

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

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

УТВЕРЖДАЮ



И.о. декана физического факультета МГУ

В.В. Белокуров

«21» *марта* 2024 г.

**ПРОГРАММА-МИНИМУМ
КАНДИДАТСКОГО ЭКЗАМЕНА ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ**

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

Шифр и наименование области науки

1. Естественные науки

Наименование отраслей науки, по которым присуждаются ученые степени

Физико-математические науки

Москва 2024

I. Описание программы

Программа-минимум кандидатского экзамена, разработана Физическим факультетом Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова на основе паспорта научной специальности, утвержденного Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, и учебного плана программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по специальности 1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий, в отрасли физико-математических наук.

II. Основные разделы и вопросы к экзамену

Тема 1. Теория атомного ядра (для специалистов-теоретиков по физике атомного ядра).

Ядерные силы и модели ядра

Общие свойства ядерного вещества. Полная энергия ядер. Энергия связи. Химический потенциал, импульс Ферми (модель ферми-газа).

Нуклон-нуклонные взаимодействия при низких энергиях. Изотопическая симметрия. Тензорные силы. Мезонная теория сильного взаимодействия. Феноменологические нуклон-нуклонные потенциалы. Дейтрон.

Оболочечная модель ядра. Средний ядерный потенциал. Последовательность одночастичных уровней. Частично-дырочный формализм. Метод Хартри-Фока. Приближение хаотических фаз. Гигантские резонансы. Зарядообменные резонансы. Релятивистские модели среднего поля ядра.

Парные взаимодействия сверхпроводящего типа. Модель Бардина-Купера-Шриффера. Преобразование Боголюбова, квазичастицы. Энергетическая щель, энергия основного состояния.

Ротационные и вибрационные спектры ядер. Моменты инерции. Электромагнитные переходы и правила отбора. Метод бозонных разложений. Модель взаимодействующих бозонов и фермионов. Высокоспиновые состояния. Статистическое описание сильновозбужденных ядер. Плотность уровней ядра.

Ядро как конечная ферми-система. Метод функций Грина. Аналитические свойства функций Грина. Спектральное разложение. Одночастичные функции Грина для бесконечных и конечных систем. Взаимодействие между квазичастицами. Парные корреляции в формализме функций Грина.

Бета-распад ядер. Гамильтониан слабого взаимодействия. Правила отбора для бета-переходов. ft -величины. Гипотеза сохранения векторного тока и частичного сохранения аксиально-векторного тока. Мю-захват. Несохранение четности в слабом взаимодействии. Описание бета-распада свободного нейтрона. Матричные элементы бета-переходов ядер и их оценки в ядерных моделях. Процессы двойного двухнейтринного и безнейтринного бета-распада.

Протонный распад, альфа-распад и кластерные распады ядер. Запаздывающие распадные процессы. Деление ядер. Спонтанное деление. Мультимодальное деление. Метод оболочечной поправки Струтинского.

Нарушение четности в процессах деления. Трансурановые и сверхтяжелые элементы, остров стабильности сверхтяжелых ядер.

Теория ядерных реакций

Волновые функции непрерывного спектра. Аналитические свойства S-матрицы. Дисперсионные соотношения. Амплитуда рассеяния. T-матрица. Вероятность и сечение рассеяния. Оптическая теорема.

Рассеяние двух частиц без спина и со спином. Принципы инвариантности и законы сохранения. Одноканальное и многоканальное рассеяние. Борновский ряд. Борновское приближение с плоскими и искаженными волнами.

Рассеяние электронов на ядрах. Мультипольное разложение. Упругое и неупругое рассеяние. Радиационные поправки.

Оптическая модель взаимодействия нуклонов с ядрами. Мнимая часть потенциала. Прямые ядерные реакции. Реакции выбивания, подхвата, передачи.

Рассеяние на системах связанных частиц. Квазиупругое рассеяние. Многократное рассеяние, теория Глаубера. Ядро-ядерные столкновения. Реакции слияния. Рассеяние мезонов на ядрах. Поглощение мезонов. Пимезоатомы. Гиперядра.

Малонуклонные системы. Уравнения Фаддеева. Ефимовские состояния. Описание слабосвязанных легких гало-ядер.

Рассеяние частиц высокой энергии на ядрах. Форм-факторы. Проявление в ядерных реакциях кварковых и других ненуклонных степеней свободы.

Ядерная астрофизика

Происхождение и эволюция Вселенной. Нуклеосинтез нуклидов в Солнечной системе и Галактике. Физика элементарных частиц и космология. Реликтовые нуклоны, барионная асимметрия и проблема стабильности протона.

Солнечная энергия. Основные ядерные реакции на Солнце. Ядерные реакции в звездах в процессе эволюции. Происхождение элементов легче железа. Модели звезд и эволюция звезд до взрыва сверхновой. Белые карлики.

Природа взрывов сверхновых. Динамика коллапса. Роль нейтрино в коллапсе сверхновых. S- и R-процессы. Происхождение средних и тяжелых элементов. Космохронология.

Нейтринная астрофизика. Солнечные нейтрино и нейтрино от сверхновых. Наблюдение взрыва сверхновой 8К 1987А. Современные детекторы солнечных нейтрино, проблема дефицита солнечных нейтрино. Масса нейтрино и гипотеза нейтринных осцилляций.

Тема 2. Физика элементарных частиц (для специалистов-теоретиков по физике атомного ядра).

Общий обзор элементарных частиц и их свойства

Таблица элементарных частиц. Квантовые числа частиц. Слабые, электромагнитные и сильные распады частиц. Эмпирические правила отбора.

Модель кварков. Изотопическая и SU(3) симметрия сильных взаимодействий; свойства слабых и электромагнитных взаимодействий по отношению к этим симметриям. Стандартная модель электрослабого и сильного взаимодействий. Массовые формулы. Цветовая симметрия сильных взаимодействий. Понятие о квантовой хромодинамике.

Взаимодействия элементарных частиц

p N-рассеяние. Формальная теория рассеяния p -мезонов нуклонами.

Рассеяние электронов на нуклонах и электромагнитные форм-факторы нуклонов. Формула Розенблюта.

Слабое взаимодействие, электромагнитные и сильные распады частиц. Эмпирические правила отбора. Сохраняющий странность слабый ток. Стандартная модель Вайнберга-Глэшоу-Салама. Нейтральные токи. Z- и W-бозоны, их ширины и моды распада.

Физика нейтрино. Уравнение Вейля. Дираковское и майорановское нейтрино. Электронное, мюонное и тау-нейтрино. Масса нейтрино. Гипотеза нейтринных осцилляций. Гипотеза аномального магнитного момента нейтрино. Современные данные по нейтринным осцилляциям.

Процессы с большой передачей импульса. Понятие о партонной модели. Кварковый счет. Понятие о квантовой хромодинамике.

Тема 3. Квантовая теория поля (для специалистов-теоретиков по физике элементарных частиц).

Классическая теория поля

Лагранжев и гамильтонов формализм в классической теории. Теорема Нетер и сохраняющиеся величины. Тензор энергии-импульса. Тензоры момента и спина. Заряд и вектор тока.

Скалярное поле. Уравнение Клейна-Гордона и свойства его решений. Разложение полей по положительно- и отрицательно-частотным решениям и плоским волнам. Комплексное (заряженное) поле. Вектор энергии-импульса, тензор момента. Заряд и ток скалярного поля.

