

Квантовая природа излучения

Содержание лекции:

- **Внешний фотоэффект**
- **Фотоны**
- **Эффект Комптона**
- **Рентгеновское излучение**
- **Давление света**

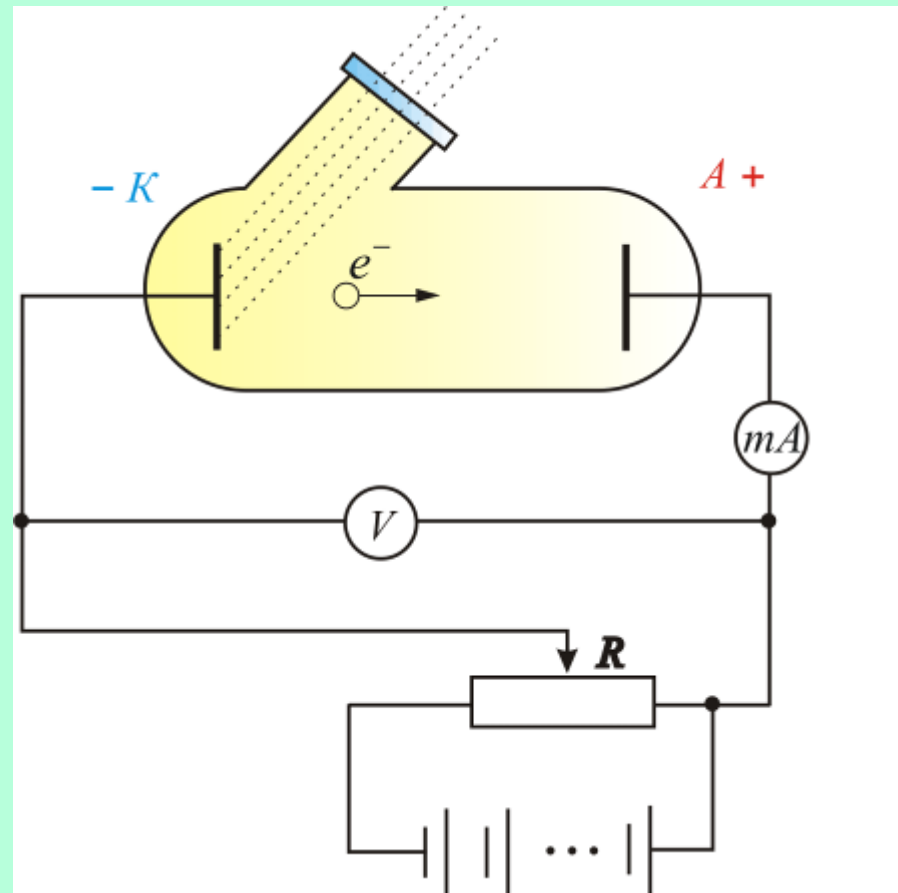
1. Внешний фотоэффект

Внешний фотоэффект (фотоэлектронная эмиссия) - испускание электронов твердыми и жидкими телами под действием электромагнитного излучения.

Внутренний фотоэффект – это вызванные электромагнитным излучением переходы электронов внутри полупроводника или диэлектрика из связанных состояний в свободные без вылета наружу.

