

ФИЗИКА

ЛЕКЦИЯ

6

МИАС ИГЭС -специалисты

Новоселова О.В.

Тепловое излучение



Корпускулярно-волновой дуализм ЭМИ

Волновые свойства: частота ν , длина волны λ .

- ~ Интерференция
- ~ Дифракция
- ~ Поляризация

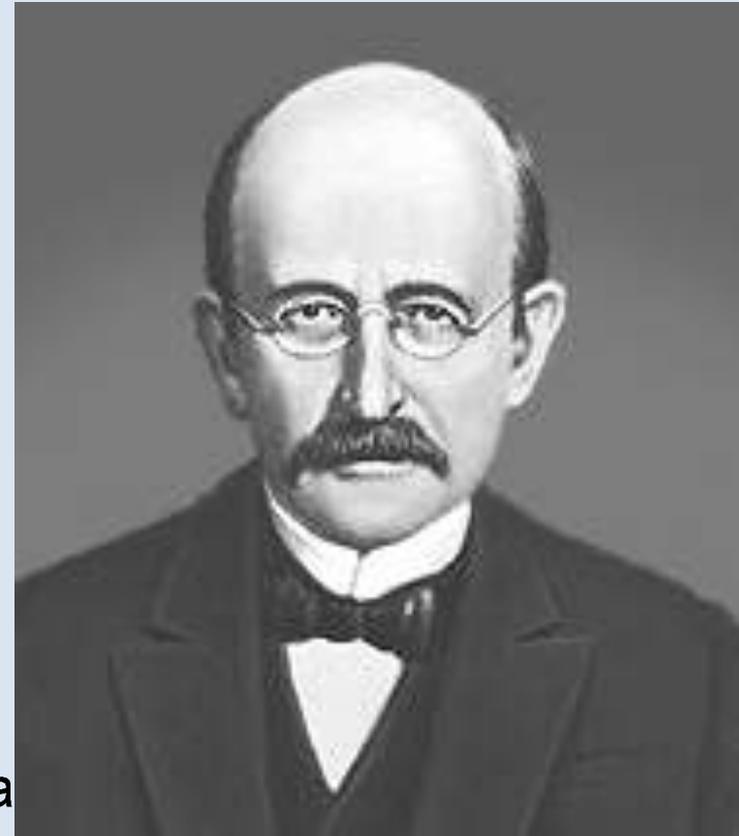
Корпускулярные свойства: энергия E , импульс p .

- Дискретные спектры излучения атомов
- Тепловое излучение
- Фотоэффект
- Эффект Комптона
- Коротковолновая граница рентгеновского излучения

Квантовая гипотеза Планка

$$\varepsilon = h \nu = \frac{hc}{\lambda}; \quad p = \frac{\varepsilon}{c} = \frac{h \nu}{c} = \frac{h}{\lambda},$$

$h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж · с — постоянная Планка



Взаимодействие света с **веществом**

Распространяясь в веществе электромагнитное поле световой волны вызывает вынужденные колебания связанных зарядов (электронов, ионов). Колеблющиеся с частотой вынуждающей силы заряды являются источником вторичных волн. Если среда однородна и изотропна, то в результате наложения первичной и вторичной волн образуется проходящая волна, фазовая скорость которой зависит от частоты. Если в среде имеются неоднородности, то дополнительно происходит рассеяние света. На границе раздела двух сред в результате интерференции первичной и вторичной волн образуется отраженная и преломленная волна.

Прохождение света через вещество также сопровождается поглощением света, т.е. потерей энергии волны.

КВАНТОВАЯ ОПТИКА

- *Квантовая оптика* называется раздел учения о свете, в котором изучается дискретный характер излучения, распространения и взаимодействия света с веществом. В квантовой оптике свет рассматривается как поток особых частиц – *фотонов*, не обладающих массой покоя и движущихся со скоростью c , равной скорости света в вакууме. Фотоны возникают (излучаются) при переходах атомов, молекул, ионов и атомных ядер из возбужденных энергетических состояний в состояния с меньшей энергией. Квантовые и волновые свойства света взаимно дополняют друг друга и отражают взаимосвязанные закономерности распространения света и его взаимодействия с веществом.
-

Квантовой оптикой принято считать раздел [оптики](#), изучающий проявление квантовых характеристик свойства света. К ним относятся: [тепловое излучение](#), фотоэффект, эффект [Комптона](#), фотохимические процессы, вынужденное излучение (и, соответственно, физика лазеров)

Главный вопрос, рассматриваемый квантовой оптикой — описание взаимодействия **света** с веществом с учётом квантовой природы объектов, а также описания распространения света в специфических условиях.

В 1900 г. Макс Планк, выдвинул идею **квантовой природы света**. Согласно данной концепции излучение света происходит порциями – квантами. Позже Эйнштейн обнаружил, что свет сформирован квантами [электромагнитного излучения](#). Кванты света стали обозначать **фотонами**, и вскоре это стало общепринятой аксиомой: «Свет состоит из фотонов». Квантовая гипотеза Планка привела к представлению о том, что свет излучается и поглощается отдельными порциями – квантами

Виды излучений

Излучение - процесс испускания и распространения энергии в виде волн и частиц. Излучение телами **электромагнитных волн** (свечение тел) может осуществляться за счет различных видов энергии.

Самым распространенным является **тепловое излучение**, т. е. испускание электромагнитных волн за счет внутренней энергии тел.

Все остальные виды свечения, возбуждаемые за счет любого вида энергии, кроме внутренней (тепловой), объединяются под общим названием «люминесценция». **Люминесценция** - излучение (свечение) тел, возникающее при различных внешних воздействиях:

Хемилюминесценция

Фотолюминесценция

Электролюминесценция

Катодолюминесценция

Биолюминесценция

Хемилюминесценция – процессы излучения, сопровождающие химические превращения внутри тела (свечение гниющего дерева, свечение фосфора, медленно окисляющегося на воздухе)



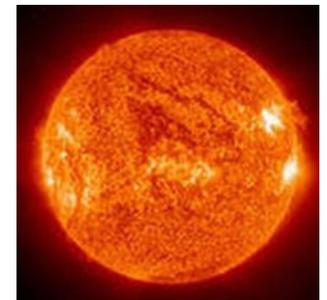
Фотолюминесценция – процессы излучения, вызванные освещением тела видимым светом или ультрафиолетовым излучением (лампы дневного света). Особый тип фотолюминесценции – **фосфоресценция**. В отличие от флуоресцентного, фосфоресцентное вещество излучает поглощённую энергию не сразу



Электролюминесценция — возбуждение свечения электрическим воздействием на излучающую систему (свечение газов или паров под действием проходящего через них электрического разряда: тлеющего, искрового, дугового) (полярное сияние, свечение рекламных трубок)



Тепловое излучение — ^{излучение} В нагретых телах часть внутренней энергии вещества может превращаться в энергию излучения. Поэтому нагретые тела являются источниками электромагнитного излучения в широком диапазоне частот. Это излучение называют **тепловым излучением**



Тепловое излучение имеет *непрерывный спектр*.

Распределение энергии излучения тела по спектру зависит от температуры тела.

Для всех тел с увеличением температуры максимум энергии излучения смещается в коротковолновый участок спектра, а общая энергия излучения возрастает.

Излучение батареи центрального отопления ($T \approx 350 \text{ К}$) имеет пик энергии в диапазоне невидимого инфракрасного излучения.

Поверхность Солнца ($T \approx 6\,000 \text{ К}$) излучает энергию в диапазоне видимого света.

При ядерном взрыве ($T \approx 1\,000\,000 \text{ К}$) большая доля энергии взрыва уносится коротковолновым рентгеновским и гамма-излучением.

Инфракрасное излучение (тепловое)

Инфракрасное излучение — электромагнитное излучение, занимающее спектральную область между красным концом видимого света и микроволновым излучением. Инфракрасное излучение также называют «тепловым» излучением, так как инфракрасное излучение от нагретых предметов воспринимается кожей человека как ощущение тепла.



Равновесное тепловое

излучение

Тепловым излучением называется электромагнитное излучение, испускаемое телами за счет их внутренней энергии.

В этом случае энергия внутренних хаотических тепловых движений частиц непрерывно переходит в энергию испускаемого электромагнитного излучения.

В обычных условиях, при комнатной температуре ($T=300K$), тепловое излучение тел происходит в инфракрасном диапазоне длин волн ($\lambda 10$ мкм), недоступным зрительному восприятию глаза. С увеличением температуры светимость тел быстро возрастает, а длины волн смещаются в более коротко- волновую область. Если температура достигает тысяч градусов, то тела начинают излучать в видимом диапазоне длин волн ($\lambda = 0.4 \div 0.8$ мкм).

Нагретое тело за счет теплового излучения отдает внутреннюю энергию и охлаждается до температуры окружающих тел. В свою очередь, поглощая излучение, могут нагреваться холодные тела.

Равновесным тепловым излучением называют излучение, при котором расход энергии тела на излучение компенсируется энергией поглощенного им излучения для каждой длины волны. Из всех видов

Тепловое излучение:

- **свечение любого нагретого твердого тела за счет энергии теплового движения его частиц.**
- имеет место при любой температуре;
- интенсивность излучения пропорциональна температуре.
- **единственное из всех видов излучений, которое может находиться в равновесии с излучающим телом.**
- лежит в **оптическом диапазоне длин волн** и подразделяется на:

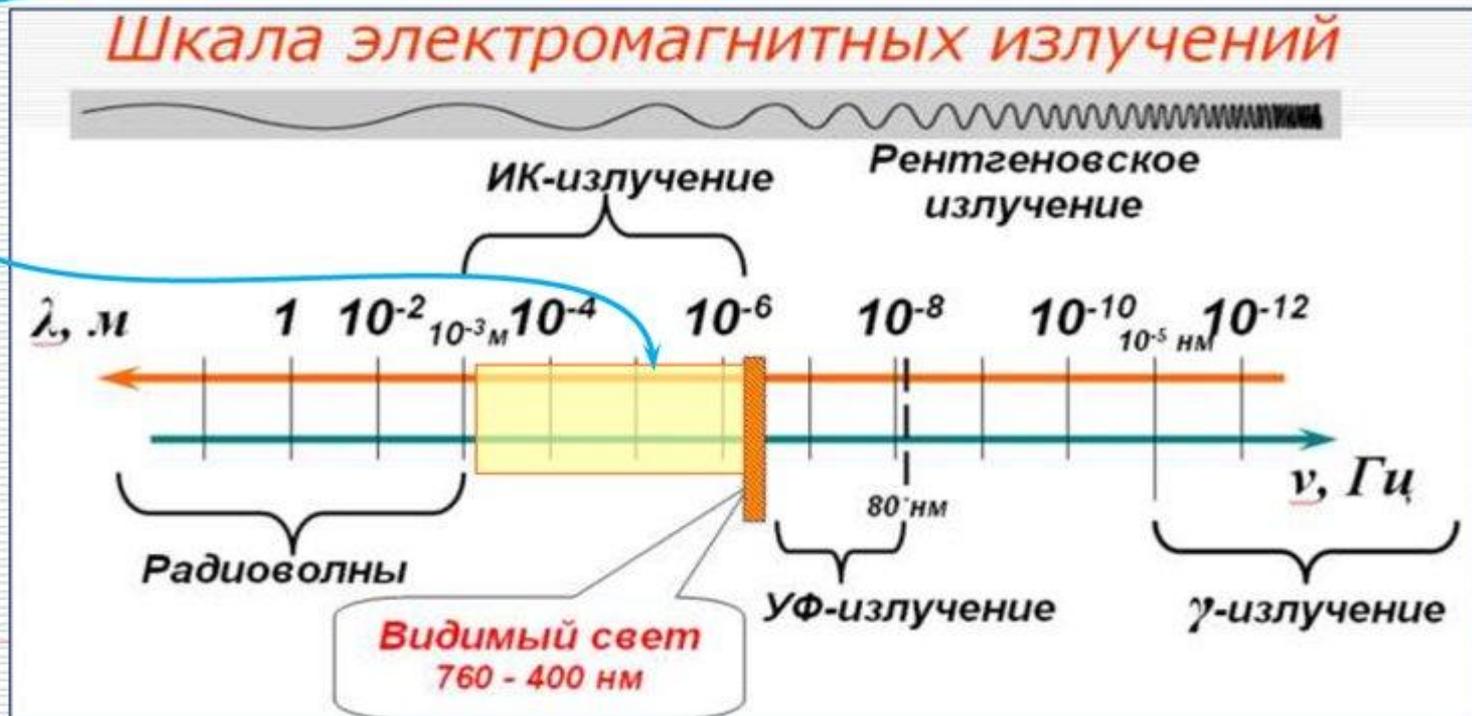
инфракрасное ($10^{-2} - 7,6 \cdot 10^{-7}$) м;

