

Ю.М. Григорьев  
И.С. Кычкин

ФИЗИКА АТОМА  
И  
АТОМНЫХ ЯВЛЕНИЙ

$$\hat{H}\psi = E\psi$$

СЕВЕРО-ВОСТОЧНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ М.К. АММОСОВА

Ю.М. Григорьев  
И.С. Кычкин

# ФИЗИКА АТОМА И АТОМНЫХ ЯВЛЕНИЙ

*Рекомендовано  
ФГАОУ ВПО*

*«Московский физико-технический институт  
(государственный университет)»*

*в качестве учебного пособия для студентов высших  
учебных заведений, обучающихся по направлению  
подготовки ВПО 03.03.02 (0011200) – физика.*

*Регистрационный номер рецензии  
№256 от 18.06.2012 г. ФГАУ ФИРО*



МОСКВА  
ФИЗМАТЛИТ®  
2015

УДК 539.1  
ББК 530.3  
Г 83

Григорьев Ю. М., Кычкин И. С. **Физика атома и атомных явлений.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. — 368 с. — ISBN 978-5-9221-1605-3.

Пособие написано на основе лекций по атомной физике, читаемых на протяжении многих лет в Физико-техническом институте (на физическом факультете) Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова (Якутского государственного университета). Приведены трудности классической физики, ставшие причиной появления квантовой физики. Изложены основы математического аппарата квантовой теории. С помощью уравнения Шрёдингера исследуются строение одно- и многоэлектронных атомов, простейших молекул, действие внешних полей на атомы; приведены элементы физики твердого тела. В конце каждого параграфа даны задачи с решениями.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям физика и радиофизика, а также студентов технических университетов.

*Рекомендовано ФГАОУ ВПО «Московский физико-технический институт (государственный университет)» в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки ВПО 03.03.02 (0011200) — физика. Регистрационный номер рецензии №256 от 18.06.2012 г. ФГАУ ФИРО.*

ISBN 978-5-9221-1605-3

© ФИЗМАТЛИТ, 2015

© Ю. М. Григорьев, И. С. Кычкин, 2015

## Оглавление

Предисловие . . . . .	6
Глава I. <b>Трудности классической физики. Гипотезы</b> . . . . .	7
1. 1900 г. Гипотеза Планка . . . . .	7
1.1. Тепловое излучение (7). 1.2. Классические законы теплового излучения (9). 1.3. Гипотеза Планка. Формула Планка (11).	
2. 1888–1890 гг. Фотозффект. 1905 г. Гипотеза Эйнштейна. Фотоны . . . . .	21
3. 1911 г. Модель атома Резерфорда . . . . .	31
3.1. Опыт Резерфорда (31). 3.2. Движение частицы в центральном поле сил (33). 3.3. Теория рассеяния $\alpha$ -частиц. Формула Резерфорда (35). 3.4. Модель атома Резерфорда (39). 3.5. Спектр атома водорода (41). 3.6. Комбинационный принцип Ритца (45).	
4. 1913 г. Постулаты Бора. Атом Бора . . . . .	50
4.1. Постулаты Бора (50). 4.2. Атом Бора (50). 4.3. Опыты Франка и Герца (56).	
5. 1923 г. Эффект Комптона . . . . .	62
6. 1924 г. Гипотеза де Бройля. Корпускулярно-волновой дуализм свойств вещества . . . . .	67
6.1. Корпускулярно-волновой дуализм электромагнитного излучения (67). 6.2. Гипотеза де Бройля. Корпускулярно-волновой дуализм частиц вещества (68). 6.3. Экспериментальное подтверждение гипотезы де Бройля. Опыт Дэвиссона–Джермера (72). 6.4. Статистический (вероятностный) смысл волн де Бройля (74). 6.5. Соотношения неопределенностей Гейзенберга (77). 6.6. Соотношение неопределенностей для энергии и времени (81).	
Глава II. <b>Основы квантовой механики</b> . . . . .	92
7. 1926 г. Уравнение Шредингера . . . . .	92
7.1. Уравнение Шредингера (92). 7.2. Свойства волновой функции (96). 7.3. Физические величины как операторы (98). 7.4. Оператор кинетической энергии (102). 7.5. Оператор момента импульса (105).	
8. Некоторые задачи квантовой механики . . . . .	113
8.1. Свободная частица (113). 8.2. Частица в бесконечно глубокой потенциальной яме (115). 8.3. Частица в потенциальной яме (118). 8.4. Прохождение частицы через потенциальный барьер (121). 8.5. Линейный гармонический осциллятор (125).	

