

**ПРОГРАММА ВСТУПИТЕЛЬНОГО ЭКЗАМЕНА  
ПО КОНКУРСНОЙ ГРУППЕ «ФФФ ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ»  
ДЛЯ ПОСТУПАЮЩИХ В АСПИРАНТУРУ**

На вступительном испытании будут заданы вопросы по выпускной квалификационной работе и из числа вопросов по направленности, по которой поступающий намерен обучаться, в зависимости от выбранного им факультета.

**Вопросы по выпускной квалификационной работе (магистратура или специалитет)**

1. Основные положения.
2. Новизна.
3. Актуальность.

**Оглавление**

<b>ФАКУЛЬТЕТ ПРОБЛЕМ ФИЗИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ.....</b>	<b>2</b>
Направленность: 01.03.04 «Планетные исследования» .....	2
Направленность: 01.04.02 «Теоретическая физика» .....	6
Направленность: 01.04.03 «Радиофизика» .....	10
Направленность: 01.04.05 «Оптика» .....	14
Направленность: 01.04.07 «Физика конденсированного состояния» .....	17
Направленность: 01.04.08 «Физика плазмы» .....	19
Направленность: 01.04.16 «Физика атомного ядра и элементарных частиц» .....	22
Направленность: 01.04.21 «Лазерная физика» .....	29
Направленность: 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» .....	31
<b>ФАКУЛЬТЕТ ОБЩЕЙ И ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ.....</b>	<b>33</b>
Направленность: 01.04.21 «Лазерная физика» .....	33
Направленность: 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» .....	37
Направленность: 01.04.02 «Теоретическая физика» .....	39
Направленность: 01.04.07 «Физика конденсированного состояния» .....	41
Направленность: 01.04.05 «Оптика» .....	44
Направленность: 01.04.16 «Физика атомного ядра и элементарных частиц» .....	47
Направленность: 01.04.09 «Физика низких температур» .....	49
Направленность: 01.04.23 «Физика высоких энергий» .....	51

## ФАКУЛЬТЕТ ПРОБЛЕМ ФИЗИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ

### Направленность: 01.03.04 «Планетные исследования»

1. Элементы физики планетных атмосфер
  - 1.1. Вертикальная структура планетных атмосфер. Тропосфера, стратосфера, мезосфера, термосфера. Гомосфера и гетеросфера. Экзосфера. Сравнительный анализ строения атмосфер Венеры, Земли, Марса и Юпитера.
  - 1.2. Общая циркуляция планетных атмосфер. Уравнения гидродинамики на вращающейся сфере. Два режима общей циркуляции. Ячейки Хэдли и струйные течения. Термический ветер. Планетарный пограничный слой. Понятие о гидродинамических моделях планетных атмосфер.
  - 1.3. Волны в атмосфере планеты. Баротропные и бароклинные моды. Внутренние гравитационные волны. Гравитационные и термические приливы. Волны Россби.
  - 1.4. Турбулентное движение в атмосферах. Колмогоровский спектр. Конвективная и сдвиговая неустойчивость. Число Ричардсона. Турбулентный пограничный слой. Турбулентные коэффициенты обмена.
  - 1.5. Спектроскопия атмосферных газов. Основные закономерности вращательных, колебательно-вращательных и электронных спектров молекул. Спектроскопические базы данных. Процессы излучения и поглощения, механизмы уширения линии в атмосферах планет. Локальное термодинамическое равновесие.
  - 1.6. Аэрономия. Химические процессы в планетных атмосферах. Диссоциация. Ионизация. Строение верхних атмосфер планет. Ионосферы.
  - 1.7. Аэрозольная среда в планетных атмосферах. Облака, аэрозольная дымка, их типы, процессы образования. Микрофизические процессы.
2. Спектрорадиометрические методы исследования планет
  - 2.1. Перенос излучения в линии. Кривые роста. Истинное поглощение и рассеяние на различных уровнях атмосферы. Формирования спектра уходящего теплового излучения планеты.
  - 2.2. Оптические свойства облаков и аэрозолей. Теория Ми
  - 2.3. Приборы для дистанционного зондирования планет в оптическом диапазоне спектра. Приемники излучения УФ, видимого и ИК диапазонов. Дифракционные спектрометры. Фурье-спектрометры. Акустооптическая фильтрация излучения. Картирующие спектрометры. Спектроскопия высокого разрешения для исследования планет: Эшелле-спектрометры, интерферометры Фабри-Перо, гетеродинные спектрометры.
3. Объекты Солнечной системы
  - 3.1. Меркурий. Орбитальные характеристики. Понятие о планетной радиолокации, ее роль в исследовании Меркурия. Поверхность Меркурия, основные особенности ее строения. Космические экспедиции Маринер-10, Мессенджер.
  - 3.2. Венера. Поверхность. Состав и вертикальное строение атмосферы. Основные характеристики облачного слоя. Тепловой режим нижней атмосферы. Динамика атмосферы. Радиоизлучение. Верхняя атмосфера. Проблема эволюции климата. Космические экспедиции к Венере от Венеры 4 до «Венеры-Экспресс».
  - 3.3. Земля как планета. Понятие о тектонике. Циркуляция атмосферы и океана. Гидросфера и биосфера. Их влияние на характеристики атмосферы и климата. Парниковый эффект. Проблема стабильности климата.
  - 3.4. Луна. Строение и эволюция поверхности. Гипотезы происхождения Луны. Проблема летучих. Открытие водяного льда на Луне. Исследование Луны, программа «Аполло», современные исследования космическими аппаратами (LRO, Чандраян, Луна-Ресурс)

- 3.5. Марс. Рельеф, поверхность, модели внутреннего строения. Состав атмосферы, ее вертикальное строение и динамика. Атмосферный аэрозоль, облака, пылевые бури. Проблема палеоклимата. Исследование Марса при помощи космических аппаратов.
- 3.6. Юпитер. Состав и структура атмосферы. Природа облачного слоя. Фазовое состояние недр. Динамика атмосферы, пояса и зоны. Столкновение кометы Шомейкера-Леви с Юпитером. Магнитосфера. Миссии «Вояджер», «Галилео».
- 3.7. Галилеевы спутники Юпитера: Ио, Европа, Ганимед и Каллисто. Их орбиты, поверхность, атмосферы, модели внутреннего строения. Экзосферы галилеевых спутников Юпитера
- 3.8. Сатурн. Модели внутреннего строения. Особенности динамики атмосферы. Система колец и спутников Сатурна. Миссии «Вояджер» и «Кассини».
- 3.9. Спутники Сатурна. Титан: состав, вертикальная структура и динамика атмосферы. Аэрозольная компонента атмосферы Титана. Понятие об углеводородном цикле. Миссия «Гюйгенс». Энцелад: орбита, поверхность, внутреннее строение, криовулканизм.
- 3.10. Уран и Нептун. Особенности теплового баланса, динамики атмосфер, внутреннего строения. Магнитные поля. Системы колец и спутников. Миссия «Вояджер».
- 3.11. Малые планеты. Главный пояс. Движение, точки Лагранжа, резонансы.
- 3.12. Кометы, их классификация. Современные представления о ядрах комет. Облако Орта. Койперовский пояс. Система Плутон-Харон. Исследования комет космическими аппаратами. Миссии «Вега», «Джотто», «Розетта»
4. Внесолнечные планетные системы
  - 4.1. Современные представления о формировании и ранней эволюции Солнечной системы. Характеристики звезд, обладающих планетными системами.
  - 4.2. Внесолнечные планетные системы. Методы обнаружения и типичные характеристики внесолнечных планет. Модели атмосфер экзопланет.
  - 4.3. Понятие обитаемой зоны. Поиск внесолнечных планет земного типа.

## Литература

### Основная

1. Бакулин П.И. и др. Курс общей астрономии. М., «Наука», 1983 (5-е изд), М. «Эдиториал УРСС», 2001 (6-е изд) (гл. 7 и 9).
2. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. М., ИЛ, 1961.
3. Витязев А.В., Печерников Г.В., Сафронов В.С., Планеты земной группы, М., Наука, 1990.
4. Герцберг Г. Спектры и строение двухатомных молекул, М., ИЛ, 1949 (гл. 1 - 4).
5. Голицын Г.С. Введение в динамику планетных атмосфер. Л., Гидрометеиздат, 1973.
6. Горькавый Н.Н., Фридман А.М. Физика планетных колец. М., Наука, 1994
7. Гуди Р. Атмосферная радиация. М., Мир, 1966.
8. Гуди Р., Дж Уокер. Атмосферы. М., Мир, 1975.
9. Жарков В.Н. внутреннее строение Земли и планет. М., Мир, 1978.
10. Жарков В.Н. и Мороз В.И. Почему Марс? Природа, № 6, 58-67, 2000
11. Ипатов С.И. Миграция небесных тел в Солнечной системе. М., «Эдиториал УРСС», 2000 (гл. 1).
12. Космонавтика, Энциклопедия. Под ред. В.П. Глушко. М., Наука, 1978, «Советская энциклопедия», 1985.
13. Краснопольский В.А. Фотохимия атмосфер Марса и Венеры. М., Наука, 1982.
14. Мороз В.И. Физика планет. М., Наука, 1967 (гл. 1 и раздел 4.3).
15. Мюррей К., Дермотт С. Динамика Солнечной системы, Москва, Физматлит, 2009.
16. Соболев В.В. Перенос излучения в атмосферах звезд и планет. М., ГТТИ, 1956.
17. Соболев В.В. Рассеяние света в атмосферах планет. М., Наука, 1972.
18. Соболев В.В. Курс теоретической астрофизики. М., Наука, 1975.

19. Тверской П.Н. Курс метеорологии (физика атмосферы), Л., Гидрометеиздат, 1962.
20. Чемберлен Дж. Теория планетных атмосфер. М., Мир, 1981.
21. Физика космоса. Маленькая энциклопедия. Под ред. Р.А. Сюняева, М., «Советская энциклопедия», 1986.
22. Левантовский В.К. Механика космического полета. М., Мир, 1975.
23. Encyclopedia of the Solar system (second edition), edited by McFadden L.-A., Weissman P.R., Johnson T.V., Elsevier, 966, 2007.
24. Irwin P. Giant planets of our Solar system. Atmospheres, composition and structure. Springer, 403c., 2009 (2006 – first edition).
25. Imke de Pater, Jack J. Lissauer, Planetary sciences, Cambridge University press, 528 c., 2004
26. Sanchez-Lavega A., An Introduction to Planetary Atmospheres, CRC press: Taylor & Francis, 629 c., 2010.
27. Taylor F.W. Planetary atmospheres Oxford University Press, 261 c., 2010

### **Дополнительная**

1. Александров Ю.В. Введение в физику планет. Киев, Вища школа, 1982.
2. Барсуков В.П. (ред) Планета Венера. М., Наука, 1989.
3. Боярчук А.А. (ред) Угроза с неба: рок или случайность? М.,Космоинформ, 1999.
4. Гуди Р. Атмосферная радиация. М., Мир, 1966.
5. Дейменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М., Мир, 1971.
6. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия. М., Наука, 1962; М., Эдиториал УРСС, 2001 (2-е изд).
7. Жарков В.Н. и Трубицин В.П. Физика планетных недр. М., Наука, 1980.
8. Космохимия Луны и планет. М., Наука, 1975.
9. Краснопольский В.А. Физика свечения атмосфер планет и комет. М., Наука, 1987.
10. Ксанфомалити Л.В. Планета Венера. М., Наука, 1985.
11. Ксанфомалити Л.В. Парад планет. М., Наука, 1997.
12. Ксанфомалити Л.В. Ценный дар небесной механики. «Вселенная и мы», 2001, № 4, стр. 14. Луна. Сб. под ред. Г. Юрии. М., Наука, 1985.
13. Марочник Л.С. Свидание с кометой. М., Наука, 1985.
14. Маров М.Я. Планеты Солнечной системы. М., Наука, 1986.
15. Манин А.С. и Шишков Ю.А. История климата. Л., Гидрометеиздат, 1979.
16. Мороз В.И. Физика планеты Марс. М., Наука, 1978.
17. Планеты и спутники. Сб. под ред. Дж. Койпера и Б. Мидлхерста, М., Мир, 1963.
18. Протозвезды и планеты. Сб. под ред. Т. Герелса. М., Мир, 1982.
19. Симоненко А.Н. Астероиды. М., Наука, 1985.
20. Солнечная система. Пер. под ред. В.И. Мороза. М., Мир, 1978.
21. Сурков Ю.А. Космические исследования планет и спутников. М., Наука, 1985.
22. Шаронов В.В. Природа планет. М., Физматгиз, 1958.
23. Шульман Л.М. Ядра комет. М., Наука, 1978.
24. Юпитер. Сб. под ред. Т. Герелса. М., Мир, 1978.
25. Чандрасекар С., Перенос лучистой энергии. М., ИЛ, 1953.
26. Bougher, S.W., D.M.Hunten, and Phillips, R.J., Venus II, The University of Arizona Press, Tucson, Arizona, 1997.
27. Coustenis A., Taylor, F.W., Exploring an Earthlike World TITAN. 2 Ed, Series on Atmospheric, Oceanic and Planetary Physics, World Scientific, 393 c., 2008
28. Houghton J., The physics of atmosphere (3 Ed.), Cambridge University press, 320 c., 2005
29. Hunten D.M., L. Colin, T.M.Donahue, and V.I.Moroz, EDS. Venus, The University of Arizona Press, Tucson, Arizona, 1983.
30. Jacobson M.Z. Fundamentals of atmospheric modeling, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 813 c, 2005

31. Jupiter. The planet, satellites and magnetosphere, Edited by F. Bagenal, T.Dowling, W.McKinnon, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 719 c, 2006.
32. Kieffer H.H., Jakosky, B.M., Snyder C.W. and Matthews M.S., eds. 1992, Mars (Tucson and London, The University of Arizona Press).
33. Lewis J.S. Physics and chemistry of the Solar System. International Geophysics Series, v.87. Elsevier, 2004. 655p.
34. McBride N., Gilmour I., An introduction to the solar system, Cambridge Univ pr, 412 c., 2004.
35. Rodgers C.D. Inverse methods for atmospheric sounding. Theory and practice. World scientific, 240 c., 2000.

## Направленность: 01.04.02 «Теоретическая физика»

### 1. Механика

Уравнения движения. Обобщенные координаты, принцип наименьшего действия, функция Лагранжа. Симметрии. Теорема Нетер. Законы сохранения энергии, импульса, момента импульса.

Интегрирование уравнений движения. Одномерное движение, приведенная масса, движение в центральном поле.

Распад частиц, упругие столкновения. Сечение рассеяния частиц, формула Резерфорда.

Малые колебания. Свободные и вынужденные одномерные колебания, параметрический резонанс. Колебания систем со многими степенями свободы, полярные координаты. Колебания при наличии трения.

Движение твердых тел. Угловая скорость, момент инерции и момент количества движения твердых тел. Эйлеровы углы и уравнение Эйлера.

Канонические уравнения, уравнение Гамильтона, скобки Пуассона, действие как функция координат, теорема Лиувилля, уравнение Гамильтона—Якоби, разделение переменных.

Принцип относительности. Скорость распространения взаимодействий. Интервал. Собственное время. Преобразование Лоренца. Преобразование скорости. Четырехмерные векторы. Четырехмерная скорость.

Релятивистская механика. Принцип наименьшего действия. Энергия и импульс. Распад частиц. Упругие столкновения частиц.

### 2. Теория поля

Заряд в электромагнитном поле. Четырехмерный потенциал поля. Уравнения движения заряда в поле, калибровочная (градиентная) инвариантность. Тензор электромагнитного поля. Преобразование Лоренца для поля. Инварианты поля.

Действие для электромагнитного поля. Уравнения электромагнитного поля. Четырехмерный вектор тока. Уравнение непрерывности. Плотность и поток энергии. Тензор энергии-импульса. Тензор энергии-импульса электромагнитного поля.

Постоянное электромагнитное поле. Закон Кулона. Электростатическая энергия зарядов. Дипольный момент. Мультипольные моменты. Система зарядов во внешнем поле. Постоянное магнитное поле. Магнитный момент. Теорема Лармора.

Электромагнитные волны. Волновое уравнение. Плоские волны. Монохроматическая плоская волна. Спектральное разложение. Поляризационные характеристики излучения. Разложение электростатического поля.

Поле движущихся зарядов. Запаздывающие потенциалы. Потенциалы Лиенара—Вихерта. Излучение электромагнитных волн. Поле системы зарядов на далеких расстояниях. Мультипольное излучение. Излучение быстродвижущегося заряда. Рассеяние свободными зарядами.

Движение частицы в гравитационном поле. Метрика. Ковариантное дифференцирование. Символы Кристоффеля. Действие для частицы в гравитационном поле.

Уравнения гравитационного поля. Тензор кривизны. Действие для гравитационного поля. Тензор энергии-импульса. Уравнения Эйнштейна.

Нерелятивистский предел уравнений Эйнштейна. Закон Ньютона. Центральносимметричное гравитационное поле. Метрика Шварцшильда. Гравитационный коллапс.

Наблюдаемые эффекты ОТО в ньютоновом и постньютоновом приближении (гравитационное красное смещение, отклонение луча света, задержка сигнала, прецессия гироскопа, прецессия орбит планет). Гравитационные линзы.

Релятивистская космология. Открытая, закрытая и плоская модели. Закон Хаббла. Расширение Вселенной на радиационно-доминированной, пылевидной и вакуум-доминированной стадиях.

Физические процессы в ранней Вселенной. Закалка нейтрино. Первичный нуклеосинтез. Рекомбинация, реликтовые фотоны.

### 3. Электродинамика сплошных сред

Электростатика диэлектриков и проводников. Диэлектрическая проницаемость и проводимость. Термодинамика диэлектриков. Магнитные свойства. Постоянное магнитное поле. Магнитное поле постоянных токов. Термодинамические соотношения. Диа-, пара-, ферро- и антиферромагнетики.

Сверхпроводники. Магнитные свойства. Сверхпроводящий ток. Критическое поле.

Уравнения электромагнитных волн. Уравнения поля в отсутствие дисперсии. Дисперсия диэлектрической проницаемости. Соотношения Крамерса—Кронига. Плоская монохроматическая волна. Распространение электромагнитных волн. Отражение и преломление. Принцип взаимности.

Электромагнитные волны в анизотропных средах. Эффекты Керра и Фарадея. Пространственная дисперсия. Естественная оптическая активность.

