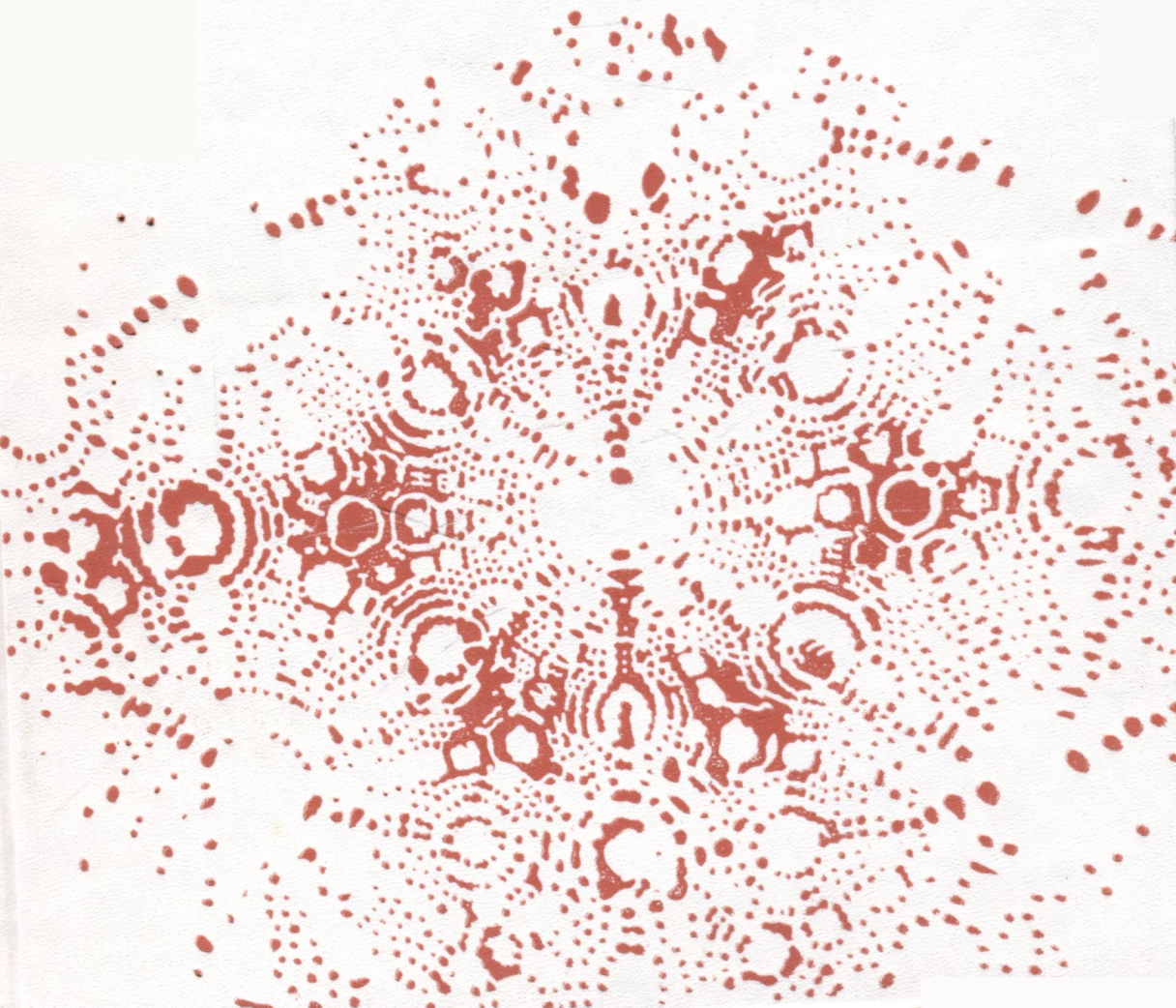


А.Н. МАТВЕЕВ

АТОМНАЯ ФИЗИКА



А. Н. МАТВЕЕВ

АТОМНАЯ ФИЗИКА

Допущено
Государственным комитетом СССР
по народному образованию
в качестве учебного пособия
для студентов физических
специальностей вузов



Москва «Высшая школа» 1989

ББК 22.38
М 33
УДК 539.1

Рецензенты: кафедра физики Московского инженерно-физического института (зав. кафедрой – д-р физ.-мат. наук, проф. А. С. Александров); акад. АН УССР А. И. Ахиезер

