

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**и.о. директора физтех-школы  
физики и исследований им.  
Ландау**

**А.А. Воронов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Введение в теорию ускорителей
<b>по направлению:</b>	Ядерная физика и технологии
<b>профиль подготовки:</b>	Ядерная физика, УТС и компьютерные методы в физике Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра фундаментальных и прикладных проблем физики микромира
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: Д.И. Казаков, д-р физ.-мат. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры фундаментальных и прикладных проблем физики микромира  
04.06.2020

## Аннотация

Ускорители являются основным инструментом физики элементарных частиц. От энергии пучков, их фокусировки, тока пучка зависит интенсивность взаимодействия частиц и частота полезных событий. Различные типы ускорителей позволяют решать разные задачи, от получения сверхвысоких энергий столкновения до поиска редких процессов в высокоинтенсивных пучках и решения прикладных задач. Данный курс является введением в теорию ускорителей и знакомит с основными понятиями физики и техники ускорителей в объеме, достаточном для физиков-экспериментаторов.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- обучение основным представлениям о физике ускорителей заряженных частиц.

#### Задачи дисциплины

- ☐ формирование представлений о физических основы методов ускорения заряженных частиц;
- ☐ получение базовых знаний об ускорительной технике;
- ☐ формирование навыков расчета основных параметров ускорителей различных типов, а также проектирования и расчета радиационной защиты.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
ОПК-1 Способен формулировать цели и задачи исследования, выбирать критерии оценки, выявлять приоритеты решения задач	ОПК-1.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
ОПК-2 Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы	ОПК-2.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-2.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования, применять знания в области профессиональной деятельности для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ПК-1 Способен к созданию теоретических и математических моделей в области ядерной физики и технологий	ПК-1.3 Владеет навыками работы с современными расчетными программными средствами
ПК-2 Готов применять методы исследования и расчета процессов, происходящих в современных физических установках и устройствах в области ядерной физики и технологий	ПК-2.2 Умеет рассчитывать и проводить исследования процессов, протекающих в современных физических установках и устройствах в области ядерной физики и технологий
ПК-3 Способен объективно оценить предлагаемое решение или проект по отношению к современному мировому уровню, подготовить экспертное заключение	ПК-3.1 Знает современный уровень развития науки и технологии, профессиональные проблемы в своей предметной области

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- ☐ основные характеристики ускорителей и пучков заряженных частиц;
- ☐ основные методы ускорения;
- ☐ принципы сохранения частиц в пучке в процессе ускорения;
- ☐ описание пучка в фазовом пространстве;
- ☐ метод встречных пучков;
- ☐ методы охлаждения пучков.

уметь:

- ☐ эффективно применять вышеуказанные знания на практике для решения фундаментальных и прикладных научных задач в области современной экспериментальной физики элементарных частиц.

владеть:

- ☐ техникой расчета экспериментов с внутренней мишенью;
- ☐ техникой расчета радиационной защиты ускорителя.

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

##### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Введение.	2	2		3
2	Ускорители прямого действия. Ускорители со встречными пучками.	2	2		3
3	Циклические ускорители. Поперечная устойчивость и фокусировка.	2	2		3
4	Индукционное ускорение. Бетатрон.	2	2		3
5	ВЧ - ускорение. Автофазировка в циклических ускорителях.	2	2		3
6	Возмущения и допуски в циклических ускорителях.	2	2		3
7	Методы охлаждения пучков заряженных частиц в циклических ускорителях. Новые методы ускорения.	2	2		3
8	Пространственный заряд и когерентные неустойчивости.	2	2		3
9	Типы циклических резонансных ускорителей.	2	2		3
10	Линейные резонансные ускорители.	2	2		3
11	Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях.	2	2		3
12	Эффекты пространственного заряда в линейных ускорителях.	2	2		3
13	Конструкция и параметры линейных ускорителей.	2	2		3
14	Источники заряженных частиц.	2	2		3
15	Радиационная защита ускорителей.	2	2		3
Итого часов		30	30		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

## 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

### 1. Введение.

Хронология развития ускорительной физики и техники. Ускорители в современной науке и промышленности. Ускорение в электростатических, вихревых и высокочастотных электрических полях. Принципиальные схемы ускорителей. Светимость ускорителя. Области использования ускорителей в фундаментальной науке и различных отраслях жизнедеятельности человека.

### 2. Ускорители прямого действия. Ускорители со встречными пучками.

Ускорители трансформаторного типа. Каскадные ускорители. Электростатические ускорители.

