

Оглавление

Квантовая оптика.....	- 2 -
1. Тепловое излучение.....	- 2 -
2. Фотоэффект.....	- 6 -
3. Эффект Комптона.....	- 8 -
4. Давление света.....	- 9 -
Хронология основных открытий в области квантовой оптики.....	- 11 -

Квантовая оптика

1. Тепловое излучение

1.1. Энергетическая светимость, испускательная и поглощательная способности

Тепловое излучение возникает за счет внутренней энергии хаотического теплового движения частиц вещества. Тепловое излучение обладает универсальностью и равновесным характером. Универсальный характер теплового излучения обусловлен тем, что тепловое излучение присуще всем телам при любой температуре. При низких температурах излучение лежит в инфракрасной области спектра, а начиная с температуры 500°C, может наблюдаться глазом. Равновесный характер заключается в установлении теплового равновесия между телами в замкнутой системе, температура которых была различна.

Величина лучистой энергии Φ , испускаемой с единицы поверхности S в единицу времени t , всевозможных частот от 0 до ∞ , называется энергетической светимостью или излучательностью

$$R = \frac{\Phi}{St} .$$

Излучательность зависит от свойств излучающего тела и температуры, измеряется в Вт/м².

Испускательной способностью или спектральной плотностью энергетической светимости называют мощность излучения с единицы поверхности тела в интервале частот единичной ширины:

$$r_{\lambda} = \frac{dR_{\lambda, \lambda+d\lambda}}{d\lambda} , \quad r_{\nu} = \frac{dR_{\nu, \nu+d\nu}}{d\nu} .$$

Связь между r_{λ} и r_{ν} определяется соотношением

$$r_{\lambda} = \frac{c}{\lambda} r_{\nu} .$$

Испускательная способность является функцией длины волны (или частоты) и температуры и наиболее полно характеризует тепловое излучение тел.

Энергетическая светимость (излучательность) связана с r_{ν} и r_{λ} соотношениями

$$R = \int_0^{\infty} r_{\nu} d\nu ; \quad R = \int_0^{\infty} r_{\lambda} d\lambda .$$

Взаимодействие тел с падающим на них излучением характеризуется величинами их поглощательной a_{ν} и ρ_{ν} отражательной способностей. Если на поверхность тела падает монохроматический лучистый поток $d\Phi_{\nu}$ в интервале частот от ν до $\nu + d\nu$, то часть этого потока $d\Phi'_{\nu}$ будет поглощена, а часть $d\Phi''_{\nu}$ отражена. Спектральной поглощательной способностью a_{ν} называют отношение поглощенного потока к падающему в интервале частот $d\nu$:

$$a_\nu = \frac{d\Phi'_{\nu,\nu+d\nu}}{d\Phi_{\nu,\nu+d\nu}} .$$

Спектральной отражательной способностью ρ_ν называют отношение отраженного потока к падающему в интервале частот $d\nu$:

$$\rho_\nu = \frac{d\Phi''_{\nu,\nu+d\nu}}{d\Phi_{\nu,\nu+d\nu}} .$$

Поглощательная и отражательная способности тел являются функциями частоты или длины волны и температуры. Для непрозрачных тел имеет место соотношение

$$a_\nu + \rho_\nu = 1 .$$

Тело, поглощательная способность которого для всех длин волн равна единице, называется абсолютно черным телом. Такое тело полностью поглощает всю падающую на него энергию. Моделью абсолютно черного тела может служить трубчатая печь с малым отверстием. Излучение, падающее в это отверстие извне, вследствие многократных отражений внутри печи практически полностью поглощается (рис. 1). Излучение самого абсолютно черного тела, обусловленное температурой его внутренних стенок, будет выходить из отверстия печи. Спектральную испускательную способность абсолютно черного тела обозначают $\ell_{\lambda,T}$ или $\ell_{\nu,T}$.