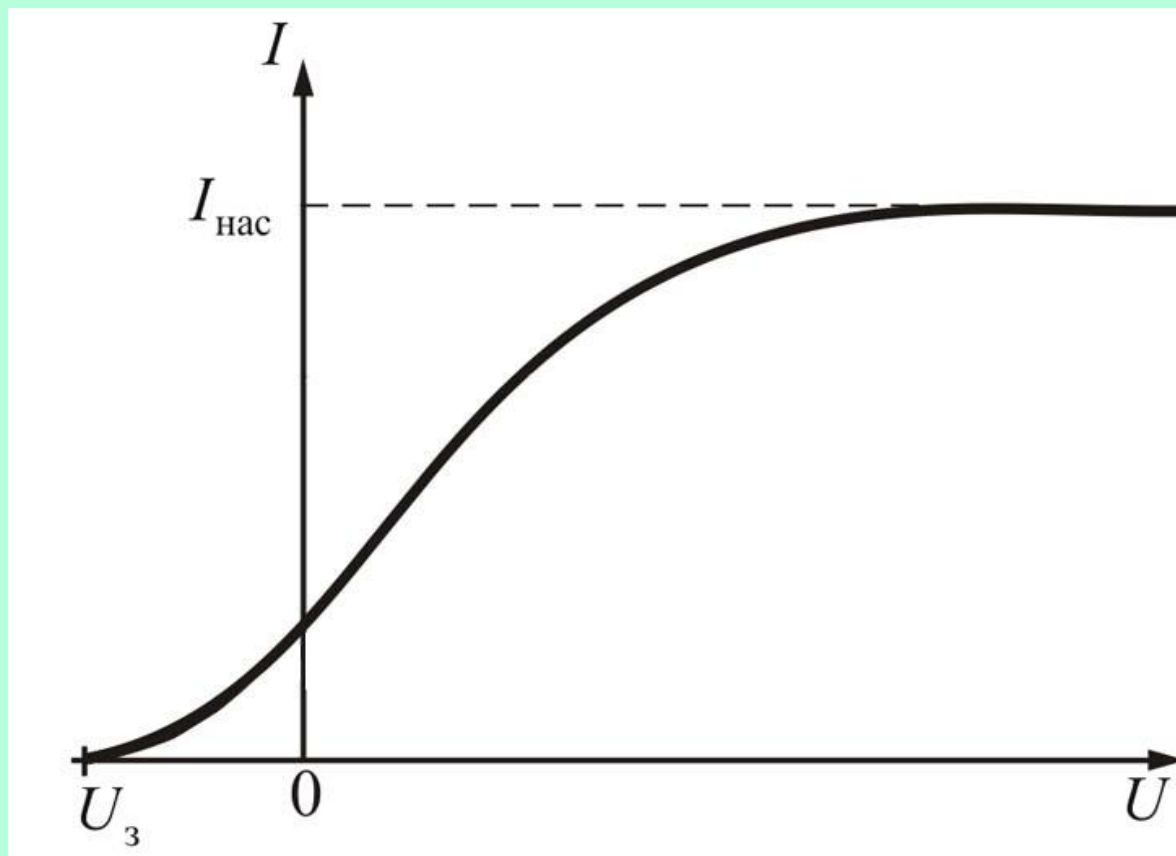
Схема для изучения фотоэффекта:

При освещении катода происходит **испускание им электронов**, которые достигают анода при включении электрического поля.



Вольтамперная характеристика

(при неизменном световом потоке)



При не очень большом напряжении фототок достигает **насыщения** – все электроны, испускаемые катодом, достигают анода.

Сила тока насыщения определяется количеством электронов, испускаемых катодом за секунду под действием света:

$$I_{\text{нас.}} = ne$$

n – число электронов, испускаемых катодом за 1 с.

Чтобы сила тока обратилась в нуль, необходимо приложить **задерживающее напряжение U_3** :

$$\frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = eU_3$$

- при таком напряжении **ни один из электронов**, даже обладающий при вылете из катода максимальной скоростью v_{max} , **не может достигнуть анода.**

Законы фотоэффекта:

1. **Закон Столетова**: при фиксированной частоте падающего света **число фотоэлектронов**, вырываемых из катода в единицу времени, **пропорционально интенсивности света**.
2. **Максимальная скорость фотоэлектронов не зависит от интенсивности** падающего света, а определяется только его частотой ν .
3. Для каждого вещества существует **красная граница фотоэффекта**, т.е. минимальная частота ν_0 света (зависящая от химической природы вещества и состояния его поверхности), ниже которой фотоэффект невозможен:

$$\nu \geq \nu_0 = \frac{A}{h}$$

A – работа выхода электронов.

