

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
и образовательным инновациям
О.И.Чуприс



_____ 2019 г.

Регистрационный № УД-7644/уч.

Ускорители заряженных частиц

**Учебная программа учреждения высшего образования
по учебной дисциплине для специальности:**

1-31 80 05 Физика

2019 г.

Учебная программа составлена на основе Образовательного стандарта ОСВО 1-31 80 05-2019, учебного плана №G31-062/уч. от 11.04.2019 г.

СОСТАВИТЕЛЬ:

А.С. Лобко - профессор кафедры ядерной физики Белорусского государственного университета, доктор физико-математических наук, доцент

РЕЦЕНЗЕНТ:

М.В. Коржик — заведующий лабораторией экспериментальной физики высоких энергий НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета, доктор физико-математических наук, доцент.

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой ядерной физики
физического факультета Белорусского государственного университета
(протокол №4 от 21.11.2019 г.);

Научно-методическим Советом БГУ
(протокол №2 от 03.12.2019).

Заведующий кафедрой _____ А.И. Тимощенко

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Цели и задачи учебной дисциплины

Цель учебной дисциплины – обучение студентов основам физики ускорения заряженных частиц, применение полученных знаний в части использования полученных пучков ускоренных частиц и производных излучений в науке, промышленности, технологиях и медицине.

Задачи учебной дисциплины:

1. сформировать у студентов представление о круге вопросов, относящихся к проблемам ускорения заряженных частиц; ознакомить с видами ускорителей, их особенностями, параметрами их ключевых элементов и систем;
2. выработать системное понимание функционирования ускорителя как сложной комплексной физико-технической установки, что будет важно для их последующей научной работы в области радиационных технологий.
3. Самостоятельная работа направлена на выработку практических навыков по анализу задач исследования физических явлений, грамотного планирования эксперимента, понимания функционирования современной физической аппаратуры.

Место учебной дисциплины в системе подготовки специалиста с высшим образованием (магистра).

Учебная дисциплина относится к компоненту учреждения высшего образования и входит в модуль «Физика элементарных частиц».

Связи с другими учебными дисциплинами, включая учебные дисциплины компонента учреждения высшего образования, дисциплины специализации и др.

Учебная дисциплина «Ускорители заряженных частиц» основана на знаниях и представлениях, заложенных в следующих дисциплинах: «Физика ядра и элементарных частиц», «Электричество и магнетизм», «Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом», «Методы и устройства регистрации излучений».

Требования к компетенциям

Освоение учебной дисциплины «Ускорители заряженных частиц» должно обеспечить формирование следующей **специализированной компетенции**:

СК-15. Быть способным использовать для научно-исследовательской деятельности принципы и методы постановки современного эксперимента в физике высоких энергий.

В результате освоения учебной дисциплины студент должен:

знать: основы физики ускорения заряженных частиц в постоянных, переменных и импульсных полях, физические основы продольной и поперечной устойчивости пучков, основные системы диагностики пучков заряженных частиц, современные методы предварительной обработки результатов эксперимента.

уметь: ставить и решать инновационные задачи, связанные с разработкой методов и технических средств, повышающих эффективность применения современных крупных физических установок;

владеть: навыками анализа основных физических и методических проблем, возникающих при решении междисциплинарных научных и научно-образовательных задач.

Структура учебной дисциплины

Дисциплина изучается в 2-м семестре. Всего на изучение учебной дисциплины «Ускорители заряженных частиц» отведено:

– для очной формы получения высшего образования – 90 часов, в том числе 48 аудиторных часов, из них: лекции – 34 часа, семинарские занятия – 10 часов, управляемая самостоятельная работа – 4 часа.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 3 зачетные единицы.

Форма текущей аттестации – экзамен.

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

1. Введение. Общие сведения.

Ускоритель заряженных частиц – важнейший инструмент исследования в физике. Общие сведения об ускорителях, основные термины, единицы и масштабы величин. Выбор энергии ускорителей. Взаимодействие заряженных частиц с электрическими и магнитными полями. Параметры пучка заряженных частиц. Эволюция и классификация ускорителей.

