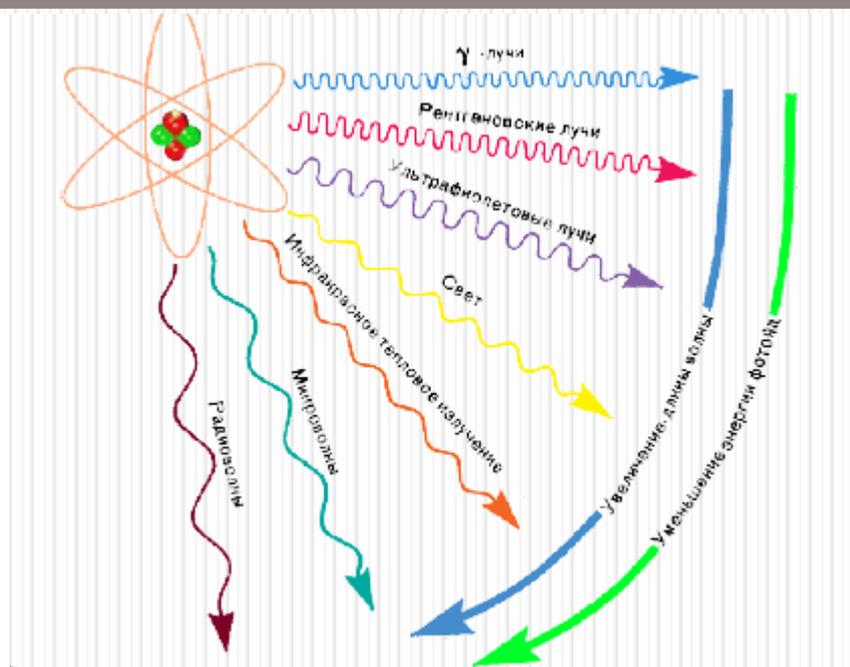


*Физико-
химические
методы
анализа*

Рентгенофлуоресцентная спектроскопия





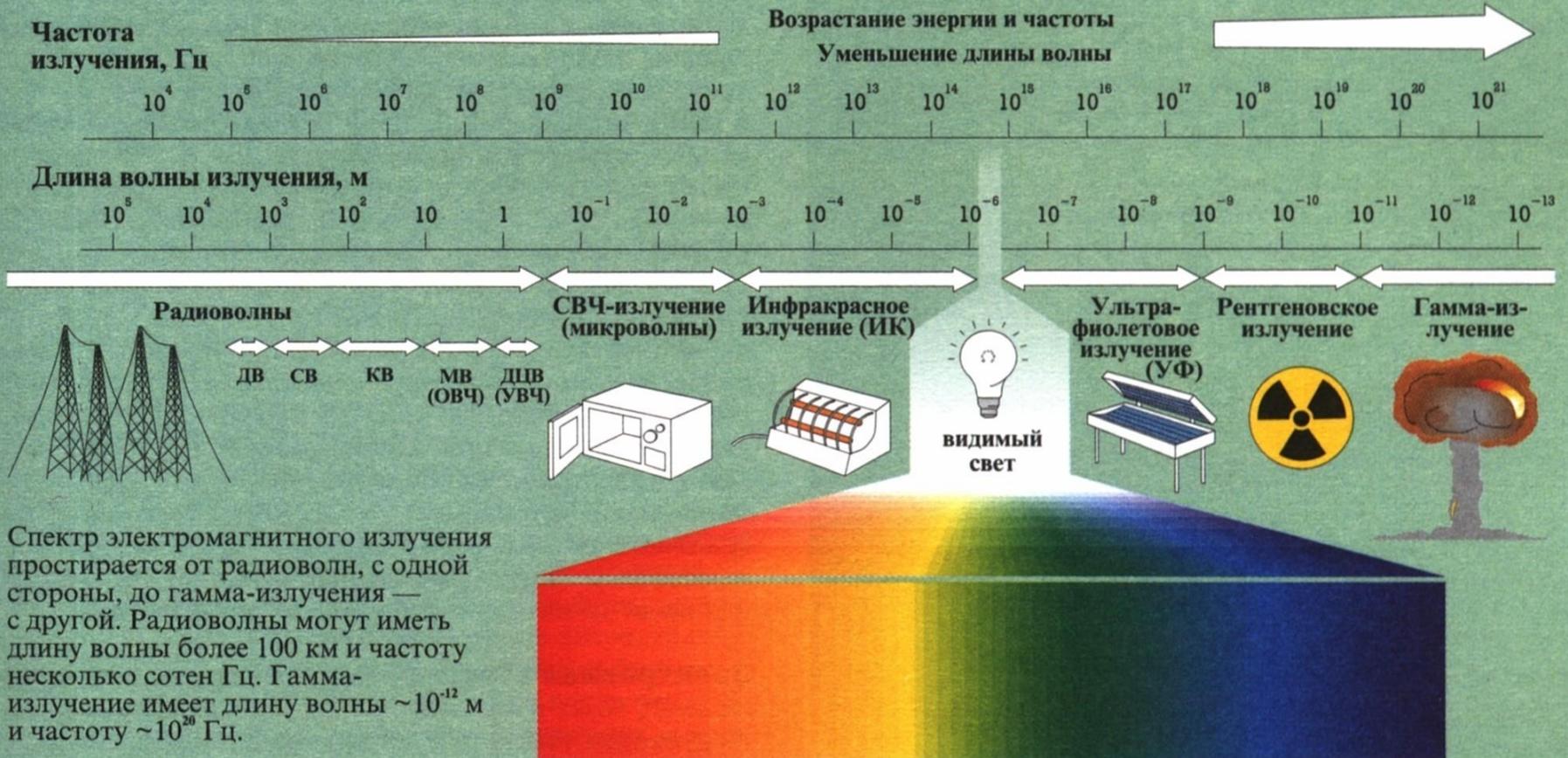
1895 г: Вильям Конрад Рентген, открытие X-лучей

- **Рентгеновская спектроскопия** - раздел спектроскопии, изучающий спектры испускания (эмиссионные) и поглощения (абсорбционные) рентгеновского излучения (электромагнитное излучение в области длин волн **10^{-2} - 10^2** нм)
- Рентгеновскую спектроскопию используют для изучения природы химических связей и количественного анализа веществ (рентгеновский спектральный анализ)
- С помощью рентгеновской спектроскопии можно определять все элементы, начиная с **В(бор)**

Интересный факт:

!! Церковь не приветствовала открытие рентгеновских лучей, т.к. при облучении человека не была обнаружена душа.

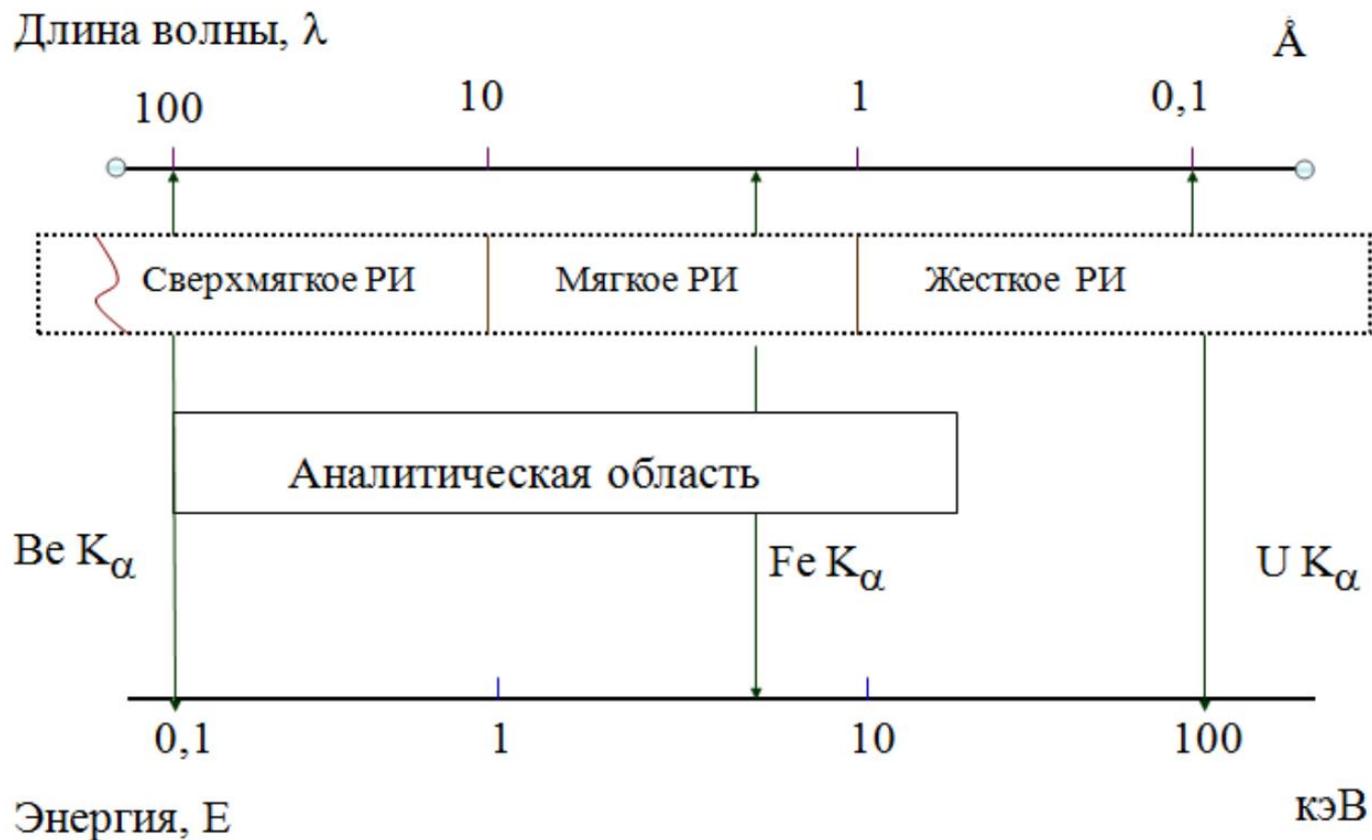
Спектр электромагнитного излучения



Спектр электромагнитного излучения простирается от радиоволн, с одной стороны, до гамма-излучения — с другой. Радиоволны могут иметь длину волны более 100 км и частоту несколько сотен Гц. Гамма-излучение имеет длину волны $\sim 10^{-12}$ м и частоту $\sim 10^{20}$ Гц.

Только небольшая часть электромагнитного спектра видна невооруженным глазом.

