

Рабочая программа составлена на основании Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению (специальности): 510400 Физика.(№ 176 ен/бак от 17.03.2000)

СД.В.1.1, дисциплины по выбору студента

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры Электрофизические установки и ускорители протокол № 7 от 30.08.2011

Программу разработал

профессор, д.ф.м.н.

Левичев Евгений Борисович

Заведующий кафедрой

с.н.с., д.ф.м.н.

Бурдаков Александр Владимирович

Ответственный за основную образовательную программу

с.н.с., д.ф.м.н.

Бурдаков Александр Владимирович

1. Внешние требования

Таблица 1.1

Шифр дисциплины	Содержание учебной дисциплины	Часы
	Коцептуальная записка по направлению 010700 Физика Ускорители заряженных частиц ФТФ 010700.62 Поперечное движение заряженных частиц в ускорителе Продольное движение заряженных частиц в ускорителе Влияние излучения на динамику частиц Охлаждение тяжелых частиц Влияние пространственного заряда на динамику частиц Инжекция и выпуск пучков заряженных частиц Типы ускорителей	50

2. Особенности (принципы) построения дисциплины

Таблица 2.1

Особенности (принципы) построения дисциплины

Особенность (принцип)	Содержание
Основания для введения дисциплины в учебный план по направлению или специальности	Курс введен по решению Ученого совета ФТФ от 10.06.2008г., протокол №6 Актуальность курса определяется тем местом, которое занимают в настоящее время циклические ускорители в науке и сфере технологических применений. С одной стороны, общепризнанно, что именно ускорители высоких энергий являются сейчас, и будут являться в будущем, основным инструментом для получения самых современных знаний о фундаментальных свойствах материи. С другой - развитие ускорительной техники привело к широкому ее использованию для технологических нужд: производство изотопов, медицина, синхротронное излучение (СИ), лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) и т.д. Современные ускорители представляют собой сложные электрофизические комплексы, состоящие из большого числа установок, концентрирующих в себе все самые современные достижения науки и техники: сверхвысокий вакуум, сильноточную и высоковольтную электрическую аппаратуру, сверхпроводящие устройства и т.п. Поведение пучка заряженных частиц в ускорителе чрезвычайно сложно и его изучение требует хорошего знания и навыков применения различных разделов физики,

	математики, компьютерного моделирования и умения проводить сложные эксперименты. Кафедра ориентирована на Институт ядерной физики им.Г.И.Будкера СО РАН, который разрабатывает и производит ускорители заряженных частиц, а также, проводит эксперименты с их использованием.
Адресат курса	Курс предназначен для студентов 4 -го курса ФТФ кафедры ЭФУиУ. Курс дает базовые знания по теории циклических ускорителей заряженных частиц, историю их развития, их место в общей генерации установок для ускорения частиц. Такие разделы, как матричная теория устойчивости колебательных систем, исследование нелинейного уравнения фазовых колебаний частиц в циклическом ускорителе или рассмотрение влияния радиационной силы трения дают достаточно общие понятия, которые могут с успехом применяться в других областях физики.
Основная цель (цели) дисциплины	Основная цель курса для студента заключается в получении базовых знаний по теории движения частиц в циклических ускорителях включая: теорию бетатронных и синхротронных колебаний, влияние излучения на движение частицы, различные виды охлаждения пучков заряженных частиц, основные понятия эффективности работы циклических ускорителей, такие как светимость для коллайдеров, яркость для источников синхротронного излучения и т.д. Еще одной целью является овладение практическими методами расчетов и оценок параметров ускорителя, знакомство с элементами систем ускорителя и с различными стадиями (процессами) работы ускорителя: инжекция и выпуск частиц, накопление и охлаждение пучков и т.п. С одной стороны, курс знакомит студентов с практическим применением тех теоретических базисных знаний по математике и физике, которые они приобрели ранее, с другой - позволяет получить представление о самых последних достижениях в постановке и проведении сложных физических экспериментов, а также, в научно-технологической сфере (криогеника, высокочастотная физика, компьютерные системы управления и т.д.). Учитывая значительные достижения ИЯФ СО РАН в области ускорителей заряженных частиц, курс знакомит студентов с такими открытиями или изобретениями, сделанными в ИЯФ, как встречные пучки, электронное охлаждение, перезарядная инжекция и т.п.
Ядро дисциплины	Ядро курса и фундамент, необходимый для понимания явлений, связанных с движением пучка в ускорителе, составляют (а) теория бетатронных и синхротронных колебаний. Эти колебания, будучи нелинейными и псевдогармоническими, дают возможность студенту познакомиться с обширным классом физических явлений и методами их изучения, которые могут применяться не только для расчета циклических ускорителей, но и в других областях физики.

