8	2	2		4		
3	Нуклон-нуклонные силы	8	2	2		4		
4	Модель Ферми-газа	8	2	2		4		
5	Гидродинамическая модель	8	2	2		4		
6	Обобщенная модель ядра	8	2	2		4		
7	Оболочечная модель	8	2	2		4		
8	Микроскопические модели ядра	10	3	3		4		
	Промежуточная аттестация	6				6	Экзамен	
ИТОГО:		72	17	17		38		

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

9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Теория атомных ядер и ядерные модели» 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.

Промежуточная аттестация по дисциплине «Теория атомных ядер и ядерные модели» проводится 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
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	Критерии оценивания результатов обучения			
	2/	3/	4/	5/

обучения	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	отлично
ЗНАТЬ: основные свойства атомных ядер и их взаимодействия с полями и частицами	Отсутствие знаний основных свойств атомных ядер и их взаимодействий с полями и частицами	В целом успешные, но не систематически знания основных свойств атомных ядер и их взаимодействий с полями и частицами	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы знания основных свойств атомных ядер и их взаимодействий с полями и частицами	Успешные и систематические знания основных свойств атомных ядер и их взаимодействий с полями и частицами
УМЕТЬ: описывать состояние атомных ядер и процессы в них с использованием различных моделей	Отсутствие умения описывать состояние атомных ядер и процессы в них с использованием различных моделей	В целом успешное, но не систематическое умение описывать состояние атомных ядер и процессы в них с использованием различных моделей	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы умение описывать состояние атомных ядер и процессы в них с использованием различных моделей	Успешное и систематическое умение описывать состояние атомных ядер и процессы в них с использованием различных моделей
ВЛАДЕТЬ: аппаратами математики и квантовой физики, необходимыми для применения ядерных моделей	Отсутствие/фрагментарное владение аппаратами математики и квантовой физики, необходимыми для применения ядерных моделей	В целом успешное, но не систематическое владение аппаратами математики и квантовой физики, необходимыми для применения ядерных моделей	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы владение аппаратами математики и квантовой физики, необходимыми для применения ядерных моделей	Успешное и систематическое владение аппаратами математики и квантовой физики, необходимыми для применения ядерных моделей

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

Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся

В ходе курса проводится тест по теме:

- Т1 - Свойства атомных ядер, модель Ферми-газа и оболочечная модель

Образец теста по теме

- «Свойства атомных ядер, модель Ферми-газа и оболочечная модель»

Вопрос № 1

Химический потенциал ферми- системы- это...

- 1) скорость протекания химической реакции.
- 2) производная энергии системы по числу частиц;
- 3) электростатический потенциал, создаваемый ядром атомом химического элемента.

Вопрос № 2

В каждом квантовом состоянии может находиться фермионов:

- 1) один;
- 2) не более одного;
- 3) не более двух;
- 4) любое количество.

Вопрос № 3

В каждом квантовом состоянии может находиться бозонов

- 1) один;
- 2) не более одного;
- 3) не более двух;
- 4) любое количество.

Вопрос № 4

Плотность состояний квантового ферми-газа ...

- 1) пропорциональна энергии частиц E ;
- 2) пропорциональна квадратному корню из энергии частиц \sqrt{E} ;
- 3) не зависит от энергии частиц.

Вопрос № 5

Если уровень Ферми для нейтронов в атомном ядре заметно выше, чем уровень Ферми для протонов, то такое ядро...

- 4) стабильно;
- 5) испытывает бета-распад с испусканием электрона ;
- 6) испытывает бета-распад с испусканием позитрона.
- 7) испытывает альфа-распад
- 8) испускает гамма-излучение.

Вопрос № 6

При увеличением значения орбитального квантового числа величина расщепления уровней энергии нуклона с различными значениями числа j ...

- 1) не изменяется;
- 2) увеличивается;
- 3) уменьшается;

Вопрос № 7

Расстояние до линии стабильности от граничных нейтронной и протонной линий стабильности...

- 1) одинаковы;
- 2) больше для протонной линии;

3) больше для нейтронной линии.

Вопрос № 8

Энергия отделения нуклона от атомного ядра больше у ...

- 1) четно-четного ядра;
- 2) нечетно-нечетного ядра;
- 3) четно-нечетного ядра;

Вопрос № 9

Максимальной энергии связи отвечают:

- 1) наиболее легкие ядра, до гелия-4;
- 2) наиболее тяжелые ядра, после свинца;
- 3) средние ядра, в районе железа.

Вопрос № 10

При равенстве остальных квантовых чисел в оболочечной модели сферического ядра.