Спектр электромагнитного излучения

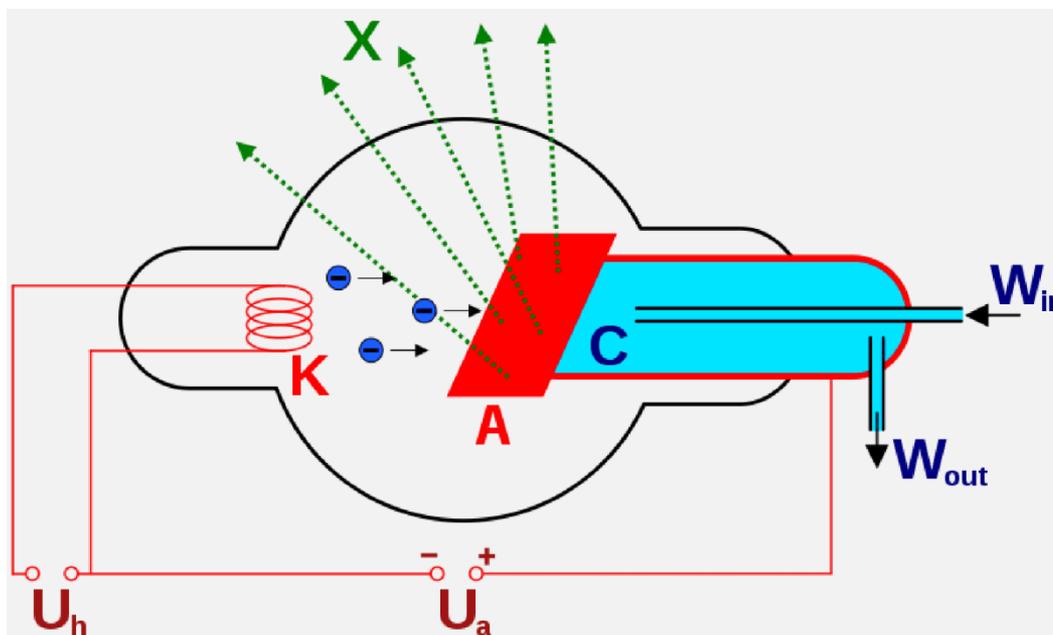


**Рентгеновская часть электромагнитного спектра
(РИ – рентгеновское излучение)**

- **Рентгенофлуоресцентная спектрометрия** (общепринятое обозначение - XRF, РФА, РФС, РФЛА)
- Метод основан на регистрации **характеристического флуоресцентного излучения** атомов, возникающего при облучении образца потоком излучения рентгеновской трубки
- В РФЛА обычно используют излучение в диапазоне длин волн от 0.05 до 10 нм, что соответствует диапазону энергий от 0.100 до 25 кэВ
- Наиболее распространенным источником рентгеновского излучения в настоящее время является рентгеновская трубка
- В зависимости от природы возникновения рентгеновских лучей различают **тормозное** и **характеристическое** излучение

Устройство рентгеновской трубки

- Трубка состоит из анода (А) и катода (К), которые помещены в металлический или стеклянный корпус с окном для выхода рентгеновского излучения; внутри трубки высокий вакуум. Электроды трубки подключаются к источнику высокого напряжения – в несколько тысяч ВОЛЬТ

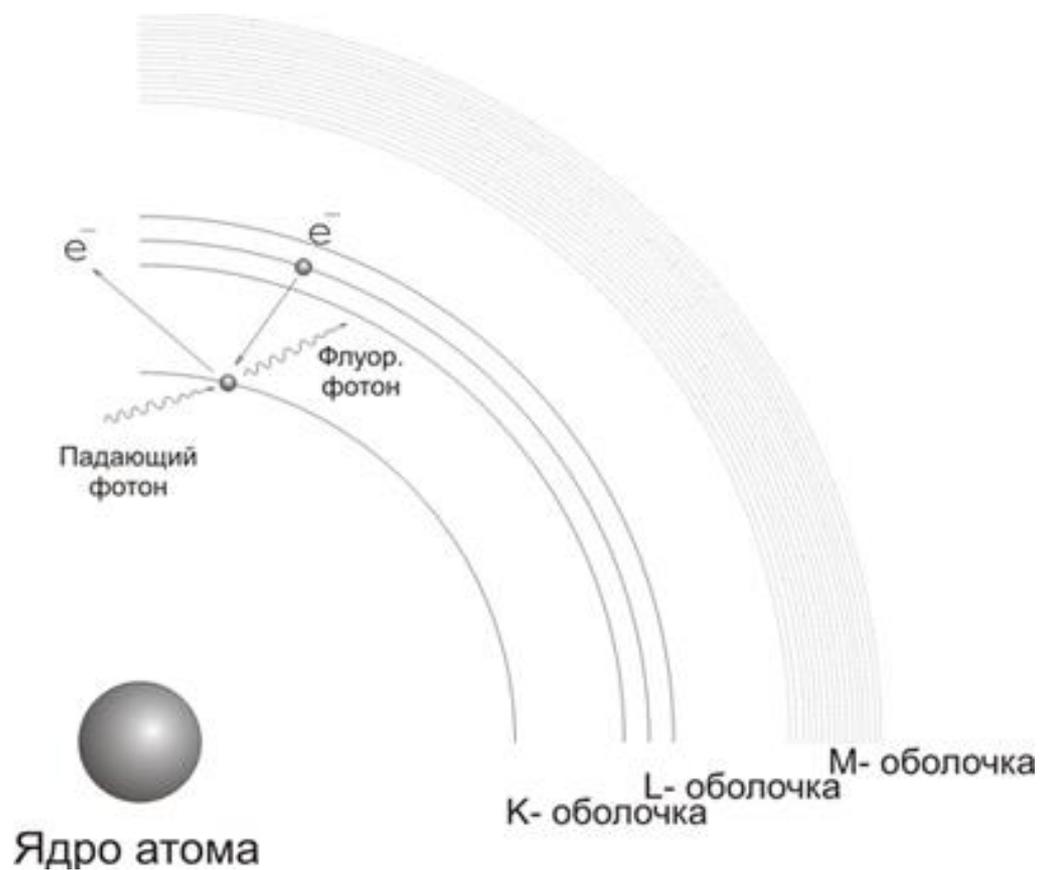


Возникновение рентгеновского излучения

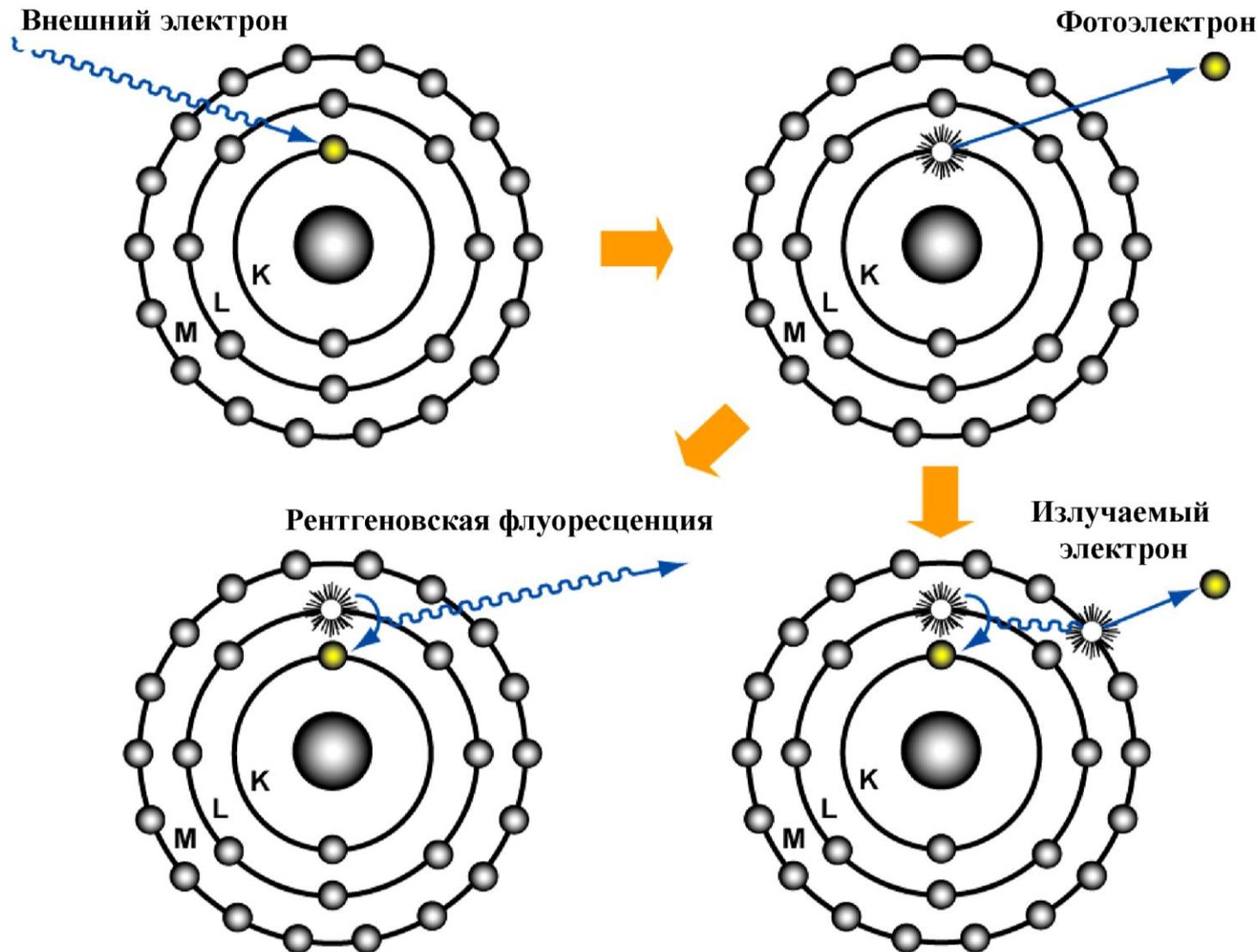
- **Тормозное рентгеновское излучение**
- Под действием высокого напряжения раскаленный катод испускает электроны, которые ускоряются до большой энергии и попадают на анод
- При прохождении через материал анода происходит торможение в результате взаимодействия электрических полей электронов и ядер атомов анода. При этом утраченная кинетическая энергия испускается в виде рентгеновских фотонов и дает непрерывный спектр
- непрерывный спектр рентгеновских лучей образуется благодаря излучению множества электронов, каждый из которых испускает один квант рентгеновского излучения строго определенной величины, отвечающей сохранившейся к моменту излучения кинетической энергии
- Спектральная интенсивность тормозного излучения возрастает с ростом заряда ядра, поэтому для ее увеличения используются мишени из материалов с высоким атомным номером, например вольфрам, рений, платину, золото

- **Характеристическое излучение**
- При облучении анода электронами наряду со сплошным рентгеновским спектром возникает излучение, которое специфично для материала анода
- Характеристическое излучение испускают атомы мишени при столкновении с электронами (первичное излучение) или с рентгеновскими фотонами (вторичное, или флуоресцентное излучение)

Рентгеновская флуоресценция



Природа рентгеновского излучения



При поглощении фотона первичного излучения в одной из внутренних оболочек выбивается электрон, образуется вакансия, а на освободившееся место переходит электрон с более удаленной от ядра оболочки атома.

