



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

УТВЕРЖДАЮ

Директор НИЦ
«Курчатовский институт» - ИФВЭ

С.В. Иванов

2022 г.



ПРОГРАММА

кандидатского экзамена по специальной дисциплине «Физика атомных ядер
и элементарных частиц, физика высоких энергий»

(физико-математические науки, технические науки)

Группа научных специальностей: **1.3. Физические науки**

Научная специальность: **1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных
частиц, физика высоких энергий**

Согласовано:

Ученый секретарь

Н.Н. Прокопенко

Согласовано:

Заведующий аспирантурой

Е.Е. Васильева

Протвино 2022 г.

1. Экспериментальные методы в физике высоких энергий

Раздел 1. Взаимодействие излучения с веществом

Тема 1. Ионизационные потери

Модель Ферми для кулоновского взаимодействия заряженной частицы с атомными электронами. Спектр электронов отдачи. Формула Бете-Блоха. Понятие MIP. Границы применимости. Эффект плотности. Плато Ферми. Ограниченные потери. Флуктуации потерь. Распределение Ландау. Ионизационные потери как основной механизм детектирования частиц.

Тема 2. Черенковское и переходное излучение

ЧИ как интерференционный эффект. Пороговый характер ЧИ. Кинематическая интерпретация ЧИ. Спектр, угловое распределение и поляризация ЧИ. ЧИ как часть ионизационных потерь.

Идентификация частиц посредством регистрации ЧИ.

ПИ от границы раздела сред. ПИ от фольги и щели. ПИ от регулярной структуры. ПИ Оптическое и рентгеновское ПИ. Насыщение ПИ как функции Лоренц-фактора частицы. Идентификация частиц посредством регистрации РПИ.

Тема 3. Многократное рассеяние.

Резерфордское рассеяние. Понятие радиационной длины. Угловое распределение рассеяния.

Тема 4. Тормозное излучение и рождение пар.

ТИ в поле ядра. Длина экранировки. Критическая энергия. Рождение электрон-позитронных пар γ -квантом в поле ядра. Формулы Бете-Гайтлера. Электромагнитный каскад. Модель каскада. Продольная форма каскада. Приближение Росси. Радиус Мольера.

Тема 5. Дополнительные вопросы излучения и взаимодействия с веществом.

Синхротронное излучение. Поглощение низкоэнергичных γ -квантов веществом: комптоновское рассеяние; фотоэффект; рэлеевское рассеяние. Взаимодействие мюонов очень высоких энергий с веществом. Взаимодействие адронов с веществом, его общие характеристики. Ядерный каскад.

Раздел 2. Детекторы частиц и излучений

Тема 6. Газовые детекторы частиц.

Физические процессы в газе: первичная и полная ионизация; δ -электроны; дрейф и диффузия заряженных частиц; газовое усиление; пробой; фотоионизация и фотопоглощение.

Ионизационная камера. Форма сигнала. Индукционный эффект. Цилиндрический пропорциональный счетчик. МПК, ДК, ДТ, GEM. Время-проекционная камера. dE/dx – идентификация частиц.

Тема 7. Полупроводниковые детекторы.

Зонная структура полупроводника. Собственная и примесная проводимость; ионизация; термализация; дрейф; рекомбинация. Шумы в п/проводнике. Необходимость обеднения. Емкость перехода. PIN-детектор. Формирование сигнала в ППД. Разрешение. Спектрометрические и трековые ППД. Вершинный детектор.

Тема 8. Сцинтилляционные детекторы и фотоприемники.

Виды и свойства сцинтилляторов, основные характеристики; механизмы сцинтилляции. Эффект Биркса. Конструкции СД.

Вакуумный ФЭУ, основные процессы и характеристики: фото- и термо- эмиссия из полупроводникового фотокатода; вторичная эмиссия; оптическая и ионная обратная связь; объемный заряд. Шумы ФЭУ.

Полупроводниковые фотоприемники. Ячеистый лавинный фотодиод.