Объяснение наблюдаемых экспериментально закономерностей было дано Эйнштейном:

свет не только испускается (Планк), но и распространяется, и поглощается веществом отдельными порциями (квантами), энергия которых

$$\varepsilon = h\nu.$$

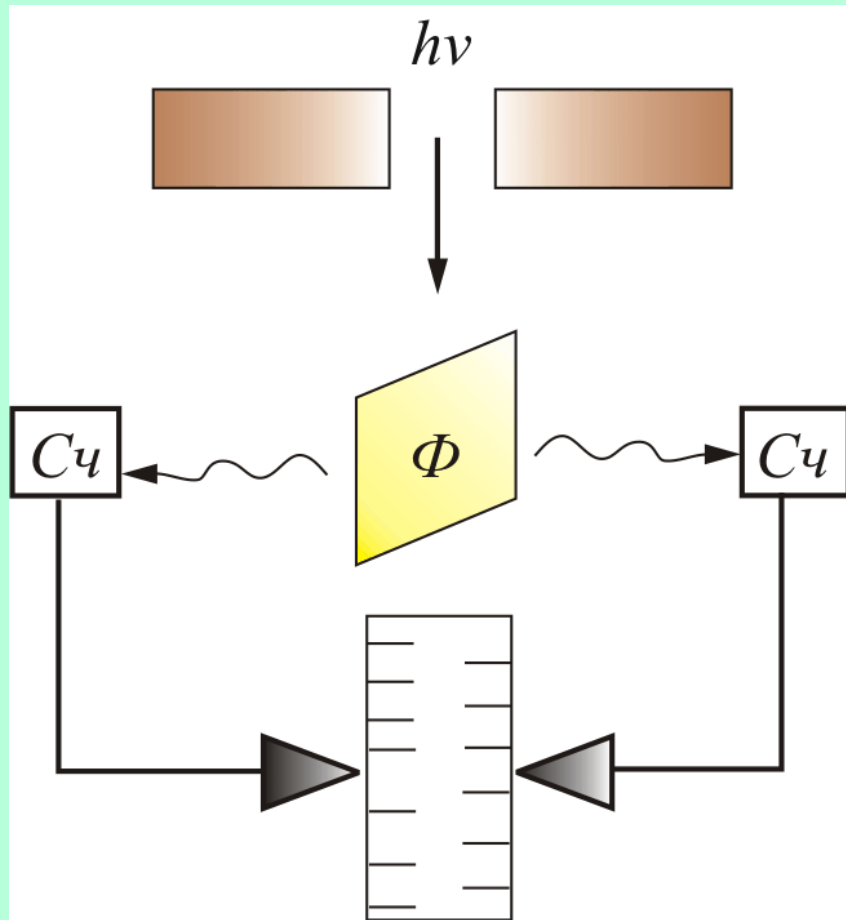
Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:

$$h\nu = \frac{mv_{\max}^2}{2} + A.$$

A – работа выхода электронов.

Опыт Боте

(подтверждение гипотезы Эйнштейна)



Тонкая металлическая фольга Φ помещена между двумя газоразрядными счетчиками $Сч$.

При облучении рентгеновскими лучами Φ становится источником рентгеновского излучения.

При попадании рентгеновских лучей счетчик срабатывает и с помощью спец. устройства делает метку на движущейся ленте.

Метки располагались на ленте **хаотично**, что свидетельствует о квантовой природе излучения – в каждом акте испускания направление движения частиц свое.

2. ФОТОНЫ

Корпускулярно-волновой дуализм – двойственность природы света, который в ряде явлений обнаруживает волновые свойства, в ряде других – корпускулярные (**чем меньше длина волны, тем меньше проявляются волновые свойства**).

Свойства фотонов:

1. Масса фотона равна нулю.
2. Скорость движения **всегда** равна скорости света (при движении в веществе происходят процессы поглощения и испускания фотонов атомами вещества, в результате **средняя скорость фотонов $< c$**).

Импульс фотона:

k – волновое число.

$$p = \frac{E}{c} = \frac{\hbar\omega}{c} = \hbar \cdot \frac{2\pi}{\lambda} = \hbar k$$

$$\vec{p} = \hbar \vec{k}$$

Взаимодействие фотонов с веществом (например, при прохождении света через дифракционную решетку) приводит к **перераспределению фотонов** в пространстве и **возникновению дифракционной картины** на экране.

- Освещенность в различных точках экрана прямо пропорциональна вероятности попадания фотонов в эти точки.
- Освещенность пропорциональна интенсивности света I .
- Интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды A^2 .