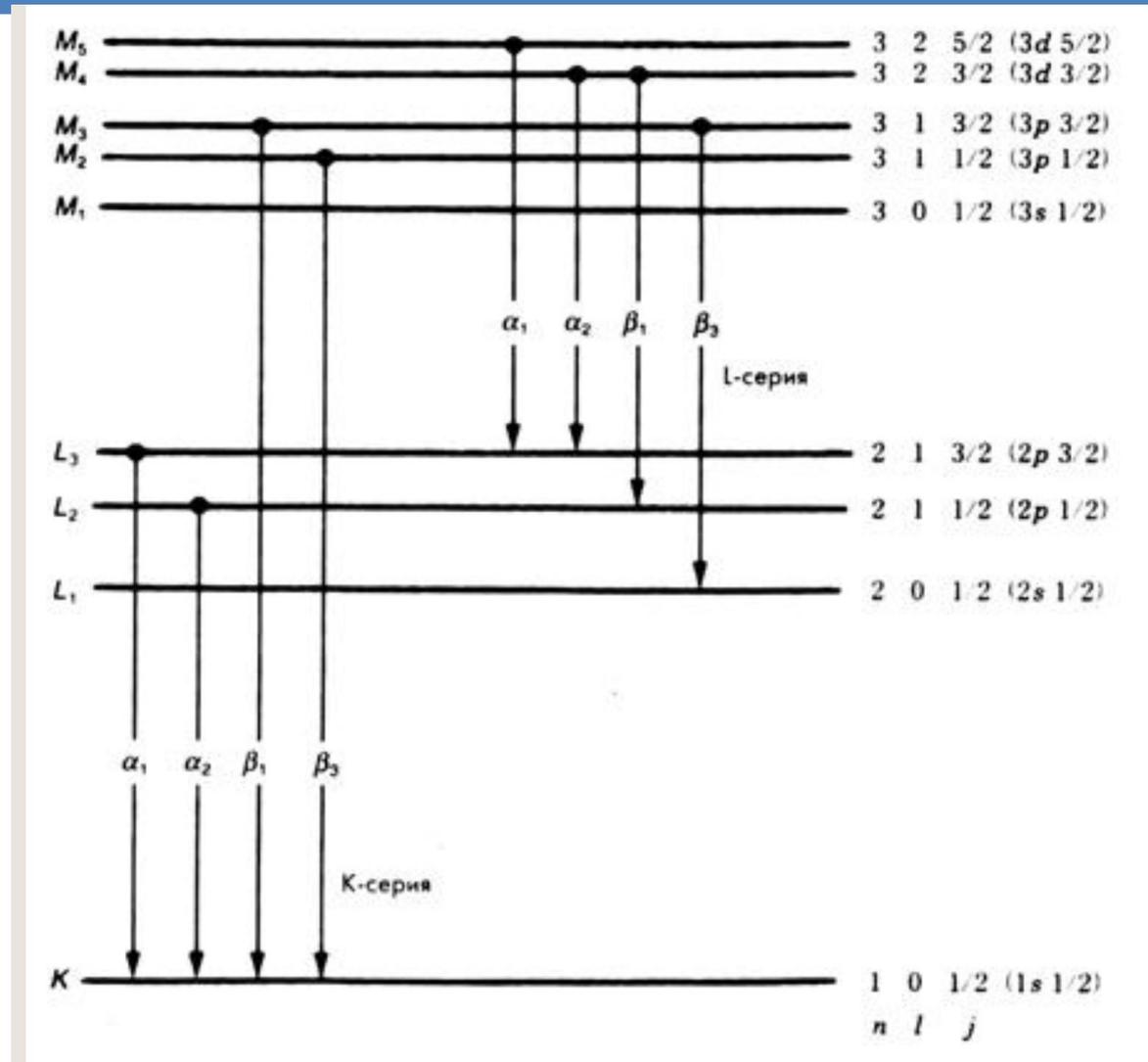
При этом возможны два пути:

- электроны с внешних оболочек либо заполняют образовавшиеся вакантные места, а излишек энергии испускается в виде фотона (рентгеновская флуоресценция),
- энергия передается другому электрону из внешних оболочек (оже-электрон)

- Теория характеристического излучения создана на основе модели атома Бора, согласно которой электроны атома находятся на *K, L, M, N* и т.д. оболочках - уровнях энергии с главными квантовыми числами $n = 1, 2, 3, 4...$
- Каждая оболочка может содержать только определенное число электронов: ближайшая к ядру *K*-оболочка – 2 электрона, *L* – 8, *M* – 18 и т.д.

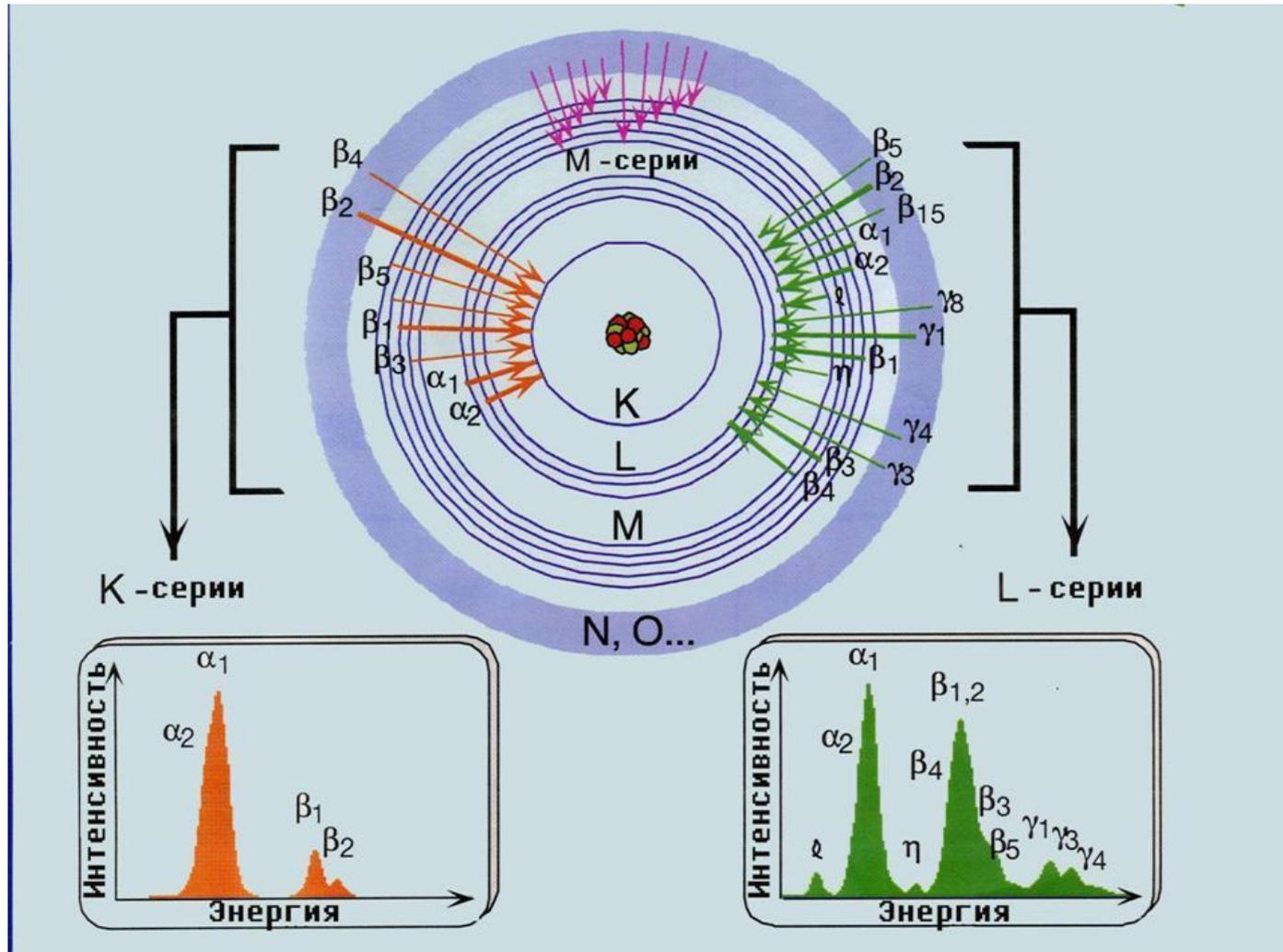
- Первая оболочка (**K**) состоит из одного подуровня 1s. Вторая оболочка (**L**) состоит из двух подуровней 2s и 2p. Третья оболочка (**M**) - из подуровней 3s, 3p и 3d
- подуровням энергии приписывают последовательно числовые индексы в порядке возрастания энергии, например, M_I , M_{II} , M_{III} , M_{IV} , M_V
- Все переходы на K, L или M-уровни называют **K, L или M-сериями** (K, L или M-переходами) и обозначают греческими буквами (α , β , γ ...) с числовыми индексами
- Существует целый набор возможных переходов на электронную вакансию со внешних электронных оболочек
- к примеру, на вакансию в K-оболочке могут перейти электроны с различных подуровней L, M и т.д. оболочек, если они имеются у атома элемента

Схема электронных переходов

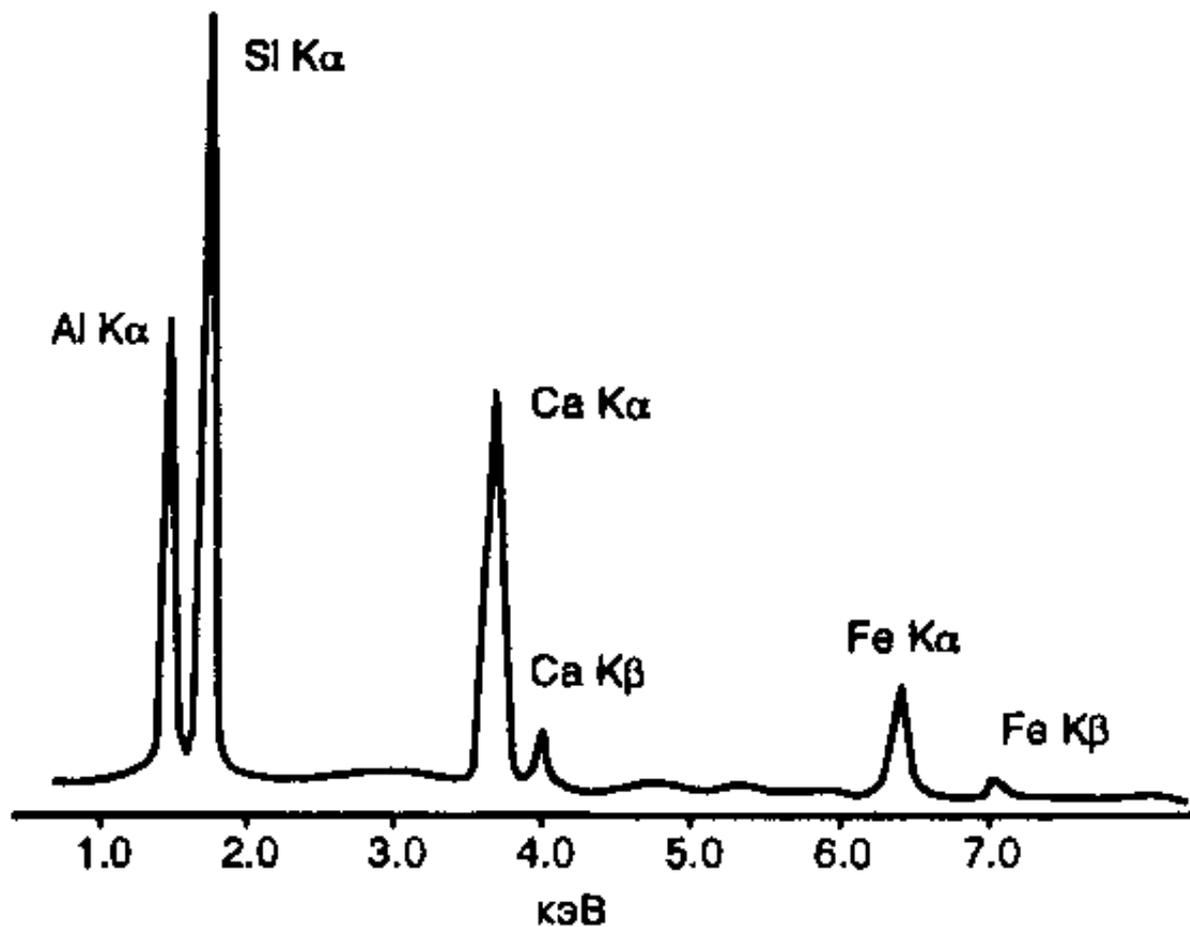


- В результате, спектр рентгеновской флуоресценции атомов одного элемента будет состоять из нескольких сигналов.
Характеристический рентгеновский спектр имеет линейчатый характер; каждая линия соответствует определенному переходу
- В спектрах рентгеновской флуоресценции **наибольшей интенсивностью** обладают излучательные переходы на электронные вакансии в К-оболочке (**К-линии спектра**)
- для достаточно «тяжелых» элементов также проявляются переходы на вакансии в L-оболочке (L-линии спектра)