2. Ускорители прямого действия.

Особенности и основные элементы ускорителей прямого действия. Источники заряженных частиц. Ускорительные трубки. Высоковольтные трансформаторы. Каскадные генераторы. Генераторы Ван де Граафа. Тандемные ускорители.

3. Сильноточные ускорители

Накопители энергии. Взрывомагнитный генератор. Электрический разряд в диэлектриках. Закон Пашена. Разрядник. Импульсные генераторы высокого напряжения. Генератор Маркса. Генератор с трансформаторами Тесла. Формирователи импульсов. Основы измерения высоких напряжений. Особенности и трудности измерения параметров импульсов. Применение мощных электронных и ионных ускорителей.

4. Линейные ускорители.

Общие сведения. Линейные ускорители протонов и ионов. Линейные ускорители электронов. Инжекция заряженных частиц. Линейные индукционные ускорители. Линейные резонансные ускорители. Волноводные линейные ускорители.

5. Циклические ускорители с постоянным во времени магнитным полем.

Циклотрон и фазотрон. Микротрон. Бетатрон. Фазовые диаграммы. Фокусирующие свойства электрических и магнитных полей. Фокусирующие элементы в ускорителях. Ускорение и поворот пучка в циклическом ускорителе. Устойчивость движения частиц. Свободные (бетатронные) колебания. Вынужденные колебания. Резонансные явления при движении частиц. Принцип автофазировки.

6. Циклические ускорители с переменным во времени магнитным полем.

Принцип действия. Частота вращения. Ускоряющие системы: дрейфовые трубки, ферритовые трансформаторы и полые резонаторы. Нарастание энергии частиц и нарастание магнитного поля. Фазовое движение частиц. Радиально-фазовые колебания. Синхротрон. Синхрофазотрон. Действие механизма автофазировки в синхротронах. Инжекция частиц. Бустерные ускорители. Быстрый и медленный вывод пучка. Временная структура пучка.

7. Накопительные кольца, метод встречных пучков, коллайдеры.

Энергия частиц в лабораторной системе координат и в системе центра масс. Накопители и коллайдеры. Светимость коллайдера. Охлаждение пучков. Проблемы получения сверхвысокого вакуума. Сверхпроводящие магниты. Физические эксперименты на встречных пучках. Вторичные пучки.

8. Применение ускорителей в науке, медицине и промышленности.

Медицинские ускорители. Синхротронное излучение и его применение. Лазеры на свободных электронах. Ускорительная наработка и использование радиоактивных нуклидов. Применение электронных и ионных пучков в технике.

9. Диагностика пучков заряженных частиц.

Классификация подходов к диагностике пучка заряженных частиц по типу взаимодействия. Методы построения систем диагностики пучков различных типов. Контактные методы диагностики. Оптические методы диагностики. Электромагнитные датчики.

10. Заключение.

Будущие ускорители. Перспективы и новейшие технологии. Лазерно-плазменное ускорение. Влияние развития ускорительной техники на современную науку, технику и технологии.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Дневная форма получения образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСП	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Введение. Общие сведения.	2						
2	Ускорители прямого действия.	2		2				Устный опрос, решение задач по темам № 1-2
3	Сильноточные ускорители	6						
4	Линейные ускорители.	2		2				Устный опрос, решение задач по темам № 3-4
5	Циклические ускорители с постоянным во времени магнитным полем.	4		2				Устный опрос
6	Циклические ускорители с переменным во времени магнитным полем.	4						
7	Накопительные кольца, метод встречных пучков, коллайдеры.	4					2	Презентация рефератов
8	Применение ускорителей в науке, медицине и промышленности.	4		4			2	Устный опрос, презентация рефератов

9	Диагностика пучков заряженных частиц.	2						
10	Заключение.	4						
	ИТОГО	34		10			4	

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Перечень основной литературы

