

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 /  
«01» сентября 2024 г.



**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

Наименование дисциплины:

**Основные положения физики высоких энергий**

---

Уровень высшего образования:

**Магистратура**

---

Направление подготовки:

**03.04.02 Физика**

Направленность (профиль)/специализация образовательной программы:

Физика элементарных частиц

---

Форма обучения:

Очная

---

Дубна 2024

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению 03.04.02 «Физика», утвержденным приказом МГУ от 30.12.2020 г. № 1366.

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

**Авторы-составители:**

1. Доктор физ.-мат. наук Строковский Евгений Афанасьевич, профессор физического факультета МГУ по совместительству

Руководитель магистерской программы:

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

## **Аннотация к рабочей программе дисциплины**

Курс посвящен: формированию системы основных понятий и представлений физики элементарных частиц и релятивистской ядерной физики; ознакомлению с инструментальной базой современной физики элементарных частиц и релятивистской ядерной физики; практике работы с базовыми понятиями физики элементарных частиц, квантовой теории поля, квантовой хромодинамики, теории электрослабого взаимодействия; обсуждению классических экспериментов по физике элементарных частиц и релятивистской ядерной физике; обсуждению связи космологии и физики элементарных частиц.

Дисциплина реализуется на 1 курсе в 1 и 2 семестре и является обязательной для освоения обучающимися.

Объем дисциплины составляет 4 з.е., в том числе 70 академических часа, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, 74 академических часа, отведенных на самостоятельную работу обучающихся.

Промежуточная аттестация по дисциплине (модулю) – экзамен в 1 семестре и зачет во 2 семестре.

## 1. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина «Основные положения физики высоких энергий» входит в блок «Профессиональный» вариативной части и является обязательной для освоения обучающимися в 1 и 2 семестрах.

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

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

## 3. Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

Компетенции	Результаты обучения
ОПК-1	<p><u>Знать</u> основные законы, научные концепции и методы исследований в области современной ядерной физики</p> <p><u>Уметь</u> применять на практике результаты актуальных научных исследований в области современной ядерной физики</p> <p><u>Владеть</u> навыками применения современных научных принципов и методов исследования в области ядерной физики для решения профессиональных задач</p>
ПК-1	<p><u>Знать</u> разделы ядерной физики, необходимыми для решения поставленной научной задачи</p> <p><u>Уметь</u> применять экспериментальные и теоретические знания при решении поставленной научной задачи</p> <p><u>Владеть</u> экспериментальными и теоретическими методами исследования при решении научных задач в области современной ядерной физики</p>
МПК-1	<p><u>Знать</u> основные разделы и направления в физике элементарных частиц.</p> <p><u>Уметь</u> структурировать явления физики элементарных частиц и релятивистской ядерной физики, создавать или подбирать физическую модель для их описания.</p> <p><u>Владеть</u> способностью оценивать границы применимости физических моделей, определять их недостатки и несоответствия</p>

**4.** Объем дисциплины (модуля) составляет 4 з.е., в том числе: 70 академических часов, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, 74 академических часов, отведенных на самостоятельную работу обучающихся.

Контактная работа включает в себя: занятия лекционного типа и занятия семинарского типа.

5. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля),  Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (ак.ч.)	В том числе					Самостоятельная работа обучающегося, академические часы	Форма текущего контроля успеваемости, наименование
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) <i>Виды контактной работы, академические часы<sup>1</sup></i>						
		Занятия лекционного типа (лекции)	Занятия семинарского типа			Всего		
Семинары	Лабораторные занятия*		Практические занятия*					
Элементарные частицы материи	<b>17</b>	5	5			<b>10</b>	7	Опрос
С- и Р- четность	<b>17</b>	5	5			<b>10</b>	7	Опрос
Наивная кварковая модель	<b>17</b>	5	5			<b>10</b>	7	Опрос
Мультиплеты мезонов и барионов	<b>15</b>	3	3			<b>6</b>	9	Опрос
<b>Промежуточная аттестация</b>							<b>6<sup>2</sup></b>	<b>Экзамен</b>
Проблемы современной релятивистской ядерной физики	<b>35</b>	9	9			<b>18</b>	17	Опрос

<sup>1</sup>Текущий контроль успеваемости может быть реализован в рамках занятий лекционного и(или) семинарского типа.