Итак, *квадрат амплитуды световой волны в какой-либо точке есть мера вероятности попадания фотонов в эту точку.*

3. Эффект Комптона

При изучении рассеяния рентгеновского излучения различными веществами было обнаружено, что в рассеянных лучах помимо излучения первоначальной длины волны λ содержится лучи большей длины волны λ' .

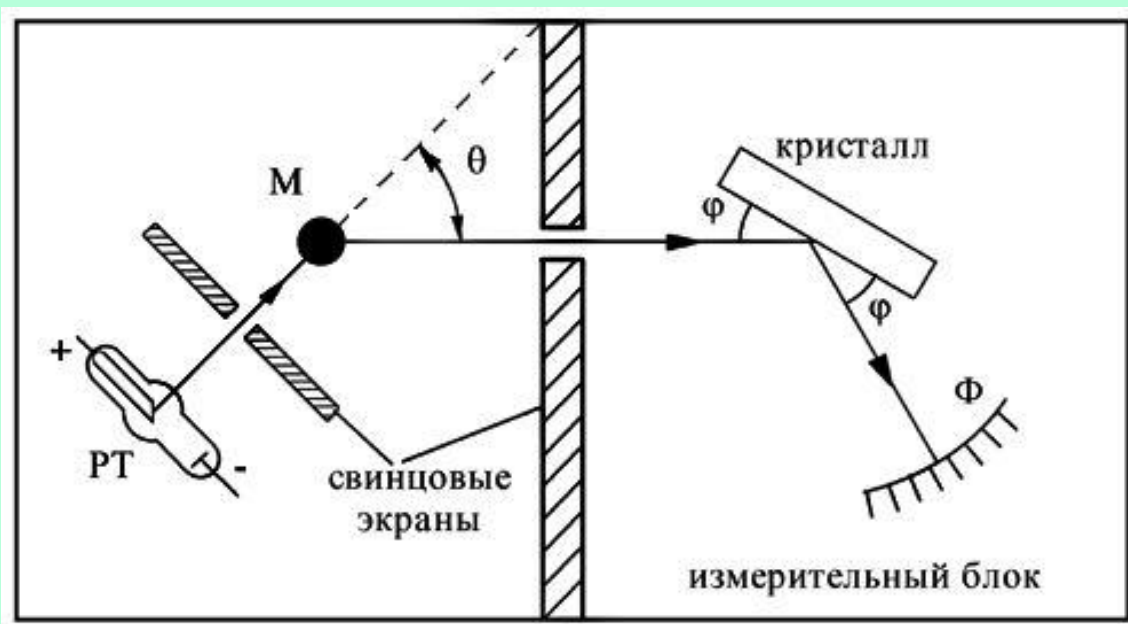


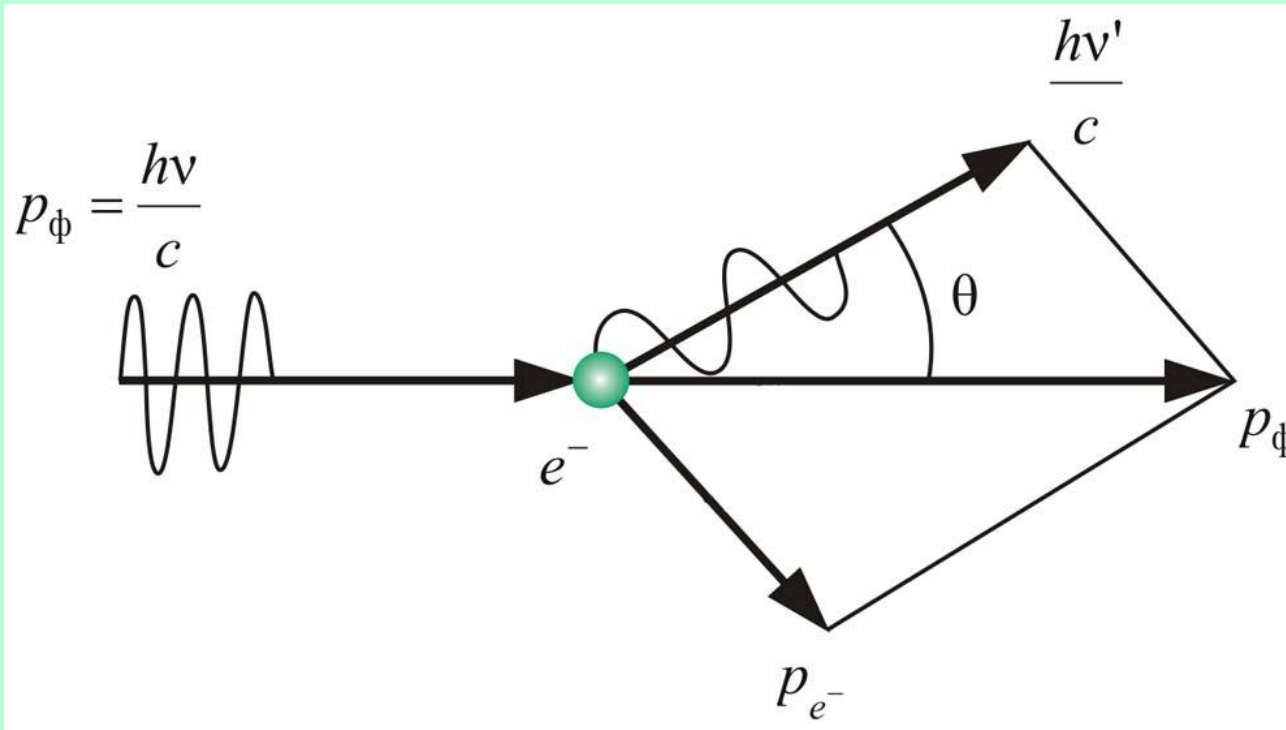
Схема опыта Комптона:

РТ – рентгеновская трубка

М – мишень

θ – угол рассеяния

Объяснение явления возможно, если рассматривать **рассеяние как процесс упругого столкновения фотона со слабо связанными электронами атома:**



При рассеянии на покоящемся электроне фотон отдает ему часть энергии.

p_ϕ – импульс фотона до столкновения;

