

Лекция 8

Рентгеновское (X) излучение, его виды, спектры.

Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом.

Радиоактивность, виды радиоактивного распада.

Ионизирующие излучения.

Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом.

Дозиметрия ионизирующего излучения.

Связь с последующей деятельностью

Изучение курса «Биофизика»:

1. Рентгеноструктурный анализ
2. Рентгеновская томография
3. Воздействие ионизирующих излучений на биообъекты

Практическое применение:

1. Рентгеновские методы диагностики и сопровождения
2. Защита от ионизирующих излучений

Отступления от общего правила для микромира:

1. Внесистемная единица измерения энергии

Энергия кванта видимого света $\lambda = 555$ нм

$$\varepsilon = h \frac{c}{\lambda} = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3,00 \cdot 10^8}{555 \cdot 10^{-9}} = 3,58 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 2,24 \text{ эВ}$$

1 эВ

$$1 \text{ В} \quad \approx 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \quad 1 \text{ В} \quad \approx 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

Энергия ионизации атома водорода:

$$2,18 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = 13,6 \text{ эВ}$$

Связь между энергией и массой (Эйнштейн):

$$E = m \cdot c^2$$

Масса электрона: $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$

Полная энергия покоящегося электрона:

$$E_0 = 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot (3,00 \cdot 10^8)^2 = 8,20 \cdot 10^{-14} \text{ Дж} = 0,513 \text{ МэВ}$$

2. Внесистемная единица измерения массы:

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,6606 \cdot 10^{-27}$$

кг

$$1 \text{ а.е.м.} \sim 931,5 \text{ МэВ}$$

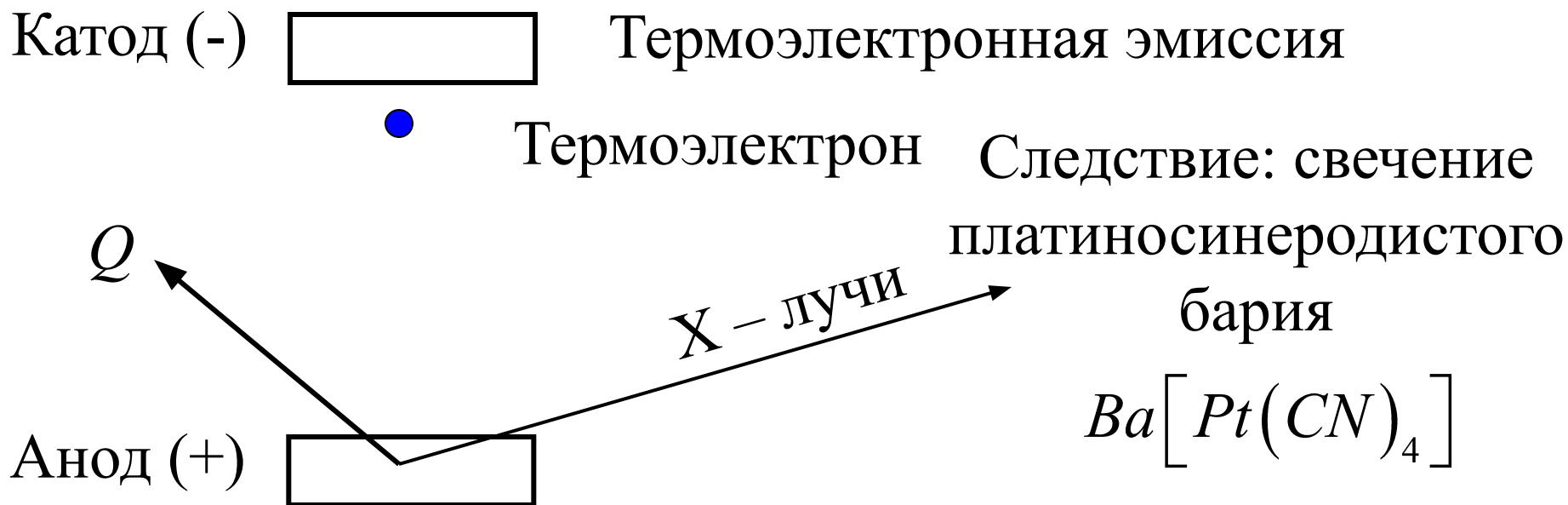
История

Вильгельм Конрад Рентген – НП №1 1901 год

8 ноября 1895

(1887 – Никола Тесла)

Исследование катодных пучков (лучей):



Источник X – лучей:

(-) подогреваемый катод (К)

Термоэлектрон

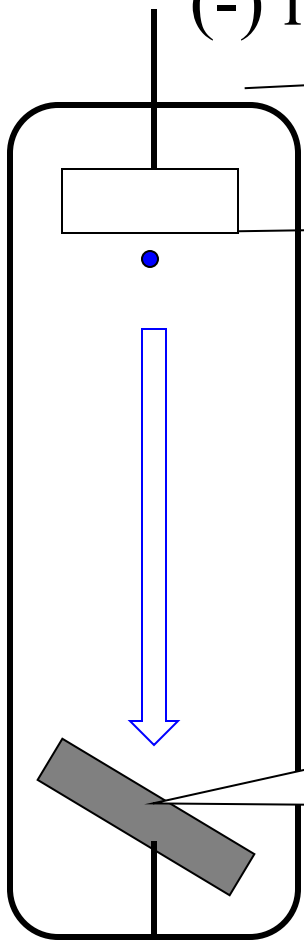
Вакуумированная трубка

Пучок термоэлектронов, ускоряемых электрическим полем между К и А

X - излучение

(+) охлаждаемый анод (антикатод) (А)

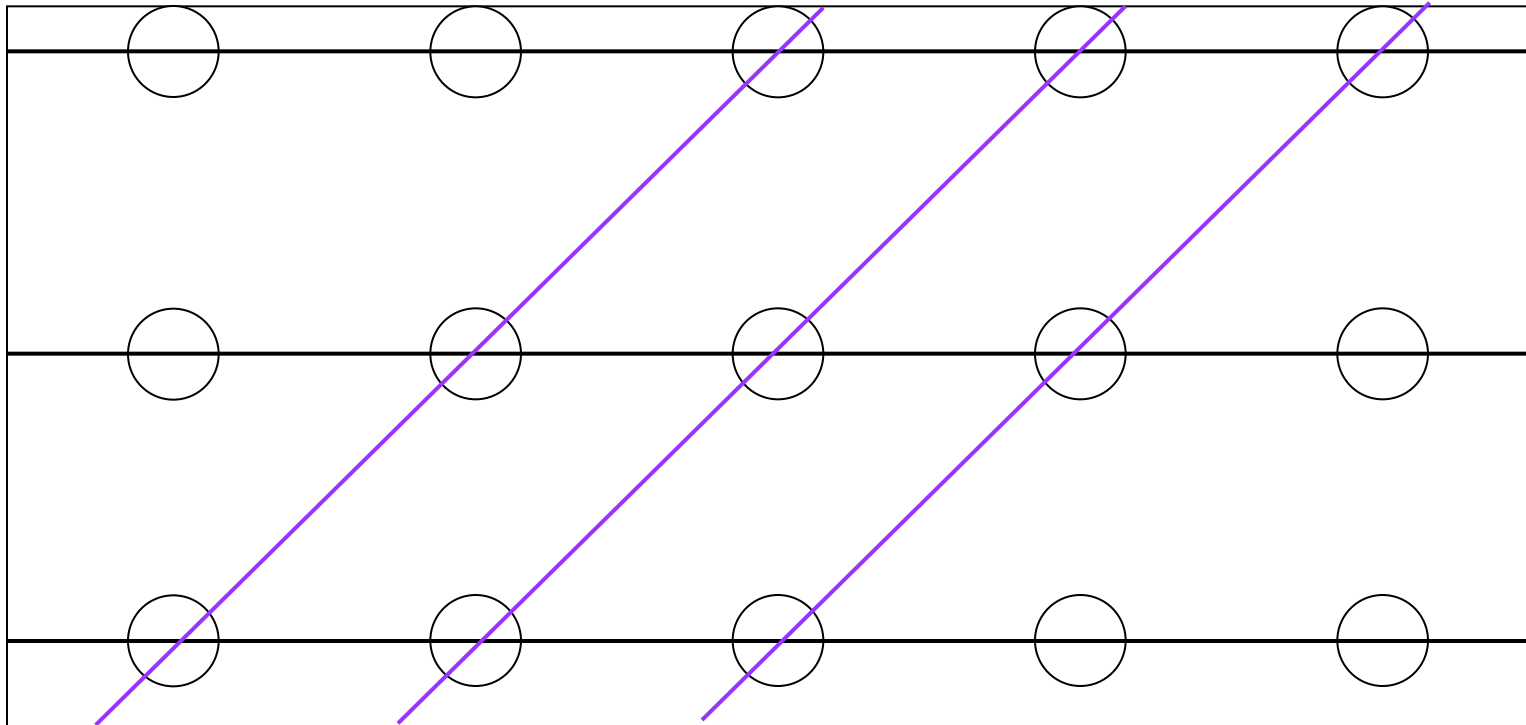
Q_a



Доказательство волновой природы X – лучей:

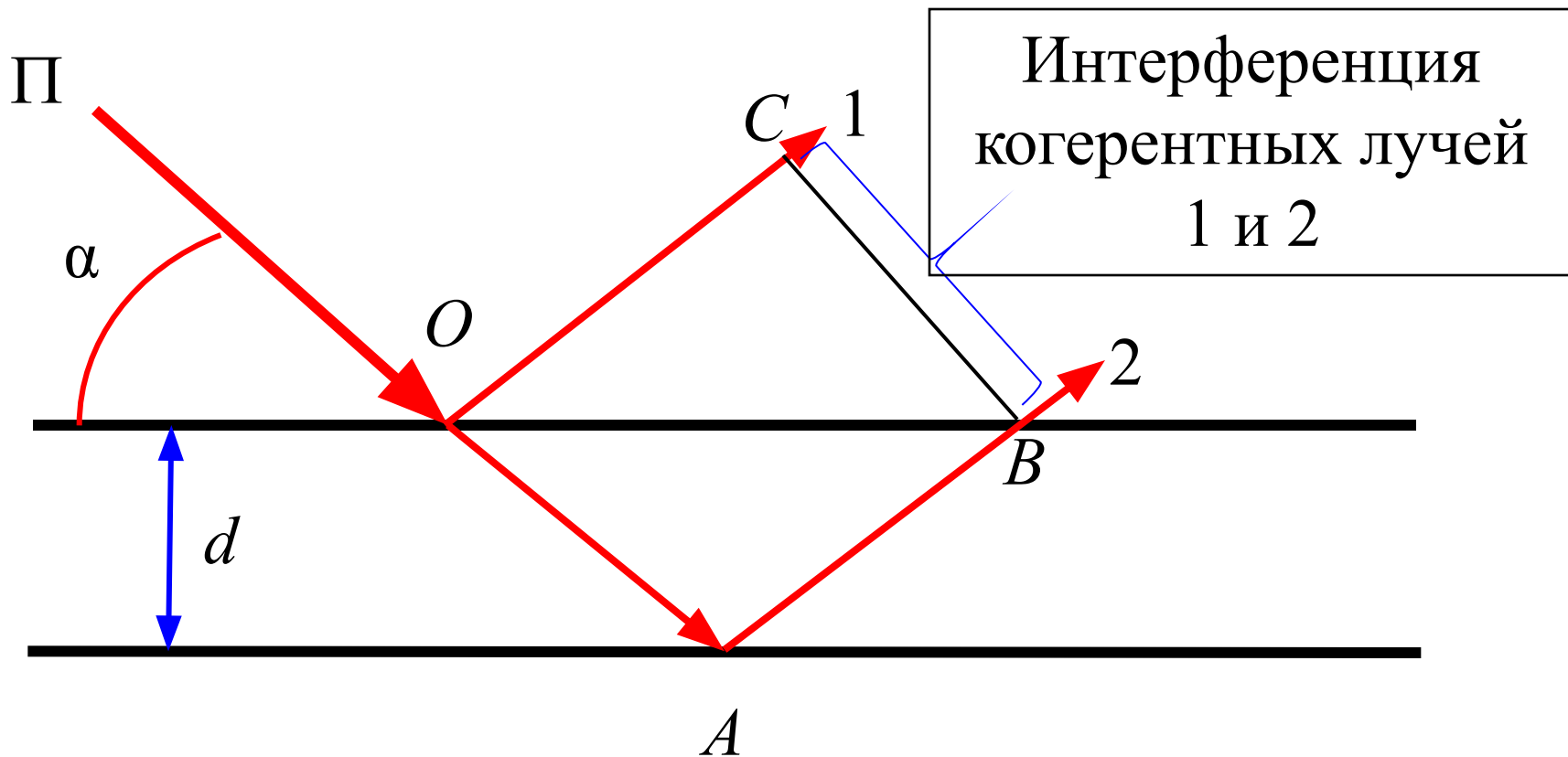
Расстояние между «щелями»: $d \approx \lambda$

→ монокристалл



«наклонные» атомные плоскости

горизонтальные атомные
плоскости



$2: |OA| + |AB|$
 $1: |OC|$

— разность хода лучей 1 и 2

$$\Delta = |OA| + |AB| - |OC|$$

$$\Delta = 2d \cdot \sin$$

ВЫВЕСТИ

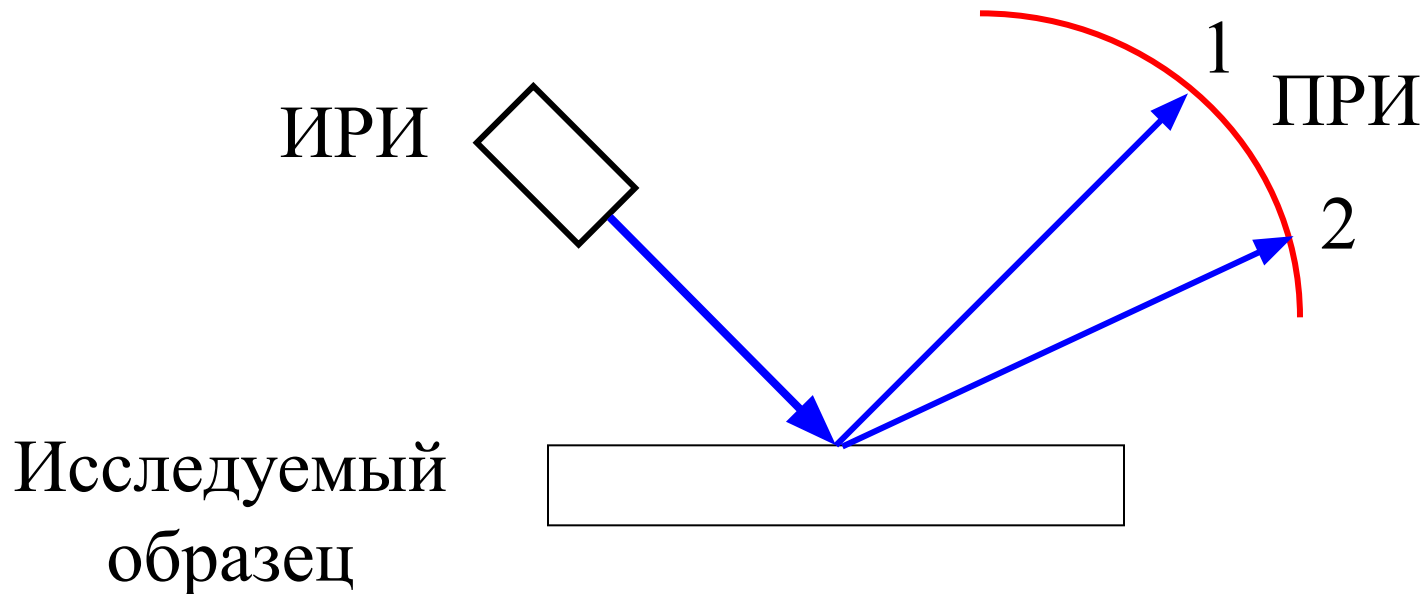
Формула Вульфа – Брэггов

Максимум интерференции (дифракции) X – лучей
наблюдается при условии:

$$\Delta = 2d \cdot \sin \alpha = k\lambda, \quad k \in Z$$

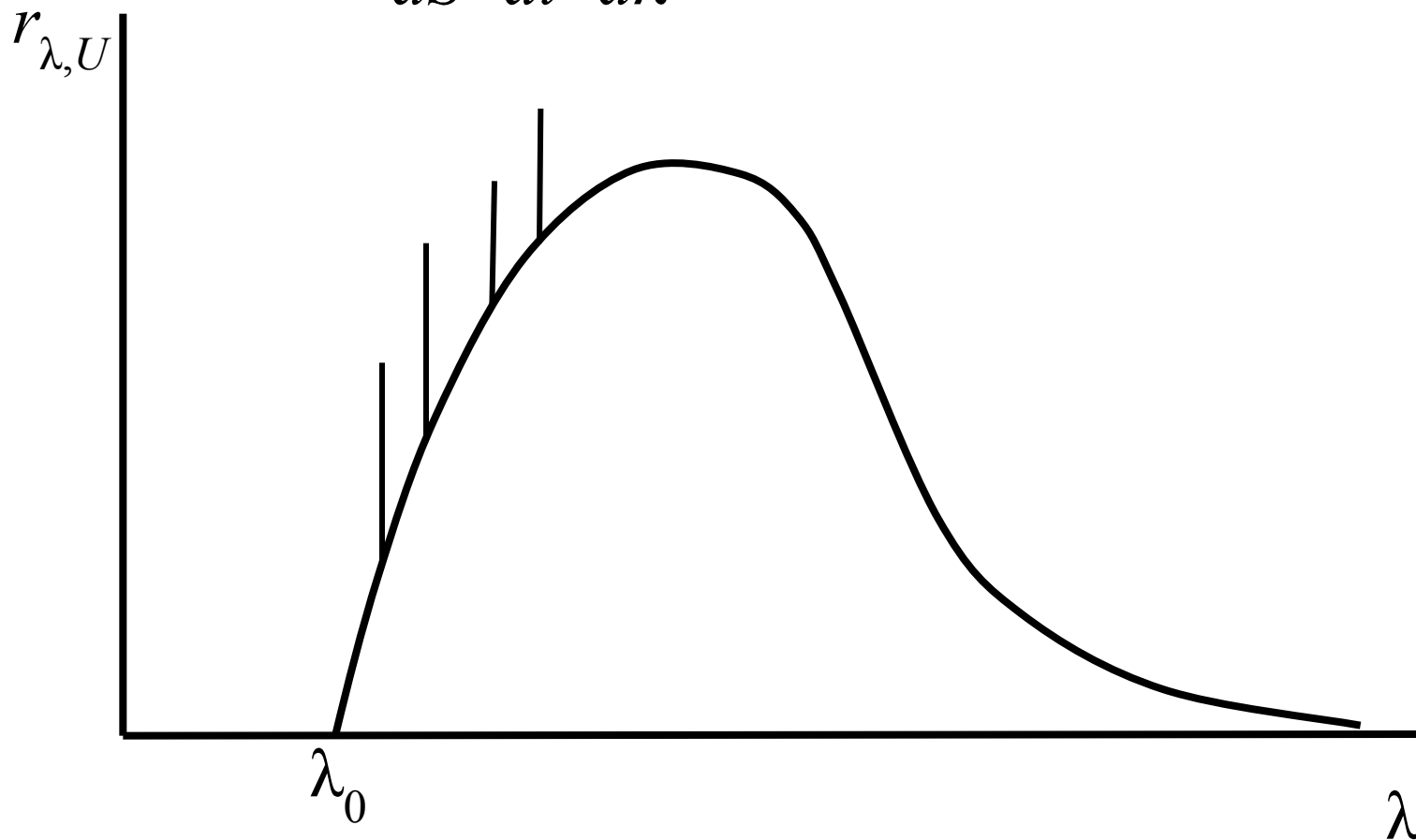
Один эксперимент – два важных вывода:

Идея рентгеноструктурного анализа и РТ:

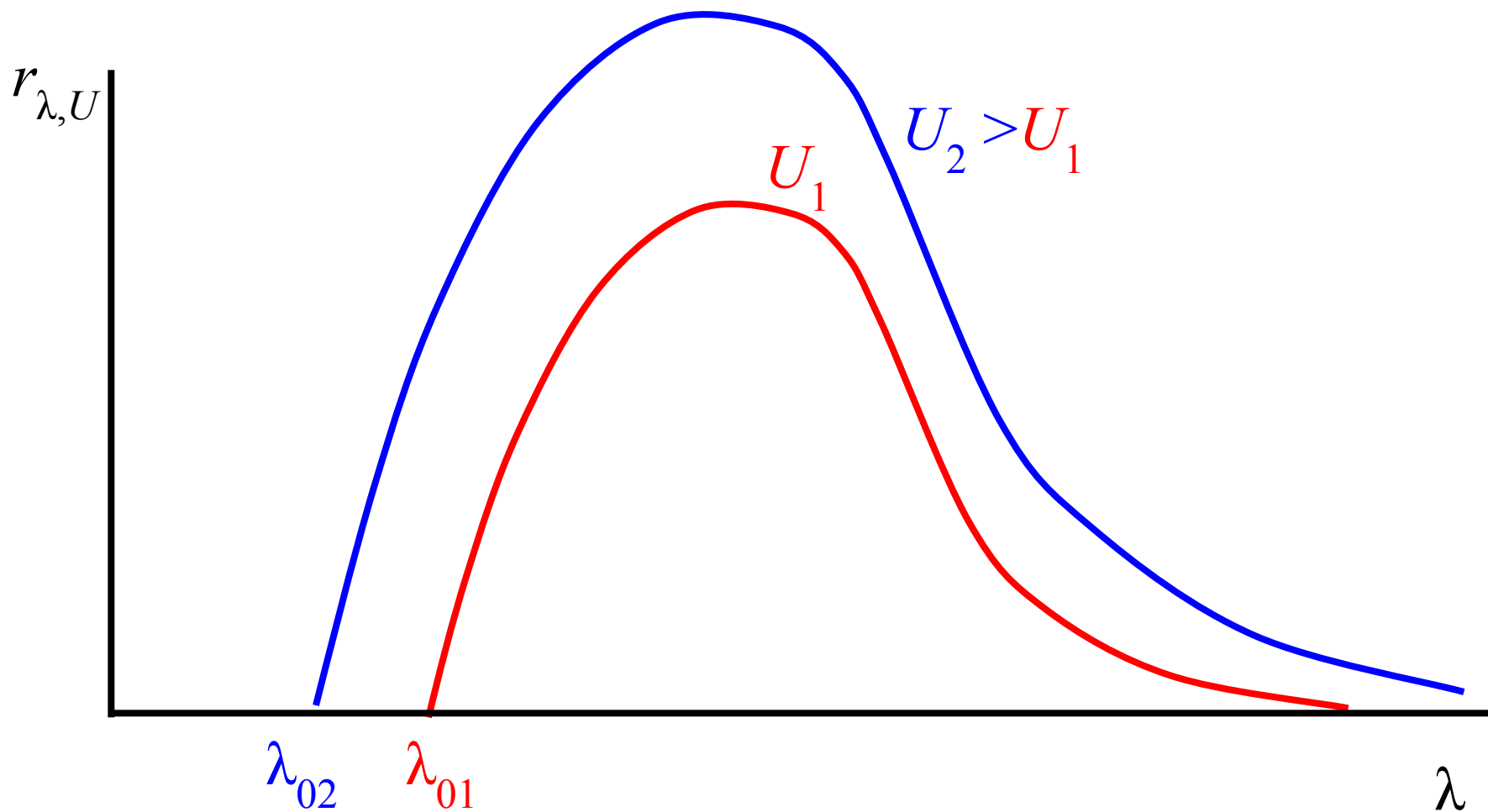


Спектр рентгеновского излучения:
распределение энергии РИ по длинам волн

$$r_{\lambda,U} = \frac{dW}{dS \cdot dt \cdot d\lambda} = f(\lambda, U)$$



Тормозная часть спектра рентгеновского излучения



Теория Максвелла: источник ЭМВ – движущийся с ускорением электрический заряд, например: электрон, разогнанный электрическим полем и, затем, тормозящий в мишени

Энергия электрона, ускоренного электрическим полем:

$$W_e = |e| \cdot U$$

Закон сохранения энергии:

$$W_e = \varepsilon + Q = h\nu + Q = h \frac{c}{\lambda} + Q$$

$Q -$

$$\varepsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda} -$$

Энергия X – кванта:

$$\varepsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = W_e - Q$$

$$Q_{\max} = W_e \Rightarrow \varepsilon = \varepsilon_{\min} = 0 \left\{ \begin{array}{l} \nu_{\min} = \\ \lambda_{\max} = \end{array} \right.$$

$$Q_{\min} = 0$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max} = h\nu_{\max} = h \frac{c}{\lambda_{\min}} = W_e = |e|U \left\{ \begin{array}{l} \nu_{\max} = \frac{|e|U}{h} \\ \lambda_{\min} = \frac{hc}{|e|U} \end{array} \right.$$

Очень грубая модель энергетического состояния
электрона, связанного с атомом:
ступеньки разной высоты и ширины

E – энергия данного состояния;

P – вероятность состояния
(ширина ступеньки)

