

# Радиационный контроль

## Радиационные технологии :

- рентгенография,
- гаммаграфия,
- радиоскопия,
- радиометрия,
- радиационно-спектральный анализ,
- радиационно-структурный анализ,
- рентгеновская дифракция,
- малоугловое рассеяние рентгеновского излучения,
- рентгеноструктурный анализ,
- рентгеновская микротомография,  
высокоэнергетическая томография.
- рентгенофлуоресцентная  
спектрометрия, портативные РФС,

- **микро РФ-спектрометрию**
- **РФ-спектрометрию при углах полного отражения,**
- **автоматизированная рентгеновская метрология,**
- **энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия,**
- **оптическая эмиссионная спектрометрия,**
- **CS/ONH – анализ углеродно\серный.**

# Терминология и основные понятия

**Ионизирующее излучение.** Под ионизирующим излучением понимают излучение, взаимодействие которого со средой приводит к образованию ионов разных знаков.

**Рентгеновское излучение.** Рентгеновским излучением называется фотонное излучение, состоящее из тормозного и (или) характеристического излучения. Поскольку интенсивность характеристического излучения по сравнению с тормозным незначительна, она полностью поглощается материалом объекта контроля (ОК).

**Экспозиционная доза излучения.** Это такое количество излучения, при котором сумма электрических зарядов ионов одного знака, ионизированных в 1 кг воздуха, равна 1 кулону и называется рентгеном.

$$1 \text{ р} = 2,58 \cdot 10^4 \text{ Кл/кг}$$

**Поглощенная доза.** Количество излучения, которое передает массе облученного вещества в 1 кг энергию 1 Дж - называется Грей.

**Эквивалентная доза.** Характеризует биологическое действие излучения. Единица измерения – Зиверт (Зв). Для рентгеновского излучения численно совпадает с Греем.

**Радиационная толщина.** Называется суммарная длина участков оси рабочего пучка направленного ионизирующего излучения в материале объекта контроля.

**Эквивалентная радиационная толщина.** Величина, характеризующая поглощающую способность объекта контроля. Равна толщине однородной пластины из материала, принятого за эквивалент, в которой плотность потока энергии узкого пучка ионизирующего излучения ослабляется также, как и в ОК.

**Радиационный контраст.** Называется отношение изменения мощности дозы из-за перепада толщины или плотности в материале объекта контроля к мощности дозы за объектом контроля.

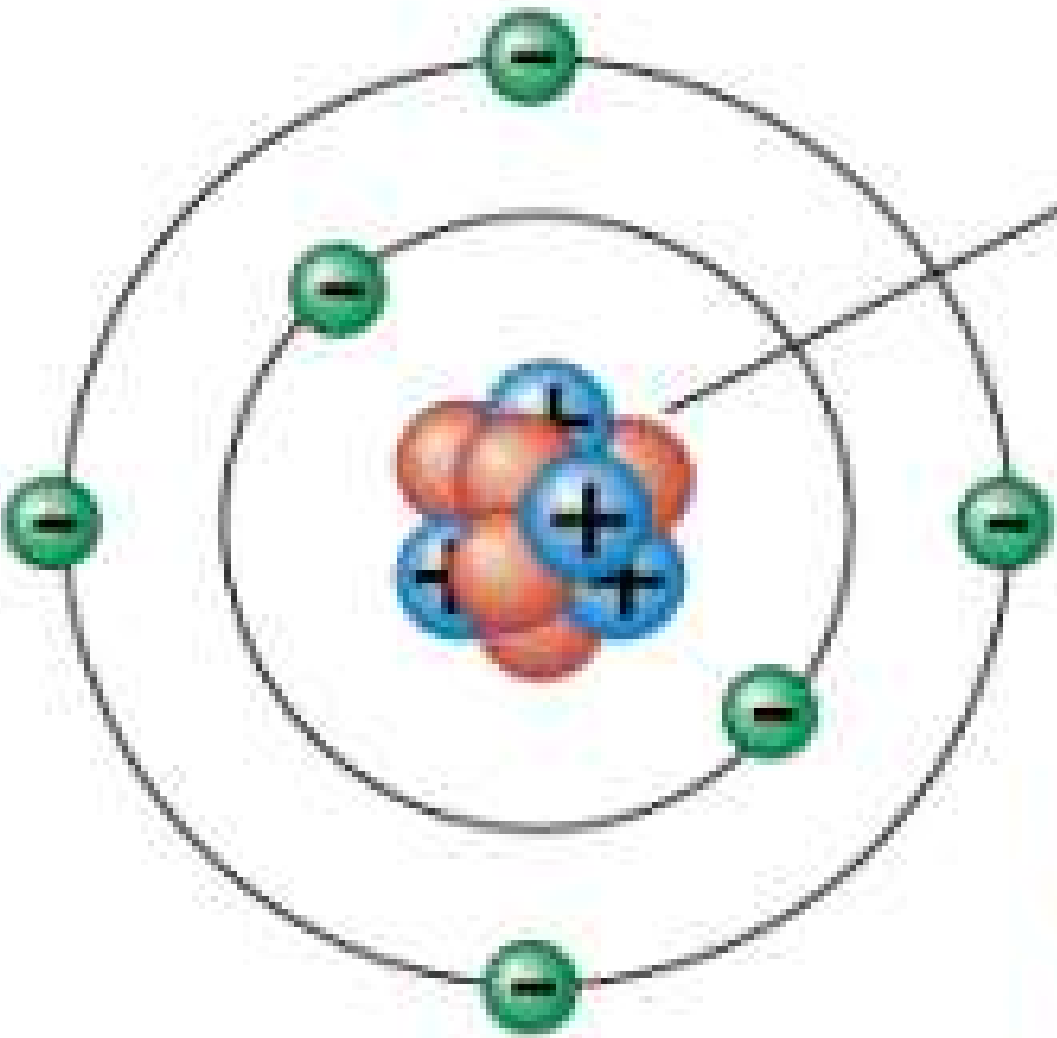
**Моноэнергетическое излучение.** Излучение с одной линией спектра (одной длины волны) называется моноэнергетическим.

**Узкий пучок излучения.** Излучение, состоящее до взаимодействия со средой из первичного направления, а после взаимодействия с ней – из части первичного излучения, не испытавшего взаимодействия со средой.

**Широкий пучок излучения.** Излучение, состоящее до взаимодействия со средой из ионизирующего излучения с выделенным направлением распространения, а после взаимодействия с ней - из части первичного излучения, не испытавшего взаимодействия со средой и рассеянного излучения.

**Эффективная энергия немонаэнергетического излучения.** Называют такую энергию моноэнергетического фотонного излучения, относительное ослабление которого в поглотителе определенного состава и определенной толщины такое же, как и у немонаэнергетического.

**Слой половинного ослабления.** Называют такую толщину слоя, которая ослабляет интенсивность падающего пучка излучения в 2 раза.



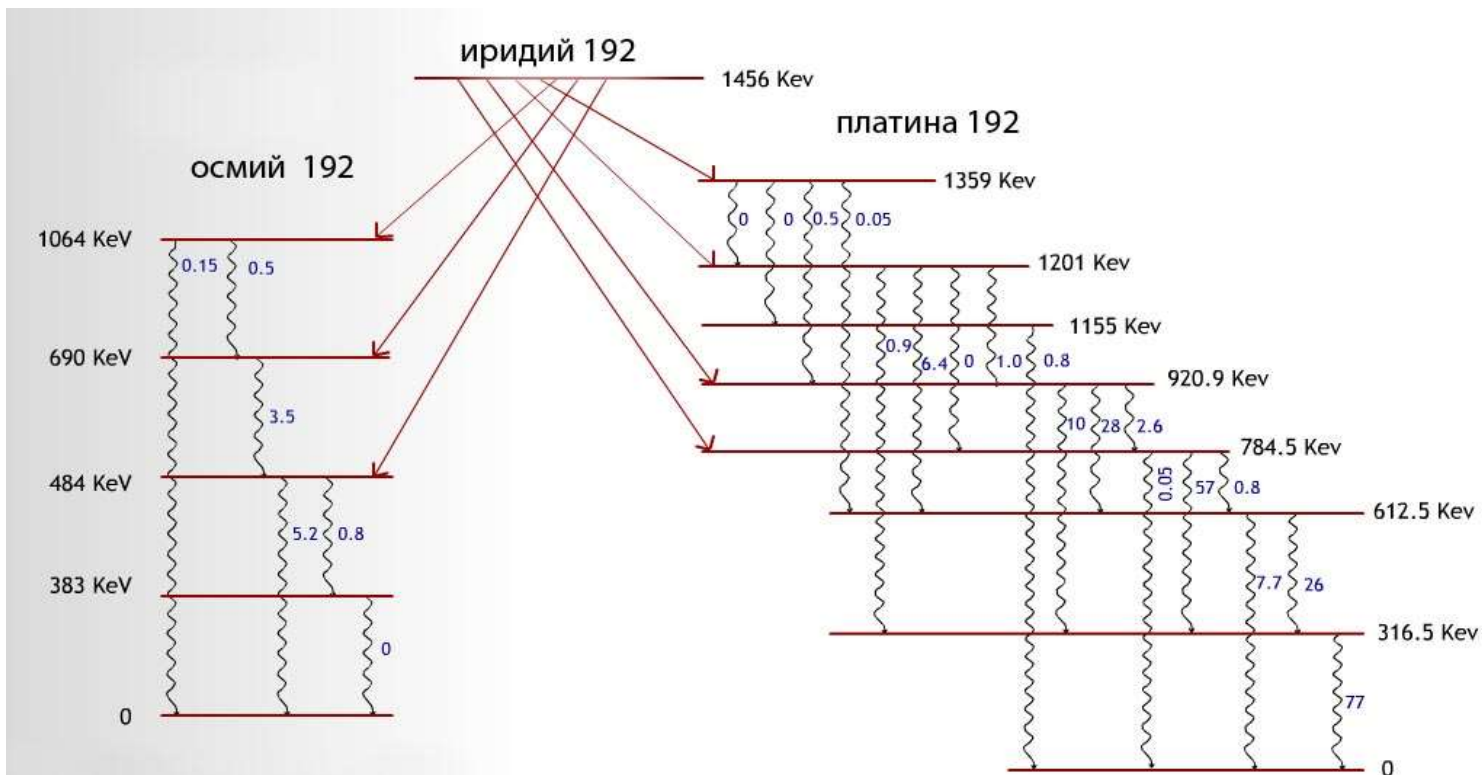
6 протонов +  
6 нейтронов

-  электрон
  -  протон
  -  нейтрон
- } нуклоны

Атом углерода

# Радиоактивный распад – Radioactive decay

Способность ядер самопроизвольно распадаться, испуская частицы, называется *радиоактивностью*. Более мелкие ядра и элементарные частицы, которые при этом возникают, принято называть *продуктами распада* или *дочерними элементами*, а распадающиеся частицы – *исходными материалами* или *родителями*.



Вид распада	Характеристика	Формула
<b>α-распад</b>	<p>Ядро испускает α-частицу, которая представляет собой ядро атома гелия <math>{}^4\text{He}</math> и состоит из двух протонов и двух нейтронов. При этом образуется другой изотоп, массовое число которого отличается от первоначального на 4, а заряд ядра на 2</p>	${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \text{He}$ ${}^{226}_{88} \text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86} \text{Rn} + {}^4_2 \text{He}$
<b>β-распад</b>	<p>В неустойчивом ядре нейтрон превращается в протон, при этом ядро испускает электрон (β-частицу) и антинейтрино. После β-распада элемент смещается на 1 клетку к концу таблицы Менделеева (поскольку заряд ядра увеличивается на 1), а массовое число ядра не меняется</p>	${}^{234}_{90} \text{Th} \rightarrow {}^{234}_{91} \text{Pa} + {}^0_{-1} e$ ${}^1_0 n \rightarrow {}^1_1 p + {}^0_{-1} e + \bar{\nu}_e$
<b>γ-распад</b>	<p>Возбужденное ядро испускает γ-квант, при этом энергия ядра уменьшается, а массовое число и заряд ядра остаются неизменными, т.е. химический элемент не видоизменяется</p>	${}^A_Z X^* \rightarrow {}^A_Z X + \gamma$



п.	Группы химических элементов															
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII								
1	<b>H</b> 1 1,00784 Водород															<b>He</b> 2 4,0026 Гелий
2	<b>Li</b> 3 6,941 Литий	<b>Be</b> 4 9,0122 Бериллий	<b>B</b> 5 10,811 Бор	<b>C</b> 6 12,01115 Углерод	<b>N</b> 7 14,0067 Азот	<b>O</b> 8 15,9994 Кислород	<b>F</b> 9 18,9984 Фтор	<b>Ne</b> 10 20,179 Неон								
3	<b>Na</b> 11 22,98976 Натрий	<b>Mg</b> 12 24,305 Магний	<b>Al</b> 13 26,9815 Алюминий	<b>Si</b> 14 28,086 Кремний	<b>P</b> 15 30,9738 Фосфор	<b>S</b> 16 32,064 Сера	<b>Cl</b> 17 35,454 Хлор	<b>Ar</b> 18 39,948 Аргон								
4	<b>K</b> 19 39,0983 Калий	<b>Ca</b> 20 40,08 Кальций	<b>Sc</b> 21 44,956 Скандий	<b>Ti</b> 22 47,88 Титан	<b>V</b> 23 50,942 Ванадий	<b>Cr</b> 24 51,996 Хром	<b>Mn</b> 25 54,938 Марганец	<b>Fe</b> 26 55,847 Железо	<b>Co</b> 27 58,9332 Кобальт	<b>Ni</b> 28 58,69 Никель						
5	<b>Rb</b> 37 85,47 Рубидий	<b>Sr</b> 38 87,62 Стронций	<b>Zn</b> 39 65,39 Цинк	<b>Ga</b> 40 69,72 Галлий	<b>Ge</b> 41 72,61 Германий	<b>As</b> 42 74,9216 Мышьяк	<b>Se</b> 43 78,96 Селен	<b>Br</b> 44 79,904 Бром	<b>Kr</b> 45 83,80 Криптон							
6	<b>Cs</b> 55 132,905 Цезий	<b>Ba</b> 56 137,327 Барий	<b>La</b> 57 138,905 Лантан	<b>Y</b> 39 88,906 Итрий	<b>Zr</b> 40 91,224 Цирконий	<b>Nb</b> 41 92,906 Нобий	<b>Mo</b> 42 95,94 Молибден	<b>Tc</b> 43 98,906 Технеций	<b>Ru</b> 44 101,07 Рутений	<b>Rh</b> 45 102,905 Родий	<b>Pd</b> 46 106,42 Палладий					
7	<b>Fr</b> 87 [223] Франций	<b>Ra</b> 88 226,025 Радий	<b>Ac</b> 89 [227] Актиний	<b>104</b> [261] Рифторидий	<b>Rf</b> 105 [261] Рифбий	<b>Db</b> 106 [262] Дубний	<b>Sg</b> 107 [263] Сибургий	<b>Bh</b> 108 [264] Бергий	<b>Hs</b> 109 [265] Хасгий	<b>Mt</b> 110 [266] Митнергий	<b>Ds</b> 111 [267] Денгангий					
8	<b>Uue</b> 119 [119] Унвекгий	<b>Ubn</b> 120 [120] Унбевекгий	<b>121</b> [121] Унвундий	<b>122</b> [122] Унвуддий	<b>123</b> [123] Унвуддий	<b>124</b> [124] Унвуддий	<b>125</b> [125] Унвуддий	<b>126</b> [126] Унвуддий	<b>127</b> [127] Унвуддий	<b>128</b> [128] Унвуддий						

Высшие оксиды

$R_2O$	$RO$	$R_2O_3$	$RO_2$	$R_2O_5$	$RO_3$	$R_2O_7$	$RO_4$
--------	------	----------	--------	----------	--------	----------	--------

