



**Рентгеновское излучение.
Источники рентгеновского излучения.
Взаимодействие рентгеновского излучения с
веществом.**

Содержание

1. Рентгеновское излучение (РИ)

2. Источники РИ. Спектральный состав РИ.

2.1 Характеристическое рентгеновское излучение. Закон Мозли.

2.2 Рентгеновские трубки. Спектр рентгеновской трубки.

2.3 Синхротронные источники. Изотопные источники.

3. Взаимодействие РИ с веществом

3.1 Упругое рассеяние.

3.2 Комптоновское рассеяние.

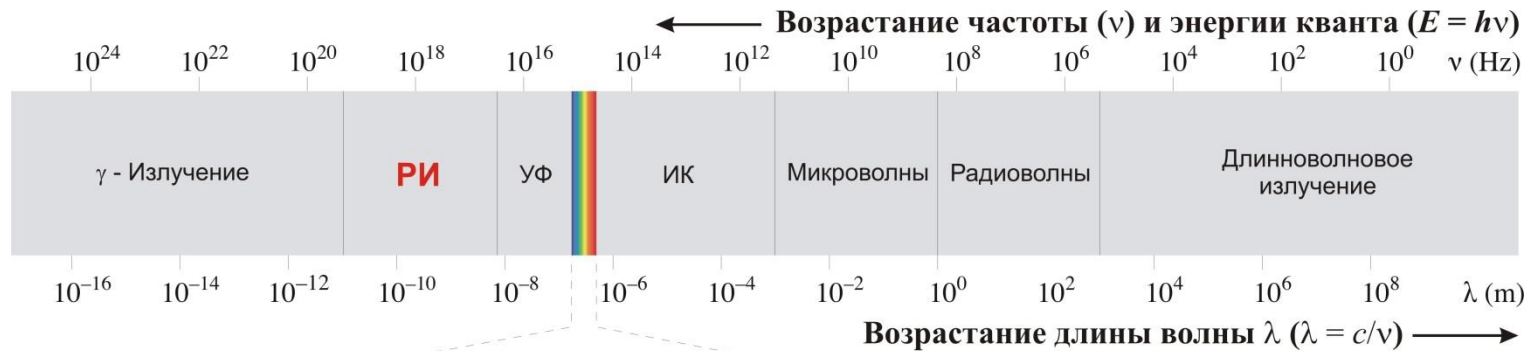
3.3 Фотоэффект. Рентгеновская флуоресценция.

3.4 Линейный коэффициент поглощения. Уравнения Гамильтона – Дарвина.

3.5 Дифракция рентгеновского излучения.

1.Рентгеновское излучение (РИ)

РИ (X-Rays, Röntgenstrahlung) – электромагнитное излучение с $\lambda = 5 \times 10^{-2} \div 10^2 \text{ \AA}$. ($E = 250 \text{ кэВ} - 100 \text{ эВ}$).



Кстати:

$$\lambda[A] = \frac{12.4}{E[кэВ]}$$



В.К.Рентген

**1-я
Нобелевская
премия по
физике (1901)**

1.Рентгеновское излучение (РИ)

Как и всякое ЭМ излучение, РИ характеризуется:

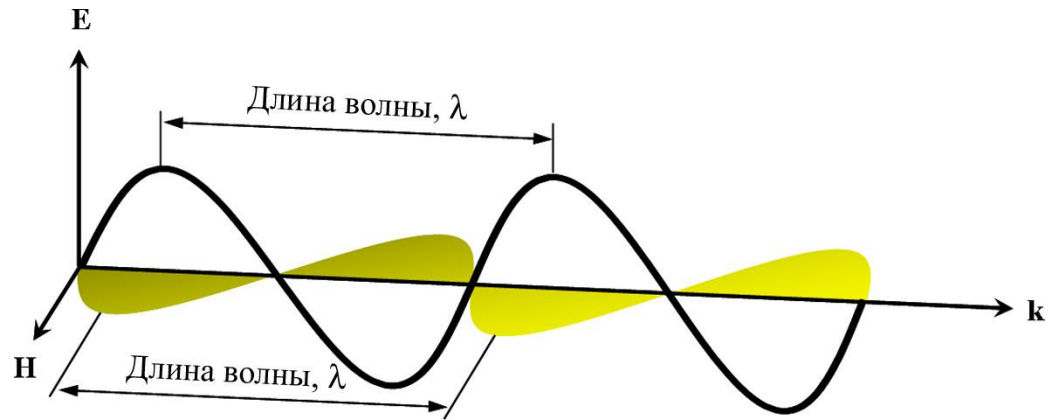
1. Волновым вектором $\mathbf{k}$

$$|\mathbf{k}| = 2\pi/\lambda = \omega/c$$

2. Амплитудой A

(а точнее, амплитудами E и H)

3. Поляризацией



В комплексном виде:

$$\hat{a}(t) = A \exp i(\omega t + \varphi) = \hat{A} \exp i\omega t$$

$$I \sim |\hat{A}|^2$$

Кстати:

В теории дифракции РИ часто считают
 $|\mathbf{k}| = 1/\lambda$

Это все для когерентного монохроматического излучения ☹.