Векторное поле. Лагранжиан векторного поля. Вектор энергии-импульса, вектор спина, тензор напряженности.

Электромагнитное поле. Вектор-потенциал и напряженности. Калибровочные преобразования. Условие Лоренца. Поперечные, продольная и временная компоненты. Вектор энергии-импульса, спин.

Квантовая теория свободного поля

Метод вторичного квантования. Пространство чисел заполнения. Операторы рождения и уничтожения. Пространство Фока. Операторы в представлении вторичного квантования. Шредингеровская и гайзенберговская картины в методе вторичного квантования.

Постулаты квантования полевой системы. Операторы рождения и уничтожения. Типы перестановочных соотношений.

Квантование скалярного, векторного и спинорного полей. Динамические переменные свободных полей и отвечающие им операторы энергии-импульса, спина, тока, заряда. Положительная определенность энергии. Проекционные операторы и спиновая матрица плотности. Зарядовое сопряжение.

Электромагнитное поле. Индефинитная метрика. Условие Лоренца. Динамические переменные. Проекционные операторы, поляризация матрица плотности.

Перестановочные функции и различные типы функций Грина. Явный вид особенности на конусе. Нормальное произведение операторов.

Описание взаимодействия, матрица рассеяния, свойства симметрии. Метод теории возмущений

Представления Гайзенберга, Шредингера, Дирака (взаимодействия). Общая форма оператора эволюции. Определение матрицы рассеяния. Свойства релятивистской инвариантности, унитарности и причинности. Условие причинности Боголюбова.

Лагранжианы различных типов взаимодействия и принципы симметрии. Сильные, электромагнитные и слабые взаимодействия. С, Р, Т-преобразования. Теорема Людерса-Паули. Р-нечетный лагранжиан слабого взаимодействия.

Вероятности и сечения. Релятивистски инвариантное определение амплитуды реакции. Инвариантные фазовые объемы. Соотношение унитарности для инвариантных амплитуд рассеяния. Оптическая теорема.

Вывод хронологического представления для S-матрицы в теории возмущений. Приведение S-матрицы к нормальной форме. Теорема Вика. Диаграммы Фейнмана. Теорема Фарри.

Эффекты низшего порядка теории возмущений: комптон-эффект, фотоэффект, аннигиляция пары, тормозное излучение и рождение пары в поле ядра, формфакторы, естественная ширина линий, позитроний.

Мультипольное излучение.

Общий метод перенормировки

Расходимости в низших порядках электродинамики: собственная энергия электрона, поляризация вакуума, вершинная часть. Методы регуляризации и выделение расходимостей. Перенормировка массы и заряда в низшем порядке по константе связи. Размерная регуляризация. Схема минимальных вычитаний.

Классификация ренормируемости теории. Примеры перенормируемых теорий. Приводимые и скелетные диаграммы. Степень расходимости произвольной скелетной диаграммы. Перенормировка массы, заряда, волновых функций и вклада произвольной диаграммы. Общая теория R-операции Боголюбова-Парасюка. Операторные разложения и их основные применения.

Градиентная инвариантность, тождества Уорда-Тахакаши и ренормируемость квантовой электродинамики. Перенормировка массы и заряда.

Суммирование диаграмм. Уравнение Дайсона-Швингера. Уравнение Бете-Солпитера. Инфракрасные расходимости, их факторизация и устранение при учете испускания мягких квантов.

Ренормализационная группа. Инвариантный заряд, функция Гелл-Манна-Лоу. Уравнение Овсянникова-Калана-Симанчика. Аномальные размерности.

Вычисление радиационных поправок к закону Кулона и магнитному моменту. Лэмбовский сдвиг.

Квантование неабелевых калибровочных теорий

Метод континуального интегрирования.

Квантование неабелевых калибровочных полей. Постулат квантования и вспомогательные поля Фаддеева-Попова. Перенормируемость. Асимптотическая свобода на малых расстояниях. Квантовая хромодинамика.

Спонтанное нарушение симметрии. Теорема Голдстоуна, явление Хиггса. Концепция квазисредних Боголюбова.

Элементы аксиоматической квантовой теории поля. Аналитические свойства амплитуды

Аксиоматическая формулировка Боголюбова. Радиационные операторы.

Формулировка теории поля Лемана-Симанчика-Циммермана. Асимптотические условия. Редукционные формулы.

Перекрестная симметрия. Аналитические свойства амплитуды рассеяния по $\cos \varphi$. Ограничения Фруассара.

Аналитические свойства диаграмм Фейнмана и уравнение Ландау для их особенностей (особенности петли, треугольника, квадрата). Представление Мандельштама для четырехугольника.

Тема 4. Теория элементарных частиц (для специалистов-теоретиков по физике элементарных частиц)

Общий обзор элементарных частиц и их свойства

Таблица элементарных частиц: лептоны, мезоны, барионы, мезонные и барионные резонансы, W, Z-бозоны. Квантовые числа частиц: масса, спин, четность, зарядовая четность, изоспин, странность, чарм, G-четность.

Распады и времена жизни частиц. Слабые, электромагнитные и сильные распады. Их характерные времена и ширины распадов. Эмпирические правила отбора на основе сохранения зарядов: электрического, барионного, лептонного, гиперзаряда, странности.

Симметрия элементарных частиц

Группа Пуанкаре. Спин и спиральность, дискретные C, P и T симметрии. Использование спиральности для описания частиц с высокими спинами.

Изотопическая инвариантность сильных взаимодействий. G-четность; правила отбора, вытекающие из сохранения G-четности.

Изотопические свойства электромагнитных взаимодействий. Изотопические соотношения между магнитными моментами гиперонов, соотношения между амплитудами фоторождения и радиационных распадов резонансов.

SU(3)-симметрия сильных взаимодействий. Классификация элементарных частиц по представлениям SU(3). Нарушение SU(3)-симметрии и массовые формулы. Соотношения между вероятностями различных процессов, вытекающие из SU(3)-симметрии; распады бозонных и барионных резонансов. Нарушение унитарной симметрии в процессах рассеяния. Частицы с чармом. Введение цвета. Глюонная гипотеза.

Электромагнитные и слабые взаимодействия в унитарной симметрии. Соотношения между электромагнитными вершинами и вероятностями радиационных распадов. Электромагнитное расщепление масс. Унитарная структура слабых взаимодействий. Стандартная модель электрослабого взаимодействия.

Кварковая модель элементарных частиц. Кварки и их основные свойства, цвет, массы кварков и массовые формулы. Тяжелые b- и t-кварки. Электромагнитные и слабые взаимодействия в рамках кварковой модели, оценки вероятностей переходов. Правила Окубо-Цвейга. Глюоны.

Динамика сильных и электромагнитных взаимодействий

p N- и p K-рассеяние: данные опыта, фазовый анализ, резонансы. Дисперсионные соотношения. Уравнение Чу-Лоу, уравнения N/D-метода. Фоторождение p -мезонов и резонансов на нуклонах. Данные опыта о фоторождении. Векторная доминантность. Рождение адронных резонансов в e+-

е--встречных пучках. Проверка унитарной симметрии, $w - j$ -смешивание. Величина отношения R , область вблизи I/u и новые тяжелые кварки. Дуальность между адронами и кварками в полном сечении e^+e^- -аннигиляции в адроны.

