



ВЫСОКАЯ ЭНЕРГИЯ, ВЫСОКАЯ  
ЧАСТОТА, МАЛАЯ ДЛИНА ВОЛНЫ

# Лекция 1. Рентгеновское излучение

- **План:**

- **1. ИСТОЧНИКИ И ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**
  - **2. ТОРМОЗНОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. СПЕКТР ТОРМОЗНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**
  - **3. ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СПЕКТР ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**
  - **4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ**
-

# 1. ИСТОЧНИКИ И ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ



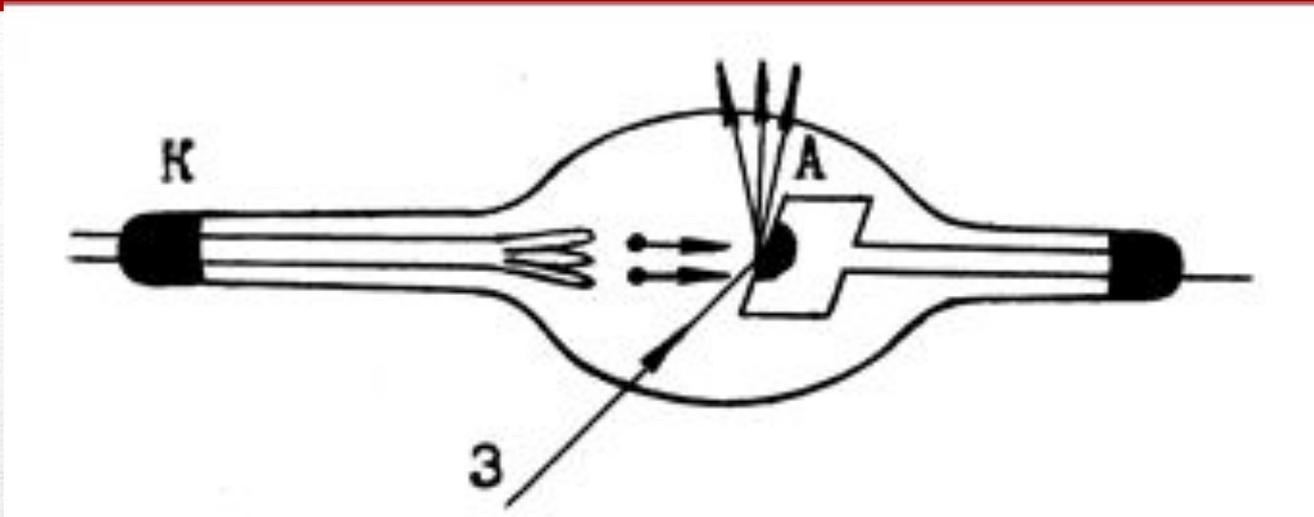
**Немецкий физик  
Вильгельм Конрад Рентген  
(1845-1923)**

**Вильгельм Рентген  
первым удостоен  
Нобелевской премии  
по физике  
в 1901 г.**

# ОТКРЫТИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ



В январе 1896 года  
В. Рентген опубликовал  
первое в истории  
изображение костей  
руки живого человека  
(Берты Рентген –  
жены профессора)



Рентгеновская трубка представляет собой стеклянный баллон с двумя впаянными основными электродами: анодом (А) и катодом (К).

**Катод** выполнен в виде спирали из тугоплавкого металла (W, Pt), через которую пропускают ток. Вследствие термоэлектронной эмиссии, нагретая спираль испускает электроны.