Магнитная гидродинамика. МГД-волны. Проблема динамо.

Нелинейная оптика. Нелинейная проницаемость. Самофокусировка. Генерация второй гармоники.

Ионизационные потери быстрых частиц. Излучение Черенкова. Рассеяние электромагнитных волн в средах. Рэлеевское рассеяние.

### 4. Механика сплошных сред и физическая кинетика

Идеальная жидкость. Уравнение непрерывности. Уравнение Эйлера. Поток энергии. Поток импульса. Сохранение циркуляции скорости. Потенциальное обтекание тел: присоединенная масса, сила сопротивления, эффект Магнуса.

Вязкая жидкость: уравнения движения вязкой жидкости. Диссипация энергии в несжимаемой жидкости.

Переход к турбулентности. Неустойчивости ламинарных течений. Теория Ландау—Хопфа. Типы аттракторов. Странный аттрактор. Переход к турбулентности путем удвоения периодов. Развитая турбулентность. Спектр турбулентности в вязком интервале. Колмогоровский спектр.

Звук. Звуковые волны. Геометрическая акустика.

Одномерное движение сжимаемого газа. Характеристики. Инварианты Римана. Простая волна Римана. Образование ударных волн. Ударная адиабата. Слабые разрывы. Теория сильного взрыва.

Ударные волны слабой интенсивности. Уравнение Бюргерса.

Звуковые волны со слабой дисперсией. Уравнение КДВ. Солитоны и их взаимодействие. Бесстолкновительные ударные волны.

Гидродинамика сверхтекучей жидкости. Двухжидкостное описание.

Кинетическая теория газов. Кинетическое уравнение Больцмана.  $H$ -теорема. Теплопроводность и вязкость газов. Симметрии кинетических коэффициентов. Диффузионное приближение. Уравнение Фоккера—Планка.

Бесстолкновительная плазма. Уравнения Власова. Диэлектрическая проницаемость бесстолкновительной плазмы. Затухание Ландау. Ленгмюровские и ионно-звуковые волны. Пучковая неустойчивость: гидродинамическая и кинетическая стадии. Квазилинейная теория.

Столкновения в плазме. Интеграл столкновений Ландау. Длина пробега частиц в плазме.

### 5. Квантовая механика

Основные положения квантовой механики. Принцип неопределенности. Принцип суперпозиции. Операторы. Дискретный и непрерывный спектры. Гамильтониан.

Стационарные состояния. Гейзенберговское представление. Соотношения неопределенности.

Уравнение Шредингера. Основные свойства уравнения Шредингера. Одномерное движение. Одномерный осциллятор. Плотность потока. Квазиклассическая волновая функция. Прохождение через барьер.

Момент количества движения. Собственные функции и собственные значения момента количества движения. Четность. Сложение моментов. Разложение Клебша—Гордана.

Движение в центральном поле. Сферические волны. Разложение плоской волны. Радиальное уравнение Шредингера. Атом водорода.

Теория возмущений. Возмущения, не зависящие от времени. Периодические возмущения. Квазиклассическая теория возмущений.

Спин. Оператор спина. Тонкая структура атомных уровней.

Тождественность частиц. Симметрия при перестановке частиц. Вторичное квантование для бозонов и фермионов. Обменное взаимодействие.

Атом. Состояние электронов атома. Уровни энергии. Самосогласованное поле. Уравнение Томаса—Ферми. Тонкая структура темных уровней. Периодическая система Менделеева.

Движение в магнитном поле. Уравнение Шредингера для движения в магнитном поле. Плотность потока в магнитном поле.

Столкновения частиц. Общая теория. Формула Бора. Резонансное рассеяние. Столкновение тождественных частиц. Упругое рассеяние при наличии неупругих процессов. Матрица рассеяния. Формула Брейта—Вигнера.

## 6. Статистическая физика

Основные принципы статистики. Функция распределения и матрица плотности. Статистическая независимость. Теорема Лиувилля. Роль энергии. Закон возрастания энтропии. Микроканоническое распределение. Распределение Гиббса. Распределение Гиббса с переменным числом частиц.

Термодинамические величины. Температура. Работа и количество тепла. Термодинамические потенциалы. Термодинамические неравенства. Принцип Ле-Шателье. Теорема Нернста. Системы с переменным числом частиц. Свободная энергия в распределении Гиббса. Вывод термодинамических соотношений.

Термодинамика идеальных газов. Распределение Больцмана. Столкновение молекул. Неравновесный идеальный газ. Закон равнораспределения. Одноатомный идеальный газ.

Распределение Ферми и Бозе. Вырожденный идеальный ферми-газ. Свойства вещества при больших плотностях. Вырожденный бозе-газ. Конденсация Бозе—Эйнштейна. Равновесное тепловое излучение. Формула Планка. Светимость абсолютно черного тела.

Неидеальные газы и конденсированные среды. Фононные спектры и термодинамические свойства газа. Термодинамические свойства идеального классического газа.

Равновесие фаз. Формула Клапейрона—Клаузиса. Критическая точка.

Системы с различными частицами. Правило фаз. Слабые растворы. Смесь идеальных газов. Смесь изотопов. Химические реакции. Условие химического равновесия. Закон действующих масс. Теплота реакции. Ионизационное равновесие.

Слабонеидеальный бозе-газ. Модель Боголюбова. Спектр возбуждений. Сверхтекучесть. Квантовые вихри.

Твердые тела. Кристаллические структуры. Поверхность Ферми. Зонная структура. Квазичастицы.

Колебания решетки. Теория упругости. Звук в твердых телах. Процессы распада и слияния фононов. Рассеяние фононов на примесях. Кинетическое уравнение для фононов. Теплопроводность.

Сверхпроводимость. Куперовское спаривание. Теория Бардина—Купера—Шриффера (БКШ). Теория Лондонов. Теория Гинзбурга-Ландау. Ток, калибровочная инвариантность, квантование потока. Сверхпроводники первого и второго рода. Эффект Джозефсона.

Флуктуации. Распределение Гиббса. Флуктуации основных термодинамических величин. Формула Пуассона. Временные флуктуации. Симметрии кинетических коэффициентов. Флуктуационно-диссипативная теорема.

Фазовые переходы второго рода. Теория Ландау. Критические индексы. Масштабная инвариантность. Флуктуации в окрестности критической точки.

## Литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. М.: Физматлит, 2001.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: Наука, 1988.
3. Давыдов А. С. Квантовая механика. М.: Наука, 1973.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М.: Физматлит, 2001.
5. Шифф Л. Квантовая механика. М. Изд-во иностр. лит., 1957.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Физматлит, 2001.
7. Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Квантовая электродинамика. М.: Физматлит, 2001.
8. Ициксон К., Зюбер Ж.-Б. Квантовая теория поля. В 2 т. М.: Мир, 1984.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Ч.1. М.: Физматлит, 2001.
10. Румер Ю.Б., Рывкин С.М. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. М.: Наука, 1971.
11. Квасников И.А. Термодинамика и статистическая физика. Теория равновесных систем. М.: Изд-во МГУ, 1991.
12. Квасников И.А. Термодинамика и статистическая физика. Теория неравновесных систем. М.: Изд-во МГУ, 1987.
13. Кубо Р. Статистическая механика. М.: Мир, 1967.
14. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Статистическая физика. Ч.2. М.: Наука, 2000.
15. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Физическая кинетика. М.: Наука, 1979.
16. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Физматлит, 2001.
17. Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В. Квантовые поля. М.: Наука, 1993.
18. Гантмахер Ф. Р. Лекции по аналитической механике. М.: Физматлит, 2001.
19. Зельдович Я.Б., Новиков И.Д. Строение и эволюция вселенной. М.: Наука, 1975.
20. Вигнер Е. Теория групп и ее приложение к квантовой механике. М.: Изд-во иностр. лит., 1961.
21. Абрикосов А.А. Основы теории металлов. М.: Наука, 2000.
22. Пескин М., Шредер Д. Введение в квантовую теорию поля. М.: Ижевск: РиХД, 2001.
23. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 2000.
24. Абрикосов А.А., Горьков Л.П., Дзялошинский И.Е. Методы квантовой теории поля в статистической физике. М.: Физматгиз, 1962.

## Направленность: 01.04.03 «Радиофизика»

### 1. Теория колебаний

Линейные колебательные системы с одной степенью свободы. Силовое и параметрическое воздействие на линейные и слабонелинейные колебательные системы.

Автоколебательная система с одной степенью свободы. Энергетические соотношения в автоколебательных системах. Методы расчета автоколебательных систем.

Воздействие гармонического сигнала на автоколебательные системы. Синхронизация. Явления затягивания и гашения колебаний. Применение затягивания для стабилизации частоты.

Аналитические и качественные методы теории нелинейных колебаний. Анализ возможных движений и бифуркаций в фазовом пространстве: метод малого параметра, метод Ван-дер-Поля, метод Крылова—Боголюбова. Укороченные уравнения. Усреднение в системах, содержащих быстрые и медленные движения.

Колебательные системы с двумя и многими степенями свободы. Нормальные колебания. Вынужденные колебания.

Автоколебательные системы с двумя и более степенями свободы. Взаимная синхронизация колебаний двух генераторов.

Параметрическое усиление и параметрическая генерация. Параметрические усилители и генераторы. Деление частоты.

Устойчивость стационарных режимов автономных и неавтономных колебательных систем. Временные и спектральные методы оценки устойчивости.

Собственные и вынужденные колебания линейных распределенных систем. Собственные функции системы (моды). Разложение вынужденных колебаний по системе собственных функций.

Распределенные автоколебательные системы. Лазер как пример такой системы. Условия самовозбуждения. Одномодовый и многомодовый режимы генерации.

Хаотические колебания в динамических системах. Понятие о хаотическом (странном) аттракторе. Возможные пути потери устойчивости регулярных колебаний и перехода к хаосу.

### 2. Теория волн

Плоские однородные и неоднородные волны. Плоские акустические волны в вязкой теплопроводящей среде, упругие продольные и поперечные волны в твердом теле, электромагнитные волны в среде с проводимостью. Поток энергии. Поляризация.

Распространение сигнала в диспергирующей среде. Простейшие физические модели диспергирующих сред. Волновой пакет в первом и втором приближении теории дисперсии. Фазовая и групповая скорости. Параболическое уравнение для огибающей. Расплывание и компрессия импульсов. Поле в средах с временной. Дисперсионные соотношения Крамерса—Кронига и принцип причинности.

Свойства электромагнитных волн в анизотропных средах. Оптические кристаллы, уравнение Френеля, обыкновенная и необыкновенная волны. Магнитоактивные среды. Тензор диэлектрической проницаемости плазмы в магнитном поле; нормальные волны, их поляризация.

Волны в периодических структурах. Механические цепочки, акустические и оптические фононы. Полосы пропускания и непрозрачности. Электрические цепочки, сплошная среда со слабыми периодическими неоднородностями. Связанные волны.

Приближение геометрической оптики. Уравнения эйконала. Дифференциальное уравнение луча. Лучи и поле волны в слоисто-неоднородных средах.

Электромагнитные волны в металлических волноводах. Диэлектрические волноводы, световоды. Линзовые линии и открытые резонаторы. Гауссовские пучки.

Метод Кирхгофа в теории дифракции. Функции Грина. Условия излучения. Дифракция в зоне Френеля и Фраунгофера. Характеристики поля в фокусе линзы.

Волны в нелинейных средах без дисперсии. Образование разрывов. Ударные волны. Уравнение Бюргера для диссипативной среды и свойства его решений. Генерация гармоник исходного монохроматического сигнала, эффекты нелинейного поглощения, насыщения и детектирования.

Уравнение Кортевега–де–Вриза и синус – Гордона. Стационарные волны. Понятие о солитонах. Взаимодействия плоских волн в диспергирующих средах. Генерация второй гармоники. Параметрическое усиление и генерация.

Самовоздействие волновых пучков. Самофокусировка света. Приближения нелинейной квазиоптики и нелинейной геометрической оптики. Обращение волнового фронта. Интенсивные акустические пучки; параметрические излучатели звука.

### 3. Статистическая радиофизика

Случайные величины и процессы, способы их описания. Стационарный случайный процесс. Статистическое усреднение и усреднение во времени. Эргодичность. Измерение вероятностей и средних значений.

Корреляционные и спектральные характеристики стационарных случайных процессов. Теорема Винера—Хинчина. Белый шум и другие примеры спектров и корреляционных функций.

Модели случайных процессов: гауссовский процесс, узкополосный стационарный шум, импульсные случайные процессы, дробовой шум.

Отклик линейной системы на шумовые воздействия; функция Грина, интеграл Дюамеля. Действие шума на колебательный контур, фильтрация шума. Нелинейные преобразования (умножения частоты и амплитудное детектирование узкополосного шума).

Марковские и диффузионные процессы. Уравнение Фоккера—Планка.

Броуновское движение. Флуктуационно-диссипационная теорема. Тепловой шум; классический и квантовый варианты формулы Найквиста. Тепловое излучение абсолютно черного тела.

Случайные поля. Пространственная и временная когерентность. Дифракция случайных волн. Теорема Ван Циттерта—Цернике. Дифракция регулярной волны на случайном фазовом экране. Тепловое электромагнитное поле. Теорема взаимности.

Рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Борновское приближение, метод плавных возмущений. Рассеяние волн на шероховатой поверхности. Понятие об обратной задаче рассеяния.

Взаимодействие случайных волн. Генерация второй оптической гармоники, самофокусировка и самомодуляция частично когерентных волн. Преобразование спектров шумовых волн в нелинейных средах без дисперсии.

### 4. Принципы усиления, генерации и управления сигналами

Принцип работы, устройство и параметры лазеров (примеры: гелий-неоновый лазер, лазер на рубине, полупроводниковый лазер).

Оптические резонаторы. Резонатор Фабри—Перо, конфокальный и концентрический резонаторы. Неустойчивый резонатор. Продольные и поперечные типы колебаний. Спектр частот и расходимость излучения. Добротность.

Режимы работы лазеров: непрерывный режим генерации, режим модуляции добротности резонатора, режим синхронизации мод. Сверхкороткие импульсы. Шумы лазеров, формула Таунса и предельная стабильность частоты. Оптические компрессоры и получение фемтосекундных импульсов.

Молекулярный генератор. Квантовые стандарты частоты (времени).

Волноводы, длинные линии и резонаторы. Критическая частота и критическая длина волновода.  $TE$ -,  $TH$ - и  $TEM$ -волны. Диэлектрические волноводы. Периодические структуры и замедляющие системы. Волновое сопротивление.

Усилители СВЧ-диапазона (резонаторный, бегущей волны). Полоса пропускания усилителя бегущей волны.

Генерация волн в СВЧ-диапазоне. Принцип работы и устройство лампы бегущей и обратной волны, магнетрона и клистрона. Отрицательное дифференциальное сопротивление и генераторы СВЧ на полевых транзисторах, туннельных диодах, диодах Ганна и лавиннопролетных диодах. Эффект Джозефсона.

Взаимодействие волн пространственного заряда с акустическим полем, акустоэлектрический эффект. Принципы работы акустоэлектронных устройств (усилители ультразвука, линии задержки, фильтры, конвольверы, запоминающие устройства).

Взаимодействия света со звуком. Дифракция Брэгга и Рамана—Ната. Принципы работы устройств акустооптики (модуляторы и дефлекторы света, преобразователи свет-сигнал, акустооптические фильтры), анализаторы спектра и корреляторы.

Линейный электрооптический и магнитооптический эффекты и их применение для управления светом.

## 5. Антенны и распространение радиоволн

Вибратор Герца. Ближняя и дальняя зоны. Диаграмма направленности. Коэффициент усиления и коэффициент рассеяния антенны. Антенны для ДВ-, СВ- и СВЧ-диапазонов. Параболическая антенна. Фазированные антенные решетки. Эффективная площадь и шумовая температура приемной антенны.

Геометрическое и дифракционное приближения при анализе распространения радиоволн. Влияние неровностей земной поверхности. Земные и тропосферные радиоволны. Рассеяние и поглощение радиоволн в тропосфере. Эффект «замирания». Тропосферный волновод. Распространение радиоволн в ионосфере. Дисперсия и поглощение радиоволн в ионосферной плазме. Ионосферная рефракция. Ход лучей в подводном звуковом канале и тропосферном радиоволноводе.

Выделение сигналов на фоне помех

Задачи оптимального приема сигнала. Апостериорная плотность вероятности. Функция правдоподобия. Статистическая проверка гипотез. Критерии Байеса, Неймана—Пирсона и Вальда проверки гипотез.

Априорные сведения о сигнале и шуме. Наблюдение и сообщение. Задачи интерполяции, фильтрации и экстраполяции.

Линейная фильтрация Колмогорова—Винера на основе минимизации дисперсии ошибки. Принцип ортогональности ошибки и наблюдения. Реализуемые линейные фильтры и уравнение Винера-Хопфа. Выделение сигнала из шума. Согласованный фильтр.

Линейный фильтр Калмана—Бьюси. Стохастические уравнения для модели сообщения и шума. Дифференциальные уравнения фильтра. Уравнение для апостериорной информации в форме уравнения Риккати. Сравнение фильтрации методом Колмогорова—Винера и Калмана—Бьюси.

Основные задачи нелинейной фильтрации и синтеза систем.

## Литература

1. Карлов Н.В., Кириченко Н.А. Колебания, волны, структуры. – М.: Физматлит, 2001.
2. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. М.: Наука, 1990.
3. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Основы теории колебаний и волн. М.: Наука, 1987.
4. Моисеев Н.Н. Асимптотические методы нелинейной механики. М.: Наука, 1981.
5. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М.: Наука, 1981.
6. Цейтлин Н. М. Антенная техника и радиоастрономия. М.: Радио и связь, 1976.

7. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Радио и связь, 1991.
8. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. М.: Мир, 1987.
9. Кайно Г. Акустические волны. Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов. М.: Мир, 1990.
10. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1989.
11. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. М.: Наука, 1981.
12. Мигулин В.В., Медведев В.И., Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. Основы теории колебаний. М.: Наука, 1988.
13. Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику: От маятника до турбулентности и хаоса. М.: Наука, 1988.
14. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М.: Наука, 1974.
15. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 1: Случайные процессы. М.: Наука, 1976.
16. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2: Случайные поля. М.: Наука, 1978.
17. Гауер Дж. Оптические системы связи. М.: Радио и связь, 1989.
18. Бахрах Л.Д., Кременецкий С.Д. Синтез излучающих систем. М.: Радио и связь, 1974.
19. Балакшиев В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.
20. Качмарек Ф. Введение в физику лазеров. М.: Мир, 1981.
21. Вайнштейн Л.А., Солнцев В.А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М.: Сов. радио, 1973.
22. Зверев В.А. Радиооптика. М.: Сов. радио, 1975.
23. Букингам М. Шумы в электронных приборах и системах. М.: Мир, 1986.
24. Карлов Н. В. Лекции по квантовой электронике. М.: Наука, 1983.
25. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989.
26. Ландау Л. В., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. Т. V, Ч. 1. М.: Наука, 1999.
27. Фейнберг Е. Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М.: Наука, 1999.

