

---

## Предисловие

---



Основной замысел данной книги — органически совместить в одном учебном пособии изложение принципов теории и эксперимента с практикой решения задач. С этой целью в каждой главе сначала излагается теория соответствующего вопроса (с иллюстрацией на конкретных примерах), приводятся результаты наблюдений и эксперимента, а затем дается разбор ряда задач, где показывается, *как*, по мнению автора, следует подходить к их решению. Задачи тесно связаны с основным текстом, часто являются его развитием и дополнением, поэтому работа над ними должна проводиться параллельно с изучением основного материала.

При изложении теоретического материала автор стремился исключить из текста все второстепенное, с тем чтобы сконцентрировать внимание читателя на основных законах квантовой физики и, в частности, на вопросах наиболее трудных для понимания и восприятия. Стремление изложить основные идеи кратко, доступно и вместе с тем корректно побудило автора насколько возможно освободить материал от излишней математизации и формализма.

Изложение ведется в гауссовой системе (СГС). Это обусловлено главным образом тем, что в СИ многие формулы изучаемого круга явлений оказываются «загроможденными» коэффициентами и теряют свою простоту и наглядность. В Приложении дана сводка некоторых формул как в гауссовой системе, так и в СИ, а также приведены соотношения между единицами ряда величин в этих системах.

Курсивом выделены важнейшие положения и термины. Петит используется для материала повышенной трудности и относительно громоздких расчетов (этот материал при первом чтении можно безболезненно опустить), а также для примеров и задач.

Во 2-м издании сделаны некоторые добавления и исправлены замеченные опечатки.

Книга как учебное пособие рассчитана на студентов физических и инженерно-технических специальностей.

Вопросы, связанные с *квантовыми статистиками* и их применениями (электронный, фотонный и фононный газы) рассматриваются в моей книге «Физика макросистем» — в соответствии с концепцией новой программы по физике Министерства образования РФ.

И. Иродов

## Принятые обозначения

**Векторы** обозначены жирным прямым шрифтом (например,  $\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{B}$ ). Та же буква светлым шрифтом и курсивом ( $v$ ,  $B$ ) означает модуль соответствующего вектора.

**Средние величины** отмечены угловыми скобками  $\langle \rangle$ , например,  $\langle r \rangle$ ,  $\langle K \rangle$ .

**Энергия частицы** обозначена как  $E$  — полная,  $K$  — кинетическая,  $U$  — потенциальная.

### Системы отсчета:

$L$ -система — лабораторная система отсчета (она предполагается инерциальной),

$C$ -система — система центра масс (или центра инерции) — система отсчета, движущаяся *поступательно* относительно инерциальной системы. Все величины в  $C$ -системе отмечены сверху значком  $\sim$  (тильда), например,  $\tilde{p}$ ,  $\tilde{E}$ .

$T$  — знак пропорциональности;

$\sim$  — величина порядка... ( $r \sim 10^{-13}$  см).

**Интегралы** любой кратности обозначены одним-единственным знаком  $\int$  и различаются лишь обозначением элемента интегрирования:  $dV$  — элемент объема,  $dS$  — элемент поверхности.

**Операторы физических величин** обозначены латинскими буквами со «шляпками» ( $\hat{\ } \text{ )$ , например,  $\hat{p}$ ,  $\hat{M}$ .

## Обозначения и названия единиц

А — ампер	Дж — джоуль	Ом — ом
Å — ангстрем	дин — дина	Па — паскаль
атм — атмосфера	К — кельвин	Н — ньютон
б — барн	кг — килограмм	с — секунда
В — вольт	Кл — кулон	ср — стерадиан
Вт — ватт	л — литр	Тл — тесла
Гс — гаусс	м — метр	ч — час
Гц — герц	мин — минута	эВ — электронвольт

## Десятичные приставки к названиям единиц

Э — экса, $10^{18}$	М — мега, $10^6$	н — нано, $10^{-9}$
П — пета, $10^{15}$	к — кило, $10^3$	п — пико, $10^{-12}$
Т — тера, $10^{12}$	м — милли, $10^{-3}$	ф — фемто, $10^{-15}$
Г — гига, $10^9$	мк — микро, $10^{-6}$	а — атто, $10^{-18}$

---

---

## Введение

---

---



По мере развития физики как науки выяснилось, что понятия и принципы, возникшие на основе изучения макроскопических объектов, неприменимы или ограниченно применимы в области атомных масштабов. Здесь потребовались новые представления и законы, которые в конце концов и были найдены. Они составили основу новой так называемой *квантовой* физики.

Более того, теперь мы понимаем, что, строго говоря, существует только единая физика, квантовая по своей сущности. И говоря о классической физике, имеют в виду ту часть единой физики, в которой роль квантовых закономерностей пренебрежимо мала.