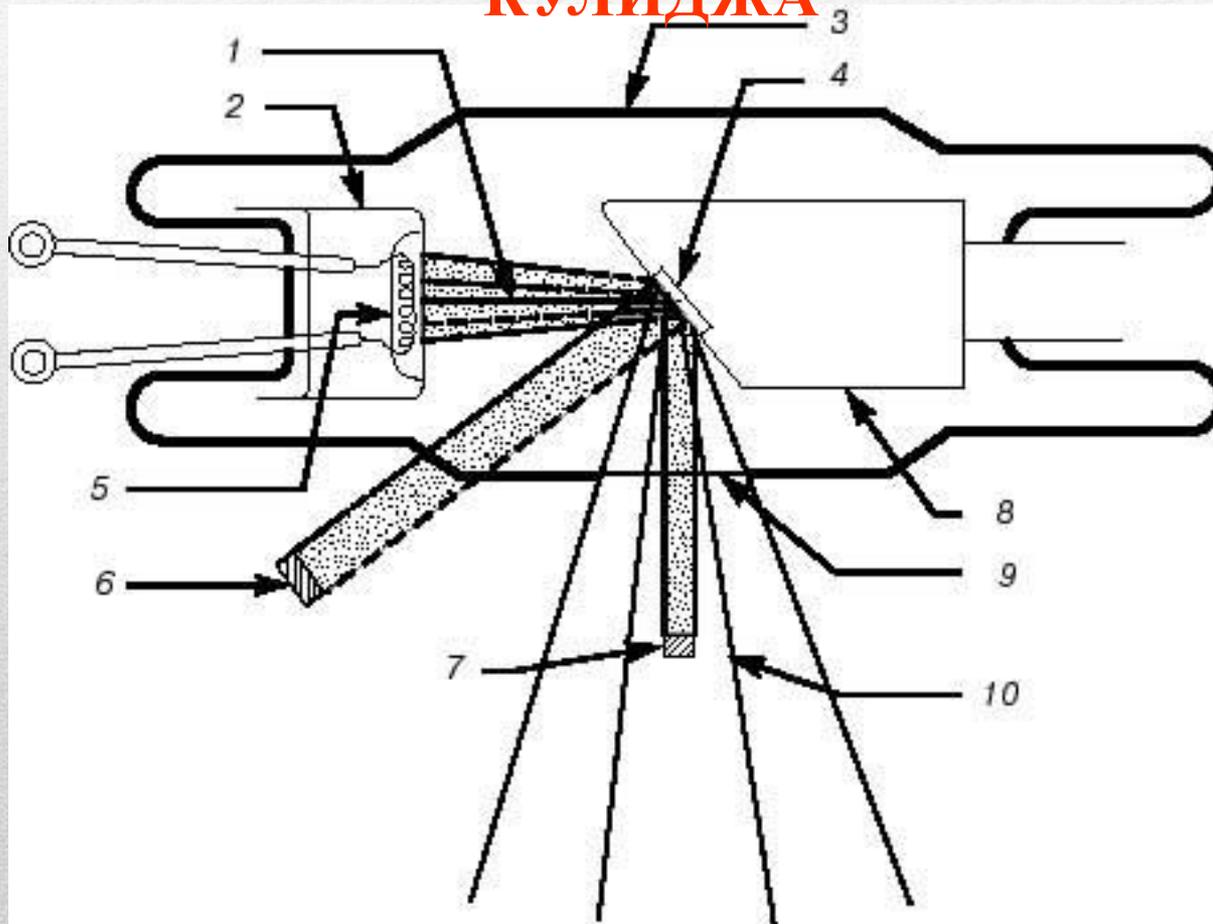
**Анод** представляет собой цилиндр, торец которого срезан под углом. В скошенную поверхность торца анода впаяна пластинка из тугоплавкого металла (W, Pt, Cu, Ag и т.д.) – «зеркало» (З). В баллоне создается высокое разряжение  $P = 10^{-6} - 10^{-7}$  мм.рт.ст.

Между анодом и катодом приложено высокое напряжение – 40÷200 кВ, а в некоторых случаях даже до 1000 кВ.

---

# ИСТОЧНИКИ РЕНТГЕНОВСКОГО

## ИЗЛУЧЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ ТРУБКА КУЛИДЖА



- 1-электроны
- 2-катод
- 3-стекл. корпус
- 4-W антикатод
- 5-нагрев катода
- 8-Cu анод
- 9-окно
- 10-рентгеновское излучение

# ИСТОЧНИКИ РЕНТГЕНОВСКОГО

## ИЗЛУЧЕНИЯ АКСИАЛЬНАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ ТРУБКА



Электронны, испускаемые нитью накала, ускоряются электрическим полем до скоростей  $\sim 2 \cdot 10^8$  м/с. Узкий пучок электронов и направляется на анод, который, благодаря косому срезу, направляет возникающее на «зеркале» рентгеновское излучение в выходное окно трубки.