Схема электронных переходов



Рентгеновский спектр (пример)

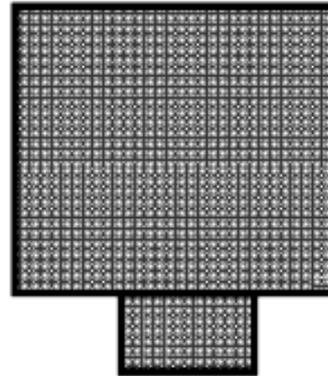
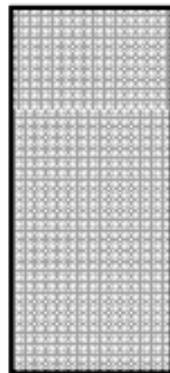


РФ-спектрометры

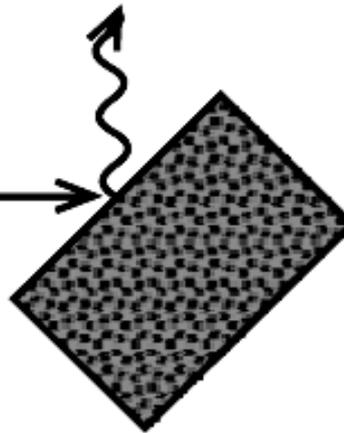
- Приборы РФС состоят из рентгеновского источника, держателя пробы и спектрометра
- Спектрометр измеряет длину волны (l) или энергию (E) и интенсивность флуоресцентного излучения, испускаемого пробой
- В зависимости от параметра, непосредственно измеряемого спектрометром (l или E), различают приборы с
 - **волновой** (ВД) (измеряет длину волны)
 - и **энергетической дисперсией** (ЭД) (измеряет энергию волны),
 - устройство которых принципиально различно

Схема рентгеновского спектрометра

**Источник
рентгеновского
излучения**



Детектор



Образец

Источники излучения

- Рентгеновские источники, используемые для возбуждения атомов в пробе, как правило, не имеют принципиальных отличий в приборах с **волновой дисперсией**(ВД) и **энергетической дисперсией** (ЭД)
- Наиболее широко используемым источником первичного рентгеновского излучения в РФЛА являются **рентгеновские трубки**
- В приборах с энергетической дисперсией возможно использование **радиоизотопных источников**

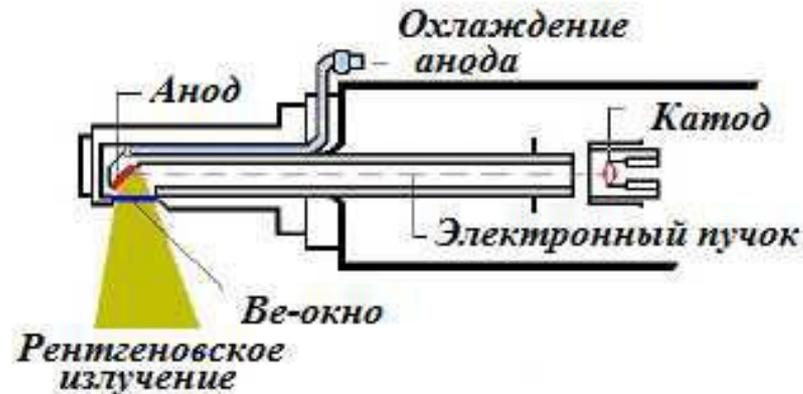
- Все **рентгеновские трубки** работают по одинаковому принципу:

Ускорение электронов в электрическом поле и их торможение в подходящем материале анода

Чтобы избежать столкновения электронов с газовыми молекулами, внутри корпуса создается вакуум

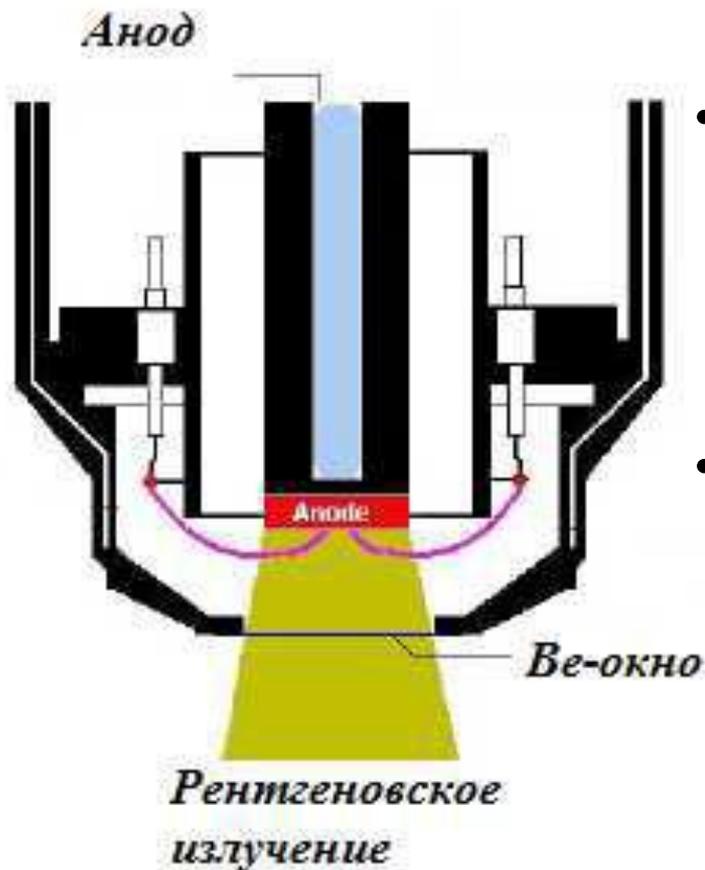
- Выход рентгеновского излучения из корпуса осуществляется через тонкое **бериллиевое** окно, пронизаемое для этого излучения
- Основные различия между типами трубок заключаются в полярности анода и катода, а также в расположении выходных окон. Два наиболее важных типа:
- **трубка с боковым окном**
- **трубка с торцевым окном**

Схема рентгеновской трубки с боковым окном



- В трубке с боковым окном к катоду приложено отрицательное напряжение, анод находится под нулевым потенциалом, разность потенциалов между анодом и материалом корпуса отсутствует
- Электроны испускаются нагретым катодом и ускоряются в направлении анода, часть электронов рассеивается на поверхности анода и способствует нагреву корпуса и, особенно бокового окна
- Чтобы исключить нагрев, используют окна толщиной не менее 300 мкм. Это приводит к слишком высокому поглощению низкоэнергетического характеристического *L-излучения* материала анода в выходном окне, что ограничивает возбуждение более легких элементов в пробе

Схема рентгеновской трубки с торцевым катодом



- В трубке с торцевым окном к аноду приложено положительное высокое напряжение, а кольцевой катод располагается вокруг анода и находится под нулевым потенциалом
- Благодаря тому, что между положительно заряженным анодом и корпусом, включая бериллиевое окно, имеется разность потенциалов, обратно рассеянные электроны будут направляться обратно к аноду
- При этом выходное окно не будет нагреваться, поэтому может быть значительно более тонким (125 и 75 мкм) по сравнению с трубкой с боковым окном
 - Это условие выполняется для того, чтобы легкие элементы возбуждались характеристическим L -излучением материала анода

- С начала 80-х годов всеми известными производителями волнодисперсионных спектрометров используются трубки с **торцевым** окном.
- Мощность этих трубок достигает 100 мА при 30 кВт. Анод трубки охлаждается деионизованной водой

- Трубки могут быть как с родиевым так и с медным, молибденовым, серебряным или другим анодом
 - Анод трубки, в некоторых случаях, выбирается в зависимости от типа задачи (элементов, требующих анализа), для решения которой будет использоваться данный прибор
- Для разных групп элементов используются различные значения силы тока и напряжения на трубке
 - Для исследования лёгких элементов вполне достаточно установить напряжение **10 кВ**,
 - для средних **20-30 кВ**,
 - для тяжелых **40-50 кВ**

Использование источников рентгеновских лучей

- При выборе **радиоактивного изотопа** как возбуждающего источника для рентгеноспектрального анализа определяющее значение имеют следующие характеристики:
 - 1) энергия испускаемых квантов и чистота спектра
 - 2) период полураспада изотопа
 - 3) удельная активность
 - 4) доступность и стоимость изотопа



Недостатки:

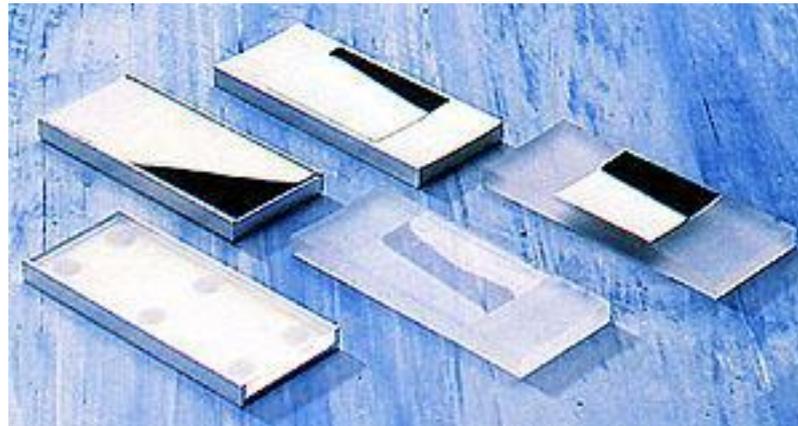
- Набор используемых радиоактивных источников невелик и не всегда может обеспечить оптимальные источники возбуждения; часто используются, например **Fe^{55} , Am^{241} , Cd^{109}**
- Любой радиоактивный изотоп, взятый в разумных количествах, является относительно маломощным источником возбуждающего излучения по сравнению с рентгеновской трубкой

Использование источников рентгеновских лучей

Достоинства:

- Радиоизотопные источники отличаются своей стабильностью, надежностью и портативностью, легко обеспечивают выход излучения порядка 10^7 - 10^8 квант/с и выше, достаточный для решения широкого круга аналитических задач
- Все же, поскольку каждая страна имеет свои требования к ввозу и вывозу излучающих изотопов, в производстве рентгенофлуоресцентной техники в последнее время стараются использовать, как правило, рентгеновскую трубку