видимое ($7,6 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}$) м;

ультрафиолетовое ($4 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-9}$) м.

1. Определение теплового излучения тел

- **Тепловое излучение** – это **электромагнитное излучение**, возникающее за счет внутренней энергии излучающего тела и зависящее только от температуры и оптических свойств этого тела.
- **Тепловое излучение** – это передача энергии от одних тел к другим в виде электромагнитных волн за счет их тепловой энергии.
- **Любое тело при температуре выше абсолютного нуля** (выше 0 K или -273°C) является источником **теплового излучения**.
- Диапазон длин электромагнитных волн (спектральный диапазон), излучаемых нагретым телом, очень широк (**теоретически от нуля до бесконечности**)
- Но только в инфракрасном диапазоне ($10^{-3}\text{ м} > \lambda > 760\text{ нм}$) тепловое излучение **замечается**.



Характеристики теплового излучения

В объёме полости будет находиться **равновесное тепловое излучение**, имеющее **сплошной спектр**.

1. Дифференциальный поток излучения - энергия электромагнитного излучения в единичном интервале длин волн, включая данную длину волны, излучаемая телом за единицу времени.

$$d\Phi_{\lambda} = \frac{dW}{dt \cdot d\lambda}$$

2. Поток излучения Φ_{ε} - энергия всех электромагнитных волн, излученных телом за единицу времени.

$$\Phi_{\varepsilon} = \frac{dW}{dt}$$

Световой поток измеряется в **люменах**: $[\Phi] = 1 \text{ лм}$.

3. Энергетическая светимость тела R_T , - численно равна энергии W , излучаемой телом во всем диапазоне длин волн ($0 < \lambda < \infty$) с единицы поверхности тела, в единицу времени, при температуре тела T по всем направлениям, т.е

$$R_T = \frac{W}{St}, \quad \frac{Дж}{м^2 с} = \frac{Вт}{м^2},$$

4. Испускательная способность тела $r_{\lambda, T}$ - численно равна энергии тела dW_{λ} , излучаемой телом с единицы поверхности тела, за единицу времени при температуре тела T , в диапазоне длин волн $r_{\lambda, T} = \frac{dW_{\lambda}}{Std\lambda}, \quad \frac{Вт}{м^3} d\lambda$, т.е.

Эту величину называют также спектральной плотностью энергетической светимости тела. Энергетическая светимость связана с испускательной способностью по формуле $R_T = \int_0^{\infty} r_{\lambda, T} d\lambda$.

5. Поглощательная способность тела $\alpha_{\lambda, T}$ - число, показывающее, какая доля энергии излучения, падающего на поверхность тела, поглощается им в диапазоне длин волн от λ до $\lambda+d\lambda$,

$$\alpha_{\lambda, T} = \frac{dW_{\lambda \text{ погл}}}{dW_{\lambda \text{ пад}}}$$

Тело, для которого $\alpha_{\lambda, T} = 1$ во всем диапазоне длин волн, называется абсолютно черным телом (АЧТ).

Тело, для которого $\alpha_{\lambda, T} = const < 1$ во всем диапазоне длин волн -

Тепловое излучение является равновесным. Это означает, что изолированное тело испускает такое же количество энергии, которое оно поглощает

Характеристики теплового излучения

☀ Температура (T) – величина, характеризующая тепловое состояние тела

Тела с различной температурой, которые могут передавать друг другу тепло, через некоторое время принимают одинаковую температуру, то есть приходят в состояние теплового равновесия.

☀ Испускательная способность тела (r_λ) – поток энергии, испускаемой единицей поверхности тела в интервале длин волн от λ до $\lambda + \Delta\lambda$

$$r_\lambda = \frac{d\Phi}{d\lambda}$$

☀ Интегральная испускательная способность тела (R) или энергетическая светимость тела

$$R = \int_0^\infty r_\lambda d\lambda$$

☀ Поглощательная способность тела (a_λ) – отношение потока поглощенной энергии в интервале длин волн от λ до $\lambda + \Delta\lambda$ к падающему потоку в том же интервале

$$a_\lambda = \frac{d\Phi'_\lambda}{d\Phi_\lambda}$$

Характеристики теплового излучения



$$r_\lambda = \frac{dR_\lambda}{d\lambda} \left(\frac{Вт}{м^3} \right) \quad \text{спектральная плотность энергетической светимости}$$

$$R = \int_0^{\infty} r_\lambda d\lambda \quad \text{энергетическая светимость тела}$$

$$\alpha_\lambda = \frac{\Phi_{\text{погл}}(\lambda)}{\Phi_{\text{над}}(\lambda)} \quad \text{коэффициент поглощения}$$

1.2. Характеристики теплового излучения

Поток энергии, испускаемый единицей поверхности излучающего тела в единицу времени во всех направлениях называется энергетической светимостью тела R

(излучательность) $[R] = \text{Вт/м}^2$.

Поток энергии, испускаемой единицей поверхности тела в интервале частот от ν до $\nu + d\nu$, обозначим через dR_ν . Тогда

$$dR_{\omega,T} = r_{\omega,T} d\omega$$

$r_{\omega,T}$ - **спектральная плотность** энергетической светимости или **лучеиспускательная способность тела.**

Таким образом, $r_{\omega,T}$ - есть функция ω и T соответственно и $R_{\omega,T} = f(\omega, T)$; $[r_{\omega,T}] = \text{Вт/м}^2 \cdot \text{Гц}^{-1}$

Закон Кирхгофа

$$\frac{r_{\lambda T}}{a_{\lambda T}} = r_{\lambda T}^*$$

Отношение спектральной плотности излучения тела к его поглотительной способности не зависит от природы тела и равно спектральной плотности излучения абсолютно черного тела при тех же значениях λ и T .

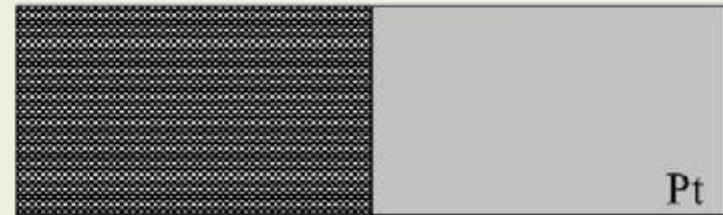
Т.о. равновесное излучение любого тела, зная его $a_{\lambda T}$, можно свести к излучению абсолютно черного тела при той же температуре:

$$r_{\lambda T} = a_{\lambda T} \cdot r_{\lambda T}^*$$

Основная модель равновесного теплового излучения – модель абсолютно черного тела.

Согласно закону Кирхгофа зачерненная часть платиновой пластинки при нагревании светится ярче, чем незачерненная.

Тело, которое при данной температуре лучше поглощает волны какой-либо длины, должно их и лучше испускать.



Низкая температура

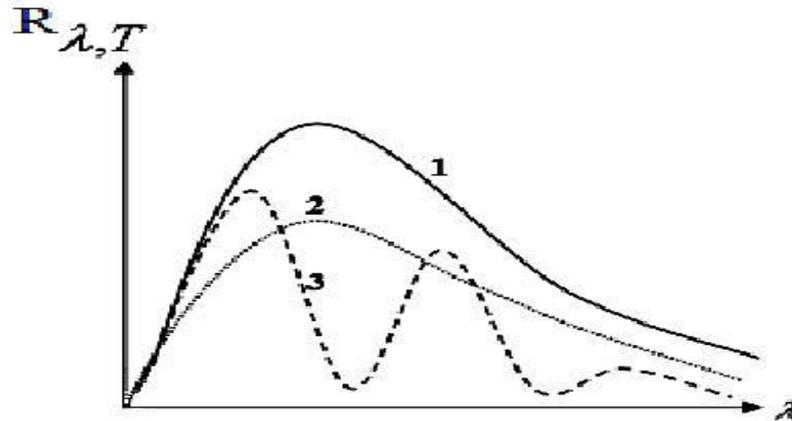


Высокая температура

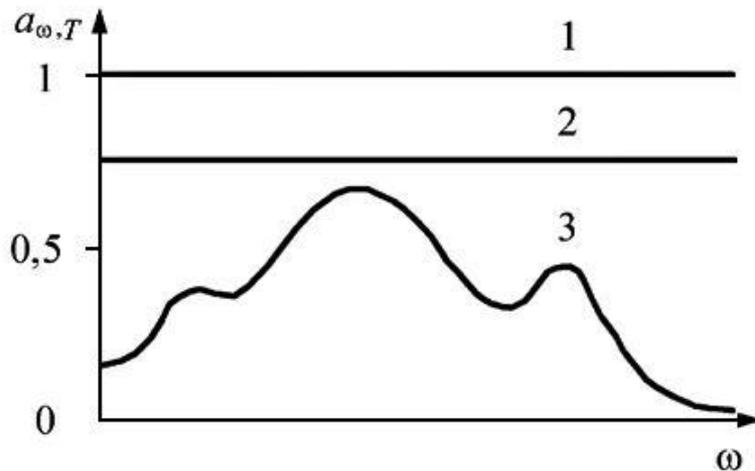
Следствия из закона Кирхгофа:

1. Спектральная энергетическая светимость АЧТ является универсальной функцией длины волны и температуры тела.
 2. Спектральная энергетическая светимость любого тела в любой области спектра всегда меньше спектральной энергетической светимости ачт.
 3. Спектральная энергетическая светимость произвольного тела равна произведению его коэффициента поглощения на спектральную энергетическую светимость абсолютно черного тела.
 4. Любое тело при данной температуре излучает волны той же длины волны, которое оно излучает при данной температуре.
 5. Если тело не поглощает электромагнитные волны какой-либо частоты, то оно его и не излучает.
- Тело, которое сильнее поглощает какие-либо лучи, будет сильнее эти лучи и испускать.

