

**КВАНТОВАЯ ПРИРОДА
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ**

Лекция 2

СОДЕРЖАНИЕ

- **ФОТОЭФФЕКТ**

 - Законны фотоэффекта

 - Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

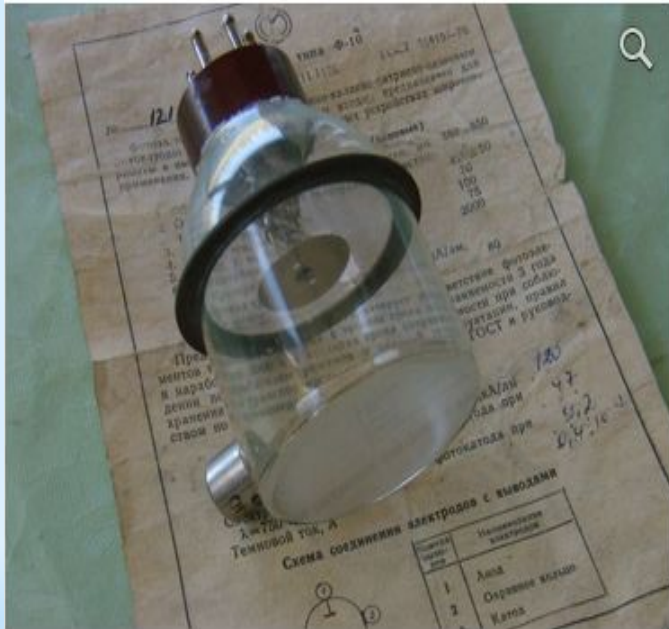
- **ФОТОНЫ**

- **ДАВЛЕНИЕ СВЕТА**

- **ЭФФЕКТ КОМПТОНА**

- **КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

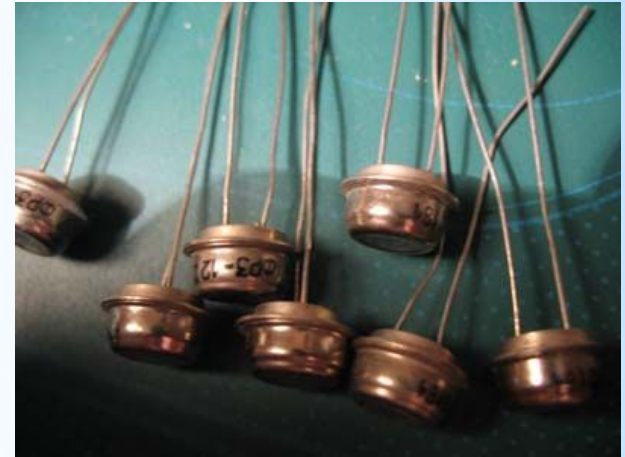
ФОТОЭФФЕКТ



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

Вентильный фотоэффект -
возникновение ЭДС (фото-ЭДС) при освещении
контакта двух разных полупроводников или
полупроводника и металла (при отсутствии
внешнего электрического поля)



Первые фундаментальные исследования фотоэффекта выполнены русским ученым *Александром Григорьевичем Столетовым.*