## Направленность: 01.04.05 «Оптика»

1. Законы геометрической оптики. Корпускулярная теория. Волновая природа света. Квантовые свойства света. Фотоны. Энергия и импульс. Шкала электромагнитных волн.
2. Решение уравнений Максвелла для идеализированной диэлектрической среды. Поляритоны. Поляризация электромагнитной волны в материальной среде. Выражения для диэлектрической проницаемости и линейной поляризуемости. Электромагнитные волны в сегнетоэлектриках и в плазме. Мягкие моды вблизи точек структурных фазовых переходов.
3. Когерентные источники волн. Явление интерференции. Интерференционные схемы. Интерференционные светофильтры и просветляющие покрытия. Многослойные диэлектрические зеркала.
4. Дифракция на щели и круглом отверстии. Микроскоп и телескоп. Дифракционная решётка. Голографические решетки.
5. Отражение и преломление света на границе изотропных диэлектриков. Формулы Френеля. Полное внутреннее отражение. Угол Брюстера. Отражение и преломление света на границе: вакуум-фотонный кристалл.
6. Излучательная и поглощательная способность. Закон Кирхгофа. Абсолютно черное тело. Формула Рэлея-Джинса. Формула Планка. Закон Стефана Больцмана. Закон смещения Вина. Тепловое излучение фотонного кристалла.
7. Спектры излучения атомов, молекул и конденсированных сред. Электролюминесценция. Радиолюминесценция. Фотолюминесценция. Длительность люминесценции. Фосфоры. Люминесцентная спектроскопия и аналитические методы. Излучение Вавилова-Черенкова. Переходное и синхротронное излучение.
8. Инверсная заселенность и методы её создания. Принцип действия лазера. Твердотельные лазеры. Газовые лазеры. Управление параметрами лазерного излучения. Генерация сверхкоротких импульсов.
9. Спектрографы и монохроматоры. Спектрометры комбинационного рассеяния. Люминесцентные спектрометры. Люминесцентный микроскоп. Комбинационный микроскоп. Фурье-спектрометры. Акустооптический спектрометры. Полихроматоры. Приёмники излучения. Системы стробирования. Обработка спектральной информации.
10. Спонтанное и вынужденное излучение. Коэффициенты Эйнштейна. Понятие о силе осцилляторов. Переходы различной мультиплетности, правила отбора для электродипольного, магнитно-дипольного и электро-квадрупольного излучения. Ширины энергетических уровней и спектральных линий.
11. Когерентное взаимодействие. Резонансное приближение. Гамильтониан атома в электромагнитном поле. Динамическое полевое уширение. Нутации. Когерентное затухание. Метод медленных амплитуд.  $\pi/2$  и  $\pi$ -импульсы.
12. Фотонное эхо и самоиндуцированная прозрачность. Поляризация при воздействии двумя короткими резонансными импульсами. Обратимая расфазировка. Длительность сигнала эха. Синус-уравнение Гордона. Автомодельное решение.  $2\pi$ -импульс. Солитоны.
13. Спектры водорода и щелочных металлов. Уровни энергии и спектры. Тонкая структура уровней. Вакуумный сдвиг. Спектральные серии щелочных металлов. Квантовый дефект. Дублетная структура уровней.
14. Приближение центрального поля. Электростатическое и магнитное взаимодействие электронов. Типы связей. LS-связь. Определение набора термов для конфигураций с неэквивалентными и эквивалентными электронами. Исходные термы. Мультиплетная структура термов. Связь типа  $jj$ , связь типа  $jl$ .
15. Двухатомные молекулы. Адиабатическое приближение Борна-Оппенгеймера для описания ядерной и электронных подсистем молекул. Кривые потенциальной энергии и электронные термы молекулы (связанные и отталкивательные). Структура колебательно-вращательных уровней энергии. Мультиплетные термы: случаи a, b, c и d. Симметрия

молекулярных термов. □-удвоение. Преддиссоциация. Излучение двухатомных молекул (электронные, колебательные и вращательные спектры). Правила отбора. Принцип Франка –Кондона. Изотопический эффект.

16. Понятие низкотемпературной плазмы, задачи диагностики. Равновесная плазма: распределения частиц по энергиям, плотности нейтральных и заряженных частиц, тепловое излучение. Модели равновесия и связанные с ними параметры: локальное термическое равновесие, частичное локальное термическое равновесие (ЧЛТР), корональная модель (МКР), столкновительно–радиационная модель. Оптический спектр и плазменные параметры.
17. Плотная высокотемпературная плазма и инерциальный управляемый синтез. Сечения термоядерных реакций. Инерциальный термоядерный синтез. Пинч эффект. Адиабатическое сжатие. Равновесие Беннета. Связь тока и температуры плазмы пинча.
18. Ускорители заряженных частиц. Классификация. Применения. Сильноточные ускорители. Заряженная плазма. Основные понятия и характерные значения. Способы описания. Необходимость самосогласованного подхода.
19. Сильноточные электронные и ионные ускорители. Узлы сильноточных ускорителей. Схемы диодов для формирования пучков с различными параметрами. Физические модели. Основные факторы, влияющие на характеристики диодов и выбор моделей.
20. Физические процессы на поверхности. Типы эмиссии: термоэлектронная, автоэлектронная, взрывная электронная, фотоэлектронная, вторичная электронная эмиссии, эмиссия с поверхности сегнетоэлектриков.
21. Сильноточные пучки в газе и плазме. Условия возникновения токовой нейтрализации пучка в плазме. Характерные масштабы процессов. Нестационарные явления при инжекции пучка в плазму. Нестационарная ионизация при инжекции пучка в нейтральный газ. Физические процессы при взаимодействии пучка с нейтральным газом. Зарядовая и токовая нейтрализация пучка в газе.
22. Монохроматическое электромагнитное излучение релятивистских частиц. Условие черенковского резонанса. Длина формирования. Излучение релятивистского осциллятора. Нормальный и аномальный эффект Доплера. Направленность и частотный спектр излучения релятивистских частиц в распределенных волноводных структурах.
23. Излучение равномерно движущегося заряда. Излучение Вавилова-Черенкова в однородной диспергирующей среде. Излучение в замагниченном плазменном волноводе. Переходное излучение. Собственные волны в периодических структурах и их возбуждение движущимся зарядом. Черенковское излучение в периодических структурах.
24. Лазеры на свободных электронах. ЛСЭ – генератор: Структура поля в оптическом резонаторе. Коэффициент усиления и порог самовозбуждения. Установившиеся колебания и выходная мощность. ЛСЭ – усилитель: Насыщение и дифракционные эффекты. Волноводные свойства электронного пучка. Режим усиления спонтанного излучения в непрерывном пучке и в коротком сгустке.

### Литература

1. Г.С. Ландсберг. «Оптика». Издательство «Наука», Москва, 1978 г.
2. С.А. Ахманов, С.Ю. Никитин. «Физическая оптика». Издательство МГУ, Москва, 1998 г.
3. Р. Дитчберн. «Физическая оптика». Издательство «Наука», Москва, 1965 г.
4. И.И. Собельман. Введение в теорию атомных спектров. М., «Наука», (1977).
5. М.А. Ельяшевич Атомная и молекулярная спектроскопия. Издание второе. Эдиториал УРСС Москва 2001.
6. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Квантовая механика. М., Наука, (1974).
7. Г.Герцберг. Атомные спектры и строение атомов. М.: ИЛ, 279с., (1948).
8. Г. Герцберг. Спектры и строение двухатомных молекул. М. ИЛ, (1949).

9. Г.Герцберг. Спектры и строение простых свободных радикалов. М.: Мир, 208с., (1974).
10. Л.А. Вайнштейн, И.И. Собельман, Е.А.Юков. Возбуждение атомов и уширение спектральных линий. М., Наука, (1979).
11. Ярив А. Квантовая электроника. М., Советское радио, 1980.
12. Звелто О. Принципы лазеров. М., Мир, 1984.
13. Акулин В.М., Карлов Н.В. Интенсивные резонансные взаимодействия в квантовой электронике. М., Наука, 1987.
14. Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике. М., Наука, 1988.
15. Короленко П.В. Взаимодействие излучения с веществом. М., Издательство Московского университета. 1992
16. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводные тома I-IV. Под ред. В.Е.Фортова. М.: Наука, 2000.
17. В.Н. Очкин, Спектроскопия низкотемпературной плазмы, М., Физматлит, 472с., 2006.
18. Арцимович Л.А. Управляемые термоядерные реакции. -М: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1961. - 468 с.
19. Liberman M.A. Physics of high-density Z-pinch plasmas/ M.A.Liberman,A.Toor, J.S.De Groot, R. B. Spielman.- New York: Springer Verlag, 1998.- 277 p.
20. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. - М.: Наука, 2004 - 704 с.
21. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. Москва, Советское радио, 1974.
22. Королев Ю.В., Месяц Г.А. Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде. Новосибирск, Наука (Сибирское отделение), 1982.
23. Лебедев А.Н., Шальнов А.В. Основы физики и техники ускорителей, Москва, Энергоатомиздат, 1991.
24. А.Н.Диденко, В.П.Григорьев, Ю.П.Усов. Мощные электронные пучки и их применение. Москва, Атомиздат, 1977.
25. Миллер Р. Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц. Москва, Мир, 1984.
26. Лоусон Дж. Физика пучков заряженных частиц. Москва, Мир, 1980.
27. Рухадзе А.А., Богданкевич Л.С., Росинский С.Е., Рухлин В.Г. Физика сильноточных релятивистских электронных пучков. Москва, Атомиздат, 1980.
28. Незлин М.В. Динамика пучков в плазме. Москва, Энергоиздат, 1982.
29. Л.Д.Ландау и Е.М. Лифшиц. Теория поля. М. Любое издание
30. Л.Д.Ландау и Е.М. Лифшиц. Электродинамика сплошных сред. М. Любое издание
31. Н.В. Карлов и Н.А. Кириченко. Колебания, волны, структуры. М. Физматлит 2001
32. М.В. Кузелев, А.А. Рухадзе, П.С. Стрелков. Плазменная СВЧ релятивистская - электроника. Из-во МГТУ им. Н.Э. Баумана 2002.
33. Месяц Г.А. Взрывная электронная эмиссия. Москва, Физматлит, 2011.

## Направленность: 01.04.07 «Физика конденсированного состояния»

### 1. Силы связи в твердых телах

Электронная структура атомов. Типы сил связи в конденсированном состоянии: ван-дер-ваальсова связь, ионная связь, ковалентная связь, металлическая связь. Примеры кристаллических структур, отвечающих плотным упаковкам шаров: простая кубическая, ОЦК, ГЦК, ГПУ.

### 2. Симметрия твердых тел

Кристаллические и аморфные твердые тела. Трансляционная инвариантность. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Ячейка Вигнера – Зейтца. Решетка Браве. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна. Элементы симметрии кристаллов: повороты, отражения, инверсия, инверсионные повороты, трансляции. Операции (преобразования) симметрии.

### 3. Дефекты в твердых телах

Точечные дефекты, их образование и диффузия. Вакансии и межузельные атомы. Линейные дефекты. Краевые и винтовые дислокации. Роль дислокаций в пластической деформации.

### 4. Дифракция в кристаллах

Распространение волн в кристаллах. Дифракция рентгеновских лучей, нейтронов и электронов в кристалле. Упругое и неупругое рассеяние, их особенности. Брэгговские отражения. Атомный и структурный факторы.

### 5. Колебания решетки

Колебания кристаллической решетки. Уравнения движения атомов. Простая и сложная одномерные цепочки атомов. Закон дисперсии упругих волн. Акустические и оптические колебания. Квантование колебаний. Фононы.

### 6. Тепловые свойства твердых тел

Теплоемкость твердых тел. Решеточная теплоемкость. Электронная теплоемкость. Температурная зависимость решеточной и электронной теплоемкости. Классическая теория теплоемкости. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы в классической физике. Границы справедливости классической теории. Квантовая теория теплоемкости по Эйнштейну и Дебаю. Предельные случаи высоких и низких температур. Температура Дебая.

### 7. Электронные свойства твердых тел

Электронные свойства твердых тел: основные экспериментальные факты. Проводимость, эффект Холла, термоЭДС, фотопроводимость, оптическое поглощение. Трудности объяснения этих фактов на основе классической теории Друде. Основные приближения зонной теории. Граничные условия Борна – Кармана. Теорема Блоха. Блоховские функции. Квазиимпульс. Зоны Бриллюэна. Энергетические зоны. Брэгговское отражение электронов при движении по кристаллу. Приближение сильносвязанных электронов. Связь ширины разрешенной зоны с перекрытием волновых функций атомов. Закон дисперсии. Тензор обратных эффективных масс. Приближение почти свободных электронов. Брэгговские отражения электронов.

Заполнение энергетических зон электронами. Поверхность Ферми. Плотность состояний. Металлы, диэлектрики и полупроводники. Полуметаллы.

### 8. Магнитные свойства твердых тел

Намагниченность и восприимчивость. Диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики. Законы Кюри и Кюри – Вейсса. Парамагнетизм и диамагнетизм электронов проводимости. Природа ферромагнетизма. Фазовый переход в ферромагнитное состояние. Роль обменного взаимодействия. Точка Кюри и восприимчивость ферромагнетика. Ферромагнитные домены. Причины появления доменов. Доменные границы (Блоха, Нееля). Антиферромагнетики. Магнитная структура. Точка Нееля. Восприимчивость антиферромагнетиков. Ферримагнетики.

- Движение магнитного момента в постоянном и переменном магнитных полях. Электронный парамагнитный резонанс. Ядерный магнитный резонанс.
9. Оптические и магнитооптические свойства твердых тел  
Комплексная диэлектрическая проницаемость и оптические постоянные. Коэффициенты поглощения и отражения. Соотношения Крамерса—Кронига. Поглощения света в полупроводниках (межзонное, примесное поглощение, поглощение свободными носителями, решеткой). Определение основных характеристик полупроводника из оптических исследований. Магнитооптические эффекты (эффекты Фарадея, Фохта и Керра). Проникновение высокочастотного поля в проводник. Нормальный и аномальный скин-эффекты. Толщина скин-слоя.
10. Сверхпроводимость  
Сверхпроводимость. Критическая температура. Высокотемпературные сверхпроводники. Эффект Мейснера. Критическое поле и критический ток. Сверхпроводники первого и второго рода. Их магнитные свойства. Вихри Абрикосова. Глубина проникновения магнитного поля в образец. Эффект Джозефсона. Куперовское спаривание. Длина когерентности. Энергетическая щель.

### Литература

1. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.
2. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. Т. I, II. М.: Мир, 1979.
3. Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела. М.: Мир, 1969.
4. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М.: Мир, 1974.
5. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. М.: Высш. шк., 2000.
6. Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1971.
7. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1979.
8. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводимости. МЦ НМО, М., 2000.
9. Н.Б.Брандт, В.А.Кульбачинский, Квазичастицы в физике конденсированного состояния, М.: Физматлит, 2005.

## Направленность: 01.04.08 «Физика плазмы»

### 1. Термодинамика плазмы

Понятие плазмы, квазинейтральность, микрополя, дебаевский радиус, идеальная и неидеальная плазма. Условие термодинамического равновесия, термическая ионизация, формула Саха, корональное равновесие, снижение потенциала ионизации. Вырождение плазмы, статистика Больцмана и Ферми—Дирака, модель Томаса—Ферми.

### 2. Элементарные процессы

Столкновения заряженных частиц, дальное действие, частоты столкновений, столкновения электронов с атомами (упругие и неупругие), столкновения тяжелых частиц. Ионизация, рекомбинация, перезарядка и прилипание. Возбуждение и диссоциация молекул электронным ударом.

### 3. Физическая кинетика

Уравнения Больцмана и Власова, интеграл столкновений, время максвеллизации и скорость выравнивания температур различных компонент плазмы. Скорость ионообразования и рекомбинации электронов и ионов, образование и разрушение возбужденных атомов (ионов). Явления переноса в плазме, электропроводность, диффузия и теплопроводность частиц при наличии и отсутствии магнитного поля. Кинетика возбужденных молекул в плазме.

### 4. Динамика заряженных частиц в электрическом и магнитном полях

Движение в скрещенных электрическом и магнитном полях. Дрейфовое приближение, разновидности дрейфового движения. Заряженная частица в высокочастотном поле. Понятие адиабатического инварианта.

### 5. Магнитная гидродинамика плазмы

Уравнения движения плазмы в магнитном поле, проникновение магнитного поля в плазму, вмороженность магнитного поля. Законы сохранения в идеальной одножидкостной МГД. Двухжидкостное приближение.

### 6. Неустойчивость плазмы

Равновесные конфигурации плазмы в магнитной гидродинамике, пинч. Неустойчивость плазмы, виды неустойчивости, перегревная и ионизационная неустойчивости. Энергетический принцип МГД-устойчивости.

### 7. Колебания и волны в плазме

Основные типы колебаний и волн в плазме: ленгмюровские электроны и ионные, электромагнитные, ионно-звуковые, магнитозвуковые, альфвеновские. Показатель преломления плазмы, пространственная и временная дисперсия, фазовая и групповая скорости плазменных волн.

### 8. Взаимодействие заряженных частиц с волнами в плазме

Возбуждение и затухание волн в плазме, черенковское излучение, затухание Ландау. Раскачка плазменных колебаний пучками. Квазилинейное приближение.

### 9. Взаимодействие электромагнитных волн с плазмой

Распространение электромагнитных волн в неоднородной плазме, геометрическая оптика, плазменный резонанс, циклотронный резонанс, линейная трансформация. Основные нелинейные процессы взаимодействия волн, неустойчивость плазмы в сильном электромагнитном поле. Рассеяние и трансформация волн.

