

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего**  
**образования**  
**«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»**

**Кафедра физики ускорителей**



УТВЕРЖДАЮ  
 Декан ФФ  
 А. Е. Бондарь  
 « 01 » сентября 2014 г.

**ЭЛЕКТРОННАЯ ОПТИКА И ФИЗИКА ПУЧКОВ**

Рабочая программа дисциплины

**Физический факультет**

Направление подготовки  
**03.03.02 Физика (уровень бакалавриата)**  
**Курс 3, семестр 5**

Профиль:  
**Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения  
**Очная**

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в период сессии) (в часах)	
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Сам. работа в течение семестра (не включая период сессии)	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем (консультации, экзамен)
		Лекции	Семинары	Лабораторные занятия			
1	2	3	4	5	6	7	8
5	108	32	36		22	14	4
Всего 108 часов / 3 зачетных единицы из них: - контактная работа 72 часа - в интерактивных формах 36 часов							

**Новосибирск 2014**

Рабочая программа дисциплины «Электронная оптика и физика пучков», предназначенная для студентов третьего курса физического факультета НГУ, разработана в 2011 году в соответствии с ФГОС ВПО по направлению подготовки 011200 Физика (квалификация «бакалавр») от 08.12.2009, приведена в соответствие с требованиями Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования от 19.12.2013, переработана в 2014 г. в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.03.02 Физика (уровень бакалавриата) от 07.08.2014.

Место дисциплины в структуре учебного плана Б1, вариативная

Составили:

Чл.-корр. РАН, докт. физ.-мат. наук, проф. Н. А. Винокуров

Рабочая программа

## Содержание

Аннотация .....	4
1. Цели освоения дисциплины .....	5
2. Место дисциплины в структуре ООП .....	5
3. Компетенции обучающегося, формируемые при освоении дисциплины .....	5
4. Структура и содержание дисциплины .....	5
5. Образовательные технологии .....	7
6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов .....	8
7. Фонд оценочных средств для проведения аттестации по итогам освоения дисциплины: показатели, критерии оценивания компетенций, типовые контрольные задания .....	8
8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины Рекомендованная литература к теоретическому курсу .....	9
9. Материально-техническое обеспечение дисциплины .....	9

## I. Рабочая программа дисциплины «Электронная оптика и физика пучков»

### Аннотация

Программа курса «**Электронная оптика и физика пучков**» составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО к уровню бакалавриата по направлению подготовки «**03.03.02 Физика**» (академический бакалавриат), а также задачами, стоящими перед Новосибирским государственным университетом по реализации Программы развития НГУ. Дисциплина реализуется на физическом факультете Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ) кафедрой физики ускорителей. Дисциплина изучается студентами третьего курса физического факультета в осеннем семестре.

Цели курса – дать студентам базовые знания, умения и навыки по основам электронной оптики и физики пучков заряженных частиц. В курсе рассмотрены основы физики пучков заряженных частиц. В первой половине излагается электронная оптика, ориентированная на применение для расчета параметров пучков в ускорителях. Описаны общий метод описания движения частиц при помощи матриц, преобразование огибающих и вторых моментов, а также абберрации. Выведены выражения для матриц основных элементов электронно-оптических систем. Рассмотрены причины роста эмиттанса пучка при прохождении через эти системы. Во второй части перечислены основные эффекты, связанные с взаимным кулоновским расталкиванием частиц пучка. Кроме того, кратко излагается теория электронной пушки Пирса.

Особенность курса «Электронная оптика и физика пучков» заключается в том, что студентам передаются не только современные знания в данной области, но и весь накопленный многолетний опыт Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. Поскольку институт стоит у истоков ускорительной техники, весь курс построен с учетом практических знаний, имеющих у его коллектива. Кроме этого, студенты могут «вживую» ознакомиться со многими макетами различных ускорительных разработок, а также с действующими установками, созданными в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника общепрофессиональных компетенций ОПК-3, ОПК-6, а также профессиональных компетенций ПК-1 и ПК-3.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, семинарские занятия, домашние задания, консультации, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью заданий, допуск к экзамену, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль успеваемости: домашние задания, задания для самостоятельного решения.

Промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 3 зачетных единицы:

- занятия лекционного типа – 32 часа;
- занятия семинарского типа – 36 часов;
- промежуточная аттестация (подготовка к сдаче экзамена и экзамен) – 36 часов;

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, семинарского типа, групповые консультации, экзамен) составляет 72 часа.