<sup>2</sup>Часы на проведение промежуточной аттестации выделяются из часов самостоятельной работы обучающегося

Элементы КХД	<b>33</b>	8	8		<b>16</b>	17	Опрос
<b>Промежуточная аттестация</b>						<b>4<sup>3</sup></b>	<b>Зачет</b>
<b>Итого</b>	<b>144</b>	<b>70</b>				<b>74</b>	

\*Лабораторные занятия, практические занятия относятся к практической подготовке обучающихся.

---

<sup>3</sup>Часы на проведение промежуточной аттестации выделяются из часов самостоятельной работы обучающегося

## 1 семестр

### *Тема 1. Элементарные частицы материи.*

Элементарные частицы материи - кварки и лептоны. Естественная система единиц. Изоспин. Бозоны и фермионы.

### *Тема 2. С- и Р- четность.*

Р-четность. С-четность. Частицы и античастицы. Странность. CP-четность. Нарушение CP.

### *Тема 3. Наивная кварковая модель.*

Очарованный кварк. В-кварк. Мезоны и барионы с b-кварком. Топ-кварк. Наивная кварковая модель.

### *Тема 4. Мультиплеты мезонов и барионов.*

Мультиплеты мезонов в SU(2), SU(3) и SU(4). Векторные и псевдоскалярные мезоны. Массовые формулы Гелл-Манна- Окубо. Классификация барионов по мультиплетам.

## 2 семестр

### *Тема 5. Проблемы, исследуемые в современной релятивистской ядерной физике.*

Особенности кинематики взаимодействия ядер с адронами. Кумулятивные эффекты. Поиск проявлений кварк-глюонных степеней свободы в ядрах. Фазовая диаграмма ядерного вещества, фазовые переходы в сильновзаимодействующей адронной материи и поиски возможной критической точки. Релятивистская ядерная физика и поляризационные явления

### *Тема 6. Элементы КХД.*

Уравнение Клейна- Гордона. Уравнение Дирака. Калибровочная инвариантность. Лагранжиан КХД. Цветовой заряд. Открытие глюонов. Конфайнмент. Кварковый вакуумный конденсат.

## **6. Фонд оценочных средств для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю)**

6.1. Типовые задания и иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения:

*Типовые вопросы для проведения текущей проверки успеваемости:*

1. Что такое «партоны»?

2. Что такое «диаграмма Аргана» в физике частиц?

3. В чём состоит основная физическая идея, опубликованная в 1954 году Янгом и Миллсом?

4. Откуда следует, что в области энергий столкновений, доступной для современных экспериментов и области, в которую можно более-менее надёжно экстраполировать современные понятия, не приходится ожидать 4-го семейства лептонов?

5. Как ведут себя полные сечения рассеяния в зависимости от энергии сталкивающихся частиц, но выше нескольких десятков ГэВ?
6. Что такое «инклюзивный» тип экспериментов?
7. Как ведут себя при высоких энергиях полные сечения взаимодействия некоторой частицы с адронной мишенью, и её античастицы с той же мишенью (например, полное сечение взаимодействия положительного каона с протоном и отрицательного каона с протоном)?
8. Что такое «инвариантная» масса некоторой системы частиц (в том числе – одной частицы)?
9. Какие из перечисленных далее реакций имеют порог?  $Kp \rightarrow Lp$ ;  $N(L,S)N$ ;  $SN \rightarrow LN$

*Типовые вопросы, задания для проведения промежуточной аттестации*

Экзамен в 1 семестре:

### Билет 1.

1. Назовите, и коротко охарактеризуйте, российские ускорители для физики частиц промежуточных и высоких энергий, известные вам.
2. Как ведут себя с ростом энергии полные сечения рассеяния элементарных частиц?
3. Почему величина  $E d\sigma/d^3p$  называется инвариантным дифференциальным сечением?
4. Какие из симметрий (изоспиновая, С, Р, Т, СР, СРТ) сохраняются в сильных, электромагнитных и слабых взаимодействиях?