p_{e^-} – импульс электрона;

p_ϕ' – импульс фотона после столкновения;

θ – угол рассеяния.

Экспериментально доказано, что разность $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ не зависит от длины волны λ падающего излучения и природы рассеивающего вещества, а определяется только углом рассеяния θ :

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_C (1 - \cos \theta)$$

λ_C — *комptonовская длина волны*:

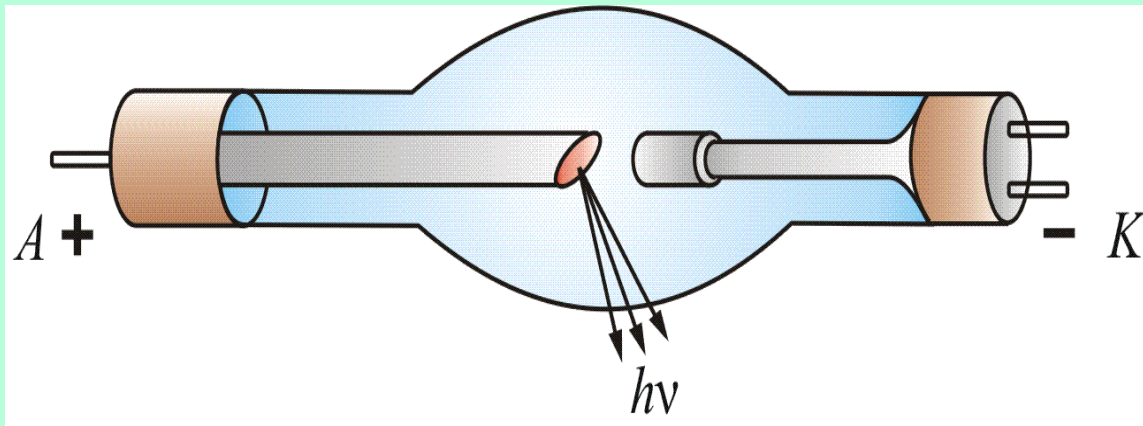
$$\lambda_C = \frac{2\pi\hbar}{mc}$$

Для электрона:

$$\lambda_C = 2,426 \text{ пм.}$$

4. Рентгеновские излучение

При бомбардировке стекла и металлов быстрыми электронами возникает излучение, обладающее большой проникающей способностью – **рентгеновские лучи** (x-rays): $\lambda = 10^{-5} \div 10^2$ нм.