Тепловое излучение является равновесным – сколько энергии излучается телом, столько ее им и поглощается.

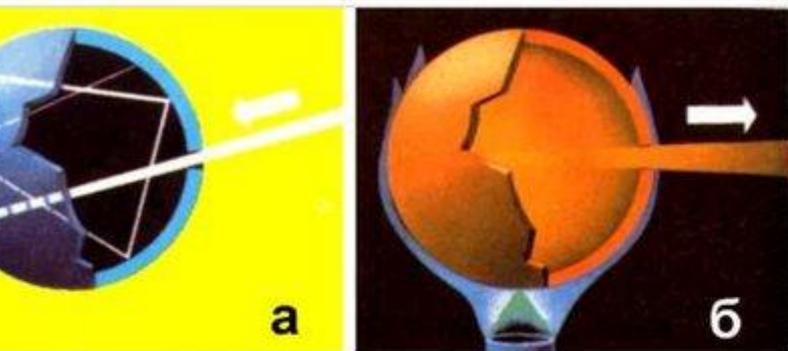


Кривые распределения энергии в спектрах теплового излучения различных тел (1 – абсолютно черное тело, 2 – серое тело, 3 – произвольное тело)



- 1 - абсолютно черное тело;
- 2 - серое тело;
- 3 - реальное тел

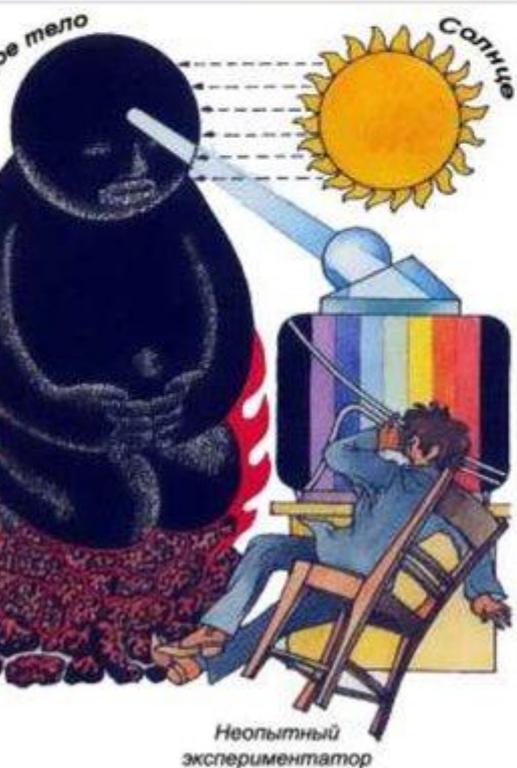
8. ИЗЛУЧЕНИЕ АБСОЛЮТНО ЧЕРНОГО ТЕЛА



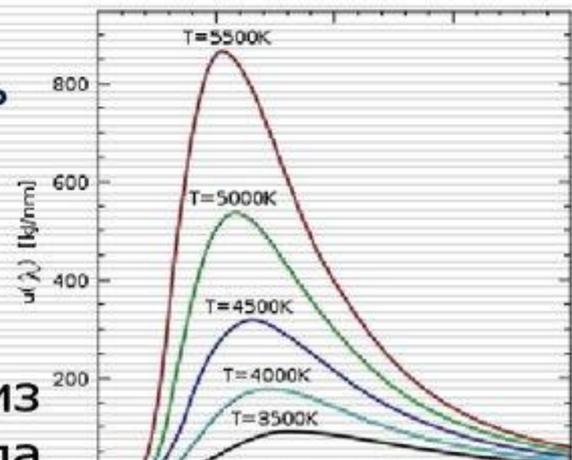
Абсолютно черных тел в природе не существует – это модель.

Однако можно создать устройство сколь угодно близкое к нему по своим свойствам.

Такое устройство представляет собой почти замкнутую полость с малым отверстием. Излучение, проникшее внутрь полости через отверстие, многократно отражается от стенок полости и почти полностью поглощается ими.



Согласно закону Кирхгофа излучательная способность такого устройства близка к универсальной функции Кирхгофа при температуре стенок полости.



и поддерживать температуру стенок полости, то из отверстия выходит излучение абсолютно черного тела

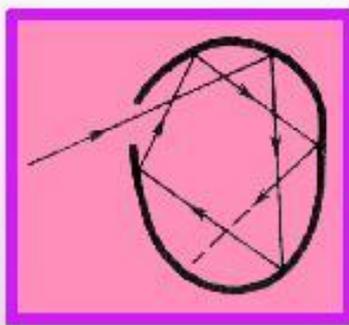
Спектр излучения черного тела



Черное тело – это тело, которое **полностью поглощает** весь падающий на него поток излучения.

Коэффициент поглощения $\alpha_\lambda = 1$ и **не зависит** от длины волны излучения.

Модель черного тела – это непрозрачный сосуд с небольшим отверстием, **стенки** которого имеют одинаковую температуру.



Через некоторое время стенки сосуда поглощают луч полностью.

ПРИМЕР: сажа, платиновая чернь



ВОПРОС:

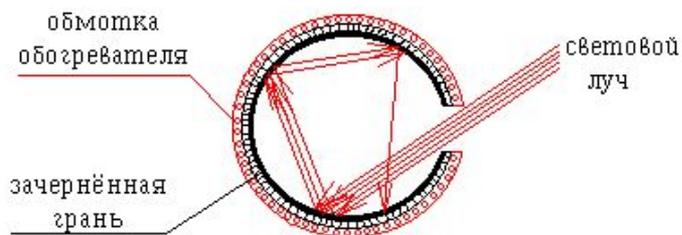
Почему **зрачок** нашего глаза кажется черным ?



Абсолютно чёрное тело (АЧТ), его характеристика.

Если тело полностью поглощает падающий на него световой поток, его называют абсолютно чёрным телом (АЧТ). Его коэффициент поглощения “ α ” для всех длин волн и при любых температурах равен “1”.

АЧТ в природе нет, но можно указать тело, которое по своим свойствам не будет отличаться от АЧТ. Такой моделью является непрозрачная замкнутая полость с очень малым отверстием, стенки которой зачернены, имеют одинаковую температуру и хорошо поглощают излучение.



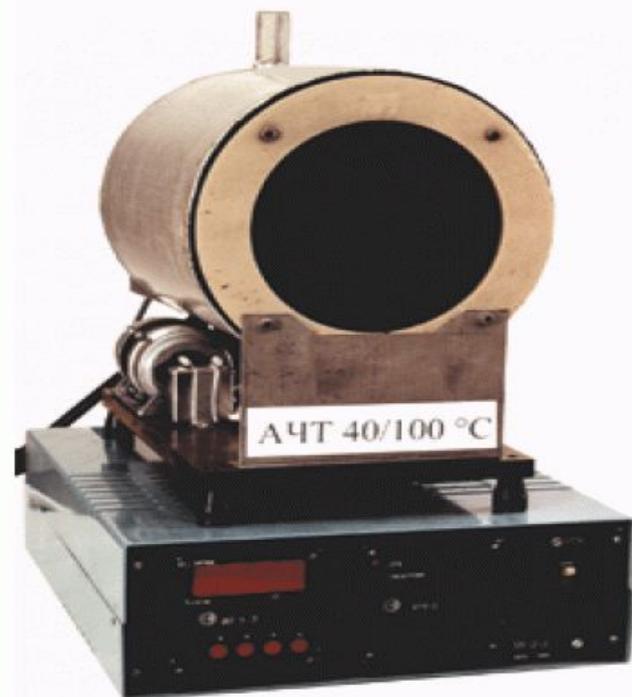
Луч, попавший внутрь такой полости, может выйти из неё, многократно отражаясь от стенок. При каждом отражении часть энергии луча поглощается и луч практически не выходит наружу. Основной особенностью

АЧТ

является независимость его свойств от природы вещества и определяющихся только температурой его стенок, т.е. АЧТ находится в термодинамическом равновесии с веществом.

Такая модель АЧТ может быть нагрета до высоких температур; тогда из отверстий полости выходит естественное излучение и отверстие будет ярко светиться (при этом оно остаётся абсолютно поглощающим). Излучение АЧТ называется “чёрным излучением”, а само тело – “полным излучателем”. Интенсивность излучения АЧТ выше, чем у “нечёрных” тел. Близким к единице коэффициентом поглощения обладает сажа (= 0,952), чёрный бархат (= 0,966).

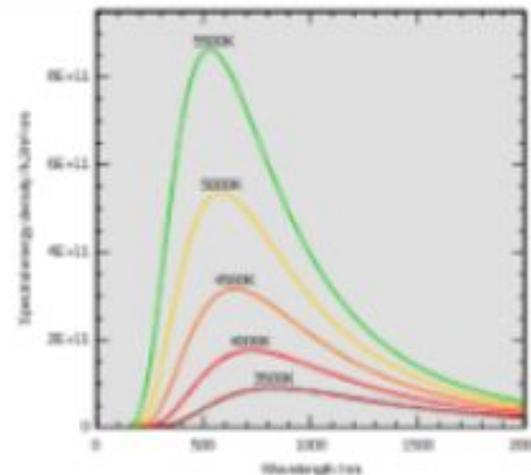
Основной особенностью АТЧ является независимость его свойств от природы вещества и определяющихся только температурой его стенок, т.е. АЧТ находится в термодинамическом равновесии с веществом.



Если коэффициент поглощения “ α ” у тела меньше “1” и не зависит от длины волны, то такое вещество называют **“серым”**.

В обычных условиях, при комнатной температуре ($T=300\text{ K}$), тепловое излучение тел происходит в инфракрасном диапазоне длин волн ($\lambda 10\text{ мкм}$), недоступным зрительному восприятию глаза. С увеличением температуры светимость тел быстро возрастает, а длины волн смещаются в более коротковолновую область. Если температура достигает тысяч градусов, то тела начинают излучать в видимом диапазоне длин волн ($\lambda=0.4\div 0.8\text{ мкм}$).

Среди тел Солнечной системы свойствами **абсолютно чёрного тела** в наибольшей степени обладает **Солнце**. Максимум энергии излучения **Солнца** приходится примерно на длину волны 450 нм, что соответствует температуре наружных слоёв **Солнца** около 6000 К (если рассматривать **Солнце** как **абсолютно чёрное тело**).



Нагретое тело за счет теплового излучения отдает внутреннюю энергию и охлаждается до температуры окружающих тел. В свою очередь, поглощая излучение, могут нагреваться холодные тела. Такие процессы, которые могут происходить и в вакууме, называют радиационным теплообменом.

Если излучающее тело окружить оболочкой с идеально отражающей поверхностью, то через некоторое время эта система придет в состояние теплового равновесия.

Равновесным тепловым излучением называют излучение, при котором расход энергии тела на излучение компенсируется энергией поглощенного им излучения для каждой длины волны

Из всех видов излучения только тепловое излучение может находиться в равновесии с излучающими телами.