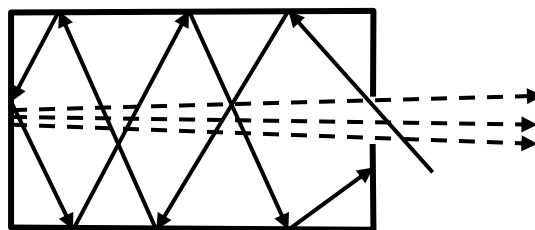


Рис. 1

Тело, для которого отражательная способность для всех длин волн равна единице, называют абсолютно белым телом. Тело, поглощательная способность которого не зависит от длины волны и меньше единицы, называют абсолютно серым телом.

1.2. Закон Кирхгофа

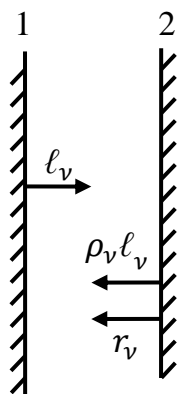


Рис. 2

Кирхгоф, опираясь на второй закон термодинамики и анализируя условия равновесного излучения в изолированной системе тел, установил количественную связь между испускательной и поглощательной способностями тел.

Рассмотрим лучистый теплообмен между двумя бесконечно протяженными стенками (рис. 2). Стенка 1 сделана из абсолютно черного тела, стенка 2 – из произвольного материала. На единичную поверхности стенки 2 в единицу времени падает энергия, равная $\ell_{\nu,T}$. На единицу поверхности стенки 1 в единицу времени падает

энергия, равная r_v , испускаемая стенкой 2, и энергия $\rho_v \ell_v = (1 - a_v) \ell_v$, отраженная от стенки 2. При тепловом равновесии имеем $\ell_v = r_v + (1 - a_v) \ell_v$, откуда $\frac{r_v}{a_v} = \ell_v$.

Кирхгофом установлен следующий закон: отношение испускательной и поглощательной способности любого тела не зависит от его природы; оно является для всех тел универсальной функцией частоты (длины волны) и температуры, т.е. испускательной способности абсолютно черного тела.

$$\frac{r_{v,T}}{a_{v,T}} = \ell_{v,T} .$$

1.3. Законы излучения абсолютно черного тела

Из закона Кирхгофа следует, что испускательная способность абсолютно черного тела является универсальной функцией, поэтому нахождение ее в явной зависимости от частоты и температуры является важной задачей теории теплового излучения.

И. Стефан и Л. Больцман, применяя термодинамический метод, решили эту задачу лишь частично, установив зависимость излучательности от температуры. Согласно закону Стефана-Больцмана

$$R = \sigma T^4 ,$$

т.е. излучательность абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры. σ – постоянная Стефана-Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴). Закон Стефана-Больцмана не дает ответа относительно спектрального состава излучения абсолютно черного тела. Из экспериментальных кривых зависимости $\ell_{\lambda T}$ от длины волны при различных температурах (рис. 3) следует, что распределение энергии в спектре абсолютно черного тела является неравномерным. Все кривые имеют ярко выраженный максимум, который по мере повышения температуры смещается в сторону более коротких волн.

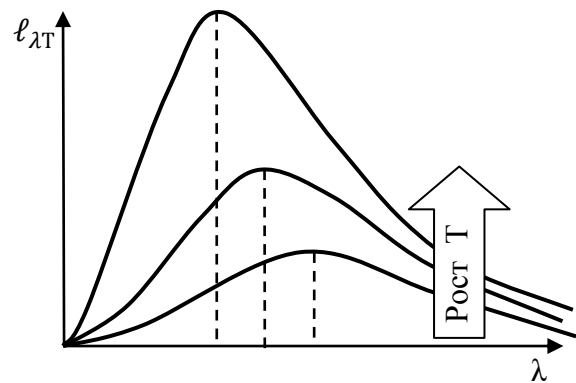


Рис. 3

Площадь, ограниченная кривой зависимости $\ell_{\lambda T}$ от λ и осью абсцисс, пропорциональна излучательной способности абсолютно черного тела и по закону Стефана-Больцмана четвертой степени температуры.