Принцип работы рентгеновской трубки:
электроны, покидающие *K* за счет термоэлектронной эмиссии, сильно ускоряются в мощном электрическом поле между *K* и *A* (Cu, Pt).

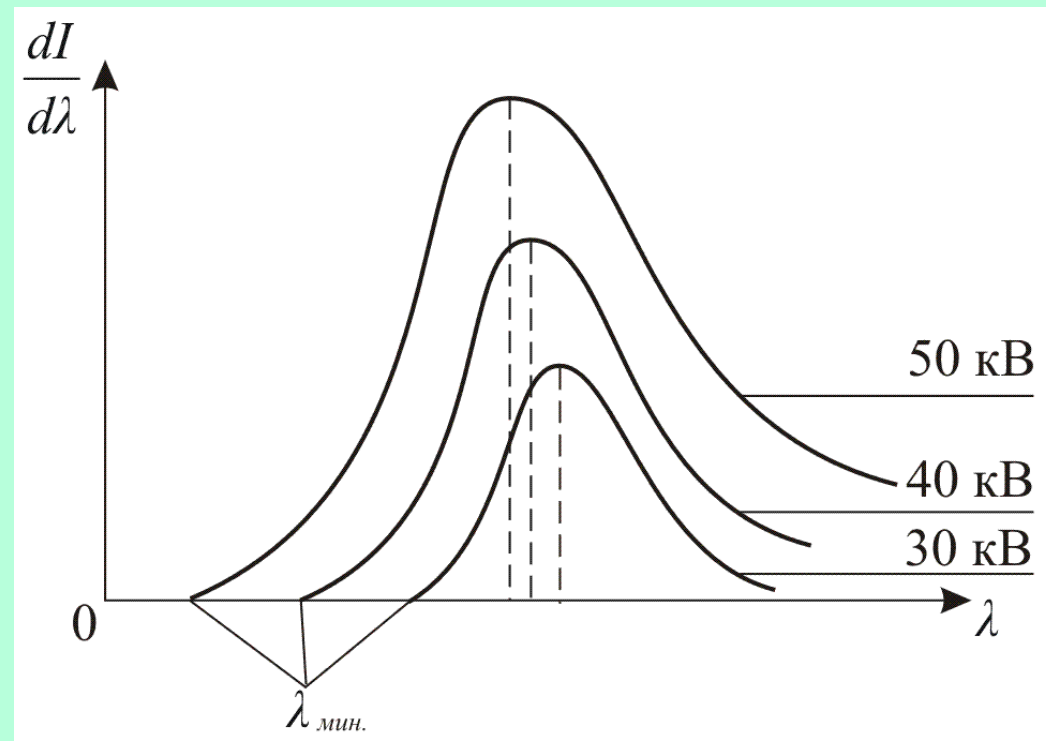
При попадании в вещество анода электроны затормаживаются, становясь источником электромагнитных волн: 1-3% энергии электронов превращается в излучение, остальное в тепло.

Излучение, обусловленное торможением электронов, называется **тормозным излучением**:

- при $U \sim 50$ кВ скорость электронов $v = 0,4 c$.
- в бетатроне энергия электронов ~ 10 МэВ, скорость $v = 0,99995 c$.

Помимо тормозного излучения, при большой скорости электронов возникает также **характеристическое излучение**, обусловленное возбуждением внутренних электронных оболочек атомов анода.