### Билет 2.

1. Какой величине разности быстрот снаряда и мишени соответствует область высоких энергий? Какой величине этой разности соответствует область промежуточных энергий?
2. Возможна ли реакция  $p+d \rightarrow {}^3\text{He}$ ? Обоснуйте ответ. В случае, если на ваш взгляд такие реакция идти не может, объясните, какая реакция с тем же начальным состоянием и ядром  ${}^3\text{He}$  в конечном состоянии все же может идти.
3. В чем состоят характерные **качественные** признаки дифракционного рассеяния?
4. Сколько поколений фундаментальных фермионов существует в исследованной на данный момент области энергий?

### Билет 3.

1. Что такое «Фруассаровский предел», в чем его смысл? Достигнут ли уже режим Фруассара?
2. Что такое «условие Вигнера» и в чем его физический смысл?
3. Для частицы, появившейся в результате взаимодействия пучка частиц «а» с мишенью «в», дайте вывод формулы для нахождения ее импульса в системе центра масс реакции.

4. Может ли возникнуть поляризация у рассеянной (упруго) частицы (например, со спином  $\frac{1}{2}$ ), если пучок неполяризован, а мишень является бесспиновой? Если может – то почему?

#### Билет 4.

1. Какие основные следствия СРТ-теоремы вы знаете?
2. Могут ли существовать  $\Sigma$ -гипер-ядра?
3. Какие методы идентификации элементарных частиц вы знаете?
4. Что такое «теорема Померанчука»?

#### Билет 5.

1. Что такое «гипер-ядра»?
2. Формула Гелл-Манна – Нишиджимы и ее физический смысл. Что привело к ее появлению?
3. Что такое «эллипс импульсов»?
4. Какова структура амплитуды упругого нуклон-нуклонного рассеяния? Что называется «полным опытом» и что такое «оптическая теорема»?

#### Билет 6.

1. Как измеряются полные сечения рассеяния элементарных частиц?
2. Какой величиной определяются, в первую очередь, главные качественные особенности дифракционного рассеяния?
3. Какие базовые симметрии существуют в физике элементарных частиц и в чем проявляются их следствия?
4. Возможно ли, чтобы при взаимодействии элементарных частиц происходили бы только неупругие реакции, без упругого рассеяния? Обоснуйте ответ.

#### Билет 7.

1. Каковы могут быть максимальные и минимальные численные значения анализирующих способностей реакций с участием поляризованных частиц? В чем причина появления этих ограничений, если они существуют?
2. Что такое «зарядовая симметрия ядерных сил»?
3. Что такое «инвариантный поток» (или «Мёллеровский поток»)?
4. Как было экспериментально подсчитано число поколений фундаментальных фермионов?

#### Билет 8.

1. Что такое «кулон-ядерная интерференция»?
2. Что такое «резонансное состояние» (или «резонанс») в мире элементарных частиц? Каково характерное время жизни адронного резонанса?
3. Дифрагируют ли релятивистские ядра? Если да, то почему?
4. Что такое «тензорная поляризация» частицы со спином 1?

### Билет 9.

1. На что указывает явление «сужения дифракционного конуса» при энергиях частиц выше 10 ГэВ?
2. Какую область энергий ускоренных частиц можно отнести к промежуточным энергиям и почему?
3. Как связаны между собой полное сечение рассеяния и длина рассеяния?
4. Может ли быть ненулевая векторная анализирующая способность у некоторой реакции, если рассеяние произошло «вперед» (т.е. на нулевой угол)? Обоснуйте ответ.

### Билет 10.

1. Как ведут себя полное парциальное сечение рассеяния и отношение вещественной части амплитуды рассеяния «вперед» к ее мнимой части при прохождении через резонанс?
2. Какие значения поляризаций пучка векторных частиц возможны?
3. Является ли нуклон «абсолютно черной» частицей? Как меняется его поглощательная способность при переходе от энергий ускорителя ПИЯФ к энергиям ЛНС, оцениваемая из данных о его взаимодействии с другим нуклоном или пионом?
4. Охарактеризуйте типы нуклон-нуклонных потенциалов и назовите современные, наиболее популярные NN-потенциалы.