Ступеньки возбужденных состояний

Карьерная
лестница

Основное состояние

$$E_{\max} =$$

$$E_3 \boxtimes E_2$$

$$P_3 \boxtimes P_2$$

$$E_2 \boxtimes E_1$$

$$P_2 \boxtimes P_1$$

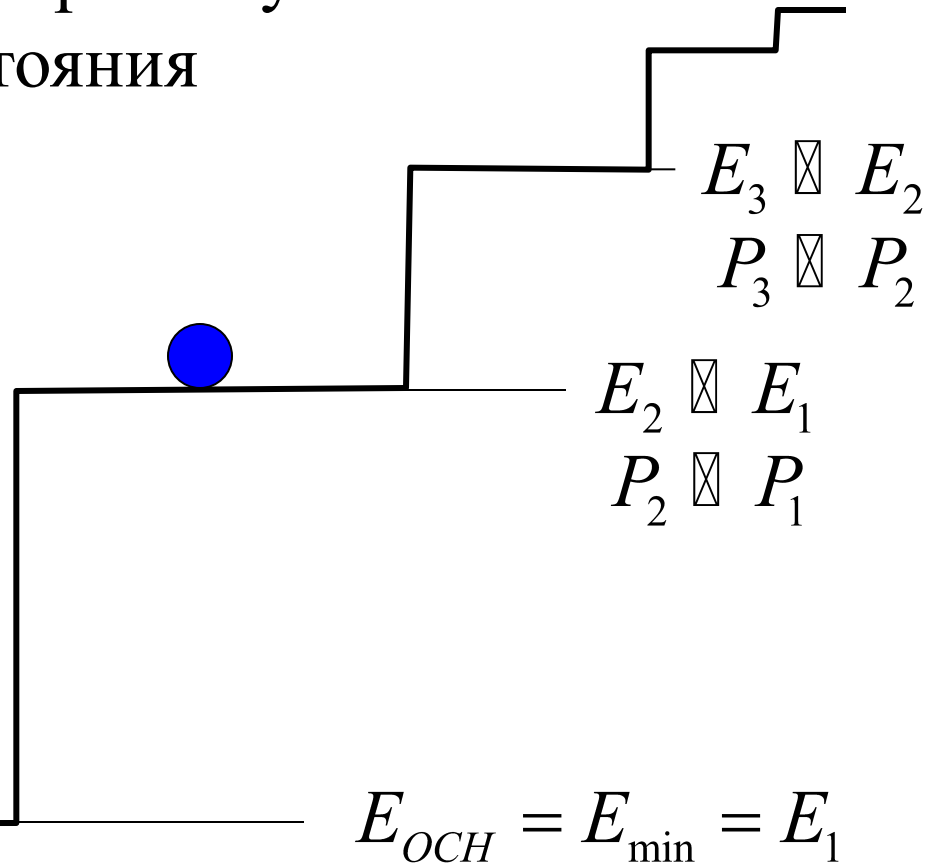
$$E_{OCH} = E_{\min} = E_1$$

$$P_1 = P_{\max}$$

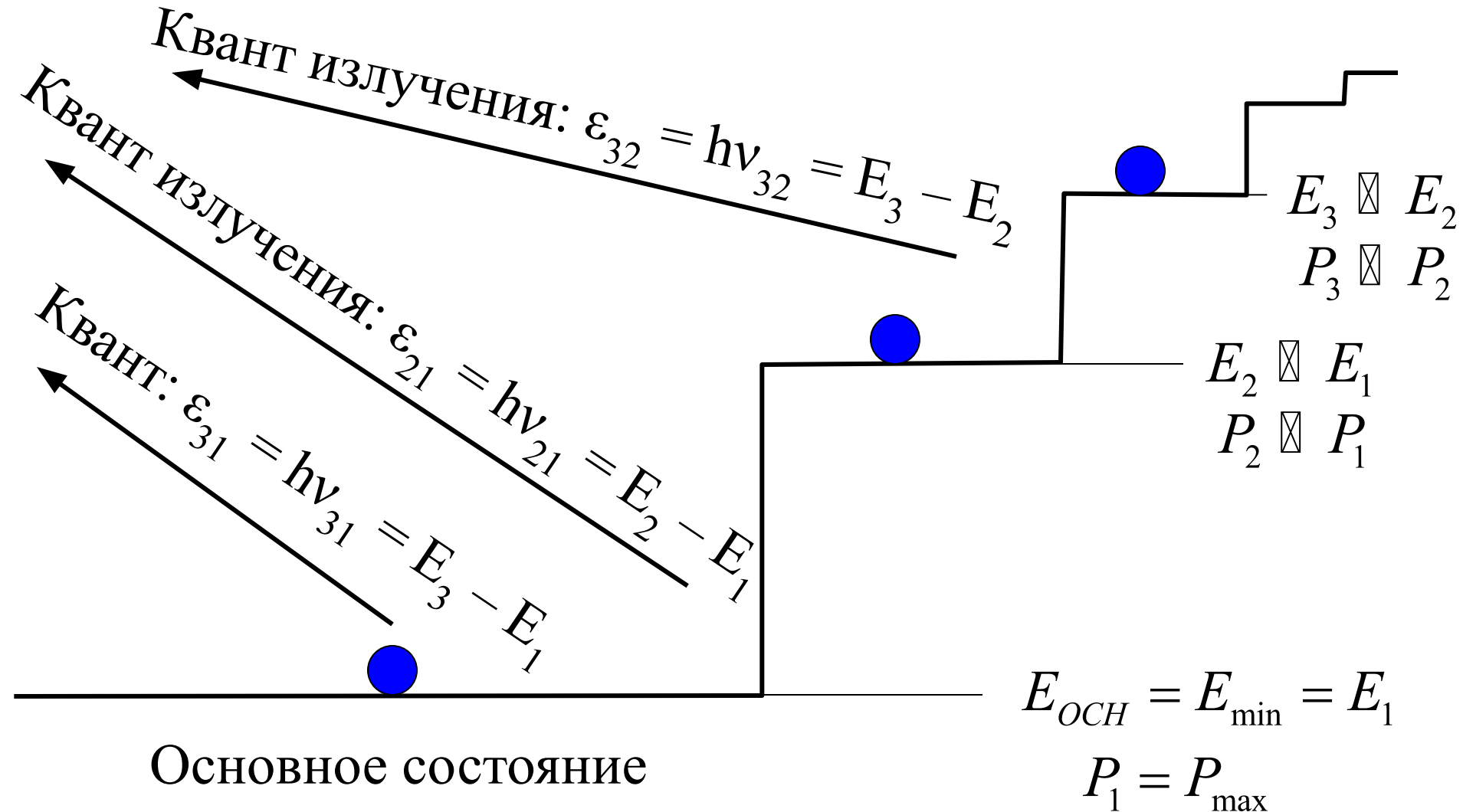
Возможен только квантовый переход из одного состояния в другое, минуя промежуточные состояния

Внешнее воздействие: $\epsilon = h\nu > E_2 - E_1$

Электрон в основном состоянии



Вероятность состояния 3 меньше, чем 1 или 2,
 происходит самопроизвольный процесс



Выводы:

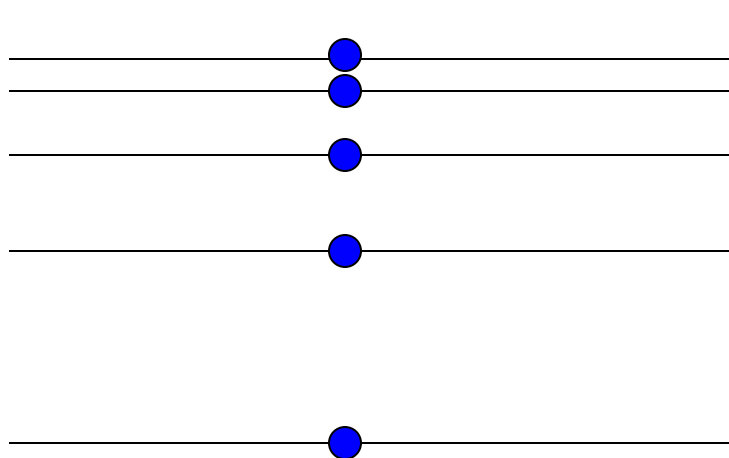
1. Энергия электрона в атоме может иметь только дискретные (ступенчатые) значения $E_1, E_2, \dots, E_i, \dots, E_n$

2. Переходу электрона из одного энергетического состояния в другое соответствует дискретное изменение энергии:

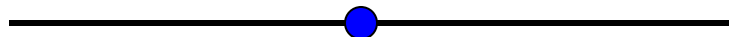
$$\Delta E = E_n - E_m \left\{ \begin{array}{l} \text{излучение} \\ E_n \boxtimes E_m \Rightarrow h\nu_{nm} = E_n - E_m \xrightarrow{\text{кванта}} \blacktriangleright \\ \text{поглощение} \\ E_n \boxtimes E_m \Rightarrow h\nu_{nm} = E_n - E_m \xleftarrow{\text{кванта}} \blacktriangleleft \end{array} \right.$$

