

Дисциплина «Источники рентгеновского излучения»

Кафедра электронных приборов и устройств

Потрахов Николай Николаевич

*Санкт-Петербургский
Государственный
Электротехнический
Университет (ЛЭТИ)*



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.

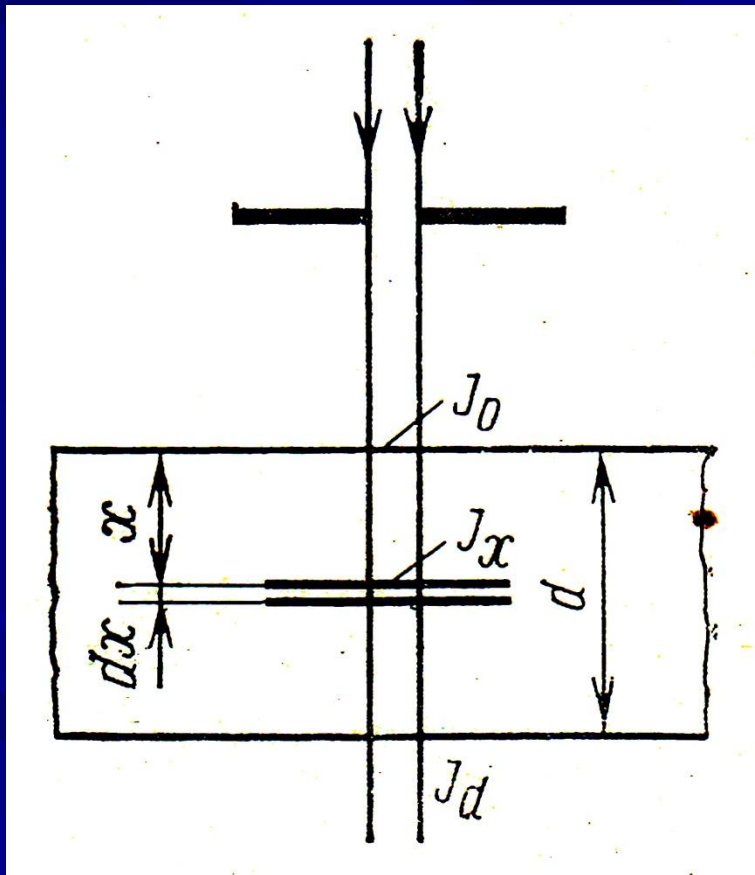
Лекция 9 - Рентгеновские аппараты. Цифровые рентгенодиагностические комплексы.

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

Лекция 2
Ослабление РИ.
Взаимодействие РИ с
веществом. Поглощение РИ.
Рассеивание РИ

Ослабление РИ

При прохождении РИ через вещество его интенсивность убывает из-за потери энергии в результате взаимодействия с атомами, электронами и ядрами атомов вещества.



J_0 - интенсивность узкого параллельного пучка РИ перед объектом;

J_x - интенсивность пучка РИ, входящего в слой вещества объекта толщиной dx ;

J_d - интенсивность пучка излучения за объектом толщиной d

Ослабление РИ

Относительное уменьшение интенсивности излучения в элементарном слое dx

$$-\frac{dI_x}{I} = \mu \cdot dx, \quad (1)$$

где μ – коэффициент пропорциональности.
Интегрирование выражения (1)

$$\int_{I_0}^{I_d} \frac{dI_x}{I_x} = -\int_0^d \mu \cdot dx$$

$$\ln \frac{I_d}{I_0} = -\mu d$$

Закон ослабления РИ веществом

$$I_d = I_0 e^{-\mu d}, \quad (2)$$

где μ [1/см] – линейный коэффициент ослабления РИ веществом;
 μ характеризует относительное уменьшение интенсивности излучения на единицу длины его пути в веществе.
 μ зависит от плотности вещества ρ

Ослабление РИ

Поскольку реальный поток РИ, выходящий, например, из окна рентгеновской трубки, имеет конкретные размеры: угол раствора, сечение и т.д., в практических расчетах удобнее использовать массовый коэффициент ослабления РИ

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}, \left[\frac{\text{см}^2}{\text{г}} \right] \quad (3)$$

где $\rho = m/V$ [г/см³];

μ_m характеризует относительное уменьшение интенсивности излучения при прохождении слоя вещества d , содержащего массу 1 г на площади 1 см².

$$I = I_0 e^{-\mu_m \rho d},$$

где $\rho \cdot d$, [г/см²] – условная толщина вещества

Ослабление РИ

Атомный коэффициент ослабления РИ - μ_a [см²/атом];
рассчитывается нормированием на количество атомов в слое вещества

$$\mu_a = \frac{\mu}{\rho} \frac{Z}{N_a} \quad N_a = N \frac{Z}{A}$$

где Z - атомный номер вещества;
 N_a [атом/г] - число атомов в одном грамме вещества
 N - число Авогадро = $6,02214129(27) \cdot 10^{23}$ моль⁻¹;

$$\mu_a = \frac{\mu}{\rho} \frac{A}{N},$$

где A - атомная масса вещества.

Электронный коэффициент ослабления РИ μ_e - [см²/электрон];
Рассчитывается нормированием на количество электронов

$$\mu_e = \mu_m \frac{1}{N_e},$$

где N_e - число электронов в одном грамме вещества;

μ_a - эффективное сечение взаимодействия РИ с атомами вещества;
 μ_e - эффективное сечение взаимодействия РИ с электронами вещества

Ослабление РИ

Общее выражение для расчета массового коэффициента ослабления РИ, где λ – длина волны, a и β – числовые коэффициенты

$$\frac{\mu}{\rho} = a \cdot \lambda^3 + \beta$$

Вещество (химический элемент)	Порядковый номер, Z	Длина волны λ , нм	Энергия E, кэВ	Массовый коэффициент ослабления μ/ρ
Углерод	6	0,04 – 0,09	15-30	$1,025\lambda^3+0,175$
Воздух	7,69	>0,09	>15	$2,55\lambda^3+0,17$
Вода	7,43	>0,09	>15	$2,55\lambda^3+0,17$
Алюминий	13	0,01 – 0,04	30-125	$14,45\lambda^3+0,15$
Свинец	82	>0,02	>60	$510\lambda^3+0,75$

Ослабление РИ

При характеристике спектра РИ используются понятия:

«жесткость» и коротковолновая граница $\lambda_{\text{мин}}$.

Рассчитать $\lambda_{\text{мин}}$ можно по выражению

$$\lambda_{\text{мин}} = \frac{1,24}{\text{кВ}} \text{ [нм]},$$

где U напряжение на рентгеновской трубке.

Прямые измерения U трудоемки.

На практике используют понятие - слой половинного ослабления Δ

$$I_{\Delta} = \frac{I_0}{2}$$

$$\Delta = \frac{\ln 2}{\mu} = 0,693 \mu^{-1}$$

Вещество (химический элемент)	Δ , мм	
	$\lambda_{\text{мин}}=0,025$ нм $U=50$ кВ	$\lambda_{\text{мин}}=0,01$ нм $U=125$ кВ
Свинец	7	0,75
Алюминий	9	24

или слой десятичного ослабления Δ_{10}

Взаимодействие РИ с веществом

Взаимодействие РИ с веществом происходит на атомном и электронном уровнях, а также на уровне ядер атомов.

Механизмы взаимодействия:

- фотоэлектрическое поглощение (фотоэффект);
- когерентное и некогерентное (Комптон-эффект) рассеяния;
- образование электронно-позитронных пар

Коэффициент ослабления РИ

$$\mu = \tau + \sigma_{\text{ког}} + \sigma_{\text{неког}} + \pi,$$

где μ - линейный коэффициент ослабления;

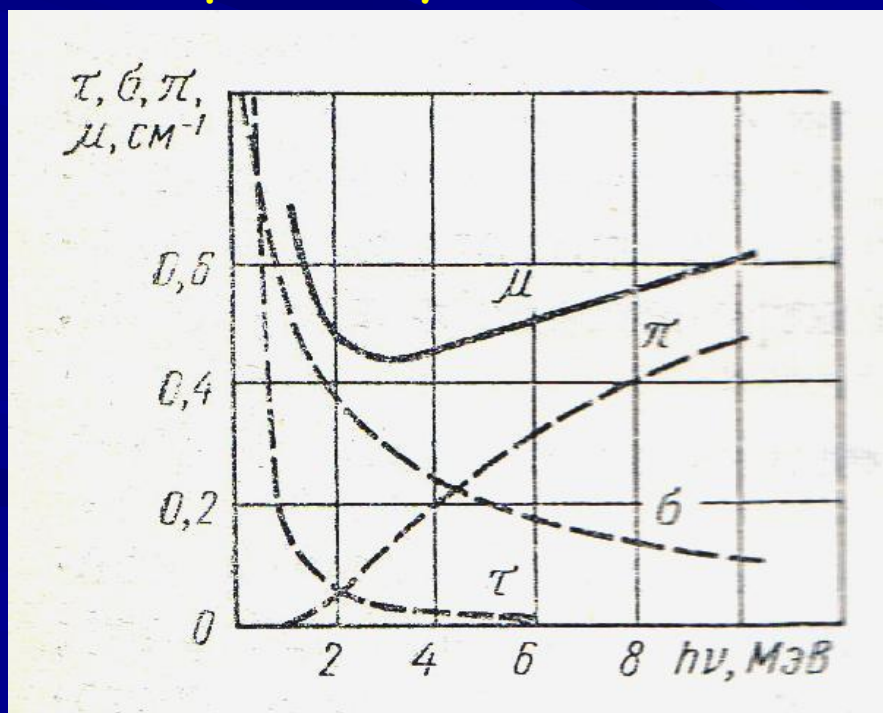
τ - линейный коэффициент фотоэлектрического поглощения;

$\sigma_{\text{ког}}$ - линейный коэффициент когерентного рассеивания;

$\sigma_{\text{неког}}$ - линейный коэффициент некогерентного рассеивания;

π - линейный коэффициент ослабления, обусловленный эффектом образования электронно-позитронных пар.