Матвеев А. Н.
М33 Атомная физика: Учеб. пособие для студентов вузов. – М.: Высш. шк., 1989. – 439 с.: ил.
ISBN 5-06-000056-7

Книга представляет собой пятый том курса общей физики (первые четыре тома вышли ранее). Большое внимание уделено анализу экспериментальной ситуации, приведшей к возникновению квантовой теории. Подробно анализируется физическое содержание основных квантовых понятий и математического аппарата, используемого для описания движения микрочастиц, рассматриваются основные явления физики атома и явления, обусловленные свойствами атомной оболочки, а также некоторые релятивистские квантовые явления.

М $\frac{1604090000 (4309000000) - 504}{001 (01) - 89}$ 106 - 89

ББК 22.38
530.4

ISBN 5-06-000056-7

© А. Н. Матвеев, 1989

Оглавление

Предисловие	9	§ 7. Эффект Рамзауэра – Таунсенда	52
Введение	11	Классификация столкновений электронов с атомами. Поперечное сечение. Средняя длина свободного пробега. Экспериментальное определение поперечного сечения упругого столкновения электрона с молекулами. Эффект Рамзауэра и Таунсенда. Интерпретация эффекта Рамзауэра – Таунсенда	
1		КОРПУСКУЛЯРНЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН	
§ 1. Фотоэффект	18	§ 8. Волны де Бройля	56
Открытие фотоэффекта. Экспериментальные факты. Противоречие законов фотоэффекта представлениям классической физики. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта. Внутренний и ядерный фотоэффекты. Импульс фотона. Селективный фотоэффект		Уравнения де Бройля. Плоские волны и фазовая скорость. Волновой пакет и групповая скорость. Несостоятельность гипотезы волнового пакета	
§ 2. Эффект Комптона	24	§ 9. Экспериментальные подтверждения волновых свойств корпускула	59
Томсоновское рассеяние. Опыты Баркла. Опыты Комптона. Рассеяние света с корпускулярной точки зрения. Расчет эффекта Комптона. Наблюдение индивидуальных актов столкновения		Длина волн де Бройля. Опыты Дэвидсона и Джермера. Учет преломления электронных волн. Опыты Томсона и Тартаковского. Опыты по дифракции электронов без использования кристаллов. Опыты с нейтронами и молекулярными пучками. Опыты при очень слабых потоках частиц	
§ 3. Флуктуации интенсивности светового потока	29	§ 10. Уравнение для волн де Бройля	65
Флуктуации интенсивности светового потока. Опыты Вавилова. Флуктуации интенсивности во взаимно когерентных волнах. Флуктуации интенсивности в поляризованных лучах. Опыт Брауна и Твисса		Уравнение Гельмгольца для волн де Бройля. Уравнение Шредингера	
§ 4. Поляризация фотонов	33	Задачи	66
Поляризация электромагнитных волн. Поляризационные явления в одноосных кристаллах. Применимость понятия поляризации к отдельному фотону. Фотон. Поляризация фотона. Суперпозиция состояний			
§ 5. Интерференция фотонов	41	3	ДИСКРЕТНОСТЬ АТОМНЫХ СОСТОЯНИЙ
Интерференция электромагнитных волн. Корпускулярная интерпретация опытов Винера. Корпускулярная интерпретация опыта Юнга. Стационарное состояние		§ 11. Излучение черного тела	68
Задачи	46	Классическая теория излучения черного тела. Концентрация мод колебаний. Формула Рэлея – Джинса. Формула Вина. Формула Планка. Противоречие формулы Планка закономерностям классической физики. Дискретность квантовых состояний и введение представления о квантовании энергии. Квантовые переходы. Спонтанные и вынужденные переходы. Коэффициенты Эйнштейна. Условия равновесия. Формула Планка	
2		§ 12. Опыты Франка – Герца	75
ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА КОРПУСКУЛА		Идея опытов Франка – Герца. Схема опытов. Интерпретация результатов опыта	
§ 6. Дифракция рентгеновских лучей в кристаллах	48	§ 13. Атомные спектры	78
Рентгеновское излучение. Формула Брэгга – Вульфа. Методы наблюдения дифракции волн на кристаллах. Способ Лауэ. Способ Брэгга. Способ Дебая – Шерера. Учет преломления рентгеновских лучей		Возбуждение спектров излучения. Экспериментальные закономерности в линейчатых спектрах. Комбинационный принцип. Несовместимость закономерностей	