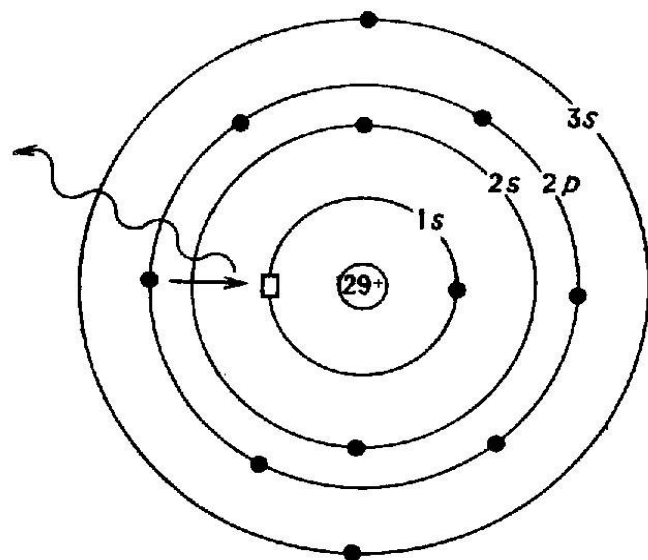
1. Когерентные источники РИ (рентгеновский лазер) ☺....
2. Обычно РИ имеет протяженный спектр, некогерентно.
3. Длина когерентности РИ ~ 1 мкм.

2. Источники РИ. Спектральный состав РИ.

Энергия связи электронов на низшей (*K*) оболочке атомов:

H: 13.6 эВ (= Ry) ➡ Be: 115.6 эВ ➡ Cu: 8.983 кэВ ➡ Pu: 121.768 кэВ

Характеристическое РИ:

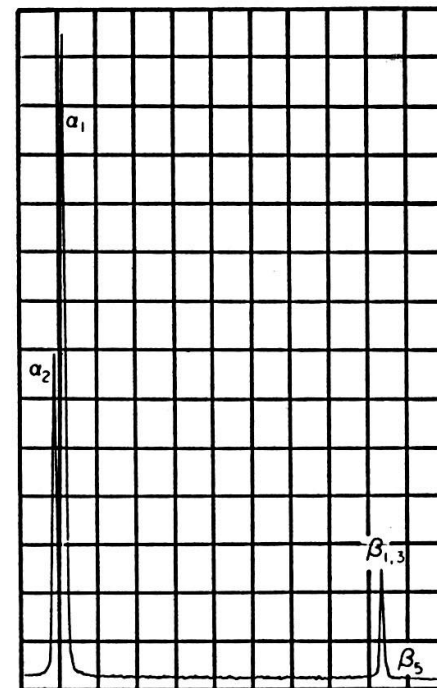
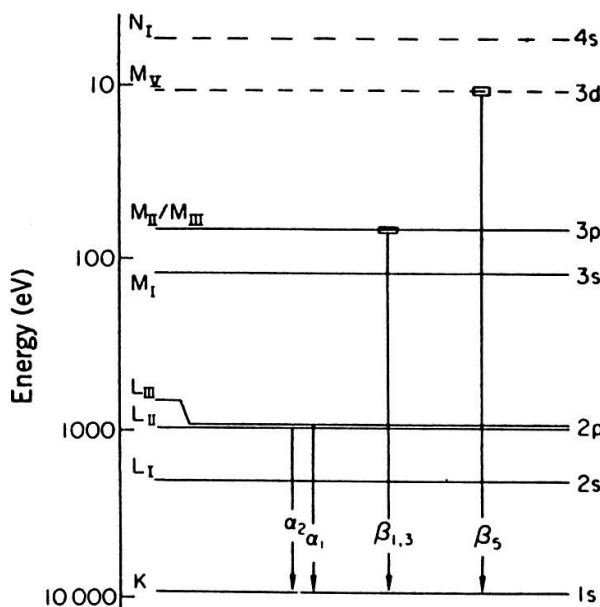


$$E(K\alpha) = E_{1s} - E_{2p}$$

$$K\alpha_1 = 2p_{3/2} \rightarrow 1s$$

$$K\beta_1 = 3p_{3/2} \rightarrow 1s$$

$$L\alpha_1 = 3d_{3/2} \rightarrow 2p_{1/2}$$



Закон Мозли (для *K* – серии)

$$E(Z) = Ry \times (Z - 1)^2 \times \left(1 - \frac{1}{n^2}\right), n = 2, 3, \dots$$

2. Источники РИ. Спектральный состав РИ.

Обозначения линий характеристического РИ

K-серия		L-серия		M-серия	
Переход	Индекс линии	Переход	Индекс линии	Переход	Индекс линии
$K-L_{II}$	α_2	L_I-M_{II}	β_4	$M_{III}-N_V$	γ
$K-L_{III}$	α_1	L_I-M_{III}	β_3	$M_{IV}-N_{III}$	δ
$K-M_{II}$	β_3	L_I-M_{IV}	β_{10}	$M_{IV}-$	β
$K-M_{III}$	β_1	L_I-M_V	β_9	$-N_{VI,V II}$	
$K-M_{IV}$	β_{15}^{II}	L_I-N_{II}	γ_2	$M_{IV}-$	η
$K-M_V$	β_{15}^I	L_I-N_{III}	γ_3	$-O_{II, III}$	
$K-M_{IV,V}$	β_5	L_I-O_{II}	γ_4	M_V-N_{II}	ϵ_1
$K-N_{II}$	β_2^{II}	L_I-O_{III}	γ_4	M_V-N_{III}	ϵ_2
$K-N_{III}$	β_2^I	$L_I-P_{II,III}$	γ_{13}	$-N_{II, III}$	ϵ
$K-N_{II, III}$	β_3	$L_{II}-M_I$	η	M_V-N_{VI}	α_2
$K-N_{IV}$	$\beta_{4,x}$	$L_{II}-M_{IV}$	β_1	M_V-N_{VII}	α_1
$K-N_V$	β_1	$L_{II}-N_I$	γ_5		
		$L_{II}-N_{IV}$	γ_1		
		$L_{II}-O_I$	γ_8		
		$L_{II}-O_{IV}$	γ_6		
		$L_{III}-M_I$	l		
		$L_{III}-M_{II}$			
		$L_{III}-M_{III}$	s		
		$L_{III}-M_{IV}$	α_2		
		$L_{III}-M_V$	α_1		
		$L_{III}-N_I$	β_6		
		$L_{III}-N_{IV}$	β_{15}		
		$L_{III}-N_V$	β_2		
		$L_{III}-$	β_7		
		$-N_{VI, VII}$			
		$L_{III}-O_I$	β_7		
		$L_{III}-O_{IV,V}$	β_5		