1. Гольдин Л.Л. Физика ускорителей. М.: Наука, 1983.— 144 с.
2. Лебедев А.Н., Шальнов А.В. Основы физики и техники ускорителей: в 3-х т. Т. 1. Ускорители заряженных частиц. М.: Энергоатомиздат, 1981.— 192 с.
3. Пашков В.Т. Физика пучка в кольцевых ускорителях. М.: Физматлит, 2006.— 264 с.
4. Humpries S., Jr. Principles of charged particles acceleration. Wiley&Sons, 1999.— 593 p.
5. Онищенко Л.М. Циклотроны // Физика элементарных частиц и атомного ядра 39(6) (2008) с. 1843-1897.
6. Абрамян Е.А. Промышленные ускорители электронов. М.: Энергоатомиздат, 1986.— 248 с.
7. Фетисов Г.В. Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ. М.: Физматлит, 2007.— 672 с.
8. Кудасов Ю.Б. Электрофизические измерения. М.: Физматлит, 2010.— 184 с.
9. Иванов И.Н., Трубников Г.В. Введение в теорию ускорителей.— Дубна: ОИЯИ, 2005, УНЦ-2005-28 (<http://uc.jinr.ru/lectures/accel/>)
10. Amaldi Ugo. Particle Accelerators: From Big Bang Physics to Hadron Therapy, Springer, 2005.—293 p.
11. Добрецов Ю.П. Ускорители заряженных частиц в экспериментальной физике высоких энергий. Текст лекций. М.: МИФИ, 2004.— 108 с.
12. Смалюк В.В. Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях / Под ред. чл.-корр. РАН Н.С. Диканского. Новосибирск: Параллель, 2009.— 294 с.
13. Климанов В.А. Дозиметрическое планирование лучевой терапии. Часть 2. Дистанционная лучевая терапия пучками заряженных частиц и нейтронов. Брахитерапия и радионуклидная терапия. Учебное пособие. М.: МИФИ, 2008. 328 с.

Перечень дополнительной литературы

1. Бенфорд А. Транспортировка пучков заряженных частиц.— М.: Атомиздат, 1969.— 240 с.
2. Карташев В.П., Котов В.И. Методы формирования пучков частиц на ускорителях высоких энергий.— М.: Энергоатомиздат, 1989.— 184 с.

3. Ципенюк Ю.М. Фундаментальные и прикладные исследования на микротроне.— М.: Физматлит, 2009.— 424 с.
4. Неразрушающий контроль с источниками высоких энергий / Ключев В.В. и др.— М.: Энергоатомиздат, 1989.— 176 с.
5. <http://www.cyclotrons.net/content.php> [Date of access 29.06.2016].
6. <http://www.iba-worldwide.com/>[Date of access 29.06.2016].
7. Нгуен Чонг Хоанг Чунг Концептуальное моделирование медицинского циклотрона // Магистерская диссертация, Минск, 2014.
8. Лобко А.С. Лазерно-плазменное ускорение заряженных частиц: принципы и достижения // Вестник Фонда фундаментальных исследований №3 (2014) С. 88-106.

Перечень рекомендуемых средств диагностики и методика формирования итоговой оценки

Формой текущей аттестации по дисциплине «Ускорители заряженных частиц» учебным планом предусмотрены экзамен

При формировании итоговой оценки используется рейтинговая оценка знаний студента, дающая возможность проследить и оценить динамику процесса достижения целей обучения.

Для текущего контроля качества усвоения знаний по дисциплине рекомендуется защита реферативных работ, устные опросы и решение задач.

Защита реферативных работ проводится в форме индивидуальных выступлений-презентаций с последующей дискуссией. Оценка рефератов проводится по десятибалльной шкале.

При оценке текущего контроля учитывается:

- участие в семинаре (опрос, дискуссия и т.д.) –30%
- презентация рефератов - 10%
- выполнение проекта - 40%
- выступление на студенческих конференциях -20%

Зачетная оценка и оценка текущей успеваемости служат для определения рейтинговой оценки по дисциплине, которая рассчитывается как средневзвешенная оценка текущей успеваемости и оценки, полученной на зачете. Рекомендуемые весовые коэффициенты для оценки текущей успеваемости — 0,5; для итогового контроля (зачетной оценки) — 0,5.