### 10. Излучение плазмы

Элементарные радиационные процессы, интенсивность спектральных линий, сплошные спектры, вынужденное испускание. Пробеги излучения, перенос излучения в среде, оптически прозрачная и непрозрачная плазма, лучистая теплопроводность.

### 11. Диагностика плазмы

Зондовые методы, оптические методы, СВЧ-методы, корпускулярные методы, лазерное рассеяние, магнитные измерения.

12. Электрический разряд в газах  
Основные виды разряда: тлеющий разряд, искра, электрическая дуга, ВЧ-, СВЧ- и оптический разряд. Условия стационарности разряда, излучающий разряд в плотной плазме, плазменно-пучковый разряд.
13. Гидродинамические и тепловые явления в плазме  
Ударные волны в плазме, скачок уплотнения, релаксационный слой, излучение ударных волн, нелинейные волны теплопроводности. Токовые слои.
14. Прикладные проблемы физики плазмы  
Управляемый термоядерный синтез, магнитное удержание и нагрев плазмы в магнитных ловушках и инерциальных системах.  
Геофизические и астрофизические плазменные явления — ионосфера Земли, межпланетная плазма, звезды.  
Плазменные источники излучения, плазменная СВЧ-электроника.  
Преобразование тепловой энергии в электрическую: МГД-преобразователи, тепловые преобразователи.  
Взаимодействие плазмы с поверхностью твердых тел. Плазменные технологии.

### Литература

1. Райзер Ю.П., Физика газового разряда. Долгопрудный: Издательский дом Интеллект, 2009. - 736 с.
2. Смирнов Б.М., Свойства газоразрядной плазмы. Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2010. – 363 с.
3. Энциклопедия низкотемпературной плазмы, под ред. В.Е. Фортова, М.: Наука, 2000 - 2008.
4. Морозов А.И., Введение в плазмодинамику, М.: Физматлит, 2006. – 576 с.
5. Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т., Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М.: Наука, 1982. - 376 с.
6. Фортов В.Е., Храпак А.Г., Якубов И.Т., Физика неидеальной плазмы, М.: Физматлит, 2004. - 528 с.
7. Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров С.А., Основы физики плазмы, Санкт-Петербург: Лань, 2011. - 448 с.
8. Ж.А. Биттенкорт. Основы физики плазмы. М. «Физматлит», 2009
9. Л.А.Арцимович, Р.З.Сагдеев. Физика плазмы для физиков. Атомиздат, 1979.
10. Б.Б.Кадомцев. Коллективные явления в плазме. “Наука”, 1988.
11. Ф.Чен. Введение в физику плазмы. “МИР”, 1987.
12. Д.А.Франк-Каменецкий. Лекции по физике плазмы. Атомиздат, 1968.
13. А.С.Кингсеп. Введение в нелинейную физику плазмы. Изд-во МФТИ, 1996.
14. А.И.Ахиезер, И.А.Ахиезер, Половин, Ситенко, Степанов. Электродинамика плазмы. “Наука”, 1974
15. Основы физики плазмы (в 2 томах), под ред. А.А.Галеева Энерготомиздат, Т.1 – 1983; т.2 – 1984.
16. А.Ф.Александров, Л.С.Богданкевич, А.А.Рухадзе. Колебания и волны в плазменных средах. Изд-во МГУ, 1990.
17. С.Ишимару. Основные принципы физики плазмы. Атомиздат, 1975
18. С.Б.Пикельнер. Основы космической электродинамики. “Наука”, 1966.
19. Ф.Клемоу, Дж.Доэрти. Электродинамика частиц и плазмы. “МИР”, 1996.
20. Б.А.Трубников. Теория плазмы. Энергоатомиздат, 1996.
21. Основы физики плазмы. Т.1, 2 и доп. к т. 2. / Под ред. Р.З. Сагдеева, М.Н. Розенблюта. М.: Энергоатомиздат, 1984—1985.
22. Александров А.Ф., Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А. Основы электродинамики плазмы. М.: Высш. шк., 1988.

23. Трубников Б.А. Теория плазмы: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1996.
24. Лукьянов С.Ю., Ковальский Н.Г. Горячая плазма и управляемый термоядерный синтез: Учеб. для вузов. М.: МФТИ, 1999.
25. Кадомцев Б.Б. Коллективные явления в плазме. М.: Наука, 1988.
26. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
27. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т. М.: На ука. Т. 3: Квантовая механика Т. 5: Статистическая физика. Т.7: Электродинамика сплошных сред. Т. 10: Физическая кинетика.
28. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2000.
29. Силин В.П. Введение в кинетическую теорию газов. М.: Наука, 1998.
30. Методы исследования плазмы / Под ред. В. Лохте-Хольгрена. М.: Мир, 1971.
31. Диагностика плазмы / Под ред. Р. Хаддлстоуна, С. Леонарда. М.: Мир, 1967.
32. Веденов А.А. Задачник по физике плазмы. М.: Атомиздат, 1981.
33. Генин Л.Г., Свиридов В.Г. Гидродинамика и теплообмен МГД-течений в каналах. М.: Изд-во МЭИ, 2001.

## 1. КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ПОЛЯ

### Элементарные частицы и поля

Типы фундаментальных взаимодействий: гравитационное, электромагнитное, сильное, слабое. Классификация частиц: адроны и лептоны, фотон и промежуточные бозоны. Классификация адронов, барионы и мезоны. Квантовые числа, характеризующие элементарные частицы. Аддитивные и мультипликативные квантовые числа. Спин, чётность  $P$ ,  $C$  и  $T$ . Изотопическая инвариантность сильных взаимодействий. Понятие об изотопспине. Соотношения между амплитудами различных процессов. Кинематические ограничения в реакциях взаимодействия элементарных частиц.  $SU(3)$ -инвариантность сильных взаимодействий. Странность и  $SU(3)$ -мультиплеты элементарных частиц. Составная структура адронов. Модель дробнозарядных кварков Гелл-Манна - Цвейга. Три поколения лептонов и кварков. Обобщение формулы Гелл-Манна - Нишиджимы для квантовых чисел  $c, b$  и  $t$ .  $S$ -матрица. Связь вероятности процесса с матричными элементами  $S$ -матрицы. Правила Фейнмана. Фейнмановский пропагатор, калибровочная инвариантность. Комптоновское рассеяние. Формула Клейна-Нишимы для сечения. Рассеяние  $ee \rightarrow ee$  в КЭД. Четырёх-фермионное слабое взаимодействие.  $\beta$ -распад нейтрона и гиперонов. Основы электрослабой теории Вайнберга-Салама. Спонтанное нарушение симметрии. Возникновение масс калибровочных бозонов  $W$  и  $Z$ . Нейтральные токи. Свойства  $W$ ,  $Z$ -бозонов, распады  $W \rightarrow l\bar{\nu}$  и  $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$ . Число сортов нейтрино из ширины распада  $Z$ -бозонов в невидимые моды. Хиггсовский бозон и его свойства. Константы связи и ширина распада  $H \rightarrow ll$ . Бегущие константы связи фундаментальных взаимодействий  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ . Основные идеи великого объединения ( $GUT$ ).

### Квантовые поля

Введение (лагранжев формализм, симметрии, теорема Нетер). Действительное свободное скалярное поле. Лагранжиан, уравнения поля, свойства классических решений. Комплексное скалярное поле. Массивное векторное поле. Лагранжиан и решения. Особенности электромагнитного поля. Поле Дирака. Построение уравнений движения,  $\gamma$ -матрицы, релятивистская ковариантность, спинорное представление группы Лоренца. Свойства решений. Лагранжев формализм. Безмассовое спинорное поле. Принципы квантования волновых полей. Каноническое квантование. Операторное квантование. Представление Шредингера и Гейзенберга. Релятивистская схема квантования. Перестановочные соотношения. Квантование по Ферми-Дираку и Бозе-Эйнштейну. Амплитуда состояния в фоковском представлении. Квантование свободного скалярного поля. Квантование свободного массивного векторного поля. Особенности квантования электромагнитного поля. Квантование свободного поля Дирака. Зарядовое сопряжение.  $CPT$ -теорема. Лагранжев формализм в теории взаимодействующих полей. Принципы построения лагранжианов. Калибровочная симметрия. Механизм Хиггса. Квантование взаимодействующих полей. Представление взаимодействия.  $S$ -матрица,  $T$ -произведение операторов, свойства  $S$ -матрицы. Теоремы Вика. Функции Грина свободных полей. Диаграммы Фейнмана. Диаграммы Фейнмана в КЭД и  $\phi^4$ -теории. Вычисление вероятностей переходов.

Функции Грина в квантовой теории поля. Метод производящих функционалов. Методы вычисления фейнмановских интегралов.  $\gamma$ -представление и метод фейнмановских параметров. Ультрафиолетовые расходимости петлевых интегралов. Методы регуляризации. Регуляризация Паули-Вилларса. Размерная регуляризация. Спиноры и  $\gamma$ -матрицы в пространстве произвольной размерности. Примеры вычислений фейнмановских интегралов. Введение в теорию перенормировок. Стандартная схема перенормировки. Схема вычитаний на массовой поверхности в скалярной теории (однопетлевое приближение). БПХ-схема перенормировок. Введение в перенормировку многопетлевых диаграмм. Метод подсчёта степеней расходимостей. Перенормируемые и неперенормируемые теории. Схема минимальных вычитаний. Особенности схемы минимальных вычитаний. Перенормировка в

квантовой электродинамике. Калибровочная инвариантность и перенормировки. Тожества Уорда. Вычисление формфакторов электрона. Ренормализационная группа. Ренормгрупповое уравнение. Вычисление ренормгрупповых коэффициентов. Применения ренормгруппы. Анализ асимптотического поведения функций Грина. Теорема Вайнберга. Ведущие логарифмы. Эффективная масса и константа связи. Разновидности высокоэнергетического и низкоэнергетического поведения. Асимптотическая свобода. Спектральные представления функций Грина. Оптическая теорема. Представление Челлена-Лемана. Перенормировка составных операторов. Аномалии в квантовой теории поля. Аксиальная аномалия.

## 2. ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И КОСМОЛОГИЯ

### Классическая теория

Основы теории групп и алгебр Ли. Неабелевы глобальные и калибровочные симметрии. Спонтанное нарушение симметрии. Явление Хиггса в неабелевых калибровочных теориях. Стандартная Модель физики элементарных частиц.

### Квантовая теория

Функциональный интеграл в квантовой механике. Свойства функционального интеграла. Квантовая теория поля в функциональной формулировке. Квантование калибровочных полей в функциональной формулировке. Перенормировка калибровочных теорий. *BRST*-симметрии и тождества Уорда.

### Космология

Ранняя Вселенная и наблюдательные данные. Модель горячей Вселенной (метрика Робертсона-Уолкера, уравнение Фридмана, история эволюции горячей Вселенной). Инфляция. Разогрев Вселенной после инфляции. Фазовые переходы. Бариогенезис. Реликтовые нейтрино. Нуклеосинтез. Реликтовое тепловое излучение. Формирование крупномасштабной структуры Вселенной.

## 3. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

### Структура ядра

Основные свойства атомных ядер. Принципы симметрии в физике атомного ядра. Ядерные силы. Модели ядер. Эффективное нуклон-нуклонное взаимодействие в ядерном веществе. Ненуклонные степени свободы ядра. Дельта-изобара в ядре. Мезонные токи. Простейшие ядерные превращения. Термодинамика ядерного вещества. Фазовые переходы.

### Ядерные реакции

Постановка задачи о рассеянии частиц. Поперечное сечение взаимодействия. Центально-симметричный потенциал. Парциальные амплитуды рассеяния. *S*-матрица. Борновское приближение. Формула Резерфорда. Рассеяние медленных частиц. Неупругие столкновения адронов со сложными ядрами. Каналы реакции. Основы теории многократного рассеяния на составных рассеивателях. Дифракционное взаимодействие быстрых адронов и ядер с ядрами. Модель Глаубера-Ситенко. Ядерные реакции, протекающие через стадию составного ядра, и прямые процессы. Резонансы в ядерных взаимодействиях. Представление об описании мезон-ядерных взаимодействий в рамках квантовой теории многих тел. Метод функций Грина. Рассеяние адронов на малонуклонных системах. Спин-орбитальное взаимодействие налетающих нуклонов с ядром-мишенью. Спиновая матрица плотности. Исследование структуры ядер с помощью рассеяния электронов. Рассеяние нейтрино на ядрах. Фотоядерные реакции. Реакции выбивания нуклонов из ядер под действием гамма-квантов, электронов и адронов. Исследования на пучках нестабильных ядер. Ядро-ядерные взаимодействия при промежуточных и высоких энергиях. Взаимодействие нестабильных частиц и антинуклонов с ядрами. Адронные атомы. Гиперядра. Астрофизические приложения. Основы релятивистской ядерной физики.

### Экспериментальная ядерная физика

Основные физические величины для описания ядерных процессов. Методы спектрометрии заряженных частиц. Метод компенсации дисперсии при создании спектрометров. Черенковские детекторы полного поглощения. Пороговые черенковские детекторы и кольцевые черенковские детекторы. Спектрометрия нейтральных мезонов. Детектирование и спектрометрия мюонов высокой энергии. Методы получения пучков поляризованных частиц. Поляризованные и ориентированные ядерные мишени. Установки для исследования рождения пи-мезонов. Методика исследования рассеяния пи-мезонов ядрами. Временные особенности при больших интенсивностях пучков. Установки с высокой геометрической эффективностью. Создание установок для изучения столкновений релятивистских ядер.

Ядерные реакции на пучках гамма-квантов. Методы монохроматизации фотонных пучков. Взаимодействие электронов с ядрами при средних и высоких энергиях. Определение радиусов ядер, плотности и формы ядер. Резонансные ядерные реакции на пучках протонов промежуточных энергий. Взаимодействие пи-мезонов с ядрами. Изучение пион-нуклонных резонансов в ядрах. Реакции с поляризованными частицами. Методы получения пучков поляризованных протонов и дейтронов. Методы получения поляризованных мишеней. Особенности изучения процессов с испусканием нейтральных пи-мезонов и -мезонов. Введение в физику взаимодействия релятивистских ядер. Рождение странных частиц при столкновениях ядер. Подпороговое рождение антипротонов. Рождение векторных мезонов при столкновении ядер высокой энергии. Программа поиска кварк-глюонной плазмы на ускорителе LHC, установка ALICE.

### Метод Монте-Карло в ядерной физике

Введение в метод Монте-Карло. Непрерывные и дискретные случайные величины. Методы моделирования случайных величин с заданным законом распределения. Вычисление интегралов методом Монте-Карло. Некоторые типичные задачи моделирования в ядерной физике. Регистрация результатов моделирования. Моделирование многочастичных процессов.

## 4. НЕЙТРИННАЯ ФИЗИКА И АСТРОФИЗИКА

### Физика нейтрино

Уравнение Дирака. Классическая теория слабого взаимодействия. Взаимодействия нейтрино с ядрами. Квазиупругие взаимодействия нейтрино с нуклонами. Свойства нейтрино. Неупругие взаимодействия нейтрино с нуклонами. Нейтрино в калибровочных теориях слабого взаимодействия. Нейтрино и космология. Экспериментальные поиски осцилляций нейтрино. Нейтрино в атмосфере. Внеатмосферные источники нейтрино высоких энергий. Термоядерные реакции в недрах Солнца и нейтрино. Нейтрино от вспышек Сверхновых. Исследование свойств нейтрино в ускорительных экспериментах. Исследование свойств элементарных частиц в экспериментах на адронных и электронных коллайдерах.

### Методы детектирования космических нейтрино сверхвысоких энергий (частицы и астрофизика)

Возможные механизмы ускорения частиц до сверхвысоких энергий. Энергетические спектры и химсостав первичных космических лучей. Сверхтяжёлые частицы (максимоны), мини-чёрные дыры, космические стринги как возможные источники космических лучей сверхвысоких энергий (топологические дефекты). Возможная верхняя граница энергетического спектра. Астрофизические источники гамма-квантов высоких энергий. Лебедь X-3; гамма-кванты и нейтроны от Лебеда X-3. «Fly's eye» эксперимент. Атмосферные мюоны и нейтрино; особенности их спектров. «Прямые» мюоны и нейтрино от распада чармированных частиц. Астрофизические источники нейтрино.

Сильные, электромагнитные, слабые взаимодействия. Распады частиц. Сечения взаимодействий мюонов и нейтрино.

Глубокоподземные эксперименты в Южной Африке, Индии, Италии, Японии. Баксанский нейтринный телескоп. Поиск нейтринных осцилляций в подземных экспериментах.

«Стандартная модель» ранней Вселенной. Расширение Вселенной. Модель Фридмана. Критическая плотность.

Модель «Великого объединения» сильного (цветового), электромагнитного и слабого взаимодействий. Масштаб объединения. Сверхтяжёлые калибровочные бозоны. Распад нуклона. Магнитный монополь. Реликтовые частицы и их поиск. Проблема «скрытой» массы Вселенной.

Глубоководное детектирование нейтрино (проекты NESTOR, Байкал). Акустический метод детектирования нейтрино супервысоких энергий (проект САДКО). Радиоволновой метод детектирования нейтрино (проект RAMAND в Антарктиде).

## 5. УСКОРЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

### Основы физики и техники ускорения заряженных частиц

Физические основы ускорения заряженных частиц. Основные типы ускорителей и их особенности. Основы электродинамики ускоряющих систем. Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях. Эффекты пространственного заряда в линейных ускорителях. Динамика частиц в циклических ускорителях. Радиационные эффекты в циклических ускорителях электронов. Пространственный заряд в циклических ускорителях. Магниты ускорителей и их питание. Ускоряющие системы циклических ускорителей. Применение сверхпроводимости. Накопительные установки. Инжекция и вывод частиц. Диагностика пучка и системы управления ускорителями. Применение ускорителей для физических исследований. Проекты ускорителей нового поколения. Новые (коллективные) методы ускорения.

### Высокочастотная электродинамика

Уравнения Максвелла. Монохроматические поля и комплексные амплитуды. Волновое уравнение. Потенциалы электромагнитного поля. Плоские волны. Теория скин-эффекта. Граничное условие Шукина-Леонтовича. Цилиндрические волны. Волноводы прямоугольного и круглого сечений. Волноводы с двухсвязной формой поперечного сечения. Потери в волноводах. Медленные волны. Диафрагмированный волновод. Резонаторы простых форм. Общая теория резонаторов. Сферические волны и их возбуждение; лемма Лоренца. Функция Грина и интегрирование неоднородных уравнений Максвелла. Возбуждение волноводов и резонаторов. Матрица рассеяния. Неоднородности в волноводах и резонаторах. Методы теории функций комплексного переменного в электродинамике (метод Винера-Хопфа-Фока, задача Римана-Гильберта).