4 Оглавление

- излучения с классическими представлениями
- § 14. **Ядерная модель атома** 81
Две модели строения атома. Формула Резерфорда. Опыты Резерфорда. Заряд ядра. Распределение заряда в атоме. Несовершенство планетарной модели атома с представлениями классической физики. Постулаты Бора. Правила квантования. Обобщение правил квантования на эллиптические орбиты. Спектральные серии атома водорода. Энергия ионизации атома водорода. Спектр иона гелия. Учет движения ядра. Изотопический сдвиг спектральных линий. Недостатки теории Бора
- § 15. **Опыты Штерна и Герлаха** 92
Орбитальный магнитный момент атома по классической теории. Движение магнитного момента в магнитном поле. Опыт Штерна и Герлаха
- Задачи** 95
- ## 4 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ
- § 16. **Уравнение Шредингера** 98
Уравнение Шредингера. Стационарные состояния. Математические требования к волновой функции. Условие нормировки волновой функции. Собственные функции и собственные значения. Ортогональность собственных функций. Характер статистических закономерностей квантовой механики. Уравнение Шредингера, зависящее от времени. Плотность заряда и плотность тока. Принцип суперпозиции состояний
- § 17. **Основные сведения из теории операторов** 104
Описание физических величин в классической физике. Описание физических величин в квантовой механике. Определение оператора. Линейные операторы. Сумма и произведение операторов. Коммутирующие и антикоммутирующие операторы. Собственные значения и собственные функции линейных операторов. Линейные самосопряженные (эрмитовы) операторы. Ортогональность собственных функций. Условие самосопряженности произведения двух самосопряженных операторов. Нормировка собственных функций. Полнота системы собственных функций. Вырожденные собственные значения. Непрерывный спектр собственных значений. Формула для суммы произведений собственных функций.
- § 18. **Представление динамических переменных посредством операторов** 110
Постулаты квантовой механики. Вычисление средних значений динамических переменных. Оператор координаты. Оператор импульса. Гамильтониан. Момент импульса частицы. Оператор полной энергии. Оператор произвольной функции динамических переменных. Условие одновременной измеримости различных динамических переменных. Принцип дополнительности. Чистые и смешанные состояния. Соотношение неопределенностей. Соотношение неопределенностей Гейзенберга. Соотношение неопределенностей между произвольными физическими величинами. Соотношение неопределенности для проекции момента импульса на ось Z. Соотношение неопределенности для энергии. Интерпретация соотношения неопределенностей
- § 19. **Изменение динамических переменных во времени** 122
Дифференцирование операторов по времени, скобки Пуассона. Квантовые уравнения Гамильтона. Интегралы движения. Теоремы Эренфеста
- Задачи** 126
- ## 5 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ
- § 20. **Что такое представление?** 128
Различные представления функций. Матричные элементы операторов. Координатное представление
- § 21. **Линейные конечномерные векторные пространства** 130
Линейное векторное пространство. Линейно независимые векторы. Размерность линейного пространства и его базис. Скалярное произведение векторов. Сопряженные векторы. Операторы. Представление векторов и операторов в ортонормированном базисе. Собственные векторы и собственные значения оператора. Условие полноты ортонормированного базиса. Построение ортонормированного базиса. Связь между представлениями вектора в различных базисах. Связь между представлениями оператора в различных базисах. Функции от операторов. Производная от оператора по параметру
- § 22. **Линейные бесконечномерные векторные пространства** 142
Бесконечномерный вектор. Скалярное произведение. Условие полноты и нормировка базисных векторов. Свойства δ -функции Дирака. Бесконечномерные

операторы. Собственные значения и собственные векторы. Коммутатор операторов \hat{X} и \hat{K} . Соотношение взаимности операторов \hat{X} и \hat{K}

- § 23. **Постулаты квантовой механики** 150
Смысл аксиоматического представления физической теории. Постулаты квантовой механики. Обобщение постулатов на многие степени свободы
- § 24. **Различные представления квантовой динамики** 153
Картина динамики Шредингера. Картина динамики Гейзенберга. Картина взаимодействия. Стационарные состояния
- Задачи** 160