Следует отметить, что равновесное тепловое излучение не зависит от природы тел, а зависит только от его температуры

Законы излучения абсолютно чёрного тела

Изначально к решению проблемы были применены чисто классические методы, которые дали ряд важных и верных результатов, однако полностью решить проблему не позволили, приведя в конечном итоге не только к резкому расхождению с экспериментом, но и к внутреннему противоречию — так называемой ультрафиолетовой катастрофе.

Изучение законов излучения абсолютно чёрного тела явилось одной из предпосылок появления квантовой механики.

- 1. Закон Стефана-Больцмана**
- 2. Закон 1 и 2 Вина**
- 3. Формула Планка**

1. Закон Стефана – Больцмана:

$$R^* = \sigma \cdot T^4$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$$

2. Первый закон (смещения) Вина:

$$\lambda_m = \frac{b}{T}$$

$$b = 2,90 \cdot 10^{-3} м \cdot К$$

3. Второй закон Вина:

$$\epsilon_{\lambda, T}^m = C \cdot T^5$$

$$C = 1,30 \cdot 10^{-5} \frac{Вт}{м^3 \cdot К^5}$$

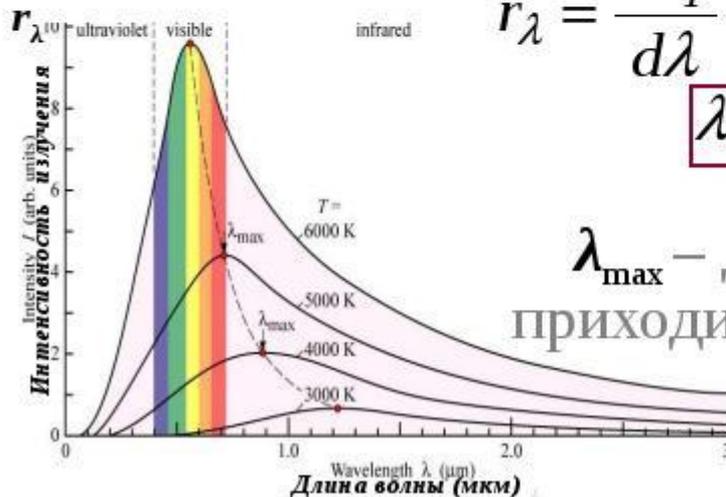
КВАНТОВАЯ ОПТИКА

1. Тепловое излучение

Все тела, имеющие отличную от нуля абсолютную температуру – источники теплового излучения.

$$R_T = \frac{dW}{dSdt} \text{ – энергетическая светимость} \quad \boxed{R = \sigma T^4} \text{ – закон Стефана-Больцмана}$$

На графике $r_\lambda(\lambda)$ R_T – площадь под кривой **при $\uparrow T$ площадь \uparrow**



$$r_\lambda = \frac{dR_T}{d\lambda} \text{ – спектральная плотность энергетической светимости}$$

$$\boxed{\lambda_{\text{max}} = b/T} \text{ – закон Вина}$$

λ_{max} – длина волны, на которую приходится максимум функции $r_\lambda(\lambda)$

при $\uparrow T$, $\lambda_{\text{max}} \downarrow$

Закон Стефана-Больцмана



J. Stefan

СТЕФАН Йозеф (1835 -1893)
австрийский физик,
основатель австрийской
физической школы.



Больцман Людвиг (1844–1906)
австрийский физик-теоретик

Стефан (1879), анализируя экспериментальные данные, пришел к выводу, что энергетическая светимость любого тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры.

Больцман (1884), исходя из термодинамических соображений, получил для энергетической светимости абсолютно черного тела **Энергетическая светимость АЧТ пропорциональна четвертой степени термодинамической температуры**

§§ Закон Стефана-Больцмана

Стефан, 1879, опытные данные

$$R = \text{const} \cdot T^4 \text{ – для любого тела}$$

Больцман, 1884, теоретический расчет

$$R = \int_0^{\infty} r_{\omega}(\omega, T) d\omega = \sigma T^4$$

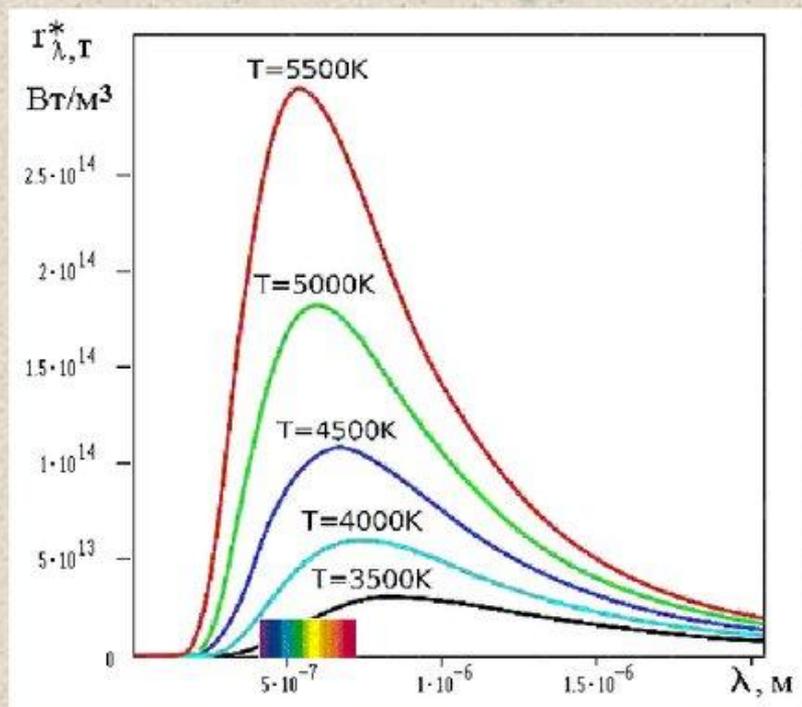
– только для
АЧТ

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4} \text{ – постоянная Стефана-Больцмана}$$

Закон Стефана - Больцмана

- Зависимость излучательности от температуры $R_{\epsilon} = \sigma T^4$
- Излучательность абсолютно чёрного тела пропорциональна четвёртой степени его температуры $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}^4}$
- Распределение энергии в спектре абсолютно чёрного тела неравномерно

Законы теплового излучения абсолютно черного тела



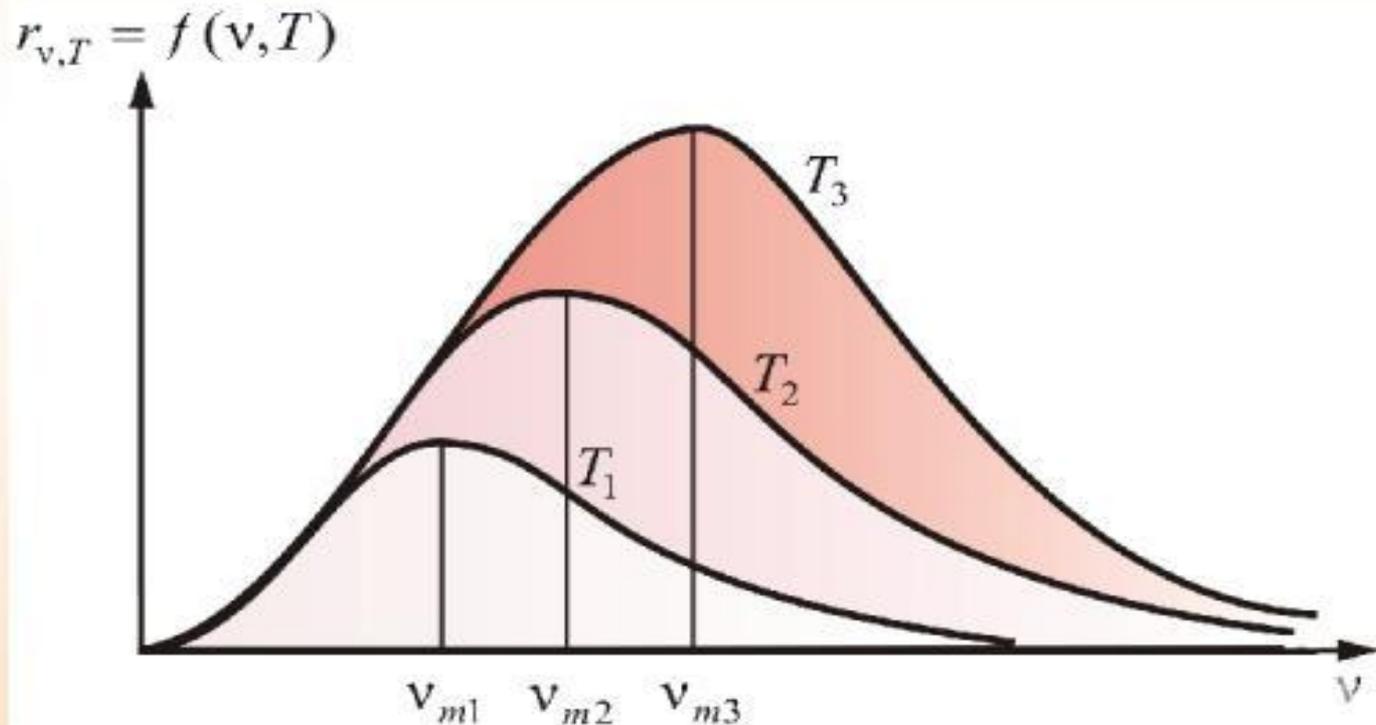
**Экспериментальные спектры излучения абсолютно черного тела
для различных температур**

1. Распределение энергии по спектру неоднородное и оно зависит от температуры.
2. Площадь под кривой (т.е. энергетическая светимость) существенно зависит от температуры.
3. Максимум излучения с повышением температуры смещается в сторону коротких длин волн.

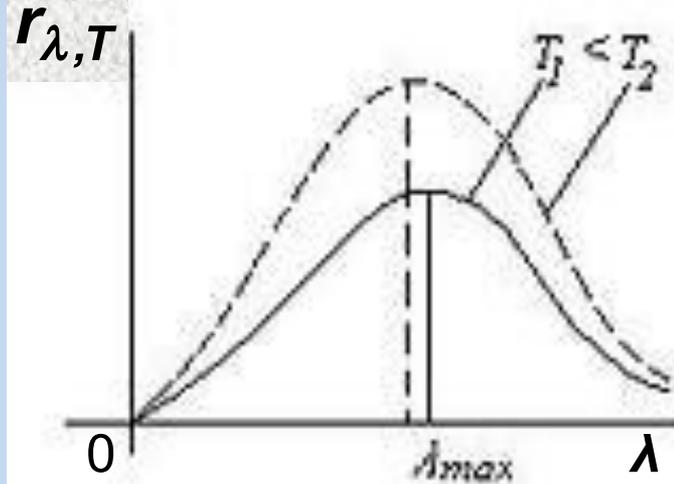
Площадь над кривой $r_{\nu,T} = f(T)$ равна

$$R = T^4 \text{ – закон Стефана-Больцмана}$$

$$= 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4} \text{ – постоянная Стефана-Больцмана.}$$



Закон смещения Вина (1893)



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

постоянная Вина

$$b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}.$$

Wilhelm Wien
(1864-1928) нем.