Кривые распределения интенсивности тормозного рентгеновского излучения по длинам волн



- Распределение интенсивности излучения по длинам волн зависит от материала анода рентгеновской трубки и приложенного напряжения;
- со стороны коротких волн эта кривая начинается с некоторой **пороговой минимальной длины волны**, зависящей от приложенного напряжения (*коротковолновая граница рентгеновского спектра*).
- Совокупность лучей со всеми возможными длинами волн образует непрерывный спектр,
- длина волны, соответствующая максимальной интенсивности, в 1,5 раза превышает минимальную длину волны

Экспериментально установлено, что

$$\lambda_{\min} (\text{нм}) = \frac{1239}{U(\text{В})}$$

Существование коротковолновой границы непосредственно вытекает из квантовой природы излучения:

если излучение возникает за счёт энергии, теряемой электроном при торможении, то энергия кванта $h\nu$ не может превысить энергию электрона eU :

$$h\nu \leq eU$$

Тогда

$$\nu_{\max} = \frac{eU}{h},$$

$$\lambda_{\min} = \frac{c}{\nu_{\max}} = \frac{ch}{eU}.$$

5. Давление света

Максвелл: свет оказывает давление на препятствия, обусловленное силами, действующими со стороны электромагнитного поля волны на заряды в освещаемом теле.

С точки зрения квантовых представлений о свете:

- фотоны обладают импульсом.
- при столкновении фотонов с веществом часть фотонов отражается, а часть поглощается. **Оба процесса сопровождаются передачей импульса от фотонов к освещаемой поверхности.**
- Согласно II закону Ньютона, изменение импульса тела означает, что на тело действует сила светового давления $F_{\text{дав}}$.

- Давление света на поверхность есть
$$P = \frac{F_{\text{дав}}}{S}$$

Опыт Лебедева

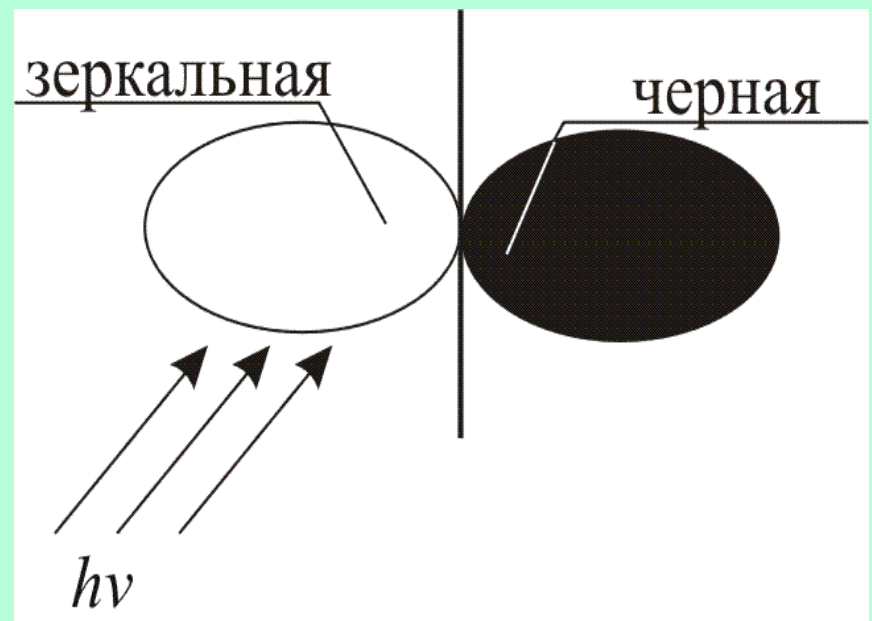
Прибор - очень чувствительные **крутильные весы**:

на тонкой кварцевой нити подвешена легкая рамка со светлыми и темными крыльшками толщиной 0.01 мм.

Свет оказывал разное давление на светлые (отражающие) и темные (поглощающие) крыльшки.

В результате на рамку действовал **вращающий момент**, который закручивал нить подвеса.

По углу закручивания нити определялось давление света.





Экспериментально выяснено,
что величина давления
зависит от интенсивности
света:

с ростом интенсивности растет
число фотонов,
взаимодействующих с
поверхностью тела, и,
следовательно, импульс,
получаемый поверхностью.

Мощные лазерные пучки
создают давление,
превышающее атмосферное.