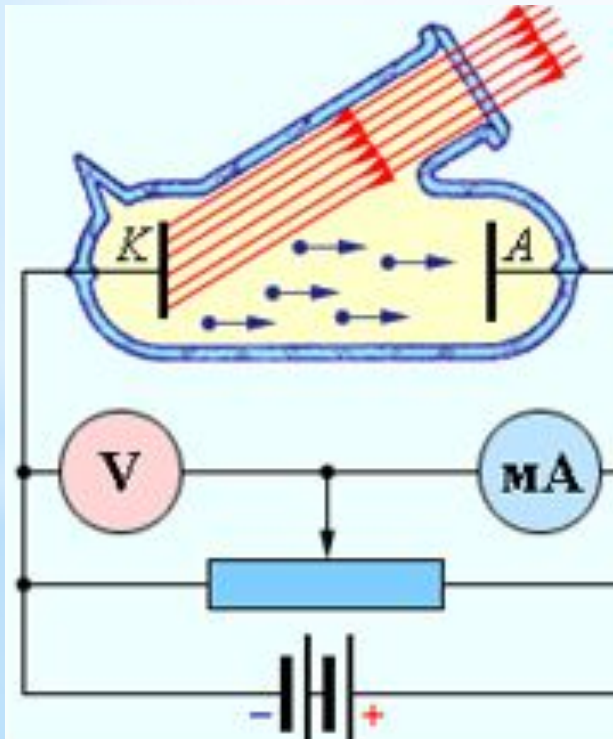
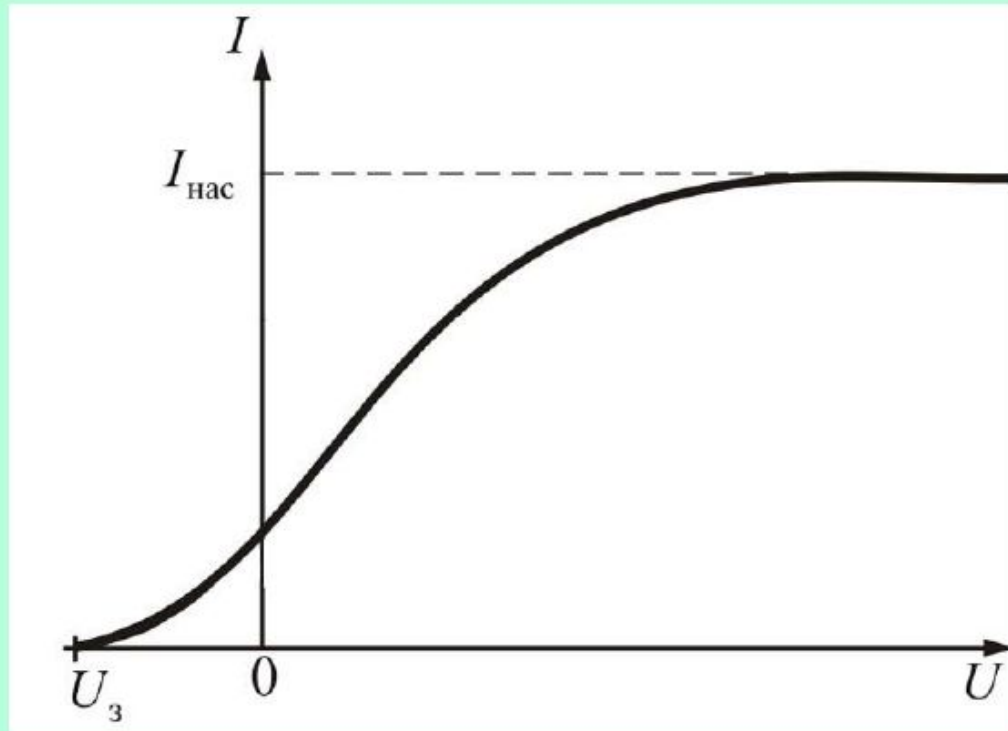


Схема для изучения фотоэффекта

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 Альбертом Эйнштейном:

Свет не только испускается (Планк), но и распространяется,
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 (зависит только от
химической природы вещества и состояния его
поверхности).

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 покоя отсутствует
- 2.** Его единственное состояние - это движение с предельной скоростью c , одинаковой во всех системах отсчета.

Фотон в состоянии покоя - понятие, лишенное физического смысла.

Формула для **массы фотона** может быть непосредственно выведена из формулы Эйнштейна, выражающей взаимосвязь массы и энергии в теории относительности:

$$m = \frac{h\nu}{c^2}. \quad (1)$$

Импульс фотона p получим из связи импульса с энергией:

$$p_\gamma = \frac{\varepsilon}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (2)$$

Фотон, как и любая другая частица, характеризуется энергией, массой и импульсом. Выражения (1) и (2) связывают **корпускулярные** характеристики фотона — массу, импульс и энергию — с **волновой** характеристикой света — его частотой ν .