Закон смещения Вина

Закон Вина: Длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, обратно пропорциональна абсолютной температуре:

$$\lambda_m = \frac{b}{T}$$

где $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ - постоянная Вина.



Излучение нагретого металла в видимом

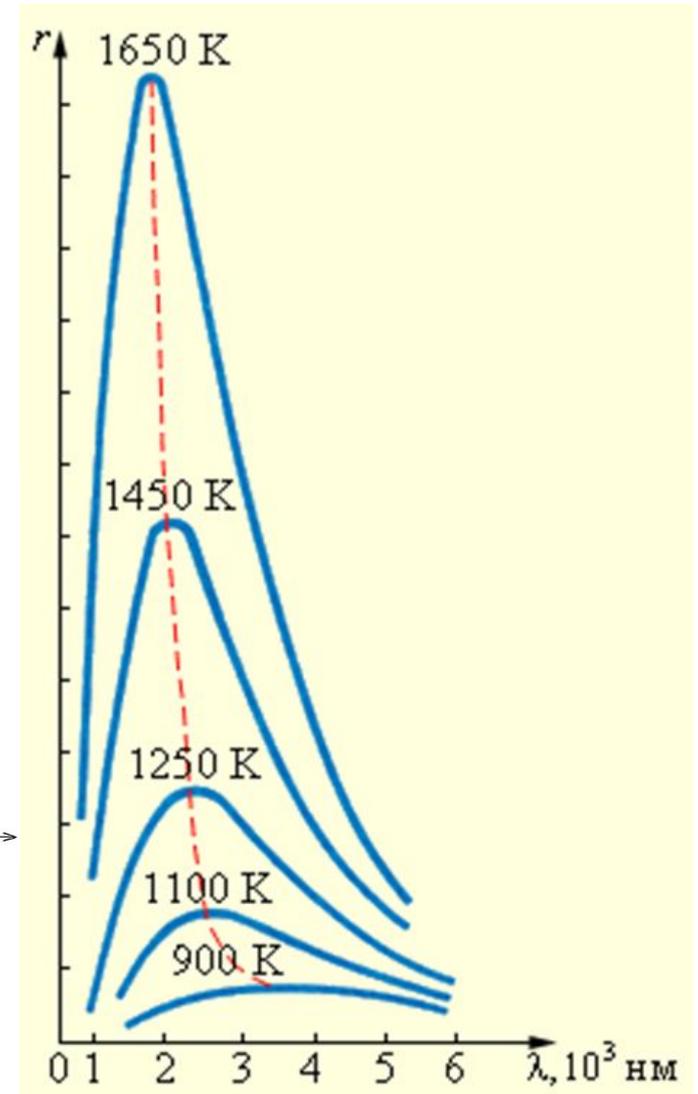
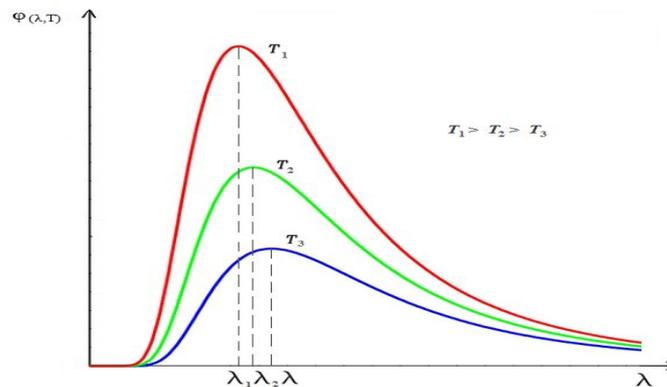
Закон смещения Вина или

Первый Закон Вина: Длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, обратно пропорциональна абсолютной температуре:

$$\lambda_m = \frac{b}{T}$$

где
постоянная Вина.

$$b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$$



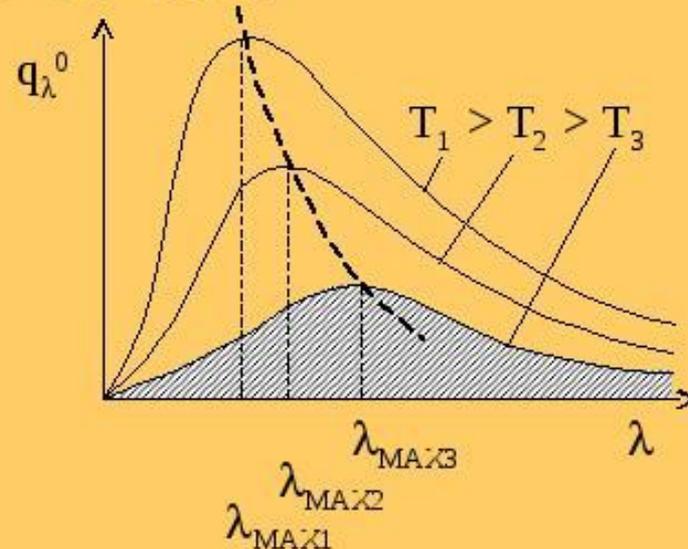


В соответствии с **законом смещения Вина**, с увеличением температуры а.ч.т. максимум излучаемой им энергии смещается в область более коротких длин волн:

$$\lambda_{\text{MAX}} \cdot T = b,$$

где λ_{MAX} – длина волны, соответствующая максимуму излучения, м;

$$b = 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}.$$



Первый Закон Вина

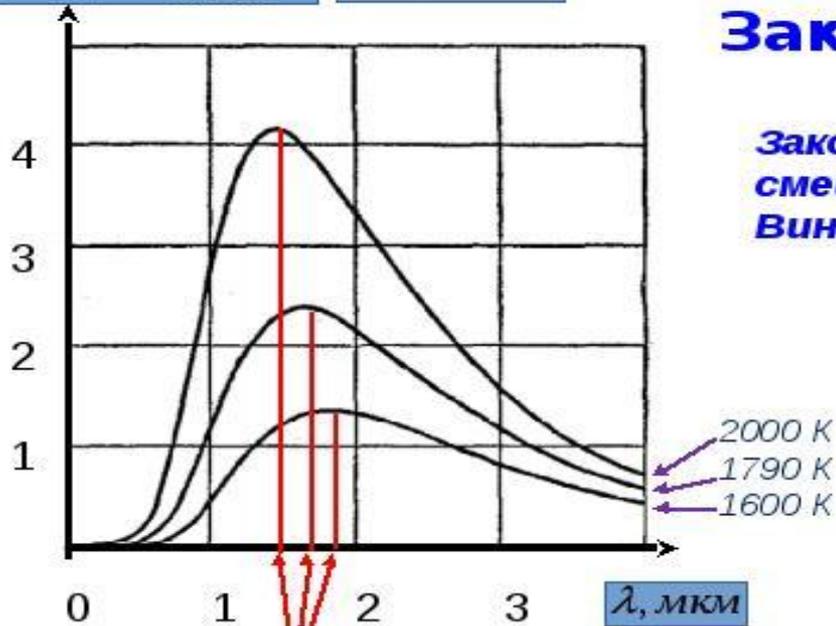
$$\varphi(\lambda, T) = (r_{\lambda T})_{\text{АЧТ}}, \quad 10^{11} \text{ Вт} / \text{м}^3$$

Закон смещения Вина

Закон
смещения
Вина

$$\lambda_m = \frac{b}{T}$$

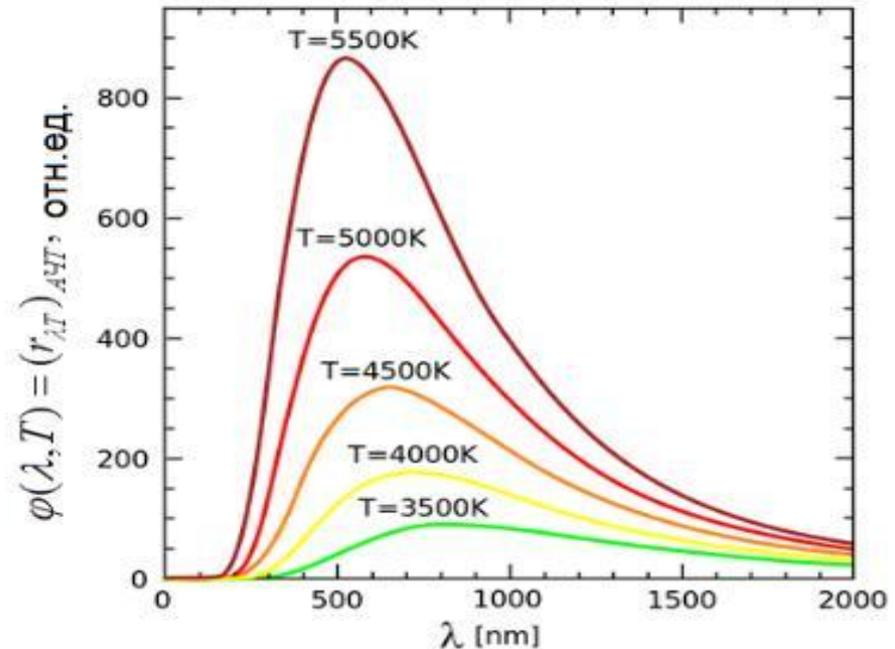
$$b \approx 290 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$$



λ_m

Инфракрасная
область

Видимая
область



2-й закон Вина

$$f(\nu, T)_{\max} = C' T^5$$

Максимальное значение функции $f(\nu, T)$, т.е. спектральной лучеиспускательной способности для абсолютно черного тела пропорциональна температуре в пятой степени.

За работы по тепловому излучению Вин в 1910 году получил Нобелевскую премию.

Нагретые тела являются источниками электромагнитного излучения в широком диапазоне частот. Это излучение называют *тепловым излучением*.

Тепловое излучение находится в равновесии с излучающим телом – является равновесным.

Энергия, испускаемая с единицы поверхности тела в единичном интервале частот, называется *спектральной испускательной способностью* тела, или *спектральной плотностью энергетической светимости*. Испускательная способность является функцией частоты и температуры $r = r(\omega, T)$.

Тепловое излучение реальных тел

Коэффициент теплового излучения зависит от поверхности объекта, температуры этого объекта и степени его окисления.

$$\varepsilon_{\text{ш}} = \varepsilon \cdot [1 + 2,8 \cdot (1 - \varepsilon)^2]$$

Закон Стефана - Больцмана
(для серого тела)

$$M_e = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4.$$

Закон Кирхгофа

$$\varepsilon_{\lambda}(T) = a_{\lambda}(T).$$

Фотоэффект.

Фотоэффект возникает при взаимодействии вещества с поглоща-емым электромагнитным излучением.

Различают внешний и внутренний фотоэффект.

Внешним фотоэффектом называется явление вырывания электронов из вещества под действием падающего на него света.

Внутренним фотоэффектом называется явление увеличения концентрации носителей заряда в веществе, а следовательно, и увеличения электропроводности вещества под действием света. Частным случаем внутреннего фотоэффекта является вентильный фотоэффект — явление возникновения под действием света электродвижущей силы в контакте двух различных полупроводников или полупроводника и металла.

Внешний фотоэффект был открыт в 1887 г. Г. Герцем, а исследован детально в 1888—1890 гг. А. Г. Столетовым.

