

## КВАНТОВАЯ ФИЗИКА. Часть 1.

### ***I. Кризис классической физики начала XX века.***

В любой области науки, в физике прежде всего, периодически наблюдаются серьезные затруднения, называемые кризисами. Суть их заключается в том, что открываются новые факты, явления и закономерности, которые не укладываются в рамки существующих теорий. Конкретнее, эти новые факты не только не могут быть описаны классическими законами физики, но и зачастую противоречат их фундаментальным концепциям, определяющим в конечном итоге физическую картину мира.

Драматизм ситуации заключается в том, что классические теории возникли в результате обобщения огромного числа опытных фактов, строго и однозначно эти факты объясняют и способны предсказывать новые физические явления. В этом смысле можно с уверенностью сказать, что классические теории превосходно выполняют свою описательную и предсказательную функцию в рамках широкого круга физических явлений. Но ведь круг этот непрерывно расширяется: исследуются новые физические объекты, да и традиционные объекты классической физики, такие как электромагнитное поле, излучение, рассматриваются с новых позиций. И в череде физических открытий конца XIX – начала XX вв. оказались такие, которые не только не могли быть объяснены с позиций классической парадигмы, но и напрямую ей противоречили. Это верный признак кризиса науки.

В процессе урегулирования кризисов в науке, классические теории никто не рушит, а лишь очерчивают границы их применимости. А для «новых» явлений, непонятных с точки зрения классики, строят новые теории и обозначают для них новые области применимости.

Так какие же явления и процессы, исследованные на рубеже XIX – XX веков не получили объяснений и каким классическим теориям противоречили?

Во-первых, движение частиц с высокими скоростями противоречили классической механике Г. Галилея - И. Ньютона. Для описания таких движений была построена Теория относительности. Отчасти с ней мы уже знакомы.

Во-вторых, закономерности излучения нагретых тел противоречили классической электродинамике Дж. К. Максвелла, которая предполагает исключительно волновую природу у излучения.

В-третьих, фотоэффект, который будет рассмотрен ниже.

### ***II. Тепловое излучение: свойства и законы.***

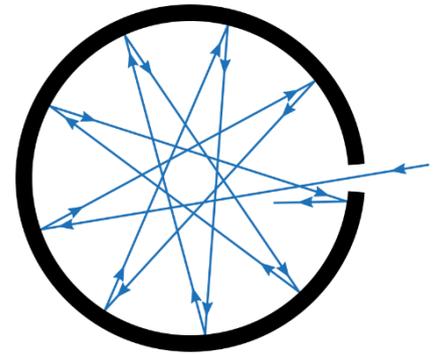
Излучение, испускаемое нагретыми телами за счет их внутренней энергии называется *тепловым*.

1. *Некоторые свойства теплового излучения.*

- ТИ испускается всеми телами, нагретыми свыше  $0\text{ K}$ , т.е. всеми телами.
- Свойства ТИ, его спектр и интенсивность, не зависят от рода вещества, а определяются только свойствами поверхности и температурой.
- ТИ не только излучается, но и поглощается телами.
- ТИ находится в равновесии с телом: при постоянной температуре в отсутствии иных механизмов теплообмена, кроме лучистого, расход внутренней энергии тела на излучение компенсируется энергией поглощенного им излучения для каждой длины волны.

2. *Абсолютно черное тело – модель для описания ТИ.*

Абсолютно черным телом называется тело, которое при любой не разрушающей его температуре поглощает всю энергию падающего на него излучения любой частоты.



Модель предложена Кирхгофом в 1862 г.

Практическая реализация модели АЧТ представляет собой непрозрачную замкнутую полость с небольшим отверстием, стенки которой имеют заданную одинаковую температуру. Излучение, проходящее внутрь полости, испытывает многократное отражение от стенок полости и практически полностью поглощается внутри нее. Собственно, абсолютно черным телом считается отверстие в полости. Совершенно ясно, почему любое отверстие, проделанное в замкнутой коробке, ящике и т.п. кажется черным даже при очень сильном наружном освещении. Также кажется черной внутренность комнаты при наблюдении издали через открытое окно в яркий солнечный день.

