

# Дисциплина «Источники рентгеновского излучения»

*Кафедра электронных приборов и устройств*

*Потрахов Николай Николаевич*

*Санкт-Петербургский  
Государственный  
Электротехнический  
Университет (ЛЭТИ)*



# Структура дисциплины

Лекционные занятия

20 часов

Лабораторные и практические занятия (курсовой проект)

на тему «Рентгеновские трубки: проектирование и применение» 40 часов

Форма оценки успеваемости

экзамен

## Основная литература:

- Хараджа Ф.Н. Общий курс рентгентехники. - М. - Л.: Энергия, 1966
- Быстров Ю.А., Иванов С.А. Ускорительная техника и рентгеновские приборы: учебник для ВУЗов. - М.: Высшая школа, 1983.
- Иванов С.А., Щукин Г.А., Рентгеновские трубки технического назначения. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989.
- Методические указания
- Основы рентгенодиагностической техники / Под ред. Н.Н. Блинова. Учебное пособие. - М.: Медицина, 2002.

## Вспомогательная литература:

- Блохин М.А. Физика рентгеновских лучей. - М.: Гос. изд-во тех.-теор. лит-ры, 1953.
- Рентгеновские диагностические аппараты. В 2-х т. / Под ред. Н.Н. Блинова, Б.И. Леонова. - М.: ВНИИИМТ, НПО «Экран», 2001. Т.2.
- Рентгентехника: Справочник. В. 2-х кн. / Под ред. В.В. Ключева. - М.: Машиностроение, 1992. - Кн. 1, 2
- Рентготелевизионные методы исследования микроструктур / С.А. Иванов Н. И. Комяк А.И Мазуров. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1983.
- Пиццуттиелло Р., Куллинан Дж. Введение в медицинскую рентгенографию. - Нью-Йорк.: Кодак, 1994.

# Содержание

**Лекция 1** - Открытие рентгеновского излучения (РИ). Свойства РИ. Спектр и интенсивность РИ.

**Лекция 2** - Ослабление РИ. Взаимодействие РИ с веществом. Фотоэффект. Эффект Комптона.

**Лекция 3** - Расчет спектра РИ. Доза РИ: экспозиционная, поглощенная и эффективная.

**Лекция 4** - Рентгеновские трубки (РТ). Классификация. Обозначение. Основные характеристики.

**Лекция 5** - Конструкции РТ. Основные узлы.

**Лекция 6** - Расчет и конструирование РТ. Технология производства.

**Лекция 7** - Способы и источники питания РТ.

**Лекция 8** - Визуализация рентгеновского изображения. Приемники рентгеновского изображения: аналоговые и цифровые. Характеристики рентгеновского изображения.

**Лекция 9** - Рентгеновские аппараты. Цифровые рентгенодиагностические комплексы.

**Лекция 10** - Способы получения рентгеновского изображения. Стандартная рентгенография. Микрофокусная рентгенография.

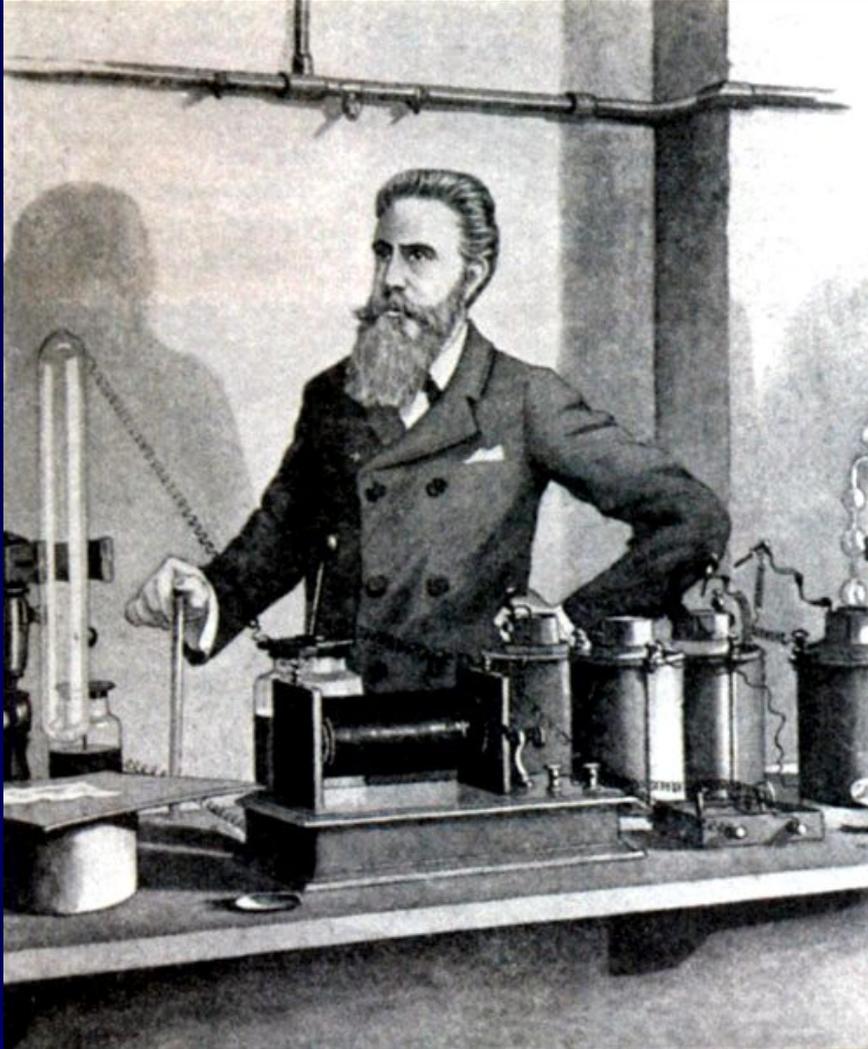
# Лекция 1

Открытие рентгеновского  
излучения (РИ).

Свойства РИ.

Спектр и интенсивность РИ.

# Открытие РИ



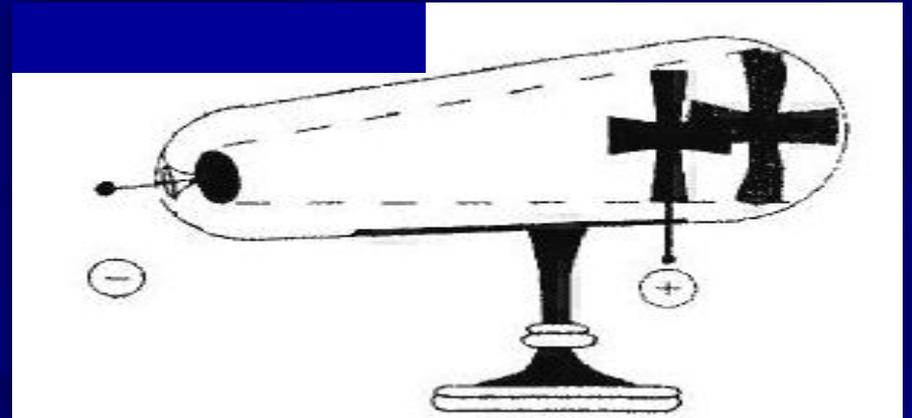
**В.К. Рентген  
(1845-1923)**

**Первый лауреат Нобелевской  
премии  
по физике**

# Открытие РИ



У. Крукс (1832-1919)



Трубка Крукса

# Открытие РИ

Трубка Крукса использовалась для исследования катодных лучей – пучков свободных электронов.

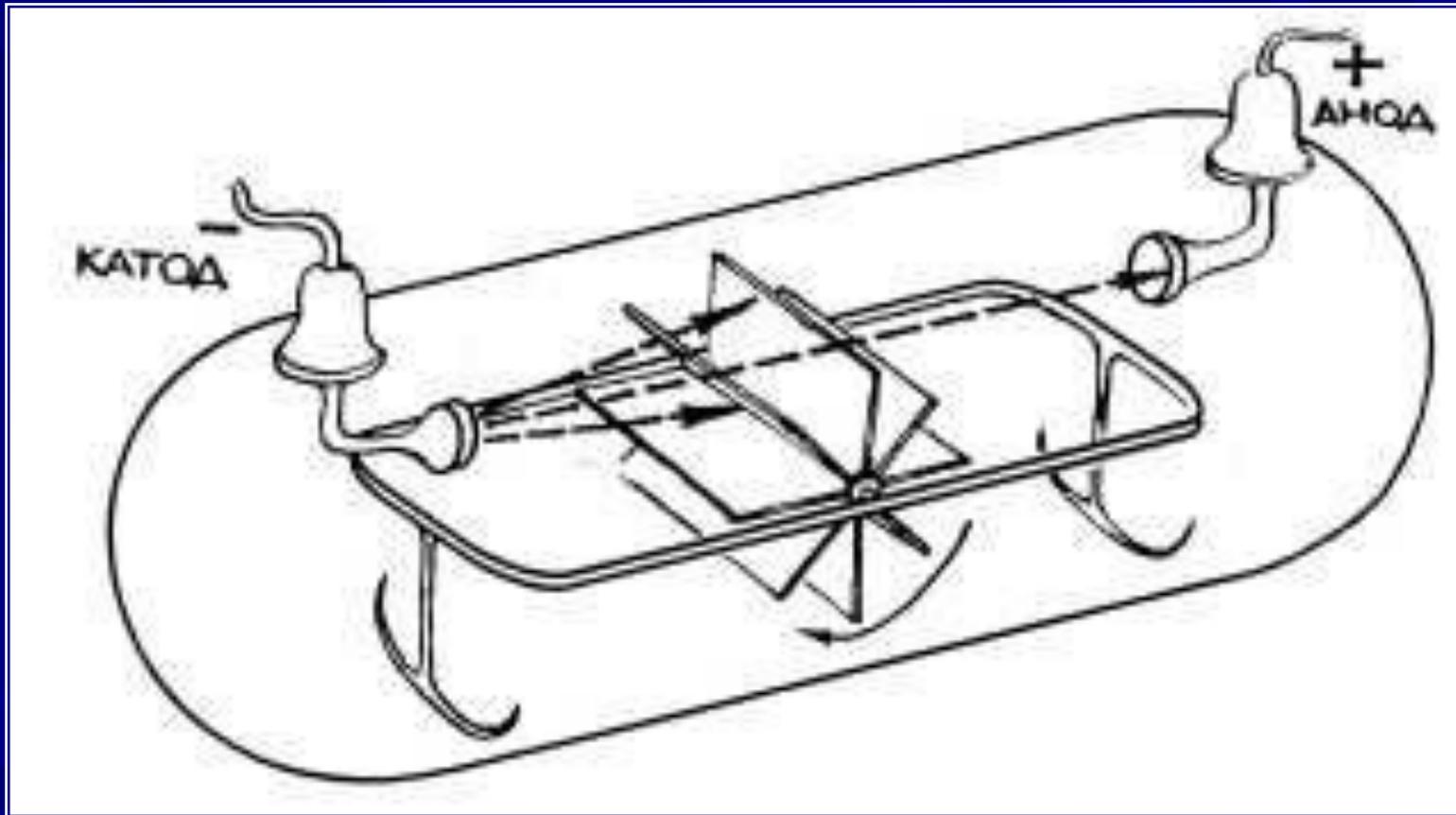


Схема эксперимента Дж. Томсона (1856 - 1940) для демонстрации факта существования электронов

# Открытие РИ

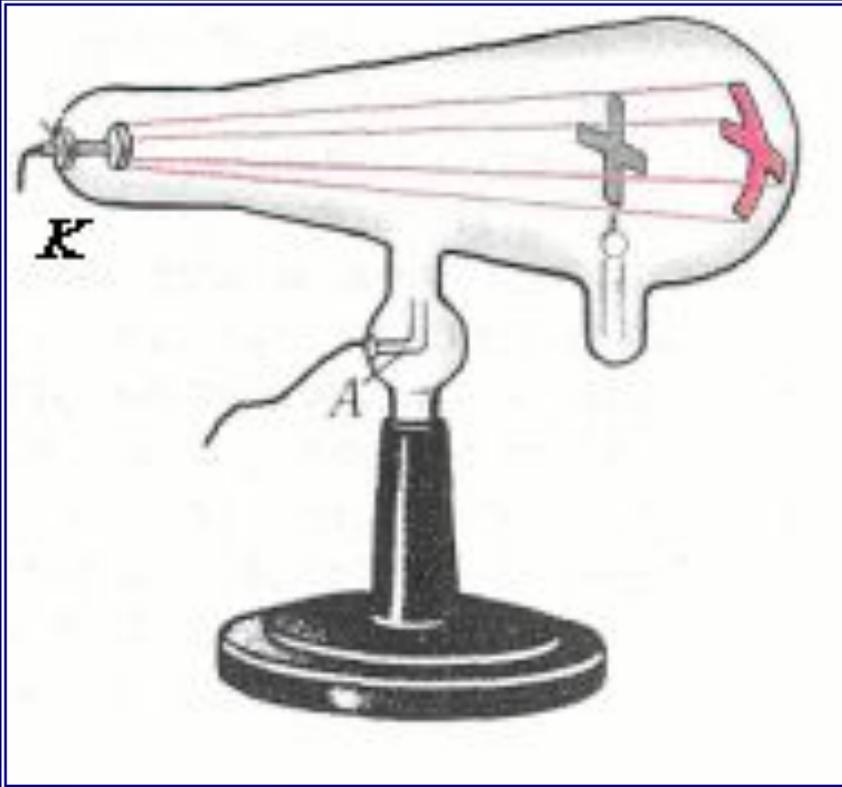
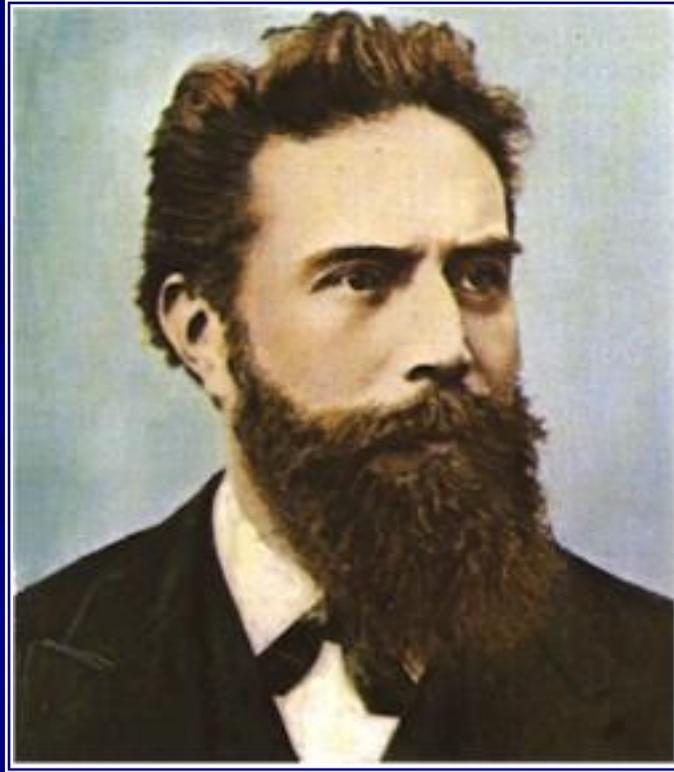