Атом вещества анода (антикатода)

Энергетическая схема электронных состояний в атомах вещества анода:

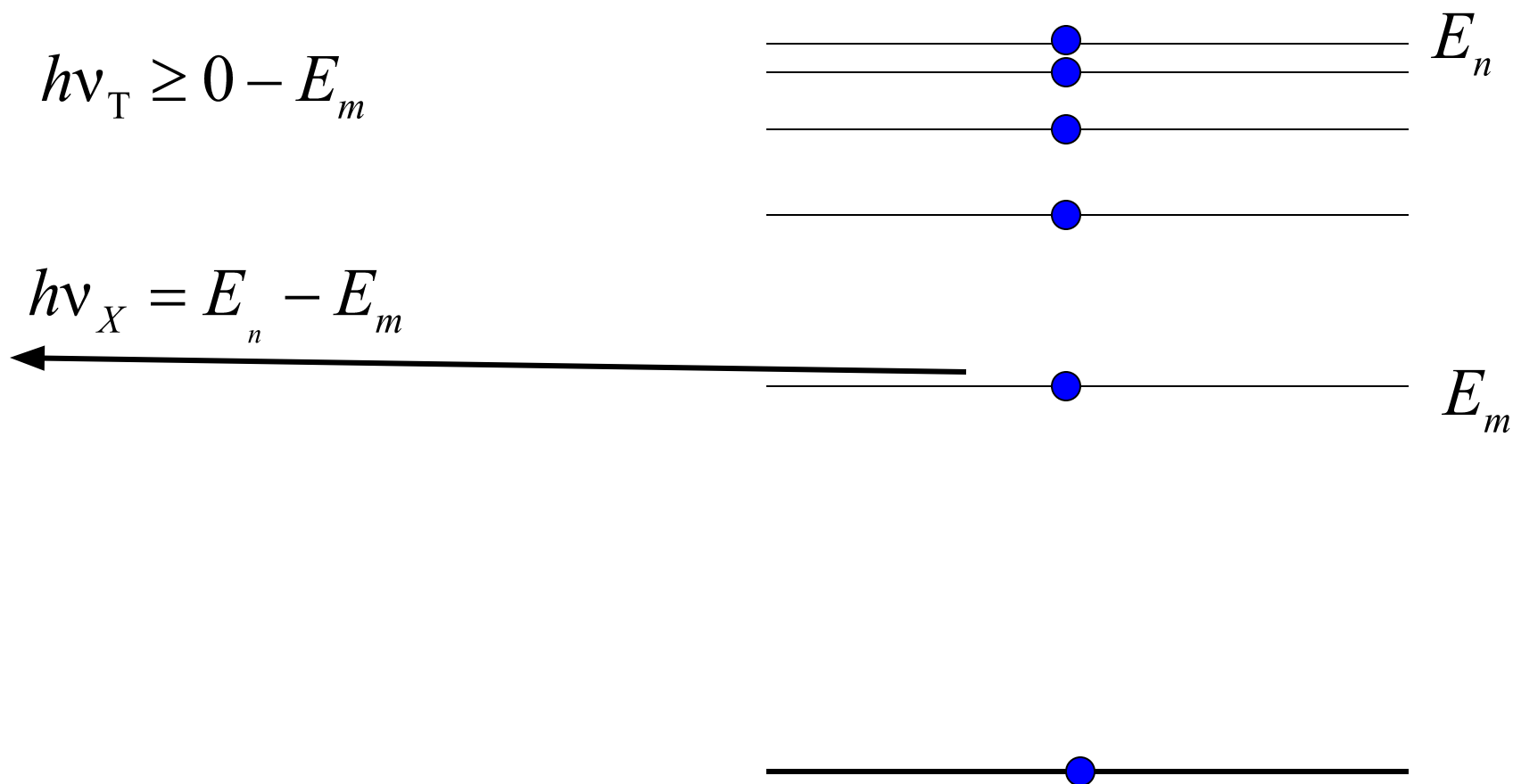


Энергетическая область
возможных состояний
электронов



- – термоэлектрон, разогнанный электрическим полем

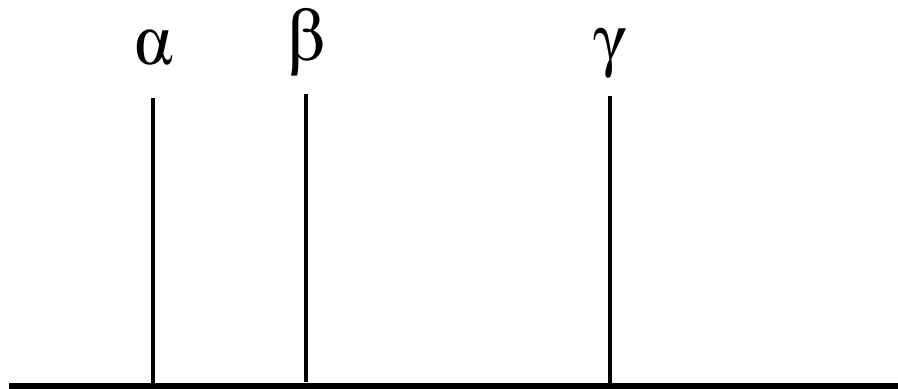
«Нормальный атом»



3. Спектр поглощения (излучения) атома состоит из отдельных линий, соответствующих частотам (длинам волн) квантов поглощения (излучения) с энергиями, равными разности возможных энергий электрона в данном атоме:

Гелий

АВС



Идентификация атома

$\nu(\lambda)$ Идентификация человека

Вывод:

по спектру излучения (поглощения) можно однозначно идентифицировать атом

Закон Мозли для характеристического рентгеновского излучения:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{\varepsilon}{\hbar} = C \cdot R (Z - \sigma)^2$$

$R = 2,07 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$ - постоянная

σ – постоянная экранирования Ридберга

C – постоянная

Z – порядковый номер элемента материала мишени

Взаимодействие X – излучения с веществом

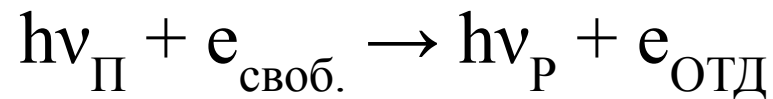
1. Когерентное рассеяние (отражение):

$$h\nu_{\text{P}} = h\nu_{\text{П}}$$

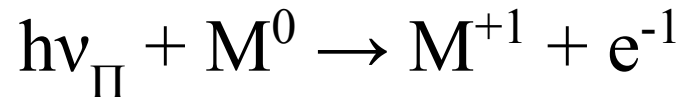
Изменение направления распространения

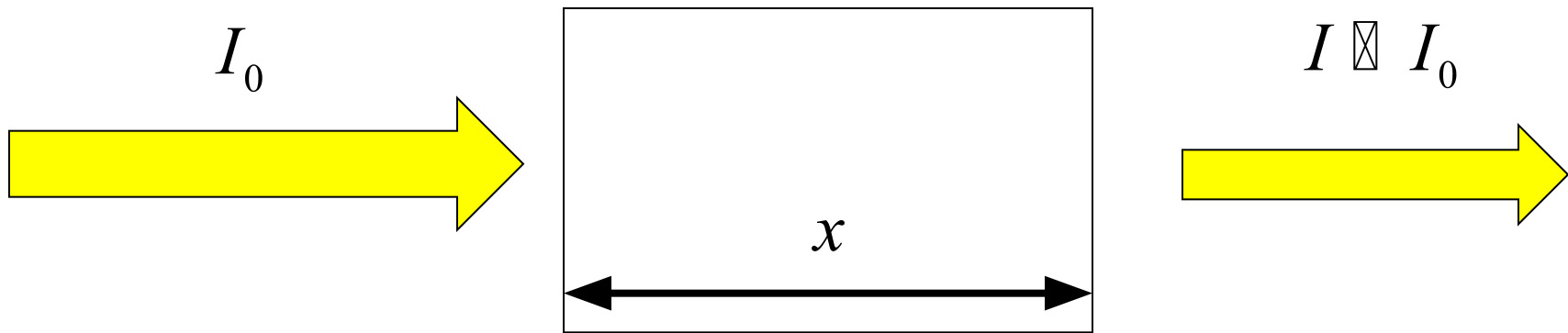
2. Некогерентное рассеяние:

Эффект Комптона (частный случай внешнего фотоэффекта)
связан с ионизацией



3. Фотоионизация нейтральных молекул





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

$$\mu = \mu_K + \mu_{HK} + \mu_\Phi$$

μ – линейный коэффициент ослабления

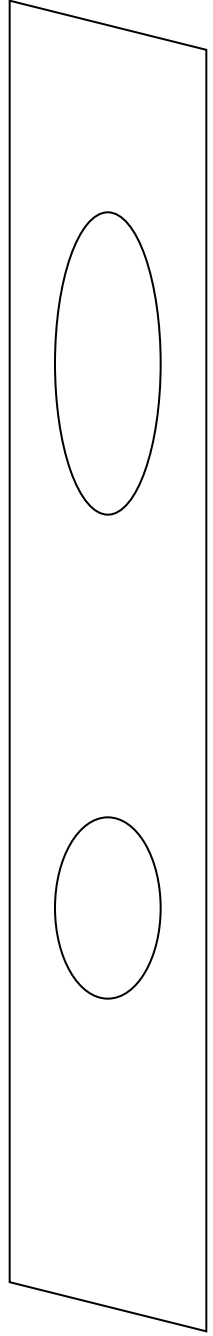
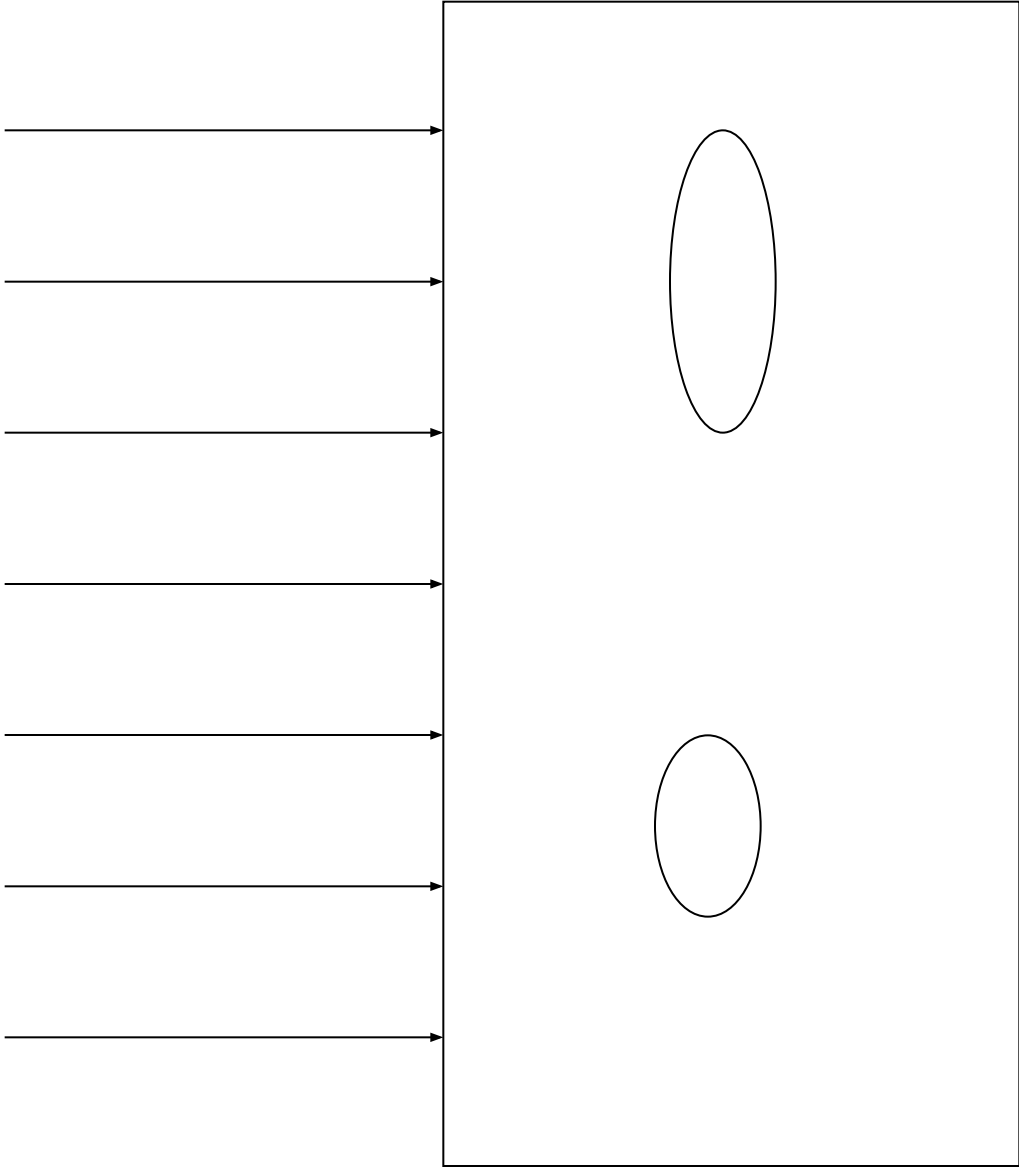
$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$ – массовый коэффициент ослабления

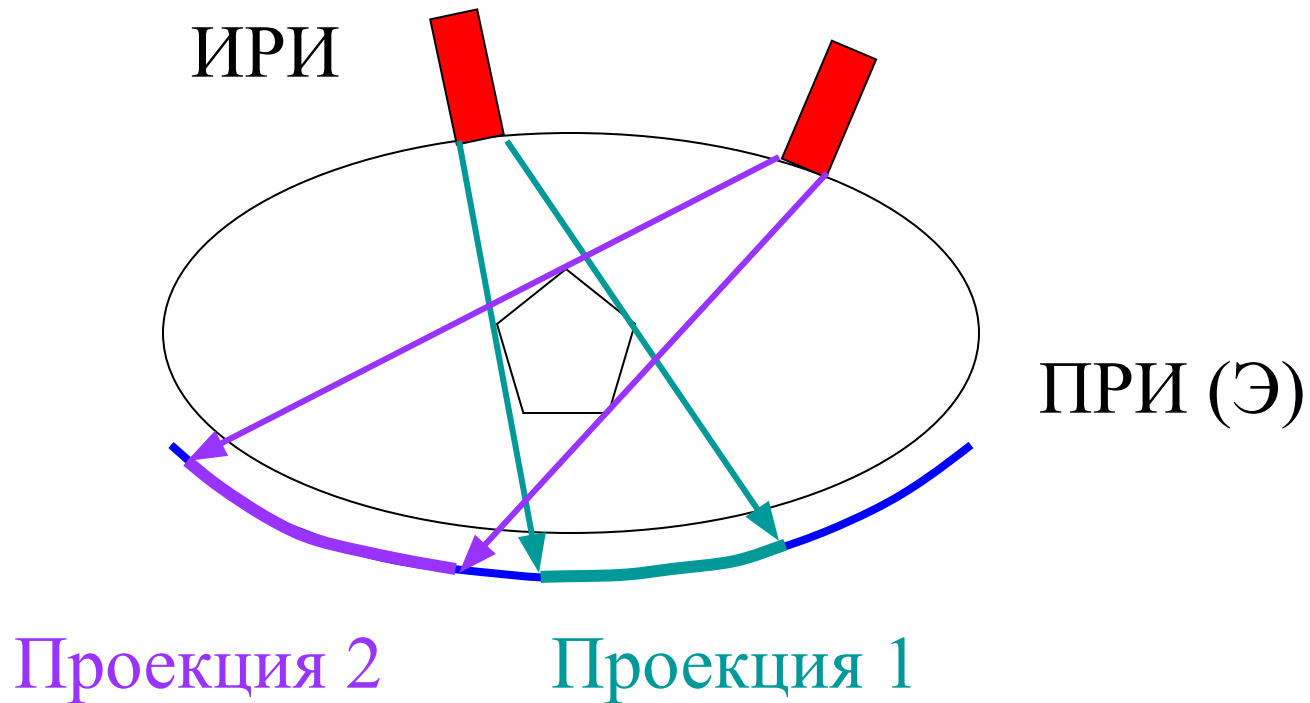
$$\mu_m = k\lambda^3 Z^3$$

Z – порядковый номер элемента

Выводы:

1. X – излучение обладает высокой проникающей способностью.
2. Проникающая способность различна для различных веществ →



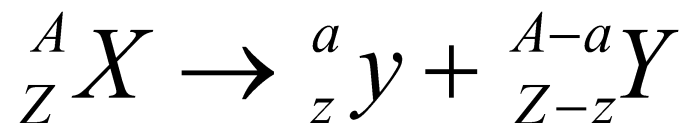


РТ: сумма проекций = пространственное представление

Радиоактивность

Ядро 1 \rightarrow

\rightarrow ядро 2 + элементарная частица 2



A – число нуклонов

Z – число протонов

N = A – Z – число нейтронов

$$q = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$q = 0 \text{ Кл}$$

$$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$m_n = 1,6750 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