μ зависит от энергии излучения и свойств вещества



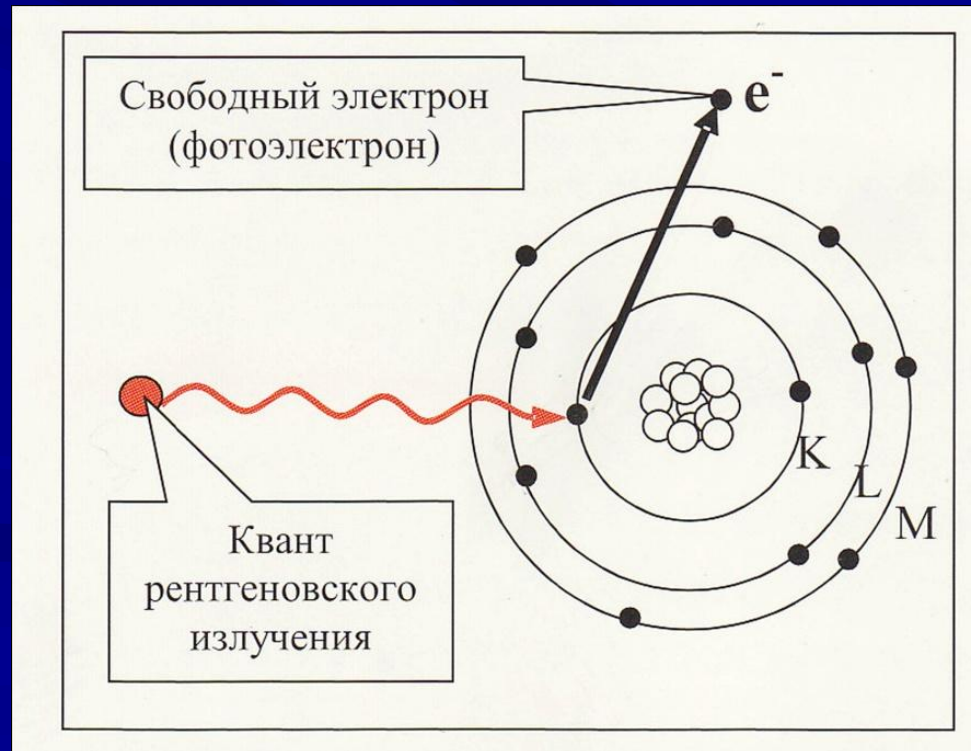
Фотоэффект

При фотоэффекте в процессе облучения вещества потоком РИ первичный квант (фотон) поглощается атомом вещества и исчезает, а из атома освобождается электрон – фотоэлектрон с энергией $h\nu$.

$$h\nu = W_i + \frac{mV^2}{2}$$

где W_i – энергия связи электрона i -го уровня в атоме;

$mV^2/2$ – кинетическая энергия фотоэлектрона после отрыва от атома



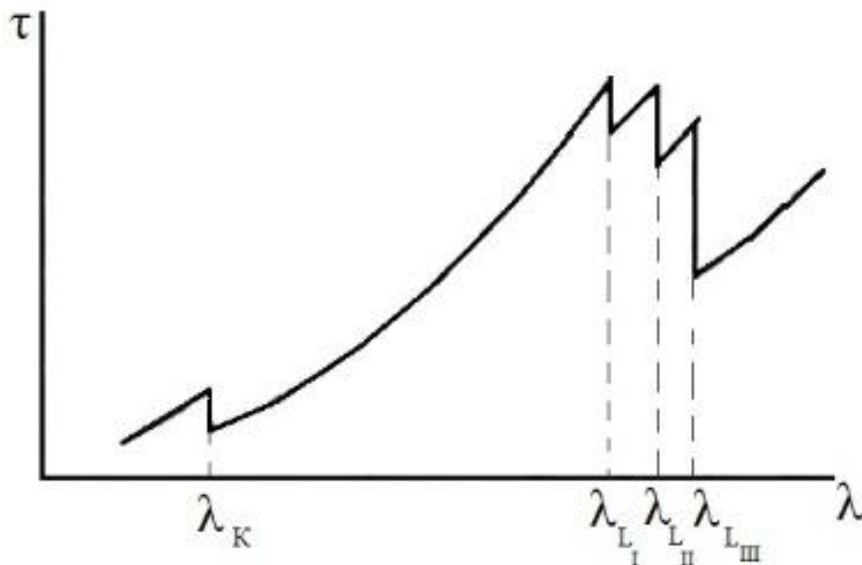
Фотоэффект

При освобождении электрона с внутренней оболочки атома на его место переходит электрон с верхней оболочки.

Переход сопровождается генерацией кванта характеристического флуоресцентного излучения.

$$h\nu = W_{\dot{\phi}} + \frac{mV^2}{2} + h\nu$$

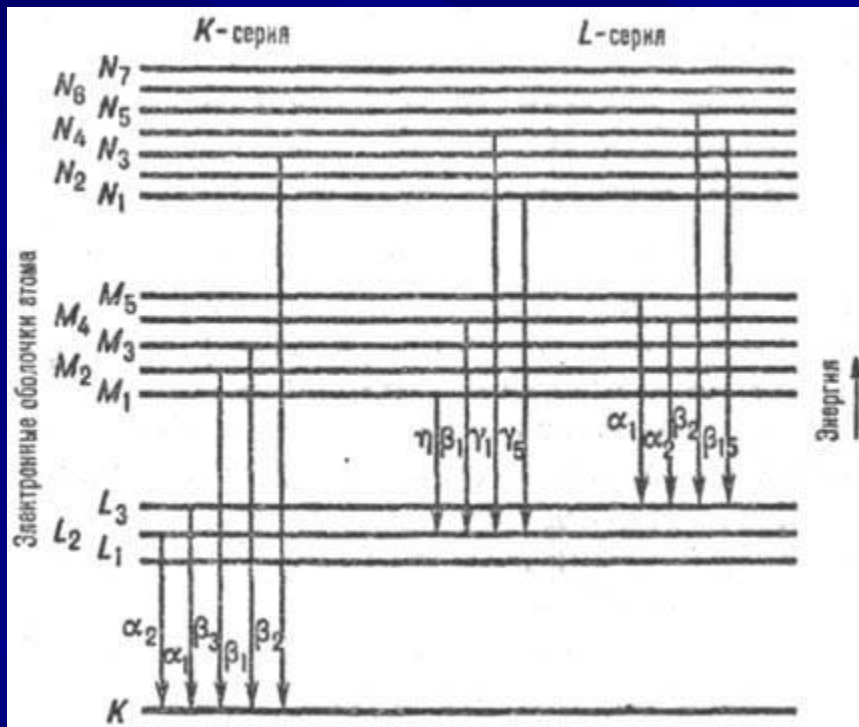
Флуоресцентное характеристическое излучение обусловлено облучением вещества квантами РИ, а не ускоренными электронами