Уровень электрона в атоме	1s	2s	2p _{1/2}	2p _{3/2}	3s
Терм уровня	K	L _I	L _{II}	L _{III}	M _I
Уровень электрона в атоме	3p _{1/2}	3p _{3/2}	3d _{3/2}	3d _{5/2}	и т. д.
Терм уровня	M _{II}	M _{III}	M _{IV}	M _V	и т. д.

Интенсивности линий внутри каждой серии связаны между собой определенным образом:

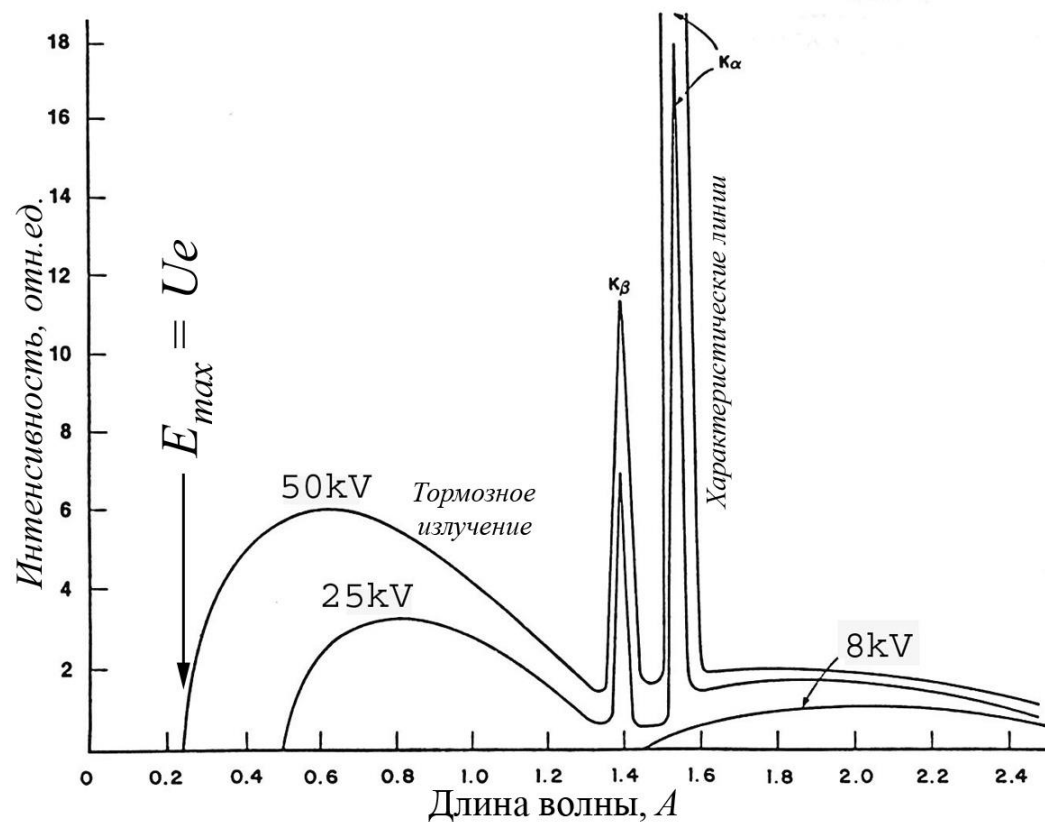
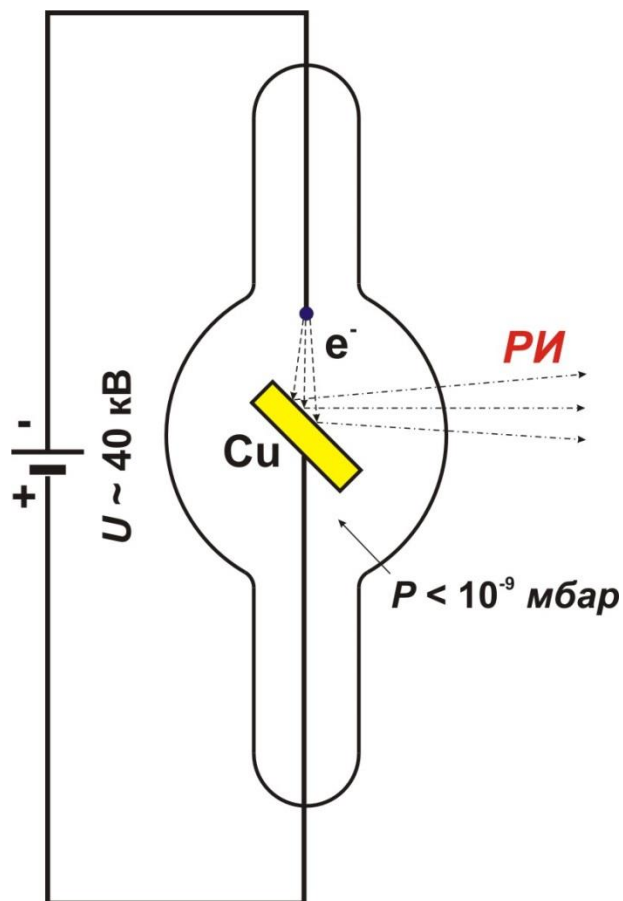
Например, для Cu K-серии:

$$I\alpha_1:I\alpha_2:I\beta_1\approx 10:5:2$$

Cu K	$\lambda_{K\alpha_1}$ для
$\lambda_{\alpha_1} = 1.5406 \text{ \AA}$	Ag 0.5594 $\text{\AA}$
$\lambda_{\alpha_2} = 1.5444 \text{ \AA}$	Mo 0.7093 $\text{\AA}$
$\lambda_{\beta_1} = 1.3930 \text{ \AA}$	Co 1.7890 $\text{\AA}$
$\lambda_{\alpha} = 1.5418 \text{ \AA}$	Fe 1.9360 $\text{\AA}$
	Cr 2.2897 $\text{\AA}$

2. Источники РИ. Спектральный состав РИ.

Рентгеновская трубка
(Cu - анод)



Характеристическое излучение:

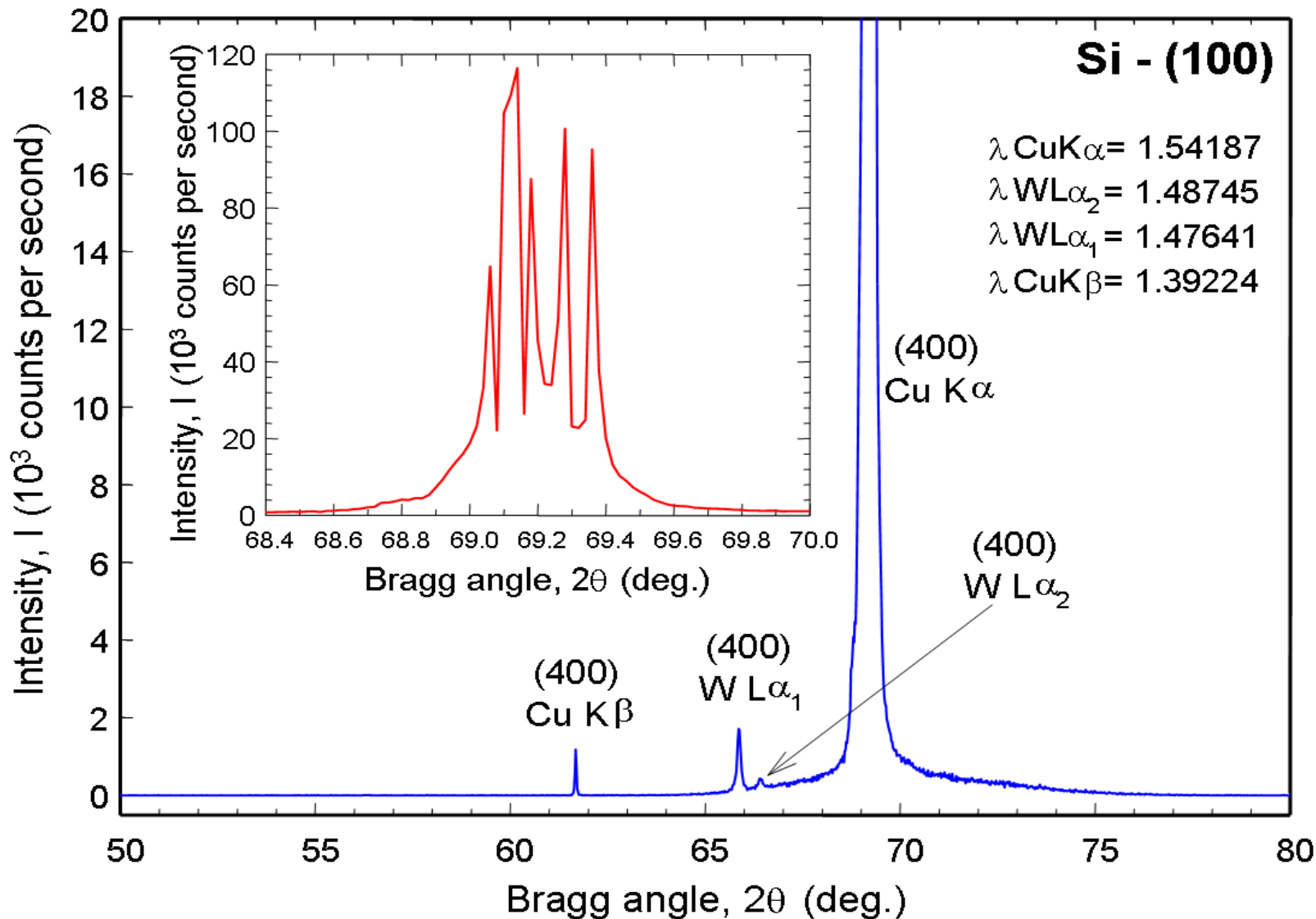
$$I \sim i \times (U - U_o)^n, 1.6 < n < 2 \quad U_o(\text{Cu}) \sim 9 \text{ кВ}$$

Тормозное излучение (белый спектр):

$$I \sim i \times U^2 Z, Z - \text{ атомный номер материала анода}$$

2. Источники РИ. Спектральный состав РИ.