К.п.д. рентгеновской трубки составляет всего 1-5 %, а остальная энергия электронного пучка превращается во внутреннюю энергию. По этой причине тело анода изготавливают из хорошо проводящих тепло материалов (Cu) и часто полым для подвода охлаждающей жидкости.

---

- X-лучи - вид электромагнитного излучения, имеющего меньшую длину волны, чем ультрафиолетовые электромагнитные волны. Длина волны X-лучей колеблется от  $70 \text{ нм}$  до  $10^{-5} \text{ нм}$ .
  - Чем короче длина волны X-лучей, тем больше энергия их фотонов и больше проникающая способность. X-лучи со сравнительно большой длиной волны (более  $10 \text{ нм}$ ), называются *мягкими*.
  - Длина волны  $1 - 10 \text{ нм}$  характеризует *жесткие* X-лучи. Они обладают огромной проникающей способностью.
-

- **2. ТОРМОЗНОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ.  
СПЕКТР ТОРМОЗНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ**
-

- $\varepsilon = h\nu$ ,
- $E_e = eU$ ,  $U$  – ускоряющее напряжение (напряжение между катодом и анодом).

- $E_e = \varepsilon_k$ ,  $eU = h\nu_k$ .

- В большинстве же случаев энергия электронов теряется в результате ряда последовательных «столкновений» с электронными облаками разных атомов, превращаясь при этом в тепло или кванты электромагнитного излучения с частотой  $\nu$  меньшей, чем  $\nu_k$  ( $\nu \leq \nu_k$ ):