Легучие водородные соединения

$RH_4$	$RH_3$	$H_2R$	$RH$
--------	--------	--------	------

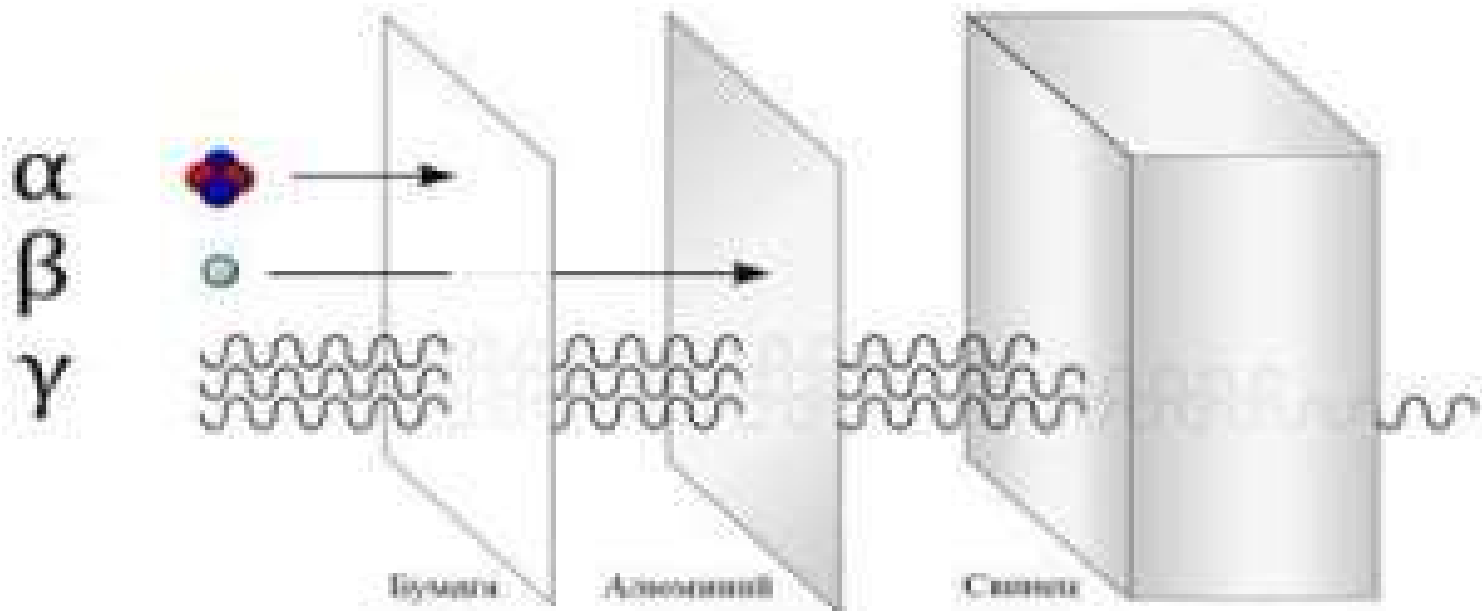
\* ЛАНТАНОИДЫ

58 114,16 Церий	<b>Ce</b> 59 140,207 Прометий	60 144,24 Неодим	61 [145] Прометий	62 150,36 Самарий	63 151,96 Европий	64 157,25 Гадолиний	65 158,904 Тербий	66 162,5 Диспрозий	67 164,93 Тольбий	68 167,26 Эрбий	69 168,94 Тулий	70 172,04 Иттербий	71 174,97 Лютеций
** АКТИНОИДЫ													

90 232,038 Торий	<b>Th</b> 91 231,04 Протактиний	<b>Pa</b> 92 231,04 Уран	93 237,05 Нептуний	94 [244] Плутоний	95 [243] Америций	96 [247] Кюрий	97 [247] Берклий	98 [251] Калифорний	99 [254] Эйнштейний	100 [257] Фермий	101 [258] Менделеевий	102 [259] Нобелий	103 260 Лоренсий
------------------------	---------------------------------------	--------------------------------	--------------------------	-------------------------	-------------------------	----------------------	------------------------	---------------------------	---------------------------	------------------------	-----------------------------	-------------------------	------------------------

# Взаимодействие $\alpha$ -излучения с веществом

- **$\alpha$ -частицы** сильно взаимодействуют с различными веществами, т.е. легко поглощаются ими. Тонкий лист бумаги или слой воздуха толщиной несколько сантиметров достаточны для того, чтобы полностью поглотить  $\alpha$ -частицы. После открытия радиоактивности в 1879 г.  $\alpha$ -лучами был назван наименее проникающий вид радиоактивного излучения.
- При прохождении  $\alpha$ -частиц через вещество они притягивают внешние орбитальные электроны атомов, отрывая их по пути своего движения. Они не движутся вместе с  $\alpha$ -частицей, а локализуются, образуя ионные пары (электроны и положительные ионы), которые медленно рекомбинируют. Происходит ионизация, сопровождаемая потерей энергии или торможением  $\alpha$ -частицы в веществе.
- **Полной ионизацией** называется число пар ионов, образованных  $\alpha$ -частицей на всем ее пути.
- **Удельной ионизацией** называют число пар ионов, образованных частицей на единице пути.



Пробегом частицы называют расстояние, которое она проходит до момента полной потери энергии. Длина пробега  $\alpha$ -частицы в воздухе составляет приблизительно 0,5 см на 1 МэВ кинетической энергии. На каждом сантиметре своего пути в воздухе  $\alpha$ -частицы оставляют дорожку из  $10^4 \dots 10^6$  ионных пар.

где  $E$  – начальная энергия ионизирующей частицы, эВ;  $N$  – полная ионизация, безразмерная величина;  $W$  – средняя энергия ионообразования в данной среде, эВ, величина постоянная для каждой среды независимо от того, с какими конкретно ионизирующими частицами происходит взаимодействие. Например, **для воздуха средняя энергия ионообразования равна 34 эВ.**

## Взаимодействие $\beta$ -излучения с веществом

$\beta$ -излучение – это поток электронов или позитронов (античастица электрона), испускаемых ядрами радионуклидов при  $\beta$ -распаде. Вероятность взаимодействия  $\beta$ -частиц с веществом меньше, чем для  $\alpha$ -частиц, так как  $\beta$ -частицы имеют в 2 раза меньший заряд и приблизительно в 7300 раз меньшую массу, поэтому пробег  $\beta$ -частиц в веществе намного больше пробега  $\alpha$ -частиц с той же энергией (см. рис. 2.6). Максимальные пробеги  $\beta$ -частиц с энергией 1 МэВ составляют в воздухе около 4 м, в воде – 4,4 м, в алюминии – 2 мм.

Взаимодействие электронов и позитронов с веществом качественно одинаково (отличие состоит только в аннигиляции позитронов) и складывается из трех основных процессов:

- упругого рассеяния на атомных ядрах;
- рассеяния на орбитальных электронах;
- неупругих столкновений с атомным ядром.

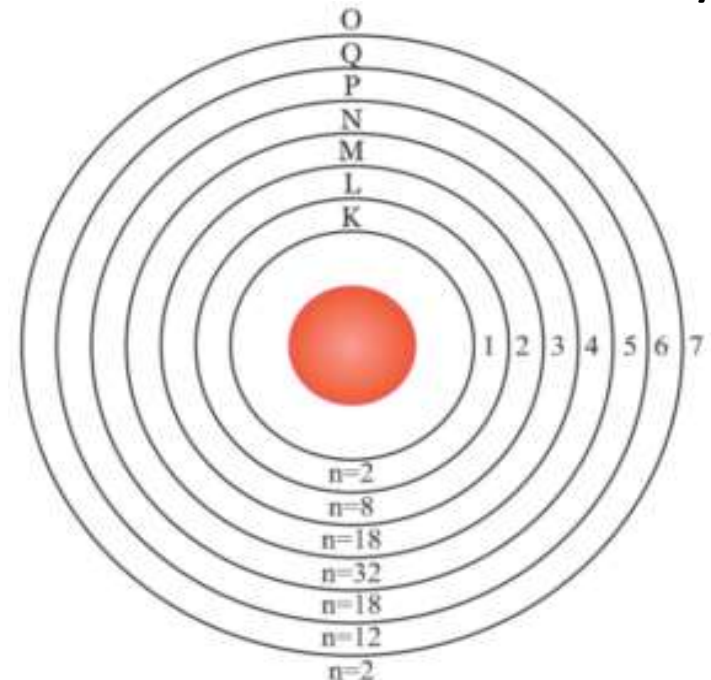
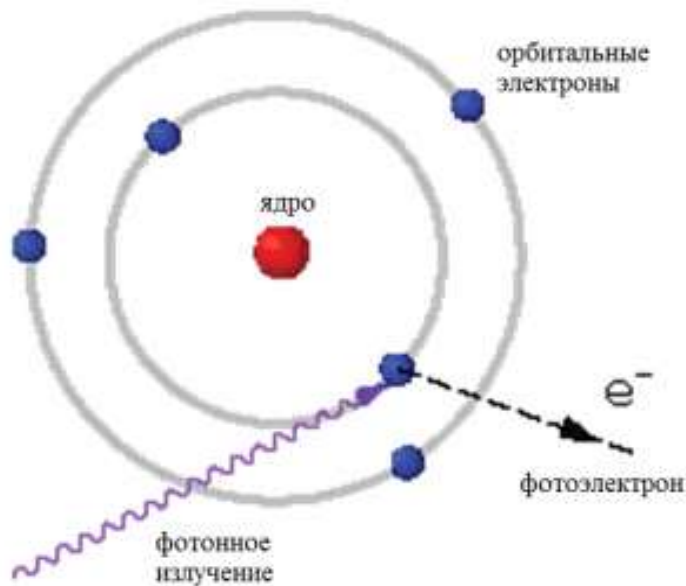
## Взаимодействие фотонного излучения с веществ.

существенно отличается от взаимодействия  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц. В то время как заряженные частицы передают свою энергию электронам атомов при многократных процессах соударения, фотоны отдают всю или по крайней мере большую часть своей энергии при однократном взаимодействии. Однако вероятность этого взаимодействия очень низка, поэтому  $\gamma$ - и X-кванты обладают гораздо большей проникающей способностью, чем заряженные частицы. Проникающая способность излучения характеризуется чаще всего толщиной слоя поглотителя, при которой интенсивность излучения уменьшается наполовину - *слой половинного ослабления*.

Поглощение высокоэнергетических фотонов вызывается тремя независимыми друг от друга процессами с различной физической природой: **фотоэффектом** (фотоэлектрическим взаимодействием); **эффектом Комптона**; **образованием электрон-позитронных пар**.

При **фотоэлектрическом взаимодействии** фотон поглощается атомом и высвобождается фотоэлектрон. Вероятность такого взаимодействия можно выразить с помощью *сечения взаимодействия*  $\sigma$  – эффективной площади мишени, обращенной к взаимодействующему фотону. Наиболее глубокий атомный уровень всегда имеет наибольшее сечение взаимодействия, т.е. взаимодействие *K*-й оболочки примерно в 4–5 раз более вероятно, чем взаимодействие *L*-й оболочки.

$$\sigma = N/n.$$

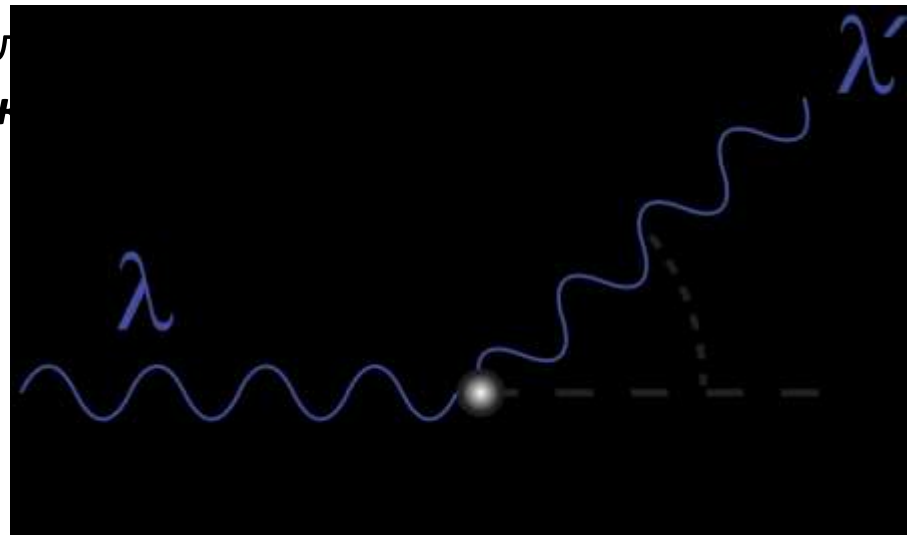


*Эффектом Комптона* называют процесс, при котором  $\gamma$ - или X-квант отдает электрону только часть своей энергии, т.е. рассеивается. Это упругое столкновение фотонного излучения с электронами внешней оболочки атома. Квант передает часть своей энергии электрону и изменяет направление своего движения. Отраженный квант называется вторичным, или рассеянным. При рассеянии фотона на свободном электроне частоты фотона  $\nu$  и  $\nu'$  (до и после рассеяния соответственно) связаны соотношением:

$\nu' = \nu / (1 + h \nu / (m_e c^2) (1 - \cos \theta))$ , где  $\theta$  - угол рассеяния (угол между направлениями распространения фотона до и после рассеяния).

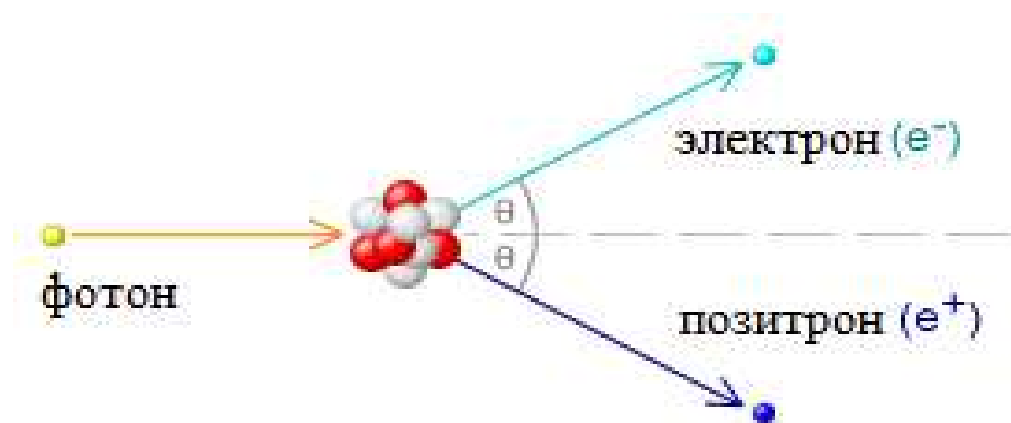
$\lambda' - \lambda = \lambda_k (1 - \cos \theta)$ , где  $\lambda_k = h / (m_e c)$  комптоновская длина волны электрона, равная  $\lambda_k \approx 2,4263 \cdot 10^{-12}$  м.

Уменьшение энергии фотона в результате рассеяния называется **комтоновск**



*Образование электрон-позитронных пар* – это взаимодействие фотонного излучения с веществом, при котором в поле ядра одновременно образуются электрон и позитрон, преобразуя всю энергию фотона в их энергию массы покоя и кинетическую энергию. Поглощение фотонного излучения в результате образования пар наблюдается в основном на атомах тяжелых элементов. Этот процесс преобладает при энергии фотонов более 10 МэВ.

Так как энергия покоя, как электрона, так и позитрона равна **0,51 МэВ**, то образование пар возможно лишь при энергии фотона больше 1,02 МэВ и только в поле ядра. Ядро в соответствии с законом сохранения импульса принимает на себя часть импульса фотона. Часть энергии фотона, превышающая 1,02 МэВ, передается электрону и позитрону в виде кинетической энергии. Позитрон через короткое время аннигилирует с образованием двух вторичных фотонов, реже трех, каждый из которых имеет энергию  $\leq 0,51$  МэВ и поэтому не может образовывать пары.





# Взаимодействие нейтронного излучения с веществом

Поскольку нейтрон не имеет заряда, он не испытывает кулоновских взаимодействий и может свободно перемещаться через вещество до тех пор, пока не столкнется с ядром атома. В общем случае нейтроны взаимодействуют с веществом двумя способами: они либо рассеиваются ядром, либо поглощаются им.

При **упругом рассеянии** нейтрон сталкивается с ядром и уходит, оставляя ядро без изменений. При таком столкновении нейтрон отдает часть своей энергии ядру, и, следовательно, при каждом столкновении энергия нейтрона уменьшается. После ряда столкновений с ядрами его энергия уменьшается до уровня средней кинетической энергии поглощающей среды. Эту энергию часто называют тепловой, поскольку она зависит от температуры, а такие нейтроны называют тепловыми нейтронами.