В. Вин, опираясь на законы термо- и электродинамики, установил зависимость длины волны λ_{\max} , соответствующей максимуму функции $\ell_{\lambda T}$, от температуры T . Согласно закону смещения Вина

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T},$$

т.е. длина волны λ_{max} , соответствующая максимальному значению спектральной плотности излучательности $\ell_{\lambda T}$ абсолютно черного тела, обратно пропорциональна его термодинамической температуре; b – постоянная Вина, ее экспериментальное значение равно $2,9 \cdot 10^{-3}$ м·К. Закон Вина показывает смещение положения максимума функции $\ell_{\lambda T}$ по мере возрастания температуры в область коротких длин волн. Согласно этому закону, при охлаждении нагретых тел в их спектре все сильнее преобладает длинноволновое излучение, например переход белого каления в красное при остывании металла.

Попытка теоретического вывода зависимости $\ell_{\lambda T}$ принадлежит Релею и Джинсу, согласно рассуждениям которых испускательная способность абсолютно черного тела по классической электромагнитной теории света определяется формулой

$$\ell_{\lambda T} = \frac{2\pi\nu^3}{c^2} kT, \quad (1)$$

где c – скорость света, k – постоянная Больцмана. Формула выведена в предположении о непрерывном характере излучения и равномерном распределении энергии по степеням свободы колебаний элементарных осцилляторов. Классическая теория согласуется с экспериментом только в области больших длин волн и высоких температур. По формуле (1) испускательная способность должна неограниченно увеличиваться с

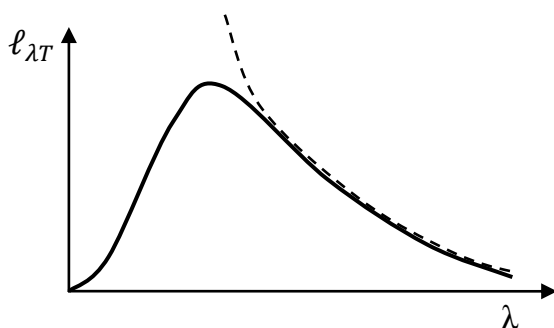


Рис. 4

уменьшением длины волны излучения (рис. 4, пунктирная кривая). Неспособность классической теории объяснить закон излучения абсолютно черного тела в области коротких волн получила в физике название «ультрафиолетовая катастрофа».

М. Планк в 1901 году пришел к выводу о неприемлемости применения законов классической физики к атомным осцилляторам. Согласно

выдвинутой Планком гипотезе, атомные осцилляторы излучают энергию не непрерывно, а определенными порциями – квантами, причем энергия кванта пропорциональна частоте колебаний:

$$\varepsilon_0 = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

где h – постоянная Планка, равная $6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с. По квантовой статистике средняя энергия атомных осцилляторов

$$\langle \varepsilon_\nu \rangle = \frac{h\nu}{e^{kT} - 1}.$$

Используя статистические методы и представления о квантовом характере теплового излучения, Планк вывел для универсальной функции Кирхгофа формулу

$$\rho_{\lambda T} = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1},$$

которая согласуется с экспериментальными данными по распределению энергии в спектре излучения абсолютно черного тела по всем интервалам частот от 0 до ∞ при различных температурах.

При малых частотах ($h\nu \ll kT$) формула Планка переходит в классический вид (закон Релея-Джинса).

2. Фотоэффект

2.1. Виды фотоэффекта

Фотоэлектрическим эффектом (фотоэффектом) называется процесс взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, в результате которого энергия фотонов передается электронам вещества. Для конденсированных систем (твердых и жидких) различают внешний фотоэффект, при котором поглощение фотонов сопровождается вылетом электронов за пределы тела, и внутренний фотоэффект, при котором электроны, оставаясь в теле, изменяют в нем свое энергетическое состояние.

Вблизи поверхности контакта между металлом и полупроводником или двумя полупроводниками p - и n -типа под воздействием света вследствие внутреннего фотоэффекта изменяется контактная разность потенциалов по сравнению с равновесной, т.е. возникает электродвижущая сила (фото-э.д.с.). Этот вид фотоэффекта называется вентильным фотоэффектом. В газах фотоэффект состоит в ионизации атомов или молекул под действием излучения (фотоионизация).