ДАВЛЕНИЕ СВЕТА

Исследовано основателем первой русской научной школы физиков, член-корреспондентом Российской АН, почетным членом Британского Королевского института, профессором Московского университета **Лебедевым Петром Николаевичем** в **1901** году

В своих опытах Лебедев П.Н. установил, что **давление света зависит от интенсивности света и от отражающей способности тела.**



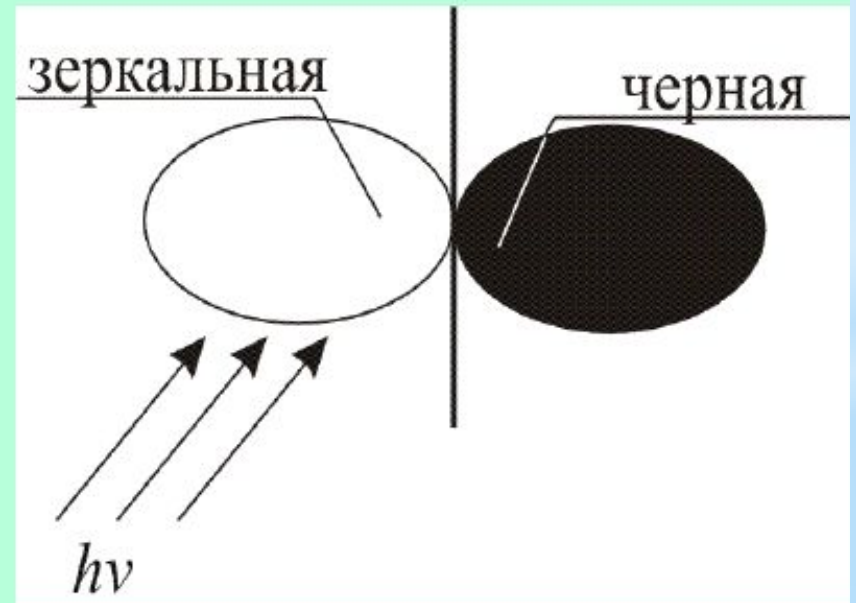
Прибор - очень чувствительные **крутильные весы**:

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

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

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

По углу закручивания нити определялось давление света.





Прибор Лебедева

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.

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

I – интенсивность излучения;

S – площадь поверхности тела;