$$h\nu = h \frac{c}{\lambda} \leq eU \quad \lambda \geq \frac{hc}{eU}$$

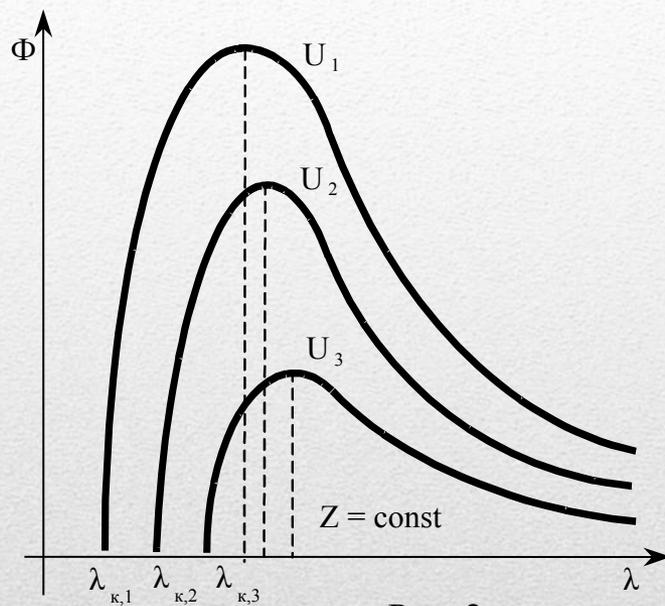


Рис. 2

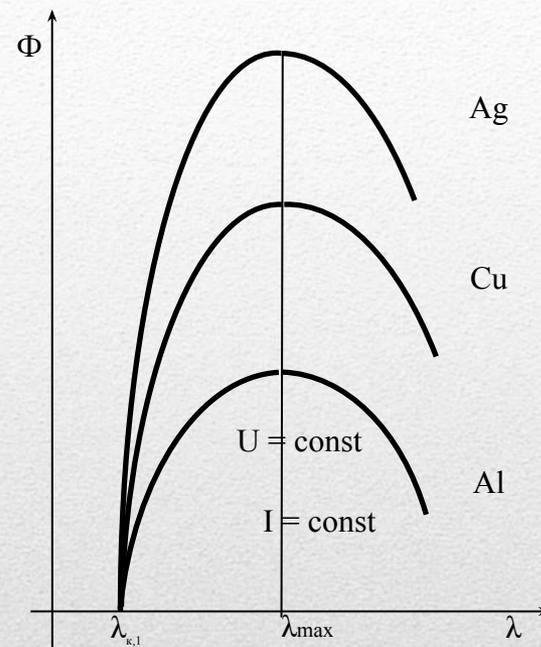


Рис. 3

Т.к. условия взаимодействия электронов с атомами анода могут быть самыми разными, то спектр излучения в таком процессе будет сплошным (непрерывным). Он представляет собой плавную несимметричную кривую, которая имеет резкую границу ( $\lambda_k$ ) со стороны коротких длин волн, четко выраженный максимум и постепенное снижение интенсивности в длинноволновой области. С ростом напряжения повышается интенсивность излучения и весь спектр смещается в сторону более коротких длин волн. Связь между ускоряющим напряжением  $U$  (кВ) и коротковолновой границей соответствующего спектра –  $\lambda_k$  (нм) имеет вид:

$$\lambda_k(\text{нм}) = \frac{hc}{eU} = \frac{1,24}{U(\text{кВ})}.$$

При этом для данного ускоряющего напряжения между  $\lambda_k$  и длиной волны  $\lambda_{(\text{max})}$ , на которую приходится максимум спектра, существует постоянное соотношение:

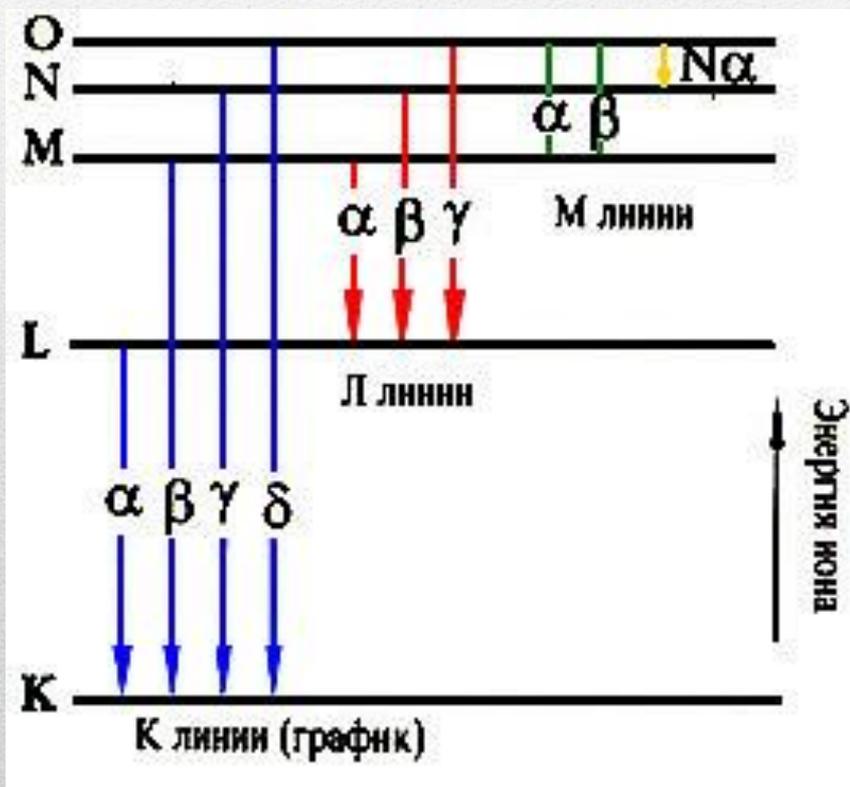
$$\lambda_{\text{max}} = \frac{3}{2} \lambda_k = \frac{1,86}{U(\text{кВ})}.$$

