

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:

**Ускорители частиц и их применение**

---

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 Костромин Сергей Александрович, 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**

Целью данного курса является ознакомление студентов с принципами работы и устройством основных систем циклических ускорителей, а также с законами и физическими основами движения заряженных частиц в электромагнитном поле ускорителей. В рамках курса студенты знакомятся с понятиями продольной и поперечной устойчивости, с типами резонансов движения, с видами фокусировки пучков в ускорителях. Рассматривается описание пучка частиц в фазовом пространстве. Дается принцип действия и подробное описание магнитных систем классических и изохронных циклотронов, а также современных синхротронов. Рассматриваются вопросы инжекции, ускорения и вывода заряженных частиц, принципы расчета и проектирования современных циклических ускорителей

Дисциплина реализуется на 1 курсе в 1 семестре и входит в состав вариативной части.

Объем дисциплины составляет 2 з.е., в том числе 36 академических часа, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, 36 академических часа, отведенных на самостоятельную работу обучающихся.

Промежуточная аттестация по дисциплине (модулю) – экзамен в 1 семестре.

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

Дисциплина «Ускорители частиц и их применение» входит в состав вариативной части и реализуется в 1 семестре 1 года обучения.

## 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-5	<p><u>Знать</u> тенденции и перспективы развития современной ядерной физики, а также смежных областей науки и техники</p> <p><u>Уметь</u> использовать передовой отечественный и зарубежный опыт в области современной ядерной физики при постановке научной задачи</p> <p><u>Владеть</u> навыками научно-инновационного прогнозирования при решении исследовательских задач в области современной ядерной физики.</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> особенности циклических ускорителей, теории для описания физических процессов в них</p> <p><u>Уметь</u> математически описывать движение частицы и пучка частиц в полях циклических ускорителей</p> <p><u>Владеть</u> навыками оценки и математического описания характеристик циклического ускорителя и соответствующих ему физических явлений</p>

4. Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е., в том числе: 36 академических часов, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, 36 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*					
Общие сведения об ускорителях заряженных частиц	4	1	1			2	2	Опрос
Движение заряженной частицы в азимутально-симметричном магнитном поле	4	1	1			2	2	Опрос
Поперечная устойчивость, уравнение радиального движения	4	1	1			2	2	Опрос
Изохронный циклотрон	4	1	1			2	2	Опрос
Синхроциклотрон. Магнитные системы	4	1	1			2	2	Опрос

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

циклотронов								
Решение задачи об описании движения пучка в циклическом ускорителе	4	1	1			2	2	Опрос
Фурье анализ магнитного поля. Вывод пучка из ускорителей циклотронного типа	4	1	1			2	2	Опрос
Резонансы бетатронного движения	4	1	1			2	2	Опрос
Кольцевые ускорители. Синхротрон. Принцип слабой и сильной фокусировки	4	1	1			2	2	Опрос
Уравнение движения в натуральной системе координат. Уравнение Хилла	6	2	2			4	2	Опрос
Решение уравнения Хилла. Критерий устойчивости решений	6	2	2			4	2	Опрос
Параметризация Твисса. Бета-функция, ее физический смысл	6	2	2			4	2	Опрос
Описание пучка в фазовом пространстве. Движение частицы с отклонением по импульсу от равновесного значения	6	2	2			4	2	Опрос
Ускорение частиц в кольцевых ускорителях.	6	2	2			4	4	Опрос

Автофазировка								
<b>Промежуточная аттестация</b>							<b>6<sup>2</sup></b>	Экзамен
<b>Итого</b>	<b>72</b>	<b>36</b>					<b>36</b>	

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

---

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

*Тема 1. Общие сведения об ускорителях заряженных частиц.*

Энергия частиц в системе центра инерции: эксперименты с фиксированной мишенью, эксперименты на встречных пучках. Линейные ускорители. Классификация ускорителей. Циклотрон, виды циклотронов. История создания.