Данные опыта о рождении частиц в pN и NN -столкновениях. Дифракционный и мультипериферический механизм рождения. Полусные члены в амплитуде рождения. Определение характеристик $p-p$ -взаимодействия методом Чу-Лоу.

Рассеяние электронов на нуклонах и электромагнитные форм-факторы нуклонов. Экспериментальные данные, формула Розенблюта, дисперсионные соотношения для форм-факторов. Глубоконеупругое рассеяние. Партонная модель, масштабная инвариантность.

Токи в физике элементарных частиц: коммутационные соотношения для токов, сохраняющиеся токи, электромагнитные и слабые токи, алгебры токов $SU(2) \times SU(3)$ и $SU(3) \times SU(3)$. Векторная доминантность в электромагнитных взаимодействиях. Частичное сохранение аксиального тока, приближение мягких пионов, правило сумм Адлера-Вайсбергера. Аномальные тождества Уорда.

Квантовая хромодинамика: отклонения от масштабной инвариантности в процессах глубоконеупругого рассеяния электронов и нейтрино на адронах, в e^+e^- -аннигиляции в адроны. Дуальность, метод правил сумм в квантовой хромодинамике, понятие о вакуумных конденсатах.

Слабые взаимодействия

Универсальное $V-A$ -взаимодействие. Токи с $D \neq 0$, угол Кабиббо. Сохранение странности в нейтральных токах, гипотеза симметрии лептонных и кварковых дублетов. Промежуточные бозоны. Введение чарма, механизм GIM. Модель Глэшоу-Салама-Вайнберга, угол Вайнберга. Нейтральные токи.

Следствия универсального $V-A$ взаимодействия при низких энергиях. Октетная схема Кабиббо. ne -рассеяние и m -распад. b -распад и лептонные распады адронов, двойной b -распад двухнейтринного типа. Процессы m -захвата.

Нелептонные распады адронов. Правило $DT=1/2$ и его обобщение. Сохранение векторного тока, гипотеза PCAC. Соотношение Гольдбергера-Треймана.

Распады нейтральных K -мезонов и нарушение CP -инвариантности. Феноменология распадов K -мезонов: нелептонные, лептонные распады. Несохранение CP и T в распадах нейтральных каонов. Интерференционные эффекты в распадах K_0 -мезонов.

Физика нейтрино. Взаимодействие нейтрино с нуклонами и ядрами. Три типа нейтрино. Масса нейтрино. Гипотеза нейтринных осцилляций. Нейтринные эксперименты на ускорителях, реакторах, детектирование солнечных нейтрино и нейтрино от взрывов сверхновых. Безнейтринный двойной b -распад ядер.

Слабые взаимодействия при высоких энергиях. Нейтринные реакции. Их описание в партонной модели, приближенная масштабная инвариантность.

Поиски выхода за рамки стандартной модели: понятия о суперсимметрии, супергравитации, теории суперструн.

Сильные взаимодействия при высоких энергиях

Обзор экспериментальных данных о рождении и рассеянии частиц при высоких энергиях, поведение полных сечений, дифференциальных сечений, процессы с перезарядкой. Инклюзивные сечения рождения, спектры, множественность. Приближенная масштабная инвариантность.

Строгие ограничения на поведение амплитуд рассеяния при высоких энергиях. Ограничение Фруассара, теорема Померанчука.

Дифракционные явления при высоких энергиях. Полюса Редже и резонансы. Реджевская асимптотика и мультипериферические процессы. Померон. Эйкональное приближение и модель квазипотенциала. Реджеонная модель для инклюзивных процессов.

Процессы с большими P^{\wedge} . Кварковый счет. Применения кварковой модели. Основные представления квантовой хромодинамики.

Тема 5. Ядерная физика(для специалистов-экспериментаторов по физике атомного ядра)

Взаимодействие ядерных излучений с веществом

Прохождение заряженных частиц через вещество. Ионизационные потери и их флуктуации. Однократное и многократное рассеяние. Взаимодействие электронов и фотонов с веществом. Излучение Вавилова-Черенкова.

Резонансное рассеяние гамма-лучей. Эффект Мёссбауэра.

Взаимодействие нейтронов с веществом. Замедление нейтронов. Ультрахолодные нейтроны.

Физика атомного ядра

Общие свойства ядерного вещества. Основные характеристики ядер: плотность, заряд, спины ядер, четность, спектры возбуждения, ядерная нестабильность. Свойства ядерных сил, нуклон-нуклонное взаимодействие. Ядерные оболочки. Энергия связи ядер. Изотопический спин. Аналоговые состояния. Гиперядра и барионные резонансы в ядрах.

Модели ядра. Капельная модель ядра. Модель ферми-газа. Одночастичная оболочечная модель. Средний ядерный потенциал. Спин-орбитальная связь. Остаточное взаимодействие. Обобщенная модель ядра. Ротационные и вибрационные уровни. Коллективные эффекты в ядрах. Гигантские резонансы. Зарядово-обменные резонансы. Правила отбора для электромагнитных и бета-переходов. Квазичастичная модель ядра, парные корреляции сверхпроводящего типа. Плотность низколежащих состояний в ядрах.

Бета-распад. Элементарная теория бета-распада. Правила отбора и форма бета-спектра, корреляционные характеристики. Разрешенные и запрещенные бета-переходы. Электронный захват. Нарушение четности в слабых взаимодействиях. Бета-распад нейтрона. Двойной двухнейтринный и безнейтринный бета-распад.

Испускание ядрами протонов, альфа-распад, деление, кластерные распады ядер. Запаздывающие процессы распада ядер. Нарушение четности при делении. Спонтанно делящиеся изомеры. Трансурановые и сверхтяжелые элементы.

Взаимодействие ядер с электромагнитным излучением. Мультипольные переходы и правила отбора для гамма-излучения. Внутренняя конверсия.

Фотоядерные реакции. Кулоновское возбуждение ядер. Гигантские мультипольные резонансы.

Ядерные реакции

Основы теории ядерных реакций. Законы сохранения. Принцип детального равновесия. Каналы реакции. Матрицы рассеяния. Оптическая модель взаимодействия нуклонов с ядрами.

Реакции с медленными нейтронами. Резонансный захват нейтронов. Формула Брейта-Вигнера. Рассеяние нейтронов ядрами. Рассеяние нейтронов кристаллами. Отражение и поляризация нейтронов. Дифракционное рассеяние. Нейтронная спектроскопия. Ультрахолодные нейтроны.

Прямые ядерные реакции. Неупругое рассеяние. Реакции передачи. Ядерные реакции перезарядки. Зарядовообменные резонансы.

Исследование ядра с помощью быстрых электронов, мезонов, протонов. Мезоатомы. Образование и свойства гиперядер. Кварки в ядрах.

Ядерная астрофизика

Физика элементарных частиц и космология. Ранняя Вселенная.

Происхождение легчайших элементов, барионная асимметрия Вселенной и проблема стабильности протона. Нуклеосинтез элементов в звездах. Основные ядерные реакции - источники энергии Солнца. Ядерные реакции в звездах в процессе эволюции. Модели звезд и эволюция звезд до взрыва сверхновой.

Природа сверхновых. Механизм взрыва сверхновой. Роль нейтрино в коллапсе сверхновых. Образование нуклидов в S- и R-процессах. Происхождение средних и тяжелых элементов. Космохронология.

Нейтринная астрофизика. Солнечные нейтрино. Современные детекторы солнечных нейтрино, проблема дефицита солнечных нейтрино, масса нейтрино и гипотеза нейтринных осцилляций. Наблюдение нейтрино от сверхновых. Поиски темной материи во Вселенной.