Парадоксальное, непредсказуемое поведение микрочастиц, с чем мы познакомимся в этой книге, в принципе не имеет аналога в классической физике. Понять, например, что микрочастица — это *одновременно* корпускула и волна, выходит за рамки наших представлений. Противоречие между корпускулярной и волновой формами материи на уровне мышления выступает как противоречие между дискретным и непрерывным. В физической реальности это противоречие снимается созданием квантовой теории, обобщающей опытные факты.

В этой теории под частицей подразумевается *квантовый объект*, у которого оба эти качества — дуализм волна-частица — находятся в единстве. При этом обнаруживается, что в определенных условиях квантовый объект ведет себя или как обычная частица или как волна. Но это крайние случаи. Говоря же, например, об электроны в атоме, мы под словом «электрон» понимаем квантовый объект. Ничего более детального о поведении микрочастицы квантовая теория не дает. Но это не надо понимать как неполноту, ограниченность квантовой теории. Просто такова сущность природы материи на микроуровне.

Мы увидим, что квантовые законы, обобщающие опытные факты, и соответствующие квантовые модели лишены привычного нам качества — наглядности. В этом главная трудность их понимания. Из-за нее, начиная знакомиться с квантовой теорией, обычно приходится преодолевать ощущение противоречивости ее законов здравому смыслу. Если же при этом не забывать, что квантовая теория опирается на опыт, такое ощущение постепенно сглаживается и адаптация к новым понятиям заметно облегчается.

И последнее. Как ни велики успехи квантовой теории, мы все же должны признать, что у нас нет детальной теории, которая могла бы объяснить *все* явления в нашем мире. Кроме того, необходимо иметь в виду, что законы классической физики остались непоколебимыми, если ограничить их область применения явлениями, для которых классическая физика была создана.

## Квантовые свойства электромагнитного излучения



### § 1.1. Проблема теплового излучения

**Тепловое излучение.** Электромагнитное излучение, испускаемое источником, уносит с собой энергию. В зависимости от природы источника различают и виды излучения. Не будем их перечислять, поскольку нас интересует только одно излучение — *тепловое*, обусловленное нагреванием, т. е. подводом теплоты. Это излучение занимает *особое* место среди всех других видов излучения. В отличие от них тепловое излучение — это единственный вид излучения, которое может находиться в термодинамическом равновесии с телами.

Чтобы составить себе представление о характере теплового излучения, рассмотрим несколько тел, нагретых до различной температуры и помещенных в замкнутую полость, стенки которой полностью отражают падающее на них излучение. Опыт показывает, что такая система в конечном счете приходит в состояние теплового равновесия, при котором температура всех тел становится одинаковой. Так происходит и в том случае, когда между телами в полости будет вакуум, и тела могут обмениваться энергией только путем испускания и поглощения электромагнитных волн. За любой промежуток времени испускаемая телами энергия становится равной поглощаемой энергии, и плотность энергии излучения в пространстве между телами достигает определенной величины, соответствующей установившейся температуре. Такое состояние излучения в полости остается неизменным во времени. Оно находится, как уже было сказано, в термодинамическом равновесии с телами, имеющими определенную температуру, и поэтому его называют *равновесным* или *черным излучением*.

Оказывается, плотность энергии равновесного излучения и его спектральный состав совершенно не зависят от размеров и формы полости и от свойств находящихся в ней тел. Характер равновесного излучения зависит только от температуры. Поэтому можно говорить о температуре самого излучения, считая ее

равной температуре тел, с которыми оно находится в тепловом равновесии. Равновесное излучение однородно, изотропно и неполяризовано.

Для экспериментального изучения спектрального состава равновесного излучения проделывают небольшое отверстие в стенке полости, поддерживаемой при определенной температуре. Выходящее наружу через отверстие излучение обладает таким же спектральным составом, что и внутри полости.

Распределение энергии по длинам волн  $\lambda$  или по частотам  $\omega$  характеризуют *спектральной плотностью* излучения  $u_\lambda$  или  $u_\omega$ , так что величина  $u_\lambda d\lambda$  дает энергию единицы объема излучения с длинами волн в интервале  $(\lambda, \lambda + d\lambda)$ , а  $u_\omega d\omega$  — с частотами в интервале  $(\omega, \omega + d\omega)$ .

В случае равновесного излучения спектральная плотность  $u_\omega$  (или  $u_\lambda$ ) представляет собой универсальную функцию только частоты (или длины волн) и температуры  $T$ . Основная проблема теории теплового излучения и заключалась в нахождении этой функции.

Все попытки решить данную проблему с помощью классических представлений потерпели неудачу. Задача о равновесии излучения с простейшим примером излучающего тела — линейным гармоническим осциллятором приводила к абсурдному результату. Проблема теплового излучения зашла в тупик...