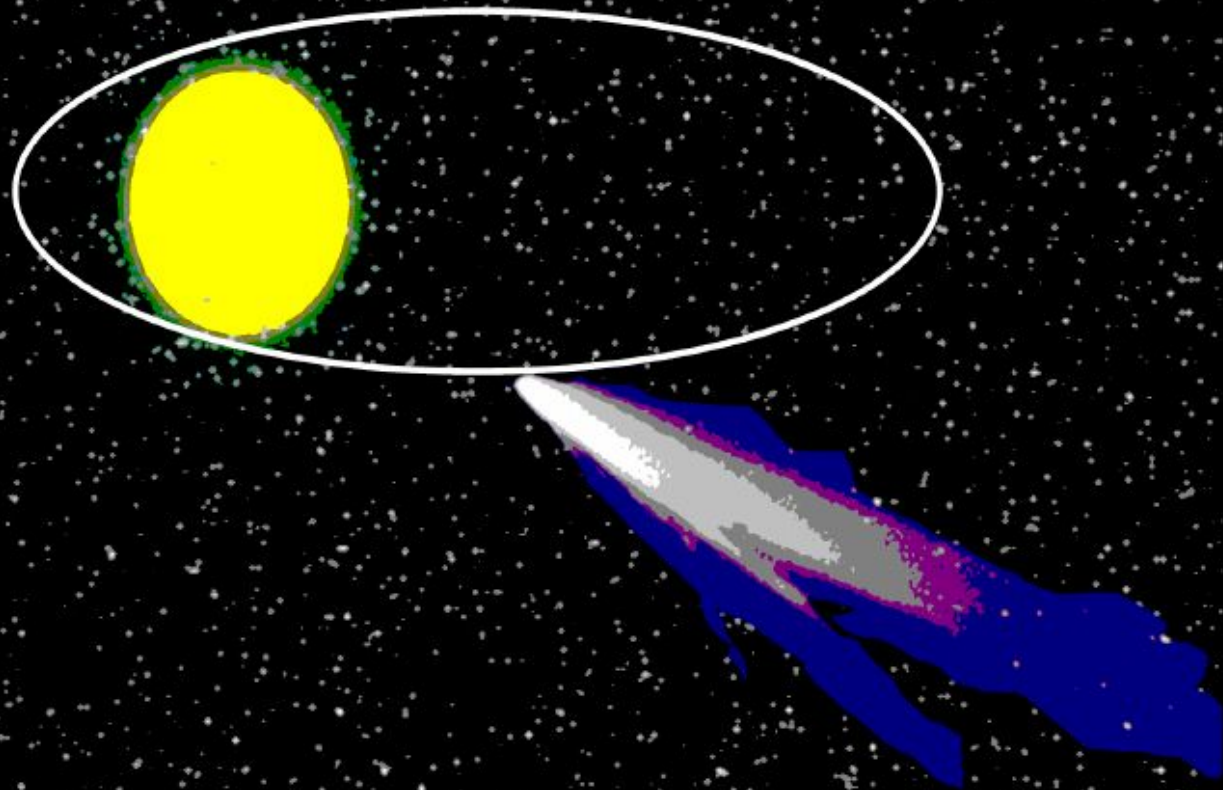
N – число фотонов, падающих на тело;

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.

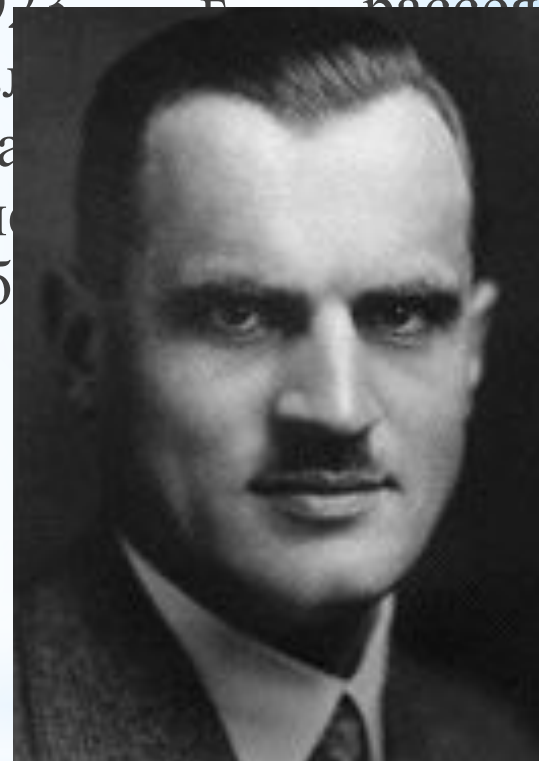
Кометный хвост под давлением света отбрасывается от Солнца

*** Если зачерненную пластинку, на которую перпендикулярно поверхности падает свет, заменить на зеркальную той же площади, то световое давление:**

- * 1. уменьшится в 2 раза**
- * 2. увеличится в 3 раза**
- * 3. увеличится в 2 раза**
- * 4. останется неизменным**

ЭФФЕКТ КОМПТОНА

Наиболее полно корпускулярные свойства света проявляются в эффекте Комптона. Американский физик **Артур Комптон** (1892—1962), исследуя в 1923 г. рассеяние монохроматического рентгеновского излучения на легких атомах (парафин, бор), обнаружил в спектре рассеянного излучения наряду с излучением той же длины волны наблюдается также более короткое излучение



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' .