Фотоэффект был открыт в 1887 году Г. Герцем, наблюдавшим усиление процесса разряда при облучении искрового промежутка ультрафиолетовыми лучами.

2.2. Внешний фотоэффект

Электроны, вылетающие из вещества при внешнем фотоэффекте, называются фотоэлектронами, а электрический ток, образуемый ими при упорядоченном движении во внешнем электрическом поле – фототок.

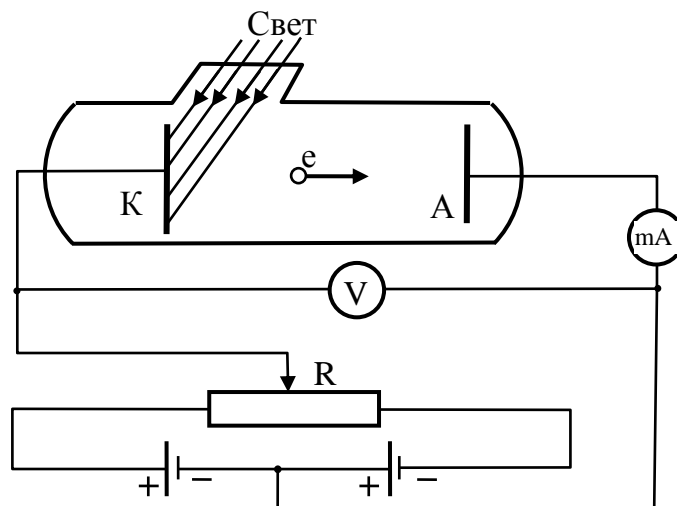


Рис. 5

Первые фундаментальные исследования внешнего фотоэффекта были выполнены русским ученым А.Г. Столетовым. Принципиальная схема для исследования фотоэффекта приведена на рис. 5. Два электрода (К – катод и А – анод) в вакуумной трубке подключены к батарее так, что с помощью потенциометра R можно изменять не только значение, но и знак подаваемого на них напряжения. Ток, возникающий при освещении монохроматическим светом, измеряется миллиамперметром.

А.Г. Столетовым была найдена зависимость между фототоком и напряжением. Такая зависимость изображена на рис. 6. Максимальное количества электронов, выходящих из катода под действием светового потока Φ , определяет величину тока насыщения I_n . С увеличением величины светового потока растет и ток насыщения. Столетов установил, что при неизменном спектральном составе света, падающего на фотокатод, фототок насыщения пропорционален величине светового потока Φ . При напряжении между электродами, равном нулю, величина фототока не равна нулю, а это означает, что выбитые светом электроны обладают некоторой кинетической

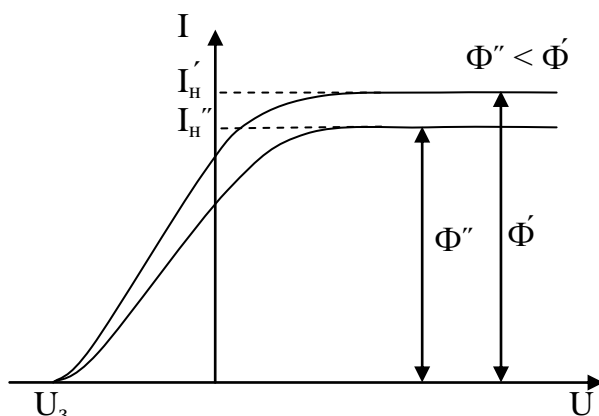


Рис. 6

энергией, что позволяет им в отсутствие электрического поля прийти от катода до анода.

Если поменять напряжение электрического поля на противоположное так, чтобы оно задерживало электроны при движении их к аноду, то при некоторой разности потенциалов U_3 ток прекратится. Для этого случая имеем равенство

$$\frac{mv_m^2}{2} = eU_3 ,$$

где U_3 – максимальная скорость электронов; e, m – заряд и масса электронов.