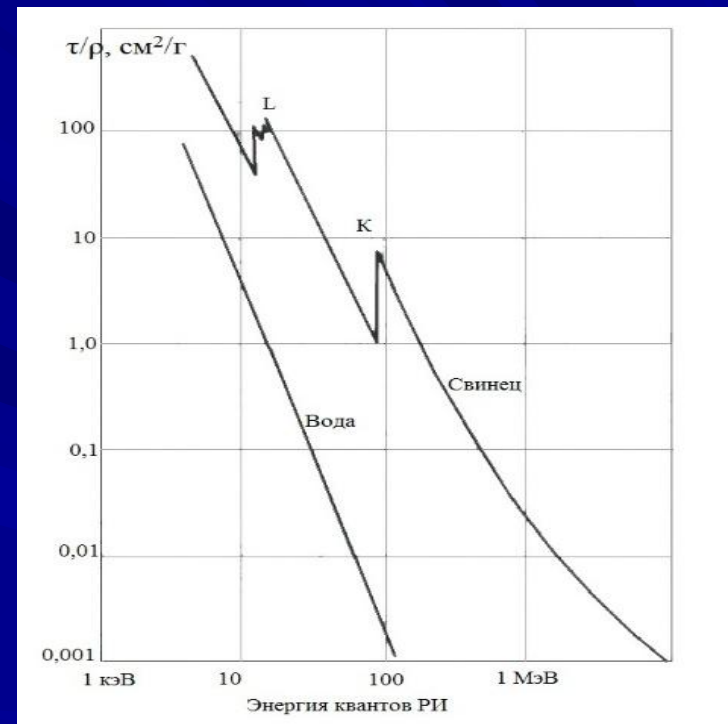
Зависимость массового коэффициента фотоэлектрического поглощения от энергии квантов РИ

Фотоэффект

В зависимости от энергии первичного кванта возможны последовательные переходы электронов с высоких энергетических уровней на более низкие с генерацией серий квантов флуоресцентного характеристического излучения



Очередность возникновения спектральных линий флуоресцентного РИ

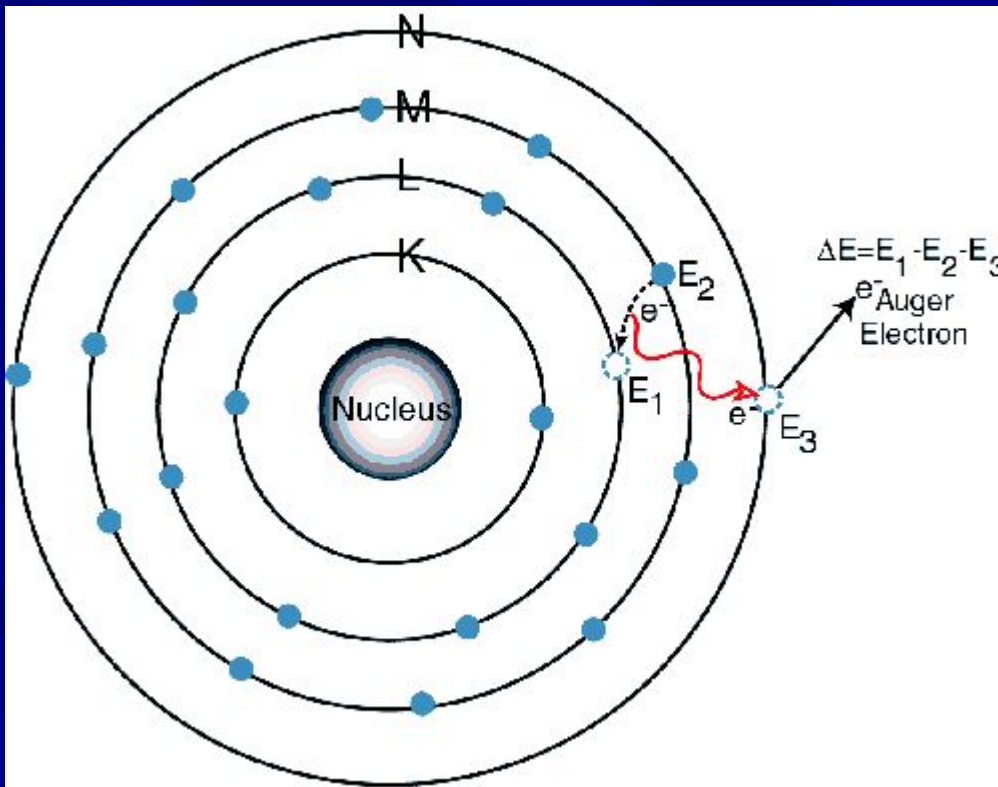


Зависимость коэффициента фотоэлектрического поглощения от длины волны РИ

Фотозффект (Оже-эффект)

Фотозффект, в результате которого атомы испускают фотоэлектроны и кванты флуоресцентного характеристического излучения, более вероятен при взаимодействием РИ с тяжелоатомным веществом.

Однако возможно полное поглощение квантов флуоресцентного характеристического излучения атомами вещества. В этом случае атом испускает только фотоэлектроны. Такой механизм поглощения РИ называется сложным фотозффектом или Оже-эффект



Пьер Виктор Оже
(1899 - 1993)
в 1925 г открыл
автоионизацию
возбуждённого атома

Оже-эффект характерен для легкоатомного вещества

Фотозффект

В результате фотозффекта энергия первичного кванта РИ преобразуется в:

- энергию фотоэлектронов (первичных и вторичных электронов);

- энергию квантов флуоресцентного характеристического излучения.

Количественно выход квантов флуоресценции i -й серии характеризуется специальным коэффициентом - отдача флуоресценции Φ .

$$\Phi_i = \frac{n_{if}}{n_i}$$

n_{if} - число атомов, испустивших флуоресцентное излучение i -ой серии;

n_i - число атомов, у которых удалены электроны i -го уровня.

Отдача флуоресценции Φ с К-уровня

$$\Phi_k = \frac{Z^4}{Z^4 + 32,2^4}$$

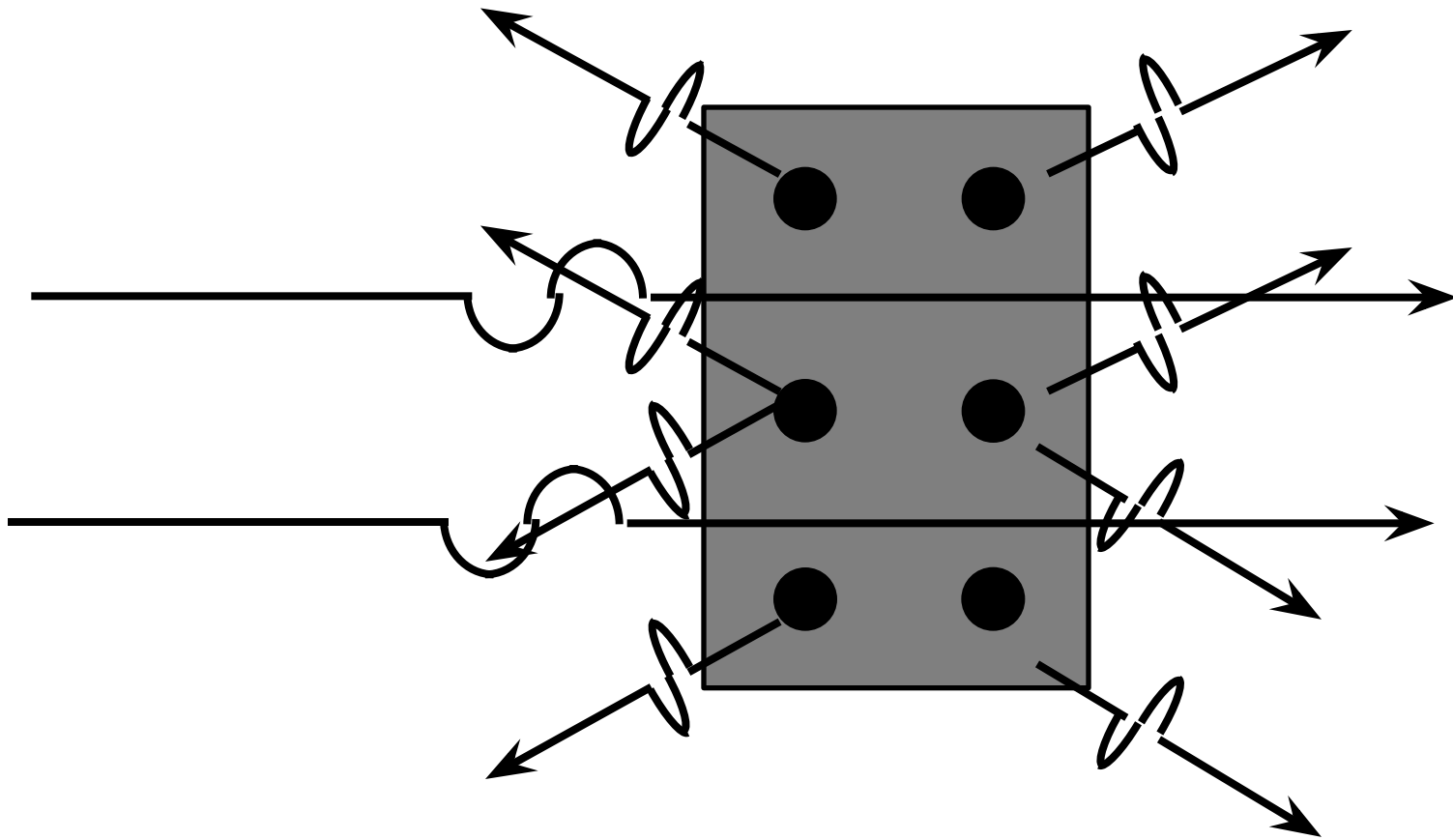
Для тяжелоатомного вещества $Z > 70$, $\Phi_k \sim 1$;