### Линейные ускорители

Области применения линейных ускорителей. Общий обзор истории развития линейных резонансных ускорителей и их системы. Источники заряженных частиц. Ускоряющая система. Ускоряющие системы с бегущей и стоячей волной. Сверхпроводящие ускоряющие структуры. Системы ВЧ питания ЛУ. Генераторы и усилители СВЧ. Клистроны Фокусирующая система. Вакуумная система. Сильноточные ЛУ для нейтронных источников. Применение ускорителей в ядерной энергетике. Метод встречных пучков. Линейные коллайдеры. ERL.

## 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЩЕСТВА

### Нейтронные источники и исследования на нейтронных пучках

Нейтронно-протонная модель ядра. Нейтроны и космогония. Нейтрон и «Великое объединение». Исследование свойств ядер с помощью нейтронов. Свойства нейтрона. Ядерные реакции с испусканием нейтронов. Энергетические спектры нейтронов. Замедление нейтронов. Диффузия нейтронов. Деление тяжёлых ядер. Цепная реакция деления. Каскадно-испарительный процесс. Канадский проект. Фотоделение как интенсивный источник

нейтронов. Развал дейтонов на лёгких ядрах как источник нейтронов. Реакция термоядерного синтеза. Техника по времени пролёта в нейтронных исследованиях. Отечественное направление в создании интенсивных импульсных источников нейтронов. Импульсные источники медленных нейтронов на основе ускорителей протонов и отрицательных ионов водорода. Первое и второе поколения импульсных источников нейтронов. Гибридные схемы источников на основе бустеров. Гигантские одиночные импульсы нейтронов. Практическое применение нейтронов. Основы экспериментальной техники. Допустимые дозы излучений.

#### Взаимодействие излучения с веществом

Прохождение тяжёлых частиц через вещество: соотношение между пробегом и энергией; связь между потерями энергии и ионизацией; разброс пробегов, определение среднего пробега по экстраполированному пробегу; упругое и неупругое рассеяние тяжёлых частиц атомами.

Прохождение  $\alpha$ -частиц через вещество: потери энергии; интенсивность и угловое распределение излучения, испускаемого быстрыми электронами; вторичные электроны; упругое рассеяние электронов атомами; многократное рассеяние заряженных частиц; прохождение через фольги, измерение энергии.

Прохождение  $\gamma$ -излучения через вещество: фотоэффект; комптоновское рассеяние; образование пар; полное сечение поглощения; другие эффекты.

#### Радиационные физические исследования

Кристаллическая структура твердых тел. Точечные и протяженные дефекты Энергия образования дефектов. Основные представления о взаимодействии ядерного излучения с веществом. Первичные процессы. 3. Передачи энергии атомам облучаемой среды. Каскады атомных смещений. Скорость радиационного повреждения в металлах, облучаемые в пучках протонов и нейтронов. Неравновесные растворы точечных дефектов в облучаемых металлах. Образование простейших комплексов. Проблема зарождения и роста кластеров. Кинетика диффузного распада пересыщенных твердых растворов. Вакансионное распухание металлов под облучением. Кинетика образования дислокационных петель в облучаемых металлах. Стохастические флуктуации в открытой диссипативной системе радиационных дефектов. Процессы самоорганизации в металлах и сплавах под облучением. Решетка пор в облучаемых металлах. Процессы радиационно-индуцированной сегрегации в сплавах. Фазовые превращения в сплавах под облучением. Численные методы моделирования радиационного повреждения. Проблемы радиационного материаловедения ядерных и термоядерных реакторов. Ключевые проблемы атомной энергетики. Возможности изучения на стендах и ядерных исследовательских установках.

#### Нейтронные методы исследования конденсированных сред

Физические предпосылки использования нейтронов в физике конденсированного состояния. Особенности взаимодействия нейтронов с веществом, волновые свойства нейтрона. Ядерное и магнитное рассеяние нейтронов. Дважды дифференциальное сечение рассеяния нейтронов. Когерентное и некогерентное рассеяние нейтронов. Корреляционные функции. Преимущества и недостатки рассеяния нейтронов по сравнению с другими видами излучений и частиц (электроны, фотоны, мюоны). Физические задачи, решаемые с помощью рассеяния нейтронов. Особенности источников нейтронов, используемых для исследования конденсированного состояния. Формирование пучков неполяризованных и поляризованных нейтронов. Монокристалльные и времяпролетные установки. Основные типы нейтронных приборов: дифрактометры, спектрометры неупругого рассеяния нейтронов, рефлектометры, установки для малоуглового рассеяния, спин-эхо спектрометры. Основные понятия физики конденсированного состояния, важные для нейтронных исследований: Кристаллические структуры. Прямая и обратная решетка. Квазичастицы и элементарные возбуждения в конденсированных средах. Методы исследования квазичастиц. Условия на образце в нейтронных исследованиях конденсированных сред. Методика получения высоких давлений, низких и высоких температур, высоких магнитных полей. Структурная и магнитная нейтронная дифрактометрия. Экспериментальная техника для нейтронной дифракции.

Методы анализа нейтронограмм. Нейтронная спектроскопия. Основы техники эксперимента на спектрометрах по времени пролета. Трехосный кристаллический спектрометр: универсальный инструмент исследования спектров элементарных возбуждений кристаллов. Нейтронная спектроскопия с высоким энергетическим разрешением. Использование нейтронов для изучения атомных колебаний. Определение функции плотности фононных состояний в веществе. Исследования дисперсионных кривых для фононов в кристаллах. Использование нейтронов для исследований по динамике магнитного момента в различных материалах. Спектроскопия магнитных возбуждений в магнитоупорядоченных и парамагнитных средах. Магнитный формфактор. Физические задачи, решаемые с помощью поляризованных нейтронов. Методы разделения ядерной и магнитной составляющей в экспериментальных нейтронных спектрах. Перспективы и направления развития нейтронных методов в физике твердого тела. Использование рассеяния нейтронов для исследования систем с сильными электронными корреляциями. Тяжелые фермионы, нестабильная валентность, необычная сверхпроводимость, магнетизм пониженной размерности. Основные направления развития нейтронных методов исследования вещества. Совершенствование экспериментальной базы. Комплементарность с другими методами.

### Литература

1. Н.Н. Боголюбов, Д.В. Ширков. Введение в теорию квантованных полей. Собрание научных трудов в 12 томах. Квантовая теория. Том 10. Издательство Московского Университета, 2008 г.
2. М. Пескин, Д.Шрёдер. Введение в квантовую теорию поля. Ижевск, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001.
3. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Теория поля. Физматлит, 2012.
4. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Квантовая механика. Физматлит, 2004.
5. В.А. Матвеев, А.Н. Тавхелидзе. Квантовое число цвет, цветные кварки и КХД (К 40-летию открытия цвета). ЭЧАЯ 37, 575, 2006.
6. М. Бояркин. Физика массивных нейтрино. Москва, URSS, 2006.
7. С. Вайнберг. Мечты об окончательной теории. М.: URSS, 2008.
8. Л.И. Сарычева. Введение в физику микромира. Физика частиц и ядер. Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012.
9. С. Guinti, C.W. Kim. Fundamentals of neutrino physics and astrophysics. Oxford, 2007.
10. I. Bigi, A. Sanda. CP violation.. Cambridge, 2000.
11. А. Любимов, Д. Киш. Введение в экспериментальную физику частиц. Физматлит, 2001.
12. F. James. Statistical methods in experimental physics. World Scientific, 2006.
13. И.М. Капитонов. Введение в физику ядра и частиц. Физматлит, 2010.
14. В.М. Емельянов, С.Л. Тимошенко, М.Н. Стриханов. Введение в релятивистскую ядерную физику. Физматлит, 2004.
15. А. Михайлов, А.В. Войтишек. Численное статистическое моделирование. Методы Монте-Карло. М., «Академия», 2006.
16. В.В. Федоров. Нейтронная физика. Учебное пособие, издательство ПИЯФ, 2004.
17. Н.Б. Брандт, В.А. Кульбачинский, Квазичастицы в физике конденсированного состояния. Физматлит, 2007.
18. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Статистическая физика. Теория конденсированного состояния. Физматлит, 2004.
19. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Физическая кинетика. Физматлит, 2007.
20. И. Пригожин. От существующего к возникающему: Время и сложность в физических науках. Серия "Синергетика: от прошлого к будущему", 2006.
21. П. Гленсдорф, И. Пригожин. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. Серия "Синергетика: от прошлого к будущему", 2003.
22. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Электродинамика сплошных сред. Физматлит, 2003.

23. P. Thomas Wangler. RF Linear Accelerators (Wiley Series in Beam Physics and Accelerator Technology). Wiley-VCH, Berlin, 2008.
24. Ю.П. Добрецов. Ускорители заряженных частиц в экспериментальной физике высоких энергий. МИФИ, 2004.
25. H. Schober, Neutron scattering instrumentation in Neutron Scattering Applications and Techniques. Ed. , editors I. Anderson, A. Hurd, R. McGreevy, Springer, 2009.
26. В.С. Окунев. Основы прикладной ядерной физики и введение в физику ядерных реакторов. МГТУ им.Н.Э. Баумана, Москва, 2010.
27. В. Балабанов, И. Балабанов. Нанотехнологии. М.: ЭКСМО, 2010.
28. О.А. Барсуков . Основы физики атомного ядра. Ядерные технологии. Физматлит, 2004.
29. F. Hippert, E. Geissler, J.-L. Hodeau, E. Lelievre-Berna, J.-R. Regnard, Neutron and X-ray spectroscopy, Springer Publ. The Netherlands, 2006.

### **Электронные ресурсы**

<http://xxx.lanl.gov/>  
[www.aspera-eu.org](http://www.aspera-eu.org)  
[www.nu.to.infn.it/Astrophysical\\_Neutrinos/](http://www.nu.to.infn.it/Astrophysical_Neutrinos/)  
<http://www.sciencemag.org/>  
<http://pdg.lbl.gov>  
<http://arxiv.org>  
<http://inspirehep.net>  
<http://scitation.aip.org/>  
<http://www.jacow.org>

### **Учебные пособия и книги сотрудников кафедры**

1. В.А. Бережной, В.Н. Курдюмов. Лекции по высокочастотной электродинамике. Учебное пособие. Второе издание, исправленное и дополненное. ИЯИ РАН, 2013.
2. Д.С. Горбунов, В.А. Рубаков. Введение в теорию ранней Вселенной: Теория горячего Большого взрыва. М.: ЛКИ, 2008.
3. Д.С. Горбунов, В.А. Рубаков. Введение в теорию ранней Вселенной: Космологические возмущения. Инфляционная теория. — М.: КРАСАНД, 2010.
4. В.Б. Копелиович. Учебно-методическое пособие «Введение в физику элементарных частиц. Часть 1.» Второе издание, исправленное и дополненное. ИЯИ РАН, 2012.
5. В.Б. Копелиович. Учебно-методическое пособие «Введение в физику элементарных частиц. Часть 2». ИЯИ РАН, 2008.
6. Э.А. Коптелов. Радиационные эффекты в твёрдых телах. Лекционный курс. ИЯИ РАН, 2001.
7. Н.В. Красников, В.А. Матвеев. Новая физика на Большом адронном коллайдере. М.,: КРАСАНД, 2011.
8. Ю.Г. Куденко. Основы экспериментальной физики элементарных частиц. ИЯИ РАН, 2007.
9. Н.М. Соболевский. Метод Монте-Карло в задачах о взаимодействии частиц с веществом. Учебное пособие. ИЯИ РАН, 2007.

## **Направленность: 01.04.21 «Лазерная физика»**

### **1. Основные процессы взаимодействия лазерного излучения с веществом**

Основные процессы, возникающие при взаимодействии излучения малой интенсивности с атомарными частицами. Свободный электрон в поле волны. Возмущение структуры атомарных частиц под действием поля лазерного излучения. Многофотонные процессы и фундаментальные законы квантовой физики. Многофотонное возбуждение атомарных частиц. Теория процесса нелинейной ионизации атомарных частиц. Нерезонансный процесс многофотонной ионизации атомарных частиц. Резонансный процесс ионизации атомарных частиц. Туннельная ионизация атомарных частиц. Нелинейное рассеяние лазерного излучения атомами. Давление лазерного излучения на атомарные частицы. Ориентация молекул в поле лазерного излучения. Диссоциация молекул в поле лазерного излучения. Образование плазмы при взаимодействии лазерного излучения с газом.

### **2. Основные понятия квантовой механики**

Уравнение Шредингера и интерпретация волновой функции. Фотоэффект в атомах. Поверхностный и объемный фотоэффект в металлах. Многофотонное возбуждение и ионизация атомов. Составные матричные элементы, динамический эффект Штарка, динамическая поляризуемость атома. Двухуровневая система в резонансном поле. Приближение вращающейся волны. Частота и осцилляции Раби.

### **3. Самовоздействие излучения с веществом**

Эффекты самовоздействия света с веществом, фазовая самомодуляция. Нелинейное взаимодействие интенсивного излучения с веществом. Нелинейная зависимость поляризации от напряженности поля световой волны. Нелинейная восприимчивость. Электронная нелинейная восприимчивость, эффект керровской линзы, электронный эффект Керра, ориентационный эффект Керра. Электрострикция, электрокалорический эффект, тепловой эффект. Вынужденные рассеяния. Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР). Вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ). Нелинейная рефракция. Самофокусировка лазерного излучения. Критическая мощность самофокусировки, длина самофокусировки. Самомодуляция лазерного излучения в нелинейных средах.

### **4. Лазеры**

Базовая схема лазера. Активная среда, инверсная населенность. Системы уровней энергии. Трехуровневая схема лазерной генерации, четырехуровневая схема. Самоограниченный переход, его особенности. Процессы накачки: электронный удар, химическая, газодинамическая, оптическая. Особенности и отличия оптической накачки с помощью инжекционных лазеров от ламповой накачки. Оптические резонаторы. Виды резонаторов. Устойчивые резонаторы, диаграмма устойчивости реального резонатора. Плоскопараллельный резонатор, центрический резонатор, конфокальный и полуконфокальный резонатор.

### **5. Генерация коротких импульсов**

Принципы генерации УКИ. Метод синхронизации мод (активной и пассивной). Механизмы действия быстрого и медленного насыщающегося поглотителя. Искусственный (безынерционный) поглотитель. Когерентность пространственная и временная, методы измерения и примеры использования лазерных источников с различной степенью когерентности. Особенности временной когерентности излучения лазеров фемтосекундных импульсов непрерывного действия. Нелинейные эффекты самовоздействия интенсивных импульсов в среде.

### **6. Лазерная спектроскопия**

КАРС спектроскопия. Спектроскопия двухфотонного поглощения в средах с центром и без центра симметрии. Спектроскопия СКР и ВКР-усиления (ослабления) в средах с центром и без центра симметрии.

## 7. Основы волоконной оптики

Структура, основные параметры и типы волоконных световодов  
Фоточувствительность волоконных световодов и волоконные решётки показателя преломления  
Нелинейные явления в волоконных световодах  
Вынужденное комбинационное (Рамановское) рассеяние света в стеклянных волоконных световодах  
Явление электрострикции в волоконных световодах. Основные применения волоконных световодов.

## 8. Наноструктуры

Что такое наноструктуры, их классификация, самые общие свойства, способы изготовления. Полупроводниковые квантовые ямы. Полупроводниковые квантовые нити и точки. Наноструктуры на основе углерода (фуллерены, нанотрубки). Способы экспериментального исследования наноструктур (оптика, магнитооптика, электронная и СТМ микроскопия).

## 9. Тепловое действие лазерного излучения

Термоупругие деформации, создаваемые лазерным излучением. Влияние фазовых переходов «твёрдое тело–жидкость» на динамику лазерного нагрева. Стимулированные лазерным излучением гетерогенные химические реакции. Лазерная очистка. Лазерное зажигание металлов. Лазерная абляция. Лазерохимическое осаждение вещества из газовой фазы (LCVD).

## Литература

1. Делоне Н.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. М., Наука, 1989.
2. Делоне Н.Б., Крайнов В.П. Нелинейная ионизация атомов лазерным излучением. М., Физматлит, 2001.
3. А.С. Давыдов, Квантовая механика, М.: НАУКА, ФИЗМАТГИЗ: М., 1963
4. О.Звелто. Принципы лазеров. Санкт-Петербург, “Лань”, 2008.
5. Д.Клаудер, Э.Сударшан Основы квантовой оптики. Москва, “Мир”, 1970
6. Й.Херман, Б.Вильгельми, Лазеры сверхкоротких импульсов. М. Мир, 1986.
7. К.Оура, В.Г.Лифшиц, А.А.Саранин, А.В.Зотов, М.Катаяма, Введение в физику поверхности. Москва, «Наука», 2006
8. K. Sakoda “Optical properties of Photonic Crystals”, Springer, 2001
9. E.L.Ivchenko and G.E. Pikus “Superlattices and Other Heterostructures”, Springer, 1997
10. Н.В. Карлов, Н.А. Кириченко, Б.С. Лукьянчук. Лазерная термохимия. Основы и применения. М.: Центрком, 1995.
11. С.А.Ахманов, Н.И.Коротеев. Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеяния света. М.: Наука. 1981.
12. Ч.Киттель. Введение в физику твёрдого тела. М.: Наука. 1978.
13. Р.Нокс. Теория экситонов. М.: Мир. 1966.
14. Ю.Н.Поливанов. Нелинейно-оптическое рассеяние света с участием фононных поляритонов. Труды ИОФРАН, т.43, с.3, 1993.

**I. Общая система уравнений движения гидродинамики и теплопереноса. Идеальная жидкость**

1. Предмет гидродинамики. Законы сохранения массы, импульса и энергии. Вывод общей системы уравнений движения неидеальной жидкости (уравнений непрерывности, Навье-Стокса и теплопереноса). Граничные условия.
2. Идеальная жидкость. Система уравнений движения и граничные условия. Гидростатика. Изэнтропические течения. Завихренность. Теорема Гомсона.
3. Потенциальное течение. Несжимаемая жидкость. Уравнение Бернулли. Потенциальное обтекание несжимаемой жидкостью. Парадокс Даламбера.
4. Условия применимости приближения несжимаемой жидкости. Гравитационные волны. Звук.