В некоторых случаях ядра атомов, получившие в результате столкновения определенный запас кинетической энергии, – ядра отдачи «выскакивают» из электронной оболочки и, проходя через вещество, производят ионизацию (поскольку они обладают зарядом). Чем меньше масса ядер среды, через которые проходят нейтроны, тем большую долю энергии они теряют в процессе упругого рассеяния. **В качестве замедлителей нейтронов лучше всего использовать водородосодержащие или легкие вещества – обычную или тяжелую воду, парафин, бериллий, углерод.**

**Радиационный захват.** При достаточной тепловой скорости нейтрон может быть захвачен одним из ядер атомов среды. Ядро переходит при этом в возбужденное состояние. Возврат ядра в основное состояние сопровождается испусканием  $\gamma$ -квантов. Не только тепловые, но и быстрые нейтроны (с энергиями 200 кэВ...20 МэВ) могут быть захвачены ядрами атомов. В результате произойдет ядерная реакция с вылетом  $\alpha$ -частицы и протона и образуется ядро другого элемента.

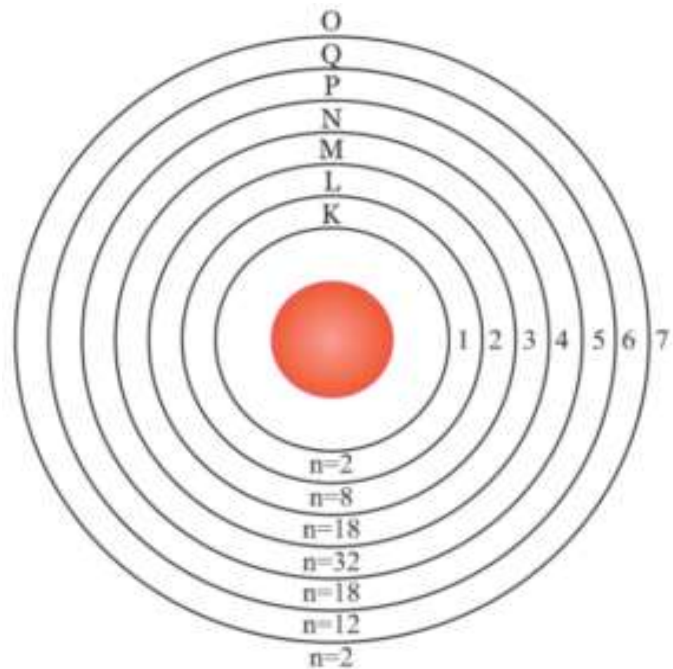
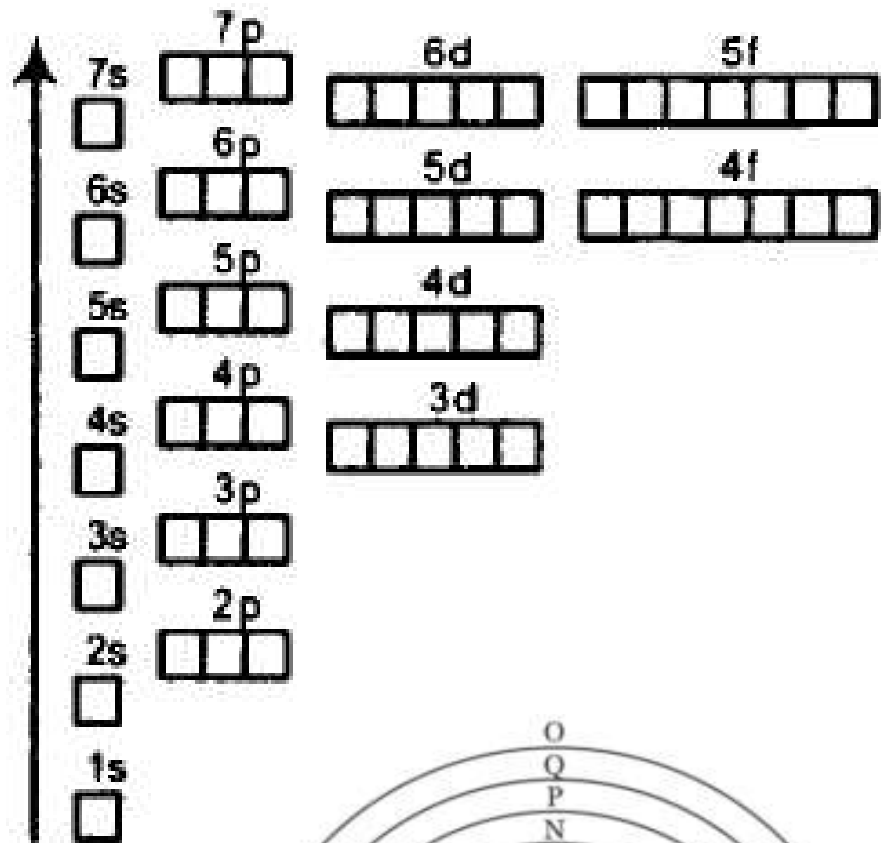
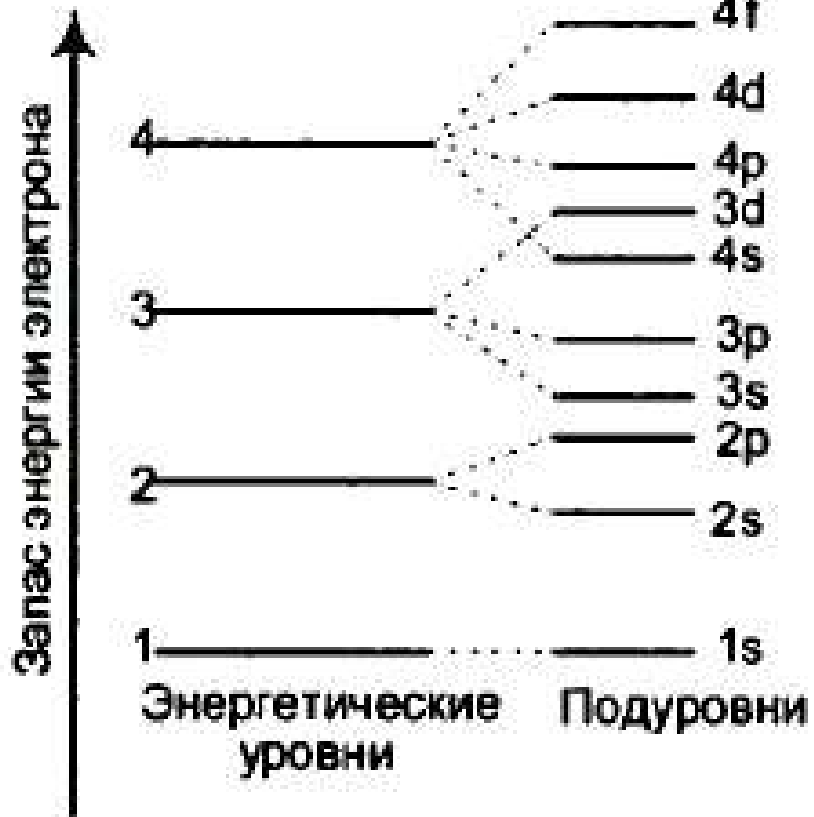
Радиационный захват нейтрона возможен при любой его энергии и на любых ядрах, но более вероятен на медленных нейтронах и тяжелых ядрах, что следует учитывать при выборе материала защиты.

**Метрологическое обеспечение** производства является основой точности, достоверности и сопоставимости результатов контроля и испытаний.

**Метрологическое обеспечение** средств и технологий неразрушающего контроля предусматривает систематическое выполнение органами государственной и ведомственных метрологических служб и комплекса работ, включающих:

- установление оптимальной номенклатуры контролируемых параметров, характеризующих качество выпускаемой продукции;
- установление норм точности измерений и оценки точности измерения при контроле качества;
- государственную и ведомственную проверку средств измерения и контроля, а также проведение государственных и ведомственных испытаний средств контроля.





## Гамма-дефектоскопы серии РИД



Активный элемент –  $Se_{75}$ ,  $Co_{60}$ ,  $Ir_{192}$   
Толщины - 5-200мм

*Гаммарид 2010P*

*Унигам P*

*Станель Se75Ir192*

*Exertus Dual120*

*Exertus Vox 100*

*Exertus Vox 400*

*Exertus Light*

*Exertus Selen 120 Circa*

*РИД-К100*

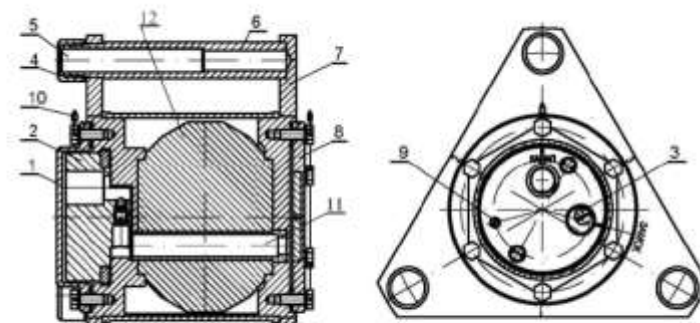
*РИД-КТМ-6*

## КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ



	«Стапель 5 Se75Ir192» еИ1.570.243	«Стапель 5 Se75Ir192» еИ1.570.243 - 02
Источник излучения на основе радионуклида/ Тип источника	Ir-192 / ГИ192М51-53, ГИИД-1-4 (до 5 Ки) Se-75 / ГС75.М11 (до 80 Ки)	Ir-192 / ГИ192М51-53, ГИИД-1-4 (до 25 Ки) Se-75 / ГС75.М11 (до 120 Ки)
Период полураспада изотопа	Ir-192 - 74 дня Se-75 - 120 дней	Ir-192 - 74 дня Se-75 - 120 дней
Диапазон толщин контролируемого металла (сталь), мм	5-80	5-80
Гарантийный период	1 год	1 год
Габаритные размеры радиационной головки (не более), мм, ДхВхШ	187.5x118.5x108	187.5x118.5x108
Масса радиационной головки (не более), кг	11	15
Материал биологической защиты	Обеднённый уран	Обеднённый уран

Количество каналов для хранения источников Se-75 и Ir-192	3
Максимальная суммарная активность источников в ТПК, Ки ( по Se-75)	240
Габаритные размеры, мм: • длина • ширина • высота	156.5 175 201
Масса, кг	22



# ТПК «РИД-КТМ-6»

Количество каналов для хранения источников Co-60	2
Максимальная суммарная активность источников в КТП, Ки	800
Габаритные размеры, мм:	
• длина	507
• ширина	340
• высота	405
Масса, кг	450



Источник излучения на основе радионуклида/ Тип источника	Co-60 / ГК60М324 (до 400 Ки)
Период полураспада изотопа	Co-60 - 5.27 лет
Диапазон толщин контролируемого металла (сталь), мм	30-200
Перемещение источника по ампулопроводу:	
• по горизонтали, м	16
• по вертикали, м	4
Гарантийный период	1 год
Габаритные размеры радиационной головки (не более), мм, ДхВхШ	615x315x385
Масса радиационной головки (не более), кг	350
Материал биологической защиты	Обеднённый уран

**ИСТОЧНИКИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ  
РАДИОНУКЛИДОВ  
ИРИДИЯ-192 И СЕЛЕНА-75**

**Селен-75**

Тип источника	Номинальная активность радионуклида в источнике, Ки
ГС75М11.20	10
ГС75М11.40	20
ГС75М11.90	60
ГС75М11.140	80
ГС75М13.40	20
ГС75М15.90	60
ГС75М15.140	80

**Иридий-192**

Тип источника	Номинальная активность радионуклида в источнике, Ки
ГИ192М34.3	20,0
ГИ192М53	20,0
ГИ192М54	30,0
ГИ192М34.4	35,0
ГИ192М54	45,0
ГИ192М55	65,0
ГИ192М55	75,0
ГИ192М56	85,0
ГИ192М31.6	100,0
ГИ192М34.6	110,0
ГИ192М56	105,0
ГИ192М56	125,0
ГИ192М57	150,0
ГИ192М34.7	165,0
ГИ192М33.7	165,0
ГИ192М57	165,0
ГИ192М64	165,0
ГИ192М58	300,0
ГИИД-1	1,4
ГИИД-2	8,0
ГИИД-3	22,0
ГИИД-4	48,5
ГИИД-5	146,5
ГИИД-6	390,0



**2.6.1. ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ.  
РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ  
ГИГИЕНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ЗАКРЫТЫХ РАДИОНУКЛИДНЫХ  
ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
САНИТАРНЫЕ ПРАВИЛА И НОРМЫ  
СанПиН 2.6.1.1202-03  
МИНЗДРАВ РОССИИ  
МОСКВА - 2003**

**Постановление Главного государственного санитарного врача  
Российской Федерации от 28.01.2021 № 2 "Об утверждении  
санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические  
нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или)  
безвредности для человека факторов среды обитания"  
(Зарегистрирован 29.01.2021 № 62296)**

## Малоуглового рассеяние рентгеновского излучения (МУРР)

Новых промышленных материалов и процессов на основе ключевых технологий в наноразмерных-области ( $10^{-9}$  м). Фармацевтические препараты, косметические средства, функциональные продукты питания, интеллектуальные полимеры, интеллектуальные поверхностные покрытия, сенсорика и диагностика обеспечат пользу в области нанонауки.

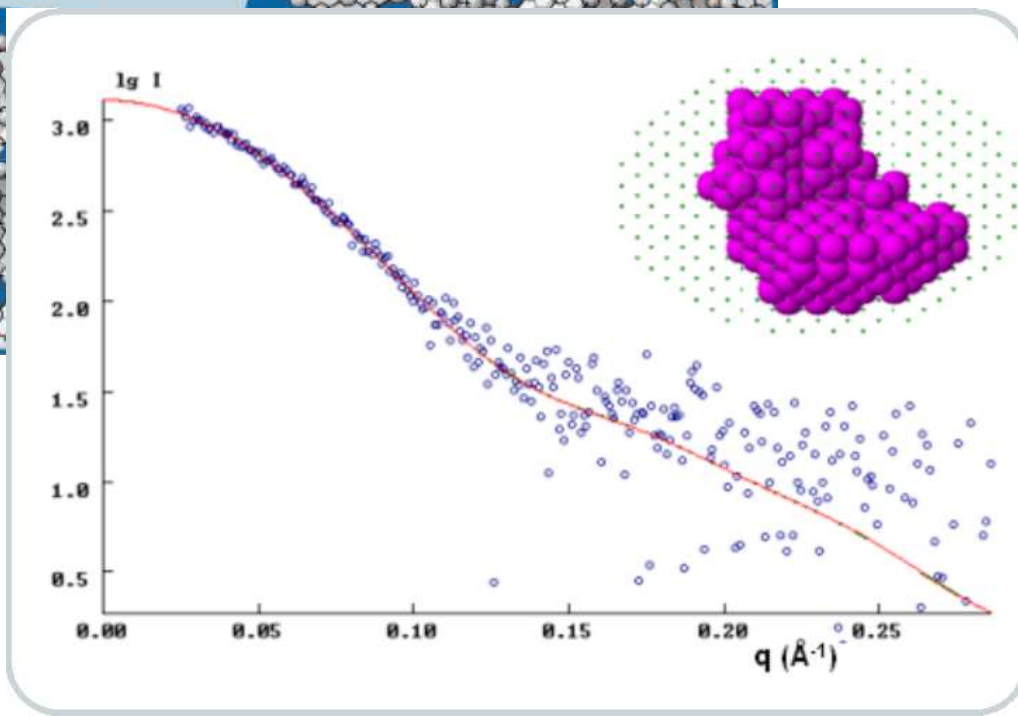
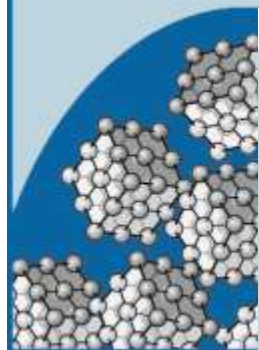
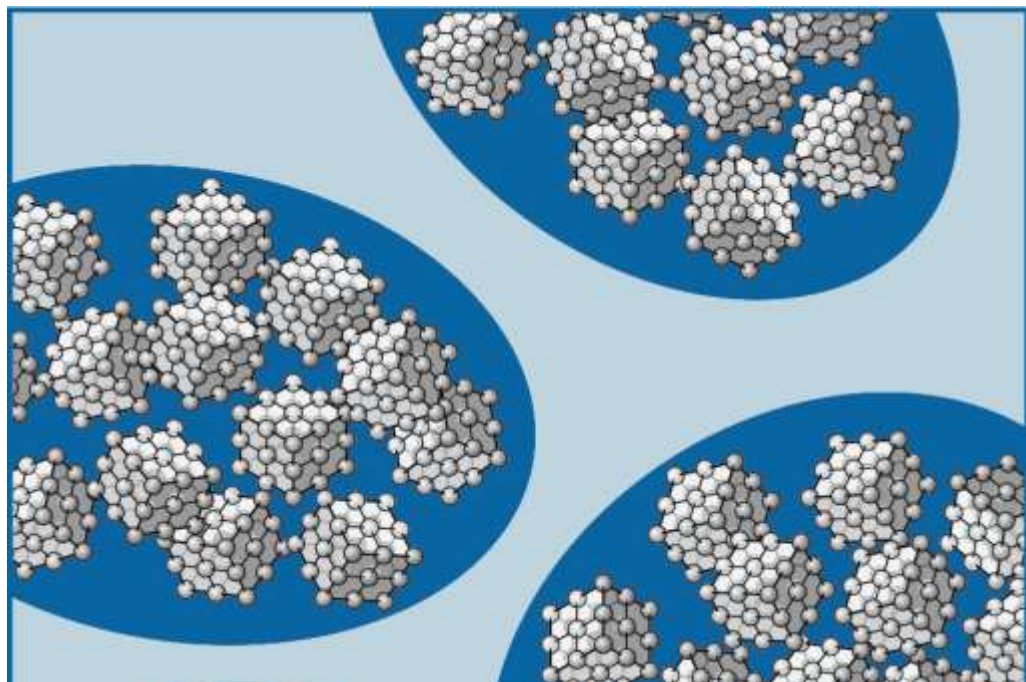
Размеры, измеренные методом малоуглового рентгеновского рассеяния.