Для легкоатомного вещества $Z < 20$, $\Phi_k \leq 0,15$

Рассеяние РИ

Когерентное (томсоновское) рассеяние

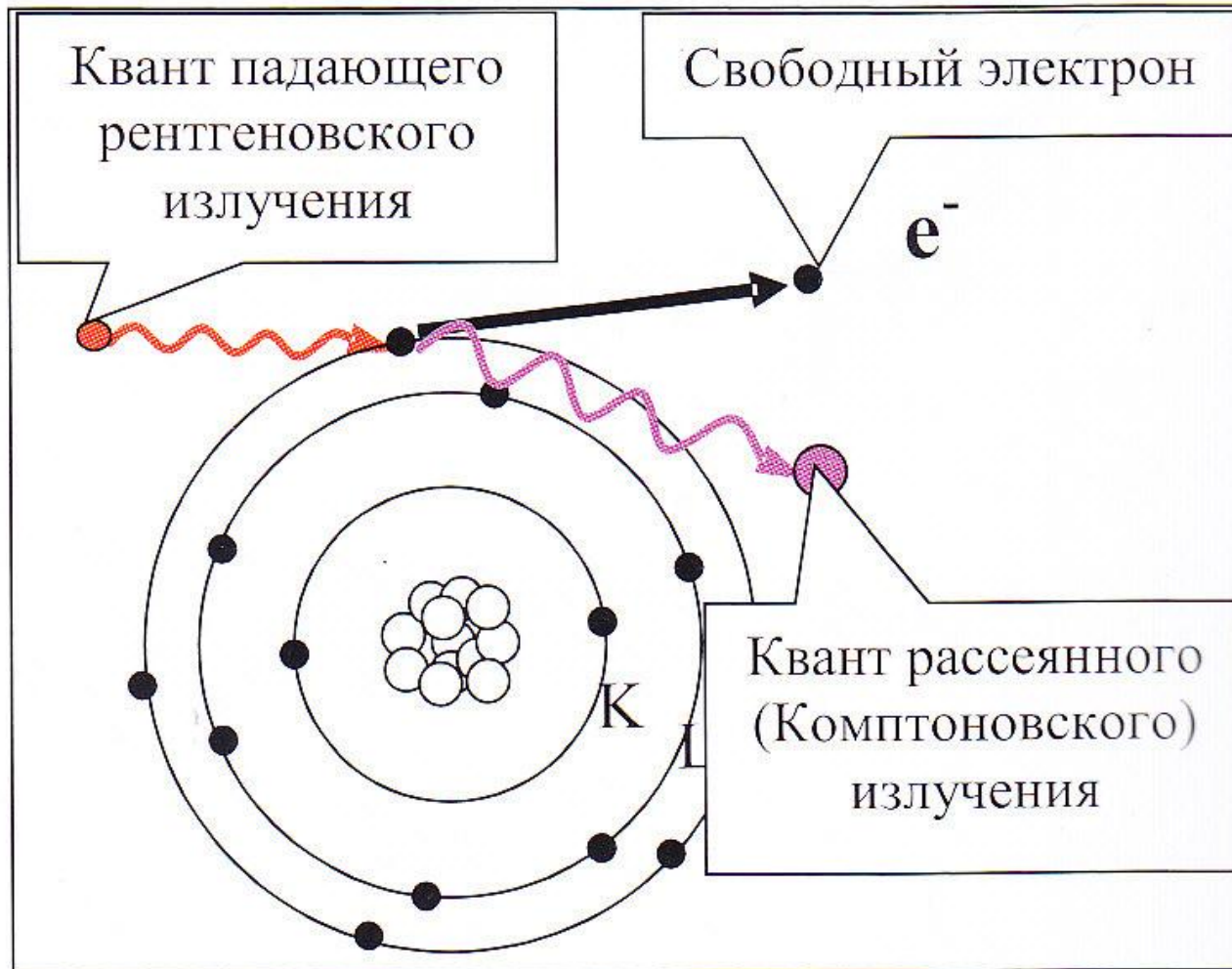
В результате когерентного рассеяния происходит изменение направления движения квантов РИ без изменения их энергии.



Рассеяние РИ

Некогерентное (комптоновское) рассеяние

В результате некогерентного рассеяния происходит с изменением направления движения квантов РИ с изменением (уменьшением) их энергии.



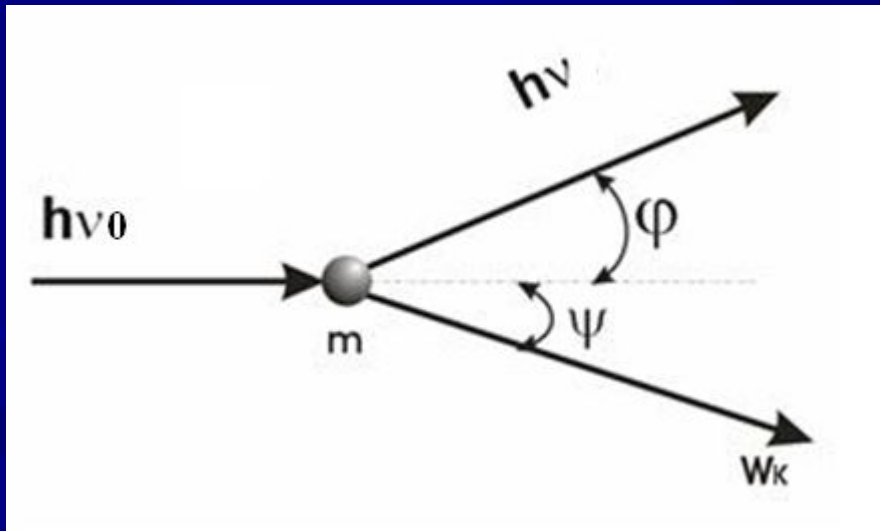
Рассеяние РИ

В результате некогерентного рассеяния происходит с изменением направления движения квантов РИ с изменением (уменьшением) их энергий.

Квант излучения с энергией $h\nu_0$ передает часть энергии W электрону (электрон отдачи или комптон-электрон).