Метод встречных пучков. Накопление легких частиц. Накопление тяжелых частиц. Ускорительно-накопительные комплексы. Линейные коллайдеры. Сильноточные электронные и ионные пучки. Импульсные источники мощности. Сильноточные диоды. Транспортировка сильноточных пучков.

### 3. Циклические ускорители. Поперечная устойчивость и фокусировка.

Поперечная устойчивость и фокусировка. Фокусировка неоднородным магнитным полем. Критерий устойчивости и бетатронные колебания в периодических системах. Простейшие элементы фокусирующей системы. Описание системы частиц в фазовом пространстве, теорема Лиувилля, инвариант Куранта-Снайдера, эмиттанс пучка.

### 4. Индукционное ускорение. Бетатрон.

Индукционное ускорение. Бетатрон. Линейный бетатрон (линейный индукционный ускоритель).

### 5. ВЧ - ускорение. Автофазировка в циклических ускорителях.

Автофазировка в циклических ускорителях: равновесная частица, принцип автофазировки, фазовые колебания, эффективная масса и критическая энергия.

### 6. Возмущения и допуски в циклических ускорителях.

Резонансы бетатронных колебаний, параметрический резонанс, резонансы связи, нелинейные резонансы. Синхротронные колебания при наличии возмущений.

### 7. Методы охлаждения пучков заряженных частиц в циклических ускорителях. Новые методы ускорения.

Радиационное, электронное, ионизационное (мюонное) и стохастическое охлаждение.

Ускорение электронных колец. Лазерные и плазменные методы ускорения. Синхротронное излучение. Лазеры на свободных электронах.

### 8. Пространственный заряд и когерентные неустойчивости.

Статические эффекты пространственного заряда; некогерентный сдвиг частоты бетатронных колебаний (формула Ласлетта). Когерентные колебания пучка. Инкременты когерентных неустойчивостей. Импеданс цилиндрической камеры. Критерий Кайла-Шнелля). Затухание Ландау и другие кинетические эффекты. Неустойчивости в цепочке малых сгустков. Другие виды когерентных неустойчивостей.

## 9. Типы циклических резонансных ускорителей.

Типы циклических резонансных ускорителей. Описание и конструкция. Магниты и их питание. Ускоряющие системы. Циклические ускорители с постоянным магнитным полем (циклотрон, синхроциклотрон, микротрон). Циклический ускоритель с постоянной орбитой – синхротрон.

## 10. Линейные резонансные ускорители.

Основные характеристики ускоряющих систем. Особенности систем со стоячей волной. Диафрагмированный волновод. Резонатор с трубками дрейфа.

## 11. Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях.

Продольное движение в поле волны. Предгруппировка частиц. Фокусировка частиц в линейных резонансных ускорителях.

## 12. Эффекты пространственного заряда в линейных ускорителях.

Продольное движение в самосогласованном поле. Нагрузка током и оптимизация параметров ускорителя. Влияние кулоновского поля.

## 13. Конструкция и параметры линейных ускорителей.

Линейные резонансные ускорители электронов. Линейные ускорители ионов. Сверхпроводящие линейные ускорители.

## 14. Источники заряженных частиц.

Электронные пушки. Ионные источники на основе высоковольтного разряда. ЭЦР-источники. Лазерные ионные источники. Ионные источники с электронным пучком-ионизатором. Источники поляризованных ионов.

## 15. Радиационная защита ускорителей.

Вакуум в ускорителях. Радиационная защита ускорителей: Взаимодействие частиц с остаточным газом в ускорителе: ионизационные потери и их флуктуации (straggling); однократное и многократное рассеяние. Типичные вакуумные условия в различных ускорителях. Радиационная защита ускорителей.

## 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Необходимое оборудование для лекций и практических занятий: учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).  
Обеспечение самостоятельной работы: доступ к библиотеке.

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. Основы физики и техники ускорителей [Текст]: в 3-х т / А. Н. Лебедев, А. В. Шальнов и Т. 2. Циклические ускорители - М. Энергоиздат, 1982
2. И. Н. Мешков, Е. М. Сыресин "Ускорители заряженных частиц в ядерной физике и физике высоких энергий", Лекции для молодых ученых, ОИЯИ, 1998.
3. И. Н. Мешков, "Транспортировка пучков заряженных частиц", Новосибирск, "Наука", 1991.

Дополнительная литература

1. Ю.М. Адо, С.М. Варзарь, А.П. Черняев “Введение в физику ускорителей. Задачи”, изд-во МГУ, 1999.
2. Коломенский А.А. “Физические основы методов ускорения заряженных частиц”, - М.: Издательство МГУ, 1980.

**7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

Не используются

**8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

Необходимое программное обеспечение: Adobe Reader.