Схема эксперимента В.К. Рентгена

# Открытие РИ



**В.К. Рентген**  
**1845 - 1923**

**Профессор университета города Вюрцбург (Германия) В.К. Рентген в ходе экспериментов с трубкой Крукса (1832 - 1919) обнаружил, что «кусочек бумаги, покрытой платино-синеродистым барием, при приближении к трубке закрытой чехлом из черного картона, начинает флюоресцировать»  
Статья «О новом роде лучей» 28.12.1895.**

# Архив университета г. Вюрцбурга



Первый аппарат



Первый снимок

# Открытие РИ

Дальнейшие эксперименты В.К. Рентгена показали:  
«если держать между разрядной трубкой и экраном руку, то видны  
тени костей в очертании тени самой руки».



Одна из первых рентгеновских  
трубок В.К. Рентгена

В течение шести месяцев  
были изучены все основные  
свойства рентгеновского  
излучения



Рентгеновский снимок руки  
супруги В.К. Рентгена

# Открытие РИ

W. C. RÖNTGEN  
ÜBER EINE NEUE ART  
VON STRAHLEN

SITZUNGSBERICHTE  
DER PHYSIKALISCH-MEDIZINISCHEN GESELLSCHAFT ZU WÜRZBURG  
JAHRGANG 1895, S. 132 UND JAHRGANG 1896, S. 10

W. C. RÖNTGEN  
LEGETE AM 28. 12. 1895 DER GESELLSCHAFT DIE ERSTE MITTHEILUNG  
DER VON IHM ENTDECKTEN STRAHLEN VOR

NEUDRUCK  
ANLÄSSLICH DES 100JÄHRIGEN BESTEHENS  
DER PHYSIKALISCH-MEDIZINISCHEN  
GESELLSCHAFT ZU WÜRZBURG

GEGRÜNDET 1849 VON  
A. v. KÖLLIKER · F. RINECKER · J. SCHERER · R. VIRCHOW  
UND ANDEREN

ZU IHREN MITGLIEDERN GEHÖRTEN:

E. v. BERGMANN, TIE. BOVERI, F. BRAUN, E. BUCHNER,  
E. BUMM, S. RAMON y CAJAL, V. CARUS, R. CLAUSSUS,  
W. EINTHOVEN, A. FICK, EMIL FISCHER, M. v. FREY,  
C. GEGENBAUR, C. GERHARDT, C. GOLGI, J. HENLE,  
M. HOFMEIER, HERZOG KARL THEODOR v. BAYERN,  
E. KLEBS, F. KOHLRAUSCH, A. v. KÖLLIKER, GREGOR  
KRAUS, O. KÜLFER, A. KUNDT, A. KUSSMAUL, W. O. v. LEUBE,  
E. LEYDIG, PRINZ LUDWIG FERDINAND v. BAYERN,  
M. FETTINGKOPFER, G. QUENCKE, F. v. RECKLINGHAUSEN,  
G. RETZIUS, F. v. RINECKER, W. C. RÖNTGEN, J. v. SACHS,  
F. v. SCANZONI, J. SCHERER, O. SEIFFERT, C. SEMPER,  
C. TH. v. SERBOLD, PH. STÖHR, C. v. TEXTOR, A. v.  
TRÖLTSCHE, C. THIERSCHE, R. VIRCHOW, R. v. WELZ,  
W. WIEN, J. WISLIZENUS

SPRINGER-VERLAG  
BERLIN · GOTTINGEN · HEIDELBERG

«О новом роде лучей»

Важно  
не только открыть  
что-то новое,  
но и вовремя опубликоваться...

## Результаты исследований Рентгена

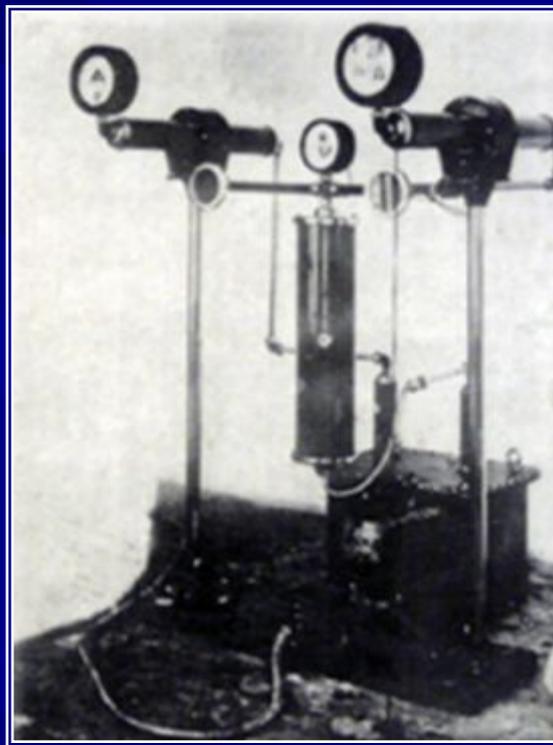
- вызывает свечение люминофора
- вызывает засветку фотоматериалов
- проникает сквозь непрозрачные объекты
  - не отклоняется магнитным полем
- не фокусируется линзами и не преломляется в призмах

# А.С. Попов и РИ

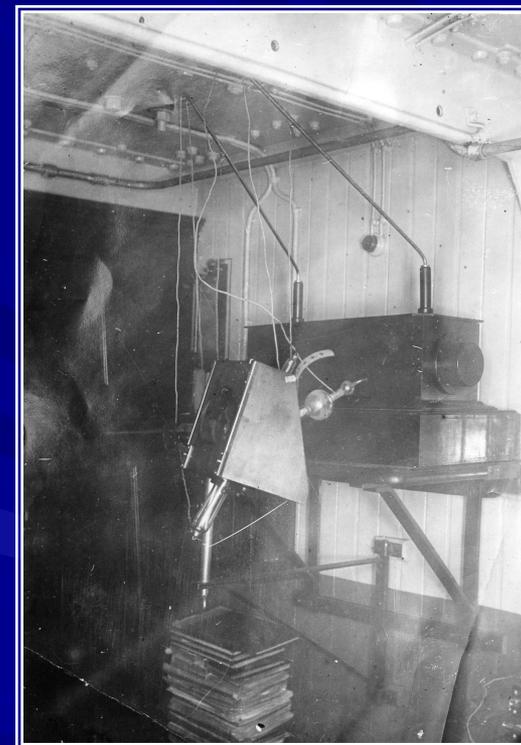
1. 2 февраля 1896 г. газета «Котлин» сообщает, что А.С. Поповым производятся опыты фотографирования невидимых предметов по способу Рентгена (совместно с сотрудником Минного офицерского класса Колотовым С.С.).
2. 25.02.1896 г. доклад «о лучах» Рентгена на заседании РФХО



А.С. Попов  
1859 - 1905

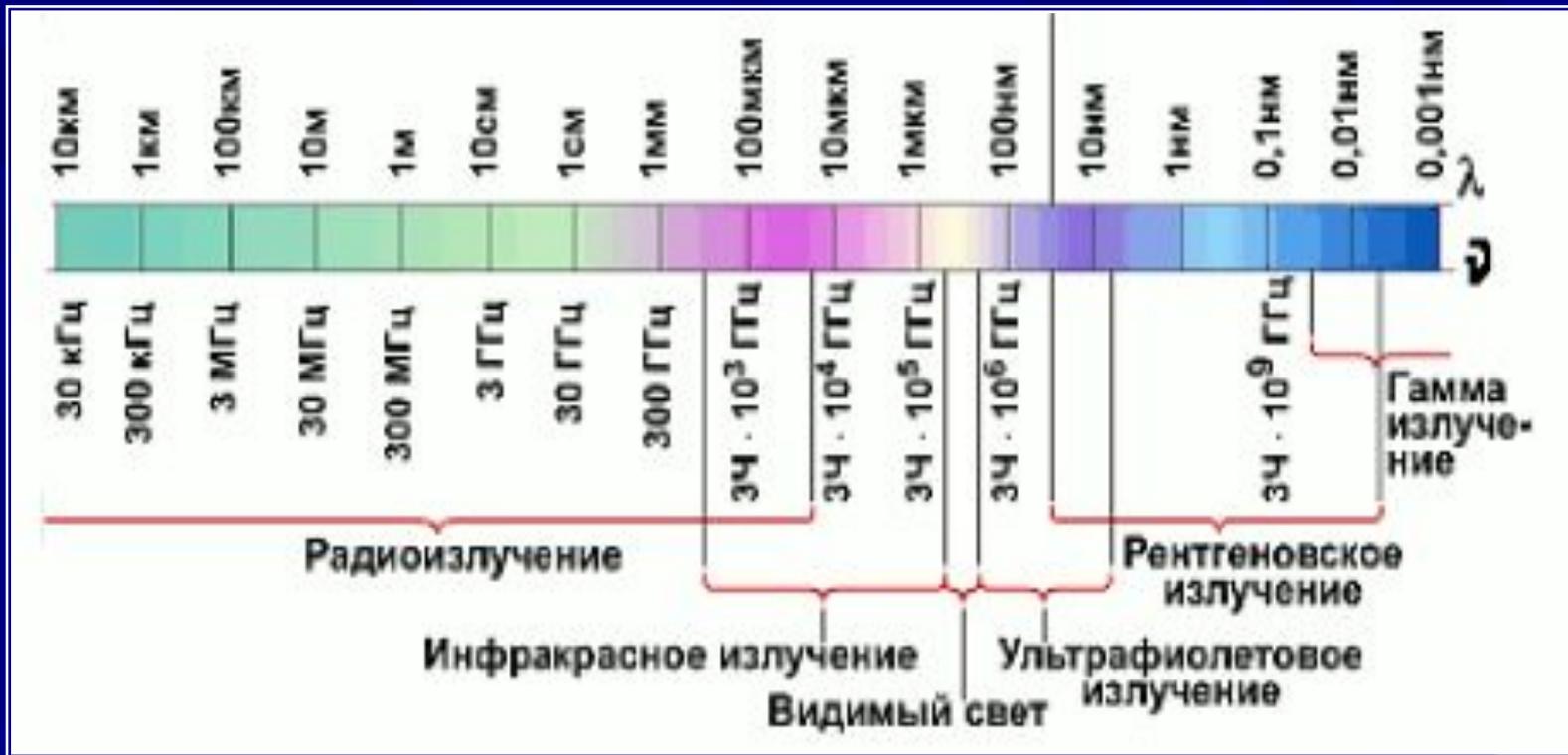


Рентгеновская аппаратура времен  
А.С. Попова



# Свойства РИ

РИ – электромагнитное излучение с длиной волны  $\lambda$  в диапазоне  $10^2$  –  $10^{-3}$  нм и соответственно частотой колебаний  $10^{14}$  –  $10^{19}$  Гц (эскагерцовый диапазон частот).



Свойства РИ проявляются в результате его взаимодействия с веществом. Взаимодействие РИ происходит на уровне отдельных электронов, атомов и ядер атомов вещества.

# Свойства РИ

## Основные свойства:

- проникающая способность:

РИ способно проходить через любые вещества, в том числе, непрозрачные для видимого света;

- ионизирующая способность:

РИ при взаимодействии с веществом ионизирует атомы и молекулы.

воздействие:      тепловое

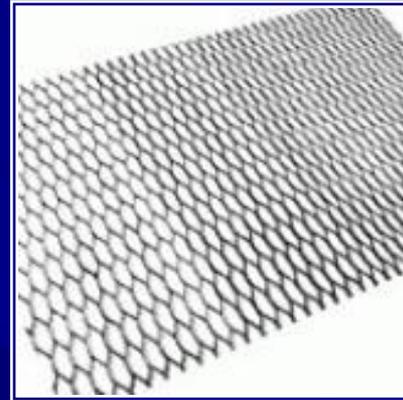
                         флуоресценция (световозбуждающее)

                         фотохимическое

                         биохимическое и др.