6 ПРОСТЕЙШИЕ СЛУЧАИ ДВИЖЕНИЯ МИКРОЧАСТИЦ

- § 25. **Свободное движение частицы** 162
Волновые функции. Нормировка на длину периодичности. Непрерывный спектр. Плотность заряда и плотность тока
- § 26. **Частица в одномерной потенциальной яме** 164
Бесконечно глубокая яма. Одномерная яма конечной глубины. Случай $E > E_{n0}$ Случай $E < E_{n0}$
- § 27. **Линейный гармонический осциллятор** 167
Линейный осциллятор. Нулевая энергия. Волновые функции. Четность собственных функций. Теория излучения. Правила отбора для осциллятора. Интенсивность излучения
- § 28. **Движение в поле центральной силы. Ротатор** 173
Собственные значения и собственные функции. Момент импульса. Закон сохранения. Четность. Собственные функции и собственные значения ротатора. Правила отбора. Классификация состояний по моменту импульса
- § 29. **Прохождение микрочастиц через потенциальный барьер** 179
Определение потенциального барьера. Коэффициент прохождения и коэффициент отражения. Прямоугольный потенциальный барьер. Потенциальный барьер произвольной формы. Холодная эмиссия электронов из металла. Радиоактивный α -распад
- Задачи** 185

7 АТОМ ВОДОРОДА И ВОДОРОДОПОДОБНЫЕ АТОМЫ

- § 30. **Стационарные состояния атома водорода и спектр излучения** 188
Собственные значения и собственные функции. Радиальные волновые функции. Правило отбора для n . Распределение плотности в электронном облаке. Схема уровней энергии водородного атома и спектр излучения
- § 31. **Учет конечности массы ядра** 193
Гамильтониан с учетом конечности массы ядра. Сдвиг энергетических уровней
- § 32. **Водородоподобные атомы и системы** 195
Определение и общая характеристика. Водородоподобные ионы и изотопы водорода. Позитроний и мюоний. Мюонные атомы. Адронные атомы. Ридберговские атомы
- § 33. **Атомы щелочных металлов** 198
Собственные значения энергии щелочных металлов. Правила отбора. Резонансная линия. Главная серия. Первая побочная (или диффузная) серия. Вторая побочная (или резкая) серия. Спектры других щелочных металлов
- § 34. **Дублетная структура спектров щелочных металлов и спин электрона** 202
Экспериментальные факты. Спин электрона. Собственный магнитный момент электрона. Сущность спин-орбитального взаимодействия. Объяснение закономерностей расщепления линий
- Задачи** 206

8 МАГНИТНЫЙ И МЕХАНИЧЕСКИЙ МОМЕНТЫ АТОМА

- § 35. **Орбитальный момент электрона** 208
Источники атомного магнетизма. Орбитальный момент электрона по квантовой теории. Модуль и ориентировка орбитального магнитного момента. Гироманнитное отношение
- § 36. **Оператор спина электрона** 211
Спин. Оператор спина. Оператор проекции спина на произвольное направление. Среднее значение проекции спина, находящегося в определенном состоянии. Вероятность проекции спина на заданное направление