Прибор Лебедева

Давление света равно

$$P = \frac{h\nu N}{cS} (1 + k) = I \frac{(1 + k)}{c}$$

I – интенсивность излучения;

S – площадь поверхности тела;

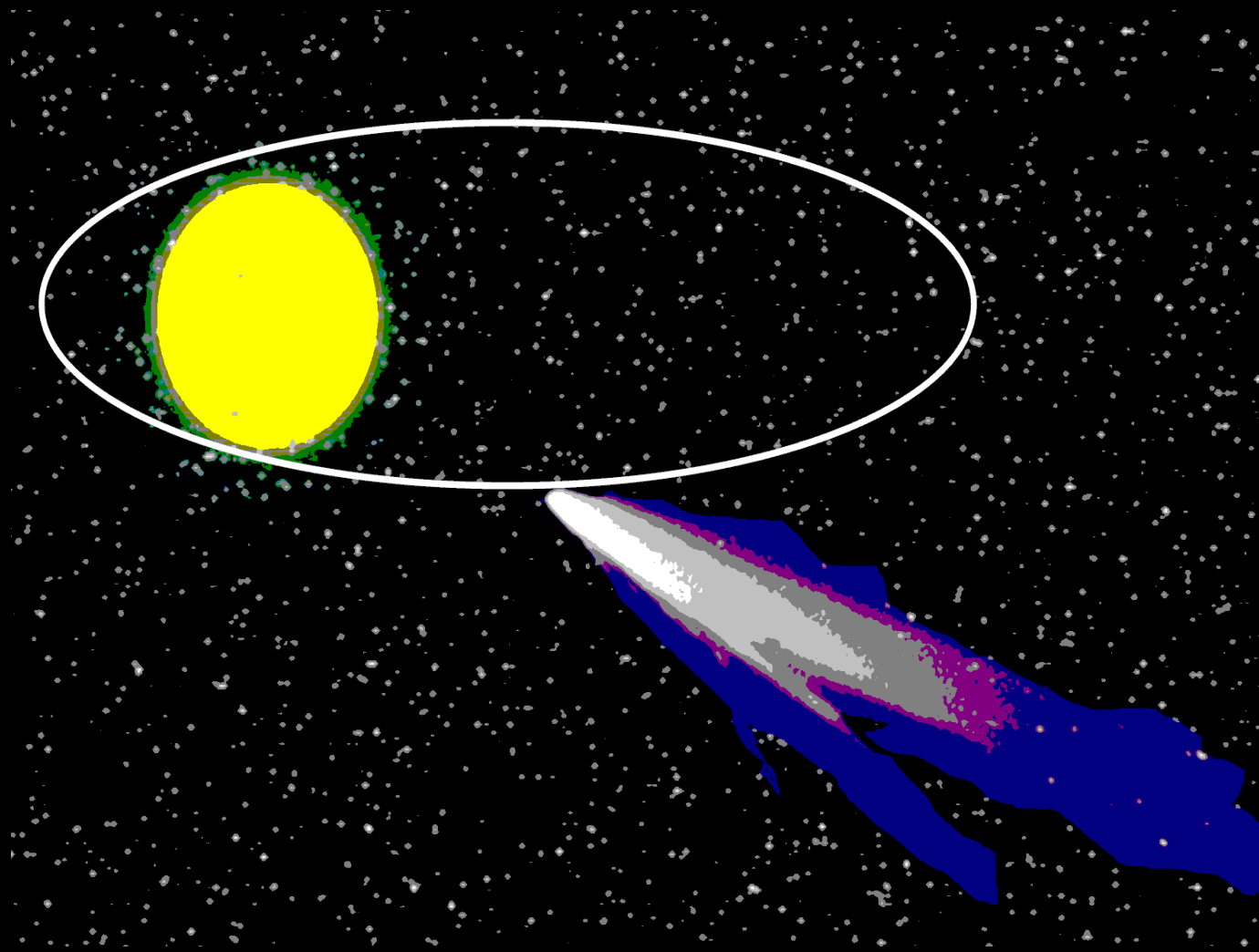
N – число фотонов, падающих на тело;

k – коэффициент отражения.

• при зеркальном отражении ($k = 1$) $P = \frac{2I}{c}$

• при полном поглощении ($k = 0$) - АЧТ $P = \frac{I}{c}$

т.е. световое давление на абсолютно черное тело в два раза меньше, чем на зеркальное.



С приближением к Солнцу под воздействием солнечного давления голова кометы принимает вид параболы.

Кометный хвост под давлением света отбрасывается от Солнца