Остаток энергии $h\nu$ сохраняется в виде рассеянного кванта

$$h\nu_0 = W + h\nu$$

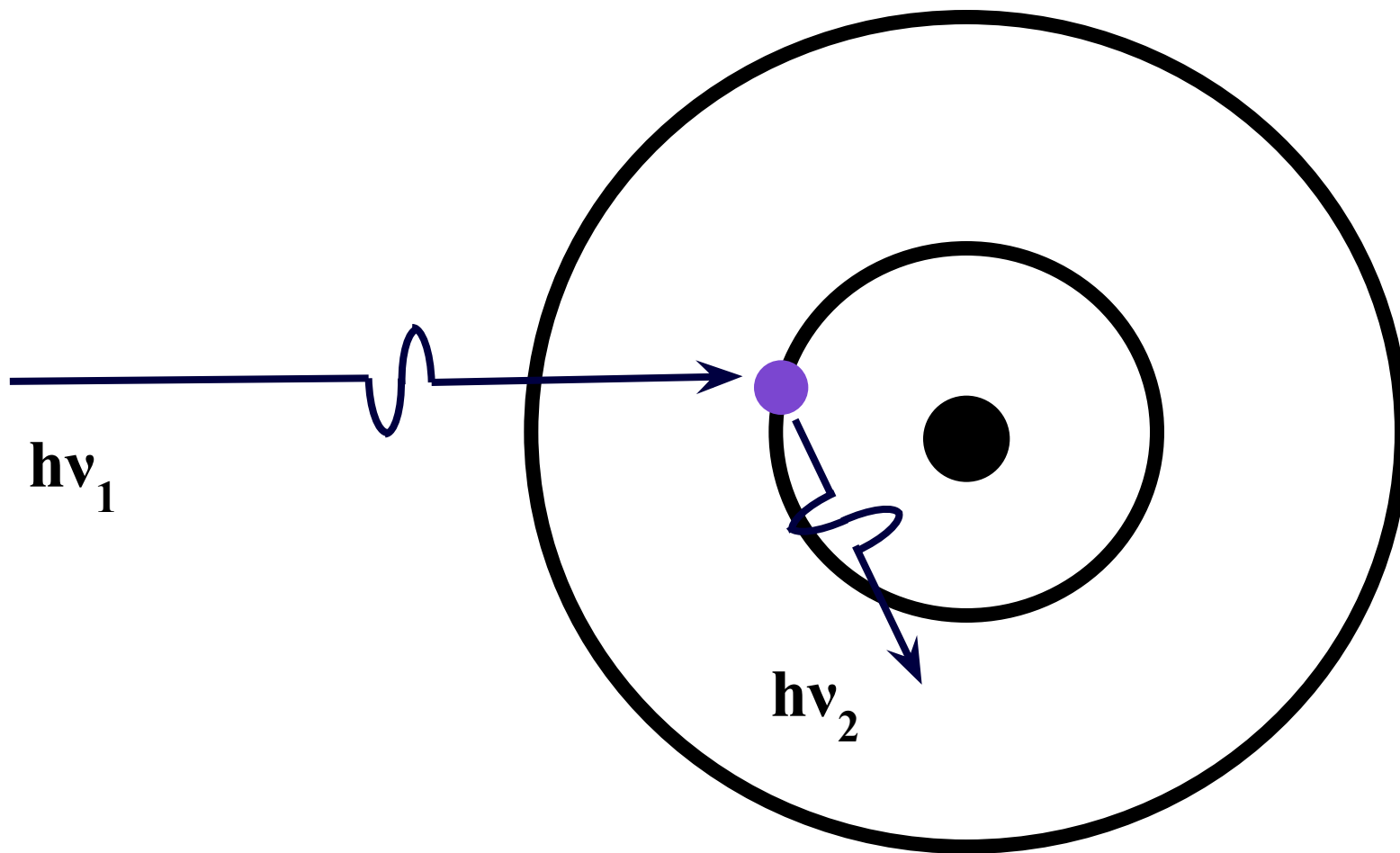


$$W = h\nu_0 \frac{\alpha(1 - \cos \varphi)}{1 + \alpha(1 - \cos \varphi)}$$

$$h\nu = h\nu_0 \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos \varphi)}$$

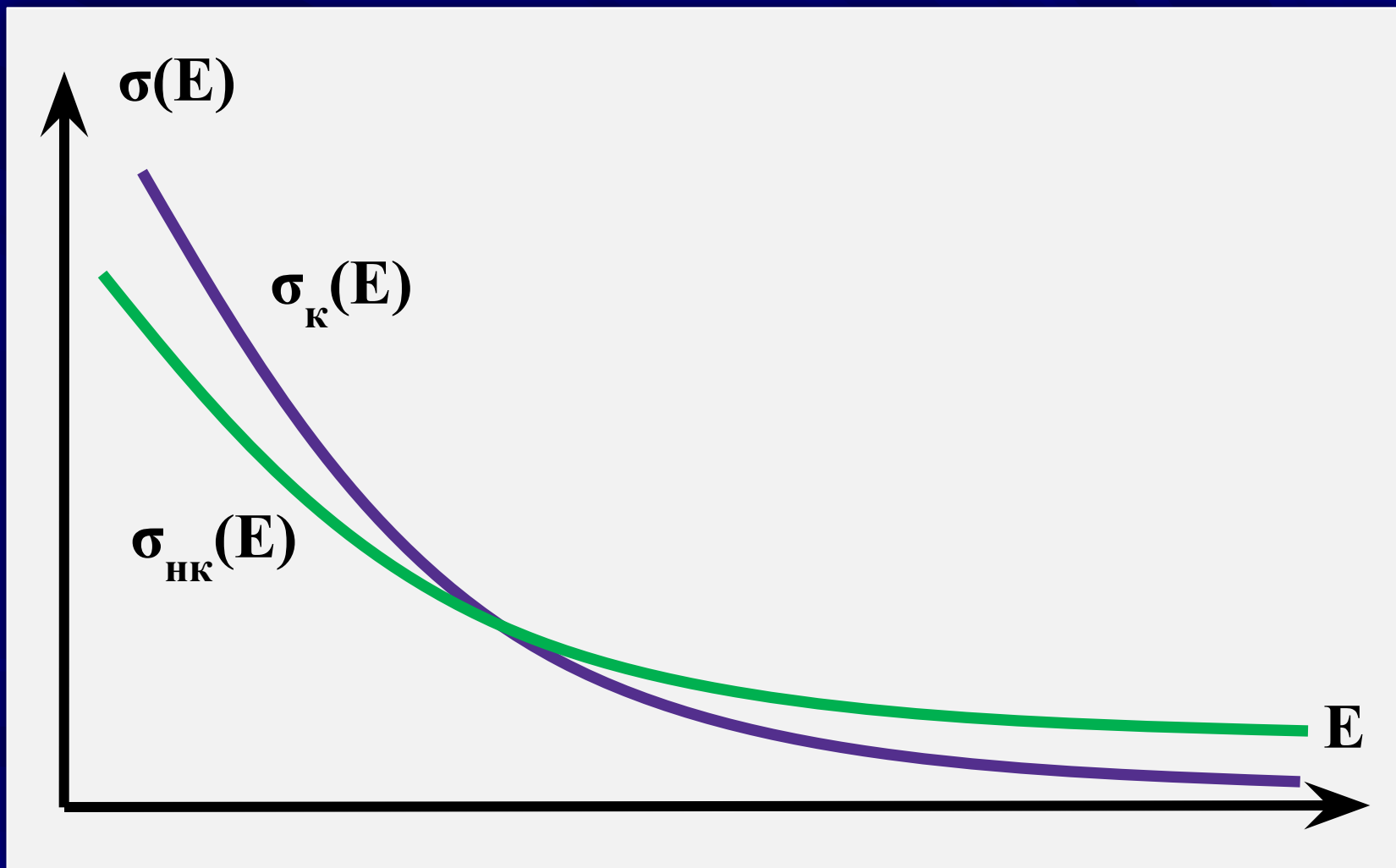
$$\operatorname{tg} \psi = - \frac{m_0 c^2}{m_0 c^2 + h\nu} \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}$$

Некогерентное рассеяние РИ



Когерентное и некогерентное рассеяние РИ

Коэффициенты ослабления рассеянного РИ (качественно)



Образование электронно-позитронных пар

Условие образования пары $h\nu > 1,022$ МэВ.

$$h\nu = 2m_0c^2 + W_c,$$

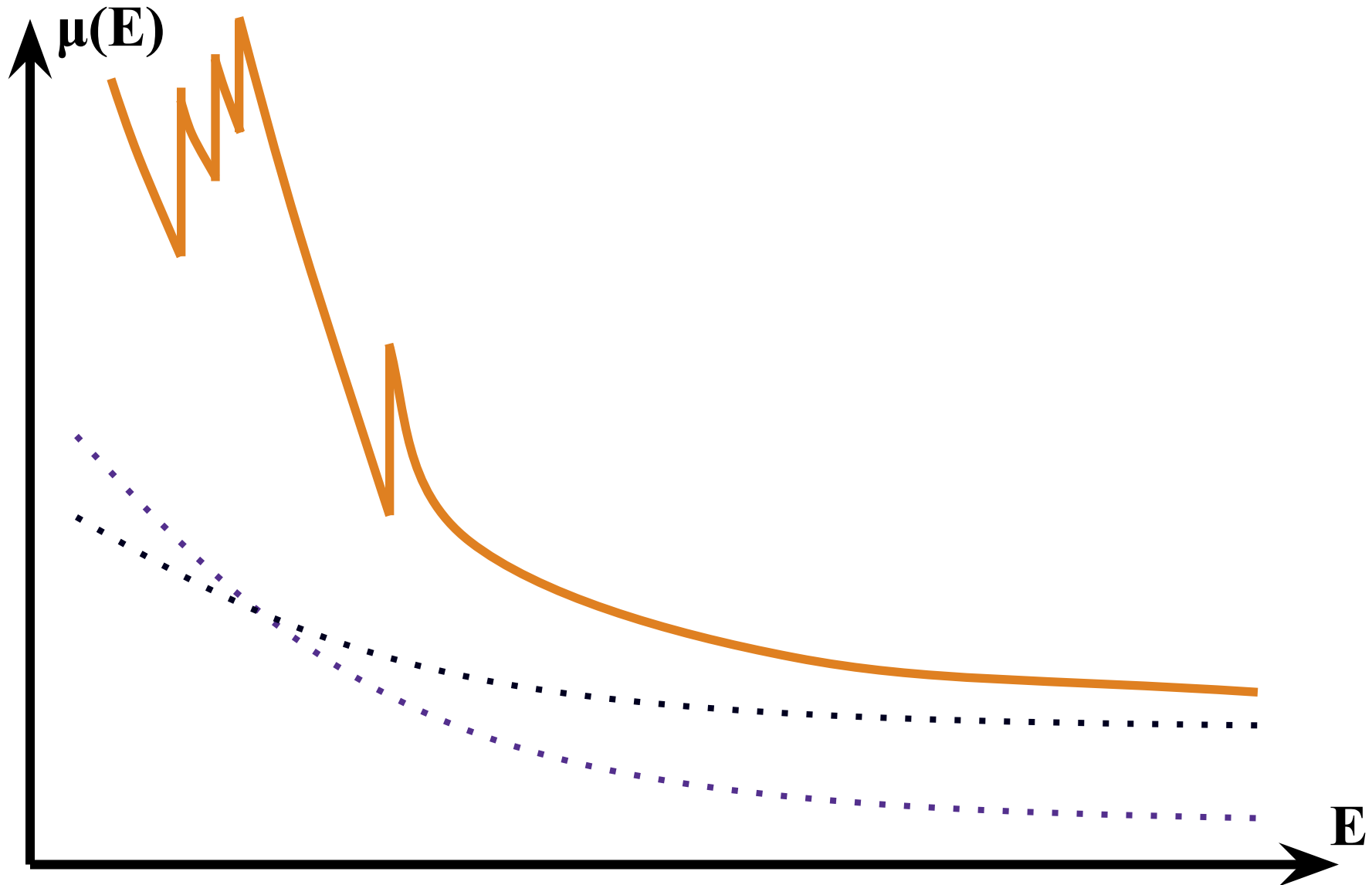
где W_c – суммарная кинетическая энергия позитрона и электрона

$$m_0c^2 = 511 \text{ кэВ.}$$

При замедлении движения позитрона происходит взаимодействие с одним из электронов – аннигиляция.