# Проникающая способность

Способы экранирования (защиты) от электромагнитного излучения.



# Ионизирующая способность

Ионизирующая способность рентгеновского излучения заключается в разложении нейтральных атомов и молекул на положительный и отрицательный ионы, составляющие ионную пару.



Данная способность обеспечивает метод измерения интенсивности РИ.

Кванты РИ, проходящие через счетчик Гейгера, ионизируют газ, при этом ток через счетчик резко возрастает. На шкале регистрирующего устройства получают показания, пропорциональные интенсивности РИ.

# Тепловое воздействие

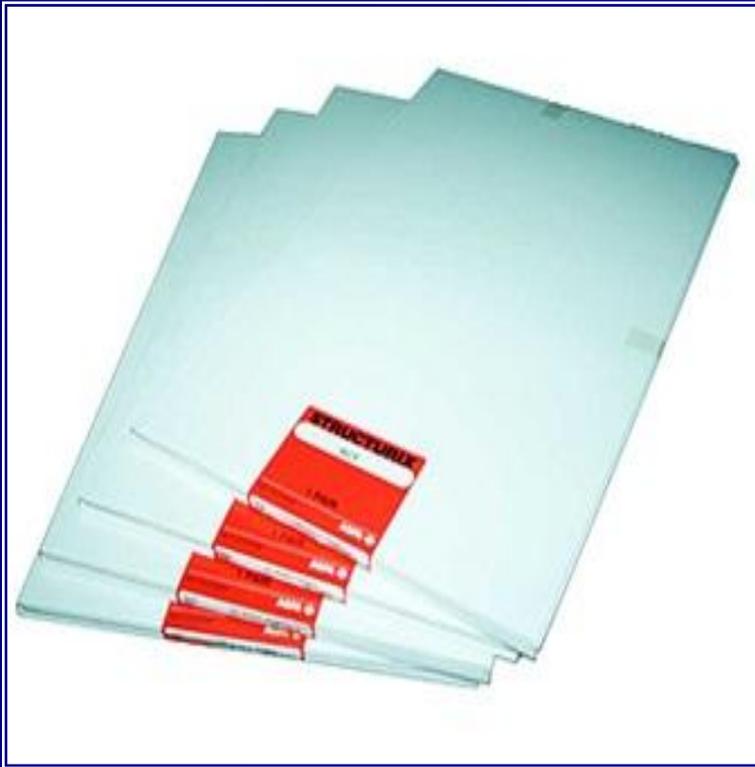
Тепловое воздействие проявляется в виде ожогов участка кожи, перегрева различных органов, а также возникающих в результате перегрева разрывов кровеносных сосудов и нервных волокон.



Тепловое воздействие определяется величиной плотности потока поглощенного излучения и временем действия излучения.

# Флуоресценция

Под действием рентгеновского излучения может возникнуть свечение веществ – флуоресценция. При этом энергия рентгеновского излучения переходит в энергию видимого света.

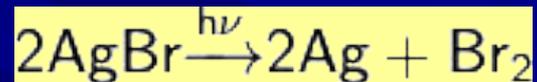


Принцип флуоресценции лежит в основе устройства так называемых усиливающих экранов, предназначенных дополнительно засвечивать рентгеновскую пленку, чувствительную также и к видимому свету.

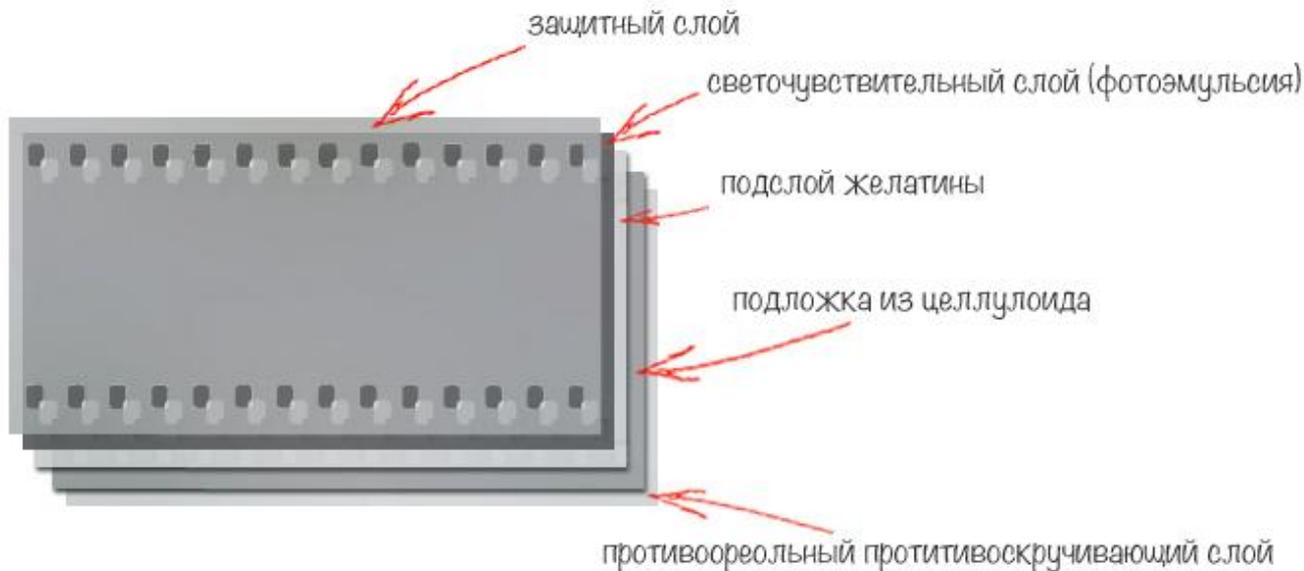
# Фотохимическое воздействие

Рентгеновское излучение влияет на светочувствительный слой фотопластинок и фотопленки подобно видимому свету - вызывает разложение бромистого серебра.

Облученные рентгеновским излучением фотопластинки или фотопленки при проявлении чернеют.



## Строение чёрно-белой негативной фотоплёнки



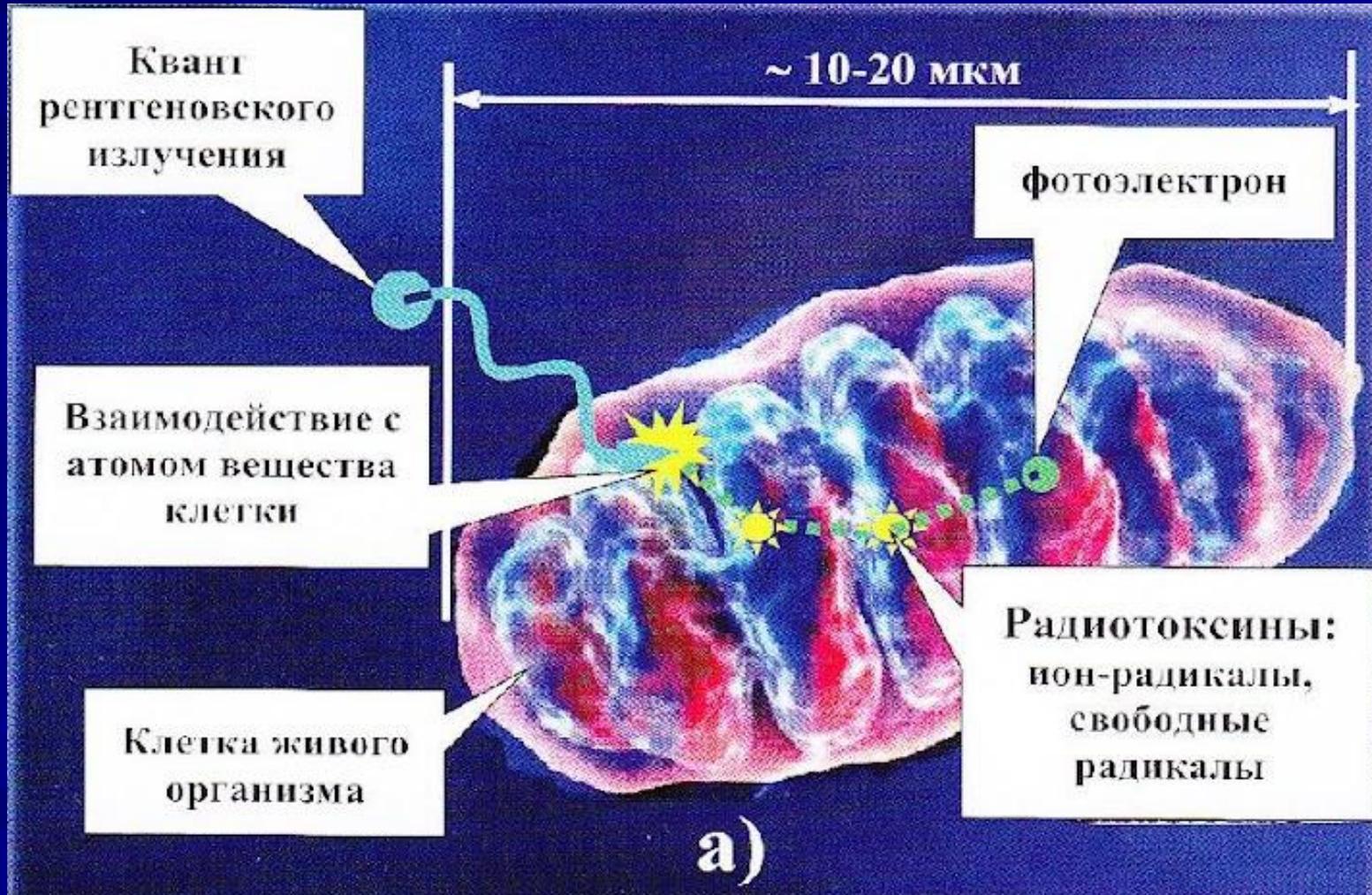
# Биохимическое воздействие

Проходя через ткани, рентгеновское излучение может вызывать различные изменения в зависимости от вида ткани и поглощенной дозы излучения.



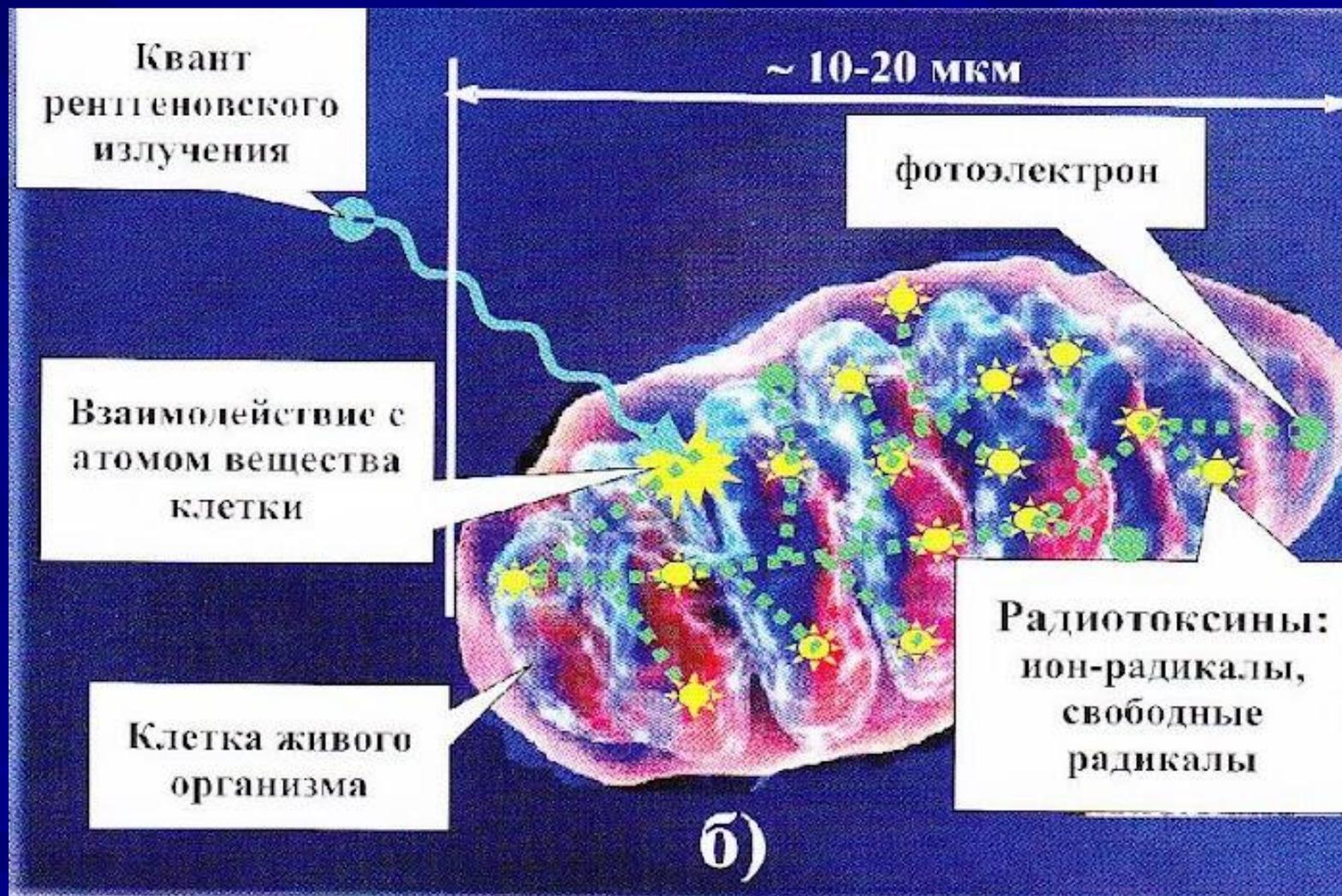
# Прямое воздействие РИ

## Повреждение биологических макромолекул свободными электронами



Процесс взаимодействия РИ с клеткой: а – кванты малой энергии

# Прямое воздействие РИ



Процесс взаимодействия рентгеновского излучения с клеткой:  
б - кванты большой энергии