---

- Испускательная способность рентгеновской трубки зависит от величины ускоряющего напряжения, анодного тока (температуры накала катода) и материала (атомного номера  $Z$ ) «зеркала» анода. В общем случае мощность тормозного излучения:
    - $\Phi = kIU^2Z,$
    - где  $k = 10^{-9} \text{ (В}\cdot\text{с)}^{-1}$ ,  $I$  – сила анодного тока;  $U$ – напряжение между анодом и катодом;  $Z$  – порядковый номер материала «зеркала» анода в
    - таблице Менделеева.
-

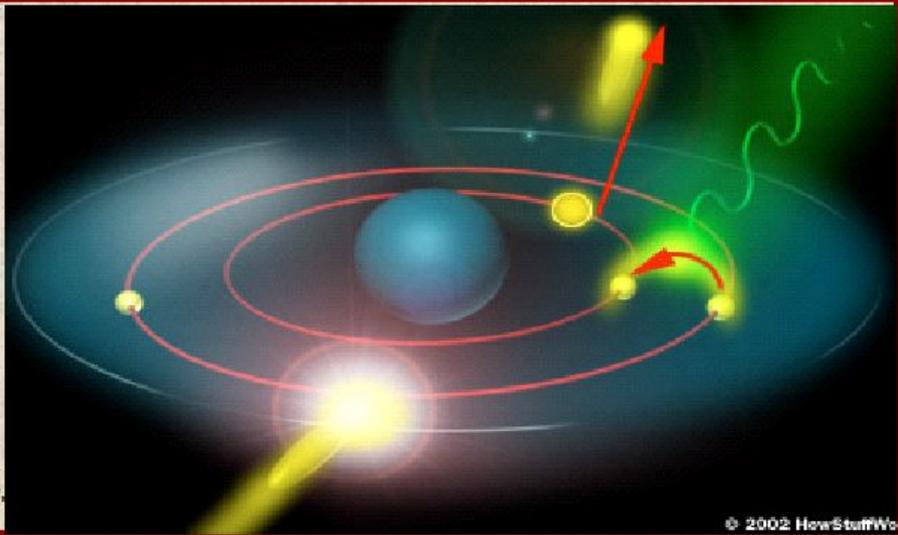
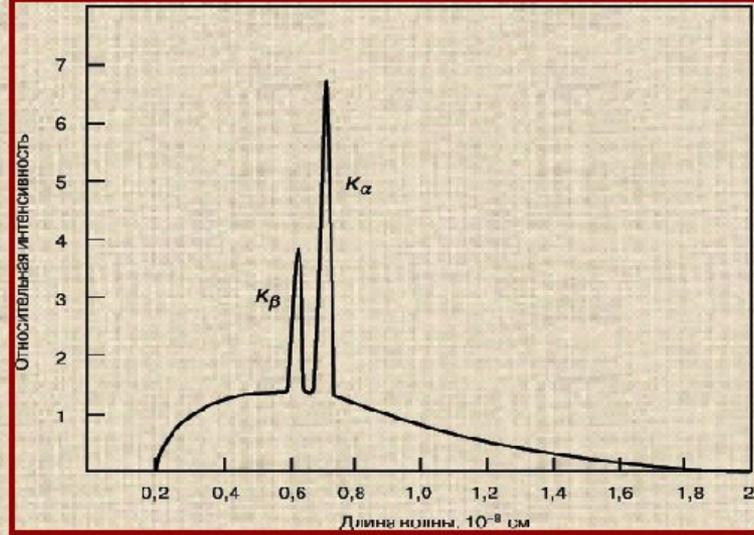
# 3. ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