Естественная и искусственная Распады

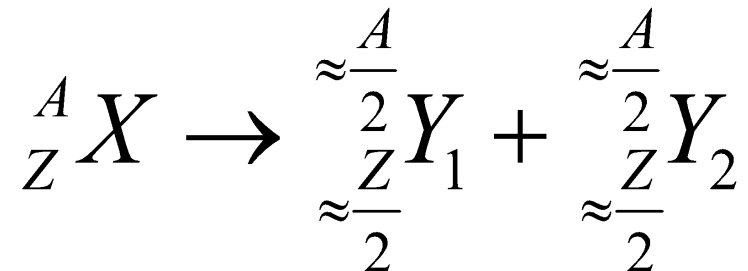
α – распад:



Протонная радиоактивность



Спонтанное деление ядер тяжелых элементов



β – распад:

$${}_{-1}^0\beta = {}_{-1}^0e \quad \text{– электрон}$$

$${}_{+1}^0\beta = {}_{+1}^0e \quad \text{– позитрон}$$

Взаимные превращения в ядре протона и нейтрона

$${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e$$

$${}^1_1p \rightarrow {}^1_0n + {}^0_{+1}e$$

$${}^1_1p + {}^0_{-1}e \rightarrow {}^1_0n$$

γ – излучение ${}^0_0\gamma \quad \varepsilon_{\gamma \max} = h\nu_{\max} = W_1 - W_2$

Закон радиоактивного распада

$$dN = -\lambda \cdot N \cdot dt$$

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

$$A = \frac{|dN|}{dt} = \lambda \cdot N$$

$$[A] = \frac{\text{распад}}{c}$$

$$[A] = 1\text{Ku} = 3,700 \cdot 10^{10} \frac{\text{распад}}{c}$$

Ионизирующие излучения:

ПОТОКИ КВАНТОВ:

X – излучение;

γ – излучение

ПОТОКИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ:

α – излучение;

β – излучение;

n – излучение;

p - излучение

Взаимодействие излучения с веществом =
= изменение состояния носителей излучения +
+ изменение состояния вещества =
 f (свойства носителей + свойства вещества)

Стадии взаимодействия:

1. Физическая
2. Физико-химическая
3. Химическая
4. Биологическая

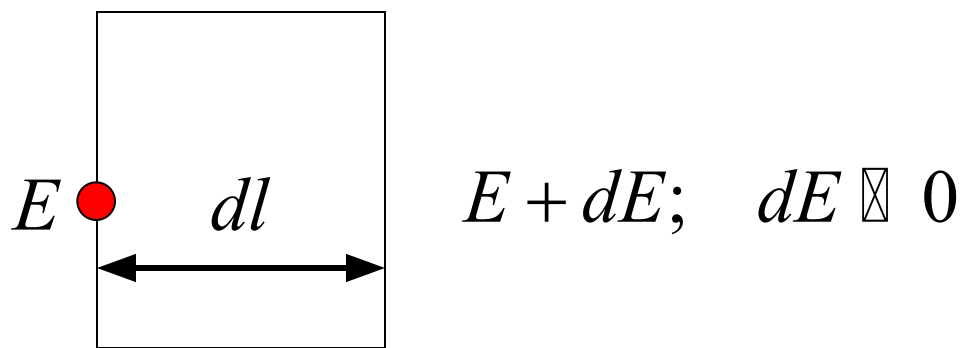
Физическая стадия

Носитель изменяет направление распространения
и теряет энергию

Вещество изменяет энергетическое и электрическое
состояние

Количественные оценки свойств излучения и вещества при их взаимодействии на первой стадии:

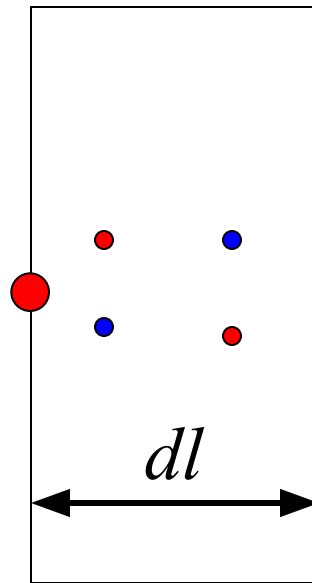
1. Линейная тормозная способность вещества:



$$S = \frac{|dE|}{dl}$$

$$S = f(\text{свойства вещества}; E; q)$$

2. Линейная плотность ионизации:



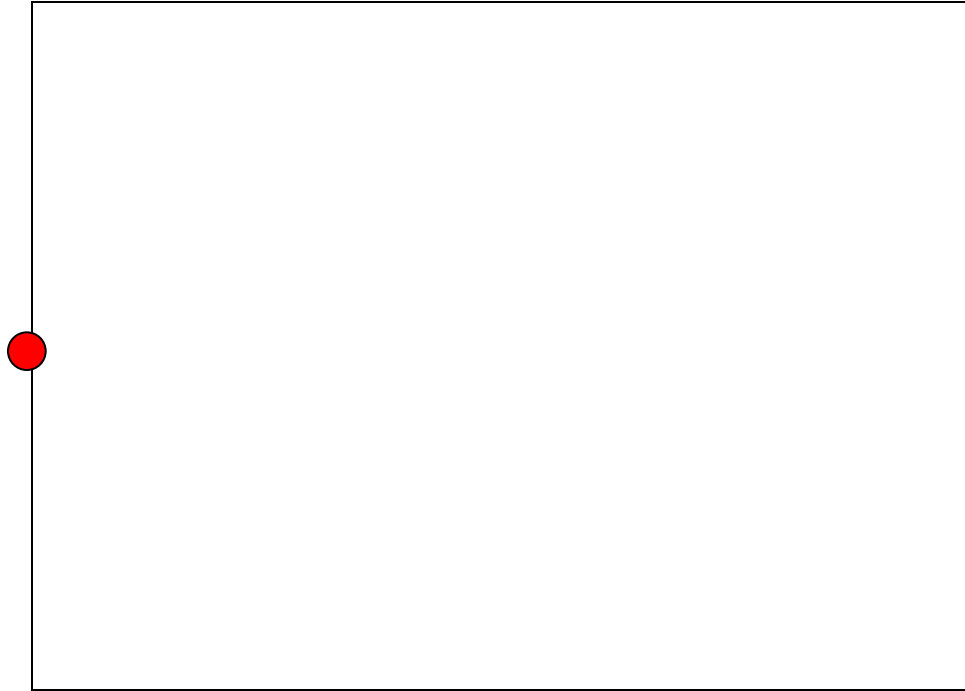
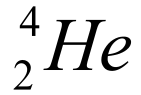
$$i = \frac{dn}{dl} = \frac{S}{E_i}$$