Физика элементарных частиц и их взаимодействий

Массы и квантовые числа элементарных частиц. Правила отбора для слабых, электромагнитных, сильных распадов.

Изотопические свойства сильных взаимодействий. SU(3)-симметрия сильных взаимодействий. Массовые формулы. Модель кварков.

NN- и p N-рассеяние. Фазовый анализ. Рассеяние электронов на нуклонах и ядрах. Электромагнитные формфакторы нуклонов и ядер.

Рассеяние быстрых нуклонов на ядрах. Теория Глаубера.

Слабое взаимодействие. Модель Вайнберга-Глэшоу-Салама. Нейтральные токи. Сохранение векторного тока, гипотеза частичного сохранения аксиально-векторного тока и их следствия. Наблюдение W- и Z-бозонов.

Физика нейтрино. Дираковское и майорановское нейтрино. Масса нейтрино. Гипотеза нейтринных осцилляций. Процессы двойного двух-нейтринного и безнейтринного бета-распада ядер.

Глубоконеупругие процессы. Партоново-кварковая структура адронов. Основные положения квантовой хромодинамики.

Тема 6. Элементарные частицы (для специалистов-экспериментаторов по физике атомного ядра).

Сильные взаимодействия

Квантовые числа элементарных частиц и резонансов.

Дискретные симметрии. Пространственное отражение, зарядовое сопряжение, обращение времени, СРТ-теорема.

Свойства внутренней симметрии. Изотопическая инвариантность. Зарядовая симметрия и G-четность. Схема Гелл-Манна-Нишиджимы. Унитарная симметрия и классификация частиц и резонансов по мультиплетам. Массовая формула Гелл-Манна-Окубо. Модель кварков. Квантовая хромодинамика.

Столкновения элементарных частиц. Нуклон-нуклонные столкновения при малых энергиях. Дейтрон. Упругое рассеяние П- и К-мезонов и нуклонов на нуклонах. Поляризационные явления. Неупругие процессы. Образование резонансных состояний в процессах столкновения. Формула Брейта-Вигнера. Общие свойства рассеяния при высоких энергиях.

Основные представления теории комплексных моментов. Теорема Померанчука.

Инклюзивные процессы. Процессы на встречных протон-протонных и протон-антипротонных пучках.

Электромагнитные взаимодействия

Принцип минимальности электромагнитного взаимодействия. Правила отбора по изотопическому спину. Процессы фоторождения и электророждения.

Рассеяние электронов и мю-мезонов нуклонами и ядрами. Электромагнитные формфакторы. Магнитные моменты элементарных частиц.

Проверка применимости квантовой электродинамики при высоких энергиях.

Мезоатомы.

Процессы на встречных e^-e^- и e^+e^+ -пучках.

Слабые взаимодействия

Бета-распад. Форма спектров. Корреляционные эксперименты в бета-распаде. Бета-распад нейтрона. К-захват. Мю-захват. Разрешенные и запрещенные переходы. Правила отбора Ферми и Гамова-Теллера. Несохранение пространственной четности в слабых взаимодействиях.

Универсальная теория слабых взаимодействий. Гипотеза о сохранении векторного тока. Двухкомпонентное нейтрино. Электронное, мюонное и тау-нейтрино. Сохранение лептонного заряда.

Распады с изменением странности. Правила $T=1/2$ и $DQ = DS$.

Унитарная симметрия в слабых взаимодействиях и угол Кабиббо.

Физика K_0 -мезонов. Интерференционные явления с нарушением CP-инвариантности в распадах K_0 -мезонов.

Нейтринные эксперименты на ускорителях при высоких и низких энергиях, реакторах, детектирование солнечных, атмосферных нейтрино и нейтрино от взрывов сверхновых, эксперименты по поискам нейтринных осцилляций.

Модель Глэшоу-Салама-Вайнберга и нейтральные токи в слабых взаимодействиях. Механизм Хиггса и массы частиц. Наблюдение Z- и W-бозонов в экспериментах на ускорителях.

Физика атомного ядра

Ядерные силы и общие свойства ядерного вещества. Энергия связи.

Модели ядра. Одночастичная оболочечная модель. Обобщенная модель ядра. Ротационные и вибрационные уровни. Модель ферми-газа. Квазичастичная модель ядра. Квазичастичные и низколежащие возбужденные состояния ядер.

Взаимодействия лептонов и адронов высокой энергии с ядрами. Электромагнитные формфакторы ядер. Теория Глаубера для взаимодействий адронов с ядрами.

Фотоядерные процессы. Гигантские мультипольные резонансы. Реакции перезарядки. Бета-распад ядер. Аналоговый и гамов-теллеровский резонансы.

Особенности рождения пионов и каонов при взаимодействии протонов с ядрами. Гиперядра. Пи- и К-мезоатомы.

Тема 7. Методика экспериментальных исследований (для специалистов-экспериментаторов по физике ядра и элементарных частиц)

Методы получения

Ускорители заряженных частиц. Линейные ускорители. Циклические ускорители. Принцип автофазировки. Жесткая фокусировка. Накопительные кольца и ускорители на встречных пучках. Коллективный метод ускорения. Методы фокусировки пучков и сепарация частиц.

Ядерные реакторы и их типы. Получение тепловых и ультрахолодных нейтронов.

Детекторы элементарных частиц

Газоразрядные детекторы. Счетчики Гейгера-Троста, пропорциональные счетчики, ионизационные камеры. Сцинтилляционные счетчики.

Черенковские счетчики. Полупроводниковые счетчики.

Трековые детекторы с пленочным съемом информации. Камера Вильсона, пузырьковые камеры, искровые и стримерные камеры. Метод ядерных фотоэмульсий.

Беспленочные камеры. Пропорциональные и дрейфовые камеры. Годоскопические системы из сцинтилляционных и черенковских счетчиков.

Методы измерений и математической обработки данных

Методы спектрометрических измерений. Магнитные спектрометры. Спектрометрические тракты измерений с полупроводниковыми и сцинтилляционными счетчиками с выводом данных на ЭВМ. Методы изображения многомерных спектров.

Дозиметрические измерения. Допустимые потоки излучений. Способы защиты.

Методы автоматической обработки фотографий трековых приборов. Механико-оптические и электронные системы сканирования с выводом данных на ЭВМ.

Физические установки с автоматическим выводом данных на ЭВМ. Типы накопительных устройств. Использование разных классов ЭВМ для приема, предварительной обработки и накопления информации, а также для контроля и управления.

Методы обработки экспериментальных данных

Основные понятия математической статистики. Теория статистических оценок и проверки гипотез. Метод максимального правдоподобия. Планирование эксперимента.

Системы математических программ обработки и анализа физических результатов. Геометрическая реконструкция пучков частиц. Система распознавания определенного класса событий. Анализ физических результатов.

Тема 8. Основные сведения по экспериментальной ядерной физике (по технической отрасли науки).

Основные свойства элементарных частиц

Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях; уравнения движения.

Взаимодействие заряженных частиц с веществом. Ионизационные потери и пробег тяжелых заряженных частиц; прохождение бета-частиц через вещество. Взаимодействие нейтральных частиц с веществом.

Элементарные частицы и ядра. Основные характеристики ядер. Физические свойства частиц: заряды, масса, спин, четность, изоспин. Времена жизни частиц.