Тема 9. Детекторы черенковского и переходного излучения.

Черенковские счетчики. Пороговый, дифференциальный и многоканальный счетчики. Детектор колец черенковского излучения.

Детекторы переходного излучения (ДПИ). Радиатор, детектирующие элементы.

Тема 10. Калориметры и установки.

Типы калориметров. Электромагнитный калориметр. Факторы разрешения: флуктуации сбора «заряда» и выборки, утечки, шумы. Линейность. Радиационная стойкость калориметра. Адронные калориметры: дополнительные факторы энергетического (и пространственного) разрешения. Конструкции калориметров.

Основные детекторы и типовые компоновки установок в ФВЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература

1. К.Н. Мухин. Экспериментальная ядерная физика. М.: Энергоатомиздат. 1985.
2. Ю.К.Акимов. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. М.: Энергоатомиздат, 1989
3. Ю.К.Акимов Фотонные методы регистрации излучений. Дубна: ОИЯИ, 2006
4. А.И.Абрамов, Ю.А.Казанский, Е.С.Матусевич. Основы экспериментальных методов ядерной физики. М.: Энергоатомиздат, 1985.
5. Ю.А.Будагов и др. Ионизационные измерения в физике высоких энергий. М.: Энергоатомиздат, 1988.
6. К.Клайнкнехт. Детекторы корпускулярных излучений. М.: Мир, 1990.
7. Д.Джелли. Черенковское излучение и его применения. М.: ИИЛ, 1960.
8. Walter Blum, Werner Riegler, Luigi Rolandi. Particle Detection with Drift Chambers. Springer, 2008. e-ISBN: 978-3-540-76684-1

Дополнительная литература:

1. С.Grupen. Particle Detectors. Cambridge: University Press. 1992
2. В.Л.Гинзбург. Теоретическая физика и астрофизика. М.: Наука, 1981.
3. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Электродинамика сплошных сред (т.VIII). М.: Наука, 1982
4. А.И.Ахиезер, Н.Ф.Шульга. Электродинамика высоких энергий в веществе.: М. Наука, 1993

2. Статистические и численные методы анализа данных

Раздел 1. Использование технологии Грид в ФВЭ

Тема 1. Характеристики и типы Грид-систем.

Грид-ресурсы и виртуальные организации. Архитектура Грид. Промежуточное программное обеспечение. Европейская инфраструктура Грид.

Тема 2. Организация практической работы в ГРИД.

Задания в Грид. Типы заданий. Запуск, получение результатов. Основные принципы работы с данными в Грид. Понятия SURL, TURL, LFN. Информационная система в Грид.

Раздел 2. Статистические методы в ФВЭ

Тема 3. Доверительный интервал и пределы доверия. Частотный подход. На примере нормального распределения. Байесовский подход. На примере распределения Пуассона с ненулевым фоном. Метод максимального правдоподобия. На примере распределения Пуассона.

Тема 4. Проверка гипотез. Учет систематических ошибок. Проверка гипотез. Статистическое программное обеспечение в задачах физики высоких энергий.

Раздел 3. Нейронные сети

Тема 5. Нейронные сети. Математическая модель нейрона. Функции активации нейронных элементов. Обучение с учителем. Дельта-правило корректировки весов. Однослойные и многослойные НС. Распространение сигнала в многослойных сетях. Алгоритмы обратного распространения ошибок для обучения многослойных НС.

Раздел 4. Прикладное программное обеспечение в ФВЭ

Тема 6. Среда программирования ROOT . Задание и построение графиков и функций, работа с графическим редактором , введение в генераторы случайных чисел. Виды гистограмм: 1D, 2D и профильные.

