

## 5. Разделы (темы) дисциплины, содержание и виды занятий

№ п/п	Раздел дисциплины	Лек-ции	Рефе-раты	Сам. работа
1	Стандартная модель физики частиц и астрофизики	4		6
2	Экспериментальные основания Стандартной модели	3		6
3	Процессы, сопровождающие прохождение частиц через вещество.	2		6
4	Принципы планирования эксперимента.	2		3
5	Методы детектирования частиц	2		5
6	Методы идентификации частиц	2		7
7	Характерные эксперименты в физике частиц и ядер. Ускорители, пучки частиц и ядер. Архитектура экспериментальных установок.	3		6
8	Исследовательские программы настоящего и ближайшего будущего.	2		6
	Представление и обсуждение рефератов		2	
	Итого	20	2	32

Содержание разделов дисциплины:

**1. Стандартная модель физики частиц и астрофизики.** 1.1 Соотношение теории и эксперимента.

1.2 Классификация физических теорий.

1.3 Типы взаимодействия частиц.

1.4 Стандартная Модель частиц, её экспериментальные и теоретические основания.

1.5 Кварковая модель.

1.6 Неполнота Стандартной Модели и возможности её расширения.

1.7 Эволюция вселенной. Модель Большого взрыва. Фазовые переходы в процессе эволюции вселенной. Общие проблемы астрофизики и физики частиц.

**2. Экспериментальные основания Стандартной модели.** 2.1 Систематика частиц. Экзотические состояния.

2.2 Кварконии и потенциал взаимодействия кварков.

2.3 Мягкие и жёсткие процессы столкновения частиц. Конфайнмент цветных кварков и глюонов.

2.4 Струйная топология жёстких процессов – свидетельство партонной структуры адронов.

2.5 Исследование взаимодействия тяжёлых ионов при высокой энергии. Поиск фазовых переходов в плотной ядерной материи.

2.6 Новые данные об адронной динамике по данным с коллайдеров Брукхейвенской лаборатории, Лаборатории им. Ферми и ЦЕРН.

**3. Процессы, сопровождающие прохождение частиц через вещество.**

3.1 Ионизация.

3.2 Электромагнитные и ядерные процессы.

3.3 Поглощение, многократное рассеяние и др.

3.4 Черенковское излучение.

3.5 Переходное излучение.

3.6 Каскадные процессы.

#### **4. Принципы планирования эксперимента**

- 4.1 Анализ состояния заданной проблемы и постановка задачи.
- 4.2 Анализ необходимой точности измерений.
- 4.3 Выбор методики и составление схемы аппаратуры.
- 4.4 Анализ систематических ошибок. Источники фона и способы его подавления.
- 4.5 Анализ конкурентоспособности выбранного решения проблемы.
- 4.6 Разработка математического обеспечения проекта.
- 4.7 Написание и защита проекта исследований.

#### **5. Методы детектирования частиц.**

- 5.1 Сцинтилляционные счётчики.
- 5.2 Полупроводниковые детекторы.
- 5.3 Пороговые и дифференциальные черенковские счётчики.
- 5.4 Детекторы переходного излучения.
- 5.5 Электромагнитные и адронные калориметры.
- 5.6 Пропорциональные, дрейфовые и время-проекционные камеры.
- 5.7 Камера с резистивными пластинами – прецизионный детектор времени.

#### **6. Методы идентификации частиц.**

- 6.1 Измерение ионизации и определение заряда частицы.
- 6.2 Идентификация методом (дельта – E – E).
- 6.3 Измерение скорости частицы черенковским счётчиком и методом времени пролёта.
- 6.4 Идентификация в магнитном спектрометре.

#### **7. Характерные эксперименты в физике частиц и ядер. Ускорители, пучки частиц и ядер. Архитектура экспериментальных установок.**

- 7.1 Характеристики внутренних и выведенных пучков ускорителей.
- 7.2 Методы формирования и транспортировки пучков.
- 7.3 Спектрометрия с помощью сцинтилляционных и полупроводниковых детекторов.
- 7.4 Эксперименты на фиксированных мишенях.
- 7.5 Особенности работы на внутренних мишенях циклического ускорителя.
- 7.6 Эксперименты на коллайдерах.
- 7.7 Системы триггера для отбора редких событий.

