

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»  
Физический факультет

УТВЕРЖДАЮ

И.о. декана физического факультета МГУ,  
профессор, д.ф.-м.н.



/ В.В. Белокуров /

» март 2024 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

**Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника**

*Physics of charged particle beams and accelerator technology*

Программа (программы) подготовки  
научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре  
Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника  
(103-01-00-1318-фмн)

---

Москва 2024

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с Приказом по МГУ от 24 ноября 2021 года № 1216 «Об утверждении Требований к основным программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, самостоятельно устанавливаемых Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова».

1. Краткая аннотация:

**Название дисциплины:** Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

**Цель изучения дисциплины** – расширение и углубление знаний о современном состоянии и тенденциях развития в области физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники.

2. Уровень высшего образования - подготовка кадров высшей квалификации.

3. Научная специальность: 1.3.18 Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника; область науки: естественные науки.

4. Место дисциплины (модуля) в структуре Программы аспирантуры: дисциплины (модули), направленные на подготовку к кандидатским экзаменам - Дисциплина, совпадающая с наименованием научной специальности.

5. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества академических или астрономических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся:

*Объем дисциплины (модуля) составляет 3 зачетных единицы, всего 108 часов, из которых 54 часа составляет контактная работа аспиранта с преподавателем (50 часов занятия лекционного типа, 4 часов мероприятия текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации), 54 часа составляет самостоятельная работа учащегося.*

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

Необходимы знания высшей математики и общей физики в объеме курсов, преподаваемых на физических специальностях классических университетов, полученных на предыдущих уровнях высшего образования.

7. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля),  форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)	В том числе								
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них					Самостоятельная работа обучающегося, часы из них			
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Групповые консультации	Индивидуальные консультации	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации	Всего	Выполнение домашних заданий	Подготовка к коллоквиумам	Всего
Тема 1. <b>Источники заряженных частиц</b> (Электронная эмиссия. Электронные пушки. Ионные источники.)	8	4					4	3	1	4
Тема 2. <b>Транспортировка пучков заряженных частиц</b> (Магнитные и электростатические линзы. Поворотные магниты. Анализаторы заряженных частиц. Системы квадрупольных линз.)	8	4					4	3	1	4
Тема 3. <b>Способы формирования пучков</b>	8	4					4	3	1	4

<i>(Методы вывода ускоренных пучков из циклических ускорителей. Способы формирования мюонных, пионных и нейтронных пучков.)</i>										
<b>Тема 4. Ускорители прямого действия</b> <i>(Каскадный генератор. Электростатический генератор Ван-де-Граафа. Электростатический тандем. Тандетрон.)</i>	8	4					4	3	1	4
<b>Тема 5. Резонансные циклические ускорители тяжелых заряженных частиц</b> <i>(Циклотрон. Синхроциклотрон. Синхротрон. Изохронный циклотрон. Автофазировка. Сильная и слабая фокусировка.)</i>	8	4					4	3	1	4
<b>Тема 6. Ускорение электронов</b> <i>(Бетатрон. Микротрон. Электронный синхротрон. Синхротронное излучение. Лазеры на свободных электронах.)</i>	8	4					4	3	1	4
<b>Тема 7. Метод встречных пучков</b> <i>(Накопители. Коллайдеры. Светимость. Стохастическое охлаждение.)</i>	8	4					4	3	1	4
<b>Тема 8. Поляризованные пучки</b>	8	4					4	3	1	4

<i>(Источники поляризованных протонов и тяжелых ионов. Радиационная поляризация электронных пучков. Управление поляризацией.)</i>										
<b>Тема 9. Линейные резонансные ускорители</b> <i>(Линейный ускоритель тяжелых заряженных частиц со стоячей волной. Линейный ускоритель электронов с бегущей волной. Мезонные фабрики.)</i>	8	4					4	3	1	4
<b>Тема 10. Вакуумные системы ускорителей</b> <i>(Методы получения и измерения высокого и сверхвысокого вакуума.)</i>	8	4					4	3	1	4
<b>Тема 11. Диагностика пучков заряженных частиц</b> <i>(Измерение тока и эмиттанса пучка. Контроль положения и профиля пучка. Контроль параметров электронных и позитронных пучков в накопителях по синхротронному излучению.)</i>	8	4					4	3	1	4
<b>Тема 12. Методы измерения и математической обработки экспериментальных данных</b> <i>(Методы спектрометрических измерений. Основные понятия</i>	8	4					4	3	1	4

<i>математической статистики. Планирование эксперимента.)</i>										
<b>Тема 13. Элементы радиационной безопасности (Физика взаимодействия излучения с веществом. НРБ.)</b>	8	4					4	3	1	4
Промежуточная аттестация: допуск к кандидатскому экзамену	4			2			2			2
<b>Итого</b>	<b>108</b>	52		2			<b>54</b>	39	13	<b>54</b>

## 8. Образовательные технологии

Используемые формы и методы обучения: лекции и семинарские занятия, самостоятельная работа аспирантов.