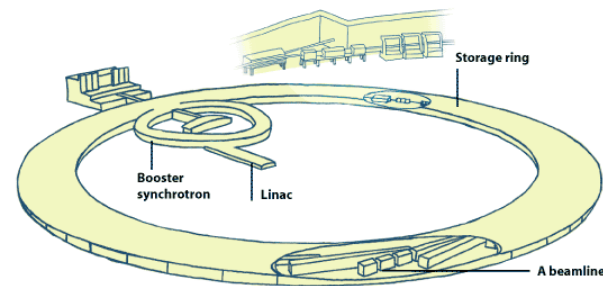
Многокомпонентный анод (Cu с примесью W):



2. Источники РИ. Спектральный состав РИ.

Синхротронные источники:

- Синхротронное излучение – излучение релятивистских электронов, движущихся с ускорением.
- Интенсивность – в $10^6 - 10^{20}(!)$ раз выше, чем у рентгеновской трубки.
- Протяженный гладкий спектр.
- Поляризованное излучение.

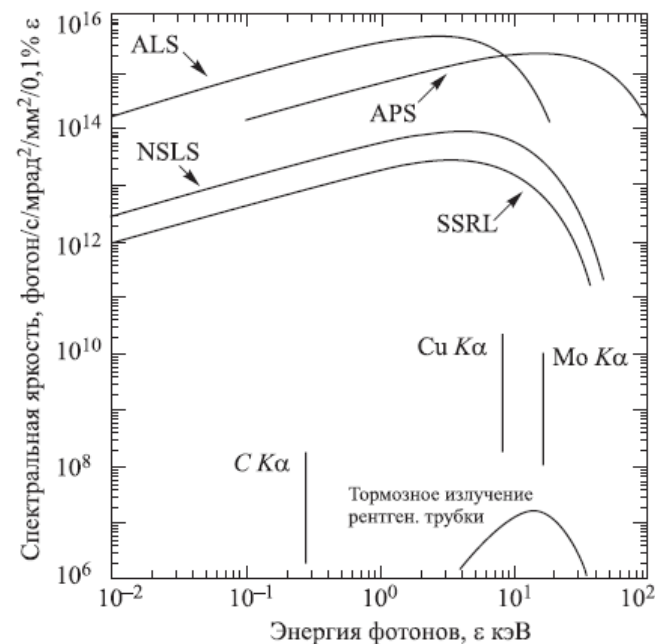


Изотопные источники:

- Распад K – захватом:



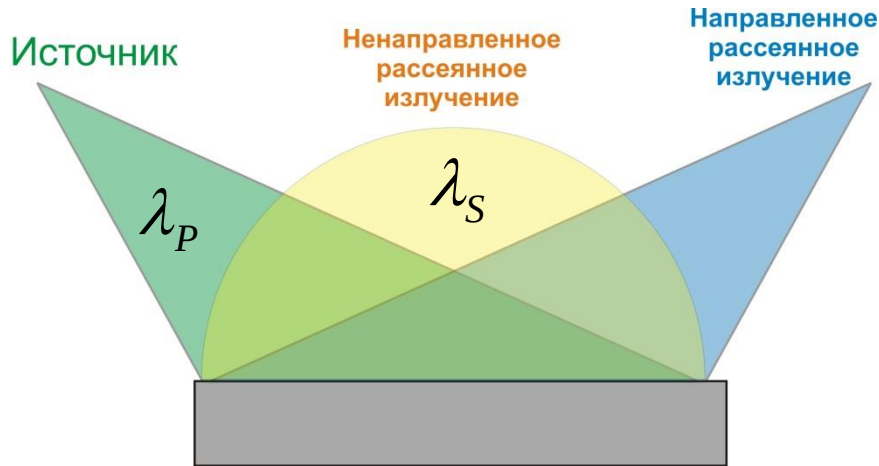
- Практически чистая K – серия (без тормозного излучения).
- Таких изотопов сравнительно немного, например ^{26}Al (Mg K), ^{59}Ni (Co K) и т.п.



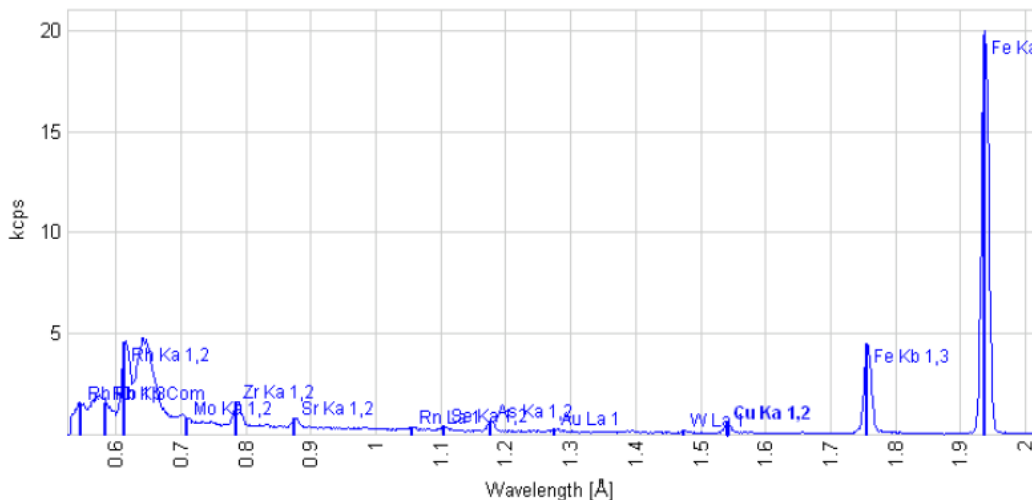
(по Г.В.Фетисов, 2007)

3. Взаимодействие РИ с веществом.