## Непрямое воздействие РИ

### Взаимодействие свободных электронов с молекулами $H_2O$

#### Стадии радиолиза воды:

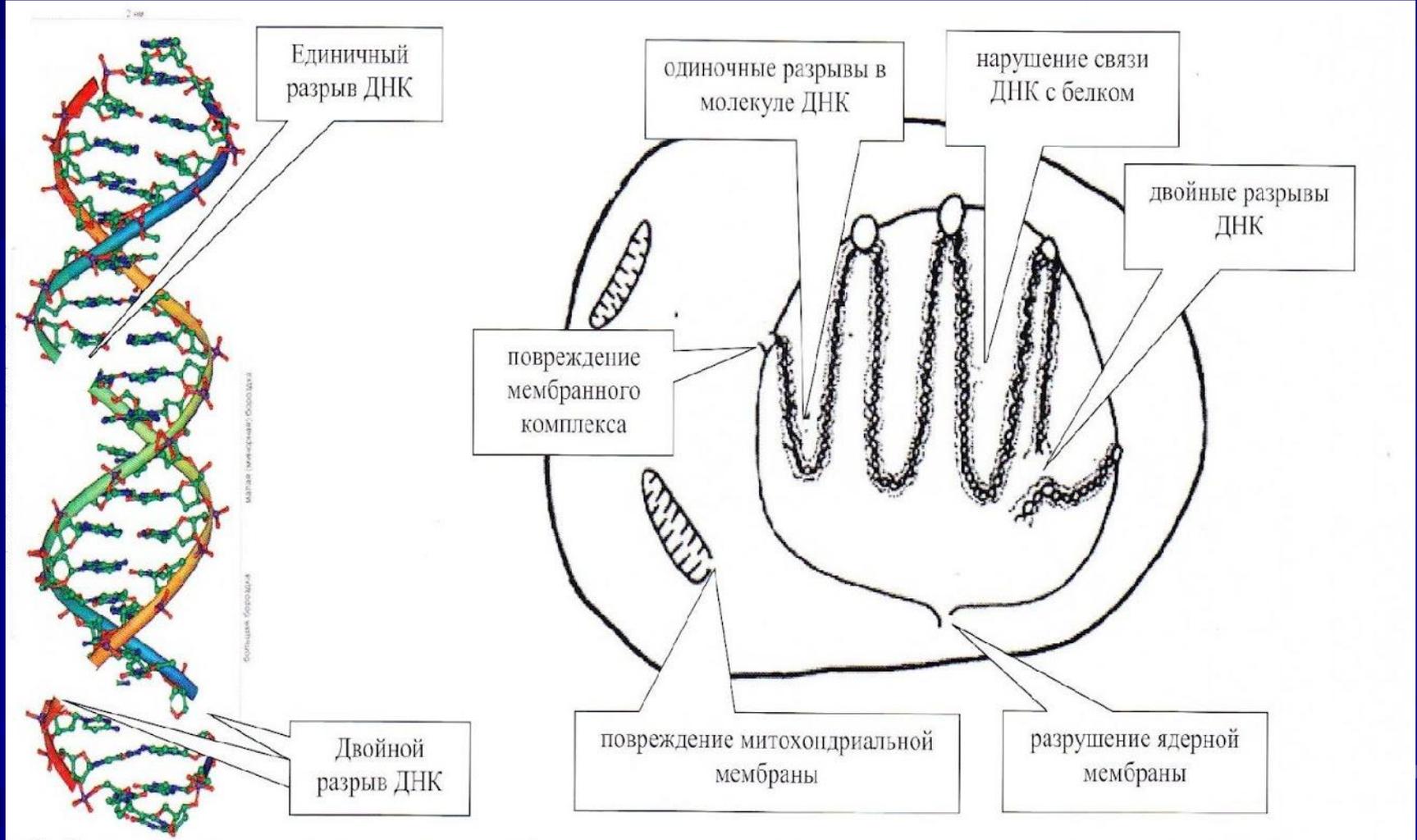
**физическая** - образование возбужденных и сверхвозбужденных молекул  $H_2O^*$ ,  $H_2O^{**}$ , ионов  $H_2O^+$  и избыточных электронов.

**физико-химическая** - образование химически активных радикалов  $OH^\circ$ ,  $H^\circ$  и  $O^\circ$  и гидратированных электронов.

**химическая** - взаимодействие радиотоксинов с биомолекулами.

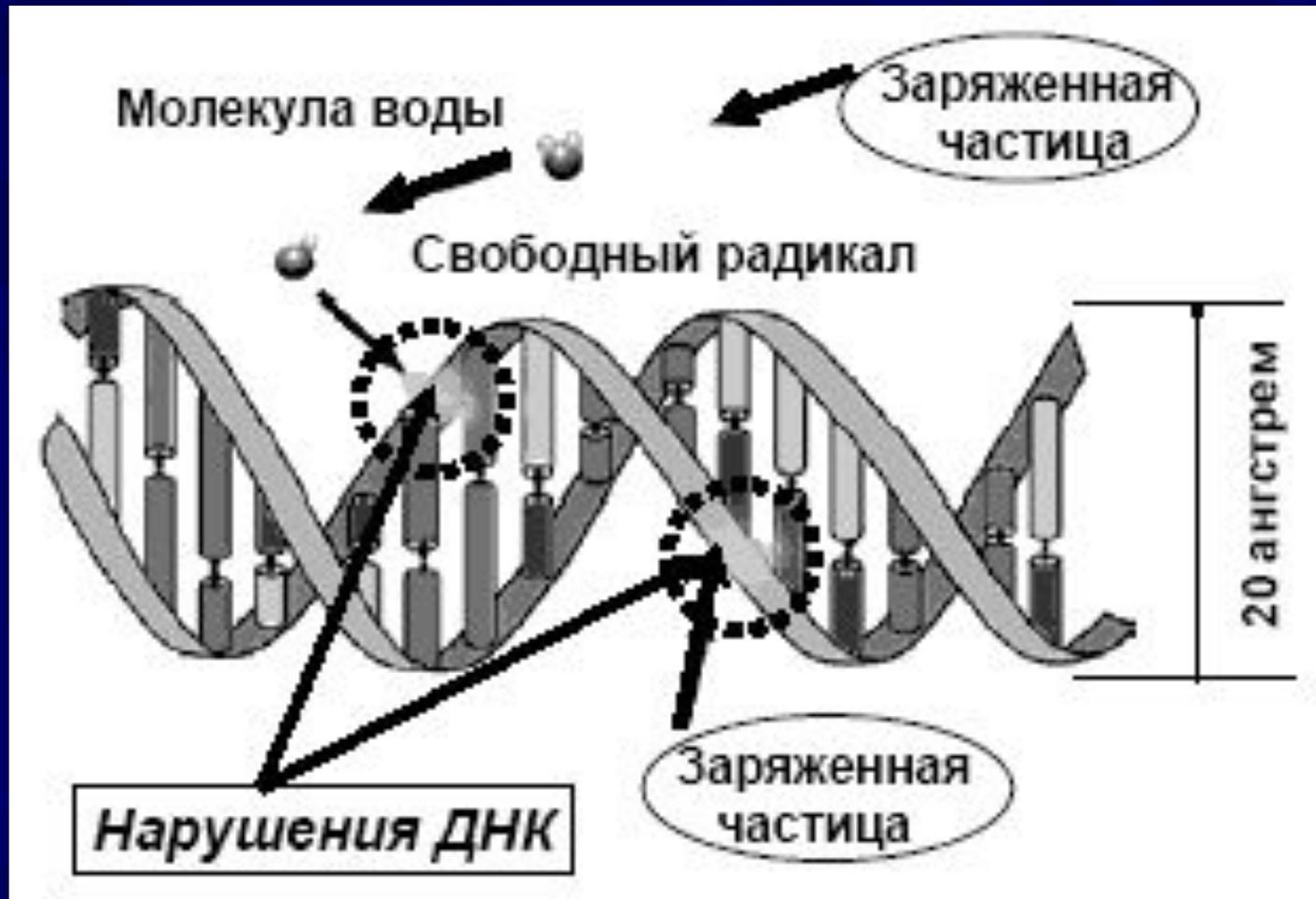
Непрямое воздействие РИ более опасно вследствие высокой концентрации радиотоксинов и большей длительности процесса.

# Непрямое воздействие РИ



**Основные структурные повреждения клетки**

# Суммарное воздействие РИ

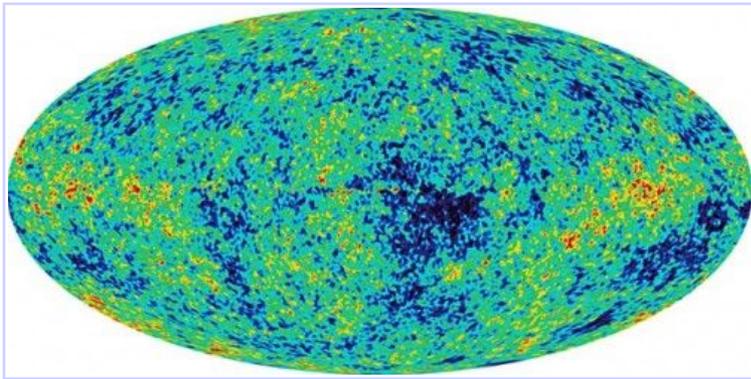


Степень воздействия определяется поглощенной дозой РИ

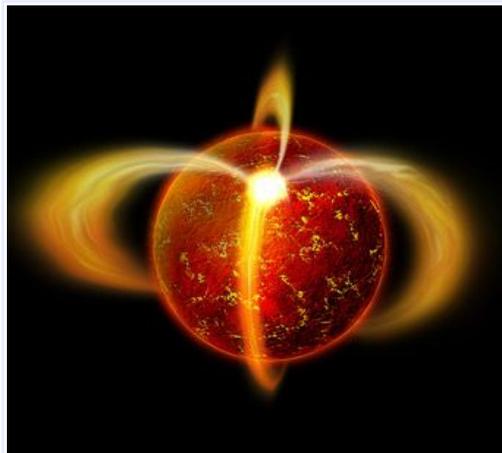
# Источники РИ

## Естественные источники РИ

- составляющая фонового космического излучения

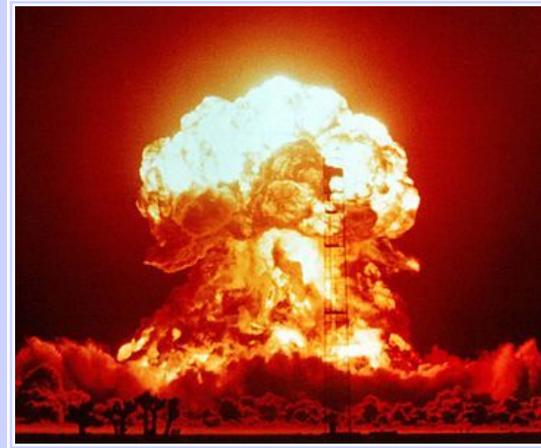


- рентгеновский пульсар

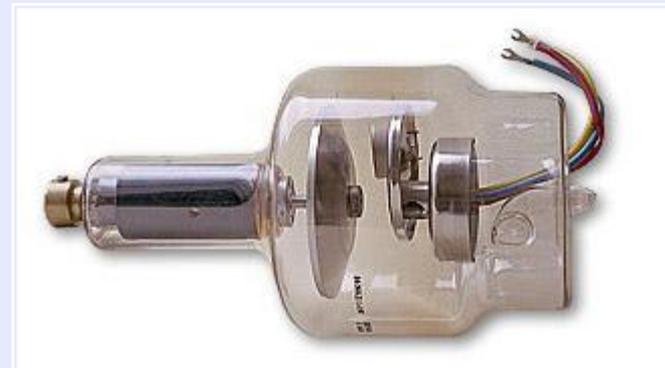


## Искусственные источники РИ

- атомная бомба

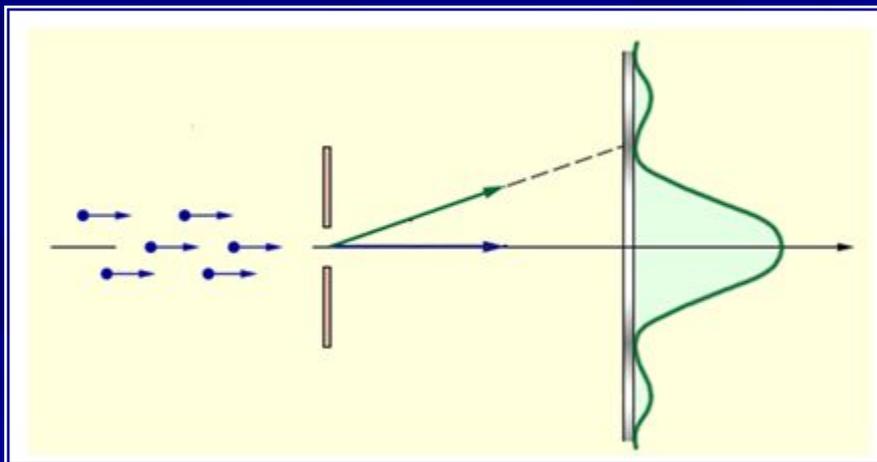


- рентгеновская трубка



# РИ и корпускулярно-волновой дуализм

Французский ученый Луи де Бройль (1892 – 1987) выдвинул в 1923 году гипотезу об универсальности корпускулярно-волнового дуализма.