§ 37. Магнитный и механический моменты атома	214	Спин-орбитальное взаимодействие. Мультиплетность энергетических уровней. Мультиплетность линий излучения. Правило отбора для L . Правило отбора для S . Правило отбора для J . Мультиплетная структура спектров щелочных элементов. Мультиплетность спектров щелочно-земельных элементов. Мультиплетность спектров атомов с тремя оптическими электронами. Правило мультиплетностей
§ 38. Квантово-механическое описание спина в магнитном поле	220	Уравнение Шредингера для спина в магнитном поле. Прецессия спина
§ 39. Магнитомеханические эффекты	222	Физическая природа эффектов. Опыт Эйнштейна – де Гааза. Прецессия атома в магнитном поле. Эффект Барнетта
§ 40. Экспериментальные методы измерения магнитных моментов	225	Метод отклонения атомов в неоднородном магнитном поле. Метод магнитного резонанса
Задачи	230	
9 ТЕОРИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ		
§ 41. Стационарная теория возмущений в случае невырожденных собственных значений	232	Постановка задачи. Оператор возмущения. Вычисление поправок к собственным функциям и собственным значениям. Постановка задачи в теории столкновений. Борновское приближение. Формула Резерфорда
§ 42. Стационарная теория возмущений в случае вырожденных собственных значений	238	Ортогонализация собственных функций, принадлежащих вырожденному собственному значению. Снятие вырождения
§ 43. Нестационарная теория возмущений	241	Постановка задачи. Уравнение Шредингера в представлении взаимодействия. Вычисление поправок к волновым функциям
Задачи	244	
10 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТОМА С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ		
§ 44. Мультиплетная структура термов атомов и линий излучения как результат спин-орбитального взаимодействия	246	
§ 45. Эффект Зеемана	249	Смысл слабого магнитного поля. Расщепление энергетических уровней при помещении атома в магнитное поле. Расщепление линий излучения. Сложный эффект Зеемана. Простой эффект Зеемана
§ 46. Эффект Пашена – Бака	252	Сильное поле. Расщепление уровней. Расщепление линий излучения
§ 47. Эффект Штарка	254	Эффект Штарка первого порядка в атоме водорода. Равенство нулю первой поправки к энергии основного состояния. Расщепление уровней первого возбужденного состояния. Квадратичный эффект Штарка
§ 48. Взаимодействие двухуровневого атома с когерентным резонансным излучением	257	Двухуровневый атом. Уравнение Шредингера. Решение уравнения Шредингера. Обсуждение физического содержания решения
§ 49. Динамика спина в переменном магнитном поле	259	Постановка задачи. Уравнение Шредингера. Решение уравнения. Прецессия спина
§ 50. Теория дисперсии	261	Задачи теории дисперсии. Нахождение волновой функции. Атомная диэлектрическая восприимчивость
§ 51. Комбинационное рассеяние	265	Дипольное приближение. Рэлеевское рассеяние. Комбинационное рассеяние
Задачи	268	
11 МНОГОЭЛЕКТРОННЫЕ АТОМЫ		
§ 52. Атом гелия	270	Непригодность старой теории Бора. Уравнение Шредингера. Решение задачи в случае пренебрежения взаимодействи-

ем между электронами и без учета спинов электронов. Тождественность различных электронов. Обменное вырождение. Симметрия волновых функций. Обменное вырождение и симметрия волновых функций с учетом взаимодействия между электронами. Волновые функции электрона с учетом спина. Математическая формулировка принципа Паули. Взаимодействие между электронами			
§ 53. Приближенные методы расчета сложных атомов	279		
Недостаточность теории возмущений. Вариационный метод. Метод Рунца. Метод самосогласованного поля. Статистический метод			
§ 54. Электронные конфигурации и идеальная схема заполнения оболочек	283		
Электронные конфигурации. Последовательность заполнения электронных оболочек. Правило Хунда. Периодичность химических свойств элементов			
§ 55. Периодическая система элементов Менделеева	286		
Обозначение электронных состояний. Заполнение электронных состояний в первых трех периодах. Отклонения от идеальной схемы заполнения оболочек			
§ 56. Трансурановые элементы	288		
Причины нестабильности трансурановых элементов. Характеристика полученных трансурановых элементов. Причины чрезвычайно малых времен жизни очень тяжелых трансурановых элементов			
§ 57. Рентгеновские спектры	292		
Рентгеновское излучение. Особенности рентгеновских спектров. Объяснение особенностей рентгеновских спектров. Закон Мозли. Дублетный характер рентгеновских спектров			
Задачи	296		
12 МОЛЕКУЛЫ			
§ 58. Химическая связь	298		
Типы химической связи. Ковалентная связь. Ионная связь			
§ 59. Ион молекулы водорода. Метод орбиталей	304		
Приближение Борна – Оппенгеймера. Ион молекулы водорода. Качественное рассмотрение. Метод орбиталей			
§ 60. Молекула водорода	307		
Волновые функции. Энергия взаимодействия. Равновесное расстояние. Полный спин молекулы. Параводород и ортоводород			
§ 61. Валентность. Метод валентных связей	312		
Инертные газы. Валентность. Метод валентных связей			
§ 62. Структура молекул	313		
Метод молекулярных орбиталей. Представление структуры методом валентных связей. Направленные валентности атомов. Гибридизация. Кратные связи между атомами			
§ 63. Колебательные и вращательные спектры молекул	316		
Энергетические состояния молекулы. Вращение двухатомных молекул. Вращение многоатомных молекул. Вращательные спектры. Колебания двухатомных молекул. Колебания многоатомных молекул. Вращательно-колебательные спектры			
§ 64. Электронные спектры молекул	324		
Принцип Франка – Кондона. Классификация электронных состояний молекулы. Отбор переходов между колебательными состояниями. Предиссоциация. Люминесценция			
Задачи	330		
13 ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ			
§ 65. Типы связи в кристаллах	332		
Возникновение кристаллической структуры. Энергия взаимодействия атомов. Ионная связь. Ковалентная связь. Водородная связь. Металлическая связь. Молекулярная связь			
§ 66. Основные понятия зонной теории твердых тел	335		
Теорема Блоха. Одномерная модель кристалла Кронига – Пенни. Проводники и диэлектрики. Естественные полупроводники. Примесные полупроводники			
§ 67. Переход металл – металл	344		
Энергия Ферми. Переходы и контакты. Возникновение разности потенциалов на переходе металл – металл. Расчет разности потенциалов. Термоэлектричество. Эффект Пельтье. Эффект Томсона			
§ 68. Полупроводники	350		
Примесные уровни. Скорость электронов. Ускорение электронов. Эффективная масса. Дырки. Подвижность носителей. Рекомбинация. Применение однородных полупроводников			