	Сюда можно отнести навыки работы в криволинейных системах координат, колебательные системы с периодическими коэффициентами (уравнения Матье), матричный метод исследования устойчивости таких систем, особенности движения нелинейного маятника и т.п. (б) излучение ускоренно движущихся зарядов, применяемое в самых различных областях науки и технологии. Студент приобретает способность быстрой оценки мощности излучения, спектрального состава, энергии, теряемой частицы. Уравнения осциллятора с учетом силы трения, изучаемые в этом разделе, возникают в различных научных и технических задачах. (в) кулоновское взаимодействие заряженных частиц, рассматриваемое в разделе об электронном охлаждении, является классическим эффектом при рассмотрении движения частиц в веществе.
Связи с другими учебными дисциплинами основной образовательной программы	Курс содержит следующие имманентные связи со смежными дисциплинами 1. Математика (матричное исчисление, гармонический анализ, теория дифференциальных уравнений и т.п.) 2. Физика частиц (взаимодействие частиц с веществом и пр.) 3. Нелинейная динамика (фазовые траектории, теория гамильтоновых систем и т.д.) 4. Теория электромагнитного поля 5. Электроника и электротехника
Требования к первоначальному уровню подготовки обучающихся	Для успешного изучения курса студенту необходимо знать теорию колебаний, электродинамику, матричный анализ, основы механики Гамильтона, квантовой механики, теории атомного ядра и элементарных частиц. Оценка знаний и умений студента проводится с помощью итогового экзамена, который включает в себя 35 вопросов по основным разделам курса. Теоретические вопросы сопровождаются задачами по расчету и оценке основных параметров циклического ускорителя.
Особенности организации учебного процесса по дисциплине	Учитывая физико-технический характер специальности, курс привязан к классификации явлений, происходящих с пучком заряженных частиц в циклическом ускорителе, по системам. Так, бетатронные колебания связываются с магнитной системой, синхротронные - с высокочастотной ускоряющей системой, изучение времени жизни частиц - с вакуумной системой, а рассмотрение основ стохастического охлаждения - с системой диагностики пучков. Помимо основного явления описывается соответствующая система, критерии ее проектирования и особенности функционирования. Такой системный подход позволяет студентам более четко представлять себе основные составляющие ускорителя заряженных частиц и их связь с особенностями динамики пучков.