*Тема 2. Движение заряженной частицы в азимутально-симметричном магнитном поле.*

Орбита частицы. Ускоритель в цилиндрической системе координат. Поперечная устойчивость. Радиальная и вертикальная устойчивость в азимутально-симметричном магнитном поле. Уравнение вертикального движения, амплитуда бетатронных колебаний.

*Тема 3. Поперечная устойчивость, уравнение радиального движения.*

Уравнение радиального движения в азимутально симметричном магнитном поле. Частота обращения. Понятие фазы частицы. Временная структура ускоряемого пучка. Ток пучка. Прохождение ускоряющих зазоров, время-пролетный фактор. Принцип работы и устройство внутреннего источника ионов.

*Тема 4. Изохронный циклотрон.*

Устройство изохронного циклотрона. Азимутальная вариация магнитного поля, фокусировка Томаса. Пространственная вариация магнитного поля, фокусировка Керста и Ласлетта. Вариация магнитного поля, общее определение. Частоты бетатронных колебаний в циклотроне со спиральными секторами. Синхроциклотрон. Максимальная энергия, достижимая в классическом циклотроне.

*Тема 5. Синхроциклотрон. Магнитные системы циклотронов.*

Устройство синхроциклотрона. Параметры синхротронов и изохронных циклотронов на примере конкретных установок. Классификация циклотронов и их магнитных систем. Формирование магнитных полей. Схема расчета основных параметров циклотрона. Постановка задачи об описании движения пучка в установках циклотронного типа.

*Тема 6. Постановка и решение задачи о движении пучка в ускорителе циклотронного типа.*

Уравнения движения в цилиндрической системе координат. Решение уравнений движения. Амплитуды бетатронных колебаний. Вертикальное и радиальное движение пучка. Продольное движение. Основные результаты моделирования движения пучка в ускорителе.

*Тема 7. Фурье анализ магнитного поля циклотрона. Вывод пучка из ускорителей циклотронного типа.*

Фурье анализ карт магнитного поля для циклотронов. Амплитуды гармоник магнитного поля. Вывод пучка из ускорителей циклотронного типа. Вывод при помощи перезарядной фольги и электростатического дефлектора. Устройство электростатического дефлектора, потери пучка при выводе, получение портретов пучка на входе в дефлектор.

*Тема 8. Резонансы бетатронного движения.*

Классификация резонансов. Диаграмма рабочей точки для циклического ускорителя. Понятие структурных резонансов и резонансов ошибок. Моделирование прохождения пучком различных резонансов в циклотроне.

*Тема 9. Кольцевые ускорители. Синхротрон. Принцип слабой и сильной фокусировки.*  
Кольцевые ускорители. Синхротрон. Зависимость частоты ускоряющего поля от ведущего магнитного поля в цикле ускорения. Слабая фокусировка. Сильная фокусировка. Примеры кольцевых ускорителей. Принцип действия квадрупольных магнитов.

*Тема 10. Уравнение движения в натуральной системе координат. Уравнение Хилла.*  
Задача о движении пучка в кольцевом ускорителе. Криволинейная (сопровождающая) система координат Уравнения движения заряженной частицы в криволинейной системе. Уравнение Хилла.

*Тема 11. Решение уравнения Хилла. Критерий устойчивости решений.*  
Задача Коши для уравнения Хилла. Матричный формализм. Понятие матрицы перехода через элемент. Матрица перехода через свободный промежуток. Матрица перехода через квадрупольный и дипольный магниты. Приближение тонкой линзы. Критерий устойчивости решений уравнения Хилла.

*Тема 12. Параметризация Твисса. Бета-функция, ее физический смысл.*  
Параметризация Твисса решения уравнения Хилла. Понятие бета-функции, ее физический смысл.