Образуется два фотона оптического излучения

Суммарный коэффициент ослабления РИ в «рентгеновском» диапазоне энергий (качественно)



Коэффициент ослабления РИ

W – энергия связи электрона в атоме вещества.

1. $h\nu \ll W$ – преобладает когерентное (томсоновское) рассеяние.

2. $h\nu \geq W$ – преобладает фотоэлектрическое поглощение (с выходом характеристического излучения на легких атомах).

3. $h\nu \gg W$ преобладает некогерентное (комптоновское) рассеивание.

$h\nu$ – энергия первичного кванта

Энергия фотонов, кЭВ	Относительное число, %		Энергия, %, уносимая		Энергия фотонов, кЭВ	Относительное число, %		Энергия, %, уносимая	
	Фото-электронов	Комптоновских электронов	Фото-электронами	Комптоновских электронами		Фото-электронов	Комптоновских электронов	Фото-электронами	Комптоновских электронами
10	95	5	100	0	60	7	93	43	57
20	70	30	99	1	80	4	96	20	80
26	50	50	96	4	100	1	99	9	91
30	39	60	93	7	150	0	100	2	98
40	20	80	80	20	200	0	100	1	99
50	11	89	61	39	400	0	100	0	100

Коэффициент ослабления РИ

Аналитическое выражение для коэффициента ослабления РИ

$$\frac{\mu}{\rho} \approx k \lambda^m Z^n,$$

где k – постоянный коэффициент в области между скачками поглощения;
 ρ – плотность вещества; m – 3–3,5; n – 3.

Энергия излучения, кэВ	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$			
	Al (Z=13)	Cu (Z=29)	Mo (Z=42)	Pb (Z=82)
5	195,5	190,2	580,1	791,2
40	0,562	4,838	12,83	14,20
100	0,172	0,453	1,097	5,596
300	0,105	0,126	-	0,624

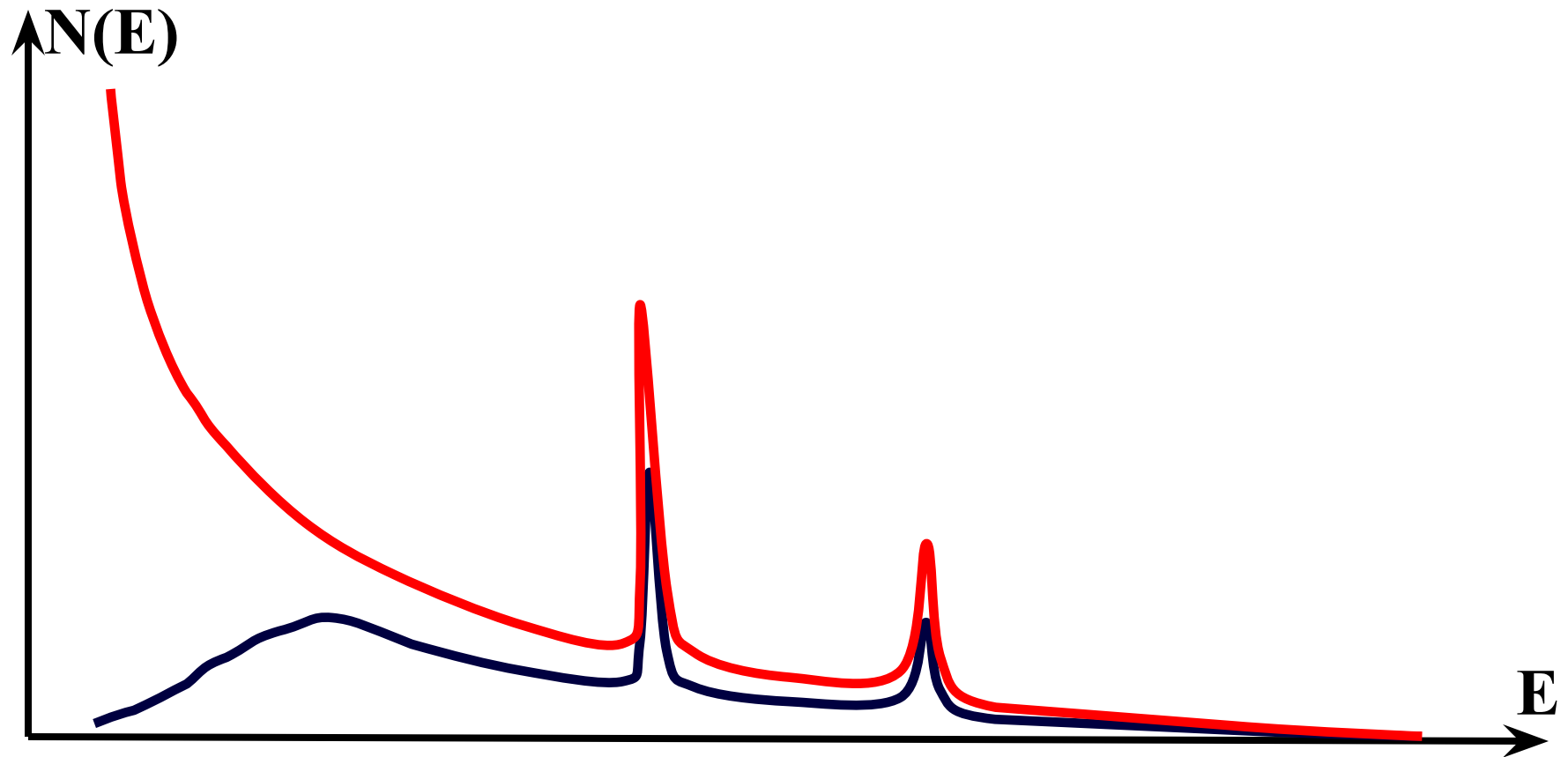
Еще раз! Фотоэффект более вероятен при $h\nu \geq W$.

Томсоновское рассеяние – для низкоэнергетичных квантов в тяжелых атомах на сильно связанных электронах $h\nu \ll W$.

Комптоновское рассеяние – для высокоэнергетичных квантов в легких атомах на слабо связанных электронах $h\nu \ll W$