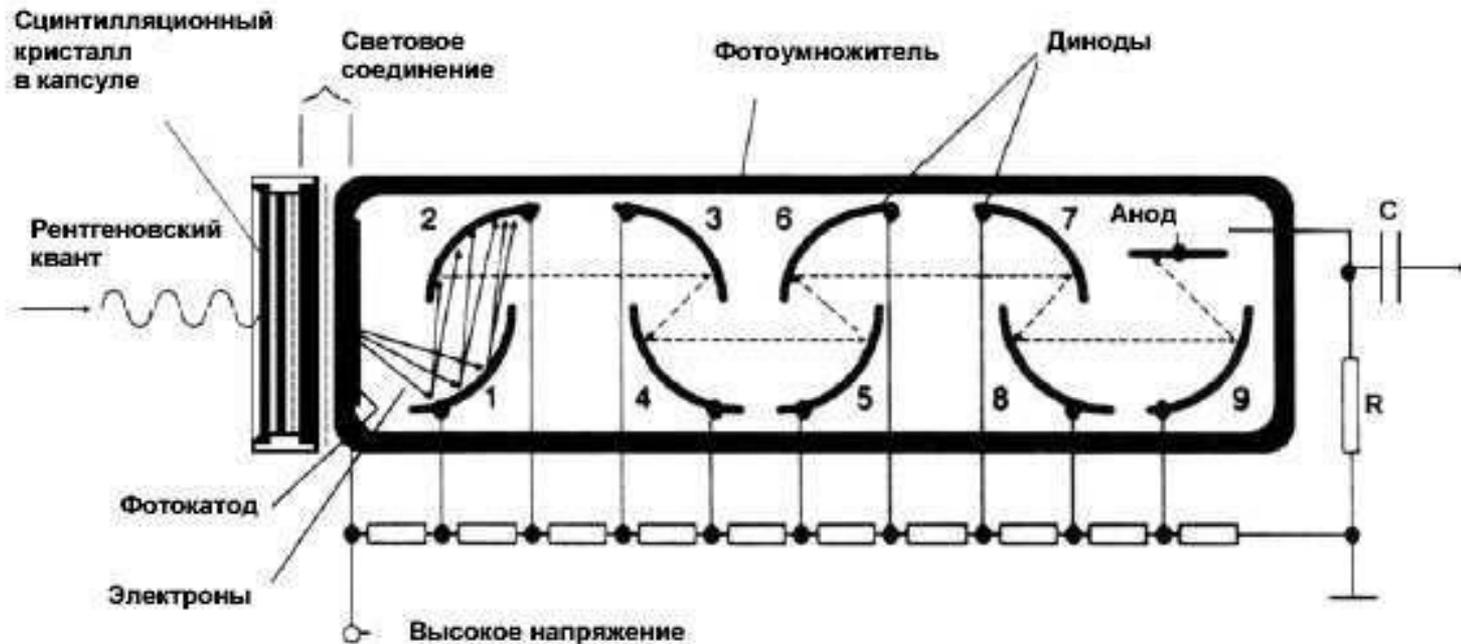
- для увеличения селективности и чувствительности аппаратуры, измерение спектра исследуемой пробы в широком диапазоне энергий производят с помощью нескольких кристаллов-монохроматоров из различных материалов
- Монокристаллы, такие как германий (Ge^{111}), фторид лития являются идеальными анализаторами для излучения многих элементов
- Многослойные синтетические покрытия используются для увеличения чувствительности при анализе легких элементов (монохроматоры серии РХ, РЕ и т.д.)



Детекторы

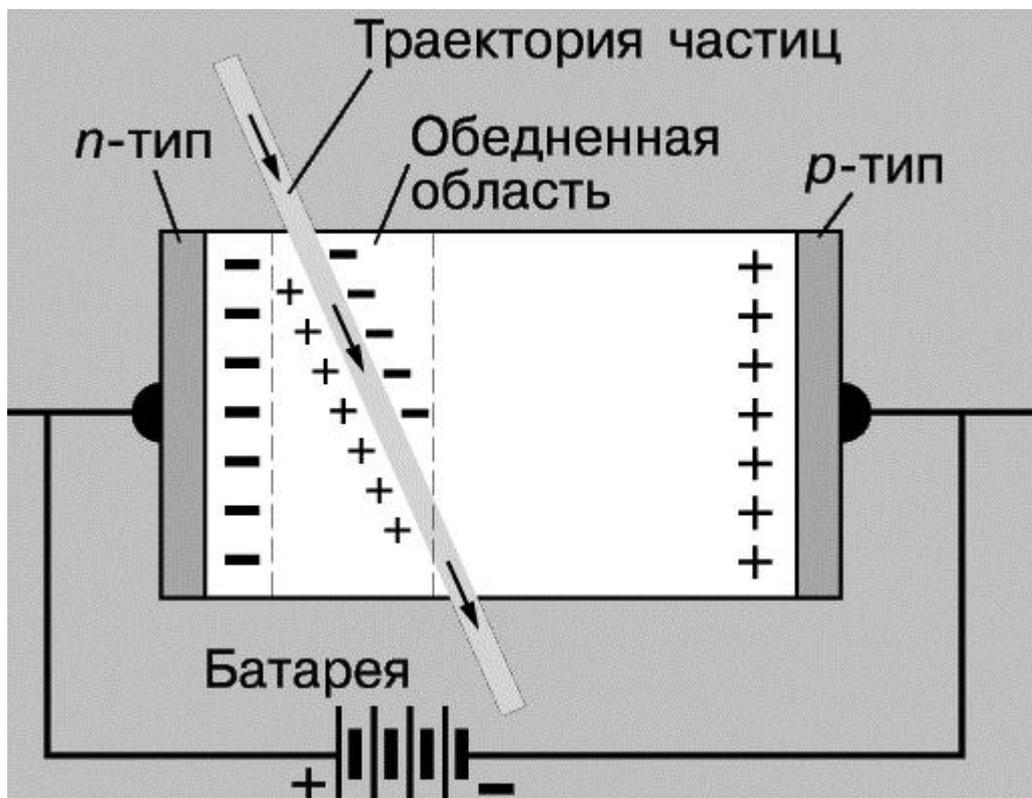
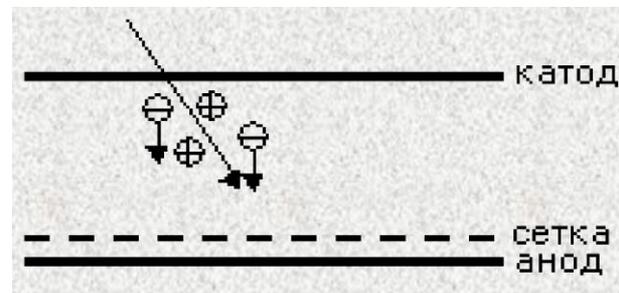
- **Детектирование рентгеновского излучения** основано на преобразовании энергии лучей в импульсы напряжения определенной амплитуды
- **Типы детекторов**
- Для относительно больших длин волн при анализе легких элементов используются **газонаполненные** детекторы. Их действие основано на ионизации инертного газа излучением и измерении числа электрических импульсов, прошедших через ионизированный газ. Величина возникающего импульса тока пропорциональна интенсивности излучения (ионизац. камера, счетчик Гейгера, пропорциональные счетчики)

- Для коротких длин волн применяются **сцинтилляционные детекторы**, в которых измеряется ток фотоэлемента, чувствительного к излучению специального вещества (сцинтиллятора, кристаллов NaI) при попадании на него рентгеновского излучения. Количество регистрируемых импульсов пропорционально количеству атомов элемента в пробе



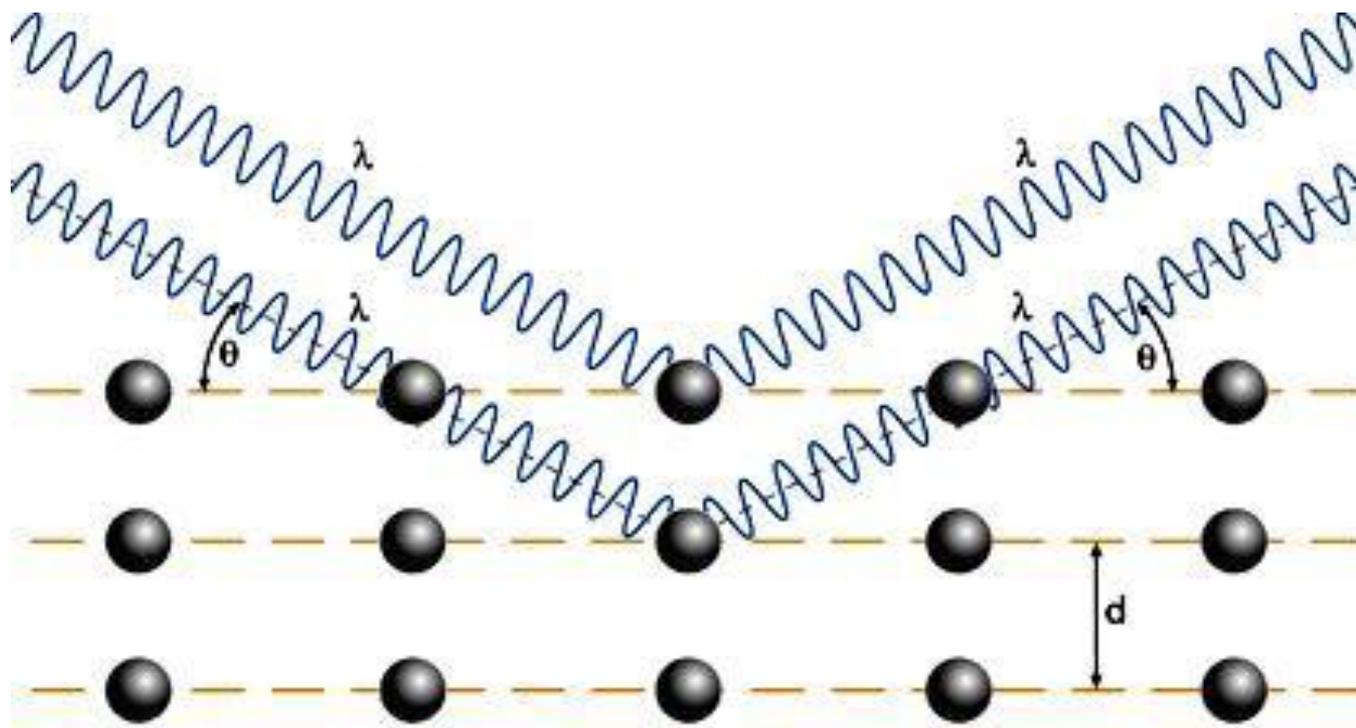
- Для детектирования вторичного излучения в спектрометрах с ЭД используются **полупроводниковые твердотельные детекторы**, действие которых основано на ионизации полупроводника. Полупроводниковые детекторы изготавливают из кристаллов Si или Ge, активированных, например литием, причем необходимо охлаждение детектора во время анализа жидким азотом
- Современные усилители и анализаторы импульсов позволяют получить удовлетворительную статистическую погрешность измерений за время менее 2 сек
- Анализ и обработка результатов измерений проводится автоматически. Результаты анализа накапливаются в базе данных для дальнейшей обработки