#### **8. Исследовательские программы настоящего и ближайшего будущего.**

- 8.1 Некоторые программы: природа спина адронов (поляризационные измерения), поиск экзотических состояний – глюоболов, пентакварков и др., исследование плотной и возбуждённой адронной материи (кварк-глюонная плазма и др.), физика нейтрино, поиск эффектов (частиц) за пределами стандартной модели.
- 8.2 Действующие ускорители и их характеристики.
- 8.3 Ускорители ближайшего будущего: НИКА (ОИЯИ), FAIR (Германия), ILC (Международный Линейный Коллайдер).

#### **Материалы, используемые при контроле знаний студентов**

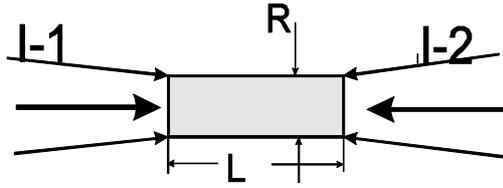
Во время опроса студентов кратко повторяется материал некоторых лекций, и решаются задачи. Ниже приводятся несколько характерных задачи.

1. Вычислить светимость цилиндрического объёма встречных протонных пучков с током  $I_1 = 0,5$  А и  $I_2 = 0,2$  А. Размеры цилиндра: радиус  $r = 0,2$  мм и длина  $l = 0,5$  м. Пучки пересекаются под углом, близким к нулю. Интенсивность пучков равномерная внутри цилиндра.

#### Решение.

Определение светимости  $L$  мишени или встречных пучков.

$$N_{\text{int}} = Fr_{\text{arg}} l \sigma; \quad N_{\text{int}} = L \sigma; \quad L = Fr_{\text{arg}} l.$$



Здесь  $N_{\text{int}}$  – число взаимодействий пучка с мишенью;  $I$  ток пучка;  $F = I/e$  – число частиц в пучке, падающих на мишень в единицу времени;  $e$  – заряд частиц пучка;  $\rho$  – плотность мишени или пучка (число ядер в единице объёма);  $l$  – толщина мишени;  $\sigma$  – сечение взаимодействия частиц пучка с частицами мишени.

Определим плотность частиц в пучке. Рассмотрим произвольный интервал времени  $\tau$ . За это время любое сечение пучка заметает цилиндр с длиной  $l = \tau \cdot v$ ,  $v$  – скорость частиц в пучке. Объём цилиндра есть:  $V = l \cdot \pi r^2$ . Число частиц в цилиндре  $n = I/e \cdot \tau$ . Получаем искомую плотность частиц в пучке. (Один из пучков считаем мишенью).

$$r = \frac{n}{V}; \quad r = \frac{I\tau}{e\tau\pi r^2 v} = \frac{I}{e\pi r^2 v}; \quad \text{Answer: } L = \frac{I_1 I_2 l}{e^2 \pi r^2 v_1 v_2}; \quad [L] = \text{cm}^{-2} \text{c}^{-1}; [I] = \text{A}; [e] = \text{C}.$$

2. В пучке присутствуют  $\mu$  и  $\pi$ - мезоны с одинаковым импульсом  $p = 1$  ГэВ/с. Найти интервал, в котором должен находиться коэффициент преломления вещества радиатора черенковского счётчика, чтобы регистрировать только  $\mu$  - мезоны.

Решение.

Скорость частицы вычисляется из соотношения  $p = mbg, g = \sqrt{1 - b^2}$ . Так как  $m_\mu < m_\pi$ , то  $\beta_\mu > \beta_\pi$

Минимальное значение коэффициента преломления, необходимое для регистрации  $\mu$ , вычисляется по из соотношения  $\beta_\mu = 1/n_{\mu, \text{min}}$ . Максимальное значение – вычисляется из соотношения  $\beta_\pi = 1/n_{\mu, \text{max}}$ .

3. Ускоритель дейтронов имеет радиус  $r = 10$  м. Импульс дейтронов  $p = 2$  ГэВ/с. Найти напряжённость магнитного поля и частоту ускоряющего электрического поля.

Решение.

Магнитное поле  $B$  находится из соотношения  $p = kB r, k = 0,3, [B] = T, [r] = m$ . Скорость частицы определяется соотношениями  $V = bc, p = mby$ . Период вращения  $T = 2\pi r/V$ . Ответ  $B = p/k r, n = 1/T$ .

4. В пучке  $p$  - мезонов с импульсом  $p = 1$  ГэВ/с имеется примесь электронов с тем же импульсом. В пучке установлены два счётчика на расстоянии  $L = 10$  м. С какой точностью необходимо измерять время пролёта частиц для разделения  $p$  - мезонов и электронов?