Методы регистрации элементарных частиц

Методы регистрации заряженных и нейтральных частиц.

Газонаполненные счетчики и их типы. Ионизационные камеры. Газонаполненные камеры с оптическим методом съема информации. Искровые и стримерные камеры.

Газонаполненные камеры с электронными методами съема информации. Многопроволочные искровые, пропорциональные и дрейфовые камеры.

Сцинтилляционные и черенковские детекторы. Фотоумножители.

Полупроводниковые детекторы. Позиционно-чувствительные детекторы.

Регистрация частиц с помощью пузырьковых камер.

Статистическая обработка результатов измерений

Основы теории вероятностей. Случайные величины. Основные законы распределения случайных величин: биномиальное распределение Пуассона, распределение Гаусса.

Основы теории ошибок измерений.

Основы теории просчетов регистрирующих систем.

Тема 9. Общая радиоэлектроника и вычислительная техника (по технической отрасли науки).

Методы расчета электрических цепей и схем

Анализ линейных электрических цепей. Эквивалентные схемы. Законы Кирхгофа, теорема об эквивалентном генераторе, метод узловых потенциалов, метод контурных токов. Четырехполюсники.

Анализ электрических сигналов. Дельта-функция и ступенчатая функция. Преобразование Фурье.

Передача сигналов через линейные системы. Дифференциальные уравнения, описывающие процессы в электрических цепях. Импульсная характеристика линейной системы. Интеграл суперпозиции. Формула свертывания. Передаточная функция. Переходные процессы в длинных цепях.

Основы операционного исчисления. Преобразование Лапласа.

Основы алгебры логики. Составление логических электронных схем.

Полупроводниковые приборы

Физические принципы работы полупроводниковых приборов. Их классификация.

Полупроводниковые диоды. Принцип действия, основные характеристики, параметры и режимы работы. Разновидности диодов: импульсные диоды, диоды с накоплением заряда, туннельные диоды, стабилитроны, светоизлучающие диоды и др. Примеры применения.

Биполярные транзисторы. Принцип действия, основные характеристики, параметры и режимы работы. Схемы включения, эквивалентные схемы, работа в линейном и ключевом режимах. Разновидности триодов. Примеры их применения.

Полевые транзисторы. Принцип действия, разновидности полевых транзисторов. Основные характеристики, параметры и режимы работы. Примеры применения.

Другие разновидности полупроводниковых приборов: динистор, тиристор, однопереходный транзистор и др. Их основные характеристики и параметры. Примеры применения.

Интегральные схемы

Гибридные и монолитные интегральные схемы. Монолитные интегральные схемы на основе биполярных и МДП-транзисторов, их особенности. Технология изготовления интегральных схем различных типов.

Аналоговые интегральные схемы: дифференциальные и операционные усилители, регуляторы напряжения, преобразователи код-аналог и аналог-код. Их основные параметры, примеры применения.

Логические интегральные схемы. Их классификация по схемотехническому исполнению. Основные параметры. Быстродействие схем. Система логических элементов. Типы триггеров. Примеры применения.

Интегральные схемы со средней степенью интеграции: счетчики, регистры, коммутаторы, дешифраторы, сумматоры и др.

Интегральные схемы с большой степенью интеграции: сложные логические устройства, запоминающие устройства, микропроцессоры и др. Пути дальнейшего повышения степени интеграции.

Электронные измерительные приборы

Классификация измерительных приборов; их классы точности.

Электронно-лучевые осциллографы. Их основные блоки. Скоростные осциллографы, стробоскопические осциллографы, осциллографы на запоминающих трубках.

Измерительные генераторы, их типы и характеристики.

Цифровые приборы для измерения аналоговых величин (напряжения, тока, частоты и др.). Их принцип действия и устройство.

Основные сведения по электронным цифровым вычислительным машинам

Принципы построения и работы электронных цифровых вычислительных машин. Процессоры. Их состав и функции.

Запоминающие устройства. Их функции. Оперативные и внешние запоминающие устройства. Устройства ввода и вывода информации.

Непосредственная связь ЭВМ с измерительным оборудованием.

Устройства для оперативного взаимодействия оператора и ЭВМ. Дисплеи.

Большие, малые и микро-ЭВМ. Состав и характеристики ЭВМ.

Основы программного обеспечения ЭВМ. Операционные системы. Их функции. Машинно-ориентированные и проблемно-ориентированные языки программирования.

Надежность радиоэлектронных устройств

Основные понятия теории надежности.

Причины отказов аппаратуры.

Оценка надежности разрабатываемых устройств.

Методы повышения надежности.

Тема 10. Приборы ядерной электроники (по технической отрасли науки).

Задачи электронной аппаратуры в экспериментальной ядерной физике

Обобщенная блок-схема ядерно-физического эксперимента.

Специфика экспериментов в области физики атомного ядра (низкие энергии) и элементарных частиц (высокие энергии).

Логическая и спектрометрическая информация, получаемая с детекторов.

Количество информации, получаемой в экспериментах различных типов.

Методы предварительного отбора поступающей информации.

Устройства для измерения интервалов времени

Характеристика детекторов с точки зрения получения временной информации.

Разброс импульсов по времени возникновения. Схемы временной привязки.

Способы измерения интервалов времени. Точность, разрешающая способность и диапазон измерения.

Устройства для измерения амплитуд импульсов

Характеристики детекторов с точки зрения получения амплитудной информации.

Шумы и методы борьбы с ними.

Спектрометрические усилители, их характеристики. Формирование импульсов для получения оптимального отношения сигнал/шум. Борьба с наложениями импульсов.

Способы измерения амплитуд импульсов. Методы повышения точности и скорости преобразования. Методы стабилизации спектрометрического тракта.

Амплитудные анализаторы, их характеристики.

Логические схемы регистрации и отбора данных

Счетные схемы. Типы схем, их быстродействие.

Схемы совпадений. Принцип работы, кратность совпадений, разрешающее время, эффективность. Случайные совпадения. Антисовпадения, их эффективность.

Другие типы логических схем: формирователи, линии задержки, дискриминаторы, схемы пропускания, разветвители и др. Их характеристики и примеры применения.

Быстрые процессоры для предварительного отбора событий.

Электронные устройства для регистрации координат частиц

Годоскопические системы и методы регистрации информации в них.

Электронные методы считывания информации с искровых камер со сплошными электродами (телевизионный, акустический и пр.).

Методы считывания информации с искровых камер с проволочными электродами, с пропорциональных камер и с дрейфовых камер.

Тема 11. Астрофизика высоких энергий

Энергетический спектр первичного космического излучения и его основные особенности (форма спектра, неоднородности спектра и их возможные причины, полная энергия космического излучения, поступающего на Землю).

Ядерный состав первичных космических лучей и его особенности. Распространенность элементов во Вселенной и в космических лучах. Интерпретация различий.

Электроны, позитроны, фотоны и антипротоны в составе первичного космического излучения при разных энергиях.

Геомагнитные эффекты, их использование для определения энергетического спектра и заряда первичных космических частиц.

Свойства космического излучения вблизи поверхности земли и под землей (состав, интенсивность). Методика исследования космических частиц разных энергий (на спутниках Земли, в атмосфере, на горах и под землей).

Широкие атмосферные ливни и их свойства. Методы регистрации широких атмосферных ливней (в том числе по радио- и черенковскому излучению).

Основные источники космического излучения. Механизмы ускорения космических частиц.