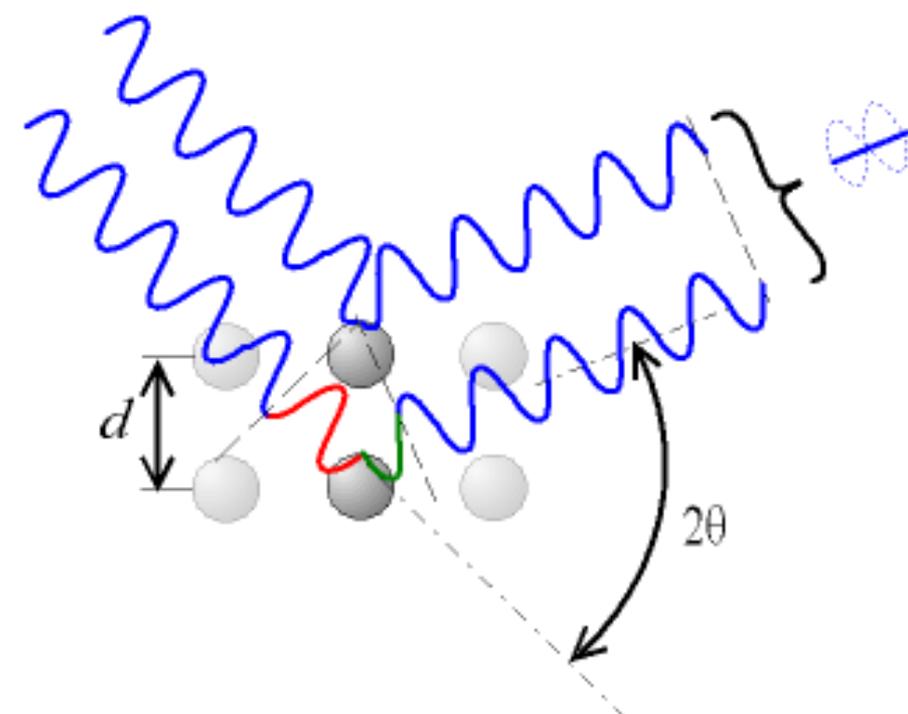
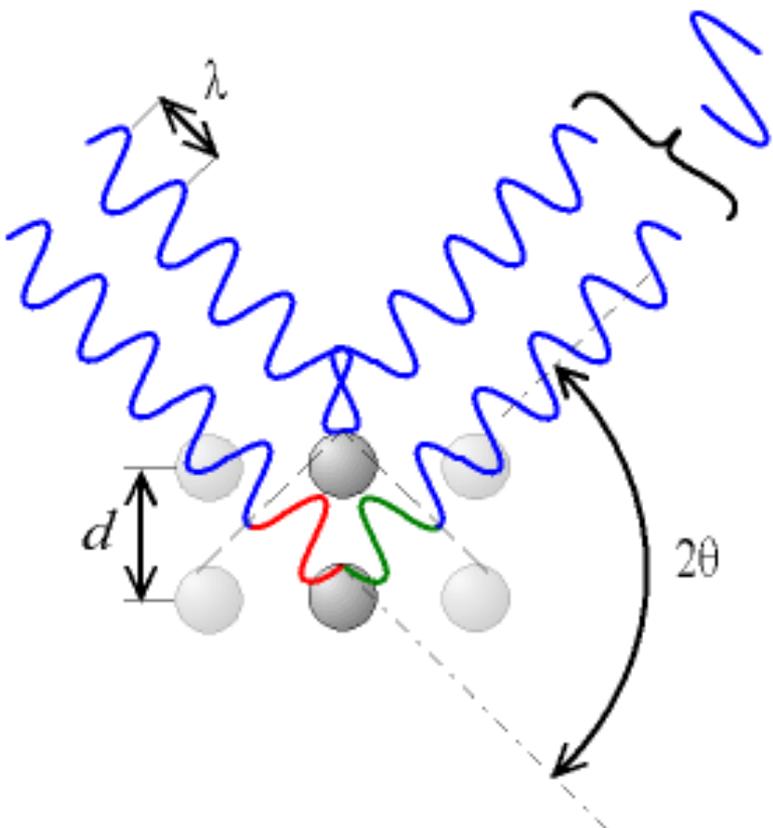
Схема газонаполненного детектора



Полупроводниковый
твёрдый
детектор

Угловое положение кристалла задается в зависимости от длины волны, которую нужно выделить из спектра. Идеальными анализаторами являются **монокристаллы Ge** и **LiF**





где d — межплоскостное расстояние, θ — угол скольжения (брегговский угол), n — порядок дифракционного максимума, λ — длина волны.

$$n\lambda = 2d \cdot \sin\theta$$

Типы кристаллов

Кристалл		Диапазон элементов	Значение $2d$, нм
LiF (420)	фторид лития	$\geq \text{Co } K\beta$	0.1801
LiF (220)	фторид лития	$\geq \text{V } K\alpha 1$	0.2848
LiF (200)	фторид лития	$\geq \text{K } K\alpha 1$	0.4028
Ge	германий	P, S, Cl	0.653
InSb	антимонид индия	Si	0.7481
PET	пентаэритрит	Al-Ti	0.874
AdP	дигидрофосфат аммония	Mg	1.0648
TlAP	гидрофтатат таллия	F, Na	2.5760
OVO-55	многослойная структура [W/Si]	Si	5.5
OVO-160	[Ni/C]	B, C	16
OVO-N	[Ni/BN]	N	11
OVO-C	[V/C]	C	12
OVO-B	[Mo/B ₄ C]	B (Be)	20

Блок-схемы рентгеновских спектрометров

- **Волнодисперсионный спектрометр**

- Аналогично устроены спектрометры в ИК-, УФ- и видимой области

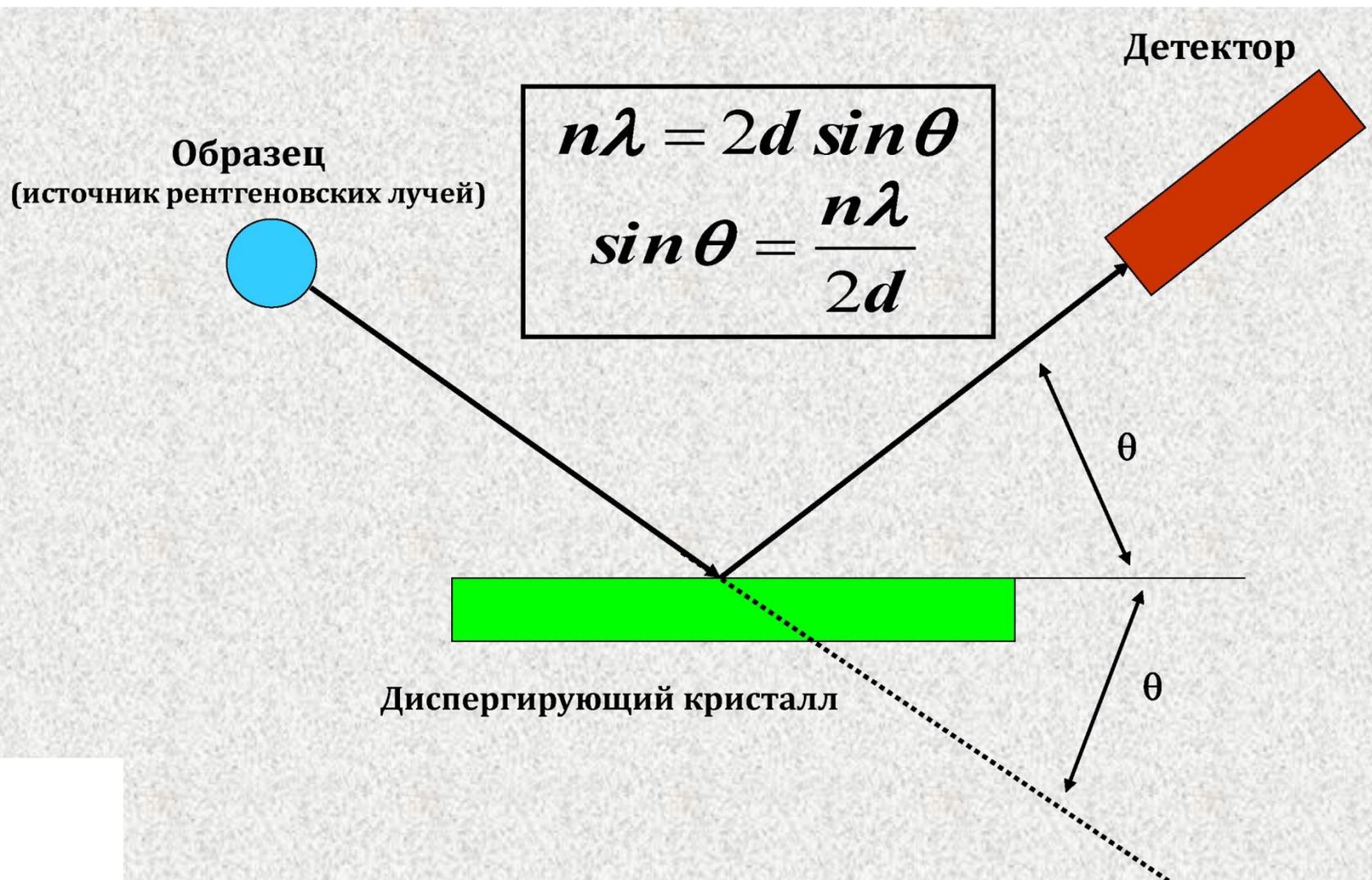


- **Энергодисперсионный спектрометр**

- Нет аналогов в дисперсионной спектрометрии
- Регистрируются только энергетические спектры



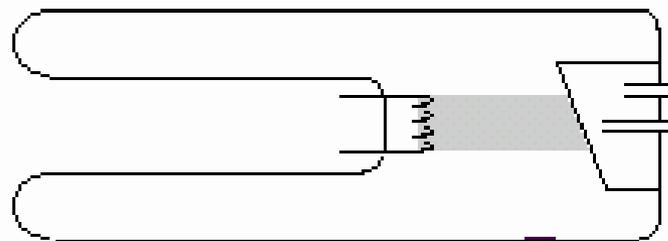
Волнодисперсионный анализатор



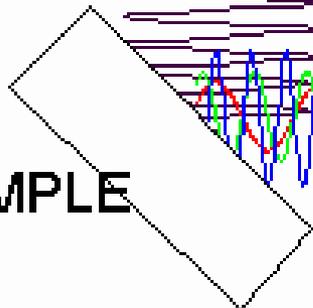
- Современные рентгенофлуоресцентные **спектрометры с волновой дисперсией** (РФСВД) представляют собой тонкие устройства очень сложной конфигурации
- Механические функции включают вращение детектора (гониометра), выбор одного из имеющихся дифракционных кристаллов, детектора, коллиматоров, фильтра между трубкой и пробой
- Все эти функции, а также высоковольтный генератор и система детектирования рентгеновского излучения, управляются с помощью компьютера
- В компьютере заложена также программа для качественного и количественного анализа
- Различают **волновые последовательные** и **волновые одновременные** приборы РФСВД

Устройство волнодисперсионного последовательного рентгенофлуоресцентного спектрометра