Тема 7. Моделирование в среде ROOT . Метод моделирования Монте-Карло. Классы для работы с 4-векторами. Основные методы подгонки данных. Моделирование распада пиона на 2 гамма кванта.. Основные методы работы с массивами данных. Извлечение информации из объектов типа TTree и их анализ. Моделирование работы электромагнитного калориметра. Генераторы событий на примере генератора PYTHIA. Моделирование процесса образования лептонной пары в pp соударениях

Тема 8. Применение баз данных и интернет технологий в ФВЭ. Базы данных на примере MySQL . Основные команды MySQL. Формирование очередей запросов в базу данных. Знакомство с интернет технологиями – HTML, PHP

Раздел 5. Основные методы реконструкции и анализа в ФВЭ

Тема 9. Основные методы реконструкции и анализа и физических процессов в ФВЭ. Основные компоненты моделирования взаимодействия. Основные типы генераторов. Знакомство с программой моделирования детекторов и процессов в них GEANT. Методы определения параметров заряженных частиц. Основные алгоритмы определения параметров струй. Проблема двойного счёта для струй и методы её решения. Основные идеи b-tagging.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б. Эккель. Философия C++. Практическое программирование. СПб. Питер, 2004

2. С. Прата. Язык программирования C++. Москва, DiaSoft, 2005
3. Д.Худсон. Статистика для физиков. Москва, Мир, 1970
4. Е.Бюклинг, К.Каянти. Кинематика элементарных частиц. Москва, Мир, 1973
5. <http://root.cern.ch>
6. С. Осовский; Нейронные сети для обработки информации, М: Финансы и статистика, 2002.
7. В.В. Круглов, "Искусственные нейронные сети", Телеком, 2001.
8. G. Cowan, Statistical Data Analysis, Oxford Univ. Press, 1998.
9. R. J. Barlow, Statistics, J. Wiley, 1989.
10. С. Битюков, Н. Красников, Применение статистических методов для поиска новой физики на Большом Адронном Коллайдере, e-Print -- arXiv:1107.3974 [physics.data-an], 2011
11. Jacob, Bart; et.al. [Introduction to Grid Computing](http://www.redbooks.ibm.com/abstracts/sg246778.html?Open). IBM.
12. GEANT - Detector Description and Simulation Tool <http://www.wasd.web.cern.ch/wwwasd/geant/>
13. Pythia event generator <http://root.cern.ch/root/html/tutorials/pythia/index.html>

3. Основы физики ускорителей

Раздел 1 Принципы работы ускорителей

Тема 1. Значение ускорителей в физической науке и технологии.

Классификация ускорителей.

Применение ускорителей. Встречные пучки, светимость, современные коллайдеры. Электронные и ионные источники заряженных частиц. Линейные ускорители: высоковольтные ускорители прямого действия, ускоритель Вин де Граафа, тандемные ускорители, каскадные ускорители, линейные индукционные ускорители. Циклические ускорители с постоянной орбитой: бетатрон, синхротрон. Циклические ускорители с переменной орбитой: циклотрон, микроотрон.

Тема 2. Резонансное ускорение.

Резонансный принцип ускорения. Линейные ускорители электронов, ионов (ускоритель Альвареса), RFQ ускоритель, мезонные фабрики. Синхротроны с совмещенными и разделенными функциями магнитной структуры. Примеры синхротронов на высокие энергии: Дубна, Бустер ИФВЭ, У-70, ЛНС, УНК, проект Омега в ИФВЭ.

Тема 3. Синхротрон: устройство и принцип действия.

Понятие о фокусировке. Проектная орбита (reference orbit). Изменение магнитного поля, коэффициент расширения орбиты. Ускорение в синхротроне: принцип автофазировки, синхронная энергия и синхронная фаза, критическая энергия, уравнения синхротронного движения, синхротронные колебания.

Раздел 2 Устойчивость колебаний

Тема 4. Устойчивость синхротронных колебаний.

“Масса” и частота синхротронных колебаний. Сепаратриса в фазовом пространстве, синхротронные эмиттансы пучка и аксептансы, захват частиц в режим устойчивого ускорения. Адиабатическое изменение параметров синхротронных колебаний, теорема Лиувилля, зависимость параметров коротких сгустков (банчей) от энергии ускоряемых частиц.