## СПЕКТР ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО О ИЗЛУЧЕНИЯ

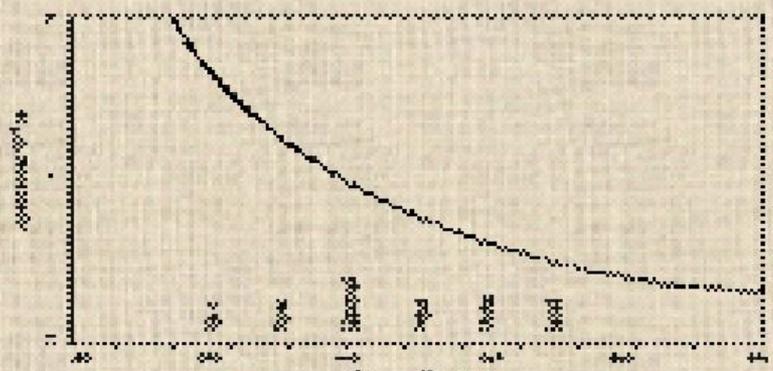


Поэтому спектр излучения атомов имеет вид дискретного спектра, состоящего из отдельных линий.

# ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ



© 2002 HowStuffWorks



$$\sqrt{\nu} = A(Z - B),$$

## Нобелевские премии за исследования рентгеновских лучей и открытия, сделанные с их помощью (1901-1988 гг)

- в 1901 г. Нобелевская премия за открытие X-лучей (В.Рентгену);
- в 1913 г. Генри Мозли изучая рентгеновские спектры элементов доказал: порядковый номер элемента в периодической системе численно равен заряду ядра его атома. Но получить высшую научную награду Мозли не довелось: он трагически погиб через два года после своего открытия при высадке английского десанта в проливе Дарданеллы;
- в 1914 г. Нобелевская премия за открытие дифракции рентгеновских лучей (М. фон Лауэ);
- в 1915 г. Нобелевская премия за изучение структуры кристаллов с помощью рентгеновских лучей присуждена отцу и сыну Брэггам Уильям Генри и Уильям Лоренс, которые заложили основы рентгено-структурного анализа;
- в 1917 г. Нобелевская премия за открытие характеристического рентгеновского излучения (Чарлзу Баркле); Поскольку во время войны поездки были ограничены, церемонию награждения пришлось отложить, и только в 1920 г. Баркла смог прочитать свою Нобелевскую лекцию "Характеристическое рентгеновское излучение";
- в 1922 г. Нобелевская премия за разработку теории периодической системы элементов, используя закономерности изменения рентгеновских спектров (Нильсу Бору);
- в 1922 г. Открытие элемента Гафний по рентгеновским спектрам (А.Довийе);
- в 1924 г. Нобелевская премия за исследования спектров в диапазоне рентгеновских лучей (К.Сигбану);
- в 1925 г. Открытие элемента Рений по рентгеновским спектрам (супруги Ноддак)

## Нобелевские премии за исследования рентгеновских лучей и открытия, сделанные с их помощью (1901-1981 гг)

- в 1927 г. Нобелевская премия за открытие рассеяния рентгеновских лучей на свободных электронах вещества (А.Комптон). Артур Комптон в 1923 г. обнаружил эффект (назван его именем), который сыграл крайне важную роль в развитии квантовой теории в 20-х гг;
- в 1936 г. Нобелевская премия за вклад в изучение молекулярных структур с помощью дифракции рентгеновских лучей и электронов (П.Дебаю);
- в 1946 г. Нобелевская премия по физиологии и медицине Герману Меллеру за обнаружение и изучение мутаций под действием рентгеновских лучей;
- в 1964 г. Дороти Кроуфут-Ходжкин (англ) – НП по химии: методом рентгеноструктурного анализа она определила строение белков и ряда биологически активных соединений.
- 1962 и 1988 гг – НП за открытие структуры молекул гемоглобина, дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) и белков, соединений, ответственных за фотосинтез, лекарственных препаратов с помощью рентгеновских лучей;
- в 1979 г. Нобелевская премия за разработку метода осевой рентгеновской томографии (А.Кормаку и Г.Хаунсфилду);
- в 1981 г. Кай Сигбан (сын Карла Сигбана) - премия по физике за разработку рентгеновской электронной спектроскопии - метода широко применяемого в химических исследованиях.