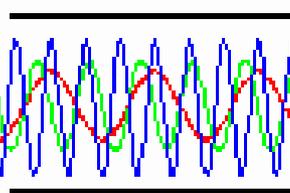
X-RAY TUBE



SAMPLE



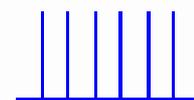
COLLIMATOR



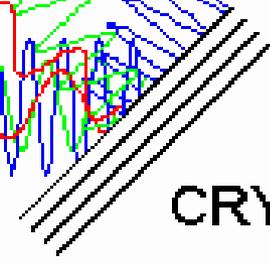
DETECTOR
2θ



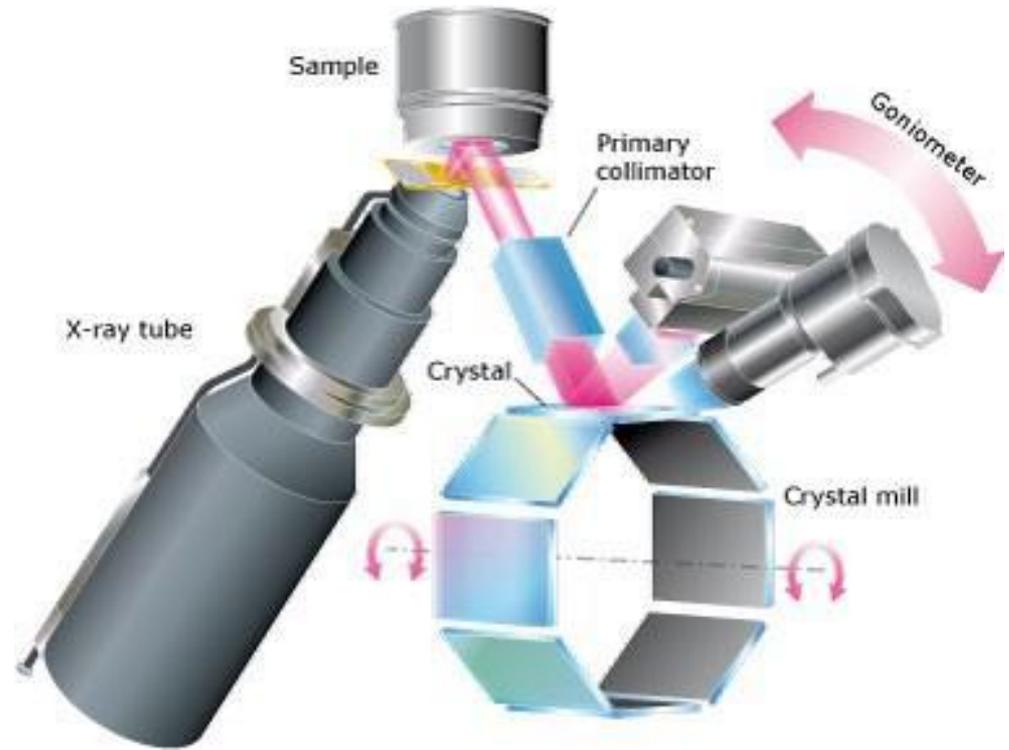
PULSE
COUNTING



CRYSTAL
θ



- **Последовательный** или **одноканальный** прибор имеет один кристалл
- осуществляется последовательное выделение каждой характеристической линии рентгеновского излучения любого числа элементов с помощью **движущегося кристалла-монокроматора** и высокоточного гониометра (прибора для измерения углов), сопряженного с устройством вращения, управляемого компьютером

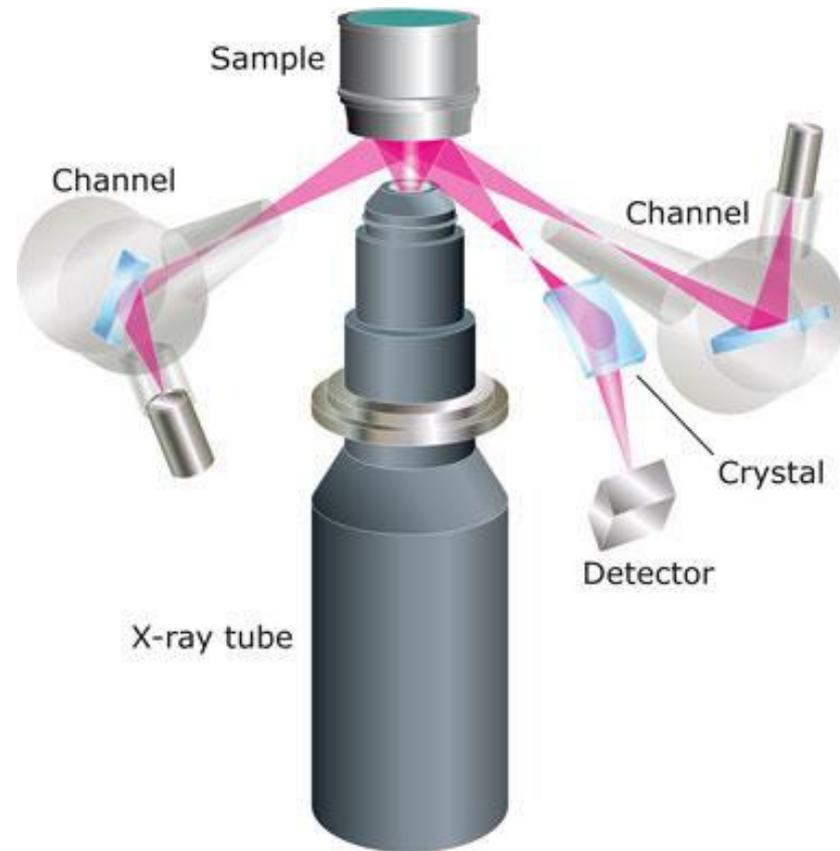


- Концентрацию различных элементов определяют, перемещая кристалл на нужный угол $2d$ и измеряя интенсивность флуоресценции в течение времени интегрирования от 1 до 100 с. Следовательно, полное измерение может занимать до 30 минут

Преимущества ВД-спектрометров последовательного действия:

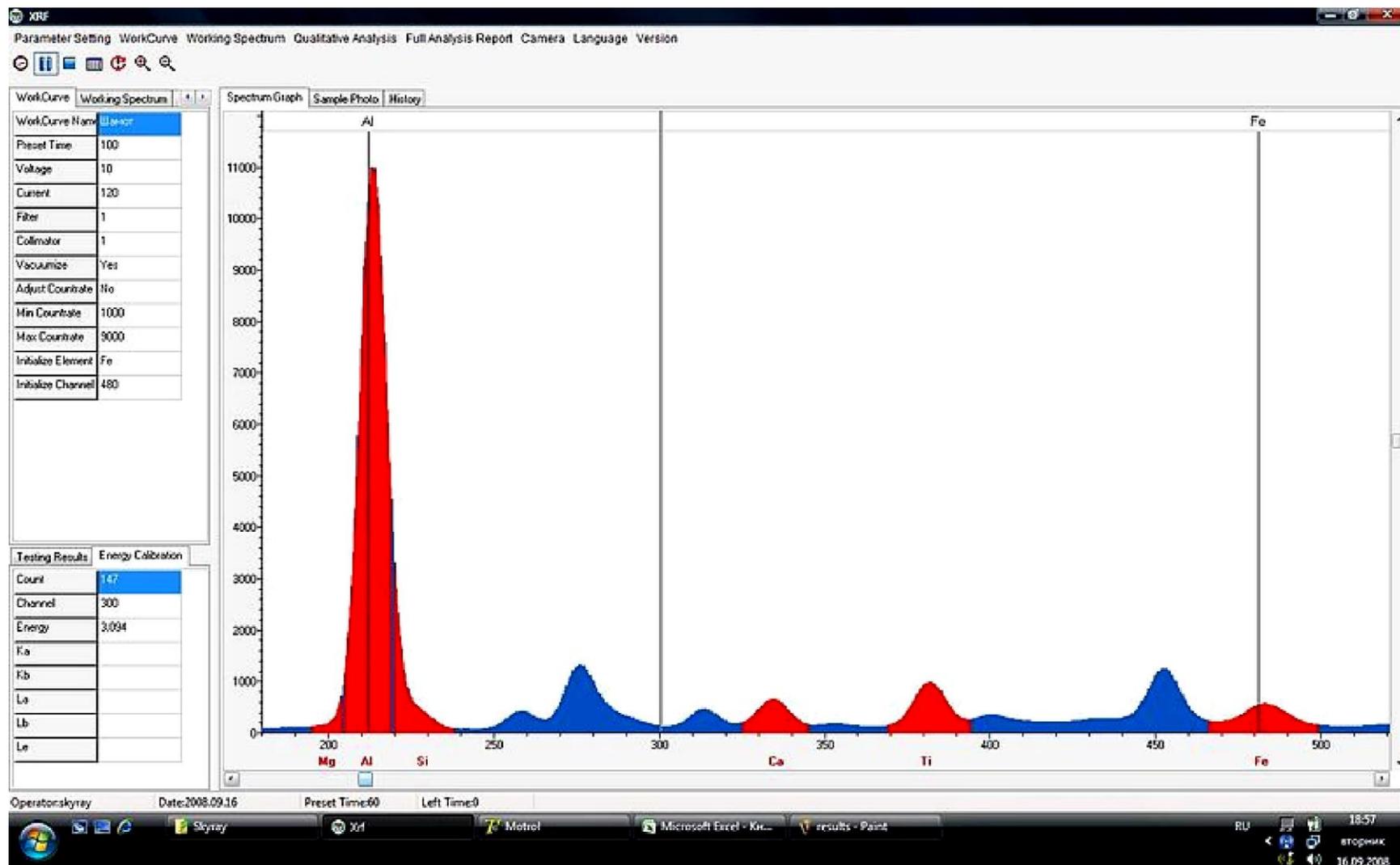
- Универсальность - определение любого числа элементов
- Оптимальные условия измерения программируются для каждого элемента
- Очень высокая чувствительность, низкие уровни детектирования
- Меньшая стоимость относительно параллельных спектрометров

- В **ВОЛНОВОМ** **одновременном** или **многоканальном** приборе размещают несколько комбинаций кристалл – детектор с фиксированными углами 2θ вокруг пробы
- **Фактически каждый из каналов является отдельным спектрометром с кристаллом-монохроматором** и детектором, настроенными на прием определенной длины волны одного элемента



- Многоэлементный анализ для фиксированного набора элементов можно выполнить за время от нескольких секунд до нескольких минут
- **Преимущества волновых** параллельных спектрометров:
- Высочайшая скорость анализа при использовании для поточного контроля качества в индустрии - экспресс-анализ технологического процесса
- Малое количество движущихся частей, прекрасная надежность в условиях промышленного предприятия