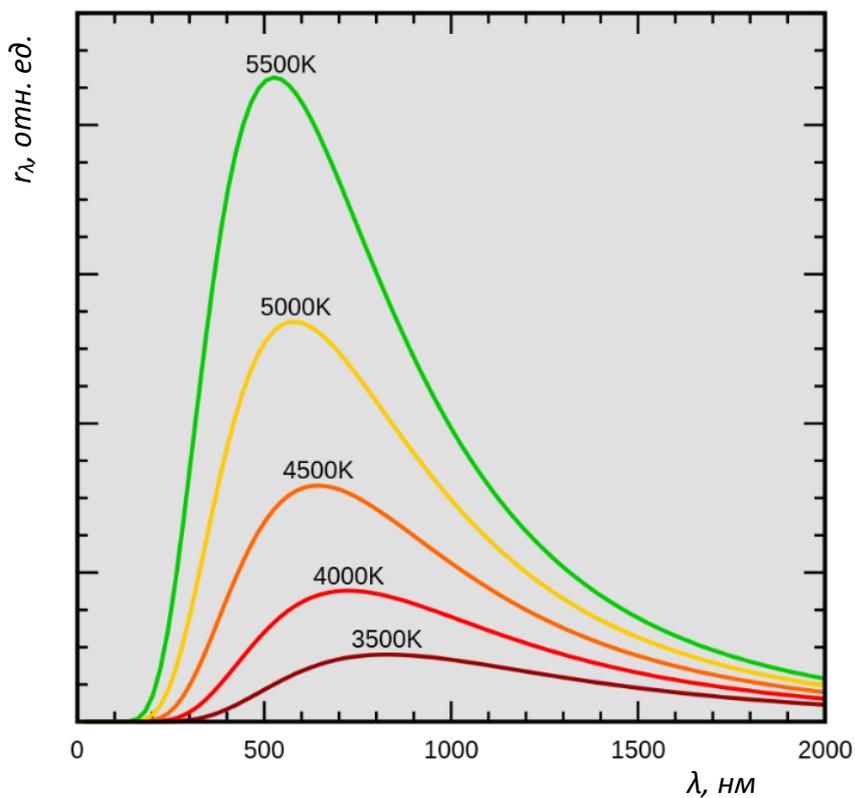
Одновременно с этим, внутренняя поверхность полости сама излучает равновесное с ней тепловое излучение, которое выходит из отверстия наружу. Таким образом, полость с отверстием является одновременно практически идеальным поглотителем и излучателем электромагнитных волн.

Физической характеристикой поглотительной способности тел (и их поверхностей) является безразмерная величина, называемая *степенью черноты тела*  $a$ .  $a = \begin{cases} 1, & \text{АЧТ} \\ 0, & \text{идеальное зеркало} \end{cases}$ . Для реальных тел и поверхностей степень черноты  $a < 1$  и зависит в той или иной степени от длины волны поглощаемого излучения  $a_\lambda = a(\lambda)$ . Рекордсменами по степени черноты в видимом диапазоне длин волн являются: печная сажа (мелкодисперсный порошок углерода  $a=0,95$ ), платиновая чернь (нанопорошок платины  $a=0,99$ ) и структура из параллельно ориентированных нанотрубок углерода *Vantablack* (vertically aligned nanotube arrays  $a=0,99965$ ).

3. Характеристики теплового излучения.

- a. Интегральная светимость  $R$  – отношение мощности ТИ к площади поверхности тела, Вт/м<sup>2</sup> в диапазоне длин волн  $0 < \lambda < \infty$ .
- b. Спектральная светимость в диапазоне длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda+d$ :  $r_\lambda = dR/d\lambda$ , Вт/(м<sup>2</sup>·м). Она показывает, какая доля плотности мощности ТИ приходится на узкий диапазон длин волн  $d\lambda$  на длине волны  $\lambda$ .
- c. Связь интегральной и спектральной светимости:  $R = \int_0^\infty r_\lambda d\lambda$

4. Спектр теплового излучения – зависимость  $r_\lambda = r_\lambda(\lambda)$  для различных температур АЧТ.