Глава III. Атом водорода . . . . .	133
9. Атом водорода (водородоподобный атом). . . . .	133
9.1. Уравнение Шредингера для атома водорода (водородоподобного атома) (133). 9.2. Решение уравнения Шредингера (134). 9.3. Энергетические уровни водородоподобных атомов (138). 9.4. Распределение электронного облака (140). 9.5. Средние значения некоторых величин (144). 9.6. Излучение (147).	
10. Спин. Спин-орбитальное взаимодействие. Тонкая и сверхтонкая структура энергетических уровней . . . . .	156
10.1. Орбитальный механический момент электрона. Орбитальный магнитный момент электрона. Гиромагнитное отношение (156). 10.2. Опыты Штерна–Герлаха. Спин электрона. Спиновое гиромагнитное отношение (159). 10.3. Спин. Полный момент (163). 10.4. Спин-орбитальное взаимодействие (165). 10.5. Релятивистские поправки (167). 10.6. Тонкая структура энергетических уровней водородоподобных атомов (167). 10.7. Тонкая структура линий водорода и водородоподобных атомов (170). 10.8. Постоянная Ридберга (175).	
Глава IV. Многоэлектронный атом . . . . .	183
11. Периодическая система . . . . .	183
11.1. Одноэлектронное приближение (183). 11.2. Принцип Паули (186). 11.3. Периодическая система (188). 11.4. Рентгеновские спектры (194).	
12. Многоэлектронный атом . . . . .	202
12.1. Гелиеподобный атом (202). 12.2. Гелиеподобный атом. Основное состояние (204). 12.3. Гелиеподобный атом. Возбужденные состояния (205). 12.4. Гелиеподобный атом. Возбужденные состояния. Тонкая структура (207). 12.5. Многоэлектронный атом (211). 12.6. Тонкая структура в многоэлектронных атомах (мультиплетное расщепление) (214). 12.7. Щелочные металлы и сходные с ними ионы (219).	
13. Приближенные методы расчета энергий многоэлектронных атомов . . . . .	231
13.1. Уравнение Шредингера в случае многоэлектронного атома. Функция состояния многоэлектронного атома (231). 13.2. Полуэмпирический метод Слэтера (232). 13.3. Метод самосогласованного поля Хартри (234). 13.4. Метод самосогласованного поля Хартри–Фока (235).	
Глава V. Атом во внешнем поле . . . . .	239
14. Атом во внешнем магнитном поле. Эффект Зеемана . . . . .	239
14.1. Эффект Зеемана (239). 14.2. Эффект Зеемана. Расщепление спектральных линий (241). 14.3. Эффект Зеемана в сильных магнитных полях (эффект Пашена–Бака) (244). 14.4. Эффект Зеемана в случае промежуточных магнитных полей (246).	
15. Атом во внешнем электрическом поле. Эффект Штарка . . . . .	256
15.1. Атом во внешнем электрическом поле (256). 15.2. Эффект Штарка для водородоподобных атомов (258). 15.3. Эффект Штарка для многоэлектронных атомов (261).	
16. Атомная спектроскопия . . . . .	263
16.1. Коэффициенты Эйнштейна (263). 16.2. Интенсивность и ширина спектральной линии (268).	

---

Глава VI. Молекула . . . . .	275
17. Молекула. . . . .	275
17.1. Молекула (275). 17.2. Оценка разных видов молекулярных энергий (276). 17.3. Колебательная энергия двухатомной молекулы (278). 17.4. Вращательная энергия двухатомной молекулы (278). 17.5. Энергетический спектр двухатомной молекулы (279).	
18. Химическая связь . . . . .	292
18.1. Химическая связь. Типы связей (292). 18.2. Молекулярный ион $\text{H}_2^+$ (294). 18.3. Молекула водорода $\text{H}_2$ (ковалентная связь) (301). 18.4. Молекула хлористого натрия $\text{NaCl}$ (ионная связь) (306).	
Глава VII. Элементы квантовой физики твердого тела . . . . .	314
19. Электронная зонная теория твердых тел . . . . .	314
19.1. Электронные энергетические зоны (314). 19.2. Валентные электроны (317). 19.3. Энергия Ферми (320). 19.4. Металлы, полупроводники и диэлектрики (323).	
20. Электронные свойства твердых тел . . . . .	328
20.1. Равновесное тепловое распределение электронов (328). 20.2. Теплоемкость твердых тел. Фононы (331). 20.3. Электронная теплоемкость (336). 20.4. Электронная проводимость (339). 20.5. Электропроводность полупроводников (собственная электропроводность полупроводников) (343). 20.6. Примесная электропроводность полупроводников (345). 20.7. Аддитивность электросопротивления. Правило Маттисена (348). 20.8. Сверхпроводимость (351). 20.9. Высокотемпературная сверхпроводимость (ВТСП) (354). 20.10. Комнатнотемпературная сверхпроводимость (1916–2009) (КТСП) (355).	
Список литературы . . . . .	361
Предметный указатель . . . . .	362