Внешний фотоэффект

Внешним фотоэффектом называют вырывание электронов из металла падающим на него светом. Энергия падающего света необходима для совершения работы выхода электрона из металла и сообщение кинетической энергии электрону:

При этом по закону сохранения энергия поглощенного фотона тратится на совершение работы выхода $(A_{\text{вых}})$ и на кинетическую энергию фотоэлектрона:

$$W_{\text{ф}} = A_{\text{с}} + W_{\text{к}}; \quad h\nu = A_{\text{с}} + \frac{mU_{\text{max}}^2}{2}.$$

Это выражение называется уравнением Эйнштейна для фотоэффекта. Работа выхода – это наименьшая энергия, которую нужно сообщить электрону, чтобы удалить его из

Все попытки объяснить явление фотоэффекта на основе законов электродинамики Максвелла, согласно которым свет — это электромагнитная волна, непрерывно распределенная в пространстве, оказались безрезультатными.

Объяснение фотоэффекта было дано в 1905 г. Эйнштейном, развившим идеи Планка о прерывистом испускании света.

Свет имеет прерывистую структуру и поглощается отдельными порциями. Энергия E каждой порции излучения в полном соответствии с гипотезой Планка пропорциональна частоте: $E = h\nu$ где h — постоянная Планка.

Энергия порции света $h\nu$ идет на совершение работы выхода (A) и на сообщение электрону кинетической энергии.

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$$

Работа выхода (A) — это минимальная энергия, которую надо сообщить электрону, чтобы он покинул металл.

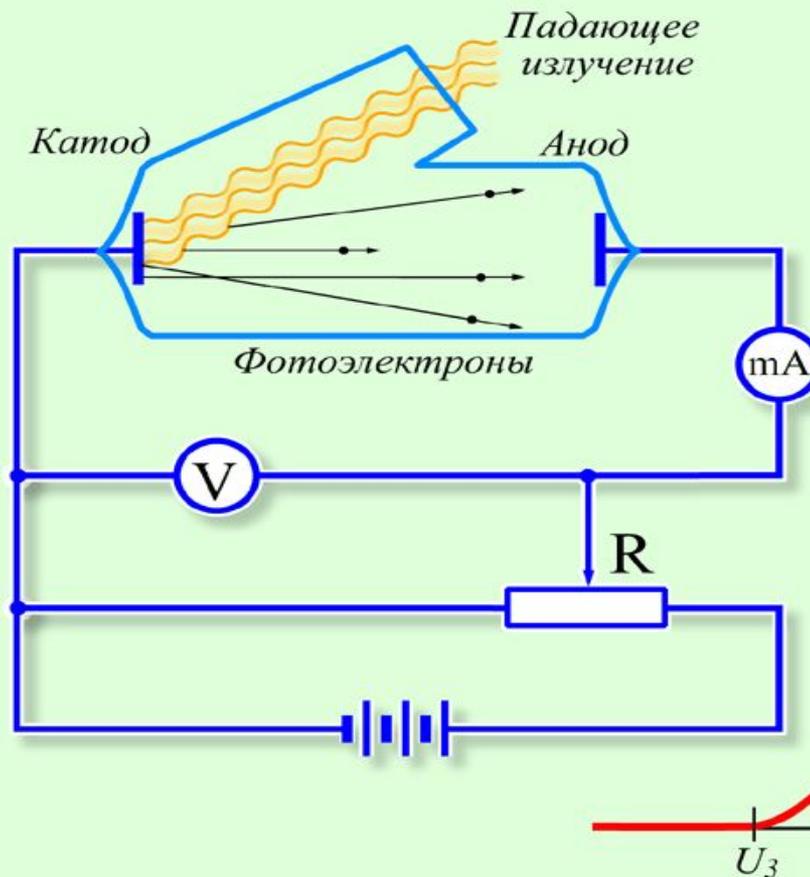
Фотоэффект (1886-1887)



Heinrich Rudolf Hertz
(1857—1894) нем.

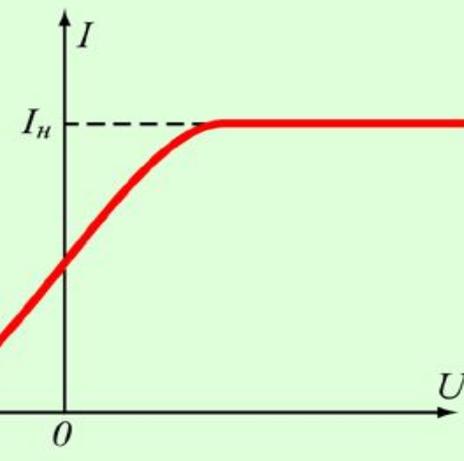


Александр Григорьевич
Столетов (1839—1896)



$$\left(\frac{mv^2}{2}\right)_{\max} = eU_3 = h\nu - A.$$

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта



$$\left(\frac{mv^2}{2}\right)_{\max} = eU_3 = \frac{hc}{\lambda} - A;$$

$$\lambda_{\text{кр}} = \frac{hc}{A} \text{ — красная граница фотоэффекта.}$$

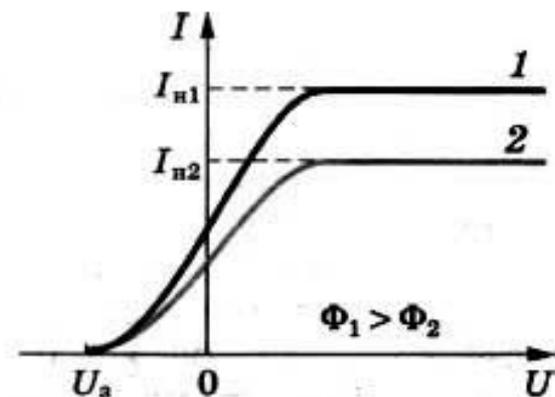
Законы Столетова для фотоэффекта

Столетов установил закономерности внешнего фотоэффекта :

1 Закон Столетова: при неизменном спектральном составе электромагнитных излучений, падающих на фотокатод, фототок насыщения пропорционален энергетической освещенности и катода (иначе: число фотоэлектронов, выбиваемых из катода за 1 с, прямо пропорционально интенсивности излучения):

Сила фототока отлична от нуля и при нулевом напряжении. Это означает, что часть вырванных светом электронов достигает правого электрода и при отсутствии напряжения. То есть

электрическое поле тормозит вырванные электроны до полной остановки, а затем возвращает их на электрод. Интенсивность света пропорциональна числу квантов (порций) энергии $h\nu$ в



2. Максимальная начальная скорость фотоэлектронов определяется частотой света и не зависит от его интенсивности.
3. Для каждого вещества существует *красная граница фотоэффекта*, то есть минимальная частота света (зависящая от химической природы вещества и состояния поверхности), ниже которой фотоэффект невозможен.

Если энергия квантов меньше работы выхода, то при любом потоке энергии света электроны не могут вылететь. Этим объясняется существование красной границы фотоэффекта. Частоту $\nu_{кр}$ можно

определить, считая, что $W_k = 0$:
$$A_e = h \nu_{кр} = \frac{A_e}{h}$$

4. Фотоэффект практически безинерционен, так как с момента облучения металла светом до вылета электронов проходит время τ .

Эйнштейн был удостоен Нобелевской премии за работы по теории фотоэффекта.

2 и 3 закон не удается объяснить на основе классической теории, согласно которой вырывание электронов из катода является результатом их "раскачивания" электромагнитной волной, которое должно усиливаться при увеличении интенсивности света

Внешний фотоэффект хорошо объясняется квантовой теорией. Согласно этой теории, электрон получает сразу целиком всю энергию фотона $\varepsilon = h\nu$, которая расходуется на совершение работы выхода электрона из вещества (катода) и на сообщение электрону кинетической энергии

При задерживающем напряжении фототок прекращается и работа задерживающего электрического поля по величине равна максимальной начальной кинетической энергии вылетающих электронов :

$$A_3 = W_k; \quad eU_3 = \frac{mU_{\max}^2}{2},$$

где m – масса и e – заряд электрона; U_{\max} – максимальная начальная скорость фотоэлектронов.

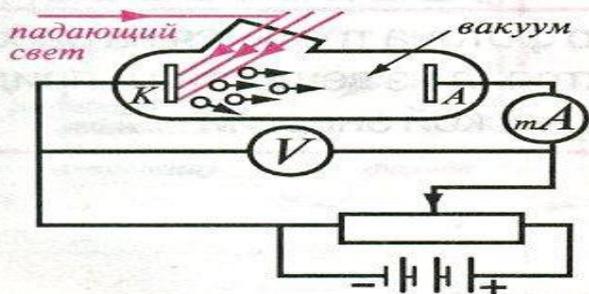
1) ФОТОЭФФЕКТ

1) **Фотоэффект** || явление вырывания электронов из вещества под действием излучения

открытие явления: 1887 г. Г. Герц

исследование явления: 1888 г. А. Г. Столетов

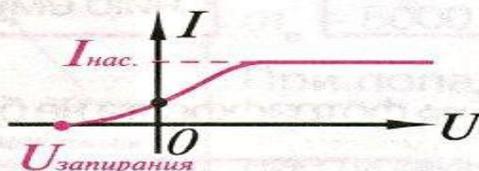
2) **Опыты Столетова**



(установка: вакуумная лампа с холодным катодом)

При освещении катода из него вырываются электроны и в цепи устанавливается электрический ток

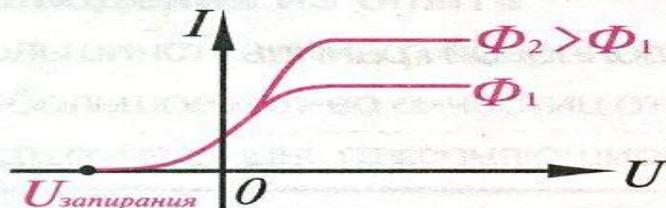
а)



$$q = \bar{e}$$

$$U_{\text{зап.}} \cdot \bar{e} = \frac{mV^2}{2}$$

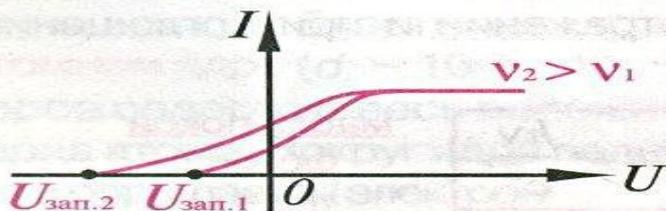
б) Изменяем интенсивность светового потока (Φ) ($\nu = \text{const}$)