Из графика и формулы связи видно:

- a. Спектр ТИ сплошной, т.е. функция  $r_\lambda = r_\lambda(\lambda)$  непрерывна.
- b. Площадь под графиком равна интегральной светимости тела  $R$ .
- c. С увеличением температуры увеличивается интегральная светимость.
- d. С увеличением температуры максимум спектральной светимости  $r_\lambda$  смещается в сторону коротких волн.
- e. Тела, имеющие температуру несколько сотен кельвин, излучают в основном в инфракрасном (не видимом глазу) диапазоне длин волн.

5. Законы теплового излучения.

- a. Закон Кирхгофа (для любых тел).

Если какое-либо тело (или система тел) при температуре  $T$  сильно поглощает излучение в каком-то диапазоне длин волн, то оно будет и сильно излучать при той же температуре и в том же диапазоне длин волн.

Закон Кирхгофа справедлив при любом механизме поглощения, будь он обусловлен свойством поверхностей или устройством системы тел как целого.

*б. Закон смещения Вина (для АЧТ).*

Длина волны  $\lambda_m$ , соответствующая максимуму спектральной светимости АЧТ обратно пропорциональна его абсолютной температуре:  $\lambda_m = \frac{b}{T}$ , где  $b=0,0029$  м·К – постоянная Вина.

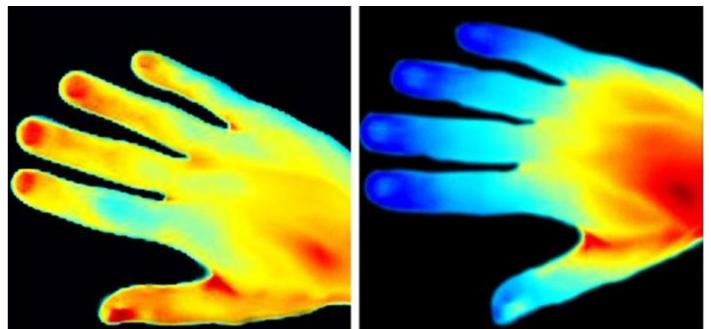
*с. Закон Стефана - Больцмана (для АЧТ).*

Интегральная светимость АЧТ пропорциональна четвертой степени его температуры:  $R = \sigma T^4$ , где  $\sigma=5,7 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана-Больцмана.

*б. Применение.*

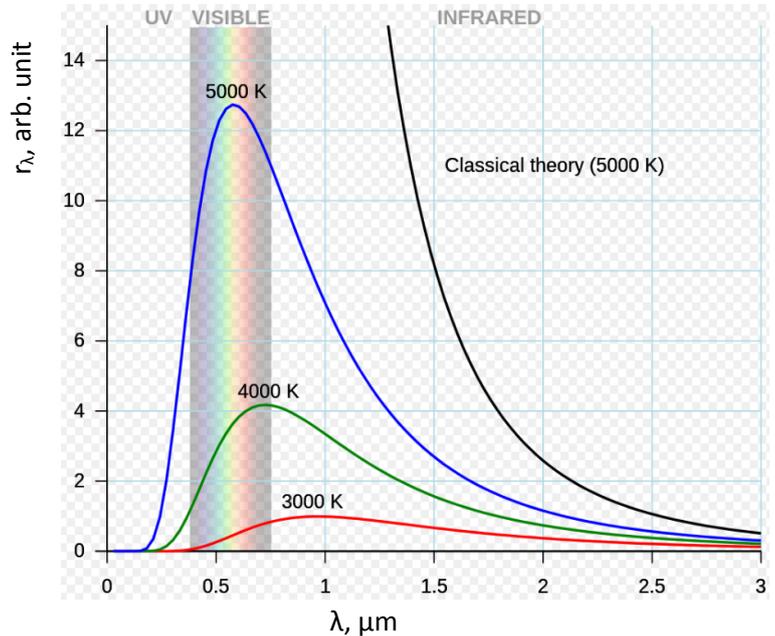
Применительно к астрофизике, законы смещения Вина и Стефана – Больцмана – это основное средство для определения температуры фотосфер звезд по сплошному спектру их излучения. Известно, что излучение звезд имеет спектр, весьма близко соответствующий модели АЧТ. Также соответствует этой модели и реликтовое излучение Вселенной, имеющее температуру около 3 К.