Работа с обучающимися в интерактивных формах составляет 36 часов.

## 1. Цели освоения дисциплины

Данный курс предназначен для обучения специалистов, которые будут в своей последующей работе использовать знание об устройстве и принципе работы электроннооптических систем для создания современных ускорительных комплексов.

Дисциплина «Электронная оптика и физика пучков» имеет своей целью дать профессионально подготовленным физикам на доступном им высоком уровне информацию о принципах работы и конструкции основных компонентов современных электроннооптических систем, а также основных физических явлениях, влияющих на параметры пучков заряженных частиц.

Для достижения поставленной цели используются материалы, изложенные в профессиональных изданиях: научных статьях, сборниках трудов конференций, монографиях ведущих специалистов. Также используется возможность контакта с разработчиками ускорителей заряженных частиц, работающими в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, имеющими многолетний опыт создания уникальных исследовательских установок. Организуются экскурсии студентов на установки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, а также прохождение практики студентами на этих установках.

## 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Электронная оптика и физика пучков» является дисциплиной вариативной части подготовки бакалавра по направлению «03.03.02 Физика».

Дисциплина «Электронная оптика и физика пучков» опирается на следующие дисциплины данной ООП:

- Математический анализ;
- Дифференциальные уравнения;
- Высшая алгебра;
- Электродинамика;

Результаты освоения дисциплины используются в следующих дисциплинах данной ООП:

- Практика и научно-исследовательская работа в НИИ.

## 3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

Общепрофессиональные компетенции ОПК-3 и ОПК-6, профессиональные компетенции ПК-1 и ПК-3.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- иметь представление о принципах электронной оптики и физике пучков заряженных частиц;
- знать о физических характеристиках и принципах работы основных элементов электронной оптики и физики пучков заряженных частиц;
- уметь использовать полученные знания при ознакомлении, работе или создании ускорительных комплексов заряженных частиц. Уметь ориентироваться в информации, получаемой из печатных изданий и сети «Интернет».

#### 4. Структура и содержание дисциплины

Дисциплина «Электронная оптика и физика пучков» представляет собой полугодовой курс, читаемый на 3-м курсе физического факультета НГУ в 5-м семестре. Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных единицы, 108 академических часов.

По использованию современных научных данных, своему содержанию, уровню предварительной подготовки студентов курс не имеет аналогов в России. По сравнению с подобными зарубежными курсами наши студенты имеют более серьезный уровень подготовки, как по математическим, так и по физическим дисциплинам, что позволяет использовать изложение на высоком профессиональном уровне. Курс актуален для дисциплин специальной подготовки, т.к. позволяет подготовить специалиста с широким кругозором и одновременно с глубоким пониманием основ.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Всего	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)			Промежуточная аттестация (в период сессии) (в часах)
				Аудиторные часы		Сам. работа в течение семестра (не включая период сессии)	
				Лекции (кол-во часов)	Семинары (кол-во часов)		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Движение заряженных частиц в электромагнитном поле	1-4	20	8	8	4	
2	Элементы электронно-оптических систем	5-7	18	6	8	4	
3	Пучки малой интенсивности	8-10	16	6	6	4	
4	Интенсивные электронные пучки	11-13	16	6	6	4	
5	Электронные пушки	14-16	20	6	8	6	
6	Групповая консультация		2				2
7	Самостоятельная подготовка обучающегося к экзамену		14				14
8	Экзамен		2				2
Всего			108	32	36	22	18

#### Содержание разделов и тем курса

##### 1. Движение заряженных частиц в электромагнитном поле

Пучки частиц. Опорная частица. Координатный трехгранник Серре-Френе. Параксиальное приближение. Применение матриц для описания движения. Матрицы  $b \times b$  и  $2 \times 2$ . Матрицы пустого промежутка.

##### 2. Элементы электронно-оптических систем

Тонкие линзы. Типы линз: квадруполи, соленоиды, литиевые и др. Их фокусные расстояния. Движение частицы в магнитной квадруполевой линзе. Матрица толстой линзы. Дублеты и триплеты, их фокусные расстояния. Характеристические плоскости оптической

системы. Движение в однородном магнитном поле (горизонтальная фокусировка поворотом). Магнит с показателем спада, его матрицы. Условие устойчивости поперечного движения в азимутально симметричном ускорителе. Краевая фокусировка. Секторный магнит и магнит с параллельными краями.