**II. Вязкая жидкость**

1. Уравнение Навье-Стокса. Задачи о простейших типах течения вязкой жидкости. Пуазейлево течение. Колебательное движение вязкой жидкости.
2. Законы подобия. Числа Рейнольдса, Фруда и Струхала.
3. Течения при малых числах Рейнольдса. Формула Стокса.
4. Ламинарные течения при больших числах Рейнольдса. Ламинарный след. Затопленная струя. Ламинарный пограничный слой. Сила сопротивления.

**III. Турбулентность**

1. Задача об устойчивости стационарного движения. Неустойчивости Рэлея-Тейлора и Кельвина-Гельмгольца. Переход к турбулентности.
2. Развитая турбулентность. Модель Колмогорова-Обухова.
3. Турбулентная струя. Турбулентный след. Логарифмический профиль скоростей при турбулентном течении вдоль неограниченной плоской поверхности.
4. Турбулентный пограничный слой. Турбулентное течение в трубах. Коэффициент сопротивления. Кризис сопротивления при турбулентном обтекании твердых тел.

**IV. Поверхностные явления**

1. Формула Лапласа. Механическое равновесие соприкасающихся тел.
2. Капиллярные волны. Рассасывание периодически модулированного профиля поверхности жидкости.

**V. Теплоперенос при вынужденной конвекции**

1. Уравнение переноса тепла. Теплопроводность в несжимаемой жидкости. Конвекция.
2. Закон подобия для теплопередачи. Теплопередача в пограничном слое. Турбулентные пульсации температуры.
3. Теплообмен при ламинарном течении в трубах и каналах.
4. Теплообмен при турбулентном течении в трубах и каналах.

**VI. Свободная конвекция в жидкости без внутренних источников тепла**

1. Тепловое расширение. Свободная конвекция. Законы подобия. Ламинарный свободноконвективный пограничный слой на вертикальной стенке.
2. Турбулентный свободноконвективный пограничный слой. Свободноконвективные струи.
3. Конвективная неустойчивость горизонтального плоскопараллельного слоя жидкости, подогреваемого снизу. Конвекция Рэлея-Бенара.
4. Турбулентная конвекция Рэлея-Бенара. Мягкая и жесткая турбулентность.

5. Теплообмен, сопровождаемый фазовыми превращениями. Радиационный теплообмен.

## **VII. Теплоотдача энерговыделяющей жидкости (эвж)**

1. Методы и современное состояние исследований теплоотдачи ЭВЖ. Метод аналитических оценок.
2. Режимы теплоотдачи ЭВЖ. Теплоотдача в асимптотическом режиме.
3. Предельные угловые характеристики теплоотдачи ЭВЖ.
4. Теплоотдача ЭВЖ в квазидвумерной геометрии.
5. Особенности теплоотдачи остывающей жидкости без внутренних источников тепла в квазистационарном режиме.

## **Литература**

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука. 1986. – 736 с.
2. Серрин Дж. Математические основы классической механики жидкости. М.: ИЛ. 1963. – 256с.
3. Mc Comb W.D. The Physics of Fluid Turbulence. Oxford.: Clarendon. 1990.
4. Natural Convection. Fundamentals and Applications. /Ed. By Kacac S., Aung W., Viskanta/ Washington etc. Hemisphere. 1985. – 1181p.
5. Себиси Т., Брэдшоу П. Конвективный теплообмен. Физические основы и вычислительные методы. М.: Мир. 1987. – 590с.
6. Гебхарт Б., Джалурия Й., Махаджан Р., Саммакия Б. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен. Кн. 1, 2. М.: Мир. 1991. – 1208с
7. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. М.: Энергоатомиздат. 1986. – 470 с.

## ФАКУЛЬТЕТ ОБЩЕЙ И ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ

### Направленность: 01.04.21 «Лазерная физика»

1. Фазовая и групповая скорость света. Дисперсия групповых скоростей. Формирование показателя преломления в среде. Теория дисперсии света. Нормальная и аномальная дисперсия. Эффективное поле и поляризуемость среды. Диэлектрическая проницаемость и показатель преломления среды.
2. Оптика металлов. Плазменная частота. Формула Друде и ее приложения к плазме и металлам. Обобщения формулы Друде. Дисперсионные соотношения для плазмонов в металле. Поверхностные плазмон-поляритоны.
3. Распространение света в изотропных и анизотропных сред. Пространственная дисперсия. Одноосные и двуосные кристаллы. Обыкновенная и необыкновенная волны. Вращение плоскости поляризации.
4. Интерференционные явления в оптике. Пространственная и временная когерентность света. Двухлучевая и многолучевая интерференция. Разрешающая сила оптического прибора. Критерий разрешения Релея.
5. Дифракционные явления в оптике. Принцип Гюйгенса-Френеля. Интеграл Кирхгофа. Дифракция Френеля и Фраунгофера. Предельные случаи. Основы точной теории дифракции.
6. Резонаторы и волноводы. Стоячие электромагнитные волны в резонаторах. Собственные частоты колебаний в резонаторах. Распространение ТМ и ТЕ волн в волноводах. Критический радиус волновода. Нижняя граница частот для распространения волн в волноводах. Главная волна в коаксиальном волноводе.
7. Уровни энергии и спектры водородоподобных атомов. Формула Ридберга. Специфика высоковозбужденных состояний атома. Тонкая и сверхтонкая структура атомов. Характерные масштабы энергий, частот и длин волн переходов в атомах и ионах.
8. Основные представления теории молекул. Приближение Борна-Оппенгеймера. Электронные и ядерные волновые функции двухатомной молекулы. Электронные термы. Энергетический спектр двухатомной молекулы. Характерные масштабы энергий, частот и длин волн переходов. Линейчатый, полосатый и непрерывный спектры.
9. Электронно-колебательно-вращательная структура спектров двухатомной молекулы. Приближения гармонического осциллятора и жесткого ротатора, их обобщения. Правила отбора для электронных, колебательных и вращательных переходов.
10. Атом во внешнем поле. Эффекты Зеемана и Штарка. Линейный эффект Штарка в атоме водорода. Случайное вырождение и переходный случай.
11. Термодинамические распределения. Распределения Гиббса, Максвелла, Больцмана, Планка. Закон действующих масс. Соотношения детального равновесия для частиц в дискретном и непрерывном спектрах. Формулы Саха и Саха-Больцмана. Статистический вес непрерывного спектра.
12. Специфика оптического диапазона. Дипольное приближение. Поля в ближней и дальней зонах. Интенсивность дипольного излучения. Разложение полей по мультиполям. Магнито-дипольное и электро-квадрупольное излучение. Мультипольное излучение.
13. Классический осциллятор с затуханием в поле электромагнитной волны. Сила радиационного трения и константа затухания осциллятора. Дисперсионная формула классической электродинамики на примере осциллятора во внешнем поле. Динамическая и статическая поляризуемости атома. Естественная ширина линии. Классическое и квантовое выражения для  $\Delta\nu_{rad}$  и  $\Delta\nu_{scat}$ . Лоренцевское распределение интенсивности излучения при радиационном уширении линии.
14. Собственные колебания поля. Разложение электромагнитного поля по плоским волнам. Гамильтоновский метод в электродинамике. Канонические переменные. Квантование

свободного поля излучения. Правило коммутации обобщенных координат и импульсов. Операторы рождения и уничтожения фотонов; оператор числа частиц. Энергия и импульс квантованного поля.

15. Когерентные и сжатые состояния света. Квантовые шумы светового поля в различных квантовых состояниях: когерентном,  $N$ -фотонном, сжатом, тепловом. Статистика фотонов.
16. Гамильтониан системы: атом + поле. Оператор взаимодействия поля с движущимся зарядом. Общие выражения теории возмущения для вероятностей однофотонного излучения и поглощения света. Спонтанное и вынужденное излучение. Коэффициенты Эйнштейна. Вероятности и интенсивности дипольного излучения. Принцип соответствия.
17. Силы осцилляторов перехода. Теорема о сумме сил осцилляторов. Спектральное распределение коэффициента Эйнштейна. Эффективные сечения поглощения и вынужденного излучения. Контуры спектральных линий. Зависимость сечений в центре линии от ее ширины. Интегральные по линии и по всему спектру сечения поглощения. Коэффициент поглощения света на связанно-связанном переходе.
18. Механизмы уширения спектральных линий. Однородное и неоднородное уширения. Доплеровское уширение. Ударное и квазистатическое уширение. Ударное уширение нейтральными частицами (модель степенного взаимодействия). Лоренцовский контур линии в ударном пределе. Вайскопсовский радиус и частота. Границы применимости ударного и квазистатического пределов. Квазистатическое и антистатическое крылья линии.
19. Квантовые формулы для сечений ударного уширения и сдвига спектральных линий. Уширение и сдвиг линии в газах на переходах между высоковозбужденными и слабовозбужденными уровнями атомов. Асимптотические выражения для ширин и сдвигов ридберговских уровней. Закон Ферми.
20. Типы связанно-свободных радиационных переходов с участием атомов и молекул. Фотоионизация атома и фоторекомбинация. Фотоотрыв электрона от отрицательного иона. Фотодиссоциация молекул. Свободно-свободные фотопереходы. Тормозное излучение электрона в кулоновском поле.
21. Упругое и неупругое рассеяние света на атомах и молекулах. Классическая теория упругого рассеяния света. Дисперсионная формула классической электродинамики и ее предельные случаи. Релеевский и Томсоновский пределы. Резонансная флуоресценция.
22. Спонтанное и вынужденное комбинационное рассеяние. Формула Крамерса-Гайзенберга. Рассеяние на молекулах. Стоксовы и антистоксовы компоненты. Тензор рассеяния. Правила отбора при рассеянии света.
23. Теория двухфотонного испускания и поглощения света. Зависимость вероятности двухфотонного испускания от частот испускаемых квантов. Сравнение вероятности однофотонного и двухфотонного испускания. Коэффициент двухфотонного поглощения.
24. Нелинейная поляризация вещества. Классификация нелинейных явлений, характерные интенсивности света. Генерация второй гармоники. Условия фазового синхронизма: угловой и частотный синхронизм. Перекачка энергии в гармонику и обратно. Генерация суммарных и разностных частот.
25. Параметрическая генерация и усиление света. Параметрическая люминесценция и усиление. Параметрическая генерация света. Четырехволновое смешение. Связь четырехволнового смешения с известными механизмами нелинейности.
26. Взаимодействие двухуровневого атома с полем. Уравнения Блоха. Осцилляции Раби под действием монохроматического поля. Отклик атома на воздействие лазерного импульса (площадь импульса,  $\pi$ - и  $2\pi$ -импульсы). Фотонное эхо. Самоиндуцированная прозрачность.

27. Квантовые особенности нелинейно-оптических явлений (генерация второй гармоники, параметрическая генерация света и генерация сжатых состояний, генерация субпуассоновского света).
28. Столкновительные процессы. Упругое и неупругое рассеяние. Эффективное сечение. Рассеяние в центральном поле. Оптическая теорема и ее следствия для рассеяния волн и частиц. Сечение возбуждения. Квазиклассическое и Борновское приближения.
29. Фемтосекундные лазерные импульсы. Фемтосекундный лазер. Самофокусировка и фазовая самомодуляция. Нелинейное параболическое уравнение. Применения фемтосекундных лазеров.
30. Лазерное охлаждение атомов и ионов. Оптическая патока, доплеровский предел. Субдоплеровское охлаждение.
31. Методы захвата заряженных частиц. Ловушка Пауля. Методы захвата нейтральных частиц. Магнитная, оптическая дипольные ловушки. Магнито-оптическая ловушка.
32. Физические основы субволновой оптики и микроскопии ближнего поля. Прохождение света через малое ( $a \ll \lambda$ ) отверстие в экране. Формула Бете для коэффициента пропускания света в дальнюю зону. Получение локализованных световых полей в сужающихся металлизированных волноводах с субволновой апертурой (оптические зонды ближнего поля).
33. Гауссовы пучки: поперечная структура, продольная структура. Соотношение между углом фокусировки и радиусом перетяжки. Преобразование гауссова пучка идеальной линзой.
34. Моды резонаторов; условие устойчивости (связь с дифракцией). Частоты продольных и поперечных мод. Синхронизация продольных мод (фемтосекундные световые импульсы).
35. Строение волоконных световодов; одномодовые и многомодовые световоды. Эффективный волновой вектор; длина волны отсечки. Причины потерь излучения.
36. Принцип действия лазеров. Методы создания инверсии населенностей. Релаксационные процессы. Ширина линии перехода. Коэффициент усиления. Эффект насыщения.
37. Одно- и многофотонная ионизация атомов и молекул. Туннельная и надбарьерная ионизация атомов и ионов.
38. Многофотонная диссоциация молекул в лазерном поле. Лазерное разделение изотопов. Оптическое стимулирование химических реакций.

## Литература

### Основная

1. Д.В. Сивухин. Общий курс физики, том IV "Оптика" (Физматлит, Москва; Издательство МФТИ, 2002)
2. М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики (Наука, Москва, 1970)
3. С.А. Ахманов, С.Ю. Никитин. Физическая оптика, (Издательство Московского Университета, Москва, 1998).
4. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Квантовая механика (Наука, Москва, 1974).
5. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Теория поля (Наука, Москва, 1973).
6. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Статистическая физика (Наука, Москва, 1976).
7. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Электродинамика сплошных сред (Наука, Москва, 1982).
8. В.Б. Берестецкий, Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский. Квантовая электродинамика (Наука, Москва, 1980).
9. В. Гайтлер. Квантовая теория излучения (Изд. Иностранной литературы, Москва, 1956).
10. Р. Лоудон. Квантовая теория света, (Мир, Москва, 1976).
11. В.П. Крайнов, Б.М. Смирнов. Излучательные процессы в атомной физике (Высшая школа, Москва, 1983).
12. И.И. Собельман. Введение в теорию атомных спектров (Наука, Москва, 1977).

13. Л.А. Вайнштейн, И.И. Собельман, Е.А. Юков. Возбуждение атомов и уширение спектральных линий (Наука, Москва, 1979).
14. С.А. Ахманов, Р.В. Хохлов. Проблемы нелинейной оптики, (Москва, 1964).
15. В.П. Быков, О.О. Силичев. Лазерные резонаторы, (Физматлит, Москва, 2003).
16. Д.Н. Клышко. Фотоны и нелинейная оптика, (Наука, Москва, 1980).
17. И.Р. Шен. Принципы нелинейной оптики, (Наука, Москва, 1989).
18. Л. Аллен, Дж. Эберли. Оптический резонанс и двухуровневые атомы, (Мир, Москва, 1978).
19. Д. Маркузе. Оптические волноводы (Мир, Москва, 1974).
20. Н.В. Карлов. Лекции по квантовой электронике. М., 1988
21. О.Звелто. Принципы лазеров. М., 1989
22. Д.Н. Клышко. Физические основы квантовой электроники. М., 1986
23. В.С. Летохов, В.П. Чеботаев. Принципы нелинейной лазерной спектроскопии. М., 1990

#### **Дополнительная**

1. Л. Мандель, Э. Вольф. Оптическая когерентность и квантовая оптика (Физматлит, Москва, 2000).
2. У. Люисел. Излучение и шумы в квантовой электронике, (Наука, Москва, 1972).
3. Я. Перина. Квантовая статистика линейных и нелинейных оптических явлений, (Мир, Москва, 1987).
4. М.М. Сушинский. Вынужденное рассеяние света, (Наука, Москва, 1985).
5. Р. Ньютон. Теория рассеяния волн и частиц (Мир, Москва, 1969).
6. В.Л. Гинзбург. Теоретическая физика и астрофизика (Наука, Москва, 1987).
7. М. Баранже. Уширение спектральных линий в плазме. Гл. 13. В кн.: Атомные и молекулярные процессы, под ред. Д. Бейтса (Мир, Москва, 1964).
8. Г. Герцберг. Спектры и строение двухатомных молекул, (Издательство иностранной литературы, Москва, 1949)
9. М.А. Ельяшевич. Атомная и молекулярная спектроскопия, Издание второе, (Эдиториал УРСС, Москва, 2001)
10. Л.А. Вайнштейн. Электромагнитные волны (Изд. "Советское радио", Москва, 1957).
11. Н.Б. Брандт, В.А. Кульбачинский. Квазичастицы в физике конденсированного состояния, (Физматлит, Москва, 2007)
12. А. Ярив, П. Юх. Оптические волны в кристаллах, (Мир, Москва, 1987).
13. Н.Б. Делоне. Взаимодействие лазерного излучения с веществом, (Наука, Москва, 1989).