Тема 5. Устойчивость поперечного движения в синхротроне.

Поперечное движение заряженных частиц в прямом магнитооптическом канале и однородном магнитном поле. Уравнение Хилла, период магнитной структуры. Слабая и сильная фокусировка. Уравнения поперечного движения в синхротроне. Основные типы электромагнитов в синхротроне: диполи и квадруполь. Матричный метод решения уравнения Хилла. Критерий устойчивости поперечного движения. Бетатронные колебания. Описание бетатронных колебаний посредством непрерывных бета и фазовых функции.

Тема 6. Параметры Куранта-Снайдера.

Параметры Куранта-Снайдера, матрица Твисса. Вычисление параметров Куранта-Снайдера, частота бетатронных колебаний, фазовый эллипс. Согласованные и не согласованные пучки, эмиттанс пучка и аксептанс вакуумной камеры. Инвариантный (нормализованный) эмиттанс пучка. Примеры магнитных структур (У-70, УНК). “Оценочный” расчет магнитной структуры типа FODO в приближении тонких линз в синхротроне на высокие энергии.

Тема 7. Дисперсионная функция и линейные возмущения в синхротроне.

Дисперсионная функция в замкнутой магнитной структуре и её расчет. Естественная хроматичность ускорителя, хроматический разброс бетатронных частот в пучке на клетке бетатронных частот. Принцип коррекции хроматичности.

Искажения замкнутой орбиты из-за геодезических ошибок установки диполей и квадруполь на проектную орбиту (reference orbit), точность изготовления магнитооптических элементов. Пример коррекции искажений орбиты. Создание бампов орбиты.

Тема 8. Описание плоского магнитного поля.

Скалярный потенциал плоского магнитного поля. Нормальные и косые мультиполи, их представление и измерение. Краевые поля. Краевая фокусировка в диполях.

Раздел 3 Резонансы

Тема 9. Влияние паразитных мультиполей на бетатронное движение.

Нелинейные уравнения бетатронного движения в канонических переменных. Решение методом усреднения. Сдвиг бетатронных частот. Суммовые и разностные бетатронные резонансы. Структурные резонансы.

Тема 10. Действие одномерного изолированного резонанса.

Ширина резонанса. Биения размеров пучка. Параметрический резонанс. Косой квадруполь и линейный резонанс связи. Использование секступольного резонанса для медленного вывода пучка из синхротрона.

Тема 11. Амплитудная зависимость сдвигов бетатронных частот.

Зависимость сдвигов частот от амплитуд колебаний. Разброс частот в пучке и системы его коррекции. Допуски на паразитные мультиполи (пример УНК). Влияние нормальных паразитных мультиполей на процесс медленного вывода.

Тема 12. Статические эффекты пространственного заряда в синхротроне.

Некогерентный кулоновский сдвиг бетатронных частот, роль фактора группировки (банчиловки). Влияние стенок вакуумной камеры. Ограничение интенсивности при низких и высоких энергиях. Нелинейный кулоновский разброс бетатронных частот. Куло-

новское взаимодействие сталкивающихся сгустков в коллайдере. Параметр пространственного заряда и ограничение светимости коллайдера.

Раздел 4 Эмиттанс

Тема 13. Сохранение эмиттанса пучка.

Рассогласование при инжекции: ошибки дипольного поля и ошибки фокусировки. Диффузионные процессы: кулоновское и ядерное рассеяние на остаточном газе. Требования к вакууму в протонных синхротронах. Шумы в RF системах и пульсации в питании электромагнитных элементах.

Тема 14. Уменьшение эмиттанса пучка в синхротроне.

Поперечное стохастическое охлаждение. Продольное стохастическое охлаждение. Электронное охлаждение.

Тема 15. Особенности электронных синхротронов.