В процессе преподавания дисциплины преподаватель использует как классические формы и методы обучения (лекции и семинарские занятия), так и активные методы обучения.

При проведении лекционных занятий преподаватель использует при необходимости аудиовизуальные, компьютерные и мультимедийные средства обучения, а также демонстрационные и наглядно-иллюстрационные (в том числе раздаточные) материалы.

9. Учебно-методические материалы для самостоятельной работы по дисциплине (модулю): аспирантам предоставляется программа курса, план занятий и задания для самостоятельной работы, презентации к лекционным занятиям.

10. Ресурсное обеспечение:

### Основная литература:

1. Коломенский А.А. Физические основы методов ускорения заряженных частиц. М.: Изд-во МГУ, 1980.
2. Лебедев А.Н., Шальнов А.В. Основы физики и техники ускорителей. В 3 т. М.: Энергоиздат, 1981-1983; 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Комар Е.Г. Основы ускорительной техники. М.: Атомиздат, 1975.
4. Мешков И.Н. Основные тенденции развития ускорителей // 16-е совещ. по ускорит. заряж. част. Т. 1. Протвино, 1998.
5. Ширшов Л.С. Ускорители заряженных частиц // Атомная техника за рубежом. 1998. 9.
6. Бредов М.М., Румянцев В.В., Топтыгин И.Н. Классическая электродинамика. М.: Наука, 1985.
7. Гаврилов Н.М. Введение в физику ускоряющих систем. Ч. 1, 2. М.: МИФИ, 1990.
8. Зверев Б.В., Собенин Н.П. Электродинамические характеристики ускоряющих резонаторов. М.: Энергоатомиздат, 1993.
9. Браун Я. Физика и технология источников ионов. М.: Мир, 1998.
10. Быстрицкий В.М., Диденко А.Н. Мощные ионные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1984.
11. Карташев В.П., Котов В.И. Основы магнитной оптики пучков заряженных частиц высоких энергий. М.: Энергоатомиздат, 1984.
12. Мешков И.Н. Транспортировка пучков заряженных частиц. Новосибирск: Наука, 1991.
13. Радиоактивность атомных ядер / Под ред. Б.С.Ишханова. М.: КДУ, Университетская книга, 2017.
14. V.Zelevinsky, A.Volya. Physics of atomic nuclei. Wiley-WCH, 2017.
15. Протон / Под ред. Б.С.Ишханова. М.: КДУ, Университетская книга, 2018.
16. Радиоактивные распады атомных ядер / Под ред. Б.С.Ишханова. М.: КДУ, Университетская книга, 2018.
17. Фотон / Под ред. Б.С.Ишханова. М.: КДУ, Университетская книга, 2020.
18. K.Heude, J.L.Wood. Quantum mechanics for nuclear structure. Vols. 1, 2. IOP Publishing, 2020.
19. Нейтрон / Под ред. Д.Е.Ланского, М.Е.Степанова, Т.Ю.Третьяковой. М.: КДУ, Университетская книга, 2021.
20. Б.С.Ишханов, И.М.Капитонов. Гигантский дипольный резонанс атомных ядер. М.: Ленанд, 2021.
21. В.В.Балашов. Квантовая теория столкновений. М.: Изд. Моск. ун-та, 2023.

### **Дополнительная литература:**

1. Лоусон Дж. Физика пучков заряженных частиц. М.: Мир, 1980.
2. Ливингуд Дж. Принципы работы циклических ускорителей. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.
3. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. М.: Сов. радио, 1966.
4. Котов В.И., Миллер В.В. Фокусировка и разделение по массам частиц высоких энергий. М.: Атомиздат, 1969.
5. Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. М.: Наука, 1978.
6. Бурштейн Э.Л. Ускорители: Статья // Физический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1983.
7. Мешков И.Н. Ускорители в физике элементарных частиц (от электрона к хиггсу) // II Науч. сем. памяти В.П. Саранцева. Дубна: ОИЯИ, 1998.
8. Капчинский И.М. Сильноточные линейные ускорители ионов // УФН. 1980. Т. 32, вып.4.
9. Капчинский И.М. Интенсивные линейные ускорители для материаловедческих исследований // 6-е Всесоюз. совещ. по ускорит. заряд. част. Т. 1. Дубна, 1979.
10. Рябухин Ю.С. Ускоренные пучки и их применение. М.: Атомиздат, 1980.
11. Сильноточный линейный ускоритель протонов для электроядерных систем / В.Н. Михайлов, П.В. Богданов, О.В. Шведов и др. // III Науч. сем. памяти В.П. Саранцева. Дубна: ОИЯИ, 2000.
12. Лазарев Н.В., Козодаев А.М. Сверхмощные линейные ускорители протонов для нейтронных генераторов и электроядерных установок // Атомная энергия. 2000. Т. 89, вып.6; 17-е совещ. по ускорит. заряд. част. Т. 2. Протвино, 2000.
13. Разработка, эксплуатация и применение линейных ускорителей / Под ред. А.В. Шальнова. М.: Энергоатомиздат, 1984.
14. Салимов Р.А. Мощные ускорители электронов для промышленного применения // УФН. 2000. Т. 170. .
15. Диденко А.Н., Григорьев В.П., Усов Ю.П. Электронные пучки и их применение. М.: Атомиздат, 1977.
16. Абрамян Е.А. Промышленные ускорители электронов. М.: Энергоатомиздат, 1986.
17. Чувило И.В., Гольдин Л.Л., Хорошков В.С. Получение короткоживущих и ультракороткоживущих радионуклидов для использования в медицине // 9-е Всесоюз. совещ. по ускорит. заряд. част. Т. 2. Дубна, 1985.