**Направленность: 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»**

1. Основы строгой кинетической теории газов
  - 1.1 Функция распределения молекулярных скоростей
  - 1.2 Определение макропараметров газа по функции распределения
  - 1.3 Газ в состоянии термодинамического равновесия
  - 1.4 Кинетическое уравнение Больцмана для одноатомного газа
  - 1.5 Классический вывод уравнения Больцмана
  - 1.6 Вывод уравнения Больцмана из уравнения Лиувилля
  - 1.7 Пределы применимости уравнения Больцмана
2. Оператор столкновений для одноатомного газа
  - 2.1 Формулы преобразования скоростей при бинарных столкновениях
  - 2.2 Основные свойства оператора столкновений
  - 2.3 H-теорема и необратимость
  - 2.4 Консервативное вычисление оператора столкновений проекционным методом
3. Постановка краевых задач и методы решения уравнения Больцмана
  - 3.1 Взаимодействие газа с поверхностью твердого тела
  - 3.2 Постановка граничных условий для кинетического уравнения
  - 3.3 Безразмерные величины и критерии подобия
  - 3.4 Кинетическое уравнение в безразмерных переменных
  - 3.5 Решение уравнения Больцмана методом дискретных ординат
4. Кинетические уравнения для смеси газов и для молекулярных газов
  - 4.1 Система кинетических уравнений для смеси газов
  - 4.2 Вращательные уровни энергии многоатомных молекул
  - 4.3 Колебательные уровни энергии многоатомных молекул
  - 4.4 Обобщенное кинетическое уравнение для газа с внутренними степенями свободы
5. Конечно-разностные аппроксимации оператора адвекции кинетического уравнения
  - 5.1 Интегральные формы кинетического уравнения Больцмана
  - 5.2 Аппроксимация уравнения Больцмана на пространственно-скоростной сетке узлов
  - 5.3 Построение конечно-разностных схем метода характеристик на основе интегральных форм уравнения Больцмана
  - 5.4 Расщепление кинетического уравнения по физическим процессам
  - 5.5 Консервативные конечно-разностные схемы
6. Дискретная реализация начальных и граничных условий
  - 6.1 Типичные начальные условия
  - 6.2 Граничные условия на поверхности твёрдого тела
  - 6.3 Граничные условия на поверхностях симметрии течения
  - 6.4 Консервативная формулировка граничных условий
7. Вычисление интеграла столкновений и решение уравнения Больцмана
  - 7.1 Консервативный проекционный метод
  - 7.2 Многомерные кубатурные сетки Коробова и их преимущество
  - 7.3 Скорости после столкновения для произвольного молекулярного потенциала
  - 7.4 Обобщение метода для смеси газов
  - 7.5 Решение дискретного кинетического уравнения

8. VIII Кинетическое уравнение для молекулярных газов
  - 8.1 Проекционный метод вычисления интеграла столкновений с учётом поступательно-вращательного и поступательно-колебательного переноса энергии
  - 8.2 Простая релаксационная модель поступательно-вращательного переноса энергии
  - 8.3 Решение системы кинетических уравнений для газа с внутренними степенями свободы молекул
9. Примеры микро и нано устройств
  - 9.1 Мембранный микрофильтр
  - 9.2 Кнудсеновский компрессор
  - 9.3 Насос из перемежающихся разно нагретых пластин
  - 9.4 Микроротатор (радиометр Крука)

### Литература

1. М.Н.Коган, Динамика разреженного газа. Москва, «Наука», 1967
2. Чепмен С. и Каулинг Т., Математическая теория неоднородных газов, Москва, «Иностранная литература», 1960
3. Е.М.Лифшиц и Л.П.Питаевский, Физическая кинетика; Теоретическая физика под редакцией Л.Д.Ландау и Е.М.Лифшица в 10 томах, том 10. Москва, «Физматлит», 2002.
4. Л.Д.Ландау и Е.М.Лифшиц, Статистическая физика; Теоретическая физика под редакцией Л.Д.Ландау и Е.М.Лифшица в 10 томах, том 5. Москва, «Физматлит», 1995.
5. Дж. Ферцигер и Г.Капер, Математическая теория процессов переноса в газах, Москва, «Мир», 1976
6. Людвиг Больцман, Избранные труды. В серии «Классики науки». Москва. «Наука», 1984
7. А.А. Самарский, Ю.П. Попов. Разностные методы решения задач газовой механики. – М.: Наука - Физматлит, 1992
8. В.С. Рябенький. Введение в вычислительную математику. – М.: Наука - Физматлит, 2000
9. Лабораторный практикум по курсу ОСНОВЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ. – М.: - МЗ Пресс, 2001.
10. Randall J. Leveque. Finite volume methods for hyperbolic problems. - Cambridge University Press, 2002
11. Р. Лафоре. Объектно-ориентированное программирование в С++. 4-е изд.– СПб.: Питер, 2008.
12. Довбуш Г.Ф. Visual С++ на примерах. Под ред. Проф. Хомоненко А.Д. – СПб.: БХВ - Петербург, 2008.

## Направленность: 01.04.02 «Теоретическая физика»

### 1. Механика

Уравнения движения. Обобщенные координаты, принцип наименьшего действия, функция Лагранжа. Законы сохранения, энергия, импульс, момент импульса. Интегрирование уравнений движения. Одномерное движение, приведенная масса, движение в центральном поле. Распад частиц, упругие столкновения, сечения рассеяния частиц, формула Резерфорда. Малые колебания. Свободные и вынужденные одномерные колебания, колебания систем с многими степенями свободы, нормальные координаты. Движение твердых тел. Угловая скорость, момент инерции, момент количества движения твердых тел. Эйлеровы углы и уравнение Эйлера. Канонические переменные, уравнение Гамильтона-Якоби, разделение переменных. Переменные действие-угол. Адиабатический инвариант.

### 2. Теория поля

Принцип относительности. Скорость распространения взаимодействий. Интервал. Собственное время. Преобразование Лоренца. Преобразование скорости. Четырехмерные векторы. Четырехмерная скорость. Принцип наименьшего действия. Энергия и импульс. Распад частиц. Упругие столкновения частиц. Заряд в электромагнитном поле. Четырехмерный потенциал поля. Уравнения движения заряда в поле, градиентная инвариантность. Тензор электромагнитного поля. Преобразование Лоренца для поля. Инварианты поля. Уравнение электромагнитного поля. Первая пара уравнений Максвелла. Действие для электромагнитного поля. Четырехмерный вектор тока. Уравнение непрерывности. Вторая пара уравнений Максвелла. Плотность и поток энергии. Тензор энергии-импульса электромагнитного поля. Постоянное электромагнитное поле. Закон Кулона. Электростатическая энергия зарядов. Дипольный момент. Мультипольные моменты. Система зарядов во внешнем поле. Постоянное магнитное поле. Магнитный момент. Теорема Лармора. Электромагнитные волны. Волновое уравнение. Плоские волны. Монохроматическая плоская волна. Спектральное разложение. Разложение электростатического поля. Поле движущихся зарядов. Запаздывающие потенциалы. Потенциалы Лиенара-Вихерта. Спектральное разложение запаздывающих потенциалов. Излучение электромагнитных волн. Поле системы зарядов на далеких расстояниях. Дипольное излучение. Излучение быстро движущегося заряда. Синхротронное излучение.

### 3. Квантовая механика

Основные понятия квантовой механики. Принцип неопределенности. Принцип суперпозиции. Операторы, их сложение и умножение. Дискретный и непрерывный спектр. Операторы энергии и импульса. Гамильтониан и дифференцирование операторов по времени. Стационарные состояния. Представление операторов в виде матриц. Гайзенберговское представление. Оператор импульса. Соотношение неопределенности. Уравнение Шредингера. Основные свойства уравнения Шредингера. Одномерное движение. Одномерный осциллятор. Плотность потока. Квазиклассическая волновая функция. Прохождение через барьер. Момент количества движения. Собственные функции и собственные значения момента количества движения. Четность. Сложение моментов. Движение в центральном поле. Сферические волны. Разложение плоской волны. Радиальное уравнение Шредингера. Теория возмущений. Возмущения, не зависящие от времени. Секулярное уравнение. Возмущения, зависящие от времени. Периодические возмущения. Спин. Оператор спина. Движение в магнитном поле. Уравнение Шредингера для движения в магнитном поле. Плотность потока в магнитном поле.

### 4. Статистическая физика

Основные принципы статистики. Статистическое распределение. Статистическая независимость. Теорема Лиувилля. Роль энергии. Энтропия. Закон возрастания энтропии. Термодинамические величины. Температура. Адиабатический процесс. Давление. Работа и количество тепла. Термодинамические потенциалы. Максимальная работа. Термодинамические неравенства. Принцип Ле-Шателье. Теорема Нернста. Система с переменным числом частиц. Равновесие тела во внешнем поле. Распределение Гиббса. Свободная энергия и распределение Гиббса. Вывод термодинамических соотношений. Термодинамика идеальных газов. Распределение Больцмана. Столкновение молекул. Неравновесный идеальный газ. Свободная энергия и уравнение состояния. Закон равнораспределения. Одноатомный идеальный газ. Распределение Ферми и Бозе. Неравновесные Ферми- и Бозе-газы. Ферми- и Бозе-газы элементарных частиц. Вырожденный электронный газ. Вырожденный Бозе-газ. Флуктуации. Распределение Гаусса. Флуктуации основных термодинамических величин. Флуктуации в идеальном газе. Формула Пуассона.

5. Электродинамика сплошных сред

Электростатика проводников. Электростатическое поле проводников. Энергия электростатического поля проводников. Электростатика диэлектриков. Электростатическое поле в диэлектриках. Диэлектрическая проницаемость. Постоянный ток. Плотность тока и проводимость. Постоянное магнитное поле. Магнитное поле постоянных токов. Сверхпроводимость. Магнитные свойства сверхпроводников. Сверхпроводящий ток. Критическое поле. Уравнение электромагнитных волн. Магнитная гидродинамика. Вмороженность. МГД-волны.

6. Механика сплошных сред

Идеальная жидкость. Уравнение Эйлера. Уравнение непрерывности. Гидростатика. Условие отсутствия конвекции. Уравнение Бернулли. Поток энергии. Поток импульса.

7. Физическая кинетика

Ансамбль Гиббса. Функция распределения. Уравнение Лиувилля. Уравнение Больцмана. Уравнение Фоккера-Планка. H-теорема. Статистическая энтропия. Идеальная жидкость. Уравнение непрерывности. Уравнение Эйлера. Бесстолкновительная плазма: самосогласованное поле, квазинейтральная плазма, гидродинамика двухтемпературной плазмы.

8. Математические методы физики

Теория функций комплексного переменного. Вычисление интегралов вычетами. Решение уравнений с помощью контурных интегралов (метод Лапласа). Вычисление асимптотик интегралов. Специальные функции (Лежандра, Бесселя, эллиптические, гипергеометрические, гамма-функции).

### Литература

1. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Механика. М.:Физматлит, 2012.
2. Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Теория поля. М.: Физматлит, 2012.
3. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М.: Физматлит, 2008.
4. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Статистическая физика. М.: Физматлит, 2010.
5. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Электродинамика сплошных сред. М.: Физматлит, 2005.
6. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Гидродинамика. М.: Физматлит, 2006.
7. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Физическая кинетика. М.: Физматлит, 2007.
8. Лаврентьев М.А., Шабат Б. В., Методы теории функций комплексного переменного, Лань, СП, 2002.
9. Смирнов В.И., Курс высшей математики, Лань, СП. 2008.
10. Бейтмен Г., Эрдейи А., Высшие трансцендентные функции, Лань, СП, 2001.

## Направленность: 01.04.07 «Физика конденсированного состояния»

### 1. Силы связи в твердых телах

Электронная структура атомов. Химическая связь и валентность. Типы сил связи в конденсированном состоянии: ван-дер-ваальсова связь, ионная связь, ковалентная связь, металлическая связь.

Химическая связь и ближний порядок. Структура вещества с ненаправленным взаимодействием. Примеры кристаллических структур, отвечающих плотным упаковкам шаров: простая кубическая, ОЦК, ГЦК, ГПУ, структура типа CsCl, типа NaCl, структура типа перовскита CaTiO<sub>3</sub>.

Основные свойства ковалентной связи. Структура веществ с ковалентными связями. Структура веществ типа селена. Гибридизация атомных орбиталей в молекулах и кристаллах. Структура типа алмаза и графита.

### 2. Симметрия твердых тел

Кристаллические и аморфные твердые тела. Трансляционная инвариантность. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Ячейка Вигнера - Зейтца. Решетка Браве. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна.

Элементы симметрии кристаллов: повороты, отражения, инверсия, инверсионные повороты, трансляции. Операции (преобразования) симметрии.

Элементы теории групп, группы симметрии. Возможные порядки поворотных осей в кристалле. Пространственные и точечные группы (кристаллические классы). Классификация решеток Браве.

### 3. Дефекты в твердых телах

Точечные дефекты, их образование и диффузия. Вакансии и межузельные атомы. Дефекты Френкеля и Шоттки.

Линейные дефекты. Краевые и винтовые дислокации. Роль дислокаций в пластической деформации.

### 4. Дифракция в кристаллах

Распространение волн в кристаллах. Дифракция рентгеновских лучей, нейтронов и электронов в кристалле. Упругое и неупругое рассеяние, их особенности.

Брэгговские отражения. Атомный и структурный факторы. Дифракция в аморфных веществах.

### 5. Колебания решетки

Колебания кристаллической решетки. Уравнения движения атомов. Простая и сложная одномерные цепочки атомов. Закон дисперсии упругих волн. Акустические и оптические колебания. Квантование колебаний. Фононы. Электрон-фононное взаимодействие.

### 6. Тепловые свойства твердых тел

Теплоемкость твердых тел. Решеточная теплоемкость. Электронная теплоемкость. Температурная зависимость решеточной и электронной теплоемкости.

Классическая теория теплоемкости. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы в классической физике. Границы справедливости классической теории.

Квантовая теория теплоемкости по Эйнштейну и Дебаю. Предельные случаи высоких и низких температур. Температура Дебая.

Тепловое расширение твердых тел. Его физическое происхождение. Ангармонические колебания.

Теплопроводность решеточная и электронная. Закон Видемана - Франца для электронной теплоемкости и теплопроводности.

## 7. Электронные свойства твердых тел

Электронные свойства твердых тел: основные экспериментальные факты. Проводимость, эффект Холла, термоЭДС, фотопроводимость, оптическое поглощение. Трудности объяснения этих фактов на основе классической теории Друде.

Основные приближения зонной теории. Граничные условия Борна - Кармана. Теорема Блоха. Блоховские функции. Квазиимпульс. Зоны Бриллюэна. Энергетические зоны.

Брэгговское отражение электронов при движении по кристаллу. Полосатый спектр энергии.

Приближение сильносвязанных электронов. Связь ширины разрешенной зоны с перекрытием волновых функций атомов. Закон дисперсии. Тензор обратных эффективных масс.

Приближение почти свободных электронов. Брэгговские отражения электронов.

Заполнение энергетических зон электронами. Поверхность Ферми. Плотность состояний. Металлы, диэлектрики и полупроводники. Полуметаллы.

## 8. Магнитные свойства твердых тел

Намагниченность и восприимчивость. Диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики. Законы Кюри и Кюри - Вейсса. Парамагнетизм и диамагнетизм электронов проводимости.

Природа ферромагнетизма. Фазовый переход в ферромагнитное состояние. Роль обменного взаимодействия. Точка Кюри и восприимчивость ферромагнетика.

Ферромагнитные домены. Причины появления доменов. Доменные границы (Блоха, Нееля).

Антиферромагнетики. Магнитная структура. Точка Нееля. Восприимчивость антиферромагнетиков. Ферримагнетики. Магнитная структура ферримагнетиков.

Спиновые волны, магноны.

Движение магнитного момента в постоянном и переменном магнитных полях. Электронный парамагнитный резонанс. Ядерный магнитный резонанс.

## 9. Оптические и магнитооптические свойства твердых тел

Комплексная диэлектрическая проницаемость и оптические постоянные. Коэффициенты поглощения и отражения. Соотношения Крамерса-Кронига.

Поглощения света в полупроводниках (межзонное, примесное поглощение, поглощение свободными носителями, решеткой). Определение основных характеристик полупроводника из оптических исследований.

Магнитооптические эффекты (эффекты Фарадея, Фохта и Керра).

Проникновение высокочастотного поля в проводник. Нормальный и аномальный скин-эффекты. Толщина скин-слоя.

## 10. Сверхпроводимость

Сверхпроводимость. Критическая температура. Высокотемпературные сверхпроводники. Эффект Мейснера. Критическое поле и критический ток.

Сверхпроводники первого и второго рода. Их магнитные свойства. Вихри Абрикосова. Глубина проникновения магнитного поля в образец.

Эффект Джозефсона.

Куперовское спаривание. Длина когерентности. Энергетическая щель.

## Литература

1. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.
2. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. Т. I, II. М.: Мир, 1979.
3. Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела. М.: Мир, 1969.
4. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М.: Мир, 1974.

5. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. М.: Высш. шк., 2000.
6. Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1971.
7. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1979.
8. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводимости. МЦ НМО, М., 2000.

## Направленность: 01.04.05 «Оптика»

### 1. Электромагнитная теория света

Уравнения Максвелла. Вектор Умова-Пойнтинга. Волновое уравнение. Плоские и сферические волны. Фазовая и групповая скорости света. Поляризация света. Параметры Стокса. Сфера Пуанкаре. Типы поляризационных устройств. Отражение и преломление света на границе раздела изотропных сред. Формулы Френеля. Полное внутреннее отражение. Комплексная диэлектрическая проницаемость. Отражение света от поверхности проводника. Глубина проникновения при отражении света. Распространение света в анизотропных и гиротропных средах. Волновые поверхности в кристаллах. Лучи и волновые нормали. Эллипсоид Френеля. Оптические свойства одноосных и двуосных кристаллов. Двойное лучепреломление. Электрооптические эффекты Керра и Поггеля. Оптическая активность. Эффект Фарадея. Оптика движущихся сред. Опыты Физо и Майкельсона. Преобразования Лоренца. Продольный и поперечный эффекты Доплера.

### 2. Геометрическая оптика

Асимптотическое решение волнового уравнения. Геометро-оптическое приближение. Уравнение эйконала. Область применения лучевого приближения. Принцип Ферма. Гомоцентрические пучки. Понятие оптического изображения. Параксиальное приближение. Преломление на сферической поверхности. Сферические зеркала и линзы. Образование каустик в оптических системах. Геометрические aberrации третьего и более высоких порядков. Хроматическая aberrация. Типы оптических приборов.

### 3. Интерференция и дифракция световых волн

Интерференционные явления в оптике. Комплексная степень когерентности. Теорема Ван-Циттерта-Цернике. Двухлучевая и многолучевая интерференция. Сдвиговая и спекл-интерферометрия. Многослойные покрытия. Дифракция. Дифракционные интегралы Кирхгофа-Гюйгенса. Дифракция Френеля и Фраунгофера. Влияние дифракции на разрешающую силу систем, образующих изображение. Дифракционная решетка. Обратные задачи теории дифракции. Синтез оптических элементов.

### 4. Теория излучения и взаимодействия световых волн с веществом

Классическая теория взаимодействия излучения с веществом. Резонансное приближение. Дисперсионные соотношения Крамерса-Кронига. Оптические нутации. Оптический эффект Штарка. Фотонное эхо и самоиндуцированная прозрачность. Солитоны. Релаксационные процессы. Уравнение для матрицы плотности. Самосогласованные уравнения для поля, поляризации и разности заселенностей. Эффект насыщения. Законы теплового излучения. Формула Планка. Фотоэффект. Квантование поля. Операторы рождения и уничтожения фотонов. Гамильтониан квантованного поля. Коммутационные соотношения для операторов поля. Однофотонные и многофотонные процессы. Вероятности спонтанных и вынужденных переходов. Коэффициенты Эйнштейна. Кооперативные эффекты. Сверхизлучение. Когерентное и комбинационное рассеяния. Распространение волн в нелинейной среде. Условие синхронизма. Генерация оптических гармоник. Самофокусировка света. Вынужденное комбинационное рассеяние. Вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна. Четырехволновое взаимодействие. Обращение волнового фронта. Вещество в сверхсильном световом поле.