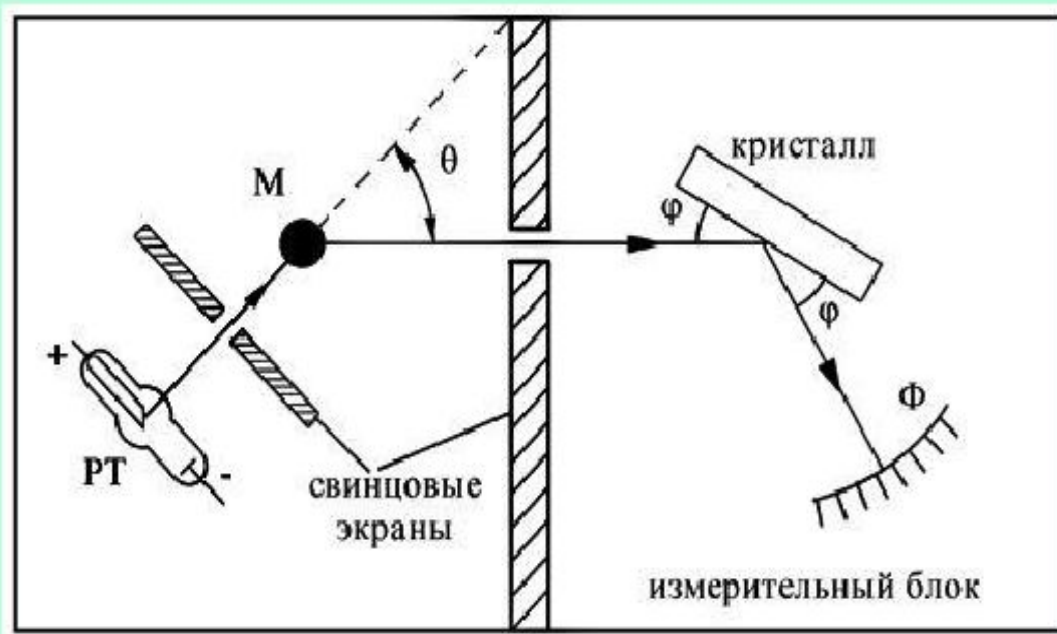


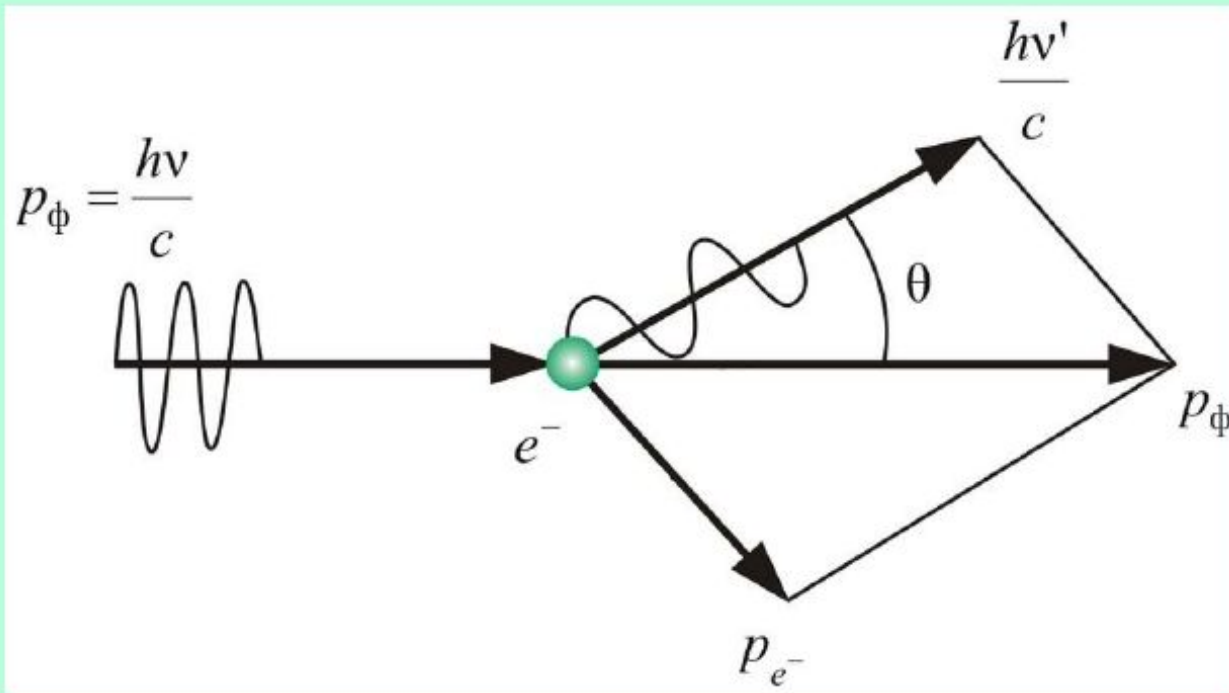
Схема опыта Комптона:

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 покоем 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*:

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

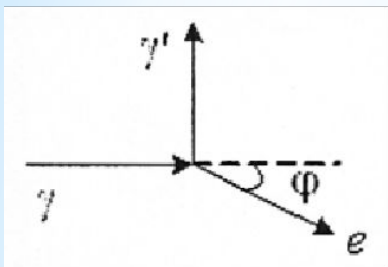
Для электрона:

$$\lambda_C = 2,426 \text{ пм.}$$

* В результате эффекта Комптона:

- * 1. в рассеянном излучении появляются составляющие с длинами волн, большими длины волны падающего излучения
- * 2. с поверхности вещества выбиваются электроны
- * 3. возникает односторонняя проводимость вещества
- * 4. происходит цепная реакция деления тяжелых ядер

На рисунке показаны направления падающего фотона (γ), рассеянного фотона (γ') и электрона отдачи (e). Угол рассеяния равен 90° , направление движения электрона отдачи составляет с направлением падающего фотона $\varphi = 30^\circ$.



Если импульс электрона отдачи по модулю равен p_e , то импульс рассеянного фотона равен:

1. $2\sqrt{3}p_e$
2. $0,5p_e$
3. $1,5\sqrt{3}p_e$
4. $\sqrt{3}p_e$

КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ

Свет – диалектическое единство противоположных свойств: он одновременно обладает свойствами непрерывных электромагнитных волн и дискретных фотонов.

При уменьшении длины волны все явственнее проявляются **корпускулярные свойства**.

Волновые свойства коротковолнового излучения проявляются **слабо** (например, рентгеновское излучение).

Наоборот, у длинноволнового (инфракрасного) излучения **квантовые свойства проявляются слабо**.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА И ИНТЕРНЕТ - РЕСУРСЫ

1. Иродов И.Е. Квантовая физика. Основные законы: Учебное пособие для вузов.- М.: Лаборатория базовых знаний, 2001 – 272 с.
2. Джанколи Д. Физика .- М.: Мир, 1998, т.2. - 667 с.
3. https://docviewer.yandex.ru/?url=ya-serp%3A%2F%2Fportal.tpu.ru%2FSHARED%2Fe%2FELENALIS%2Frabota%2F%25D0%259B%25D0%25B5%25D0%25BA%25D1%2586%25D0%25B8%25D0%25B8%2520%25D1%2584%25D0%25B8%25D0%25B7%25D0%25B8%25D0%25BA%25D0%25B0%25203%2FLect_16.pdf&page=5&lang=ru&c=558023df1260