11. Язык преподавания – русский

12. Преподаватели:

1. Д.ф.-м.н., профессор Платонов Сергей Юрьевич, [platonov@sinp.msu.ru](mailto:platonov@sinp.msu.ru);
2. Д.ф.-м.н., профессор Еременко Дмитрий Олегович, [eremenko@sinp.msu.ru](mailto:eremenko@sinp.msu.ru);
3. К.ф.-м.н., доцент Ланской Дмитрий Евгеньевич, [lanskoj@sinp.msu.ru](mailto:lanskoj@sinp.msu.ru).

### **Фонды оценочных средств, необходимые для оценки результатов обучения**

#### **Образцы домашних заданий:**

1. Как будет двигаться заряженная частица, влетевшая в однородное магнитное поле под углом  $90^\circ$  к вектору магнитного поля?
2. Почему для ускорения электронов не применяются классические циклотроны?
3. Порядок величины энергии протона, ускоряемого на классическом циклотроне?
4. Как оценить длину электростатического генератора Ван-де-Граафа?

5. Что такое светимость ядерно-физической установки?
6. В чем заключается принцип автофазировки?
7. Как оценить длину линейного ускорителя протонов?
8. Сопоставьте размеры протонного и электронного синхротронов.
9. Что такое коллективные методы ускорения частиц?
10. Сопоставьте величину тока протонов, ускоряемых на циклотроне и синхротроне.

**Вопросы для промежуточной аттестации – зачета:**

1. Принцип работы электростатического генератора Ван-де-Граафа.
2. Тандемный электростатический генератор.
3. Принцип работы классического циклотрона.
4. Слабая фокусировка.
5. Принцип работы синхроциклотрона.
6. Принцип автофазировки.
7. Принцип работы синхротрона.
8. Сильная фокусировка.
9. Чем отличается ускорение протонов от ускорения электронов на синхротроне.
10. Основные свойства синхротронного излучения.
11. Синхротронное излучение как инструмент ядерно-физических исследований.
12. Принцип работы бетатрона.
13. Принцип работы микротрона.
14. Принцип работы разрезного микротрона.
15. Принцип работы линейного ускорителя ионов со стоячей волной.
16. Принцип работы линейного ускорителя электронов с бегущей волной.
17. Метод встречных пучков.
18. Накопители и коллайдеры.
19. Метод стохастического охлаждения.
20. Методы получения и измерения вакуума.

**Методические материалы  
для проведения процедур оценивания результатов обучения**

Зачет проходит по билетам, включающем 4 вопроса. Уровень знаний аспиранта по каждому вопросу на «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». В случае если на все вопросы был дан ответ, оцененный не ниже чем «удовлетворительно», аспирант получает общую оценку «зачтено».

**Шкала оценивания знаний, умений и навыков**

Результат освоения дисциплины	Критерии оценивания знаний, умений и навыков			
	2/ не зачтено	3/ зачтено	4/ зачтено	5/ зачтено
Знания	Отсутствие знаний основных законов физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники	В целом успешные, но не систематические знания основных законов физики пучков заряженных	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания основных законов физики пучков заряженных	Успешные и систематические знания основных законов физики пучков заряженных частиц и

		частиц и ускорительной техники	частиц и ускорительной техники	ускорительной техники
Умения	Отсутствие умения применять знания основных законов физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники для решения научных задач	В целом успешное, но не систематическое применение знания основных законов физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники для решения научных задач	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение применять знания основных законов физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники для решения научных задач	Успешное и систематическое умение применять знания основных законов физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники для решения научных задач
Навыки	Отсутствии/фрагментарное владение навыками решения научных задач в области физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники	В целом успешное, но не систематическое владение навыками решения научных задач в области физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение навыками решения научных задач в области физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники	Успешное и систематическое владение навыками решения научных задач в области физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники