

И. В. САВЕЛЬЕВ

КУРС ФИЗИКИ

ТОМ 3

КВАНТОВАЯ ОПТИКА
АТОМНАЯ ФИЗИКА
ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА
ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА
И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

*Допущено Государственным комитетом СССР
по народному образованию
в качестве учебника для студентов
высших технических учебных заведений*



МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1989

ББК 22.3
С12
УДК 53(075.8)

Рецензенты:

кафедра физики Московского авиационного института
им. С. Орджоникидзе (заведующий кафедрой доктор физико-
математических наук, профессор *Ф. А. Николаев*);
доктор физико-математических наук, профессор *А. Д. Гладун*

САВЕЛЬЕВ И. В. Курс физики: Учеб.: В 3-х т. Т. 3: Кван-
товая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика
атомного ядра и элементарных частиц.— М.: Наука. Гл. ред.
физ.-мат. лит., 1989.— 304 с.— ISBN 5-02-014432-0 (Т. 3).

Содержание и расположение материала соответствуют про-
грамме курса «Физика» для инженерно-технических специаль-
ностей вузов, утвержденной Учебно-методическим управлением по
высшему образованию Минвуза СССР. Главное внимание обра-
щено на разъяснение физических законов и их сознательное при-
менение. Новый курс существенно отличается от «Курса общей
физики» того же автора (М.: Наука, 1986—1988) отбором мате-
риала, уровнем и способом изложения.

Для студентов и преподавателей высших технических учеб-
ных заведений; может быть использован студентами других
вузов.

Табл. 6. Ил. 127.

С $\frac{1604010000-076}{053(02)-89}102-89$

ISBN 5-02-014432-0 (Т. 3)

ISBN 5-02-014052-X

© Издательство «Наука»,
Главная редакция
физико-математической
литературы, 1989

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие

6

ЧАСТЬ 1

КВАНТОВАЯ ПРИРОДА ИЗЛУЧЕНИЯ

Глава 1. Тепловое излучение	7
§ 1. Основные определения	7
§ 2. Закон Кирхгофа	10
§ 3. Равновесная плотность энергии излучения	13
§ 4. Закон Стефана — Больцмана и закон Вина	14
§ 5. Формула Планка	16
§ 6. Оптическая пирометрия	27
Примеры решения задач	32
Глава 2. Фотоны	32
§ 7. Коротковолновая граница рентгеновского спектра	32
§ 8. Внешний фотоэффект	35
§ 9. Фотоны .	40
§ 10. Эффект Комптона	44
Примеры решения задач	48

ЧАСТЬ 2

ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОЙ ФИЗИКИ И КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

Глава 3. Волновые свойства микрочастиц	50
§ 11. Гипотеза де Бройля	50
§ 12. Свойства микрочастиц . . .	53
§ 13. Соотношение неопределенностей	56
§ 14. Волновая функция .	60
§ 15. Уравнение Шрёдингера	62
§ 16. Прохождение частиц через потенциальный барьер	65
Примеры решения задач .	70
Глава 4. Квантование физических величин	71
§ 17. Квантование энергии	71
§ 18. Собственные значения физических величин	76
§ 19. Квантование момента импульса	78
§ 20. Гармонический осциллятор	81
Примеры решения задач	84
Глава 5. Физика атомов и молекул .	85
§ 21. Опыт Резерфорда. Теория Бора	85
§ 22. Атом водорода	93

§ 23. Механический и магнитный моменты электрона	104
§ 24. Механический и магнитный моменты атомов	110
§ 25. Эффект Зеемана	118
§ 26. Электронный парамагнитный резонанс	122
§ 27. Принцип Паули	124
§ 28. Энергия молекул	131
Примеры решения задач	135
Глава 6. Излучение и спектры	136
§ 29. Спектры атомов и молекул	136
§ 30. Рентгеновские спектры	141
§ 31. Комбинационное рассеяние света	144
§ 32. Вынужденное излучение	146
§ 33. Лазеры	149
Примеры решения задач	156

ЧАСТЬ 3

ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ СТАТИСТИКИ И ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Глава 7. Статистики Бозе — Эйнштейна и Ферми — Дирака	157
§ 34. Распределение Ферми — Дирака и распределение Бозе — Эйнштейна	157
§ 35. Фотонный газ	165
§ 36. Фононный газ. Теплоемкость кристаллической решетки	167
§ 37. Сверхтекучесть	174
§ 38. Электронный газ в металлах	179
§ 39. Движение электрона в периодическом поле кристаллической решетки	184
§ 40. Электропроводность металлов	186
§ 41. Сверхпроводимость	189
Примеры решения задач	196
Глава 8. Зонная теория твердых тел	197
§ 42. Энергетические зоны в кристаллах	197
§ 43. Полупроводники	200
§ 44. Контактные явления	210
§ 45. Контакт электронного и дырочного полупроводников	220
§ 46. Фотоэффект в полупроводниках	225
§ 47. Люминесценция твердых тел	227
Примеры решения задач	229

ЧАСТЬ 4

ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Глава 9. Атомное ядро	231
§ 48. Состав и характеристика атомного ядра	231
§ 49. Дефект массы и энергия связи ядра	235
§ 50. Ядерные силы	238
§ 51. Радиоактивность	245
§ 52. Ядерные реакции	254

§ 53. Деление ядер	. 259
§ 54. Синтез атомных ядер	267
Примеры решения задач	. 270
Г л а в а 10. Элементарные частицы	271
§ 55. Виды взаимодействий и классы элементарных частиц	271
§ 56. Частицы и античастицы	274
§ 57. Кварки	281
§ 58. Единая теория взаимодействий	285
Примеры решения задач	287
Приложение	290
Происхождение обозначений S , P , D , F , ... для состояний с различными значениями азимутального квантового числа L	290
Именной указатель	. 294
Предметный указатель	. 296

ПРЕДИСЛОВИЕ

«Курс физики» существенно отличается от «Курса общей физики» того же автора (М.: Наука, 1986—1988) отбором материала, уровнем и способом изложения. Курс написан в соответствии с утвержденной Учебно-методическим управлением по высшему образованию Минвуза СССР программой курса ФИЗИКА для инженерно-технических специальностей высших учебных заведений (УМУ-9/1).

Содержанием данного завершающего курса тома является физика XX столетия — квантовая физика. Начало этой физике было положено М. Планком в 1900 г. Тогда же родилось слово «квант». Заканчивается том рассказом о сенсационном событии в физике — обнаружении предсказанных теоретически промежуточных векторных бозонов (1982—1983 гг.).

Подчеркнем, что изучение физики принесет пользу и не будет скучным, обременительным занятием только в том случае, если работать над учебником «с карандашом в руках», проделывая все выкладки и добиваясь глубокого понимания изучаемого материала. При соблюдении этих условий физика предстанет перед учащимся как очень умная, логичная и красивая наука.

Большую роль в изучении физики играет самостоятельное решение задач. Некоторые задачи с решениями приведены в конце каждой главы. Задачи для самостоятельного решения можно найти в «Сборнике вопросов и задач по общей физике» И. В. Савельева (2-е изд. — М.: Наука, 1988).

Выражаю признательность профессору Ф. А. Николаеву и профессору А. Д. Гладуну за полезные замечания, которые были учтены при подготовке тома к печати.

Москва, июль 1988 г.

И. В. Савельев

Глава 1. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

§ 1. Основные определения

Тепловым (или температурным) излучением называется электромагнитное излучение, испускаемое телами за счет их внутренней энергии.

Тепловое излучение имеет место при любой температуре, однако при невысоких температурах излучаются практически лишь длинные (инфракрасные) электромагнитные волны. С повышением температуры возрастает общая энергия излучения, а максимум спектра излучения перемещается в область меньших длин волн.

Окружим излучающее тело оболочкой с идеально отражающей поверхностью (рис. 1.1). Воздух из оболочки удалим. Отраженное оболочкой излучение, упав на тело, поглотится им (частично или полностью). Следовательно, будет происходить непрерывный обмен энергией между телом и заполняющим оболочку излучением. Если распределение энергии между телом и излучением остается неизменным для каждой длины волны, состояние системы тело — излучение будет равновесным.

Опыт показывает, что единственным видом излучения, которое может находиться в равновесии с излучающими телами, является тепловое излучение. Эта способность теплового излучения обусловлена тем, что его интенсивность возрастает при повышении температуры. Допустим, что равновесие между телом и излучением нарушено и тело излучает энергии больше, чем поглощает. Тогда внутренняя энергия тела будет

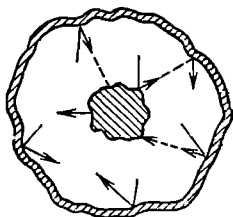


Рис. 1.1. Равновесие между телом и излучением в вакуумированной замкнутой полости с идеально отражающими стенками

убывать, что приведет к понижению температуры. Это в свою очередь обусловит уменьшение количества излучаемой телом энергии. Температура тела будет понижаться до тех пор, пока количество излучаемой телом энергии не станет равным количеству поглощаемой энергии. Если равновесие нарушится в другую сторону, т. е. количество излучаемой энергии окажется меньше, чем поглощаемой, температура тела будет возрастать до тех пор, пока снова не установится равновесие. Таким образом, нарушение равновесия в системе тело — излучение вызывает возникновение процессов, восстанавливающих равновесие.

К равновесным состояниям и процессам применимы законы термодинамики. Поэтому тепловое излучение должно подчиняться некоторым общим закономерностям, вытекающим из принципов термодинамики.

Интенсивность теплового излучения мы будем характеризовать потоком энергии, измеряемым в ваттах. Поток энергии, испускаемый единицей поверхности излучающего тела по всем направлениям (в пределах телесного угла 2π), называют энергетической светимостью тела. Мы будем обозначать эту величину буквой R . Энергетическая светимость является функцией температуры.

Излучение состоит из волн различных частот ω (или длин λ). Обозначим поток энергии, испускаемый единицей поверхности тела в интервале частот $d\omega$, через dR_ω . При малом интервале $d\omega$ поток dR_ω будет пропорционален $d\omega$:

$$dR_\omega = r_\omega d\omega. \quad (1.1)$$

Величина r_ω называется испускательной способностью тела. Как и энергетическая светимость, испускательная способность сильно зависит от температуры тела. Таким образом, r_ω есть функция частоты и температуры.

Энергетическая светимость связана с испускательной способностью формулой

$$R_T = \int dR_{\omega T} = \int_0^\infty r_{\omega T} d\omega \quad (1.2)$$

(чтобы подчеркнуть, что энергетическая светимость и испускательная способность зависят от температуры, мы их снабдили индексом T).

Излучение можно характеризовать вместо частоты ω длиной волны λ . Участку спектра $d\omega$ будет соответствовать интервал длин волн $d\lambda$. Определяющие один и тот же участок величины $d\omega$ и $d\lambda$ связаны простым соотношением, вытекающим из формулы: $\lambda = 2\pi c/\omega$. Дифференцирование дает

$$d\lambda = -\frac{2\pi c}{\omega^2} d\omega = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} d\omega. \quad (1.3)$$

Знак минус в этом выражении не имеет существенного значения, он лишь указывает на то, что с возрастанием одной из величин, ω или λ , другая величина убывает. Поэтому минус в дальнейшем мы не будем писать.

Доля энергетической светимости, приходящаяся на интервал $d\lambda$, может быть по аналогии с (1.1) представлена в виде

$$dR_\lambda = r_\lambda d\lambda. \quad (1.4)$$

Если интервалы $d\omega$ и $d\lambda$, входящие в выражения (1.1) и (1.4), связаны соотношением (1.3), т. е. относятся к одному и тому же участку спектра, то величины dR_ω и dR_λ должны совпадать:

$$r_\omega d\omega = r_\lambda d\lambda.$$

Заменяя в последнем равенстве $d\lambda$ согласно (1.3), получим

$$r_\omega d\omega = r_\lambda \frac{2\pi c}{\omega^2} d\omega = r_\lambda \frac{\lambda^2}{2\pi c} d\omega,$$

откуда

$$r_\omega = r_\lambda \frac{2\pi c}{\omega^2} = r_\lambda \frac{\lambda^2}{2\pi c}. \quad (1.5)$$

С помощью формулы (1.5) можно перейти от r_λ к r_ω и наоборот.

Пусть на элементарную площадку поверхности тела падает поток лучистой энергии $d\Phi_\omega$, обусловленный электромагнитными волнами, частота которых заключена в интервале $d\omega$. Часть этого потока $d\Phi'_\omega$ будет поглощена телом. Безразмерная величина

$$a_{\omega T} = \frac{d\Phi'_\omega}{d\Phi_\omega} \quad (1.6)$$

называется поглощательной способностью тела. Поглощательная способность тела есть функция частоты и температуры.

По определению $a_{\omega T}$ не может быть больше единицы. Для тела, полностью поглощающего упавшее на него излучение всех частот, $a_{\omega T} \equiv 1$. Такое тело называется абсолютно черным. Тело, для которого $a_{\omega T} \equiv a_T = \text{const} < 1$, называют серым.

§ 2. Закон Кирхгофа

Между испускательной и поглощательной способностями любого тела имеется связь. В этом можно убедиться, рассмотрев следующий эксперимент. Пусть

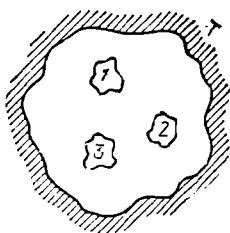


Рис. 2.1. Тела, заключенные в эвакуированную полость, стенки которой поддерживаются при неизменной температуре

внутри замкнутой оболочки, поддерживаемой при постоянной температуре T , помещены несколько тел (рис. 2.1). Полость внутри оболочки эвакуирована, так что тела могут обмениваться энергией между собой и с оболочкой лишь путем испускания и поглощения электромагнитных волн. Опыт показывает, что такая система через некоторое время придет в состояние теплового равновесия — все тела примут одну и ту же температуру, равную температуре оболочки T .

В таком состоянии тело, обладающее большей испускательной способностью $r_{\omega T}$, теряет в единицу времени с единицы поверхности больше энергии, чем тело, обладающее меньшей $r_{\omega T}$. Поскольку температура (а следовательно, и энергия) тел не меняется, то тело, испускающее больше энергии, должно и больше поглощать, т. е. обладать большей $a_{\omega T}$. Таким образом, чем больше испускательная способность тела $r_{\omega T}$, тем больше и его поглощательная способность $a_{\omega T}$. Отсюда вытекает соотношение

$$\left(\frac{r_{\omega T}}{a_{\omega T}}\right)_1 = \left(\frac{r_{\omega T}}{a_{\omega T}}\right)_2 = \left(\frac{r_{\omega T}}{a_{\omega T}}\right)_3 = \dots, \quad (2.1)$$

где индексы 1, 2, 3 и т. д. относятся к разным телам.

Соотношение (2.1) выражает установленный Кирхгофом закон, который формулируется следующим образом: *отношение испускательной и поглощательной способностей не зависит от природы тела, оно является для всех тел одной и той же (универсальной) функцией частоты (длины волны) и температуры:*

$$r_{\omega T}/a_{\omega T} = f(\omega, T). \quad (2.2)$$

Сами величины $r_{\omega T}$ и $a_{\omega T}$ могут меняться чрезвычайно сильно при переходе от одного тела к другому. Отношение же их оказывается одинаковым для всех тел. Это означает, что тело, сильнее поглощающее какие-либо лучи, будет эти лучи сильнее и испускать (не следует смешивать испускание лучей с их отражением).

Для абсолютно черного тела по определению $a_{\omega T} \equiv 1$. Следовательно, из формулы (2.2) вытекает, что $r_{\omega T}$ для такого тела равна $f(\omega, T)$. Таким образом, универсальная функция Кирхгофа $f(\omega, T)$ есть не что иное, как испускательная способность абсолютно черного тела.

При теоретических исследованиях для характеристики спектрального состава равновесного теплового излучения удобнее пользоваться функцией частоты $f(\omega, T)$. В экспериментальных работах удобнее пользоваться функцией длины волны $\varphi(\lambda, T)$. Обе функции связаны друг с другом формулой

$$f(\omega, T) = \frac{2\pi c}{\omega^2} \varphi(\lambda, T) = \frac{\lambda^2}{2\pi c} \varphi(\lambda, T), \quad (2.3)$$

аналогичной формуле (1.5). Согласно (2.3) для того, чтобы по известной функции $f(\omega, T)$ найти $\varphi(\lambda, T)$, нужно заменить в $f(\omega, T)$ частоту ω через $2\pi c/\lambda$ и получившееся выражение умножить на $2\pi c/\lambda^2$:

$$\varphi(\lambda, T) = \frac{2\pi c}{\lambda^2} f\left(\frac{2\pi c}{\lambda}, T\right). \quad (2.4)$$

Для нахождения $f(\omega, T)$ по известной $\varphi(\lambda, T)$ нужно воспользоваться соотношением

$$f(\omega, T) = \frac{2\pi c}{\omega^2} \varphi\left(\frac{2\pi c}{\omega}, T\right). \quad (2.5)$$

Абсолютно черных тел в природе не существует. Сажа или платиновая чернь имеют поглощательную способность $a_{\omega T}$, близкую к единице лишь в ограни-

ченном интервале частот; в далекой инфракрасной области их поглощательная способность заметно меньше единицы. Однако можно создать устройство, сколь угодно близкое по своим свойствам к абсолютно черному телу. Такое устройство представляет собой почти замкнутую полость, снабженную малым отверстием (рис. 2.2). Излучение, проникшее внутрь через отверстие, прежде чем выйти обратно из отверстия, претерпевает многократные отражения. При каждом отражении часть энергии поглощается, в результате чего практически все излучение любой частоты погло-

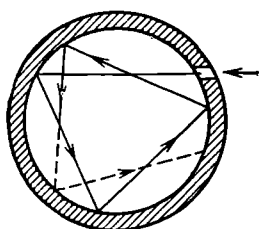


Рис. 2.2. Модель абсолютно черного тела

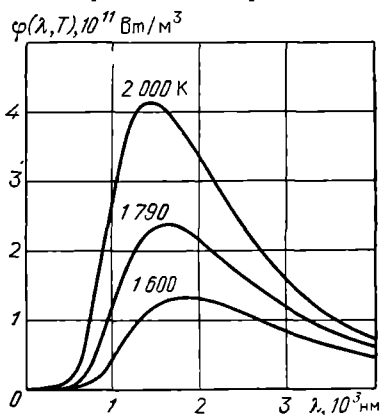


Рис. 2.3. Экспериментальные кривые зависимости испускательной способности абсолютно черного тела от длины волны, полученные для трех значений температуры

щается такой полостью. (По той же причине внутренность комнаты в яркий солнечный день при рассматривании издали через открытое окно кажется темной.) Согласно закону Кирхгофа испускательная способность такого устройства очень близка к $f(\omega, T)$, причем T означает температуру стенок полости. Таким образом, если стенки полости поддерживать при некоторой температуре T , то из отверстия выходит излучение, весьма близкое по спектральному составу к излучению абсолютно черного тела при той же температуре. Разлагая это излучение в спектр с помощью дифракционной решетки и измеряя интенсивность различных участков спектра, можно найти экспериментально вид функции $f(\omega, T)$ или $\phi(\lambda, T)$. Результаты

таких опытов приведены на рис. 2.3. Разные кривые относятся к различным значениям температуры T абсолютно черного тела. Площадь, охватываемая кривой, дает энергетическую светимость абсолютно черного тела при соответствующей температуре.

Из рис. 2.3 следует, что энергетическая светимость абсолютно черного тела сильно возрастает с температурой. Максимум излучательной способности с увеличением температуры сдвигается в сторону более коротких волн.

§ 3. Равновесная плотность энергии излучения

Рассмотрим излучение, находящееся в равновесии с веществом. Для этого представим себе эвакуированную полость, стенки которой поддерживаются при постоянной температуре T . В равновесном состоянии энергия излучения будет распределена в объеме полости с определенной плотностью $u = u(T)$. Спектральное распределение этой энергии можно охарактеризовать функцией $u(\omega, T)$, определяемой условием $du_\omega = u(\omega, T)d\omega$, где du_ω — доля плотности энергии, приходящаяся на интервал частот $d\omega$. Полная плотность энергии $u(T)$ связана с функцией $u(\omega, T)$ формулой

$$u(T) = \int_0^{\infty} u(\omega, T) d\omega. \quad (3.1)$$

Из термодинамических соображений следует, что равновесная плотность энергии излучения $u(T)$ зависит только от температуры и не зависит от свойств стенок полости. Рассмотрим две полости, стенки которых изготовлены из разных материалов и имеют первоначально одинаковую температуру. Допустим, что равновесная плотность энергии в обеих полостях различна и, скажем, $u_1(T) > u_2(T)$. Соединим полости с помощью небольшого отверстия (рис. 3.1) и тем самым позволим стенкам полостей вступить в теплообмен через излучение. Так как по предположению $u_1 > u_2$, поток энергии из первой полости во вторую должен быть больше, чем поток, текущий во встречном направлении. В результате стенки второй полости станут поглощать больше энергии, чем излучать, и

температура их начнет повышаться. Стенки же первой полости станут поглощать меньше энергии, чем излучать, так что они будут охлаждаться. Однако два тела с первоначально одинаковой температурой не могут вследствие теплообмена друг с другом приобрести

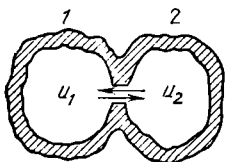


Рис. 3.1. Обмен лучистой энергией между двумя полостями, стенки которых имеют одинаковую температуру

различные температуры — это запрещено вторым началом термодинамики. Поэтому наше допущение о неодинаковости u_1 и u_2 должно быть признано неверным. В соответствии с принципом детального равновесия (см. § 63 1-го тома) вывод о равенстве $u_1(T)$ и $u_2(T)$ распространяется на каждую спектральную составляющую $u(\omega, T)$.

В § 9 мы выведем формулу, связывающую испускательную способность абсолютно черного тела с равновесной плотностью энергии теплового излучения. Эта формула имеет вид

$$f(\omega, T) = \frac{c}{4} u(\omega, T). \quad (3.2)$$

§ 4. Закон Стефана — Больцмана и закон Вина

Теоретическое объяснение законов излучения абсолютно черного тела имело огромное значение в истории физики — оно привело к понятию квантов энергии.

Долгое время попытки получить теоретически вид функции $f(\omega, T)$, или, что то же самое, функции $u(\omega, T)$ (см. формулу (3.2)), не давали общего решения задачи. В 1879 г. Стефан¹⁾, анализируя экспериментальные данные, пришел к выводу, что энергетическая светимость R любого тела пропорциональна четвертой степени термодинамической температуры. Однако последующие более точные измерения показали ошибочность его выводов.

В 1884 г. Больцман, исходя из термодинамических соображений, получил теоретически для энергетиче-

¹⁾ Йозеф Стефан (1835—1893) — австрийский физик.

ской светимости абсолютно черного тела значение

$$R^* = \int_0^{\infty} f(\omega, T) d\omega = \sigma T^4, \quad (4.1)$$

где σ — постоянная величина, T — термодинамическая температура. (Чтобы подчеркнуть, что речь идет об энергетической светимости абсолютно черного тела, мы снабдили R звездочкой.) Таким образом, заключение, к которому Стефан пришел для нечерных тел (с абсолютно черными телами он не экспериментировал), оказалось справедливым лишь для абсолютно черных тел.

Соотношение (4.1) между энергетической светимостью абсолютно черного тела и его термодинамической температурой получило название закона Стефана — Больцмана. Константу σ называют постоянной Стефана — Больцмана. Ее экспериментальное значение равно

$$\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4). \quad (4.2)$$

В 1893 г. Вин¹⁾, воспользовавшись, кроме термодинамики, электромагнитной теорией, показал, что функция спектрального распределения должна иметь вид

$$f(\omega, T) = \omega^3 F\left(\frac{\omega}{T}\right), \quad (4.3)$$

где F — некоторая функция отношения частоты к температуре.

Согласно формуле (2.4) для функции $\varphi(\lambda, T)$ получается выражение

$$\varphi(\lambda, T) = \frac{2\pi c}{\lambda^2} \left(\frac{2\pi c}{\lambda}\right)^3 F\left(\frac{2\pi c}{\lambda T}\right) = \frac{1}{\lambda^5} \psi(\lambda T), \quad (4.4)$$

где $\psi(\lambda T)$ — некоторая функция произведения λT .

Соотношение (4.4) позволяет установить зависимость между длиной волны λ_m , на которую приходится максимум функции $\varphi(\lambda, T)$, и температурой. Про дифференцируем это соотношение по λ :

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{d\lambda} &= \frac{1}{\lambda^5} T \psi'(\lambda T) - \frac{5}{\lambda^6} \psi(\lambda T) = \\ &= \frac{1}{\lambda^6} [\lambda T \psi'(\lambda T) - 5\psi(\lambda T)]. \end{aligned} \quad (4.5)$$

¹⁾ Вильгельм Вин (1864—1928) — немецкий физик.

Выражение в квадратных скобках представляет собой некоторую функцию $\Psi(\lambda T)$. При длине волны λ_m , соответствующей максимуму функции $\Phi(\lambda, T)$, выражение (4.5) должно обращаться в нуль:

$$\left(\frac{d\Phi}{d\lambda}\right)_{\lambda=\lambda_m} = \frac{1}{\lambda_m^6} \Psi(\lambda_m T) = 0.$$

Из опыта известно, что λ_m конечно ($\lambda_m \neq \infty$). Поэтому должно выполняться условие: $\Psi(\lambda_m T) = 0$. Решение последнего уравнения относительно неизвестного $\lambda_m T$ дает для этого неизвестного некоторое число, которое мы обозначим буквой b . Таким образом, получается соотношение

$$\lambda_m T = b, \quad (4.6)$$

которое носит название закона смещения Вина. Экспериментальное значение константы b равно

$$b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К} = 2,898 \cdot 10^6 \text{ нм} \cdot \text{К}. \quad (4.7)$$

§ 5. Формула Планка

Функцию $f(\omega, T)$, в точности соответствующую экспериментальным данным, удалось найти Планку в 1900 г. При выводе этой функции возникает необходимость в подсчете числа стоячих волн, которые могут возбуждаться в объеме конечных размеров. С определения этого числа мы и начнем.

Из учения о колебаниях и волнах известно, что в закрепленной на концах струне могут возникать колебания лишь таких частот, при которых на длине струны укладывается целое число полуволн (см. § 78 2-го тома). Эти колебания имеют характер стоячих волн, причем на концах струны находятся узлы волн. Аналогично обстоит дело и в случае волн, возбуждаемых в двумерной или трехмерной областях.

Рассмотрим стоячую волну, возбуждаемую в двумерной области, имеющей форму прямоугольника, со сторонами a и b (рис. 5.1). Совместим с одной из сторон a ось x , а с одной из сторон b — ось y . Если возбудить волну, распространяющуюся вдоль оси x , то условие, накладываемое на волну, имеет вид

$$a = n_1 \frac{\lambda}{2} = n_1 \frac{\pi}{k_x}, \quad \text{или} \quad k_x = n_1 \frac{\pi}{a},$$

где $k_x = 2\pi/\lambda$ — модуль волнового вектора, совпадающий в данном случае с проекцией волнового вектора на ось x (из двух противоположно направленных волновых векторов взят тот, проекция которого на ось x положительна), n_1 — целое положительное число. Условие для волны, распространяющейся вдоль оси y , выглядит следующим образом:

$$b = n_2 \frac{\lambda}{2} = n_2 \frac{\pi}{k_y},$$

или

$$k_y = n_2 \frac{\pi}{b},$$

где k_y — проекция волнового вектора на ось y , n_2 — целое положительное число.

Теперь возбудим волну, распространяющуюся в направлении, образующем угол α с осью x и угол β с осью y (оба угла отличны от нуля). В результате отражения от границ области образуются четыре бегущих волны. На рис. 5.1 видно, что волны 1 и 3, а также волны 2 и 4 бегут навстречу друг другу. Поэтому образуются две системы стоячих волн, устанавливающиеся вдоль направлений, определяемых волновыми векторами k_1 и k_2 . Из рис. 5.2 следует, что, для того чтобы во всех четырех вершинах области были узлы обеих стоячих волн, на стороне a должен укладываться целое число раз отрезок длины $\lambda/2 \cos \alpha$, а на стороне b — отрезок длины $\lambda/2 \cos \beta$. Отсюда получаются два условия:

$$\frac{n_1 \lambda}{2 \cos \alpha} = a, \quad \frac{n_2 \lambda}{2 \cos \beta} = b. \quad (5.1)$$

Приняв во внимание, что $(2\pi/\lambda) \cos \alpha$ есть k_x -проекция волнового вектора на ось x , а $(2\pi/\lambda) \cos \beta$ есть k_y -проекция волнового вектора на ось y , условиям (5.1) можно придать вид

$$k_x = n_1 \frac{\pi}{a}, \quad k_y = n_2 \frac{\pi}{b}. \quad (5.2)$$

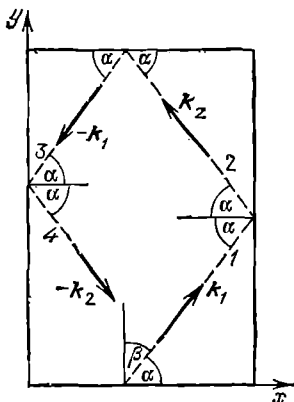


Рис. 5.1. Возникновение стоячих волн в двумерной области

где n_1 и n_2 — целые положительные числа. Подчеркнем, что k_x и k_y в формулах (5.2) — положительные величины.

Таким образом, при возбуждении в двумерной области волн, у которой волновой вектор $\mathbf{k}$ образует с осями x и y углы, отличные от нуля, возникает колебательный процесс, представляющий собой наложение

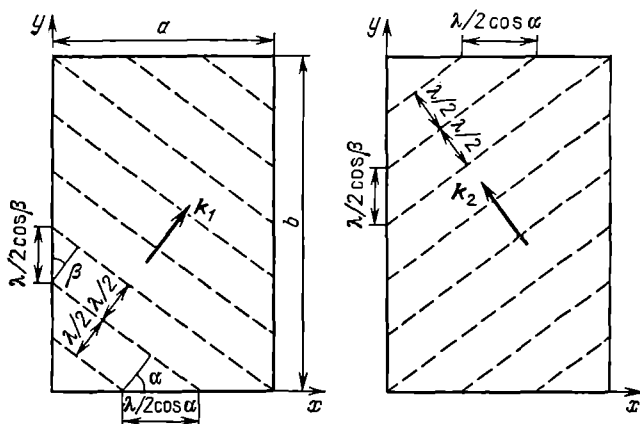


Рис. 5.2. Две системы стоячих волн в двумерной области (на обоих рисунках изображена одна и та же область). Штриховыми линиями показаны узлы волн. Обозначения те же, что на рис. 5.1

двух стоячих волн. Частота ω этих волн определяется условиями (5.2) (через соотношение $\omega = vk$; v — фазовая скорость волны). Следовательно, каждой паре чисел n_1 и n_2 соответствует частота стоячих волн, которые могут возбуждаться в данной двумерной области.

Возьмем на k -плоскости систему координат с осями k_x и k_y (рис. 5.3). Пары чисел n_1 и n_2 (т. е. возможной стоячей волне) будет соответствовать на этой плоскости точка с координатами (5.2). Точки располагаются в вершинах прямоугольников со сторонами π/a и π/b . Легко сообразить, что на долю каждой стоячей волны приходится на k -плоскости площадь, равная $\pi^2/ab = \pi^2/S$ (S — площадь двумерной области, в пределах которой устанавливается стоячая волна). Следовательно, плотность точек на k -плоскости равна S/π^2 .

Найдем число стоячих волн dN_k , у которых модуль волнового вектора лежит в пределах от k до $k + dk$. Это число равно количеству точек, попадающих в область, заключенную между четвертьокружностями радиусов k и $k + dk$ (рис. 5.4). Площадь этой области

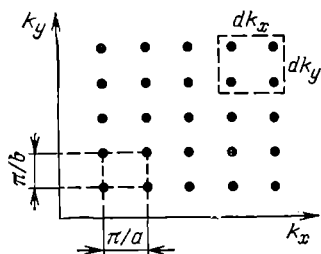


Рис. 5.3. Каждая точка на k -плоскости определяет волновое число (а следовательно, и частоту) стоячих волн, которые могут возбуждаться в двумерной прямоугольной области со сторонами a и b

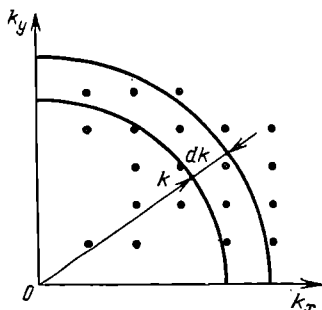


Рис. 5.4. Число точек, заключенных между четвертьокружностями, равно числу стоячих волн, волновые числа которых лежат в интервале dk

равна $(1/2)\pi k dk$. Умножив плотность точек на площадь области, получим

$$dN_k = \frac{S}{\pi^2} \cdot \frac{1}{2} \pi k dk = \frac{S}{2\pi} k dk. \quad (5.3)$$

Приняв во внимание, что $k = \omega/v$, соответственно $dk = d\omega/v$ (мы полагаем, что дисперсии нет, т. е. $v = \text{const}$), можно написать

$$dN_\omega = \frac{S}{2\pi v^2} \omega d\omega, \quad (5.4)$$

где dN_ω — число стоячих волн, частоты которых лежат в пределах от ω до $\omega + d\omega$.

Полученный результат легко обобщить на трехмерный случай. При выполнении граничных условий в изображенной на рис. 5.5 области может возникнуть колебательный процесс, представляющий собой систему стоячих волн одинаковой частоты ω . Для того чтобы во всех восьми вершинах области находились узлы

стоячих волн, необходимо выполнение условий

$$k_x = \frac{\pi}{a} n_1, \quad k_y = \frac{\pi}{b} n_2, \quad k_z = \frac{\pi}{c} n_3 \quad (5.5)$$

$$(n_1, n_2, n_3 = 1, 2, 3, \dots)$$

(ср. с (5.2)).

В k -пространстве с осями k_x , k_y , k_z каждой стоячей волне отвечает точка в первом октанте (рис. 5.6).

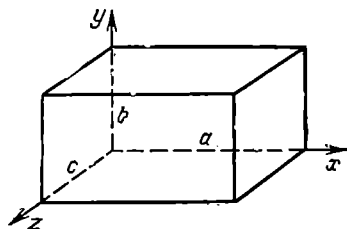


Рис. 5.5. Трехмерная прямоугольная область со сторонами a , b и c

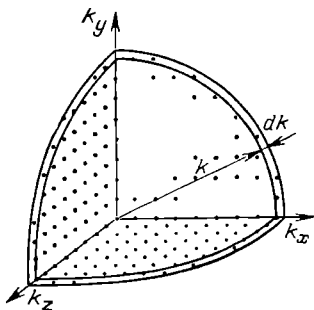


Рис. 5.6. Число точек, заключенных в $1/8$ шарового слоя, равно числу стоячих волн, волновые числа которых лежат в интервале dk

На долю каждой точки приходится объем $\pi^3/abc = \pi^3/V$ (V — объем области). Следовательно, плотность точек равна V/π^3 .

Число стоячих волн, у которых модуль волнового вектора лежит в пределах от k до $k + dk$, равно количеству точек, попадающих в пределы $1/8$ шарового слоя радиуса k и толщины dk (см. рис. 5.6). Следовательно,

$$dN_k = \frac{V}{\pi^3} \cdot \frac{1}{8} \cdot 4\pi k^2 dk = V \frac{k^2 dk}{2\pi^2} \quad (5.6)$$

(ср. с (5.3)).

Заменив k через ω/v и dk через $d\omega/v$, получим число стоячих волн, частоты которых попадают в интервал от ω до $\omega + d\omega$:

$$dN_\omega = V \frac{\omega^2 d\omega}{2\pi^2 v^3}. \quad (5.7)$$

Выражение (5.7) пропорционально объему полости V . Поэтому можно говорить о числе стоячих волн

dn_ω , приходящихся на единицу объема полости. Это число равно

$$dn_\omega = \frac{\omega^2 d\omega}{2\pi^2 v^3}. \quad (5.8)$$

В дальнейшем мы внесем в это выражение уточнение, вызванное необходимостью учесть возможные виды поляризации волн.

Рэлей и Джинс¹⁾ сделали попытку определить равновесную плотность излучения $u(\omega, T)$, исходя из теории классической статистики о равномерном распределении энергии по степеням свободы. Они предположили, что на каждое электромагнитное колебание приходится в среднем энергия, равная двум половинкам kT , — одна половинка на электрическую, вторая — на магнитную энергию волны (напомним, что по классическим представлениям на каждую колебательную степень свободы приходится в среднем энергия, равная двум половинкам kT).

Равновесное излучение в полости представляет собой систему стоячих волн. Без учета возможных видов поляризации количество стоячих волн, отнесенное к единице объема полости, определяется формулой (5.8), в которой скорость v нужно положить равной c . Вдоль заданного направления могут распространяться две электромагнитные волны одинаковой частоты, отличающиеся направлением поляризации (поляризованные во взаимно перпендикулярных направлениях). Чтобы учесть это обстоятельство, нужно выражение (5.8) умножить на два. В результате получим

$$dn_\omega = \frac{\omega^2 d\omega}{\pi^2 c^3}. \quad (5.9)$$

Умножив dn_ω на среднюю энергию колебания $\langle \epsilon \rangle$, равную kT , получим плотность энергии, приходящуюся на интервал частот $d\omega$:

$$u(\omega, T) d\omega = \langle \epsilon \rangle dn_\omega = kT \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} d\omega.$$

Отсюда

$$u(\omega, T) = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} kT. \quad (5.10)$$

¹⁾ Джеймс Хопвуд Джинс (1877—1946) — английский физик и астрофизик.

Перейдя от $u(\omega, T)$ к $f(\omega, T)$ по формуле (3.2), получим выражение для испускательной способности абсолютно черного тела:

$$f(\omega, T) = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} kT. \quad (5.11)$$

Отметим, что функция (5.11) удовлетворяет полученному Вином условию (4.3).

Выражения (5.10) и (5.11) называются формулой Рэлея — Джинса. Эта формула удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными лишь при больших длинах волн и резко расходится с опытом для малых длин волн (см. рис. 5.7, на котором

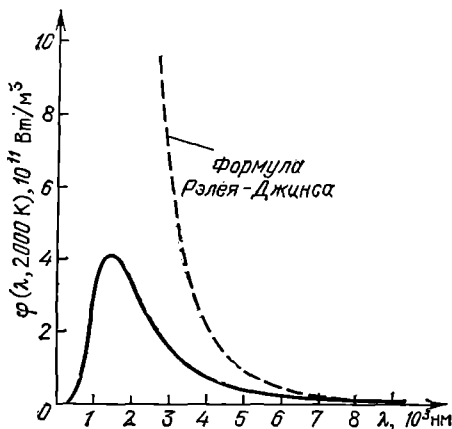


Рис. 5.7. Кривые зависимости испускательной способности $\varphi(\lambda)$ абсолютно черного тела от длины волны. Сплошная кривая получена экспериментально, штриховая кривая построена по формуле Рэлея — Джинса

сплошной линией изображена экспериментальная кривая, штриховой — кривая, построенная по формуле Рэлея — Джинса).

Интегрирование выражения (5.10) по ω в пределах от 0 до ∞ дает для равновесной плотности энергии $u(T)$ бесконечно большое значение. Этот результат, получивший название ультрафиолетовой катастрофы, также находится в противоречии с опытом. Равновесие между излучением и излучающим телом устанавливается при конечных значениях $u(T)$.

С классической точки зрения вывод формулы Рэлея — Джинса является безупречным. Поэтому расхождение этой формулы с опытом указывало на существование каких-то закономерностей, несовместимых с представлениями классической физики.

Чтобы получить функцию $f(\omega, T)$, согласующуюся с экспериментальными данными, Планку пришлось сделать предположение, совершенно чуждое классическим представлениям, а именно допустить, что электромагнитное излучение испускается в виде отдельных порций энергии (к в а н т о в), пропорциональных частоте излучения:

$$\epsilon = \hbar\omega. \quad (5.12)$$

Коэффициент пропорциональности $\hbar$ получил впоследствии название постоянной Планка. Определенное из опыта значение этой постоянной равно

$$\hbar = 1,0545915 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} = 0,6582176 \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \cdot \text{с}. \quad (5.13)$$

Постоянной Планка называют также обозначаемый перечеркнутой буквой h коэффициент пропорциональности между энергией кванта ϵ и обычной частотой ν :

$$\epsilon = h\nu. \quad (5.14)$$

Поскольку $\omega = 2\pi\nu$,

$$h = 2\pi\hbar = 6,6261937 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}. \quad (5.15)$$

В механике есть имеющая размерность «энергия $\times$ время» величина, которая называется действием. Поэтому постоянную Планка иногда называют квантом действия. Заметим, что размерность $\hbar$ совпадает с размерностью момента импульса.

Если излучение испускается порциями $\hbar\omega$, то его энергия ϵ_n должна быть кратной этой величине:

$$\epsilon_n = n\hbar\omega \quad (n = 0, 1, 2, \dots). \quad (5.16)$$

Из формулы (76.6) 1-го тома следует, что число молекул dN_ϵ , полная энергия ϵ которых заключена в интервале $d\epsilon$, пропорционально множителю $\exp(-\epsilon/kT)$ (интервалу скоростей соответствует интервал кинетической, а интервалу координат — интервал потенциальной энергии). При выводе этой формулы предполагалось, что энергия молекулы может

иметь непрерывный ряд значений. Такая же закономерность имеет место и в том случае, когда энергия частиц (не обязательно молекул), находящихся в термодинамическом равновесии при температуре T , может принимать только дискретные значения: $\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \dots$. Число частиц N_n , энергия каждой из которых равна ϵ_n , определяется формулой

$$N_n = A \exp(-\epsilon_n/kT), \quad (5.17)$$

где A — нормировочный множитель, k — постоянная Больцмана. Формула (5.17) называется распределением Больцмана.

В этом случае для средней энергии частиц получается выражение

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{N_0 \cdot 0 + N_1 \epsilon_1 + N_2 \epsilon_2 + \dots}{N_0 + N_1 + N_2 + \dots} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} N_n \epsilon_n}{\sum_{n=0}^{\infty} N_n}. \quad (5.18)$$

Здесь N_0 — число частиц, энергия которых $\epsilon_0 = 0$. Предполагается, что число возможных значений энергии не ограничено. В числителе стоит суммарная энергия частиц, в знаменателе — полное число частиц.

Подстановка в (5.18) значения (5.16) для ϵ_n и (5.17) для N_n приводит к формуле

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} n \hbar \omega \exp(-n \hbar \omega / kT)}{\sum_{n=0}^{\infty} \exp(-n \hbar \omega / kT)}. \quad (5.19)$$

Чтобы произвести вычисления, обозначим $\hbar \omega / kT = x$ и допустим, что x может изменяться, принимая непрерывный ряд значений. Тогда выражение (5.19) можно написать в виде

$$\langle \epsilon \rangle = \hbar \omega \frac{\sum_{n=0}^{\infty} n \exp(-nx)}{\sum_{n=0}^{\infty} \exp(-nx)} = -\hbar \omega \frac{d}{dx} \ln \sum_{n=0}^{\infty} \exp(-nx). \quad (5.20)$$

Под знаком логарифма в формуле (5.20) стоит сумма членов бесконечной геометрической прогрессии с

первым членом, равным единице, и знаменателем прогрессии, равным $\exp(-x)$. Так как знаменатель меньше единицы, прогрессия будет убывающей, и по известной из алгебры формуле

$$\sum_{n=0}^{\infty} \exp(-nx) = \frac{1}{1 - \exp(-x)}.$$

Подставив это значение суммы в (5.20) и выполнив дифференцирование, получим

$$\begin{aligned} \langle \epsilon \rangle &= -\hbar\omega \frac{d}{dx} \ln \frac{1}{1 - \exp(-x)} = \\ &= \hbar\omega \frac{\exp(-x)}{1 - \exp(-x)} = \frac{\hbar\omega}{\exp x - 1}. \end{aligned}$$

Наконец, заменив x его значением $\hbar\omega/kT$, получим окончательное выражение для средней энергии излучения частоты ω :

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{\hbar\omega}{\exp(\hbar\omega/kT) - 1}. \quad (5.21)$$

Заметим, что при $\hbar$, стремящемся к нулю, формула (5.21) переходит в классическое выражение $\langle \epsilon \rangle = kT$. В этом можно убедиться, положив $\exp(\hbar\omega/kT) \approx \approx 1 + \hbar\omega/kT$, что выполняется тем точнее, чем меньше $\hbar$. Таким образом, если бы энергия могла принимать непрерывный ряд значений, ее среднее значение было бы равно kT .

Перемножив выражения (5.9) и (5.21), получим плотность энергии, приходящуюся на интервал частот $d\omega$:

$$u(\omega, T) d\omega = \frac{\hbar\omega}{\exp(\hbar\omega/kT) - 1} \frac{\omega^2 d\omega}{\pi^2 c^3}.$$

Отсюда

$$u(\omega, T) = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3} \frac{1}{\exp(\hbar\omega/kT) - 1}. \quad (5.22)$$

Воспользовавшись соотношением (3.2), придем к формуле

$$f(\omega, T) = \frac{\hbar\omega^3}{4\pi^2 c^2} \frac{1}{\exp(\hbar\omega/kT) - 1}. \quad (5.23)$$

Выражения (5.22) и (5.23) носят название формулы Планка. Эта формула точно согласуется с экспериментальными данными во всем интервале частот от 0 до ∞ . Функция (5.23) удовлетворяет

критерию Вина (4.3). При условии, что $\hbar\omega/kT \ll 1$ (малые частоты или большие длины волн), экспоненту $\exp(\hbar\omega/kT)$ можно положить приближенно равной $1 + \hbar\omega/kT$, в результате чего формула Планка переходит в формулу Рэлея — Джинса (см. (5.10) и (5.11)). Это следует также из того, что при указанном условии выражение (5.21) приближенно равняется kT .

Осуществив преобразование выражения (5.23) по формуле (2.4), получим

$$\varphi(\lambda, T) = \frac{4\pi^2 \hbar c^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(2\pi \hbar c / kT \lambda) - 1}. \quad (5.24)$$

Из формулы Планка вытекают законы Стефана — Больцмана и Вина. Для энергетической светимости абсолютно черного тела получается выражение

$$R^* = \int_0^\infty j(\omega, T) d\omega = \int_0^\infty \frac{\hbar \omega^3}{4\pi^2 c^2} \frac{d\omega}{\exp(\hbar\omega/kT) - 1}.$$

Введем вместо ω безразмерную переменную $x = \hbar\omega/kT$. Подстановка $\omega = (kT/\hbar)x$, $d\omega = (kT/\hbar)dx$ преобразует формулу для R^* к виду

$$R^* = \frac{\hbar}{4\pi^2 c^2} \left(\frac{kT}{\hbar}\right)^4 \int_0^\infty \frac{x^3 dx}{\exp x - 1}.$$

Определенный интеграл в последнем выражении может быть вычислен. Он равен $\pi^4/15 \approx 6,5$. Подставив его значение, мы приходим к закону Стефана — Больцмана:

$$R^* = \frac{\pi^2 k^4}{60 c^2 \hbar^3} T^4 = \sigma T^4. \quad (5.25)$$

Подстановка в эту формулу числовых значений k , c и $\hbar$ дает для постоянной Стефана — Больцмана значение $5,6696 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴), очень хорошо согласующееся с экспериментальным значением.

В заключение найдем значение постоянной в законе смещения Вина (4.6). Для этого продифференцируем функцию (5.24) по λ и приравняем получив-

шееся выражение нулю:

$$\frac{d\varphi(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{4\pi^2\hbar c^2 \left\{ \frac{2\pi\hbar c}{kT\lambda} \exp\left(\frac{2\pi\hbar c}{kT\lambda}\right) - 5 \left[\exp\left(\frac{2\pi\hbar c}{kT\lambda}\right) - 1 \right] \right\}}{\lambda^6 \left[\exp\left(\frac{2\pi\hbar c}{kT\lambda}\right) - 1 \right]^2} = 0.$$

Удовлетворяющие этому уравнению значения $\lambda = 0$ и $\lambda = \infty$ соответствуют минимумам функции $\varphi(\lambda, T)$. Значение λ_m , при котором функция достигает максимума, обращает в нуль выражение, стоящее в числителе в фигурных скобках. Обозначив $2\pi\hbar c/kT\lambda_m = x$, получим уравнение

$$xe^x - 5(e^x - 1) = 0.$$

Его решение можно найти методом последовательных приближений. Поскольку $1 \ll e^5$, в качестве первого приближения примем $x = 5$. Положив показатель экспоненты равным 5, придем к уравнению $xe^5 - 5(e^5 - 1) = 0$, решение которого дает во втором приближении $x = 4,9663102$. Подстановка этого значения в показатель экспоненты и решение получившегося уравнения дают $x = 4,9651558$. Следующий шаг дает $x = 4,9651157$. Таким образом, с точностью до единицы четвертого знака после запятой $x = 4,9651$. Следовательно, $2\pi\hbar c/kT\lambda_m = 4,9651$, откуда

$$T\lambda_m = \frac{2\pi\hbar c}{4,9651k} = b.$$

Подстановка значений $\hbar$, c и k дает для b значение $2,898 \cdot 10^{-3}$ м·К, совпадающее с экспериментальным значением.

Таким образом, формула Планка дает исчерпывающее описание равновесного теплового излучения.

§ 6. Оптическая пирометрия

Пирометрией (от греческого *пυρ* — огонь и *μετρεό* — измеряю) называют совокупность оптических (бесконтактных) методов измерения температуры. Приборы для измерения температуры нагретых тел по интенсивности их теплового излучения в оптическом диапазоне спектра называются пирометрами.

Они подразделяются на три основные группы: 1) радиационные, 2) яркостные и 3) цветные пирометры.

Радиационные пирометры. Схема радиационного пирометра показана на рис. 6.1. Прибор наводится на излучатель так, чтобы резкое изображение излучающей поверхности, даваемое объективом *Об*, полностью

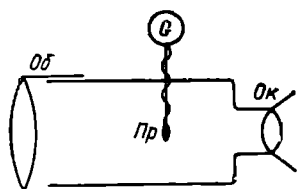


Рис. 6.1. Схема радиационного пирометра

перекрывало приемник излучения *Пр*. Контроль за этим осуществляется при помощи окуляра *Ок*. В качестве приемника обычно применяется термостолбик. По отклонению стрелки гальванометра *Г* можно судить о температуре излучателя. Это вытекает из следующих соображений.

Соответствующий расчет дает, что в случае, когда изображение излучателя полностью перекрывает приемник, поток энергии, падающий на приемник, независимо от расстояния до излучателя (которое должно быть велико по сравнению с фокусным расстоянием объектива), пропорционален энергетической светимости излучателя. Строго говоря, это справедливо, только если излучателем является абсолютно черное тело. Чтобы исключить влияние трудноучитываемых факторов (поглощение излучения на пути к приемнику, теплообмен приемника с остальными частями прибора и т. п.), прибор градуируют по абсолютно черному телу, нанося против деления шкалы гальванометра соответствующую температуру.

Для нечерного тела показания радиационного пирометра дают не истинную температуру T , а то значение температуры $T_{\text{рад}}$, при котором энергетическая светимость абсолютно черного тела R^* равна энергетической светимости R исследуемого тела при его истинной температуре T :

$$R^*(T_{\text{рад}}) = R(T). \quad (6.1)$$

Температура $T_{\text{рад}}$ называется радиационной. Найдем связь между радиационной температурой нечерного тела $T_{\text{рад}}$ и его истинной температурой T . Обозначим через a_T отношение энергетических светимостей данного тела R и абсолютно черного тела R^* ,

взятых для одной и той же температуры. Тогда

$$R(T) = a_T R^*(T).$$

Подставив это значение в (6.1), получим

$$R^*(T_{\text{рад}}) = a_T R^*(T).$$

Выразив R^* через температуру согласно закону (4.1), придем к соотношению

$$\sigma T_{\text{рад}}^4 = a_T \sigma T^4,$$

откуда

$$T = \frac{1}{\sqrt[4]{a_T}} T_{\text{рад}}.$$

Так как a_T для нечерных тел меньше единицы, истинная температура больше радиационной. В справочниках имеются таблицы значений a_T для различных излучателей. Например, для вольфрама при истинной температуре 1500 К $a_T = 0,15$, а при 3000 К $a_T = 0,32$, для никеля при 1500 К $a_T = 0,06$ и т. д. Следовательно, при истинной температуре вольфрама 3000 К радиационный пирометр покажет температуру

$$T_{\text{рад}} = \sqrt[4]{a_T} T = \sqrt[4]{0,32} \cdot 3000 = 2250 \text{ К}.$$

Яркостные пирометры. Наибольшее распространение получил метод определения температур, основывающийся на сравнении излучения светящегося тела с излучением абсолютно черного тела на одном и том же фиксированном узком участке спектра $\Delta\lambda$. Обычно используется участок, лежащий в окрестности $\lambda = 660 \text{ нм}$ (красная часть спектра). Схема яркостного пирометра, называемого пирометром с исчезающей нитью, дана на рис. 6.2. Имеющая форму полуокружности нить лампочки L лежит в плоскости, перпендикулярной к оси прибора. Объектив $Об$ создает в этой же плоскости изображение поверхности исследуемого излучателя.

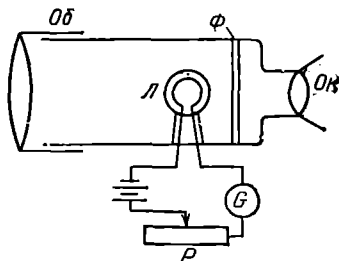


Рис. 6.2. Схема пирометра с исчезающей нитью

Светофильтр Φ пропускает к окуляру $Ок$ лишь красные лучи с длиной волны вблизи 660 нм. Наблюдая через окуляр, подбирают с помощью реостата R такой накал нити, чтобы ее яркость совпала с яркостью изображения излучателя (в этом случае нить «исчезает», т. е. становится неразличимой на фоне изображения). Предварительно прибор градуируют по абсолютно черному телу, нанося против делений шкалы гальванометра соответствующие значения температуры.

Для нечерного тела прибор дает то значение температуры $T_{\text{ярк}}$, при котором яркость абсолютно черного тела для $\lambda = 660$ нм равна яркости исследуемого тела при истинной температуре T . Можно показать, что

$$T = \frac{T_{\text{ярк}}}{1 + (k\lambda/2\pi\hbar c) \ln a_{\lambda, T} \cdot T_{\text{ярк}}}, \quad (6.2)$$

где k — постоянная Больцмана, $a_{\lambda, T}$ — поглощательная способность исследуемого тела при истинной температуре T для пропускаемой светофильтром длины волны λ .

Из формулы (6.2) видно, что истинная температура T нечерных тел всегда больше яркостной температуры $T_{\text{ярк}}$ ($\ln a_{\lambda, T} < 0$).

Значения $a_{\lambda, T}$ для разных излучателей можно найти в справочниках. Например, для вольфрама при $T = 3000$ К и $\lambda = 660$ нм $a_{\lambda, T} = 0,46$. Вычисления по формуле (6.2) дают в этом случае, что $T_{\text{ярк}} = 2700$ К (выше было выяснено, что радиационная температура в этом случае равна 2250 К).

Цветовые пирометры. Для серого тела испускательная способность может быть представлена в виде

$$r_{\lambda, T} = a_T \Phi(\lambda, T),$$

где $a_T = \text{const}$. Следовательно, максимум испускательной способности серого тела при температуре T придется на ту же длину волны λ_m , что и для абсолютно черного тела при той же температуре. Поэтому, если определена λ_m , температура серого тела может быть вычислена по формуле (4.6). Найденная таким способом температура называется цветовой.

Вместо исследования всего спектрального распределения, для определения температуры серого тела достаточно найти отношение его испускательных спо-

собностей для двух длин волн:

$$\xi = \frac{r(\lambda_1, T)}{r(\lambda_2, T)}.$$

Для цветовой температуры можно получить формулу

$$T_{\text{цв}} = \frac{(2\pi\hbar c/k)(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)}{\ln \xi - 5 \ln (\lambda_2/\lambda_1)}. \quad (6.3)$$

Для абсолютно черных и серых тел вычисленная по формуле (6.3) цветовая температура совпадает с истинной. Для тел, не слишком сильно отличающихся от серых, цветовая температура обычно бывает выше истинной. Для тел, характер излучения которых сильно отличается от излучения серых тел, понятие цветовой температуры теряет смысл.

Один из типов цветowych пирометров представляет собой, в принципе, прибор, отличающийся от изображенного на рис. 6.1 тем, что перед объективом установлен вращающийся диск с вмонтированными в него красным и синим светофильтрами. В цепи приемника получается периодически изменяющийся ток, отношение максимумов и минимумов $i_{\text{max}}/i_{\text{min}}$ которого тем больше, чем больше ξ . Специальная электронная схема преобразует этот ток так, что показания прибора, включенного на выходе, оказываются пропорциональными $i_{\text{max}}/i_{\text{min}}$. Прибор градуируется по абсолютно черному телу.

Максимум в спектре излучения Солнца (до прохождения излучения через атмосферу Земли) приходится на длину волны $\lambda_m = 480$ нм. (После прохождения излучения через атмосферу максимум смещается в сторону более длинных волн и приходится приблизительно на 550 нм.) Подстановка этого значения в формулу (4.6) дает для цветовой температуры Солнца значение 6000 К. Радиационная температура Солнца получается равной примерно 5800 К. Малое различие между цветовой и радиационной температурами указывает на то, что поверхность Солнца по своим свойствам близка к абсолютно черному телу.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чему равна испускательная способность идеально отражающей поверхности?
2. Какое тело называется серым?

3. Как изменится испускательная способность абсолютно черного тела, если термодинамическую температуру этого тела увеличить в два раза?
4. Как связана испускательная способность абсолютно черного тела с равновесной плотностью энергии теплового излучения?

Примеры решения задач

1. При некоторой температуре T энергетическая светимость абсолютно черного тела $R^* = 250$ кВт/м². На какую длину волны λ_m приходится при этой температуре максимум испускательной способности тела?

Решение. Согласно закону Стефана — Больцмана $R^* = \sigma T^4$, согласно закону смещения Вина $\lambda_m T = b$. Исключив T из этих уравнений, получим, что

$$\lambda_m = b \sqrt[4]{\frac{\sigma}{R^*}} = 2,898 \cdot 10^{-3} \sqrt[4]{\frac{5,670 \cdot 10^{-8}}{250 \cdot 10^3}} = 2000 \text{ нм.}$$

2. Температура солнечной поверхности $T = 5800$ К, радиус Солнца $r = 6,96 \cdot 10^8$ м. Полагая свойства солнечной поверхности подобными свойствам абсолютно черного тела, определить массу m , теряемую Солнцем в 1 с за счет излучения.

Решение. С единицы поверхности Солнца излучается в единицу времени энергия $R^* = \sigma T^4$, а со всей поверхности — энергия $E = \sigma T^4 \cdot 4\pi r^2$. Эта убыль энергии сопровождается уменьшением массы

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{\sigma T^4 \cdot 4\pi r^2}{c^2} = \frac{5,670 \cdot 10^{-8} \cdot 5800^4 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot (6,96 \cdot 10^8)^2}{(3 \cdot 10^8)^2} = 4,3 \cdot 10^9 \text{ кг/с.}$$

Глава 2. ФОТОНЫ

§ 7. Коротковолновая граница рентгеновского спектра

В 1895 г. Рентген¹⁾ обнаружил, что при бомбардировке стекла и металлов быстрыми электронами возникает излучение, обладающее большой проникаю-

¹⁾ Вильгельм Конрад Рентген (1845—1923) — немецкий физик. За открытие рентгеновских лучей получил в 1901 г. первую Нобелевскую премию по физике.

щей способностью. Сам Рентген назвал открытое им излучение X-лучами (икс-лучами). Впоследствии оно получило название рентгеновских лучей. Дальнейшие исследования показали, что рентгеновское излучение представляет собой электромагнитное излучение с длиной волны в пределах от 10^{-5} до 10^2 нм.

Современная рентгеновская трубка (рис. 7.1) представляет собой эвакуированный баллон с несколькими электродами. Нагреваемый током катод K служит источником

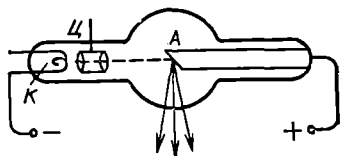


Рис. 7.1. Схема рентгеновской трубки

свободных электронов, испускаемых вследствие термоэлектронной эмиссии (см. § 32 2-го тома). Цилиндрический электрод Γ предназначен для фокусировки электронного пучка. Мишенью является анод A , который называют также антикатодом. Его делают из тяжелых металлов (W , Cu , Pt и т. д.). Ускорение электронов осуществляется высоким напряжением, создаваемым между катодом и антикатодом. Почти вся энергия электронов выделяется на антикатоде в виде теплоты (в излучение превращается лишь 1—3 % энергии). Поэтому в мощных трубках антикатод приходится интенсивно охлаждать. С этой целью в теле антикатада делаются каналы, по которым циркулирует охлаждающая жидкость (вода или масло).

Если между катодом и антикатодом приложено напряжение U , электроны разгоняются до энергии eU . Попадая в вещество антикатада, электроны испытывают сильное торможение и становятся источником электромагнитных волн. При достаточно большой скорости электронов, кроме тормозного излучения (т. е. излучения, обусловленного торможением электронов), возбуждается также характеристическое излучение (вызванное возбуждением внутренних электронных оболочек атомов антикатада). В этом параграфе нас будет интересовать только тормозное излучение.

Согласно классической электродинамике при торможении электрона должны возникать волны всех

длин — от нуля до бесконечности. Длина волны, на которую приходится максимум мощности излучения, должна уменьшаться по мере увеличения скорости электронов, т. е. напряжения U на трубке. На рис. 7.2 даны экспериментальные кривые распределения мощности тормозного рентгеновского излучения по длинам волн, полученные для разных значений U . Из рисунка следует, что выводы теории в основном подтверждаются на опыте. Однако имеется одно принципиальное отступление от требований классической электродинамики. Оно заключается в том, что кривые распределения мощности не идут к началу координат, а обрываются при конечных значениях длины волны $\lambda_{\min}$.

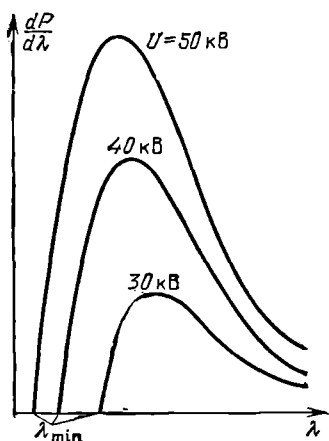


Рис. 7.2. Кривые распределения мощности тормозного рентгеновского излучения по длинам волн

Экспериментально установлено, что коротковолновая граница тормозного рентгеновского спектра $\lambda_{\min}$ (в нанометрах) связана с ускоряющим напряжением U (в вольтах) соотношением

$$\lambda_{\min} = 1239/U. \quad (7.1)$$

Существование коротковолновой границы является одним из подтверждений представления об испускании электромагнитного излучения порциями $\hbar\omega$. Действительно, если излучение возникает за счет энергии, теряемой электроном при торможении, то величина кванта $\hbar\omega$ не может превысить энергию электрона eU :

$$\hbar\omega \leq eU.$$

Отсюда получается, что частота излучения не может превысить $\omega_{\max} = eU/\hbar$, а, следовательно, длина волны не может быть меньше значения

$$\lambda_{\min} = \frac{2\pi c}{\omega_{\max}} = \frac{2\pi\hbar c/e}{U}. \quad (7.2)$$

Приравняв числители формул (7.1) и (7.2), придем к равенству: $2\pi\hbar c/e = 1239 \cdot 10^{-9}$ (мы перешли от нанометров к метрам). Отсюда для $\hbar$ получается значение

$$\hbar = \frac{1239 \cdot 10^{-9} e}{2\pi c} = \frac{1239 \cdot 10^{-9} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}}{2\pi \cdot 3 \cdot 10^8} = 1,053 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с},$$

совпадающее со значением, получающимся из законов теплового излучения (см. формулу (5.13)).

§ 8. Внешний фотоэффект

Внешним фотоэффектом (или фотоэлектронной эмиссией) называется испускание электронов твердыми и жидкими телами под действием электромагнитного излучения. Это явление было открыто Г. Герцем в 1887 г. Он заметил, что проскакивание искры между шариками разрядника значительно облегчается, если один из шариков осветить ультрафиолетовыми лучами.

В 1888—1889 гг. А. Г. Столетов подверг фотоэффект систематическому исследованию с помощью установки, схема которой показана на рис. 8.1. Конденсатор, образованный проволоочной сеткой и сплошной пластиной, был включен последовательно с гальванометром G в цепь батареи.

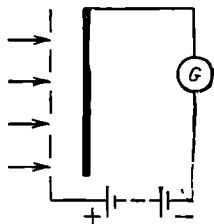


Рис. 8.1. Схема прибора А. Г. Столетова для изучения фотоэффекта

Свет, проходя через сетку, падал на сплошную пластину. В результате в цепи возникал ток, регистрировавшийся гальванометром. Столетов показал, что испускаемые под действием света заряды имеют отрицательный знак. Кроме того, он обнаружил, что сила фототока возрастает с увеличением освещенности пластины.

В 1899 г. Ленард¹⁾ и Дж. Дж. Томсон, измерив удельный заряд испускаемых под действием света частиц, установили, что эти частицы являются электронами.

¹⁾ Филипп Эдуард Антон Ленард (1862—1947) — немецкий физик.

Ленард и другие исследователи усовершенствовали прибор Столетова, поместив электроды в evacuated баллон (рис. 8.2). Свет, проникающий через кварцевое¹⁾ окошко $Kв$, освещает катод K , изготовленный из исследуемого материала. Электроны, испущенные вследствие фотоэффекта, перемещаются под действием электрического поля к аноду A . В результате в

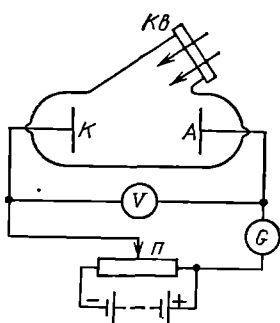


Рис. 8.2. Схема вакуумного прибора для изучения фотоэффекта

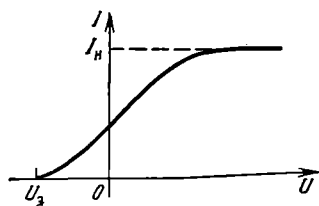


Рис. 8.3. Зависимость фототока I от напряжения между катодом и анодом. I_n — ток насыщения, U_z — задерживающее напряжение

цепи прибора течет фототок, измеряемый гальванометром G . Напряжение между анодом и катодом можно изменять с помощью потенциометра Π .

Полученная на таком приборе вольт-амперная характеристика (т. е. кривая зависимости фототока I от напряжения между электродами U) приведена на рис. 8.3. Естественно, что характеристика снимается при неизменном световом потоке Φ . Из этой кривой видно, что при некотором не очень большом напряжении фототок достигает насыщения — все электроны, испущенные катодом, попадают на анод. Следовательно, сила тока насыщения I_n определяется количеством электронов, испускаемых катодом в единицу времени под действием света.

Пологий ход кривой указывает на то, что электроны вылетают из катода с различными скоростями. Для электронов, отвечающая силе тока при $U=0$, обладает скоростями, достаточными для того, чтобы долететь до анода «самостоятельно», без помощи

¹⁾ В отличие от обычного стекла, кварц пропускает ультрафиолетовые лучи.

ускоряющего поля. Для обращения силы тока в нуль нужно приложить задерживающее напряжение U_3 . При таком напряжении ни одному из электронов, даже обладающему при вылете из катода наибольшим значением скорости v_m , не удастся преодолеть задерживающее поле и достигнуть анода. Поэтому можно написать, что

$$\frac{mv_m^2}{2} = eU_3, \quad (8.1)$$

где m — масса электрона. Таким образом, измерив задерживающее напряжение U_3 , можно определить максимальное значение скорости фотоэлектронов.

К 1905 г. было выяснено, что максимальная скорость фотоэлектронов не зависит от интенсивности света, а зависит только от его частоты — увеличение частоты приводит к возрастанию скорости. Установленные экспериментально зависимости не укладываются в рамки классических представлений. Например, скорость фотоэлектронов по классическим понятиям должна возрастать с амплитудой, а следовательно, и с интенсивностью электромагнитной волны.

В 1905 г. Эйнштейн показал, что все закономерности фотоэффекта легко объясняются, если предположить, что свет поглощается такими же порциями $\hbar\omega$ (квантами), какими он, по предположению Планка, испускается. По мысли Эйнштейна, энергия, полученная электроном, доставляется ему в виде кванта $\hbar\omega$, который усваивается им целиком. Часть этой энергии, равная работе выхода A ¹⁾, затрачивается на то, чтобы электрон мог покинуть тело. Если электрон освобождается светом не у самой поверхности, а на некоторой глубине, то часть энергии, равна E' , может быть потеряна вследствие случайных столкновений в веществе. Остаток энергии образует кинетическую энергию E_k электрона, покинувшего вещество. Энергия E_k будет максимальна, если $E' = 0$. В этом случае должно выполняться соотношение

$$\hbar\omega = \frac{mv_m^2}{2} + A, \quad (8.2)$$

которое называется формулой Эйнштейна.

¹⁾ См. § 32 2-го тома.

Фотоэффект и работа выхода в сильной степени зависят от состояния поверхности металла (в частности, от находящихся на ней окислов и адсорбированных веществ). Поэтому долгое время не удавалось проверить формулу Эйнштейна с достаточной точностью. В 1916 г. Милликен создал прибор, в котором исследуемые поверхности подвергались очистке в вакууме, после чего измерялась работа выхода и исследовалась зависимость максимальной кинетической энергии фотоэлектронов от частоты света (эта энергия определялась путем измерения задерживающего потенциала U_z). Результаты оказались в полном согласии с формулой (8.2).

Подставив в формулу (8.2) измеренные значения A и $mv_m^2/2$ (при данной ω), Милликен определил значение постоянной Планка $\hbar$, которое оказалось совпадающим со значениями, найденными из спектрального распределения равновесного теплового излучения и из коротковолновой границы тормозного рентгеновского спектра.

Дальнейшее усовершенствование методики исследования фотоэффекта было осуществлено в 1928 г. Лукирским¹⁾ и С. С. Прилежаевым, которые создали прибор в виде сферического конденсатора. Анодом в их приборе служили посеребренные стенки стеклянного сферического баллона. В центре баллона помещался катод в виде шарика. При такой форме электродов вольт-амперная характеристика идет круче, что позволяет повысить точность определения задерживающего потенциала.

Чтобы объяснить распределение энергии в спектре равновесного теплового излучения, достаточно, как показал Планк, допустить, что свет испускается порциями $\hbar\omega$. Для объяснения фотоэффекта достаточно предположить, что свет поглощается такими же порциями. Однако Эйнштейн пошел значительно дальше. Он выдвинул гипотезу, что свет и распространяется в виде дискретных частиц, названных первоначально световыми квантами. Впоследствии (в 1926 г.) эти частицы получили название фотонов.

¹⁾ Петр Иванович Лукирский (1894—1954) — советский физик.

Наиболее непосредственное подтверждение гипотезы Эйнштейна дал в 1924 г. опыт Бёте¹⁾, Тонкая металлическая фольга Φ (рис. 8.4) помещалась между двумя газоразрядными счетчиками $C\check{c}$. Фольга освещалась слабым пучком рентгеновских лучей, под действием которых она сама становилась источником рентгеновского излучения (это явление называется рентгеновской флуоресценцией). Вследствие малой интенсивности первичного пучка количество квантов, испускаемых фольгой, было невелико. При попадании в него рентгеновских лучей счетчик срабатывал и приводил в действие особый механизм M , делавший отметку на движущейся ленте L . Если бы излучаемая энергия распространялась равномерно во все стороны, как это следует из волновых представлений, оба счетчика должны были бы срабатывать одновременно и отметки на ленте приходились бы одна против другой. В действительности же наблюдалось совершенно беспорядочное расположение отметок. Это можно объяснить лишь тем, что в отдельных актах испускания возникают световые частицы, летящие то в одном, то в другом направлении.

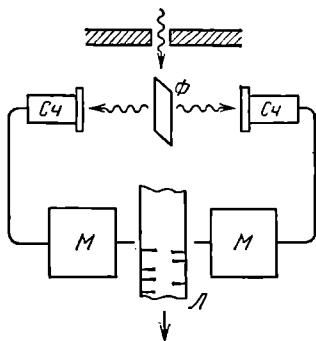


Рис. 8.4. Схема опыта Бёте

Из формулы (8.2) вытекает, что в случае, когда работа выхода A превышает энергию кванта $\hbar\omega$, электроны не могут покинуть металл. Следовательно, для возникновения фотоэффекта необходимо выполнение условия $\hbar\omega \geq A$, или

$$\omega \geq \omega_0 = A/\hbar. \quad (8.3)$$

Соответственно для длины волны получается условие

$$\lambda \leq \lambda_0 = \frac{2\pi\hbar c}{A}. \quad (8.4)$$

Частота ω_0 , или длина волны λ_0 , называется красной границей фотоэффекта.

¹⁾ Вальтер Бёте (1891—1957) — немецкий физик.

Число высвобождаемых вследствие фотоэффекта электронов должно быть пропорционально числу падающих на поверхность квантов света. Вместе с тем световой поток Φ определяется количеством квантов света, падающих на поверхность в единицу времени. В соответствии с этим ток насыщения I_n должен быть пропорционален падающему световому потоку:

$$I_n \propto \Phi. \quad (8.5)$$

Эта зависимость также подтверждается экспериментально. Заметим, что лишь малая часть квантов передает свою энергию фотоэлектронам. Энергия остальных квантов затрачивается на нагревание вещества, поглощающего свет.

В наших рассуждениях мы предполагали, что электрон получает энергию лишь от одного фотона. Такие процессы называются *однофотонными*. С изобретением лазеров были получены недостижимые до тех пор мощности световых пучков. Это дало возможность осуществить *многофотонные* процессы. В частности, был наблюден *многофотонный фотоэффект*, в ходе которого электрон, вылетающий из металла, получает энергию не от одного, а от N фотонов ($N = 2, 3, 4, 5$).

Формула Эйнштейна в случае многофотонного фотоэффекта выглядит следующим образом:

$$N\hbar\omega = \frac{mv_m^2}{2} + A. \quad (8.6)$$

Соответственно красная граница фотоэффекта смещается в сторону более длинных волн (λ_0 увеличивается в N раз). Формула (8.5) в случае N -фотонного эффекта имеет вид

$$I_N \propto \Phi^N. \quad (8.7)$$

Кроме рассмотренного нами внешнего фотоэффекта (называемого обычно просто фотоэффектом) существует также *внутренний фотоэффект* (см. § 46).

§ 9. ФОТОНЫ

Итак, было экспериментально доказано существование особых световых частиц — фотонов. Следовательно, как уже отмечалось в § 84 2-го тома, свет пред-

ставляет собой сложное явление, сочетающее в себе свойства электромагнитной волны и свойства потока частиц. Такое сочетание называется корпускулярно-волновым дуализмом.

Энергия фотона определяется его частотой:

$$E = \hbar\omega. \quad (9.1)$$

Во 2-м томе было выяснено, что электромагнитная волна, несущая энергию W , обладает импульсом $K = W/c$ (см. формулу (81.7) 2-го тома). Очевидно, что такое же соотношение должно соблюдаться между импульсом фотона p и его энергией E :

$$p = \frac{E}{c} = \frac{\hbar\omega}{c}. \quad (9.2)$$

В § 53 1-го тома было показано, что такое соотношение между импульсом и энергией возможно только для частиц с нулевой массой, движущихся со скоростью c . Таким образом, из квантового соотношения $E = \hbar\omega$ и общих принципов теории относительности вытекает, что

- 1) масса фотона равна нулю,
- 2) фотон всегда движется со скоростью c .

Сказанное означает, что фотон представляет собой частицу особого рода, отличную от таких частиц, как электрон, протон и т. п., которые могут существовать, двигаясь со скоростями, меньшими c , и даже покоясь.

Надо иметь в виду, что фотоны движутся со скоростью c не только в вакууме, но и в веществе. «Замедление» света в веществе обусловлено тем, что при прохождении через вещество фотоны поглощаются атомами и вслед за тем испускаются вновь. Между актами поглощения и испускания проходит некоторое время, вследствие чего средняя скорость фотонов в веществе оказывается меньше c .

Заменив в формуле (9.2) частоту ω через длину волны λ , получим для импульса фотона выражение

$$p = \hbar \cdot 2\pi/\lambda = \hbar k \quad (9.3)$$

(k — волновое число). Фотон летит в направлении распространения электромагнитной волны. Поэтому направления импульса p и волнового вектора k совпадают. Следовательно, формулу (9.3) можно написать

в векторном виде:

$$\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k}. \quad (9.4)$$

Пусть на поглощающую свет поверхность падает поток фотонов, летящих по нормали к поверхности. Если плотность фотонов равна n , на единицу поверхности падает в единицу времени nc фотонов. При поглощении каждый фотон сообщает стенке импульс $p = E/c$. Умножив p на nc , получим импульс, сообщаемый в единицу времени единице поверхности, т. е. давление $\mathcal{P}$ света на стенку:

$$\mathcal{P} = \frac{E}{c} nc = En.$$

Произведение En равно энергии фотонов, заключенных в единице объема, т. е. плотности электромагнитной энергии ω . Таким образом, мы пришли к формуле $\mathcal{P} = \omega$, которая совпадает с выражением для давления, получающимся из электромагнитной теории (см. формулу (81.10) 2-го тома). Отражаясь от стенки, фотон сообщает ей импульс $2p$. Поэтому для отражающей поверхности давление будет равно 2ω .

Исходя из представления об электромагнитном поле как совокупности фотонов, легко получить соотношение между испускательной способностью абсолютно черного тела и равновесной плотностью излучения. Допустим, что в единице объема полости, заполненной равновесным излучением, имеется dn_ω фотонов, частота которых лежит в пределах от ω до $\omega + d\omega$. Тогда плотность энергии, приходящаяся на тот же интервал частот, будет равна

$$du_\omega = u(\omega, T) d\omega = \hbar \omega dn_\omega. \quad (9.5)$$

Подобно молекулам газа, фотоны летят внутри полости по всем направлениям. Воспользовавшись формулой (63.7) 1-го тома, получим для числа фотонов, ударяющихся об единицу поверхности в единицу времени, значение $(1/4)cdn_\omega$. Если стенка абсолютно черная, она поглотит все эти фотоны и, следовательно, получит энергию, равную $(1/4)\hbar\omega c dn_\omega$. В случае равновесия абсолютно черная стенка испустит такую же энергию. Таким образом,

$$j(\omega, T) d\omega = \frac{1}{4} \hbar \omega c dn_\omega. \quad (9.6)$$

Из сопоставления выражений (9.5) и (9.6) вытекает, что

$$f(\omega, T) = \frac{c}{4} u(\omega, T) \quad (9.7)$$

(см. формулу (3.2)).

В данной главе мы рассмотрели ряд явлений, в которых свет ведет себя как поток частиц (фотонов). Однако не надо забывать, что такие явления, как интерференция и дифракция света, могут быть объяснены только на основе волновых представлений. Выясним, в каком соотношении находятся волновая и корпускулярная картины. Ответ на этот вопрос можно получить, рассмотрев с обеих точек зрения освещенность какой-либо поверхности. Согласно волновым представлениям освещенность в некоторой точке поверхности пропорциональна квадрату амплитуды световой волны. С корпускулярной точки зрения освещенность пропорциональна плотности потока фотонов. Следовательно, между квадратом амплитуды световой волны и плотностью потока фотонов имеется прямая пропорциональность. Носителем энергии и импульса является фотон. Энергия выделяется в той точке поверхности, в которую попадает фотон. Квадрат амплитуды волны определяет вероятность того, что фотон попадает в данную точку поверхности. Точнее, вероятность того, что фотон будет обнаружен в пределах объема dV , заключающего в себе рассматриваемую точку пространства, определяется выражением

$$dP = \chi A^2 dV,$$

где χ — коэффициент пропорциональности, A — амплитуда световой волны.

Из сказанного вытекает, что распределение фотонов по поверхности, на которую падает свет, должно иметь статистический характер. Наблюдаемая на опыте равномерность освещенности обусловлена тем, что обычно плотность потока фотонов бывает очень большой. Так, например, при освещенности, равной 50 лк (такая освещенность нужна, чтобы глаза не утомлялись при чтении), и длине волны 550 нм на 1 см² поверхности падает примерно $2 \cdot 10^{13}$ фотонов в секунду. В теории вероятностей доказывается, что относительные флуктуации (т. е. относительные отклонения статистических величин от их среднего значения) обрат-

но пропорциональны квадратному корню из числа частиц. Поэтому при указанном значении потока фотонов флуктуации оказываются ничтожными и поверхность представляется освещенной равномерно.

Флуктуации слабых световых потоков были обнаружены С. И. Вавиловым и его сотрудниками. Они установили, что в области наибольшей чувствительности ($\lambda = 555$ нм) глаз начинает реагировать на свет при попадании на зрачок примерно 200 фотонов в секунду. При такой интенсивности Вавилов наблюдал флуктуации светового потока, носившие отчетливо выраженный статистический характер. Правда, следует иметь в виду, что наблюдавшиеся в опытах Вавилова колебания светового восприятия были обусловлены не только флуктуациями светового потока, но также и флуктуациями, связанными с физиологическими процессами, протекающими в глазу.

§ 10. Эффект Комптона

Особенно отчетливо проявляются корпускулярные свойства света в явлении, которое получило название эффекта Комптона. В 1923 г. Комптон¹⁾, исследуя рассеяние рентгеновских лучей различными веществами, обнаружил, что в рассеянных лучах наряду с

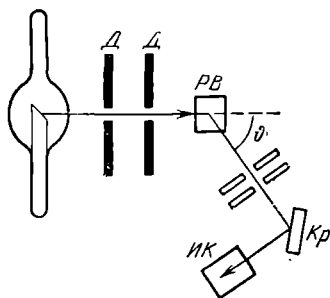


Рис. 10.1. Схема опыта Комптона

излучением первоначальной длины волны λ содержатся также лучи большей длины волны λ' . Разность $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ оказалась зависящей только от угла ϑ , образуемого направлением рассеянного излучения с направлением первичного пучка. От длины волны λ и от природы рассеивающего вещества $\Delta\lambda$ не зависит.

Схема опыта Комптона показана на рис. 10.1. Выделяемый диафрагмами D узкий пучок монохромати-

¹⁾ Артур Холли Комптон (1892—1962) — американский физик,

ческого (характеристического) рентгеновского излучения направлялся на рассеивающее вещество *PB*. Спектральный состав рассеянного излучения исследовался с помощью рентгеновского спектрографа, состоящего из кристалла *Kp* и ионизационной камеры *ИК*.

На рис. 10.2 приведены результаты исследования рассеяния монохроматического рентгеновского излучения (линия K_{α}^1) молибдена) на графите. Кривая *a*

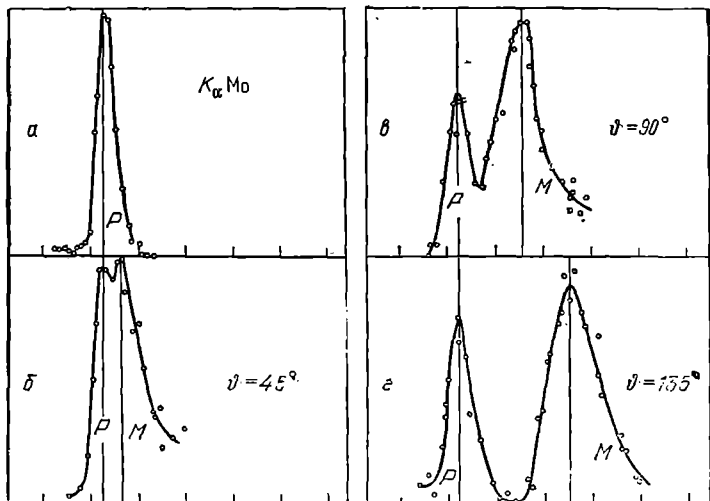


Рис. 10.2. Распределение интенсивности рассеянного на графите рентгеновского излучения по длинам волн

характеризует первичное излучение. Остальные кривые относятся к разным углам рассеяния θ , значения которых указаны на рисунке. По оси ординат отложена интенсивность излучения, по оси абсцисс — длина волны.

Рис. 10.3 характеризует зависимость соотношения интенсивностей смещенной *M* и несмещенной *P* компонент от атомного номера рассеивающего вещества. Верхняя кривая в левом столбце характеризует первичное излучение (линия K_{α} серебра). При рассеянии веществами с малым атомным номером (*Li*, *Be*, *B*) практически все рассеянное излучение имеет смещенную длину волны. По мере увеличения атомного

¹⁾ См. § 30.

номера все большая часть излучения рассеивается без изменения длины волны.

Все особенности эффекта Комптона можно объяснить, рассматривая рассеяние как процесс упругого

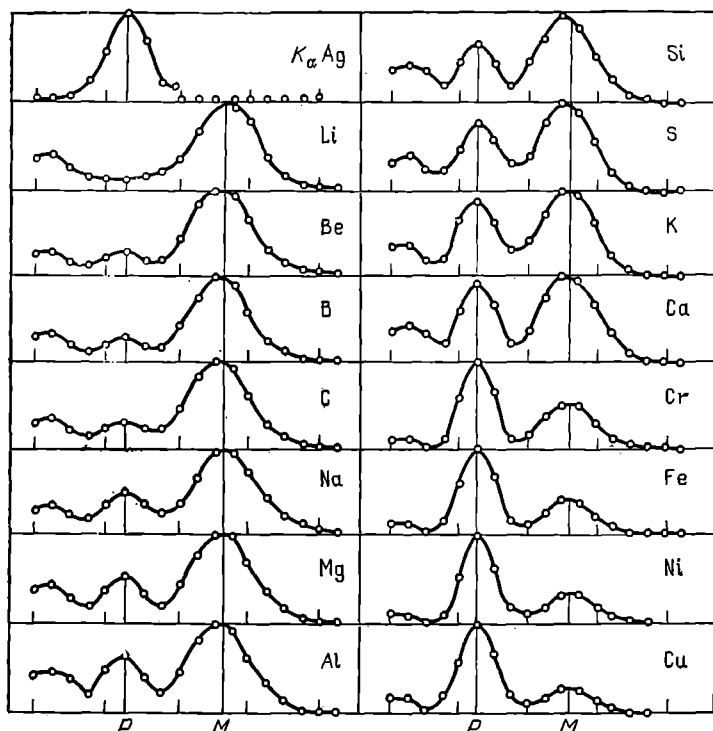


Рис. 10.3. Кривые зависимости интенсивности рассеянного рентгеновского излучения для разных веществ. P — несмещенная, M — смещенная компоненты

столкновения рентгеновских фотонов с практически свободными электронами. Свободными можно считать слабее всего связанные с атомами электроны, энергия связи которых значительно меньше той энергии, которую фотон может передать электрону при соударении¹⁾.

¹⁾ При упругом соударении фотон не может передать электрону (или какой-либо другой частице) всю свою энергию. Такой процесс нарушал бы законы сохранения энергии и импульса.

Пусть на первоначально покоящийся свободный электрон падает фотон с энергией $\hbar\omega$ и импульсом $\hbar\mathbf{k}$ (рис. 10.4). Энергия электрона до столкновения равна mc^2 (m — масса электрона), импульс равен нулю. После столкновения электрон будет обладать импульсом $\mathbf{p}$ и энергией, равной $c\sqrt{p^2 + m^2c^2}$ (см. формулу (51.6) 1-го тома). Энергия и импульс фотона также изменятся и станут равными $\hbar\omega'$ и $\hbar\mathbf{k}'$. Из законов сохранения энергии и импульса вытекают два равенства:

$$\hbar\omega + mc^2 = \hbar\omega' + c\sqrt{p^2 + m^2c^2}, \quad (10.1)$$

$$\hbar\mathbf{k} = \mathbf{p} + \hbar\mathbf{k}'. \quad (10.2)$$

Разделим первое равенство на c и напомним его в виде

$$\sqrt{p^2 + m^2c^2} = \hbar(k - k') + mc$$

($\omega/c = k$). Возведение в квадрат дает

$$p^2 = \hbar^2(k^2 + k'^2 - 2kk') + 2\hbar mc(k - k'). \quad (10.3)$$

Из (10.2) следует, что

$$p^2 = \hbar^2(\mathbf{k} - \mathbf{k}')^2 = \hbar^2(k^2 + k'^2 - 2kk' \cos \vartheta) \quad (10.4)$$

(ϑ — угол между векторами $\mathbf{k}$ и $\mathbf{k}'$; см. рис. 10.4).

Из сравнения выражений (10.3) и (10.4) получаем

$$mc(k - k') = \hbar kk'(1 - \cos \vartheta).$$

Умножим это равенство на 2π и разделим на $m\hbar ck k'$:

$$\frac{2\pi}{k'} - \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi\hbar}{mc}(1 - \cos \vartheta).$$

Наконец, учтя, что $2\pi/k = \lambda$, придем к формуле

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_C(1 - \cos \vartheta), \quad (10.5)$$

где

$$\lambda_C = \frac{2\pi\hbar}{mc}. \quad (10.6)$$

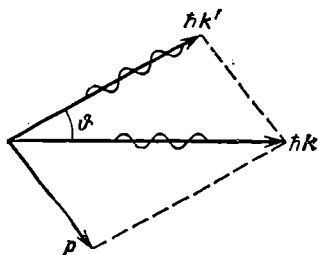


Рис. 10.4. Рассеяние рентгеновского фотона на первоначально покоившемся электроном. $\mathbf{p}$ — импульс электрона, $\hbar\mathbf{k}$ — импульс фотона до столкновения с электроном, $\hbar\mathbf{k}'$ — импульс фотона после столкновения, ϑ — угол рассеяния

Определяемая этим выражением величина λ_c называется комптоновской длиной волны той частицы, масса m которой имеется в виду. В рассматриваемом нами случае λ_c — комптоновская длина волны электрона. Подстановка значений $\hbar$, m и c дает для λ_c электрона значение

$$\lambda_c = 0,00243 \text{ нм.} \quad (10.7)$$

(Комптоновской длиной волны называют иногда величину $\lambda_c = \hbar/mc$. Для электрона $\lambda_c = 0,000386$ нм.)

Результаты измерений Комптона и последующих измерений находятся в полном согласии с формулой (10.5), если подставить в нее значение (10.7) для λ_c .

При рассеянии фотонов на электронах, связь которых с атомом велика, обмен энергией и импульсом происходит с атомом как целым. Поскольку масса атома намного превосходит массу электрона, комптоновское смещение в этом случае ничтожно и λ' практически совпадает с λ . По мере роста атомного номера увеличивается относительное число электронов с сильной связью, чем и обусловливается ослабление смещенной линии (см. рис. 10.3).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем обусловлено существование коротковолновой границы тормозного рентгеновского спектра?
2. Как объясняется существование красной границы фотоэффекта?
3. Чему равен импульс фотона?
4. Что такое комптоновская длина волны?

Примеры решения задач

1. Определить скорость v , при которой импульс электрона $p_e = mv$ равен по модулю импульсу фотона с длиной волны $\lambda = 500$ нм (зеленая часть спектра).

Решение. Импульс фотона

$$p_\phi = \hbar\omega/c = 2\pi\hbar/\lambda.$$

Из соотношения

$$mv = 2\pi\hbar/\lambda$$

следует, что

$$v = \frac{2\pi\hbar}{m\lambda} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1,055 \cdot 10^{-34}}{0,911 \cdot 10^{-30} \cdot 500 \cdot 10^{-9}} = 1,45 \text{ км/с.}$$

2. Работа выхода электрона для никеля $A = 4,84$ эВ. Найти длину волны λ_0 , отвечающую красной границе фотоэффекта.

Решение. Минимальная энергия фотона, при которой возможен фотоэффект, определяется условием $\hbar\omega_{\min} = A$. Отсюда для максимальной длины волны, т. е. для красной границы фотоэффекта, получается значение

$$\lambda_0 = \frac{2\pi c}{\omega_{\min}} = \frac{2\pi\hbar c}{A} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1,055 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{4,84 \cdot 1,60 \cdot 10^{-19}} = 256 \text{ нм}$$

(1 эВ = $1,60 \cdot 10^{-19}$ Дж).

Глава 3. ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА МИКРОЧАСТИЦ

§ 11. Гипотеза де Бройля

В результате углубления представлений о природе света выяснилось, что в оптических явлениях обнаруживается своеобразный дуализм. Наряду с такими свойствами света, которые самым непосредственным образом свидетельствуют о его волновой природе (интерференция, дифракция), имеются и другие свойства, столь же непосредственно обнаруживающие его корпускулярную природу (фотоэффект, явление Комптона).

В 1924 г. де Бройль¹⁾ выдвинул смелую гипотезу, что дуализм не является особенностью одних только оптических явлений, но имеет универсальное значение. «В оптике, — писал он, — в течение столетия слишком пренебрегали корпускулярным способом рассмотрения по сравнению с волновым; не делалась ли в теории вещества обратная ошибка?» Допуская, что частицы вещества наряду с корпускулярными свойствами имеют также и волновые, де Бройль перенес на случай частиц вещества те же правила перехода от одной картины к другой, какие справедливы в случае света. Фотон обладает энергией

$$E = \hbar\omega$$

и импульсом

$$p = 2\pi\hbar/\lambda.$$

По идее де Бройля, движение электрона или какой-либо другой частицы связано с волновым процессом, длина волны которого равна

$$\lambda = 2\pi\hbar/p, \quad (11.1)$$

а частота

$$\omega = E/\hbar. \quad (11.2)$$

¹⁾ Луи де Бройль (1892—1987) — французский физик,

Для нерелятивистской частицы (т. е. частицы, движущейся со скоростью, много меньшей c) формула (11.1) может быть написана в виде

$$\lambda = 2\pi\hbar/mv. \quad (11.3)$$

Гипотеза де Бройля вскоре была подтверждена экспериментально. Дэвиссон¹⁾ и Джермер²⁾ исследовали в 1927 г. отражение электронов от монокристалла никеля, принадлежащего к кубической системе. Узкий пучок моноэнергетических электронов направлялся на поверхность монокристалла, сошлифованную перпендикулярно к большой диагонали кристаллической ячейки. Отраженные электроны улавливались цилиндрическим электродом, присоединенным к гальванометру (рис. 11.1). Интенсивность отраженного пучка оценивалась по силе тока, текущего через

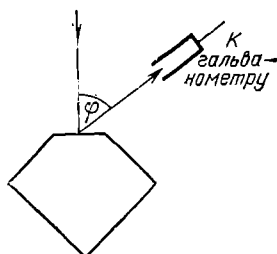


Рис. 11.1. Схема опыта Дэвиссона и Джермера

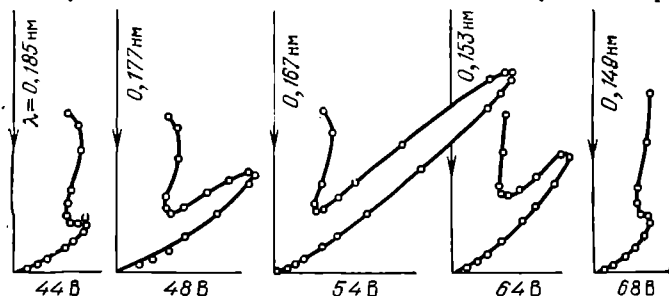


Рис. 11.2. Зависимость интенсивности электронного пучка от угла отражения φ для различных значений ускоряющего напряжения. Вертикальная ось определяет направление падающего пучка. Угол φ отсчитывается от этой оси. Сила тока в заданном направлении представлена длиной отрезка, проведенного из начала координат до пересечения с кривой

гальванометр. Варьировались скорость электронов и угол φ . На рис. 11.2 показана зависимость силы тока,

¹⁾ Клинтон Джозеф Дэвиссон (1881—1958) — американский физик.

²⁾ Лестер Халберт Джермер (1896—1971) — американский физик.

измеряемой гальванометром, от угла φ при различных энергиях электронов. Из рисунка следует, что рассеяние оказалось особенно интенсивным при определенном значении угла φ . Этот угол соответствовал отражению от атомных плоскостей, расстояние между которыми d было известно из рентгенографических исследований. При данном φ сила тока оказалась особенно значительной при ускоряющем напряжении, равном 54 В. Вычисленная по формуле (11.1) длина волны, отвечающая этому напряжению, равна 0,167 нм. Брэгговская длина волны, отвечающая условию ¹⁾

$$2d \sin \vartheta = \lambda,$$

равнялась 0,165 нм. Совпадение настолько разительное, что опыты Дэвиссона и Джермера следует признать блестящим подтверждением идеи де Бройля.

В 1927 г. Дж. П. Томсон ²⁾, а также Тартаковский ³⁾ получили дифракционную картину при прохождении электронного пучка через металлическую

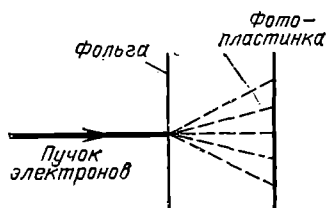


Рис. 11.3. Схема установки для изучения дифракции электронов

фольгу. Опыт осуществлялся следующим образом (рис. 11.3). Пучок электронов, ускоренных разностью потенциалов порядка нескольких десятков киловольт, проходил через тонкую металлическую фольгу и попадал на фотопластинку. Электрон при ударе о фотопластинку оказывает на нее такое же действие,

как и фотон. Полученная таким способом электронограмма золота сопоставлена на рис. 11.4 с полученной в аналогичных условиях рентгенограммой алюминия. Сходство обеих картин поразительно. В 1929 г. Штерн ⁴⁾ и его сотрудники показали, что дифрак-

¹⁾ См. формулу (96.3) 2-го тома. Угол скольжения ϑ связан с углом φ соотношением $\vartheta = \pi/2 - \varphi/2$.

²⁾ Джордж Паджет Томсон (1892—1975), сын Дж. Дж. Томсона — английский физик.

³⁾ П. С. Тартаковский (1895—1939) — советский физик.

⁴⁾ Отто Штерн (1888—1969) — немецкий физик.

ционные явления обнаруживаются также у атомных и молекулярных пучков. Во всех перечисленных

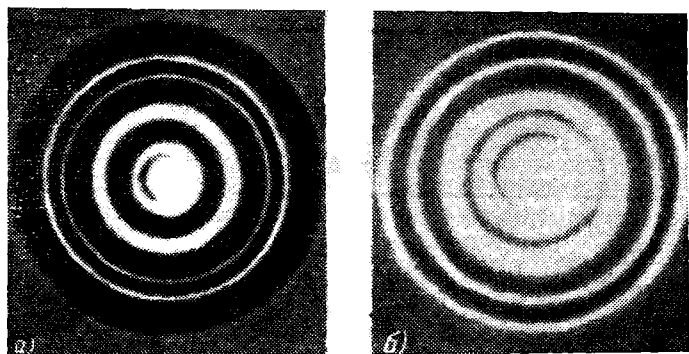


Рис. 11.4. Электронограмма золота (а) и рентгенограмма алюминия (б)

случаях дифракционная картина соответствует длине волны, определяемой соотношением (11.1).

§ 12. Свойства микрочастиц

Микрочастицами называют элементарные частицы (электроны, протоны, нейтроны, фотоны и другие простые частицы), а также сложные частицы, образованные из сравнительно небольшого числа элементарных частиц (молекулы, атомы, ядра атомов и т. п.).

Термин «микрочастица» отражает только одну сторону объекта, к которому он применяется. Всякий микрообъект (молекула, атом, электрон, фотон и т. д.) представляет собой образование особого рода, сочетающее в себе свойства и частицы, и волны.

Микрообъект не способен воздействовать непосредственно на наши органы чувств — ни видеть, ни осязать его нельзя. Ничего подобного микрообъектам в воспринимаемом нами мире не существует. Микротела «не похожи ни на что из того, что вам хоть когда-нибудь приходилось видеть». (Эта и последующие фразы в данном параграфе, взятые в кавычки, заимство-

ваны из «Фейнмановских лекций по физике», вып. 3, гл. 37, «Мир», 1965.)

«Раз поведение атомов так непохоже на наш обыденный опыт, то к нему очень трудно привыкнуть. И новичку в науке, и опытному физику — всем оно кажется своеобразным и туманным. Даже большие ученые не понимают его настолько, как им хотелось бы, и это совершенно естественно, потому что весь непосредственный опыт человека, вся его интуиция — все прилагается к крупным телам. Мы знаем, что будет с большим предметом; но именно так мельчайшие тельца не поступают. Поэтому, изучая их, приходится прибегать к различного рода абстракциям, напрягать воображение и не пытаться связывать их с нашим непосредственным опытом».

В доквантовой физике «понять» означало составить себе наглядный образ объекта или процесса. Квантовую физику нельзя понять в таком смысле слова. Всякая наглядная модель неизбежно будет действовать по классическим законам и поэтому непригодна для представления квантовых процессов. Поэтому самое правильное, что можно сделать, — это отказаться от попыток строить наглядные модели поведения квантовых объектов. Отсутствие наглядности поначалу может вызвать чувство неудовлетворенности, но со временем это чувство проходит, и все становится на свои места.

Сочетая в себе свойства частицы и волны, микротела «не ведут себя ни как волны, ни как частицы...». Отличие микрочастицы от волны заключается в том, что она всегда обнаруживается как неделимое целое. Никто никогда не наблюдал, например, полэлектрона. В то же время волну можно разделить на части (например, направив световую волну на полупрозрачное зеркало) и воспринимать затем каждую часть в отдельности. Отличие микрочастицы от привычной нам макрочастицы заключается в том, что она не обладает одновременно определенными значениями координаты и импульса, вследствие чего применительно к микрочастице понятие траектории утрачивает смысл.

Своеобразие свойств микрочастиц отчетливее всего обнаруживается в следующем мысленном экспери-

менте¹⁾). Направим на преграду с двумя узкими щелями параллельный пучок монохроматических (т. е. обладающих одинаковой кинетической энергией) электронов (рис. 12.1). За преградой поставим фотопластинку Φn . Вначале закроем вторую щель и произведем экспонирование в течение времени τ . Почернение

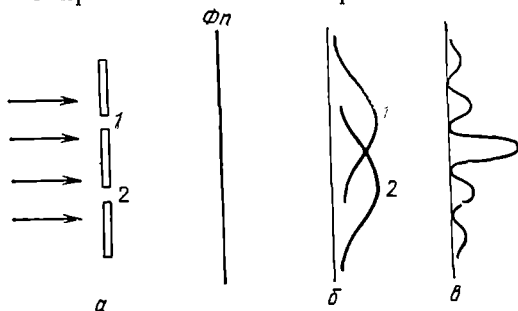


Рис. 12.1. Дифракция электронного пучка на двух щелях. Схема мысленного эксперимента (а), кривые почернения, получающиеся при поочередном открывании щелей (б), кривая почернения, получающаяся при одновременно открытых щелях (в)

на обработанной фотопластинке будет характеризоваться кривой 1 на рис. 12.1б. Вторую фотопластинку подвергнем экспозиции в течение того же времени τ , закрыв первую щель. Характер почернения передается в этом случае кривой 2 на том же рисунке. Наконец, откроем обе щели и подвергнем экспонированию в течение времени τ третью пластинку. Картина почернения, получающаяся в последнем случае, изображена на рис. 12.1в. Эта картина отнюдь не эквивалентна наложению первых двух картин. Она оказывается аналогичной картине, получающейся при интерференции двух когерентных световых волн. Характер картины свидетельствует о том, что на движение каждого электрона оказывают влияние оба отверстия. Такой вывод несовместим с представлением о траекториях. Если бы электрон в каждый момент времени находился в определенной точке пространства и двигался по траектории, он проходил бы через определенное отверстие — первое или второе. Явление же дифракции доказывает, что в прохождении каждого электрона участвуют оба отверстия — и первое, и второе.

¹⁾ См. подстрочное примечание на с. 36 1-го тома.

Не следует, однако, представлять дело так, что какая-то часть электрона проходит через одно отверстие, а другая часть — через второе. Мы уже отмечали, что электрон, как и другие микрочастицы, всегда обнаруживается как целое, с присущей ему массой, зарядом и другими характерными для него величинами. Таким образом, электрон, протон, атомное ядро представляют собой частицы с весьма своеобразными свойствами. Обычный шарик, даже и очень малых размеров (макроскопическая частица), не может служить прообразом микрочастицы. С уменьшением размеров начинают проявляться качественно новые свойства, не обнаруживающиеся у макрочастиц.

В ряде случаев утверждение об отсутствии траекторий у микрочастиц, казалось бы, противоречит опытным фактам. Так, например, в камере Вильсона путь, по которому движется микрочастица, обнаруживается в виде узких следов (треков), образованных капельками тумана; движение электронов в электронно-лучевой трубке превосходно рассчитывается по классическим законам, и т. п. Это кажущееся противоречие объясняется тем, что при известных условиях понятие траектории оказывается применимым к микрочастицам, но только с некоторой степенью точности. Положение оказывается точно таким, как в оптике. Если размеры преград или отверстий велики по сравнению с длиной волны, распространение света происходит как бы вдоль определенных лучей (траекторий). При определенных условиях понятие траектории оказывается приближенно применимым к движению микрочастиц, подобно тому как оказывается справедливым закон прямолинейного распространения света.

§ 13. Соотношение неопределенностей

В классической механике состояние материальной точки (классической частицы) определяется заданием значений координат, импульса, энергии и т. д. Перечисленные величины называются динамическими переменными. Строго говоря, микрообъекту не могут быть приписаны указанные динамические переменные, однако информацию о микрочастицах мы получаем, наблюдая их взаимодействие с приборами, представляющими собой макроскопические тела. По-

этому результаты измерений поневоле выражаются в терминах, разработанных для характеристики макротел, т. е. через значения динамических переменных. В соответствии с этим измеренные значения динамических переменных приписываются микрочастицам. Например, говорят о состоянии электрона, в котором он имеет такое-то значение энергии, и т. д.

Своеобразие свойств микрочастиц проявляется в том, что не для всех переменных получаются при измерениях определенные значения. Так, например, электрон (и любая другая микрочастица) не может иметь одновременно точных значений координаты x и компоненты импульса p_x . Неопределенности значений x и p_x удовлетворяют соотношению

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar/2 \quad (13.1)$$

($\hbar$ — постоянная Планка). Из (13.1) следует, что чем меньше неопределенность одной из переменных (x или p_x), тем больше неопределенность другой. Возможно такое состояние, в котором одна из переменных имеет точное значение, другая переменная при этом оказывается совершенно неопределенной (ее неопределенность равна бесконечности).

Соотношение, аналогичное (13.1), имеет место для y и p_y , для z и p_z , а также для ряда других пар величин (в классической механике такие пары величин называются канонически сопряженными). Обозначив канонически сопряженные величины буквами A и B , можно написать

$$\Delta A \cdot \Delta B \geq \hbar/2. \quad (13.2)$$

Эта формула называется соотношением неопределенностей для величин A и B . Его открыл В. Гейзенберг в 1927 г.

Утверждение о том, что *произведение неопределенностей значений двух сопряженных переменных не может быть по порядку величины меньше постоянной Планка $\hbar$* , называется принципом неопределенности Гейзенберга.

Энергия и время являются канонически сопряженными величинами. Поэтому для них также справедливо соотношение неопределенностей:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2. \quad (13.3)$$

Это соотношение означает, что определение энергии с точностью ΔE должно занять интервал времени, равный по меньшей мере $\Delta t \sim \hbar/\Delta E$.

Соотношение неопределенностей было установлено из рассмотрения, в частности, следующего примера. Попробуем определить значение координаты x свободно летящей микрочастицы, поставив на ее пути щель ширины Δx , расположенную перпендикулярно к

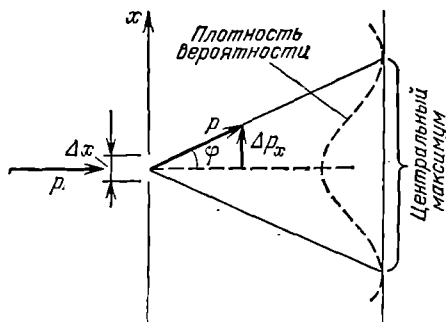


Рис. 13.1. Дифракция частицы на щели. Уменьшение неопределенности координаты x от ∞ до Δx сопровождается возрастанием неопределенности компоненты импульса p_x от нуля до Δp_x

направлению движения частицы (рис. 13.1). До прохождения частицы через щель ее компонента импульса p_x имеет точное значение, равное нулю (щель по условию перпендикулярна к импульсу), так что $\Delta p_x = 0$, зато координата x частицы является совершенно неопределенной. В момент прохождения частицы через щель положение меняется. Вместо полной неопределенности координаты x появляется неопределенность Δx , но это достигается ценой утраты определенности значения p_x . Действительно, вследствие дифракции имеется некоторая вероятность того, что частица будет двигаться в пределах угла 2φ , где φ — угол, соответствующий первому дифракционному минимуму (максимумами высших порядков можно пренебречь, поскольку их интенсивность мала по сравнению с интенсивностью центрального максимума). Таким образом, появляется неопределенность

$$\Delta p_x = p \sin \varphi.$$

Краю центрального дифракционного максимума (первому минимуму), получающемуся от щели ширины Δx , соответствует угол φ , для которого

$$\sin \varphi = \lambda / \Delta x$$

(см. формулу (93.5) 2-го тома). Следовательно,

$$\Delta p_x = p \lambda / \Delta x.$$

Отсюда с учетом (11.1) получается соотношение

$$\Delta x \cdot \Delta p_x = p \lambda = 2\pi \hbar,$$

согласующееся (по порядку величины) с (13.1).

Иногда соотношение неопределенностей получает следующее толкование: в действительности у микрочастицы имеются точные значения координат и импульсов, однако ощутимое для такой частицы воздействие измерительного прибора не позволяет точно определить эти значения. Такое толкование является совершенно неправильным. Оно противоречит наблюдаемым на опыте явлениям дифракции микрочастиц.

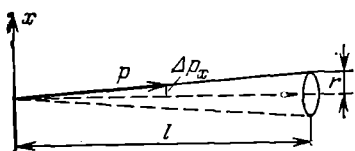
Соотношение неопределенностей обусловлено корпускулярно-волновой природой микрообъектов. Оно указывает, в какой мере можно пользоваться понятиями классической механики применительно к микрочастицам, в частности, с какой степенью точности можно говорить о траекториях микрочастиц. Движение по траектории характеризуется вполне определенными значениями координат и скорости в каждый момент времени. Подставив в (13.1) вместо p_x произведение mv_x , получим соотношение

$$\Delta x \cdot \Delta v_x \geq \hbar / 2m.$$

Мы видим, что чем больше масса частицы, тем меньше неопределенности ее координаты и скорости и, следовательно, с тем большей точностью применимо понятие траектории. Уже для макрочастицы размером всего 1 мкм неопределенности значений x и v_x оказываются за пределами точности измерения этих величин, так что практически ее движение будет неотличимо от движения по траектории.

При определенных условиях даже движение микрочастицы может приближенно рассматриваться как происходящее по траектории. В качестве примера рассмотрим движение электрона в электронно-лучевой

трубке. Оценим неопределенности координаты и импульса электрона для этого случая. Пусть след электронного пучка на экране имеет радиус r порядка 10^{-2} мм, длина трубки l порядка 100 мм (рис. 13.2).



Тогда $\Delta p_x/p_x \sim 10^{-4}$. Импульс электрона связан с ускоряющим напряжением U соотношением

$$\frac{p^2}{2m} = eU.$$

Рис. 13.2. К расчету движения электрона в электронно-лучевой трубке

Отсюда $p = \sqrt{2meU}$. При напряжении $U \sim 10^4$ В энергия электрона равна

10^4 эВ = $1,65 \cdot 10^{-15}$ Дж. Оценим импульс электрона:

$$p = \sqrt{2 \cdot 0,91 \cdot 10^{-30} \cdot 1,6 \cdot 10^{-15}} \approx 5 \cdot 10^{-23} \text{ кг} \cdot \text{м/с}.$$

Следовательно, $\Delta p_x = 5 \cdot 10^{-23} \cdot 10^{-4} = 5 \cdot 10^{-27}$ кг·м/с. И, наконец, согласно соотношению (13.1)

$$\Delta x = \frac{\hbar/2}{\Delta p_x} = \frac{1,05 \cdot 10^{-34}/2}{5 \cdot 10^{-27}} \approx 10^{-8} \text{ м} = 10^{-5} \text{ мм} = 10^{-3} r.$$

Полученный результат указывает на то, что движение электрона в электронно-лучевой трубке практически неотличимо от движения по траектории.

§ 14. Волновая функция

Де Бройль связал со свободно движущейся частицей плоскую волну, смысл которой вначале оставался неясным. Реальная плоская волна, распространяющаяся в направлении оси x , описывается уравнением

$$\xi = A \cos(\omega t - kx) = A \cos(\omega t - 2\pi x/\lambda).$$

Заменив в соответствии с формулами (11.1) и (11.2) ω и λ через E и p , уравнение волны де Бройля для свободной частицы пишут в виде

$$\Psi = A \exp[(i/\hbar)(px - Et)]. \quad (14.1)$$

Функцию Ψ называют волновой функцией (или пси-функцией). Она описывает состояние частицы. Функция Ψ , как правило, бывает комплекс-

ной и в ряде случаев (когда частица движется в силовом поле) имеет не свойственный волне непериодический характер. Несмотря на это, ее и в этих случаях называют волновой.

Правильную интерпретацию волновой функции дал в 1926 г. Борн¹⁾. Согласно Борну квадрат модуля волновой функции определяет вероятность dP того, что частица будет обнаружена в пределах объема dV :

$$dP = |\Psi|^2 dV = \Psi^* \Psi dV. \quad (14.2)$$

Интеграл от выражения (14.2), взятый по всему пространству, должен равняться единице:

$$\int \Psi^* \Psi dV = 1. \quad (14.3)$$

Действительно, этот интеграл дает вероятность того, что частица находится в одной из точек пространства, т. е. вероятность достоверного события, которая равна единице.

Соотношение (14.3) носит название условия нормировки. Функции, удовлетворяющие этому условию, называются нормированными.

Из формулы (14.2) вытекает, что квадрат модуля волновой функции дает плотность вероятности (вероятность, отнесенную к единице объема) нахождения частицы в соответствующем месте пространства.

В соответствии со своим смыслом волновая функция должна быть однозначной, непрерывной и конечной (за исключением, быть может, особых точек). Кроме того, она должна иметь непрерывную и конечную производную. Совокупность перечисленных требований носит название стандартных условий.

Из физического смысла волновой функции вытекает, что квантовая механика имеет статистический характер. Она не позволяет определить местонахождение частицы в пространстве или траекторию, по которой движется частица. С помощью волновой функции можно лишь предсказать, с какой вероятностью частица может быть обнаружена в различных точках пространства. На первый взгляд может показаться, что квантовая механика дает значительно менее точ-

¹⁾ Макс Борн (1882—1970) — немецкий физик.

ное и исчерпывающее описание движения частицы, чем классическая механика, которая определяет «точно» местоположение и скорость частицы в каждый момент времени. Однако в действительности это не так. Квантовая механика гораздо глубже вскрывает истинное поведение микрочастиц. Она лишь не определяет того, чего нет на самом деле. В применении к микрочастицам понятия определенного местоположения и траектории, как мы уже отмечали, вообще теряют смысл.

§ 15. Уравнение Шрёдингера

В развитие идеи де Бройля о волновых свойствах вещества Шрёдингер¹⁾ получил в 1926 г. свое знаменитое уравнение. Оно позволяет найти волновые функции частиц, движущихся в различных силовых полях. Уравнение выглядит следующим образом:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + U \Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}. \quad (15.1)$$

Здесь m — масса частицы, i — мнимая единица, U — потенциальная энергия частицы, Δ — оператор Лапласа, результат действия которого на некоторую функцию представляет собой сумму вторых частных производных по координатам:

$$\Delta \Psi = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2}. \quad (15.2)$$

Из уравнения (15.1) следует, что вид волновой функции определяется функцией U , т. е. в конечном счете характером сил, действующих на частицу.

Уравнение Шрёдингера является основным уравнением нерелятивистской квантовой механики. Оно не может быть выведено из других соотношений. Его следует рассматривать как исходное основное предположение, справедливость которого доказывается тем, что все вытекающие из него следствия самым точным образом согласуются с опытными фактами.

Шрёдингер установил свое уравнение, исходя из оптико-механической аналогии. Эта аналогия заключается в сходстве уравнений, описывающих ход свето-

¹⁾ Эрвин Шрёдингер (1887—1961) — австрийский физик.

вых лучей, с уравнениями, определяющими траектории частиц в классической механике.

Поясним, как можно прийти к уравнению Шрёдингера. Для простоты ограничимся одномерным случаем. Рассмотрим свободно движущуюся частицу. Согласно идее де Бройля ей нужно сопоставить плоскую волну

$$\Psi = A \exp [(i/\hbar)(px - Et)]$$

(см. (14.1)). Продифференцировав эту функцию один раз по t , а другой раз дважды по x , получим

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} E \Psi, \quad \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = \left(\frac{i}{\hbar}\right)^2 p^2 \Psi.$$

Отсюда

$$E = \frac{1}{\Psi} i \hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}, \quad p^2 = -\frac{1}{\Psi} \hbar^2 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2}. \quad (15.3)$$

В нерелятивистской классической механике энергия E и импульс p свободной частицы связаны соотношением

$$E = \frac{p^2}{2m}.$$

Подставив в это соотношение выражения (15.3) для E и p^2 и сократив затем на Ψ , получим уравнение

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = i \hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t},$$

которое совпадает с уравнением (15.1), если в последнем положить $U = 0$.

В случае частицы, движущейся в силовом поле, характеризуемом потенциальной энергией U , энергия E и импульс p связаны соотношением

$$\frac{p^2}{2m} = E - U.$$

Распространив и на этот случай выражения (15.3) для E и p^2 , получим

$$-\frac{1}{\Psi} \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = \frac{1}{\Psi} i \hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} - U.$$

Умножив это соотношение на Ψ и перенеся член $U\Psi$ влево, придем к уравнению

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + U\Psi = i \hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t},$$

совпадающему с уравнением (15.1),

Изложенные рассуждения не имеют доказательной силы и не могут рассматриваться как вывод уравнения Шрёдингера. Их цель — пояснить, каким образом можно было прийти к установлению этого уравнения.

Если силовое поле, в котором движется частица, стационарно (т. е. постоянно во времени), то функция U не зависит явно от t . В этом случае решение уравнения Шрёдингера распадается на два множителя, один из которых зависит только от координат, другой — только от времени:

$$\Psi(x, y, z, t) = \psi(x, y, z) \exp[-i(E/\hbar)t]. \quad (15.4)$$

Здесь E — полная энергия частицы, которая в случае стационарного поля остается постоянной. Чтобы убедиться в справедливости выражения (15.4), подставим его в уравнение (15.1). В результате получим соотношение

$$\begin{aligned} -\frac{\hbar^2}{2m} \exp[-i(E/\hbar)t] \Delta\psi + U\psi \exp[-i(E/\hbar)t] = \\ = i\hbar [-i(E/\hbar)] \psi \exp[-i(E/\hbar)t]. \end{aligned}$$

Сократив на общий множитель $\exp[-i(E/\hbar)t]$, придем к дифференциальному уравнению, определяющему функцию ψ :

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta\psi + U\psi = E\psi. \quad (15.5)$$

Уравнение (15.5) называется уравнением Шрёдингера для стационарных состояний. В дальнейшем мы будем иметь дело только с этим уравнением и для краткости будем называть его просто уравнением Шрёдингера. Уравнение (15.5) часто пишут в виде

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \psi = 0. \quad (15.6)$$

В случае стационарного силового поля волновая функция имеет вид (15.4). Соответственно

$$\Psi^* \Psi = \exp[i(E/\hbar)t] \psi^* \cdot \exp[-i(E/\hbar)t] \psi = \psi^* \psi,$$

так что плотность вероятности равна $\psi^* \psi$ и, следовательно, от времени не зависит. По этой причине состояния, описываемые волновыми функциями вида (15.4), и были названы стационарными,

В классической механике состояние частицы (материальной точки) определяется заданием положения и скорости (или импульса) частицы. Если известно состояние в начальный момент времени и силовое поле, в котором находится частица, то, решив уравнение Ньютона, можно найти положение и скорость частицы в любой последующий момент времени. В этом состоит сущность причинности в классической механике.

В квантовой механике классическое понятие состояния лишено смысла, ибо координата и скорость частицы принципиально не могут иметь одновременно определенных значений. Соответственно классическое понятие причинности также неприменимо в квантовой теории. Состояние частицы задается в квантовой механике волновой функцией. Если известны волновая функция в начальный момент времени и силовое поле, в котором движется частица, то, решив уравнение Шрёдингера, можно найти волновую функцию в последующие моменты времени. В этом заключается сущность причинности в квантовой механике. Таким образом, квантовая механика не отменила принцип причинности. Она лишь придала ему форму, соответствующую истинной природе вещей.

§ 16. Прохождение частиц через потенциальный барьер

Различие в поведении классической и квантовой частиц отчетливо проявляется в тех случаях, когда на пути частицы встречается потенциальный барьер. Будем считать, что частица движется вдоль оси x . Пусть имеется потенциальный барьер, изображенный на рис. 16.1а. Потенциальная энергия частицы U при $x < 0$ равна нулю, при $x \geq 0$ — имеет значение U_0 .

Рассмотрим вначале поведение классической частицы (т. е. частицы, подчиняющейся законам классической механики). Если полная энергия E частицы меньше высоты барьера U_0 (E_1 на рис. 16.1а), частица отразится от барьера и полетит в обратную сторону с той же энергией, какую она имела первоначально. В случае, когда $E > U_0$ (E_2 на рис. 16.1а), частица пройдет над барьером, потеряв лишь «часть» своей скорости, и будет беспрепятственно двигаться в прежнем направлении.

Совершенно иначе выглядит поведение квантовой частицы. Такая частица, налетев на ступенчатый барьер, имея энергию, меньшую U_0 , проникает в него на некоторую глубину (причем ее волновая функция убывает экспоненциально) и лишь затем поворачивает в

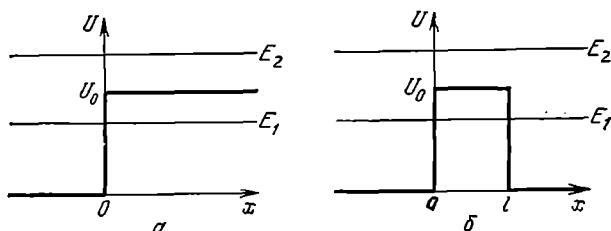


Рис. 16.1. Потенциальный барьер в виде ступеньки (а) и потенциальный барьер конечной ширины (б)

обратную сторону. Под глубиной проникновения понимают расстояние x_e , на котором вероятность обнаружения частицы уменьшается в e раз (напомним, что граница барьера имеет $x=0$). Соответствующий расчет дает, что

$$x_e = \frac{\hbar}{\sqrt{8m(U_0 - E)}}. \quad (16.1)$$

Из этой формулы вытекает, что чем легче частица (чем меньше m) и чем меньше превышение высоты барьера U_0 над E , тем на большую глубину проникает частица в процессе отражения.

Произведем оценку x_e для свободного электрона в металле. Металлическое тело представляет собой для электрона потенциальную яму глубины U_0 . Поэтому электрон, движущийся к поверхности металла, «натыкается» на ступенчатый потенциальный барьер высоты U_0 . Превышение этого барьера над энергией E наиболее быстрых электронов составляет величину порядка нескольких электронвольт. Примем $U_0 - E$ равной 1 эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж. Тогда согласно (16.1)

$$x_e = \frac{1,05 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{8 \cdot 0,91 \cdot 10^{-30} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}} \approx 10^{-10} \text{ м} = 0,1 \text{ нм}.$$

Получилось значение порядка межатомных расстояний в кристалле. Таким образом, свободные электроны вылетают за пределы металла на расстояние порядка

0,1 нм, после чего возвращаются обратно. В результате металлическое тело оказывается окруженным облаком электронов (см. рис. 32.1 и соответствующий текст во 2-м томе).

В случае, когда $E > U_0$ (E_2 на рис. 16.1а), квантовая частица не обязательно проникает в область $x > 0$ и движется в первоначальном направлении. Имеется вероятность того, что частица отразится от барьера и полетит в обратном направлении. Эта вероятность равна

$$R = \left(\frac{\sqrt{E} - \sqrt{E - U_0}}{\sqrt{E} + \sqrt{E - U_0}} \right)^2$$

Для случая $E = 2U_0$

$$R = \left(\frac{\sqrt{2} - 1}{\sqrt{2} + 1} \right)^2 = 0,030.$$

Если $E = 1,1U_0$, то $R = 0,29$.

Еще разительнее различие в поведении классической и квантовой частиц в случае потенциального барьера конечной ширины (рис. 16.1б). Для такого барьера $U = 0$ при $x < 0$ и при $x > l$, а в области $0 \leq x \leq l$ $U = U_0$. При $E < U_0$ (E_1 на рис. 16.1б) классическая частица отражается от такого барьера точно так же, как от ступенчатого барьера, изображенного на рис. 16.1а. Вероятность проникнуть за барьер у классической частицы равна нулю. При $E > U_0$ (E_2 на рис. 16.1б) частица проходит над барьером и продолжает двигаться за барьером с первоначальной скоростью. Вероятность отразиться от барьера у классической частицы равна нулю.

Квантовая частица может оказаться за барьером даже при $E < U_0$ и отразиться от барьера при $E > U_0$. Это вытекает из уравнения Шрёдингера и стандартных условий, налагаемых на волновые функции (см. § 14). Не приводя в принципе простых, но громоздких вычислений, дадим только конечный результат. Вероятность того, что частица окажется за барьером, называется коэффициентом прохождения (или коэффициентом прозрачности). В случае прямоугольного барьера, изображенного на рис. 16.1б, коэффициент прохождения D может быть представлен приближенной формулой

$$D \approx \exp \left[- (l/\hbar) \sqrt{8m(U_0 - E)} \right]. \quad (16.2)$$

Из этой формулы следует, что вероятность прохождения частицы через потенциальный барьер сильно зависит от ширины барьера l и от его превышения над E , т. е. от $U_0 - E$. Если при какой-то ширине барьера коэффициент прохождения D равен, допустим, 0,01, то при увеличении ширины в два раза D станет рав-

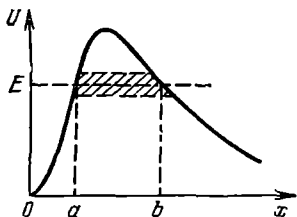


Рис. 16.2. «Туннель» в потенциальном барьере произвольной формы

ным $0,01^2 = 0,0001$, т. е. уменьшится в 100 раз. Тот же эффект в этом случае вызвало бы возрастание в четыре раза величины $U_0 - E$. Коэффициент прохождения резко уменьшается при увеличении массы частицы m .

Соответствующий расчет дает, что в случае потенциального барьера произвольной формы (рис. 16.2) формула (16.2) должна быть заменена более общей формулой

$$D \approx \exp \left[- (1/\hbar) \int_a^b \sqrt{8m(U - E)} dx \right], \quad (16.3)$$

где $U = U(x)$.

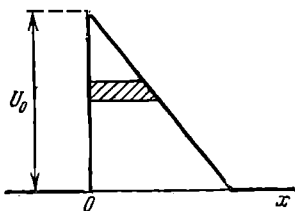
При преодолении потенциального барьера частица как бы проходит через «туннель» в этом барьере (см. заштрихованную область на рис. 16.2), в связи с чем рассмотренное нами явление называют туннельным эффектом.

С классической точки зрения туннельный эффект представляется абсурдным, так как частица, «находящаяся в туннеле», должна была бы обладать отрицательной кинетической энергией (в туннеле $E < U_0$). Однако туннельный эффект — явление специфически квантовое, не имеющее аналога в классической физике. В квантовой же механике деление полной энергии на кинетическую и потенциальную не имеет смысла, так как противоречит принципу неопределенности. Действительно, тот факт, что частица обладает определенной кинетической энергией E_k , был бы равнозначен тому, что частица имеет определенный импульс p . Аналогично тот факт, что частица имеет определенную потенциальную энергию U , означал бы, что ча-

стица находится в точно заданном месте пространства. Поскольку координата и импульс частицы не могут одновременно иметь определенных значений, не могут быть одновременно точно определены E_k и U . Таким образом, хотя полная энергия частицы E имеет вполне определенное значение, она не может быть представлена в виде суммы точно определенных энергий E_k и U . Ясно, что в этом случае заключение об отрицательности E_k «внутри» туннеля становится беспочвенным.

Туннельный эффект позволяет объяснить ряд явлений, в частности вырывание электронов из металлов электрическим полем (автоэлектронную эмиссию; см. § 32 2-го тома). Если создать вблизи металла сильное электрическое поле, то ступенчатый барьер, удерживающий свободные электроны в металле, превращается в барьер конечной ширины (рис. 16.3). В резуль-

Рис. 16.3. Созданное вблизи поверхности металла очень сильное электрическое поле превращает ступенчатый потенциальный барьер в барьер конечной ширины. Вне металла потенциальная энергия электрона равна $U_0 - e\varphi = U_0 - eEx$ (φ — потенциал, E — модуль напряженности поля)



тате становится возможным выход электронов из металла за счет туннельного эффекта. Чем сильнее поле, тем уже барьер и тем больше коэффициент прохождения D .

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как зависит длина волны де Бройля от массы частицы?
2. Почему для микрочастицы неприменимо понятие траектории?
3. Напишите соотношение неопределенностей для энергии и времени.
4. Каков смысл волновой функции?
5. Что такое туннельный эффект?
6. Чем отличается выражение для длины волны де Бройля нерелятивистской частицы от выражения для комптоновской длины волны?

Примеры решения задач

1. Волновая функция некоторой частицы имеет вид $\psi = A \exp(-r/a)$, где A и a — константы, r — расстояние частицы от силового центра. Найти наиболее вероятное расстояние $r_{\text{вер}}$ частицы от центра.

Решение. В соответствии со смыслом волновой функции вероятность того, что частица окажется в пределах объема dV , равна $dP = \psi^* \psi dV$. В данном случае волновая функция вещественна и зависит только от r . Поэтому вероятность того, что частица окажется в пределах шарового слоя радиуса r и толщины dr , определяется выражением

$$dP = \psi^2 \cdot 4\pi r^2 dr = 4\pi A^2 \left[\exp\left(-\frac{2r}{a}\right) \right] r^2 dr = f(r) dr.$$

Наиболее вероятное расстояние $r_{\text{вер}}$ соответствует максимуму функции $f(r)$. Следовательно, $r_{\text{вер}}$ является корнем уравнения $df/dr = 0$. Произведя дифференцирование, придем к уравнению

$$4\pi A^2 \exp\left(-\frac{2r}{a}\right) \left[-\frac{2}{a} r^2 + 2r\right] = 0.$$

Корнями этого уравнения являются значения r , равные 0, ∞ и a . Первые два соответствуют минимумам функции $f(r)$. Таким образом,

$$r_{\text{вер}} = a.$$

2. Волновая функция основного состояния гармонического осциллятора имеет вид

$$\psi_0(x) = \sqrt{\alpha/\sqrt{\pi}} \exp(-\alpha^2 x^2/2),$$

где $\alpha = \sqrt{m\omega/\hbar}$ (m — масса, ω — собственная частота осциллятора). Энергия осциллятора в этом состоянии $E_0 = \hbar\omega/2$. Найти среднее значение модуля координаты $\langle |x| \rangle$, выразить его через классическую амплитуду a (которая связана с энергией осциллятора соотношением $E = ma^2\omega^2/2$).

Решение. Напомним, что в случае дискретного спектра случайной величины x среднее значение $\langle x \rangle = \sum P_i x_i$, где P_i — вероятность значения x_i (см. формулу (73.5) 1-го тома). Аналогично в случае непрерывного спектра $\langle x \rangle = \int x dP_x$, где dP_x — вероятность того, что значение x окажется в интервале от x до $x + dx$ (см. формулу (73.10) 1-го тома).

В данном случае $dP_x = \psi^2 dx$. Функция $|x|\psi^2$ четная, поэтому

$$\begin{aligned} \langle |x| \rangle &= \int_{-\infty}^{+\infty} |x| \psi^2 dx = 2 \int_0^{\infty} x \psi^2 dx = 2 \int_0^{\infty} \frac{\alpha}{\sqrt{\pi}} x \exp(-\alpha^2 x^2) dx = \\ &= \frac{2\alpha}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{2\alpha^2} = \frac{1}{\alpha \sqrt{\pi}} = \sqrt{\frac{\hbar}{\pi m \omega}}. \end{aligned}$$

Классическая амплитуда связана с энергией соотношением $E_0 = \hbar \omega / 2 = m a^2 \omega^2 / 2$. Отсюда $\sqrt{\hbar / m \omega} = a$. С учетом этого

$$\langle |x| \rangle = \frac{a}{\sqrt{\pi}} = 0,564a.$$

Г л а в а 4. КВАНТОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

§ 17. Квантование энергии

Уравнение Шрёдингера позволяет найти волновую функцию данного состояния и, следовательно, определить вероятность нахождения частицы в различных точках пространства. Однако этим далеко не исчерпывается значение указанного уравнения. Из уравнения (15.6) и налагаемых на волновые функции стандартных условий (см. § 14) непосредственно вытекает квантование энергии частицы.

В уравнение Шрёдингера входит в качестве параметра полная энергия частицы E . В теории дифференциальных уравнений доказывается, что уравнения вида (15.6) имеют решения, удовлетворяющие стандартным условиям, не при любых значениях параметра (т. е. энергии E), а лишь при некоторых избранных значениях. Эти избранные значения называются собственными значениями и соответствующей величины (в нашем случае — энергии). Решения, соответствующие собственным значениям E , называются собственными функциями задачи.

Совокупность собственных значений называется спектром величины. Если эта совокупность образует дискретную последовательность, спектр называется дискретным. Если собственные значения образуют непрерывную последовательность, спектр называют непрерывным или сплошным. В дальнейшем мы ограничимся рассмотрением только

таких задач, у которых спектр собственных значений является дискретным.

В случае дискретного спектра собственные значения и собственные функции можно пронумеровать:

$$\begin{aligned} E_1, E_2, \dots, E_n, \dots, \\ \psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n, \dots \end{aligned} \quad (17.1)$$

Таким образом, квантование энергии получается из основных положений квантовой механики без каких-либо дополнительных предположений.

Нахождение собственных значений и собственных функций, как правило, представляет весьма трудную математическую задачу. Мы рассмотрим пример, достаточно простой для того, чтобы можно было решить уравнение Шрёдингера без большого труда.

Найдем собственные значения энергии и соответствующие им собственные функции для частицы, находящейся в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме. Предположим, что частица может двигаться только вдоль оси x . Пусть движение ограничено непроницаемыми для частицы стенками: $x=0$ и $x=l$. Потенциальная энергия U имеет в этом случае следующий вид (рис. 17.1а): она равна нулю при

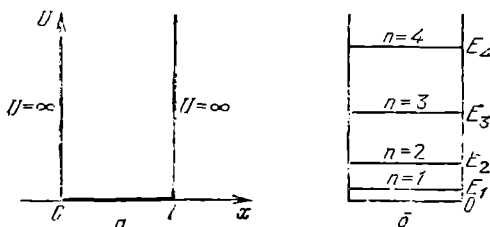


Рис. 17.1. а — Бесконечно глубокая потенциальная яма. б — Схема уровней энергии частицы, находящейся в такой яме

$0 \leq x \leq l$ и обращается в бесконечность при $x < 0$ и $x > l$.

Возьмем уравнение Шрёдингера в виде (15.6). Поскольку волновая функция зависит только от координаты x , уравнение упрощается следующим образом:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \psi = 0. \quad (17.2)$$

За пределы потенциальной ямы частица попасть не может. Поэтому вероятность обнаружения частицы вне ямы равна нулю. Соответственно и функция ψ за пределами ямы равна нулю. Из условия непрерывности следует, что ψ должна быть равна нулю и на границах ямы, т. е. что

$$\psi(0) = \psi(l) = 0. \quad (17.3)$$

Это и есть то условие, которому должны удовлетворять решения уравнения (17.2).

В области, где ψ не равна тождественно нулю, уравнение (17.2) имеет вид

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E\psi = 0 \quad (17.4)$$

(в этой области $U = 0$). Введя обозначение

$$k^2 = \frac{2m}{\hbar^2} E, \quad (17.5)$$

придем к уравнению, хорошо известному из теории колебаний:

$$\psi'' + k^2\psi = 0.$$

Решение такого уравнения имеет вид

$$\psi(x) = A \sin(kx + \alpha) \quad (17.6)$$

(см. формулу (64.6) 2-го тома. В данном случае удобнее взять синус вместо косинуса).

Условиям (17.3) можно удовлетворить соответствующим выбором постоянных k и α . Прежде всего из условия $\psi(0) = 0$ получаем

$$\psi(0) = A \sin \alpha = 0,$$

откуда следует, что α должна быть равна нулю. Далее, должно выполняться условие

$$\psi(l) = A \sin kl = 0,$$

что возможно лишь в случае, если

$$kl = \pm n\pi \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (17.7)$$

($n = 0$ отпадает, поскольку при этом получается $\psi \equiv 0$ — частица нигде не находится).

Исключив k из уравнений (17.5) и (17.7), найдем собственные значения энергии частицы:

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2} n^2 \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (17.8)$$

Спектр энергии оказался дискретным. На рис. 17.1б изображена схема энергетических уровней.

Оценим расстояния между соседними уровнями для различных значений массы частицы m и ширины ямы l . Разность энергий двух соседних уровней равна

$$\Delta E_n = E_{n+1} - E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2} (2n + 1) \approx \frac{\pi^2 \hbar^2}{ml^2} n. \quad (17.9)$$

Если взять m порядка массы молекулы ($\sim 10^{-26}$ кг), а l порядка 0,1 м (размеры сосуда, в котором находится газ), получится

$$\Delta E_n = \frac{3,14^2 \cdot 1,05^2 \cdot 10^{-68}}{10^{-26} \cdot 0,1^2} n = 10^{-39} n \text{ Дж} \approx 10^{-20} n \text{ эВ}.$$

Столь густо расположенные энергетические уровни будут практически восприниматься как сплошной спектр энергии, так что хотя квантование энергии в принципе будет иметь место, но на характере движения молекул сказываться не будет.

Аналогичный результат получается, если взять m порядка массы электрона ($\sim 10^{-30}$ кг) при тех же размерах ямы (свободные электроны в металле). В этом случае

$$\Delta E_n \approx 10^{-35} n \text{ Дж} \approx 10^{-16} n \text{ эВ}.$$

Однако совсем иной результат получается для электрона, если область, в пределах которой он движется, будет порядка атомных размеров ($\sim 10^{-10}$ м). В этом случае подстановка в формулу (17.9) числовых значений дает

$$\Delta E_n \approx 10^{-17} n \text{ Дж} \approx 10^2 n \text{ эВ}.$$

Согласно формуле (17.8) минимальная энергия, которой может обладать частица, находящаяся в потенциальной яме, отлична от нуля. Этот результат обусловлен волновыми свойствами частицы и может быть получен из соотношения неопределенностей. Неопределенность координаты x в этом случае ограничена размером сосуда l . Поскольку $\Delta x = l$, неопределен-

ность импульса Δp (т. е. в данном случае сам импульс p) равна

$$p = \Delta p \geq \hbar/\Delta x = \hbar/l.$$

Следовательно, энергия частицы ограничена снизу значением

$$E_{\min} \approx \frac{p^2}{2m} \approx \frac{\hbar^2}{2ml^2},$$

которое с точностью до множителя π^2 совпадает с выражением (17.8) для $n=1$.

Подставив в (17.6) значение k , получающееся из условия (17.7), найдем собственные функции задачи:

$$\psi_n(x) = A \sin \frac{n\pi x}{l}$$

(напомним, что $\alpha = 0$). Для нахождения коэффициента A воспользуемся условием нормировки (14.3),

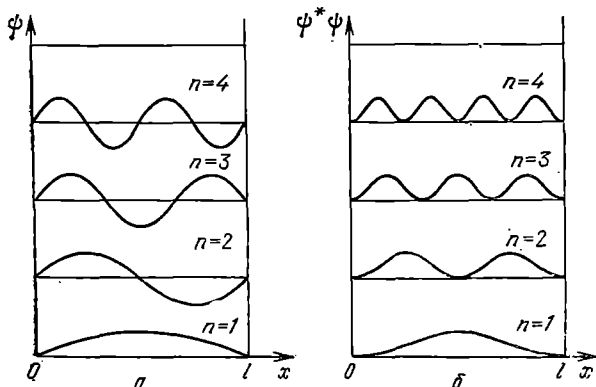


Рис. 17.2. а — Графики собственных функций частицы, находящейся в потенциальной яме, изображенной на рис. 17.1 а. б — Плотность вероятности обнаружения частицы в точках с различными значениями координаты x

которое в данном случае запишется следующим образом:

$$A^2 \int_0^l \sin^2 \frac{n\pi x}{l} dx = 1.$$

На концах промежутка интегрирования подынтегральная функция обращается в нуль. Поэтому значение интеграла можно получить, умножив среднее значение

$\sin^2(n\pi x/l)$ (равное, как известно, $1/2$) на длину промежутка l . В результате получится: $A^2(1/2)l = 1$, откуда $A = \sqrt{2/l}$. Таким образом, собственные функции имеют вид

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (17.10)$$

Графики собственных функций изображены на рис. 17.2а. На рис. 17.2б дана плотность вероятности обнаружения частицы на различных расстояниях от стенок ямы, равная $\psi^*\psi$. Из графиков, например, следует, что в состоянии с $n = 2$ частица не может быть обнаружена в середине ямы и вместе с тем одинаково часто бывает как в левой, так и в правой половине ямы. Такое поведение частицы, очевидно, несовместимо с представлением о траекториях. Отметим, что согласно классическим представлениям все положения частицы в яме равновероятны.

§ 18. Собственные значения физических величин

В квантовой механике каждой физической величине сопоставляется оператор. Под оператором подразумевается правило, посредством которого одной функции (обозначим ее φ) сопоставляется другая функция (обозначим ее f). Символически это записывается следующим образом:

$$\hat{f} = Q\varphi. \quad (18.1)$$

Здесь Q — обозначение оператора, с таким же успехом можно взять любую другую букву (или даже букву «в некоторой степени») полужирного прямого шрифта, например **H**, **U**, **L**² и т. д. В формуле (15.2) роль Q играет Δ , роль φ — функция Ψ , а роль f — правая часть формулы.

Под символом оператора скрывается совокупность действий, с помощью которых исходная функция (φ) превращается в другую функцию (f). Например, под символом Δ скрывается двукратное дифференцирование по всем трем координатам x , y и z с последующим суммированием полученных выражений. Оператор может, в частности, представлять собой умножение исходной функции φ на некоторую функцию U . Тогда $f = U\varphi = U\varphi$ и, следовательно, $U = U$.

Если рассматривать функцию U в уравнении (15.5) как оператор, действие которого на волновую функцию сводится к умножению ψ на U , то уравнению (15.5) можно придать вид

$$\mathbf{H}\psi = E\psi. \quad (18.2)$$

В этом уравнении символом $\mathbf{H}$ обозначен оператор, равный сумме операторов $-(\hbar^2/2m)\Delta$ и U :

$$\mathbf{H} = -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta + U. \quad (18.3)$$

Этот оператор называют гамильтонианом.

Гамильтониан является оператором энергии E . В квантовой механике другим физическим величинам также сопоставляются операторы. Соответственно рассматриваются операторы координат, импульса, момента импульса и т. д. Для каждой физической величины q составляется уравнение, аналогичное уравнению (18.2). Оно имеет вид

$$\mathbf{Q}\psi = q\psi, \quad (18.4)$$

где $\mathbf{Q}$ — оператор, сопоставляемый физической величине q .

Сказанное в § 17 по поводу собственных значений и собственных функций энергии справедливо и для других физических величин. Значения q , при которых решения уравнения (18.4) удовлетворяют стандартным условиям, называются собственными значениями величины q , а сами решения — ее собственными функциями. Спектр собственных значений может быть как дискретным, так и сплошным. В случае дискретного спектра собственные значения и собственные функции можно пронумеровать:

$$\begin{array}{lll} q_1, & q_2, & q_n, \\ \psi_1, & \psi_2, & \psi_n, \end{array} \quad (18.5)$$

(ср. с (17.1)).

Согласно одному из постулатов квантовой механики при измерениях физической величины q , представляемой оператором $\mathbf{Q}$, могут получаться только результаты, совпадающие с собственными значениями этого оператора.

Возможны состояния, для которых при измерениях некоторой величины q всегда получается одно и то же

значение q_n . О таких состояниях говорят как о состояниях, в которых величина q имеет определенное значение. Однако возможны также состояния, для которых при измерениях получаются с разной вероятностью различные собственные значения оператора Q . О таких состояниях говорят как о состояниях, в которых величина q не имеет определенного значения.

Волновая функция ψ состояния, в котором q не имеет определенного значения, является суперпозицией (наложением) собственных функций величины q :

$$\psi = \sum c_n \psi_n, \quad (18.6)$$

где c_n — не зависящие от координат, в общем случае комплексные числа. Количество слагаемых в сумме равно числу различных собственных функций величины q .

Квадраты модулей коэффициентов c_n дают вероятности того, что при измерениях, производимых над системой, находящейся в состоянии ψ , будут получены соответствующие значения величины q . Поскольку сумма всех таких вероятностей должна быть равна единице, коэффициенты c_n удовлетворяют условию

$$\sum_n |c_n|^2 = 1.$$

§ 19. Квантование момента импульса

Имеются четыре оператора, относящихся к моменту импульса частицы, — оператор квадрата момента L^2 и три оператора проекций момента на оси координат: L_x , L_y , L_z . Оказывается, что одновременно могут иметь определенные значения лишь квадрат момента и одна из проекций момента на координатные оси. Две другие проекции оказываются при этом совершенно неопределенными¹⁾. Это означает, что «вектор» момента не имеет определенного направления и, следовательно, не может быть изображен, как в классической механике, с помощью направленного отрезка прямой.

¹⁾ Исключение составляет случай $L = 0$, когда все три проекции момента на оси x , y , z имеют определенное значение, равное нулю.

Решение уравнения

$$L^2\psi = L^2\psi$$

является очень трудным. Поэтому мы ограничимся приведением конечных результатов: собственные значения оператора квадрата момента импульса равны

$$L^2 = l(l+1) \quad (l=0, 1, 2, \dots). \quad (19.1)$$

Здесь l — квантовое число, называемое а з и м у т а л ь н ы м. Следовательно, модуль момента импульса может иметь лишь дискретные значения, определяемые формулой¹⁾

$$|L| = \hbar \sqrt{l(l+1)} \quad (l=0, 1, 2, \dots). \quad (19.2)$$

Вид оператора L_z довольно прост. Поэтому мы можем рассмотреть решение уравнения

$$L_z\psi = L_z\psi \quad (19.3)$$

в качестве еще одного примера на нахождение собственных значений (первый пример был рассмотрен в § 17, в котором были определены собственные значения энергии для частицы в потенциальной яме).

В сферических координатах (r, ϑ, φ) оператор проекции момента импульса на полярную ось z (от которой отсчитывается полярный угол ϑ) имеет вид

$$L_z = -i\hbar \frac{\partial}{\partial \varphi}.$$

Следовательно, уравнение (19.3) выглядит следующим образом:

$$-i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial \varphi} = L_z\psi. \quad (19.4)$$

Подстановка $\psi = \exp(\alpha\varphi)$ приводит после сокращения на общий множитель $\exp(\alpha\varphi)$ к алгебраическому уравнению

$$-i\hbar\alpha = L_z,$$

из которого для α получается значение $iL_z/\hbar$. Таким образом, решение уравнения (19.4) имеет вид

$$\psi = C \exp[i(L_z/\hbar)\varphi].$$

¹⁾ Буквой L обозначается квантовое число суммарного момента импульса (см. (19.7)). Поэтому мы будем обозначать модуль момента импульса символом $|L|$.

Для того чтобы эта функция была однозначной, необходимо выполнение условия $\psi(\varphi + 2\pi) = \psi(\varphi)$, или

$$\exp[i(L_z/\hbar)(\varphi + 2\pi)] = \exp[i(L_z/\hbar)\varphi].$$

Это условие будет выполнено, если положить $L_z = m\hbar$, где m — целое положительное или отрицательное число либо нуль. Следовательно, оператор L_z обладает дискретным спектром:

$$L_z = m\hbar \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (19.5)$$

По причинам, которые выяснятся в дальнейшем, m называется магнитным квантовым числом.

Поскольку проекция вектора не может превзойти модуль этого вектора, должно выполняться условие

$$|m\hbar| \leq \hbar \sqrt{l(l+1)}.$$

Отсюда следует, что максимальное возможное значение $|m|$ равно l .

Для удобства обозрения напомним вместе полученные результаты:

$$\begin{aligned} |L| &= \hbar \sqrt{l(l+1)} \quad (l = 0, 1, 2, \dots), \\ L_z &= m\hbar \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l). \end{aligned} \quad (19.6)$$

Из этих формул вытекает, что $|L_z|$ всегда меньше $|L|$. Следовательно, направление момента импульса не может совпадать с выделенным в пространстве направлением. Это согласуется с тем обстоятельством, что направление момента в пространстве является неопределенным.

Подчеркнем, что отличные от (19.6) значения $|L|$ и L_z не могут наблюдаться ни при каких обстоятельствах. Поэтому моменты макроскопических тел также подчиняются правилам (19.6). Правда, вследствие малости $\hbar$ дискретность моментов макроскопических тел практически не обнаруживается, подобно тому как вследствие малости элементарного заряда e не обнаруживается дискретность макроскопических электрических зарядов.

Отметим, что из правил квантования момента вытекает, что постоянную Планка $\hbar$ можно рассматривать как естественную единицу момента импульса.

Момент импульса системы, состоящей из нескольких микрочастиц, равен сумме моментов отдельных

частиц. Суммарный момент, как и всякий момент вообще, определяется выражением

$$|L| = \hbar \sqrt{L(L+1)}, \quad (19.7)$$

где L — азимутальное квантовое число результирующего момента. В случае системы, состоящей из двух частиц, число L может иметь значения

$$L = l_1 + l_2, \quad l_1 + l_2 - 1, \dots, |l_1 - l_2|, \quad (19.8)$$

где l_1 и l_2 — числа, определяющие модули складываемых моментов по формуле

$$|L_i| = \hbar \sqrt{l_i(l_i + 1)}.$$

§ 20. Гармонический осциллятор

Гармоническим осциллятором называют частицу, совершающую одномерное движение под действием квазиупругой силы $F_x = -kx$. Потенциальная энергия такой частицы имеет вид

$$U = kx^2/2. \quad (20.1)$$

Собственная частота классического гармонического осциллятора равна $\omega = \sqrt{k/m}$, где m — масса частицы (см. § 64 2-го тома). Выразив в формуле (20.1) k через m и ω , получим

$$U = m\omega^2 x^2/2.$$

В одномерном случае $\Delta\psi = d^2\psi/dx^2$. Поэтому уравнение (15.6) для осциллятора выглядит следующим образом:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} \left(E - \frac{m\omega^2 x^2}{2} \right) \psi = 0 \quad (20.2)$$

(E — полная энергия осциллятора). В теории дифференциальных уравнений доказывается, что уравнение (20.2) имеет конечные, однозначные и непрерывные решения при значениях параметра E , равных

$$E_n = (n + 1/2) \hbar \omega \quad (n = 0, 1, 2, \dots). \quad (20.3)$$

На рис. 20.1 дана схема энергетических уровней гармонического осциллятора. Для наглядности уровни вписаны в кривую потенциальной энергии. Однако следует помнить, что в квантовой механике полная

энергия не может быть представлена в виде суммы точно определенных энергий E_k и U (см. § 16).

Уровни энергии гармонического осциллятора являются эквидистантными, т. е. отстоящими друг от друга на одинаковое расстояние. Наименьшее возможное значение энергии равно

$$E_0 = \frac{1}{2} \hbar \omega. \quad (20.4)$$

Это значение называется нулевой энергией.

Существование нулевой энергии вытекает из принципа неопределенности. Классическое выражение для полной энергии гармонического осциллятора имеет вид

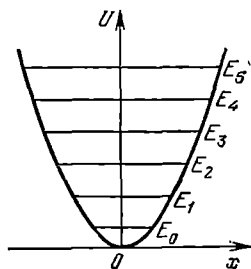


Рис. 20.1. Схема энергетических уровней гармонического осциллятора

$$E = E_k + U = \frac{p^2}{2m} + \frac{m\omega^2 x^2}{2}.$$

Поскольку p и x квантового осциллятора не могут одновременно обращаться в нуль, энергия такого осциллятора не может принимать нулевого значения.

Произведем оценку минимальной энергии квантового гармонического осциллятора с помощью соотношения неопределенностей. Среднее значение координаты x равно нулю, поэтому в качестве неопределенности координаты Δx можно принять классическую амплитуду колебаний A . Аналогично можно положить Δp равным p . Тогда соотношение неопределенностей примет вид

$$pA \geq \hbar, \text{ откуда } p \geq \hbar/A$$

(знак $\geq$ означает «по порядку величины больше»).

Средние значения кинетической и потенциальной энергий одинаковы. Поэтому в качестве полной энергии можно взять удвоенное значение кинетической энергии

$$E = 2E_k = \frac{p^2}{m} \approx \frac{\hbar^2}{mA^2}. \quad (20.5)$$

Вместе с тем, полная энергия равна максимальному значению потенциальной энергии:

$$E = U_{\max} = \frac{m\omega^2 A^2}{2}. \quad (20.6)$$

Перемножив выражения (20.5) и (20.6), найдем, что

$$E^2 \approx \frac{\hbar^2 \omega^2}{2}, \quad \text{т. е. } E \approx \hbar \omega.$$

Полученное значение с точностью до числового множителя порядка единицы совпадает с нулевой энергией осциллятора.

Существование нулевой энергии подтверждается экспериментами по изучению рассеяния света кристаллами при низких температурах. Оказывается, что интенсивность рассеянного света по мере понижения температуры стремится не к нулю, а к некоторому конечному значению, указывающему на то, что при абсолютном нуле колебания атомов в кристаллической решетке не прекращаются.

Квантовая механика позволяет вычислить вероятности различных переходов квантовой системы из одного состояния в другое. Подобные вычисления показывают, что для гармонического осциллятора возможны лишь переходы между соседними уровнями. При таких переходах квантовое число n изменяется на единицу:

$$\Delta n = \pm 1. \quad (20.7)$$

Условия, накладываемые на изменения квантовых чисел при переходах системы из одного состояния в другое, называются правилами отбора. Таким образом, для гармонического осциллятора существует правило отбора, выражаемое формулой (20.7).

Из правила (20.7) вытекает, что энергия гармонического осциллятора может изменяться только порциями $\hbar\omega$. Этот результат, получающийся естественным образом в квантовой механике, совпадает с тем весьма чужеродным для классической физики предположением, которое пришлось сделать Планку, чтобы вычислить испускательную способность абсолютно черного тела (см. § 5). Отметим, что Планк предполагал, что энергия гармонического осциллятора может быть лишь целой кратной $\hbar\omega$. В действительности же

имеется еще нулевая энергия, существование которой было установлено только после создания квантовой механики.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое собственные значения и собственные функции оператора физической величины?
2. Каковы возможные значения квадрата момента импульса?
3. Чему равны возможные значения энергии гармонического осциллятора?
4. Как может изменяться энергия гармонического осциллятора?

Примеры решения задач

1. Решения уравнения Шрёдингера для частицы массы m , находящейся в бесконечно глубокой потенциальной яме радиуса R , имеют вид

$$\psi(r) = \frac{A}{r} \sin(kr + \alpha),$$

где $k = \sqrt{2mE}/\hbar$ (E — полная энергия частицы). Найти собственные значения энергии частицы. (Бесконечная глубина ямы означает, что потенциальная энергия частицы внутри ямы равна нулю, а вне ямы — бесконечности.)

Решение. Выйти за пределы ямы частица не может; поэтому вне ямы $\psi \equiv 0$. Для того чтобы при $r = 0$ волновая функция была конечна, константа α должна быть равна нулю. Следовательно,

$$\psi(r) = \frac{A}{r} \sin kr. \quad (1)$$

Для того чтобы волновая функция не претерпевала разрыва на границе ямы, необходимо выполнение условия

$$\psi(R) = \frac{A}{R} \sin kR = 0.$$

Отсюда $kR = n\pi$, где $n = 1, 2, 3$, (при $n = 0$ функция (1) была бы тождественно равна нулю — частица отсутствовала бы). С учетом значения k имеем

$$E_n = \frac{k^2 \hbar^2}{2m} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mR^2} n^2 \quad (n = 1, 2, 3, \dots).$$

Лишь при таких значениях энергии волновая функция будет конечной и непрерывной. Следовательно, только такие значения может принимать энергия частицы.

2. Найти собственные значения энергии частицы массы m , находящейся в двумерной бесконечно глубокой прямоугольной потенциальной яме, размеры которой равны a по оси x и b по оси y ($0 \leq x \leq a$, $0 \leq y \leq b$).

Решение. Вне ямы волновая функция тождественно равна нулю. Напишем уравнение Шрёдингера для ψ внутри ямы, приняв во внимание, что U внутри ямы равна нулю:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi = 0 \quad (2)$$

(в двумерном случае ψ зависит только от x и y). Попробуем искать решение в виде $\psi(x, y) = \psi_1(x)\psi_2(y)$. Подстановка в (2) дает, что

$$\psi_1'' \psi_2 + \psi_1 \psi_2'' + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi_1 \psi_2 = 0.$$

Разделив обе части на $\psi_1 \psi_2$, получим

$$\frac{\psi_1''}{\psi_1} + \frac{\psi_2''}{\psi_2} + \frac{2m}{\hbar^2} E = 0.$$

Это уравнение можно представить как сумму двух независимых уравнений

$$\frac{d^2 \psi_1}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E_1 \psi_1 = 0 \quad \text{и} \quad \frac{d^2 \psi_2}{dy^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E_2 \psi_2 = 0 \quad (E_1 + E_2 = E).$$

Эти уравнения того же типа, что и (17.4). Их решения имеют вид (17.6). Таким образом,

$$\psi_1(x) = A \sin(k_1 x + \alpha_1), \quad \psi_2(y) = B \sin(k_2 y + \alpha_2), \quad (3)$$

где

$$k_1^2 = \frac{2mE_1}{\hbar^2}, \quad k_2^2 = \frac{2mE_2}{\hbar^2}. \quad (4)$$

Перемножив функции (3), получим решение уравнения (1):

$$\psi = AB \sin(k_1 x + \alpha_1) \sin(k_2 y + \alpha_2).$$

Волновая функция не должна претерпевать разрыва на границах ямы; поэтому ее значение на границах ямы должно быть равно нулю (напомним, что за пределами ямы $\psi \equiv 0$). Для этого необходимо, чтобы, во-первых, $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$ и, во-вторых,

$$k_1 a = n_1 \pi, \quad k_2 b = n_2 \pi.$$

Отсюда согласно (4)

$$E_1 = \frac{k_1^2 \hbar^2}{2m} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2} n_1^2, \quad E_2 = \frac{k_2^2 \hbar^2}{2m} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mb^2} n_2^2$$

Сумма этих величин дает возможные значения энергии частицы:

$$E_{n_1, n_2} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m} \left(\frac{n_1^2}{a^2} + \frac{n_2^2}{b^2} \right).$$

Здесь n_1 и n_2 — целые числа, принимающие независимо друг от друга значения 1, 2, 3, ...

Г л а в а 5. ФИЗИКА АТОМОВ И МОЛЕКУЛ

§ 21. Опыт Резерфорда. Теория Бора

До 1911 г. не было правильных представлений о строении атомов. В 1903 г. Дж. Дж. Томсон предложил модель, согласно которой атом представляет собой равномерно заполненный положительным электричеством шар, внутри которого находятся электроны. Суммарный положительный заряд шара равен заряду электронов, так что атом в целом нейтрален. Однако эта модель оказалась несостоятельной.

В 1911 г. Резерфорд и его сотрудники исследовали рассеяние α -частиц¹⁾ при прохождении через тонкие металлические слои (фольги). Опыт осуществлялся следующим образом (рис. 21.1).

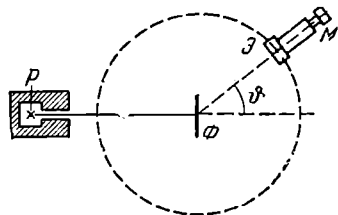


Рис. 21.1. Схема опыта Резерфорда

Выделяемый отверстием узкий пучок α -частиц, испускаемых радиоактивным веществом P , падал на тонкую фольгу Φ . При прохождении через фольгу α -частицы отклонялись от первоначального направления движения на различные углы φ . Рассеянные α -частицы ударялись об экран $\mathcal{E}$, покрытый сернистым цинком, и вызываемые ими сцинтилляции (вспышки

¹⁾ Альфа-частицы (α -частицы) — ядра атомов гелия, испускаемые некоторыми веществами при радиоактивном распаде. Скорость этих частиц бывает порядка 10^7 м/с.

света) наблюдались в микроскоп М. Микроскоп и экран можно было вращать вокруг оси, проходящей через центр рассеивающей фольги, и устанавливать таким образом под любым углом ϑ . Весь прибор помещался в откачанный кожух, чтобы устранить рассеяние α -частиц за счет столкновений с молекулами воздуха.

Оказалось, что некоторое количество α -частиц рассеивается на очень большие углы (почти до 180°). Проанализировав результаты опыта, Резерфорд пришел к выводу, что столь сильное отклонение α -частиц возможно только в том случае, если внутри атома имеется чрезвычайно сильное электрическое поле, которое создается зарядом, связанным с большой массой и сконцентрированным в очень малом объеме. Основываясь на этом выводе, Резерфорд предложил в 1911 г. ядерную модель атома. Согласно Резерфорду атом представляет собой систему зарядов, в центре которой расположено тяжелое положительное ядро с зарядом Ze , имеющее размеры, не превышающие 10^{-14} м, а вокруг ядра расположены Z электронов, распределенных по всему объему, занимаемому атомом. Почти вся масса атома сосредоточена в ядре. Исходя из таких предположений, Резерфорд разработал количественную теорию рассеяния α -частиц и вывел формулу для распределения рассеянных частиц по значениям угла ϑ . При выводе формулы Резерфорд исходил из предположения о том, что взаимодействие α -частицы и ядра подчиняется закону Кулона, справедливому для точечных зарядов.

В 1913 г. сотрудники Резерфорда произвели проверку формулы путем подсчета сцинтилляций, наблюдавшихся под разными углами ϑ за одинаковые промежутки времени. Полученные результаты оказались в согласии с формулой, выведенной Резерфордом.

Справедливость теории, исходящей из кулоновского взаимодействия между α -частицей и ядром атома, свидетельствует о том, что даже отбрасываемая в обратном направлении α -частица не проникает в область положительного заряда атома. Вместе с тем летящая точно по направлению к ядру α -частица подошла бы к его центру на расстояние, которое можно определить, приравняв кинетическую энергию α -частицы потенциальной энергии взаимодействия α -частицы

с ядром в момент полной остановки частицы:

$$\frac{m_{\alpha} v^2}{2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze \cdot 2e}{r_{\min}}$$

(Ze — заряд ядра, $2e$ — заряд α -частицы, $r_{\min}$ — минимальное расстояние между центрами α -частицы и ядра). Положив $Z = 47$ (серебро), $v = 10^7$ м/с и учтя, что масса α -частицы m_{α} равна $4 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} = 6,6 \times 10^{-27}$ кг, получим

$$r_{\min} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{4Ze^2}{m_{\alpha} v^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{4 \cdot 47 \cdot 1,6^2 \cdot 10^{-38}}{6,6 \cdot 10^{-27} \cdot 10^{14}} \approx 6 \cdot 10^{-14} \text{ м.}$$

Итак, результаты опытов по рассеянию α -частиц свидетельствуют в пользу ядерной модели атома, предложенной Резерфордом. Однако ядерная модель оказалась в противоречии с законами классической механики и электродинамики. Поскольку система неподвижных зарядов не может находиться в устойчивом состоянии, Резерфорду пришлось отказаться от статической модели атома и предположить, что электроны движутся вокруг ядра, описывая искривленные траектории. Но в этом случае электрон будет двигаться с

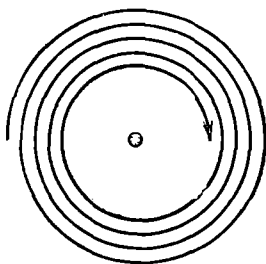


Рис. 21.2. Траектория «классического» электрона, движущегося вокруг атомного ядра

ускорением, в связи с чем, согласно классической электродинамике, он должен непрерывно излучать электромагнитные (световые) волны. Процесс излучения сопровождается потерей энергии, так что электрон должен в конечном счете упасть на ядро (рис. 21.2).

Выход из создавшегося тупика был найден в 1913 г. Нильсом Бором, правда, ценой введения предположений, противоречащих классическим представлениям. Допущения, сделанные Бором, содержатся в двух высказанных им постулатах.

1. Из бесконечного множества электронных орбит, возможных с точки зрения классической механики, осуществляются в действительности только некоторые дискретные орбиты, удовлетворяющие определенным квантовым условиям. Электрон, находящийся на одной

из этих орбит, несмотря на то что он движется с ускорением, не излучает электромагнитных волн (света).

2. Излучение испускается или поглощается в виде светового кванта энергии $\hbar\omega$ при переходе электрона из одного стационарного (устойчивого) состояния в другое. Световой квант равен разности энергий тех стационарных состояний, между которыми совершается квантовый скачок электрона:

$$\hbar\omega = E_n - E_m \quad (21.1)$$

(n и m — номера состояний).

Условие для стационарных орбит заключается в том, что момент импульса электрона, движущегося по такой орбите, должен быть равен целому кратному постоянной Планка $\hbar$:

$$L = m_e v r = n\hbar \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (21.2)$$

Число n называется главным квантовым числом.

Существование дискретных энергетических уровней атома подтверждается опытами, осуществленными в 1914 г. Франком¹⁾ и Герцем²⁾. Схема их установки

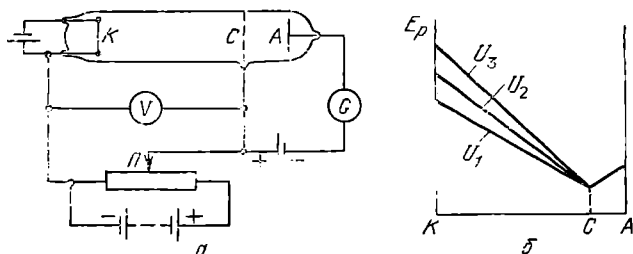


Рис. 21.3. а — Схема опыта Франка и Герца. б — Изменение потенциальной энергии электрона на пути катод — сетка — анод

приведена на рис. 21.3а. В трубке, заполненной парами ртути под небольшим давлением (~ 1 гПа), имелись три электрода: катод K , сетка C и анод A . Электроны, вылетавшие из катода вследствие термоэлектронной эмиссии, ускорялись разностью потенциалов U , приложенной между катодом и сеткой. Эту

¹⁾ Джеймс Франк (1882—1964) — немецкий физик.

²⁾ Густав Людвиг Герц (1887—1975) — немецкий физик.

разность потенциалов можно было плавно менять с помощью потенциометра Π . Между сеткой и анодом создавалось слабое электрическое поле (разность потенциалов порядка 0,5 В), тормозившее движение электронов к аноду. На рис. 21.36 показано изменение потенциальной энергии электрона $E_p = -e\varphi$ в зазоре между электродами при различных значениях напряжения U между катодом и сеткой (φ — потенциал в соответствующей точке поля).

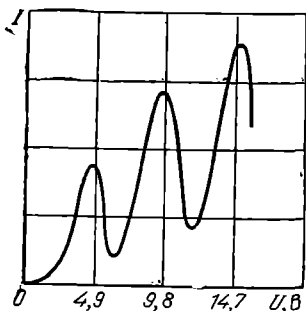


Рис. 21.4. Зависимость силы тока в цепи анода от напряжения между катодом и сеткой, полученная в опыте Франка и Герца

Исследовалась зависимость силы тока I в цепи анода от напряжения U между катодом и сеткой. Сила тока измерялась гальванометром G , напряжение — вольтметром V . Полученные результаты представлены на рис. 21.4. Сила тока вначале монотонно возрастала, достигая максимума при $U = 4,9$ В, после чего с дальнейшим увеличением U резко падала, достигала минимума и снова

начинала расти. Максимумы силы тока повторялись при U , равном 9,8; 14,7 В и т. д.

Такой ход кривой объясняется тем, что вследствие дискретности энергетических уровней атомы могут воспринимать энергию только порциями

$$\Delta E_1 = E_2 - E_1 \quad \text{либо} \quad \Delta E_2 = E_3 - E_1 \quad \text{и т. д.,}$$

где $E_1, E_2, E_3 \dots$ — энергия 1-го, 2-го, 3-го и т. д. стационарных состояний.

До тех пор пока энергия электрона меньше ΔE_1 , соударения между электроном и атомом ртути носят упругий характер, причем, поскольку масса электрона во много раз меньше массы атома ртути, энергия электрона при столкновениях практически не изменяется. Часть электронов попадает на сетку, остальные же, проскочив через сетку, достигают анода, создавая ток в цепи гальванометра G . Чем больше скорость, с которой электроны достигают сетки (чем больше U), тем больше будет доля электронов, проскочивших че-

рез сетку, и тем, следовательно, больше будет сила тока I .

Когда энергия, накапливаемая электроном в промежутке катод — сетка, достигает значения ΔE_1 , соударения перестают быть упругими — электроны при ударах об атомы передают им энергию ΔE_1 и продолжают затем двигаться с меньшей скоростью. Поэтому число электронов, достигающих анода, уменьшается. Например, при $U = 5,3$ В электрон сообщает атому энергию, соответствующую 4,9 В (первый потенциал возбуждения атома ртути), и продолжает двигаться с энергией 0,4 эВ. Если даже такой электрон окажется между сеткой и анодом, он не сможет преодолеть задерживающее напряжение 0,5 В и будет возвращен обратно на сетку.

Атомы, получившие при соударении с электронами энергию ΔE_1 , переходят в возбужденное состояние, из которого они спустя время порядка 10^{-8} с возвращаются в основное состояние, излучая фотон с частотой $\omega = \Delta E_1/\hbar$.

При напряжении, превышающем 9,8 В, электрон на пути катод — анод может дважды претерпеть неупругое соударение с атомами ртути, теряя при этом энергию 9,8 эВ, вследствие чего сила тока снова начнет уменьшаться. При еще большем напряжении возможны трехкратные неупругие соударения электронов с атомами, что приводит к возникновению максимума при $U = 14,7$ В, и т. д.

При достаточном разрежении паров ртути и соответствующем значении ускоряющего напряжения электроны за время до столкновения с атомами могут приобрести скорость, достаточную для перевода атома в состояние с энергией E_3 . В этом случае на кривой $I = f(U)$ наблюдаются максимумы при напряжениях, кратных второму потенциалу возбуждения атома (для ртути этот потенциал равен 6,7 В), или при напряжениях, равных сумме первого и второго потенциалов возбуждения, и т. д.

Таким образом, в опытах Франка и Герца непосредственно обнаруживается существование у атомов дискретных энергетических уровней.

Исходя из своих постулатов и условия (21.2) для стационарных орбит, Бор создал полуклассическую теорию водородного атома. У этого атома заряд ядра

равен $+e$. Ньютоновское уравнение для электрона, движущегося по орбите радиуса r со скоростью v , имеет вид

$$m_e \frac{v^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}. \quad (21.3)$$

Исключив v из уравнений (21.2) и (21.3), получим выражение для радиусов допустимых орбит:

$$r_n = 4\pi\epsilon_0 \frac{\hbar^2}{m_e e^2} n^2 \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (21.4)$$

Радиус первой орбиты водородного атома называется боровским радиусом. Его значение равно

$$r_0 = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м.} \quad (21.5)$$

Отметим, что боровский радиус имеет значение порядка газокинетических размеров атома.

Внутренняя энергия атома складывается из кинетической энергии электрона (ядро неподвижно) и энергии взаимодействия электрона с ядром:

$$E = \frac{m_e v^2}{2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}.$$

Заменив согласно (21.3) $m_e v^2/2$ через $(1/4\pi\epsilon_0) e^2/2r$, получим, что

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{e^2}{2r} - \frac{e^2}{r} \right) = - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{2r}.$$

Наконец, подставив сюда выражение (21.4) для r , найдем дозволённые значения внутренней энергии атома:

$$E_n = - \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{m_e e^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (21.6)$$

Согласно (21.1) частота спектральной линии, излучаемой водородным атомом при переходе с уровня с номером n на уровень с номером m , определяется формулой

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{E_n - E_m}{\hbar} = - \left[\left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{m_e e^4}{2\hbar^2} \right] \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) = \\ &= R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n > m), \end{aligned} \quad (21.7)$$

где

$$R = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{m_e e^4}{2\hbar^2} = 2,07 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}. \quad (21.8)$$

Вычисленные по формуле (21.7) частоты спектральных линий водородного атома оказались в превосходном согласии с экспериментальными данными.

Теория Бора была крупным шагом в развитии теории атома. Она с полной отчетливостью показала неприменимость классической физики к внутриатомным процессам и главенствующее значение квантовых законов в микромире.

В настоящее время теория Бора имеет преимущественно историческое значение. После первых успехов теории все яснее давали себя знать ее недочеты. Особенно тягостной была неудача всех попыток построения теории атома гелия — одного из простейших атомов, непосредственно следующего за атомом водорода.

Самой слабой стороной теории Бора, обусловившей последующие неудачи, была ее внутренняя логическая противоречивость: она не была ни последовательно классической, ни последовательно квантовой теорией. После открытия волновых свойств вещества стало совершенно ясно, что теория Бора, опирающаяся на классическую механику, могла быть только переходным этапом на пути к созданию последовательной теории атомных явлений.

§ 22. Атом водорода

Простейшим атомом является атом водорода. Он состоит из ядра с массой, равной примерно 1840 массам электрона, и зарядом $+e$ (это ядро представляет собой элементарную частицу, называемую протоном) и движущегося вокруг ядра электрона. Строго говоря, ядро и электрон движутся вокруг их центра масс. Однако в связи с тем, что масса ядра на три порядка больше массы электрона, в первом приближении ядро можно считать неподвижным.

Спектр излучения атомарного водорода состоит из отдельных спектральных линий (рис. 22.1). Очевидно, что линии располагаются в определенном порядке. Расстояние между линиями закономерно убывает по мере перехода от более длинных волн к более корот-

ким. В 1885 г. Бальмер¹⁾ обнаружил, что длины волн этой серии линий водорода могут быть точно представлены формулой

$$\lambda = \lambda_0 \frac{n^2}{n^2 - 4}, \quad (22.1)$$

где λ_0 — константа, n — целое число, принимающее

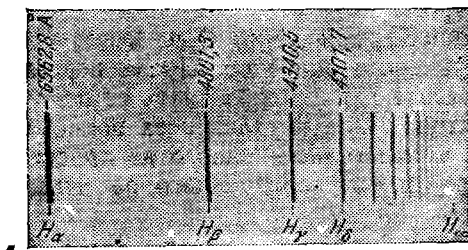


Рис. 22.1. Часть спектра атомарного водорода в видимой и близкой ультрафиолетовой областях. Символами H_α , H_β , H_γ и H_δ обозначены видимые линии, H_∞ — граница серии Бальмера

значения 3, 4, 5 и т. д. Если перейти от длины волны к частоте, получится формула

$$\omega = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 3, 4, 5, \dots), \quad (22.2)$$

где R — константа, называемая постоянной Ридберга²⁾. Ее экспериментальное значение равно

$$R = 2,0670687 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1} \quad (22.3)$$

(ср. с (21.8)).

Формула (22.2) называется формулой Бальмера, а соответствующая серия спектральных линий водородного атома — серией Бальмера. Дальнейшие исследования показали, что в спектре водорода имеется еще несколько серий. В ультрафиолетовой части спектра находится серия Лаймана. Остальные серии лежат в инфракрасной области. Линии этих серий могут быть представлены в виде формул,

¹⁾ Иоганн Якоб Бальмер (1825—1898) — швейцарский физик и математик.

²⁾ Юханнес Роберт Ридберг (1854—1919) — шведский физик.

аналогичных (22.2):

серия Лаймана $\omega = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 2, 3, 4, \dots),$

серия Пашена $\omega = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 4, 5, 6, \dots),$

серия Брэкета $\omega = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 5, 6, 7, \dots),$

серия Пфунда $\omega = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 6, 7, 8, \dots).$

Частоты всех линий спектра водородного атома можно представить одной формулой:

$$\omega = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (22.4)$$

где m имеет значение 1 для серии Лаймана, 2 — для серии Бальмера и т. д. При заданном m число n принимает все целочисленные значения, начиная с $m + 1$. Выражение (22.4) называют обобщенной формулой Бальмера.

При возрастании n частота линии в каждой серии стремится к предельному значению R/m^2 , которое называется границей серии.

Отметим, что формула (22.4) вытекает из теории Бора (см. (21.7)).

Перейдем к квантовомеханической задаче об атоме водорода. Потенциальная энергия электрона в этом атоме равна

$$U = - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

(r — расстояние электрона от ядра). Следовательно, уравнение Шрёдингера имеет вид

$$\Delta\psi + \frac{2m_e}{\hbar^2} \left(E + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} \right) \psi = 0. \quad (22.5)$$

Поле, в котором движется электрон, является центрально-симметричным. Поэтому целесообразно взять выражение оператора Лапласа в сферической системе координат r, ϑ, φ . Соответственно и решения уравнения, т. е. функции ψ , получатся в этих координатах.

Оказывается, что решения уравнения (22.5) удовлетворяют стандартным условиям (см. § 14) в следующих случаях: 1) при любых положительных значе-

ниях энергии E ; 2) при дискретных отрицательных значениях энергии, равных

$$E_n = - \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{m_e e^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (22.6)$$

Случай $E > 0$ соответствует электрону, пролетающему вблизи ядра и удаляющемуся снова на бесконечность. Случай $E < 0$ соответствует электрону, связанному с ядром. Сравнение с выражением (21.6) показывает, что квантовая механика приводит к таким же значениям энергии водородного атома, какие получались и в теории Бора. Однако в квантовой механике эти значения получаются как следствие основных положений этой науки. Бору же для получения такого результата пришлось вводить специальные дополнительные предположения.

Подставив в (22.6) значения констант и приняв $n = 1$, получим значение энергии основного состояния [т. е. состояния с наименьшей энергией] водородного атома:

$$\begin{aligned} E_1 &= - (9 \cdot 10^9)^2 \cdot \frac{0,911 \cdot 10^{-30} \cdot (1,602 \cdot 10^{-19})^4}{2 (1,055 \cdot 10^{-34})^2} = \\ &= -2,18 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = -13,6 \text{ эВ}. \end{aligned} \quad (22.7)$$

Такая же по модулю положительная энергия представляет собой в атомной физике внесистемную единицу энергии, получившую название **ридберга** (Р):

$$1 \text{ Р} = 13,6 \text{ эВ}. \quad (22.8)$$

Оценить размеры водородного атома и минимальную возможную энергию электрона в этом атоме можно с помощью соотношения неопределенностей. Если бы электрон упал на точечное ядро, его координаты x , y , z и компоненты импульса p_x , p_y , p_z приняли одновременно определенные (нулевые) значения, что несовместимо с принципом неопределенности. Этот принцип требует, чтобы неопределенности каждой координаты и соответствующей компоненты импульса были связаны условием (13.1). У электрона, покоящегося на ядре, координаты x , y , z и компоненты импульса p_x , p_y , p_z были бы равны нулю. Поэтому неопределенности координат Δx , Δy , Δz можно положить равными «радиусу» атома r , а неопределенности компонент им-

пульса Δp_x , Δp_y , Δp_z равными модулю импульса p . Следовательно, можно написать, что

$$rp \approx \hbar. \quad (22.9)$$

Энергия электрона в атоме водорода равна

$$E = \frac{p^2}{2m_e} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}.$$

Заменяя согласно (22.9) p через $\hbar/r$, получим, что

$$E = \frac{\hbar^2}{2m_e r^2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}. \quad (22.10)$$

Чтобы найти минимальное значение E , продифференцируем выражение (22.10) по r и приравняем производную нулю:

$$-\frac{\hbar^2}{m_e r^3} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = 0.$$

Отсюда следует, что «размер» атома равен

$$r = 4\pi\epsilon_0 \frac{\hbar^2}{m_e e^2}. \quad (22.11)$$

Полученное нами значение совпадает с боровским радиусом r_0 (см. формулу (21.5)).

Подстановка выражения (22.11) в формулу (22.10) дает минимальную энергию атома:

$$\begin{aligned} E_{\min} &= \frac{\hbar^2}{2m_e} \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{m_e e^2}{\hbar^2} \right)^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{m_e e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar^2} = \\ &= - \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{m_e e^4}{2\hbar^2}. \end{aligned}$$

Найденное значение совпадает с энергией, получающейся из выражения (22.6) для $n = 1$.

То обстоятельство, что мы получили точные значения r_0 и E_1 , является, конечно, просто удачей. Приведенный нами расчет может претендовать лишь на то, чтобы дать оценку порядка величин r_0 и E_1 .

Собственные функции уравнения (22.5) содержат три целочисленных параметра n , l и m :

$$\psi = \psi_{nlm}(r, \vartheta, \varphi). \quad (22.12)$$

Параметр n , называемый главным квантовым числом, совпадает с номером уровня энергии (см. формулу (22.6)). Параметры l и m представляют собой азимутальное и магнитное квантовые

числа, определяющие по формулам (19.6) модуль момента импульса и проекцию момента на некоторое направление z .

Решения, удовлетворяющие стандартным условиям, получаются лишь для значений l , не превышающих $n - 1$. Следовательно, при данном n квантовое число l может принимать n различных значений:

$$l = 0, 1, 2, \dots, n - 1.$$

При данном l квантовое число m может принимать $2l + 1$ различных значений:

$$m = -l, -l + 1, \dots, -1, 0, +1, \dots, l - 1, l$$

(см. формулы (19.6)).

Согласно (22.6) энергия электрона зависит только от главного квантового числа n . Следовательно, каждому собственному значению энергии E_n (кроме E_1) соответствует несколько собственных функций ψ_{nlm} , отличающихся значениями квантовых чисел l и m . Это означает, что атом водорода может иметь одно и то же значение энергии, находясь в нескольких различных состояниях. В табл. 22.1 приведены состояния, соответствующие первым трем энергетическим уровням.

Т а б л и ц а 22.1

Уровень энергии E_n	Волновая функция ψ_{nlm}	Значение			Уровень энергии E_n	Волновая функция ψ_{nlm}	Значение		
		n	l	m			n	l	m
E_1	ψ_{100}	1	0	0	E_3	ψ_{300}	3	0	0
E_2	ψ_{200} ψ_{21-1} ψ_{210} ψ_{21+1}	2	0	0 -1 0 +1		ψ_{31-1}	3	1	-1
						ψ_{310}	3	1	0
						ψ_{31+1}	3	1	+1
						ψ_{32-2}	3	2	-2
						ψ_{32-1}	3	2	-1
						ψ_{320}	3	2	0
						ψ_{32+1}	3	2	+1
						ψ_{32+2}	3	2	+2

Состояния с одинаковой энергией называются вырожденными, а число различных состояний с ка-

ким-либо значением энергии называется кратностью вырождения соответствующего энергетического уровня. Кратность вырождения уровней водорода легко вычислить, исходя из возможных значений для l и m . Каждому из n значений квантового числа l соответствует $2l + 1$ значений квантового числа m . Следовательно, число различных состояний, соответствующих данному n , равно

$$\sum_{l=0}^{n-1} (2l + 1) = n^2.$$

Таким образом, кратность вырождения энергетических уровней водородного атома равна n^2 (см. табл. 22.1).

Состояния с различными значениями азимутального квантового числа l отличаются значениями момента импульса. В атомной физике применяются заимствованные из спектроскопии условные обозначения состояний электрона с различными l . Электрон, находящийся в состоянии с $l = 0$, называют s -электроном (соответствующее состояние — s -состоянием), с $l = 1$ — p -электроном, с $l = 2$ — d -электроном, с $l = 3$ — f -электроном, затем идут g , h и т. д. уже по алфавиту. Значение главного квантового числа указывается перед условным обозначением квантового числа l . Таким образом, электрон в состоянии с $n = 3$ и $l = 1$ обозначается символом $3p$ и т. д.

Поскольку l всегда меньше n , возможны следующие состояния электрона:

$$\begin{aligned} &1s, \\ &2s, \quad 2p, \\ &3s, \quad 3p, \quad 3d, \\ &4s, \quad 4p, \quad 4d, \quad 4f \end{aligned}$$

и т. д.

Схема уровней энергии водородного атома дана на рис. 22.2. Уровни, отвечающие состояниям с различными значениями квантового числа l , помещены в разных столбцах.

Испускание и поглощение света происходит при переходах электрона с одного уровня на другой. В квантовой механике доказывается, что для азимутального квантового числа l имеется правило отбора

$$\Delta l = \pm 1. \quad (22.13)$$

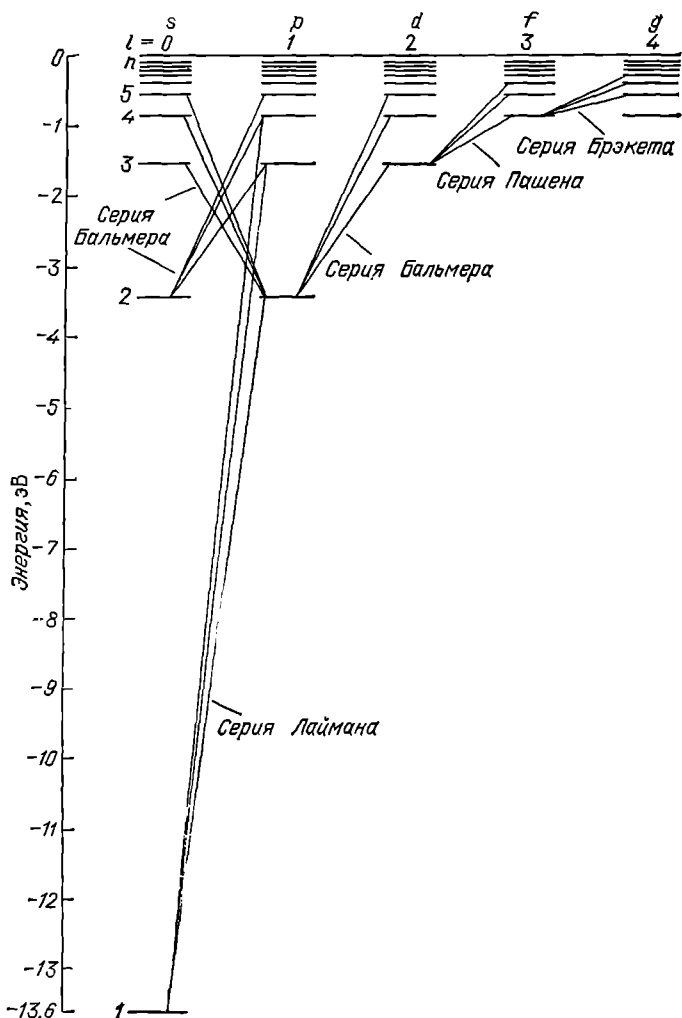


Рис. 22.2. Схема энергетических уровней водородного атома. Наклонными линиями показаны переходы между уровнями, разрешенные правилом отбора (22.13)

Это означает, что возможны только такие переходы, при которых l изменяется на единицу. Правило (22.13) обусловлено тем, что фотон обладает собственным моментом импульса (спином; см. § 23), равным пример-

но $\hbar$ (в дальнейшем мы уточним его значение). При испускании фотон уносит из атома этот момент, а при поглощении привносит, так что правило отбора (22.13) есть просто следствие закона сохранения момента импульса.

На рис. 22.2 показаны переходы, разрешенные правилом (22.13). Пользуясь условными обозначениями состояний электрона, переходы, приводящие к возникновению серии Лаймана, можно написать в виде

$$np \rightarrow 1s \quad (n = 2, 3, \dots);$$

серии Бальмера соответствуют переходы

$$ns \rightarrow 2p \quad \text{и} \quad nd \rightarrow 2p \quad (n = 3, 4, \dots),$$

и т. д.

Состояние $1s$ является основным состоянием атома водорода. В этом состоянии атом обладает минимальной энергией. Чтобы перевести атом из основного состояния в возбужденное (т. е. в состояние с большей энергией), ему необходимо сообщить энергию. Это может быть осуществлено за счет теплового соударения атомов (по этой причине нагретые тела светятся — атомы излучают, возвращаясь из возбужденного в основное состояние), или за счет столкновения атома с достаточно быстрым электроном, или, наконец, за счет поглощения атомом фотона.

Фотон при поглощении его атомом исчезает, передавая атому всю свою энергию. Атом не может поглотить только часть фотона, ибо фотон, как и электрон, как и другие элементарные частицы, является неделимым. Поэтому в отсутствие многофотонных процессов (см. § 8) атом может поглощать только те фотоны, энергия которых соответствует разности энергий двух его уровней. Поскольку поглощающий атом обычно находится в основном состоянии, спектр поглощения водородного атома должен состоять из линий, соответствующих переходам

$$1s \rightarrow np \quad (n = 2, 3, \dots).$$

Этот результат полностью согласуется с опытом.

По мере роста главного квантового числа n уровни энергии становятся все гуще и гуще (см. рис. 22.2). Следовательно, присущая квантовой механике дискретность уровней уменьшается и характер поведения

частицы приближается к классическому. В этом проявляется принцип соответствия, установленный Бором в 1923 г. Согласно этому принципу *в пределе при больших квантовых числах следствия, вытекающие из квантовой механики, должны совпадать с результатами классической теории*. С формальной точки зрения принцип соответствия означает, что в пределе при $\hbar \rightarrow 0$ квантовомеханическое описание физических объектов должно быть эквивалентно классическому.

Иногда в термин «принцип соответствия» вкладывают более общий смысл, заключающийся в том, что любая новая теория, претендующая на более глубокое описание физической реальности и на более широкую область применимости, чем старая, должна включать старую теорию как предельный случай. Например, релятивистская механика в пределе малых скоростей v ($v \ll c$) переходит в ньютоновскую. Формально переход осуществляется при $c \rightarrow \infty$.

Собственные функции уравнения (22.5) распадаются на два множителя, один из которых зависит только от r , а другой — только от углов ϑ и φ :

$$\psi_{nlm} = R_{nl}(r) Y_{lm}(\vartheta, \varphi). \quad (22.14)$$

Множитель $R_{nl}(r)$ вещественный и зависит от квантовых чисел n и l , множитель $Y_{lm}(\vartheta, \varphi)$ комплексный и зависит от квантовых чисел l и m .

Функция $Y_{lm}(\vartheta, \varphi)$ представляет собой собственную функцию оператора квадрата момента импульса. Для s -состояний электрона (т. е. для состояний с моментом импульса, равным нулю) эта функция является константой, так что волновые функции вида ψ_{n00} зависят только от r .

Элемент объема в сферической системе координат, равный $dV = r^2 \sin \vartheta dr d\vartheta d\varphi$, можно представить в виде $dV = r^2 dr d\Omega$, где $d\Omega = \sin \vartheta d\vartheta d\varphi$ есть элемент телесного угла. Поэтому условие нормировки функций (22.14) можно написать следующим образом:

$$\int \psi_{nlm}^* \psi_{nlm} dV = \int_0^\infty R_{nl}^2 r^2 dr \int_{(4\pi)} Y_{lm}^* Y_{lm} d\Omega = 1 \quad (22.15)$$

(интеграл по $d\Omega$ берется по полному телесному углу, равному 4π). Собственные функции оператора L^2 пред-

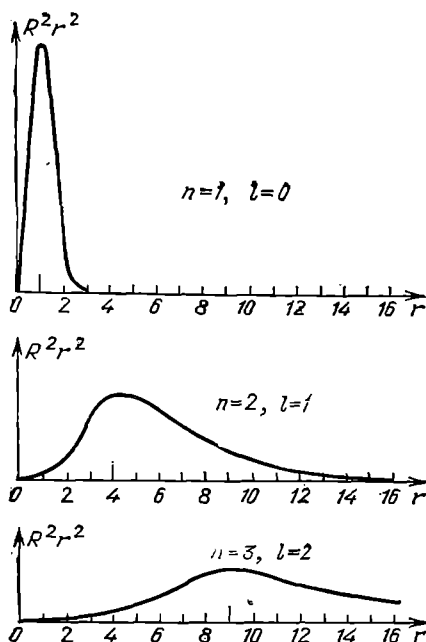


Рис. 22.3. Графики плотности вероятности для состояний с различными n и l . За единицу масштаба для оси r принят боровский радиус r_0 (см. (21.5)). Длинными вертикальными черточками отмечены радиусы соответствующих боровских орбит

полагаются нормированными; это означает, что

$$\int_{(4\pi)} Y_{lm}^* Y_{lm} d\Omega = 1. \quad (22.16)$$

Следовательно, из (22.15) вытекает условие нормировки функций $R_{nl}(r)$:

$$\int_0^\infty R_{nl}^2 r^2 dr = 1. \quad (22.17)$$

Вероятность нахождения электрона в элементе объема $dV = r^2 \sin \vartheta dr d\vartheta d\varphi = r^2 dr d\Omega$ определяется выражением

$$dP_{r, \vartheta, \varphi} = R_{nl}^2 r^2 dr Y_{lm}^* Y_{lm} d\Omega.$$

Проинтегрировав это выражение по полному телесному углу 4π , найдем вероятность dP_r того, что электрон окажется в тонком шаровом слое радиуса r и толщины dr :

$$dP_r = R_{nl}^2 r^2 dr \int_{(4\pi)} Y_{lm}^* Y_{lm} d\Omega.$$

Приняв во внимание условие (22.16), получим, что

$$dP_r = R_{nl}^2 r^2 dr. \quad (22.18)$$

Из этой формулы следует, что выражение $R_{nl}^2 r^2$ представляет собой плотность вероятности нахождения электрона на расстоянии r от ядра. На рис. 22.3 приведены графики плотности вероятности для различных состояний водородного атома. На рисунке видно, что наиболее вероятные расстояния электрона от ядра совпадают с радиусами соответствующих боровских орбит.

§ 23. Механический и магнитный моменты электрона

Классическая заряженная частица, движущаяся по круговой орбите, обладает моментом импульса (механическим моментом) L и магнитным моментом μ . В § 50 2-го тома для отношения этих моментов в случае электрона было найдено значение

$$\mu/L = -e/2m_e \quad (23.1)$$

(см. формулу (50.3) 2-го тома; $-e$ — заряд, m_e — масса электрона). Это выражение, называемое гиромеханическим отношением, было получено из рассмотрения электрона, движущегося по круговой орбите, причем предполагалось, что электрон подчиняется классическим законам. В действительности понятие орбиты (как и траектории вообще) применительно к электрону утрачивает смысл. Однако по аналогии с классической теорией механический и магнитный моменты электрона, обусловленные его движением вокруг ядра, и в квантовой механике называются орбитальными. Экспериментально установлено, что формула (23.1) справедлива и в квантовой теории.

В квантовой механике понятий силы и момента силы не существует. Вместе с тем обозначение момента

импульса буквой L крайне неудобно, поскольку этой буквой принято обозначать квантовое число орбитального механического момента атома. Поэтому в дальнейшем мы будем обозначать механический момент буквой M . С учетом этого напомним соотношение (23.1) в виде

$$\mu_l/M_l = -e/2m_e \quad (23.2)$$

(индекс l указывает на то, что имеются в виду орбитальные моменты). Согласно (19.6) модуль орбитального механического момента электрона равен

$$M_l = \hbar \sqrt{l(l+1)}, \quad (23.3)$$

где l — орбитальное квантовое число электрона.

Из формул (23.2) и (23.3) следует, что

$$\mu_l = -(e\hbar/2m_e) \sqrt{l(l+1)} = -\mu_B \sqrt{l(l+1)}. \quad (23.4)$$

Величина

$$\mu_B = (e\hbar/2m_e) = 0,927 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/Тл} \quad (23.5)$$

называется магнетоном Бора¹⁾ и представляет собой естественную единицу магнитного момента. Знак минус в формуле (23.4) указывает на то, что направления магнитного и механического моментов противоположны (это обусловлено тем, что заряд электрона отрицательный).

Проекция механического момента на некоторое направление z определяется выражением

$$M_{lz} = m_l \hbar \quad (m_l = -l, -l+1, \dots, l-1, l) \quad (23.6)$$

(см. формулу (19.6), m_l — магнитное квантовое число). Наличие минуса в формуле (23.4) позволяет получить проекцию μ_l на направление z простой заменой в выражении (23.4) $\sqrt{l(l+1)}$ на квантовое число m_l :

$$\mu_{lz} = -\mu_B m_l \quad (m_l = -l, -l+1, \dots, l-1, l). \quad (23.7)$$

При $m_l > 0$ проекция M_l положительна, а проекция μ_l отрицательна; при $m_l < 0$ проекция M_l отрицательна, а проекция μ_l положительна.

Исследование спектров щелочных металлов (Na, K и др.) при помощи приборов с большой разрешающей

¹⁾ См. формулу (50.7) 2-го тома.

силой показало, что каждая линия этих спектров является двойной (дублетом). Впоследствии расщепление спектральных линий на несколько (две, три и т. д.) компонент было обнаружено и у других элементов. У водорода спектральные линии так же, как и у щелочных металлов, являются дублетами, однако расщепление компонент дублетов оказывается намного меньшим, чем, скажем, у натрия. Расщепление спектральных линий, очевидно, обусловлено расщеплением энергетических уровней.

Структура спектра, отражающая расщепление линий на компоненты, называется тонкой структурой. Сложные линии, состоящие из нескольких компонент, получили название мультиплетов. Число компонент в мультиплете может быть равно двум (дублеты), трем (триплеты), четырем (квартеты), пяти (квинтеты) и т. д. В частном случае спектральные линии даже с учетом тонкой структуры могут быть одиночными (синглеты). Термин «тонкая структура» применяется также к энергетическим уровням, расщепляющимся на подуровни в результате спин-орбитального взаимодействия.

Для объяснения расщепления уровней Гаудсмит¹⁾ и Уленбек²⁾ выдвинули в 1925 г. гипотезу о том, что электрон обладает собственным моментом импульса M_s , не связанным с движением электрона в пространстве. Этот собственный момент был назван спином.

Первоначально предполагалось, что спин обусловлен вращением электрона вокруг своей оси. Согласно этим представлениям электрон уподобляется волчку или веретену. Отсюда и происходит сам термин «спин»: по-английски *spin* означает «верчение». Но вскоре пришлось отказаться от подобных модельных представлений, в частности по следующей причине. Вращающийся заряженный шарик должен обладать магнитным моментом, причем отношение магнитного момента к механическому должно иметь значение, совпадающее с (23.2). Однако ряд опытных фактов свидетельствует о том, что отношение собственных магнитного и механического моментов в два раза боль-

¹⁾ Сэмюэл Абрахам Гаудсмит (1902—1979) — американский физик.

²⁾ Джордж Юджин Уленбек (1900—1974) — американский физик, по национальности голландец, с 1927 г. в США.

ше, чем для орбитальных моментов:

$$\mu_s/M_s = -e/m_e. \quad (23.8)$$

Таким образом, представление об электро́не как о вращающемся шарике оказалось несостоятельным. Спин следует считать внутренним свойством, присущим электрону, подобно тому как ему присущи заряд или масса.

«Удвоенный магнетизм» спина подтверждается, в частности, опытом Эйнштейна и де Хааза и опытом Барнетта (см. § 50 2-го тома).

Предположение о спине электрона было подтверждено большим количеством опытных фактов. Оказалось также, что наличие спина и все его свойства вытекают из установленного Дираком уравнения квантовой механики, удовлетворяющего требованиям теории относительности. Следовательно, спин электрона является свойством одновременно квантовым и релятивистским. Спином обладают также протоны, нейтроны, фотоны и другие элементарные частицы (кроме мезонов).

Модуль собственного момента импульса электрона определяется по общим законам квантовой механики (см. формулу (19.2)) спиновым¹⁾ квантовым числом s , равным $1/2$:

$$M_s = \hbar \sqrt{s(s+1)} = \hbar \sqrt{(1/2) \cdot (3/2)} = (1/2)\hbar \sqrt{3}. \quad (23.9)$$

Проекция спина на заданное направление может принимать квантованные значения, отличающиеся друг от друга на $\hbar$:

$$M_{sz} = m_s \hbar \quad (m_s = \pm s = \pm 1/2). \quad (23.10)$$

Умножив выражение (23.9) на отношение μ_s к M_s (см. (23.8)), найдем модуль собственного магнитного момента электрона:

$$\begin{aligned} \mu_s &= -\frac{e}{m_e} M_s = -\frac{e\hbar}{m_e} \sqrt{s(s+1)} = \\ &= -2\mu_B \sqrt{s(s+1)} = -\mu_B \sqrt{3}. \end{aligned} \quad (23.11)$$

¹⁾ В квантовой механике принято обозначать спиновое квантовое число и состояние с $l=0$ одной и той же буквой s . Однако это не приводит к недоразумениям, так как всегда бывает очевидно, какой смысл имеет обозначение в данном конкретном случае.

Проекция собственного (спинового) магнитного момента электрона может иметь два значения:

$$\mu_{sz} = -\frac{e}{m_e} M_{sz} = -\frac{e}{m_e} \hbar m_s = -\frac{e\hbar}{m_e} \left(\pm \frac{1}{2} \right) = \mp \mu_B \quad (23.12)$$

(минус получается, если $m_s = +1/2$, плюс, если $m_s = -1/2$).

Таким образом, проекция собственного момента импульса электрона может принимать значения $+(1/2)\hbar$ и $-(1/2)\hbar$, а собственного магнитного момента — значения $+\mu_B$ и $-\mu_B$. В ряд формул, в частности в выражение для энергии, входят не сами моменты, а их проекции. Поэтому принято говорить, что собственный механический момент (спин) электрона равен половине (подразумевается: в единицах $\hbar$), а собственный магнитный момент равен одному магнетону Бора.

В общем случае механический момент электрона складывается из двух моментов: орбитального M_l , обусловленного движением электрона в атоме, и спинового M_s , не связанного с движением электрона в пространстве. Результирующая этих моментов дает полный момент импульса электрона. Его модуль, как и модуль всякого момента импульса вообще, определяется выражением

$$M_j = \hbar \sqrt{j(j+1)}, \quad (23.13)$$

где j — квантовое число полного момента импульса, которое может иметь значения

$$j = l + s, \quad |l - s| \quad (23.14)$$

(l и s — соответственно азимутальное и спиновое квантовые числа). При $l = 0$ квантовое число j имеет только одно значение: $j = s = 1/2$. При l , отличном от нуля, возможны два значения: $j = l + 1/2$ и $j = l - 1/2$, которые соответствуют двум возможным взаимным ориентациям моментов M_l и M_s — «параллельной» и «антипараллельной». (Термины «параллельный» и «антипараллельный» взяты в кавычки, поскольку два складываемых момента никогда не бывают направленными вдоль одной прямой.) Поскольку l — целое число либо нуль, квантовое число j электрона в атоме

водорода может иметь лишь полуцелые значения: $1/2$, $3/2$, $5/2$, ...

Подобно (23.6) и (23.10) проекция полного механического момента на направление z определяется формулой

$$M_{jz} = m_j \hbar \quad (m_j = -j, -j+1, \dots, j-1, j). \quad (23.15)$$

Формула для полного магнитного момента оказывается сложнее, чем формулы (23.4) и (23.11). Это обусловлено тем, что коэффициент пропорциональности между μ_s и M_s в два раза превышает аналогичный коэффициент для орбитальных моментов. Расчет, который мы не приводим, дает, что

$$\mu_j = -\mu_B g \sqrt{j(j+1)}, \quad (23.16)$$

где

$$g = 1 + \frac{j(j+1) + s(s+1) - l(l+1)}{2j(j+1)}. \quad (23.17)$$

Выражение (23.17) называется множителем Ланде¹⁾ (или g -фактором, или фактором магнитного расщепления). Если бы спин электрона равнялся нулю ($s=0$), числа j и l совпадали бы, g равнялось единице и формула (23.16) переходила в формулу (23.4). При равенстве нулю орбитального момента электрона ($l=0$) j совпадает с s , множитель Ланде равен двум и формула (23.16) переходит в формулу (23.11).

Рассмотрим, как существование спина объясняет расщепление энергетических уровней (и соответственно расщепление спектральных линий). Орбитальный и спиновый магнитные моменты взаимодействуют друг с другом подобно тому, как взаимодействуют две магнитные стрелки (рис. 23.1). Это взаимодействие называется спин-орбитальным. Энергия взаимодействия зависит от взаимной ориентации моментов μ_l и μ_s . Отсюда заключаем, что состояния с различными j должны обладать различной энергией.

Левый вертикальный ряд уровней на рис. 22.2 соответствует $l=0$. Следовательно, j имеет только одно значение, равное $s=1/2$, и эти уровни не расщеп-

¹⁾ Альфред Ланде (1888—1975) — немецкий физик.

ляются. У второго слева вертикального ряда уровней $l=1$. Поэтому j может иметь значения $1/2$ и $3/2$ и

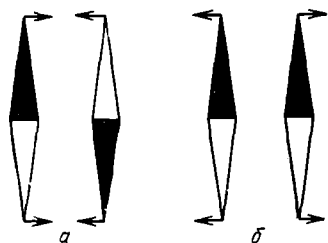


Рис. 23.1. Взаимодействие магнитных стрелок: при анти-параллельном расположении стрелки притягивают друг друга (а), при параллельном — отталкиваются друг от друга (б). Притягивающиеся стрелки обладают меньшей взаимной энергией, чем отталкивающиеся

каждый уровень расщепляется на два. Для третьего ряда уровней j равно $3/2$ и $5/2$, и т. д.

§ 24. Механический и магнитный моменты атомов

В предыдущем параграфе мы выяснили, что состояние электрона в атоме водорода определяется четырьмя квантовыми числами: главным n , орбитальным l , магнитным m_l и магнитным спиновым m_s . С тем же успехом можно использовать и другую четверку чисел: n , l , j (квантовое число полного момента импульса) и m_j (квантовое число проекции полного момента). Обе четверки чисел эквивалентны — по значениям одной четверки могут быть определены значения другой.

В многоэлектронных атомах состояние каждого электрона определяется теми же квантовыми числами, что и в атоме водорода. Влияние на данный электрон остальных электронов проявляется в том, что поле, в котором движется электрон, перестает быть кулоновским (т. е. изменяющимся по закону $1/r^2$). Это обуславливает зависимости энергии электрона не только от числа n , но и от числа l (говорят, что снимается вырождение по l).

Механический и магнитный моменты атома складываются из орбитальных и спиновых моментов отдельных электронов¹⁾. При этом возможны два случая.

1. Моменты M_l взаимодействуют между собой сильнее, чем с M_s , которые в свою очередь сильнее

¹⁾ Атомное ядро также обладает магнитным моментом. Однако этот момент на три порядка меньше момента электронов и существенного вклада в магнитный момент атома не вносит.

связаны друг с другом, чем с M_l . Вследствие этого все M_l складываются в результирующую M_L , моменты M_s складываются в M_s , а затем уже M_L и M_s дают суммарный момент атома M_J . Такой вид связи встречается чаще всего и называется LS -связью.

2. Каждая пара M_l и M_s взаимодействует между собой сильнее, чем с другими M_l и M_s , вследствие чего образуются результирующие M_j для каждого электрона в отдельности, которые затем уже объединяются в M_J атома. Такой вид связи, называемый jj -связью, наблюдается у тяжелых атомов.

Мы ограничимся рассмотрением LS -связи. В этом случае результирующий орбитальный момент импульса определяется формулой

$$M_L = \hbar \sqrt{L(L+1)}, \quad (24.1)$$

где L — орбитальное квантовое число атома. В случае двух электронов L может иметь значения:

$$L = l_1 + l_2, \quad l_1 + l_2 - 1, \dots, |l_1 - l_2|, \quad (24.2)$$

где l_1 и l_2 — орбитальные квантовые числа, определяющие модули складываемых моментов по формуле (23.3). Легко сообразить, что результирующий момент может иметь $2l_{\min} + 1$ различных значений ($l_{\min}$ — меньшее из чисел l_1 и l_2).

В случае атома, имеющего более чем два электрона, максимальное значение L равно сумме чисел l всех электронов. Чтобы найти минимальное значение L , нужно сложить сначала числа l любых двух электронов. Затем каждый из полученных результатов складывается с l третьего электрона и т. д. Наименьшее из получившихся при этом чисел будет представлять собой минимальное возможное значение квантового числа L . Пусть, например, $l_1 = l_2 = 1$ и $l_3 = 3$. Возможные значения суммарного момента первого и второго электронов определяются числами 0, 1 и 2. Сложение первого из этих чисел с $l_3 = 3$ дает $L = 3$, второго числа — $L = 2$, 3, 4, третьего числа — $L = 1$, 2, 3, 4, 5. Следовательно, квантовое число, определяющее результирующий момент в рассматриваемом случае, может иметь значения $L = 1, 2, 3, 4, 5$. Минимальное значение L оказалось равным 1, максимальное, как и следовало ожидать, равно $5(1 + 1 + 3)$.

Орбитальные квантовые числа l всегда бывают целыми (или нулями). Соответственно квантовое число L суммарного орбитального момента также бывает целым (либо нулем).

Проекция результирующего момента на некоторое направление z определяется, как и для любого момента вообще, выражением

$$M_{Lz} = m_L \hbar \quad (m_L = -L, -L+1, \dots, L-1, L) \quad (24.3)$$

(см. (19.6)).

Результирующий спиновый механический момент атома и проекция этого момента на ось z определяются выражениями, аналогичными (24.1) и (24.3), с заменой L на S и m_L на m_S .

Квантовое число S результирующего спинового момента атома M_S может быть целым или полуцелым в зависимости от того, каким является число электронов в атоме — четным или нечетным. При четном числе электронов N квантовое число S принимает все целые значения от $N \cdot (1/2)$ (все M_S «параллельны» друг другу) до нуля (все M_S попарно компенсируют друг друга). Так, например, при $N=4$ квантовое число S может иметь значения 2, 1, 0. При нечетном N квантовое число S принимает все полуцелые значения от $N \cdot (1/2)$ (все M_S «параллельны» друг другу) до $1/2$ (все M_S , кроме одного, попарно компенсируют друг друга). Например, при $N=5$ возможными значениями S будут: $5/2, 3/2, 1/2$.

Результирующие орбитальный и спиновый механические моменты атома образуют в сумме полный момент импульса атома, который вычисляется по формуле

$$M_J = \hbar \sqrt{J(J+1)}. \quad (24.4)$$

При данных M_L и M_S квантовое число J результирующего момента M_J может иметь одно из следующих значений:

$$J = L + S, \quad L + S - 1, \quad |L - S|.$$

Следовательно, J будет целым, если S — целое (т. е. при четном числе электронов в атоме), и полуцелым, если S — полуцелое (т. е. при нечетном числе электронов). Так, например, в случае $L=2, S=1$ воз-

возможные значения J равны 3, 2, 1, а в случае $L = 2$, $S = 3/2$ возможные значения J равны $7/2$, $5/2$, $3/2$, $1/2$.

Проекция полного механического момента атома на направление z определяется формулой

$$M_{Jz} = m_J \hbar \quad (m_J = -J, -J + 1, \dots, J - 1, J). \quad (24.5)$$

С механическими моментами связаны магнитные моменты, которые взаимодействуют между собой. Поэтому энергия атома зависит от взаимной ориентации моментов M_L (т. е. от квантового числа L), от взаимной ориентации моментов M_S (от квантового числа S) и от взаимной ориентации M_L и M_S (от квантового числа J).

Из сказанного выше вытекает, что состояние атома и его энергия определяются квантовыми числами L , S и J . Вместо того чтобы писать, что $L =$ тому-то, $S =$ тому-то, а $J =$ тому-то, для характеристики состояния атома пользуются символической записью, которая включает в себе информацию о значениях квантовых чисел. Этот символ имеет вид

$$^{2S+1}L_J, \quad (24.6)$$

где под L подразумевается одна из букв S , P , D , F и т. д. в зависимости от значения числа L (см. § 22); S -состоянием называется состояние с $L = 0$, P -состоянием — состояние с $L = 1$, D -состоянием — состояние с $L = 2$, F -состоянием — состояние с $L = 3$ и т. д.

Приведем несколько примеров. Символ 1S_0 обозначает состояние, характеризуемое числами $L = 0$, $S = 0$ и $J = 0$ (не спутайте символ состояния S с обозначением спинового квантового числа!). Символ $^2P_{3/2}$ обозначает состояние с $L = 1$, $S = 1/2$ и $J = 3/2$. Символ 3D_1 обозначает состояние с $L = 2$, $S = 1$ и $J = 1$.

В случае, когда $S < L$, стоящее в (24.6) слева сверху число $2S + 1$ дает мультиплетность энергетического уровня, т. е. количество подуровней, отличающихся значением числа J . В случае, когда $S > L$, фактическая мультиплетность равна $2L + 1$. Однако символ состояния все равно пишут в виде (24.6), иначе он не содержал бы сведений о значении квантового числа S .

Модуль магнитного момента атома определяется формулой

$$\mu_J = -\mu_B g \sqrt{J(J+1)}, \quad (24.7)$$

где μ_B — магнетон Бора, а g — множитель Ланде, вычисляемый по формуле, аналогичной (23.17):

$$g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}. \quad (24.8)$$

В случае, когда суммарный спиновый момент атома равен нулю ($S=0$), полный момент совпадает с орбитальным ($J=L$). Подстановка в выражение (24.8) $S=0$ и $J=L$ дает $g=1$. В случае, когда суммарный орбитальный момент атома равен нулю ($L=0$), полный момент совпадает со спиновым ($J=S$). Подстановка этих значений квантовых чисел в выражение (24.8) дает $g=2$. Отметим, что множитель Ланде может иметь значения меньше единицы и даже может быть равен нулю (это получается, например, при $L=3$, $S=2$ и $J=1$). В последнем случае магнитный момент атома равен нулю, хотя механический момент отличен от нуля.

Напомним, что наличие минуса в формуле (24.7) позволяет получить проекцию μ_J на ось z простой заменой $\sqrt{J(J+1)}$ на m_J . Следовательно,

$$\mu_{Jz} = -\mu_B g m_J \quad (m_J = -J, -J+1, \dots, J-1, J). \quad (24.9)$$

Ряд вопросов физики атома может быть рассмотрен с помощью так называемой векторной модели атома. При построении такой модели механические и магнитные моменты изображаются в виде направленных отрезков. Строго говоря, вследствие неопределенности направлений векторов $\mathbf{M}$ в пространстве такой прием является неправомерным. Поэтому, работая с векторной моделью, необходимо помнить условность соответствующих построений. Векторную модель нельзя понимать буквально. Ее следует рассматривать как совокупность правил, позволяющих получить результаты, справедливость которых подтверждается строгими квантовомеханическими расчетами.

Векторная модель строится по следующим правилам. Пусть M и M_z имеют определенные значения

(M_x и M_y при этом не определены). Следовательно, вектор $\mathbf{M}$ может иметь направление одной из образующих конуса, изображенного на рис. 24.1. Можно

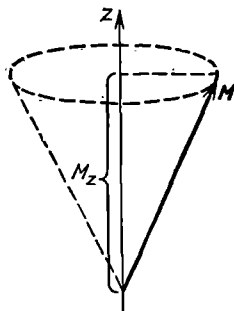


Рис. 24.1. Представление с помощью векторной модели момента импульса $\mathbf{M}$ и его проекции M_z на ось z . Вектор $\mathbf{M}$ прецессирует вокруг оси z

представлять себе дело так, что вектор $\mathbf{M}$ равномерно вращается (прецессирует) вокруг направления z , совпадающего с осью конуса.

Допустим, что в направлении z создано магнитное поле $\mathbf{B}$. С механическим моментом $\mathbf{M}$ связан магнитный момент $\boldsymbol{\mu}$. Поэтому поле воздействует на $\mathbf{M}$ (через $\boldsymbol{\mu}$). Предполагается, что скорость прецессии момента $\mathbf{M}$ вокруг $\mathbf{B}$ будет тем больше, чем сильнее воздействует поле на момент, т. е. чем больше $\mathbf{B}$.

Согласно правилам построения векторной модели складываемые моменты $\mathbf{M}_1$ и $\mathbf{M}_2$ прецессируют вокруг направления результирующего момента $\mathbf{M}$ (рис. 24.2).

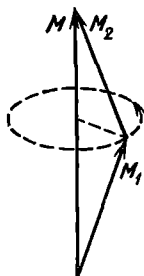


Рис. 24.2. Векторная модель суммы моментов импульса $\mathbf{M}_1$ и $\mathbf{M}_2$. Складываемые моменты прецессируют вокруг направления результирующего вектора $\mathbf{M}$

Моменты взаимодействуют друг с другом (через магнитные моменты $\boldsymbol{\mu}_1$ и $\boldsymbol{\mu}_2$). Скорость прецессии предполагается пропорциональной интенсивности взаимодействия. В состоянии, в котором определены M и M_z , вектор $\mathbf{M}$ прецессирует в свою очередь вокруг направления z . Создадим направленное вдоль оси z магнитное

поле $\mathbf{B}$, недостаточно сильное для того, чтобы разорвать связь между моментами μ_1 и μ_2 (рис. 24.3). В этом случае будут наблюдаться два вида прецессии: прецессия моментов $\mathbf{M}_1$ и $\mathbf{M}_2$ вокруг направления

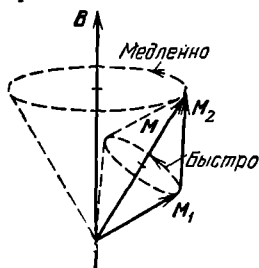


Рис. 24.3. Векторная модель воздействия магнитного поля на результирующую $\mathbf{M}$ моментов импульса $\mathbf{M}_1$ и $\mathbf{M}_2$. Складываемые моменты прецессируют вокруг $\mathbf{M}$ с большей скоростью, чем $\mathbf{M}$ прецессирует вокруг направления поля

$\mathbf{M}$ и прецессия результирующего вектора $\mathbf{M}$ вокруг направления $\mathbf{B}$. Скорость первой прецессии будет больше, так как взаимодействие моментов между собой превосходит воздействие на каждый из них магнитного поля.

Применим изложенные правила для построения векторной модели атома. На рис. 24.4 изображены

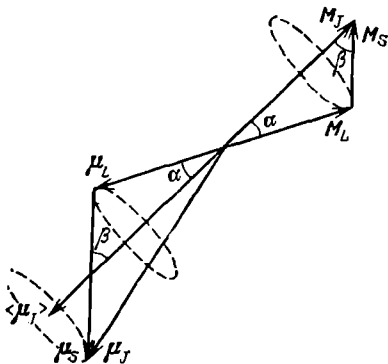


Рис. 24.4. Векторная модель атома

векторы $\mathbf{M}_L$, $\mathbf{M}_S$, $\mathbf{M}_J$ и соответствующие им векторы μ_L , μ_S , μ_J . Масштабы выбраны так, что векторы $\mathbf{M}_L$ и μ_L изображаются отрезками одинаковой длины. При этом условии вектор μ_S изобразится отрезком в два раза большим, чем отрезок, изображающий вектор $\mathbf{M}_S$. Из-за «удвоенного магнетизма» спина вектор μ_J оказывается неколлинеарным с вектором $\mathbf{M}_J$. Векторы $\mathbf{M}_L$ и $\mathbf{M}_S$ прецессируют вокруг направления $\mathbf{M}_J$, вовлекая в эту прецессию и результирующий вектор магнитного

момента μ_J . Экспериментально будет наблюдаться среднее значение вектора μ_J , обозначенное на рис. 24.4 символом $\langle \mu_J \rangle$. Построенная нами модель позволяет найти выражение (24.8) для фактора Ланде.

Экспериментальное определение магнитных моментов атомов было осуществлено в 1922 г. О. Штерном и Герлахом¹⁾. В их опытах пучок атомов пропусклся через сильно неоднородное магнитное поле. Неоднородность поля достигалась за счет специальной формы полюсных наконечников электромагнита (рис. 24.5). Согласно формуле (40.10)

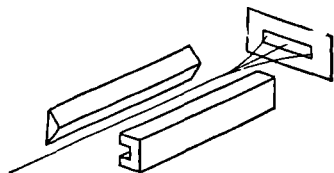


Рис. 24.5. Схема опыта Штерна и Герлаха

2-го тома на атомы пучка должна действовать сила, проекция которой на ось x определяется выражением

$$F_x = \mu_J \frac{\partial B}{\partial x} \cos \alpha$$

(α — угол между направлениями момента и поля). При хаотическом распределении магнитных моментов по направлениям в пучке имеются атомы, для которых значения α изменяются в пределах от 0 до π . В соответствии с этим предполагалось, что узкий пучок атомов после прохождения между полюсами образует на экране сплошной растянутый след, края которого соответствуют атомам с ориентациями момента под углами $\alpha = 0$ и $\alpha = \pi$ (рис. 24.6). Опыт дал неожиданные результаты.

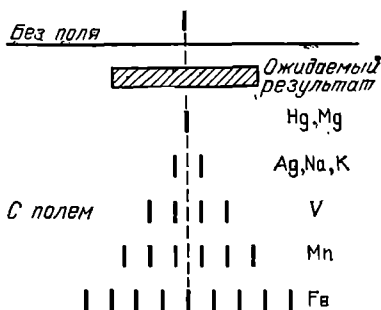


Рис. 24.6. Следы, оставленные на экране пучками, на которые разделялся в опыте Штерна и Герлаха исходный атомный пучок при прохождении через неоднородное магнитное поле

Вместо сплошного растянутого следа получались отдельные линии, расположенные симметрично относи-

¹⁾ Вальтер Герлах (1889—1979) — немецкий физик.

тельно следа пучка, полученного в отсутствие поля.

Опыт Штерна и Герлаха показал, что углы, под которыми ориентируются магнитные моменты атомов по отношению к направлению магнитного поля, могут иметь только дискретные значения, т. е. что проекция магнитного момента на направление поля квантуется. Тем самым была экспериментально доказана формула (24.5).

Число возможных значений проекции магнитного момента на направление магнитного поля для разных атомов оказалось различным. Для атомов серебра, алюминия, меди и щелочных металлов оно равно двум, для ванадия, азота и галогенов — четырем, для кислорода — пяти, марганца — шести, железа — девяти, кобальта — десяти.

Для магнитных моментов атомов измерения дали значения порядка нескольких магнетонов Бора. Некоторые атомы не обнаружили отклонения (см., например, след атомных пучков ртути и магния на рис. 24.6), что указывает на отсутствие у них магнитного момента.

§ 25. Эффект Зеемана

В 1896 г. Зееман¹⁾ обнаружил, что при действии на атомы магнитного поля испускаемые ими спектральные линии расщепляются на несколько компонент. Расщепление линий, очевидно, обусловлено расщеплением энергетических уровней атомов. Расщепление уровней, равно как и расщепление спектральных линий, вызванное действием на атомы магнитного поля²⁾, называют эффектом Зеемана. Расщепление линий невелико — в поле порядка 1 Тл оно составляет лишь несколько сотых нанометра.

Зеемановское расщепление уровней объясняется тем, что атом, обладающий магнитным моментом μ , приобретает в магнитном поле дополнительную

¹⁾ Питер Зееман (1865—1943) — нидерландский физик.

²⁾ Расщепление энергетических уровней происходит также при действии на атомы электрического поля. Это явление называется эффектом Штарка [Йоханнес Штарк (1874—1957) — немецкий физик (ФРГ)].

энергию

$$\Delta E = -\mu_{JB}B, \quad (25.1)$$

где μ_{JB} — проекция магнитного момента на направление поля (см. формулу (40.9) 2-го тома). В соответствии с (24.9)

$$\mu_{JB} = -\mu_B g m_J.$$

Подстановка этого выражения в (25.1) дает

$$\Delta E = \mu_B g B m_J \quad (m_J = -J, -J+1, \dots, J-1, J). \quad (25.2)$$

Из этой формулы следует, что энергетический уровень, отвечающий состоянию $^{2S+1}L_J$, расщепляется на $2J+1$ равноотстоящих подуровня, причем величина расщепления зависит от множителя Ланде, т. е. от квантовых чисел L , S и J данного уровня. До включения поля состояния, отличающиеся значениями квантового числа m_J , обладали одинаковой энергией, т. е. наблюдалось вырождение по квантовому числу m_J . Магнитное поле снимает вырождение по m_J .

Рассмотрим зеемановское расщепление спектральных линий, не имеющих тонкой структуры (синглетов). Эти линии возникают при переходах между уровнями, отвечающими $S=0$. Для таких уровней $g=1$. Следовательно, формула (25.2) имеет вид

$$\Delta E = \mu_B B m_J \quad (m_J = 0, \pm 1, \dots, \pm J) \quad (25.3)$$

($J=L$, $m_J=m_L$).

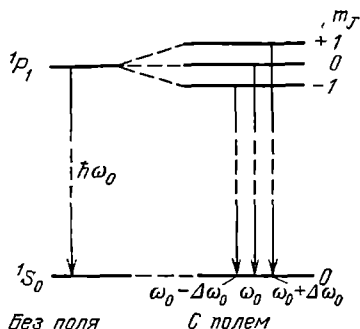


Рис. 25.1. Возникновение зеемановского триплета для перехода $^1P_1 \rightarrow ^1S_0$

На рис. 25.1 показано расщепление уровней и спектральных линий для перехода между состояниями с $L=1$ и $L=0$ (для $P \rightarrow S$ -перехода). В отсутствие поля наблюдается одна линия, частота которой обозначена ω_0 . При включении поля, кроме линии ω_0 ,

появляются две расположенные симметрично относительно нее линии с частотами $\omega_0 + \Delta\omega_0$ и $\omega_0 - \Delta\omega_0$.

На рис. 25.2 дана аналогичная схема для более сложного случая — для перехода $D \rightarrow P$. На первый

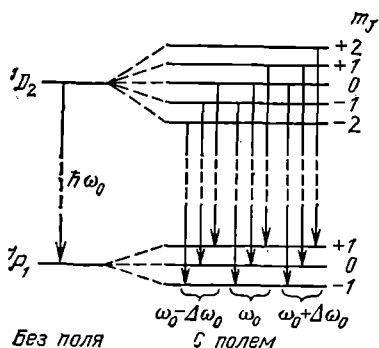


Рис. 25.2. Возникновение зеемановского триплета для перехода ${}^1D_2 \rightarrow {}^1P_1$

взгляд может показаться, что в этом случае первоначальная линия должна расщепиться на семь компонент. Однако на самом деле получается, как и в предыдущем случае, лишь три компоненты: линия с частотой ω_0 и две симметрично расположенные относительно нее линии с частотами $\omega_0 + \Delta\omega_0$ и $\omega_0 - \Delta\omega_0$. Это объясняется тем, что для магнитного квантового

числа m_J имеется правило отбора, согласно которому возможны только переходы, при которых m_J либо остается неизменным, либо изменяется на единицу:

$$\Delta m_J = 0, \pm 1. \quad (25.4)$$

Вследствие этого правила возможны только переходы, указанные на рис. 25.2. В результате получаются три компоненты с такими же частотами, как и в случае, изображенном на рис. 25.1.

Получающееся в рассмотренных случаях смещение компонент называется нормальным или лоренцевым¹⁾ смещением. В соответствии с формулой (25.3) это смещение равно

$$\Delta\omega_0 = \frac{\mu_B B}{\hbar} = \frac{e\hbar}{2m_e} \frac{B}{\hbar} = \frac{e}{2m_e} B. \quad (25.5)$$

Рассмотренное расщепление на три линии, две из которых отличаются по частоте от несмещенной линии на $\Delta\omega_0$, носит название простого (или нормального) эффекта Зеемана. Оценим простое зее-

¹⁾ Х. Лоренц дал классическое объяснение простого эффекта Зеемана и вычислил значение нормального смещения.

мановское расщепление для поля порядка 1 Тл. Поскольку $\lambda = 2\pi c/\omega$,

$$|\Delta\lambda| = \frac{2\pi c}{\omega^2} \Delta\omega_0 = \frac{\pi c e B}{m_e \omega^2}.$$

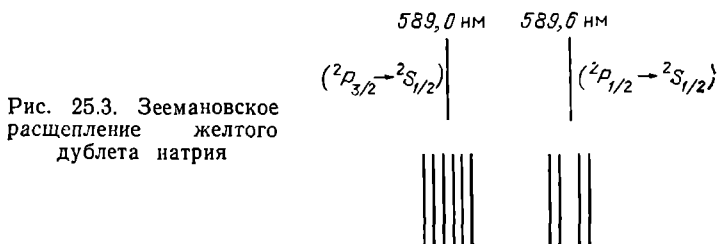
Для видимого света ω равна примерно $3 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$. Следовательно,

$$\Delta\lambda = \frac{3,14 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1}{0,91 \cdot 10^{-30} \cdot (3 \cdot 10^{15})^2} \approx 2 \cdot 10^{-11} \text{ м} = 0,02 \text{ нм}.$$

Мы уже отмечали, что простой эффект Зеемана наблюдается в том случае, когда исходные линии не имеют тонкой структуры, т. е. являются синглетами. У линий, обладающих тонкой структурой, число компонент бывает больше трех, а величина расщепления составляет рациональную дробь от нормального смещения

$$\Delta\omega = \Delta\omega_0 \frac{r}{q},$$

где r и q — небольшие целые числа. Например, расщепление желтого дублета натрия¹⁾ выглядит так,



как показано на рис. 25.3. Такое расщепление спектральных линий называется сложным (или аномальным) эффектом Зеемана.

Сложный эффект Зеемана объясняется зависимостью величины расщепления уровней от множителя Ланде g , т. е. в конечном счете существованием спина электрона и «удвоенным магнетизмом» спина. В дальнейшие подробности мы вдаваться не будем.

¹⁾ Желтым дублетом натрия называется двойная линия, компоненты которой соответствуют переходам $^2P_{1/2} \rightarrow ^2S_{1/2}$ и $^2P_{3/2} \rightarrow ^2S_{1/2}$. Длина волны компонент равна 589,0 и 589,6 нм. Благодаря этой линии при внесении в пламя соединений натрия (например, NaCl) оно окрашивается в желтый цвет.

§ 26. Электронный парамагнитный резонанс

В предыдущем параграфе мы выяснили, что в случае, когда атом с магнитным моментом, отличным от нуля, находится в магнитном поле, каждый уровень атома расщепляется на $2J + 1$ зеемановских подуровня. Согласно (25.2) расстояние между подуровнями равно

$$\delta E = \mu_B g B.$$

Предположим, что на атом, находящийся в постоянном магнитном поле B , падает электромагнитная волна, частота которой удовлетворяет условию

$$\hbar \omega = \delta E = \mu_B g B = \hbar \Delta \omega_0 g, \quad (26.1)$$

где $\Delta \omega_0$ — нормальное смещение (см. (25.5)). Можно ожидать, что под действием магнитного поля падающей волны будут происходить переходы атома между соседними подуровнями (правило (25.4) разрешает лишь переходы, при которых m_z изменяется не больше, чем на единицу). Такое явление действительно наблюдается. Оно было обнаружено Завойским¹⁾ в 1944 г. и получило название электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Это название объясняется следующими причинами. Явление имеет резонансный характер — переходы возникают при строго определенной частоте падающей волны. Ответственным за расщепление уровней является магнитный момент атома, обусловленный орбитальными и спиновыми моментами электронов (отметим, что кроме электронного наблюдается ядерный магнитный резонанс, обусловленный магнитным моментом ядра). Явление имеет место лишь для парамагнитных веществ (у диамагнетиков магнитные моменты атомов равны нулю).

Из формулы (26.1) следует, что резонансные частоты оказываются порядка нормального смещения $\Delta \omega_0$ (множитель g имеет значение порядка единицы). При $B = 1$ Тл

$$\omega \approx \Delta \omega_0 = \frac{\mu_B B}{\hbar} = \frac{0,927 \cdot 10^{-23} \cdot 1}{1,05 \cdot 10^{-34}} \approx 10^{11} \text{ с}^{-1}$$

¹⁾ Евгений Константинович Завойский (1907—1976) — советский физик.

(см. (23.5)). Такой частоте отвечает длина волны порядка нескольких сантиметров. Следовательно, резонансные частоты лежат в радиодиапазоне.

Под действием электромагнитной волны атом с равной вероятностью может перейти как в более высокое, так и в более низкое энергетическое состояние (подробно об этом идет речь в § 32). В первом случае волна будет ослабляться, во втором — усиливаться. Если парамагнетик находится в тепловом равновесии, атомы распределяются по подуровням в соответствии с законом Больцмана (см. формулу (5.17)). Следовательно, число атомов, находящихся в состоянии с меньшей энергией, превышает число атомов, находящихся в состоянии с большей энергией. Поэтому переходы, происходящие с увеличением энергии атомов, будут преобладать над переходами, происходящими с уменьшением энергии. В итоге интенсивность волны будет уменьшаться — парамагнетик поглощает электромагнитное излучение, в результате чего он нагревается.

Таким образом, электронный парамагнитный резонанс представляет собой избирательное поглощение энергии радиочастотного поля в парамагнитных веществах, находящихся в постоянном магнитном поле.

В наших рассуждениях мы неявно предполагали, что атомы парамагнетика не взаимодействуют друг с другом. Практически ЭПР наблюдается в кристаллических или жидких парамагнетиках (он был наблюден также и в некоторых газах). В конденсированных средах на отдельные атомы кроме внешнего магнитного поля действуют также беспорядочно ориентированные внутренние поля. Поэтому резонансные частоты для различных атомов оказываются слегка отличными, вследствие чего линии ЭПР имеют конечную ширину.

Прибор для исследования ЭПР называется радиоспектроскопом. Он состоит (рис. 26.1а) из генератора электромагнитных волн G , волноводов $B\alpha$, объемного резонатора OP^1 , помещенного между полюсами электромагнита, приемника Pr и регистрирующего устройства $PУ$. Приемник настраивается на

¹⁾ Волноводами называются трубы с проводящими стенками. Объемный резонатор представляет собой полость с проводящими стенками.

частоту генератора. В качестве регистрирующего устройства используется осциллограф или самописец. Парамагнитный образец помещается внутри объемного резонатора. В ходе эксперимента плавно изменяется

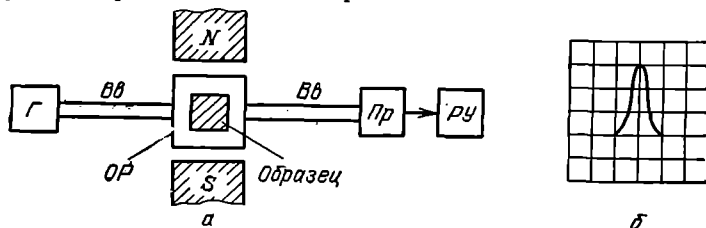


Рис. 26.1. Схема радиоспектроскопа (а) и кривая поглощения, наблюдаемая на экране осциллографа (б)

магнитное поле, создаваемое электромагнитом. При значении B , отвечающем условию (26.1), наблюдается интенсивное поглощение волны образцом. Кривая поглощения показана на рис. 26.1б. Она, как отмечалось выше, имеет конечную ширину.

Электронный парамагнитный резонанс используется для исследования структуры кристаллов, магнитных свойств атомных ядер и в ряде других случаев.

§ 27. Принцип Паули

В классической механике частицы одинаковой природы (например, электроны) можно различать. Пронумеровав их в некоторый момент времени t_0 , можно следить за каждой из них при ее движении по траектории и в любой момент времени t указать, какой номер был присвоен той либо иной частице.

В квантовой механике положение оказывается в корне иным. В силу принципа неопределенности понятие траектории частицы утрачивает смысл. Поэтому следить за каждой из одинаковых частиц и тем самым различать их невозможно. Таким образом, в квантовой механике частицы одинаковой природы полностью теряют свою «индивидуальность» — они оказываются неразличимыми. Это утверждение носит название принципа неразличимости (или принципа тождественности) одинаковых частиц.

Принцип неразличимости одинаковых частиц приводит к глубоким физическим следствиям. Пусть

имеется система из двух тождественных частиц. Обозначив совокупность координат и проекции спина частиц буквами ξ_1 и ξ_2 , рассмотрим волновую функцию системы $\psi(\xi_1, \xi_2)$. Поскольку частицы неразличимы, перестановка ξ_1 и ξ_2 не должна приводить к изменению физических свойств системы, т. е. изменять квадрат модуля волновой функции. Следовательно, должно выполняться равенство

$$|\psi(\xi_1, \xi_2)|^2 = |\psi(\xi_2, \xi_1)|^2.$$

При этом возможны два случая:

$$\psi(\xi_1, \xi_2) = \psi(\xi_2, \xi_1) \text{ и } \psi(\xi_1, \xi_2) = -\psi(\xi_2, \xi_1).$$

В первом случае функция ψ оказывается симметричной по отношению к переменным ξ_1 и ξ_2 , во втором случае — антисимметричной.

Оказывается, что частицы с нулевым или целым спином описываются симметричными, а частицы с полуцелым спином — антисимметричными волновыми функциями. Дальнейший анализ, который ввиду его сложности мы излагаем в данной книге не имея возможности, приводит к следующим результатам.

Частицы с целым или нулевым спином могут находиться в пределах данной системы в одинаковом состоянии в неограниченном количестве. Такие частицы подчиняются статистике, разработанной Бозе¹⁾ и Эйнштейном, и поэтому называются бозонами. Можно сказать, что бозоны являются «коллективистами», они «любят» накапливаться в одном и том же состоянии.

Частицы с полуцелым спином могут находиться в квантовых состояниях только поодиночке. Такие частицы подчиняются статистике, разработанной Ферми²⁾ и Дираком, и называются фермионами. Фермионы являются «индивидуалистами».

В 1925 г. Паули³⁾ сформулировал носящий его имя принцип, согласно которому *в одном и том же атоме (или в какой-либо другой квантовой системе) не может быть двух электронов (либо других частиц с полуцелым спином), обладающих одинаковой совокупностью квантовых чисел*. Иными словами, в одном

¹⁾ Шатъендранат Бозе (1894—1974) — индийский физик.

²⁾ Энрико Ферми (1901—1954) — итальянский физик.

³⁾ Вольфганг Паули (1900—1958) — швейцарский физик.

и том же состоянии не могут находиться одновременно два электрона.

Напомним, что состояние электрона в атоме характеризуется четырьмя квантовыми числами:

главным	n	$(n = 1, 2, 3, \dots),$
азимутальным	l	$(l = 0, 1, 2, \dots, n - 1),$
магнитным	m_l	$(m_l = 0, \pm 1, \dots, \pm l),$
спиновым	m_s	$(m_s = +1/2, -1/2).$

Энергия состояния зависит в основном от чисел n и l . Кроме того, имеется слабая зависимость энергии от чисел m_l и m_s , поскольку их значения связаны с взаимной ориентацией моментов M_l и M_s , от которой зависит энергия спин-орбитального взаимодействия. Энергия состояния сильнее возрастает с увеличением числа n , чем с увеличением l . Поэтому, как правило, состояние с большим n обладает независимо от значения l большей энергией.

В основном (невозбужденном) состоянии атома электроны должны располагаться на самых низких доступных для них энергетических уровнях. Поэтому, казалось бы, в любом атоме в основном состоянии все электроны должны находиться в состоянии $1s$ ($n = 1, l = 0$). Однако опыт показывает, что это не так.

Объяснение характера наблюдаемых на опыте основных состояний атомов дает принцип Паули. Применительно к электронам в атоме этот принцип можно сформулировать следующим образом: в одном и том же атоме не может быть двух электронов, обладающих одинаковой совокупностью квантовых чисел n, l, m_l и m_s .

В § 22 было показано, что данному n соответствует n^2 состояний, отличающихся значениями l и m_l . Квантовое число m_s может принимать два значения: $\pm 1/2$. Поэтому в состояниях с данным значением n могут находиться в атоме не более $2n^2$ электронов:

- $n = 1$ могут иметь 2 электрона,
- $n = 2$ могут иметь 8 электронов,
- $n = 3$ могут иметь 18 электронов,
- $n = 4$ могут иметь 32 электрона,
- $n = 5$ могут иметь 50 электронов и т. д.

Совокупность электронов, имеющих одинаковые значения квантового числа n , образует оболочку. Оболочки подразделяются на подоболочки, отличающиеся значением квантового числа l . В соответствии с значением n оболочкам дают обозначения, заимствованные из спектроскопии рентгеновских лучей:

Значение n	1	2	3	4	5	6	7...
Обозначение оболочки	K	L	M	N	O	P	$Q...$

Подразделение возможных состояний электрона в атоме на оболочки и подоболочки показано в табл. 27.1, в которой вместо обозначений $m_s = \pm 1/2$

Таблица 27.1

Оболочка	n	l	m_l	m_s	Подоболочка	Оболочка	n	l	m_l	m_s	Подоболочка
K	1	0	0	$\uparrow\downarrow$	$K (1s)$	N	4	0	0	$\uparrow\downarrow$	$N_1 (4s)$
L	2	0	0	$\uparrow\downarrow$	$L_1 (2s)$			1	-1	$\uparrow\downarrow$	$N_2 (4p)$
		1	-1	$\uparrow\downarrow$	0			$\uparrow\downarrow$			
			0	$\uparrow\downarrow$	+1			$\uparrow\downarrow$			
M	3	0	0	$\uparrow\downarrow$	$M_1 (3s)$			2	-2	$\uparrow\downarrow$	$N_3 (4d)$
		1	-1	$\uparrow\downarrow$	-1			$\uparrow\downarrow$			
			0	$\uparrow\downarrow$	0			$\uparrow\downarrow$			
			+1	$\uparrow\downarrow$	+1			$\uparrow\downarrow$			
		2	-2	$\uparrow\downarrow$	+1			$\uparrow\downarrow$	$N_4 (4f)$		
			-1	$\uparrow\downarrow$	0			$\uparrow\downarrow$			
			0	$\uparrow\downarrow$	+1			$\uparrow\downarrow$			
			+1	$\uparrow\downarrow$	+2			$\uparrow\downarrow$			
			+2	$\uparrow\downarrow$	+3	$\uparrow\downarrow$					

применены для наглядности символы $\uparrow\downarrow$. Подоболочки, как указано в таблице, могут обозначаться двумя способами (например, L_1 либо $2s$).

Для полностью заполненной подоболочки характерно равенство нулю суммарного орбитального и суммарного спинового моментов ($L = 0$, $S = 0$). Следовательно, момент импульса такой подоболочки равен нулю ($J = 0$). Убедимся в этом на примере $3d$ -подоболочки. Спины всех десяти электронов, входящих в эту подоболочку, попарно компенсируют друг друга, вследствие чего $S = 0$. Квантовое число проекции результирующего орбитального момента M_L этой подоболочки на ось z имеет единственное значение $m_L = \sum m_l = 0$. Следовательно, L также равно нулю. Таким образом, при определении L и S атома заполненные подоболочки можно не принимать во внимание.

Принцип Паули дает объяснение периодической повторяемости свойств атомов. Проследим построение периодической системы элементов Д. И. Менделеева. Начнем с атома водорода, имеющего один электрон. Каждый следующий атом будем получать, увеличивая заряд ядра предыдущего атома на единицу и добавляя один электрон, который мы будем помещать в доступное ему согласно принципу Паули состояние с наименьшей энергией.

В атоме водорода имеется в основном состоянии один $1s$ -электрон с произвольной ориентацией спина. Квантовые числа атома имеют значения: $L = 0$, $S = 1/2$, $J = 1/2$. Соответственно символ основного состояния водородного атома имеет вид ${}^2S_{1/2}$.

Если заряд ядра атома водорода увеличить на единицу и добавить еще один электрон, получится атом гелия. Оба электрона в этом атоме могут находиться в K -оболочке, но с антипараллельной ориентацией спинов. Так называемая электронная конфигурация атома может быть записана как $1s^2$ (два $1s$ -электрона). Основным состоянием будет 1S_0 ($L = 0$, $S = 0$, $J = 0$).

На атоме гелия заканчивается заполнение K -оболочки. Третий электрон атома лития может занять лишь уровень $2s$ (рис. 27.1). Получается электронная конфигурация $1s^2 2s$. Основное состояние характеризуется квантовыми числами $L = 0$, $S = 1/2$, $J = 1/2$. Поэтому основным состоянием, как и у водорода, будет ${}^2S_{1/2}$. Третий электрон атома лития, занимая более высокий энергетический уровень, чем остальные два электрона, оказывается слабее, чем

они, связанным с ядром атома. В результате он определяет оптические и химические свойства атома.

У четвертого элемента, бериллия, полностью заполняется подоболочка $2s$. У последующих шести элементов (В, С, N, О, F и Ne) происходит заполнение электронами подоболочки $2p$, в результате чего неон имеет полностью заполненные оболочки K (двумя электронами) и L (восемью электронами), образующие устойчивую систему, подобную системе гелия, чем обуславливаются специфические свойства инертных газов.

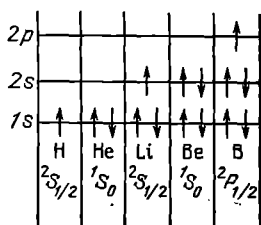


Рис. 27.1. Схема заполнения электронами энергетических уровней

Процесс застройки электронных оболочек первых 36 элементов периодической системы представлен в табл. 27.2. Одиннадцатый элемент, натрий, имеет кроме заполненных оболочек K и L один электрон в подоболочке $3s$. Электронная конфигурация имеет вид $1s^2 2s^2 2p^6 3s$. Основным состоянием будет $^2S_{1/2}$. Электрон $3s$ связан с ядром слабее других и является валентным, или оптическим, электроном. В связи с этим химические и оптические свойства натрия подобны свойствам лития.

У следующих за натрием элементов нормально заполняются подоболочки $3s$ и $3p$. Подоболочка $3d$ при данной общей конфигурации оказывается энергетически выше подоболочки $4s$, в связи с чем при незавершенном в целом заполнении оболочки M начинается заполнение оболочки N . Подоболочка $4p$ лежит уже выше, чем $3d$, так что после $4s$ заполняется подоболочка $3d$.

С аналогичными отступлениями от обычной последовательности, повторяющимися время от времени, осуществляется застройка электронных уровней всех атомов. При этом периодически повторяются сходные электронные конфигурации (например, $1s, 2s, 3s$ и т. д.) сверх полностью заполненных подоболочек, чем обуславливается периодическая повторяемость химических и оптических свойств атомов,

Т а б л и ц а 27.2

Элемент	<i>K</i>	<i>L</i>		<i>M</i>			<i>N</i>	
	1 <i>s</i>	2 <i>s</i>	2 <i>p</i>	3 <i>s</i>	3 <i>p</i>	3 <i>d</i>	4 <i>s</i>	4 <i>p</i>
1H 2He	1 2	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —
3Li 4Be 5B 6C 7N 8O 9F 10Ne	2 2 2 2 2 2 2 2	1 2 2 2 2 2 2 2	— — 1 2 3 4 5 6	— — — — — — — —	— — — — — — — —	— — — — — — — —	— — — — — — — —	— — — — — — — —
11Na 12Mg 13Al 14Si 15P 16S 17Cl 18Ar	2 2 2 2 2 2 2 2	8 8 8 8 8 8 8 8	— — — — — — — —	1 2 2 2 2 2 2 2	— — 1 2 3 4 5 6	— — — — — — — —	— — — — — — — —	— — — — — — — —
19K 20Ca 21Sc 22Ti 23V 24Cr 25Mn 26Fe 27Co 28Ni	2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	8 8 8 8 8 8 8 8 8 8	— — — — — — — — — —	8 8 8 8 8 8 8 8 8 8	— — 1 2 3 5 6 7 8	1 2 2 2 2 1 2 2 2 2	— — — — — — — — — —	
29Cu 30Zn 31Ga 32Ge 33As 34Se 35Br 36Kr	2 2 2 2 2 2 2 2	8 8 8 8 8 8 8 8	— — — — — — — —	8 8 8 8 8 8 8 8	10 10 10 10 10 10 10 10	1 2 2 2 2 2 2 2	— — 1 2 3 4 5 6	

§ 28. Энергия молекул

Экспериментально установлено, что силы, удерживающие атомы в молекуле, вызваны взаимодействием внешних электронов. Электроны внутренних оболочек при объединении атомов в молекулу остаются в прежних состояниях.

Мы ограничимся рассмотрением двухатомных молекул. Различают два вида связи между атомами в молекуле. Один из них осуществляется в том случае, когда электроны в молекуле можно разделить на две группы, каждая из которых все время находится около одного из ядер. Электроны распределяются так, что около одного из ядер образуется избыток электронов, а около другого — их недостаток. Таким образом, молекула как бы состоит из двух ионов противоположных знаков, притягивающихся друг к другу. Связь этого типа называется гетерополярной (или ионной). Примером молекул с гетерополярной связью могут служить NaCl , KBr , HCl и т. д.

Второй вид связи наблюдается в тех молекулах, в которых часть электронов движется около обоих ядер. Такая связь называется гомеополярной (или ковалентной, или атомной). Она образуется парами электронов с противоположно направленными спинами. Среди молекул этого типа следует различать молекулы с одинаковыми ядрами (H_2 , N_2 , O_2) и молекулы с разными ядрами (например, CN). В молекулах первого рода электроны распределены симметрично. В молекулах второго рода имеется некоторая асимметрия в распределении электронов, благодаря чему молекулы приобретают электрический дипольный момент.

Простейшей молекулой с гомеополярной связью является молекула водорода. В 1927 г. Гайтлер¹⁾ и Лондон²⁾ предприняли успешную попытку квантовомеханического расчета основного состояния молекулы H_2 . Им удалось решить уравнение Шрёдингера для системы, состоящей из двух протонов (ядер атома водорода) и двух электронов. Оказалось, что собственные значения энергии зависят от расстояния между

¹⁾ Вальтер Генрих Гайтлер (1904—1981) — немецкий физик.

²⁾ Фриц Лондон (1900—1954) — немецкий физик.

ядрами R , т. е. $E=E(R)$, причем в случаях параллельной и антипараллельной ориентации спинов электронов характер этой зависимости существенно различен (рис. 28.1). Образование молекулы возможно лишь

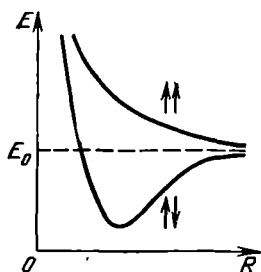


Рис. 28.1. Зависимость энергии E молекулы водорода от расстояния R между ядрами для случаев «параллельной» и «антипараллельной» ориентаций спинов электронов

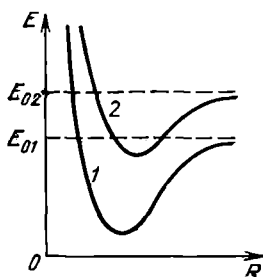


Рис. 28.2. Зависимость энергии E двухатомной молекулы от расстояния R между ядрами для основного (кривая 1) и возбужденного (кривая 2) состояний

при сближении атомов с антипараллельными спинами. Асимптотическое значение E_0 , к которому стремится энергия молекулы при $R \rightarrow \infty$ для обеих изображенных на рисунке кривых, одинаково и равно сумме энергий изолированных атомов.

Аналогично обстоит дело и в случае других двухатомных молекул. Энергия, обусловленная электронной конфигурацией (электронная энергия), имеет минимум при некотором значении R и изображается кривой такого же вида, как для водородной молекулы (см. кривую 1 на рис. 28.2).

Изменение электронной конфигурации молекулы приводит к изменению кривой зависимости электронной энергии от расстояния между ядрами R . Асимптотическое значение энергии также становится иным — равным суммарной энергии изолированных атомов в новом квантовом состоянии (см. кривую 2 на рис. 28.2).

В основном изменение энергетического запаса молекулы происходит, как и в атоме, в результате изменений в электронной конфигурации, образующей периферическую часть молекулы. Однако при заданной

электронной конфигурации ядра молекулы могут различным образом колебаться и вращаться относительно общего центра масс. С этими видами движения связаны запасы колебательной и вращательной энергии, которые должны быть учтены в общем балансе. Введем обозначения:

E_e — энергия, обусловленная электронной конфигурацией (электронная энергия);

E_v — энергия, соответствующая колебаниям молекулы (колебательная, или вибрационная, энергия);

E_r — энергия, связанная с вращением молекулы (вращательная, или ротационная, энергия).

В первом приближении отдельные виды молекулярных движений — движение электронов, колебание и вращение молекулы — можно считать независимыми друг от друга. Поэтому полную энергию молекулы можно представить в виде

$$E = E_e + E_v + E_r.$$

Согласно (20.3) энергия гармонического осциллятора определяется выражением

$$E_v = (v + 1/2) \hbar \omega_v \quad (v = 0, 1, 2, \dots), \quad (28.1)$$

где v — колебательное квантовое число, ω_v — классическая частота осциллятора (в формуле (20.3) эти величины обозначены буквами n и ω). Напомним, что для колебательного квантового числа имеется правило отбора

$$\Delta v = \pm 1 \quad (28.2)$$

(см. (20.7)).

Кривая потенциальной энергии молекулы (см. рис. 28.2) совпадает с параболой только при малых колебаниях. Ангармоничность (отклонения от гармоничности), наступающая при увеличении интенсивности колебаний, приводит к тому, что с увеличением квантового числа v уровни сгущаются, имея своим пределом энергию E_0 диссоциированной молекулы (рис. 28.3). Однако при небольших значениях v можно

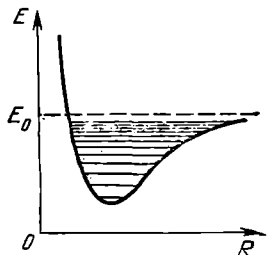


Рис. 28.3. Влияние ангармоничности на колебательные уровни молекулы

с достаточной степенью точности считать, что колебательная энергия молекулы определяется формулой (28.1).

Рассмотрим вращение молекулы. Энергия системы, имеющей момент инерции I и вращающейся

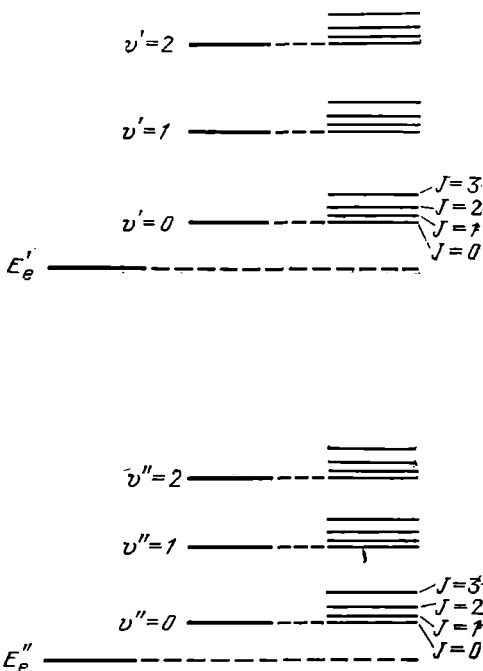


Рис. 28.4. Схема энергетических уровней двухатомной молекулы (приведены только два электронных уровня). Полная совокупность уровней изображена сплошными линиями в правом столбце; первые два столбца лишь поясняют структуру уровней. На рисунке не соблюден масштаб. Чтобы показать правильные пропорции, расстояние между электронными уровнями нужно было бы сделать порядка 20 см

с угловой скоростью ω_r , равна

$$E_r = I\omega_r^2/2 = (I\omega_r)^2/2I = M^2/2I,$$

где $M = I\omega_r$ — момент импульса системы. Согласно (19.2) момент импульса может принимать лишь дискретные значения:

$$M = \hbar \sqrt{J(J+1)} \quad (J=0, 1, 2, \dots)$$

(J — квантовое число момента импульса). Следовательно, вращательная энергия молекулы может иметь только квантованные значения:

$$E_r = \hbar^2 J(J+1)/2I, \quad (28.3)$$

где I — момент инерции молекулы относительно оси, проходящей через ее центр масс, J — вращательное квантовое число, принимающее значения 0, 1, 2 и т. д.

Для вращательного квантового числа имеется правило отбора

$$\Delta J = \pm 1. \quad (28.4)$$

Итак, в соответствии с (28.1) и (28.3) полная энергия молекулы равна

$$E = E_e + (v + 1/2) \hbar \omega_v + \hbar^2 J(J+1)/2I. \quad (28.5)$$

Эксперименты и расчеты показывают, что расстояние между вращательными уровнями ΔE_r значительно меньше расстояния между колебательными уровнями ΔE_v , которое в свою очередь значительно меньше расстояния между электронными уровнями ΔE_e . Следовательно, схема энергетических уровней двухатомной молекулы выглядит так, как изображено на рис. 28.4.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое боровский радиус?
2. Напишите обобщенную формулу Бальмера.
3. Как зависит энергия водородного атома от главного квантового числа n ?
4. Что такое ридберг?
5. Существует ли правило отбора для главного квантового числа n ?
6. Какому правилу отбора подчиняется орбитальное квантовое число l ?
7. Что такое магнетон Бора?
8. В чем заключается эффект Зеемана?

Примеры решения задач

1. Чему равен полный механический момент L , атома, находящегося в состоянии, в котором магнитный момент атома равен нулю, а орбитальное и спинное квантовые числа имеют значения $L = 2$, $S = 3/2$?

Решение. Магнитный момент атома определяется формулой $\mu = \mu_B g \sqrt{J(J+1)}$ (J — квантовое число полного механического момента атома, g — множитель Ланде). Из этой формулы следует, что магнитный момент атома может быть равным нулю в двух случаях: если $J = 0$ или если $g = 0$.

При $L = 2$ и $S = 3/2$ квантовое число J не может быть равным нулю (его минимальное значение в этом случае равно $1/2$). Значит, в данном состоянии равен нулю множитель g . Подставив в выражение для g значения L и S и приравняв это выражение нулю, придем к уравнению

$$g = 1 + \frac{J(J+1) + (3/2)(5/2) - 2 \cdot 3}{2J(J+1)} = 0,$$

из которого вытекает, что $J = 1/2$. Следовательно,

$$L_J = \hbar \sqrt{J(J+1)} = \hbar \sqrt{(1/2)(3/2)} = \hbar \sqrt{3/4}.$$

2. Валентный электрон атома натрия находится в состоянии с $n = 4$. Значения остальных квантовых чисел электрона таковы, что атом имеет наибольшее возможное значение механического момента L_J . Определить магнитный момент μ атома в этом состоянии.

Решение. Электроны, кроме валентного, образуют заполненные оболочки, вследствие чего вклада в числа L и S не вносят. При $n = 4$ наибольшее значение квантового числа l равно трем. При $L = l = 3$ и $S = s = 1/2$ максимальное значение J равно $7/2$. Подставив значения квантовых чисел в выражение для множителя Ланде, получим

$$g = 1 + \frac{(7/2)(9/2) + (1/2)(3/2) - 3 \cdot 4}{2(7/2)(9/2)} = 8/7.$$

Следовательно, магнитный момент атома равен

$$\mu = \mu_B g \sqrt{J(J+1)} = \mu_B \cdot (8/7) \sqrt{(7/2)(9/2)} = \mu_B \cdot (4/7) \sqrt{63}.$$

Глава 6. ИЗЛУЧЕНИЕ И СПЕКТРЫ

§ 29. Спектры атомов и молекул

Излучение не взаимодействующих друг с другом атомов состоит из отдельных спектральных линий. В соответствии с этим спектр испускания атомов называется линейчатым. Простейший линейчатый спектр — спектр атома водорода — приведен на

рис. 22.1. Спектры других элементов оказываются более сложными (см., например, спектр, показанный на рис. 29.1). Однако и в этом случае спектральные линии располагаются не беспорядочно, а объединяются в серии.

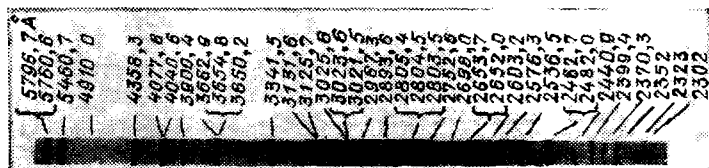


Рис. 29.1. Спектр испускания паров ртути. Длины волн указаны в ангстремах ($1 \text{ Å} = 0,1 \text{ нм}$)

В отличие от линейчатых спектров атомов молекулярные спектры при наблюдении в прибор средней разрешающей силы представляются состоящими из полос (рис. 29.2). При применении приборов высокой разрешающей силы обнаруживается, что полосы

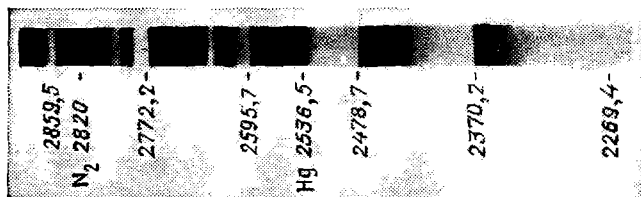


Рис. 29.2. Участок спектра, получающегося при тлеющем разряде в воздухе. Длины волн даны в ангстремах

состоят из большого числа тесно расположенных линий (рис. 29.3).

В соответствии с их характером спектры молекул носят название полосатых спектров. В зависимости от того, изменение каких видов энергии (электронной, колебательной или вращательной) обуславливает испускание молекулой фотона, различают три вида полос: 1) вращательные, 2) колебательно-вращательные и 3) электронно-колебательные. Полосы на рис. 29.2 принадлежат к

электронно-колебательному типу. Для полос этого типа характерно наличие резкого края, называемого кантом полосы. Другой край такой полосы оказывается размытым. Кант бывает обусловлен сгущением

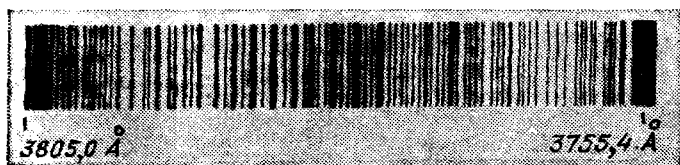


Рис. 29.3. Тонкая структура одной из полос спектра молекул азота

линий, образующих полосу. У вращательных и колебательно-вращательных полос канта нет.

Мы ограничимся рассмотрением вращательных и колебательно-вращательных спектров двухатомных молекул. Энергия таких молекул складывается из электронной, колебательной и вращательной энергий (см. формулу (28.5)). В основном состоянии молекулы все три вида энергии имеют минимальное значение. При сообщении молекуле достаточного количества энергии она переходит в возбужденное состояние и затем, совершая разрешенный правилами отбора переход в одно из более низких энергетических состояний, излучает фотон:

$$\hbar\omega = \Delta E_e + \Delta E_v + \Delta E_r = E'_e - E''_e + (v' + 1/2) \hbar\omega'_v - \\ - (v'' + 1/2) \hbar\omega''_v + \frac{\hbar^2 J' (J' + 1)}{2I'} - \frac{\hbar^2 J'' (J'' + 1)}{2I''}$$

(надо иметь в виду, что как I , так и ω_v отличаются для различных электронных конфигураций молекулы).

В предыдущем параграфе было указано, что

$$\Delta E_e \gg \Delta E_v \gg \Delta E_r.$$

Поэтому при слабых возбуждениях изменяется только E_r , при более сильных — E_v и лишь при еще более сильных возбуждениях изменяется электронная конфигурация молекулы, т. е. E_e .

Вращательные полосы. Наименьшей энергией обладают фотоны, соответствующие переходам молеку-

лы из одного вращательного состояния в другое (электронная конфигурация и энергия колебания при этом не изменяются):

$$\hbar\omega = \Delta E_r = \frac{\hbar^2 J' (J' + 1)}{2I} - \frac{\hbar^2 J'' (J'' + 1)}{2I}.$$

Возможные изменения квантового числа J ограничены правилом отбора (28.4). Поэтому частоты линий, испускаемых при переходах между вращательными уровнями, могут иметь значения:

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{\Delta E_r}{\hbar} = B[(J+1)(J+2) - J(J+1)] = \\ &= 2B(J+1) = \omega_1(J+1), \end{aligned}$$

где J — квантовое число уровня, на который совершается переход (оно может иметь следующие значения: 0, 1, 2, ...), а

$$B = \hbar/2I. \quad (29.1)$$

На рис. 29.4 показана схема возникновения вращательной полосы. Вращательный спектр состоит из

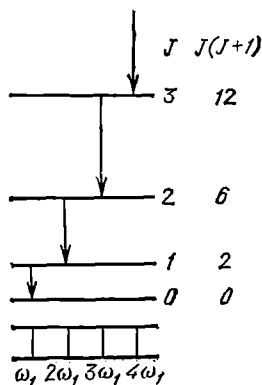


Рис. 29.4. Схема возникновения вращательной полосы

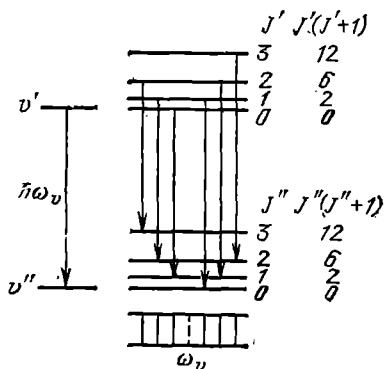


Рис. 29.5. Схема возникновения колебательно-вращательной полосы

ряда равноотстоящих линий, расположенных в очень далекой инфракрасной области. Измерив расстояние между линиями $\Delta\omega = \omega_1$, можно определить константу (29.1) и найти момент инерции молекулы. Затем, зная массы ядер, можно вычислить равновесное расстояние между ними R_0 в двухатомной молекуле,

Расстояние между линиями $\Delta\omega$ бывает порядка 10^{13} с^{-1} , так что для моментов инерции молекул получаются значения порядка $10^{-47} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Например, для молекулы HCl $I = 2,71 \cdot 10^{-47} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, что соответствует $R_0 = 0,129 \text{ нм}$.

Колебательно-вращательные полосы. В случае, когда при переходе изменяется и колебательное, и вращательное состояние молекулы (рис. 29.5), энергия излучаемого фотона будет равна

$$\hbar\omega = \Delta E_v + \Delta E_r = \hbar\omega_v(v' + 1/2) - \hbar\omega_v(v'' + 1/2) + \\ + \hbar^2 J'(J' + 1)/2I - \hbar^2 J''(J'' + 1)/2I.$$

Для квантового числа v действует правило отбора (28.2), для J — правило (28.4).

Поскольку $\Delta E_v \gg \Delta E_r$, испускание фотона может наблюдаться не только при $J' > J''$, но и при $J' < J''$. В случае, если $J' > J''$, частоты фотонов определяются формулой

$$\omega = \omega_v + B[(J + 1)(J + 2) - J(J + 1)] = \\ = \omega_v + 2B(J + 1) = \omega_v + 2Bk \quad (k = 1, 2, 3, \dots),$$

где J — вращательное квантовое число нижнего уровня, которое может принимать значения: $0, 1, 2, \dots$; B — величина (29.1). Если $J' < J''$, формула для частоты фотонов имеет вид

$$\omega = \omega_v + B[(J - 1)J - J(J + 1)] = \omega_v - 2BJ = \omega_v - 2Bk \\ (k = 1, 2, 3, \dots),$$

где J — вращательное квантовое число нижнего уровня, которое может принимать значения: $1, 2, \dots$ (в этом случае $J'' = J$ не может иметь значения 0 , так как тогда J' равнялось бы -1).

Оба случая можно охватить одной формулой:

$$\omega = \omega_v \pm 2Bk = \omega_v \pm \omega_1 k \quad (k = 1, 2, 3, \dots).$$

Совокупность линий с частотами, определяемыми этой формулой, называется колебательно-вращательной полосой. Колебательная часть частоты ω_v определяет спектральную область, в которой располагается полоса; вращательная часть $\pm \omega_1 k$ определяет тонкую структуру полосы, т. е. расщепление отдельных линий. Область, в которой располагаются ко-

лебательно-вращательные полосы, простирается примерно от 800 до 5000 нм.

На рис. 29.5 видно, что колебательно-вращательная полоса состоит из симметричных относительно ω_0 линий, отстоящих друг от друга на $\Delta\omega = \omega_1$. Только в середине полосы расстояние в два раза больше, так как линия с частотой ω_0 не возникает.

Расстояние между компонентами колебательно-вращательной полосы связано с моментом инерции молекулы таким же соотношением, как и в случае вращательной полосы, так что, измерив это расстояние, можно найти момент инерции молекулы.

Заметим, что в полном соответствии с выводами теории вращательные и колебательно-вращательные спектры наблюдаются на опыте только для несимметричных двухатомных молекул (т. е. молекул, образованных двумя различными атомами). У симметричных молекул дипольный момент равен нулю, что приводит к запрету вращательных и колебательно-вращательных переходов. Электронно-колебательные спектры наблюдаются как для несимметричных, так и для симметричных молекул.

§ 30. Рентгеновские спектры

Кроме рассмотренного в § 7 тормозного рентгеновского излучения существует еще одно рентгеновское излучение, называемое характеристическим. При не слишком больших энергиях бомбардирующих антикатод электронов наблюдается лишь тормозное излучение, обладающее сплошным спектром и не зависящее от материала антикатада. Когда энергия бомбардирующих электронов становится достаточной для вырывания электронов из внутренних оболочек атома, на фоне тормозного излучения появляются резкие линии характеристического излучения. Частоты этих линий зависят от природы вещества, из которого изготовлен антикатод (по этой причине излучение и называется характеристическим).

Рентгеновские спектры отличаются заметной простотой. Они состоят из нескольких серий, обозначаемых буквами K , L , M , N и O . Каждая серия насчитывает небольшое число линий, обозначаемых в порядке возрастания частоты индексами α , β , γ , (K_α , K_β ,

$K_{\gamma}, \dots; L_{\alpha}, L_{\beta}, L_{\gamma}, \dots$ и т. д.). Спектры разных элементов имеют сходный характер. При увеличении атомного номера Z весь рентгеновский спектр лишь смещается в коротковолновую часть, не меняя своей

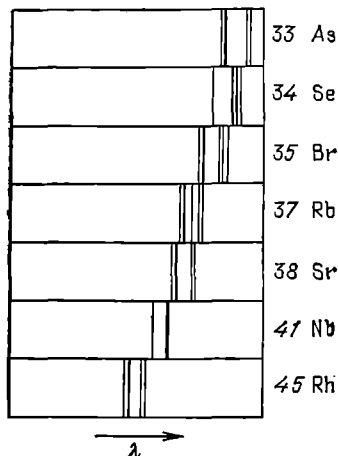


Рис. 30.1. Рентгеновские спектры различных элементов

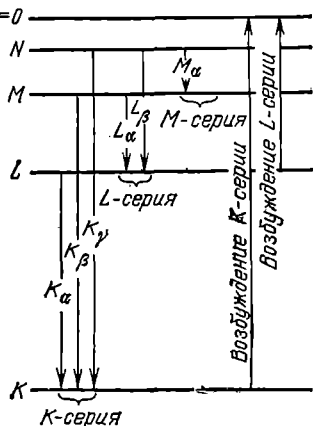


Рис. 30.2. Схема возникновения различных серий рентгеновского спектра

структуры (рис. 30.1). Это объясняется тем, что рентгеновские спектры возникают при переходах электронов во внутренних частях атомов, которые (части) имеют сходное строение.

Схема возникновения рентгеновских спектров дана на рис. 30.2. Возбуждение атома состоит в удалении одного из внутренних электронов. Если вырывается один из двух электронов K -слоя, то освободившееся место может быть занято электроном из какого-либо внешнего слоя (L , M , N и т. д.). При этом возникает K -серия. Аналогично возникают и другие серии. Серия K обязательно сопровождается остальными сериями, так как при испускании ее линий освобождаются уровни в слоях L , M и т. д., которые будут в свою очередь заполняться электронами из более высоких слоев.

В 1913 г. Мозли¹⁾ установил закон, связывающий частоты линий рентгеновского спектра с атомным но-

¹⁾ Генри Гвиш Джефрис Мозли (1887—1915) — английский физик.

мером Z испускающего их элемента. Согласно этому закону частоты линии K_α можно представить формулой

$$\omega_{K_\alpha} = R(Z - 1)^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right)$$

(R — постоянная Ридберга); линии K_β — формулой

$$\omega_{K_\beta} = R(Z - 1)^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{3^2} \right);$$

линии L_α — формулой

$$\omega_{L_\alpha} = R(Z - 7,5)^2 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right)$$

и т. д. Все эти формулы имеют вид

$$\omega = R(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right). \quad (30.1)$$

Закон Мозли обычно выражают формулой

$$\sqrt{\omega} = C(Z - \sigma) \quad (30.2)$$

(C и σ — константы, имеющие свое значение для каждой линии) и формулируют следующим образом: *корень квадратный из частоты является линейной функцией атомного номера Z .*

На рис. 30.3 изображены построенные по экспериментальным точкам графики зависимости $\sqrt{\omega}$ от Z для линий K_α и L_α . По этим графикам можно судить, насколько точно выполняется закон Мозли. При внимательном рассмотрении можно заметить, что график для линии K_α имеет не вполне прямолинейный характер.

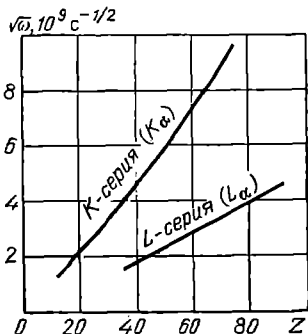


Рис. 30.3. Зависимость корня из частоты линий K_α и L_α от атомного номера элемента

Закон Мозли позволяет по измеренной длине волны рентгеновских линий точно установить атомный номер данного элемента; он сыграл большую роль при размещении элементов в периодической системе.

Мозли дал простое теоретическое объяснение найденного им закона. Он заметил, что линии с частотами,

определяемыми формулой (30.1), совпадают с линиями, испускаемыми при переходе электрона, находящегося в поле заряда $(Z - \sigma)e$ с уровня с номером n_2 на уровень с номером n_1 . Смысл константы σ легко понять: электроны, совершающие переходы при испускании рентгеновских лучей, находятся под воздействием ядра, притяжение которого несколько ослаблено действием остальных окружающих его электронов. Это экранирующее действие и находит свое выражение в необходимости вычесть из Z некоторую величину σ .

Заметим, что формула (30.1) основана на допущении, что постоянная экранирования σ для обоих уровней имеет одинаковое значение. На самом же деле экранирование, например, для K -уровня будет слабее, чем для L -уровня, потому что электрон, находящийся в L -оболочке, экранируют оба электрона K -оболочки и, кроме того, частичное участие в экранировании принимают остальные электроны L -оболочки, в то время как для электронов K -оболочки экранирование осуществляется только одним K -электроном. Более строго формулу (30.1) следует писать в виде

$$\omega = R \left[\frac{(Z - \sigma_1)^2}{n_1^2} - \frac{(Z - \sigma_2)^2}{n_2^2} \right].$$

§ 31. Комбинационное рассеяние света

В 1928 г. Л. И. Мандельштам и Ландсберг¹⁾ и одновременно Раман²⁾ и Кришнан³⁾ открыли явление, заключающееся в том, что в спектре рассеяния, возникающем при прохождении света через газы, жидкости или прозрачные кристаллические тела, помимо несмещенной линии содержатся новые линии, частоты которых ω представляют собой комбинацию частот падающего света ω_0 и частот ω_i колебательных или вращательных переходов рассеивающих молекул:

$$\omega = \omega_0 \pm \omega_i. \quad (31.1)$$

¹⁾ Григорий Самуилович Ландсберг (1890—1957) — советский физик.

²⁾ Чандрасекхара Венката Раман (1888—1970) — индийский физик.

³⁾ Рашал Сапгамесмарп Кришнан (род. 1911) — индийский физик.

Это явление получило название комбинационного рассеяния света¹⁾.

На рис. 31.1 приведен пример спектра комбинационного рассеяния. На рисунке видно, что спектр состоит из несмещенной линии ω_0 , симметрично относительно которой располагается ряд спутников. Каждому «красному» спутнику (т. е. спутнику, смещенному

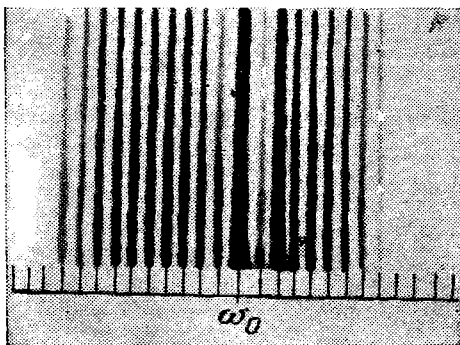


Рис. 31.1. Спектр комбинационного рассеяния кислорода, возбуждаемый линией ртути с длиной волны 253,65 нм (частота ω_0). На линию комбинационного рассеяния, расположенную справа от линии источника, наложилась линия ртути с длиной волны 253,48 нм (менее интенсивная, чем линия с $\lambda = 253,65$ нм), вследствие чего интенсивность этой линии получилась больше, чем других

в сторону больших длин волн) с частотой $\omega_0 - \omega_i$ соответствует «фиолетовый» спутник с частотой $\omega_0 + \omega_i$. При обычных температурах интенсивность фиолетовых спутников значительно меньше, чем красных. С повышением температуры интенсивность фиолетовых спутников быстро растет.

Согласно квантовой теории процесс рассеяния света можно рассматривать как неупругое соударение фотонов с молекулами. При соударении фотон может отдать молекуле или получить от нее только такие количества энергии, которые равны разностям двух ее энергетических уровней. Если при столкновении с

¹⁾ В зарубежной литературе это явление обычно называют эффектом Рамана.

фотоном молекула переходит из состояния с энергией E' в состояние с энергией E'' ($E'' > E'$), то энергия фотона после рассеяния станет равной $\hbar\omega_0 - \Delta E$, где $\Delta E = E'' - E'$. Соответственно частота фотона уменьшится на $\omega_1 = \Delta E/\hbar$ — возникает красный спутник. Если первоначально молекула находилась в состоянии с энергией E'' , она может перейти в результате соударения с фотоном в состояние с энергией E' , отдав избыток энергии $\Delta E = E'' - E'$ фотону. В результате энергия фотона станет равной $\hbar\omega_0 + \Delta E$ и частота увеличится на ω_1 . Рассеяние фотона $\hbar\omega_0$ может сопровождаться переходами молекулы между различными вращательными или колебательными уровнями E' , E'' , E''' и т. д. В итоге возникает ряд симметрично расположенных спутников.

При обычных температурах число молекул, находящихся в основном состоянии, намного превосходит число молекул, находящихся в возбужденных состояниях. Поэтому столкновения, сопровождающиеся уменьшением энергии молекулы, происходят гораздо реже, чем переходы, сопровождающиеся увеличением энергии. Этим объясняется малая интенсивность фиолетовых спутников по сравнению с красными. При повышении температуры число возбужденных молекул быстро растет, что приводит к увеличению интенсивности фиолетовых спутников.

Исследование комбинационного рассеяния дает много сведений о строении молекул. С помощью этого метода определяются собственные частоты колебаний молекулы; он позволяет также судить о характере симметрии молекулы. Спектры комбинационного рассеяния настолько характерны для молекул, что с их помощью осуществляют анализ сложных молекулярных смесей, особенно органических молекул, анализ которых химическими методами весьма затруднен или даже невозможен.

§ 32. Вынужденное излучение

До сих пор мы рассматривали только два вида переходов атомов между энергетическими уровнями: спонтанные (самопроизвольные) переходы с более высоких на более низкие уровни и происходящие под действием излучения (вынужденные) переходы

ды с более низких на более высокие уровни. Переходы первого вида приводят к спонтанному испусканию атомами фотонов, переходы второго вида обуславливают поглощение излучения веществом.

В 1916 г. Эйнштейн обратил внимание на то, что двух указанных видов излучения недостаточно для объяснения существования состояний равновесия между излучением и веществом. Действительно, вероятность спонтанных переходов определяется лишь внутренними свойствами атомов и, следовательно, не может зависеть от интенсивности падающего излучения, в то время как вероятность «поглощательных» переходов зависит как от свойств атомов, так и от интенсивности падающего излучения. Для возможности установления равновесия при произвольной интенсивности падающего излучения необходимо существование «испускательных» переходов, вероятность которых возрастала бы с увеличением интенсивности излучения, т. е. «испускательных» переходов, вызываемых излучением. Возникающее в результате таких переходов излучение называется вынужденным или индуцированным.

Вынужденное излучение обладает весьма важными свойствами. Направление его распространения в точности совпадает с направлением распространения вынуждающего излучения, т. е. внешнего излучения, вызвавшего переход. То же самое относится к частоте, фазе и поляризации вынужденного и вынуждающего излучений. Следовательно, вынужденное и вынуждающее излучения оказываются строго когерентными. Эта особенность вынужденного излучения лежит в основе действия усилителей и генераторов света, называемых лазерами (см. следующий параграф).

Согласно принципу детального равновесия, в равновесной термодинамической системе каждый микроскопический процесс сопровождается обратным ему процессом, причем вероятность обоих процессов одинакова. Основываясь на этом принципе, Эйнштейн постулировал, что вероятность вынужденных переходов, сопровождающихся излучением, должна быть равна вероятности вынужденных переходов, сопровождающихся поглощением света. Таким образом, вынужденные переходы могут с равной вероят-

ностью происходить как в одном, так и в другом направлении.

Пусть P_{nm} — вероятность вынужденного перехода атома в единицу времени с энергетического уровня E_n на уровень E_m , а P_{mn} — вероятность обратного перехода. Выше было указано, что при одинаковой интенсивности излучения $P_{nm} = P_{mn}$. Вероятность вынужденных переходов пропорциональна плотности энергии u_ω вынуждающего переход электромагнитного поля, приходящейся на частоту ω , соответствующую данному переходу ($\omega = (E_n - E_m)/\hbar$). Обозначив коэффициент пропорциональности буквой B , получим

$$P_{nm} = B_{nm}u_\omega, \quad P_{mn} = B_{mn}u_\omega. \quad (32.1)$$

Величины B_{nm} и B_{mn} называются коэффициентами Эйнштейна. Поскольку $P_{nm} = P_{mn}$, имеет место равенство: $B_{nm} = B_{mn}$.

Основываясь на равновероятности вынужденных переходов $n \rightarrow m$ и $m \rightarrow n$, Эйнштейн дал простой вывод формулы Планка. Равновесие между веществом и излучением будет достигнуто при условии, что число атомов N_{nm} , совершающих в единицу времени переход из состояния n в состояние m , будет равно числу атомов N_{mn} , совершающих переход в обратном направлении. Допустим, что $E_n > E_m$. Тогда переходы $m \rightarrow n$ смогут происходить только под воздействием излучения, переходы же $n \rightarrow m$ будут совершаться как вынужденно, так и спонтанно. Следовательно,

$$N_{mn} = N_{mn}^{(\text{вын})}, \quad N_{nm} = N_{nm}^{(\text{вын})} + N_{nm}^{(\text{сп})}.$$

Условие равновесия имеет вид

$$N_{mn}^{(\text{вын})} = N_{nm}^{(\text{вын})} + N_{nm}^{(\text{сп})}. \quad (32.2)$$

Согласно (32.1)

$$N_{mn}^{(\text{вын})} = P_{mn}N_m = B_{mn}u_\omega N_m, \quad (32.3)$$

$$N_{nm}^{(\text{вын})} = P_{nm}N_n = B_{nm}u_\omega N_n \quad (32.4)$$

(N_m и N_n — числа атомов в состояниях m и n).

Обозначим вероятность спонтанного перехода атома в единицу времени из состояния n в состояние m через A_{nm} . Тогда число атомов, совершающих в единицу времени спонтанный переход $n \rightarrow m$, определится выражением

$$N_{nm}^{(\text{сп})} = A_{nm}N_n. \quad (32.5)$$

Подстановка выражений (32.3) — (32.5) в соотношение (32.2) приводит к равенству

$$B_{mn}u_{\omega}N_m = B_{nm}u_{\omega}N_n + A_{nm}N_n.$$

Определяемое этим равенством значение u_{ω} представляет собой равновесное значение этой величины, т. е. $u(\omega, T)$. Таким образом,

$$u(\omega, T) = \frac{A_{nm}N_n}{B_{mn}N_m - B_{nm}N_n} = \frac{A_{nm}}{B_{nm}} \frac{1}{N_m/N_n - 1}$$

(мы учли, что $B_{mn} = B_{nm}$)

Равновесное распределение атомов по состояниям с различной энергией определяется законом Больцмана, согласно которому

$$N_m/N_n = \exp[(E_n - E_m)/kT] = \exp(\hbar\omega/kT)$$

(см. (5.17)). Следовательно, мы приходим к формуле

$$u(\omega, T) = \frac{A_{nm}}{B_{nm}} \frac{1}{\exp(\hbar\omega/kT) - 1}. \quad (32.6)$$

Для определения множителя A_{nm}/B_{nm} Эйнштейн воспользовался тем, что при малых частотах выражение (32.6) должно переходить в формулу Рэля — Джинса. В случае $\hbar\omega \ll kT$ можно произвести замену $\exp(\hbar\omega/kT) \approx 1 + \hbar\omega/kT$, в результате чего (32.6) принимает вид

$$u(\omega, T) = \frac{A_{nm}}{B_{nm}} \frac{kT}{\hbar\omega}.$$

Сравнение с формулой (5.10) дает для A_{nm}/B_{nm} значение

$$\frac{A_{nm}}{B_{nm}} = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3}.$$

Подстановка этого значения в (32.6) приводит к формуле Планка (см. (5.22)).

§ 33. Лазеры

В 50-х годах были созданы устройства, при прохождении через которые электромагнитные волны усиливаются за счет открытого Эйнштейном вынужденного излучения (см. предыдущий параграф). В 1953 г.

Басовым¹⁾ и Прохоровым²⁾ и независимо от них Таунсом³⁾ были созданы первые молекулярные генераторы, работающие в диапазоне сантиметровых волн и получившие название мазеров. (В 1964 г. Басову, Прохорову и Таунсу была за эти работы присуждена Нобелевская премия.) Слово «мазер» происходит от первых букв английского названия Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation (усиление микроволн с помощью вынужденного излучения).

В 1960 г. Мейманом⁴⁾ был создан первый аналогичный прибор, работающий в оптическом диапазоне, — лазер (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation — усиление света с помощью вынужденного излучения). Лазеры называют также оптическими квантовыми генераторами.

В предыдущем параграфе мы выяснили, что воздействующий на вещество свет частоты ω , совпадающей с одной из частот $(E_n - E_m)/\hbar$ атомов вещества ($E_n > E_m$), может вызывать два процесса: 1) вынужденный переход $m \rightarrow n$ и 2) вынужденный переход $n \rightarrow m$. Первый процесс приводит к поглощению света и ослаблению падающего пучка, второй — к увеличению интенсивности падающего пучка. Результирующее изменение интенсивности светового пучка зависит от того, какой из двух процессов преобладает.

В случае термодинамического равновесия распределение атомов по различным энергетическим состояниям определяется законом Больцмана:

$$N_i = \frac{N \exp(-E_i/kT)}{\sum_j \exp(-E_j/kT)} = C \exp(E_i/kT), \quad (33.1)$$

где N — полное число атомов, N_i — число атомов, находящихся при температуре T в состоянии с энергией E_i (для простоты мы предположили, что все энергетические уровни не являются вырожденными). Из этой формулы следует, что с увеличением энергии состоя-

¹⁾ Николай Геннадиевич Басов (род. 1922) — советский физик.

²⁾ Александр Михайлович Прохоров (род. 1916) — советский физик.

³⁾ Чарлз Хард Таунс (род. 1915) — американский физик.

⁴⁾ Теодор Гарольд Мейман (род. 1927) — американский физик.

ния населенность уровня, т. е. количество атомов в данном состоянии, уменьшается. Число переходов между двумя уровнями пропорционально населенности исходного уровня. Следовательно, в системе атомов, находящейся в термодинамическом равновесии, поглощение падающей световой волны будет преобладать над вынужденным излучением, так что падающая волна при прохождении через вещество ослабляется.

Для того чтобы получить усиление падающей волны, нужно обратить населенность энергетических уровней, т. е. сделать так, чтобы в состоянии с большей энергией находилось большее число атомов, чем в состоянии с меньшей энергией. В этом случае говорят, что данная совокупность атомов имеет инверсную населенность.

Изменение интенсивности света при прохождении через поглощающую среду описывается формулой

$$I = I_0 \exp(-\alpha l). \quad (33.2)$$

В веществе с инверсной населенностью энергетических уровней вынужденное излучение может превысить поглощение света атомами, вследствие чего падающий пучок света при прохождении через вещество будет усиливаться. В случае усиления падающего пучка явление протекает так, как если бы коэффициент поглощения α в формуле (33.2) стал отрицательным. Соответственно совокупность атомов с инверсной населенностью можно рассматривать как среду с отрицательным коэффициентом поглощения.

Создание лазера стало возможным после того, как были найдены способы осуществления инверсной населенности уровней в некоторых веществах. В построенном Мейманом первом лазере рабочим телом был цилиндр из розового рубина. Диаметр стержня был порядка 1 см, длина — около 5 см. Торцы рубинового стержня были тщательно отполированы и представляли собой строго параллельные друг другу зеркала. Один торец покрывался плотным непрозрачным слоем серебра, другой торец покрывался таким слоем серебра, который пропускал около 8 % упавшей на него энергии.

Рубин представляет собой окись алюминия (Al_2O_3), в которой некоторые из атомов алюминия замещены атомами хрома. При поглощении света ионы хрома

Cr^{3+} (в таком виде хром находится в кристалле рубина) переходят в возбужденное состояние. Обратный переход в основное состояние происходит в два этапа. На первом этапе возбужденные ионы отдают часть своей энергии кристаллической решетке и переходят в метастабильное состояние. Переход из метастабильного состояния в основное запрещен правилами отбора. Поэтому среднее время жизни иона в метастабильном состоянии ($\sim 10^{-3}$ с) примерно в 10^5 раз превосходит время жизни в обычном возбужденном состоянии. На втором этапе ионы из метастабильного состояния переходят в основное¹⁾, излучая фотон с $\lambda = 694,3$ нм. Под действием фотонов такой же длины волны, т. е. при вынужденном излучении, переход ионом хрома из метастабильного состояния в основное происходит значительно быстрее, чем при спонтанном излучении.

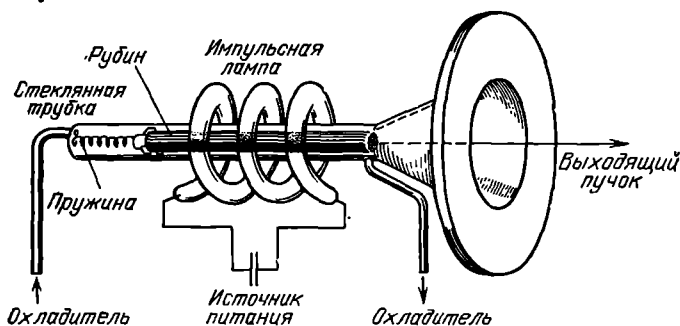


Рис. 33.1. Схема лазера на рубине

В лазере рубин освещается импульсной ксеноновой лампой (рис. 33.1), которая дает свет с широкой полосой частот. При достаточной мощности лампы большинство ионов хрома переводится в возбужденное состояние. Процесс сообщения рабочему телу лазера энергии для перевода атомов в возбужденное состояние называется накачкой. На рис. 33.2 дана схема уровней иона хрома Cr^{3+} (уровень 3 представляет собой полосу, образованную совокупностью близко расположенных уровней).

¹⁾ Правила отбора не являются абсолютно строгими. Вероятность запрещенных переходов значительно меньше, чем разрешенных, но все же отлична от нуля.

Возбуждение ионов за счет накачки изображено стрелкой W_{13} . Время жизни уровня 3 очень мало ($\sim 10^{-8}$ с). В течение этого времени некоторые ионы перейдут спонтанно из полосы 3 на основной уровень 1. Такие переходы показаны стрелкой A_{31} . Однако большинство ионов перейдет на метастабильный уровень 2 (вероятность перехода, изображенного стрелкой S_{32} , значительно больше, чем перехода A_{31}). При

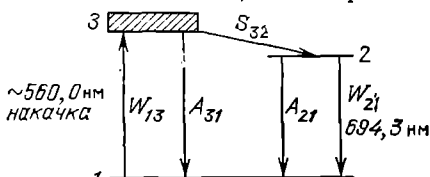


Рис. 33.2. Схема уровней иона хрома

достаточной мощности накачки число ионов хрома, находящихся на уровне 2, становится больше числа ионов на уровне 1. Следовательно, возникает инверсия населенностей уровней 1 и 2.

Стрелка A_{21} изображает спонтанный переход с метастабильного уровня на основной. Излученный при этом фотон может вызвать вынужденное испускание дополнительных фотонов (переход W_{21}), которые в свою очередь вызовут вынужденное излучение, и т. д. В результате образуется каскад фотонов. Напомним, что фотоны, возникающие при вынужденном излучении, летят в том же направлении, что и падающие фотоны. Фотоны, направления движения которых образуют малые углы с осью кристаллического стержня, испытывают многократные отражения от торцов образца. Поэтому путь их в кристалле будет очень большим, так что каскады фотонов в направлении оси получают особенное развитие. Фотоны, испущенные спонтанно в других направлениях, выходят из кристалла через его боковую поверхность.

Процесс образования каскада изображен схематически на рис. 33.3. До вспышки лампы ионы хрома находятся в основном состоянии (черные кружки на рис. 33.3а). Свет накачки (сплошные стрелки на рис. 33.3б) переводит большинство ионов в возбужденное состояние (светлые кружки). Каскад начинает развиваться, когда возбужденные ионы спонтанно излучают фотоны (штриховые стрелки на рис. 33.3в) в

направлении, параллельном оси кристалла (фотоны, испущенные по другим направлениям, выходят из кристалла). Фотоны размножаются за счет вынужденного излучения. Этот процесс развивается (рис. 33.3г и д), так как фотоны многократно проходят вдоль кристалла, отражаясь от его торцов. При каждом отражении

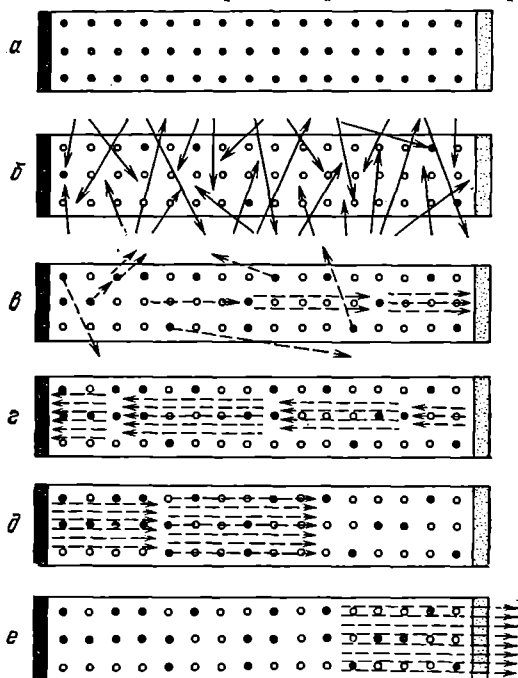


Рис. 33.3. Процесс образования каскада фотонов

от частично прозрачного торца небольшая доля (8 %) светового пучка выходит из кристалла. Поэтому после каждого акта накачки возникает вспышка лазерного излучения, состоящая из ряда импульсов, общая продолжительность которых равна нескольким микросекундам. Лазеры на рубине работают в импульсном режиме с частотой порядка нескольких вспышек в минуту.

В 1961 г. Джаваном¹⁾ был создан первый газовый

¹⁾ Али Джаван (род. 1926) — американский физик. Родился в Тегеране. В 1948 г. переехал в США.

лазер, работающий на смеси гелия и неона. В 1963 г. были созданы первые полупроводниковые лазеры. В настоящее время список лазерных материалов насчитывает много десятков твердых, жидких и газообразных веществ. Одни лазеры работают в импульсном, другие — в непрерывном режиме.

Излучение лазеров отличается рядом замечательных особенностей. Для него характерны: 1) строгая монохроматичность ($\Delta\lambda \sim 0,01$ нм); 2) высокая временная и пространственная когерентность; 3) большая интенсивность и 4) узость пучка. Угловая ширина генерируемого лазером светового пучка столь мала, что, используя телескопическую фокусировку, можно получить на лунной поверхности пятно света диаметром всего лишь 3 км. Большая мощность и узость пучка позволяют при фокусировке с помощью линзы получить плотность потока энергии, в 1000 раз превышающую плотность потока энергии, которую можно получить фокусировкой солнечного света.

Лазеры имеют многочисленные применения. Они используются в технике для сварки, резки и плавления металлов; в медицине — как бескровные скальпели, при лечении глазных и кожных болезней. Лазерная локация позволила измерить скорость вращения планет, уточнить характеристики движения Луны и планеты Венера. Лазеры используются также в различных приборах для тонких физических исследований. Наконец, применяя лазеры для нагрева плазмы, пытаются с их помощью решить проблему управляемого термоядерного синтеза.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой характер имеют атомные спектры?
2. Как выглядят при небольшом разрешении молекулярные спектры?
3. Какой вид имеют характеристические рентгеновские спектры?
4. Какое явление называется комбинационным рассеянием света?
5. Какое излучение называется вынужденным?
6. Что такое инверсная населенность энергетических уровней?

Примеры решения задач

1. Основываясь на том, что энергия ионизации водородного атома $E_i = 13,6$ эВ, определить длину волны λ_1 первой линии и длину волны λ_∞ границы серии Лаймана.

Решение. Умножив обобщенную формулу Бальмера на $\hbar$, получим энергию фотона

$$\hbar\omega = \hbar R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) = E_n - E_m \quad (1)$$

испускаемого атомом водорода при переходе из n -го состояния в m -е. Из (1) следует, что энергия атома, находящегося в состоянии с квантовым числом n ,

$$E_n = -\frac{\hbar R}{n^2}.$$

Энергия ионизации равна энергии основного состояния (т. е. состояния с $n = 1$), взятой с обратным знаком: $E_i = -E_1 = \hbar R$. Отсюда $R = E_i/\hbar$. Подставив это значение R в обобщенную формулу Бальмера и приняв во внимание, что в случае серии Лаймана $m = 1$, получим частоты линий серии Лаймана:

$$\omega = \frac{E_i}{\hbar} \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 2, 3, \dots).$$

Для первой линии $n = 2$, для границы серии $n = \infty$. Следовательно, $\omega_1 = (E_i/\hbar) \cdot 3/4$, $\omega_\infty = (E_i/\hbar)$. Поскольку частота связана с длиной волны соотношением $\lambda = 2\pi c/\omega$,

$$\lambda_1 = \frac{2\pi\hbar c}{E_i} \cdot \frac{4}{3} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1,055 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{13,6 \cdot 1,60 \cdot 10^{-19}} \cdot \frac{4}{3} = 122 \text{ нм},$$

$$\lambda_\infty = \frac{2\pi\hbar c}{E_i} = 91 \text{ нм}.$$

2. Длина волны линии K_α ванадия ($Z = 23$) равна $\lambda_1 = 0,251$ нм. Определить, какому элементу принадлежит линия K_α с длиной волны $\lambda_2 = 0,154$ нм.

Решение. Согласно закону Мозли частота ω линии K_α связана с атомным номером Z химического элемента соотношением

$$\sqrt{\omega} = C(Z - 1).$$

Длина волны обратна частоте линии. Следовательно, можно написать, что

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \left(\frac{Z_2 - 1}{Z_1 - 1} \right)^2,$$

откуда

$$Z_2 - 1 = (Z_1 - 1) \sqrt{\lambda_1/\lambda_2} = (23 - 1) \sqrt{0,251/0,154} = 28.$$

Отсюда вытекает, что линия с длиной волны, равной 0,154 нм, принадлежит элементу с $Z = 29$, т. е. меди.

ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ СТАТИСТИКИ И ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Г л а в а 7. СТАТИСТИКИ БОЗЕ — ЭЙНШТЕЙНА И ФЕРМИ — ДИРАКА

§ 34. Распределение Ферми — Дирака и распределение Бозе — Эйнштейна

Одной из основных задач статистической физики является нахождение закона распределения частиц по разным квантовым состояниям.

Пусть имеется система практически не взаимодействующих тождественных частиц, каждая из которых может находиться в состояниях с энергиями $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots$ (Мы будем предполагать состояния невырожденными, это означает, что каждому значению энергии соответствует только одно состояние.) Если система находится в равновесном состоянии, то распределение частиц по энергиям характеризуется средними числами заполнения $\langle n_1 \rangle, \langle n_2 \rangle, \dots$, т. е. средними числами частиц, находящихся в состояниях с соответствующими значениями энергии. Поскольку речь идет о средних числах, то они могут быть не только целыми, но и дробными.

В § 27 мы установили, что частицы подразделяются на два класса: фермионы (т. е. частицы с полуцелым спином) и бозоны (т. е. частицы с целым или нулевым спином). При больших числах заполнения закон распределения для фермионов и бозонов оказывается неодинаковым. В данном параграфе мы приведем вывод функций, описывающих эти распределения.

В гл. 13 1-го тома мы рассмотрели полуклассическую статистическую физику в применении к молекулам газа. Для изображения состояний молекул мы ввели два пространства—пространство координат (т. е. обычное трехмерное пространство) с осями x, y, z и пространство импульсов с осями p_x, p_y, p_z . Оба пространства мы разбили на одинаковые кубические

ячейки. Состояние молекулы изображалось двумя точками — одной в ячейке пространства координат, другой в ячейке пространства импульсов. Для того чтобы учесть принцип неопределенности, ячейки были взяты таких размеров, что произведение объема ячейки одного пространства на объем ячейки другого пространства было порядка h^3 :

$$\Delta x \Delta y \Delta z \Delta p_x \Delta p_y \Delta p_z \sim h^3. \quad (34.1)$$

Теперь мы поступим несколько иначе. Введем воображаемое шестимерное пространство с взаимно перпендикулярными осями x, y, z, p_x, p_y, p_z . Его называют фазовым μ -пространством. Разобьем это пространство на ячейки с объемом порядка h^3 (см. (34.1)). В этом случае состояние частицы определяется указанием ячейки μ -пространства, в которую «попадает» данная частица. Задача заключается в том, чтобы найти наиболее вероятное распределение частиц по ячейкам μ -пространства.

При размещении по ячейкам μ -пространства фермионы и бозоны ведут себя существенно различным образом. Фермионы могут находиться в ячейках только поодиночке (можно сказать, что они являются индивидуалистами). Бозоны могут находиться в одной ячейке в любом количестве (они являются коллективистами).

Рассмотрим идеальный ферми-газ, т. е. систему, состоящую из N фермионов (например, электронов), заключенных в сосуд с неизменяющимся объемом. (Идеальность газа заключается в том, что взаимодействием между частицами можно пренебречь.) Найдем число Ω способов, которыми эти N фермионов могут быть размещены по Z ячейкам. (Очевидно, что должно выполняться условие $Z \geq N$; кстати, при $Z = N$ фермионы могут быть размещены по ячейкам только одним способом. Напомним, что частицы неразличимы.) Каждый способ размещения представляет собой микросостояние системы частиц. Следовательно, Ω есть не что иное, как статистический вес макросостояния системы (см. § 81 1-го тома). (В дальнейшем для краткости мы будем говорить просто «статвес».) Пометим ячейки, занятые частицами, черными кружками, а незанятые ячейки — светлыми кружками (рис. 34.1). Произведем все возможные пе-

перестановки черных и светлых кружков. Число таких перестановок равно $Z!$. Однако вследствие неразличимости тождественных частиц перестановки черных кружков не приводят к новому распределению. Таких перестановок $N!$. Перестановки светлых кружков также ничего не изменяют. Таких перестановок $(Z - N)!$. Следовательно, число физически различных распределений N фермионов по Z ячейкам равно



Рис. 34.1. Распределение фермионов (черные кружки) по ячейкам. Белыми кружками помечены незаполненные ячейки

$$\Omega = \frac{Z!}{N!(Z - N)!}. \quad (34.2)$$

Если, например, $Z = 5$, а $N = 2$, то (рис. 34.2)

$$\Omega = \frac{5!}{2! \cdot 3!} = 10.$$

Энергия ϵ частицы зависит от ее координат (если есть внешнее поле) и компонент импульса

$$\epsilon = f(x, y, z, p_x, p_y, p_z),$$

В обычном трехмерном пространстве уравнение $f(x, y, z) = \text{const}$ является уравнением некоторой поверхности. Например, уравнение $ax + by + cz = \text{const}$

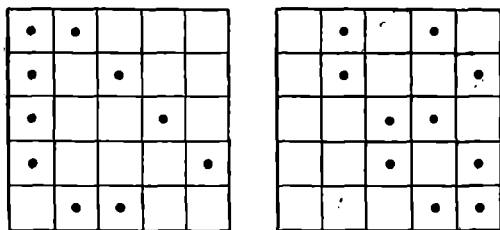


Рис. 34.2. Десять способов размещения двух фермионов в пяти ячейках

есть уравнение плоскости, а уравнение $x^2 + y^2 + z^2 = \text{const}$ есть уравнение сферы. Аналогично, уравнение $f(x, y, z, p_x, p_y, p_z) = \text{const} = \epsilon$ определяет гиперповерхность («сверхповерхность») в μ -пространстве, все

точки которой соответствуют одной и той же энергии частицы. Разобьем все μ -пространство на тонкие энергетические слои. Будем считать i -м слой, ограниченный поверхностями $f(x, y, z, p_x, p_y, p_z) = \varepsilon_i$ и $f(x, y, z, p_x, p_y, p_z) = \varepsilon_{i+1}$. Тонким считается слой, для которого $(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) \ll \varepsilon_i$.

Пусть в пределы i -го слоя попадает Z_i ячеек и N_i частиц. Тогда согласно (34.2) статвес подсистемы из N_i частиц будет равен

$$\Omega_i = \frac{Z_i!}{N_i! (Z_i - N_i)!}.$$

Статвес системы равен произведению статвесов подсистем:

$$\Omega = \prod_i \Omega_i = \prod_i \frac{Z_i!}{N_i! (Z_i - N_i)!}. \quad (34.3)$$

В статистической физике предполагается, что все микросостояния равновероятны. Поэтому статвес пропорционален вероятности данного макросостояния.

Чтобы найти наиболее вероятное распределение частиц по ячейкам, нужно найти максимум выражения (34.3) при соблюдении условий

$$\sum_i N_i = N \quad \text{и} \quad \sum_i \varepsilon_i N_i = E \quad (34.4)$$

(E — энергия системы).

Вместо максимума статвеса Ω будем искать максимум энтропии $S = k \ln \Omega$ (см. формулу (82.5) 1-го тома). С учетом (34.3)

$$S = k \sum_i [\ln Z_i! - \ln N_i! - \ln (Z_i - N_i)!]. \quad (34.5)$$

В математике доказывается формула Стирлинга, согласно которой

$$\ln n! \approx n \ln n - n$$

(это справедливо для $n \gg 1$, что соблюдается для чисел Z_i и N_i). Преобразовав выражение (34.5) по формуле Стирлинга, получим

$$\begin{aligned} S &= k \sum_i [Z_i \ln Z_i - Z_i - N_i \ln N_i + \\ &\quad + N_i - (Z_i - N_i) \ln (Z_i - N_i) + (Z_i - N_i)] = \\ &= -k \sum_i [N_i \ln N_i + (Z_i - N_i) \ln (Z_i - N_i)] + \text{const}, \end{aligned} \quad (34.6)$$

где $\text{const} = \sum Z_i \ln Z_i$ (варьируются только числа частиц N_i).

Надо найти максимум выражения (34.6) при условии постоянства полного числа частиц N и энергии E системы (см. (34.4)). Эта задача на условный экстремум решается методом множителей Лагранжа, суть которого заключается в следующем. Пусть требуется найти экстремум функции $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, на аргументы которой наложены условия $\varphi_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = C_1$, $\varphi_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = C_2, \dots$, где $C_1, C_2, \dots$ — константы. В математике доказывается, что в этом случае надо приравнять нулю частные производные по всем переменным x_i от функции

$$F = f + \lambda_1 \varphi_1 + \lambda_2 \varphi_2 +$$

считая неопределенные множители Лагранжа $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ постоянными. Решив получившуюся систему n уравнений, находим значения переменных $x_1, x_2, \dots, x_n$, при которых достигается условный экстремум.

В соответствии с методом множителей Лагранжа образуем функцию

$$F = S + \alpha N - \beta E = -k \sum_i [N_i \ln N_i + (Z_i - N_i) \ln (Z_i - N_i)] + \text{const} + \alpha \sum_i N_i - \beta \sum_i \varepsilon_i N_i \quad (34.7)$$

(α и $-\beta$ — множители Лагранжа) и приравняем частные производные этой функции по переменным N_i нулю:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial N_i} = & -k \left[\ln N_i + N_i \frac{1}{N_i} - \ln (Z_i - N_i) - \right. \\ & \left. - (Z_i - N_i) \frac{1}{Z_i - N_i} \right] + \alpha - \beta \varepsilon_i = k \ln \frac{Z_i - N_i}{N_i} + \\ & + \alpha - \beta \varepsilon_i = 0. \end{aligned}$$

Из полученных уравнений следует, что

$$\frac{1 - N_i/Z_i}{N_i/Z_i} = \frac{Z_i - N_i}{N_i} = \exp \frac{\beta \varepsilon_i - \alpha}{k}. \quad (34.8)$$

Отношение N_i/Z_i представляет собой среднее число частиц $\langle n_i \rangle$, приходящихся на одну ячейку, т. е. на од-

но квантовое состояние. Решив уравнение (34.8) относительно величин $\langle n_i \rangle = N_i/Z_i$, придем к формуле

$$\langle n_i \rangle = \frac{1}{\exp [(\beta \epsilon_i - \alpha)/k]}. \quad (34.9)$$

Значение множителя β можно найти, воспользовавшись тем, что равенство всех частных производных по N_i функции (34.7) равнозначно равенству нулю дифференциала этой функции:

$$dF = dS - \beta dE = 0 \quad (34.10)$$

(число частиц N остается постоянным, поэтому $dN = 0$). Предположим, что система получает обратимо количество теплоты dQ , в результате чего энтропия системы получает приращение $dS = dQ/T$. Поскольку объем системы остается постоянным, работа в ходе получения теплоты не совершается; следовательно, $dQ = dE$. Соответственно

$$dS = \frac{1}{T} dE. \quad (34.11)$$

Из соотношений (34.10) и (34.11) следует, что $\beta = 1/T$. Подставив в (34.9) найденное значение β и представив множитель α в виде μ/T , получим окончательное выражение для распределения Ферми — Дирака:

$$\langle n_i \rangle = \frac{1}{\exp [(\epsilon_i - \mu)/kT] + 1}. \quad (34.12)$$

Параметр распределения μ называется химическим потенциалом. Он является функцией макроскопических параметров состояния ферми-газа, в частности температуры. Энергия частицы определяется с точностью до произвольной аддитивной постоянной. Очевидно, что с точностью до той же постоянной определяется и химический потенциал μ (иначе от выбора этой постоянной, т. е. от нашего произвола, зависели бы числа заполнения). Обычно аддитивную постоянную выбирают так, чтобы наименьшее значение энергии ϵ_1 было равно нулю. Тогда и химический потенциал делается однозначным.

При абсолютном нуле температуры μ может быть только положительным. В противном случае экспонента в знаменателе (34.12) обращалась бы при $T = 0$ в бесконечность, а числа заполнения — в нуль.

Перейдем к выводу закона распределения для идеального бозе-газа, т. е. системы практически не взаимодействующих бозонов. Вначале решим вспомогательную задачу. Возьмем N неразличимых объектов, помещенных в некоторый длинный ящик (пенал).

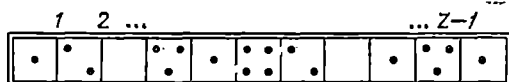


Рис. 34.3. Распределение N неразличимых объектов по Z ячейкам, разделенным друг от друга $Z - 1$ перегородкой

Разделим этот ящик с помощью $Z - 1$ перегородок на Z ячеек (рис. 34.3) и найдем число способов, которыми объекты могут быть размещены по ячейкам, независимо от числа объектов в каждой ячейке.

Произведем все возможные перестановки $N + Z - 1$ элементов системы, состоящей из объектов и перегородок. (Подчеркнем, что переставляются не только частицы с частицами или перегородки с перегородками, но и частицы с перегородками.) Число таких перестановок равно $(N + Z - 1)!$. Однако вследствие неразличимости объектов их перестановки не приводят к новому распределению. Таких перестановок $N!$. Перестановки перегородок также ничего не изменяют. Таких перестановок $(Z - 1)!$. Следовательно, число способов, которыми N неразличимых объектов могут быть распределены по Z ячейкам, равно

• • • •		
	• • • •	
		• • • •
• • •	•	
• • •		•
•	• • •	
	• • •	•
•		• • •
	•	• • •
• •	• •	
• •		• •
	• •	• •
• •	•	•
•	• •	•
•	•	• •

Рис. 34.4. Пример, поясняющий формулу (34.13). При числе объектов $N = 4$ и ячеек $Z = 3$ имеется $\frac{(4 + 3 - 1)!}{4! (3 - 1)!} = 15$ способов размещения объектов по ящикам

$$\Omega = \frac{(N + Z - 1)!}{N! (Z - 1)!} \quad (34.13)$$

(см. рис. 34.4).

Таким же будет число способов, которыми N бозонов могут быть распределены по Z состояниям. Разде-

лим, как и при выводе распределения Ферми — Дирака, μ -пространство на тонкие энергетические слои, в каждом из которых содержится N_i частиц и Z_i состояний. Тогда энтропия бозе-газа будет определяться выражением

$$S = k \ln \prod_i \frac{(N_i + Z_i - 1)!}{N_i! (Z_i - 1)!}.$$

Чтобы найти максимум энтропии при соблюдении условий (34.4), надо проделать выкладки, аналогичные тем, которые привели нас к формуле (34.8). В результате получится соотношение

$$\frac{N_i + Z_i - 1}{N_i} = \frac{\langle n_i \rangle + 1 - 1/Z_i}{\langle n_i \rangle} = \exp \left(\frac{\epsilon_i - \mu}{kT} \right)$$

(как и в случае фермионов $\beta = 1/T$, $\mu = \alpha T$). Числа Z_i много больше единицы, поэтому слагаемым $-1/Z_i$ в числителе можно пренебречь. Разрешив получившееся в результате равенство относительно $\langle n_i \rangle$, получим для среднего числа бозонов в состоянии с энергией ϵ_i формулу

$$\langle n_i \rangle = \frac{1}{\exp [(\epsilon_i - \mu)/kT] - 1}, \quad (34.14)$$

которую называют распределением Бозе — Эйнштейна. Эта формула отличается от (34.12) только знаком перед единицей в знаменателе.

Химический потенциал μ бозе-газа не может быть положительным, потому что при $\mu > 0$ некоторые из чисел заполнения оказались бы отрицательными, что невозможно.

При малых (по сравнению с единицей) числах заполнения экспонента в знаменателе формул (34.12) и (34.14) много больше единицы. Поэтому единицей в знаменателе можно пренебречь, в результате чего оба распределения приобретают вид

$$\langle n_i \rangle = \exp [-(\epsilon_i - \mu)/kT] = A \exp (-\epsilon_i/kT), \quad (34.15)$$

где $A = \exp (\mu/kT)$. Таким образом, при малых числах заполнения распределение Ферми — Дирака и распределение Бозе — Эйнштейна переходят в распределение Больцмана (см. (5.17)).

При выводе распределений (34.12) и (34.14) мы предполагали полное число частиц N наперед задан-

ным и неизменным. В случае, если число частиц постоянно, условие $\sum N_i = N$ не имеет места. Поэтому в формуле, аналогичной (34.7), отсутствует слагаемое $\alpha \sum N_i$. Это означает, что $\alpha = 0$, соответственно и $\mu = 0$. Таким образом, химический потенциал бозе-газа с переменным числом частиц равен нулю, вследствие чего распределение (34.14) имеет вид

$$\langle n_i \rangle = \frac{1}{\exp(\epsilon_i/kT) - 1}. \quad (34.16)$$

§ 35. Фотонный газ

При обычных (нелазерных) интенсивностях световые волны не возмущают друг друга. Это означает, что фотоны, которые можно сопоставить этим волнам, не взаимодействуют между собой. Поэтому излучение, находящееся в равновесии со стенками полости, в которой оно заключено, можно представить как идеальный фотонный газ.

Спин фотона равен единице. Следовательно, фотоны являются бозонами. Стенки полости непрерывно излучают и поглощают фотоны. Поэтому число фотонов не является наперед заданным (оно определяется объемом полости и температурой ее стенок). Из постоянства числа фотонов вытекает, что их распределение по состояниям описывается формулой

$$\langle n_i \rangle = \frac{1}{\exp(\hbar\omega_i/kT) - 1} \quad (35.1)$$

(см. (34.16); мы сделали замену $\epsilon_i = \hbar\omega_i$). Исходя из этого попытаемся получить формулу Планка, т. е. вычислить энергию излучения, отнесенную к единице объема полости и к единичному интервалу частот (см. формулу (5.22)).

Энергия фотона не зависит от координат и направления его движения. В этом случае энергия частицы определяется только модулем ее импульса: $\epsilon = f(p)$. Поэтому изоэнергетическая поверхность (т. е. поверхность, все точки которой соответствуют одинаковой энергии) представляет собой сферу радиуса p . Отсюда следует, что объем $\Delta\tau$ тонкого энергетического слоя равен объему шарового слоя радиуса p и толщины Δp , умноженному на объем сосуда, в котором

находится газ:

$$\Delta\tau = V \cdot 4\pi p^2 \Delta p. \quad (35.2)$$

Поясним формулу (35.2) следующим примером. Пусть в обычном трехмерном пространстве имеется обычный газ, заключенный в сосуд с плоскими параллельными стенками, отстоящими друг от друга на расстояние l . Предположим, что потенциальная энергия молекул газа зависит только от расстояния r от перпендикулярной к стенкам оси,

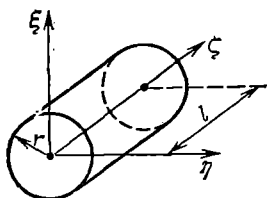


Рис. 35.1. Изоэнергетическая цилиндрическая поверхность (имеется в виду потенциальная энергия)

которую мы обозначим буквой ξ (рис. 35.1). Тогда потенциальная энергия молекулы будет одинакова во всех точках цилиндрической поверхности радиуса r и длины l . Уравнение изоэнергетической поверхности имеет вид $\xi^2 + \eta^2 = \text{const} = r^2$, а объем тонкого энергетического слоя

$$\Delta\tau = l \cdot 2\pi r \Delta r.$$

От координаты ξ энергия не зависит. Поэтому в $\Delta\tau$ вошла множителем вся область изменения координаты ξ .

В рассмотренном нами примере ξ играет роль координат частицы x, y, z , а ξ и η — роль компонент импульса p_x, p_y, p_z . Поскольку в рассматриваемой нами задаче энергия частицы не зависит от координат x, y, z , в $\Delta\tau$ вошла множителем вся область изменения координат, т. е. объем V (см. (35.2)).

Найдем число состояний Z_i фотона в i -м тонком энергетическом слое объема $\Delta\tau_i = V \cdot 4\pi p_i^2 \Delta p_i$. Объем ячейки в μ -пространстве равен h^3 . Поэтому число ячеек равно $\Delta\tau_i/h^3$. В каждой ячейке «помещается» два состояния фотона, отличающихся направлением поляризации (см. текст перед формулой (5.9)). Следовательно,

$$Z_i = 2 \frac{\Delta\tau_i}{h^3} = V \cdot 8\pi \frac{p_i^2 \Delta p_i}{8\pi^3 h^3} = V \frac{p_i^2 \Delta p_i}{\pi^2 h^3} \quad (35.3)$$

(мы учли, что $h = 2\pi\hbar$).

Импульс фотона $p = \hbar\omega/c$ (см. (9.2)). Соответственно $p^2 \Delta p = \hbar^3 \omega^2 \Delta\omega/c^3$. Подстановка этого выраже-

ния в (35.3) дает, что

$$Z_i = V \frac{\omega_i^2 \Delta\omega_i}{\pi^2 c^3}. \quad (35.4)$$

Умножив Z_i на среднее число заполнения $\langle n_i \rangle$, найдем число фотонов, частоты которых заключены в интервале $\Delta\omega_i$, а умножив это число на энергию фотона $\varepsilon_i = \hbar\omega_i$, получим энергию фотонов

$$\Delta E_i = Z_i \langle n_i \rangle \hbar\omega_i.$$

Подстановка выражений (35.1) и (35.4) приводит к формуле

$$\Delta E_i = V \frac{\hbar\omega_i^3 \Delta\omega_i}{\pi^2 c^3} \frac{1}{\exp(\hbar\omega_i/kT) - 1}. \quad (35.5)$$

Наконец, разделив ΔE_i на V и на $\Delta\omega_i$, найдем плотность энергии электромагнитного излучения, отнесенную к единичному интервалу частот, т. е. величину, которая в § 3 была обозначена через $u(\omega, T)$. Таким образом, опустив за ненадобностью индекс i , получим формулу

$$u(\omega, T) = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3} \frac{1}{\exp(\hbar\omega/kT) - 1},$$

совпадающую с формулой Планка (5.22).

§ 36. Фононный газ. Теплоемкость кристаллической решетки

Согласно классическим представлениям кристалл, состоящий из N атомов, является системой с $3N$ колебательными степенями свободы, на каждую из которых приходится в среднем энергия kT ($kT/2$ в виде кинетической и $kT/2$ в виде потенциальной энергии). Из этих представлений вытекает закон Дюлонга¹⁾ и Пти²⁾, который утверждает, что молярная теплоемкость всех химически простых тел в кристаллическом состоянии одинакова и равна $3R$. Этот закон выполняется приближенно только при сравнительно высоких температурах. При низких температурах теплоемкость кристаллов убывает, стремясь к нулю при приближении к 0 К.

¹⁾ Пьер Луи Дюлонг (1785—1838) — французский физик и химик.

²⁾ Алексис Терез Пти (1791—1820) — французский физик.

В 1907 г. Эйнштейн создал теорию теплоемкости кристаллов, в которой он учел тот факт, что энергия гармонического осциллятора квантуется, т. е. может принимать только дискретные значения¹⁾

$$E_n = (n + 1/2) \hbar \omega \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (36.1)$$

(см. (20.3)). Предположив, что распределение осцилляторов по состояниям с различной энергией подчиняется закону Больцмана, Эйнштейн вычислил среднее значение энергии (36.1). Умножение этого значения на число осцилляторов $3N$ привело к формуле, которая давала качественно правильный ход теплоемкости при низких температурах. Однако согласно формуле Эйнштейна теплоемкость изменялась вблизи 0 К по экспоненциальному закону, в то время как согласно экспериментальным данным теплоемкость вблизи абсолютного нуля изменяется по закону T^3 .

Количественного согласия с опытом удалось достигнуть Дебаю в 1912 г. Дебай учел, что колебания атомов в кристаллической решетке не являются независимыми. Смещение одного из атомов из положения равновесия влечет за собой смещения других соседних с ним атомов. Таким образом, кристалл представляет собой систему N упруго связанных друг с другом атомов, обладающую $3N$ степенями свободы. Колебания такой системы имеют характер стоячих волн с дискретными частотами ω_i . Можно показать, что в кристалле, состоящем из N частиц, существует $3N$ типов простейших колебаний, называемых нормальными колебаниями или модами. В кристалле могут существовать одновременно все возможные нормальные колебания, причем каждое совершается так, как если бы остальных не было вовсе. Согласно (36.1) энергия i -го нормального колебания может иметь значения

$$E_i = (n_i + 1/2) \hbar \omega_i \quad (n_i = 0, 1, 2, \dots). \quad (36.2)$$

Энергию кристалла можно представить как сумму энергий нормальных колебаний:

$$E = \sum_{i=1}^{3N} (n_i + 1/2) \hbar \omega_i = E_0 + \sum_{i=1}^{3N} n_i \hbar \omega_i, \quad (36.3)$$

¹⁾ Существование нулевой энергии колебаний было установлено значительно позже, лишь после создания квантовой механики. Поэтому в использованном Эйнштейном выражении для E_n слагаемое $\hbar \omega/2$ отсутствовало,

где $E_0 = (1/2) \sum \hbar \omega_i$ — энергия нулевых колебаний решетки.

Из (36.2) следует, что за вычетом энергии нулевых колебаний энергия нормального колебания частоты ω_i складывается из порций

$$\epsilon_i = \hbar \omega_i, \quad (36.4)$$

которые можно назвать квантами звука. Это дает основание сопоставить нормальному колебанию квазичастицу, называемую фононом. Не следует понимать термин «частица» буквально. Фонон представляет собой возбужденное состояние, распределенное по всему кристаллу. В то время как квантом света является фотон, квантом звука является фонон.

Многие процессы в кристаллах (например, рассеяние рентгеновских лучей или нейтронов) протекают так, как если бы фонон обладал импульсом $p = \hbar k$, где k — волновой вектор (ср. с (9.4)). Модуль импульса

$$p = \hbar k = \hbar \omega / v \quad (36.5)$$

(ср. с (9.2)). Здесь k — волновое число, соответствующее нормальному колебанию, v — скорость упругих волн в кристалле (см. формулу (73.6) 2-го тома).

Фонон во многих отношениях ведет себя так, как если бы он был частицей с энергией (36.4) и импульсом (36.5). Однако в отличие от обычных частиц (электронов, протонов, фотонов и т. п.) фонон не может возникнуть в вакууме — для своего возникновения и существования фонон нуждается в некоторой среде. Подобного рода частицы называются квазичастицами. Таким образом, фонон является квазичастицей.

Импульс фонона обладает своеобразными свойствами. При взаимодействии фононов друг с другом их импульс может дискретными порциями передаваться кристаллической решетке и, следовательно, не сохраняется. В связи с этим величину (36.5) в случае фононов называют не импульсом, а квазиимпульсом.

Из (36.2) вытекает, что в кристалле может одновременно возбуждаться неограниченное число одинаковых фононов. Следовательно, принцип Паули на фононы не распространяется, и они являются бозонами.

Таким образом, колебания кристаллической решетки можно представить как фононный газ, заключенный в пределах образца кристалла, подобно тому как электромагнитное излучение можно представить как фотонный газ, заполняющий полость. Формально оба представления весьма схожи — и фотоны, и фононы подчиняются одной и той же статистике. Однако между фотонами и фононами имеется существенное различие: в то время как фотоны являются истинными частицами, фононы являются квазичастицами.

Комбинационное рассеяние света кристаллами (см. § 31) можно трактовать как процесс взаимодействия фотона с фононами. Фотон, пролетающий через кристаллическую решетку, может возбудить в ней фонон. На это фотон израсходует часть своей энергии, вследствие чего его частота уменьшится — возникает красный спутник. Если в кристалле уже был возбужден фонон, пролетающий фотон может поглотить его, увеличив за этот счет свою энергию, — возникает фиолетовый спутник.

Применив к фононному газу распределение Бозе — Эйнштейна, можно получить выражение для энергии колебаний кристаллической решетки, а следовательно, и для теплоемкости кристаллов. Число фононов непостоянно (они могут возникать и исчезать). Поэтому надо взять распределение Бозе — Эйнштейна в виде (35.1).

Вычисление энергии кристалла, т. е. энергии фононного газа, аналогично приведенному в предыдущем параграфе вычислению энергии фотонного газа. В твердой среде вдоль некоторого направления могут распространяться три разные волны с одним и тем же значением ω , отличающиеся направлением поляризации: одна продольная и две поперечные с взаимно перпендикулярными направлениями колебаний. Поэтому в формуле (35.3) множитель 2 (учитывающий две взаимно перпендикулярные поляризации фотонов) нужно заменить множителем 3 (мы считаем скорость продольных и поперечных волн одинаковой). В результате число состояний в энергетическом слое толщины Δp_i окажется равным

$$Z_i = 3 \frac{\Delta \tau_i}{h^3} = V \frac{3 p_i^2 \Delta p_i}{2 \pi^2 h^3}.$$

Из (36.5) вытекает, что $p_i^2 \Delta p_i = \hbar^3 \omega_i^2 \Delta \omega_i / v^3$. Следовательно,

$$Z_i = V \frac{3\omega_i^2 \Delta \omega_i}{2\pi^2 v^3}. \quad (36.6)$$

Умножив Z_i на среднее число заполнения состояний $\langle n_i \rangle$ и на энергию фонона $\hbar \omega_i$, найдем ту часть энергии (за вычетом энергии нулевых колебаний), которая соответствует интервалу частот $\Delta \omega_i$:

$$\Delta E_i = Z_i \langle n_i \rangle \hbar \omega_i = V \frac{3\hbar \omega_i^3 \Delta \omega_i}{2\pi^2 v^3} \frac{1}{\exp(\hbar \omega_i / kT) - 1}. \quad (36.7)$$

Полученное выражение отличается от (35.5) лишь тем, что в нем имеется множитель $3/2$ и вместо скорости света c стоит скорость упругих волн v .

Суммирование выражения (36.7) по индексу i даст энергию кристалла (за вычетом нулевой энергии). Заменяв суммирование интегрированием, представим выражение для энергии в виде

$$E = E_0 + V \frac{3\hbar}{2\pi^2 v^3} \int_0^{\omega_m} \frac{\omega^3 d\omega}{\exp(\hbar \omega / kT) - 1}. \quad (36.8)$$

Здесь ω_m — наибольшая частота нормальных колебаний решетки, которую можно оценить, исходя из следующих соображений. Длина волны, возбужденной тепловыми колебаниями в кристалле, ограничена снизу значением $\lambda_{\min} \approx 2d$, где d — расстояние между соседними атомами в решетке. Волны меньшей длины не имеют физического смысла. Отсюда максимальная частота возможных стоячих волн

$$\omega_m = \frac{2\pi v}{\lambda_{\min}} \approx \frac{2\pi v}{2d} = \frac{\pi v}{d}.$$

Если атомы расположены в узлах кубической кристаллической решетки, то $d^3 = 1/n$, где n — число атомов в единице объема. Следовательно,

$$\omega_m \approx \pi v \sqrt[3]{n}. \quad (36.9)$$

Строгий расчет приводит к значению

$$\omega_m = v \sqrt[3]{6\pi^2 n}, \quad (36.10)$$

которое на 24 % больше, чем (36.8).

Энергия (36.8) пропорциональна объему кристалла V . Поэтому, разделив (36.8) на V , получим энергию единицы объема кристалла. Продифференцировав полученное выражение по температуре, найдем теплоемкость C единицы объема вещества:

$$C = \frac{\partial E}{\partial T} = \frac{3\hbar}{2\pi^2 v^3} \int_0^{\omega_m} \frac{\exp(\hbar\omega/kT) (\hbar\omega/kT^2) \omega^3 d\omega}{[\exp(\hbar\omega/kT) - 1]^2}.$$

Заменим в соответствии с (36.10) v^3 через $\omega_m^3/6\pi^2 n$ и введем переменную $x = \hbar\omega/kT$. Тогда выражение для теплоемкости примет вид

$$C = 9nk \frac{T^3}{(\hbar\omega_m/k)^3} \int_0^{x_m} \frac{e^x x^4 dx}{(e^x - 1)^2}, \quad (36.11)$$

где $x_m = \hbar\omega_m/kT$.

Величину θ , определяемую условием $\hbar\omega_m = k\theta$, называют характеристической температурой Дебая. По определению,

$$\theta = \frac{\hbar\omega_m}{k}. \quad (36.12)$$

Температура Дебая указывает для каждого вещества ту область, где становится существенным квантование энергии колебаний.

С учетом (36.12) формулу (36.11) можно написать следующим образом:

$$C = 9nk \left(\frac{T}{\theta}\right)^3 \int_0^{\theta/T} \frac{e^x x^4 dx}{(e^x - 1)^2}. \quad (36.13)$$

При $T \ll \theta$ верхний предел интеграла будет очень большим, так что его можно приближенно положить равным бесконечности. Тогда интеграл будет представлять собой некоторое число, и теплоемкость C окажется пропорциональной кубу температуры: $C \propto T^3$. Эта приближенная зависимость известна как закон T^3 Дебая. При достаточно низких температурах этот закон выполняется во многих случаях очень хорошо.

При $T \gg \theta$, т. е. при $\hbar\omega_m/kT \ll 1$, формулу (36.8) можно упростить, положив $\exp(\hbar\omega/kT) \approx 1 + \hbar\omega/kT$.

Тогда для энергии получается выражение

$$E = E_0 + V \frac{3\hbar}{2\pi^2 v^3} \int_0^{\omega_m} \frac{kT}{\hbar} \omega^2 d\omega =$$

$$= E_0 + V \frac{kT}{2\pi^2} \left(\frac{\omega_m}{v} \right)^3 = V \cdot 3nkT$$

(мы воспользовались соотношением (36.10)). Отсюда $C = V \cdot 3nk$. Если в качестве V взять объем моля, то произведение Vn будет равно постоянной Авогадро

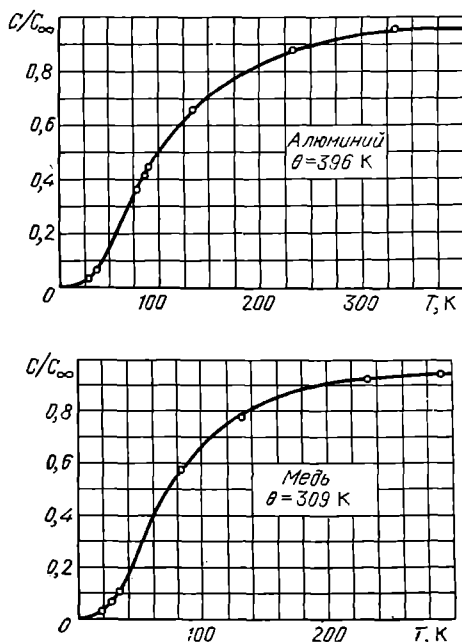


Рис. 36.1. Кривые теплоемкости алюминия и меди, построенные по формуле (36.13). Кружками показаны экспериментальные точки

N_A , а $N_A k$ есть газовая постоянная R . Следовательно, $C_m = 3R$. Мы пришли к закону Дюлонга и Пти.

О согласии теории Дебая с опытом можно судить по рис. 36.1, на котором приведены данные для теплоемкости алюминия ($\theta = 396 K$) и меди ($\theta = 309 K$); C_∞ — классическое значение теплоемкости, получающееся из квантовых формул при $T \rightarrow \infty$.

Формула Дебая хорошо передает ход теплоемкости с температурой лишь для тел с простыми кристаллическими решетками, т. е. для химических элементов и некоторых простых соединений. К телам с более сложной структурой формула Дебая неприменима.

§ 37. Сверхтекучесть

Гелий является единственным веществом, которое остается жидким вплоть до абсолютного нуля температуры. (Твердая фаза может быть получена под давлением 25 атм и выше.) Имеются два изотопа (две разновидности атомов) гелия, которые отличаются составом ядра. Ядро ${}^4\text{He}$ состоит из четырех частиц — двух протонов и двух нейтронов; его спин равен нулю. Ядро ${}^3\text{He}$ состоит из двух протонов и одного нейтрона; его спин равен $1/2$. В дальнейшем мы рассматриваем только изотоп ${}^4\text{He}$. В состав атома гелия входят два электрона с «антипараллельными» спинами. Таким образом, атомы ${}^4\text{He}$ имеют спин, равный нулю, и, следовательно, являются бозонами. (Атомы ${}^3\text{He}$ являются фермионами.)

При атмосферном давлении гелий сжижается при 4,2 К. При понижении давления температура кипения гелия уменьшается. При 2,17 К гелий претерпевает фазовое превращение второго рода (т. е. превращение без поглощения или выделения теплоты и без изменения плотности жидкости). Жидкая фаза, существующая выше 2,17 К, называется гелием I (HeI), фазу, существующую ниже 2,17 К, называют гелием II.

Гелий II обнаруживает своеобразные свойства, самым удивительным из которых является открытая в 1938 г. Капицей¹⁾ сверхтекучесть. Это явление заключается в том, что гелий II способен протекать по узким каналам или щелям, не обнаруживая никакой вязкости. Другой особенностью течения гелия II является образование пленки, покрывающей выступающие части предмета, частично погруженного в гелий II. Толщина этой пленки составляет примерно 100 атомных слоев. Наличие пленки приводит к тому, что пустая пробирка, опущенная в гелий II, начинает наполняться жидкостью даже в том случае, если ее верх-

¹⁾ Петр Леонидович Капица (1894—1984) — советский физик.

ний край расположен высоко над поверхностью жидкости в основном сосуде (рис. 37.1а). Перетекание жидкости продолжается до тех пор, пока уровни жидкости в пробирке и в основном сосуде не сравняются. Если затем пробирку поднять (рис. 37.1б), то жидкость вытекает из нее до тех пор, пока пробирка не опустеет. Таким образом, пленка работает как сифон.

Отсутствие вязкости гелия II при течении в капиллярах было продемонстрировано экспериментами с незатухающим потоком жидкости. В этих экспериментах использовался сосуд в виде тора, заполненный пористым материалом с очень тонкими каналами. Наполненный гелием II тор приводился во вращение вокруг его оси симметрии, а затем останавливался, после чего течение гелия II продолжалось без уменьшения скорости в течение 12 часов.

Таким образом, при течении через капилляры гелий II ведет себя как жидкость без трения. Вместе с тем, в экспериментах с погруженными в гелий II дисками, совершающими крутильные колебания, гелий II ведет себя как обычная вязкая жидкость, вызывающая затухание колебаний. Для объяснения такого противоречивого поведения гелия II была предложена двухжидкостная модель, согласно которой при отличных от нуля температурах гелий II ведет себя так, как если бы он представлял собой смесь двух жидкостей. Одна из них сверхтекуча и при движении вдоль твердой поверхности не обнаруживает вязкости. Другая же ведет себя как нормальная вязкая жидкость. Между этими движущимися «друг сквозь друга» частями жидкости нет трения. С понижением температуры относительная доля сверхтекучей компоненты возрастает. При абсолютном нуле вся жидкость сверхтекуча.

Представление о гелии II как «смеси» двух жидкостей — нормальной и сверхтекучей — не следует понимать буквально. Физически разделить эти две жидкости невозможно. Недопустимо также считать, что не-

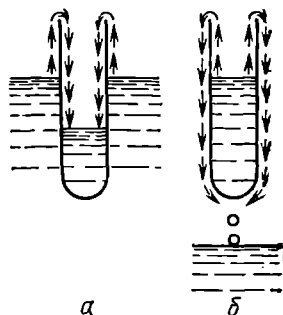


Рис. 37.1. Пленка гелия II выполняет роль сифона

которые атомы принадлежат нормальной жидкости, а другие — сверхтекучей, поскольку все атомы гелия II одинаковы. Строго говоря, сущность двухжидкостной модели заключается в том, что в гелии II могут существовать одновременно два движения, каждое из которых связано со своей эффективной массой. Одно из этих движений нормально, другое — сверхтекуче. Сумма эффективных масс этих движений равна массе жидкости. С учетом этой оговорки мы будем пользоваться моделью двух жидкостей.

Двухжидкостная модель разрешает парадокс, заключающийся в том, что в одних процессах гелий II ведет себя как сверхтекучая, а в других — как нормальная жидкость. В течении через капилляры и щели участвует в основном сверхтекучая компонента, нормальная же компонента задерживается. Затухание крутильных колебаний диска обуславливается нормальной компонентой жидкости.

Отметим, что отличительным свойством гелия II является также очень большая теплопроводность, которая в случае малых тепловых потоков стремится к бесконечности.

Теорию сверхтекучести создал Ландау¹⁾ в 1941 г. Эта теория очень сложна. Поэтому мы можем дать о ней только качественное представление.

Атомы ^4He являются бозонами. Следовательно, они могут накапливаться в одном состоянии. Температура, ниже которой начинают проявляться квантовые свойства газа, обусловленные тождественностью его частиц, называется температурой вырождения. Применительно к бозонам температура вырождения представляет собой температуру, ниже которой происходит переход значительной доли частиц в состояние с нулевым импульсом (с наименьшей энергией). Этот процесс называется конденсацией Бозе — Эйнштейна. При этом никакой конденсации в обычном смысле слова не происходит. Распределение частиц в пространстве остается равномерным. Речь идет лишь о конденсации в пространстве импульсов. Для подавляющего большинства газов температура вырождения очень мала и вещество переходит в твердое состояние гораздо раньше, чем может наступить

¹⁾ Лев Давидович Ландау (1908—1968) — советский физик,

пить конденсация Бозе — Эйнштейна. Исключение составляет гелий.

При абсолютном нуле все атомы гелия находятся в основном (невозбужденном) состоянии. При сообщении такой бозе-жидкости некоторой энергии возбуждаются не отдельные атомы жидкости, а возникают коллективные элементарные возбуждения. При температурах, близких к абсолютному нулю, элементарные возбуждения имеют такой же характер, как и элементарные возбуждения кристаллической решетки, т. е. являются фононами — квазичастицами с энергией

$$\varepsilon = \hbar\omega \quad (37.1)$$

и импульсом

$$p = \varepsilon/v \quad (37.2)$$

(v — скорость звука, экспериментально установленное значение которой равно 240 м/с). Из (37.2) следует, что $\varepsilon = vp$, т. е. что энергия зависит от импульса по линейному закону. Отметим, что в отличие от квазиимпульса фононов в кристалле импульс фононов в жидком гелии является истинным.

Число и энергия фотонов резко растут с повышением температуры. При температуре около 0,6 К появляются возбуждения с большими энергиями. Эти возбуждения получили название ротонов. Для ротонов зависимость энергии от импульса является нелинейной.

Кривая зависимости энергии квазичастиц ε от импульса p , т. е. график функции $\varepsilon(p)$, называется дисперсионной кривой или спектром возбуждений. Исходя из феноменологических соображений, Ландау предложил для гелия II дисперсионную кривую, изображенную на рис. 37.2. Вблизи начала координат зависимость $\varepsilon(p)$ имеет линейный характер — это область возбуждения фононов. Участок кривой вблизи p_0 соответствует ротонам.

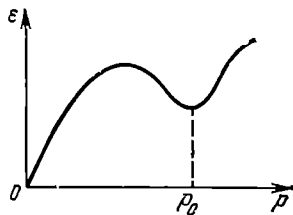


Рис. 37.2. Дисперсионная кривая гелия II. Участок в окрестности p_0 соответствует ротонам

Кривая, предложенная Ландау, хорошо согласуется с экспериментальными данными по теплоемкости и другим термодинамическим свойствам гелия II. Она также была

подтверждена экспериментами по рассеянию нейтронов жидким гелием.

Ландау показал, что жидкость, элементарные возбуждения которой описываются кривой такого вида, как на рис. 37.2, обладает свойством сверхтекучести. Это означает, что трение о стенки капилляра или щели не может привести к замедлению потока жидкости и к переходу кинетической энергии потока в энергию возбуждения.

Рассмотрим поток жидкости, в которой возбуждения (квазичастицы) отсутствуют. Пусть скорость потока относительно стенок капилляра равна V . Поскольку энергия и импульс квазичастиц определены в покоящейся среде, перейдем в систему отсчета, в которой жидкость в капилляре неподвижна. В этой системе стенки капилляра движутся со скоростью $-V$. Если масса капилляра равна M , то он обладает импульсом $P = -MV$ и кинетической энергией $E_k = P^2/2M$. Пусть в результате трения о стенку в жидкости возникло возбуждение с энергией ϵ и импульсом p . Тогда вследствие законов сохранения кинетическая энергия капилляра должна получить приращение

$$\Delta E_k = -\epsilon, \quad (37.3)$$

а импульс — приращение

$$\Delta P = -p. \quad (37.4)$$

Приращение кинетической энергии капилляра

$$\Delta E_k = \Delta(P^2/2M) = 2P \Delta P / 2M = V \Delta P.$$

Подставив значения (37.3) и (37.4) для ΔE_k и ΔP , получим, что $\epsilon = Vp$. Поскольку $Vp \leq V\rho$, имеет место соотношение $\epsilon \leq V\rho$, откуда

$$V \geq \epsilon/p. \quad (37.5)$$

Полученный результат означает, что при скоростях течения V , меньших минимального возможного значения ϵ/p , обмен энергией и импульсом между капилляром и жидкостью невозможен — он противоречит законам сохранения.

Найдем минимальное значение отношения ϵ/p . Условие минимума имеет вид

$$\frac{d}{dp} \left(\frac{\epsilon}{p} \right) = \frac{1}{p} \frac{d\epsilon}{dp} - \frac{\epsilon}{p^2} = 0.$$

Отсюда

$$\frac{d\varepsilon}{dp} = \frac{\varepsilon}{p}. \quad (37.6)$$

Точка на кривой дисперсии (рис. 37.3), в которой выполняется условие (37.6), определяет минимальное значение $V_{\min}$ скорости течения, при котором возможно возбуждение жидкости, текущей по капилляру. В этой точке касательная к кривой проходит через начало координат. Угол наклона касательной отличен от нуля, следовательно, отлична от нуля и $V_{\min}$.

В наших рассуждениях мы предполагали, что температура жидкости равна нулю, вследствие чего возбуждения в ней отсутствуют. Если температура отлична от абсолютного нуля, но не превышает 2,17 К, то в жидкости, независимо от ее движения, имеются слабые возбуждения. В этом случае взаимодействие текущей жидкости со стенками капилляра может привести к появлению дополнительных возбуждений. Если скорость течения V меньше минимального значения отношения ε/p , появление дополнительных возбуждений невозможно. Следовательно, стенки капилляра не оказывают воздействия на текущую жидкость — имеет место сверхтекучесть.

В заключение отметим, что явление сверхтекучести примечательно тем, что в нем проявляется квантование в макроскопических масштабах.



Рис. 37.3. К нахождению минимума отношения ε/p

§ 38. Электронный газ в металлах

Свободные электроны в металлах ведут себя подобно молекулам идеального газа. Поэтому их называют электронным газом.

В § 17 мы выяснили, что энергия частицы, находящейся в одномерной потенциальной яме, квантуется. Аналогичный результат получается и для свободных электронов в металле. Металлический образец представляет собой для электронов трехмерную потен-

циальную яму. Решение уравнения Шрёдингера для частицы, находящейся в такой яме, дает, что энергия частицы может иметь только дискретные (квантованные) значения.

Электроны являются фермионами (их спин равен $1/2$); поэтому распределение электронов по энергетическим уровням описывается функцией Ферми — Дирака. При выводе формулы (34.12) мы считали уровни энергии невырожденными, т. е. не учитывали возможности того, что данной энергии могут соответствовать несколько различных квантовых состояний частицы. Электроны обладают одной и той же энергией в двух состояниях, отличающихся ориентацией спина (т. е. значениями квантового числа m_s , которое может быть равно $\pm 1/2$). В связи с этим среднее число электронов, находящихся на уровне энергии ϵ_i , определяется выражением

$$\langle n_i \rangle = \frac{2}{\exp [(\epsilon_i - \epsilon_F)/kT] + 1}. \quad (38.1)$$

Имеющий размерность энергии параметр μ в формуле (34.12) часто обозначают через ϵ_F и называют уровнем Ферми или энергией Ферми. В формуле (38.1) мы воспользовались этим обозначением. Отметим, что $\epsilon_F > 0$, иначе некоторые числа заполнения оказались бы при $T = 0$ К отрицательными.

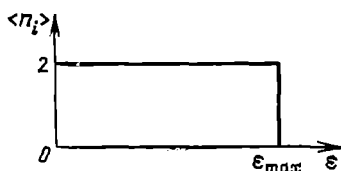


Рис. 38.1. Распределение электронов по энергетическим уровням при абсолютном нуле

При абсолютном нуле электроны располагаются попарно на самых низких доступных для них уровнях. В соответствии с этим зависимость $\langle n_i \rangle$ от ϵ_i имеет вид, показанный на рис. 38.1. (Вследствие дискретности уровней горизонтальный

участок графика состоит из отдельных точек. Однако уровни расположены столь густо, что изображающие их точки сливаются в непрерывную линию.) Тот же результат вытекает и из формулы (38.1). При $T = 0$ К

$$\begin{aligned} \langle n_i \rangle &= 2, & \text{если } \epsilon_i < \epsilon_F, \\ \langle n_i \rangle &= 0, & \text{если } \epsilon_i > \epsilon_F. \end{aligned}$$

Таким образом, при абсолютном нуле уровень Ферми ϵ_F совпадает с верхним заполненным электронами уровнем $\epsilon_{\max}$. Независимо от значения температуры, при $\epsilon_i = \epsilon_F$ среднее число заполнения $\langle n_i \rangle$ равно единице.

Найдем выражение для уровня Ферми. Каждой ячейке μ -пространства соответствуют два состояния электрона, отличающиеся направлением спина. Поэтому, как и в случае фотонов, число состояний в тонком энергетическом слое объема $\Delta\tau_i$ определяется формулой

$$Z_i = 2 \frac{\Delta\tau_i}{h^3} = V \frac{p_i^2 \Delta p_i}{\pi^2 \hbar^3} \quad (38.2)$$

(см. (35.3)).

Импульс электрона связан с его энергией соотношением $\epsilon_i = p_i^2/2m$. Отсюда $p_i = (2m\epsilon_i)^{1/2}$, а $p_i \Delta p_i = m \Delta\epsilon_i$. Перемножив эти выражения, найдем, что $p_i^2 \Delta p_i = m (2m\epsilon_i)^{1/2} \Delta\epsilon_i$. Произведя в (38.2) такую замену, получим

$$Z_i = V \frac{m (2m\epsilon_i)^{1/2} \Delta\epsilon_i}{\pi^2 \hbar^3} = V \frac{(2m)^{3/2}}{2\pi^2 \hbar^3} \epsilon_i^{1/2} \Delta\epsilon_i. \quad (38.3)$$

Введя обозначение

$$A = V \frac{(2m)^{3/2}}{2\pi^2 \hbar^3}, \quad (38.4)$$

представим формулу (38.3) в виде

$$Z_i = A \epsilon_i^{1/2} \Delta\epsilon_i. \quad (38.5)$$

При абсолютном нуле заполнены N нижних состояний, где N — число электронов в данном образце металла. Следовательно, сумма чисел Z_i , соответствующих энергиям от 0 до $\epsilon_{\max}$, должна быть равна N :

$$N = \sum Z_i = A \sum_0^{\epsilon_F} \epsilon_i^{1/2} \Delta\epsilon_i \quad (38.6)$$

(мы учли, что при абсолютном нуле $\epsilon_{\max} = \epsilon_F$). Приняв во внимание, что $\Delta\epsilon_i \ll \epsilon_i$, можно в формуле (38.6) заменить суммирование интегрированием. Тогда

$$N = A \int_0^{\epsilon_F} \epsilon^{1/2} d\epsilon = \frac{2}{3} A \epsilon_F^{3/2}. \quad (38.7)$$

Подстановка выражения (38.4) для A дает, что

$$N = \frac{2}{3} V \frac{(2m)^{3/2}}{2\pi^2 \hbar^3} \epsilon_F^{3/2}.$$

Отсюда с учетом того, что $N/V = n$ есть концентрация свободных электронов, т. е. их число в единице объема металла, получается для уровня Ферми при абсолютном нуле формула

$$\epsilon_F(0) = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 n)^{2/3}. \quad (38.8)$$

Оценим значение $\epsilon_F(0)$. Концентрация свободных электронов в металлах лежит в пределах от 10^{28} до 10^{29} м^{-3} . Взяв для n среднее значение $5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$, получим

$$\begin{aligned} \epsilon_F(0) &= \frac{(1,05 \cdot 10^{-34})^2}{2 \cdot 0,91 \cdot 10^{-30}} \cdot (3 \cdot 3,14^2 \cdot 5 \cdot 10^{28})^{2/3} = \\ &= 8 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 5 \text{ эВ}. \end{aligned} \quad (38.9)$$

Величина

$$T_F = \epsilon_F(0)/k \quad (38.10)$$

называется температурой Ферми. Для $\epsilon_F(0) = 5 \text{ эВ}$ температура Ферми равна примерно $60\,000 \text{ К}$, т. е. в 200 раз превышает комнатную температуру.

Теперь можно найти среднюю энергию электронов при абсолютном нуле. Для этого нужно умножить число состояний Z_i на энергию ϵ_i и просуммировать произведения по соответствующим значениям индекса i . В результате получится суммарная энергия E свободных электронов, заключенных в объеме V :

$$E = \sum Z_i \epsilon_i = A \sum_0^{\epsilon_F} \epsilon_i^{3/2} \Delta \epsilon_i.$$

Замена суммирования интегрированием дает, что

$$E = A \int_0^{\epsilon_F} \epsilon^{3/2} d\epsilon = \frac{2}{5} A \epsilon_F^{5/2}. \quad (38.11)$$

Разделив суммарную энергию E на число электронов N , т. е. взяв отношение выражений (38.11) и (38.7), найдем среднюю энергию свободных электро-

нов при абсолютном нуле:

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{3}{5} \epsilon_F(0). \quad (38.12)$$

С учетом (38.9) для средней энергии свободных электронов при абсолютном нуле получается примерно 3 эВ. Это огромная величина. Чтобы сообщить классическому электронному газу такую энергию, его нужно нагреть до температуры порядка 25 000 К.

Уровень Ферми, хотя и очень слабо, но зависит от температуры. Для температур, удовлетворяющих условию $kT \ll \epsilon_F$, эта зависимость описывается приближенной формулой

$$\epsilon_F \approx \epsilon_F(0) \left[1 - \frac{\pi^2}{12} \left(\frac{kT}{\epsilon_F(0)} \right)^2 \right]. \quad (38.13)$$

Для комнатных температур $kT \approx 0,025$ эВ, в то время как $\epsilon_F(0) \approx 5$ эВ. Следовательно, при температуре порядка 300 К ϵ_F отличается от $\epsilon_F(0)$ лишь на 0,002 %.

Поэтому во многих случаях можно полагать ϵ_F равным $\epsilon_F(0)$. Однако для понимания некоторых явлений зависимость ϵ_F от T имеет принципиальное значение.

При температурах, отличных от нуля, график функции (38.1)

имеет вид, показанный на рис. 38.2. Заметное отличие от графика, изображенного на рис. 38.1, наблюдается лишь в области порядка kT . Чем выше температура, тем более полого идет ниспадающий участок кривой.

Поведение электронного газа в сильной степени зависит от соотношения между температурой кристалла и температурой Ферми (см. (38.10)). Различают два предельных случая.

1. Если $T \ll T_F$, т. е. $kT \ll \epsilon_F$, электронный газ называется вырожденным.

2. Если $T \gg T_F$, т. е. $kT \gg \epsilon_F$, электронный газ называется невырожденным.

Температура Ферми для металлов составляет несколько десятков тысяч кельвин. Поэтому даже при

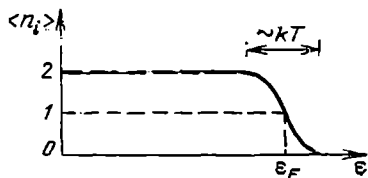


Рис. 38.2. Распределение Ферми — Дирака при температуре, отличной от нуля

температуре, близкой к температуре плавления металла ($\sim 10^3$ К), электронный газ в металле является вырожденным. В полупроводниках концентрация свободных электронов оказывается много меньшей, чем в металлах. Соответственно уровень Ферми мал (согласно (38.8) ϵ_F пропорционален $n^{2/3}$). Поэтому уже при комнатной температуре электронный газ во многих полупроводниках является невырожденным и подчиняется классической статистике.

В § 30 2-го тома была рассмотрена классическая электронная теория металлов. В конце параграфа было указано, что одно из принципиальных затруднений этой теории заключается в следующем. По классическим представлениям электронный газ должен обладать молярной теплоемкостью, равной $(3/2)R$. Согласно закону Дюлонга и Пти молярная теплоемкость кристаллической решетки составляет $3R$. Следовательно, теплоемкость металлов должна была бы превышать теплоемкость диэлектриков примерно в полтора раза. Однако в действительности теплоемкость металлов не отличается существенно от теплоемкости неметаллических кристаллов. Это противоречие устраняется квантовой теорией.

Средняя энергия теплового движения, равная по порядку величины kT , составляет при комнатной температуре $1/40$ эВ. Такая энергия может возбудить только электроны, находящиеся на самых верхних уровнях, примыкающих к уровню Ферми. Основная масса электронов, размещенных на более глубоких уровнях, останется в прежних состояниях и поглощать энергию при нагревании не будет. Таким образом, в процессе нагревания металла участвует незначительная часть электронов проводимости, чем и объясняется малая теплоемкость электронного газа в металлах.

§ 39. Движение электрона в периодическом поле кристаллической решетки

В предыдущих параграфах мы видели, что поведение частицы в какой-либо среде определяется характером дисперсионной кривой, т. е. зависимостью энергии частицы ϵ от ее импульса p , или, что то же самое, от модуля волнового вектора k (вследствие волновой природы частиц импульс $p = \hbar k$),

Термин «свободный электрон» означает, что на электрон не действуют никакие силовые поля. В действительности электроны проводимости в металле движутся в периодическом силовом поле кристаллической решетки. Квантовомеханический расчет приводит для этого случая к дисперсионной кривой, изображенной на рис. 39.1 (напомним, что в случае свободной частицы дисперсионная кривая является параболой).

Если создать в металле электрическое поле E , электрон проводимости будет находиться под действием двух сил: силы $-eE$ и силы $F_{кр}$, обусловленной действием периодического поля решетки. Поэтому уравнение движения электрона имеет вид

$$m \frac{dv}{dt} = -eE + F_{кр}.$$

С учетом дисперсионной кривой это уравнение может быть приведено к виду

$$\frac{\hbar^2}{d^2\epsilon/dk^2} \frac{dv}{dt} = -eE. \quad (39.1)$$

Следовательно, электрон проводимости можно рассматривать как квазичастицу, обладающую массой

$$m^* = \frac{\hbar^2}{d^2\epsilon/dk^2}, \quad (39.2)$$

называемой эффективной массой электрона в кристалле. Ускорение этой квазичастицы пропорционально внешней силе $-eE$. Из кривой на рис. 39.1 следует, что эффективная масса m^* может сильно отличаться от истинной массы электрона m , в частности она может принимать отрицательные значения. Несмотря на это, именно значение m^* определяет характер движения электрона в решетке под действием силы $-eE$. Введение эффективной массы позволяет, абстрагируясь от взаимодействия электронов с решеткой, определять характер движения электрона под дейст-

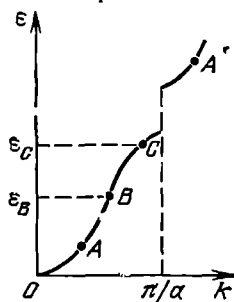


Рис. 39.1. Дисперсионная кривая для электрона проводимости в металле. Предполагается, что образец металла имеет форму куба со стороной a

нием внешнего поля. Приписав электрону массу m^* , мы можем исследовать поведение электрона под действием силы $-eE$, считая его свободным.

Итак, воздействие решетки на движение электрона можно учесть, заменив в уравнении движения, включающем только внешнюю силу $-eE$, истинную массу m эффективной массой m^* .

Исследуем зависимость эффективной массы m^* от «местоположения» электрона на дисперсионной кривой. В окрестности точек A и A' (см. рис. 39.1) кривая мало отличается от параболы, т. е. от кривой $\epsilon(k)$, для свободных электронов. Соответственно $m^* \approx m$.

В точке перегиба $d^2\epsilon/dk^2$ равна нулю. Следовательно, m^* обращается в бесконечность. Это означает, что внешнее поле не может изменить скорость электрона, находящегося в состоянии с энергией ϵ_B .

В точке C производная $d^2\epsilon/dk^2 < 0$ ($d\epsilon/dk$ с ростом k уменьшается). В соответствии с этим m^* оказывается отрицательной. Это означает, что под совместным действием сил $-eE$ и $F_{кр}$ электрон, находящийся в состоянии с энергией ϵ_C , получает ускорение, противоположное по направлению силе $-eE$.

§ 40. Электропроводность металлов

Решение квантовомеханической задачи о движении электронов в кристалле приводит к выводу, что в случае идеальной кристаллической решетки электроны проводимости не испытывали бы при своем движении никакого сопротивления и электропроводность металлов была бы бесконечно большой. Однако кристаллическая решетка никогда не бывает совершенной. Нарушения строгой периодичности решетки бывают обусловлены наличием примесей или вакансий (т. е. отсутствий атомов в узлах), а также тепловыми колебаниями решетки. Рассеяние электронов на атомах примеси и на фононах приводит к возникновению электросопротивления металлов. Чем чище металл и ниже температура, тем меньше это сопротивление.

Удельное электрическое сопротивление металлов можно представить в виде

$$\rho = \rho_{\text{колеб}} + \rho_{\text{прим}}$$

где $\rho_{\text{колеб}}$ — сопротивление, обусловленное тепловыми колебаниями решетки, $\rho_{\text{прим}}$ — сопротивление, обусловленное рассеянием электронов на примесных атомах. Слагаемое $\rho_{\text{колеб}}$ уменьшается с понижением температуры и обращается в нуль при $T = 0$ К. Слагаемое $\rho_{\text{прим}}$ при небольшой концентрации примесей не зависит от температуры и образует остаточное сопротивление металла (см. рис. 26.2 2-го тома; речь идет о металлах, не переходящих в сверхпроводящее состояние).

Пусть в единице объема металла имеется n свободных электронов. Среднюю скорость этих электронов называют дрейфовой скоростью $v_{\text{др}}$. По определению

$$v_{\text{др}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i. \quad (40.1)$$

В отсутствие внешнего поля дрейфовая скорость равна нулю и электрический ток в металле отсутствует. При наложении на металл внешнего электрического поля $\mathbf{E}$ дрейфовая скорость становится отличной от нуля — в металле возникает электрический ток. Согласно закону Ома дрейфовая скорость является конечной и пропорциональной силе $-\mathbf{eE}$.

Из механики известно, что скорость установившегося движения оказывается пропорциональной приложенной к телу внешней силе $\mathbf{F}$ в том случае, когда кроме силы $\mathbf{F}$ на тело действует сила сопротивления среды, которая пропорциональна скорости тела (примером может служить падение маленького шарика в вязкой среде). Отсюда заключаем, что кроме силы $-\mathbf{eE}$ на электроны проводимости в металле действует сила «трения», среднее значение которой равно

$$\mathbf{F}_{\text{тр}} = -r\mathbf{v}_{\text{др}} \quad (40.2)$$

(r — коэффициент пропорциональности).

Электроны проводимости в металле ведут себя как квазичастицы с эффективной массой m^* , отличной от истинной массы m электрона (см. формулу (39.2)). Поэтому уравнение движения для «среднего» электрона имеет вид

$$m^* \frac{d\mathbf{v}_{\text{др}}}{dt} = -e\mathbf{E} - r\mathbf{v}_{\text{др}}. \quad (40.3)$$

Это уравнение позволяет найти установившееся значение дрейфовой скорости.

Если после установления стационарного состояния выключить внешнее поле E , дрейфовая скорость начнет убывать и по достижении состояния равновесия между электронами и решеткой обращается в нуль. Найдем закон убывания дрейфовой скорости после выключения внешнего поля. Положив в (40.3) $E = 0$, получим уравнение

$$m^* \frac{dv_{др}}{dt} + r v_{др} = 0.$$

Его решение имеет вид

$$v_{др}(t) = v_{др}(0) \cdot \exp\left(-\frac{r}{m^*} t\right), \quad (40.4)$$

где $v_{др}(0)$ — значение дрейфовой скорости в момент выключения поля.

Из (40.4) следует, что за время

$$\tau = \frac{m^*}{r} \quad (40.5)$$

значение дрейфовой скорости уменьшается в e раз. Таким образом, величина (40.5) представляет собой время релаксации, характеризующее процесс установления равновесия между электронами и решеткой, нарушенного действием внешнего поля E .

Заменив в формуле (40.2) r через m^* и τ в соответствии с (40.5), получим для силы «трения» выражение

$$F_{тр} = -\frac{m^*}{\tau} v_{др}.$$

Установившееся значение дрейфовой скорости можно найти, приравняв нулю сумму силы $-eE$ и силы $F_{тр}$:

$$-eE - \frac{m^*}{\tau} v_{др} = 0.$$

Отсюда

$$v_{др} = -\frac{eE\tau}{m^*}.$$

Установившееся значение плотности тока можно получить, умножив это значение $v_{др}$ на заряд электрона $-e$ и концентрацию электронов n :

$$j = -\frac{eE\tau}{m^*} (-e) n = \frac{ne^2\tau}{m^*} E.$$

Коэффициент пропорциональности между E и j представляет собой удельную электропроводность σ . Таким образом,

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m^*}. \quad (40.6)$$

Исходя из физических соображений, удается произвести оценку величин, входящих в выражение (40.6), и тем самым вычислить по порядку величины проводимость σ . Полученные таким способом значения находятся в хорошем согласии с опытными данными. Также в согласии с опытом получается, что σ изменяется с температурой по закону $1/T$. Напомним, что классическая теория дает, что σ обратно пропорциональна $\sqrt{T}$.

Выкладки, приведшие к формуле (40.6), одинаково пригодны как при классической трактовке движения электронов проводимости в металле, так и при квантовомеханической трактовке. Различие этих двух трактовок заключается в следующем. При классическом рассмотрении предполагается, что все электроны возмущаются внешним электрическим полем, в соответствии с чем каждое слагаемое в формуле (40.1) получает добавку в направлении, противоположном E . При квантовомеханической трактовке приходится принимать во внимание, что, хотя электрическим полем также возмущаются все электроны, однако их коллективное движение воспринимается в опыте как возмущение полем лишь электронов, занимающих состояния вблизи уровня Ферми. Соответственно только эти электроны вносят вклад в сумму (40.1). Кроме того, при классической трактовке в знаменателе формулы (40.6) должна стоять обычная масса электрона m , при квантовомеханической трактовке вместо обычной массы должна быть взята эффективная масса электрона m^* .

§ 41. Сверхпроводимость

Экспериментальные факты. В 1911 г. Х. Камерлинг-Оннес обнаружил, что электрическое сопротивление ртути при температуре 4,15 К скачкообразно обращается в нуль. Это явление, названное сверхпроводимостью, было затем обнаружено для ряда металлов и сплавов. Температура, при которой

происходит переход в сверхпроводящее состояние, называется критической температурой и обозначается T_k .

Экспериментально сверхпроводимость можно наблюдать двумя способами:

1) включив в общую электрическую цепь, по которой течет ток, звено из сверхпроводника. В момент перехода в сверхпроводящее состояние разность потенциалов на концах этого звена обращается в нуль;

2) поместив кольцо из сверхпроводника в перпендикулярное к нему магнитное поле. Охладив затем кольцо ниже T_k , выключают поле. В результате в кольце индуцируется незатухающий электрический ток. Ток в таком кольце циркулирует неограниченно долго. Камерлинг-Оннес продемонстрировал это, перевезя сверхпроводящее кольцо с текущим по нему током из Лейдена в Кембридж. В ряде экспериментов наблюдалось отсутствие затухания тока в сверхпроводящем кольце в течение примерно года. В 1959 г. Коллинз сообщил о наблюдавшемся им отсутствии уменьшения тока в течение двух с половиной лет.

Для сверхпроводящего состояния характерно то, что магнитное поле не проникает в толщу сверхпроводника. Это явление называется эффектом Мейсснера¹⁾. Если сверхпроводящий образец охлаждается, будучи помещенным в магнитное поле, в момент перехода в сверхпроводящее состояние поле выталкивается из образца, и магнитная индукция в образце обращается в нуль. Формально можно сказать, что сверхпроводник обладает нулевой магнитной проницаемостью ($\mu = 0$). Вещества с $\mu < 1$ называются диамагнетиками. Таким образом, сверхпроводник является идеальным диамагнетиком.

Достаточно сильное внешнее магнитное поле разрушает сверхпроводящее состояние. Значение магнитной индукции, при котором это происходит, называется критическим полем и обозначается B_k . Значение B_k зависит от температуры образца. При критической температуре $B_k = 0$, с понижением температуры значение B_k возрастает, стремясь к B_{k0} — значению критического поля при нулевой температуре. Примерный вид этой зависимости показан на рис. 41.1.

¹⁾ Вальтер Фриц Мейсснер (1882—1974) — немецкий физик,

Если усиливать ток, текущий через сверхпроводник, включенный в общую цепь, то при значении силы тока I_k сверхпроводящее состояние разрушается. Это значение называют критическим током. Значение I_k зависит от температуры. Вид этой зависимости аналогичен зависимости B_k от T (см. рис. 41.1).

Долгое время сверхпроводящее состояние различных металлов и соединений удавалось получить лишь при весьма низких температурах, достижимых с помощью жидкого гелия. К началу 1986 г. максимальное наблюдавшееся значение критической температуры составляло 23 К. В 1986—1987 гг. был обнаружен ряд высокотемпературных сверхпроводников с критической температурой порядка 100 К. Такая температура достигается с помощью жидкого азота. В отличие от гелия жидкий азот получают в промышленном масштабе.

Все открытые до сих пор высокотемпературные сверхпроводники принадлежат к группе металлооксидной керамики (соединений типа La—Ba—Cu—O и Y—Ba—Cu—O). Исследование уже открытых и поиск новых высокотемпературных сверхпроводников производятся очень интенсивно широким фронтом в ряде стран (в том числе и в СССР).

Огромный интерес к высокотемпературным сверхпроводникам обусловлен, в частности, тем, что материалы с критической температурой порядка 300 К произведут подлинную техническую революцию. Например, использование сверхпроводящих линий электропередач полностью устранил потери мощности в проводах.

Понятие о теории сверхпроводимости. Сверхпроводимость представляет собой явление, в котором, как и в сверхтекучести, квантовомеханические эффекты обнаруживаются не в микроскопических, а в макроскопических масштабах. Теория сверхпроводимости

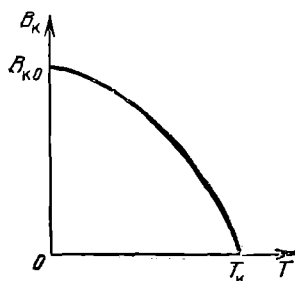


Рис. 41.1. Зависимость критического поля B_k от температуры. T_k — критическая температура сверхпроводника

была создана в 1957 г. Бардиным¹⁾, Купером²⁾ и Шриффером³⁾. Ее называют кратко теорией БКШ. Независимо от них в 1958 г. Н. Н. Боголюбов⁴⁾ разработал более совершенный вариант теории сверхпроводимости.

Теория сверхпроводимости очень сложна. Поэтому нам придется ограничиться изложением теории БКШ на уровне научно-популярных книг.

Разгадка сверхпроводимости заключается в том, что электроны в металле, кроме кулоновского отталкивания, испытывают особый вид взаимного притяжения, которое в сверхпроводящем состоянии преобладает над отталкиванием. В результате электроны проводимости объединяются в так называемые куперовские пары. Электроны, входящие в такую пару, имеют противоположно направленные спины. Поэтому спин пары равен нулю, и она представляет собой бозон. Бозоны склонны накапливаться в основном энергетическом состоянии, из которого их сравнительно трудно перевести в возбужденное состояние. Следовательно, куперовские пары, придя в согласованное движение, остаются в этом состоянии неограниченно долго. Такое согласованное движение пар и есть ток сверхпроводимости.

Поясним сказанное более подробно. Электрон, движущийся в металле, деформирует (поляризует) состоящую из положительных ионов кристаллическую решетку. В результате этой деформации электрон оказывается окруженным «облаком» положительного заряда, перемещающимся по решетке вместе с электроном. Электрон и окружающее его облако представляют собой положительно заряженную систему, к которой будет притягиваться другой электрон. Таким образом, кристаллическая решетка играет роль промежуточной среды, наличие которой приводит к притяжению между электронами.

На квантовомеханическом языке притяжение между электронами объясняется как результат обмена

¹⁾ Джон Бардин (род. 1908) — американский физик.

²⁾ Леон Купер (род. 1930) — американский физик.

³⁾ Джон Роберт Шриффер (род. 1931) — американский физик.

⁴⁾ Николай Николаевич Боголюбов (род. 1909) — советский математик и физик.

между электронами квантами возбуждения решетки — фононами. Электрон, движущийся в металле, нарушает режим колебаний решетки — возбуждает фононы. Энергия возбуждения передается другому электрону, который поглощает фонон. В результате такого обмена фононами возникает дополнительное взаимодействие между электронами, которое имеет характер притяжения. При низких температурах это притяжение у веществ, являющихся сверхпроводниками, превышает кулоновское отталкивание.

Взаимодействие, обусловленное обменом фононами, наиболее сильно проявляется у электронов, обладающих противоположными импульсами и спинами. В результате два таких электрона объединяются в куперовскую пару. Эту пару не следует представлять себе как два слипшихся электрона. Напротив, расстояние между электронами пары весьма велико, оно составляет примерно 10^{-4} см, т. е. на четыре порядка превышает межатомные расстояния в кристалле. Примерно 10^6 куперовских пар заметно перекрываются, т. е. занимают общий объем.

В куперовские пары объединяются не все электроны проводимости. При температуре T , отличной от абсолютного нуля, имеется некоторая вероятность того, что пара будет разрушена. Поэтому всегда наряду с парами имеются «нормальные» электроны, движущиеся по кристаллу обычным образом. Чем ближе T к T_k , тем доля нормальных электронов становится больше, обращаясь в единицу при $T = T_k$. Следовательно, при температуре выше T_k сверхпроводящее состояние невозможно.

Образование куперовских пар приводит к перестройке энергетического спектра металла. Для возбуждения электронной системы, находящейся в сверхпроводящем состоянии, надо разрушить хотя бы одну пару, на что требуется энергия, равная энергии связи $E_{св}$ электронов в паре. Эта энергия представляет собой минимальное количество энергии, которое может воспринять система электронов сверхпроводника. Следовательно, в энергетическом спектре электронов, находящихся в сверхпроводящем состоянии, имеется щель ширины $E_{св}$, расположенная в области уровня Ферми. Значения энергии, принадлежащие этой щели,

запрещены. Существование щели было доказано экспериментально.

Итак, возбужденное состояние электронной системы, находящейся в сверхпроводящем состоянии, отделено от основного состояния энергетической щелью ширины $E_{\text{св}}$. Поэтому квантовые переходы этой системы не всегда будут возможными. При малых скоростях своего движения (отвечающих силе тока, меньшей $I_{\text{к}}$) электронная система не будет возбуждаться, а это и означает движение без трения, т. е. без электрического сопротивления.

Ширина энергетической щели $E_{\text{св}}$ с ростом температуры уменьшается и обращается в нуль при критической температуре $T_{\text{к}}$. Соответственно все куперовские пары разрушаются, и вещество переходит в нормальное (несверхпроводящее) состояние.

Из теории сверхпроводимости следует, что магнитный поток Φ , связанный со сверхпроводящим кольцом (или цилиндром), по которому циркулирует ток, должен быть целым кратным величины $2\pi\hbar/q$, где q — заряд носителя тока:

$$\Phi = n \cdot 2\pi\hbar/q.$$

Величина

$$\Phi_0 = 2\pi\hbar/q \quad (41.1)$$

представляет собой квант магнитного потока.

Квантование магнитного потока было экспериментально обнаружено в 1961 г. Дивером и Фейрбэнком и независимо от них Доллом и Небауэром. В опытах Дивера и Фейрбэнка образцом служил поясok олова, нанесенный на медную проволоку диаметром около 10^{-2} мм. Проволока играла роль каркаса и в сверхпроводящем состоянии не переходила. Измеренные значения магнитного потока в этих опытах, как и в опытах Долла и Небауэра, оказались целыми кратными величины (41.1), в которой в качестве q надо взять удвоенный заряд электрона ($q = -2e$). Это служит дополнительным подтверждением правильности теории БКШ, согласно которой носителями тока в сверхпроводнике являются куперовские пары, заряд которых равен суммарному заряду двух электронов, т. е. $-2e$.

Эффект Джозефсона. В 1962 г. Джозефсон¹⁾ предсказал на основе теории сверхпроводимости существо-

¹⁾ Брайан Джозефсон (род. 1940) — английский физик,

вание явления, которое было обнаружено экспериментально в 1963 г. и получило название эффекта Джозефсона.

Эффект Джозефсона заключается в протекании сверхпроводящего тока через тонкий слой диэлектрика, разделяющий два сверхпроводника. Этот слой называется контактом Джозефсона и обычно представляет собой пленку окиси металла толщиной порядка 1 нм. Электроны проводимости проходят через диэлектрический контакт благодаря туннельному эффекту (см. § 16). Аналогичный эффект наблюдается, когда между сверхпроводниками находится тонкий слой металла в несверхпроводящем состоянии или полупроводника, а также если сверхпроводники соединены тонкой перемычкой, например точечным контактом.

Различают два эффекта Джозефсона — стационарный и нестационарный.

Стационарный эффект наблюдается при условии, что ток через контакт Джозефсона не превышает определенного значения, называемого критическим током контакта. При стационарном эффекте падение напряжения на контакте отсутствует.

Если ток через контакт превышает критическое значение, наблюдается нестационарный эффект Джозефсона. В этом случае на контакте возникает падение напряжения U и контакт начинает излучать электромагнитные волны с частотой $\omega = 2eU/\hbar$. Известно, что излучать электромагнитные волны может только переменный ток. Именно такой ток течет через контакт при постоянном напряжении U на контакте. Квантовое объяснение излучения состоит в том, что электронная пара при прохождении через контакт приобретает энергию $2eU$, которая является избыточной по отношению к энергии основного состояния сверхпроводника. Возвращаясь в основное состояние, электронная пара излучает квант частоты $2eU/\hbar$.

В эффекте Джозефсона непосредственно проявляется важнейшее свойство сверхпроводника — согласованное поведение его электронов.

Эффект Джозефсона нашел применение для создания уникальных по точности приборов для измерения малых токов (до 10^{-10} А), напряжений (до 10^{-15} В), магнитных полей (до 10^{-18} Тл) и др.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое фазовое μ -пространство?
2. Чем отличается выражение для распределения Ферми — Дирака от выражения для распределения Бозе — Эйнштейна?
3. Что такое фонон?
4. По какому закону изменяется теплоемкость твердых тел вблизи абсолютного нуля?
5. В каком случае электронный газ называется вырожденным?
6. Какое явление называется эффектом Мейсснера?

Примеры решения задач

1. Оценить энергию Ферми ϵ_F для меди, полагая, что число свободных электронов равно числу атомов металла.

Решение. Относительная атомная масса меди $A_r = 63,5$, плотность $\rho = 8,93 \cdot 10^3$ кг/м³, молярная масса $M = (0,001 \text{ кг/моль}) A_r = 0,0635$ кг/моль. В 1 м³ меди содержится число атомов $n = \rho N_A / M$ (N_A — постоянная Авогадро). Подстановка этого значения n в формулу (38.8) дает

$$\begin{aligned} \epsilon_F &\approx \epsilon_F(0) = \frac{\hbar^2}{2m} \cdot (3\pi^2 n)^{2/3} = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{3\pi^2 \rho N_A}{M} \right)^{2/3} = \\ &= \frac{1,05^2 \cdot 10^{-68}}{2 \cdot 0,91 \cdot 10^{-31}} \left(\frac{3 \cdot 3,14^2 \cdot 8,93 \cdot 10^3 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{0,0635} \right)^{2/3} = \\ &= 1,13 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} \approx 7 \text{ эВ}. \end{aligned}$$

2. Найти максимальную энергию ϵ_m фонона, который может возбудиться в кристалле, температура Дебая которого $\theta = 300$ К. Фотон какой длины волны λ обладал бы такой же энергией?

Решение. Наибольшая частота ω_m колебаний, которые могут возбудиться в кристаллической решетке, связана с температурой Дебая соотношением $\hbar\omega_m = k\theta$. Отсюда следует, что максимальная энергия фонона

$$\epsilon_m = k\theta = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 = 4,14 \cdot 10^{-21} \text{ Дж} = 0,026 \text{ эВ}.$$

Длина волны фотона частоты ω_m

$$\lambda = \frac{2\pi c}{\omega_m} = \frac{2\pi \hbar c}{k\theta} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1,05 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} = 48\,000 \text{ нм}.$$

Глава 8. ЗОННАЯ ТЕОРИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

§ 42. Энергетические зоны в кристаллах

В § 38 мы отмечали, что в приближении свободных электронов энергия валентных (т. е. слабее всего связанных с атомами) электронов в кристалле изменяется квазинепрерывно. Это означает, что спектр разрешенных значений энергии состоит из множества близкорасположенных дискретных уровней. В действительности валентные электроны в кристалле движутся не вполне свободно — на них действует периодическое поле решетки. Это обстоятельство приводит к тому, что спектр возможных значений энергии валентных электронов распадается на ряд чередующихся

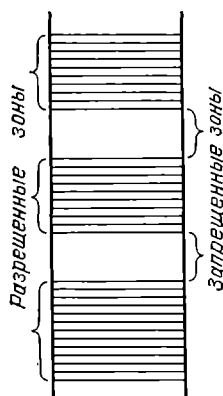


Рис. 42.1. Энергетические зоны в кристалле

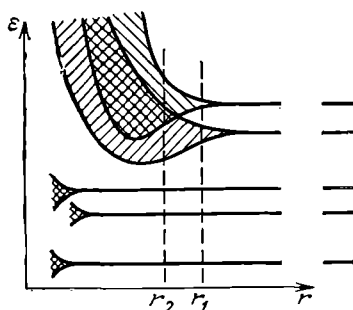


Рис. 42.2. Образование энергетических зон при сближении атомов

разрешенных и запрещенных зон (рис. 42.1). В пределах разрешенных зон энергия изменяется квазинепрерывно. Значения энергии, принадлежащие запрещенным зонам, не могут реализоваться.

Чтобы понять происхождение зон, рассмотрим воображаемый процесс объединения атомов в кристалл. Пусть первоначально имеется N изолированных атомов какого-либо вещества. Пока атомы изолированы друг от друга, они имеют полностью совпадающие схемы энергетических уровней. Заполнение уровней

электронами осуществляется в каждом атоме независимо от заполнения аналогичных уровней в других атомах. По мере сближения атомов между ними возникает все усиливающееся взаимодействие, которое приводит к изменению положения уровней. Вместо одного одинакового для всех атомов уровня возникают N очень близких, но не совпадающих уровней. Таким образом, каждый уровень изолированного атома расщепляется в кристалле на N густо расположенных уровней, образующих полосу, или зону.

Расщепление разных уровней не одинаково. Сильнее возмущаются уровни, заполненные в атоме внешними электронами. Уровни, заполненные внутренними электронами, возмущаются мало. На рис. 42.2 показано расщепление уровней как функция расстояния r между атомами. Из схемы видно, что возникающее в кристалле расщепление уровней, занятых внутренними электронами, очень мало. Заметно расщепляются лишь уровни, занимаемые валентными электронами. Такому же расщеплению подвергаются и более высокие уровни, не занятые электронами в основном состоянии атома.

В зависимости от конкретных свойств атомов равновесное расстояние между соседними атомами в кристалле может быть либо типа r_1 , либо типа r_2 (см. рис. 42.2). При расстоянии типа r_1 между разрешенными зонами, возникшими из соседних уровней атома, имеется запрещенная зона. При расстоянии типа r_2 происходит перекрывание соседних зон. Число уровней в такой слившейся зоне равно сумме количеств уровней, на которые расщепляются оба уровня атома.

Итак, спектр возможных значений энергии валентных электронов в кристалле распадается на ряд разрешенных и запрещенных зон. Ширина зон не зависит от размеров кристалла. Таким образом, чем больше атомов содержит кристалл, тем теснее располагаются уровни в зоне. Разрешенные зоны имеют ширину порядка нескольких электронвольт. Следовательно, если кристалл содержит 10^{23} атомов, расстояние между соседними уровнями в зоне составляет примерно 10^{-23} эВ.

На каждом энергетическом уровне могут находиться два электрона, обладающие противоположно направленными спинами,

Существование энергетических зон позволяет объяснить с единой точки зрения существование металлов, полупроводников и диэлектриков.

Разрешенную зону, возникшую из того уровня, на котором находятся валентные электроны в основном состоянии атома, мы будем называть валентной зоной. При абсолютном нуле валентные электроны заполняют попарно нижние уровни валентной зоны. Более высокие разрешенные зоны будут от электронов свободны. В зависимости от степени заполнения валентной зоны и ширины запрещенной зоны возможны три случая, изображенные на рис. 42.3. В случае а

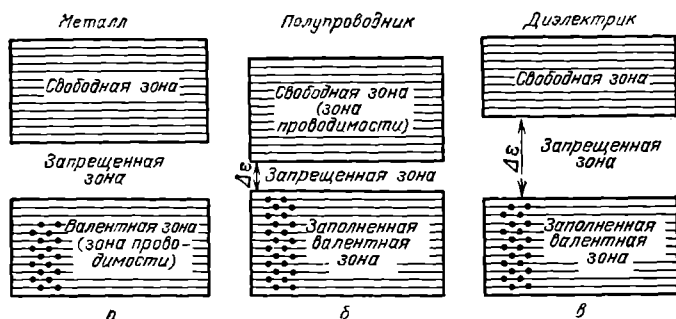


Рис. 42.3. Ширина запрещенной зоны определяет электрические свойства кристалла

электроны заполняют валентную зону не полностью. Поэтому достаточно сообщить электронам, находящимся на верхних уровнях, совсем небольшую энергию ($\sim 10^{-23} - 10^{-22}$ эВ) для того, чтобы перевести их на более высокие уровни. Энергия теплового движения (kT) составляет при 1 К величину порядка 10^{-4} эВ. Следовательно, при температурах, отличных от абсолютного нуля, часть электронов переводится на более высокие уровни. Дополнительная энергия, вызванная действием на электрон электрического поля, также оказывается достаточной для перевода электрона на более высокие уровни. Поэтому электроны могут ускоряться электрическим полем и приобретать дополнительную скорость в направлении, противоположном направлению поля. Таким образом, кристалл с подобной схемой энергетических уровней будет представлять собою металл.

Частичное заполнение валентной зоны (в случае металла ее называют также зоной проводимости) наблюдается в тех случаях, когда на последнем занятом уровне в атоме находится только один электрон или когда имеет место перекрывание зон (см. рис. 42.2, расстояние r_2). В первом случае N электронов проводимости заполняют попарно только половину уровней валентной зоны. Во втором случае число уровней в зоне проводимости будет больше N , так что, даже если количество электронов проводимости равно $2N$, они не смогут занять все уровни зоны.

В случаях *б* и *в* (см. рис. 42.3) уровни валентной зоны полностью заняты электронами — зона заполнена. Для того чтобы увеличить энергию электрона, необходимо сообщить ему количество энергии, не меньшее, чем ширина запрещенной зоны $\Delta\epsilon$. Электрическое поле (во всяком случае такой напряженности, при которой не происходит электрический пробой кристалла) сообщить электрону такую энергию не в состоянии. При этих условиях электрические свойства кристалла определяются шириной запрещенной зоны $\Delta\epsilon$. Если эта ширина невелика (порядка нескольких десятых электронвольта), энергия теплового движения оказывается достаточной для того, чтобы перевести часть электронов в верхнюю свободную зону. Эти электроны будут находиться в условиях, аналогичных тем, в которых находятся валентные электроны в металле. Свободная зона окажется для них зоной проводимости. Одновременно станет возможным переход электронов валентной зоны на ее освободившиеся верхние уровни. Такое вещество называется собственным полупроводником.

Если ширина запрещенной зоны $\Delta\epsilon$ велика (порядка нескольких электронвольт), тепловое движение не сможет забросить в свободную зону заметное число электронов. В этом случае кристалл оказывается диэлектриком.

§ 43. Полупроводники

Полупроводниками являются кристаллические вещества, у которых при 0 К валентная зона полностью заполнена электронами (см. рис. 42.3б), а ширина запрещенной зоны невелика. Полупроводники

обязаны своим названием тому обстоятельству, что по электропроводности они занимают промежуточное положение между металлами и диэлектриками. Однако характерным для них является не значение проводимости, а то, что их проводимость растет с повышением температуры (напомним, что у металлов она уменьшается).

Различают собственные и примесные полупроводники. К числу собственных относятся химически чистые полупроводники. Электрические свойства примесных полупроводников определяются имеющимися в них искусственно вводимыми примесями.

При рассмотрении электрических свойств полупроводников большую роль играет понятие «дырок». Остановимся на выяснении физического смысла этого понятия.

В собственном полупроводнике при абсолютном нуле все уровни валентной зоны полностью заполнены

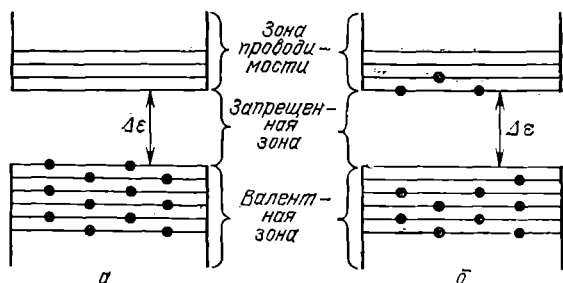


Рис. 43.1. Образование вакантных уровней в валентной зоне полупроводника

электронами, а в зоне проводимости электроны отсутствуют (рис. 43.1а). Электрическое поле не может перебросить электроны из валентной зоны в зону проводимости. Поэтому собственные полупроводники ведут себя при абсолютном нуле как диэлектрики. При температурах, отличных от 0 К, часть электронов с верхних уровней валентной зоны переходит в результате теплового возбуждения на нижние уровни зоны проводимости (рис. 43.1б). В этих условиях электрическое поле получает возможность изменять состояние электронов, находящихся в зоне проводимости. Кроме того, вследствие образования вакантных уровней в

валентной зоне электроны этой зоны также могут изменять свою скорость под воздействием внешнего поля. В результате электропроводность полупроводника становится отличной от нуля.

Оказывается, что при наличии вакантных уровней поведение электронов валентной зоны может быть представлено как движение положительно заряженных квазичастиц, получивших название «дырок». Из равенства нулю проводимости полностью заполненной валентной зоны вытекает, что сумма скоростей всех электронов такой зоны равна нулю:

$$\sum_i v_i = 0.$$

Выделим из этой суммы скорость k -го электрона:

$$\sum_{i \neq k} v_i + v_k = 0.$$

Отсюда

$$\sum_{i \neq k} v_i = -v_k.$$

Из полученного соотношения вытекает, что, если k -й электрон в валентной зоне отсутствует, то сумма скоростей оставшихся электронов оказывается равной $-v_k$. Следовательно, все эти электроны создадут ток, равный $(-e)(-v_k) = ev_k$. Таким образом, возникший ток оказывается эквивалентным току, который создавала бы частица с зарядом $+e$, имеющая скорость отсутствующего электрона. Эта воображаемая частица и есть дырка.

К понятию дырок можно прийти также следующим путем. Запрещенной зоне соответствует разрыв дисперсионной кривой, изображенной на рис. 39.1. Вакантные уровни образуются у потолка валентной зоны, т. е. в окрестности точки C дисперсионной кривой. Эффективная масса электрона m^* вблизи этой точки является отрицательной. Отсутствие частицы с отрицательным зарядом $-e$ и отрицательной массой m^* эквивалентно наличию частицы с положительным зарядом $+e$ и положительной массой $|m^*|$, т. е. дырки.

Итак, по своим электрическим свойствам валентная зона с небольшим числом вакантных состояний эквивалентна пустой зоне, содержащей небольшое число положительно заряженных квазичастиц, называемых дырками.

Подчеркнем, что движение дырки не есть перемещение какой-то реальной положительно заряженной частицы. Представление о дырках отображает характер движения всей многоэлектронной системы в полупроводнике.

Собственная проводимость полупроводников. Собственная проводимость возникает в результате перехода электронов с верхних уровней валентной зоны в зону проводимости. При этом в зоне проводимости появляется некоторое число носителей тока — электронов, занимающих уровни вблизи дна зоны; одновременно в валентной зоне освобождается такое же число мест на верхних уровнях, в результате чего появляются дырки.

Распределение электронов по уровням валентной зоны и зоны проводимости описывается функцией Ферми — Дирака (см. рис. 38.2). Это распределение можно сделать очень наглядным, изобразив, как это

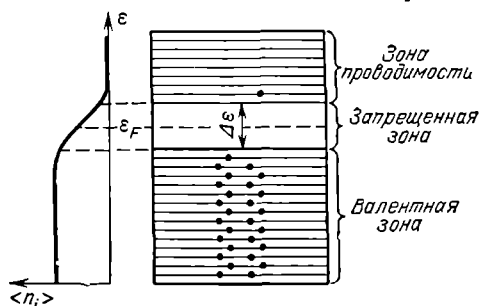


Рис. 43.2. Распределение электронов по уровням валентной зоны и зоны проводимости в собственном полупроводнике

сделано на рис. 43.2, график функции распределения совместно со схемой энергетических зон.

Соответствующий расчет дает, что у собственных полупроводников отсчитанное от потолка валентной зоны значение уровня Ферми равно

$$\epsilon_F = \frac{1}{2} \Delta\epsilon + \frac{3}{4} kT \ln \frac{m_d^*}{m_s^*},$$

где $\Delta\epsilon$ — ширина запрещенной зоны, а m_d^* и m_s^* — эффективные массы дырки и электрона, находящегося в зоне проводимости. Обычно второе слагаемое прене-

брежимо мало и можно полагать $\epsilon_F = (1/2)\Delta\epsilon$. Это означает, что уровень Ферми лежит посредине запрещенной зоны (см. рис. 43.2). Следовательно, для электронов, перешедших в зону проводимости, величина $\epsilon_i - \epsilon_F$ мало отличается от половины ширины запрещенной зоны.

Уровни зоны проводимости лежат на «хвосте» кривой распределения (см. рис. 43.2). Поэтому средние числа заполнения для них малы по сравнению с единицей. В этом случае единицей в знаменателе распределения (38.1) можно пренебречь и считать, что

$$\langle n_i \rangle \approx 2 \exp [-(\epsilon_i - \epsilon_F)/kT].$$

Положив в этой формуле $\epsilon_i - \epsilon_F \approx \Delta\epsilon/2$, получим, что

$$\langle n_i \rangle \approx 2 \exp (-\Delta\epsilon/2kT). \quad (43.1)$$

Количество электронов, перешедших в зону проводимости, а следовательно, и количество образовавшихся дырок будут пропорциональны выражению (43.1). Эти электроны и дырки являются носителями тока. Поскольку проводимость пропорциональна числу носителей, она также должна быть пропорциональна выражению (43.1). Следовательно, электропроводность собственных полупроводников быстро растет с температурой, изменяясь по закону

$$\sigma = \sigma_0 \exp (-\Delta\epsilon/2kT), \quad (43.2)$$

где $\Delta\epsilon$ — ширина запрещенной зоны, σ_0 — величина, изменяющаяся с температурой гораздо медленнее, чем экспонента, в связи с чем ее можно в первом приближении считать константой.

Если на графике откладывать зависимость $\ln \sigma$ от $1/T$, то для собственных полупроводников получается прямая линия, изображенная на рис. 43.3. По наклону этой прямой можно определить ширину запрещенной зоны $\Delta\epsilon$.

Типичными полупроводниками являются элементы IV группы периодической системы Менделеева — германий и кремний. Они образуют решетку типа алмаза, в которой каждый атом связан ковалентными (парно-электронными) связями с четырьмя равноотстоящими от него соседними атомами (см. рис. 91.2а 1-го тома). Условно такое взаимное расположение атомов можно представить в виде плоской структуры, изображенной

на рис. 43.4. Кружки со знаком «+» обозначают положительно заряженные атомные остатки (т. е. ту часть атома, которая остается после удаления валентных электронов), кружки со знаком «-» — валентные электроны, двойные линии — ковалентные связи.

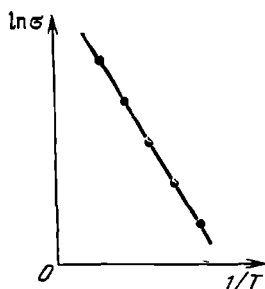


Рис. 43.3. Температурная зависимость собственной проводимости полупроводника

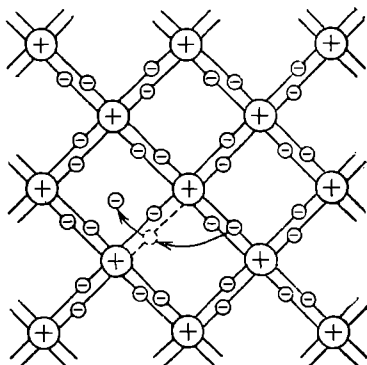


Рис. 43.4. Условная схема кристалла типа алмаза

При достаточно высокой температуре тепловое движение может разорвать отдельные пары, освободив один электрон. Покинутое электроном место перестает быть нейтральным, в его окрестности возникает избыточный положительный заряд $+e$, т. е. образуется дырка (на рис. 43.4 она изображена пунктирным кружком). На это место может перескочить электрон одной из соседних пар. В результате дырка начинает также странствовать по кристаллу, как и освободившийся электрон.

При встрече свободного электрона с дыркой они рекомбинируют (соединяются). Это означает, что электрон нейтрализует избыточный положительный заряд, имеющийся в окрестности дырки, и теряет свободу передвижения до тех пор, пока снова не получит от кристаллической решетки энергию, достаточную для своего высвобождения. Рекомбинация приводит к одновременному исчезновению свободного электрона и дырки. На схеме уровней (рис. 43.2) процессу рекомбинации соответствует переход электрона из зоны

проводимости на один из свободных уровней валентной зоны.

Итак, в собственном полупроводнике идут одновременно два процесса: рождение попарно свободных электронов и дырок и рекомбинация, приводящая к попарному исчезновению электронов и дырок. Вероятность первого процесса быстро растет с температурой. Вероятность рекомбинации пропорциональна как числу свободных электронов, так и числу дырок. Следовательно, каждой температуре соответствует определенная равновесная концентрация электронов и дырок, которая изменяется с температурой пропорционально выражению (43.1).

Когда внешнее электрическое поле отсутствует, электроны проводимости и дырки движутся хаотически. При включении поля на хаотическое движение накладывается упорядоченное движение: электронов против поля и дырок — в направлении поля. Оба движения — и дырок, и электронов — приводят к переносу заряда вдоль кристалла. Следовательно, собственная электропроводность обуславливается как бы носителями заряда двух знаков — отрицательными электронами и положительными дырками.

Отметим, что при достаточно высокой температуре собственная проводимость наблюдается во всех без исключения полупроводниках. Однако в полупроводниках, содержащих примесь, электропроводность складывается из собственной и примесной проводимостей.

Примесная проводимость полупроводников.

Примесная проводимость возникает, если некоторые атомы данного полупроводника заменить в узлах кристаллической решетки атомами, валентность которых отличается на единицу от валентности основных атомов. На рис. 43.5 условно изображена решетка германия с примесью пятивалентных атомов фосфора. Для образования ковалентных связей с соседями атому фос-

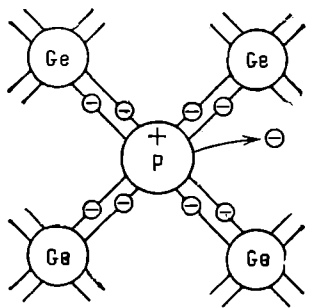


Рис. 43.5. Решетка германия с примесью пятивалентных атомов фосфора

фора достаточно четырех электронов. Следовательно, пятый валентный электрон оказывается как бы лишним и легко отщепляется от атома за счет энергии теплового движения, образуя странствующий свободный электрон.

В отличие от случая, изображенного на рис. 43.4, образование свободного электрона не сопровождается нарушением ковалентных связей, т. е. образованием дырки. Хотя в окрестности атома примеси возникает избыточный положительный заряд, но он связан с этим атомом и перемещаться по решетке не может. Благодаря этому заряду атом примеси может захватить приблизившийся к нему электрон, но связь захваченного электрона с атомом будет непрочной и легко нарушается вновь за счет тепловых колебаний решетки.

Таким образом, в полупроводнике с примесью, валентность которой на единицу больше валентности основных атомов, имеется только один вид носителей тока — электроны. Соответственно говорят, что такой полупроводник обладает электронной проводимостью

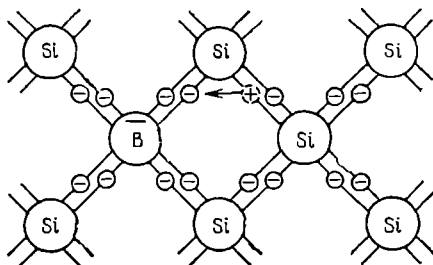


Рис. 43.6. Решетка кремния с примесью трехвалентных атомов бора

или является полупроводником *n*-типа (от слова negative — отрицательный). Атомы примеси, поставляющие электроны проводимости, называются донорами.

Теперь рассмотрим случай, когда валентность примеси на единицу меньше валентности основных атомов. На рис. 43.6 условно изображена решетка кремния с примесью трехвалентных атомов бора. Трех валентных электронов атома бора недостаточно для образования связей со всеми четырьмя соседями. Поэтому одна из связей окажется неупакованной

и будет представлять собой место, способное захватить электрон. При переходе на это место электрона одной из соседних пар возникнет дырка, которая будет кочевать по кристаллу. Вблизи атома примеси возникнет избыточный отрицательный заряд, но он будет связан с данным атомом и не может стать носителем тока.

Таким образом, в полупроводнике с примесью, валентность которой на единицу меньше валентности основных атомов, возникают носители тока только одного вида — дырки. Проводимость в этом случае называется дырочной, а о полупроводнике говорят, что он принадлежит к *p*-типу (от слова *positive* — положительный). Примеси, вызывающие возникновение дырок, называются **а к ц е п т о р н ы м и**.

Электронный характер проводимости полупроводников *n*-типа и дырочный характер проводимости полупроводников *p*-типа подтверждается экспериментально при исследовании эффекта Холла (см. § 45 2-го тома). Наблюдаемый знак холловской разности потенциалов соответствует в полупроводниках *n*-типа отрицательным носителям тока, а в полупроводниках *p*-типа — положительным носителям.

Примеси искажают поле решетки, что приводит к возникновению на энергетической схеме примесных уровней, расположенных в запрещенной зоне кристалла. В случае полупроводников *n*-типа примесные уровни называются **д о н о р н ы м и** (рис. 43.7а), в случае полупроводников *p*-типа **а к ц е п т о р н ы м и** (рис. 43.7б).

Уровень Ферми в полупроводниках *n*-типа располагается в верхней половине запрещенной зоны, а в полупроводниках *p*-типа — в нижней половине запрещенной зоны. При повышении температуры уровень Ферми в полупроводниках обоих типов смещается к середине запрещенной зоны.

Если донорные уровни расположены недалеко от потолка валентной зоны¹⁾, они не могут существенно повлиять на электрические свойства кристалла. Иначе обстоит дело, когда расстояние таких уровней от дна зоны проводимости гораздо меньше ширины за-

¹⁾ Это значит, что пятый валентный электрон прочно связан со своим атомом,

прещенной зоны. В этом случае энергия теплового движения даже при обычных температурах оказывается достаточной для того, чтобы перевести электрон с донорного уровня в зону проводимости (см. рис. 43.7а). Этому процессу соответствует отщепление пятого валентного электрона от атома примеси. Захвату свободного электрона атомом примеси соответствует на рис. 43.7 переход электрона из зоны проводимости на один из донорных уровней.

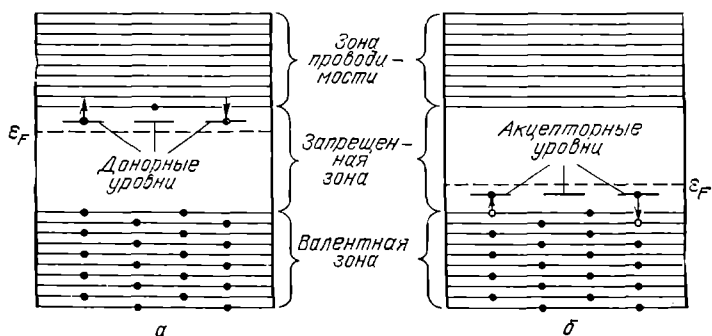


Рис. 43.7. Схема энергетических уровней полупроводника *n*-типа (а) и *p*-типа (б)

Акцепторные уровни оказывают существенное влияние на электрические свойства кристалла в том случае, если они расположены недалеко от потолка валентной зоны (см. рис. 43.7б). Образованию дырки отвечает переход электрона из валентной зоны на акцепторный уровень. Обратный переход соответствует разрыву одной из четырех ковалентных связей атома примеси с его соседями и рекомбинации образовавшегося при этом электрона и дырки.

При повышении температуры концентрация примесных носителей тока быстро достигает насыщения. Это означает, что практически освобождаются все донорные или заполняются электронами все акцепторные уровни. Вместе с тем по мере роста температуры все в большей степени начинает сказываться собственная проводимость полупроводника, обусловленная переходом электронов непосредственно из валентной зоны в зону проводимости. Таким образом, при высоких температурах проводимость полупроводника будет

складываться из примесной и собственной проводимостей. При низких температурах преобладает примесная, а при высоких — собственная проводимость.

§ 44. Контактные явления

В § 32 2-го тома мы определили работу выхода как наименьшую энергию, которую нужно сообщить электрону, чтобы удалить его из твердого или жидкого тела в вакуум. Теперь мы можем дать более строгое определение работы выхода для случая твердых тел.

Металлическое тело представляет для валентных электронов потенциальную яму. Поэтому потенциальная энергия валентных электронов внутри металла меньше, чем вне металла, на величину, равную глубине потенциальной ямы ϵ_{p0} (рис. 44.1). Изменение

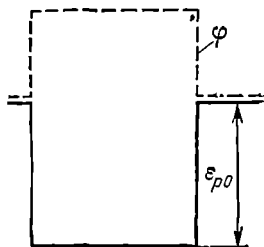


Рис. 44.1. Потенциальная яма глубины ϵ_{p0} для валентных электронов в металле. Потенциальная энергия электрона в металле отрицательна и равна $-\epsilon_{p0}$ (потенциальную энергию вне металла полагаем равной нулю). Штриховой линией показано изменение потенциала при переходе через поверхность металла

энергии происходит на длине порядка нескольких межатомных расстояний, поэтому стенки ямы можно считать вертикальными.

Согласно формуле (8.5) 2-го тома потенциальная энергия электрона $-\epsilon_{p0}$ внутри металла равна произведению заряда электрона $-e$ на потенциал ϕ_m внутри металла (потенциал вне металла полагаем равным нулю). Отсюда следует, что потенциал ϕ_m внутри металла положителен и равен ϵ_{p0}/e (ϵ_{p0} — глубина потенциальной ямы, e — элементарный заряд). Подчеркнем, что потенциальная энергия электрона и потенциал имеют разные знаки.

Сообщение металлу избыточного положительного заряда увеличивает потенциал как на поверхности, так и внутри металла. Потенциальная энергия электрона соответственно уменьшается (рис. 44.2а). Напомним, что за начало отсчета приняты значения потенциала и потенциальной энергии на бесконечности,

Сообщение отрицательного заряда понижает потенциал внутри и вне металла. Соответственно потенциальная энергия электрона возрастает (рис. 44.2б).

Полная энергия электрона в металле складывается из потенциальной и кинетической энергий. В § 38 было

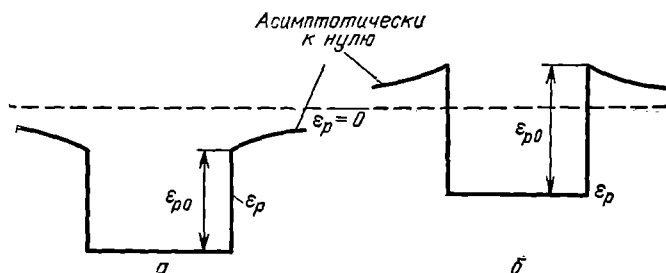
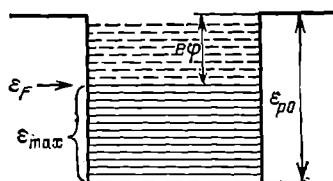


Рис. 44.2. Изменение потенциальной энергии электрона при сообщении металлу положительного (а) и отрицательного (б) зарядов

выяснено, что при абсолютном нуле значения кинетической энергии электронов проводимости заключены в пределах от нуля до совпадающей с уровнем Ферми энергии $\epsilon_{\max}$. На рис. 44.3 энергетические уровни зоны

Рис. 44.3. Потенциальная яма с «вписанными» в нее энергетическими уровнями зоны проводимости. Штриховыми линиями изображены уровни, не занятые при абсолютном нуле



проводимости «вписаны» в потенциальную яму. Для удаления за пределы металла разным электронам нужно сообщить неодинаковую энергию. Так, электрону, находящемуся на самом нижнем уровне зоны проводимости, необходимо сообщить энергию ϵ_{p0} ; для электрона, находящегося на уровне Ферми, достаточна энергия $\epsilon_{p0} - \epsilon_{\max} = \epsilon_{p0} - \epsilon_F$.

Работу выхода принято обозначать через $e\phi$, где ϕ — величина, называемая потенциалом выхода. В соответствии со сказанным выше работа выхода электрона из металла определяется выражением

$$e\phi = \epsilon_{p0} - \epsilon_F. \quad (44.1)$$

Мы получили это выражение в предположении, что температура металла равна 0 К. При других температурах работу выхода также определяют как разность глубины потенциальной ямы и уровня Ферми, т. е. распространяют определение (44.1) на любые температуры. Это же определение применяется и для полупроводников.

Уровень Ферми зависит от температуры (см. формулу (38.13)). Кроме того, из-за обусловленного тепловым расширением изменения средних расстояний между атомами слегка изменяется глубина потенциальной ямы ϵ_{p0} . Это приводит к тому, что работа выхода немного зависит от температуры.

Контактная разность потенциалов. Если привести два разных металла в соприкосновение, между ними

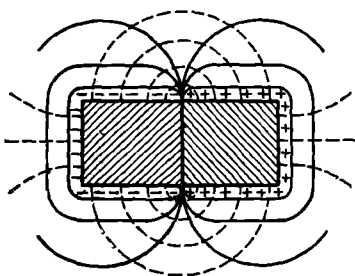


Рис. 44.4. Эквипотенциальные поверхности (сплошные) и линии E (штриховые) поля, обусловленного контактной разностью потенциалов

возникает разность потенциалов, которая называется контактной. В результате в окружающем металлы пространстве появляется электрическое поле. На рис. 44.4 изображены эквипотенциальные поверхности и линии напряженности этого поля; поверхность каждого из металлов является эквипотенциальной.

Контактная разность потенциалов обусловлена тем, что при соприкосновении металлов часть

электронов из одного металла переходит в другой. В верхней части рис. 44.5 изображены два металла до приведения их в соприкосновение и после. В нижней части рисунка даны графики потенциальной энергии электрона. Уровень Ферми в первом металле лежит, по предположению, выше, чем во втором. Естественно, что при возникновении контакта между металлами электроны с самых высоких уровней в первом металле станут переходить на более низкие свободные уровни второго металла. В результате потенциал первого металла возрастет, а второго — уменьшится. Соответственно потенциальная энергия электрона в пер-

вом металле уменьшится, а во втором увеличится (напомним, что потенциал металла и потенциальная энергия электрона в нем имеют разные знаки).

В статистической физике доказывается, что условием равновесия между соприкасающимися металлами (а также между полупроводниками или металлом

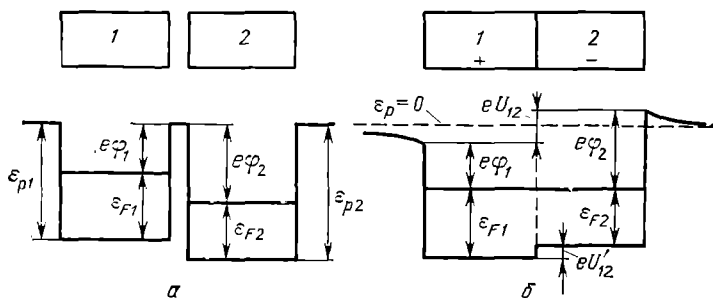


Рис. 44.5. График потенциальной энергии электрона в двух различных металлах, не соприкасающихся друг с другом (а) и находящихся в контакте друг с другом (б)

и полупроводником) является равенство полных энергий, соответствующих уровням Ферми. При этом условии уровни Ферми обоих металлов располагаются на схеме на одинаковой высоте. На рис. 44.5 видно, что в этом случае потенциальная энергия электрона в непосредственной близости к поверхности первого металла будет на $e\varphi_2 - e\varphi_1$ меньше, чем вблизи второго металла. Следовательно, потенциал на поверхности первого металла будет на

$$U_{12} = \frac{e\varphi_2 - e\varphi_1}{e} = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (44.2)$$

выше, чем на поверхности второго. Величина U_{12} и есть контактная разность потенциалов между первым и вторым металлами.

Согласно формуле (44.2) контактная разность потенциалов между первым и вторым металлами равна разности работ выхода для второго и первого металлов, деленной на элементарный заряд, или просто разности потенциалов выхода для второго и первого металлов.

Разность потенциалов (44.2) устанавливается между точками, лежащими вне металлов в непосред-

венной близости к их поверхности. Поэтому ее называют внешней контактной разностью потенциалов. Чаще же говорят просто о контактной разности потенциалов, подразумевая под ней внешнюю. Между внутренними точками металлов также имеется разность потенциалов, которая называется внутренней. На рис. 44.5 видно, что потенциальная энергия электрона в первом металле меньше, чем во втором, на $\epsilon_{F1} - \epsilon_{F2}$. Соответственно потенциал внутри первого металла выше, чем внутри второго, на величину

$$U'_{12} = \frac{\epsilon_{F1} - \epsilon_{F2}}{e}. \quad (44.3)$$

Это выражение дает внутреннюю контактную разность потенциалов. На такую величину убывает потенциал при переходе из первого металла во второй.

Если придать двум разным металлам форму, показанную на рис. 44.6, и привести их в соприкосновение, то в зазоре $B-C$ возникает электрическое поле.

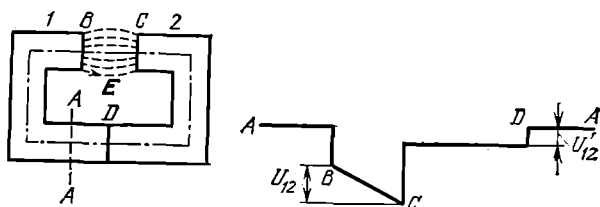


Рис. 44.6. Поле в зазоре между двумя соприкасающимися металлами. Штрихами изображены линии E . Справа показано изменение потенциала вдоль контура, обозначенного на левом рисунке штрихпунктирной линией

На рис. 44.7 показано изменение потенциальной энергии электрона вдоль трех различных соприкасающихся друг с другом металлов 1, 2, 3. Из рисунка следует, что устанавливающаяся между металлами 1 и 3 разность потенциалов оказывается в этом случае точно такой, как и при их непосредственном соприкосновении. (Значения потенциалов при этом могут измениться. В частности, может случиться, что оба крайних металла будут иметь потенциал одного знака.) То же самое справедливо при любом числе промежуточных звеньев: разность потенциалов между конца-

ми цепи определяется разностью работ выхода для металлов, образующих крайние звенья цепи.

Значения внешней контактной разности потенциалов колеблются для различных пар металлов от нескольких десятых вольт до нескольких вольт.

Мы рассмотрели контакт двух металлов. Однако контактная разность потенциалов возникает и на границе между металлом и полупроводником, а также на границе между двумя полупроводниками.

В заключение рассмотрим замкнутую цепь, составленную из произвольного числа разнородных металлов и полупроводников (рис. 44.8). Если все спай поддерживать при одинаковой температуре,

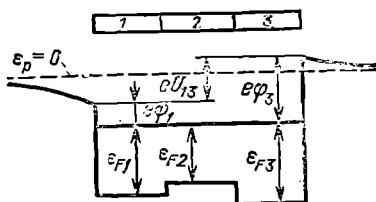


Рис. 44.7. График потенциальной энергии электрона в трех соприкасающихся различных металлах

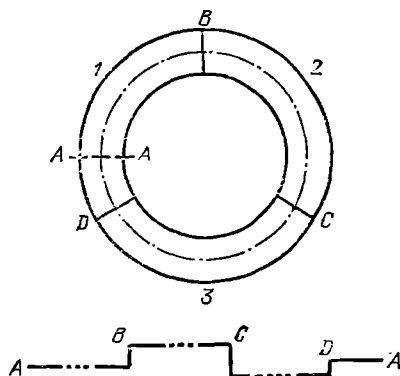


Рис. 44.8. Замкнутая цепь, состоящая из трех различных металлов. Внизу показано изменение потенциала вдоль этой цепи

сумма скачков потенциалов будет равна нулю. Поэтому ЭДС в цепи возникнуть не может. Возникновение тока в такой цепи противоречило бы второму началу термодинамики. Действительно, так как протекание тока в металлах и полупроводниках не сопровождается химическими изменениями, ток совершал бы работу за счет теплоты, получаемой от окружающей цепи

среды. Никаких побочных процессов (например, передачи части полученной теплоты другим телам) при этом не происходило бы. Следовательно, был бы осуществлен перпетуум мобиле второго рода.

Эффект Зеебека. В 1821 г. Зеебек¹⁾ обнаружил, что в случае если спаи 1 и 2 двух разнородных металлов, образующих замкнутую цепь (рис. 44.9),

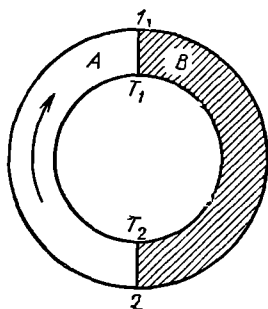


Рис. 44.9. Замкнутая цепь двух разнородных металлов, спаи которых имеют неодинаковую температуру

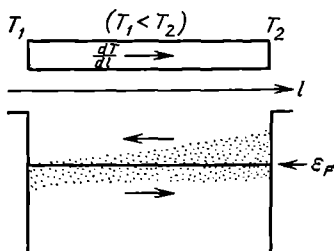


Рис. 44.10. Диффузия электронов вдоль неоднородно нагретого стержня. Верхняя стрелка указывает направление диффузии более быстрых электронов, нижняя стрелка — направление диффузии более медленных электронов

имеют неодинаковую температуру, в цепи течет электрический ток. Изменение знака у разности температур спаев сопровождается изменением направления тока.

Термоэлектродвижущая сила (сокращенно термо ЭДС) обусловлена тремя причинами: 1) зависимостью уровня Ферми от температуры, 2) диффузией электронов (или дырок) и 3) увлечением электронов фононами.

Уровень Ферми зависит от температуры (см. формулу (38.13)). Поэтому скачок потенциала при переходе из одного металла в другой (т. е. внутренняя контактная разность потенциалов; см. (44.3)) для спаев, находящихся при разных температурах, неодинаков, и сумма скачков потенциала отлична от нуля.

¹⁾ Томас Иоганн Зеебек (1770—1831) — немецкий физик.

Одного этого было бы достаточно для возникновения ЭДС в цепи, изображенной на рис. 44.9.

Чтобы понять вторую причину возникновения термоЭДС, рассмотрим однородный металлический проводник, вдоль которого имеется градиент температуры dT/dl (рис. 44.10). В этом случае концентрация электронов с $\varepsilon > \varepsilon_F$ у нагретого конца будет больше, чем у холодного; концентрация электронов с $\varepsilon < \varepsilon_F$ будет, наоборот, у нагретого конца меньше. Вдоль проводника возникнет градиент концентрации электронов с данным значением энергии, что повлечет за собой диффузию более быстрых электронов к холодному концу, а более медленных — к теплomu. Диффузионный поток быстрых электронов будет больше, чем поток медленных электронов. Поэтому вблизи холодного конца образуется избыток электронов, а вблизи горячего — их недостаток. Это приводит к возникновению диффузионного слагаемого термоЭДС.

Третья причина возникновения термоЭДС заключается в увлечении электронов фононами. При наличии градиента температуры вдоль проводника возникает дрейф фононов. Сталкиваясь с электронами, фононы сообщают им направленное движение от более нагретого конца проводника к менее нагретому. В результате происходит накапливание электронов на холодном конце и обеднение электронами горячего конца, что приводит к возникновению «фононного» слагаемого термоЭДС.

Оба процесса — диффузия электронов и увлечение электронов фононами — приводят к образованию избытка электронов вблизи холодного конца проводника и недостатка их вблизи горячего конца. В результате внутри проводника возникнет стороннее (неэлектростатическое) поле E^* , направленное навстречу градиенту температуры.

Описанный процесс возникновения поля E^* внутри неравномерно нагретого проводника имеет место и в полупроводниках. У полупроводников n -типа это поле имеет такое же направление, как в металле. В случае дырочной проводимости дырки, диффундируя в большем числе к холодному концу, создают вблизи него избыточный положительный заряд. К такому же результату приводит увлечение дырок фононами. Поэтому у полупроводников p -типа потенциал холодного

конца будет выше, чем потенциал нагретого, и, следовательно, направление поля E^* совпадает с направлением градиента температуры.

ТермоЭДС, возникающую в изображенной на рис. 44.9 цепи, состоящей из металлов или полупроводников A и B , можно представить в виде

$$\mathcal{E}_{\text{термо}} = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_{AB} dT. \quad (44.4)$$

Величину α_{AB} называют дифференциальной или удельной термоэлектродвижущей силой данной пары металлов или полупроводников. Для большинства пар металлов α_{AB} имеет порядок $10^{-5} - 10^{-4}$ В/К; для полупроводников она может оказаться гораздо больше (до $1,5 \cdot 10^{-3}$ В/К). Это объясняется тем, что у полупроводников с разным типом проводимости поле E^* ориентировано одинаковым образом по отношению к направлению обхода по замкнутой цепи (у металлов и полупроводников одинакового типа эта ориентация в звеньях A и B цепи противоположна).

В отдельных случаях удельная термоЭДС слабо зависит от температуры. Тогда формулу (44.4) можно приближенно представить в виде

$$\mathcal{E}_{\text{термо}} = \alpha_{AB} (T_2 - T_1). \quad (44.5)$$

Однако, как правило, с увеличением разности температур спаев $\mathcal{E}_{\text{термо}}$ изменяется не по линейному закону, а довольно сложным образом, вплоть до того, что может менять знак. Так, например, если один спай пары железо — медь поддерживать при 0°C , то при температуре второго спае, равной примерно 540°C , термоЭДС обращается в нуль; при более низкой температуре спае термоЭДС имеет один знак, при более высокой — другой.

Эффект Зеебека используется для измерения температур. Соответствующее устройство называется термопарой. Один спай термопары поддерживают при постоянной температуре (например, при 0°C), другой помещают в ту среду, температуру которой хотят измерить. О значении температуры можно судить по силе возникающего термотока, измеряемой гальванометром. Более точный результат получается, если

измерять возникающую термоЭДС по методу компенсации. Предварительно термопару градуируют. С помощью термопар можно измерять с точностью порядка сотых долей градуса как низкие, так и высокие температуры.

В качестве источников тока термопары из металлов и их сплавов не используются вследствие весьма низкого КПД (не более 0,5 %). Термопары из полупроводниковых материалов обладают гораздо большим КПД (порядка 10 %). Они нашли применение в качестве небольших генераторов для питания радиоаппаратуры.

Эффект Пельтье. Этот эффект, открытый Пельтье¹⁾ в 1834 г., заключается в том, что при протекании тока через цепь, составленную из разнородных металлов или полупроводников, в одних спаях происходит выделение, а в других — поглощение теплоты. Таким образом, эффект Пельтье оказывается обратным эффекту Зеебека.

Экспериментально найдено, что количество выделившейся или поглотившейся в спаяе теплоты пропорционально заряду q , прошедшему через спай:

$$Q_{AB} = P_{AB}q = P_{AB}It \quad (44.6)$$

(индексы указывают, что ток течет от звена A к звену B). Коэффициент пропорциональности P_{AB} называется коэффициентом Пельтье.

Из (44.6) следует, что, в отличие от теплоты Джоуля — Ленца, теплота Пельтье пропорциональна не квадрату, а первой степени силы тока.

При перемене направления тока Q изменяет знак, т. е. вместо выделения (поглощения) теплоты наблюдается поглощение (выделение) такого же количества теплоты (при том же q). Следовательно,

$$P_{AB} = -P_{BA}.$$

В случае контакта двух веществ с одинаковым видом носителей тока (металл — металл, металл — полупроводник n -типа, два полупроводника n -типа, два полупроводника p -типа) эффект Пельтье имеет следующее объяснение. Носители тока (электроны или

¹⁾ Жан Шарль Атаназ Пельтье (1785—1845) — французский физик.

дырки) по разные стороны от спая имеют различную среднюю энергию (имеется в виду полная энергия — кинетическая плюс потенциальная). Если носители, пройдя через спай, попадают в область с меньшей энергией, они отдают избыток энергии кристаллической решетке, в результате чего спай нагревается. На другом спае носители переходят в область с большей энергией; недостающую энергию они заимствуют у решетки, что приводит к охлаждению спая.

В случае контакта двух полупроводников с различным типом проводимости эффект Пельтье имеет другое объяснение. В этом случае на одном спае электроны и дырки движутся навстречу друг другу. Встретившись, они рекомбинируют: электрон, находившийся в зоне проводимости n -полупроводника, попав в p -полупроводник, занимает в валентной зоне место дырки. При этом высвобождается энергия, которая требуется для образования свободного электрона в n -полупроводнике и дырки в p -полупроводнике, а также кинетическая энергия электрона и дырки. Эта энергия сообщается кристаллической решетке и идет на нагревание спая. На другом спае протекающий ток отсасывает электроны и дырки от границы между полупроводниками. Убыль носителей тока в пограничной области восполняется за счет попарного рождения электронов и дырок (при этом электрон из валентной зоны p -полупроводника переходит в зону проводимости n -полупроводника). На образование пары затрачивается энергия, которая заимствуется у решетки, — спай охлаждается.

§ 45. Контакт электронного и дырочного полупроводников

Контакт полупроводников разного типа, называемый $p-n$ -переходом, лежит в основе устройств, получивших название транзисторов. Этот переход представляет собой тонкий слой на границе между двумя областями одного и того же кристалла, отличающимися типом примесной проводимости. Для изготовления такого перехода берут, например, монокристалл из очень чистого германия с электронным механизмом проводимости (обусловленным ничтожными остатками примесей). В вырезанную из кри-

сталла тонкую пластинку вплавляют с одной стороны кусочек индия. Во время этой операции, которая осуществляется в вакууме или в атмосфере инертного газа, атомы индия диффундируют в германии на некоторую глубину. В той области, в которую проникают атомы индия, проводимость германия становится дырочной. На

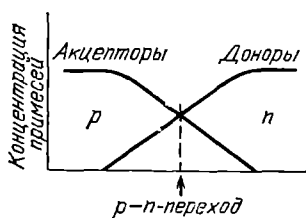


Рис. 45.1. Изменение концентрации акцепторных и донорных примесей в области $p-n$ -перехода

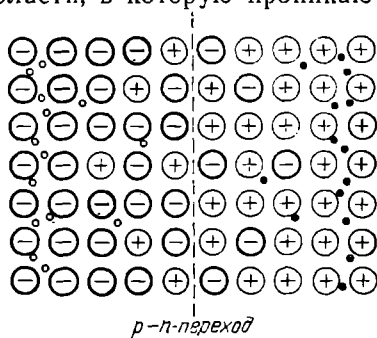


Рис. 45.2. Распределение акцепторов и доноров в окрестности $p-n$ -перехода. Большие кружки со знаком плюс или минус — ионы, малые кружки — дырки, черные точки — электроны

границе этой области возникает $p-n$ -переход. Существуют и другие способы получения $p-n$ -переходов.

На рис. 45.1 показан ход концентрации примесей в направлении, перпендикулярном к граничному слою. В p -области основными носителями тока являются дырки, образовавшиеся в результате захвата электронов атомами примеси; акцепторы при этом становятся отрицательными ионами (рис. 45.2). Кроме того, в p -области имеется небольшое число неосновных носителей — электронов, возникающих вследствие перевода тепловым движением электронов из валентной зоны непосредственно в зону проводимости (этот процесс немного увеличивает и число дырок). В n -области основные носители тока — электроны, отданные донорами в зону проводимости (доноры при этом превращаются в положительные ионы); происходящий за счет теплового движения переход электронов из валентной зоны в зону проводимости приводит к образованию небольшого числа дырок — неосновных носителей для этой области.

Диффундируя во встречных направлениях через пограничный слой, дырки и электроны рекомбинируют друг с другом. Поэтому $p-n$ -переход оказывается сильно обедненным носителями тока и приобретает большое сопротивление. Одновременно на границе между областями возникает двойной электрический слой, образованный отрицательными ионами акцепторной примеси, заряд которых теперь не компенсируется дырками, и положительными ионами донорной примеси, заряд которых теперь не компенсируется электронами (см. рис. 45.2). Электрическое поле в этом слое направлено так, что противодействует дальнейшему переходу через слой основных носителей. Равновесие достигается при такой высоте потенциального барьера, при которой уровни Ферми обеих областей располагаются на одинаковой высоте (рис. 45.3).

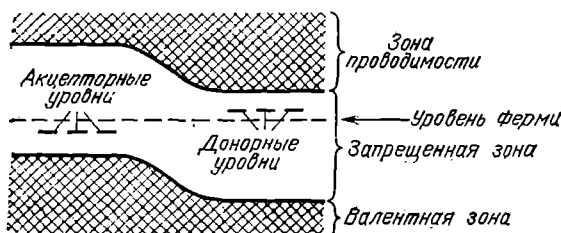


Рис. 45.3. Изгибание энергетических зон в области $p-n$ -перехода

Изгибание энергетических зон в области перехода вызвано тем, что потенциал p -области в состоянии равновесия ниже, чем потенциал n -области; соответственно потенциальная энергия электрона в p -области больше, чем в n -области. Нижняя граница валентной зоны дает ход потенциальной энергии электрона $\epsilon_{pз}$ в направлении, перпендикулярном к переходу (см. сплошную кривую на рис. 45.4а). Заряд дырок противоположен заряду электрона, поэтому их потенциальная энергия $\epsilon_{pд}$ больше там, где меньше $\epsilon_{pз}$, и наоборот (см. штриховую кривую на рис. 45.4а).

В состоянии равновесия некоторому количеству основных носителей удастся преодолеть потенциальный барьер, вследствие чего через переход течет небольшой ток $I_{осн}$ (рис. 45.4а). Этот ток компенсируется обусловленным неосновными носителями встречным то-

ком $I_{\text{неосн}}$. Неосновных носителей очень мало, но они легко проникают через границу областей, «скатываясь» с потенциального барьера. Величина $I_{\text{неосн}}$ определяется числом рождающихся каждую секунду неосновных носителей и от высоты потенциального барьера почти не зависит. Величина $I_{\text{осн}}$, напротив, сильно

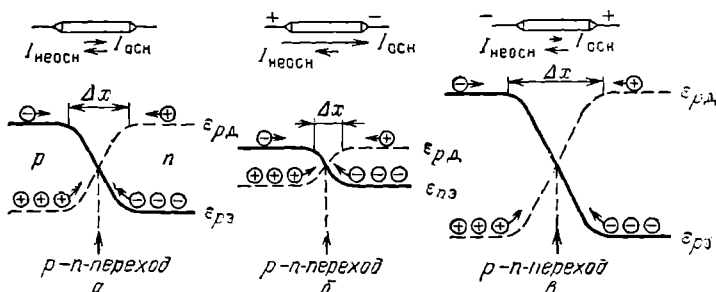


Рис. 45.4. Ход потенциальной энергии электронов (сплошные кривые) и дырок (штриховые кривые) в окрестности *p-n*-перехода для случаев: отсутствия внешнего напряжения (а), положительного (б) и отрицательного (в) внешнего напряжения

зависит от высоты барьера. Равновесие устанавливается как раз при такой высоте потенциального барьера, при которой оба тока $I_{\text{осн}}$ и $I_{\text{неосн}}$ компенсируют друг друга.

Подадим на кристалл внешнее напряжение¹⁾ такого направления, чтобы плюс был подключен к *p*-области, а минус — к *n*-области (такое напряжение называется прямым). Это приведет к возрастанию потенциала (т. е. увеличению $\epsilon_{p\Delta}$ и уменьшению $\epsilon_{p\Delta}$) *p*-области и понижению потенциала (т. е. уменьшению $\epsilon_{p\Delta}$ и увеличению $\epsilon_{p\Delta}$) *n*-области (рис. 45.4б). В результате высота потенциального барьера уменьшится и ток $I_{\text{осн}}$ возрастет. Ток же $I_{\text{неосн}}$ останется практически без изменений (он, как отмечалось, от высоты барьера почти не зависит). Следовательно, результирующий ток станет отличен от нуля. Понижение потенциального барьера пропорционально приложенному напряжению (оно равно eU). При

¹⁾ Внешнее напряжение нарушает равновесие, так что уровни Ферми обеих областей смещаются друг относительно друга. При прямом напряжении уровень Ферми в *p*-области располагается ниже, чем в *n*-области.

уменьшении высоты барьера ток основных носителей, а следовательно, и результирующий ток быстро нарастают. Таким образом, в направлении от p -области к n -области $p-n$ -переход пропускает ток, сила которого быстро нарастает при увеличении приложенного напряжения. Это направление называется прямым (или пропускным, или проходным).

На рис. 45.5 приведена вольт-амперная характеристика $p-n$ -перехода. Возникающее в кристалле при

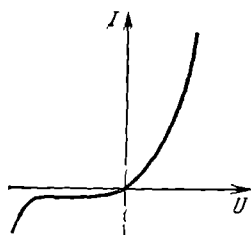


Рис. 45.5. Вольт-амперная характеристика $p-n$ -перехода

прямом напряжении электрическое поле «поджимает» основные носители к границе между областями, вследствие чего ширина переходного слоя, обедненного носителями, сокращается. Соответственно уменьшается и сопротивление перехода, причем тем сильнее, чем больше напряжение. Поэтому вольт-амперная характеристика в пропускной области не является прямой (см. правую ветвь кривой на рис. 45.5).

Теперь приложим к кристаллу напряжение такого направления, чтобы плюс был подключен к n -области, а минус — к p -области (такое напряжение называется обратным). Это приведет к повышению потенциального барьера и соответственному уменьшению тока основных носителей $I_{осн}$ (рис. 45.4в). Возникающий при этом результирующий ток (называемый обратным) быстро достигает насыщения (т. е. перестает зависеть от U) и становится равным $I_{неосн}$. Таким образом, в направлении от n -области к p -области (которое называется обратным или запорным) $p-n$ -переход пропускает слабый ток, целиком обусловленный неосновными носителями. Лишь при очень большом обратном напряжении сила тока начинает резко возрастать, что обусловлено электрическим пробоем перехода (см. левую ветвь на рис. 45.5). Каждый $p-n$ -переход характеризуется своим предельным значением обратного напряжения, которое он способен выдержать без разрушения.

Из рис. 45.5 следует, что $p-n$ -переход обладает в обратном направлении гораздо большим сопротивлением, чем в прямом. Это объясняется тем, что поле,

возникающее в кристалле при наложении обратного напряжения, «оттягивает» основные носители от границы между областями, что приводит к возрастанию ширины переходного слоя, обедненного носителями. Соответственно увеличивается и сопротивление перехода.

Неодинаковость сопротивления в прямом и обратном направлениях позволяет использовать $p-n$ -переходы для выпрямления переменного тока. На рис. 45.6 показан график тока, текущего через переход, в том случае, если приложенное напряжение изменяется по гармоническому закону. В этом случае ширина слоя, обедненного носителями, и сопротивление перехода пульсируют, изменяясь в такт с изменениями напряжения.

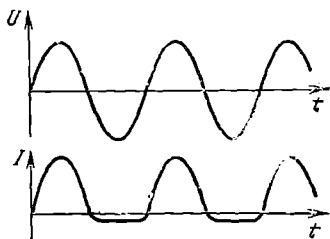


Рис. 45.6. Выпрямление переменного тока с помощью $p-n$ -перехода

§ 46. Фотоэффект в полупроводниках

В полупроводниках перераспределение электронов по энергетическим уровням может происходить не только вследствие теплового движения, но и под воздействием света. Если энергия фотона $\hbar\omega$ превышает ширину запрещенной зоны, то поглотивший фотон электрон переходит из валентной зоны в зону проводимости. В результате появляется дополнительная пара носителей тока — электрон и дырка, что проявляется в увеличении электропроводности вещества. Это явление называется внутренним фотоэффектом¹⁾.

В случае, когда в веществе имеются примеси, под действием света электроны могут переходить из валентной зоны на уровни примеси или с примесных уровней в зону проводимости. В первом случае возникает дырочная, во втором — электронная проводимость.

¹⁾ Внутренний фотоэффект может наблюдаться также и в диэлектриках.

На внутреннем фотоэффекте основано действие фотосопротивлений. Количество образующихся носителей тока пропорционально падающему световому потоку. Поэтому фотосопротивления применяются для целей фотометрии. В видимой части спектра применяются фотосопротивления, изготовленные из сернистого кадмия (CdS). Фотосопротивления из полупроводников PbS, PbSe, PbTe и InSb используются в качестве детекторов инфракрасного излучения.

В области $p-n$ -перехода или на границе металла с полупроводником может наблюдаться вентильный фотоэффект. Он заключается в возникновении под действием света электродвижущей силы (фотоЭДС). На рис. 46.1 показан ход потенциальной энергии электронов (сплошная кривая) и дырок (штриховая кривая) в области $p-n$ -перехода.

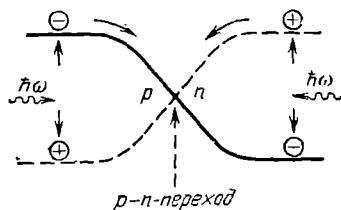


Рис. 46.1. Вентильный фотоэффект в области $p-n$ -перехода

Неосновные для данной области носители (электроны в p -области и дырки в n -области), возникшие под действием света, беспрепятственно проходят через переход. В результате в p -области накапливается избыточный положительный заряд, а в n -области — избыточный отрицательный заряд. Это приводит к возникновению приложенного к переходу напряжения, которое и представляет собой фотоэлектродвижущую силу.

Если подключить кристалл с $p-n$ -переходом к внешней нагрузке, в ней будет течь фототок. При не очень больших освещенностях сила этого тока пропорциональна падающему на кристалл световому потоку. На этом основано действие фотоэлектрических фотометров, в частности применяемых в фотографиях экспонометров.

Если подключить кристалл с $p-n$ -переходом к внешней нагрузке, в ней будет течь фототок. При не очень больших освещенностях сила этого тока пропорциональна падающему на кристалл световому потоку. На этом основано действие фотоэлектрических фотометров, в частности применяемых в фотографиях экспонометров.

Большое количество соединенных последовательно $p-n$ -переходов образует солнечную батарею. Такие батареи непосредственно преобразуют энергию солнечного излучения в электрическую энергию и служат основным источником энергоснабжения космических

летательных аппаратов. Напряжение солнечных батарей достигает десятков вольт, а мощность — десятков киловатт.

§ 47. Люминесценция твердых тел

Термин «люминесценция» обозначает все виды излучения тел, за исключением теплового излучения. Люминесценция может вызываться различными воздействиями на тело: облучением светом, бомбардировкой электронами или ионами, механическими деформациями или химическими процессами. Типичным примером люминесценции является свечение экранов телевизоров или стенок ламп дневного света.

Характерной особенностью люминесценции является длительность, значительно превышающая период световых колебаний. Критерий длительности был введен С. И. Вавиловым для того, чтобы отличить люминесценцию от рассеяния и отражения света, а также от тормозного излучения и излучения Вавилова — Черенкова.

Тела могут люминесцировать при любой температуре, поэтому люминесценцию часто называют холодным свечением. Таким холодным свечением является, в частности, северное сияние.

Вещества, способные люминесцировать, называются люминофорами. Мы ограничимся рассмотрением кристаллических люминофоров.

Кристаллы с правильной решеткой, не искаженной дефектами в виде чужеродных атомов или вакансий в узлах, практически не люминесцируют. Для сообщения люминесцентных свойств в основное вещество вводят активаторы в виде соответствующим образом подобранных чужеродных атомов, количество которых не превышает сотых долей процента. Изготовленные таким способом вещества, обладающие высокими люминесцентными свойствами, называются кристаллофосфорами. Они могут люминесцировать под действием света, пучка электронов, электрического тока и т. д.

Рассмотрим процесс люминесценции кристаллофосфора под действием света, называемый фотолюминесценцией. На рис. 47.1 приведена схема энергетических уровней кристаллофосфора. Уровни

основного вещества объединены в зоны — валентную и проводимости (речь идет о диэлектриках или полупроводниках, металлы люминесцировать не могут). На штриховой линии, обозначенной буквой *A*, расположены локальные уровни активаторов; на штриховой

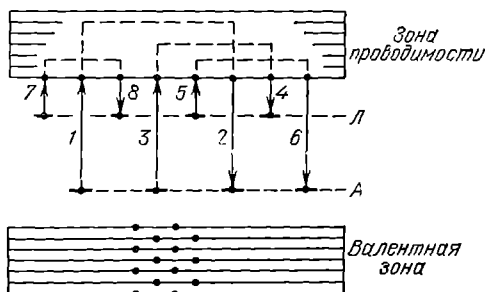


Рис. 47.1. Схема энергетических уровней кристаллофосфора

линии, обозначенной буквой *Л*, помещаются локальные уровни атомов другой примеси, называемые ловушками. В невозбужденном состоянии все уровни активатора заполнены электронами, все уровни ловушек вакантны.

Под действием света электроны с уровней *A* могут быть заброшены в зону проводимости (переходы 1 и 3 на схеме). Попад в эту зону, электрон странствует по кристаллу до тех пор, пока либо встретится с ионом активатора и рекомбинирует с ним (переход 2), либо будет захвачен ловушкой (переход 4). Рекомбинация, т. е. возвращение на уровень *A*, сопровождается испусканием фотона люминесценции. Захват электрона ловушкой не сопровождается свечением; выделяемая при этом энергия расходуется на возбуждение колебаний решетки, т. е. на образование фононов.

Рекомбинация заброшенного в зону проводимости электрона с ионом активатора происходит очень быстро. Поэтому, если бы не было ловушек, свечение люминесценции было бы кратковременным и исчезало бы практически сразу после прекращения облучения кристалла. Ловушки позволяют увеличить длительность свечения. Электроны, захваченные ловушками, утрачивают подвижность и не могут рекомбинировать

с ионами активатора. Спустя некоторое время под воздействием тепловых колебаний решетки (т. е. поглотив фонон) электрон может освободиться из ловушки и перейти снова в зону проводимости (переход 5). В дальнейшем он может либо вновь быть захваченным ловушкой (процесс 7—8), либо встретиться с ионом активатора и рекомбинировать с ним (процесс 5—6). В последнем случае возникает свечение люминесценции. При наличии ловушек период послесвечения может составлять от 1 мкс до нескольких часов.

Кристаллофосфоры применяются в электронно-лучевых (в частности, телевизионных) трубках, в люминесцентных лампах (лампах дневного света), для изготовления светящихся экранов в рентгеновских установках, в сцинтилляционных счетчиках заряженных частиц и для других целей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как зонная теория объясняет существование проводников, полупроводников и диэлектриков?
2. Какая проводимость полупроводников называется собственной?
3. Почему примесная проводимость полупроводников при повышении температуры достигает насыщения?
4. Что такое работа выхода электрона из металла?
5. Какое явление называется эффектом Зеебека?
6. Что такое термопара?

Примеры решения задач

1. Удельная проводимость кремния имеет значение $\sigma_1 = 19$ См/м при температуре $T_1 = 600$ К и $\sigma_2 = 4095$ См/м при $T_2 = 1200$ К. Определить ширину запрещенной зоны $\Delta\epsilon$ для кремния.

Решение. Зависимость электропроводности собственных полупроводников от температуры определяется формулой

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-\Delta\epsilon/2kT), \quad (1)$$

где $\Delta\epsilon$ — ширина запрещенной зоны, k — постоянная Больцмана, σ_0 — величина, слабо зависящая от температуры. Логарифмирование дает, что

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \Delta\epsilon/2kT.$$

Исключив σ_0 из уравнений

$$\ln \sigma_1 = \ln \sigma_0 - \Delta\epsilon/2kT_1 \quad \text{и} \quad \ln \sigma_2 = \ln \sigma_0 - \Delta\epsilon/2kT_2,$$

получим для $\Delta\epsilon$ выражение

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon &= 2k \frac{\ln(\sigma_2/\sigma_1)}{1/T_1 - 1/T_2} = 2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\ln(4095/19)}{1/600 - 1/1200} = \\ &= 1,78 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,11 \text{ эВ.} \end{aligned}$$

2. Во сколько раз изменится при повышении температуры от 300 до 310 К электропроводность σ собственного полупроводника, ширина запрещенной зоны которого $\Delta\epsilon = 0,300$ эВ.

Решение. В соответствии с формулой (1) (см. предыдущую задачу)

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_2}{\sigma_1} &= \frac{\sigma_0 \exp(-\Delta\epsilon/2kT_2)}{\sigma_0 \exp(-\Delta\epsilon/2kT_1)} = \exp \left[\frac{\Delta\epsilon}{2k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right] = \\ &= \exp \left[\frac{0,300 \cdot 1,60 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}} \left(\frac{1}{300} - \frac{1}{310} \right) \right] = 1,21. \end{aligned}$$

Таким образом, электропроводность увеличится в 1,21 раза.

ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Глава 9. АТОМНОЕ ЯДРО

§ 48. Состав и характеристика атомного ядра

В 1911 г. Резерфорд установил экспериментально ядерную структуру атомов. В то время были известны только две элементарные частицы — электрон и протон. Естественно, была выдвинута гипотеза о том, что ядро состоит из этих частиц. Ядро характеризуется зарядом и массой. Было известно, что заряд ядра равен $+Ze$, где Z — атомный номер (совпадающий с порядковым номером элемента в периодической системе Менделеева), а $+e$ — положительный элементарный заряд. Масса же ядра приблизительно равна Am_p , где A — целое число, называемое массовым числом ядра, m_p — масса протона. Поэтому ядро с заданными значениями Z и A можно, казалось бы, построить из A протонов и $A-Z$ электронов. Однако такая модель ядра вступала в противоречие с экспериментом. В частности, она приводила к неправильному значению спина ядра. Например, ядро азота (для которого $A = 14$, а $Z = 7$) должно было бы состоять из 14 протонов и 7 электронов, т. е. из 21 частицы с полуцелым спином (спин как электрона, так и протона равен $1/2$). Соответственно спин ядра должен был бы быть полуцелым, эксперимент же дает для спина ядра азота с $A = 14$ значение, равное единице. Таким образом, протонно-электронная модель ядра оказалась несостоятельной. В 1932 г. Чедвиком¹⁾ был открыт нейтрон. В том же году Иваненко²⁾ впервые высказал в печати идею о том, что ядра атомов состоят из протонов и нейтронов, сразу после чего эта идея была развита Гейзенбергом.

¹⁾ Джеймс Чедвик (1891—1974) — английский физик.

²⁾ Дмитрий Дмитриевич Иваненко (род. 1904) — советский физик.

Входящие в состав атомного ядра частицы — протон и нейтрон — получили название нуклонов («ядерных частиц»).

В соответствии с тем, как это принято в физике элементарных частиц, мы будем выражать массы в единицах энергии, умножая их для этой цели на c^2 . Таким образом, утверждение о том, что масса частицы равна 1 МэВ, эквивалентно тому, что масса равна $10^6 \text{ эВ}/c^2 = 1,60 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}/(3 \cdot 10^8 \text{ м/с})^2 = 1,78 \cdot 10^{-30} \text{ кг}^1$.

Протон. Протон (p) обладает зарядом $+e$ и массой

$$m_p = 938,28 \text{ МэВ.} \quad (48.1)$$

Для сравнения укажем, что масса электрона

$$m_e = 0,511 \text{ МэВ.} \quad (48.2)$$

Из сопоставления (48.1) и (48.2) следует, что $m_p = 1836 m_e$.

Протон имеет спин, равный половине ($s = 1/2$), и собственный магнитный момент

$$\mu_p = +2,79\mu_{\text{я}}, \quad (48.3)$$

где

$$\mu_{\text{я}} = \frac{e\hbar}{2m_p} = 5,05 \cdot 10^{-27} \text{ Дж/Тл} \quad (48.4)$$

— единица магнитного момента, называемая ядерным магнетоном. Из сравнения с (23.5) вытекает, что $\mu_{\text{я}}$ в 1836 раз меньше магнетона Бора μ_B . Следовательно, собственный магнитный момент протона примерно в 660 раз меньше, чем магнитный момент электрона.

Нейтрон. Электрический заряд нейтрона равен нулю, а масса

$$m_n = 939,57 \text{ МэВ} \quad (48.5)$$

очень близка к массе протона. Разность масс нейтрона и протона $m_n - m_p$ составляет 1,3 МэВ, т. е. $2,5 m_e$.

Нейтрон обладает спином, равным половине ($s = 1/2$), и (несмотря на отсутствие электрического заряда) собственным магнитным моментом

$$\mu_n = -1,91\mu_{\text{я}} \quad (48.6)$$

¹⁾ Применяется также единица, называемая атомной единицей массы (а.е.м.): 1 а.е.м. = 931,50 МэВ.

(знак минус указывает на то, что направления собственных механического и магнитного моментов противоположны). Объяснение этого удивительного факта будет дано в § 50.

Отметим, что отношение экспериментальных значений μ_p и μ_n с большой степенью точности равно $-3/2$. Это было замечено лишь после того, как такое значение было получено теоретически.

В свободном состоянии нейтрон нестабилен (радиоактивен) — он самопроизвольно распадается, превращаясь в протон и испуская электрон (e^-) и еще одну частицу, называемую антинейтрино ($\bar{\nu}$). Период полураспада (т. е. время, за которое распадается половина первоначального количества нейтронов) равен примерно 12 мин. Схему распада можно написать следующим образом:



Вопрос о массе нейтрино (и антинейтрино) остается открытым: пока с достоверностью не установлено, отлична она от нуля или нет. Во всяком случае она пренебрежимо мала по сравнению с массой электрона. Масса нейтрона больше массы протона на $2,5 m_e$. Следовательно, масса нейтрона превышает суммарную массу частиц, фигурирующих в правой части уравнения (48.7), на $1,5 m_e$, т. е. на 0,77 МэВ. Эта энергия выделяется при распаде нейтрона в виде кинетической энергии образующихся частиц.

Характеристики атомного ядра. Одной из важнейших характеристик атомного ядра является зарядовое число Z . Оно равно количеству протонов, входящих в состав ядра, и определяет его заряд, который равен $+Ze$. Мы уже отмечали, что Z определяет порядковый номер химического элемента в периодической таблице Менделеева. Поэтому его также называют атомным номером ядра.

Число нуклонов (т. е. суммарное число протонов и нейтронов) в ядре обозначается буквой A и называется массовым числом ядра. Число нейтронов в ядре равно $N = A - Z$.

Для обозначения ядер применяется символ



где под X подразумевается химический символ данного элемента. Слева сверху ставится массовое число,

слева внизу — атомный номер (последний значок часто опускают). Иногда массовое число пишут не слева, а справа от символа химического элемента (${}_Z X^A$).

Ядра с одинаковым Z , но разными A называются изотопами. Большинство химических элементов имеет по несколько стабильных изотопов. Так, например, у кислорода имеется три стабильных изотопа: ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{17}_8\text{O}$, ${}^{18}_8\text{O}$, у олова — десять, и т. д.

Водород имеет три изотопа:

${}_1^1\text{H}$ — обычный водород, или протий ($Z = 1$, $N = 0$),

${}_1^2\text{H}$ — тяжелый водород, или дейтерий ($Z = 1$, $N = 1$),

${}_1^3\text{H}$ — тритий ($Z = 1$, $N = 2$).

Дейтерий обозначают также символом D , а тритий — символом T . Протий и дейтерий стабильны, тритий радиоактивен.

Ядра с одинаковым массовым числом A называются изобарами. В качестве примера можно привести ${}^{40}_{18}\text{Ar}$ и ${}^{40}_{20}\text{Ca}$. Ядра с одинаковым числом нейтронов $N = A - Z$ носят название изотонов (${}^{13}_6\text{C}$, ${}^{14}_7\text{N}$). Наконец, существуют радиоактивные ядра с одинаковыми Z и A , отличающиеся периодом полураспада. Они называются изомерами. Например, имеются два изомера ядра ${}^{80}_{35}\text{Br}$, у одного из них период полураспада равен 18 мин, у другого — 4,4 часа.

Известно около 1500 ядер, различающихся либо Z , либо A , либо и тем и другим. Примерно 1/5 часть этих ядер устойчивы, остальные радиоактивны. Многие ядра были получены искусственным путем с помощью ядерных реакций.

В природе встречаются элементы с атомным номером Z от 1 до 92, исключая технеций (Tc , $Z = 43$) и прометий (Pm , $Z = 61$). Плутоний (Pu , $Z = 94$) после получения его искусственным путем был обнаружен в ничтожных количествах в природном минерале — смоляной обманке. Остальные трансурановые (т. е. заурановые) элементы (с Z от 93 до 107) были получены искусственным путем посредством различных ядерных реакций.

Трансурановые элементы кюриум (96 Cm), эйнштейний (99 Es), фермий (100 Fm) и менделевий

(101 Md) получили названия в честь выдающихся ученых П. и М. Кюри, А. Эйнштейна, Э. Ферми и Д. И. Менделеева. Лоуренсий (103 Lw) назван в честь изобретателя циклотрона Э. Лоуренса. Курчатовий (104 Ku) получил свое название в честь выдающегося советского ученого Курчатова¹⁾.

Некоторые трансурановые элементы, в том числе курчатовий и элементы с номерами 106 и 107, были получены в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований в Дубне Флеровым²⁾ и его сотрудниками.

Размеры ядер. В первом приближении ядро можно считать шаром, радиус которого довольно точно определяется формулой

$$r = 1,3 \cdot 10^{-15} A^{1/3} \quad m = 1,3 A^{1/3} \Phi \quad (48.8)$$

(Φ — ферми — название применяемой в ядерной физике единицы длины, равной 10^{-15} м). Из (48.8) следует, что объем ядра пропорционален числу нуклонов в ядре. Таким образом, плотность вещества во всех ядрах примерно одинакова.

Спин ядра. Спины нуклонов складываются в результирующий спин ядра. Спин нуклона равен $1/2$. Поэтому квантовое число спина ядра I будет полуцелым при нечетном числе нуклонов A и целым или нулем при четном A . Спины ядер I не превышают нескольких единиц. Это указывает на то, что спины большинства нуклонов в ядре взаимно компенсируют друг друга, располагаясь антипараллельно. У всех четно-четных ядер (т. е. ядер с четным числом протонов и четным числом нейтронов) спин равен нулю.

§ 49. Дефект массы и энергия связи ядра

Масса ядра $m_{\text{я}}$ меньше суммы масс входящих в него частиц. Это обусловлено тем, что при объединении нуклонов в ядро выделяется энергия связи нуклонов друг с другом.

Энергия покоя частицы связана с ее массой соотношением $E_0 = mc^2$. Следовательно, энергия покояще-

¹⁾ Игорь Васильевич Курчатов (1903—1960) — советский физик.

²⁾ Георгий Николаевич Флеров (род. 1913) — советский физик.

гося ядра меньше суммарной энергии невзаимодействующих покоящихся нуклонов на величину

$$E_{\text{св}} = c^2 \{ [Zm_p + (A - Z)m_n] - m_{\text{я}} \}. \quad (49.1)$$

Эта величина и есть энергия связи нуклонов в ядре. Она равна той работе, которую нужно совершить, чтобы разделить образующие ядро нуклоны и удалить их друг от друга на такие расстояния, при которых они практически не взаимодействуют друг с другом.

Равенство (49.1) практически не нарушится, если заменить массу протона m_p массой атома водорода m_{H} , а массу ядра $m_{\text{я}}$ — массой атома $m_{\text{а}}$. Действительно, если пренебречь сравнительно ничтожной энергией связи электронов с ядрами, указанная замена будет означать добавление к уменьшаемому и вычитаемому выражения, стоящего в фигурных скобках, одинаковой величины, равной Zm_e . Таким образом, формуле (49.1) можно придать вид

$$E_{\text{св}} = c^2 \{ [Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_n] - m_{\text{а}} \}. \quad (49.2)$$

Эта формула удобнее, чем (49.1), потому что в таблицах обычно даются не массы ядер, а массы атомов.

Энергия связи, приходящаяся на один нуклон, т. е. $E_{\text{св}}/A$, называется удельной энергией связи нуклонов в ядре.

Величина

$$\Delta = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m_{\text{я}} \quad (49.3)$$

называется дефектом массы ядра. Дефект массы связан с энергией связи соотношением $\Delta = E_{\text{св}}/c^2$.

Вычислим энергию связи нуклонов в ядре ${}^4_2\text{He}$, в состав которого входят два протона ($Z = 2$) и два нейтрона ($A - Z = 2$). Масса атома ${}^4_2\text{He}$ равна 4,00260 а. е. м., чему соответствует 3728,0 МэВ. Масса атома водорода ${}^1_1\text{H}$ равна 1,00815 а. е. м. (938,7 МэВ; ср. с (48.1)). Масса нейтрона равна значению (48.5). Подставив эти величины в формулу (49.2), получим

$$E_{\text{св}} = (2 \cdot 938,7 + 2 \cdot 939,5) - 3728,0 = 28,4 \text{ МэВ}.$$

В расчете на один нуклон энергия связи ядра гелия составляет 7,1 МэВ. Для сравнения укажем, что энергия связи валентных электронов в атомах имеет величину,

в 10^6 раз меньшую (порядка 10 эВ). Для других ядер удельная энергия связи, т. е. энергия связи, приходящаяся на один нуклон ($E_{\text{св}}/A$), имеет примерно такую же величину, как у гелия.

На рис. 49.1 изображена зависимость удельной энергии связи $E_{\text{св}}/A$ от массового числа A . Сильнее

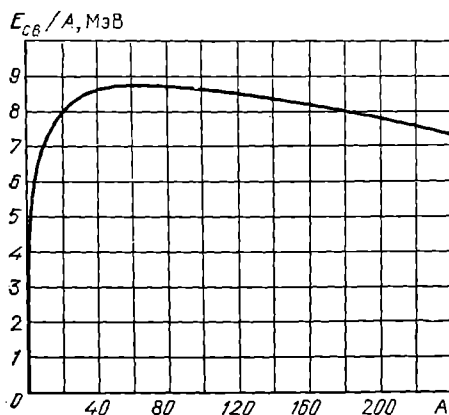


Рис. 49.1. Зависимость энергии связи, приходящейся на один нуклон, от массового числа

всего связаны нуклоны в ядрах с массовыми числами порядка 50—60 (т. е. для элементов от Cr до Zn). Энергия связи для этих ядер достигает 8,7 МэВ/нуклон. С ростом A удельная энергия связи постепенно уменьшается; для самого тяжелого природного элемента — урана — она составляет 7,5 МэВ/нуклон. Такая зависимость удельной энергии связи от массового числа делает энергетически возможными два процесса: 1) деление тяжелых ядер на несколько более легких ядер и 2) слияние (синтез) легких ядер в одно ядро. Оба процесса должны сопровождаться выделением большого количества энергии. Так, например, деление одного ядра с массовым числом $A = 240$ (удельная энергия связи равна 7,5 МэВ) на два ядра с массовыми числами $A = 120$ (удельная энергия связи равна 8,5 МэВ) привело бы к высвобождению энергии в 240 МэВ. Слияние двух ядер тяжелого водорода ${}^2_1\text{H}$ в ядро гелия ${}^4_2\text{He}$ привело бы к выделению энергии, равной 24 МэВ. Для сравнения укажем, что при соединении одного атома углерода с двумя атомами

кислорода (сгорание угля до CO_2) выделяется энергия порядка 5 эВ.

Ядра со значениями массового числа A от 50 до 60 являются энергетически наиболее выгодными. В связи с этим возникает вопрос: почему ядра с иными значениями A оказываются стабильными? Ответ заключается в следующем. Для того чтобы разделиться на несколько частей, тяжелое ядро должно пройти через ряд промежуточных состояний, энергия которых превышает энергию основного состояния ядра. Следовательно, для процесса деления ядру требуется дополнительная энергия (энергия активации), которая затем возвращается обратно, приплюсовываясь к энергии, выделяющейся при делении за счет изменения энергии связи. В обычных условиях ядру неоткуда взять энергию активации, вследствие чего тяжелые ядра не претерпевают спонтанного деления. Энергия активации может быть сообщена тяжелому ядру захваченным им дополнительным нейтроном. Процесс деления ядер урана или плутония под действием захватываемых ядрами нейтронов лежит в основе действия ядерных реакторов и обычной атомной бомбы.

Для слияния легких ядер в одно ядро они должны подойти друг к другу на очень близкое расстояние ($\sim 10^{-15}$ м). Такому сближению ядер препятствует кулоновское отталкивание между ними. Для того чтобы преодолеть это отталкивание, ядра должны двигаться с огромными скоростями, соответствующими температурам порядка нескольких сот миллионов кельвин. По этой причине процесс синтеза легких ядер называется термоядерной реакцией. Термоядерные реакции протекают в недрах Солнца и звезд. В земных условиях пока были осуществлены неуправляемые термоядерные реакции при взрывах водородных бомб. Ученые ряда стран настойчиво работают над изысканием способов осуществления управляемого термоядерного синтеза. Советские физики занимают в этой области одно из ведущих мест.

§ 50. Ядерные силы

Огромная энергия связи нуклонов в ядре указывает на то, что между нуклонами имеется очень интенсивное взаимодействие, которое носит характер при-

тяжения. Оно удерживает нуклоны на расстояниях порядка 10^{-15} м друг от друга, несмотря на сильное кулоновское отталкивание между протонами. Ядерное взаимодействие между нуклонами получило название сильного взаимодействия. Его можно описать с помощью поля ядерных сил. Перечислим отличительные особенности этих сил.

1. Ядерные силы являются короткодействующими. Их радиус действия имеет порядок 10^{-15} м. На расстояниях, существенно меньших 10^{-15} м, притяжение нуклонов сменяется отталкиванием.

2. Сильное взаимодействие не зависит от заряда нуклонов. Ядерные силы, действующие между двумя протонами, протоном и нейтроном и двумя нейтронами, имеют одинаковую величину. Это свойство называется зарядовой независимостью ядерных сил.

3. Ядерные силы зависят от взаимной ориентации спинов нуклонов. Так, например, нейтрон и протон удерживаются вместе, образуя ядро тяжелого водорода дейтрон, только в том случае, если их спины параллельны друг другу.

4. Ядерные силы не являются центральными. Их нельзя представлять направленными вдоль прямой, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов. Нецентральность ядерных сил вытекает, в частности, из того факта, что они зависят от ориентации спинов нуклонов.

5. Ядерные силы обладают свойством насыщения (это означает, что каждый нуклон в ядре взаимодействует с ограниченным числом нуклонов). Насыщение проявляется в том, что удельная энергия связи нуклонов в ядре при увеличении числа нуклонов не растет, а остается примерно постоянной. Кроме того, на насыщение ядерных сил указывает также пропорциональность объема ядра числу образующих его нуклонов (см. формулу (48.8)).

По современным представлениям сильное взаимодействие обусловлено тем, что нуклоны виртуально обмениваются частицами, получившими название мезонов. Для того чтобы уяснить сущность этого процесса, рассмотрим прежде, как выглядит электромагнитное взаимодействие с точки зрения квантовой электродинамики.

Взаимодействие между заряженными частицами осуществляется через электромагнитное поле. Мы знаем, что это поле может быть представлено как совокупность фотонов. Согласно представлениям квантовой электродинамики процесс взаимодействия между двумя заряженными частицами, например электронами, заключается в обмене фотонами. Каждая частица создает вокруг себя поле, непрерывно испуская и поглощая фотоны. Действие поля на другую частицу проявляется в результате поглощения ею одного из фотонов, испущенных первой частицей. Такое описание взаимодействия нельзя понимать буквально. Фотоны, посредством которых осуществляется взаимодействие, являются не обычными реальными фотонами, а виртуальными. В квантовой механике виртуальными называются частицы, которые не могут быть обнаружены за время их существования. В этом смысле виртуальные частицы можно назвать воображаемыми.

Чтобы лучше понять смысл термина «виртуальный», рассмотрим покоящийся электрон. Процесс создания им в окружающем пространстве поля можно представить уравнением

$$e^- \rightleftharpoons e^- + \hbar\omega. \quad (50.1)$$

Суммарная энергия фотона и электрона больше, чем энергия покоящегося электрона. Следовательно, превращение, описываемое уравнением (50.1), сопровождается нарушением закона сохранения энергии. Однако для виртуального фотона это нарушение является кажущимся. Согласно квантовой механике энергия состояния, существующего время Δt , оказывается определенной лишь с точностью ΔE , удовлетворяющей соотношению неопределенностей

$$\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar \quad (50.2)$$

(см. формулу (13.3)). Из этого соотношения вытекает, что энергия системы может претерпевать отклонения ΔE , длительность которых Δt не должна превышать значения, определяемого условием (50.2). Следовательно, если испущенный электроном виртуальный фотон будет поглощен этим же или другим электроном до истечения времени $\Delta t = \hbar/\epsilon$ (где $\epsilon = \hbar\omega$), то нару-

шение закона сохранения энергии не может быть обнаружено.

При сообщении электрону дополнительной энергии (это может произойти, например, при соударении его с другим электроном) вместо виртуального может быть испущен реальный фотон, который может существовать неограниченно долго.

За определяемое условием (50.2) время $\Delta t = \hbar/\epsilon$ виртуальный фотон может передать взаимодействие между точками, разделенными расстоянием

$$l = c\Delta t = c\hbar/\epsilon.$$

Энергия фотона $\epsilon = \hbar\omega$ может быть сколь угодно мала (частота ω изменяется от 0 до ∞). Поэтому радиус действия электромагнитных сил является неограниченным. Если бы частицы, которыми обмениваются взаимодействующие электроны, имели отличную от нуля массу m , то радиус действия соответствующих сил был бы ограничен величиной

$$r = c\Delta t_{\max} = c \frac{\hbar}{\epsilon_{\min}} = c \frac{\hbar}{mc^2} = \frac{\hbar}{mc} = \lambda_C,$$

где λ_C — комптоновская длина волны данной частицы (см. § 10). Мы положили, что частица — переносчик взаимодействия — движется со скоростью c .

В 1934 г. И. Е. Тамм высказал предположение, что взаимодействие между нуклонами также передается посредством каких-то виртуальных частиц. В то время, кроме нуклонов, были известны лишь фотон, электрон, позитрон и нейтрино. Самая тяжелая из этих частиц — электрон — обладает комптоновской длиной волны $\lambda_C = 3,86 \cdot 10^{-13}$ м, на два порядка превышающей радиус действия ядерных сил. Кроме того, значение сил, которые могли бы быть обусловлены виртуальными электронами, как показали расчеты, оказалось чрезвычайно малым. Таким образом, первая попытка объяснения ядерных сил с помощью обмена виртуальными частицами оказалась неудачной. В 1935 г. Юкава ¹⁾ высказал смелую гипотезу о том, что в природе существуют пока не обнаруженные частицы с массой, в 200—300 раз большей массы электрона, и что эти-то частицы и выполняют роль пере-

¹⁾ Хидэки Юкава (1907—1981) — японский физик.

носчиков ядерного взаимодействия, подобно тому как фотоны являются переносчиками электромагнитного взаимодействия. Юкава назвал эти гипотетические частицы тяжелыми фотонами. В связи с тем, что по массе эти частицы занимают промежуточное положение между электронами и нуклонами, они впоследствии были названы мезонами (греческое «мезос» означает «средний»).

В 1936 г. Андерсон¹⁾ и Неддермейер обнаружили в космических лучах частицы с массой, равной $207 m_e$. Вначале полагали, что эти частицы, получившие название μ -мезонов, или мюонов, и есть переносчики взаимодействия, предсказанные Юкавой. Однако впоследствии выяснилось, что мюоны очень слабо взаимодействуют с нуклонами, так что не могут быть ответственными за ядерные взаимодействия. Только в 1947 г. Пауэлл²⁾ и Оккиалини³⁾ открыли в космическом излучении еще один тип мезонов — так называемые π -мезоны (иногда их называют пионами), которые оказались носителями ядерных сил, предсказанными за 12 лет до того Юкавой.

Существуют положительный (π^+), отрицательный (π^-) и нейтральный (π^0) мезоны. Заряд π^+ - и π^- -мезонов равен элементарному заряду e . Масса заряженных π -мезонов одинакова и равна $273 m_e$ (140 МэВ), масса π^0 -мезона равна $264 m_e$ (135 МэВ). Спин как заряженных, так и нейтрального π -мезона равен нулю ($s=0$). Все три частицы нестабильны. Время жизни π^+ - и π^- -мезонов составляет $2,60 \cdot 10^{-8}$ с, π^0 -мезона — $0,8 \cdot 10^{-16}$ с.

Подавляющая часть заряженных π -мезонов распадается по схеме

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu, \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu} \quad (50.3)$$

(μ^+ и μ^- — положительный и отрицательный мюоны, ν — нейтрино, $\bar{\nu}$ — антинейтрино). В среднем 2,5 распада из миллиона протекают по другим схемам (например, $\pi \rightarrow e + \nu$; $\pi \rightarrow \pi^0 + e + \nu$ и т. п., причем в случае π^+ образуется e^+ , т. е. позитрон, а в случае π^- возникает e^- , т. е. электрон).

¹⁾ Карл Дейвид Андерсон (род. 1905) — американский физик.

²⁾ Сесил Франк Пауэлл (1903—1969) — английский физик.

³⁾ Джузеппе Станиславо Оккиалини (род. 1907) — итальянский физик.

В среднем 98,8 % π^0 -мезонов распадаются на два γ -кванта:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma. \quad (50.4)$$

Остальные 1,2 % распадов осуществляется по схемам:

$$\pi^0 \rightarrow e^+ + e^- + \gamma; \quad \pi^0 \rightarrow e^+ + e^- + e^+ + e^-;$$

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma + \gamma.$$

Частицы, названные первоначально μ -мезонами, принадлежат к классу лептонов (см. § 55), а не мезонов. Поэтому в дальнейшем мы будем называть их мюонами. Мюоны имеют положительный (μ^+) или отрицательный (μ^-) заряд, равный элементарному заряду e (нейтрального мюона не существует). Масса мюона равна $207 m_e$ (106 МэВ), спин — половине ($s = 1/2$). Мюоны, как и π -мезоны, нестабильны, они распадаются по схеме

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}, \quad \mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}. \quad (50.5)$$

Время жизни обоих мюонов одинаково и равно $2,2 \cdot 10^{-6}$ с.

Обратимся к рассмотрению обменного взаимодействия между нуклонами. В результате виртуальных процессов

$$p \rightleftharpoons p + \pi^+, \quad (50.6)$$

$$n \rightleftharpoons p + \pi^-, \quad (50.7)$$

$$p \rightleftharpoons p + \pi^0, \quad n \rightleftharpoons n + \pi^0 \quad (50.8)$$

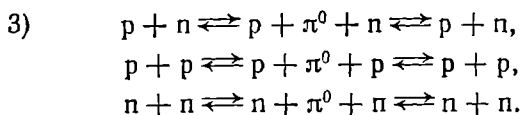
нуклон оказывается окруженным облаком виртуальных π -мезонов, образующих поле ядерных сил. Поглощение этих мезонов другим нуклоном приводит к сильному взаимодействию между нуклонами, которое осуществляется по одной из следующих схем:

$$1) \quad p + n \rightleftharpoons n + \pi^+ + p \rightleftharpoons p + p.$$

Протон испускает виртуальный π^+ -мезон, превращаясь в нейтрон. Мезон поглощается нейтроном, который вследствие этого превращается в протон. Затем такой же процесс протекает в обратном направлении (рис. 50.1a). Каждый из взаимодействующих нуклонов часть времени проводит в заряженном состоянии, а часть — в нейтральном.

$$2) \quad n + p \rightleftharpoons p + \pi^- + p \rightleftharpoons p + n.$$

Нейтрон и протон обмениваются π -мезонами (рис. 50.1б).



Нуклоны обмениваются π^0 -мезонами (рис. 50.1в).

Первый из трех описанных выше процессов находит экспериментальное подтверждение в рассеянии

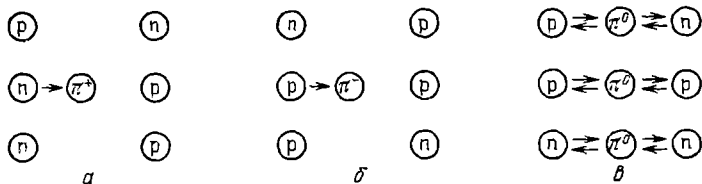


Рис. 50.1. Обменное взаимодействие нуклонов, осуществляемое π^+ -мезоном (*a*), π^- -мезоном (*б*) и π^0 -мезоном (*в*)

нейтронов на протонах. При прохождении пучка нейтронов через водород в этом пучке появляются протоны, многие из которых имеют ту же энергию и направление движения, что и падающие нейтроны. Соответствующее число практически покоящихся нейтронов обнаруживается в мишени. Совершенно невероятно, чтобы такое большое число нейтронов полностью передавало свой импульс ранее покоившимся протонам в результате лобовых ударов. Поэтому приходится

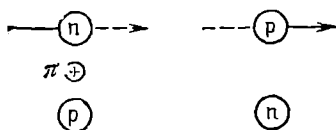


Рис. 50.2. Захват виртуального π^+ -мезона нейтроном, пролетающим вблизи протона

признать, что часть нейтронов, пролетая вблизи протонов, захватывает один из виртуальных π^+ -мезонов. В результате нейтрон превращается в протон, а потерявший свой заряд протон превращается в нейтрон (рис. 50.2).

Если нуклону сообщить энергию, эквивалентную массе π -мезона, то виртуальный π -мезон может стать реальным. Необходимая энергия может быть сообщена при столкновении достаточно ускоренных нуклонов (или ядер) либо при поглощении нуклоном γ -кванта.

При очень больших энергиях соударяющихся частиц может возникнуть несколько реальных π -мезонов.

Теперь мы имеем возможность объяснить существование магнитного момента у нейтрона и аномальную величину магнитного момента протона (см. § 48). В соответствии с процессом (50.7) нейтрон часть времени проводит в виртуальном состоянии ($p + \pi^-$). Орбитальное движение π^- -мезона приводит к возникновению наблюдаемого у нейтрона отрицательного магнитного момента. Аномальный магнитный момент протона ($2,79 \mu_n$ вместо одного ядерного магнетона) также можно объяснить орбитальным движением π^+ -мезона в течение того промежутка времени, когда протон находится в виртуальном состоянии ($p + \pi^+$).

§ 51. Радиоактивность

Радиоактивностью называется самопроизвольное превращение одних атомных ядер в другие, сопровождаемое испусканием элементарных частиц. Такие превращения претерпевают только нестабильные ядра. К числу радиоактивных процессов относятся: 1) α -распад, 2) β -распад (в том числе электронный захват), 3) γ -излучение ядер, 4) спонтанное деление тяжелых ядер, 5) протонная радиоактивность.

Радиоактивность, наблюдающаяся у ядер, существующих в природных условиях, называется естественной. Радиоактивность ядер, полученных посредством ядерных реакций, называется искусственной. Между искусственной и естественной радиоактивностью нет принципиального различия. Процесс радиоактивного превращения в обоих случаях подчиняется одним и тем же законам.

Закон радиоактивного превращения. Отдельные радиоактивные ядра претерпевают превращение независимо друг от друга. Поэтому можно считать, что количество ядер dN , распадающихся за малый промежуток времени dt , пропорционально как числу имеющихся ядер N , так и промежутку времени dt :

$$dN = -\lambda N dt. \quad (51.1)$$

Здесь λ — характеристическая для радиоактивного вещества константа, называемая постоянной распада. Знак минус взят для того, чтобы dN можно было рас-

сма́тривать как приращение числа нераспавшихся ядер N .

Интегрирование выражения (51.1) приводит к соотношению

$$N = N_0 \exp(-\lambda t), \quad (51.2)$$

где N_0 — количество ядер в начальный момент, N — количество нераспавшихся атомов в момент времени t . Формула (51.2) выражает закон радиоактивного превращения. Этот закон весьма прост: *число нераспавшихся ядер убывает со временем по экспоненте.*

Количество ядер, распавшихся за время t , определяется выражением

$$N_0 - N = N_0 [1 - \exp(-\lambda t)]. \quad (51.3)$$

Время, за которое распадается половина первоначального количества ядер, называется периодом полураспада T . Это время определяется условием

$$N_0/2 = N_0 \exp(-\lambda T),$$

откуда

$$T = \ln 2 / \lambda = 0,693 / \lambda. \quad (51.4)$$

Период полураспада для известных в настоящее время радиоактивных ядер находится в пределах от $3 \cdot 10^{-7}$ с до $5 \cdot 10^{15}$ лет.

Найдем среднее время жизни радиоактивного ядра. Количество ядер $dN(t)$, испытывающих превращение за промежуток времени от t до $t + dt$, определяется модулем выражения (51.1): $dN(t) = \lambda N(t) dt$. Время жизни каждого из этих ядер равно t . Следовательно, сумма времен жизни всех N_0 имевшихся первоначально ядер получается путем интегрирования выражения $t dN(t)$. Разделив эту сумму на число ядер N_0 , получим среднее время жизни τ радиоактивного ядра:

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t dN(t) = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \lambda N(t) dt.$$

Подставим сюда выражение (51.2) для $N(t)$:

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \lambda N_0 \exp(-\lambda t) dt = \int_0^{\infty} t \lambda \exp(-\lambda t) dt = \frac{1}{\lambda}$$

(надо перейти к переменной $x = \lambda t$ и осуществить интегрирование по частям). Таким образом, среднее время жизни есть величина, обратная постоянной распада λ :

$$\tau = 1/\lambda. \quad (51.5)$$

Сравнение с (51.4) показывает, что период полураспада T отличается от τ числовым множителем, равным $\ln 2$.

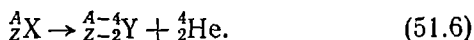
Часто бывает, что возникающие в результате радиоактивного превращения ядра в свою очередь оказываются радиоактивными и распадаются со скоростью, характеризуемой постоянной распада λ' . Новые продукты распада могут также оказаться радиоактивными, и т. д. В результате возникает целый ряд радиоактивных превращений. В природе существуют три радиоактивных ряда (или семейства), родоначальниками которых являются ^{238}U (ряд урана), ^{232}Th (ряд тория) и ^{235}U (ряд актиноурана). Конечными продуктами во всех трех случаях служат изотопы свинца — в первом случае ^{206}Pb , во втором ^{208}Pb и, наконец, в третьем ^{207}Pb .

Естественная радиоактивность была открыта в 1896 г. Беккерелем ¹⁾. Большой вклад в изучение радиоактивных веществ внесли Пьер Кюри и Склодовская-Кюри ²⁾. Было обнаружено, что имеются три вида радиоактивных излучений. Одно из них, получившее название α -лучей, отклоняется под действием магнитного поля в ту же сторону, в которую отклонялся бы поток положительно заряженных частиц. Второе, названное β -лучами, отклоняется магнитным полем в противоположную сторону, т. е. так, как отклонялся бы поток отрицательно заряженных частиц. Наконец, третье излучение, никак не реагирующее на действие магнитного поля, было названо γ -лучами. Впоследствии выяснилось, что γ -лучи представляют собой электромагнитное излучение весьма малой длины волны (от 10^{-4} до $0,1$ нм).

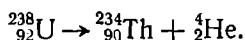
¹⁾ Антуан Анри Беккерель (1852—1908) — французский физик.

²⁾ Мария Склодовская-Кюри (1867—1934) — французский физик и химик, по национальности полька, с 1891 г. работала во Франции.

Альфа-распад. Альфа-лучи представляют собой поток ядер гелия ${}^4_2\text{He}$. Распад протекает по следующей схеме:



Буквой X обозначен химический символ распадающегося (материнского) ядра, буквой Y — химический символ образующегося (дочернего) ядра. Альфа-распад обычно сопровождается испусканием дочерним ядром γ -лучей. Из схемы распада видно, что атомный номер дочернего вещества на 2 единицы, а массовое число на 4 единицы меньше, чем у исходного вещества. Примером может служить распад изотопа урана ${}^{238}_{92}\text{U}$, протекающий с образованием тория:



Скорости, с которыми α -частицы (т. е. ядра ${}^4_2\text{He}$) вылетают из распавшегося ядра, очень велики (порядка 10^7 м/с; кинетическая энергия порядка нескольких мегаэлектронвольт). Пролетая через вещество, α -частица постепенно теряет свою энергию, затрачивая ее на ионизацию молекул вещества, и, в конце концов, останавливается. На образование одной пары ионов в воздухе тратится в среднем 35 эВ. Таким образом, α -частица образует на своем пути примерно 10^5 пар ионов. Естественно, что чем больше плотность вещества, тем меньше пробег α -частиц до остановки. Так, в воздухе при нормальном давлении пробег составляет несколько сантиметров, в твердом веществе пробег имеет значение порядка 0,01 мм (α -частицы полностью задерживаются обычным листом бумаги).

Кинетическая энергия α -частиц возникает за счет избытка энергии покоя материнского ядра над суммарной энергией покоя дочернего ядра и α -частицы. Эта избыточная энергия распределяется между α -частицей и дочерним ядром в отношении, обратно пропорциональном их массам. В большинстве случаев радиоактивное вещество испускает несколько групп α -частиц близкой, но различной энергии. Это обусловлено тем, что дочернее ядро может возникать не только в нормальном, но и в возбужденных состояниях. Среднее время жизни τ возбужденных состояний для большинства ядер лежит в пределах от 10^{-8} до

10^{-15} с. За время, равное в среднем τ , дочернее ядро переходит в нормальное или более низкое возбужденное состояние, испуская γ -фотон.

Энергия возбуждения дочернего ядра может быть выделена и другими способами. Возбужденное ядро может испустить какую-либо частицу: протон, нейтрон, электрон или α -частицу. Наконец, образовавшееся в результате α -распада возбужденное ядро может отдать избыток энергии непосредственно (без предварительного испускания γ -кванта) одному из электронов K -, L - или даже M -оболочки атома, в результате чего электрон вылетает из атома. Этот процесс носит название внутренней конверсии. Возникшее в результате вылета электрона вакантное место будет заполняться электронами с вышележащих энергетических уровней. Поэтому внутренняя конверсия всегда сопровождается испусканием характеристических рентгеновских лучей.

Подобно тому как фотон не существует в готовом виде в недрах атома и возникает лишь в момент излучения, α -частица также возникает в момент радиоактивного распада ядра. Покидая ядро, α -частице приходится преодолевать потенциальный барьер, высота которого превосходит полную энергию α -частицы,

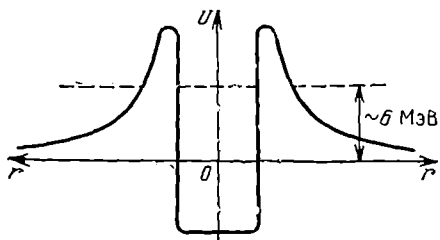


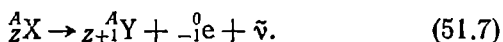
Рис. 51.1. Потенциальный барьер, преодолеваемый α -частицей при вылете из ядра

равную в среднем 6 МэВ (рис. 51.1). Внешняя, спадающая асимптотически к нулю сторона барьера обусловлена кулоновским отталкиванием α -частицы и дочернего ядра. Внутренняя сторона барьера обусловлена ядерными силами. Опыты по рассеянию α -частиц тяжелыми α -радиоактивными ядрами показали, что высота барьера заметно превышает энергию выле-

тающих при распаде α -частиц. По классическим представлениям преодоление частицей потенциального барьера при указанных условиях невозможно. Однако согласно квантовой механике имеется отличная от нуля вероятность того, что частица просочится через барьер, как бы пройдя по туннелю, имеющемуся в барьере. Это явление называется туннельным эффектом (см. § 16). Теория α -распада, основывающаяся на представлении о туннельном эффекте, приводит к результатам, хорошо согласующимся с данными опыта.

Бета-распад. Существуют три разновидности β -распада. В одном случае ядро, претерпевающее превращение, испускает электрон, в другом — позитрон, в третьем случае, называемом электронным захватом (e -захватом), ядро поглощает один из электронов K -оболочки, значительно реже L - или M -оболочки (соответственно вместо e -захвата говорят о K -захвате, L -захвате или M -захвате).

Первый вид распада (β^- -распад, или электронный распад) протекает по схеме



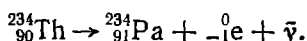
Чтобы подчеркнуть сохранение заряда и числа нуклонов в процессе β^- -распада, мы приписали β -электрону зарядовое число $Z = -1$ и массовое число $A = 0$.

Из схемы (51.7) видно, что дочернее ядро имеет атомный номер на единицу больший, чем у материнского ядра, массовые числа обоих ядер одинаковы. Наряду с электроном испускается также антинейтрино $\bar{\nu}$. Весь процесс протекает так, как если бы один из нейтронов ядра ${}_Z^AX$ превратился в протон, претерпев превращение по схеме (48.7). Вообще процесс (48.7) представляет собой частный случай процесса (51.7). Поэтому говорят, что свободный нейтрон β -радиоактивен.

Бета-распад может сопровождаться испусканием γ -лучей. Механизм их возникновения тот же, что и в случае α -распада, — дочернее ядро возникает не только в нормальном, но и в возбужденных состояниях. Переходя затем в состояние с меньшей энергией, ядро высвечивает γ -фотон.

Примером β^- -распада может служить превращение тория ${}^{234}\text{Th}$ в протактиний ${}^{234}\text{Pa}$ с испусканием

электрона и антинейтрино:



В отличие от α -частиц, обладающих строго определенной энергией, β -электроны обладают самой разнообразной кинетической энергией от 0 до E_{max} . На рис. 51.2 изображен энергетический спектр электронов, испускаемых ядрами при β -распаде. Площадь, охватываемая кривой, дает общее число электронов, испускаемых в единицу времени, dN — число электронов, энергия которых заключена в интервале dE . Энергия E_{max} соответствует разности между массой материнского ядра и массами электрона и дочернего ядра.

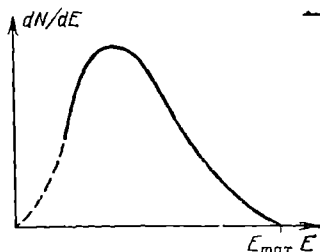


Рис. 51.2. Энергетический спектр электронов, испускаемых ядрами при β -распаде

Следовательно, распады, при которых энергия электрона E меньше E_{max} , протекают с кажущимся нарушением закона сохранения энергии.

Чтобы объяснить исчезновение энергии $E_{\text{max}} - E$, В. Паули высказал в 1932 г. предположение, что при β -распаде вместе с электроном испускается еще одна частица, которая уносит с собой энергию $E_{\text{max}} - E$. Так как эта частица никак себя не обнаруживает, следовало признать, что она нейтральна и обладает весьма малой массой (в настоящее время установлено, что масса этой частицы равна либо близка к нулю). По предложению Э. Ферми эту гипотетическую частицу называли нейтрино¹⁾, (что означает «маленький нейтрон»).

Имеется еще одно основание для предположения о существовании нейтрино (или антинейтрино). Спин нейтрона, протона и электрона одинаков и равен $1/2$. Если написать схему (51.7) без антинейтрино, то суммарный спин возникающих частиц (который для двух частиц с $s = 1/2$ может быть либо нулем, либо едини-

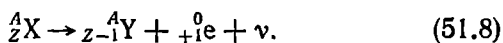
¹⁾ В соответствии с принятой в настоящее время классификацией при β -распаде испускается не нейтрино, а антинейтрино.

цей) будет отличаться от спина исходной частицы. Таким образом, участие в β -распаде еще одной частицы диктуется законом сохранения момента импульса, причем этой частице необходимо приписать спин, равный $1/2$ (или $3/2$). Установлено, что спин нейтрино (и антинейтрино) равен $1/2$.

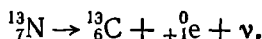
Непосредственное экспериментальное доказательство существования нейтрино было получено только в 1956 г

Итак, энергия, выделяющаяся при β -распаде, распределяется между электроном и антинейтрино (либо между позитроном и нейтрино, см. ниже) в самых разнообразных пропорциях.

Второй вид распада (β^+ -распад, или позитронный распад) протекает по схеме



В качестве примера можно привести превращение азота ${}^{13}\text{N}$ в углерод ${}^{13}\text{C}$:



Из схемы (51.8) видно, что атомный номер дочернего ядра на единицу меньше, чем материнского. Процесс сопровождается испусканием позитрона e^+ (в формуле (51.8) он обозначен символом ${}_+1^0e$) и нейтрино ν , возможно также возникновение γ -лучей. Позитрон является античастицей для электрона. Следовательно, обе частицы, испускаемые при распаде (51.8), представляют собой античастицы по отношению к частицам, испускаемым при распаде (51.7).

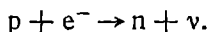
Процесс β^+ -распада протекает так, как если бы один из протонов исходного ядра превратился в нейтрон, испустив при этом позитрон и нейтрино:



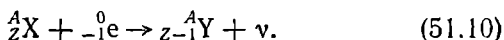
Для свободного протона такой процесс невозможен по энергетическим соображениям, так как масса протона меньше массы нейтрона. Однако протон в ядре может заимствовать требуемую энергию от других нуклонов, входящих в состав ядра.

Третий вид β -распада (электронный захват) заключается в том, что ядро поглощает один из K -электронов (реже — один из L - или M -электронов)

своего атома, в результате чего один из протонов превращается в нейтрон, испуская при этом нейтрино:

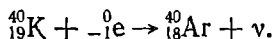


Возникшее ядро может оказаться в возбужденном состоянии. Переходя затем в более низкие энергетические состояния, оно испускает γ -фотоны. Схема процесса выглядит следующим образом:



Место в электронной оболочке, освобожденное захваченным электроном, заполняется электронами из вышележащих слоев, в результате чего возникают рентгеновские лучи. Электронный захват легко обнаруживается по сопровождающему его рентгеновскому излучению. Именно этим путем и был открыт K -захват Альваресом¹⁾ в 1937 г.

Примером электронного захвата может служить превращение калия ${}^{40}\text{K}$ в аргон ${}^{40}\text{Ar}$:



Спонтанное деление тяжелых ядер. В 1940 г. советскими физиками Г. Н. Флеровым и К. А. Петряком был обнаружен процесс самопроизвольного деления ядер урана на две примерно равные части. Впоследствии это явление было наблюдеено и для многих других тяжелых ядер. По своим характерным чертам спонтанное деление близко к вынужденному делению (см. § 53).

Протонная радиоактивность. Как следует из названия, при протонной радиоактивности ядро претерпевает превращение, испуская один или два протона (в последнем случае говорят о двупротонной радиоактивности). Этот вид радиоактивности наблюдался впервые в 1963 г. группой советских физиков, руководимой Г. Н. Флеровым.

Активность радиоактивного вещества. Активностью радиоактивного препарата называется число распадов, происходящих в препарате за единицу времени. Если за время dt распадается $dN_{\text{расп}}$ ядер, то

¹⁾ Луис Уолтер Альварес (род. 1911) — американский физик.

активность равна $dN_{\text{расп}}/dt$. Согласно (51.1)

$$dN_{\text{расп}} = -dN = -\lambda N dt.$$

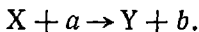
Отсюда следует, что активность радиоактивного препарата равна λN , т. е. произведению постоянной распада на количество имеющихся в препарате нераспавшихся ядер.

В СИ единицей активности является беккерель (Бк), равный одному распаду в секунду. Допускается применение внесистемных единиц расп./мин и кюри (Ки). Единица активности, называемая кюри, определяется как активность такого препарата, в котором происходит $3,700 \cdot 10^{10}$ актов распада в секунду. Применяются дробные единицы (милликюри, микрокюри и т. д.), а также кратные единицы (килокюри, мегакюри).

§ 52. Ядерные реакции

Ядерной реакцией называется процесс взаимодействия атомного ядра с элементарной частицей или с другим ядром, приводящий к преобразованию ядра (или ядер). Взаимодействие реагирующих частиц возникает при сближении их до расстояний порядка 10^{-15} м благодаря действию ядерных сил.

Наиболее распространенным видом ядерной реакции является взаимодействие легкой частицы a с ядром X , в результате которого образуется легкая частица b и ядро Y :



Уравнение таких реакций принято записывать сокращенно в виде



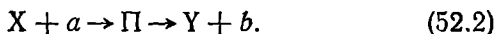
В скобках указываются участвующие в реакции легкие частицы, сначала исходная, затем конечная.

В качестве легких частиц a и b могут фигурировать нейтрон (n), протон (p), дейтрон (d), α -частица (α) и γ -фотон (γ).

Ядерные реакции могут сопровождаться как выделением, так и поглощением энергии. Количество выделяющейся энергии называется энергией реакции. Она определяется разностью масс (выраженных в энергетических единицах) исходных и конечных ядер. Если сумма масс образующихся ядер превосходит сум-

му масс исходных ядер, реакция идет с поглощением энергии и энергия реакции будет отрицательной.

В 1936 г. Н. Бор установил, что реакции, вызываемые не очень быстрыми частицами, протекают в два этапа. Первый этап заключается в захвате приближающейся к ядру X частицы a и в образовании промежуточного ядра Π , называемого составным ядром. Энергия, принесенная частицей a (она складывается из кинетической энергии частицы и энергии ее связи с ядром), за очень короткое время перераспределяется между всеми нуклонами составного ядра, в результате чего это ядро оказывается в возбужденном состоянии. На втором этапе составное ядро испускает частицу b . Символически такое двустадийное протекание реакции записывается следующим образом:



Если испущенная частица тождественна с захваченной ($b \equiv a$), процесс (52.2) называют рассеянием. В случае, когда энергия частицы b равна энергии частицы a ($E_b = E_a$), рассеяние является упругим, в противном случае (т. е. при $E_b \neq E_a$) — неупругим. Ядерная реакция имеет место, если частица b не тождественна с a .

Промежуток времени $\tau_{\text{я}}$, который требуется нуклону с энергией порядка 1 МэВ (что соответствует скорости нуклона порядка 10^7 м/с) для того, чтобы пройти расстояние, равное диаметру ядра ($\sim 10^{-14}$ м), называется ядерным временем (или ядерным временем пролета). Это время по порядку величины равно

$$\tau_{\text{я}} \sim \frac{10^{-14} \text{ м}}{10^7 \text{ м/с}} = 10^{-21} \text{ с}. \quad (52.3)$$

Среднее время жизни составного ядра (равное $10^{-14} - 10^{-12}$ с) на много порядков превосходит ядерное время пролета $\tau_{\text{я}}$. Следовательно, распад составного ядра (т. е. испускание им частицы b) представляет собой процесс, не зависящий от первого этапа реакции, заключающегося в захвате частицы a (составное ядро как бы «забывает» способ своего образования). Одно и то же составное ядро может распадаться различными путями, причем характер этих

путей и их относительная вероятность не зависят от способа образования составного ядра.

Реакции, вызываемые быстрыми нуклонами и дейтронами, протекают без образования промежуточного ядра. Такие реакции носят название *п р я м ы х*. Типичной прямой ядерной реакцией является реакция срыва, наблюдающаяся при нецентральных соударениях дейтрона с ядром. При таких соударениях один из нуклонов дейтрона может попасть в зону действия ядерных сил и будет захвачен ядром, в то время как другой нуклон останется вне зоны действия ядерных сил и пролетит мимо ядра. Символически эту реакцию можно представить в виде (d, p) или (d, n) .

Обратной реакции срыва является реакция подхвата — налетевший нуклон (n или p) откалывает от ядра один из нуклонов (p или n), превращаясь при этом в дейтрон: (n, d) либо (p, d) .

В ядерной физике вероятность взаимодействия принято характеризовать с помощью эффективного сечения σ . Смысл этой величины заключается в следующем. Пусть поток частиц, например нейтронов,

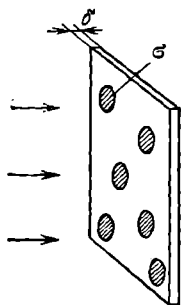


Рис. 52.1. К определению эффективного сечения реакции (или процесса)

попадает на мишень, настолько тонкую, что ядра мишени не перекрывают друг друга (рис. 52.1; напомним, что потоком частиц называется количество частиц, пролетающих через некоторую поверхность в единицу времени). Если бы ядра были твердыми шариками с поперечным сечением σ , а падающие частицы — твердыми шариками с исчезающе малым сечением, то вероятность того, что падающая частица заденет одно из ядер мишени, была бы равна

$$P = \sigma n \delta,$$

где n — концентрация ядер, т. е. число их в единице объема мишени, δ — толщина мишени ($\sigma n \delta$ определяет относительную долю площади мишени, перекрытую ядрами-шариками).

Пусть на мишень падает перпендикулярно к ее поверхности поток частиц N . Тогда количество частиц,

претерпевающих в единицу времени столкновения с ядрами мишени, ΔN определяется формулой

$$\Delta N = NP = N\sigma n\delta. \quad (52.4)$$

Следовательно, определив относительное количество частиц, претерпевших столкновения, $\Delta N/N$, можно было бы вычислить поперечное сечение ядра по формуле

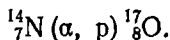
$$\sigma = \Delta N / Nn\delta. \quad (52.5)$$

В действительности ни ядра мишени, ни падающие на нее частицы не являются твердыми шариками. Однако по аналогии с моделью сталкивающихся шариков для характеристики вероятности взаимодействия используют величину σ , определяемую формулой (52.5), в которой под ΔN подразумевают не число столкнувшихся, а число провзаимодействовавших с ядрами мишени частиц. Эта величина и называется эффективным сечением для данной реакции (или процесса).

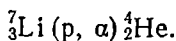
Эффективные сечения ядерных процессов принято выражать в единицах, получивших название барн:

$$1 \text{ барн} = 10^{-28} \text{ м}^2 = 10^{-10} \text{ нм}^2. \quad (52.6)$$

Впервые ядерная реакция была осуществлена Резерфордом в 1919 г. При облучении азота α -частицами, испускаемыми радиоактивным источником, некоторые ядра азота превращались в ядра кислорода, испуская при этом протон. Уравнение этой реакции имеет вид



Резерфорд воспользовался для расщепления атомного ядра природными снарядами — α -частицами. Первая ядерная реакция, вызванная искусственно ускоренными частицами, была осуществлена Кокрофтом¹⁾ и Уолтоном²⁾ в 1932 г. С помощью так называемого умножителя напряжения они ускоряли протоны до энергии порядка 0,8 МэВ и наблюдали реакцию



¹⁾ Джон Дуглас Кокрофт (1897—1967) — английский физик.
²⁾ Эрнест Томас Синтон Уолтон (род. 1903) — ирландский физик.

В дальнейшем по мере развития техники ускорения заряженных частиц множилось число ядерных превращений, осуществляемых искусственным путем.

Наибольшее значение имеют реакции, вызываемые нейтронами. В отличие от заряженных частиц (p , d , α), нейтроны не испытывают кулоновского отталкивания, вследствие чего они могут проникать в ядра, обладая весьма малой энергией. Эффективные сечения реакций обычно возрастают при уменьшении энергии нейтронов. Это можно объяснить тем, что чем меньше скорость нейтрона, тем больше время, которое он проводит в сфере действия ядерных сил, пролетая вблизи ядра, и, следовательно, тем больше вероятность его захвата. Однако часто наблюдаются случаи, когда сечение захвата нейтронов имеет резко выраженный

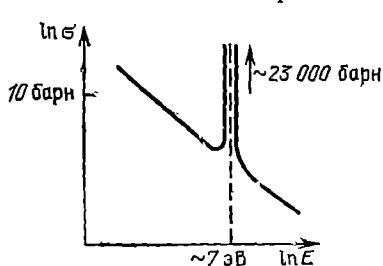
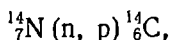


Рис. 52.2. Сечение захвата нейтронов ядром урана-238

максимум для нейтронов определенной энергии E_r . В качестве примера на рис. 52.2 приведена кривая зависимости сечения захвата нейтрона ядром ^{238}U от энергии нейтрона E . Масштаб по обеим осям — логарифмический. На рисунке видно, что при $E = E_r = 7$ эВ сечение захвата резко возрастает, достигая 23 000 барн. Вид кривой указывает на то, что явление имеет резонансный характер. Такое резонансное поглощение имеет место в том случае, когда энергия, приносимая нейтроном в составное ядро, в точности равна той энергии, которая необходима для перевода составного ядра на возбужденный энергетический уровень. Подобным же образом для фотонов, энергия которых равна разности энергий между первым возбужденным и основным уровнями атома, вероятность поглощения особенно велика (резонансное поглощение света).

Представляет интерес реакция



которая постоянно протекает в атмосфере под действием нейтронов, образуемых космическими лучами.

Возникающий при этом углерод ^{14}C называется радиоуглеродом, так как он β^- -радиоактивен, его период полураспада составляет 5730 лет. Радиоуглерод усваивается при фотосинтезе растениями и участвует в круговороте веществ в природе.

Количество возникающих в атмосфере в единицу времени ядер радиоуглерода ΔN_+ в среднем остается постоянным. Количество распадающихся ядер ΔN_- пропорционально числу имеющихся ядер N :

$$\Delta N_- = kN.$$

Так как период полураспада очень велик, устанавливается равновесная концентрация ядер ^{14}C в обычном углероде, отвечающая условию

$$\Delta N_+ = \Delta N_-, \text{ или } \Delta N_+ = kN.$$

Специальные исследования показали, что вследствие действия ветров и океанских течений равновесная концентрация ^{14}C в различных местах земного шара одинакова и соответствует примерно 14 распадам в минуту на каждый грамм углерода.

Пока организм живет, убыль в нем ^{14}C из-за радиоактивности восполняется за счет участия в круговороте веществ в природе. В момент смерти организма процесс усвоения сразу же прекращается и концентрация ^{14}C в обычном углероде начинает убывать по закону радиоактивного распада. Следовательно, измерив концентрацию ^{14}C в останках организмов (в древесине, костях и т. п.), можно определить дату их смерти или, как говорят, их возраст. Проверка этого метода на древних образцах, возраст которых точно определен историческими методами, дала вполне удовлетворительные результаты.

§ 53. Деление ядер

В 1938 г. Ган¹⁾ и Штрассман²⁾ обнаружили, что при облучении урана нейтронами образуются элементы из середины периодической системы — барий и лантан. Объяснение этого явления было дано Фришем³⁾

¹⁾ Отто Ган (1879—1968) — немецкий радиохимик (ФРГ).

²⁾ Фриц Штрассман (1902—1980) — немецкий химик и физик.

³⁾ Отто Роберт Фриш (1904—1979) — английский физик.

и Мейтнер¹⁾. Они высказали предположение, что захватившее нейтрон ядро урана делится на две примерно равные части, получившие название осколков деления.

Дальнейшие исследования показали, что деление может происходить разными путями. Всего образуется около 80 различных осколков, причем наиболее вероятным является деление на осколки, массы которых

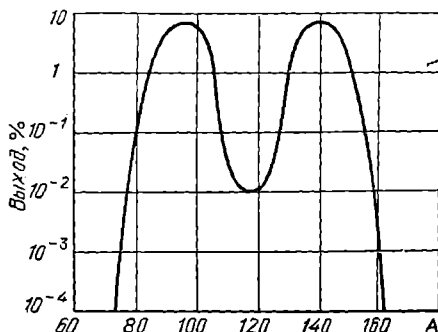


Рис. 53.1. Относительный выход (в процентах) осколков, возникающих при делении урана-235 тепловыми нейтронами. По оси ординат применена логарифмическая шкала

относятся как 2:3. Кривая на рис. 53.1 дает относительный выход осколков разной массы, возникающих при делении ^{235}U медленными (тепловыми²⁾) нейтронами. Согласно этой кривой относительное число актов деления, при которых образуются два осколка равной массы ($A \approx 117$), составляет $10^{-2}\%$, в то время как образование осколков с массовыми числами порядка 95 и 140 ($95:140 \approx 2:3$) наблюдается в 7% случаев.

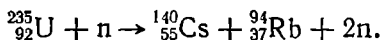
Удельная энергия связи для ядер средней массы примерно на 1 МэВ больше, чем у тяжелых ядер (см. рис. 49.1). Отсюда следует, что деление ядер должно сопровождаться выделением большого количества энергии. Но особенно важным оказалось то обстоятельство, что при делении каждого ядра высвобо-

¹⁾ Лизе Мейтнер (1878—1968) — австрийский физик.

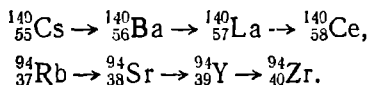
²⁾ Тепловыми называются нейтроны, находящиеся в тепловом равновесии с атомами вещества. Их энергия равна примерно 0,03 эВ.

ждается несколько нейтронов. Относительное количество нейтронов в тяжелых ядрах заметно больше, чем в средних ядрах. Поэтому образовавшиеся осколки оказываются сильно перегруженными нейтронами, в результате чего они выделяют по нескольку нейтронов. Большинство нейтронов испускается мгновенно (за время, меньшее 10^{-14} с). Часть (около 0,75 %) нейтронов, получившая название запаздывающих нейтронов, испускается не мгновенно, а с запаздыванием от 0,05 с до 1 мин. В среднем на каждый акт деления приходится 2,5 выделившихся нейтронов.

Выделение мгновенных и запаздывающих нейтронов не устраняет полностью перегрузку осколков деления нейтронами. Поэтому осколки оказываются в большинстве радиоактивными и претерпевают цепочку β -превращений, сопровождаемых испусканием γ -излучения. Поясним сказанное примером. Один из путей, которыми осуществляется деление, выглядит следующим образом:



Осколки деления — цезий и рубидий — претерпевают превращения:



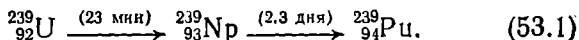
Конечные продукты — церий ${}^{140}\text{Ce}$ и цирконий ${}^{94}\text{Zr}$ — являются стабильными.

Кроме урана, при облучении нейтронами¹⁾ делятся торий (${}_{90}^{232}\text{Th}$) и протактиний (${}_{91}^{231}\text{Pa}$), а также трансурановый элемент плутоний (${}_{94}^{239}\text{Pu}$). Нейтроны сверхвысоких энергий (порядка нескольких сотен мегаэлектронвольт) вызывают деление и более легких ядер. Ядра ${}^{235}\text{U}$ и ${}^{239}\text{Pu}$ делятся нейтронами любых энергий, но особенно хорошо медленными нейтронами. Тепловыми нейтронами делятся также ${}^{233}\text{U}$ и ${}^{230}\text{Th}$, но эти изотопы в природе не встречаются, они получают искусственным путем.

¹⁾ Деление тяжелых ядер может быть вызвано не только нейтронами, но и другими частицами — протонами, дейтронами, α -частицами, а также γ -фотонами. В последнем случае говорят о фотоделении ядер.

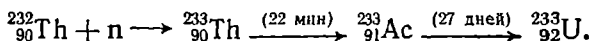
Ядра ^{238}U делятся только быстрыми нейтронами (с энергиями, не меньшими 1 МэВ). При меньших энергиях нейтроны поглощаются ядрами ^{238}U без последующего их деления. В результате образуется ядро ^{239}U , энергия возбуждения которого выделяется в виде γ -фотона. Поэтому такой процесс называется радиационным захватом (реакция (n, γ)). Эффективное сечение этого процесса резко возрастает при энергии нейтронов, равной примерно 7 эВ, достигая 23 000 барн (см. рис. 52.2). Сечение захвата ядром ^{238}U тепловых нейтронов составляет меньше 3 барн.

Образовавшееся в результате захвата нейтрона ядро ^{239}U нестабильно (период полураспада T равен 23 мин). Испуская электрон, антинейтрино и γ -фотон, оно превращается в ядро трансуранового элемента нептуния ^{239}Np . Нептуний также претерпевает β^- -распад ($T = 2,3$ дня), превращаясь в плутоний ^{239}Pu . Эта цепочка превращений выглядит следующим образом:



Плутоний α -радиоактивен, однако его период полураспада так велик (24 400 лет), что его можно считать практически стабильным.

Радиационный захват нейтронов ядром тория ^{232}Th приводит к образованию делящегося изотопа урана ^{233}U , отсутствующего в природном уране:



Уран-233 α -радиоактивен ($T = 162\,000$ лет).

Испускание при делении ядер ^{235}U , ^{239}Pu и ^{233}U нескольких нейтронов делает возможным осуществление цепной ядерной реакции. Действительно, испущенные при делении одного ядра z нейтронов могут вызвать деление z ядер, в результате будет испущено z^2 новых нейтронов, которые вызовут деление z^2 ядер, и т. д. Таким образом, количество нейтронов, рождающихся в каждом поколении, нарастает в геометрической прогрессии. Нейтроны, выпускаемые при делении ядер ^{235}U , имеют в среднем энергию порядка 2 МэВ, что соответствует скорости порядка $2 \cdot 10^7$ м/с. Поэтому время, протекающее между испусканием нейтрона и захватом его новым делящимся ядром, очень мало,

так что процесс размножения нейтронов в делящемся веществе протекает весьма быстро.

Нарисованная нами картина является идеальной. Процесс размножения нейтронов протекал бы описанным образом при условии, что все выделившиеся нейтроны поглощаются делящимися ядрами. В действительности это далеко не так. Прежде всего из-за конечных размеров делящегося тела и большой проникающей способности нейтронов многие из них покинут зону реакции прежде, чем будут захвачены каким-либо ядром и вызовут его деление. Кроме того, часть нейтронов поглотится ядрами педелящихся примесей, вследствие чего выйдет из игры, не вызвав деления и, следовательно, не породив новых нейтронов.

Объем тела растет как куб, а поверхность — как квадрат линейных размеров. Поэтому относительная доля вылетающих наружу нейтронов уменьшается с ростом массы делящегося вещества.

Природный уран содержит 99,27 % изотопа ^{235}U , 0,72 % ^{235}U и около 0,01 % ^{234}U . Следовательно, на каждое делящееся под действием медленных нейтронов ядро ^{235}U приходится 140 ядер ^{238}U , которые захватывают не слишком быстрые нейтроны без деления. Поэтому в природном уране цепная реакция деления не возникает.

Цепная реакция в уране может быть осуществлена двумя способами. Первый способ заключается в выделении из природного урана делящегося изотопа ^{235}U . Вследствие химической неразличимости изотопов разделение их представляет собой весьма трудную задачу. Однако она была решена несколькими методами.

В куске чистого ^{235}U (или ^{239}Pu) каждый захваченный ядром нейтрон вызывает деление с испусканием около 2,5 новых нейтронов. Однако если масса такого куска меньше определенного критического значения, то большинство испущенных нейтронов вылетает наружу, не вызвав деления, так что цепная реакция не возникает. При массе, большей критической, нейтроны быстро размножаются, и реакция приобретает взрывной характер. На этом основано действие атомной бомбы (рис. 53.2). Ядерный заряд такой бомбы представляет собой два или более кусков почти чистого ^{235}U или ^{239}Pu . Масса каждого куска мень-

ше критической, вследствие чего цепная реакция не возникает.

В земной атмосфере всегда имеется некоторое количество нейтронов, рожденных космическими лучами. Поэтому, чтобы вызвать взрыв, достаточно соединить

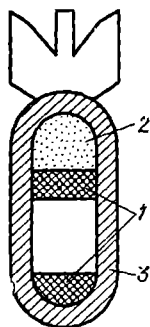


Рис. 53.2. Схематическое изображение атомной бомбы: 1 — ядерный заряд, 2 — запал, 3 — корпус бомбы

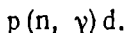
части ядерного заряда в один кусок с массой, большей критической. Это нужно делать очень быстро, и соединение кусков должно быть очень плотным. В противном случае ядерный заряд разлетится на части прежде, чем успеет прореагировать заметная доля делящегося вещества. Для соединения используется обычное взрывчатое вещество (запал), с помощью которого одной частью ядерного заряда выстреливают в другую. Все устройство заключено в массивную оболочку из металла большой плотности. Оболочка служит отражателем нейтронов и, кроме того, удерживает ядерный заряд от распыления до тех пор, пока максимально возможное число его ядер не выделит свою энергию при делении.

Цепная реакция в атомной бомбе идет на быстрых нейтронах. При взрыве успевает прореагировать только часть ядерного заряда.

Иной способ осуществления цепной реакции используется в ядерных реакторах. В качестве делящегося вещества в реакторах служит природный (либо несколько обогащенный изотопом ^{235}U) уран. Чтобы предотвратить радиационный захват нейтронов ядрами ^{238}U (который становится особенно интенсивным при энергии нейтронов, равной примерно 7 эВ), сравнительно небольшие блоки делящегося вещества размещают на некотором расстоянии друг от друга, а промежутки между блоками заполняют замедлителем, т. е. веществом, в котором нейтроны замедляются до тепловых скоростей. Сечение захвата тепловых нейтронов ядром ^{238}U составляет всего 3 барна, в то время как сечение деления ^{235}U тепловыми нейтронами почти в 200 раз больше (580 барн). Поэтому, хотя нейтроны сталкиваются с ядрами ^{238}U в 140 раз чаще, чем с ядрами ^{235}U , радиационный захват происхо-

дит реже, чем деление, и при больших размерах всего устройства коэффициент размножения нейтронов (т. е. отношение количеств нейтронов, рождающихся в двух последующих поколениях) может достигнуть значений, больших единицы.

Замедление нейтронов осуществляется за счет упругого рассеяния. В этом случае энергия, теряемая замедляемой частицей, зависит от соотношения масс сталкивающихся частиц. Максимальное количество энергии теряется в случае, если обе частицы имеют одинаковую массу (см. § 25 1-го тома). С этой точки зрения идеальным замедлителем должно было бы быть вещество, содержащее обычный водород, например вода (массы протона и нейтрона примерно одинаковы). Однако такие вещества оказались непригодными в качестве замедлителя, потому что протоны поглощают нейтроны, вступая с ними в реакцию



Ядра замедлителя должны обладать малым сечением захвата нейтронов и большим сечением упругого рассеяния. Этому условию удовлетворяют дейтрон (ядро тяжелого водорода — дейтерия D), а также ядра графита (C) и бериллия (Be). Для уменьшения энергии нейтрона от 2 МэВ до тепловых энергий в тяжелой воде (D₂O) достаточно около 25 столкновений, в C или Be — примерно 100 столкновений.

Первый уран-графитовый реактор был пущен в декабре 1942 г. в Чикагском университете под руководством итальянского физика Э. Ферми. В Советском Союзе реактор такого же типа был пущен под руководством И. В. Курчатова в декабре 1946 г. в Москве.

Схема уран-графитового реактора приведена на рис. 53.3. Стержни, помеченные цифрой 3, содержат кадмий или бор. Эти элементы интенсивно поглощают нейтроны. Поэтому введение стержней в реактор уменьшает коэффициент размножения нейтронов, а выведение — увеличивает. Специальное автоматическое устройство, управляющее стержнями, позволяет поддерживать развиваемую в реакторе мощность на заданном уровне. Регулирование значительно облегчается тем обстоятельством, что часть нейтронов, как уже отмечалось, испускается при делении ядер не мгновенно, а с запаздыванием до 1 мин.

Первые промышленные реакторы предназначались для производства делящегося материала для атомных бомб — плутония. В таких реакторах часть нейтронов, испускаемых при делении ядер ^{235}U , идет на поддержание цепной реакции, часть же претерпевает радиационный захват ядрами ^{238}U , что, как мы видели, приводит в конечном итоге к образованию ^{239}Pu (см.

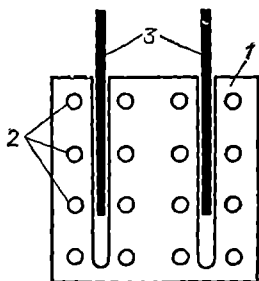


Рис. 53.3. Схема уран-графитового реактора: 1 — замедлитель (графит), 2 — блоки из урана, 3 — регулировочные стержни

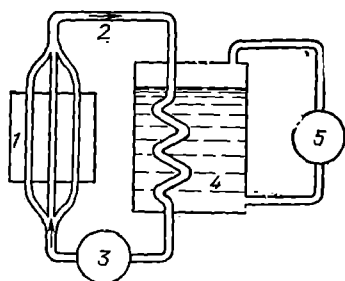


Рис. 53.4. Схема атомной электростанции: 1 — активная зона реактора, 2 — контур, по которому циркулирует теплоноситель, 3 — насос, 4 — теплообменник, 5 — турбина

схему (53.1)). После того как в урановых блоках накопится достаточное количество ^{239}Pu , блоки извлекаются из реактора и направляются на химическую переработку для выделения из них плутония.

Применение ядерной энергии для мирных целей было впервые осуществлено в СССР под руководством И. В. Курчатова. В 1954 г. в Советском Союзе была введена в эксплуатацию первая атомная электростанция мощностью 5000 кВт. Схема атомной электростанции изображена на рис. 53.4. Энергия, выделяемая в активной зоне реактора 1, снимается теплоносителем, циркулирующим в контуре 2. Циркуляция обеспечивается насосом 3. В качестве теплоносителя применяется вода или щелочные металлы с низкой температурой плавления, например натрия ($T_{\text{плав}} = 98^\circ\text{C}$). В теплообменнике 4 теплоноситель отдает свою теплоту воде, превращая ее в пар, вращающий турбину 5.

Реакторы с замедлителем работают на медленных (тепловых) нейтронах. Используя горючее, обога-

щенное делящимся изотопом (^{235}U или ^{239}Pu), можно построить реактор, действующий на быстрых нейтронах. Часть нейтронов в таких реакторах используется для превращения ^{238}U в ^{239}Pu или ^{232}Th в ^{233}U , причем количество образующихся ядер, способных делиться тепловыми нейтронами, может превосходить количество делящихся ядер, израсходованных на поддержание работы реактора. Следовательно, воспроизводится большее количество ядерного горючего, чем выгорает в реакторе. Поэтому такие ядерные реакторы называют реакторами-размножителями.

В заключение отметим, что побочными продуктами процессов, протекающих в ядерных реакторах, являются радиоактивные изотопы многих химических элементов, которые находят разнообразные применения в биологии, медицине и технике.