Способность визуализировать структуры в области нанонауки и нанотехнологий, так как видимый свет микроскопия не предоставляет информацию в этом масштабе.

МУРР или GISAXS инструменты наноскопии, получая информацию в диапазоне от 1 нм до 0,1. мкм, не только по размерам, наночастиц, распределений, формы, но и структурной динамики из большого множества материалов, таких как жидкие кристаллы, характеристики поверхности, порошки, объемных образцов и тонких пленок.

МУРР в сочетании с белковой кристаллографией и ядерным магнитным резонансом (ЯМР) играют важную роль в предоставлении сложных биологических наносистем. К примеру, большинство современных исследования белков, мембран или крупных биофункциональных комплексов уже используют этот мощный гибридный "аналитический подход".

- Высокочувствительные детекторы и мощные микрофокусные рентгеновские источники.



Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) является одним из наиболее востребованных аналитических методов элементного анализа. Независимо от типа пробы, измеряются ли жидкости, порошки или твердые пробы, РФА сочетает высокую точность с простой и быстрой пробоподготовкой.

Рентгенофлуоресцентные спектрометры позволяют измерять весь элементный диапазон от бериллия (Be) до урана (U) в концентрациях от единиц ppm до 100%. Волнодисперсионная рентгенофлуоресцентная спектрометрия (ВДРФА) является наиболее точным, воспроизводимым и надежным методом.

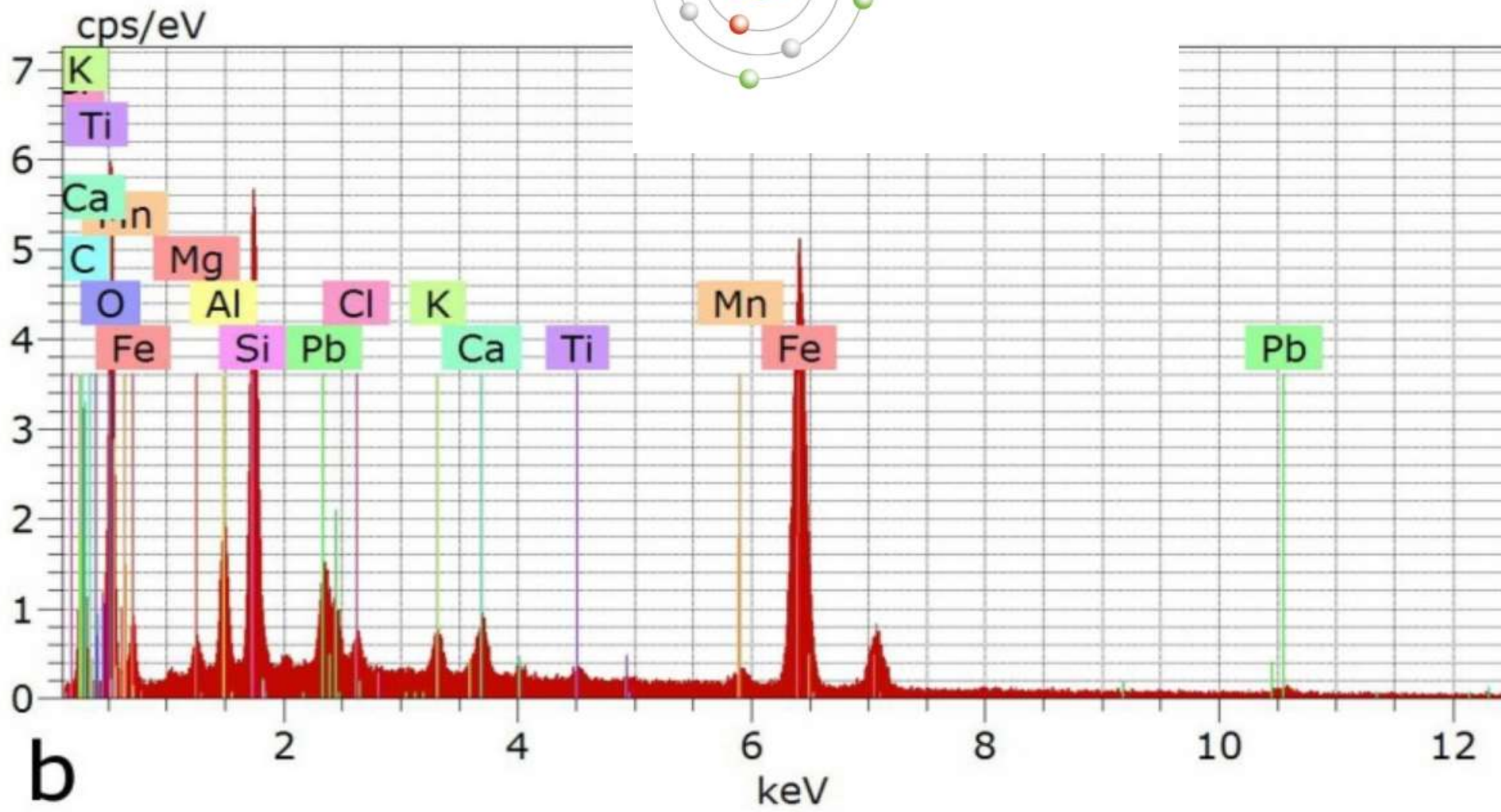
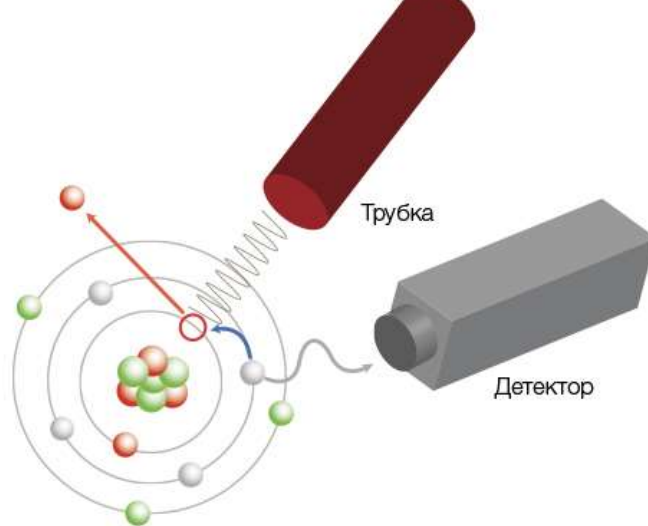
Волнодисперсионные системы применяются в таких отраслях как производство цемента, полимеров, нефтепереработка, горное дело и геология, в производстве промышленных минералов.



Рентгенофлуоресцентный анализ с полным внешним отражением (РФА ПВО). Метод позволяет исследовать микроколичества вещества с уровнем измеряемых концентраций от миллиардных долей до 100% в медицине, экологии, криминалистике, фармакологии, при производстве продуктов питания.



синхронный волнодисперсионный рентгенофлуоресцентный (ВДРФА) спектрометр S8 LION позволяет за максимально короткое время получать результаты для управления производством и контроля качества в цементной, минералодобывающей и горнодобывающей промышленности.

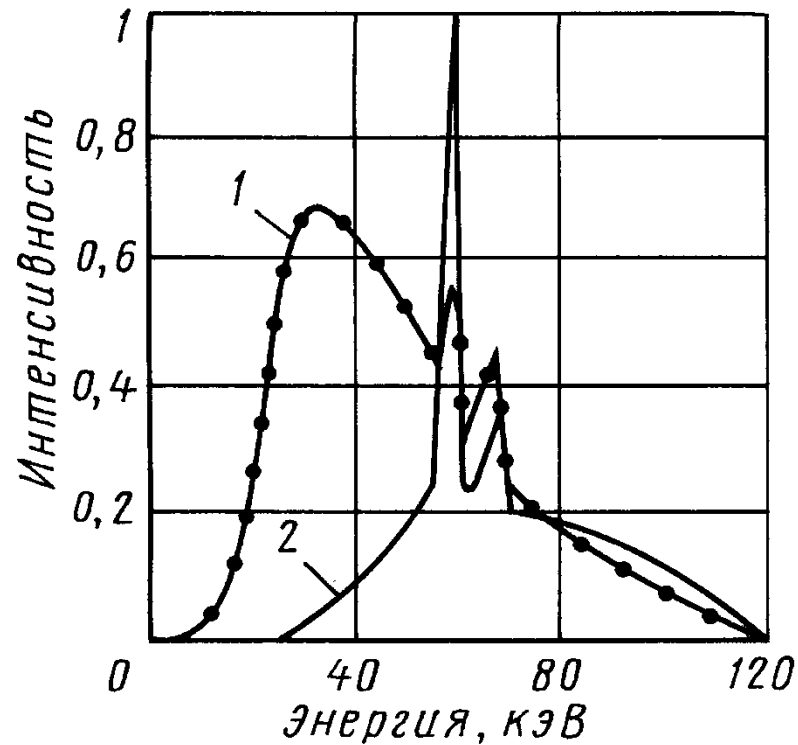
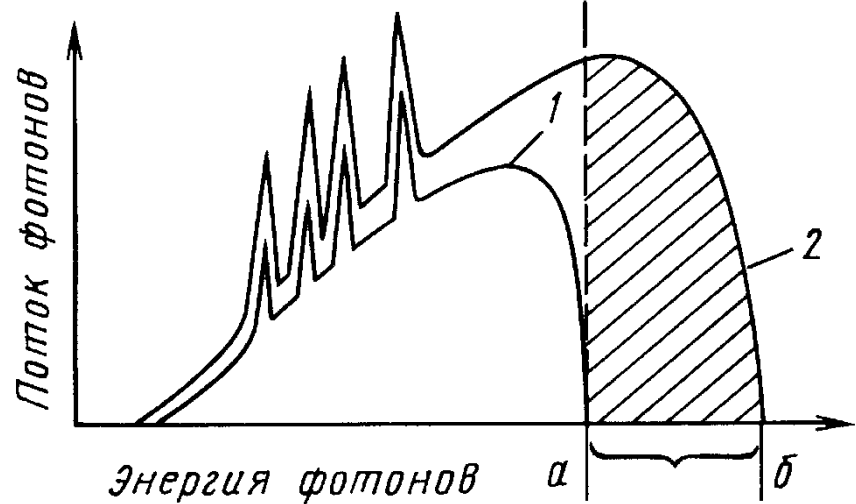
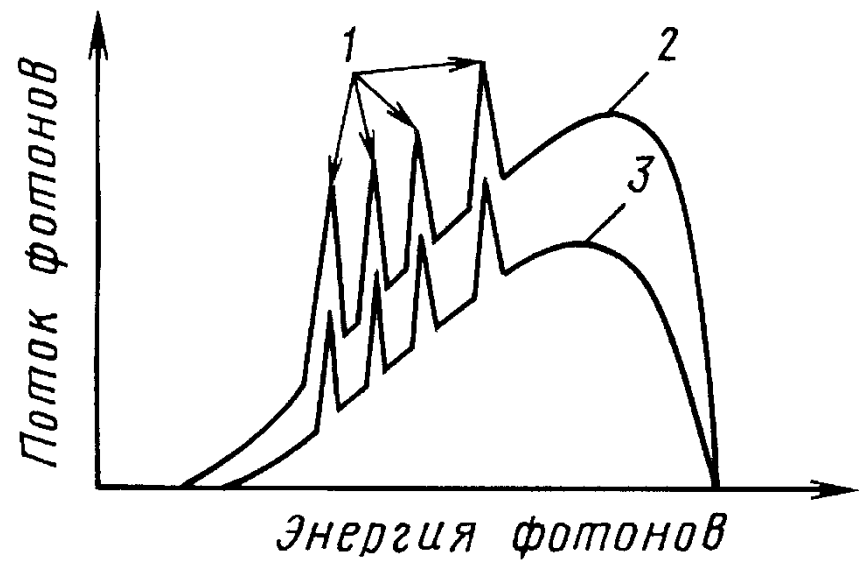
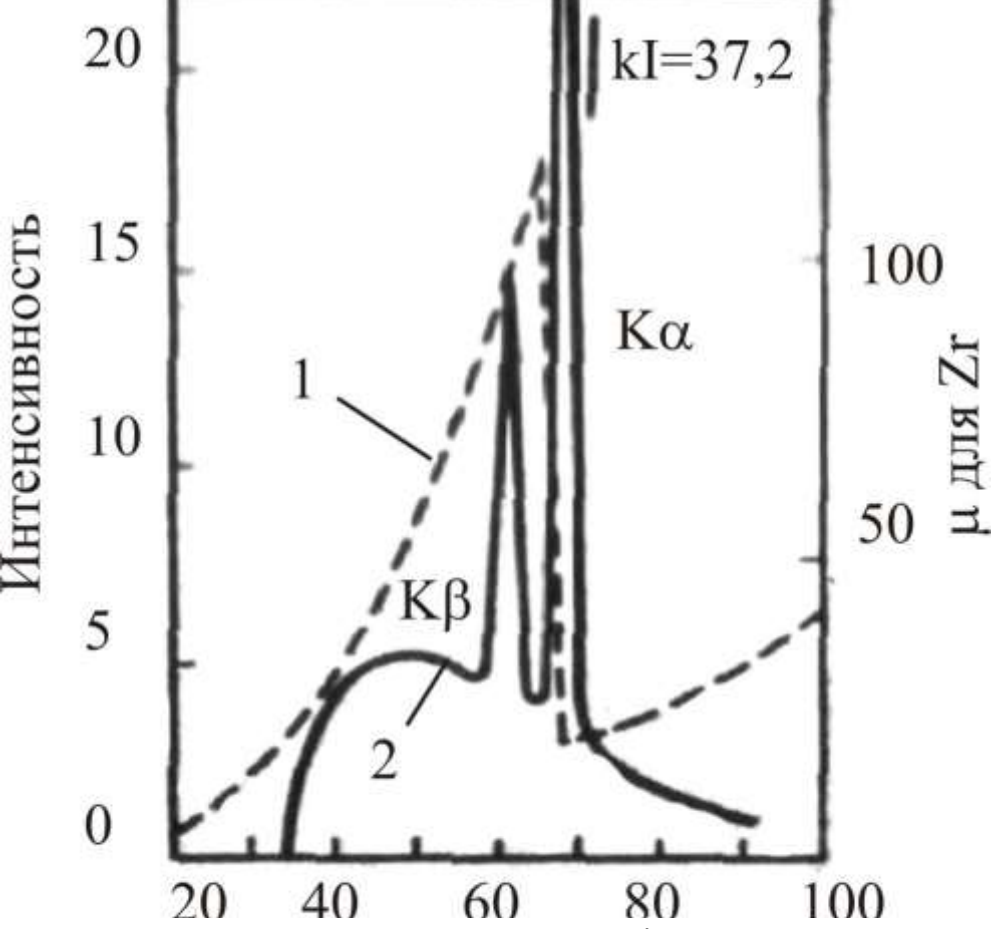


Частота  $\nu$  характеристического рентгеновского излучения атома химического элемента и его атомный номер  $Z$  связаны между собой зависимостью:  $\nu = Z^2/n^2$

где  $n$ -главное квантовое число.