Синхротронное излучение в электронных ускорителях. Радиационное затухание вертикальных бетатронных колебаний. Сжатие 6-мерного фазового объема пучка под влиянием излучения. Радиальные бетатронные и синхротронные колебания электронов. Декременты колебаний в ускорителях с различными типами фокусировки. Влияние квантовых флуктуаций излучения на движение электронов.

Тема 16. Когерентные эффекты пространственного заряда.

Когерентные бетатронные колебания. Когерентная поперечная неустойчивость пучка. Продольная неустойчивость пучка (эффект отрицательной массы).

Литература:

1. А.А. Коломенский, А.Н. Лебедев. Теория циклических ускорителей. М., Физматгиз, 1962.
2. А.А. Коломенский. Физические основы методов ускорения заряженных частиц. Издательство Московского университета, 1980.
3. А.Н. Лебедев, А.В. Шальнов. Основы физики и техники ускорителей. М., Энергоатомиздат, 1991.
4. D.A. Edwards, M.J. Syphers. An Introduction to the Physics of High Energy Accelerators. John Wiley & sons, INC., 1993.
5. H. Wiedemann. Particle Accelerator Physics I. Basic principles and linear beam dynamics, Springer-Verlag, 1995.
6. H. Wiedemann. Particle Accelerator Physics II. Nonlinear and higher-order beam dynamics. Springer-Verlag, 1995.

4. Теория фундаментальных взаимодействий

Раздел 1. Квантовая электродинамика

Тема 1. Функция распространения

Тема 2. Электромагнитное поле

Тема 3. Свободные релятивистские частицы с массой

Тема 4. Свободные частицы со спином $\frac{1}{2}$

Тема 5. Функция Грина электрона

Тема 6. Матричные элементы амплитуд рассеяния

Тема 7. Взаимодействие с фотоном электрона и скалярной частицы

- Тема 8. Рассеяние фотона электроном и скалярной частицей (Комптон-эффект)
- Тема 9. Аннигиляция электрон-позитронной пары
- Тема 10. Аннигиляция скалярных частиц
- Тема 11. Формула Вайцекера-Вильямса

Раздел 2. Слабые взаимодействия

- Тема 1. Структура слабых токов
- Тема 2. Распад мюона
- Тема 3. Лептонные распады адронов
- Тема 4. Нейтральные К-мезоны, распады и смешивание
- Тема 5. Нарушение CP-инвариантности
- Тема 6. Распады τ -лептона
- Тема 7. Распады очарованных частиц
- Тема 8. Матрица смешивания кварков
- Тема 9. Калибровочная инвариантность
- Тема 10. Стандартная модель электрослабого взаимодействия
- Тема 11. Спонтанное нарушение симметрии
- Тема 12. Свойства промежуточных бозонов
- Тема 13. Свойства Хиггсовских бозонов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература

1. М. Пескин, Д. Шредер, «Введение в квантовую теорию поля», Addison-Wesley Publishing Company (русский перевод: Научно-издательский центр «R&C Dynamics», Москва-Ижевск, 2001 г.)
2. В.Н. Грибов, «Квантовая электродинамика», Научно-издательский центр «R&C Dynamics», Москва-Ижевск, 2001г.
3. Р. Фейнман, «Квантовая электродинамика», издательство «Мир», Москва, 1964 г.
4. Л.Б. Окунь, «Лептоны и кварки», Москва, «Наука», 1981 г.

Дополнительная литература

1. Дж.Д. Бьёркен, С.Д. Дрелл, «Релятивистская квантовая теория. (В 2х томах)», И: Наука, 1978 г.

5. Введение в физику высоких энергий

Тема 1. Что и как изучает физика высоких энергий.

Массы частиц. Размеры частиц. Естественные единицы. Виды фундаментальных взаимодействий. Сечение. Светимость. Типичные эксперименты.

Кинематика реакций.

Пороги реакций. Бинарные реакции. Преобразования распределений. Двухчастичные распады. Трехчастичные распады. Инклюзивные и эксклюзивные реакции.

Тема 2. Теория рассеяния.