Опыт показывает, что кинетическая энергия выбиваемых светом электронов не зависит от интенсивности падающего светового потока, а определяется только частотой (или длиной волны). Экспериментальная зависимость eU_3 от частоты изображена на рис. 7.

При частоте, меньше $\nu_{кр}$, фотоэффект не происходит. Длина волны $\lambda_{кр} = c/\nu_{кр}$ называется красной границей фотоэффекта. Согласно классической волновой теории, электроны в веществе под действием падающей световой волны приходят в колебательное движение. Чем больше интенсивность световой волны, тем большую энергию должны приобрести электроны, вырываемые светом из вещества. Экспериментально установлена независимость энергии фотоэлектронов от интенсивности света, что противоречит классической теории.

А. Эйнштейн показал, что явление фотоэффекта и его закономерности могут быть объяснены на предложенной им квантовой теории фотоэффекта. Согласно Эйнштейну, свет частотой ν не только испускается, но и распространяется в пространстве и поглощается веществом отдельными порциями (квантами), энергия которых $\varepsilon_0 = h\nu$. Распространение

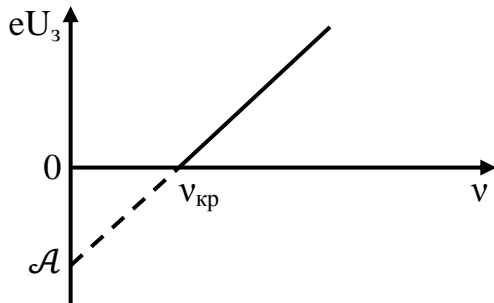


Рис. 7

света нужно рассматривать как поток локализованных в пространстве дискретных световых квантов, движущихся со скоростью света, которые получили название фотонов.

По Эйнштейну каждый фотон поглощается одним электроном, поэтому число вырванных электронов должно быть пропорционально числу поглощенных фотонов, т.е. пропорционально интенсивности света.

Энергия падающего фотона расходуется на совершение электроном работы выхода \mathcal{A} из металла и на сообщение вылетевшему фотоэлектрону кинетической энергии. По закону сохранения энергии

$$h\nu = \mathcal{A} + \frac{mv_{max}^2}{2} . \quad (2)$$

Уравнение (2) носит название уравнения Эйнштейна для внешнего фотоэффекта. Из него непосредственно следуют и линейная зависимость кинетической энергии электронов от частоты падающего света, и наличие граничной частоты фотоэффекта. Если энергия фотона меньше работы выхода ($h\nu_{kp} < \mathcal{A}$), то фотоэффект не наблюдается.

3. Эффект Комптона

Эффектом Комптона называется изменение частоты или длины волны фотонов при их рассеянии электронами и нуклонами. Эффект Комптона отличается от фотоэффекта тем, что фотон передает частицам вещества свою энергию не полностью.

Рассеяние фотона на свободном электроне можно рассматривать как процесс их упругого столкновения. Законы сохранения импульса и энергии при столкновении имеют вид

$$\vec{p}_\phi = \vec{p}_e + \vec{p}'_\phi ,$$

$$\varepsilon_\phi + m_0c^2 = \varepsilon'_\phi + mc^2 ,$$

где \vec{p}_ϕ – импульс налетающего фотона ($p_\phi = \frac{h}{\lambda}$); \vec{p}_e – импульс электрона после взаимодействия ($p_e = mv$; $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}}$ – релятивистская масса; v – скорость, приобретенная электроном); \vec{p}'_ϕ – импульс отраженного фотона

($p'_{\phi} = \frac{h}{\lambda'}$); ε_{ϕ} – энергия налетающего фотона ($\varepsilon_{\phi} = \frac{hc}{\lambda}$); m_0c^2 – энергия покоя электрона; ε'_{ϕ} – энергия рассеянного фотона ($\varepsilon'_{\phi} = \frac{hc}{\lambda'}$); mc^2 – полная энергия электрона после столкновения. С учетом геометрии рассеяния (рис. 8) для изменения длины волны фотона $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ имеем

$$\Delta\lambda = \frac{2h}{m_0c} \sin^2 \frac{\theta}{2} ,$$

где θ – угол между направлениями первичного и рассеянного фотона. Величина $\lambda_e = \frac{h}{m_0c} = 2,426 \cdot 10^{-10}$ см называется комptonовской длиной волны для электрона.