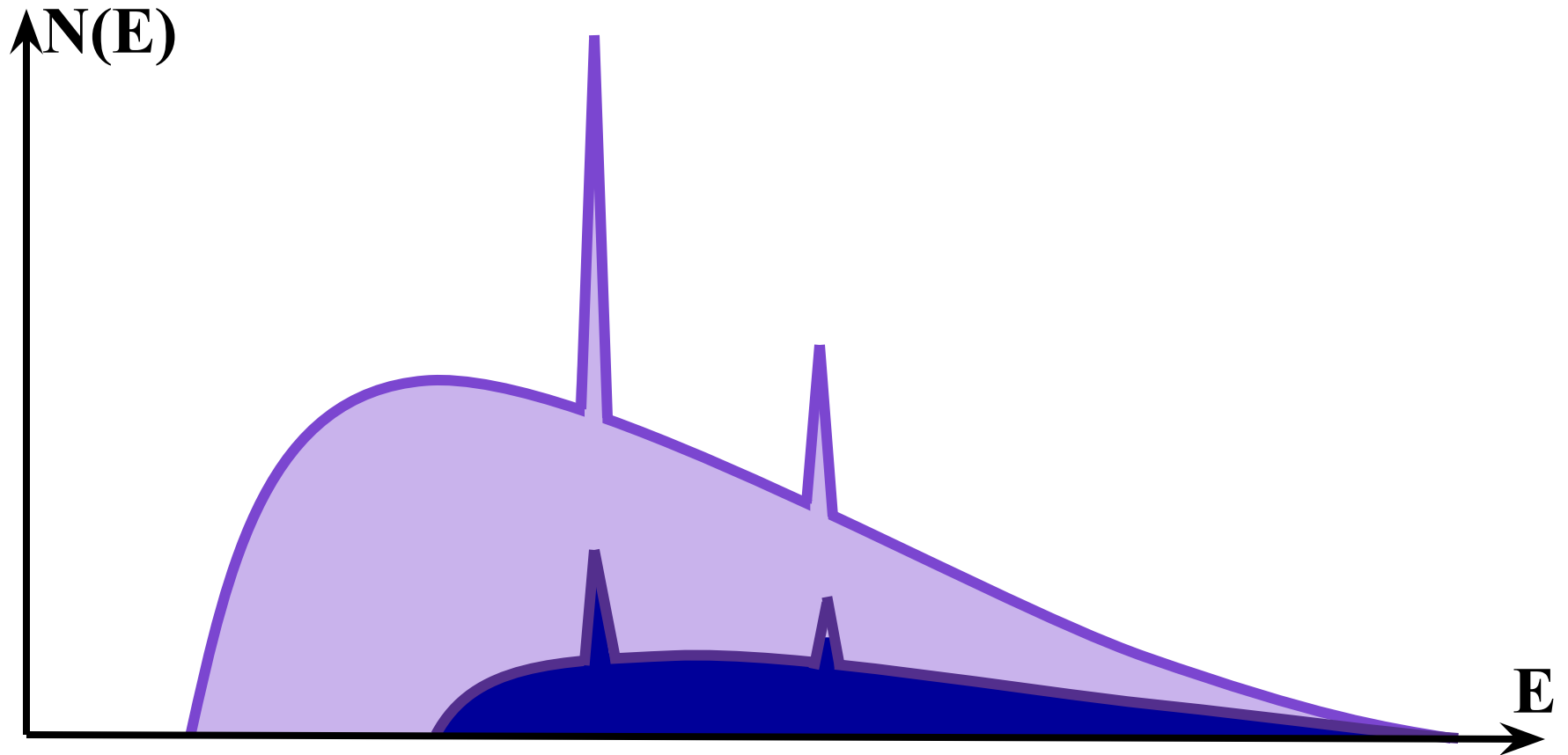
Ослабление РИ в рентгеновской трубке

$$I(E)_d = I(E)_0 \exp(-\mu(E)D)$$



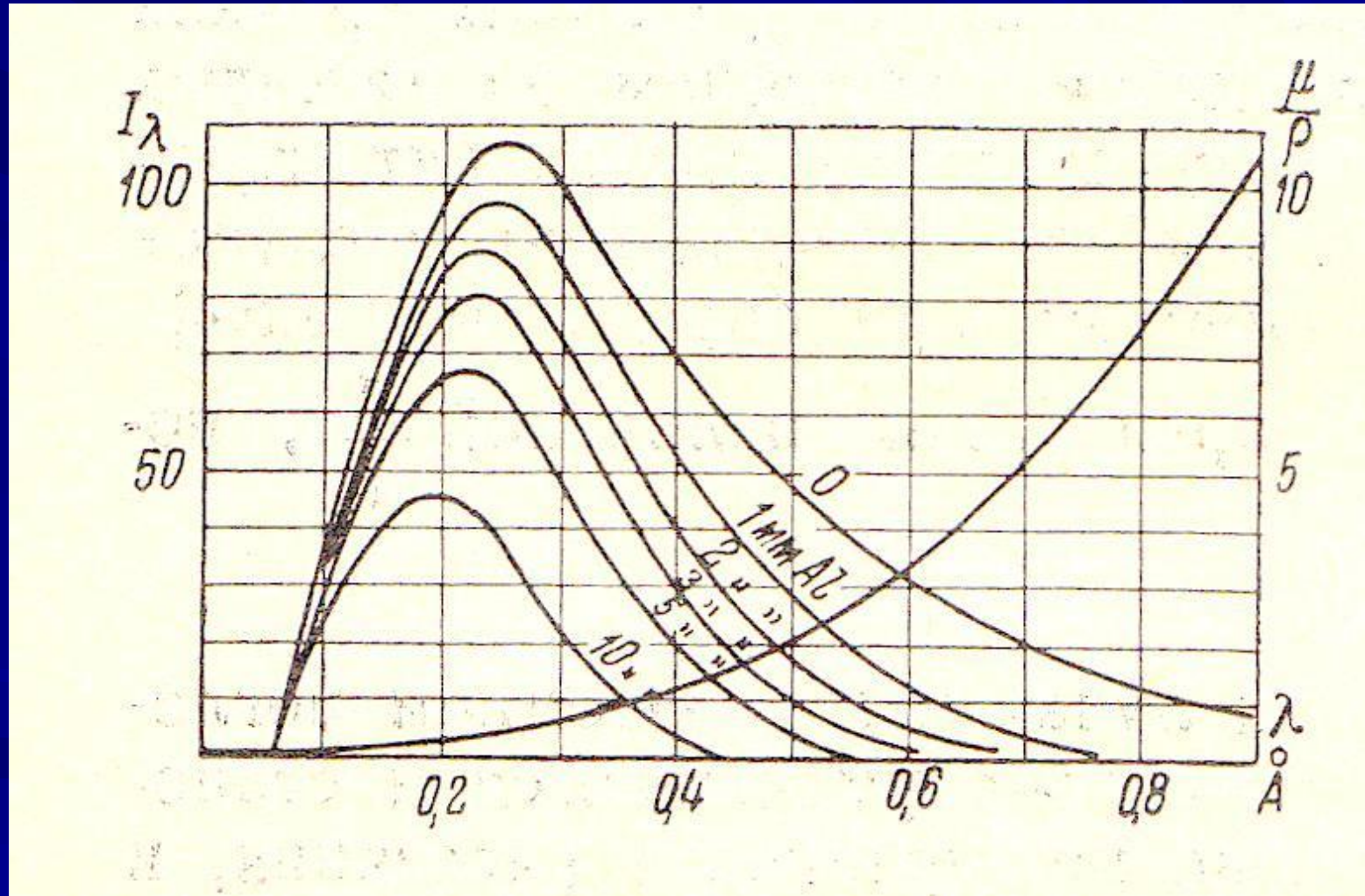
Ослабление РИ объекте

$$I(E)_d = I(E)_0 \exp(-\mu(E)D)$$

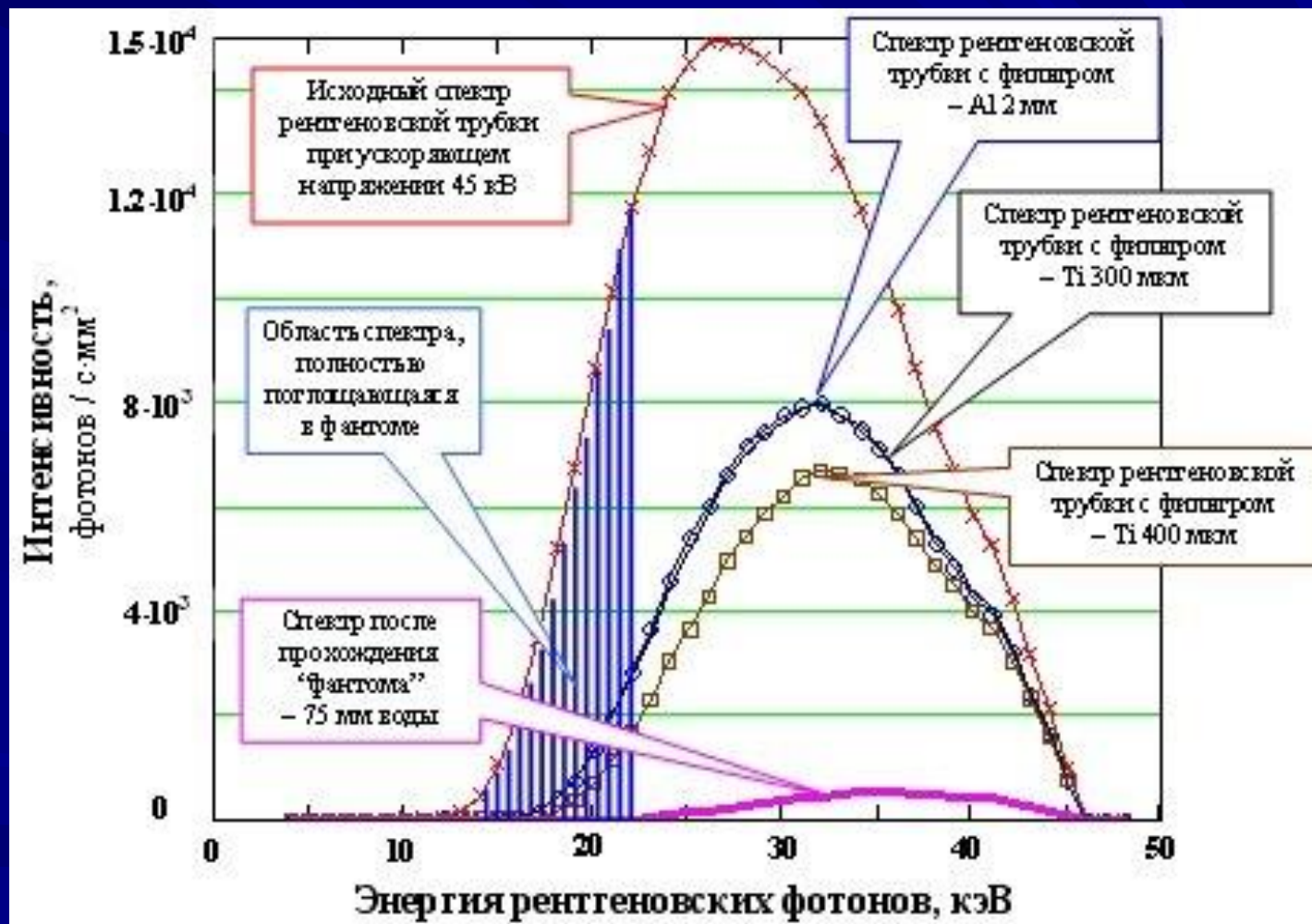


Фильтрация РИ

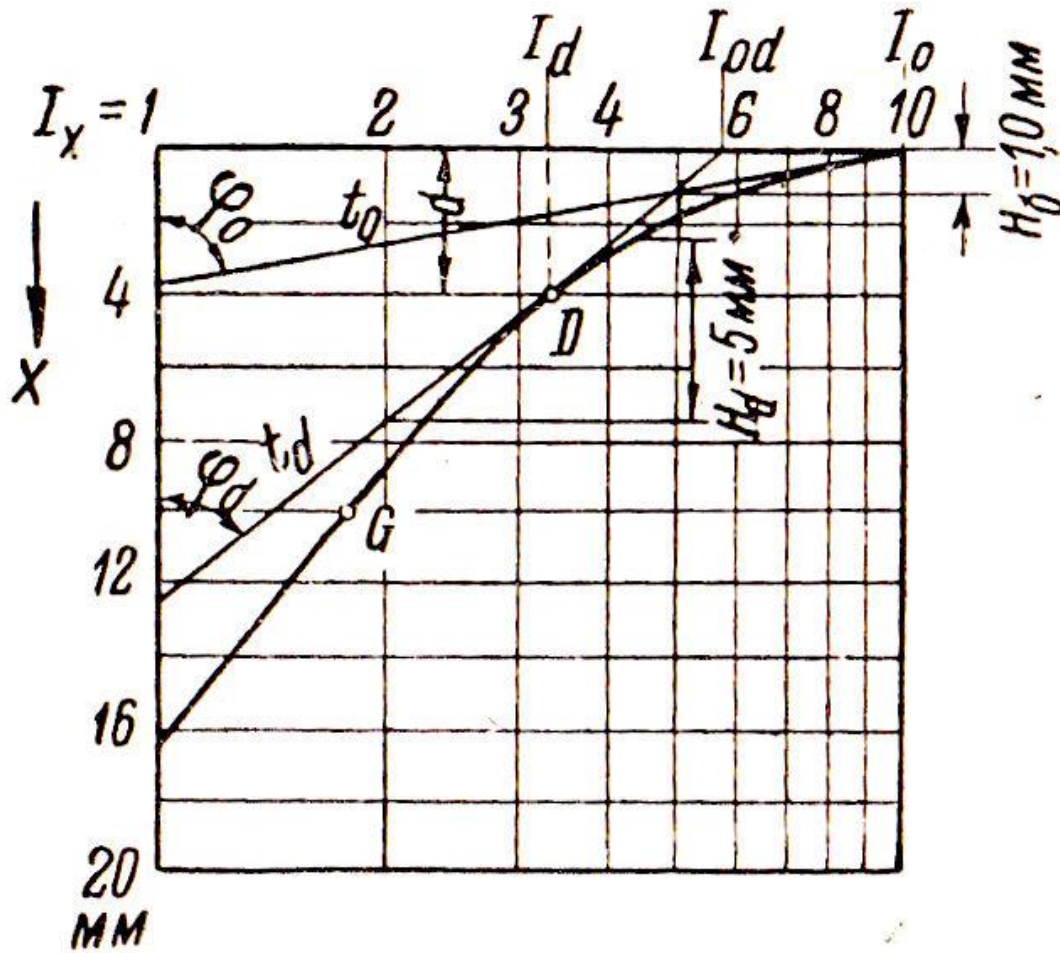
Изменение формы спектра излучения с ростом толщины фильтра



Ослабление низкоэнергетичной части спектра РИ в рентгеновской трубке