Решение.

Скорость частицы вычисляется из соотношения  $b = p/E, E = \sqrt{p^2 + m^2}$ . Точность измерения времени пролёта частиц должна быть лучше, чем  $t_\pi - t_e = L/c(1/b_\pi - 1/b_e)$ .

5. Магнитный спектрометр имеет следующие компоненты.

Магнит имеет длину  $l = 1$  м и напряжённость поля  $B = 1$  Тл. Угол частиц на входе и выходе из магнита измеряется парой кремниевых детекторов с толщиной одного детектора  $h = 1$  мм. Радиационная длина кремния равна  $l_{\text{rad}} = 9,4$  см. Учитывая многократное рассеяние частиц во входном и выходном детекторах, определить импульсное разрешение спектрометра для импульса протонов  $p = 1$  ГэВ/с.

Решение.

Угол поворота частицы в магните есть:

$$q = \frac{l}{r} = \frac{l}{p/kB} = \frac{kBl}{p} = \frac{C}{p}; \quad C = kBl, k = 0,3.$$

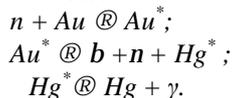
Здесь  $r$  – радиус кривизны траектории частицы в магните. Искомая неопределённость импульса  $dp$  связана с неопределённостью угла  $dq$  соотношением

$$dq = \frac{C dp}{p^2};$$

С другой стороны неопределённость измеренного детекторами угла поворота  $d(q_1 - q_2)$  есть

$$d(q_1 - q_2) = \sqrt{2} dq_{ms}; \quad dq_{ms} = \frac{K_M \sqrt{h/l_{\text{rad}}}}{pbc}; \quad \text{result: } \frac{dp}{p} = \sqrt{2} dq_{ms} \cdot p / C.$$

6. Под действием нейтронов происходит следующая цепочка реакций.



Последняя реакция – излучение  $\gamma$  возбуждённым ядром  $Hg^*$  имеет характерное время  $\sim 10$  нс. Предложить схему аппаратуры для измерения этого времени и обсудить факторы, определяющие точность измерения.

Решение.

В районе мишени расположены два сцинтилляционных счётчика. Один счётчик регистрирует  $b$ , а другой  $\gamma$ . Сигнал с первого счётчика подаётся на «старт» ВЦП, а сигнал со второго – на «стоп» ВЦП. ВЦП регистрирует искомое время жизни ядра  $Hg^*$ .

### **Практические занятия.**

*Заслушивание и обсуждение рефератов, подготовленных студентами по рекомендованной литературе. Недали 12-я и 13-я.*

Ниже приводится несколько характерных тем рефератов.

Устные доклады (около 15 мин) по рефератам входят в зачёт (или экзамен) по данному курсу.

#### **Установка для исследования кумулятивных процессов.**

Литература. И.Г.Алексеев и др. Журнал «Приборы и техника эксперимента», ПТЭ, №4, стр. 5, 2008 г.

#### **Дифференциальный счётчик Черенкова.**

Литература. Фирузабади М.М. и др. Журнал «Приборы и техника эксперимента» - ПТЭ, №2, стр. 43, 1999.

#### **Изучение светосбора в калориметрах.**

Литература. А.Б.Арефьев и др. Журнал «Приборы и техника эксперимента», ПТЭ, №4, стр. 25, 2008 г.

#### **Система лазерного контроля сцинтилляционного калориметра.**

Литература. П.И.Гончаров и др. Журнал «Приборы и техника эксперимента», ПТЭ, №6, стр. 11, 2000 г.

#### **Калибровка CsI(Tl) калориметра с помощью продуктов распада каонов.**

Литература. М.М.Хабибулин и др. Журнал «Приборы и техника эксперимента», ПТЭ, №5, стр. 9, 2000 г.

#### **Система измерения времени пролёта для установки .....HADES.**

Литература. Н.В.Рабин и др. Журнал «Приборы и техника эксперимента», ПТЭ, №4, стр. 5, 2000.

#### **Детектор заряженных частиц на основе пропорциональных трубок с сегментированным катодом.**

Литература. А.М.Блик и др. Журнал «Приборы и техника эксперимента», ПТЭ, №3, стр.63, 2001 г.

#### **Плоскопараллельная камера как детектор для времяпролётных измерений.**

Литература. В.А.Акимов и др. Журнал «Приборы и техника эксперимента», ПТЭ, №4, стр. 63, 2002 г.