Взаимодействие РИ с веществом



Типичный спектр рассеянного излучения



Упругое рассеяние

- Релеевское рассеяние

$$\lambda_P = \lambda_S$$

Неупругое рассеяние

- Комптоновское рассеяние – взаимодействие со слабо связанным электроном

$$\lambda_S = \lambda_P + \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \alpha)$$

- Фотоэффект и последующая рентгеновская флуоресценция

$$\lambda_P > \lambda_S = \lambda_{K,L,M}^X$$

Упругое когерентное рассеяние

- Дифракция

$$\lambda_P = \lambda_S$$

для когерентного рассеяния первичного пучка

3.1 Упругое (релеевское/томсоновское) рассеяние

Томсоновское рассеяние – упругое рассеяние на заряженных частицах.

Рассеяние происходит упруго - с сохранение длины волны: $\lambda_P = \lambda_S$

Полное сечение рассеяния: $\sigma = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 mc^2} \right)^2$

Очевидно, что $\sigma_N \ll \sigma_p \ll \sigma_e$ -
рассеяние происходит, в основном, на электронах

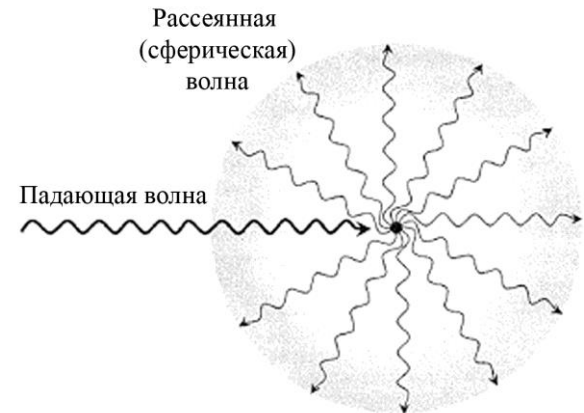
Интенсивность рассеянного излучения (нет зависимости от λ !):

$$\frac{d\varepsilon}{d\Omega} = I_0 n \left(\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 mc^2} \right)^2 \frac{1 + \cos^2 2\theta}{2}$$

Рассеянное излучение – сферическая волна.

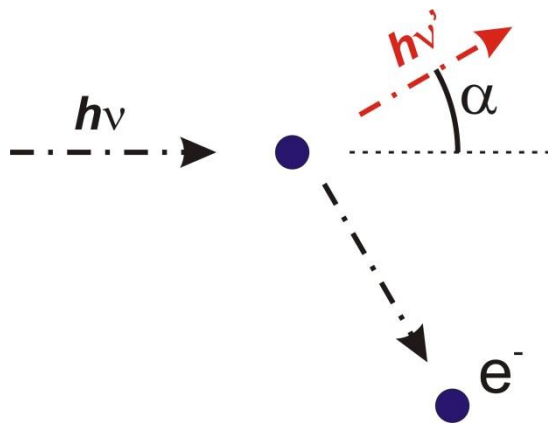
$$I \sim \frac{1}{r^2}$$

Рассеянное излучение поляризовано (параллельно ускорению частицы).



3.2 Комptonовское рассеяние

Соударение кванта РИ и слабо связанного (!) электрона

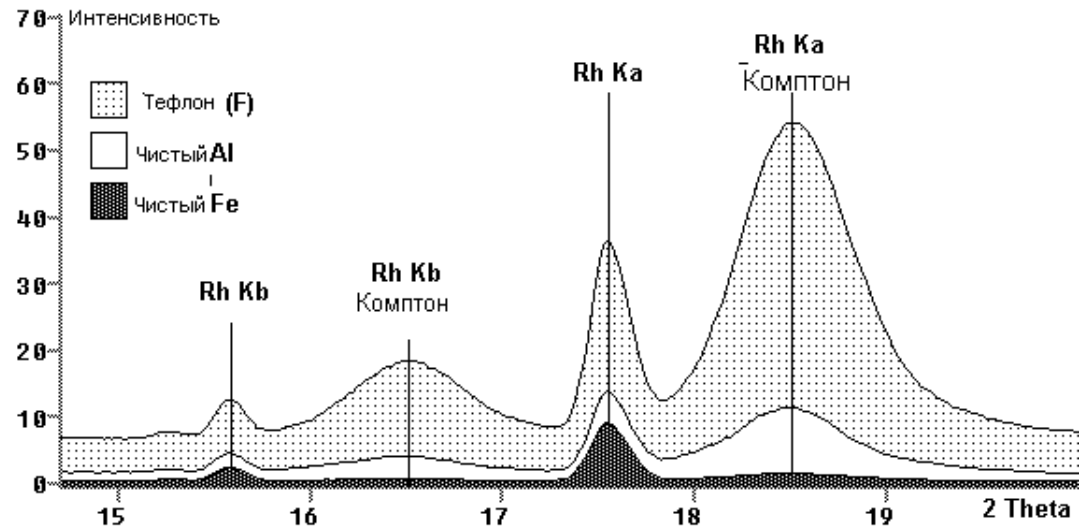


Часть энергии кванта $h\nu$ передается электрону:

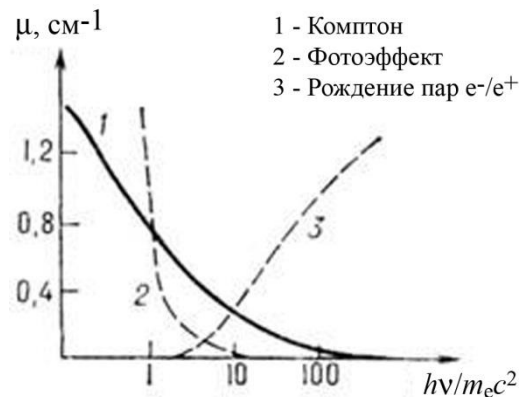
$$\lambda' = \lambda + \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \alpha)$$