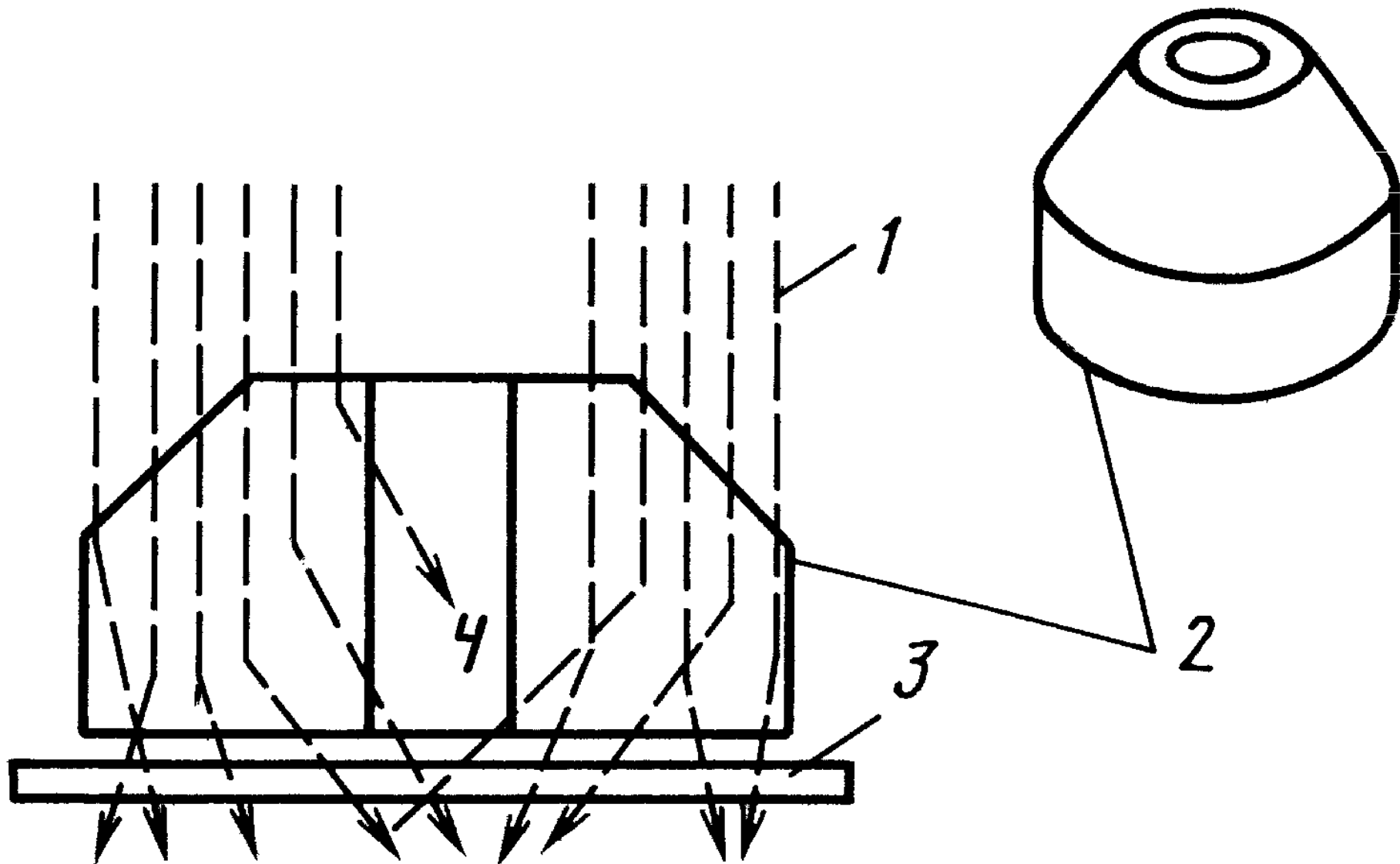
Это соотношение является выражением закона Мозли: частота рентгеновской линии пропорциональна квадрату атомного номера элемента.

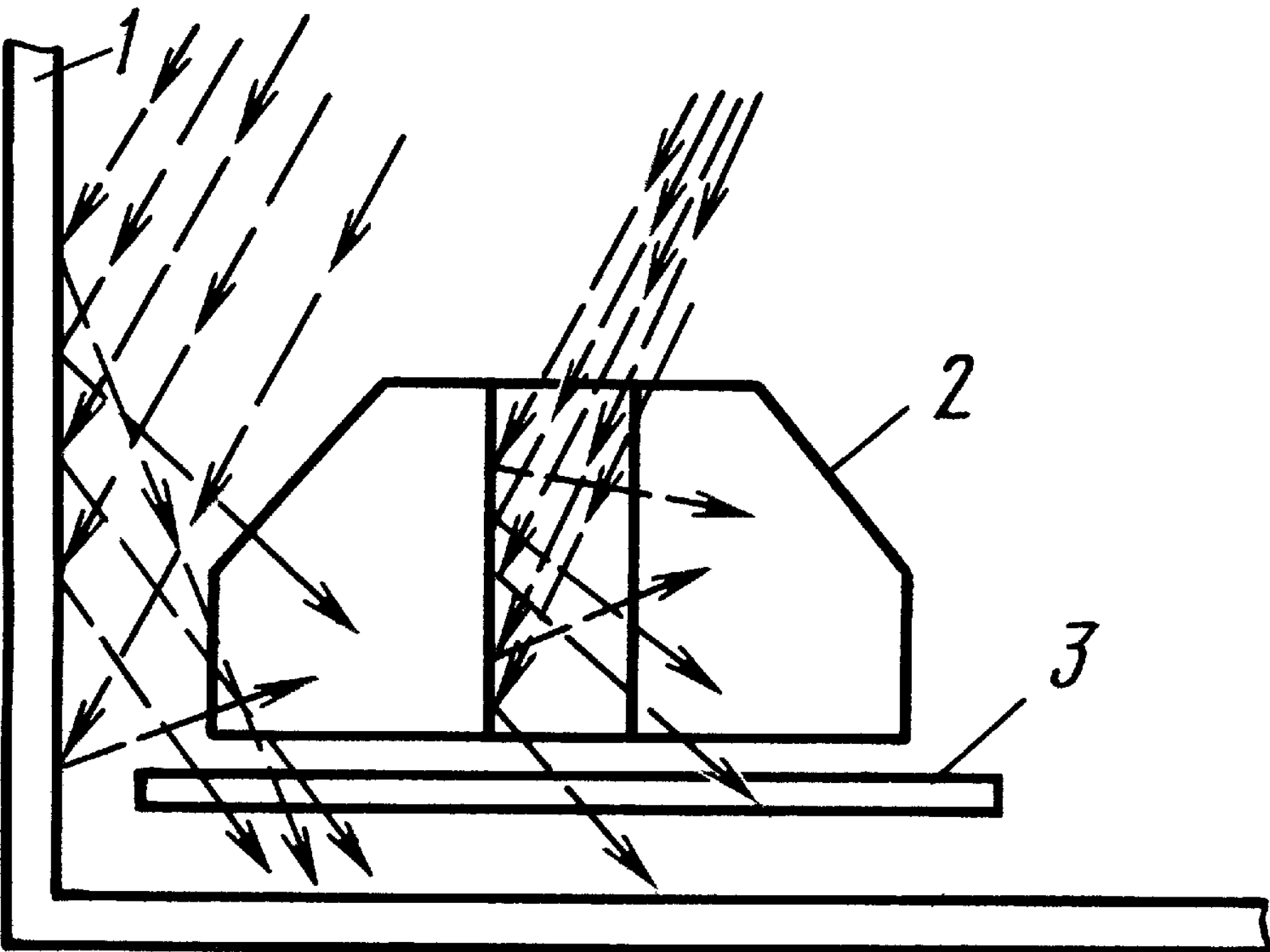
Закон Мозли лежит в основе качественного определения элементов. Установив экспериментально длину волн рентгеновского излучения, можно рассчитать атомные номера элементов, входящих в пробу. Закон Мозли позволяет предсказывать положение линий в рентгеновском спектре, что было использовано при открытии элементов.