**9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Ядерная физика и технологии
<b>профиль подготовки:</b>	Ядерная физика, УТС и компьютерные методы в физике Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра фундаментальных и прикладных проблем физики микромира
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен	
<b>Разработчик:</b>	Д.И. Казаков, д-р физ.-мат. наук, профессор

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
ОПК-1 Способен формулировать цели и задачи исследования, выбирать критерии оценки, выявлять приоритеты решения задач	ОПК-1.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
ОПК-2 Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы	ОПК-2.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-2.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования, применять знания в области профессиональной деятельности для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ПК-1 Способен к созданию теоретических и математических моделей в области ядерной физики и технологий	ПК-1.3 Владеет навыками работы с современными расчетными программными средствами
ПК-2 Готов применять методы исследования и расчета процессов, происходящих в современных физических установках и устройствах в области ядерной физики и технологий	ПК-2.2 Умеет рассчитывать и проводить исследования процессов, протекающих в современных физических установках и устройствах в области ядерной физики и технологий
ПК-3 Способен объективно оценить предлагаемое решение или проект по отношению к современному мировому уровню, подготовить экспертное заключение	ПК-3.1 Знает современный уровень развития науки и технологии, профессиональные проблемы в своей предметной области

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Введение в теорию ускорителей» обучающийся должен:

### знать:

- ☐ основные характеристики ускорителей и пучков заряженных частиц;
- ☐ основные методы ускорения;
- ☐ принципы сохранения частиц в пучке в процессе ускорения;
- ☐ описание пучка в фазовом пространстве;
- ☐ метод встречных пучков;
- ☐ методы охлаждения пучков.

### уметь:

- ☐ эффективно применять вышеуказанные знания на практике для решения фундаментальных и прикладных научных задач в области современной экспериментальной физики элементарных частиц.

### владеть:

- ☐ техникой расчета экспериментов с внутренней мишенью;
- ☐ техникой расчета радиационной защиты ускорителя.

## 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

Не предусмотрено.



#### 4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Перечень контрольных вопросов для сдачи экзамена в 9-ом семестре:

1. Ускорители заряженных частиц. Назначение, применение, типы ускорителей.
2. Магнитная система ускорителей.
3. Фокусировка магнитным полем.
4. Уравнение движения частицы в магнитном поле ускорителя.
5. Матричная форма решения уравнения движения. Матрицы перехода различных элементов. Матричный метод анализа устойчивости движения.
6. Замкнутое решение уравнения движения. Связь бетатронной функции с матричными элементами.
7. Слабая и сильная фокусировка
8. Анализ бетатронного движения на фазовой плоскости. Фазовый объем пучка.
9. Зависимость параметров орбиты от энергии частицы.
10. Резонансный режим ускорения. Принцип автофазировки.
11. Анализ синхротронного движения, фазовая плоскость, сепаратриса.
12. Синхротронное излучение.
13. Стохастическое охлаждение пучков.
14. Электронное охлаждение пучков.
15. Влияние пространственного заряда на некогерентные бетатронные колебания. Накопление ионов.
16. Влияние пространственного заряда встречного пучка.
17. Влияние пространственного заряда на некогерентные синхротронные колебания. Понятие о когерентных неустойчивостях.
18. Ускорители со встречными пучками: светимость, ограничение светимости эффектами встречи.
19. Особенности ускорителей различных типов (линейные и циклические ускорители).
20. Особенности ускорителей различных типов (циклотрон, бетатрон, микротрон, синхротрон).

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Ускорители заряженных частиц. Назначение, применение, типы ускорителей.
2. Анализ синхротронного движения, фазовая плоскость, сепаратриса.

Билет 2.

1. Магнитная система ускорителей.
2. Синхротронное излучение.

#### Критерии оценивания

Обучающемуся ставится оценка в соответствии с продемонстрированным уровнем подготовки; оценивание производится на усмотрения экзаменатора в соответствии с особенностями дисциплины и следующими критериями:

Оценка "отлично" (10 баллов) выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка "отлично" (9 баллов) выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка "отлично" (8 баллов) выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочётами.

Оценка "хорошо" (7 баллов) выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка "хорошо" (6 баллов) выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка "хорошо" (5 баллов) выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка "удовлетворительно" (4 балла) выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка "удовлетворительно" (3 балла) выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка "неудовлетворительно" (2 балла) выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка "неудовлетворительно" (1 балл) выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

При проведении оценивания знаний обучающемуся предоставляется время на подготовку на усмотрение экзаменатора. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать одного астрономического часа. Оценивание знаний производится в соответствии с вышеуказанными критериями в соответствии с содержанием дисциплины.