для свободного покоящегося электрона

Соотношение $I^{\text{Relay}}/I^{\text{Compton}}$ зависит от типа вещества



Широкий комptonовский пик ↔ распределение импульсов связанных электронов

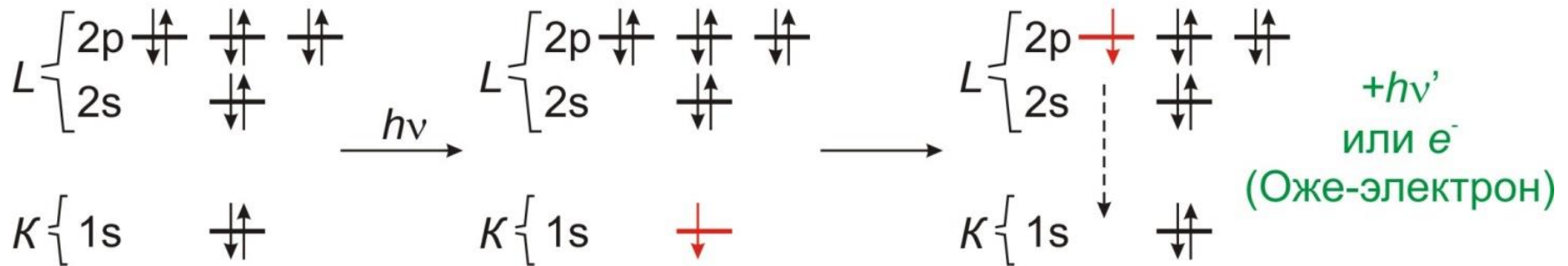


Сечение рассеяния комptonовского излучения имеет сложную зависимость от энергии кванта

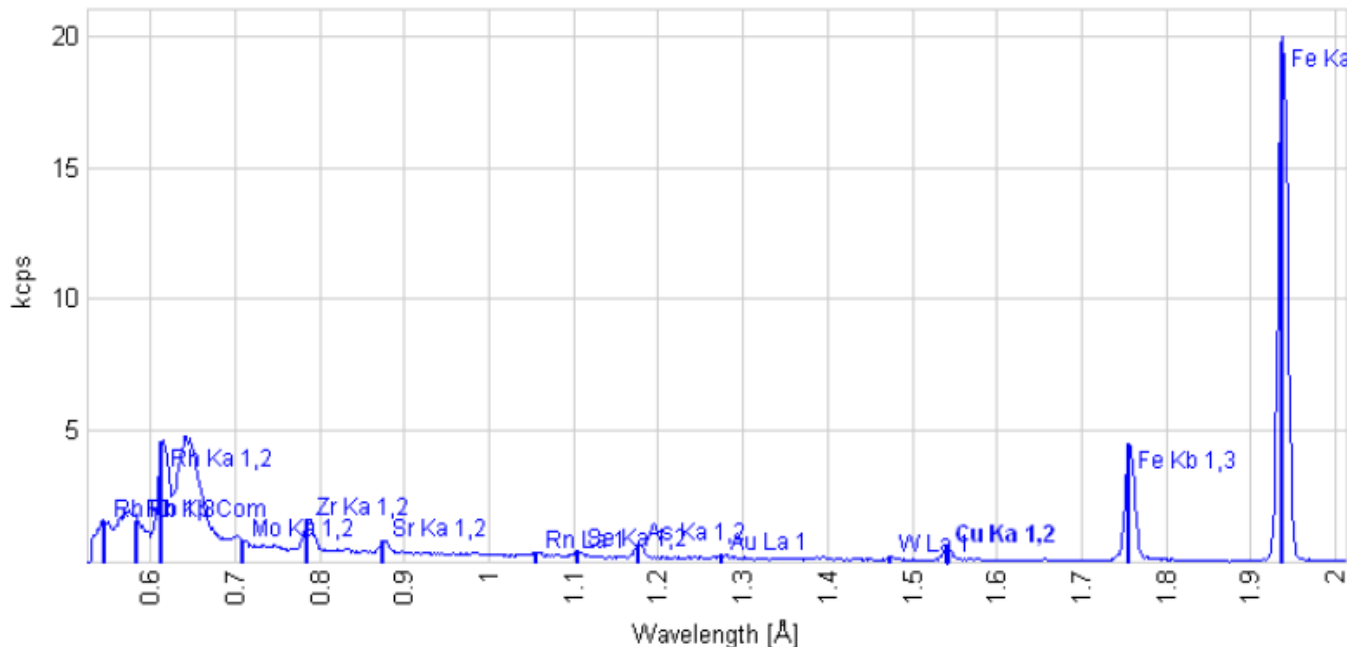
3.3 Фотоэффект. Рентгеновская флуоресценция.

Взаимодействие электрона с *K*-оболочки с квантом РИ.