С каждым микрообъектом связываются:

- корпускулярные характеристики (энергия  $E$ , импульс  $P$ , масса  $m$ , скорость  $V$ );
- волновые характеристики (частота  $\nu$ , длина волны  $\lambda$ , фаза  $\varphi$ ).

С любой материальной частицей, обладающей импульсом  $P$ , сопоставляется волновой процесс с длиной волны  $\lambda$ .

Гипотеза была экспериментально подтверждена для:

- пучка электронов в 1927 году, К. Девисон (1881 – 1958) и Л. Джермен (1896 – 1971);
- отдельного электрона в 1948 году, В.А. Фабрикант (1907 – 1991).

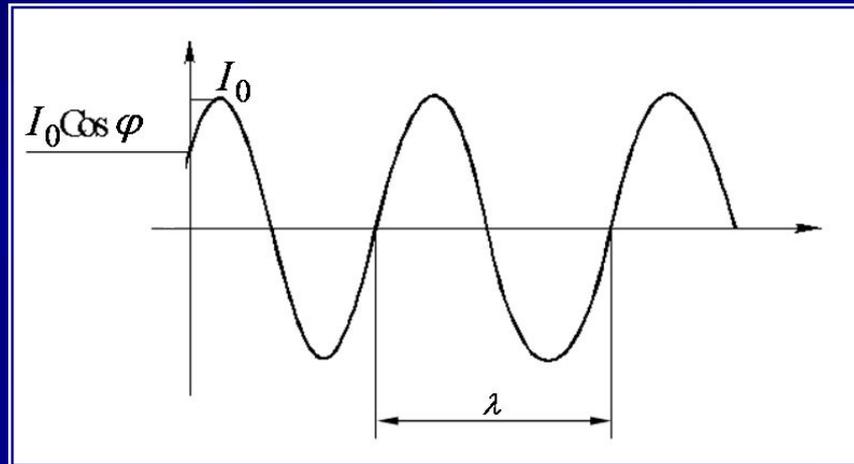
# РИ и корпускулярно-волновой дуализм

В соответствии с теорией дуализма РИ это:

- совокупность (спектр) отдельных гармонических колебаний (электромагнитных волн), характеризуемых амплитудой  $I$ , длиной волны  $\lambda$ , частотой  $\nu$  и фазой  $\varphi$ .

$$I = I_0 \cos(\omega t + \varphi),$$

где  $I_0$  - амплитуда колебаний;  
 $\omega = 2\pi\nu$  - круговая частота,  $\nu = 1/\lambda$

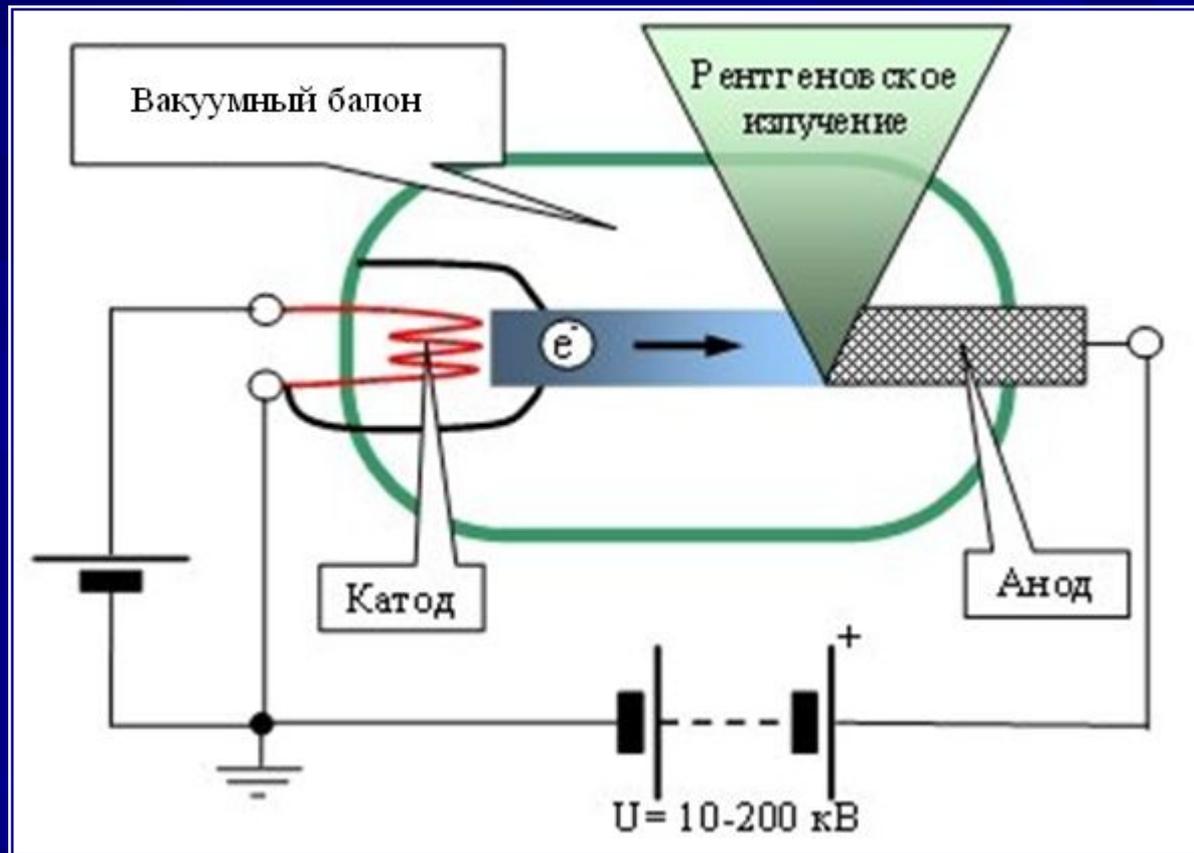


- поток фотонов (квантов) электромагнитного излучения, характеризуемых собственной энергией, скоростью и траекторией движения.

Квант рентгеновского излучения - нейтральная элементарная частица с нулевой массой, распространяющаяся в вакууме со скоростью света  $c$ , обладающая энергией  $E = h\nu$

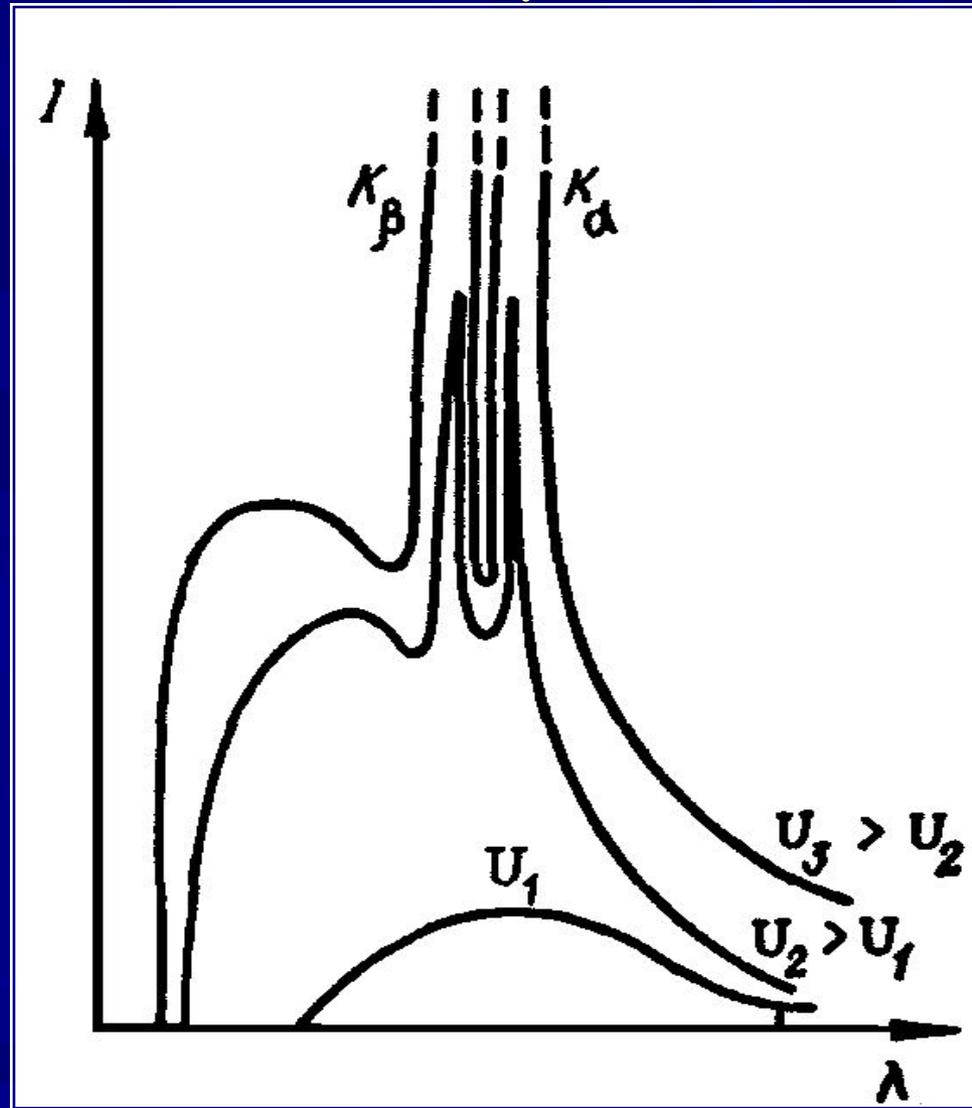
# Генерация РИ

Генерация РИ происходит в результате бомбардировки мишени рентгеновской трубки ускоренными электронами



При бомбардировке мишени ускоренными электронами возникает рентгеновское излучение одновременно двух видов - тормозное и характеристическое.

# Спектр РИ



Спектр РИ зависимость интенсивности РИ или энергии (частоты) квантов РИ в потоке излучения от длины волны РИ или энергии (частоты) квантов РИ

# Интенсивность РИ

Интенсивность рентгеновского излучения – сумма энергий всех квантов в потоке излучения, генерируемых в единицу времени в телесном угле один стерадиан во всем диапазоне энергии излучения.

1. Интегральная интенсивность – [квант · кэВ/с · ср]

$$I = \int_0^{\nu_i} \frac{dn}{d\nu} \cdot h\nu d\nu,$$

где  $dn/d\nu = N_\nu$  – спектральная плотность потока квантов РИ, характеризуемая количеством квантов одной энергии, генерируемых за одну секунду в единицу телесного угла – плотность потока квантов РИ.

$E = h\nu$  – энергия отдельного кванта – [кэВ],  
где  $h$  – постоянная Планка;  $\nu = \lambda/c$ ;  $c$  – скорость света.

2. Спектральная интенсивность РИ – [квант/с · ср]

$$J_\nu = N_\nu \cdot h\nu.$$

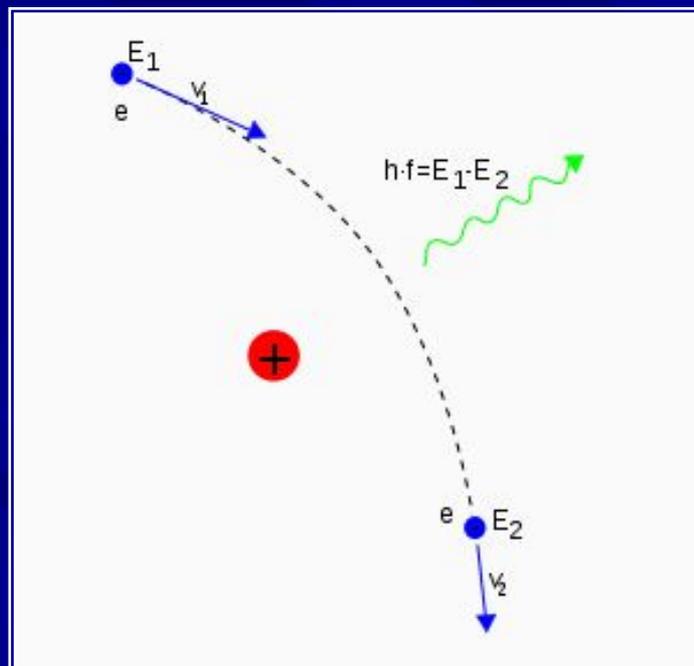
Спектральная интенсивность характеризуется количеством квантов одной энергии в каждом отдельно взятом участке всего спектра энергий излучения.

# Тормозное РИ

Ускоренно движущиеся заряженные частицы излучают в пространство электромагнитные волны. Их амплитуды пропорциональны квадрату ускорения частицы (квантовая электродинамика).

Падающие на мишень электроны испытывают торможение в поле атомных ядер и электронов.

Торможение – процесс движения с отрицательным ускорением. Электроны, бомбардирующие мишень, теряют всю энергию или ее часть в виде тормозного РИ



# Коротковолновая граница спектра тормозного РИ

Тормозное РИ имеет непрерывный спектр множества электромагнитных волн, длины которых начинаются с  $\lambda_{\text{мин}}$  и простираются до  $\lambda = \infty$ .