*Тема 13. Описание пучка в фазовом пространстве. Движение частицы с отклонением по импульсу от равновесного значения.*  
Понятие фазового пространства. Описание ансамбля частиц в фазовом пространстве. Оценки основных параметров кольцевого ускорителя, расчет основных характеристик пучка. Распределение частиц в пучке. Понятие размера пучка с Гауссовым распределением частиц. Движение частицы с импульсом  $p + \Delta p$ . Коэффициент пространственного уплотнения орбит.

*Тема 14. Ускорение частиц в кольцевых ускорителях. Автофазировка.*  
Принципы ускорения частиц в кольцевых ускорителях. Понятие автофазировки, ее принцип действия и физический смысл. Уравнение фазовых колебаний. Показатель автофазировки, критическая энергия. Сепаратриса пучка.

## **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. К какому типу ускорителей относятся современные кольцевые синхротроны?
2. Сформулировать условие устойчивости движения частицы в азимутально симметричном магнитном поле (в классическом циклотроне)
3. Чем определяется амплитуда свободных (бетатронных) колебаний при движении частицы в магнитном поле ускорителя в общем случае?
4. Перечислить основные типы структурных магнитов кольцевых ускорителей

5. Перечислить основные особенности поля магнитной системы изохронного циклотрона
6. Сформулировать понятие устойчивости при движении частицы в циклическом ускорителе
7. В чем суть принципа *сильной* фокусировки частиц в кольцевых ускорителях?

Типовые вопросы, задания для проведения промежуточной аттестации (экзамена):

1. Уравнение движения заряженной частицы в электромагнитном поле
2. Энергия частиц в системе центра инерции, «полезная» энергия ускорителя
3. Типы ускорителей заряженных частиц
4. Понятие орбиты частицы, движение в однородном магнитном поле
5. Понятие устойчивости движения в ускорителе – продольная и поперечная устойчивость
6. Радиальная устойчивость в азимутально симметричном магнитном поле. Показатель спада магнитного поля. Уравнения радиального движения
7. Вертикальная устойчивость в азимутально симметричном магнитном поле. Уравнение вертикального движения.
8. Бетатронные колебания. Частоты бетатронных колебаний частицы в азимутально симметричном магнитном поле.
9. Амплитуда бетатронных колебаний
10. Сильная и слабая фокусировка частиц в циклических ускорителях.
11. Типы структурных магнитов в кольцевых ускорителях
12. Постановка задачи об описании движения пучка
13. Уравнение Хилла. Критерий устойчивости решений.
14. Матричный формализм описания движения частиц в ускорителе. Матрицы преобразования для основных типов магнитов (дипольный магнит, квадрупольный магнит, свободный промежуток).
15. Параметризация Твисса. Бета-функция.
16. Описание движения частицы в ускорителе в фазовом пространстве
17. Движение частицы с импульсом  $p+\Delta p$ . Коэффициент пространственного уплотнения орбит
18. Принцип автофазировки. Уравнение фазовых колебаний.
19. Показатель автофазировки. Понятие сепаратрисы.
20. Резонансы бетатронных колебаний.

## 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 содержащие 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 содержащие 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 содержащие отдельные пробелы навыки в решении задач	Успешные и систематические навыки в решении задач

## 7. Ресурсное обеспечение

### Перечень основной и дополнительной учебной литературы

#### Основная литература

1. Дж. Ливингуд Принципы работы циклических ускорителей: Издательство иностранной литературы, 1963.
2. А.А. Коломенский Физические основы методов ускорения заряженных частиц, Издательство Московского университета, 1980
3. А.Н. Лебедев, А.В. Шальнов, Основы физики и техники ускорителей, т.1, 2, Энергоиздат, 1982
4. Коломенский А.А., Лебедев А.Н. *Теория циклических ускорителей*: Физматгиз, 1962

#### Дополнительная литература

1. Г. Брук. Циклические ускорители заряженных частиц: пер с франц. Атомиздат, 1970
2. Е.Г. Комар Основы ускорительной техники. Атомиздат, 1975

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