Оценка величины ускоряющего напряжения



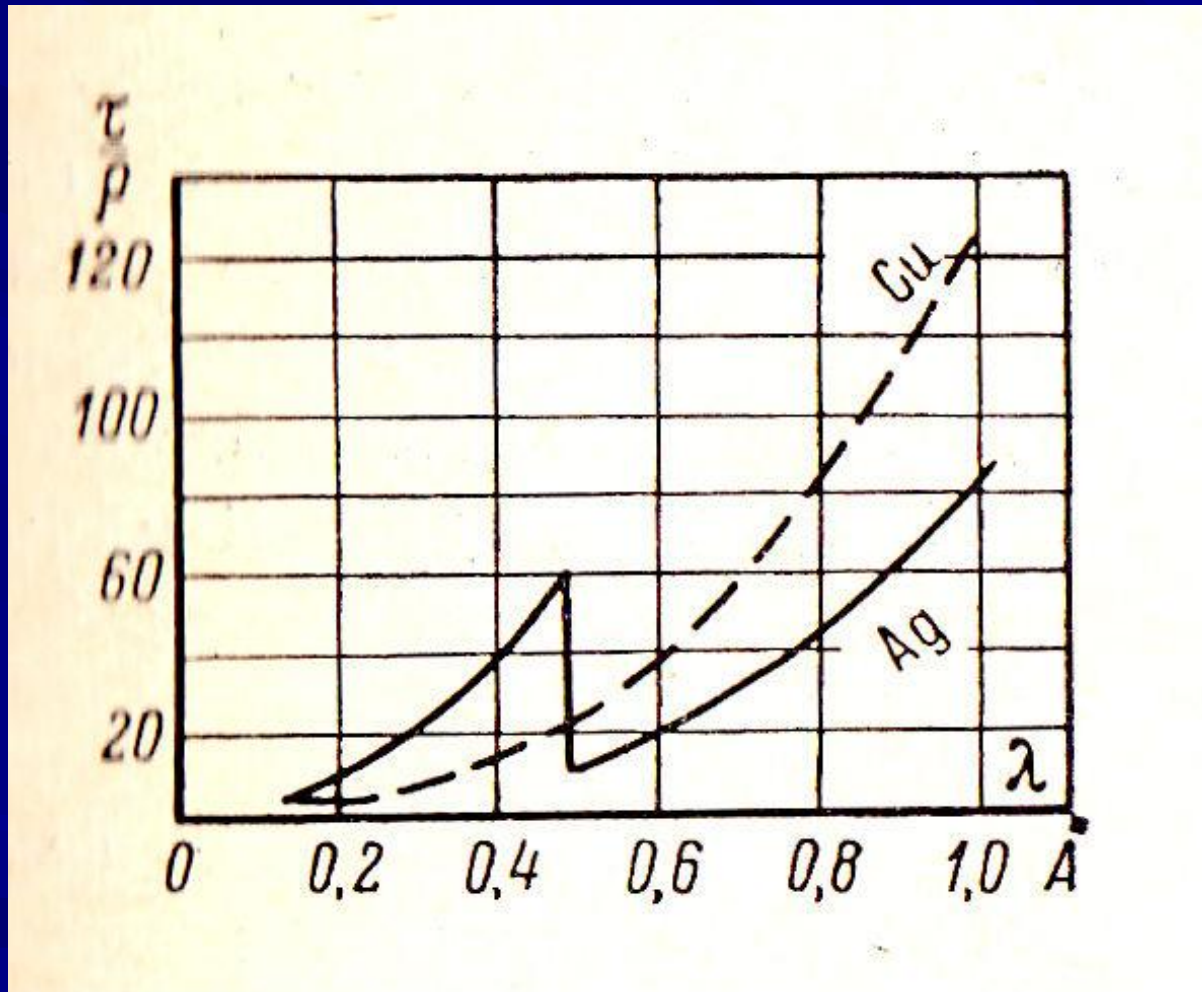
$$I_d = I_0 \cdot e^{-\mu d}$$

$$\frac{I_0}{I_d} = e^{\mu d}$$

$$\ln \frac{I_0}{I_d} = \mu d$$

$$\mu = \frac{\lg \frac{I_0}{I_d}}{d} = \operatorname{tg} \varphi \left[\frac{1}{d} \right]$$

Оценка величины ускоряющего напряжения



$$\mu \rightarrow \lambda$$

$$U = \frac{12,4}{\lambda} \left[\frac{\text{кВ}}{\text{Å}} \right]$$

Метод дифференциальных фильтров