3. Цели учебной дисциплины

Таблица 3.1

После изучения дисциплины студент будет

иметь представление	
1	- Об основных ускорительных проектах в мире, в РФ и в ИЯФ
2	об устройстве и параметрах основных систем циклических ускорителей, о действии синхротронного излучения на движение пучков заряженных частиц
3	О различных типах ускорителей заряженных частиц по (а) использованию, (б) способу ускорения, (в) способу фокусировки пучков
4	- О характерных параметрах различных ускорителей
5	- Об основных направлениях развития и совершенствования ускорительной техники
6	об основных механизмах охлаждения пучков тяжелых заряженных частиц.
7	о теории бетатронных колебаний
8	о теории синхротронных колебаний
9	об устройстве и параметрах основных систем циклических ускорителей
10	о действии синхротронного излучения на движение пучков заряженных частиц
11	об основных механизмах охлаждения пучков тяжелых заряженных частиц.
знать	
12	Расчет оптических функций циклического ускорителя. Выбор рабочей точки на диаграмме частот.
13	Оценка влияния погрешностей магнитных элементов на параметры ускорителя.
уметь	
14	Оценка влияния погрешностей магнитных элементов на параметры ускорителя.
15	Оценка декрементов и времен затухания из-за синхротронного излучения. Учет квантовых флуктуаций, оценка фазового объема пучка и его размеров.
16	Оценка основных характеристик магнитных элементов (дипольный магнит, квадрупольная и секступольная линзы).
17	Расчет устойчивости поперечного движения частицы в произвольной магнитной структуре.
18	Оценка светимости встречных пучков и учет факторов ограничивающих светимость. Вывод формулы для параметра пространственного заряда.
19	Оценка эффективности инжекции пучка частиц в циклический ускоритель.
20	Расчет коэффициента уплотнения орбит, частоты малых синхротронных колебаний, энергетического акцептанса ускорителя.
21	Оценка времени стохастического и электронного охлаждения пучка тяжелых частиц.
22	Расчет оптических функций канала транспортировки пучка заряженных частиц.

23	Оценка когерентного сдвига бетатронных частот из-за пространственного заряда пучка. Влияние фактора нейтрализации из-за накопления ионов в электронном пучке.
иметь опыт (владеть)	
24	Математическим аппаратом для расчета поля основных магнитов ускорителя (дипольный, квадрупольный и секступольный магниты) на основе решения уравнения Максвелла в вакууме.
25	Иметь опыт вычисления частот бетатронных колебаний и оптических функций для магнитной структуры типа ФОДО.
26	Владеть техникой исследования фазового пространства движения частицы.
27	Владеть аппаратом вычисления силы взаимодействия заряженной частицы с веществом (с сопровождающим ионным пучком).

4. Содержание и структура учебной дисциплины

Лекционные занятия

Таблица 4.1

(Модуль), дидактическая единица, тема	Часы	Ссылки на цели
Семестр: 8		
Вводная лекция. История развития ускорителей заряженных частиц. Их применение в области физики заряженных частиц и технологии.	2	1, 3, 4
Дидактическая единица: Поперечное движение заряженных частиц в ускорителе		
Фокусировка заряженных частиц. Слабая и сильная фокусировка, фокусировка однородным полем, магнитной линзой, соленоидом, краевым полем. Понятие о бетатронных колебаниях.	2	25, 7
Поперечное движение частицы. Сопровождающая криволинейная система координат. Вывод уравнения движения частицы в магнитном поле.	2	13, 16
Поперечное движение частицы. Матричный метод решения уравнения с периодическими коэффициентами. Матрицы перехода различных участков. Матрица оборота и критерии устойчивости. Сохранение плотности траекторий фазового пространства (теорема Лиувилля).	2	17, 22
Поперечное движение частицы. Замкнутый вид решения уравнения движения. Амплитудная и фазовая бетатронные функции. Дисперсионная функция. Теорема Флоке. Движение на фазовой плоскости. Бетатронная частота.	4	
Поперечное движение частицы. Связь матричного и замкнутого методов решения. Параметры Твисса. Транспортировка параметров Твисса вдоль кольца.	2	14, 24
Поперечное движение частицы. Адиабатическое затухание бетатронных колебаний. Малые погрешности магнитного поля: искажение замкнутой орбиты, сдвиг бетатронной частоты.	4	14, 16