I закон фотоэффекта

Сила тока насыщения прямо пропорциональна интенсивности светового излучения

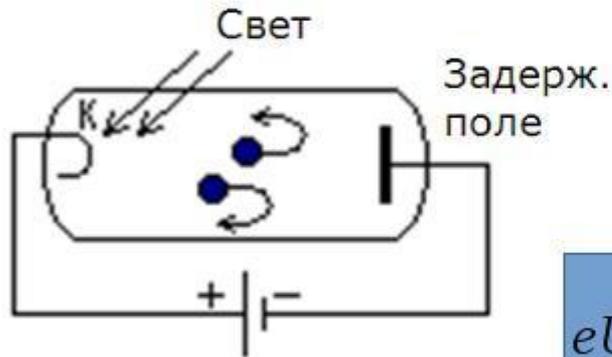
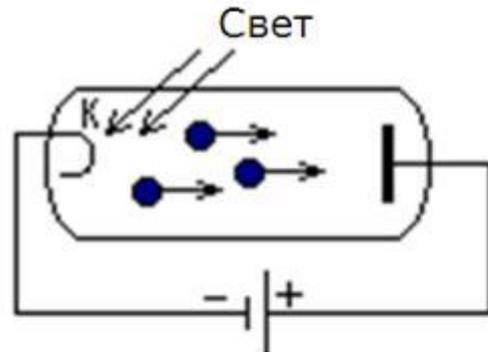
в) Изменяем частоту излучения (ν) ($\Phi = \text{const}$)



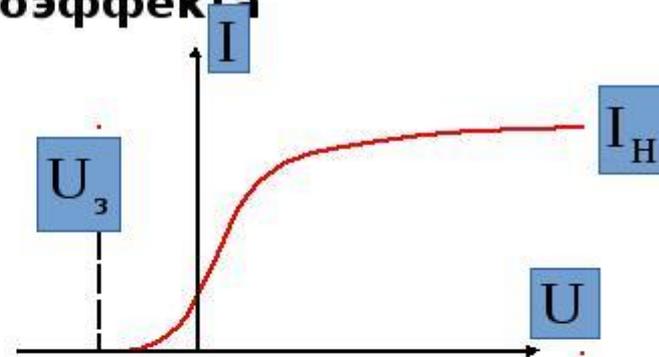
II закон фотоэффекта

Максимальная E_k фотоэлектронов пропорциональна частоте света и не зависит от его интенсивности

Фотоэффект



Вольт-амперная характеристика фотоэффекта



$$eU_3 = \frac{mv^2}{2}$$

- Фототок насыщения пропорционален световому потоку (Столетов)
- Существует своя так называемая красная граница: если длина волны падающего света больше некоторой величины, то фотоэффекта не наблюдается. Для каждого металла красная граница своя.
- Кинетическая энергия электрона

Формула Релея-Джинса.

Гипотеза Планка. Формула

Планка

Релей и Джинс, исходя из классической теории о равном распределении энергии по степеням свободы, и представляя тело как набор осцилляторов, получили следующую формулу для испускательной способности АЧТ,

где k - постоянная Больцмана,
 kT - энергия колебаний осцилляторов на
длине волны λ .

$$r_{\lambda, T}^0 = 2\pi c k T / \lambda^4$$

Формула удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными лишь при больших длинах волн и резко расходится с опытом для малых длин волн: при $\lambda \rightarrow 0$. Этот результат, получивший название ультрафиолетовой катастрофы, находится в противоречии с опытом.

Формула Рэля-Джинса

•Рэлей и Джинс сделали попытку определить равновесную плотность излучения абсолютно чёрного тела из теоремы классической статистики о равномерном распределении энергии по степеням свободы. На каждую степень свободы приходится в среднем kT . В результате они получили:

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{C^2}kT, \quad (1)$$

где C – скорость света в вакууме.

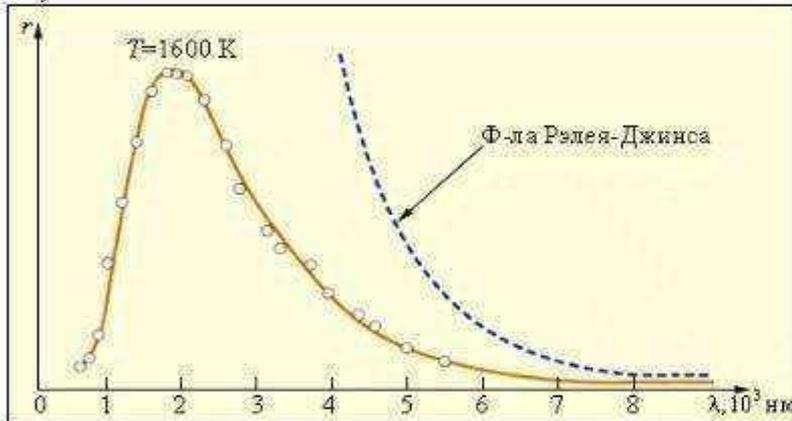
Тепловое излучение

Закономерности и излучение АЧТ

Формула Релея-Джинса

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

$f(\omega t)$

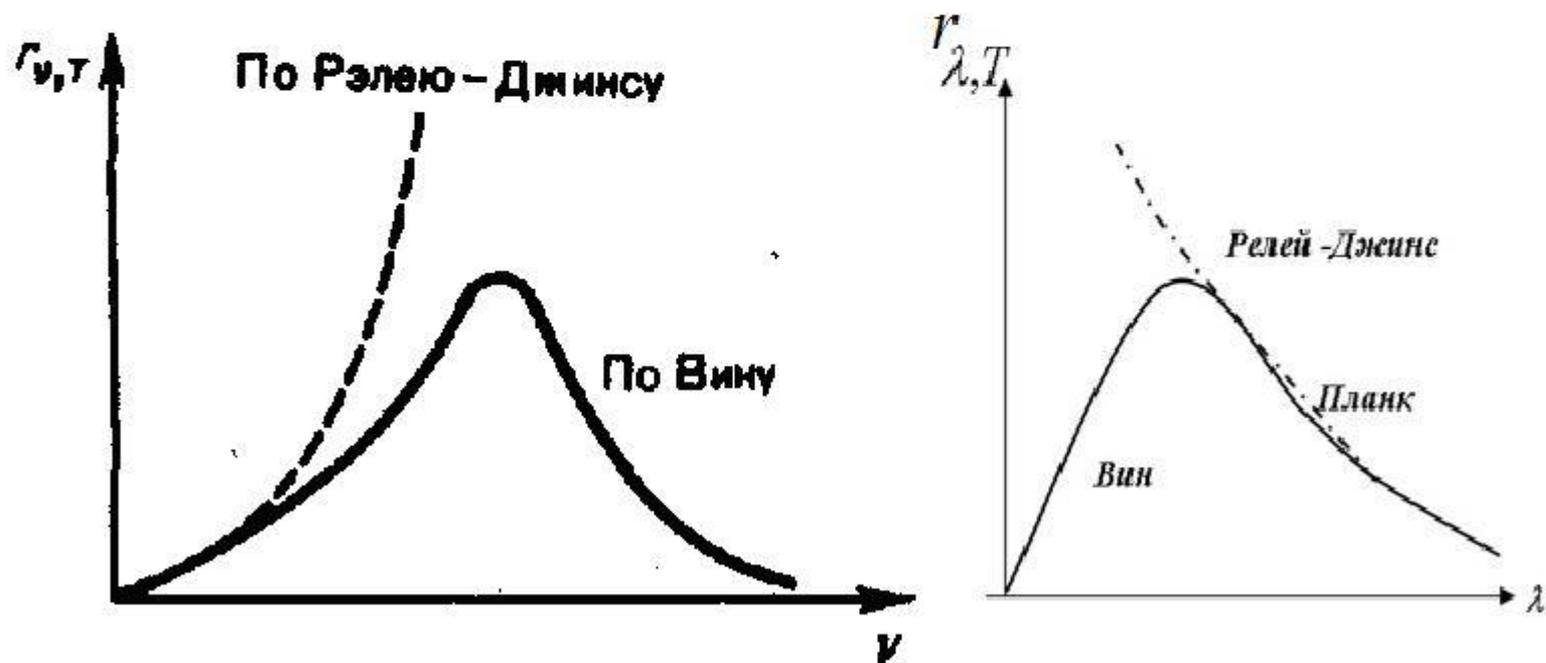


Формула Релея Джинса согласуется с экспериментом **лишь при больших длинах волн (малых частотах)**

Ультрафиолетовая катастрофа!!

«Ультрафиолетовая катастрофа» - каждое тело, обладающее энергией для излучения, должно излучать ее практически полностью в ультрафиолетовой области и короче (при любой температуре)

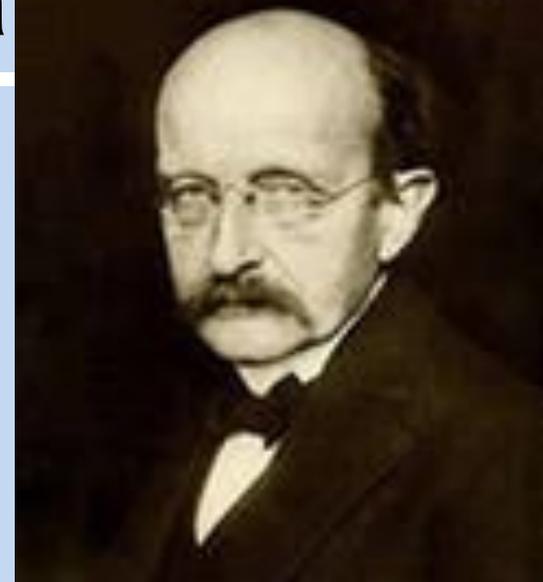
$$f(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$



Формулы Релея–Джинса и Планка



Rayleigh Jeans law –
ультрафиолетовая катастрофа



Max Planck
(1858—1947) нем.

Квантовая гипотеза Планка (1900): свет испускается в виде отдельных порций – квантов, энергия кванта

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} - \text{постоянная Планка};$$

формула Планка для теплового излучения :

$$r_{\nu, T} = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}.$$

Эта формула предполагает квадратичное возрастание спектральной плотности излучения в зависимости от его частоты. На практике такой закон означал бы невозможность термодинамического равновесия между веществом и излучением, поскольку согласно ему вся тепловая энергия должна была бы перейти в энергию излучения коротковолновой области спектра. Такое гипотетическое явление было названо ультрафиолетовой катастрофой.

Тем не менее закон излучения Рэля — Джинса справедлив для длинноволновой области спектра и адекватно описывает характер излучения. Объяснить факт такого соответствия можно лишь при использовании квантово-механического подхода, согласно которому излучение происходит дискретно. Исходя из квантовых законов, позже будет получена формула Планка, которая будет совпадать с формулой Рэля — Джинса

Применяя к тепловому излучению классический закон *равнораспределения* энергии по степеням свободы Рэлей и Джинс получили выражение для зависимости испускательной способности черного тела $r_{\nu,T}$ от частоты света:

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \langle \varepsilon \rangle = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$

где $\langle \varepsilon \rangle = kT$ — средняя энергия осциллятора с собственной частотой ν

Однако попытка получить закон Стефана-Больцмана из этой формулы приводит к **абсурдному** результату — R_e неограниченно растет, достигая чрезвычайно больших значений в ультрафиолете, — который получил название "**ультрафиолетовая катастрофа**":

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu = \frac{2\pi kT}{c^2} \int_0^{\infty} \nu^2 d\nu = \infty$$

РОЖДЕНИЕ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ

- **Макс Карл Эрнст Людвиг Планк** (23 апреля 1858 — 4 октября 1947) — немецкий физик-теоретик, основоположник квантовой физики. Лауреат Нобелевской премии по физике и других наград, член Прусской академии, ряда иностранных научных обществ и академий наук.
- В середине 1890-х годов он занялся проблемой теплового излучения и в конце 1900 года достиг решающего успеха: получил правильную формулу для распределения энергии в спектре абсолютно чёрного тела и дал её теоретическое обоснование, введя знаменитый «квант действия». Квантовая гипотеза немецкого учёного, глубокий смысл которой вскрылся лишь много позже, ознаменовала рождение квантовой физики.