### 5. Статистическая оптика

Временная и пространственная когерентность световых полей; корреляционные функции первого и высших порядков. Спектральное представление. Теорема Винера-Хинчина. Распределение Бозе-Эйнштейна. Параметр вырождения поля. Пуассоновская, субпуассоновская и суперпуассоновская статистика фотонов. Связь статистик фотонов и

фотоотсчетов, формула Манделя для распределения фотоотсчетов. Дробовой шум. Спонтанное параметрическое рассеяние света. Бифотоны. Перепутанные состояния света. Оптическая реализация кубитов и их преобразования. Состояния Белла. Парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена. Неравенства Белла.

## 6. Спектроскопия

Спектры атомов. Систематика спектров многоэлектронных атомов. Типы связей электронов. Определение набора термов. Мультиплетная структура. Правила отбора. Спектры молекул. Адиабатическое приближение. Группы симметрии молекул. Колебательные спектры. Классификация нормальных колебаний по типам симметрии. Правила отбора в колебательных спектрах поглощения и комбинационного рассеяния. Вращательная структура колебательных полос. Электронные спектры молекул. Классификация электронных состояний двухатомных молекул. Принцип Франка-Кондона. Типы связи электронного движения и вращения. Спектроскопия твердого тела. Переходы под действием света в идеальном кристалле. Поглощение в инфракрасной области спектра и взаимодействие света с фононной подсистемой. Поглощение света в металлах. Запрещенная зона и область прозрачности в диэлектриках. Переходы с остовных уровней. Эффекты Оже и Фано. Эффекты на краях остовного поглощения: EXAFS и XANES. Понятие о поляритонах. Спектроскопия дефектных состояний в кристаллах. Люминесценция. Классификация люминесценции по длительности свечения и способу ее возбуждения. Молекулярная и рекомбинационная люминесценция. Закон Стокса-Ломмеля. Правило зеркальной симметрии спектров поглощения и люминесценции Левшина. Закон Вавилова. Триплетные состояния молекул и их роль в процессах деградации и миграции энергии электронного возбуждения. Схема Теренина-Льюиса. Тушение люминесценции. Безызлучательный перенос энергии электронного возбуждения. Люминесценция молекулярных кристаллов.

## 7. Экспериментальная и прикладная оптика

Источники оптического излучения. Тепловые, газоразрядные и лазерные источники. Синхротронное излучение. Оптические материалы. Характеристики приемников излучения: спектральная и интегральная чувствительность, шумы, инерционность. Техника спектроскопии. Светофильтры, призменные и дифракционные спектральные приборы, интерферометры. Фурье-спектроскопия. Основные характеристики приборов: аппаратная функция, разрешение, светосила, дисперсия. Лазерная спектроскопия. Запись и обработка оптической информации. Волоконная оптика. Типы волоконных световодов. Волоконные линии связи. Нелинейные эффекты в оптических волокнах.

## 8. Оптика лазеров

Принцип работы лазера. Схемы накачки. Теория Лэмба. Эффекты затягивания частоты и выгорания дыр. Лэмбовский провал. Оптические резонаторы. Моды оптических резонаторов. Свойства лазерных пучков. Типы лазеров. Твердотельные лазеры. Газовые лазеры: лазеры на нейтральных атомах, ионные лазеры, молекулярные лазеры, лазеры на самоограниченных переходах. Химические лазеры. Полупроводниковые лазеры. Лазеры на центрах окраски. Режимы работы лазеров. Непрерывные и импульсный режимы. Пичковый режим. Модуляция добротности. Синхронизация мод. Генерация сверхкоротких импульсов.

## 9. Нанопотоника

Ближнеполевые взаимодействия. Оптика затухающих волн. Плазмоника. Распределение поля в системе металл-диэлектрик. Гигантское усиление электромагнитного поля вблизи металлических наноструктур. Нелинейные свойства наноразмерных структур. Ближнеполевые нелинейные оптические процессы. Фотонные материалы с запрещенной зоной. Фотонные кристаллы. Наноразмерные источники света. Метаматериалы. Суперлинза. Фотовольтаика. Характеризация поверхности. Сканирующая зондовая микроскопия. Электронная микроскопия.

## Литература

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970.
2. Матвеев А.Н. Оптика. М.: Высшая школа, 1985.
3. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. М: Изд-во МГУ, 1998.
4. Мандель Л., Вольф Э. Оптическая когерентность и квантовая оптика. М.: Физматлит, 2000.
5. Ландсберг Оптика: учебное пособие, 6-е изд., М: Физматлит, 2010.
6. Новотный Л., Хехт Б. Основы нанооптики, М.:Физматлит, 2011.
7. Скалли М.О., Зубайри М.С. Квантовая оптика, М.: Физматлит, 2003.
8. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия. М.: Эдиториал УРСС, 2001.
9. Лебедева В.В. Экспериментальная оптика. М.: Изд-во МГУ, 1994.
10. Корниенко Л.С., Наний О.Е. Физика лазеров. Ч.1, 2. М.: Изд-во МГУ, 1996.
11. Ханин Я.И. Основы динамики лазеров. М., 1999.
12. Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М.: Наука, 1990.
13. Парыгин В.Н., Балакший В.И. Оптическая обработка информации. М.: Изд-во МГУ, 1987.
14. В.Е.А. Saleh, М.С. Teich, Fundamentals of Photonics, A John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, 2007.
15. P.N. Prasad, Nanophotonics, John Wiley & Sons Inc., 2004.
16. S. Kawata, Near-field optics and surface plasmon polaritons, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001.

## Направленность: 01.04.16 «Физика атомного ядра и элементарных частиц»

1. Уравнение Дирака и его свободное решение.
2. Лагранжиан и квантование электромагнитного поля.
3. S-матрица и правила Фейнмана в КЭД.
4. Радиационные поправки в КЭД.
5. Инфракрасная катастрофа и ее устранение.
6. Калибровочная инвариантность в абелевых и неабелевых теориях.
7. Структура слабых токов. Левые заряженные токи. Универсальность слабого взаимодействия. Нейтральные токи.
8. Спонтанное нарушение SU(2)-симметрии и генерация масс фермионов и векторных бозонов.
9. Лагранжиан Стандартной модели.
10. Теория Великого объединения.
11. Суперсимметрия.
12. Экспериментальное определение элементов матрицы СКМ.
13. Наблюдение осцилляций  $B_0$ ,  $B_s$  и  $D_0$  мезонов.
14. Эксперименты по поиску осцилляций нейтрино от различных источников.
15. Экспериментальное изучение CP-нарушения в B и K мезонах.
16. Экспериментальная проверка Стандартной модели в экспериментах ЦЕРНа (ускорители LEP, SPS).
17. Спектроскопия адронов, содержащих тяжелые кварки.
18. Изучение свойств tau-лептона. g-2 эксперименты.
19. Структурные функции и глубоко-неупругое рассеяние.
20. Открытие бозона Хиггса.
21. Масса нейтрино. Иерархия масс нейтрино. 2beta-распад.
22. Поиск процессов за границами Стандартной модели.
23. Прохождение заряженных частиц через вещество. Ионизация. Эффект Вавилова-Черенкова. Переходное излучение.
24. Прохождение электронов и фотонов через вещество. Электромагнитные ливни.
25. Прохождение адронов через вещество. Адронные ливни.
26. Фотодетекторы. Классификация. Основные характеристики и область применения.
27. Газовые детекторы. Классификация. Основные характеристики и область применения.
28. Кремниевые детекторы. Классификация. Основные характеристики и область применения.
29. Детекторы черенковского излучения. Классификация. Основные характеристики и область применения.
30. Электромагнитные калориметры. Классификация. Основные характеристики и область применения.
31. Трековые детекторы. Классификация. Основные характеристики и область применения.
32. Общие принципы устройства современного детектора в физике частиц высоких энергий.
33. Общие принципы устройства современного низкофонового детектора.

### Литература

1. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Квантовая механика (Наука, Москва, 1974).
2. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Теория поля (Наука, Москва, 1973).
3. В.Б. Берестецкий, Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский. Квантовая электродинамика (Наука, Москва, 1980).
4. J. Beringer et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D 86, 010001 (2012) (и более поздние издания).

5. Л.Б.Окунь « $\alpha \beta \gamma \dots Z$ » Элементарное введение в физику элементарных частиц, Москва «Наука» 1985.
6. Л.Б.Окунь «Лептоны и кварки», Москва, Наука, 1981.
7. М.В.Данилов УФН, т.168, №6, с.631, (1988) «Поиск нарушения CP-инвариантности в распадах B-мезонов»
8. Мизнер Ч., Торн К. Уилер Д.- Гравитация, 3 тома (Мир, 1977)
9. Вейнберг С. — Гравитация и космология. М., Мир, 1975.
10. Уолд Р. — Общая теория относительности, 2002
11. Статистические методы в экспериментальной физике, под редакцией А.А. Тяпкина, Москва, Атомиздат, 1976г.
12. Ахиезер, А. И., Берестецкий, В. Б., Квантовая электродинамика. -4-е изд., перераб., М.: Наука, 1981
13. К. Группен, «Детекторы элементарных частиц», Новосибирск, «Сибирский хронограф», 1999.
14. К. Н. Мухин, «Экспериментальная ядерная физика», книга 2, Москва, Энергоатомиздат, 1993.
15. Ф.Дайсон, Релятивистская квантовая механика, ИКС 2009
16. Хелзен Ф. Мартин А. «Кварки и лептоны. Введение в физику частиц». 1987 год.
17. Б.В.Мартемьянов Десять лекций по кварковой структуре адронов
18. Д.Перкинс «Введение в физику высоких энергий», Москва, Энергоатомиздат, 1991.
19. Л. Б. Окунь, Лептоны и кварки, Москва, Наука (1990).
20. Л. Райдер, Элементарные частицы и симметрии. Москва, Наука, (1983).
21. С. В. Семенов, Физика очарованных адронов, УФН т.169, №.9 937 (1999).
22. Высоцкий М.И. Лекции по теории электрослабых взаимодействий, Физматлит, М., 2011
23. Пескин М., Шредер Д. Введение в квантовую теорию поля. – Пер. с англ.. – М.: R&C Dynamics, 2001.
24. Ю. Весс и Дж. Баггер, «Суперсимметрия и Супергравитация», М.~Мир, 1986.
25. П. Уэст, «Введение в суперсимметрию и супергравитацию», М. Мир, 1989
26. С. Вайнберг, «Квантовая теория полей. т. 3, Суперсимметрия, М. ФАЗИС, 2002
27. «Введение в теорию ранней Вселенной. Теория горячего Большого взрыва», Д.С.Горбунов, В.А.Рубаков, Москва: «ЛКИ», 2008
28. «Введение в теорию ранней Вселенной. Космологические возмущения. Инфляционная теория», Д.С.Горбунов, В.А.Рубаков, Москва: «КРАСАНД», 2009

## Направленность: 01.04.09 «Физика низких температур»

### 1. Холодильные циклы.

Идеальный процесс ожижения газов и минимальная работа ожижения. Ожижение водорода и гелия. Охлаждение путем откачки паров  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$  методом растворения  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$ . Охлаждение с использованием эффекта Померанчука и адиабатического размагничивания. Термометрия при низких температурах.

### 2. Термодинамика и статистическая физика

Распределения Гиббса, Максвелла, Больцмана. Второе начало термодинамики. Термодинамические потенциалы, соотношения между их производными. Термодинамические функции идеального газа. Теорема равнораспределения энергии по степеням свободы. Условие равновесия фаз. Уравнение Клайперона-Клаузиуса. Критическая точка. Фазовые переходы второго рода. Изменение симметрии и параметр порядка. Скачок теплоемкости. Критические индексы. Распределения Бозе и Ферми. Температура вырождения. Порядок величины теплоемкости вырожденного Ферми-газа.

### 3. Симметрия, кристаллография

Кристаллические системы. Решетки Браве. Обратная решетка, зона Бриллюэна. Кристаллические структуры простых веществ. Жидкие кристаллы. Магнитная симметрия.

### 4. Тепловые свойства диэлектриков.

Теплоемкость: закон Дебая, закон Дюлонга и Пти. Температура Дебая. Законы сохранения энергии и квазиимпульса при взаимодействии фононов. Теплопроводность диэлектриков. Зависимость от температуры. Роль процессов переброса.

### 5. Магнитные свойства диэлектриков

Атом в магнитном поле. Диамагнетизм. Парамагнетизм. Закон Кюри. Гамильтониан Гейзенберга. Магнитоупорядоченные вещества. Ферромагнетики. Закон Кюри-Вейсса. Антиферромагнетики. Продольная и поперечная восприимчивость АФМ. Ферримагнетики. Магнетики в слабых и сильных магнитных полях. Спиновые волны. Закон дисперсии для ферро- и антиферромагнетика. Температурная зависимость магнитного вклада в теплоемкость и намагниченности ферромагнетика в приближении теории спиновых волн. Резонансы. ЯМР, ЭПР, ФМР, АФМР. Области частот резонансов.

### 6. Нормальные металлы

Модель свободных электронов. Энергия, импульс, скорость, температура Ферми. Вид зависимости энергии от квазиимпульса для электронов в периодическом поле решетки. Закрытые и открытые поверхности Ферми. Плотность состояний. Квазичастицы. Элементарные формулы для проводимости и теплопроводности. Длина свободного пробега электронов. Электрон-фононные столкновения (условия сохранения энергии и импульса). Температурная зависимость проводимости и теплопроводности. Закон Видемана-Франца. Диамагнетизм Ландау и парамагнетизм Паули. Аномальный скин-эффект. Циклотронный резонанс. Квантовые осцилляции магнитного момента и сопротивления.

### 7. Сверхпроводники

Изменение свободной энергии, энтропии, теплоемкости при переходе металла из нормального состояния в сверхпроводящее в магнитном поле. Соотношения БКШ для  $T_c$  и щели  $\Delta$ . Электронный энергетический спектр возбуждений в сверхпроводнике и

нормальном металле. Связь между шириной щели и  $N_c$  при  $T = 0$ . Зависимость теплоемкости и теплопроводности сверхпроводников от температуры при  $T \ll T_c$ . Длина когерентности и глубина проникновения. Выражение этих величин через ширину щели, фермиевскую скорость, массу и плотность электронов. Квантование магнитного потока. Эффекты Джозефсона. Сверхпроводники I и II рода. Кривые намагничивания. Структура сверхпроводников в смешанном состоянии. Вихри Абрикосова.

8. Гелий-4 и гелий-3.

Фазовая диаграмма  $^4\text{He}$  и  $^3\text{He}$ . Энергетический спектр сверхтекучего  $^4\text{He}$  и критическая скорость Ландау. Температурная зависимость фононного и ротонного вклада в теплоемкость. Термомеханический эффект. 1-й и 2-й звуки. Вихри в сверхтекучем  $^4\text{He}$ . Ферми-жидкость: температура вырождения, теплоемкость, вязкость, теплопроводность.

### Литература

1. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.
2. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. Т. I, II. М.: Мир, 1979.
3. Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела. М.: Мир, 1969.
4. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М.: Мир, 1974.
5. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводимости. МЦ НМО, М., 2000.
6. Л. Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Статистическая физика, М, Наука, Физматлит 1995
7. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Электродинамика сплошных сред, М, Наука, Физматлит 2001

## **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 электронпозитронных пар -квантом в поле ядра. Формулы Бете-Гайтлера. Электромагнитный каскад. Модель каскада. Продольная форма каскада. Приближение Росси. Радиус Мольер.

#### Тема 5. Дополнительные вопросы излучения и взаимодействия с веществом.

Синхротронное излучение. Поглощение низкоэнергичных  $\gamma$ -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;  $e^-$ -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 (ДНИ). 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.

### **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. C.Grunen. 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 SURF, 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.

### **Литература**

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 физикина БольшомАдронномКоллайдере, e-Print -- arXiv:1107.3974 [physics.data- an], 2011
11. Jacob, Bart; et.al.Introduction to Grid Computing. IBM.  
<http://www.redbooks.ibm.com/abstracts/sg246778.html?Open>
12. GEANT - Detector Description and Simulation Tool  
<http://wwwasd.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 Альвареца), 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.

## 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. 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  $\tau$ -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

#### Основная литература

1. М. Пескин, Д. Шредер, «Введение в квантовую теорию поля», Addison-WesleyPublishingCompany (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. Бёркен, 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. Барийные 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).

$e+e-$  в адроны. Полное сечение. Струи. Цвет.

#### Тема 6. Систематика адронов.

Кварковая модель, SU(3)<sub>f</sub>-симметрия, цвет.

Мезоны, барионы, тяжелыйкварконий.

#### Тема 7. Жесткие процессы(2).

Глубоко-неупругое взаимодействие. Кинематика. Скейлинг. Партоновая модель.

#### Тема 8. Дискретные симметрии

P, C, T -симметрии. Тожественность частиц. Связь спина и статистики

#### Тема 9. Уравнение Дирака. Волновая функция частиц со спином У. 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 партоны. 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.

Вклад адронов в  $a_e$ . Аномальный магнитный момент мюона. Измерение аномального магнитного момента мюона.

Тема 2. Электромагнитные свойства адронов.

Относительные ширины распадов  $V \rightarrow ll$  в кварковой модели Относительные ширины распадов  $V \rightarrow \rho\gamma$  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. С-четность пиона. Примеры разрешенных и запрещенных (подавленных) реакций.

Тема 4. Эксперименты по проверке С, Р, Т инвариантности.

Как преобразуются различные величины при Р и Т инверсиях Сравнение сечений прямых и обратных реакций Наблюдение несохранения Р-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  $\alpha_s$  с  $q^2$ . Асимптотическая свобода. Конфайнмент.

Тема 7. Модели адронов.

Потенциальная модель Модель мешков. Трубки. Тяжелый кварконий.

Тема 8. Экзотические адроны

Какие 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, kt...). 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-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. Эксперименты по исследованию распада пиона.

Тема 16. P-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. Нелептонные распады.

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-л+l. Феноменология нарушения CP. CP - неинвариантные эффекты.

Эксперименты по исследованию нарушения CP-инвариантности в распадах каонов.

Тема 20. t-лептон.

Лептонные распады. Полуадронные распады. Эксперименты по исследованию распадов t-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.

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

### 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.V. Collins & A.D. Martin. Hadroninteractions, 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 1990.