Хроматизм. Понятие о связи бетатронных колебаний и нелинейных резонансах.		
Дидактическая единица: Продольное движение заряженных частиц в ускорителе		
Продольное движение частицы. Зависимость параметров бетатронных колебаний от энергии частицы. Коэффициент уплотнения орбит. Критическая энергия.	2	20
Продольное движение частицы. Принцип автофазировки. Вывод уравнений синхротронных колебаний. Малые синхротронные колебания, их частота. Сепаратриса и энергетический акцептанс. Адиабатическое затухание синхротронных колебаний.	4	15, 20
Дидактическая единица: Влияние излучения на динамику частиц		
Излучение. Влияние излучения на движение электронов и позитронов высоких энергий. Основные свойства СИ. Затухание бетатронных и синхротронных колебаний. Вывод выражений для декрементов затухания.	4	15, 20
Излучение. Квантовая раскачка колебаний. Распределение плотности пучка частиц. Понятие фазового объема (эмиттанса) и размеров пучка. Апертурные ограничения и время жизни пучка.	4	15, 20
Дидактическая единица: Охлаждение тяжелых частиц		
Охлаждение тяжелых частиц. Основные понятия охлаждения пучков частиц. Стохастическое охлаждение.	4	21
Охлаждение тяжелых частиц. Метод электронного охлаждения.	4	21
Дидактическая единица: Влияние пространственного заряда на динамику частиц		
Пространственный заряд. Влияние пространственного заряда. Когерентный сдвиг бетатронной частоты. Накопление ионов, фактор нейтрализации. Понятие о когерентных эффектах.	3	23
Пространственный заряд. Коллайдеры, светимость, эффекты встречи, как факторы, ограничивающие светимость. Параметр пространственного заряда.	4	23
Дидактическая единица: Инжекция и выпуск пучков заряженных частиц		
Инжекция и выпуск. Инжекция в продольном и поперечном фазовом пространстве. Одно- и многооборотная инжекция. Перезарядная инжекция, стэкинг. Эффективность инжекции.	2	19
Инжекция и выпуск. Транспортировка заряженных частиц, каналы транспортировки, оптические функции канала транспортировки. Согласование оптических функций канала транспортировки. Выпуск пучка (одно- и многооборотный). Выпуск	4	18, 19

пучка на резонансе.		
Дидактическая единица: Типы ускорителей		
Типы ускорителей. Линейные ускорители: Кокрофта-Уолтона, генератор Ван де Графа, индукционный и высокочастотный ускоритель.	2	1, 2, 3, 4, 5
Типы ускорителей. Циклические ускорители. Циклотрон, бетатрон, синхрофазотрон, синхротрон, микротрон. Установки на встречных пучках.	2	10, 7, 9

5. Самостоятельная работа студентов

Семестр- 8, Подготовка к зачету

Подготовка к зачету: 4 часа

Семестр- 8, Индив. работа

Индивидуальная работа: 6 часов

Семестр- 8, Подготовка к занятиям

Подготовка к занятиям: 6 часов

Подготовка к занятиям включает (а) чтение рекомендованной литературы, (б) повторение предыдущей лекции, (в) перед подачей нового материала лектор кратко перечисляет основные результаты предыдущего раздела и отвечает на вопросы студентов.

6. Правила аттестации студентов по учебной дисциплине

Правила аттестации по дисциплине:

В соответствии с учебным планом проводится - зачет. К итоговой аттестации допускаются студенты, выполнившие задания по всем темам индивидуальных занятий и самостоятельных работ, предусмотренных графиком изучения дисциплины в семестре. При аттестации используются контролирующие материалы.

Итоговая аттестация студента осуществляется в виде зачета в устной форме по билетам. Билет состоит из трех теоретических вопросов.

7. Список литературы

7.1 Основная литература

В печатном виде

1. Левичев Е. Б. Лекции по нелинейной динамике частиц в циклическом ускорителе : [учебное пособие] / Е. Б. Левичев ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2009. - 222 с. : ил.

В электронном виде

1. Левичев Е. Б. Лекции по нелинейной динамике частиц в циклическом ускорителе : [учебное пособие] / Е. Б. Левичев ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2009. - 222 с. : ил.. - Режим доступа: <http://www.library.nstu.ru/fulltext/metodics/2009/lev.rar>. - Парал. тит. л. англ..