Гамма-астрономия высоких и сверхвысоких энергий. Поиски гамма-излучения высокой энергии от остатков сверхновых звезд.

Большой Взрыв. Красное смещение. Реликтовое излучение, его энергетический спектр, происхождение.

Темная материя во Вселенной и ее возможная природа.

Регистрация потоков нейтрино низких энергий от вспышки сверхновой 8К 1987А на различных установках в мире.

Проблема верхней границы энергетического спектра космических протонов и ядер. Экспериментальные данные.

Тема 12 .Экспериментальная техника для исследования процессов, протекающих при высокой энергии

Методы ускорения частиц. Линейные и циклические ускорители: циклотрон, фазотрон, синхрофазотрон. Мезонные фабрики.

Коллайдеры, накопительные кольца. Устройство. Достоинства. Примеры действующих и проектируемых коллайдеров.

Крупнейшие действующие и проектируемые ускорители заряженных частиц.

Космические лучи как источник сверхвысоких энергий.

Метод рентгеноэмульсионных камер в космических лучах.

Детекторы частиц. Импульсные ионизационные и пропорциональные камеры, дрейфовые камеры, сцинтилляционные счетчики, микростриповые и падовые детекторы, пузырьковые камеры, черенковские счетчики, кольцевой черенковский спектрометр. Искровые и стриммерные камеры.

Методы идентификации частиц.

Методы измерения энергии: магнитные спектрометры, ионизационные калориметры, детекторы переходного излучения.

Основные требования, предъявляемые к трековым детекторам и калориметрам: геометрический фактор, пространственное и энергетическое разрешение.

Комплексные установки на ускорителях и в космических лучах. Примеры действующих и проектируемых установок.

Тема 13. Кинематика при анализе процессов взаимодействия и распада частиц

Основные кинематические характеристики: энергия, импульс (поперечный и продольный, четырехимпульс). Манделштамовские переменные: s , t , u , фейнмановская переменная x , бьеркеновские переменные, быстрота и псевдобыстрота.

Физические системы координат: система центра масс, лабораторная система, симметричная система и др. Связь характеристик частиц в этих системах: преобразования Лоренца. Инварианты лоренцевских преобразований.

Внутренние квантовые числа: спин, изотопспин, лептонный и барионный заряды, странность, чарм, бьюти, топ - и законы их сохранения. Дискретная симметрия. Законы сохранения.

Дифференциальное и полное сечение реакций, матричный элемент, фазовый объем.

Особенности кинематики распада на две, три или более частиц.

Тема 14. Общие свойства фундаментальных взаимодействий

Электрослабые, сильные и гравитационные взаимодействия. Бегущие константы взаимодействий. Характерные эффективные сечения и другие особенности разных типов взаимодействий. Фундаментальные частицы и их роль в процессах взаимодействия.

Универсальный характер взаимодействий и Великое объединение.

Открытие позитрона, мюона, ρ -мезона, странных и очарованных частиц.

Фермионы (лептоны, кварки) и бозоны (глюоны, фотоны, W^{+-} , W^{--} , Z^0 -бозоны, гипотетический бозон Хиггса, мезоны и резонансы). Распады частиц под влиянием сильных, электромагнитных и слабых сил.

Открытие W^{+-} , W^{--} , Z^0 -бозонов. Открытие t -кварка.

Адроны (барионы, мезоны, резонансы) и ядра. Кварковая структура адронов.

Гипотеза суперсимметричных частиц. Великое объединение. Распад протона.

CP-нарушение и его экспериментальные проявления. CPT-теорема.

Распады нейтральных каонов. Углы смешивания Кабибо. Матрица Кабаяши-Маскавы. Осцилляции странности. Регенерация каонов.

Тема 15. Структура адронов

Магнитные моменты и g-факторы частиц.

Партонная структура нуклона из экспериментов по глубоконеупругому рассеянию $e_p, \mu_p, g(p, p)$ (53 bytes), p, p : кварки, их спин и электрические заряды.

Валентные и морские кварки и глюоны и их структурные функции в адронах и ядрах. Методы их измерения. Бьеркеновский скейлинг. Квантовое число "цвет".

Свойства кварков и глюонов из экспериментов по электрон-позитронной аннигиляции в адроны: масса кварков, их спин и заряд, экспериментальное доказательство существования "цветного" заряда.

Проблема невылетания цвета (конфайнмент) и адронизация кварков.

Рассеяние электронов и нейтрино на нуклонах. Формулы Резерфорда, Мотта и Дирака.

Кварконий. Потенциальное описание цветовых взаимодействий. Основные положения квантовой хромодинамики. Механизм Дрелла-Яна.

Тема 16. Свойства лептонов

Электроны, мюоны, нейтрино (вейлевские, дираковские, майорана). Их заряды, массы, лептонные числа, спиральность, нарушение четности. Поколения лептонов и кварков и их возможное число. Методы определения (космологические и ускорительные).

Слабые взаимодействия при высоких энергиях. Универсальный характер слабых взаимодействий. Взаимодействия нейтрино с кварками. Заряженные и нейтральные токи. Сечения слабых взаимодействий.

Осцилляции нейтральных каонов и гипотеза нейтринных осцилляций. Осцилляции нейтрино в плотном веществе (эффект Михеева-Смирнова-Вольфенштейна).

Солнечные нейтрино и их происхождение. Эксперименты Девиса и их результаты. Галлиевые детекторы. Примеры более поздних экспериментов по изучению потоков солнечных нейтрино и осцилляций (Камиоканде и др.).

Тема 17. Электромагнитные взаимодействия *

Тормозное и синхротронное излучение. Излучение Вавилова-Черенкова. Переходное излучение. Рождение электрон-позитронных пар фотонами. Энергетические зависимости сечений и потерь энергии.

Особенности прохождения заряженных частиц через вещество. Ионизационные потери энергии. Формула Бете-Гайтлера. Радиационная длина и критическая энергия.

Эффект Ландау-Померанчука-Мигдала.

Электронно-фотонный каскад. Основные результаты теории (число частиц в максимуме каскада, положение максимума, зависимость от энергии и атомного номера).

Каскад в атмосфере, радиус ливня, состав частиц. Связь с энергией первичной частицы.

Черенковское и радиоизлучение ливня. Примеры установок для изучения широких атмосферных ливней. Действующие и проектируемые установки для регистрации космических лучей предельно высоких энергий (ШАЛ-1000 и др.).

Обнаружение "излома" в энергетическом спектре первичного космического излучения при энергии $5 \cdot 10^6$ ГэВ и его современное объяснение в

диффузионной модели. Возможность галактической и внегалактической протонной астрономии при предельно высоких энергиях космических частиц (109 - 1011 ГэВ).

Тема 18. Стандартная Модель

Понятие о калибровочной природе сильных и электрослабых взаимодействий. Основные положения Стандартной Модели.

Экспериментальное обнаружение W^{+-} , W^{--} и Z^0 -бозонов.

Роль гипотетического скалярного Хиггс-бозона в теории. Возможные эксперименты для его обнаружения в e^+e^- и pp -столкновениях.

Тема 19. Сильные взаимодействия

Поперечные сечения процессов взаимодействия. Полные, упругие и неупругие поперечные сечения. Экспериментальное определение поперечных сечений разных процессов. Оптическая теорема. Предел Фруассара.