#### **Темы для рефератов на английском языке.**

1. A.Gunsal et. al. A low pressure gas detector. Journal “Nuclear Instruments and methods.” NIM A, vol. 495, p. 216, 2002.
2. J.McDonald et al. Ionization chamber for monitoring of high-intensity charged particle beam. Journal “Nuclear Instruments and methods.” NIM A, vol. 496, #23, p. 293, 2003.
3. M.Hori et al. Analog Cherenkov detector. Journal “Nuclear Instruments and methods.” NIM A, vol. 496, p. 102, 2003.

### **6. Учебно-методическое обеспечение дисциплины.**

## Рекомендуемая литература

### 1 Основная литература.

- Ишханов Б.С. Частицы и атомные ядра: Учебник для вузов / Ишханов Борис Саркисович, Капитонов Игорь Михайлович, Юдин Николай Прокофьевич. - 2-е изд., испр. и доп. - М.: Издательство ЛКИ, 2007. - 584с.: --20 шт
- Л.Б. Окунь. Физика элементарных частиц. М., 1984 г.
- Л.Б. Окунь. Лептоны и кварки. М., 1990 г.
- D.H.Perkins. Introduction to High Energy Physics. 4<sup>th</sup> Edition. University of Oxford. 2000.
- В.М. Емельянов. Стандартная модель и её расширения. Физматлит, 2007.
- А.Л.Любимов, Д.Киш. Введение в экспериментальную физику частиц. Дубна, 1999.
- Н.М.Никитюк, В.Н.Самойлов. Физические установки на Большом Адронном Коллайдере. ОИЯИ. Дубна, 2008 г.
7. Ю.К.Акимов и др. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. М. Энергоатомиздат, 1989.
8. А.Н.Скринский. Ускорители, детекторы и перспективы физики элементарных частиц. УФН, т. 138, стр. 3.
9. Сборники лекций на школах ОИЯИ – ЦЕРН после 2000 г (жёлтые книги).
- Ландау Л.Д. Механика: Учебное пособие для вузов. 5-е изд., стер. - М.: Физматлит, 2004.
- Ландау Л.Д. Квантовая механика (нерелятивистская теория): Учебное пособие для вузов. 6-е изд., испр. - М.: Физматлит, 2004.
- Тейлор Дж. Теория рассеяния. Квантовая теория нерелятивистских столкновений. М.: Мир, 1975.

### 2 Дополнительная литература

1. В.А.Григорьев и др. Электронные методы ядерно-физического эксперимента. Энергоатомиздат, 1988.
2. В.А.Смирнов. Средства организации систем сбора данных. ЭЧАЯ, т. 28б, вып. 5, стр. 1295, 1997.
3. Ю.М.Адо. Ускорители заряженных частиц. УФН, т.145, №1, стр. 87.
4. В.П. Карташов, В.И. Котов. Основные методы в оптике пучков заряженных частиц. М., 1984 г.
5. В.Dolgoshein. Transition radiation detectors. NIM, A326, p. 434, (1993).
6. В.Д.Пешехонов. Методика координатных газонаполненных детекторов... ЭЧАЯ, т. 17, в. 5, стр. 1030, (1986).
7. В.А.Бедняков и др. Лаборатория ядерных проблем им. В.П.Джелепова. На рубеже тысячелетий. ЭЧАЯ, т. 32, вып. 3, стр. 514, 2002.
8. Бом Д. Квантовая теория. 2-е изд., испр. - М.: Госиздат физико-математической литературы, 1965.

#### *Периодические издания:*

1. Успехи физических наук. / Учредитель: РАН; Гл.ред. Л.В.Келдыш. М.: Основан в 1918 году. См. электронные версии статей: <http://ufn.ru/ru/articles/>.
2. Ядерная физика. / Учредитель: РАН; Гл.ред. Ю.Г. Абов. - М. : Наука. - Основан в 1965 году.
3. ЭЧАЯ (Элементарные частицы и атомные ядра). / Научный обзорный журнал. Основан ОИЯИ в 1970 г.

#### *Справочные ресурсы и материалы в Интернет:*

1. <http://nrv.jinr.ru/nrv>
2. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/>
3. <http://algotlist.manual.ru/>
4. <http://www.poiskknig.ru/cgi-bin/poisk.cgi?>

## **7. Технические и электронные средства обучения**

В ходе изучения курса предусмотрено использование компьютера для визуализации данных и работы в сети Интернет.