- § 69. ***p-n*-Переходы и транзисторы** 356
 Возникновение *p-n*-перехода. Распределение электронов и дырок в *p-n*-переходе. Электрический ток через *p-n*-переход. Вольт-амперная характеристика. Емкость *p-n*-перехода. Диод. Туннельный диод. Выпрямление тока. Детектирование. Стабилитрон. Светоизлучающий диод. Биполярный транзистор. Включение по схеме с общим эмиттером. Включение по схеме с общей базой. Включение по схеме с общим коллектором. Полевые транзисторы. Интегральные схемы
- § 70. **Сверхпроводимость** 369
 Сверхпроводимость. Критическое поле. Критическая плотность тока. Эффект Мейсснера. Сверхпроводники первого и второго рода. Остаточное сопротивление металлов. Спаривание электронов. Энергетическая щель. Фазовая когерентность. Квантование магнитного потока. Колебания тока в сверхпроводящем кольце. Туннелирование электронов через диэлектрический слой. Эффекты Джозефсона. Квантовые интерферометры. Высокотемпературная сверхпроводимость
- 14 РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЭФФЕКТЫ В АТОМНОЙ ФИЗИКЕ**
- § 71. **Релятивистские волновые уравнения** 382
 Область релятивистских эффектов в атомной физике. Общие замечания о релятивистских уравнениях. Уравнение Клейна-Гордона. Уравнение Дирака. Волновая функция свободного электрона
- § 72. **Релятивистские эффекты в атомной физике** 393
 Уровни энергии бесспиновой частицы в кулоновском поле. Тонкая структура уровней энергии атома водорода. Состояния с отрицательной энергией
- § 73. **Физические свойства вакуума** 400
 Опыты Лэмба и Ризерфорда. Физические свойства вакуума
- 15 КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ**
- § 74. **Измерение в квантовой механике** 404
 Материальная точка квантовой механики. Состояние движения. Измерение в классической механике. Измерение в квантовой механике. Статистический ансамбль систем. Детерминированное и недетерминированное изменение состояния. Редукция состояния
- § 75. **Элемент физической реальности и проблема полноты квантовой механики** 411
 Соотношение неопределенностей. Индетерминизм. Рассуждения ЭПР и элементы физической реальности. Проблема полноты квантовой теории. Квантовомеханическая корреляция и несепарабельность квантовой системы
- § 76. **Квантовые корреляции** 416
 Корреляция спинов в синглетном состоянии. Схема эксперимента типа ЭПР с поляризациями. Измерение линейной поляризации фотонов. Вычисление коэффициента корреляции поляризаций
- § 77. **Корреляционные эксперименты** 423
 Возбуждение источника каскадного излучения пар фотонов. Эксперименты с одноканальными анализаторами. Эксперименты с двухканальными анализаторами
- § 78. **Неравенства Белла и физическая реальность** 425
 Локальный характер законов классической физики. Неравенства Белла. Экспериментальная проверка неравенств Белла. Физическая реальность. Эксперименты с переключаемыми анализаторами
- § 79. **Физическая реальность и здравый смысл** 430
 Приложение 435
 Предметный указатель 436