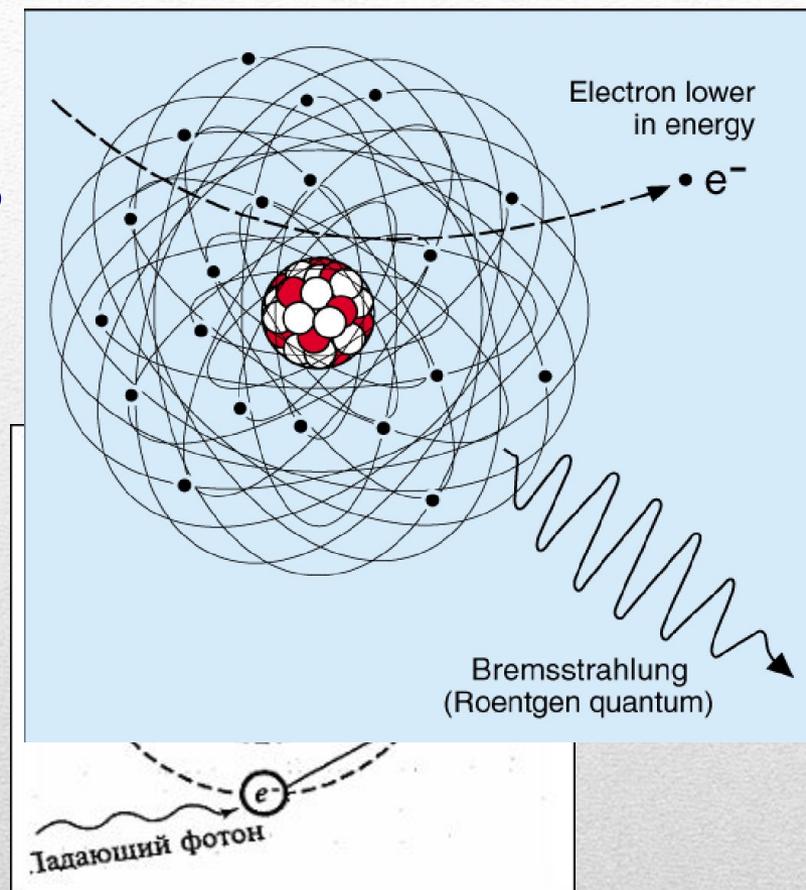
# Механизмы взаимодействия электромагнитного излучения (фотонов – квантовых частиц, не имеющих заряда) с веществом:

1. Фотоэффект
  2. Комptonовский эффект (рассеяние)
  3. Образование пар
  4. Рэлеевское (когерентное) рассеяние;
  5. Фотоядерные реакции
-

# Механизмы поглощения энергии фотонов

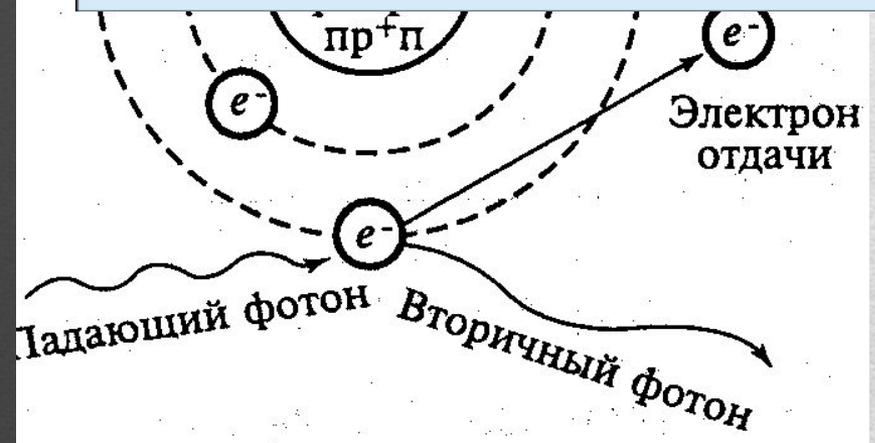
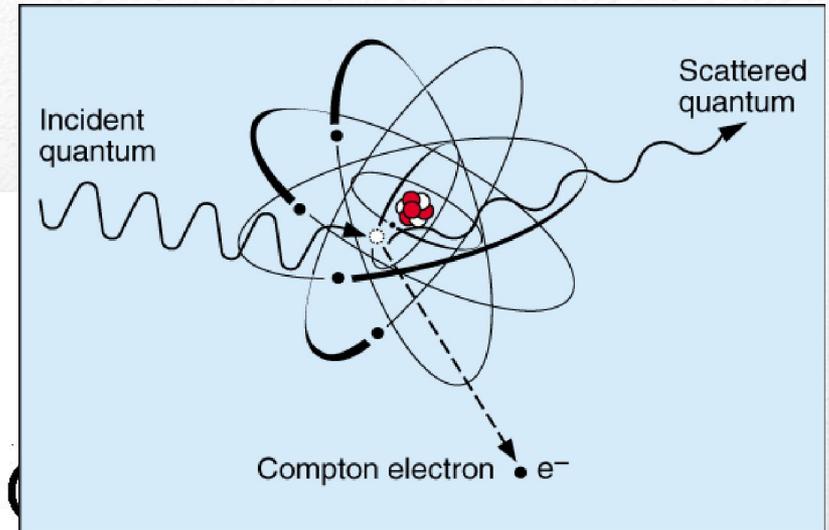
## • **Фотоэффект** (только для длинноволнового рентгеновского излучения)