Оценка текущего контроля формируется

Оценка за активное участие в учебном процессе и посещение занятий	Количество баллов
Все занятия	Максимальный балл - 10
Не менее 75%	7

Не менее 50%	5
Не менее 25%	2
Участие в семинаре	10
Уровень подготовки и презентация материала по теме реферата	20
Самостоятельная работа по теме реферата (выполнение проекта)	60
Выступление на студенческих конференциях с докладом*	90
Выполнение группового задания	30

*Выступление на конференциях по плану мероприятий факультета

Количество баллов	Оценка (T_T)	Количество баллов	Оценка (T_T)
0	0		
2	1	40,0	6
5	2	60,0	7
7	3	80,0	8
10	4	90,0	9
20,0	5	100,0	10

В случае пропуска семинарских занятий возможность представления реферата определяется кафедрой, обеспечивающей данный курс. В случае неявки на семинар по уважительной причине студент вправе по согласованию с преподавателем выполнить нагрузку в дополнительное время. Для студентов, получивших неудовлетворительные оценки за реферат, либо не явившихся по неуважительной причине, по согласованию с преподавателем и с разрешения заведующего кафедрой мероприятие может быть проведено повторно, до сессии.

Рейтинговая оценка $T_p = T_T \cdot 0,5 + T_{II} \cdot 0,5$

где T_{II} – оценка итогового контроля

При условии, что $T_p \geq 4$ ставится «зачтено»

ставится при условии $T_p \geq 4$ для каждого курса после сдачи обоих курсов. В случае не сдачи одного из курсов ставится «не зачтено»

Примерный перечень заданий для управляемой самостоятельной работы студентов

1. **Тема №7 Накопительные кольца, метод встречных пучков, коллайдеры.** Прослушивание онлайн-лекции «Структура и задачи комплекса NICA» на образовательном портале Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна, Российская Федерация) <https://edu.jinr.ru/courses/course/view.php?id=77> (2 часа). *Форма контроля – устный опрос, презентация реферата.*
2. **Тема №8 Применение ускорителей в науке, медицине и промышленности.** Прослушивание онлайн-лекции «Физика тяжелых ионов и высокие технологии» на образовательном портале Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна, Российская Федерация) <https://edu.jinr.ru/courses/course/view.php?id=48> (2 часа). *Форма контроля – устный опрос, презентация реферата.*

Примерная тематика семинарских занятий.

Семинар №1. **Тема №2 Ускорители прямого действия.** Решение задач по ускорительной тематике. (2 часа). *Форма контроля – решение задач.*

Семинар №2. **Тема №4 Линейные ускорители** Решение задач по ускорительной тематике. (2 часа). *Форма контроля – решение задач.*

Семинар №3. **Тема №5 Циклические ускорители с постоянным во времени магнитным полем.** Компоненты и системы циклического ускорителя. Параметры и технические особенности компонентов ускорителя на примере студенческого циклотрона RutgersUniversity (<http://koethcyclotron.org/>). (2 часа). *Форма контроля – устный опрос.*

Семинар №4. **Тема №8 Применение ускорителей в науке, медицине и промышленности.** Современные ускорители для медицины: технические решения, спецификации и примеры применения на медицинских ускорителях компании ИВА: лучевая терапия, протонная терапия, радиофармацевтика (2 часа) *Форма контроля – устный опрос.*

Семинар №5. **Тема №8 Применение ускорителей в науке, медицине и промышленности.** Современные ускорители для промышленности: технические решения, спецификации и примеры применения на промышленных ускорителях компании ИВА: стерилизация, модификация полимеров, таможенный контроль, обработка пищевой продукции (2 часа) *Форма контроля – устный опрос.*

Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины

В рамках данного курса предполагается использовать проектный подход к преподаванию учебной дисциплины, а также метод группового обучения.

При организации образовательного процесса *используется метод проектного обучения*, который предполагает:

- способ организации учебной деятельности студентов, развивающий актуальные для учебной и профессиональной деятельности навыки планирования, самоорганизации, сотрудничества и предполагающий создание собственного продукта;

- приобретение навыков для решения исследовательских, творческих, социальных, предпринимательских и коммуникационных задач.