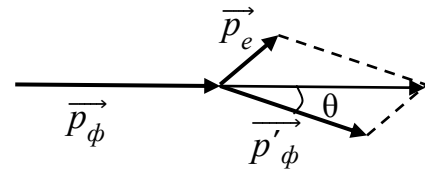


Рис. 8

Эффект Комптона, наблюдаемый на нуклонах, реально «просматривается» только при рассеянии фотонов очень высоких энергий. Это связано со значительно большей массой покоя этих частиц по сравнению с массой покоя электрона.

4. Давление света

Согласно теории Максвелла, электромагнитные волны должны оказывать на тела давление. Оценка солнечного излучения на поверхность Земли показывает, что для абсолютно поглощающей поверхности она составляет примерно 5 мкПа. Экспериментальное доказательство существования светового давления на твердые тела и газы дано в опытах П.Н. Лебедева.

Лебедев использовал легкий подвес на тонкой нити, по краям которого были приклеены легкие крылышки, одни из которых зачернены сажей, а поверхности других зеркальные. Значение светового давления на крылышки определялось по углу закручивания нити подвеса, и оно совпало с теоретически рассчитанным.

Чтобы определить величину светового давления исходя из квантовых представлений, необходимо знать массу и импульс фотона. Масса фотона находится из закона взаимосвязи массы и энергии:

$$m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2} .$$

Фотон – элементарная частица, которая всегда движется со скоростью света и имеет массу покоя, равную нулю. Импульс фотона равен

$$p_{\phi} = \frac{h\nu}{c} .$$

Рассчитаем с точки зрения квантовой теории световое давление, оказываемое на поверхность тела потоком монохроматического излучения частотой ν , падающего перпендикулярно поверхности. Обозначим через N число фотонов, падающих на единичную поверхность в единицу времени, тогда

при коэффициенте отражения ρ от поверхности тела отразится ρN фотонов. Каждый поглощенный фотон передает поверхности импульс $h\nu/c$, а каждый отраженный – $2h\nu/c$. С учетом этого давление света

$$p = \frac{2h\nu}{c} \rho N + \frac{h\nu}{c} (1 - \rho)N = (1 + \rho) \frac{h\nu}{c} N .$$

Энергия всех фотонов, падающих на единичную поверхность в единицу времени, составляет $E_e = Nh\nu$. Тогда давление света

$$p = \frac{E_e}{c} (1 + \rho) = w(1 + \rho) , \quad (3)$$

где w – объемная плотность энергии.

Формула (3), выведенная из квантовых представлений, совпадает с выражением, полученным из электромагнитной теории.

Хронология основных открытий в области квантовой оптики

- 1887 г. – Открытие Г. Герцем (H. Hertz) внешнего фотоэффекта
- 1893 г. – В. Вин (W. Wien) установил, что максимум излучения в спектре абсолютно черного тела с увеличением температуры смещается в сторону коротких волн (закон Вина)
- 1900 г. – Дж. Рэлей (J. Rayleigh) вывел закон распределения энергии в спектре излучения абсолютно черного тела, развитый затем Дж. Джинсом (J. Jeans) (формула Рэля – Джинса). В области коротких волн закон принципиально расходился с экспериментальными результатами («ультрафиолетовая катастрофа»)
- 1900 г. – М. Планк (M. Planck) ввел понятие кванта энергии и получил формулу, описывающую распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела, соответствующую экспериментальным результатам
- 1905 г. – А. Эйнштейн (A. Einstein) объяснил законы внешнего фотоэффекта на основании квантовой гипотезы М. Планка (Нобелевская премия 1921 г.)