Выражение амплитуды рассеяния через фазы. Оптическая теорема. Формула Брейта-Вигнера. Дифракционное рассеяние. Барийонные и мезонные резонансы.

Тема 3. Изотопическая симметрия

Адроны. SU(2)-симметрия. Коэффициенты Клебша. SU(2)-симметрия в сильных и слабых взаимодействиях. Нарушение SU(2)-симметрии.

Тема 4. Рассеяние электронов на нуклонах и ядрах.
Вывод формулы Резерфорда. Формфактор. Формулы Мёллера и Розенблата.
Формфакторы нуклонов.

Тема 5. Жесткие процессы (1).
 $e+e- \rightarrow$ адроны. Полное сечение. Струи. Цвет.

Тема 6. Систематика адронов.
Кварковая модель, SU(3)_f-симметрия, цвет.
Мезоны, барионы, тяжелый кварконий.

Тема 7. Жесткие процессы(2).
Глубоко-неупругое взаимодействие. Кинематика. Скейлинг. Партоновая модель.

Тема 8. Дискретные симметрии
P, C, T –симметрии. Тождественность частиц. Связь спина и статистики

Тема 9. Уравнение Дирака.
Волновая функция частиц со спином 1/2. Частицы и античастицы.

Тема 10. Слабые взаимодействия.
Распады лептонов. Нарушение P-четности. Взаимодействие ток*ток. Фермиевская константа. Распады адронов. Универсальность слабого взаимодействия.

Тема 11. Смешивание кварков.
Матрица смешивания кварков. Нарушение CP-четности. Эксперименты по исследованию распадов тяжелых кварков.

Тема 12. Нейтрино
Массы нейтрино. Дираковские и майорановские нейтрино. Взаимодействие нейтрино с веществом. Осцилляции.

Тема 13. Промежуточные бозоны.
Рождение промежуточных бозонов в адронных взаимодействиях. Рождение Z-бозонов в $e+e-$ взаимодействиях. Массы, ширины, вероятности распадов.

Тема 14. Сведения о стандартной модели
Проблемы модели Ферми. Калибровочные теории. Хиггсовская модель. Свойства хиггсовского бозона.

Литература:

1. Д. Перкинс. Введение в физику высоких энергий. Энергоатомиздат, 1991
2. Ф.Клоуз. Кварки и партонны. М.: Мир, 1988
3. Ф.Хелзен, А.Мартин. Кварки и лептоны. Москва, Мир, 1987.
4. Л.Б.Окунь, Лептоны и кварки, Наука,М., 1981
5. Л.Б.Окунь. Физика элементарных частиц. М.: Наука, 1988

6. Феноменология в ФВЭ

Раздел 1. Электромагнитные взаимодействия

Тема 1 Высшие порядки в КЭД

Лэмбовский сдвиг. Эволюция α_s с q^2

Вклад адронов в α_s . Аномальный магнитный момент мюона

Измерение аномального магнитного момента мюона

Тема 2 Электромагнитные свойства адронов

Относительные ширины распадов $V \rightarrow l^+ l^-$ в кварковой модели

Относительные ширины распадов $V \rightarrow P \gamma$ в кварковой модели

Модель доминантности векторных мезонов

Реакции Примакова

Приближение эквивалентных фотонов

Тема 3 Эксперименты по измерению квантовых чисел адронов

Пространственная четность пиона. Спин пиона

C-четность пиона. Примеры разрешенных и запрещенных (подавленных) реакций

Тема 4 Эксперименты по проверке C, P, T инвариантности

Как преобразуются различные величины при P и T инверсиях

Сравнение сечений прямых и обратных реакций

Наблюдение несохранения P-четности в слабых взаимодействиях

Комбинированная четность

Измерение электрического дипольного момента нейтрона

Раздел 2. Сильные взаимодействия

Тема 5 Лагранжиан КХД

Локальное преобразование $SU(3)_c$

Восемь безмассовых глюонов

Самодействие глюонов. Неабелевость.