### Билет 11.

1. До каких энергий выполнены фазовые анализы протон-протонного и нейтрон-протонного рассеяния?
2. Как, в принципе, измеряется векторная поляризация пучка частиц?
3. Вы провели два одинаковых измерения инклюзивного типа одной и той же реакции при существенно разных энергиях пучка и решили сравнить распределения по выходу регистрируемого типа частиц в зависимости от  $\chi_F$ , например, при одном и том же поперечном импульсе  $p_{\perp}$ . Корректно ли будет такое сравнение?
4. Существуют два типа экспериментов: (а) на встречных пучках (коллайдерные) и (б) на выведенных (или вторичных) пучках с мишенью, покоящейся в лаборатории («эксперименты с фиксированной мишенью»). Охарактеризуйте их основные достоинства и недостатки по отношению друг к другу.

### Билет 12.

1. Есть ли разница между симметриями решений и симметриями уравнений?
2. Что такое длина рассеяния и о чем говорит ее знак?
3. Что такое «теорема Померанчука»?
4. Дайте качественное описание партонной картины неупругого взаимодействия элементарных частиц.

### Билет 13.

1. Что такое «зарядовая независимость ядерных сил»?
2. Что такое «гипер-ядра»?

3. Насколько общий характер имеют дисперсионные соотношения для амплитуды упругого рассеяния «вперед»?
4. Какие основные типы координатных детекторов для регистрации элементарных частиц вы знаете?

Зачет во 2 семестре:

#### Билет 1.

5. Расскажите о распаде  $\Lambda \rightarrow p\pi$  (амплитуде распада и угловом распределении продуктов распада).
6. Что такое «партоны» и как на языке партонов описываются неупругие взаимодействия частиц?
7. Как создается пучок поляризованных частиц и как измеряется его поляризация?

#### Билет 2.

5. Что такое «дифракционная диссоциация»?
6. Что такое «дискретные» симметрии C, P и T? Что такое «теорема Людерса-Паули»?
7. Почему ядра, испытывающие бета-распад, имеют разные времена жизни, хотя свободный нейтрон «живет»  $14.667 \pm 0.015$  минут?

#### Билет 3.

5. Что такое электромагнитные формфакторы адронов и каков их физический смысл? Как экспериментально определить электромагнитные формфакторы протона, используя неполяризованные пучки и неполяризованную мишень?
6. Можно ли сосчитать (если да, то в какого типа экспериментах это можно сделать и что для этого достаточно измерить) все кварки? Как было это сделано?
7. Что подразумевают, когда говорят о полных сечениях рассеяния? Как измеряются полные сечения и дифференциальные сечения (например, упругого рассеяния)? (Объясните идею измерений.)

#### Билет 4.

5. Что имеют в виду, говоря о «структурных функциях» и чем они отличаются от т.н. «функций фрагментации»? Каков физический смысл тех и других?
6. Что такое «осцилляции странности» и «регенерация»? Какова CP-четность и странность  $K^0_L$  и  $K^0_S$ ?
7. Как ведут себя полные сечения рассеяния в зависимости от энергии сталкивающихся частиц, начиная с низких и кончая наивысшими, достигнутыми сегодня на ускорителях? Есть ли какие-либо общие ограничения на это поведение?

#### Билет 5.

5. Что такое «инклюзивное глубоконеупругое рассеяние»? Что такое «струи»? Как их «увидеть» в эксперименте?

6. Могут ли (и если могут, то при каких условиях) быть «центральные столкновения» пиона с нуклоном?
7. Выпишите формулу Гелл-Манна-Нишиджимы (первоначальный и современный вид) и объясните смысл входящих в нее величин.

#### Билет 6.

5. Что такое «упругое дифракционное рассеяние», каковы его характерные особенности и что такое «оптическая точка»?
6. Что такое гипер-ядра? Какие вопросы гипер-ядерной физики сегодня находятся в центре внимания?
7. Что такое «осцилляции нейтрино» и есть ли они?

#### Билет 7.

1. Что такое «механизм seesaw»?
2. Что такое «векторная доминантность» и как устроены электромагнитные формфакторы нуклонов в моделях, основанных на векторной доминантности?
3. Что есть в мире элементарных частиц «резонанс»? Что такое «диаграмма Аргана»?