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

Гипотеза Планка. Формула

Планка

Формула Релея-Джинса $r_{\lambda, T}^0 = 2\pi ckT / \lambda^4$ удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными лишь при больших длинах волн и резко расходится с опытом для малых длин волн. Этот результат, получивший название ультрафиолетовой катастрофы, находится в противоречии с опытом.

Устранить противоречие удалось Планку. В 1900 г. он показал, что выражение для $r_{\lambda, T}$, согласующееся с опытом, может быть получено, если предположить, что излучение испускается не непрерывно, а в виде отдельных порций. Энергия такой порции - кванта излучения, пропорциональна частоте излучения ν и равна $\varepsilon = h\nu$, где $h = 6.6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка.

В результате получилось, что средняя энергия колебаний осцилляторов на частоте ν не равна $\langle \varepsilon \rangle = kT$ как в

Гипотеза и формула Планка



Макс Карл Эрнст
Людвиг Планк
(1858—1947),
немецкий физик

Гипотеза Планка: Электромагнитное излучение испускается телами не непрерывно, а в виде отдельных порций энергии (квантов), величина которых

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \hbar\omega$$

где

$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с
- постоянная Планка;

$\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж · с
- постоянная Планка с чертой

Так как излучение испускается порциями, то энергия осциллятора ϵ может принимать лишь определенные *дискретные значения*, кратные целому числу элементарных порций энергии ϵ_0 :

$$\epsilon = nh\nu \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

То, что $\epsilon_0 = h\nu$ нельзя ниоткуда вывести, это гениальная догадка М. Планка!!!

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

$$r_{\nu, T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{h\nu/(kT)} - 1}, \quad (13.1.2)$$



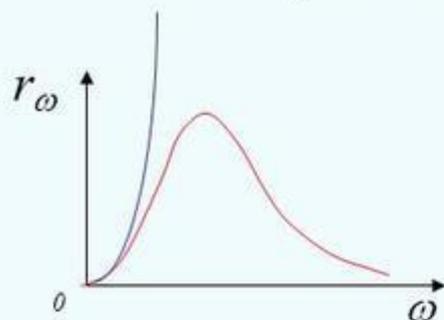
Основные законы теплового излучения

Формула Планка

Классическая физика не могла объяснить тепловое излучение. Из классических формул следовало, что раскаленная печь должна с течением времени отдавать все больше тепла в окружающее пространство и яркость ее свечения должна все больше возрастать (!?)

Совпадение расчета с практическими результатами имело место лишь в очень узком диапазоне низких частот. Этот парадокс получил название *“Ультрафиолетовой катастрофы”*

Макс Планк ввел понятие *дискретности* излучения фотонов (квант энергии излучения).



$$E = h\nu$$

Формула Планка

$$r_{\lambda}(\lambda) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}$$

Задачи квантовой оптики направлены на исследование корпускулярных свойств света (то есть его фотонов и частиц-корпускул).

Согласно предложенной в 1901 г. гипотезе М. Планка о свойствах света, поглощается и излучается он только отдельными порциями (фотонами, квантами). Квант представляет материя. $m = E / c^2 = hv / c^2$ ицу с некоторой массой , $p = \mathcal{E} / c = hv / c = h / \lambda$ и импульсом $E = hv$ и импульсом

Тогда записывается формула: $E = hv$, где h - постоянная Планка. $v = c / \lambda$ - это частота света в вакууме.

Связь формулы Планка с классическими законами теплового излучения

1) При $\frac{\hbar\omega}{kT} \ll 1$, $\hbar\omega \ll kT$ (область малых частот)

$$f(\omega, T) = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\hbar\omega}{kT} - 1} = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} \cdot kT$$

формула Планка переходит в формулу Рэля-Джинса

2) При $\frac{\hbar\omega}{kT} \gg 1$, $\hbar\omega \gg kT$ (область высоких частот)

$$f(\omega, T) = \frac{\omega^3}{4\pi^2 c^2} \cdot e^{-\frac{\hbar\omega}{kT}} = \omega^2 \cdot F\left(\frac{\omega}{T}\right)$$

формула Планка переходит в формулу Вина

3) Для энергетической светимости абсолютно черного тела:

формула Планка приводит к закону Стефана-Больцмана

Здесь $\frac{\pi^2 k^4}{60c^2 \hbar^3} = \sigma$ - постоянная Стефана-Больцмана

$$R_T = \int_0^{\infty} f(\omega, T) d\omega = \int_0^{\infty} \frac{\hbar}{4\pi^2 c^2} \cdot \frac{\omega^3 d\omega}{e^{-\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1} = \frac{\pi^2 k^4}{60c^2 \hbar^3} T^4 = \sigma T^4$$

4) Исследование формулы Планка на экстремум откуда получаем закон смещения Вина

$$\lambda_m = \frac{2\pi\hbar c}{4,965k} = b$$

Заключение

Гипотеза Планка о квантах нарушила "незыблемое" правило классической физики о том, что любая физическая величина, в том числе и энергия, изменяется непрерывным образом, и за бесконечно малый промежуток времени ее изменение всегда бесконечно мало.

Эта гипотеза оказала огромное влияние на последующее развитие физики. Именно развитие гипотезы Планка о квантах, высказанной в начале столетия, привело к появлению *квантовой механики* - современной физической теории, в которой *идея квантования* или дискретности *распространяется на различные физические величины*, характеризующие состояние системы.

В этом смысле 1900 г. можно назвать годом рождения квантовой физики, которая за последующие сто лет бурно развивалась и позволила физикам создать законченную и непротиворечивую картину микромира на уровне атомных явлений.

На первом этапе с помощью гипотезы о квантовании энергии излучения Планку удалось дать исчерпывающее теоретическое описание равновесного теплового излучения, сняв все противоречия классической теории.

Квантовые свойства электромагнитного

излучения

1. Фотоны, энергия, масса и импульс фотона

Чтобы объяснить распределение энергии в спектре теплового излучения Планк допустил, что электромагнитные волны испускают-ся порциями (квантами). Эйнштейн в 1905 г. пришел к выводу, что излучение не только испускается, но и поглощается и распространяется в виде квантов. Этот вывод позволил объяснить все экспериментальные факты (например фотоэффект), которые не могла объяснить классическая электродинамика, исходившая из волновых представлений о свойствах излучения.

Таким образом, распространение света следует рассматривать не как непрерывный волновой процесс, а как поток локализованных в пространстве дискретных частиц, движущихся со скоростью распространения света в вакууме. Впоследствии (в 1926 г.) эти час-частицы получили название

1. Энергия фотона $\varepsilon = h\nu = \hbar\omega = h\frac{c}{\lambda}$,

где $h = 6.6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка, $\omega = 2\pi\nu$ - круговая частота.

Энергия фотона увеличивается с ростом частоты (или с уменьшением длины волны), и, например, фотон фиолетового света ($\lambda = 0.38$ мкм) имеет большую энергию, чем фотон красного света ($\lambda = 0.77$ мкм).

2. Масса фотона определяет $m = E/c^2 = h\nu/c^2$ з закона о взаимосвязи массы и энергии ($E = mc^2$)

3. Импульс фотон $E = c\sqrt{p^2 + m_0^2 c^2}$ релятивиской частицы энергия ее

$$p = \varepsilon / c = h\nu / c = h / \lambda$$

Поскольку у фотона $m_0 = 0$, то импульс фотона

дуализм электромагнитного

излучения

Тепловое излучения ~~и фотоэффект~~ показали, что электромагнитное излучение (в частности, свет), обладает всеми свойствами частицы (корпускулы). Однако большая группа оптических явлений - интерференция, дифракция, поляризация свидетельствует о волновых свойствах электромагнитного излучения, в частности, света.

Что же представляет собой свет - непрерывные электромагнитные волны, излучаемые источником или поток дискретных фотонов, беспорядочно испускаемых источником?

Одним из наиболее значительных достижений современной физики служит постепенное убеждение в ошибочности противопоставления волновых и квантовых свойств света (излучения). Свойства

непрерывности характерны не для

Свет (электромагнитное излучение) одновременно обладает свойствами непрерывных электромагнитных волн и свойствами дискретных фотонов. В этом заключается корпускулярно-волно-вой дуализм (двойственность) электромагнитного излучения.

. Явления интерференции, дифракции, поляризации света неопровержимо свидетельствуют о волновых свойствах света. В свою очередь закономерности теплового излучения тел, фото-эффекта неоспоримо свидетельствуют, что свет ведет себя не как непрерывная протяженная волна, а как поток частиц – фотонов.

Свет, как и любое электромагнитное излучение, имеет и волновые свойства, и корпускулярные свойства, т.е. имеет корпускулярно-волновую природу.

Однако корпускулярно-волновая природа света не означает, что свет – это и частица, и волна в привычном классическом их представлении.

Сочетание корпускулярных и волновых свойств света

Рассмотрим с обеих точек зрения интенсивность света или освещенность какой-либо поверхности

1. Согласно волновым представлениям интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды световой волны в данном месте:.

$$J = dW / dSdt \sim A^2 .$$

С корпускулярной точки зрения интенсивность света пропорциональна числу фотонов dN , попадающих в данное место:

$$J = dW / dSdt = h\nu dN / dSdt \sim dN.$$

Следовательно, между квадратом амплитуды световой волны и

числом фотонов в данном месте имеется прямая пропорциональная зависимость: $dN \sim A^2$.

Введем величину, показывающую, какая часть dN от общего

числа фотонов в потоке N попадает в данное место

месте определяет вероятность попадания фотонов в это место и распределение фотонов по поверхности имеет вероятностный (статистический) характер. Наблюдаемая на опыте равномерность освещенности обусловлена тем, что обычно плотность потока фотонов очень большая.

Свет корпусулярен в том смысле, что его энергия, импульс, масса и спин локализованы в фотонах, а не размыты в пространстве, но не в том, что фотон может находиться в данном точно определенном месте пространства.

Свет ведет себя как волна в том смысле, что распространение и распределение фотонов в пространстве носят вероятностный характер: вероятность того, что фотон находится в данной точке, определяется квадратом амплитуды в этой точке.

Но вероятностный (волновой) характер распределения фотонов в пространстве не означает, что фотон в один и тот же момент времени находится в разных местах, фотон в каждый момент времени находится в каком-то одном месте.

Таким образом, свет сочетает в себе непрерывность волн и дискретность частиц.

Если учтем, что фотоны существуют только при движении со скоростью c , то приходим к выводу, что свету одновременно присущи как волновые, так и корпускулярные свойства. Просто в некоторых явлениях при определенных условиях основную роль играют или волновые, или корпускулярные свойства и свет можно рассматривать или как волну, или как поток частиц (фотонов).

Итак, свет – это поток фотонов, распространение и распределение которых в пространстве описывается уравнениями электро-магнитных волн.