Энергия падающего кванта полностью поглощается веществом, в результате появляются свободные электроны с кинетической энергией, равной энергии захваченного кванта за вычетом энергии выхода электрона



# • Эффект Комптона - упругое рассеяние падающих фотонов на электроне внешней орбиты

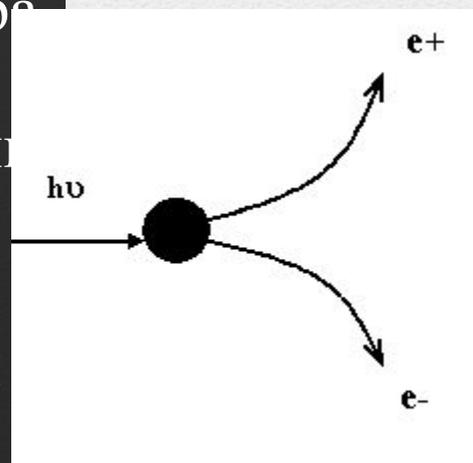
- Электрону внешней орбиты передается часть энергии фотона.
- Оставшуюся энергию уносят рассеявшиеся фотоны.
- Средняя энергия фотонов возрастает с увеличением энергии падающего излучения



- **Образование электрон-позитронных пар** для фотонов с энергией  $> 1,022 \text{ МэВ}$ , т.е. превышающей внутриатомные энергии связи

- В результате взаимодействия кванта излучения с кулоновским полем ядра атома, квант исчезает и одновременно возникает пара частиц электрон-позитрон.
- Позитрон аннигилирует с электронами среды, с образованием вторичных гамма-квантов
- Вторичные гамма-кванты проходя через вещество теряют энергию за счет фотоэффекта или эффекта

Комптона



# Поглощение фотонов в биологических тканях

Относительная вероятность реализации вышеперечисленных механизмов при облучении биологических тканей представлена на рисунке



Рис. 4.2. Относительная вероятность, %, поглощения фотонов различной энергии ( $E$ ) в одном из трех видов взаимодействия излучения с веществом:

1 — фотоэффект, 2 — комптон-эффект, 3 — процесс образования пар

10-100 кэВ – фотоэффект;  
0,3-10 МэВ – эффект  
Комптона;  
>10 МэВ – образование пар

**В большинстве случаев при облучении биологических объектов энергия электромагнитного излучения находится в диапазоне 0.2-2 МэВ, поэтому наибольшую роль играет эффект Комптона**

- При действии рентгеновского и гамма-излучения первичная ионизация (возникновение атомов, утративших электрон вследствие фото- и Комптон-эффекта) мала по сравнению с ионизацией в результате действия вторичных электронов.
- Поэтому электромагнитное излучение считают *косвенно ионизирующим*.