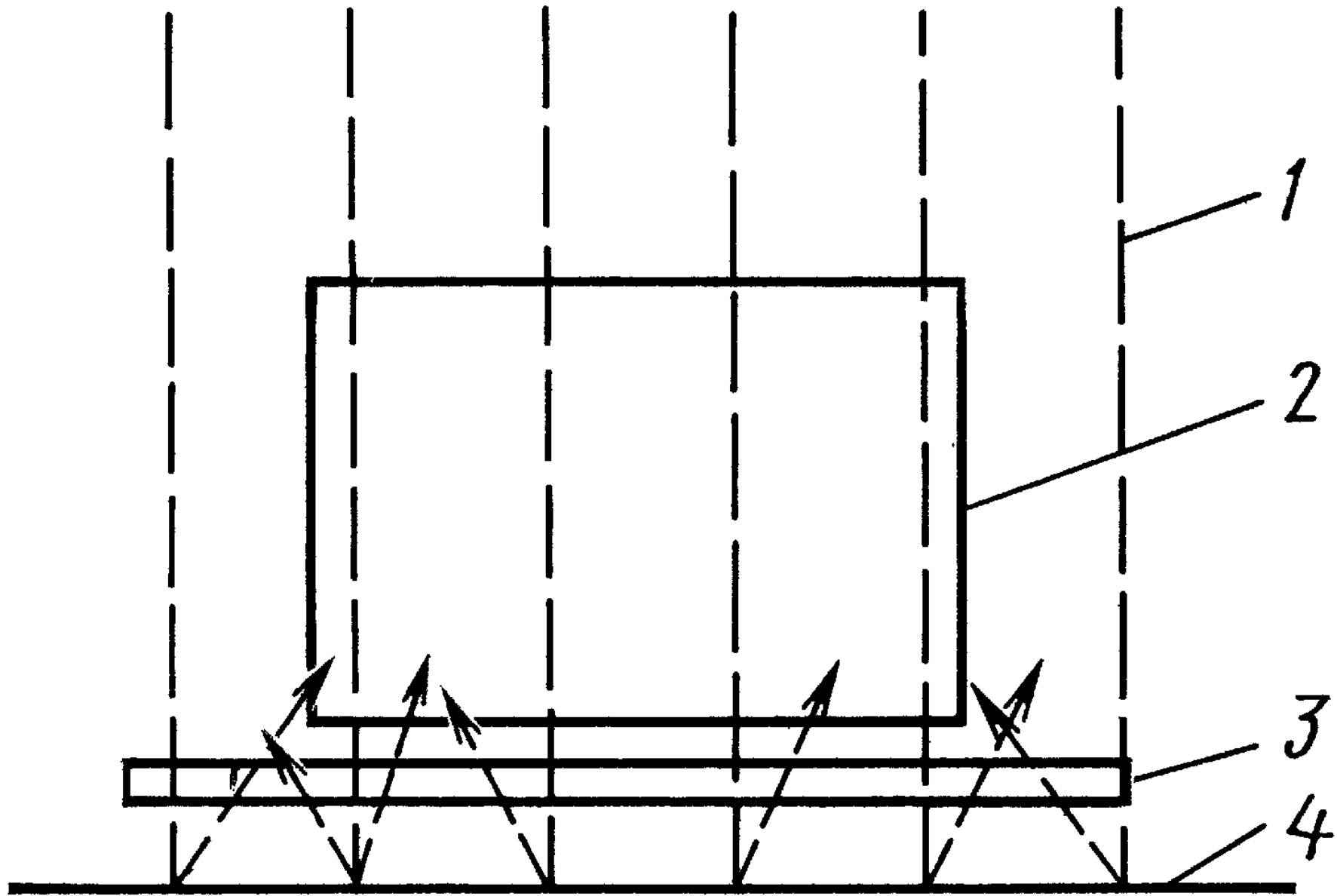




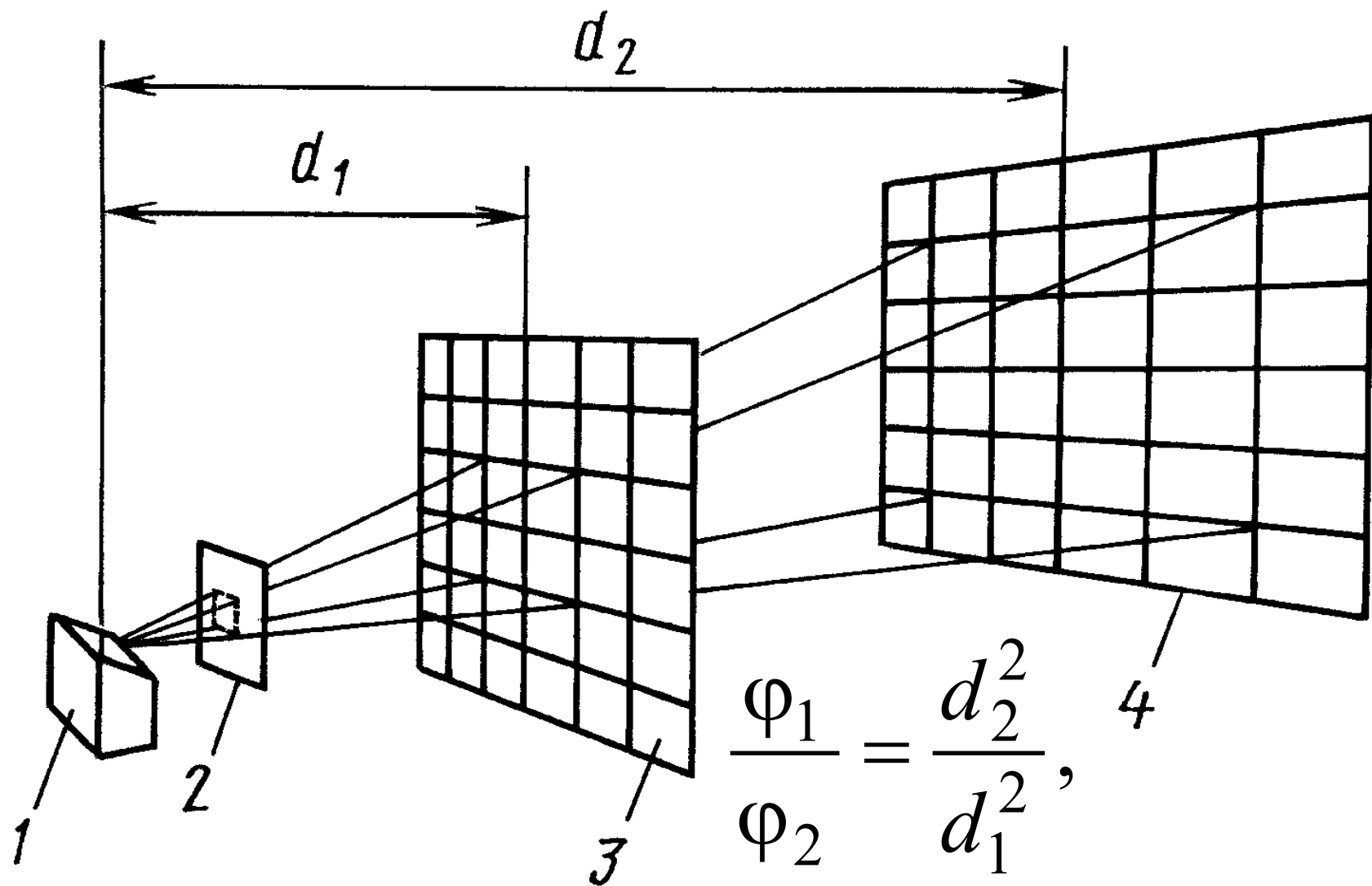
# Рассеянное излучение







# Закон обратных квадратов



1 – анод; 2 – диафрагма; 3 – плоскость I; 4 – плоскость II

# Проекционное увеличение при радиационном контроле

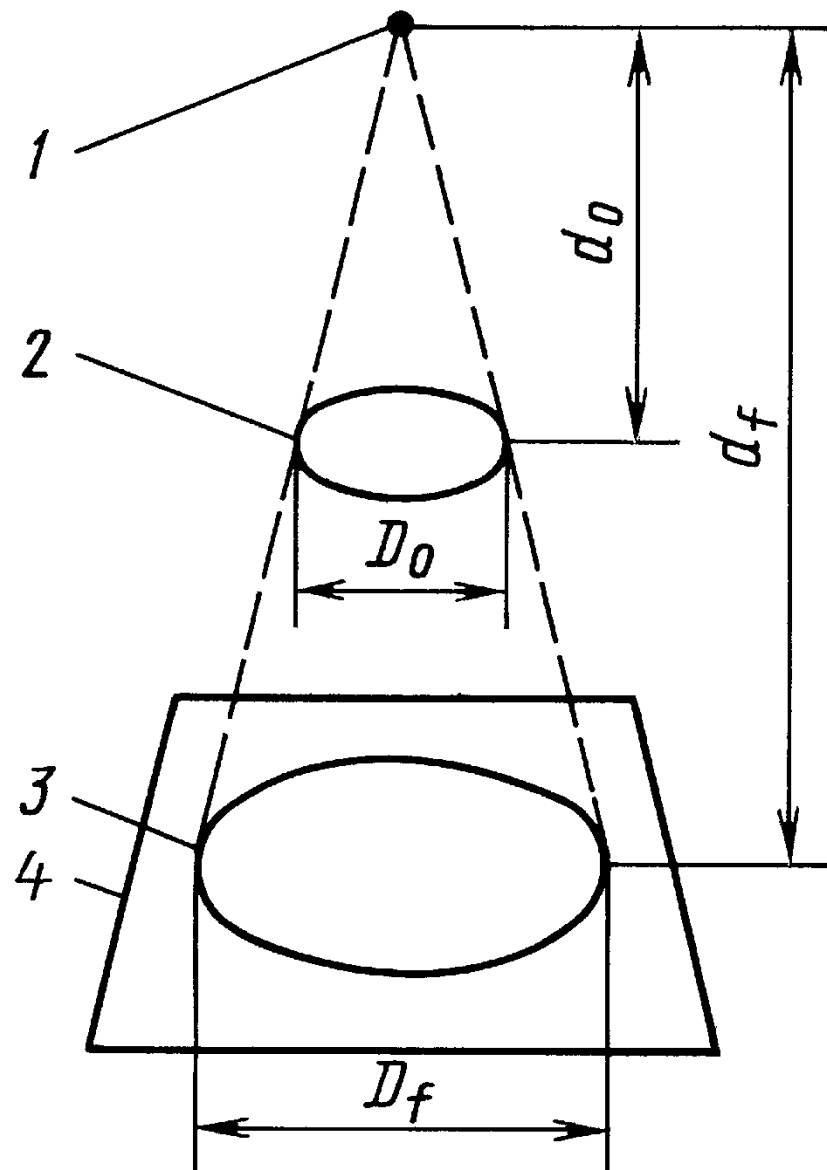
$$M = \frac{D_f}{D_0} = \frac{d_f}{d_0}.$$

1 – точечный источник излучения;

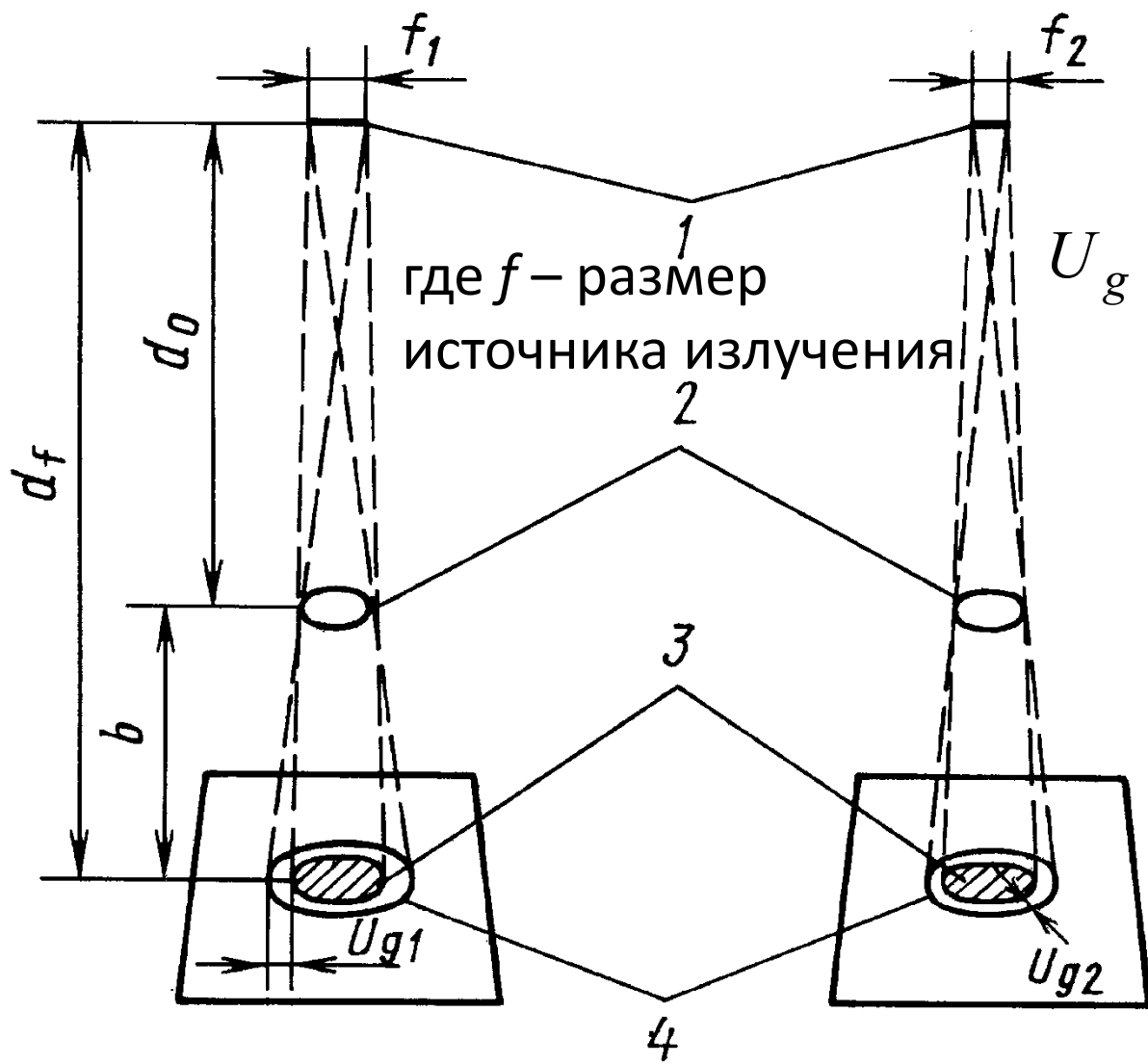
2 – элемент ОК;

3 – элемент теневого изображения;

4 – радиационный преобразователь



# Геометрическая нерезкость радиационного изображения

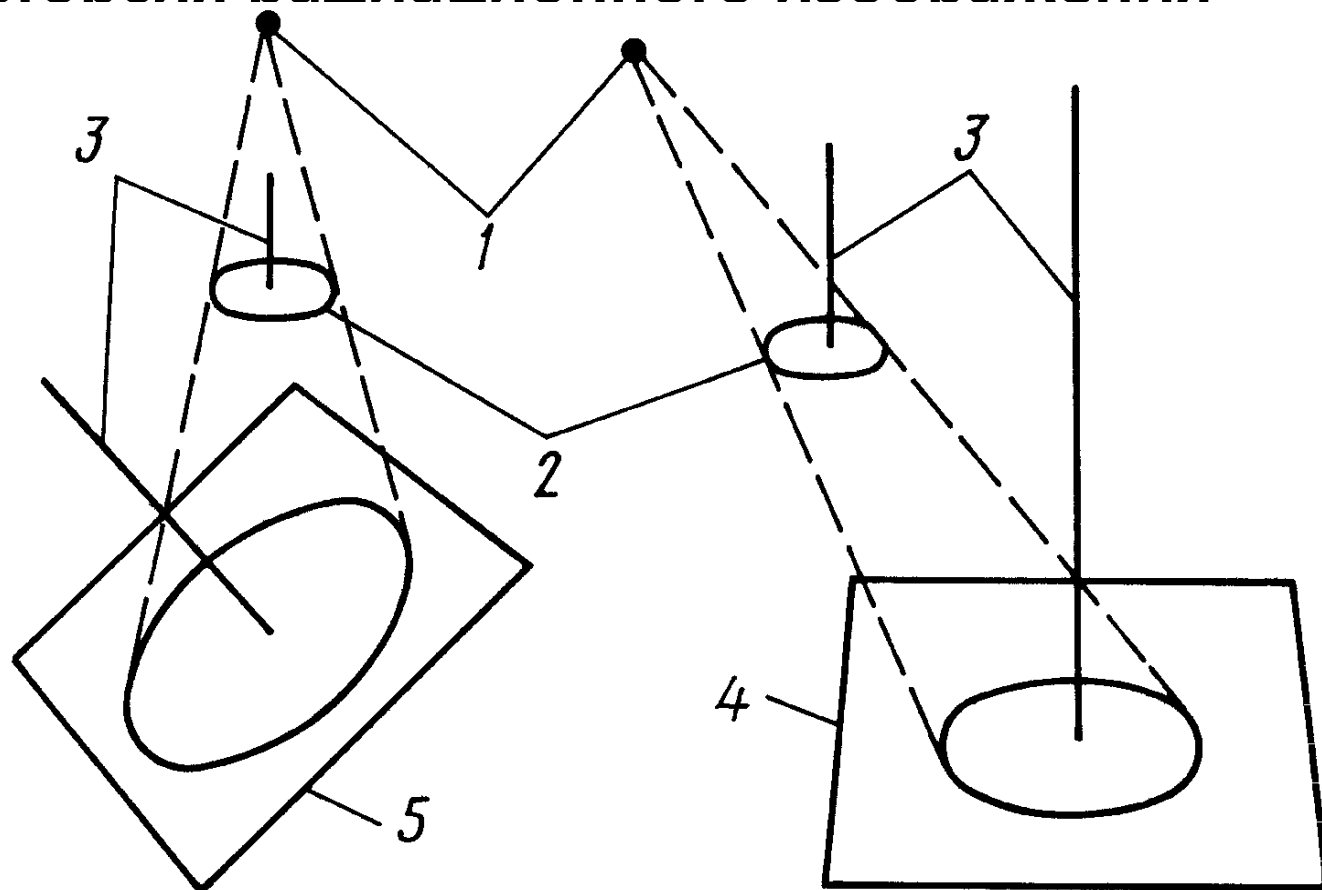


$$U_g = f \left( \frac{d_f}{d_0} - 1 \right);$$

$$U_g = fb / d_0 = fb / (d_f - b),$$

- 1 – источники излучения ( $f_1 > f_2$ );
- 2 – ОК;
- 3 – области тени радиационных изображений;
- 4 – области полутени радиационных изображений геометрической нерезкости  $U_{g1} > U_{g2}$

# Дисторсия радиационного изображения



- 1 – точечные источники излучений;  
2 – элементы ОК; 3 – перпендикуляры к плоскостям элемента ОК и радиационного изображения; 4 – плоскость радиационного изображения, параллельная плоскости элемента ОК;  
5 – плоскость радиационного изображения, размещенная под углом к плоскости элемента ОК

# Сигнал и шум радиационного изображения

для теневого радиационного изображения ОК в виде пластины с дефектом в полости размером  $\varepsilon$  под сигналом понимают среднее число первичных фотонов, прошедших ОК, на площадке размером  $\varepsilon^2$ , т.е.  $N_{\text{сигн}} = F_N \varepsilon^2$ , где  $F_N$  – перенос фотонов, а шумом  $N_{\text{ш}} = \sqrt{N_{\text{сигн}}}$ .

Если учитывать шум рассеянного излучения,

$$\text{ОСШ} = \mu\varepsilon \sqrt{N_{\text{сигн}} / \chi}$$

где  $\chi$  – коэффициент накопления.



## **Неоптимальные условия, которые следует избегать:**

Низкие экспозиционные дозы от рентгеновского или гамма-источника приводят к малым CNR. CNR возрастает нелинейно с увеличением экспозиции (мА·с или ГБк·мин) до максимального достижимого значения из-за структурного шума (шума с фиксированной текстурой) применяемых детекторов.

Запоминающие пластины (IP) генерируют шумы изображения из-за внутренней структуры кристаллов, чувствительной к излучению, и шероховатости поверхности. Для высококачественной радиографии рекомендуется выбирать запоминающие пластины (IP) с низким структурным шумом (мелкозернистого типа). Изготовителю рекомендуется представить информацию о максимальном достигаемом систем сканер-IP.

Матричные цифровые детекторы (DDA) генерируют шум вследствие различных свойств детекторных элементов. Они могут быть выровнены с помощью процедуры настройки. Современные методы настройки позволяют достичь очень высокие значения SNR. Термические и другие эффекты, а также ограниченное время экспозиции при получении настроечных изображений, ограничивают эффективность настройки, и небольшой остаточный шум с фиксированной текстурой сохраняется.

Шумы генерируются некоторыми материалами, такими как высоконикелевые сплавы или материалы с шероховатой поверхностью. Шум может затруднить видимость мелких дефектов и даже уменьшить показание IQI.

Обратно-рассеянное излучение вносит существенный вклад в значения градации серого в изображениях и в шум. Поскольку обычно это не способствует контрасту радиографического изображения (CNR), видимость IQI снижается.

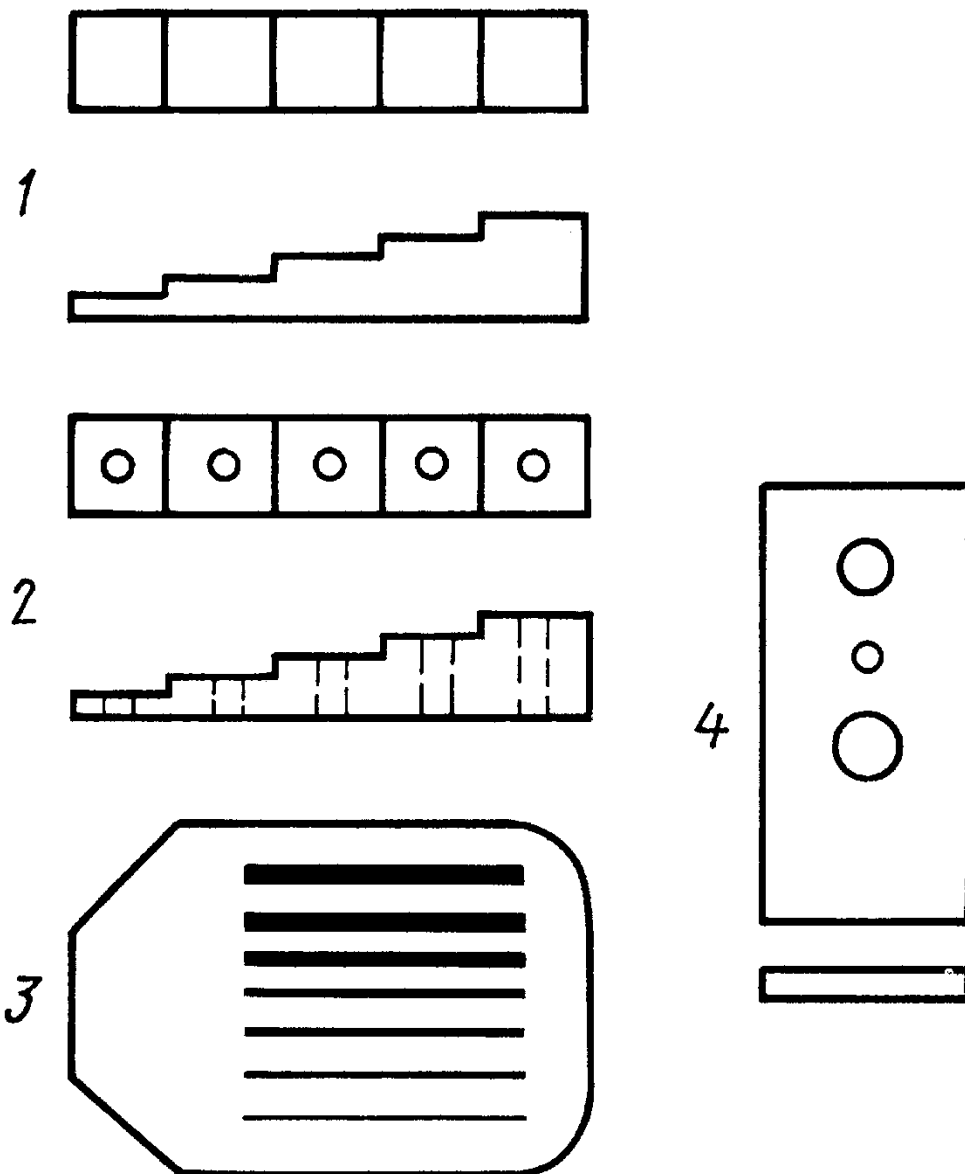
При слишком высокой энергии излучения получается низкий контраст при постоянном уровне шума (для того же значения градации серого). Из-за этого уменьшается CNR и, следовательно, видимость IQI. Это может быть скомпенсировано увеличением требуемого значения градации серого или уменьшением напряжения на рентгеновской трубке, как при пленочной радиографии (CPI).