7.2 Дополнительная литература

В печатном виде

1. Ливингуд Д. Принципы работы циклических ускорителей : пер. с англ. / Дж. Ливингуд ; под ред. В. И. Данилова. - М., 1963. - 493 с. : ил.
2. Лебедев А. Н. Основы физики и техники ускорителей. (В 3 т.). Т. 3. Линейные ускорители : учебное пособие для физических специальностей вузов / А. Н. Лебедев, А. В. Шальнов. - М., 1983. - 199 с. : ил. - Рекомендовано МО.
3. Коломенский А. А. Теория циклических ускорителей / А. А. Коломенский, А. Н. Лебедев. - М., 1962. - 352 с. : ил.

8. Методическое и программное обеспечение

8.1 Методическое обеспечение

8.2 Программное обеспечение

2. Microsoft, Office XP, Офисный пакет приложений

1. OriginLab Corporation, Origin, пакет программ для численного анализа данных и научной графики

9. Контролирующие материалы для аттестации студентов по дисциплине

Список экзаменационных вопросов

1. Ускорители заряженных частиц. Зачем нужны, типы (линейные и циклические), применение, требования к ускорителям.
2. Магнитная система ускорителей: назначение и функции, основные характеристики магнитных элементов, способы исполнения.
3. Магнитная система ускорителей: фокусирующие свойства магнита с однородным полем, магнит с градиентом, краевое поле магнита, магнитная линза, соленоид.
4. Движение частицы в магнитной системе: уравнение движения частицы в магнитном поле ускорителя.
5. Движение частицы в магнитной системе: матричная форма решения уравнения движения. Матрицы перехода различных элементов. Матричный метод анализа устойчивости движения.
6. Движение частицы в магнитной системе: замкнутое решение уравнения движения. Связь бетатронной функции с матричными элементами.
7. Движение частицы в магнитной системе: слабая фокусировка (на примере азимутально-симметричного случая), сильная фокусировка.
8. Движение частицы в магнитной системе: анализ бетатронного движения на фазовой плоскости. Фазовый объем пучка.
9. Движение частицы в магнитной системе: адиабатическое затухание бетатронных колебаний.
10. Движение частицы в магнитной системе: резонансы.
11. Ускорение заряженных частиц: зависимость параметров орбиты от энергии частицы.
12. Ускорение заряженных частиц: резонансный режим ускорения, принцип автофазировки.
13. Ускорение заряженных частиц: уравнение фазового движения.
14. Ускорение заряженных частиц: анализ синхротронного движения, фазовая плоскость, сепаратриса.
15. Ускорение заряженных частиц: адиабатическое затухание синхротронных колебаний.
16. Синхротронное излучение: свойства.
17. Синхротронное излучение: движение частиц в присутствии излучения.
18. Синхротронное излучение: декременты затухания продольных и поперечных колебаний.
19. Синхротронное излучение: возбуждение колебаний за счет излучения.
20. Синхротронное излучение: установившийся размер пучка.
21. Охлаждение пучков заряженных частиц: стохастическое охлаждение.
22. Охлаждение пучков заряженных частиц: электронное охлаждение.
23. Инжекция и выпуск частиц: основные проблемы и требования.
24. Инжекция и выпуск частиц: однооборотная инжекция.
25. Инжекция и выпуск частиц: многооборотная инжекция.
26. Инжекция и выпуск частиц: последовательное заполнение фазового пространства (stacking). Инжекция со смещением по фазе синхротронных колебаний.
27. Инжекция и выпуск частиц: быстрый и медленный (резонансный) выпуск частиц из циклического ускорителя.
28. Инжекция и выпуск частиц: каналы транспортировки.
29. Влияние пространственного заряда на некогерентные бетатронные колебания. Накопление ионов.
30. Влияние пространственного заряда встречного пучка.
31. Влияние пространственного заряда на некогерентные синхротронные колебания. Понятие о когерентных неустойчивостях.

32. Накопители заряженных частиц: инжекция и накопление (радиационное охлаждение, стохастическое и электронное охлаждение).
33. Установки со встречными пучками: светимость, ограничение светимости эффектами встречи.
34. Особенности ускорителей различных типов (линейные и циклические ускорители).
35. Особенности ускорителей различных типов (циклотрон, бетатрон, микротрон, синхротрон).