Зависимость поперечных сечений от природы и энергии соударяющихся частиц (экспериментальные данные и теоретические предсказания). Рассеяние частиц на ядрах. Формфакторы.

Множественное рождение частиц при высоких энергиях - универсальный процесс. Эксклюзивный, инклюзивный и эвентуальный способы анализа процессов. Основные характеристики процесса: множественность, импульсные и угловые распределения.

Основные механизмы адронных взаимодействий (дифракционные процессы, пионизация и фрагментация; кластеризация, эффект лидирования и относительное постоянство поперечного импульса). Струи. Асимметрия разлета вторичных частиц в системе центра масс столкновения мезонов и нуклонов. Фейнмановский скейлинг.

Открытие ядерно-каскадного процесса в космических лучах. Особенности адронных взаимодействий при сверхвысоких энергиях.

Взаимодействие адронов с ядрами и ядер с ядрами. Основные характеристики. Зависимость основных параметров столкновения от атомного номера. Способы описания столкновений с ядрами: глауберовский подход, ядерно-каскадные модели, струнные модели, модель независимых столкновений.

Кварк-глюонная плазма и ее проявления.

Принципы построения моделей для описания процессов множественного рождения частиц в мягких процессах (статистические, гидродинамические модели, мультипериферические, кварк-глюонные и др.). Основные предсказания моделей.

III. Критерии оценивания

Критерии и показатели оценивания ответа на экзамене			
Неудовлетворительно	Удовлетворительно	Хорошо	Отлично
Фрагментарные	Неполные знания	Сформированные,	Сформированные

знания в области физики атомных ядер и элементарных частиц, физики высоких энергий	в области физики атомных ядер и элементарных частиц, физики высоких энергий	но содержащие отдельные пробелы знания в области физики атомных ядер и элементарных частиц, физики высоких энергий	и систематические знания в области физики атомных ядер и элементарных частиц, физики высоких энергий
--	---	--	--

IV. Рекомендуемая основная литература

1. Автоматическая обработка данных пузырьковых и искровых камер: Сб. статей. М.: Атомиздат, 1971.
2. Айзенберг И., Грайнер В. Микроскопическая теория ядра. М.: Атомиздат, 1976.
3. Альфа-, бета-, гамма-спектроскопия / Под ред. К. Зигбана. М.: Атомиздат, 1969.
4. Андреев И.В. Хромодинамика и жесткие процессы при высоких энергиях. М.: Наука, 1981.
5. Ахиезер А.И., Берестецкий В.Б. Квантовая электродинамика. М.: Наука, 1969.
6. Ахиезер А.И., Шульга Н.В. Электродинамика высоких энергий в веществе. М.: Наука, 1993.
7. Базь А.И., Зельдович Я.Б., Переломов А.М. Рассеяние, реакции и распады в нерелятивистской квантовой механике. М.: Наука, 1971.
8. Беляев В.Б. Лекции по теории малочастичных систем. М.: Энергоатомиздат, 1986.
9. Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Питаевский А.Н. Квантовая электродинамика. М.: Наука, 1980.
10. Берштейн Д. Элементарные частицы и их токи. М.: Мир, 1970.
11. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высш. школа, 1973.
12. Блейзо Ж.П., Рипка Ж. Квантовая теория конечных систем. Киев: Феникс, 1998.
13. Блин-Стойл Р. Фундаментальные взаимодействия и атомное ядро. Гл. 3, 4. М.: Мир, 1976.
14. Боголюбов Н.Н., Ширков Д.В. Введение в теорию квантованных полей. М.: Наука, 1976.
15. Боголюбов Н.Н., Ширков Д.В. Квантовые поля. М.: Наука, 1980.
16. Бони Ф. Введение в физику ядра, адронов и элементарных частиц. М.: Мир, 1999.
17. Бор О., Моттelson Б. Структура атомного ядра. Т. 1, 2. М.: Мир, 1971, 1977.
18. Боум Ф., Фогель П. Физика массивных нейтрино. М.: Мир, 1990.
19. Букреев И.Н., Мансуров Б.М., Горячев В.И. Микроэлектронные схемы цифровых устройств. М.: Сов. радио, 1975.

20. Бьеркен Д., Дрелл С. Релятивистская квантовая теория. Т. 1, 2. М.: Наука, 1978.
21. Вайнберг С. УФН. 1976. Т. 118. С. 505.
22. Виноградов В.И. Дискретные информационные системы в научных исследованиях. М.: Атомиздат, 1976.
23. Воробьев А.А., Руденко Н.С., Сметанин В.И. Техника искровых камер. М.: Атомиздат, 1978.
24. Воробьев А.А., Руденко Н.С., Сметанин В.И. Техника искровых камер. М.: Атомиздат, 1978.
25. Газиорович С. Физика элементарных частиц. М.: Наука, 1969.
26. Гольданский В.И., Куценко А.В., Подгорецкий М.И. Статистика отсчетов при регистрации ядерных частиц. М.: Физматгиз, 1959.
27. Гольданский В.И., Никитин Ю.П., Розенталь И.Л. Кинематические методы в физике высоких энергий. М.: Наука, 1987.
28. Гришин В.Г. Кварки и адроны во взаимодействиях частиц высоких энергий. М.: Энергоатомиздат, 1988.
29. Гуревич И.И., Тарасов Л.В. Физика нейтронов низких энергий. М.: Наука, 1965.
30. Далитц Р. Странные частицы и сильные взаимодействия. М.: Атомиздат, 1966.
31. Ермолов П.Ф. Лептонные взаимодействия при высоких энергиях. М.: Изд-во МГУ, 1987.
32. Искровая камера / М.И. Дайсон, Б.А. Долгошеин и др. М.: Атомиздат, 1967.
33. Кадменский С.Г., Фурман В.И. Альфа-распад и родственные ядерные реакции. М.: Энергоатомиздат, 1985.
34. Калашникова В.И., Козадаев М.С. Детекторы элементарных частиц. М.: Наука, 1966.
35. Калибровочные поля. Сб. статей: М.: Мир, 1977 [обзор Е. Аберс и В. Ли].
36. Калибровочные поля: Сб. статей. М.: Мир, 1977.
37. Ким Е. Мезонные атомы и ядерная структура. М.: Атомиздат, 1975.
38. Клоуз Ф. Кварки и партоны. М.: Мир, 1982.
39. Комар Е.Г. Основы ускорительной техники. М.: Атомиздат, 1975.
40. Комминс Ю., Буксбаум Ф. Слабое взаимодействие лептонов и кварков. М.: Энергоатомиздат, 1987.
41. Кузнецов А.В., Полосьянц Б.А., Ступин Ю.В. Мини-ЭВМ в экспериментальной физике. М.: Атомиздат, 1975.
42. Куценко А.В., Полосьянц Б.А., Ступин Ю.В. Мини-ЭВМ в экспериментальной физике. М.: Атомиздат, 1975.
43. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. М.: Наука, 1974.
44. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. Гл. X-XII. М.: Наука, 1973.
45. Левин В.Е. Ядерная физика и ядерные реакторы. М.: Атомиздат, 1975.
46. Ли Ц., Ву Ц. Слабые взаимодействия. М.: Мир, 1968.
47. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Релятивистская квантовая теория. Ч. 2. Гл.14, 15. М.: Наука, 1971.
48. Мелешко Е.А. Интегральные схемы в наносекундной ядерной электронике. М.: Атомиздат, 1977.