Применительно к технологиям, на основе измерений ТИ, чаще всего интегральной светимости, работают бесконтактные *радиационные термометры* (и *пирометры* – для измерения высоких температур), а также *тепловизоры*, позволяющие регистрировать пространственное распределение температур больших поверхностей. Разновидностями тепловизора являются *приборы ночного видения*, регистрирующие инфракрасное ТИ окружающих тел и позволяющие визуализировать их ввиду незначительной разности температур.



### 7. «Ультрафиолетовая катастрофа».

Попытки описания спектра ТИ на стыке классической электродинамики и молекулярно-кинетической теории привели к сильному расхождению с данными эксперимента. На рис. справа черный график – результат такого описания, полученный Релеем и Джинсом. Видно, что спектральная светимость неограниченно увеличивается, стремясь к бесконечности в ультрафиолетовой части спектра:  $r_\lambda \rightarrow \infty$  при  $\lambda \rightarrow 0$ . Это означает, что интегральная светимость должна быть бесконечно большой в этом случае:  $R \rightarrow \infty$ . Этот противоречащий закону сохранения энергии результат был назван «ультрафиолетовой катастрофой», так как с точки зрения классической физики теоретические построения Релея и Джинса были безупречными. Были и другие попытки описания ТИ на базе классической физики (Вин), но все они не увенчались успехом.



### 8. Квантовая гипотеза М. Планка (1900 г).

С точки зрения классической электродинамики источники ТИ – атомные осцилляторы, - атомы и молекулы тел, совершающие тепловые колебания и вследствие такого движения излучающие электромагнитную волну. И это правильно. Но классическая физика предполагает излучение системой энергии процессом *непрерывным*. Выдающийся немецкий физик Макс Планк предложил пересмотреть положение о непрерывности процесса излучения и поглощения энергии.

Согласно выдвинутой Планком квантовой гипотезе, атомные осцилляторы излучают, а также поглощают энергию не непрерывно, а определенными порциями – квантами, причем энергия кванта пропорциональна частоте колебания:  $\varepsilon = h\nu = \hbar\omega = \frac{hc}{\lambda}$ , где  $h=6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – квант действия (Планк), называемый сейчас постоянной Планка.

Взяв за основу абсолютно новую на те времена квантовую гипотезу, Планк вывел формулу для спектра ТИ:

$$r_{\nu,T} = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT}-1},$$

где  $\nu$ - частота,  $c$  – скорость света,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура, К.

И она превосходно соответствовала экспериментальным спектрам излучения АЧТ и из нее легко выводились законы смещения Вина и Стефана-Больцмана.

14 декабря 1900 г., когда Планк доложил результаты этой работы на заседании Немецкого физического общества, считается днем рождения квантовой физики.

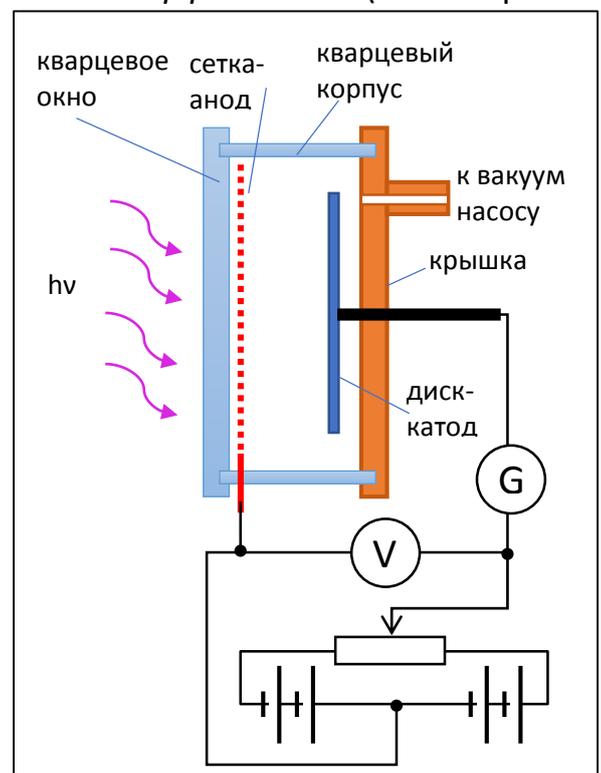
### III. Фотоэлектрический эффект.