Частицы с отклоненной энергией: уравнения движения; поперечная дисперсия - элемент  $6 \times 6$  матрицы преобразования.  $\eta$ -функция периодических систем. Ахроматические системы. Изменение длины траектории при поперечном отклонении частицы. Продольная дисперсия. Изохронные системы. Коэффициент уплотнения орбит.  $6 \times 6$  матрица магнита с показателем спада.

Матрица ускоряющего зазора. "Изменение" фазового объема. Зазор с переменным напряжением. Клистронная группировка.

Связь поперечных степеней свободы. Косой квадруполь, поворот медианной плоскости и соленоид.

### 3. Пучки малой интенсивности

Преобразование фазовой плоскости в пустом промежутке, тонкой и толстой линзах. Описание пучка при помощи эллипса на фазовой плоскости. Параметры эллипса.  $\beta$ -функция и огибающая. Преобразование огибающей при прохождении системы с известной лучевой матрицей. Уравнение Хилла. Уравнение огибающей. Эмиттанс и акцептанс. Периодические системы: согласованный фазовый эллипс, акцептанс, огибающая. Распределение частиц в фазовом пространстве: ступенчатое, гауссово и Капчинского-Владимирского. Волновые гауссовы пучки.

Рост эмиттанса при прохождении через вещество. Эффективный рост эмиттанса из-за неидеальностей магнитной системы. Нормализованный эмиттанс. Яркость катода с сеткой. Эмиттанс "замагниченного" катода. Интегральные инварианты 6-мерного фазового пространства. Измерение эмиттанса. Измерение энергетического разброса и длины сгустка.

Аберрации. Разложение магнитного поля около равновесной траектории. Секступольные и октупольные линзы. Компенсация хроматической аберрации секступолями. Рост эмиттанса из-за наличия аберраций.

### 4. Интенсивные электронные пучки

Гидродинамическое приближение. Поперечные силы в круглом и плоском пучках. Изменение поперечных размеров ламинарного пучка в пустом пространстве. Сравнение влияния сил пространственного заряда и эмиттанса на размеры; критерии применимости гидродинамического приближения и пренебрежения силами пространственного заряда. "Провисание потенциала", энергетический разброс и предельный ток. Продольное расталкивание (случай длинного сгустка и коротковолновой модуляции плотности). Эффективное приращение эмиттанса из-за поперечного расталкивания. Компенсация пространственного заряда пучка ионами остаточного газа. Пучок в продольном магнитном поле. Бриллюэновский поток, максимальная равновесная плотность тока.

### 5. Электронные пушки

Закон "трех вторых". Первеанс. Пушки Пирса. Анодная линза. Виртуальный катод. Пушки с малыми шумами тока. Электронная эмиссия и типы катодов.

## 5. Образовательные технологии

Учебный курс «Линейные ускорители» читается классическим способом: проводятся потоковые лекции, а также семинарские занятия по группам, в каждой из которых не более 15-и студентов. При подаче материала лекционного курса активно используется мультимедийная техника. На экран выводятся формулировки, определения, основные понятия, а также графические иллюстрации, помогающие наглядно подать материал. Все семинарские занятия проводятся в интерактивной форме. Обсуждаются идеи и способы решения поставленных задач, оптимальность предложенных решений. Поощряется элемент соревновательности. Автор наиболее удачного решения рассказывает его у доски.

Существенным элементом образовательных технологий является не только умение студента найти решение задачи, но и способность доходчиво донести его до всей аудитории. Умение ответить на вопросы сокурсников и преподавателя развивает навыки, которые будут необходимы в дальнейшей профессиональной деятельности студента. Важнейшим элементом технологии является самостоятельное решение студентами и сдача заданий. Это единственная полностью индивидуальная форма обучения. Сдача заданий в устной форме преподавателю направлена на формирование коммуникативных навыков, умения объяснять, логически излагать решение, быстро отвечать на вопросы преподавателя. Студент рассказывает свое решение преподавателю, отвечает на дополнительные вопросы, решает одну - две простые задачи на ту же тему. Таким образом, триада: лекции + семинары + задания способствуют активному усвоению материала и позволяют студентам не столько вы зубрить теорию, сколько научиться применять ее для решения задач.