49. Мигдал А.Б. Теория конечных ферми-систем и свойства атомных ядер. М.: Наука, 1983.
50. Мурзин В.С. Введение в физику космических лучей. 3-е изд. М.: Изд-во МГУ, 1988.
51. Мурзин В.С., Сарычева Л.И. Физика адронных процессов. М.: Энергоатомиздат, 1986.
52. Мухин К.Н. Введение в ядерную физику. М.: Атомиздат, 1965.
53. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. Т.1, 2. М.: Энергоатомиздат, 1993.
54. Нелипа Н.Ф. Физика элементарных частиц. М.: Высш. шк., 1977.
55. Нишиджима К. Фундаментальные частицы. М.: Мир, 1965.
56. Новожилов Ю.В. Введение в теорию элементарных частиц. Гл.8-16. М.: Наука, 1978.
57. Окунь Л.Б. Введение в физику элементарных частиц. М.: Наука, 1992.
58. Окунь Л.Б. Лептоны и кварки. М.: Наука, 1990.
59. Окунь Л.Б. Слабые взаимодействия элементарных частиц. М.: Физматгиз, 1963; Лептоны и кварки. М.: Наука, 1983.
60. Перкинс Д. Введение в физику высоких энергий. М.: Энергоатомиздат, 1991.
61. Пузырьковые камеры / Ю.А. Александров, Г.С. Ворожцев и др. М., 1963.
62. Ситенко А.Т., Тарковский В.К. Лекции по теории ядра. М.: Атомиздат, 1972.
63. Славнов А.А., Фаддеев Л.Д. Введение в теорию калибровочных полей. М.: Наука, 1978.
64. Соловьев В.Г. Теория атомного ядра. Ядерные модели. М.: Энергоиздат, 1981.
65. Соловьев В.Г. Теория сложных ядер. М.: Наука, 1971.
66. Статистические методы в экспериментальной физике: Сб. статей / Пер. под ред. А.А. Тяпкина. М.: Атомиздат, 1976.
67. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М.: Энергия, 1977.
68. Тейлор Дж. Теория рассеяния. М.: Мир, 1976.
69. Трейман С., Джаквив Р., Гросс Д. Лекции по алгебре токов. М.: Атомиздат, 1977.
70. Фейнман Р. Взаимодействие фотонов с адронами. М.: Мир, 1975.
71. Ферми Э. Лекции о П-мезонах и нуклонах.
72. Физика высоких энергий и теория элементарных частиц: Сб. статей / Под ред. Н.Н. Боголюбова. Киев: Наукова думка, 1967.
73. Физическая энциклопедия / Под ред. А.М. Прохорова. Т. 1 - 5. М.: Сов. энциклопедия; Большая российская энциклопедия, 1988 - 1998.
74. Христиансен Г.Б., Куликов Г.Б., Фомин Ю.А. Космическое излучение сверхвысоких энергий. М.: Наука, 1975.
75. Челлен Г. Физика элементарных частиц. Гл. 4, 5. М.: Наука, 1966.
76. Швебер С. Введение в релятивистскую квантовую теорию поля. М.: Изд-во иностр. лит., 1968.
77. Эриксон Т., Вайзе В. Пионы и ядра. М.: Наука, 1986.

78. Ядерная астрофизика: Сб. статей / Под ред. Ч. Барнса, Д. Клейтона, Д. Шрамма. М.: Мир, 1986.

V. Рекомендуемая дополнительная литература

1. Адлер С., Дашен Р. Алгебра токов. М.: Мир, 1970.
2. Берштейн Дж. Элементарные частицы и их токи. М.: Мир, 1970.
3. Боголюбов Н.Н., Логунов А.А., Тодоров И.Т. Основы аксиоматического подхода к квантовой теории поля. М.: Наука, 1969.
4. Боум Ф., Фогель П. Физика массивных нейтрино. М.: Мир, 1990.
5. Виноградов В.И. Дискретные информационные системы в научных исследованиях. М.: Атомиздат, 1976.
6. Газиорович С. Физика элементарных частиц. М.: Наука, 1969.
7. Гротц К., Клапдор-Клайнгротхаус Г.В. Слабое взаимодействие в физике ядра, частиц и астрофизике. М.: Мир, 1992.
8. Гротц К., Клапдор-Клайнгротхаус Г.В. Слабое взаимодействие в физике ядра, частиц и астрофизике. М.: Мир, 1992.
9. Гупта Н.Д., Гом С. Камера Вильсона и ее применение в физике. М.: Изд-во иностр. лит., 1976.
10. Заневский Ю.В. Проволочные детекторы элементарных частиц. М.: Атомиздат, 1978.
11. Зеленский Ю.В. Проволочные детекторы элементарных частиц. М.: Атомиздат, 1978.
12. Зрелов В.П. Излучение Вавилова-Черенкова и его применение в ядерной физике. М.: Атомиздат, 1968.
13. Ициксон К., Зюбер Ж.Б. Квантовая теория поля. Т. 1, 2. М.: Мир, 1984.
14. Ишханов Б.С., Капитонов К.М., Тутынь И.А. Нуклеосинтез во Вселенной. М.: Изд-во МГУ, 1999.
15. Кадышевский В.Г., Тавхелидзе А.Н. Квазипотенциальный метод // Проблемы теоретической физики: Сб. статей. М.: Наука, 1986.
16. Клапдор-Клайнгротхаус Г.В., Штаудт А. Неускорительная физика элементарных частиц. М.: Наука, 1997.
17. Клоуз Ф. Кварки и партоны. М.: Мир, 1982.
18. Комминс Ю., Буксбаум Ф. Слабое взаимодействие лептонов и кварков. М.: Энергоатомиздат, 1987.
19. Курочкин С.С., Мурин И.Д. Современная ядерная электроника. Т. 2: Цифровые информационные системы и устройства. М.: Атомиздат, 1975.
20. Ландау Л., Лифшиц Е. Квантовая механика. Ч. 1. Л.: ОГИЗ, 1948.
21. Лейн А. Теория ядра. М.: Атомиздат, 1967.
22. Лингвуд Дж. Принципы работы циклических ускорителей. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.
23. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Релятивистская теория. Т. 1, 2. М.: Наука, 1970.
24. Нгуен Ван Хью. Лекции по теории унитарной симметрии элементарных частиц. М.: Атомиздат, 1967.
25. Нелипа Н.Ф. Физика элементарных частиц. М.: Высшая школа, 1977.

26. Нишиджима К. Фундаментальные частицы. М.: Мир, 1965.
27. Пауэлл О., Фаулер П., Перкинс Д. Исследование элементарных частиц фотографическим методом. М.: Изд-во иностр. лит., 1962.
28. Полупроводниковые детекторы ядерных частиц и их применение / Ю.К. Азимов, А.И. Калинин и др. М.: Атомиздат, 1967.
29. Престон М. Физика ядра. М.: Мир, 1964
30. Рамон П. Теория поля. Современный вводный курс. М.: Мир, 1984.
31. Слабое взаимодействие: Сб. статей / Под ред. М.К. Гайнера, М. Николича. М.: Энергоатомиздат, 1984.
32. Современная ядерная электроника. Т. 1: Измерительные системы и устройства / И.С. Крашенинников, С.С. Курочкин, А.В. Матвеев, Е.И. Рехин. М.: Атомиздат, 1974.
33. Хайд Э., Перельман И., Сиборг Г. Деление ядер. М.: Атомиздат, 1969