## **8. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

(указываются специализированные лаборатории и классы, основные приборы, установки)

Практические задания выполняются в аудиториях оборудованных персональными компьютерами с доступом в Интернет, а также отдельным компьютером для преподавателя снабженным проектором для мультимедийных презентаций.

## **9. Формы контроля**

*Перечень примерных контрольных вопросов и заданий для самостоятельной работы:*

1. Дать характеристику ускорительного комплекса ЦЕРН, или Лаборатории им. Ферми в США (FNAL), или Брукхейвенской Национальной Лаборатории США (BNL).
2. Открытие глубоко неупругих процессов во взаимодействии лептонов с нуклонами и жестких процессов во взаимодействии адронов (реакции с большой передачей импульса).
3. Элементы магнитной оптики и принцип построения каналов транспортировки пучка заряженных частиц. Графический расчёт фокусировки частиц парой квадрупольных магнитных линз и дипольным магнитом.
4. Основные понятия специальной теории относительности: скорость света как мировая константа, преобразования Галилея и Лоренца, четырёхмерные векторы. Вычислить энергию в с.ц.м. при столкновении  $pp$  и  $pd$  с заданными импульсами и с заданным относительным углом траекторий первичных частиц.

## **Экзаменационные вопросы по курсу «Экспериментальная физика высоких энергий»**

### **I. Физические проблемы.**

5. Стандартная Модель в физике частиц и ее основные положения. Фундаментальные конститuentы материи – кварки, лептоны и калибровочные бозоны.
6. Точечноподобные конститuentы адронов. Партоновая модель. От партонов к кваркам и глюонам. Аналогия с опытом Резерфорда.
7. Квантовая хромодинамика и ее экспериментальные основания. Спектр масс кваркониев. Потенциал кварк-антикваркового взаимодействия. Цвет и его пленение – конфайнмент.
8. Рождение струй адронов. Кварковые и глюонные струи. Подтверждение предсказаний КХД в рамках теории возмущений.
9. Систематика частиц. Распределение частиц по мультиплетам. Экзотические и неэкзотические состояния.

10. Постановка вопроса о фазовых переходах в плотной и возбуждённой ядерной материи. Оценка плотности энергии, достигаемой во взаимодействии тяжёлых ионов.
11. Основные коллективные эффекты, наблюдаемые в событиях столкновения тяжёлых ионов: течение ядерной материи, поглощение струй и частиц с большим импульсом.

## II. Техника эксперимента

12. Типы ускорителей заряженных частиц: электростатические, линейные, циклические, коллайдеры.
13. Основные принципы планирования электронного эксперимента.
14. Процессы, сопровождающие прохождение заряженных частиц через вещество.
15. Принцип работы ППД.
16. Тепловой и токовый шум в электронных схемах.
17. Принцип построения спектрометрического канала регистрации частиц.
18. Методы идентификации частиц в области низких и высоких энергий.
19. Характерные блок-схемы аппаратуры в спектрометрических экспериментах с ППД.
20. Принцип подавления событий с наложением двух и более сигналов.
21. Принцип действия пропорциональной и дрейфовой камеры. Восстановление координат многочастичных событий.
22. Пороговые и дифференциальные черенковские счётчики и их характеристики.

### **10. Методические рекомендации по организации изучения дисциплины.**

#### *Методические рекомендации для преподавателей*

Курс лекций рассчитан на студентов кафедры экспериментальной ядерной физики. В связи с этим необходимо сделать упор на изложении материала в приложении к задачам исследования реакций с частицами и ядрами. Лекции должны сопровождаться наглядным иллюстративным материалом, в частности, с использованием компьютерных презентаций. Следует уделить особое внимание практическим расчетам, выполняемым самими студентами при работе над текущими заданиями и рефератами. Допускается использование студентами уже существующих пакетов расчета характеристик ядерных реакций. Следует поощрять самостоятельное программирование.

Формулировку практических заданий следует выполнять подробно, а так же допускать использование интернет-ресурсов при работе над заданиями.

Контроль работы студента проводить в виде опроса по выполненному заданию и в виде реферативных докладов.

Дополнительная литература для разработки и переработки лекционных материалов:

1. Н. Мотт, Г. Месси, Теория атомных столкновений, М., Мир, 1969.
2. Р. Ньютон, Теория рассеяния волн и частиц, М., Мир, 1969.