# Чувствительность радиационного контроля

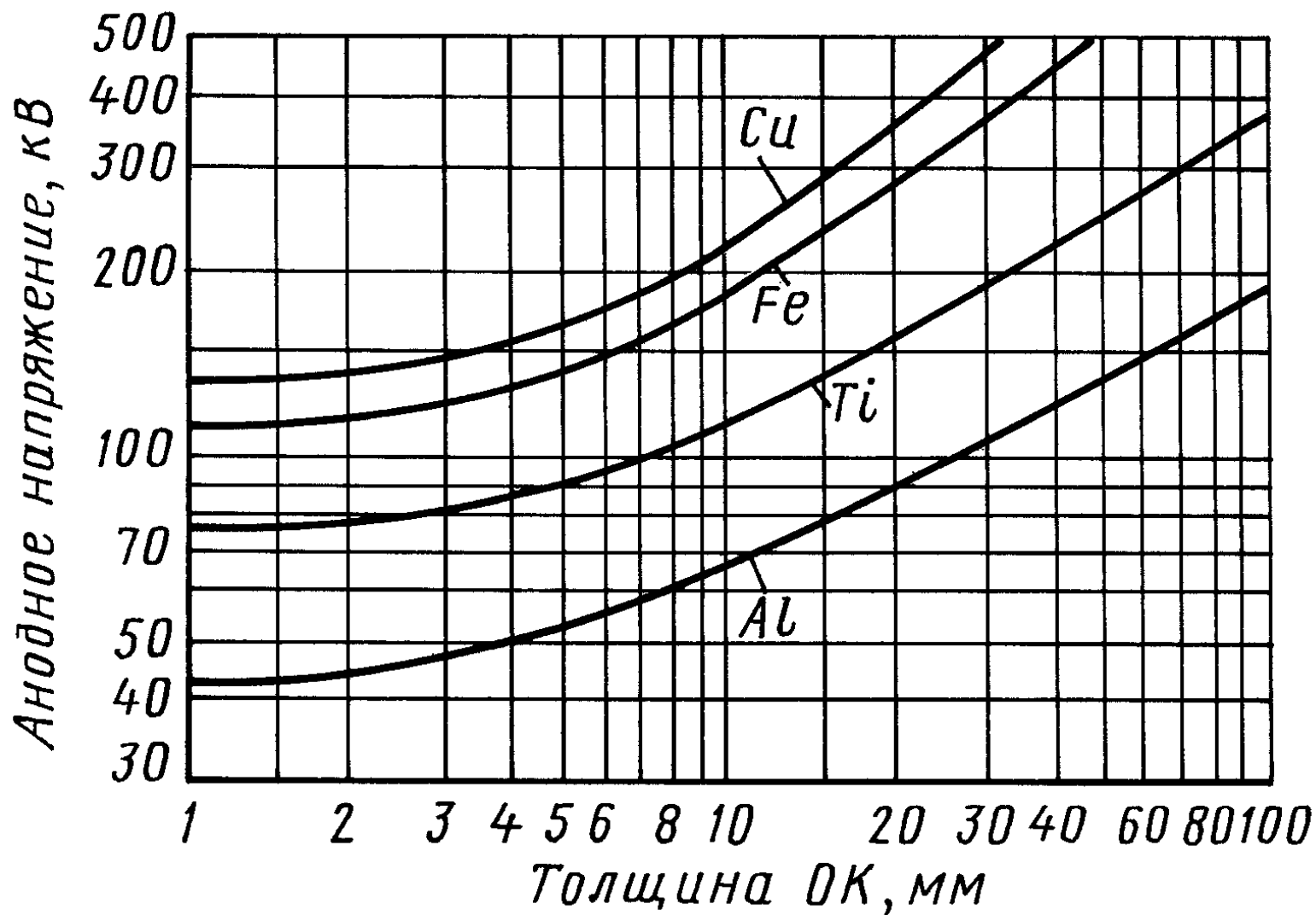
В практике радиационного контроля для оценки качества снимков используют эталоны чувствительности

- 1 – ступенчатый;
- 2 – ступенчато-дырочный;
- 3 – проволочный;
- 4 – пластинчатый

Абсолютная чувствительность радиационного контроля должна соответствовать требованиям технической документации на ОК.



# ВЫБОР ЭНЕРГИИ ИСТОЧНИКОВ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ



# Область применения РК

**Тип источника  
излучения**

**Толщина  $x$  ОК, мм**

**Yb 169**

**$5 \leq x \leq 15$**

**Ir 192**

**$20 \leq x \leq 100$**

**Co 60**

**$60 \leq x \leq 150$**

**Ускорители на энергию**

**1 ... 4 МэВ**

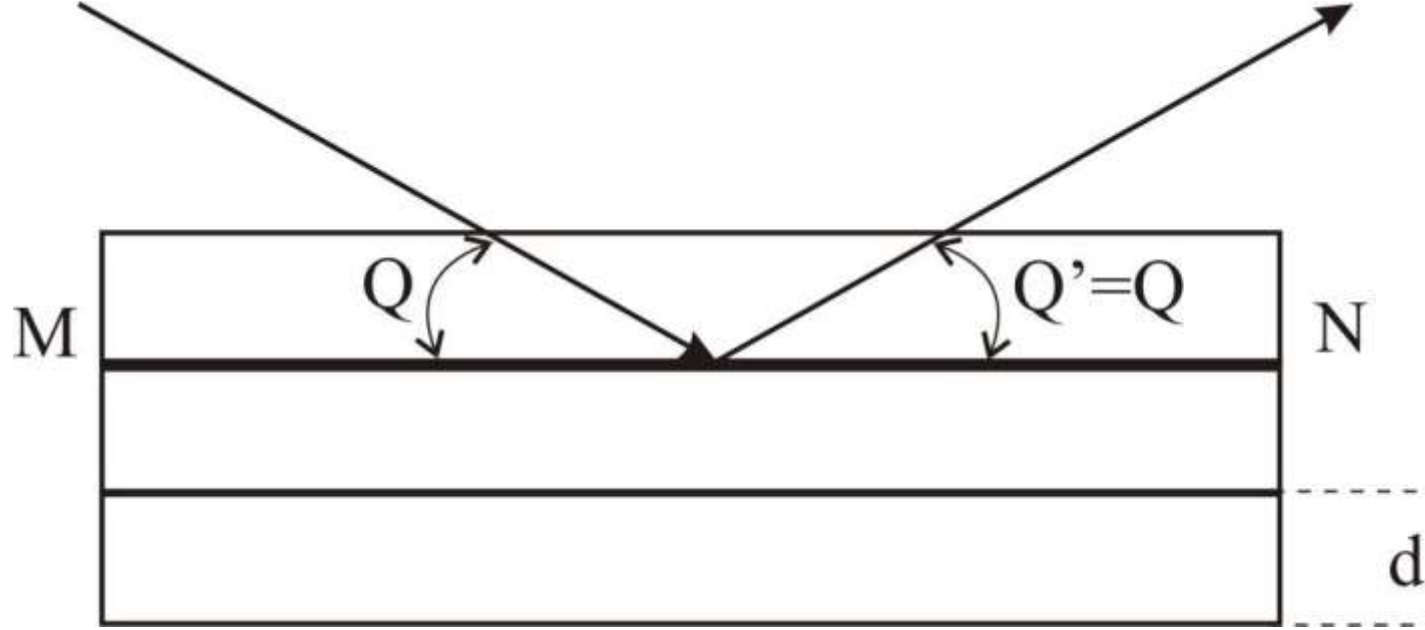
**$50 \leq x \leq 180$**

**4 ... 12 МэВ**

**$x \geq 80$**

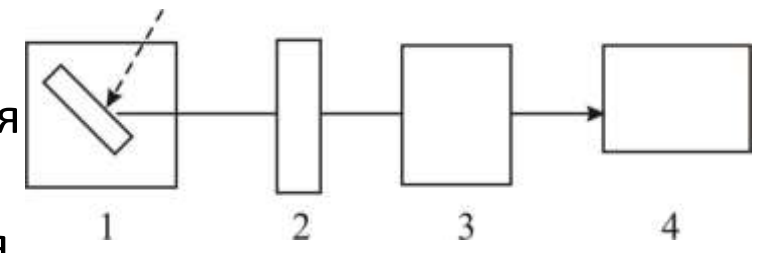
**выше 12 МэВ**

**$x \geq 100$**

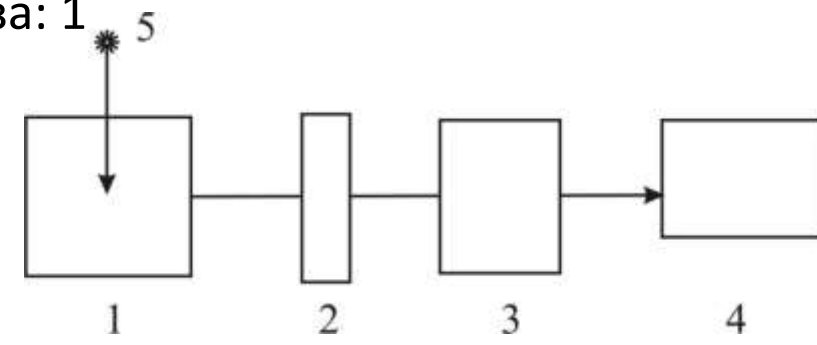


В спектре молибдена его линия  $K\alpha$  может быть выделена практически без ослабления и искажения с помощью фильтра из циркония, поглощающего большую часть тормозного излучения, а также линию  $K\beta$  испускания молибдена. Принцип действия анализатора, который разлагает полихроматическое рентгеновское излучение, выделяющее из излучения характеристические линии или разлагающее его в спектр в монохроматические составляющие.

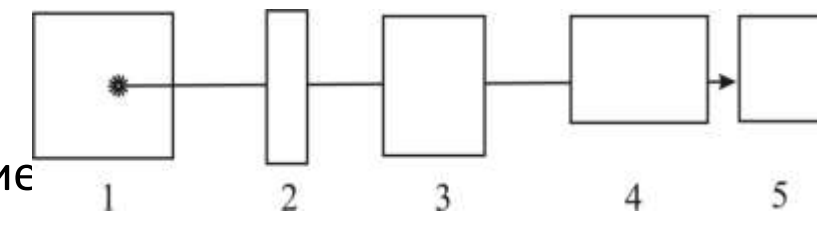
Частоты рентгеновских квантов соответствуют краям поглощения схема для проведения **рентгеноэмиссионного** анализа: 1 – рентгеновская трубка; 2 – анализатор излучения; 3 – приемник излучения; 4 – измерительный прибор. Схема для проведения **рентгенофлуоресцентного** анализа: 1 – анализируемая проба; 2 –



– анализируемая проба; 2 – спектральный прибор (анализатор); 3 – приемник излучения; 4 – прибор для измерения интенсивности аналитических линий; 5 – источник рентгеновского излучения; Возбужденное в пробе вторичное рентгеновское излучение направляется на анализатор спектра, отделяющий аналитические линии, которые регистрируются и исследуются, как и в случае первичных спектров.



В отличие от анализа по первичным спектрам при флуоресцентном анализе проба, являющаяся излучателем вторичного спектра, и источник возбуждающего излучения отделены друг от друга.



1 – источник рентгеновского излучения; 2 – анализируемая проба; 3 – анализатор; 4 – приемник излучения; 5 – измерительный прибор

Схема **рентгеноабсорбционного** анализа:

Кристаллография - дифракции рентгеновских лучей в монокристаллах





Рентгеновская рефлектометрия в настоящее время широко используется в исследованиях и на производстве для измерения параметров тонких пленок:

- толщина, шероховатость супер-гладких поверхностей,
- период многослойных нано структур и поверхностного слоя
- плотность

Разработчик - Физический институт П.Н. Лебедева

Из-за своих уникальных характеристик обеспечивает одновременные измерение нескольких спектральных линий. Прибор специально предназначен для диагностики тонких пленок.

Но благодаря гибкой схеме он также может обеспечить все стандартные методы рентгеновского анализа.



рентгеновская трубка с  
линейной проекцией  
фокуса – 20 мкм  
диапазон регулирования  
высокого напряжения 10 -  
45 кВ с шагом 0.1 кэВ

- **CompleXRay-C6**
- Рентгеновская  
аналитическая система

сцинтилляционные – 2 шт (опция 3 шт)  
энергодисперсионный кремниевый – 1 шт



## **Основные режимы работы и контролируемые параметры:**

- **Рефлектометр**
- **Дифрактометр**
- **Флуоресцентный рентгеновский анализатор**
- **Рефрактометрия**
- **рассеяние на малые углы**
- **абсорбционный рентгеновский спектрометр**
- **Поверхностные и интерфейс шероховатости (до 0,05 нм)**
- **Толщина слоя (1-300 нм)**
- **Период структуры (0,1 нм)**
- **поверхностная плотность слоя**
- **Радиус и концентрация наночастиц**
- **Состав слоев**
- **Радиус кривизны (до 300 м)**
- **Период послойной структуры**

- Угломер системы:
- минимальный шаг (угол) -  $0,0002^\circ$  (0,7")
- диапазон поворота  $145^\circ$  (2 оси детектора)  
+ (Ось образца  $360^\circ$ ) + образец линейно движется с 1,25 мкм шагом, диапазон 100 мм
- Максимальный размер образца - 200 мм
- Диапазон напряжения 10 - 45 кВ
- Мощность - 300 Вт (500 Вт опция)
- Стабильность мощности - 0,01%
- Система охлаждения закрытого типа на дистиллированной воде



## Переносной рентгеновский аппарат РАПАН 400/200 с постоянным напряжением

Максимальная мощность на аноде рентгеновской трубки, Вт	200
Выход излучения	боковой, 70° × 40°
Фокусное пятно, мм	Ø1,5
Максимальная толщина просвечиваемой стали на пленку (F = 700 мм, экспозиция - 10 мин., плотность почернения - 2), мм:	
- на пленку D7 Agfa Structurix с Pb-экранами 0,027 мм	55
- на пленку F8 с рентгенофлуоресцентными экранами (F8+RCF)	85
Условия эксплуатации:	
- температура окружающего воздуха, °С	от -40 до +40
- влажность, %	до 95
Максимальная длительность экспозиции, мин	15
Продолжительность непрерывной работы на максимальной мощности при температуре окружающей среды до +40 °С	без ограничений
Питание	сеть 220 В, 50 Гц
Потребляемая мощность, Вт, не более	500