Лагранжиан КХД

Тема 6 Асимптотическая свобода, конфайнмент

Эволюция α_s с q^2

Асимптотическая свобода

Конфайнмент

Тема 7 Модели адронов

Потенциальная модель

Модель мешков

Трубки

Тяжелый кварконий

Тема 8 Экзотические адроны

Какие $q\bar{q}$ состояния могут реализовываться в нерелятивистской модели

Глюболы. Гибридные мезоны и барионы. Многокварковые состояния

Пентакварковые барионы. Состояния X, Y, Z

Тема 9. Киральная симметрия, массы кварков

Киральная симметрия $SU(2)_L \times SU(2)_R$
Пион как псевдоголдстоуновский бозон
Киральная симметрия $SU(3)_L \times SU(3)_R$
Массы u и d - кварков

Тема 10. Струи
Факторизация жестких и мягких процессов
Обнаружение струй в экспериментах на e^+e^- коллайдерах
Алгоритмы выделения струй (конус, $k_t \dots$). Характеристики струй
Методы калибровки энергии струй.

Тема 11. Множественные процессы
Быстрота и псевдобыстрота. Лестничная модель
Фрагментация и рекомбинация.
Правила счета для процессов с малыми p_t

Тема 12. Реджистика
Дисперсионные соотношения. Унитарность. Перекрестная симметрия
Диаграмма Чу-Фраучи. Померон
Феноменология бинарных реакций

Тема 13. Кварк-глюонная плазма
Фазовая диаграмма. Критическая температура.
Коллективные свойства.

Раздел 3. Стандартная модель

Тема 14. Структура слабых взаимодействий при низких энергиях, несохранение четности
Взаимодействие ток \times ток
Универсальность заряженного тока. Фермиевская константа. Левые заряженные токи.
Нейтральный ток
Распад мюона. Эксперименты по исследованию распада мюона.

Тема 15. Распад пиона
Угол Кабиббо. Сохранение векторного тока
Распад $\pi \rightarrow l \nu$
Распад $\pi^+ \rightarrow \pi^0 e \nu$
Эксперименты по исследованию распада пиона.

Тема 16. β -распад нейтрона
Общий вид векторного и аксиального токов
Векторные формфакторы. Аксиальные формфакторы
Частичное сохранение аксиального тока
Эксперименты по исследованию распада нейтрона

Тема 17. Распады каонов.
Правило $\Delta Q = \Delta S$. Правило $|\Delta S| = 1$
Распады K_{12} , K_{13} , K_{14}
Нелептонные распады. $\Delta T = 1/2$, распады гиперонов
Редкие распады каонов

Тема 18. Нейтральные каоны

Переходы $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$. Разность масс K_1 и K_2
Осцилляции странности. Механизм ГИМ
Регенерация

Тема 19. Несохранение CP

Распады $K_1 \rightarrow \pi^+ \pi^-$

Феноменология нарушения CP. CP – неинвариантные эффекты

Эксперименты по исследованию нарушения CP-инвариантности в распадах каонов.

Тема 20. τ -лептон

Лептонные распады. Полуадронные распады.

Эксперименты по исследованию распадов τ -лептона.

Тема 21. Распады тяжелых кварков

Мезоны с d и b- кварками

Лептонные распады. Нелептонные распады

t- кварк.

Тема 22. Несохранение CP-четности в распадах тяжелых кварков

Матрица КKM

Измерение констант V_{ij}

Треугольник КKM

Измерение угла в распаде $B \rightarrow J/\psi K^0$

Тема 23. Нейтринные взаимодействия

Взаимодействие нейтрино с электроном

Взаимодействие нейтрино с нуклонами

Эксперименты по прямому измерению массы нейтрино

Тема 24. Осцилляции нейтрино

Осцилляции для системы из двух нейтрино

Эксперименты по наблюдению осцилляций.