#### 1. История открытия и суть явления.

В 1887 году Генрих Герц в процессе обнаружения и исследования электромагнитных волн обнаружил следующее явление. Если облучать электроды искрового разрядника ультрафиолетовым излучением, то разряд происходит при существенно меньшем напряжении, чем в отсутствие такого облучения. Герц, имея другие задачи, не стал заниматься исследованием этого явления. Годом позже детальные исследования этого эффекта начал профессор Московского университета Александр Григорьевич Столетов. Он установил, что световое излучение выбивает с поверхности металлического электрода отрицательно заряженные частицы (электроны в то время не были еще открыты). В последствии (1899) был измерен удельный заряд таких частиц, и тем было доказано, что это электроны.

□ Явление выбивания электронов с поверхности твердых и жидких тел под действием света называется *внешним фотоэлектрическим эффектом* (или просто фотоэффектом). А выбитые таким образом электроны называются *фотоэлектронами*.

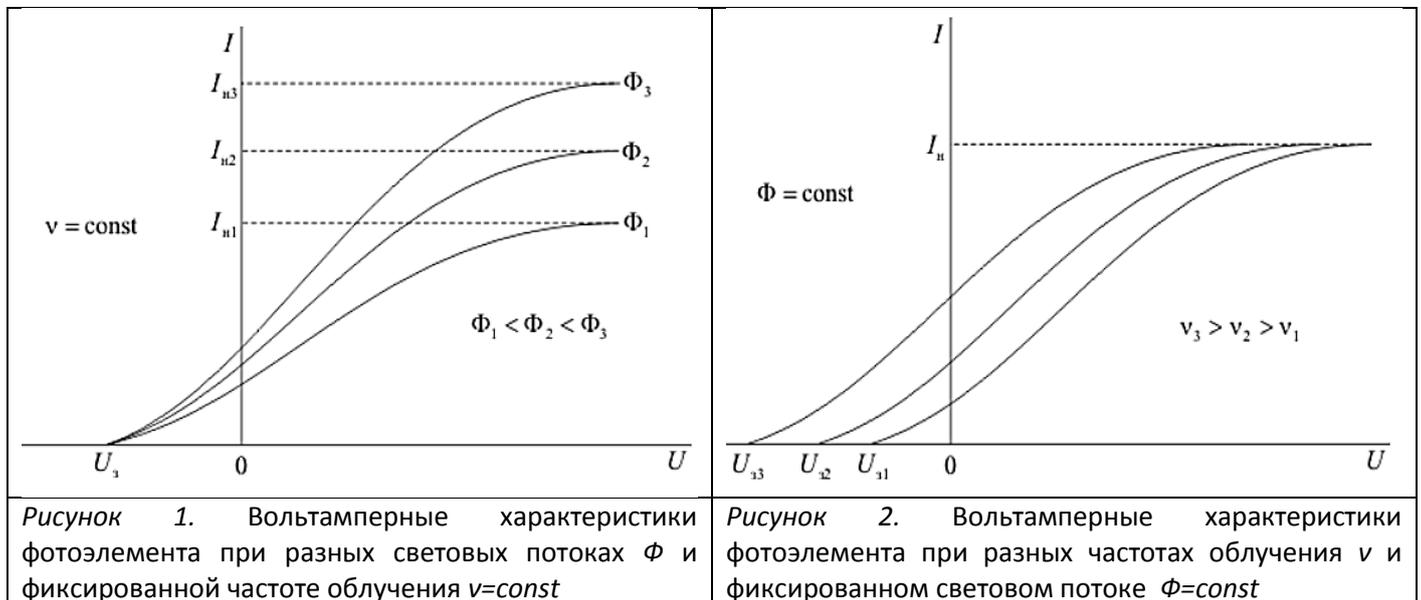
#### 2. Эксперименты А. Г. Столетова (1888-1889гг.).