Напряжение рентгеновской трубки  
(постоянное стабилизированное),  
кВ

140, 150

Максимальная мощность на аноде  
рентгеновской трубки, Вт

140

Фокусное пятно, мм

Ø0,8

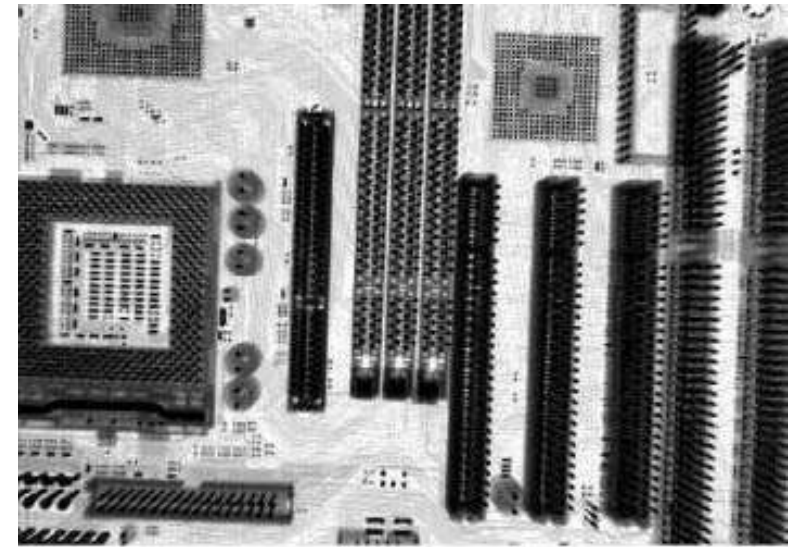
Выход излучения

боковой, 80° × 40°

Пульсация рентгеновского  
излучения, %

не более 0,5

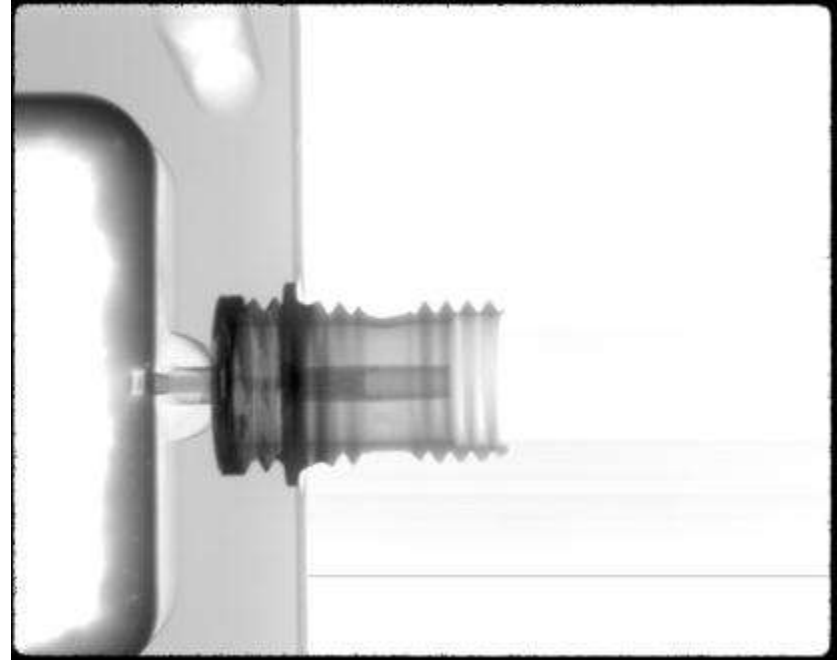




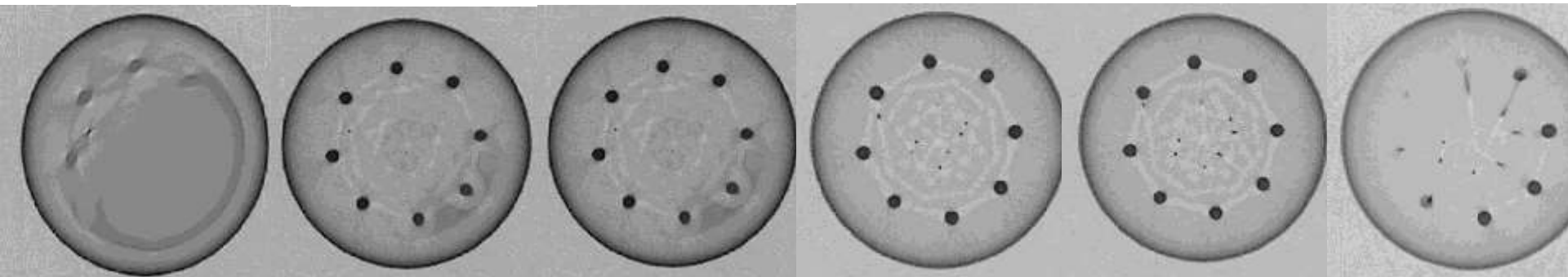
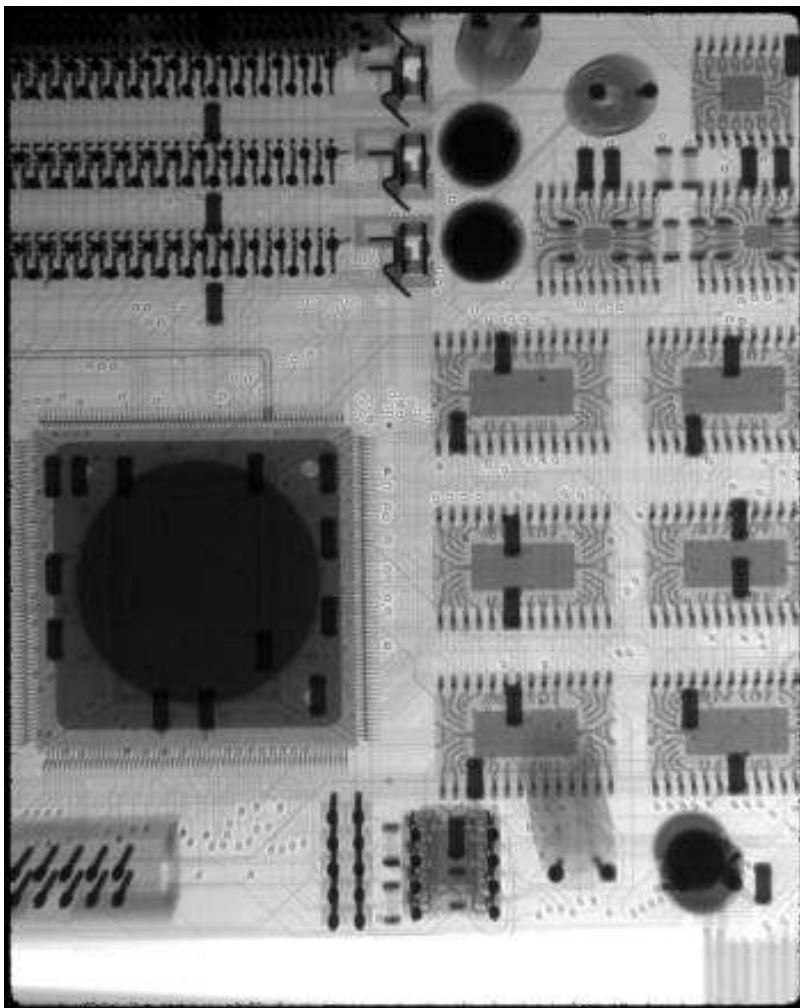
## Орел

- Стационарная установка ОРЕЛ предназначена для технологического контроля микроэлектронных изделий и позволяет выявлять основные виды дефектов и изменения в конструкции электронных блоков. Фокус 10 мкм, макс – 18 мм Fe, 20 – 150 кВ
- **Калан-4/130**
- Комплекс предназначен для неразрушающего радиографического контроля изделий различной формы и конструкции. Наличие двух излучателей прострельного и панорамного типа позволяет оптимизировать режим контроля для деталей различных форм. Для удобства позиционирования рентгеновские излучатели имеют возможность вертикального перемещения...

*Рентгеновский томограф «Орел»*



Послойные изображения  
операционного усилителя





**Рентгеновские излучатели «Т-50» и «Т-50П»**  
для близкофокусной терапии при лечении  
непосредственно доступных форм раковых  
опухолей для аппаратов близкофокусной  
терапии «PAPILLON-50».

Установка для локального рентгеновского  
облучения.

Рентгеновский излучатель постоянного  
потенциала.

$U_a = 50$  кВ,  $I_a = 3$  мА, время облучения - 45  
сек

угол диаграммы излучения - 310 градусов.

Диаметр фокусного пятна - 4 мм.



**Трубка с вынесенным анодом**  
длиной 230 мм с жидкостным  
охлаждением.  
Мощность 150 Вт,  
Диаметр вынесенного анода с  
интегрированной системой  
охлаждения - 16 мм,  
Магнитная корректировка  
положения фокусного пятна.  
При использовании с фильтром,  
позволяет имитировать  
источник Ir-192.



# Единицы радиоактивности

В. Рентген – немецкий физик

$$\text{Рентген} = 1 \text{ [Р]} = 1 \text{ [R]}$$

Л.Грей – английский физик и радиобиолог

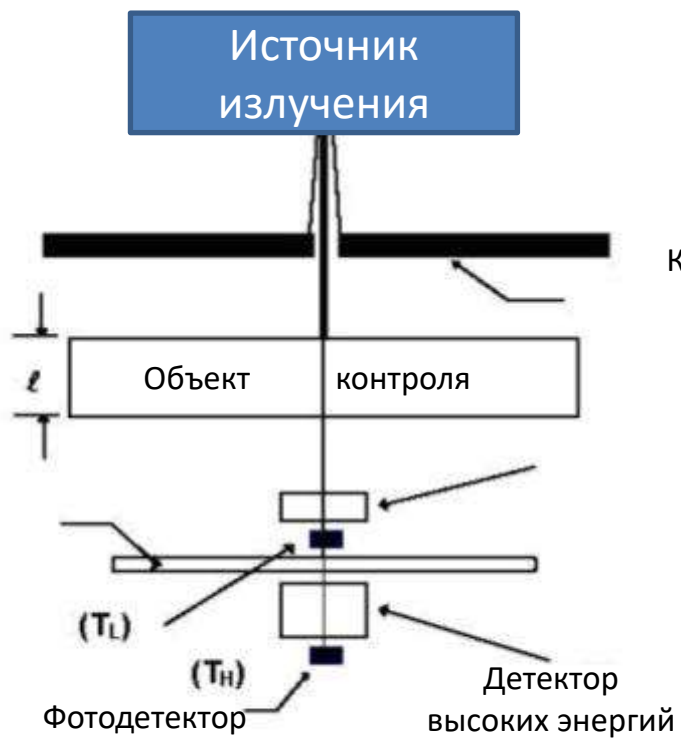
$$\text{Грей} = 1 \text{ [Гр]} = 1 \text{ [Gy]}$$

Зиверт - шведский ученый физик

$$\text{Зиверт} = 1 \text{ [Зв]} = 1 \text{ [Sv]}.$$

биологический эквивалент рентгена – бэр

- $\text{рад} = 1 \text{ [рад]} = 10^{-2} \text{ Гр}$
- $1 \text{ Зв} = 100 \text{ Р} = 100 \text{ бэр}$
- $1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад} = 114 \text{ Р}$ 
  - $1 \text{ рад} = 1 \text{ бэр} = 1 \text{ Р}$

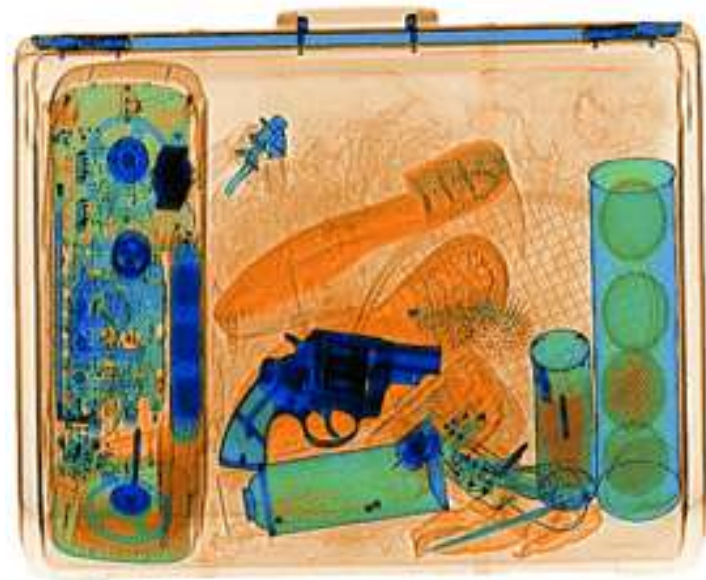
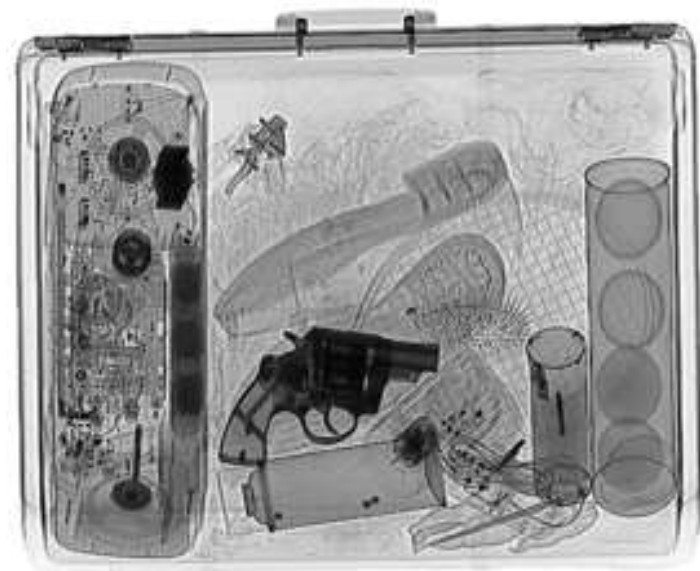
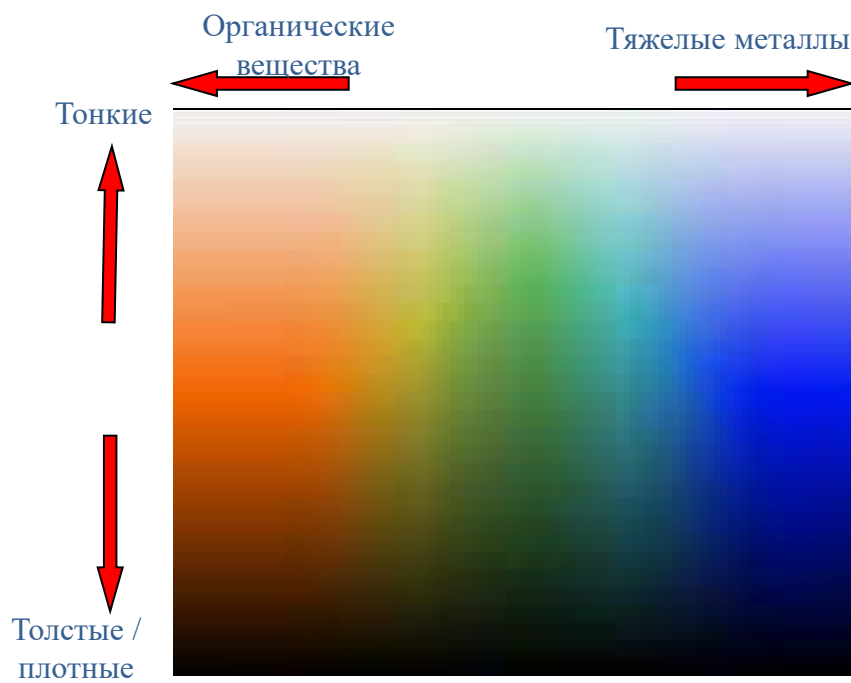


Коллиматор

Детектор  
низких  
энергий



**Химсостав органики не  
определяется**



# Чувствительность метода

Максимальная чувствительность любого фотонного прибора определяется статистическими флуктуациями числа зарегистрированных фотонов. Во многих диапазонах электромагнитного спектра число регистрируемых фотонов обычно так велико, что максимальная чувствительность достигается редко. Но в рентгеновском и гамма-диапазоне энергия каждого фотона очень велика, поэтому число фотонов, обеспечивающих перенос заданной на детектор энергии, соответственно мало.

# Источники излучения