Взаимодействие с веществом

Общий вид матрицы смешивания для трех нейтрино

Тема 25. Лагранжиан стандартной модели

Свойства Z, W. Массы W и Z – бозонов

Слабые заряды нейтральных токов

Массы лептонов и кварков

Эксперименты по измерению параметров W и Z-бозонов

Тема 26. Свойства H бозонов

Ограничения на массу хиггсовского бозона.

Роль хиггсовского бозона при высоких энергиях.

Взаимодействие H-бозона с кварками

Взаимодействие H-бозона с глюонами и фотонами

Открытие хиггсовского бозона

Раздел 4. За пределами стандартной модели

Тема 27. Прецизионные измерения в стандартной модели

Измерения в пике Z-бозона

Глобальный фит параметров электрослабой модели
Вклады t -кварка и хиггсовского бозона в массу Z, W бозонов
Параметризация отклонений от стандартной модели

Тема 28. Большое объединение
Эволюция зарядов
Группа $SU(5)$
Распад протона

Тема 29. Суперсимметрия
MSSM
Эксперименты по поиску суперсимметричных частиц.
Эксперименты по поиску WIMP

Тема 30. Взаимодействия при сверхвысоких энергиях
Эксперименты на коллайдерах, параметры коллайдеров.
Проекты новых коллайдеров (ILC, CLIC, LEP3, мюонный коллайдер)

Тема 31. Высокоинтенсивные протонные ускорители.
Поиски новых взаимодействий в распадах мюонов
Нейтрон (время жизни, параметры распада, EDM, $n \leftrightarrow \bar{n}$)
Поиски новых взаимодействий в распадах каонов, D и B -мезонов

Тема 32. Массивные нейтрино
Механизм «качелей»
Двойной бета-распад
Стерильные нейтрино

Тема 33. Большой взрыв
Нуклеосинтез
Микроволновое излучение
Проблемы модели большого взрыва

Тема 34. Инфляционная модель

Тема 35. Темная материя и темная энергия

Тема 36. Сверхвысокие энергии,
Космические лучи, ШАЛ
Эксперименты по изучению космических лучей сверхвысоких энергий.
Поиски возможных проявлений суперсимметрии в космических лучах
Эксперименты по поиску антиядер в космических лучах.

Тема 37. Барийонная асимметрия Вселенной.
Эксперименты по поиску нарушения CP в лептонном секторе

Литература:

1. Д. Перкинс. Введение в физику высоких энергий. Энергоатомиздат, 1991
2. Ф.Клоуз. Кварки и партоны. М.: Мир, 1988
3. Ф.Хелзен, А.Мартин. Кварки и лептоны. Москва, Мир, 1987.
4. P.D.B. Collins & A.D. Martin. Hadron interactions, 1984, ISBN 0-85274-768-3

5. Фейнман Р., Взаимодействие фотонов с адронами, Наука, М., 1975
6. Л.Б.Окунь, Лептоны и кварки, Наука, М., 1981
7. Т.-П.Ченг, Л.-Ф.Ли. Калибровочные теории в физике элементарных частиц, Мир, 1987
8. Боум Ф., Фогель П. Физика массивных нейтрино. М. Мир 1990г.
9. Вайнберг С., Первые три минуты, пер. с англ., М., 1981;
10. John F. Hawley, Foundations of Modern Cosmology, published by [Oxford University Press](http://www.astro.virginia.edu/~jh8h/Foundations/) (<http://www.astro.virginia.edu/~jh8h/Foundations/>)
11. Вилчек Ф., Космическая асимметрия между материей и антиматерией, пер. с англ., "УФН", 1982, т. 136, с. 149
12. Долгов А.Д., Зельдович Я.Б., Сажин М.В. Космология ранней Вселенной. М.: Изд-во МГУ, 1988
13. В.М.Емельянов, Стандартная модель и ее расширения, Физматлит, 2007
14. Горбунов Д.С., Рубаков В.А, Введение в теорию ранней Вселенной. Теория горячего Большого взрыва, ЛКИ, 2006