Главной частью установки является *фотоэлемент*, специально сконструированный Столетовым для исследований фотоэффекта (фото слева). Фотоэлемент включался в измерительную схему (рис. справа), позволяющую

зарегистрировать его вольтамперные характеристики (ВАХ). Он представляет собой цилиндрический кварцевый сосуд, одно из оснований которого закрыто кварцевым окном, а другое – металлической крышкой. Внутри сосуда помещаются: металлическая пластинка в виде диска – фотокатод (использовались диски из разных металлов), медная сетка – анод. Воздух из сосуда откачивался вакуумным насосом. Диск – фотокатод освещался через кварцевое окно и сетку от мощной дуговой лампы со светофильтрами. Между сеткой и катодом создавалась разность потенциалов, величину и знак которой можно регулировать реостатом. Световой поток, падающий на диск выбивал из него фотоэлектроны, которые двигались в ускоряющем поле между сеткой и диском преимущественно в сторону сетки и собирались ею. Таким образом, освещение фотоэлемента вызывало эмиссию электронов с поверхности диска и ток в цепи фотоэлемента (регистрировался гальванометром  $G$ ).

Семейства вольтамперных характеристик  $I=I(U_{сп})$  (здесь  $U_{сп}$  – напряжение на сетке относительно пластинки-диска) показаны на рис. 1,2. Все ВАХ – существенно не линейны, что говорит о том, что фотоэлемент как двухполюсник не подчиняется закону Ома. Первый квадрант графиков ( $U>0$ ) соответствует ускоряющему фотоэлектроны электрическому полю, а второй квадрант ( $U<0$ ) – тормозящему. Видно, что в отсутствие поля ( $U=0$ ) ток



фотоэлектронов не равен нулю. Это обусловлено ненулевой кинетической энергией выбитых фотоэлектронов, за счет которых они долетает до сетки, но далеко не все. Чтобы отсечь фотоэлектроны от сетки необходимо приложить к ней запирающее (отрицательное) напряжение, модуль которого обозначен как  $U_3$ . В этом случае по теореме о кинетической энергии, работа электрических сил идет на изменение кинетической энергии до нуля:  $e|U_3| = \frac{mv^2}{2}$ , где  $e$  – элементарный заряд,  $m$  – масса

электрона. Заметим, что по запирающему напряжению можно определить начальную кинетическую энергию выбитых фотоэлектронов (прямая пропорциональность).

Графики на рис. 1 показывают замечательный факт: запирающее напряжение, а значит и стартовая кинетическая энергия фотоэлектронов, не зависит от светового потока на фотокатод. Из графика ВАХ видно, что при увеличении ускоряющего напряжения на сетке темп роста тока замедляется и при достаточно высоком ускоряющем напряжении перестает расти с увеличением напряжения. Говорят, что ток достиг насыщения. Ток насыщения  $I_H$  тем больше, чем больше световой поток на фотокатод. Насыщение тока говорит о том, что все фотоэлектроны, покидающие фотокатод в единицу времени, достигают сетки.

Графики на рис. 2 показывают, что запирающее напряжение, а значит и стартовая кинетическая энергия фотоэлектронов, зависит от частоты света, падающего на фотокатод.

На основании результатов опытов Столетова и более поздних исследований были сформулированы законы внешнего фотоэлектрического эффекта.