**Открытие постоянной Планка.** Это произошло в 1900 г. Планк получил формулу для спектральной плотности  $u_\omega(T)$  теплового излучения, хорошо согласующуюся с экспериментальными данными. Однако для этого ему пришлось ввести гипотезу, коренным образом противоречащую представлениям классической физики. Планк предположил, что энергия осциллятора может принимать не любые, а только вполне определенные дискретные значения  $\varepsilon_n$ , пропорциональные некоторой элементарной порции — *кванту энергии*  $\varepsilon_0$ . В связи с этим испускание и поглощение электромагнитного излучения осциллятором (веществом) осуществляется не непрерывно, а дискретно в виде отдельных квантов, величина которых пропорциональна частоте излучения:

$$\varepsilon_0 = \hbar \omega, \quad (1.1)$$

где коэффициент  $h$  получил впоследствии название *постоянной Планка*\*. Определенное из опыта значение  $h$  равно

$$h = 1,054 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с} = 0,659 \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \cdot \text{с}.$$

В физике есть величина, имеющая размерность «энергия время». Ее называют *действием*. Постоянная Планка имеет ту же размерность, поэтому ее иногда называют *квантом действия*. Заметим также, что размерность  $h$  совпадает с размерностью момента импульса. Это совпадение, как мы увидим далее, не случайное.

Постоянная Планка была определена экспериментально не только с помощью законов теплового излучения, но и другими, более прямыми и точными методами. Значения  $h$ , полученные на основе разных физических явлений (тепловое излучение, фотоэффект, коротковолновая граница сплошного рентгеновского спектра и др.), хорошо согласуются друг с другом.

Постоянная Планка — это важнейшая универсальная константа, играющая в квантовой физике такую же фундаментальную роль, как скорость света в теории относительности. Открытие постоянной Планка и связанной с ней идеи квантования ознаменовало рождение новой, квантовой теории. Физику, как науку, стали подразделять на **классическую** (нерелятивистскую и релятивистскую) и **квантовую**, неразрывно связанную с фундаментальной константой  $h$ .

Итак, Планк доказал, что формулу для спектральной плотности энергии теплового излучения можно получить только в том случае, если допустить квантование энергии, противоречащее классическим представлениям.

Трудно было примириться с таким отказом от классических представлений, и Планк, совершив великое открытие, еще в течение нескольких лет пытался понять квантование энергии с позиций классической физики. Безуспешность этих попыток привела его к окончательному выводу, что в рамках классической теории природу теплового излучения понять невозможно.

---

\* Собственно говоря, постоянной Планка называют коэффициент пропорциональности между  $\epsilon_0$  и линейной частотой  $\nu$ ,  $\epsilon_0 = h\nu$ . Постоянная  $h$  ( $h$  перечеркнутая) это постоянная Планка  $h$ , деленная на  $2\pi$ . Числовое значение  $h$  равно

$$h = 6,62 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с} = 4,21 \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \cdot \text{с}.$$

## § 1.2. Фотоэффект

**Световые кванты.** Квантовая гипотеза Планка была оценена по достоинству и получила дальнейшее развитие прежде всего в работах Эйнштейна. Он первый указал на то, что кроме теплового излучения существуют и другие явления, которые можно объяснить на основе квантовой гипотезы.

В 1905 г. Эйнштейн выдвинул гипотезу *световых квантов*. Он предположил, что дискретный характер присущ не только процессам испускания и поглощения света, но и самому свету. Гипотеза о корпускулярных свойствах света позволила объяснить результаты экспериментов по фотоэффекту, совершенно непонятные с позиций классической электромагнитной теории. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

Фотоэлектрическим эффектом, или *фотоэффектом* называют испускание электронов веществом под действием света. Исследование закономерностей фотоэффекта проводят на установке, схематически показанной на рис. 1.1. При освещении катода  $K$  монохроматическим светом через кварцевое окошко (пропускающее и ультрафиолетовые лучи) из катода вырываются фотоэлектроны, и в цепи возникает фототок, регистрируемый гальванометром  $G$ . График зависимости фототока  $I$  от приложенного внешнего напряжения  $V$  между катодом и анодом  $A$  представлен на рис. 1.2. Этот график называют *характеристикой фотоэлемента*, т. е. того прибора, в котором наблюдают фотоэффект.

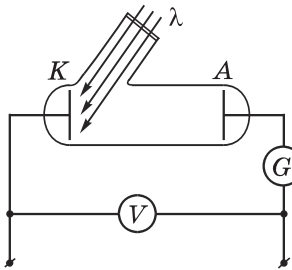


Рис. 1.1

Для этой зависимости характерно наличие участка тока насыщения  $I_{\text{нас}}$ , когда все электроны, вырванные светом с поверхности катода  $K$ , попадают на анод  $A$ , и другого участка, на котором фототок уменьшается до нуля при некотором внешнем задерживающем напряжении  $V_1$  (на рис. 1.2  $V_1 < 0$ ).

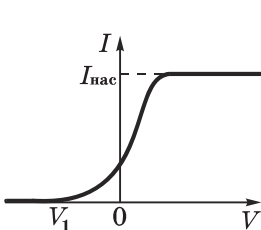


Рис. 1.2

[ . . . ]