- 1) уровень с большим j лежит ниже уровня с меньшим j ;
- 2) уровень с большим j лежит выше уровня с меньшим j ;
- 3) уровень с большим j совпадает с уровнем с меньшим j .

Перечень примерных контрольных вопросов и заданий для самостоятельной работы:

1. Глобальные свойства ядер

- 1.1 Выписать формулу, описывающую распределение плотности нуклонов в ядре.
Значения радиуса ядра и параметра диффузности
- 1.2 Рассчитать объем ядра, используя для плотности нуклонов формулу Вудса-Саксона.
- 1.3 Используя формулу Бете-Вайцзеккера найти соотношение между числами протонов и нейтронов в ядре для заданного полного числа нуклонов при условии максимума энергии связи.
- 1.4 Закон радиоактивного распада. Среднее время жизни ядра.
- 1.5 В цепочке радиоактивного распада, состоящей из трех ядер, определить как изменяется во времени количество каждого из ядер.

2. Взаимодействие с электромагнитным полем

- 2.1 Выписать формулу для магнитного момента ядра.
- 2.2 Привести формулу для квадрупольного момента ядра.
- 2.3 Получить выражение для Зеемановского расщепления уровней ядра в магнитном поле.
- 2.4 Вывести выражение, описывающее расщепление уровней ядра в электрическом поле, обладающем квадрупольным моментом.

3. Нуклон-нуклонные силы

- 3.1 Каковы следствия трансляционной и ротационной инвариантности для потенциала Взаимодействия нуклонов.
- 3.2 Привести выражение для тензорных сил.
- 3.3 Получить мультипольное разложение для поверхностных дельта-сил.

4. Модель Ферми-газа.

- 4.1 Получить волновые функции нуклонов в модели Ферми газа для сферически симметричной прямоугольной ямы.
- 4.2 Получить выражение для среднего числа экситонов при заданной температуре ядра.
- 4.3 Установить связь температуры с энергией возбуждения ядра.

5. Гидродинамическая модель ядра.

- 5.1 Получить выражение для радиуса поверхности ядра через параметры формы ядра.

5.2 Получить ограничения на значения параметров формы ядра из условия сохранения объема ядра.

5.3 Получить ограничения на значения параметров формы ядра из условия сохранения неизменным положения центра ядра.

5.4 Установить связь параметров, характеризующих форму ядра в лабораторной и внутренней системах координат.

6. *Обобщенная модель ядра*

6.1 Основываясь на классическом выражении для энергии жидкой капли, совершающей колебания малой амплитуды, получить гамильтониан, используемый при квантово-механическом рассмотрении вибрационных возбуждений.

6.2 Получить выражение для спектра коллективных квадрупольных возбуждений сферического ядра.

6.3 Получить выражение для массового коэффициента гамильтониана, описывающего мульти-польные колебания формы ядра.

6.4 Получить выражение для квадрупольного момента в обобщенной модели ядра.

6.5 Получить выражение для спектра ротационных возбуждений деформированного ядра.

7. *Оболочечная модель ядра*

7.1 Выписать гамильтониан оболочечной модели ядра, включающий спин-орбитальное взаимодействие.

7.2 Какими квантовыми числами характеризуются одночастичные состояния сферических ядер?

7.3 Асимптотические квантовые числа, характеризующие одночастичные состояния в модели Нильссона.

7.4 Получить выражение для энергии взаимодействия нуклона с поверхностными колебаниями ядра.

8. Микроскопические модели ядра

8.1 Получить выражение для гамильтониана оболочечной модели ядра в представлении вторичного квантования.

8.2 Получить выражение для оператора числа частиц через операторы рождения и уничтожения квазичастиц.

8.3 Получить выражение для вероятности заселения одночастичного состояния через коэффициенты u - v преобразования.

8.4 Получить выражение для среднеквадратичных флуктуаций числа частиц в модели Бардина-Купера-Шиффера.

8.5 Выразить оператор рождения фонона через операторы рождения квазичастиц.

8.6 Вычислить коммутатор линейных комбинаций бифермионных операторов, образующих фононные операторы в приближении Тамма-Данкова.

8.7 Вывести секулярное уравнение для энергии фонона в приближении Тамма-Данкова.

1. Вычислить среднее от произведения четырех операторов рождения и уничтожения нуклонов в основном состоянии ядра в приближении Хартри-Фока.