### 3. Законы внешнего фотоэлектрического эффекта.

|  |
|--|
| а. При фиксированной частоте падающего света число электронов, вылетающих из фотокатода (фототок насыщения), пропорционально интенсивности света.                      |
| б. Максимальная начальная кинетическая энергия фотоэлектронов определяется частотой падающего света и <i>не зависит</i> от его интенсивности.                          |
| в. Для каждого вещества существует «красная» граница внешнего фотоэффекта, т.е. наименьшая частота падающего света $\nu_{min}$ , ниже которой фотоэффект прекращается. |

Установлена также практическая безинерционность внешнего фотоэффекта: по современным данным задержка между приходом на фотокатод светового импульса и возникновением фототока менее  $10^{-10}$  с.

Из трех законов фотоэффекта только первый может быть объяснен исходя из классической электромагнитной теории света. Второй и третий законы с точки зрения классической электродинамики представляются абсурдными и напрямую ей противоречат. Это и есть еще одна кризисная ситуация.

### 4. Закон внешнего фотоэлектрического эффекта А. Эйнштейна (1905 г).

За рабочую гипотезу Эйнштейн взял положение о квантовом характере излучения и в особенности поглощения света. Подобное утверждение было выдвинуто в 1900

г. М. Планком относительно теплового излучения. Хотя ТИ и фотоэффект – явления на первый взгляд различные, но между ними имеется глубокая связь. Согласно квантовой теории свет излучается, распространяется и поглощается в виде потока квантов – частиц с энергией  $\varepsilon = h\nu = \hbar\omega = \frac{hc}{\lambda}$ , названных впоследствии **фотонами**.

Закон внешнего фотоэффекта представляет собой закон сохранения энергии, описывающий эффект поглощения кванта электроном на границе твердого или жидкого вещества.

$$h\nu = A_{\text{ВЫХ}} + \frac{mv^2}{2}$$

энергия кванта света идет на совершение электроном работы выхода электрона из вещества и на сообщение электрону кинетической энергии.

**О** Работа выхода – это энергия, которую необходимо сообщить электрону для преодоления потенциального барьера на границе вещество-вакуум.

**Работа выхода электронов из металла**

Работа выхода зависит от рода вещества и состояния поверхности, играющей роль фотокатода.

| Металл  | $A_{\text{ВЫХ}}$ , эВ | $A_{\text{ВЫХ}} \cdot 10^{-19}$ , Дж |
|---------|-----------------------|--------------------------------------|
| Калий   | 2,2                   | 3,5                                  |
| Литий   | 2,3                   | 3,7                                  |
| Натрий  | 2,5                   | 4,0                                  |
| Платина | 6,3                   | 10,1                                 |
| Серебро | 4,7                   | 7,5                                  |
| Цинк    | 4,0                   | 6,4                                  |

Уравнение Эйнштейна легко объясняет все три закона внешнего фотоэффекта. Так, например, уравнение для «красной границы» будет иметь вид:  $h\nu_{\text{min}} = A_{\text{ВЫХ}}$  и фотоэффект возможен, когда  $h\nu \geq A_{\text{ВЫХ}}$ .

**IV. Корпускулярно – волновой дуализм света.**

Сейчас необходимо вернуться ненадолго к вопросу о кризисе физике на рубеже XIX – XX веков. Возникла весьма странная ситуация. С одной стороны, множество явлений и их исследования неопровержимо доказывали, что свет представляет собой электромагнитную волну. Среди таковых известные вам интерференция, дифракция, поляризация, дисперсия. С другой стороны, тепловое излучение, фотоэффект, фотохимические реакции, эффект Комптона (будет рассмотрен позже) с не меньшей убедительностью демонстрируют, что свет – это поток безмассовых частиц (корпускул, как говорили древние)-, так называемых фотонов. Приходится признать, что и волновые, и квантовые (корпускулярные) свойства света неопровержимо доказаны, но кажутся на первый взгляд взаимно исключаящими. Концепция «единства противоположностей» в современной физике называется **корпускулярно-волновой дуализм (двойственность) света: свет в определенных условиях проявляет себя как электромагнитная волна, но в других условиях как поток частиц.**