#### Билет 8.

5. Расскажите об аналогии между развалом релятивистских ядер (на примере дейтрона) и неупругим взаимодействием частиц в партонной картине. Используйте переменные «светового фронта».
6. Что такое изоспин? Каков изоспин у всех частиц барионных октета и декуплета, нонетов векторных и псевдоскалярных мезонов?
7. Что такое «квазиупругое рассеяние»? Что такое «кумулятивные реакции»?

#### Билет 9.

5. Назовите все российские ускорители для физики частиц промежуточных и высоких энергий (и коротко охарактеризуйте каждый из них: где находится, тип ускоряемых частиц, максимальная кинетическая энергия (если нужно – в расчете на один нуклон), год запуска).
6. Охарактеризуйте типы нуклон-нуклонных потенциалов и назовите современные, наиболее популярные NN-потенциалы. Что такое «длина рассеяния»? Имеет ли она отношение к полным сечениям взаимодействия?
7. Наблюдалась ли интерференция слабого и электромагнитного взаимодействий в атомной физике? (Если вы считаете, что наблюдалась – приведите пример такого эксперимента).

#### Билет 10.

5. Расскажите об эмпирических правилах для распадов странных частиц и угле Кабиббо.
6. Что такое «фазовый анализ» и что такое SAID?
7. Охарактеризуйте (кратко) инструментальную базу и физическую программу исследований будущих ускорительных комплексов НИКА и FAIR.

### Билет 11.

5. Расскажите о главных результатах, полученных на коллайдере LEP.
6. Что такое SU(3) симметрия и что такое кварки; каковы квантовые числа кварков?
7. Какова основная идея теоретического объяснения механизма появления масс у фермионов?

### Билет 12.

5. Что такое «*прямое* CP нарушение»?
6. Какова общая структура амплитуды упругого нуклон-нуклонного рассеяния? Что называется «полным опытом» и что такое «оптическая теорема»?
7. Какие токи входят в эффективный гамильтониан слабого взаимодействия и сохраняются ли они?

### 6.2. Шкала и критерии оценивания

Результат освоения дисциплины	Критерии оценивания знаний, умений и навыков			
	2/ не зачтено	3/ зачтено	4/ зачтено	5/ зачтено
Знания	Отсутствие знаний	В целом успешные, но не систематические знания	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания	Успешные и систематические знания
Умения	Отсутствие умения применять знания фундаментальных и актуальных проблем.	В целом успешное, но не систематическое умение применять знания	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение применять знания	Успешное и систематическое умение применять знания
Навыки	Отсутствие/фрагментарные навыки в решении задач	В целом успешные, но не систематические навыки в решении задач	В целом успешные, но содержащее отдельные пробелы навыки в решении	Успешные и систематические навыки в решении задач

			задач	
--	--	--	-------	--

## 7. Ресурсное обеспечение

Перечень основной и дополнительной учебной литературы

1. Л.Б.Окунь Физика элементарных частиц. М., Наука., 1988
2. Д.Перкинс, Введение в физику высоких энергий, М., Энергоатомиздат, 1991
3. М.Е.Пескин, Д.В.Шредер, Введение в квантовую теорию поля., Ижевск, НИЦ РХД, 2001
4. Г.И.Копылов, Основы кинематики резонансов, М., Наука, 1970
5. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, Теоретическая физика, Том 2, М. Наука, 1988
6. Е. Бюклинг, К. Каянти, Кинематика элементарных частиц, М., Мир, 1975

Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем

- База данных РИНЦ (российский индекс научного цитирования)  
<http://www.elibrary.ru>
- Открытая база данных Particle Data Group,
- поисковая система INSPIRE (<http://inspirehep.net/>)
- Электронные версии журналов Phys. Lett., Phys. Rev., Eur. Phys. J., Nucl. Phys., Nucl. Instrum and Meth.

Описание материально-технической базы: курс может быть прочитан в поточной аудитории при наличии: работающих электрических розеток, компьютера, проектора, экрана, учебной доски

**8. Язык преподавания:** русский