Оценка на экзамене складывается из трех сумм:  $\Sigma = \Sigma_b + \Sigma_t + \Sigma_p$ , где  $\Sigma_b$  — количество баллов, заработанных студентом в семестре,  $\Sigma_t$  — количество баллов, полученных за ответ на теоретический билет,  $\Sigma_p$  — количество баллов, полученных за решение задач из практического билета. Каждая из сумм может равняться нулю. В зависимости от набранных баллов проставляется оценка за экзамен:

$\Sigma$	Оценка
[0;200)	неудовлетворительно
[200;400)	удовлетворительно
[400;600)	хорошо
[600;900]	отлично

## 6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

Самостоятельная работа студентов поддерживается следующими учебными пособиями кафедры физики ускорителей:

1. Н. А. Винокуров. Лекции по электронной оптике для ускорительных физиков. Электронное пособие, <http://accel.inp.nsk.su/library/Elopt24.pdf>.

Система контроля включает текущий (по ходу семестра) контроль освоения практического материала, а также экзамен.

Текущий контроль по практике: осуществляется в ходе семестра путем приема обязательных заданий.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию, по билетам, в устной форме.

## 7. Фонд оценочных средств для проведения аттестации по итогам освоения дисциплины: показатели, критерии оценивания компетенций, типовые контрольные задания

Освоение компетенций оценивается по двухбалльной шкале «сформирована / не сформирована». Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленные компетенции ОПК-3, а также ПК-1 и ПК-3 сформирована в части, относящейся к формированию способности использовать в профессиональной деятельности материал данного курса.



**Образец билета на экзамене:**

Билет № 1

1. Пучки частиц. Опорная частица. Координатный трехгранник Серре-Френе.
2. Преобразование фазовой плоскости в пустом промежутке, тонкой и толстой линзах. Описание пучка при помощи эллипса на фазовой плоскости. Параметры эллипса.  $\beta$ -функция и огибающая.

**8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

Обязательная литература:

1. Н. А. Винокуров. Лекции по электронной оптике для ускорительных физиков. Электронное пособие, <http://accel.inp.nsk.su/library/Elopt24.pdf>.
2. И.Н. Мешков. Введение в физику пучков заряженных частиц. Пучки низкой интенсивности. Новосибирск, НГУ, 1988.

Дополнительная литература:

1. А.А. Коломенский и А.Н.Лебедев. Теория циклических ускорителей. М.: Физматгиз, 1962.
2. Г.С. Ландсберг. Оптика. М.: Физматлит, 2003.
3. С.И. Молоковский и А.Д. Сушков. Интенсивные электронные и ионные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1991.
4. А.Н. Лебедев и А.В. Шальнов. Основы физики и техники ускорителей. М.: Энергоатомиздат, 1981, 1991.

Интернет ресурсы:

1. Методические материалы на сайте кафедры физики ускорителей ФФ НГУ  
<http://accel.inp.nsk.su/>

**9. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Доступ к информационным ресурсам, выложенным на сайте кафедры  
<http://accel.inp.nsk.su/>

Дисциплина обеспечена лекционными аудиториями Института ядерной физики СО РАН.

Оснащение основных лекционных аудиторий ИЯФ СО РАН:

*Аудитория ВЭПП-4.* – Лекционная аудитория на 30 мест:

- а) основное оборудование:  
ручной подвесной проекционный экран 127см\*127см  
Вспомогательный переносной проектор EPSON EMP-1715

*Пристройка 2 эт.* – Лекционная аудитория на 48 мест:

- а) основное оборудование:  
Стационарный (подвесной) проектор EPSON EB-X72 с пультом;  
Ноутбук DELL PP22L;
- б) дополнительное оборудование:  
ручной подвесной проекционный экран 127см\*127см  
Вспомогательный переносной проектор EPSON EMP-1715

*Зал для конференций* – на 305 мест

- а) основное оборудование:

Переносной проектор NEC VT660 с пультом;

Ноутбук ASPIRE 5720;

б) дополнительное оборудование:

электрический подвесной проекционный экран 200м\*200м

проектор для больших презентаций SANYO PLC-XP57L

беспроводные инфракрасные микрофоны и аппаратура воспроизведения звука.

Возможность использования интернет библиотек.

**Рабочая программа дисциплины одобрена на заседании кафедры физики ускорителей физического факультета НГУ 29 августа 2014 года.**