Наличие коротковолновой границы – важнейшая особенность спектра тормозного РИ  $\lambda_{\text{мин}}$  ( $\nu_{\text{макс}}$ ).

При торможении кинетическая энергия электрона, прошедшего разность потенциалов  $U$  [кВ], может полностью перейти в энергию одного кванта

$$eU = \frac{hc}{\lambda_{\text{мин}}} = h\nu_{\text{макс}}$$

В этом случае квант имеет максимально возможные энергию и частоту.

Граничная длина волны  $\lambda_{\text{мин}}$  [нм] определяется ускоряющим напряжением  $U$  [кВ].

$$\lambda_{\text{мин}} = \frac{hc}{eU} = \frac{1,24}{U},$$

где  $h$  –  $6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с;  $c$  – скорость света  $3 \cdot 10^8$  м/с;  
 $e$  – заряд электрона  $1,9 \cdot 10^{-19}$  Кл

# Интенсивность тормозного РИ

I. Распределение интенсивности РИ I по спектру.

1.1 Распределение энергии в спектре тормозного излучения по длинам или частотам волн определяется спектральной плотностью излучения - спектральной интенсивностью.

$$J_{\lambda} = \frac{dI}{d\lambda};$$

$$J_{\nu} = \frac{dI}{d\nu}.$$

Спектральная интенсивность - отношение интенсивности излучения, заключенного в интервале частот или длин волн к величине этого интервала.

В приближенных расчетах принимается

$$J_{\nu} = kiz(\nu_{\max} - \nu),$$

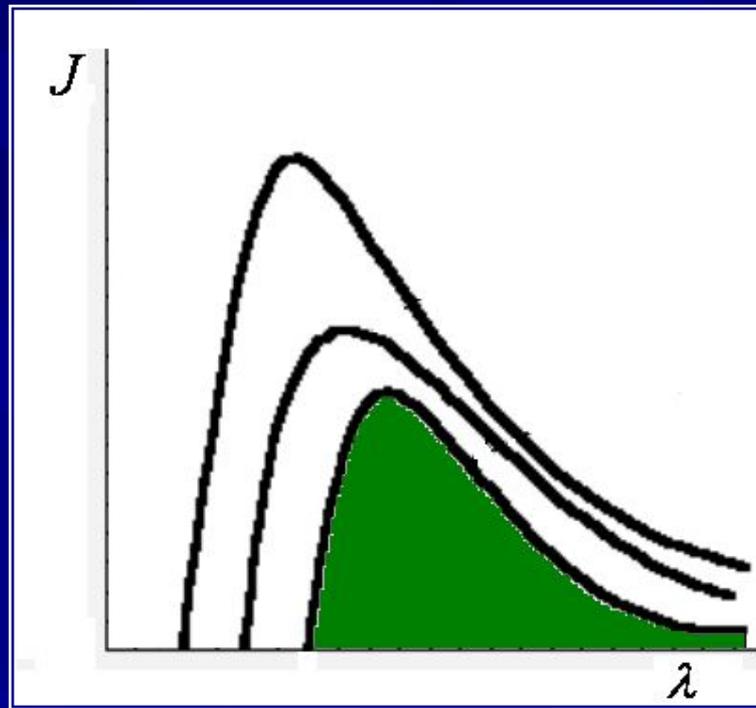
где  $k$  - коэффициент пропорциональности;  $z$  - атомный номер;

$\nu_{\max}$  - граничная частота,  $i$  - ток электронов на мишени.

# Интенсивность тормозного РИ

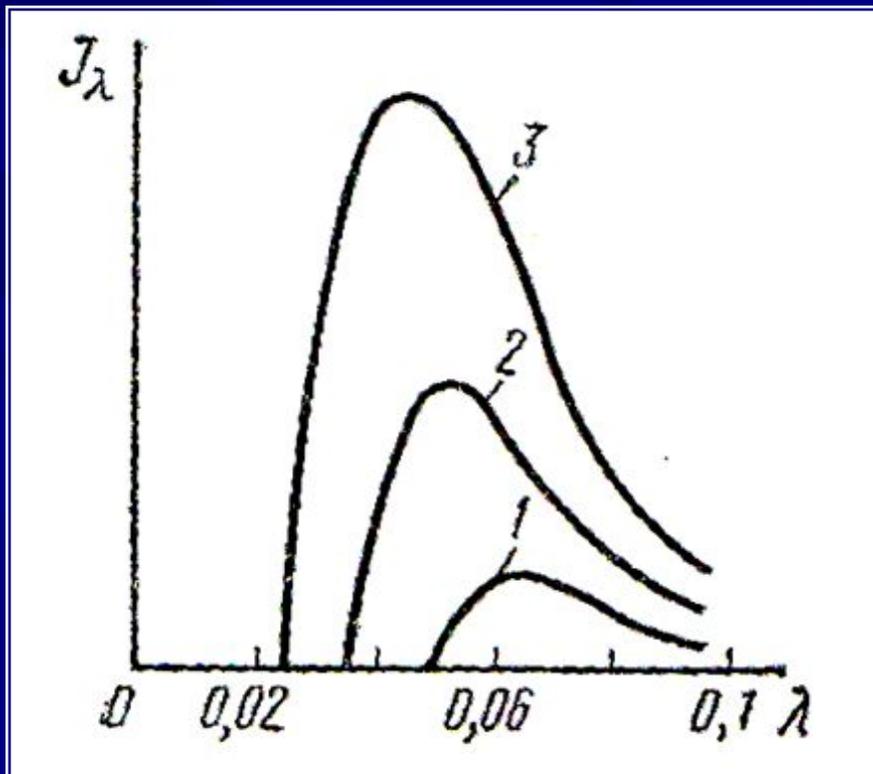
1.2 Интенсивность тормозного РИ – совокупность отдельных интенсивностей всех составляющих спектр волн.

Интенсивность тормозного излучения (интегральная интенсивность) численно равна площади, ограниченной кривой и осью абсцисс.



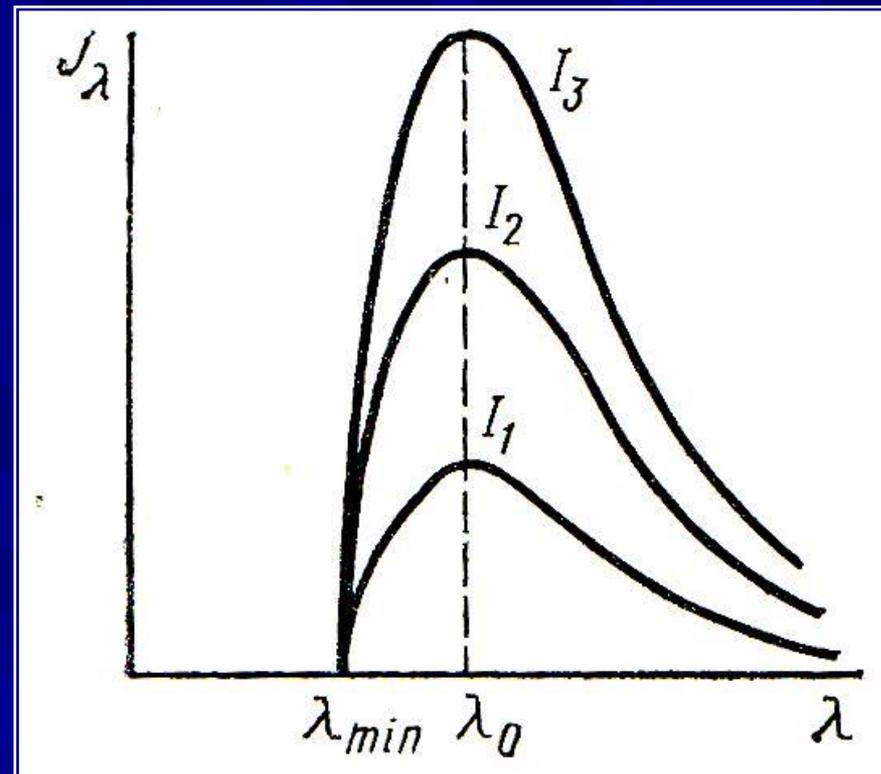
$$J = \int_0^{\nu} J_{\nu} d\nu = k' iz \frac{\nu_{\text{макс}}^2}{2} = kizU^2$$

# Интенсивность тормозного РИ



$$U_3 > U_2 > U_1$$

Распределение спектральной интенсивности тормозного излучения при различных значениях ускоряющего напряжения



$$i_3 > i_2 > i_1$$

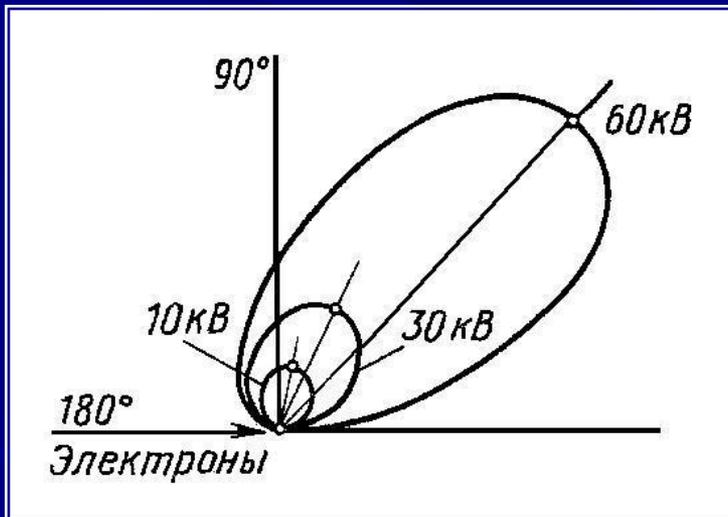
Распределение спектральной интенсивности тормозного излучения при различных значениях тока

# Интенсивность тормозного РИ

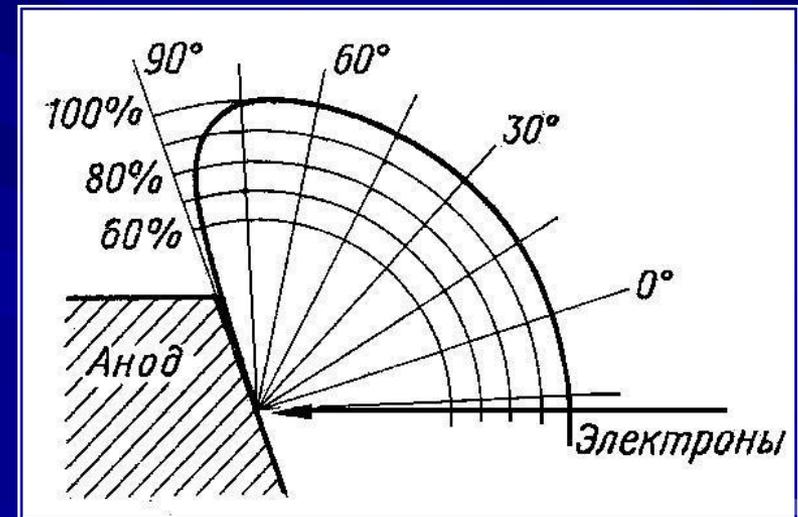
II Распределение интенсивности тормозного РИ в пространстве.

Распределение интенсивности РИ в пространстве определяется величиной вектора Умова-Пойнтинга.

$$I_{\varphi} = \frac{c}{4\pi} EH = \frac{k}{4\pi R^2} \sin^2 \varphi$$



а

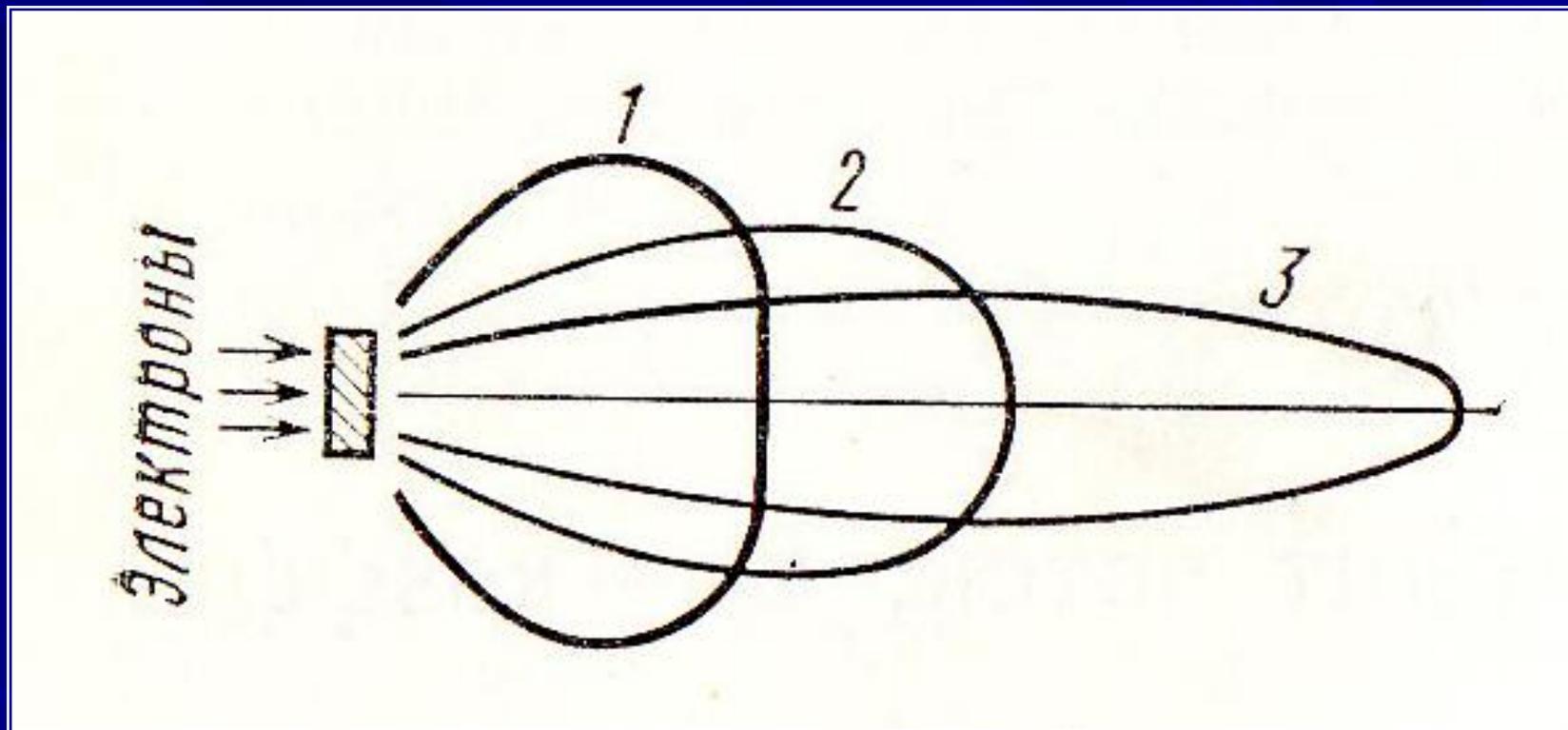


б

Пространственное (азимутальное) распределение интенсивности рентгеновского излучения:

а - для тонкой мишени (теоретическое); б - для массивного анода с вольфрамовой мишенью (практическое)

# Изменение диаграммы направленности РИ с ростом ускоряющего напряжения



1.  $U = 300$  кВ;  $U = 500$  кВ;  $U = 1000$  кВ

# Коэффициент полезного действия механизма генерации тормозного РИ

КПД  $\eta$  тормозного излучения – отношение полного потока энергии излучения  $P$  к мощности, подводимой электронным током к мишени  $P_{\text{э}}$ .

$$\eta = \frac{P}{P_{\text{э}}}.$$

Поток энергии излучения

$$P = \int_S I dS = k_0 i z U^2,$$

где  $P$  – подводимая мощность при постоянном напряжении;

$S$  – поверхность, через которую проходит поток;  $k_0$  – коэффициент пропорциональности,  $z$  – порядковый номер материала мишени,  $i$  – ток пучка электронов на мишень,  $U$  – ускоряющее напряжение.

Подводимая мощность

$$P_{\text{э}} = iU$$

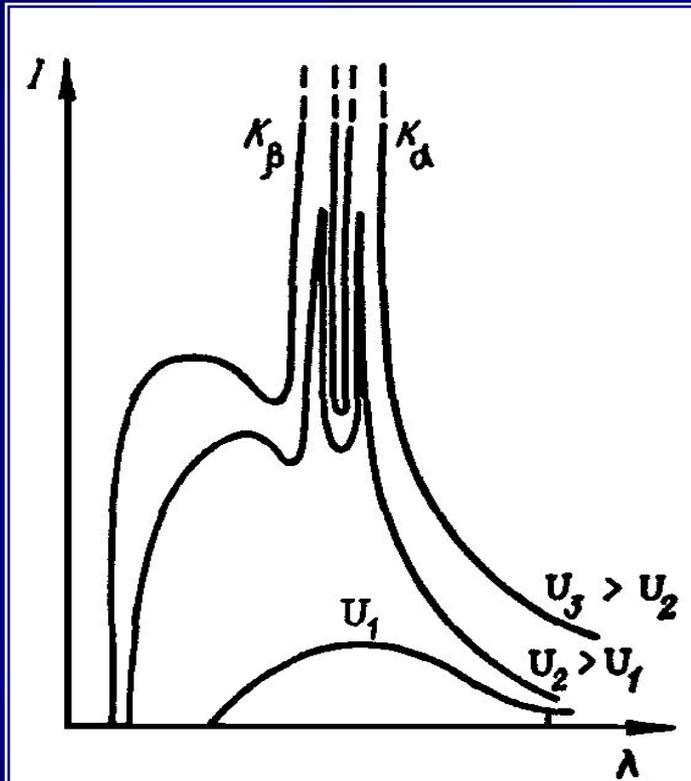
# Коэффициент полезного действия механизма генерации тормозного РИ

$$\eta = k_0 z U$$

U, кВ	$\eta$	
	Расчет	Эксперимент
45	0,3	0,5
100	0,7	1,1
150	1,1	1,6
200	1,5	2,2
1000	7,5	9,0
10000	-	60

# Характеристическое излучение

Характеристическое излучение – наблюдаемые на кривой интенсивности непрерывного тормозного спектра излучения отдельные максимумы интенсивности.



Спектры рентгеновского излучения при различных значениях ускоряющего напряжения

Характеристическое излучение имеет линейчатый спектр.

С ростом ускоряющего напряжения положение линий не меняется, растет только их интенсивность

# Характеристическое РИ

Распределение линий характеристического спектра обусловлено энергетическими уровнями или строением электронных оболочек атома.

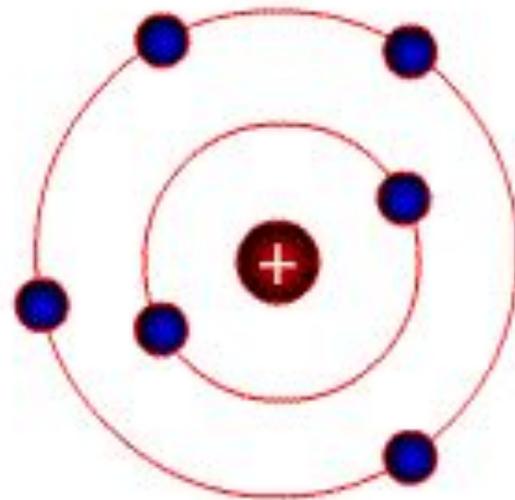
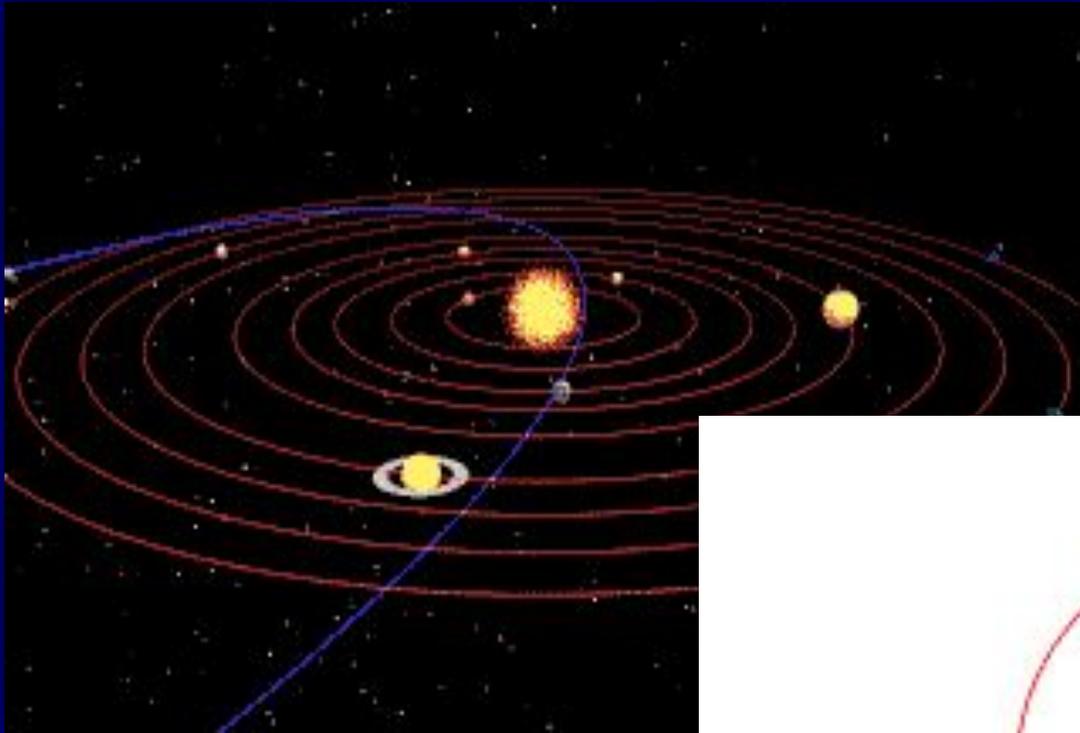
Серии линий характеристического излучения соответствуют электронным оболочкам атома: К, L, M, N, O, P.

Удаление электрона с К - оболочки приводит к каскаду переходов между уровнями.

Чем больше вероятность перехода, тем больше интенсивность линии.

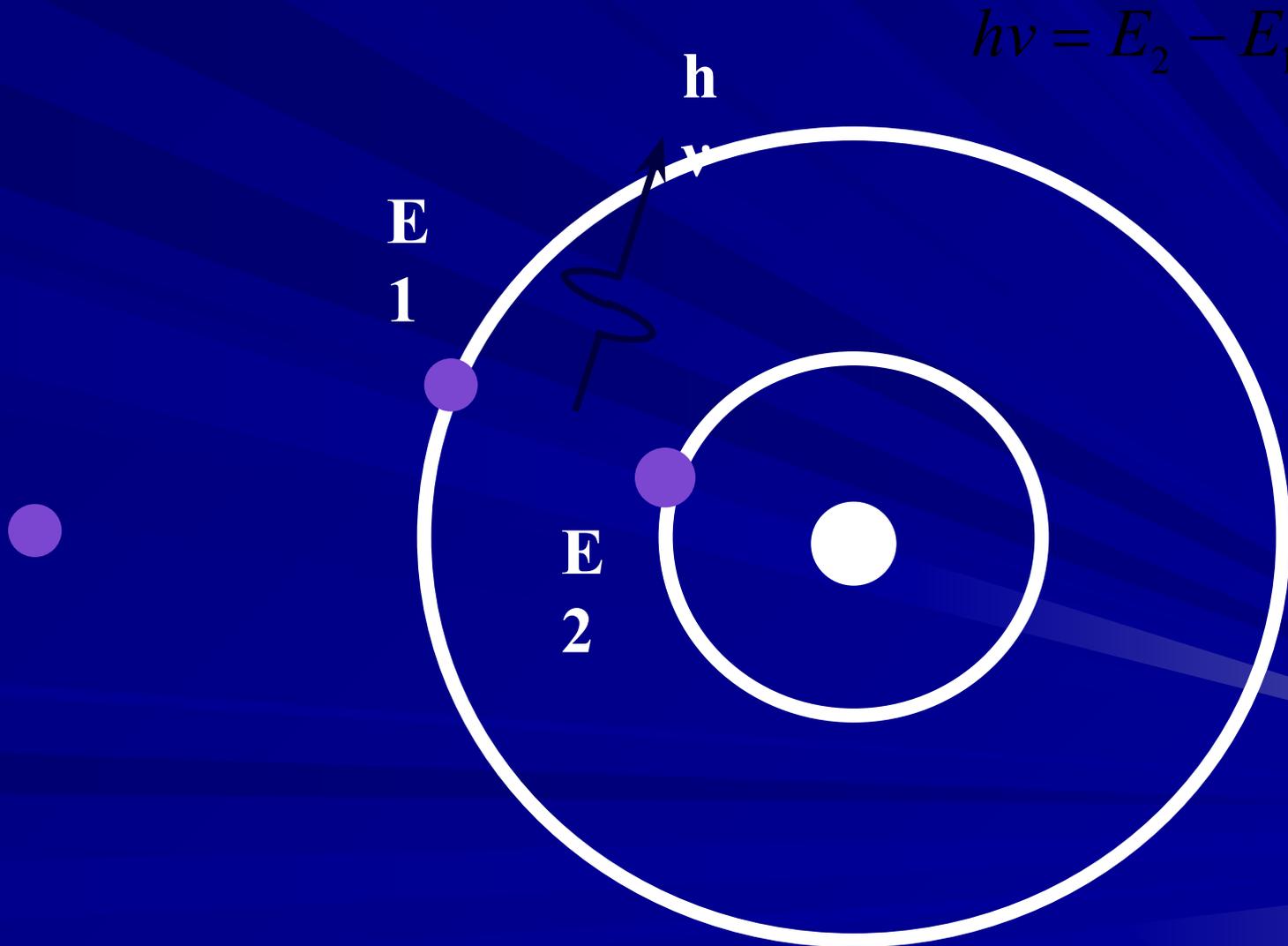
Наибольшей энергией обладают кванты характеристического излучения К-серии.

# Атом – это Солнечная система



МОДЕЛЬ АТОМА УГЛЕРОДА

# Возникновение характеристического излучения



# Механизм генерации характеристического РИ

Линии характеристического спектра группируются в серии.

Максимальное количество серий – 6.

Наличие излучения определенной серии зависит от соотношения потенциала возбуждения серии  $U_i$  и ускоряющего напряжения  $U$ . При  $U$  больше  $U_k$  характеристический спектр содержит все серии.

