

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 /
« 09 /» 2022 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование дисциплины:

Основы физики циклических ускорителей

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 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 «Основы физики циклических ускорителей»

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 пуска 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

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 «Основы физики циклических ускорителей» 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
МПК-1 Способен решать практические задачи профессиональной деятельности в области физики элементарных частиц на основе фундаментальных знаний	ИМПК-1.1 Знает основные разделы физики элементарных частиц: сильные, электромагнитные, слабые взаимодействия, симметрии в физике частиц	З-1 Знать: особенности циклических ускорителей, теории для описания физических процессов в них У-1 Уметь: математически описывать движение частицы и пучка частиц в полях циклических ускорителей В-1 Владеть: навыками оценки и математического описания характеристик циклического ускорителя и соответствующих ему физических явлений

2. **Форма обучения:** очная.

3. **Язык обучения:** русский.

4. **Содержание дисциплины**

Тема 1. Общие сведения об ускорителях заряженных частиц.

Энергия частиц в системе центра инерции. Линейные ускорители. Классификация ускорителей. Циклотрон. 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. Амплитуда бетатронного движения.

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. Фокусировка Томаса. Фокусировка Керста и Ласлетта. Вариация магнитного поля. Частоты бетатронных колебаний в циклотроне со спиральными секторами. Синхроциклотрон.

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 циклотрона. Постановка задачи об описании движения пучка в циклотроне.

Тема 6. Решение задачи об описании движения пучка в циклическом ускорителе.

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. 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 электростатического дефлектора.

Тема 8. Резонансы бетатронного движения.

Классификация резонансов. Диаграмма рабочей точки для циклического ускорителя. Понятие структурных резонансов и резонансов ошибок. Моделирование прохождения пучком резонанса в циклотроне. Примеры крупнейших ускорителей циклотронного типа. Кольцевые ускорители. Синхротрон. Слабая фокусировка. Сильная фокусировка. Примеры кольцевых ускорителей. Принцип действия квадрупольных магнитов.

Тема 9. Кольцевые ускорители. Синхротрон. Принцип слабой и сильной фокусировки.

Кольцевые ускорители. Синхротрон. Слабая фокусировка. Сильная фокусировка. Примеры кольцевых ускорителей. Принцип действия квадрупольных магнитов.

Тема 10. Уравнение движения в натуральной системе координат. Уравнение Хилла.

Криволинейная 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.

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		
Основы физики циклических ускорителей	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 «Основы физики циклических ускорителей» 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	Общие сведения об ускорителях заряженных частиц	4	1	1		2	
2	Движение заряженной частицы в азимутально-симметричном магнитном поле	4	1	1		2	
3	Поперечная устойчивость, уравнение радиального движения	4	1	1		2	
4	Изохронный циклотрон	4	1	1		2	
5	Синхроциклотрон. Магнитные системы циклотронов	4	1	1		2	
6	Решение задачи об описании движения пучка в циклическом ускорителе	4	1	1		2	
7	Фурье анализ магнитного поля. Вывод пучка из ускорителей циклотронного типа	4	1	1		2	
8	Резонансы бетатронного движения	4	1	1		2	
9	Кольцевые ускорители. Синхротрон. Принцип слабой и сильной фокусировки	4	1	1		2	
10	Уравнение движения в натуральной системе координат. Уравнение Хилла	4	1	1		2	
11	Решение уравнения Хилла. Критерий устойчивости решений	6	2	2		2	
12	Параметризация Твисса. Бета-функция, ее физический смысл	6	2	2		2	
13	Описание пучка в фазовом пространстве. Движение частицы с отклонением по импульсу от равновесного значения	6	2	2		2	
14	Ускорение частиц в кольцевых ускорителях. Автофазировка	8	2	2		4	
	Промежуточная аттестация	6				6	экзамен
ИТОГО:		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 «Основы физики циклических ускорителей» 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 «Основы физики циклических ускорителей» 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
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	Требования к порядку проведения собеседования

11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	2/ неудовлетворительно	3/ удовлетворительно	4/ хорошо	5/ отлично
ЗНАТЬ: особенности циклических ускорителей, теории для описания физических процессов в них ИМПК-1.1	Отсутствие знаний особенностей циклических ускорителей, теории для описания физических процессов в них	В целом успешные, но не систематические знания особенностей циклических ускорителей, теории для описания физических процессов в них	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы особенности циклических ускорителей, теории для описания физических процессов в них знания	Успешные и систематические знания особенностей циклических ускорителей, теории для описания физических процессов в них
УМЕТЬ: математически описывать движение частицы и пучка частиц в полях циклических ускорителей ИМПК-1.1	Отсутствие умения математически описывать движение частицы и пучка частиц в полях циклических ускорителей	В целом успешное, но не систематическое умение математически описывать движение частицы и пучка частиц в полях циклических ускорителей	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение математически описывать движение частицы и пучка частиц в полях циклических ускорителей	Успешное и систематическое умение математически описывать движение частицы и пучка частиц в полях циклических ускорителей
ВЛАДЕТЬ: навыками оценки и математического описания характеристик циклического ускорителя и соответствующих ему физических явлений ИМПК-1.1	Отсутствие/фрагментарное владение навыками оценки и математического описания характеристик циклического ускорителя и соответствующих ему физических явлений	В целом успешное, но не систематическое владение навыками оценки и математического описания характеристик циклического ускорителя и соответствующих ему физических явлений	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение навыками оценки и математического описания характеристик циклического ускорителя и соответствующих ему физических явлений	Успешное и систематическое владение навыками оценки и математического описания характеристик циклического ускорителя и соответствующих ему физических явлений

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

Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся

Пример:

Вопросы по теории:

1. Понятие слабая фокусировка, сильная фокусировка.
2. Задача Коши для уравнения Хилла.
3. Критерий устойчивости решений уравнения Хилла.

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. Уравнение движения заряженной частицы в электромагнитном поле
2. Типы ускорителей заряженных частиц
3. Понятие орбиты частицы, движение в однородном магнитном поле
4. Понятие устойчивости движения в ускорителе – продольная и поперечная устойчивость
5. Радиальная устойчивость в азимутально симметричном магнитном поле.
6. Показатель спада магнитного поля.
7. Уравнения радиального движения
8. Вертикальная устойчивость в азимутально симметричном магнитном поле.
9. Уравнение вертикального движения.
10. Бетатронные колебания. Частоты бетатронных колебаний частицы в азимутально симметричном магнитном поле.
11. Амплитуда бетатронных колебаний

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

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

При реализации дисциплины может быть использовано следующее программное обеспечение:

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

Перечень интернет ресурсов

1. Сайт кафедры <https://msu-dubna.ru/her>

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.