$$i = f(\text{свойства вещества}; E; q)$$

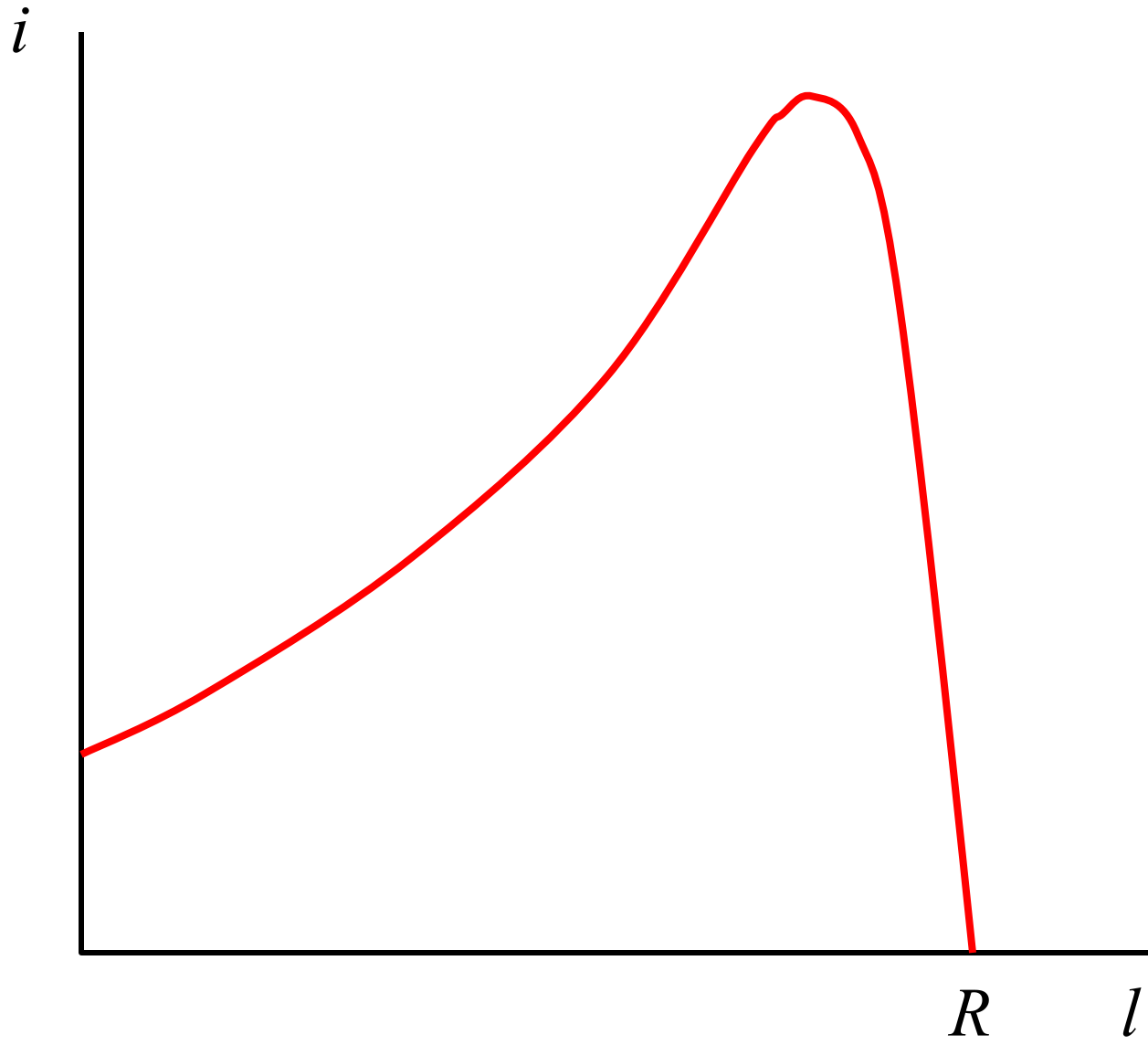
3. Средний линейный пробег

R

α – излучение

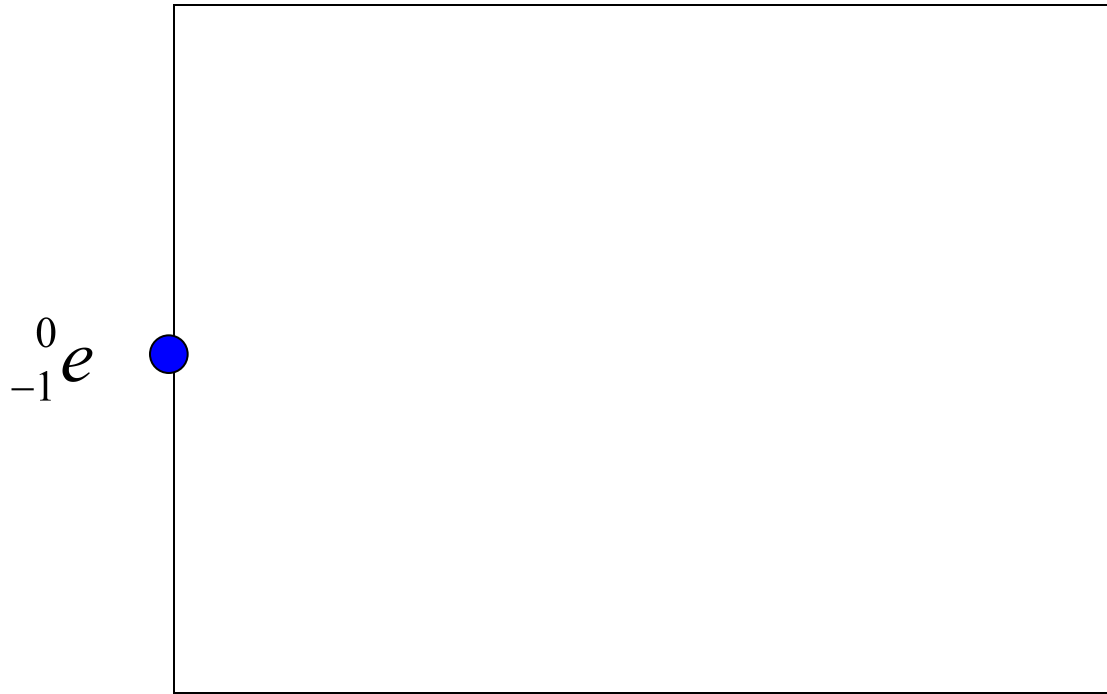


Направление движения не меняется



Энергия, МэВ	Линейная тормозная способность (S), кэВ/мкм	Линейная плотность ионизации (i), пар ионов/мкм	Пробег (R), мкм
1	264	6200	5,3
3	135	2000	16,8
6	82	1100	47
9	60	775	91
10	56	706	108

β – излучение

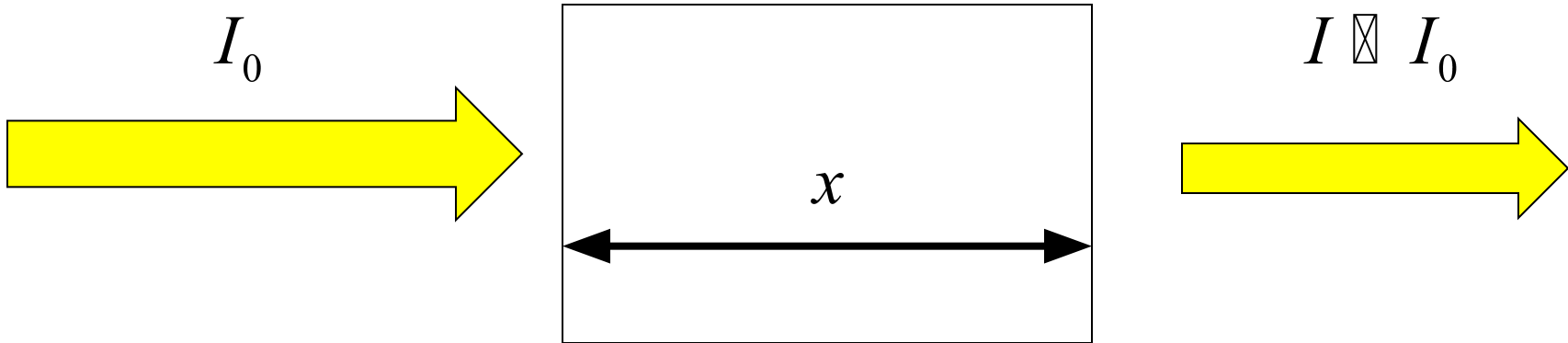


Направление движения меняется

Энергия, кэВ	Линейная тормозная способность (S), кэВ/мкм	Линейная плотность ионизации (i), пар ионов/мкм	Пробег (R), мкм
0,1	33	1700	0,003
0,2	29	840	0,006
0,8	14	285	0,038
2,0	7,7	128	0,16
9,5	2,4	32	2,3
22,5	1,2	15	10,5
45,0	0,7	8	36,8
90,0	0,4	5	118
150,0	0,3	3	278
450,0	0,2	2	1 500

γ – излучение

${}^0_0\gamma$



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

$$\mu = \mu_K + \mu_{HK} + \mu_{\Pi}$$

μ – линейный коэффициент ослабления

Действие излучения на вещество

Физическое воздействие

1. Поглощенная доза:

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m}$$

$$[D] = \text{Гр} = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$$1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$$

2. Мощность поглощенной дозы:

$$N = \frac{\Delta E}{\Delta m \Delta t}$$

3. Экспозиционная доза

Равна заряду всех положительных ионов, образующихся под действием излучения в единице массы воздуха при нормальных условиях

$$[X] = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$$

$$[X] = 1\text{Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$$

Энергетический эквивалент 1 Рентгена:

$$1\text{Р} \rightarrow 88 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$$D = f \cdot X$$

$$D = fX$$

Вещество	$f, \text{рад/Р}$
Воздух при нормальных условиях	0,88
Вода и мягкие ткани	≈ 1
Костная ткань (величина Γ растет при увеличении длины волны)	1 – 4,5

Биологическое воздействие

4. Эквивалентная доза:

$$H = KD$$

Вид излучения	<i>K</i>
1. γ - и рентгеновское излучения	1
2. β -излучение	1
3. Протоны с энергиями более 2 МэВ	5
4. α -излучение	20

$$[H] = 1 \text{ Зв} = 100 \text{ бЭР}$$

$$H = \sum_1^n K_i D_i$$

Общие выводы

1. Воздействие ионизирующего излучения на вещество определяется как свойствами излучения, так и свойствами вещества
2. Воздействие складывается из последовательных стадий