§ 54. Синтез атомных ядер

Ядерный синтез, т. е. слияние легких ядер в одно ядро, сопровождается, как и деление тяжелых ядер, выделением огромного количества энергии. Поскольку для синтеза ядер необходимы очень высокие температуры, этот процесс называется термоядерной реакцией.

Чтобы преодолеть потенциальный барьер, обусловленный кулоновским отталкиванием, ядра с порядковыми номерами Z_1 и Z_2 должны обладать энергией

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r_{\text{я}}},$$

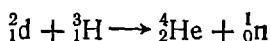
где $r_{\text{я}}$ — радиус действия ядерных сил, равный примерно $2 \cdot 10^{-15}$ м. Даже для ядер с $Z_1 = Z_2 = 1$ эта энергия составляет

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_{\text{я}}} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{2 \cdot 10^{-15}} = 1,15 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} \approx 0,7 \text{ МэВ}.$$

На долю каждого сталкивающегося ядра приходится 0,35 МэВ. Средней энергии теплового движения, равной 0,35 МэВ, соответствует температура порядка $2 \cdot 10^9$ К. Однако синтез легких ядер может протекать и при значительно меньших температурах. Дело в том, что из-за случайного распределения частиц по скоро-

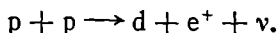
стям всегда имеется некоторое число ядер, энергия которых значительно превышает среднее значение. Кроме того, что особенно существенно, слияние ядер может произойти вследствие туннельного эффекта. Поэтому некоторые термоядерные реакции протекают с заметной интенсивностью уже при температурах порядка 10^7 К.

Особенно благоприятны условия для синтеза ядер дейтерия и трития, так как реакция между ними носит резонансный характер. Именно эти вещества образуют заряд водородной (или термоядерной) бомбы¹⁾. Запалом в такой бомбе служит обычная атомная бомба, при взрыве которой возникает температура порядка 10^7 К. Реакция синтеза дейтрона (d) и ядра трития (${}^3\text{H}$)

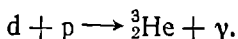


сопровождается выделением энергии, равной 17,6 МэВ, что составляет около 3,5 МэВ на нуклон. Для сравнения укажем, что деление ядра урана приводит к высвобождению приблизительно 0,85 МэВ на нуклон.

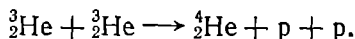
Синтез ядер водорода в ядра гелия являются основным источником энергии Солнца и других звезд, температура в недрах которых достигает 10^7 — 10^8 К. Этот синтез может осуществляться двумя путями. При более низких температурах имеет место протонно-протонный цикл, протекающий следующим образом. Вначале происходит синтез двух протонов с образованием дейтрона, позитрона и нейтрино:



Образовавшийся дейтрон, сталкиваясь с протоном, объединяется с ним в ядро ${}^3\text{He}$:



Последнее звено цикла образует реакция

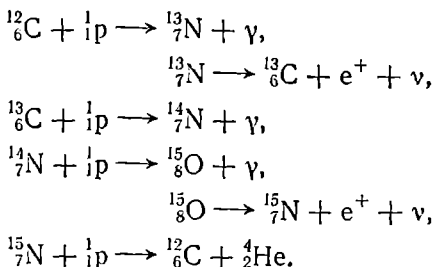


При более высоких температурах большей вероятностью обладает предложенный Бете²⁾ углерод-

¹⁾ Первый термоядерный взрыв был осуществлен в Советском Союзе в 1953 г.

²⁾ Ханс Альбрехт Бете (род. 1906) — по национальности немец, с 1935 г. в США.

ный (или углеродно-азотный) цикл, который состоит из следующих звеньев:



Итогом углеродного цикла является исчезновение четырех протонов и образование одной α -частицы. Количество ядер углерода остается неизменным; эти ядра участвуют в реакции в роли катализатора.

В водородной бомбе термоядерная реакция носит неконтролируемый характер. Для осуществления управляемых термоядерных реакций необходимо создать и поддерживать в некотором объеме температуру порядка 10^8 К. При столь высокой температуре вещество представляет собой полностью ионизированную плазму. На пути осуществления управляемой термоядерной реакции стоят огромные трудности. Наряду с необходимостью получить чрезвычайно высокие температуры, возникает проблема удержания плазмы в заданном объеме. Соприкосновение плазмы со стенками сосуда приведет к ее остыванию. Кроме того, стенка из любого вещества при такой температуре немедленно испарится. В связи с этим для удержания плазмы в заданном объеме приходится использовать магнитное поле. Силы, действующие в этом поле на движущиеся заряженные частицы, заставляют их двигаться по траекториям, расположенным в ограниченной части пространства.

Осуществление управляемого термоядерного синтеза даст человечеству практически неисчерпаемый источник энергии. Поэтому работы по овладению управляемыми термоядерными реакциями ведутся во многих странах. Одним из основных направлений, в котором ведутся эти работы, является создание установок типа токамак (сокращение от «тороидальная камера с магнитными катушками»). Такая установка представляет собой замкнутую магнитную ловушку,

имеющую форму тора. Плазма удерживается в токамаке магнитным полем очень сложной конфигурации. Разогрев плазмы осуществляется протекающим по ней током.

Основополагающий вклад в разработку систем типа токамак внес коллектив научных работников под руководством Арцимовича¹⁾, который в 1956 г. начал экспериментальное исследование этих систем в Институте атомной энергии имени И. В. Курчатова в Москве. Кроме СССР, установки типа токамак интенсивно разрабатываются в США, в странах Европейского экономического сотрудничества.

Кроме квазистационарных систем типа токамак исследуются также импульсные системы, в которых крупинки смеси дейтерия и трития подвергаются воздействию мощных импульсов лазерного излучения или электронных пучков.

Ряд специалистов считает, что проблема управляемого термоядерного синтеза будет успешно решена до конца XX столетия.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем определяется массовое число ядра?
2. Масса какой частицы — протона или нейтрона — больше?
3. В каком соотношении находятся магнетон Бора и ядерный магнетон?
4. Чему равна энергия связи нуклонов в ядре?
5. Охарактеризуйте свойства ядерных сил.
6. Какие частицы называются виртуальными?
7. Какие частицы являются переносчиками сильного взаимодействия?
8. Сформулируйте закон радиоактивного распада.
9. Почему деление тяжелых ядер сопровождается выделением большого количества энергии?
10. Почему реакция синтеза ядер называется термоядерной?

Примеры решения задач

1. Определить энергию связи, приходящуюся на один нуклон, $E_{\text{св}}/A$, для ядра ${}^{56}_{26}\text{Fe}$. Масса соответствующего атома равна 52103,47 МэВ, масса атома водорода $m_{\text{H}} = 938,79$ МэВ.

¹⁾ Лев Андреевич Арцимович (1909—1973) — советский физик.

Решение. Энергия связи нуклонов в ядре определяется формулой

$$E_{\text{св}} = c^2 [Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_{\text{n}} - m_{\text{a}}] = \\ = 26 \cdot 938,79 + (56 - 26) \cdot 939,57 - 52 \cdot 103,47 = 492,17 \text{ МэВ.}$$

Разделив полученное значение на $A = 56$, получим искомую величину

$$E_{\text{св}}/A = 492,17/56 = 8,79 \text{ МэВ/нуклон.}$$

2. Среднее время жизни атомов некоторого радиоактивного вещества $\tau = 1,000$ с. Определить вероятность P того, что ядро атома распадется за промежуток времени t , равный 1 с.

Решение. За время t распадается число атомов, равное

$$N_{\text{расп}} = N_0 - N = N_0 [1 - \exp(-\lambda t)] = N_0 [1 - \exp(-t/\tau)].$$

Вероятность распада равна

$$P = N_{\text{расп}}/N_0 = 1 - \exp(-t/\tau) = 1 - \exp(-1/1,00) = 0,63.$$

Г л а в а 10. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

§ 55. Виды взаимодействий и классы элементарных частиц

Элементарными частицами называются мельчайшие известные в настоящее время частицы материи. Термин «элементарные частицы» в значительной мере условен, так как не существует четкого критерия элементарности частицы. Характерной особенностью элементарных частиц является их способность к взаимным превращениям.

Всего вместе с античастицами открыто около 350 элементарных частиц, и число их продолжает расти. Большинство элементарных частиц нестабильно — они спонтанно превращаются в другие частицы. Стабильными являются фотон, электрон, все виды нейтрино, протон ¹⁾ и их античастицы.

Для того чтобы объяснить свойства и поведение элементарных частиц, их приходится наделять кроме массы, электрического заряда и спина рядом дополни-

¹⁾ В последнее время возникло сомнение в абсолютной стабильности протона.

тельных характерных для них величин (квантовых чисел), о которых будет сказано ниже.

Известны четыре вида взаимодействий между элементарными частицами: сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное (мы перечислили их в порядке убывания интенсивности).

Интенсивность взаимодействия принято характеризовать с помощью так называемой константы взаимодействия, которая представляет собой безразмерный параметр, определяющий вероятность процессов, обусловленных данным видом взаимодействия. Отношение значений констант дает относительную интенсивность соответствующих взаимодействий.

Сильное взаимодействие. Этот вид взаимодействия обеспечивает связь нуклонов в ядре. Константа сильного взаимодействия имеет значение порядка 10. Наибольшее расстояние, на котором проявляется сильное взаимодействие (радиус действия r), составляет примерно 10^{-15} м.

Электромагнитное взаимодействие. Константа взаимодействия равна $1/137 \approx 10^{-2}$. Радиус действия не ограничен ($r = \infty$).

Слабое взаимодействие. Это взаимодействие ответственно за все виды β -распада ядер (включая e -захват), за многие распады элементарных частиц, а также за все процессы взаимодействия нейтрино с веществом. Константа взаимодействия равна по порядку величины 10^{-14} . Слабое взаимодействие, как и сильное, является короткодействующим.

Гравитационное взаимодействие. Константа взаимодействия имеет значение порядка 10^{-39} . Радиус действия не ограничен ($r = \infty$). Гравитационное взаимодействие является универсальным, ему подвержены все без исключения элементарные частицы. Однако в процессах микромира гравитационное взаимодействие ощутимой роли не играет.

В табл. 55.1 сопоставлены значения (по порядку величины) константы разных видов взаимодействия. В последнем столбце таблицы приведено среднее время жизни частиц, распадающихся за счет данного вида взаимодействия (это время называют также временем распада).

Элементарные частицы обычно подразделяют на четыре класса¹⁾. К одному из них относится только одна частица — фотон. Второй класс образуют лептоны, третий — мезоны и, наконец, четвертый класс — барионы. Мезоны и барионы часто объединяют в один класс сильно взаимодействующих частиц,

Таблица 55.1

Вид взаимодействия	Константа взаимодействия	Время жизни, с
Сильное	10^{-2}	10^{-23}
Электромагнитное	10^{-14}	10^{-16}
Слабое	10^{-39}	10^{-8}
Гравитационное	10^{-39}	—

называемых адронами (греческое «адрос» означает крупный, массивный).

Приведем краткую характеристику перечисленных классов частиц.

1. Фотоны γ (кванты электромагнитного поля) участвуют в электромагнитных взаимодействиях, но не обладают сильным и слабым взаимодействиями.

2. Лептоны получили свое название от греческого слова «лептос», которое означает «легкий». К их числу относятся частицы, не обладающие сильным взаимодействием: электроны (e^- , e^+), мюоны (μ^- , μ^+), тяжелый тау-лептон (τ^- , τ^+), а также электронные нейтрино (ν_e , $\bar{\nu}_e$), мюонные нейтрино (ν_μ , $\bar{\nu}_\mu$) и тау-нейтрино (ν_τ , $\bar{\nu}_\tau$). Все лептоны имеют спин, равный $1/2$, и, следовательно, являются фермионами. Все лептоны обладают слабым взаимодействием. Те из них, которые имеют электрический заряд (т. е. электроны и мюоны), обладают также электромагнитным взаимодействием.

3. Мезоны — сильно взаимодействующие нестабильные частицы, не несущие так называемого барионного заряда (см. ниже). К их числу принадлежат л-мезоны, или пионы (π^+ , π^- , π^0), К-мезоны, или каоны (K^+ , K^- , K^0 , $\bar{K}^0$), и эта-мезон (η).

¹⁾ Предположительно существует еще один класс частиц — гравитоны (кванты гравитационного поля). Экспериментально эти частицы еще не обнаружены.

О π -мезонах было рассказано в § 50. Масса K -мезонов составляет примерно $970 m_e$ (494 МэВ для заряженных и 498 МэВ для нейтральных K -мезонов). Время жизни K -мезонов имеет значение порядка 10^{-8} с. Они распадаются с образованием π -мезонов и лептонов или только лептонов. Масса эта-мезона равна 549 МэВ ($1074 m_e$), время жизни порядка 10^{-19} с. Эта-мезоны распадаются с образованием π -мезонов и γ -фотонов.

В отличие от лептонов, мезоны обладают не только слабым (и, если они заряжены, электромагнитным), но также и сильным взаимодействием, проявляющимся при взаимодействии их между собой, а также при взаимодействии между мезонами и барионами. Спин всех мезонов равен нулю, так что они являются бозонами.

4. Класс барионов объединяет в себе нуклоны (p, n) и нестабильные частицы с массой, большей массы нуклонов, получившие название гиперонов ($\Lambda, \Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-, \Xi^0, \Xi^-, \Omega^-$). Все барионы обладают сильным взаимодействием. Спин всех барионов равен $1/2$, так что барионы являются фермионами. За исключением протона¹⁾, все барионы нестабильны. При распаде бариона, наряду с другими частицами, обязательно образуется барион. Эта закономерность является проявлением закона сохранения барионного заряда (см. следующий параграф).

Кроме перечисленных выше частиц, обнаружено большое число сильно взаимодействующих короткоживущих частиц, которые получили название резонансов. Эти частицы представляют собой резонансные состояния, образованные двумя или большим числом элементарных частиц. Время жизни резонансов составляет всего лишь примерно $10^{-23} - 10^{-22}$ с.

§ 56. Частицы и античастицы

Уравнение Шрёдингера не удовлетворяет требованиям теории относительности — оно не инвариантно по отношению к преобразованиям Лоренца. В 1928 г. Дираку удалось найти релятивистское квантовомеханическое уравнение для электрона,

¹⁾ См. подстрочное примечание на с. 271.

из которого вытекает ряд замечательных следствий. Прежде всего из этого уравнения естественным образом, без каких-либо дополнительных предположений, получаются спин и числовое значение собственного магнитного момента электрона. Таким образом, выяснилось, что спин представляет собой величину одновременно и квантовую, и релятивистскую.

Но этим не исчерпывается значение уравнения Дирака. Оно позволило также предсказать существование античастицы электрона — позитрона. Из уравнения Дирака получаются для полной энергии свободного электрона не только положительные, но и отрицательные значения. Исследование уравнения показывает, что при заданном импульсе p частицы существуют решения уравнения, соответствующие энергиям

$$E = \pm \sqrt{c^2 p^2 + m_e^2 c^4}. \quad (56.1)$$

Между наибольшей отрицательной энергией ($-m_e c^2$) и наименьшей положительной энергией ($+m_e c^2$) имеется интервал значений энергии, которые не могут реализоваться. Ширина этого интервала равна $2m_e c^2$ (рис. 56.1). Следовательно, получаются две области собственных значений энергии: одна начинается с $+m_e c^2$ и простирается до $+\infty$, другая начинается с $-m_e c^2$ и простирается до $-\infty$.

В некантовой релятивистской механике энергия выражается через импульс с помощью соотношения, совпадающего с (56.1) (см. формулу (51.6) 1-го тома), так что формально также может иметь отрицательные значения. Однако в некантовой теории энергия изменяется непрерывно и поэтому не может пересечь запрещенную зону и перейти от положительных значений к отрицательным. В квантовой теории энергия может изменяться не только непрерывно, но и скачком, так что существование запрещенной зоны не может воспрепятствовать переходу частицы в состоянии с отрицательной энергией.

Частица с отрицательной энергией должна обладать очень странными свойствами. Переходя в состоя-

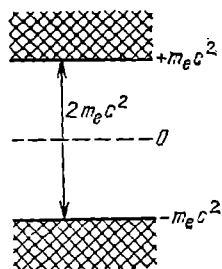


Рис. 56.1. Интервал запрещенных значений энергии электрона

ния со все меньшей энергией (т. е. со все большей по модулю отрицательной энергией), она могла бы выделять энергию, скажем, в виде излучения, причем, поскольку $|E|$ ничем не ограничен, частица с отрицательной энергией могла бы излучить бесконечно большое количество энергии. Ввиду этих трудностей следовало, казалось бы, признать, что состояния с отрицательной энергией нужно исключить из рассмотрения как приводящие к абсурдным результатам. Это, однако, противоречило бы некоторым общим принципам квантовой механики. Поэтому Дирак избрал другой путь. Он предположил, что переходы электронов в состояния с отрицательной энергией обычно не наблюдаются по той причине, что все имеющиеся уровни с отрицательной энергией уже заняты электронами. Напомним, что электроны подчиняются принципу Паули, который запрещает находиться в одном и том же состоянии более чем одной частице.

Согласно Дираку вакуум есть такое состояние, в котором все уровни отрицательной энергии заселены электронами, а уровни с положительной энергией свободны (рис. 56.2а). Поскольку заняты все без исключения уровни, лежащие ниже запрещенной полосы,

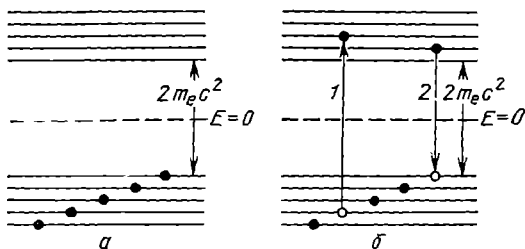


Рис. 56.2. *а* — Полностью заполненные электронами отрицательные уровни энергии. *б* — Схема рождения и аннигиляции электрон-позитронной пары

электроны на этих уровнях никак себя не обнаруживают. Если одному из электронов, находящихся на отрицательных уровнях, сообщить энергию

$$E \geq 2m_e c^2, \quad (56.2)$$

то этот электрон перейдет в состояние с положительной энергией и будет вести себя обычным образом, как частица с положительной массой и отрицательным

зарядом. Вакансия («дырка»), образовавшаяся при этом в совокупности отрицательных уровней, должна вести себя как электрон, имеющий положительный заряд. Действительно, отсутствие частицы, обладающей отрицательными массой и зарядом (из соотношения $E = mc^2$ вытекает, что у частицы с отрицательной энергией масса также будет отрицательной), будет восприниматься как наличие частицы с положительной массой и положительным зарядом. Эта первая из предсказанных теоретически частиц была названа **позитроном**.

При встрече позитрона с электроном они **аннигилируют** (исчезают) — электрон переходит с положительного уровня на вакантный отрицательный. Энергия, соответствующая разности этих уровней, выделяется в виде излучения. На рис. 56.26 стрелка 1 изображает процесс рождения пары электрон — позитрон, а стрелка 2 — их аннигиляцию. Термин «аннигиляция» не следует понимать буквально. По существу происходит не исчезновение, а превращение одних частиц (электрона и позитрона) в другие (γ -фотоны).

Теория Дирака была настолько «сумасшедшей», что большинство физиков отнеслось к ней весьма недоверчиво. Она получила признание только после того, как в 1932 г. Андерсон обнаружил позитрон в составе космического излучения. В камере Вильсона, помещенной между полюсами электромагнита, позитрон оставлял такой же след, как и рождавшийся одновременно с ним электрон, только этот след был закручен в противоположную сторону (рис. 56.3).

Рождение электрон-позитронных пар происходит, в частности, при прохождении γ -фотонов через вещество. Это — один из основных процессов, приводящих к поглощению γ -излучения веществом. В полном соответствии с теорией Дирака минимальная энергия γ -фотона, при которой наблюдается рождение пар, оказывается равной $2m_e c^2 = 1,02 \text{ МэВ}$ (см. (56.2)). Для соблюдения закона сохранения импульса в процессе рождения пары должна участвовать еще одна частица (электрон или ядро атома), которая воспринимает избыток импульса γ -фотона над суммарным импульсом электрона и позитрона. Следовательно, схема

рождения пары имеет вид

$$\gamma + e^- \rightarrow e^- + e^- + e^+ \quad (56.3)$$

либо

$$\gamma + X \rightarrow X + e^- + e^+, \quad (56.4)$$

где X — ядро, в силовом поле которого происходит рождение пары.



Рис. 56.3. Треки электрона и позитрона, полученные в камере Вильсона

Электрон-позитронные пары могут также возникать при столкновениях между двумя заряженными частицами, например электронами:

$$e^- + e^- \rightarrow e^- + e^- + e^- + e^+. \quad (56.5)$$

При аннигиляции требования закона сохранения импульса удовлетворяются тем, что возникают два (реже три) γ -фотона, разлетающихся в разные стороны:

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma (+\gamma). \quad (56.6)$$

В несколько измененном виде уравнение Дирака применимо не только к электронам, но и к другим частицам со спином, равным $1/2$. Следовательно, для

каждой такой частицы (например, протона или нейтрона) должна существовать античастица¹⁾. По аналогии с (56.5) рождения пары протон — антипротон ($p - \bar{p}$) или нейтрон — антинейтрон ($n - \bar{n}$) можно было ожидать при столкновении нуклонов достаточно большой энергии.

В 1955 г. в г. Беркли (США) был создан ускоритель, позволявший ускорять протоны до энергии 6,3 ГэВ (1 ГэВ = 10^9 эВ). При облучении пучком ускоренных протонов медной мишени наблюдалось образование пары протон — антипротон.

Антипротон отличается от протона знаком электрического заряда и собственного магнитного момента (у антипротона магнитный момент отрицателен, т. е. направлен противоположно механическому моменту). Главное же, что отличает антипротон от протона (и вообще частицу от античастицы), заключается в их способности к взаимной аннигиляции, в результате которой возникают другие частицы. Антипротон может аннигилировать при встрече не только с протоном, но и с нейтроном. Совокупность возникающих частиц в отдельных актах аннигиляции различна. Например, возможны процессы

$$\begin{aligned}\bar{p} + p &\longrightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^+ + \pi^- + \pi^0, \\ \bar{p} + p &\longrightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0 + \pi^0 + \pi^0, \\ \bar{p} + n &\longrightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^- + \pi^0 + \pi^0.\end{aligned}\quad (56.7)$$

В 1956 г. на том же ускорителе в Беркли были наблюдаемы антинейтроны. Антинейтрон отличается от нейтрона знаком собственного магнитного момента (у антинейтрона направление магнитного момента совпадает с направлением механического момента) и способностью аннигилировать при встрече с нуклоном (нейтроном или протоном). В результате аннигиляции возникают новые частицы (главным образом π -мезоны).

Античастицы имеются не только у фермионов, но и у бозонов. Так, например, π^- -мезон является античастицей по отношению к π^+ -мезону.

¹⁾ Античастицу обозначают той же буквой, что и соответствующую ей частицу с добавлением тильды ($\sim$) или черточки над этой буквой. Например, антипротон обозначают символом $\bar{p}$ или $\tilde{p}$.

Существуют частицы, которые тождественны со своими античастицами (т. е. не имеют античастиц). Такие частицы называются абсолютно нейтральными. К их числу принадлежат фотон, π^0 -мезон и η -мезон. Частицы, тождественные со своими античастицами, не способны к аннигиляции. Это, однако, не означает, что они вообще не могут превращаться в другие частицы.

Если барионам (т. е. нуклонам и гиперонам) приписать барионный заряд¹⁾ (или барионное число) $B = +1$, антибарионам — барионный заряд $B = -1$, а всем остальным частицам — барионный заряд $B = 0$, то для всех процессов, протекающих с участием барионов и антибарионов (например, для (56.7)), будет характерно сохранение барионного заряда, подобно тому как для процессов (56.3) — (56.6) характерно сохранение электрического заряда.

Закон сохранения барионного заряда обуславливает стабильность самого легкого из барионов — протона. Другие законы сохранения (энергии, импульса, момента импульса, электрического заряда и т. д.) не запрещают, например, процесса

$$p \longrightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}, \quad (56.8)$$

который в конечном итоге привел бы к аннигиляции атомов. Однако такой процесс сопровождался бы уменьшением барионного заряда на единицу и поэтому не наблюдается. Аналогично закон сохранения электрического заряда обуславливает стабильность самой легкой заряженной частицы — электрона, запрещая, например, процесс

$$e^- \longrightarrow \gamma + \gamma + \nu. \quad (56.9)$$

Для объяснения особенностей протекания процессов с участием лептонов и антилептонов приходится ввести квантовое число L , получившее название лептонного заряда (или лептонного числа). Лептонам приписывается $L = +1$, антилептонам $L = -1$, всем остальным частицам $L = 0$. При этом условии во всех без исключения процессах наблюдает-

¹⁾ Барионный заряд есть одно из тех квантовых чисел, о которых говорится в начале § 55.

ся сохранение суммарного лептонного заряда рассматриваемой физической системы.

Теперь мы имеем возможность объяснить, почему частицу, возникающую при распадах (48.7) и (51.7), следует называть антинейтрино, а возникающую при распаде (51.8) — нейтрино. Это вытекает из требования сохранения лептонного заряда. У электрона и нейтрино $L = +1$, а у позитрона и антинейтрино $L = -1$. Поэтому суммарный лептонный заряд не изменяется, если электрон возникает вместе с антинейтрино, а позитрон — вместе с нейтрино.

Приписав электрону $L = +1$, мы должны в соответствии со схемой распада (50.5) отрицательному мюону также приписать $L = +1$, т. е. считать μ^- частицей, а положительный мюон рассматривать как античастицу и приписывать ему значение $L = -1$. Легко убедиться в том, что в процессах распада π -мезонов (см. (50.3)) также сохраняется лептонный заряд.

Таким образом, кроме действующих в макромире законов сохранения энергии, импульса, момента импульса и электрического заряда, в мире элементарных частиц соблюдаются законы сохранения барионного и лептонного зарядов и еще несколько законов сохранения, на которых останавливаться мы не имеем возможности.

§ 57. Кварки

Частиц, называемых элементарными, стало так много, что возникли серьезные сомнения в их элементарности. В 1964 г. Гелл-Ман¹⁾ и независимо от него Цвейг²⁾ выдвинули гипотезу, согласно которой все адроны (т. е. мезоны и барионы) построены из трех частиц, получивших название кварков³⁾. Этим частицам приписывают дробные квантовые числа, в частности электрический заряд, равный $+2/3$, $-1/3$,

¹⁾ Марри Гелл-Ман (род. 1929) — американский физик.

²⁾ Джордж Цвейг (род. 1937) — американский физик.

³⁾ Название «кварк» заимствовано Гелл-Маном из фантастического романа Дж. Джойса «Поминки по Финнегану». В романе есть песня, начинающаяся словами «three quarks», что означает «три карканья», «три кваканья», «три пустяка». Цвейг называл кварки тузами, но это название не прижилось.

— $1/3$ соответственно для каждого из трех кварков. Эти кварки обычно обозначаются буквами u (от английского слова up, что означает вверх), d (down — вниз), и s (strange — странный). Кроме кварков, рассматриваются антикварки ($\bar{u}$, $\bar{d}$, $\bar{s}$). Свойства, приписываемые кваркам, даны в табл. 57.1 (кварки c , b , t ,

Таблица 57.1

Тип (аромат) кварка	Электрический заряд, q	Барионный заряд, B	Спин	Очарование, C	Цвет
u	$+2/3$	$+1/3$	$1/2$	0	Желтый, синий, красный
d	$-1/3$	$+1/3$	$1/2$	0	То же
s	$-1/3$	$+1/3$	$1/2$	0	»
c	$+2/3$	$+1/3$	$1/2$	$+1$	»
b	$-1/3$	$+1/3$	$1/2$	0	»
t	$+2/3$	$+1/3$	$1/2$	0	»
$\bar{u}$	$-2/3$	$-1/3$	$1/2$	0	Фиолетовый, оранжевый, зеленый
$\bar{d}$	$+1/3$	$-1/3$	$1/2$	0	То же
$\bar{s}$	$+1/3$	$-1/3$	$1/2$	0	»
$\bar{c}$	$-2/3$	$-1/3$	$1/2$	-1	»
$\bar{b}$	$+1/3$	$-1/3$	$1/2$	0	»
$\bar{t}$	$-2/3$	$-1/3$	$1/2$	0	»

очарование и цвет обсуждаются ниже). Отметим, что «цвет» и «очарование» — это просто названия квантовых чисел, которые свидетельствуют о том, что физикам, как правило, присуще чувство юмора. Конечно, можно было бы вместо подобных экзотических названий пользоваться терминами «квантовое число № 1», «квантовое число № 2» и т. д. Однако это было бы ужасно скучно.

Мезоны образуются из пары кварк — антикварк, а барионы — из трех кварков. В табл. 57.2 приведены некоторые из этих образований.

В дальнейшем систему кварков пришлось расширить. По ряду соображений, в частности чтобы устранить противоречие с принципом Паули, было введено понятие цвета кварка. Стали говорить, что каждый

кварк может существовать в трех «окрашенных» формах: желтой, синей и красной (отметим, что смесь этих цветов дает «нулевой» белый цвет).

Сочетание цветов кварков в адронах должно быть таким, чтобы средний цвет адрона был нулевым (т. е. адрон был «бесцветным»). Например, в состав протона входят кварки: u (желтый), u (синий) и d (красный). В сумме получается нулевой (белый) цвет.

Таблица 57.2

Частица	Состав	Электрический заряд, q	Барийонный заряд, B	Взаимная ориентация спинов кварков	Спин частицы
π^+	$u\bar{d}$	+1	0	$\uparrow\downarrow$	0
π^-	$\bar{u}d$	-1	0	$\uparrow\downarrow$	0
p	uud	+1	+1	$\uparrow\uparrow$	1/2
n	udd	0	+1	$\uparrow\uparrow$	1/2

Антикварки считаются окрашенными в дополнительные цвета (антицвета), дающие в сумме с цветом нулевой цвет. Соответственно мезоны, состоящие из кварка и антикварка, также имеют нулевой цвет. Антицветом для желтого является фиолетовый цвет, для синего — оранжевый, для красного — зеленый (см. табл. 57.1).

В основном же цвет кварка (подобно знаку электрического заряда) стал выражать различие в свойстве, определяющем взаимное притяжение и отталкивание кварков. По аналогии с квантами полей различных взаимодействий (фотонами в электромагнитных взаимодействиях, π -мезонами в сильных взаимодействиях и т. д.) были введены частицы — переносчики взаимодействия между кварками. Эти частицы были названы глюонами (от английского glue — клей). Они переносят цвет от одного кварка к другому, в результате чего кварки удерживаются вместе.

В 1974 г. была открыта практически одновременно в двух лабораториях США частица с огромной массой, равной 3,10 ГэВ (более трех масс нуклона). В одной из лабораторий новой частице дали обозначение J , в другой — ψ , в связи с чем эту частицу называют

J/ψ -частицей (джей-пси-частицей). Открытие этой частицы послужило подтверждением предложенной ранее модели частиц из четырех кварков. Кроме u -, d - и s -кварков, в этой модели фигурирует четвертый «очарованный» кварк c (от английского *charged* — очарованный). Он отличается от остальных кварков тем, что квантовое число C , получившее название очарование (его называют также шарм или чарм), у него равно единице, в то время как для остальных кварков оно равно нулю (см. табл. 57.1). В состав обычных (неочарованных) частиц (мезонов и барионов) c -кварк не входит.

Для объяснения свойств открытой в 1976 г. Y -частицы (ипсилон-частицы) пришлось ввести пятый кварк, получивший обозначение b (*bottom* — нижний) (см. табл. 57.1). Вскоре после того выяснилось, что существует шестой очень массивный кварк, обозначаемый буквой t (*top* — верхний).

Таким образом, система кварков включает уже кварки шести сортов (ароматов) (u , d , s , c , b , t), каждый из которых существует в трех цветовых разновидностях (желтой, синей и красной).

Идея кварков оказалась весьма плодотворной. Она позволила не только систематизировать уже известные частицы, но и предсказать целый ряд новых. Гипотеза кварков позволила также объяснить многие свойства частиц и связать между собой различные процессы.

Ряд экспериментальных данных указывает с несомненностью на реальное существование кварков. Вместе с тем все попытки наблюдать кварки в свободном состоянии оказались безуспешными. Это привело к выводу, что кварки могут существовать только внутри адронов и в принципе не могут наблюдаться в свободном состоянии. Появился даже применительно к кваркам термин *конфайнмент* (от английского *confinement*, что означает тюремное заключение). Причиной конфайнмента является необычное поведение сил взаимодействия кварков друг с другом. При малых расстояниях эти силы крайне малы, так что кварки оказываются практически свободными (это состояние называется асимптотической свободой). Однако с увеличением расстояний между кварками силы взаимодействия очень быстро растут, не позволяя кваркам вылететь из адрона.

§ 58. Единая теория взаимодействий

Эйнштейн в течение многих лет пытался создать единую теорию гравитационных и электромагнитных взаимодействий. Однако его усилия не увенчались успехом. Идея Эйнштейна о единстве различных видов взаимодействий была реализована (хотя бы частично) спустя 30 лет после его смерти. Удалось объединить в рамках единой теории электромагнитное и слабое взаимодействия и разработать основы для построения единой теории электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий.

В 60-х годах XX столетия Вайнберг¹⁾, Глэшоу²⁾ и Салам³⁾ создали единую теорию электро-слабых (т. е. электромагнитных и слабых) взаимодействий. Из этой теории вытекает, что переносчиком слабых взаимодействий является группа частиц, получивших название промежуточных векторных бозонов. В эту группу входят две заряженные частицы (W^+ и W^-) и одна нейтральная (Z^0) (W — первая буква английского слова weak — слабый). Таким образом, слабые взаимодействия подобны электромагнитным, переносчиками которых также являются векторные бозоны — фотоны. Теория позволила предсказать массы промежуточных бозонов.

Промежуточные бозоны были обнаружены в 1982—1983 гг. двумя группами физиков в ЦЕРНе (Европейской организации ядерных исследований, расположенной вблизи Женевы). Опыт проводился на протон-антипротонном коллайдере — ускорителе, в котором взаимодействуют встречные пучки протонов и антипротонов, каждый из которых ускорялся до энергии 270 ГэВ. В хорошем согласии с предсказаниями теории масса W^+ - и W^- -бозонов оказалась равной 81 ГэВ, а Z^0 -бозона 93 ГэВ (напомним, что масса нуклона равна примерно 1 ГэВ).

Промежуточные бозоны — нестабильные частицы, их время жизни составляет всего $3 \cdot 10^{-25}$ с. Несмотря на это, их рождение надежно устанавливается по

¹⁾ Стивен Вайнберг (род. 1933) — американский физик.

²⁾ Шелдон Ли Глэшоу (род. 1932) — американский физик.

³⁾ Абдус Салам (род. 1926) — пакистанский физик.

природе и энергии продуктов распада. Характерные схемы распада промежуточных бозонов имеют вид

$$\begin{aligned} W^+ &\longrightarrow e^+ + \nu_e, & W^- &\longrightarrow e^- + \bar{\nu}_e, & Z^0 &\longrightarrow e^+ + e^-, \\ W^+ &\longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu, & W^- &\longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu, & Z^0 &\longrightarrow \mu^+ + \mu^-. \end{aligned}$$

Бета-распад происходит за счет слабого взаимодействия. Следовательно, в нем должен участвовать промежуточный бозон. В соответствии с этим, например, распад нейтрона ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$) в действительности представляет собой двухступенчатый процесс:

$$n \longrightarrow p + W^-, \text{ затем } W^- \longrightarrow e^- + \bar{\nu}_e.$$

Таким образом, теория электрослабого взаимодействия получила блестящее экспериментальное подтверждение. На очередь стало создание большого объединения, идея которого состоит в том, что сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия представляют собой различные проявления одного фундаментального взаимодействия, характеризуемого одной безразмерной константой.

Энергия, необходимая для прямой проверки теории большого объединения путем реакций между частицами ($\sim 10^{15}$ ГэВ), столь велика, что вряд ли будет достигнута на ускорителях в обозримое время. Однако имеется способ косвенной проверки. Дело в том, что простейший вариант теории большого объединения предсказывает распад протона. Нестабильность протона (если она есть) крайне мала. Теоретические оценки времени жизни протона дают значение $10^{29} - 10^{30}$ лет (отметим, что время существования Вселенной порядка 10^{10} лет). Столь большое время жизни не исключает возможности экспериментальной проверки предсказания теории. Если время жизни составляет 10^{30} лет, то в одном кубическом метре воды должен в течение года распадаться один протон. Пока обнаружить распад протона не удалось. Из экспериментальных данных вытекает, что время жизни протона превышает 10^{31} лет. Попытки зарегистрировать распад протона продолжаются. Обнаружение нестабильности протона явилось бы подтверждением теории Великого объединения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Охарактеризуйте четыре вида взаимодействий.
2. Что характерно для всех мезонов?
3. Можно ли мюон считать мезоном?
4. Какие частицы называются адронами?
5. Есть ли античастица у фотона?
6. Какие частицы называются абсолютно нейтральными?
7. Какие частицы являются переносчиками взаимодействия между кварками?
8. Какие частицы являются переносчиками слабого взаимодействия?

Примеры решения задач

1. Найти наибольшую скорость, которую может иметь позитрон, образовавшийся при радиоактивном распаде свободного покоящегося антинейтрона.

Решение. Максимальная полная энергия возникшего позитрона равна разности энергий покоя антинейтрона и антипротона:

$$\frac{m_e c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = (m_n - m_p) c^2.$$

Отсюда

$$v = c \sqrt{1 - \left(\frac{m_e}{m_n - m_p} \right)^2} = c \sqrt{1 - \left(\frac{0,511}{939,57 - 938,28} \right)^2} = 0,92c$$

(мы подставили значения масс в энергетических единицах).

2. Какие законы сохранения нарушились бы в ходе распада свободного протона по схеме

$$p \rightarrow n + e^-?$$

Ответ. Законы сохранения энергии, момента импульса, электрического заряда и лептонного заряда.

3. Два протона с энергией $E = 50$ ГэВ каждый движутся в системе K навстречу друг другу и претерпевают лобовое соударение. Рассмотреть этот процесс в системе K' , в которой один из протонов неподвижен; определить энергию E' другого протона (энергия покоя протона $E_0 = 0,938$ ГэВ). Какой вывод можно сделать из полученного результата?

Решение. В системе K протоны движутся с одинаковыми по модулю скоростями v и $-v$ (см. рисунок). Для того чтобы

1-й протон покоился в системе K' , эта система должна двигаться относительно системы K со скоростью $V = v$. Следовательно,

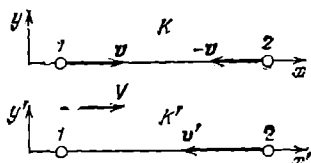
$$V = v. \quad (1)$$

В системе K энергия второго протона равна

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{E_0}{x} \quad (2)$$

(m — масса; E_0 — энергия покоя протона). Мы ввели обозначение

$$1 - v^2/c^2 = x^2, \quad \text{откуда} \quad v^2/c^2 = 1 - x^2. \quad (3)$$



К задаче 3

Проекция скорости 2-го протона на ось x системы K

$$v_x = -v. \quad (4)$$

Для нахождения проекции скорости 2-го протона на ось x' системы K' воспользуемся формулой преобразования скоростей

$$v'_{x'} = \frac{v_x - V}{1 - Vv_x/c^2}$$

(см. первую из формул (49.6) 1-го тома). Из рисунка следует, что $v'_{x'} = -v'$. Поэтому с учетом (1) и (4) получается соотношение

$$-v' = \frac{-v - v}{1 - v(-v)/c^2} = \frac{-2v}{1 + v^2/c^2},$$

откуда

$$\frac{v'}{c} = \frac{2v/c}{1 + v^2/c^2} = \frac{2\sqrt{1 - x^2}}{2 - x^2} \quad (5)$$

(мы воспользовались соотношением (3)).

В соответствии с формулой (5)

$$1 - \frac{v'^2}{c^2} = \left(\frac{x^2}{2 - x^2} \right)^2. \quad (6)$$

Подставив в формулу

$$E' = \frac{E_0}{\sqrt{1 - v'^2/c^2}}$$

значение (6) для $1 - v^2/c^2$, придем к выражению

$$E' = \frac{E_0 (2 - x^2)}{x^2}. \quad (7)$$

Взяв отношение выражений (7) и (2), найдем, что

$$E' = E \frac{2 - x^2}{x}.$$

Наконец, выразив согласно (2) x через отношение E_0/E , получим ответ

$$E' = E \frac{2 - (E_0/E)^2}{E_0/E} = \frac{2E^2}{E_0} - E_0.$$

Подстановка числовых значений дает, что

$$E' = \frac{2 \cdot 50^2}{0,938} - 0,938 = 53 \cdot 10^2 \text{ ГэВ}.$$

Таким образом, столкновение двух встречных пучков протонов, ускоренных до энергии 50 ГэВ, эквивалентно бомбардировке мишени из неподвижных протонов пучком протонов, ускоренных до энергии 5300 ГэВ. В этом состоит преимущество ускорителей частиц, основанных на принципе встречных пучков.

Задачу можно также решить, воспользовавшись формулами преобразования энергии и импульса

$$p'_{x'} = \frac{p_x - (V/c^2) E}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}, \quad p'_{y'} = p_y, \quad p'_{z'} = p_z, \quad E' = \frac{E - V p_x}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}.$$

$$E = E_{nl}.$$

Рекомендуем читателю проделать это самостоятельно.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Происхождение обозначений $S, P, D, F, \dots$ для состояний с различными значениями азимутального квантового числа L

Обозначения $S, P, D, F, \dots$ возникли из английских названий спектральных серий атома натрия. Спектр испускания атома натрия (равно как и спектры других щелочных металлов) состоит из нескольких серий линий. Самые интенсивные из них получили названия: главная, резкая, диффузная и основная (или серия Бергмана). Эти названия обусловлены следующими причинами. Главная серия названа так потому, что наблюдается не только при испускании, но и при поглощении света. Следовательно, она соответствует переходам атома в основное состояние. Резкая и диффузная серии состоят соответственно из резких и размытых (диффузных) линий. Серия Бергмана была названа основной (фундаментальной) за свое сходство с сериями водорода.

Линии серий атома натрия можно представить как переходы между энергетическими уровнями, изображенными на рис. 1. Эта схема отличается от схемы уровней водородного атома (см. рис. 22.2 на с. 100) тем, что аналогичные уровни в различных столбцах лежат на неодинаковой высоте. Несмотря на это отличие, обе схемы обнаруживают большое сходство. Это сходство дает основание предположить, что спектры щелочных металлов испускаются при переходах валентного электрона с одного уровня на другой.

На рис. 1 видно, что энергия состояния зависит, кроме квантового числа n , также от того, в какой столбец попадает данный уровень, т. е. от значения квантового числа L . Таким образом, энергия валентного электрона в атоме щелочного металла зависит от величины момента импульса электрона (что не наблюдается для атома водорода).

Зависимость энергии валентного электрона щелочного атома от квантового числа L вытекает также из квантовомеханических расчетов. В более сложных, чем водород, атомах каждый из электронов движется в усредненном поле ядра и остальных электронов. Это поле не будет кулоновским (т. е. пропорциональным $1/r^2$), но обладает сферической симметрией (зависит только от r). Действительно, в зависимости от степени проникновения электрона в глубь атома заряд ядра будет для данного электрона в большей или меньшей степени экранироваться другими электронами, вследствие чего эффективный заряд, действующий на рассматриваемый электрон, на разных расстояниях от ядра будет неодинаковым. Вместе с тем, поскольку электроны движутся в атоме с большими скоростями, усредненное по времени поле можно считать центрально-симметричным.

Решение уравнения Шрёдингера для электрона, движущегося в центрально-симметричном некулоновском поле, дает

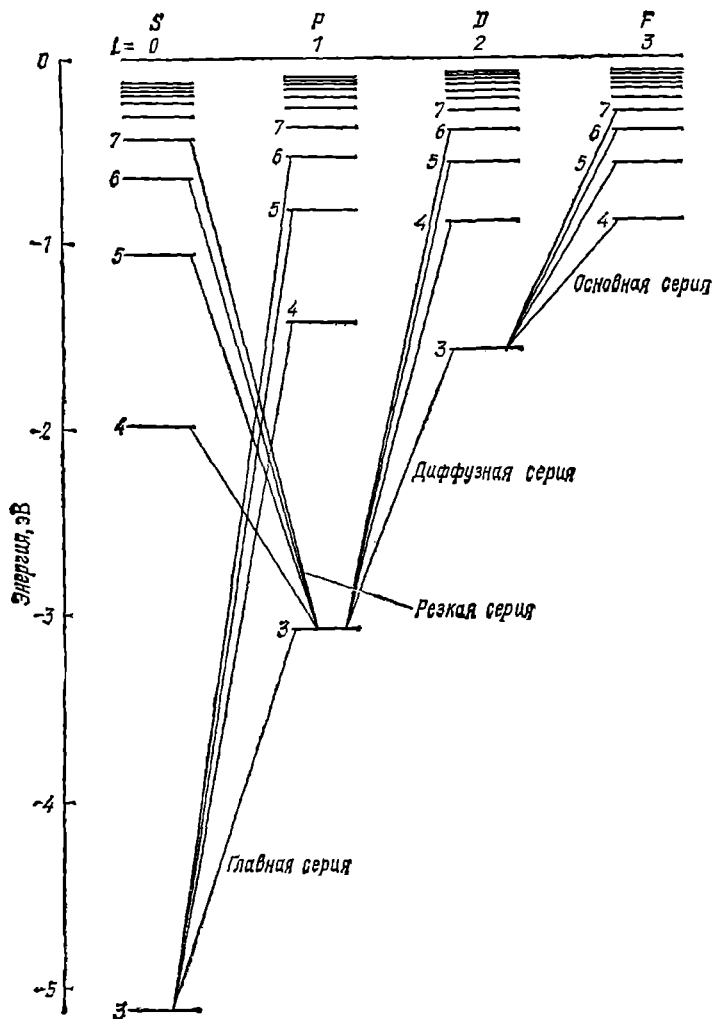


Рис. 1. Спектр натрия. Числа, проставленные против уровней, представляют собой значения главного квантового числа n

результат, аналогичный результату для водородного атома, с тем отличием, что энергетические уровни зависят не только от квантового числа n , но и от квантового числа l :

$$E = E_{nl}.$$

Говорят, что в этом случае снимается вырождение по l .

Отличие в энергии между состояниями с различными l и одинаковыми n не так велико, как между состояниями с различными n . С увеличением l энергия состояний с одинаковым n возрастает.

Для квантового числа l валентного электрона щелочных металлов действует такое же правило отбора, как и для l электрона водородного атома (см. формулу (22.13)).

Исследование оптических спектров ионов щелочных металлов показало, что момент импульса атомного остатка (т.е. ядра и остальных электронов, кроме валентного, удаляющегося при ионизации) равен нулю. Следовательно, момент атома щелочного металла равен моменту его валентного электрона и L атома совпадает с l этого электрона. В соответствии с этим на рис. 1 столбцы помечены прописными буквами S, P, D, F вместо строчных s, p, d, f , которыми помечены столбцы на рис. 22.2.

K - и L -оболочки атома натрия заполнены полностью десятью электронами. Одиннадцатый (валентный) электрон в основном состоянии помещается в M -оболочке, для которой $n = 3$. Поэтому на рис. 1 против основного уровня проставлено число 3.

Обозначения S, P, D, F являются первыми буквами английских названий серий: sharp — резкий, principal — главный, diffuse — размытый, fundamental — основной. Каждая из серий возникает за счет переходов с уровней, принадлежащих соответствующему столбцу. Впоследствии обозначения $s, p, d, f, \dots$ были перенесены на состояния с $l = 0, 1, 2, 3, \dots$, независимо от характера физического объекта, к которому они применяются. Например, говорят об s -электроне, p -электроне и т. д.

Воспользовавшись буквенными обозначениями числовых значений L , частоты спектральных линий атома натрия можно представить в виде

$$\begin{aligned} \text{резкая серия:} \quad \omega &= 3P - nS \quad (n = 4, 5, \dots), \\ \text{главная серия:} \quad \omega &= 3S - nP \quad (n = 3, 4, \dots), \\ \text{диффузная серия:} \quad \omega &= 3P - nD \quad (n = 3, 4, \dots), \\ \text{основная серия:} \quad \omega &= 3D - nF \quad (n = 4, 5, \dots). \end{aligned} \quad (1)$$

Обозначенные символами $3P, nS$ и т. д. числа, разности которых дают частоты спектральных линий, называются термами. В конце прошлого столетия Ридберг установил, что термы щелочных металлов с большой степенью точности можно представить с помощью эмпирической формулы

$$T(n) = \frac{R}{(n + \alpha)^2}. \quad (2)$$

Здесь R — постоянная Ридберга (см. (22.3)), n — главное квантовое число, α — дробное число, называемое ридберговской поправкой или квантовым дефектом. Эта по-

правка имеет постоянное значение для данного ряда термов. Ее принято обозначать той же буквой, какой обозначен соответствующий ряд термов, — буквой s для S -термов, буквой p для P -термов и т. д. Поправки определяются экспериментально. Для натрия поправки равны

$$s = -1,35, \quad p = -0,87, \quad d = -0,01, \quad f = 0,00. \quad (3)$$

Терм (2) отличается от терма водородного атома (см. 22.4) только наличием поправки α . Для F -термов эта поправка равна нулю. Поэтому основная серия (возникающая при переходах с F -уровней) оказывается водородоподобной.

Подставив выражения (2) в соотношения (1), получим формулы для частот спектральных серий натрия:

$$\text{резкая серия:} \quad \omega = \frac{R}{(3+p)^2} - \frac{R}{(n+s)^2} \quad (n=4, 5, \dots),$$

$$\text{главная серия:} \quad \omega = \frac{R}{(3+s)^2} - \frac{R}{(n+p)^2} \quad (n=3, 4, \dots),$$

$$\text{диффузная серия:} \quad \omega = \frac{R}{(3+p)^2} - \frac{R}{(n+d)^2} \quad (n=3, 4, \dots),$$

$$\text{основная серия:} \quad \omega = \frac{R}{(3+d)^2} - \frac{R}{(n+f)^2} \quad (n=4, 5, \dots).$$

Поправки s, p, d, f в этих формулах имеют значения (3).

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Числа в квадратных скобках указывают том и страницу этого тома, на которой приведены сведения об ученом

Альварес 253
Андерсон 242, 277
Арцимович 270

Бальмер 94
Бардин 192
Басов 150
Беккерель 247
Бете 268
Боголюбов 192
Бозе 125
Больцман [1; 217], 14
Бор [2; 181], 88, 91, 255
Борн 61
Боте 39

Вавилов [2; 445], 44, 227
Вайнберг 285
Вин 15, 22, 26

Гайтлер 131
Ган 259
Гаудсмит 106
Гейзенберг [1; 184], 57, 231
Гелл-Ман 281
Герлах 117
Герц Генрих [2; 241], 35
Герц Густав 89
Глэшоу 285

Дебай [2; 119]; 168
Де Бройль 50, 60, 62, 63
Джаван 154
Джермер 51
Джинс 21
Джозефсон 194
Дивер 194
Дирак [2; 139], 107, 274, 276
Долл 194
Дэвиссон 51
Дюлонг 167

Завойский 122
Зеебек 216
Зееман 118

Иваненко 231

Камерлинг-Оннес [2; 101], 189, 190
Капица 174
Кирхгоф [2; 103], 11
Кокрофт 257
Коблинз 190
Комптон 44, 48
Кришнан 144
Купер 192
Курчатов 235, 265, 266, 270
Кюри М. (Склодовская-Кюри) 235, 247
Кюри П. [2; 189], 235, 247

Ландау 176, 178
Ланде 109
Ландсберг 144
Ленард 35, 36
Лондон 131
Лоренц [1; 156], 120
Лоуренс [2; 162], 235
Лукирский 38

Мандельштам [2; 444], 144
Мейман 150, 152
Мейснер 190
Менделеев [1; 319], 128, 235
Милликен [2; 156], 38
Мозли 142, 143

Небауэр 194
Недермайер 242

Окиналини 242

- Паули 125, 251
 Пауэлл 242
 Пельтье 219
 Петржак 253
 Планк [1; 182], 23, 37, 38, 83
 Прилежаев 38
 Прóxоров 150
 Пти 167

 Ра́ман 144, 145
 Резерфорд [2; 180], 86—88, 231, 257
 Рёнтген 32, 33
 Рйдберг 94
 Рэлей 21

 Сала́м 285
 Сте́фан 14, 15
 Столе́тов [2; 190], 35, 36

 Тамм 241
 Тартаковский 52
 Таунс 150
 То́мсон Дж. Дж. [2; 158], 35, 86
 То́мсон Дж. П. 52

 Уленбек 106
 Уолтон 257

 Фейрбенк 194
 Фе́рми 125, 235, 251, 265
 Флёров 235, 253
 Франк Джеймс 89
 Фриш 259

 Цвейг 281

 Чедвик 231

 Шрёдингер 62
 Шриффер 192
 Штарк 118
 Штерн 52, 117
 Штра́ссман 259

 Эйнштейн [1; 122], 37—39, 125, 147, 149, 168, 235, 285

 Юка́ва 241, 242

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абсолютно черное тело 10, 12, 28, 31
Автоэлектронная эмиссия 69
Адроны 273
Активность радиоактивного вещества 253, 254
Альфа-распад 245, 248
Альфа-частицы 86, 248, 249
Аннигиляция частиц и античастиц 276, 278, 279
Антинейтрино 233, 250, 281
Антинейтрон 279
Антипротон 279
Античастицы 279, 280
Аромат кварка 282
Асимптотическая свобода 284
Атом водорода 91—104
— —, спектральные серии 94, 95
— —, схема энергетических уровней 100
Атомная электростанция 266
Атомное ядро 110

Барьонное число 280
Барьонный заряд 280, 282
Барьоны 273, 282
Барн 257
Беккерель 254
Бета-распад 245, 250—252, 286
Бозе-жидкость 177
Бозоны 125, 157, 158, 174, 192
— векторные 285
Бомба атомная 238, 263, 264, 266, 268
— водородная 238, 268, 269
— термоядерная 268
Боровский радиус 92, 103

Вакуум 276
Векторная модель атома 114
Взаимодействие гравитационное 278
— сильное 239, 272
— слабое 272
— электромагнитное 239, 272

Виртуальные процессы 243
Внутренняя конверсия 249
Волна де Бройля 60
Волновая функция 60, 65, 125
Волновой вектор 41, 169, 184
Время жизни возбужденных состояний атомов 91
— — — — ядер 248
— — метастабильных состояний 152
— — радиоактивного ядра 246, 247
— — частиц 272, 273
— распада 272
— релаксации 188
Второе начало термодинамики 215
Вырождение 98, 110, 119

Газ фононный 170
— фотонный 165, 170
— электронный 179
— — вырожденный 183, 184
— — невырожденный 183, 184
Газовая постоянная 173
Гамильтониан 77
Гамма-излучение 245, 248, 250
Гармонический осциллятор 81, 82
Гелий 174, 177
Гипероны 274
Гиперповерхность 159
Гипотеза де Бройля 50, 51
— Юкавы 241
Гиромагнитное отношение 104
Глаз 44
Глюоны 283
Гравитоны 273
Граница серии 95
g-фактор 109

Давление света 42
Действие 23
Дейтерий 234
Дейтрон 239, 256, 265, 268
Деление ядер 237, 238, 259—266

- Джей-пси-частица 284
 Динамические переменные 56
 Дисперсионная кривая 177, 184, 185, 202
 Диэлектрик 200
 Дырка 201, 202, 205, 208, 217

 Единица активности 254
 Естественная единица магнитного момента 105
 — — момента импульса 80

 Закон Больцмана 123, 149, 168
 — Вина 14, 16, 26
 — Дюлонга и Пти 167, 173, 184
 — Кирхгофа 10, 11
 — Кулона 87
 — Мозли 143
 — Ома 187
 — радиоактивного превращения 245, 246
 — сохранения барионного заряда 274, 280
 — — импульса 277
 — — лептонного заряда 281
 — — момента импульса 101, 252
 — — электрического заряда 280
 — — энергии 240, 241, 251
 — T^3 Дебая 172
 Законы сохранения 178, 281
 Зарядовое число 233
 Зона валентная 199, 201
 — запрещенная 197, 198, 204
 — проводимости 200, 201
 — разрешенная 197, 198
 — энергетических уровней 197

 Идеальный бозе-газ 163, 164
 — ферми-газ 158, 162
 Излучение вынужденное 146, 147, 149, 152
 — индуцированное 147
 — равновесное 13, 14
 — спонтанное 146
 — тепловое 7
 Изобары 234
 Изомеры 234
 Изотопы 234
 Изотопы 234
 Икс-лучи 33
 Инверсная населенность энергетических уровней 151

 Испускательная способность 8, 10
 — — абсолютно черного тела 11, 12, 14, 42, 83
 jj -связь 111

 Кант полосы 138
 Каон 273
 Квазимпульс 169
 Квазичастица 169, 177, 178, 202
 Квант действия 23
 — звука 169
 — магнитного потока 194
 — света 37, 38, 89
 — энергии 14, 23
 Квантование момента импульса 78
 — энергии 71
 Квантовая механика 61
 — электродинамика 240
 Квантовое число азимутальное 79, 81, 97, 99, 108, 126
 — — вращательное 135
 — — главное 89, 97, 101, 110, 126
 — — колебательное 133
 — — магнитное 80, 97, 105, 110, 126
 — — спинное 110
 — — орбитальное 105, 110, 111
 — — полного момента импульса 108, 110
 — — спина ядра 235
 — — спинное 107, 108, 126
 Квантовые числа 282
 — — электрона в атоме 126
 Кварки 281—284
 К-захват 250
 К-мезоны 273
 Комбинационное рассеяние света 144—146
 Комптоновская длина волны 48, 241
 — — — электрона 48
 Конденсация Бозе—Эйнштейна 176, 177
 Константы взаимодействия 272, 273
 Контакт Джозефсона 195
 Контактная разность потенциалов 212—214
 — — — внешняя 214, 215
 — — — внутренняя 214, 216

- Конфайнмент 284
 Коротковолновая граница тор-
 мозного рентгеновского спек-
 тра 34, 38
 Корпускулярно-волновой дуа-
 лизм 41, 50
 Коэффициент Пельтье 219
 — прозрачности 67
 — прохождения 67
 Коэффициенты Эйнштейна 148
 Кратность вырождения 99
 Кристаллофосфор 227, 228
 Критическая температура 190,
 191
 Критический ток 191
 — — контакта 195
 Критическое поле 190, 191
 Куперовские пары 192—194
 Кюри 254

 Лазер 40, 147, 149—155
 Лептонное число 280
 Лептонный заряд 280, 281
 Лептоны 243, 273
 —, спин 273
 LS-связь 111
 Люминесценция 227
 Люминофор 227

 Магнетон Бора, 105, 108, 114,
 118, 232
 — ядерный 232
 Мазер 150
 Массовое число 231, 233, 234,
 237
 Мезоны 107, 239, 242, 273, 282
 —, спин 274
 Металл 199
 Микрочастицы 53, 56, 57
 Многофотонные процессы 40
 Множитель Ланде 109, 119
 Мода 168
 Молекула водорода 131
 Момент импульса 23, 104
 — — полный атома 112, 118
 — — — электрона 108, 109
 — — собственный 106
 — магнитный 104
 — — атома 114, 117
 — — орбитальный 104, 109
 — — полный 109
 — — собственный 106—108,
 275
 — — спиновый 108, 109
 — механический 104, 105

 Момент механический орбиталь-
 ный 104, 105, 108
 — — собственный 106
 — — спиновый 108
 — силы 109
 Мультиплетность энергетиче-
 ского уровня 113
 Мультиплеты 106
 Мысленный эксперимент 54, 55
 Мю-мезоны 242, 243
 Мюоны 242, 243, 281
 —, время жизни 243
 —, масса 243
 —, спин 243

 Нейтрино 251, 252, 271, 281
 —, масса 233
 —, спин 252
 Нейтрон 231—233, 250, 258
 —, время жизни 233
 —, магнитный момент 232, 245
 —, масса 232
 —, спин 232
 Нептуний 262
 Нормальные колебания 168
 Нуклон 232, 233, 239, 241

 Однофотонные процессы 40
 Оператор 76—79
 — Лапласа 62, 95
 — энергии 77
 Оптико-механическая аналогия
 62
 Оптическая пирометрия 27
 Оптический квантовый генера-
 тор 150
 Опыт Барнетта 107
 — Боте 39
 — Вавилова 44
 — Дэвиссона и Джермера 51,
 52
 — Комптона 44
 — Милликена 38
 — Резерфорда 86
 — Тартаковского 52
 — Томсона 52
 — Франка и Герца 89—91
 — Штерна и Герлаха 117, 118
 — Эйнштейна и де Хааза 107
 Опыты Столетова 35
 Очарование 282, 284

 Период полураспада 233, 246,
 247

- Периодическая система элемен-
 тов 128, 143, 233
 Пи-мезон 242, 279
 — —, время жизни 242
 — —, масса 242
 — —, спин 242
 Пион 242
 Пирометр 27
 — радиационный 28
 — с исчезающей нитью 29
 — цветовой 30
 — яркостный 29
 Плазма 269, 270
 Плотность вероятности 61, 103,
 104
 — электромагнитной энергии 42
 Плутоний 238, 261, 262, 266
p — *n*-переход 220—226
 Поглощательная способность
 10
 Позитрон 275, 278
 Полосы вращательные 138, 139,
 141
 — колебательно-вращательные
 139—141
 Полупроводник 184, 200
 — *n*-типа 207, 217
 — примесный 201
 — *p*-типа 208, 217
 — собственный 200, 201, 204,
 206
 Порядковый номер 233
 Постоянная Авогадро 173
 — Больцмана 24
 — Планка 23, 38, 57, 80, 89
 — распада 245, 254
 — Ридберга 94
 — Стефана — Больцмана 15,
 26
 Постулаты Бора 88, 91
 Потенциал выхода 211
 Потенциальный барьер 65, 66
 Правила отбора 83, 152
 Правила отбора для азиму-
 тального квантового числа 99
 — — — вращательного кван-
 тового числа 135, 139
 — — — колебательного кван-
 тового числа 83, 133
 Принцип детального равнове-
 сия 147
 — неопределенности 57, 68, 82,
 96, 124, 158
 — неразличимости одинаковых
 частиц 124
 Принцип Паули 124—126, 128,
 169, 276, 282
 — причинности 65
 — соответствия 102
 Проводимость дырочная 208
 — электронная 207
 Промежуточные векторные бо-
 зоны 285, 286
 Протий 234
 Протон 93, 232, 252, 271, 280
 —, время жизни 286
 —, магнитный момент 232, 243
 —, масса 232
 —, спин 232
 Пси-функция 60
 Работа выхода 37, 38, 210, 212
 Равновесная плотность энергии
 теплового излучения 14, 42
 Равнораспределение энергии по
 степеням свободы 21
 Радиационный захват 262
 Радиоактивность 245
 — естественная 245
 — искусственная 245
 — протонная 245, 253
 Радиоактивные ряды 247
 Радиоспектроскоп 123
 Радиоуглерод 259
 Распределение Бозе—Эйнштей-
 на 157, 164
 — Больцмана 24, 164
 — Ферми—Дирака 157, 162,
 164, 180, 183, 203
 Рассеяние света 145
 Резонансное поглощение 258
 Резонансы 274
 Рекомбинация электронов и ды-
 рок 205, 206
 Рентгеновская трубка 33
 — флуоресценция 39
 Рентгеновские лучи 33
 Рентгеновское излучение 253
 — — тормозное 33
 — — характеристическое 33,
 45, 249
 Ридберг 96
 Рождение пар 276—278
 Ротон 177
 Сверхпроводимость 189—195
 Сверхтекучесть 174—179, 191
 Свет 40
 Связь атомная 131
 — гетерополярная 131

- Связь гомеополлярная 131
 — ковалентная 131
 Северное сияние 227
 Серия Бальмера 94, 101
 — Брэкета 95
 — Лаймана 95, 101
 — Пашена 95
 — Пфунда 95
 Серое тело 10
 Сила 104
 Символ состояния атома 113
 — ядра 233, 234
 Символы состояний электрона 99
 Синтез ядер 237
 Сложение моментов 111
 Смещение лоренцево 120
 — нормальное 120, 122
 Собственные значения 71, 72, 77, 79
 — функции 71, 72, 77, 102
 Солнечная батарея 226
 Солнце 31, 268
 Соотношение неопределенностей 57—59, 74, 82, 96, 240
 Состояние возбужденное 101
 — метастабильное 152
 — основное 101
 Состояния вырожденные 98
 — стационарные 64
 Спектр атомный 94, 136, 137
 — возбуждений 177
 — дискретный 71, 72
 — линейчатый 136
 — непрерывный 71
 — поглощения 101
 — полосатый 137
 — рентгеновский 141—144
 — собственных значений 77
 — сплошной 71
 — физической величины 71
 — характеристический 141
 Спектральные серии 137
 — — водородного атома 94, 95
 Спин 106, 107, 131, 251
 Спин-орбитальное взаимодействие 106, 109, 126
 Спонтанное деление тяжелых ядер 245, 253
 Стандартные условия 61, 71, 77, 95
 Статвес 158
 Стационарные орбиты 89, 91
 Суперпозиция собственных функций 78
 Сцинтилляция 86
 Температура вырождения 176
 — Дебая 172
 — радиационная 28, 29
 — Ферми 182, 183
 — цветовая 30, 31
 — яркостная 30
 Теория БКШ 192
 — Бора 86, 91, 93, 95, 96
 — Дирака 277
 — относительности 41, 107
 Теплоемкость кристаллической решетки 170—174
 — металлов 184
 Теплота Пельтье 219
 Термопара 218, 219
 Термоэлектродвижущая сила 216—218
 Термоядерная реакция 238, 267
 — — управляемая 238, 269
 Токамак 269, 270
 Тонкая структура спектральных линий 106, 119
 Траектория 55, 56, 59, 104
 Транзистор 220
 Трансурановые элементы 234, 235
 Тритий 234, 268
 Туннельный эффект 68, 69, 250, 268
 Тяжелая вода 265
 Тяжелый водород 234
 — тау-лептон 273
 Удельная электропроводность металлов 189
 Ультрафиолетовая катастрофа 22
 Управляемый термоядерный синтез 155
 Уравнение Дирака 107, 274, 275
 — Шрёдингера 62—65, 71, 131, 180, 274
 — — для стационарных состояний 64
 Уран 238
 Уровень акцепторный 208
 — донорный 208
 — Ферми 180, 182—184, 189, 193, 203, 204, 208, 211, 213, 216, 222

- Уровни энергии 89, 91
Условие нормировки 61, 102
- Фазовое μ -пространство** 158, 159, 181
— превращение второго рода 174
Фактор Ланде 117
— магнитного расщепления 109
Ферми 235
Фермионы 125, 157, 158
Флуктуации 43, 44
Фонон 169, 170, 177, 193, 216, 217
Фононный газ 167
Формула Бальмера 94
— — обобщенная 95
— **Планка** 16, 25—27, 148, 149, 165, 167
— **Рэлея — Джинса** 22, 23, 26, 149
— **Стирлинга** 160
— **Эйнштейна** 37, 38, 40
Фотоделение ядер 261
Фотолюминесценция 227
Фотометр 226
Фотон 38, 40, 50, 101, 107, 170, 225, 240, 249, 271, 273, 280
— виртуальный 240
—, импульс 41, 42
—, масса 41
—, скорость 41
—, спин 100, 165
—, энергия 41
Фотосопротивление 226
Фотоэлектродвижущая сила 226
Фотоэффект 40, 50
— вентильный 226
— внешний 35, 40
— внутренний 40, 225
—, красная граница 39, 40
— многофотонный 40
- Химический потенциал** 162, 164, 165
- Цвет кварка** 282
- Частицы абсолютно нейтральные** 280
— виртуальные 240, 241
— элементарные 101, 107, 271, 281
- Электрон** 48, 50, 56, 57, 185, 271, 280
—, магнитный момент 108
—, масса 232
—, оптический 129
—, спин 106, 108, 275
Электронная конфигурация 128, 132
— оболочка 127
— подоболочка 127
Электронный захват 245, 250, 252
— парамагнитный резонанс 122—124
Электрон-позитронная пара 276—278
Энергетическая светимость 8
— — абсолютно черного тела 13
Энергия активации 238
— вращательная 133
— гармонического осциллятора 81, 133, 168
— — — нулевая 82—84
— колебательная 133
— полная 68, 69
— связи нуклонов в ядре 235—237
— Ферми 180
— электронная 132, 133
Энтропия 160
Эта-мезон 280
Эффект Джозефсона 194, 195
— Зеебека 216, 218, 219
— Зеемана 118—121
— Комптона 44—48, 50
— Мейсснера 190
— Пельтье 219, 220
— Рамана 145
— Холла 208
— Штарка 118
Эффективная масса электрона 185, 187, 189
Эффективное сечение 256—258
- Ядерная модель атома** 87, 88
— реакция 234, 254, 256
— — цепная 262, 263
Ядерное время 255
Ядерный реактор 238, 264—267
— синтез 267
Ядро атома 87, 231—235
— составное 255, 256

Учебное издание

САВЕЛЬЕВ Игорь Владимирович

КУРС ФИЗИКИ

Т о м 3

Квантовая оптика. Атомная физика.

Физика твердого тела.

Физика атомного ядра и элементарных частиц

Заведующий редакцией *Л. И. Гладнева*

Редактор *Н. А. Михалина*

Младший редактор *В. А. Кузнецова*

Художественный редактор *Т. Н. Кольченко*

Технический редактор *Л. В. Лихачева*

Корректор *Н. Б. Румянцева*

ИБ № 32579

Сдано в набор 05.11.88. Подписано к печати 25.04.89.
Формат 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 15,96. Усл. кр.-отт. 16,17. Уч.-изд. л. 16,06. Тираж 250 000 экз. Заказ № 1232.
Цена 70 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

Ленинградская типография № 2 головное предприятие
ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского
объединения «Техническая книга» им. Евгения Соколовой
Союзполиграфпрома при Государственном комитете
СССР по делам издательства, полиграфии и книжной
торговли. 198052 Ленинград, Л-52, Измайловский про-
спект, 29

NAUKA PUBLISHERS

Main Editorial Board for Literature
on Physics and Mathematics

Leninski prospect, 15, Moscow W-71, 117071, USSR

PHYSICS

The Textbook for general engineering colleges

VOLUMES 1—3

Igor V. SAVELYEV, D. Sc. (*Phys. & Math.*)

Moscow Institute of Engineering Physics

VOLUME 3

1989, 304 pages. ISBN 05-02- 014052-X: 5-02-014432-0

READERSHIP: Higher School Students.

THE BOOK: The accent is placed not on imparting information, but on the formation of physical thinking by students and on their mastering the ideas and methods of the science of physics. Methodically more improved ways of treating a number of questions have been found. This has made the expounding of the material stricter, and the same time simpler and easier to understand.

CONTENTS: Preface. Quantum Nature of Light: Thermal Radiation. Photons. Elements of Atomic Physics and Quantum Mechanics: The Wave Properties of Microparticles. Quantization of Physical Quantities. The Physics of Atoms and Molecules. Emission and Spectra. Elements of Quantum Statistic and Physics of Solids: Bose—Einstein and Fermi—Dirac Statistics. The Band Theory of Solids. Elements of Physics of the Atomic Nucleus and Elementary Particles: Atomic Nucleus. Elementary Particles.

THE AUTHOR: Igor V. Savelyev has been head of Department of General Physics at the Moscow Institute of Engineering Physics for over 25 years, after devoting a few years to experimental physics. He is the author of three—volumed textbook «Physics, a General Course» (intended for higher schools with an extended syllabus in physics), two—volumed textbook «Fundamentals of Theoretical Physics» and textbook «Questions and Problems in General Physics». Professor Savelyev holds the title of Honoured Scientist of the RSFSR and is a USSR State Prize winner,

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 1

УЧЕБНИКИ И УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ С ГРИФОМ ГОСОБРАЗОВАНИЯ СССР

Для студентов высших технических учебных заведений

Савельев И. В. Курс физики: Учебник: В 3-х т. Т. 1. Механика. Молекулярная физика. — 1989. — 352 с. — 80 к.

Т. 2. Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика. — 1989. — 464 с. — 95 к.

Т. 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. — 1989. — 304 с. — 75 к.

Савельев И. В. Курс общей физики: В 3-х т.

Т. 1. Механика. Молекулярная физика. — 3-е изд. — 1986. — 432 с. — 1 р. 10 к.

Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. — 3-е изд. — 1988. — 496 с. — 1 р. 20 к.

Т. 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. — 3-е изд. — 1987. — 320 с. — 85 к.

Савельев И. В. Сборник вопросов и задач по общей физике. — 2-е изд. — 1988. — 288 с. — 80 к.

Волькенштейн В. С. Сборник задач по общему курсу физики/Под ред. И. В. Савельева. — 12-е изд. — (Аннот. план 1990 г., поз. 122). — 80 к.

Иродов И. Е. Задачи по физике. — 2-е изд. — 1988. — 416 с. — 1 р. 20 к.

Сборник качественных вопросов и задач по общей физике/Е. И. Бабаджан, В. И. Гервидс, В. М. Дубовик, Э. А. Нерсесов. — (Аннот. план 1990 г., поз. 124). — 90 к.

Сена Л. А. Единицы физических величин и их размерности. — 3-е изд. — 1988. — 432 с. — 1 р.

Для студентов физических специальностей вузов

Сивухин Д. В. Общий курс физики: В 5-ти т.

Т. I. Механика. — 3-е изд. — (Аннот. план 1989 г., поз. 104). — 1 р. 50 к.

Т. II. Термодинамика и молекулярная физика. — 3-е изд. — (Аннот. план 1990 г., поз. 125). — 1 р. 50 к.

Т. III. Электричество. — 2-е изд. — 1983. — 688 с. — 1 р. 70 к.

Т. IV. Оптика. — 2-е изд. — 1985. — 772 с. — 2 р.

Т. V. Атомная и ядерная физика: В 2-х ч.

Ч. 1. Атомная физика. — 1986. — 416 с. — 1 р. 20 к.

Ч. 2. Ядерная физика. — 1989. — 416 с. — 1 р. 30 к.

Приобретайте перечисленные выше издания в магазинах Союзкниги и Академкниги, распространяющих литературу данной тематики.