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. Изоспин. Энергия связи ядер. Насыщение ядерных сил. Плотность и размеры ядер.
2. Стабильность ядер. Формула Бете—Вайцеккера.
3. Радиоактивный распад ядер.
4. Взаимодействие с электромагнитным излучением. Магнитный дипольный и электрический квадрупольный моменты.
5. Нуклон—нуклонное взаимодействие. Симметрии.
6. Длина свободного пробега нуклона в ядре. Ферми—газ.
7. Плотность ядерных уровней.
8. Модель жидкой капли. Параметризация поверхности ядра.
9. Поверхностные колебания относительно сферически симметричной равновесной формы. Фононы. Квадрупольные и октупольные колебания.
10. Электрические квадрупольные переходы в модели жидкой капли. Правила сумм.
11. Деформированные ядра. Вращательные и колебательные возбуждения.
12. Правила Алага.
13. Асимметричный ротатор. Большие угловые моменты.
14. Оболочечная модель ядра. Магические ядра. Среднее поле. Спин—орбитальные силы. Одночастичная схема уровней.
15. Потенциал гармонического осциллятора. Собственные функции.
16. Деформация. Анизотропный гармонический осциллятор. Квантовые числа. Схема Нильссона.
17. Вторичное квантование. Частичные и дырочные уровни. Основное состояние ядра. Возбужденные состояния.
18. Связь частиц с колебаниями поверхности.
19. Парные корреляции. $u-v$ преобразование Боголюбова.
20. Двухквaziчастичные возбуждения. Энергетическая щель в спектре. Спектры возбуждения нечетных ядер.
21. Микроскопическое описание вибрационных возбуждений. Фононы. Секулярное уравнение.
22. Метод Хартри—Фока.
23. Метод Струтинского.

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

Основная литература

1. Ишханов Б. С., Капитонов И. М., Юдин Н. П. "Частицы и атомные ядра", М., Издательство ЛКИ, 2007.
2. Шевелев А. К. Структура ядра / Шевелев Александр Киприянович. - М.: КомКнига, 2006. - 312с.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Том 5, Атомная и ядерная физика. М-ФИЗМАТЛИТ, 2011
4. Орир Дж. Физика: Полный курс. Примеры, задачи, решения: Учебник / Орир Джей; Пер.с англ.и науч.ред. Ю.Г.Рудого, А.В.Беркова. - М.: КДУ, 2011. - 752с.
5. Широков Ю. М., Юдин Н. П. Ядерная физика. М.: Наука, 1972.

Дополнительная литература

1. Субатомная физика: Вопросы.Задачи.Факты: Учебное пособие / Под.ред.Б.С.Ишханова. - М.: Издательство Московского университета, 1994. - 224с

2. Поликанов С.М. Изомерия формы атомных ядер / Поликанов Сергей Михайлович. - М.: Атомиздат, 1977. - 200с. - 1 шт
3. Калинин Б.Н. Некоторые вопросы теории ядра и ядерных реакций / Калинин Б.Н. - Алматы, 2011. - 202с. - 3 шт
4. Бете Г. Элементарная теория ядра / Бете Г., Моррисон Ф.; Пер.с англ. О.А.Владимировой; Под ред. В.Б.Берестецкого. - М.: Иностранная литература, 1958. - 356с.
5. Валантэн Л. Субатомная физика: ядра и частицы: В 2 т. Т.2 : Дальнейшее развитие / Валантэн Люк; Пер.с фр. Н.Н. Колесникова. - М.: Мир, 1986. - 336с.:
6. Нерсесов Э.А. Основные законы атомной и ядерной физики: Учебное пособие / Нерсесов Эдуард Аристаркесович. - М.: Высшая школа, 1988. - 288с.
7. Ядерная энциклопедия / Авт.и гл.ред. А.А.Ярошинская. - М.: Благотворительный фонд Ярошинской, 1996. - 656с.: ил.
8. Адлер И. Внутри ядра / Адлер Ирвинг; Пер.с англ. Г.А.Васильева, В.А.Кучеряева, Ю.В.Орлова. - М.: Атомиздат, 1968. - 152с.
9. Робертсон Б. Современная физика в прикладных науках / Робертсон Б.; Пер.с англ. под ред. Е.М.Лейкина. - М.: Мир, 1985. - 272с.

Периодические издания:

1. Ядерная физика / Учредитель: РАН; Гл.ред. Ю.Г. Абов. - М. : Наука. - Журнал, выходит 1 раз в месяц. - Основан в 1965 году.

При реализации дисциплины может быть использовано следующее программное обеспечение:

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

Справочные ресурсы и материалы в Интернет:

1. <http://nndc.bnl.gov>
2. <http://nr.v.jinr.ru/nrv>
3. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/>
4. <http://theory.asu.ru/>

Материально-техническое обеспечение

В соответствии с требованиями п. 5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки 03.04.02 «Физика», курс может быть прочитан в поточной аудитории при наличии: работающих электрических розеток, компьютера, проектора, экрана, учебной доски.