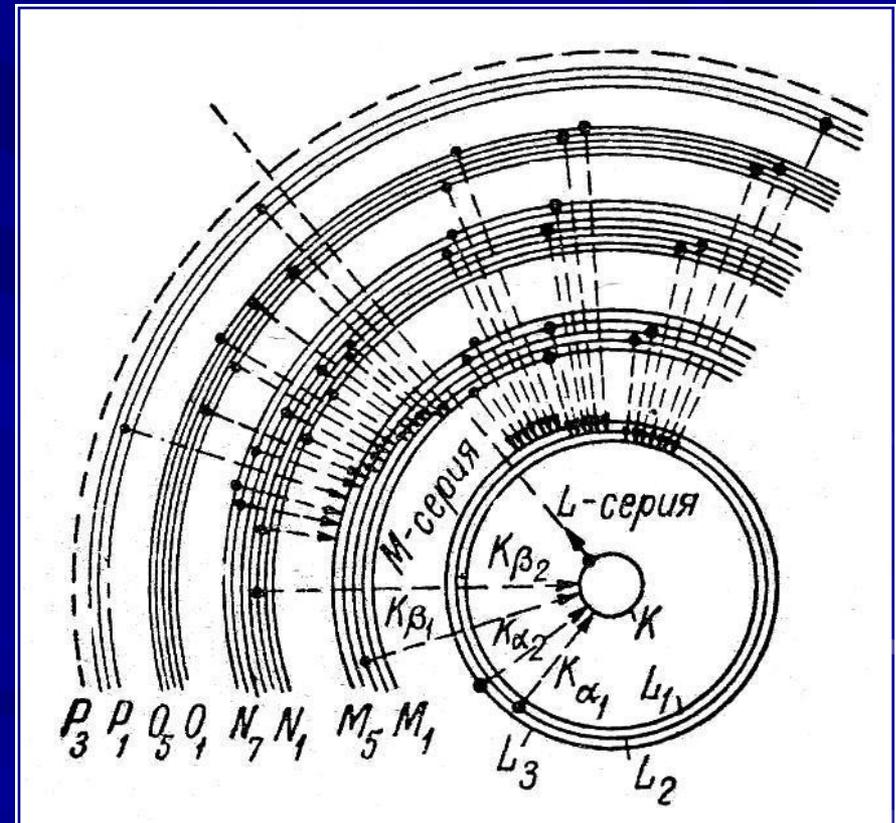


Схема уровней энергий в атоме урана

# Характеристическое РИ

Закономерности формирования характеристического спектра были описывается выражением

Закон Мозли:

$$\nu = cR(Z - S)^2 \left[ \left( \frac{1}{n_1^2} \right) - \left( \frac{1}{n_2^2} \right) \right],$$

где  $c=3 \cdot 10^8$  м/с - скорость света;  $R=109737$  см<sup>-1</sup> - постоянная Ридберга;  $S$  - экранирующая постоянная;  $n_1, n_2$  - главные квантовые числа уровня, между которыми осуществляется переход электрона.

Интенсивность линий характеристического излучения

$$J_i = kI(U - U_i)^m,$$

где  $k$  и  $m$  - постоянные;  $U_i$  - потенциал возбуждения данной серии.

Поскольку характеристическое излучение присуще атомам, длина волны линий характеристического излучения не зависит от того, входит ли данный элемент в состав смеси или соединения

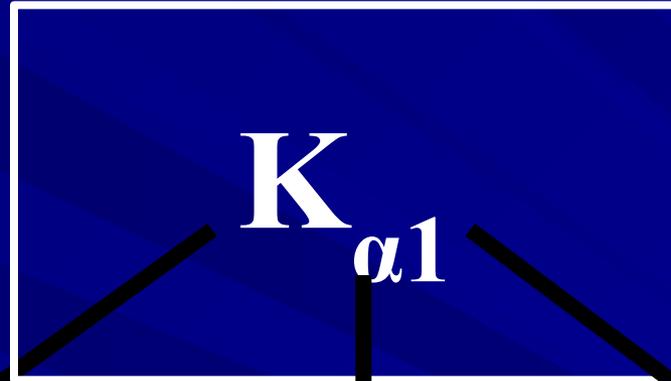
# Характеристические излучение



Генри Мозли (1887 - 1915).

«С точки зрения того, каких открытий мог ещё достигнуть Мозли... его смерть, вполне возможно, была самой большой единичной утратой в войне для всего человечества».

# Общепринятое обозначение



На какой уровень  
переходит  
электрон

С какого уровня  
переходит  
электрон

С какого  
подуровня  
переходит  
электрон

# Характеристическое РИ

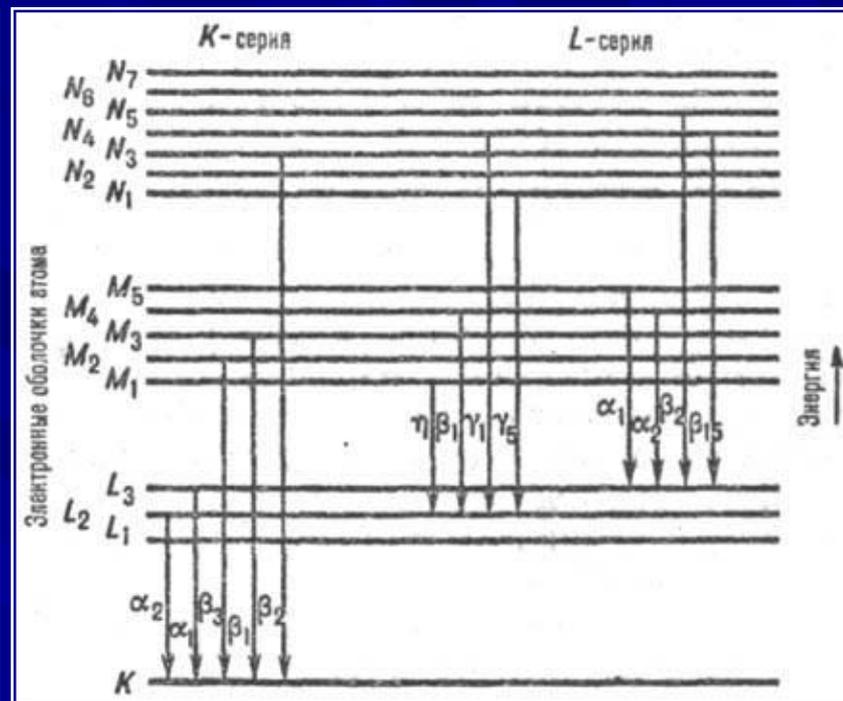
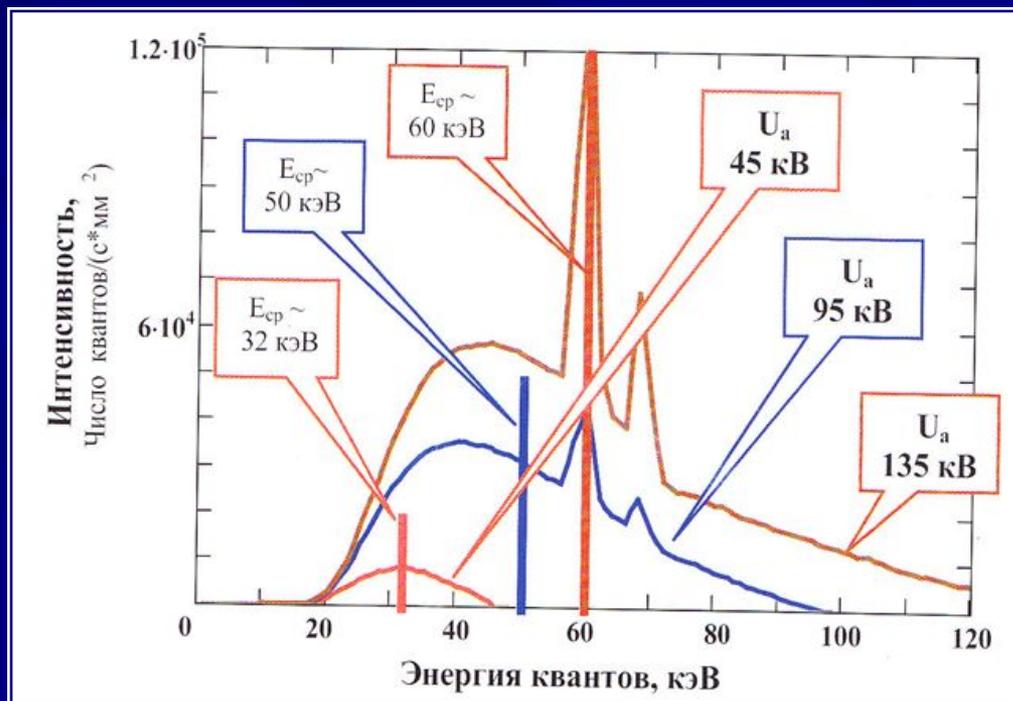
Наибольшая интенсивность линий К-серий.

В К-серии наиболее интенсивными являются линии  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

Элемент	Атомный номер	Потенциал возбуждения, кВ	Длина волны, нм			
			$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\beta_1$	$\beta_2$
U	92	115	0,0126	0,0131	0,0112	0,0108
Pb	82	87,6	-	-	-	-
W	74	69,3	0,0209	0,0213	0,0184	0,0179
Ag	47	25,5				
Mo	42	20,0	0,0708	0,0712	0,0631	0,0620
Cu	29	8,86	0,1537	0,1541	0,1389	0,1378
Fe	26	7,10	0,1932	0,1936	0,1753	0,1740
Cr	24	5,98	0,2285	0,2289	0,2080	0,2067

Отношение интенсивностей этих линий для большинства атомов равно двум!

# Изменение спектра РИ с ростом напряжения на трубке (энергии квантов РИ)



# Бескристалльный рентгеновский анализатор спектра (рентгенофлуоресцентный) БРА-18

Принцип действия анализатора основан на возбуждении флуоресцентного излучения атомов пробы исследуемого вещества излучением рентгеновской трубки.



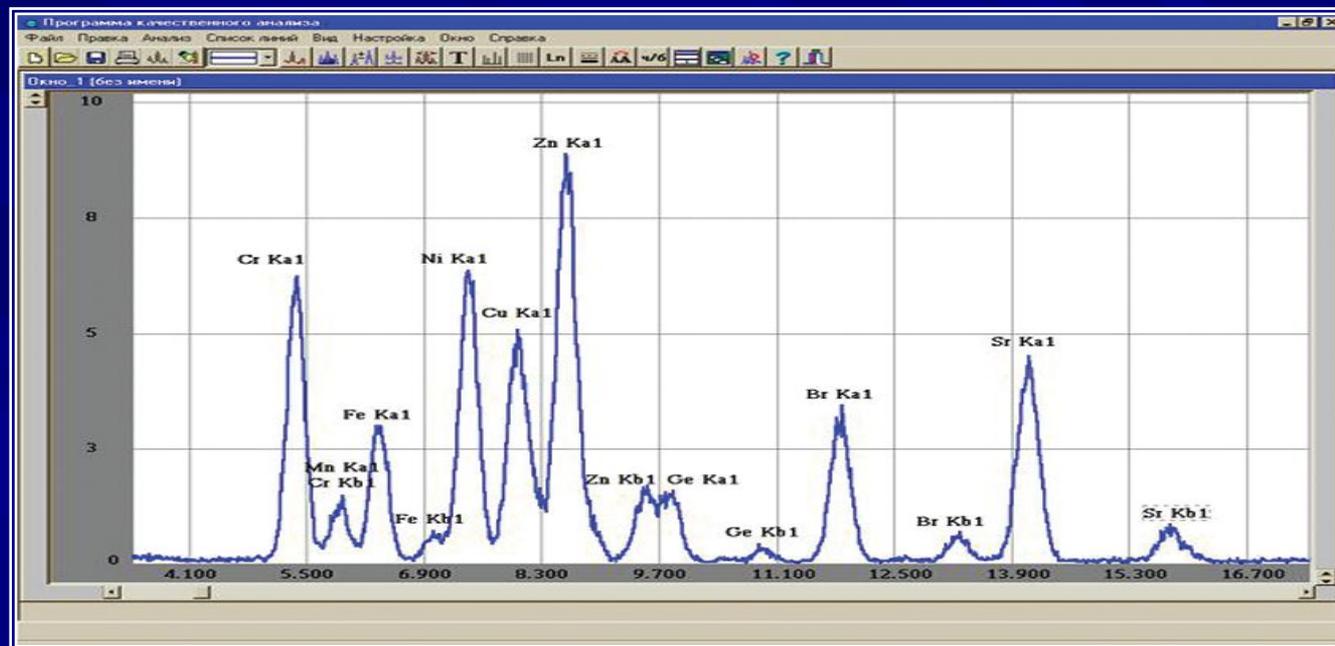
Определение химических элементов от Na до U  
в твердых, жидких  
и порошкообразных пробах

# Рентгенофлуоресцентный анализатор БРА-18



- одновременная загрузка 16 образцов, анализ которых осуществляется в автоматическом режиме;
- возможность установки образцов неправильной формы;
- анализируемые образцы находятся вне вакуумного объема и загружаются сверху, поэтому одинаково проводится анализ твердых, сыпучих и жидких образцов;
- наличие вакуумируемой измерительной камеры обеспечивает высокие аналитические характеристики прибора в области легких элементов

# Рентгенофлуоресцентный анализатор БРА-18



Флуоресцентное излучение от образца попадает в полупроводниковый детектор, где кванты различной энергии преобразуются в электрические импульсы, амплитуды которых пропорциональны энергии поглощенных квантов. С помощью аналого-цифрового преобразователя последовательность электрических импульсов преобразуется в спектр, отражающий химический состав анализируемого образца.