$$+ e^- (E = h\nu - \varepsilon_{1s})$$



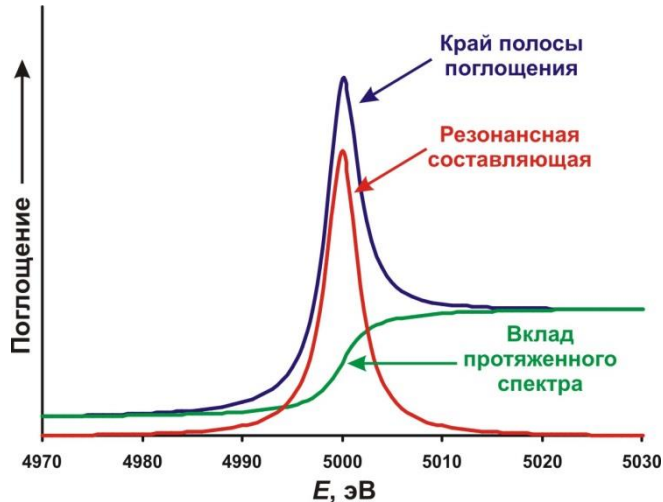
Спектр рассеянного излучения



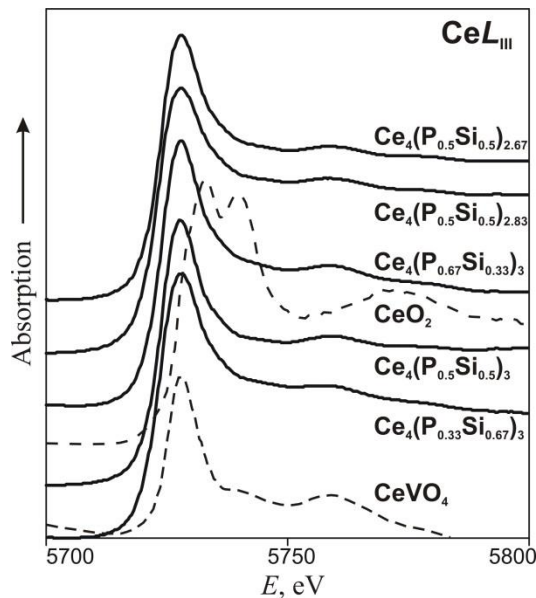
**Фотоэффект +
рентгеновская
флуоресценция
– один из самых
вероятных
процессов**

3.3 Фотоэффект. Рентгеновская флуоресценция.

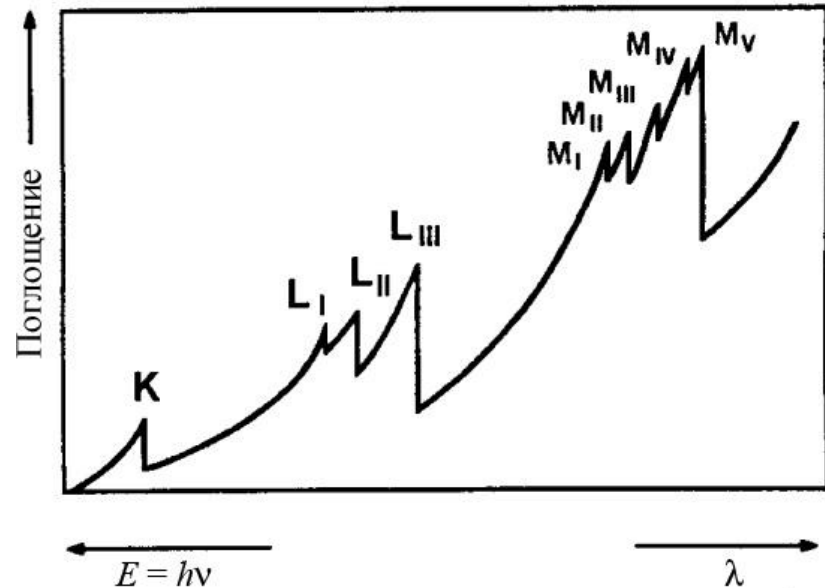
Какова зависимость вероятности фотоэффекта от энергии кванта?



XANES, EXAFS



Край полосы поглощения ($h\nu = E_{K,L,M,\dots}$)



**Вдали от края полосы
поглощения:**

$$\mu \sim \lambda^3 Z^3$$

Наибольшая вероятность поглощения кванта
- у сильно связанных электронов (K-
уровень).

3.4 Линейный коэффициент поглощения. Уравнения Гамильтона – Дарвина.

Закон Бугера-Ламберта-Бэра:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

Линейный коэффициент поглощения μ
– сумма всех видов взаимодействий

Очевидно, что $\mu = \mu(\lambda, \text{материал})$. $[\mu] = \text{мм}^{-1} = 10 \text{ см}^{-1} = (1000 \text{ м}^{-1})$

Для более детального описания взаимодействия РИ с веществом применяют
т.н. **уравнения Гамильтона – Дарвина:**

$$\frac{\partial I_P}{\partial \mathbf{t}_P} = \mu I_P + \sigma_2 I_S$$

I_P – интенсивность первичного пучка с
направлением распространения $\mathbf{t}_P$,

$$\frac{\partial I_S}{\partial \mathbf{t}_S} = \mu I_S + \sigma_1 I_P$$

I_S – интенсивность вторичного пучка с
направлением распространения $\mathbf{t}_S$, σ – сечение
рассеяния для векторов $\mathbf{t}_P, \mathbf{t}_S$.

Зачастую принимают:

$$\frac{\partial I_P}{\partial \mathbf{t}_P} = \mu I_P$$

- пренебрежение
т.н. «экстинкцией»

$$\frac{\partial I_S}{\partial \mathbf{t}_S} = \mu I_S + \sigma I_P$$

**Эти уравнения понадобятся
нам при расчете
коэффициентов абсорбции,
количественном РФА,
исследовании тонких
пленок...**

Summary

1. Рентгеновское излучение (РИ) – коротковолновое ($0.05 - 100 \text{ \AA}$) ЭМ излучение.
2. РИ возникает при переходах во внутренних оболочках атомов (характеристическое РИ)
3. Источники РИ: рентгеновская трубка, синхротрон, изотопы...
4. Взаимодействие с веществом РИ комплексное: упругое и неупругое рассеяние, фотоэффект...
5. Распространение РИ в пробе – уравнения Гамильтона-Дарвина