При организации образовательного процесса *используется метод группового обучения*, который представляет собой форму организации учебно-познавательной деятельности обучающихся, предполагающую функционирование разных типов малых групп, работающих как над общими, так и специфическими учебными заданиями.

Методические рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся

Основными направлениями самостоятельной работы студента являются:

- подробное ознакомление с программой учебной дисциплины;
- ознакомление со списком рекомендуемой литературы по дисциплине в целом и ее разделам;
- изучение и расширение лекционного материала преподавателя за счет специальной литературы;
- написание рефератов и их оформление;
- подготовка к семинарским занятиям;
- изучением основной и дополнительной литературы;
- подготовка к экзамену.

Темы реферативных работ

1. Электронный синхротрон как источник фотонов (SLS).
2. Будущие циркулярные коллайдеры (FCC).
3. Генерация мощных высоковольтных импульсов.
4. Применение ускорителей в ядерной медицине.
5. Ускорительная наработка и использование радиоактивных нуклидов.
6. Применение мощных электронных и ионных пучков в технике и промышленности.
7. Современный циклотрон.

8. Электромагнитное ускорение макроскопических тел.
9. Лазерно-плазменное ускорение.
10. Диэлектрическое лазерное ускорение
11. Физические основы лучевой терапии
12. Основные методы диагностики пучков заряженных частиц
13. Ускорительный комплекс NICA (ОИЯИ, Дубна)

Примерный перечень вопросов к экзамену

1. Общие сведения об ускорителях. Выбор энергии и типа частиц. Единицы и масштабы.
2. Характеристики ускоряемых частиц. Взаимодействие заряженных частиц с электромагнитным полем.
3. Продольная устойчивость. Принцип автофазировки.
4. Ускорители прямого действия: устройство и принцип работы. Ускорительные трубки.
5. Бетатрон. Бетатронное условие.
6. Циклические ускорители с переменным во времени магнитным полем: устройство и принцип действия.
7. Источники заряженных частиц.
8. Высокочастотные трансформаторы. Каскадные генераторы.
9. Генератор Ван де Граафа. Тандемный ускоритель.
10. Изменение энергии частиц при ускорении. Тормозное излучение.
11. Электронный синхротрон. Синхротронное излучение.
12. Вигглер и ондулятор. Лазер на свободных электронах.
13. Сильноточные ускорители, их особенности и применение.
14. Основные параметры пучков заряженных частиц.
15. Фазовые диаграммы пучка. Теорема Лиувилля. Эмиттанс и аксептанс.
16. Линейные ускорители. Резонансное ускорение.
17. Циклические ускорители с постоянным во времени магнитным полем.
18. Фокусирующие свойства электрических и магнитных полей.
19. Поперечная устойчивость. Мягкая и жесткая фокусировка.
20. Адиабатическое сжатие пучка.
21. Встречные пучки. Накопители и коллайдеры. Светимость.
22. Циклотрон: конструкция и принцип действия. Изохронный циклотрон.
23. Основные методы измерения параметров пучков заряженных частиц.
24. Лучевая терапия пучками заряженных частиц.

ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
1. Физика высоких энергий	Кафедра ядерной физики	нет	Оставить без изменений. протокол №4 от 21.11.2019 г.
2. Физика ядра и элементарных частиц	Кафедра ядерной физики	нет	Оставить без изменений, протокол № 4 от 21.11.2019 г.
3. Лабораторный спецпрактикум «Моделирование в ядерном физическом эксперименте»	Кафедра ядерной физики	нет	Оставить без изменений, протокол № 4 от 21.11.2019 г.

**ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ ПО
ИЗУЧАЕМОЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

на ____ / ____ учебный год

№ п/п	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры
ядерной физики
(протокол № _____ от _____ г.)

Заведующий кафедрой
ядерной физики
к.ф.-м.н., доцент

_____ А.И. Тимощенко

УТВЕРЖДАЮ
Декан физического факультета БГУ
к.ф.-м.н., доцент

_____ М.С. Тиванов