Волнодисперсионный рентгенофлуоресцентный спектр



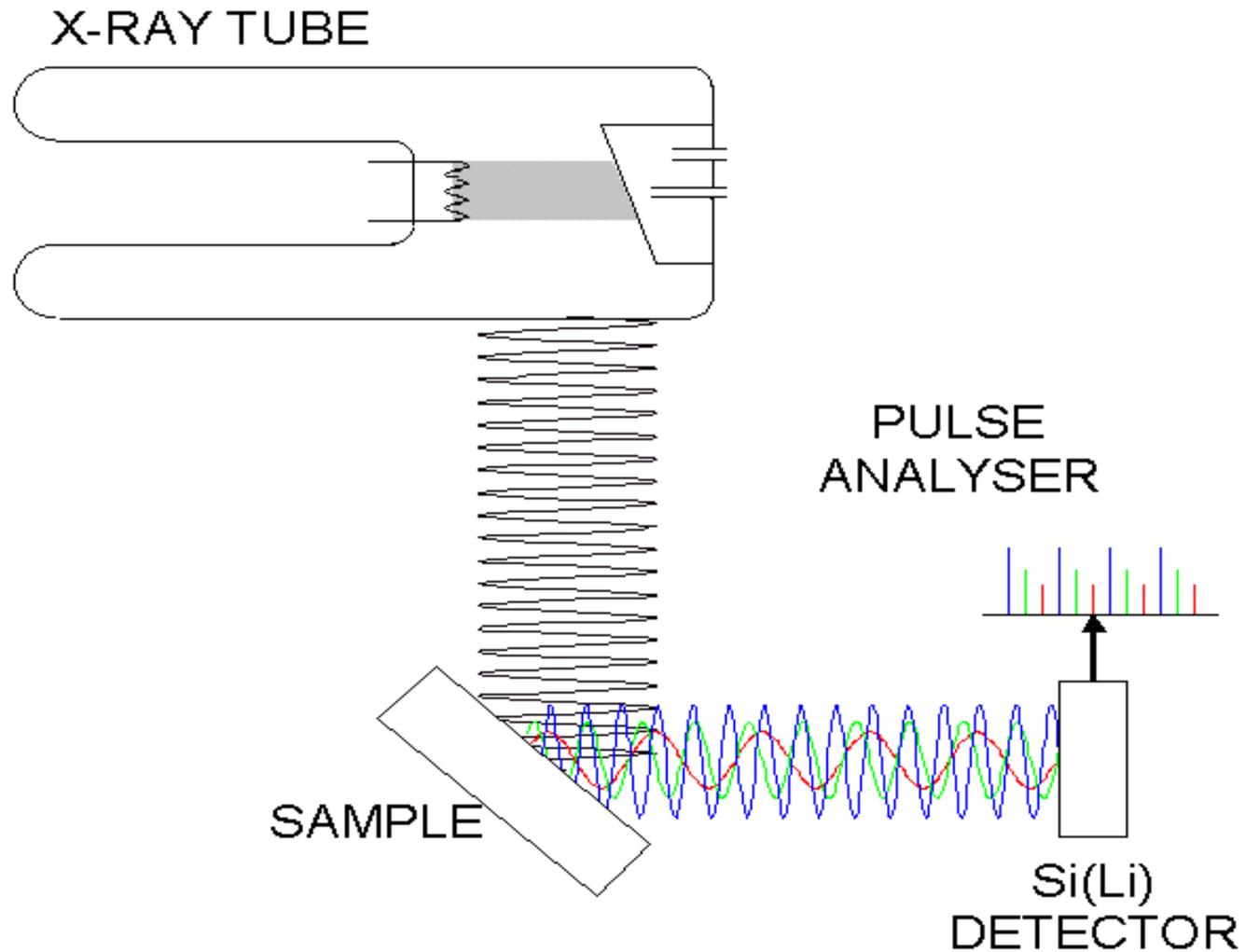
Волнодисперсионный рентгенофлуоресцентный спектрометр СПЕКТРОКАН МАКС-GF2E



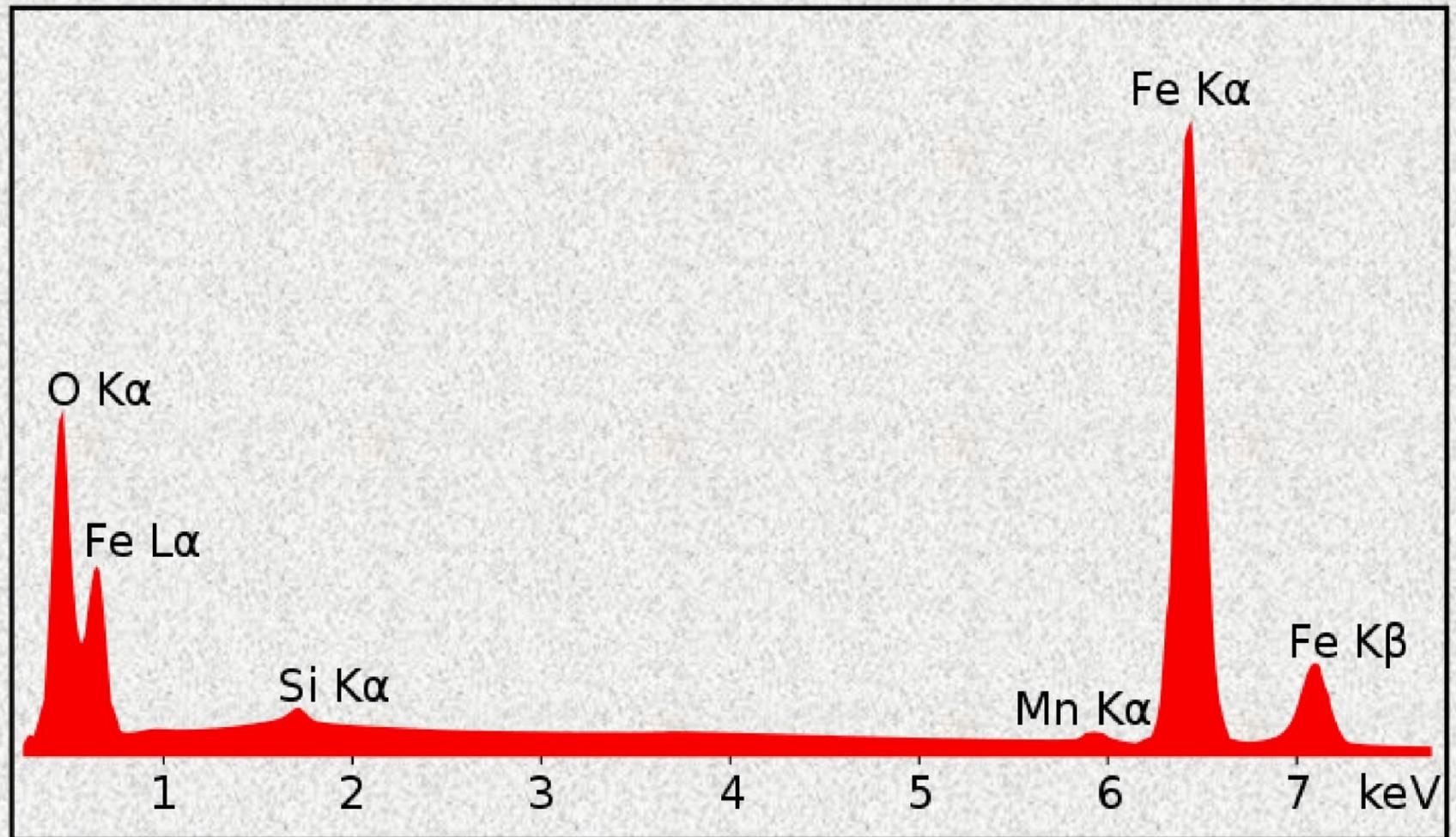
Спектрометры с энергетической дисперсией

- Спектрометры с **энергетической дисперсией** имеют простую механическую конструкцию, значительно дешевле, но используют сложную электронику для обработки очень слабых сигналов от детектора
- Основная система включает рентгеновскую трубку низкой мощности и Si(Li)-детектор, оба расположенные под углом 45° к пробе . Для ограничения возбуждающего и флуоресцентного пучков в области образца применяют коллиматоры
- В отличие от ВД метода, при ЭД определении регистрируется одновременно весь диапазон энергий вторичного (характеристического) излучения от пробы. Таким образом, спектр представляет из себя зависимость интенсивности от энергий излучения элементов

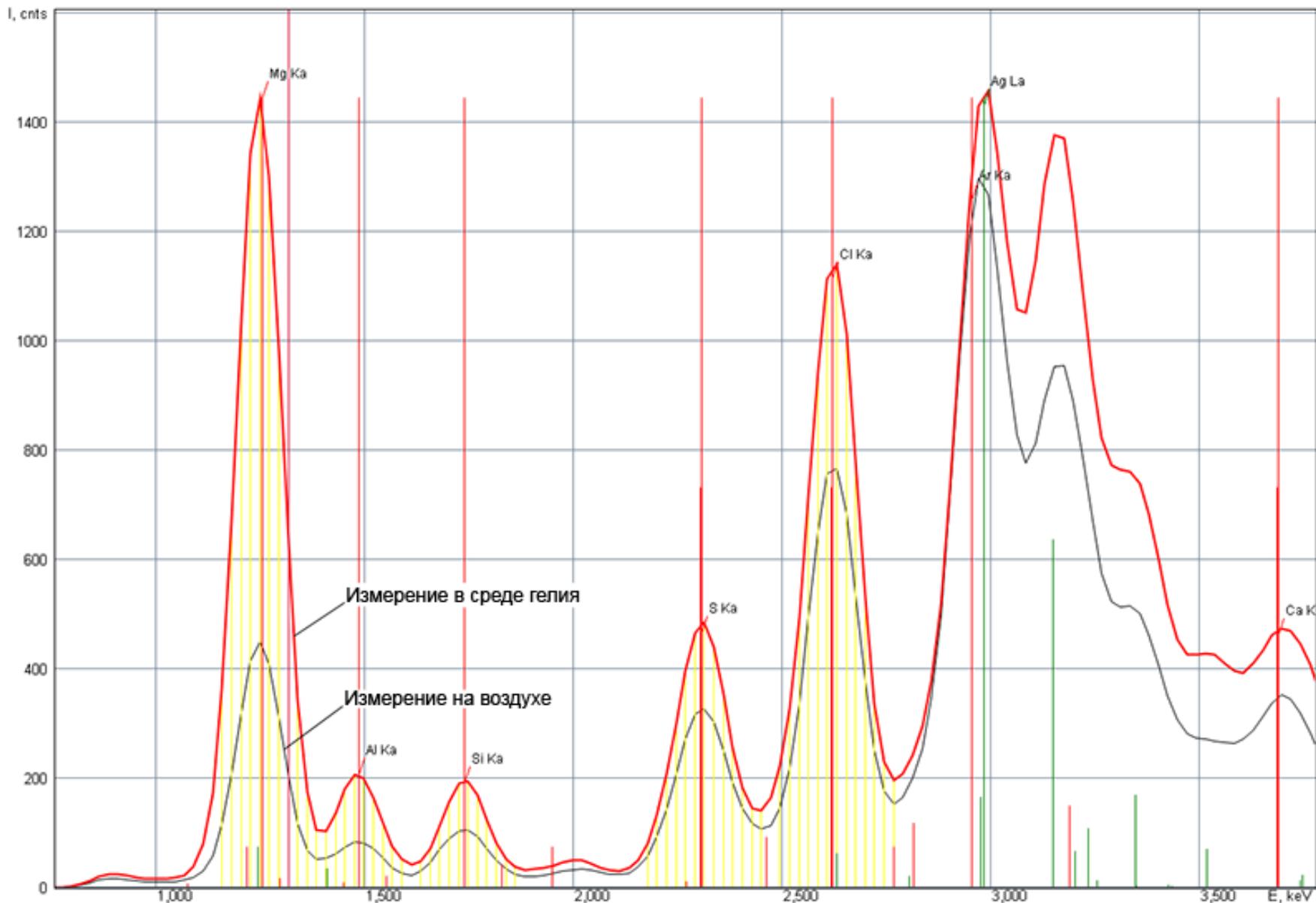
Устройство энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра



Энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный спектр



- Чтобы улучшить определение элементов с низким атомным номером Z , всю систему заполняют гелием или вакуумируют
- Более усовершенствованная система включает использование вторичной мишени. В этом случае устраняется тормозное излучение трубки, что приводит к снижению фона в спектре и лучшим пределам обнаружения

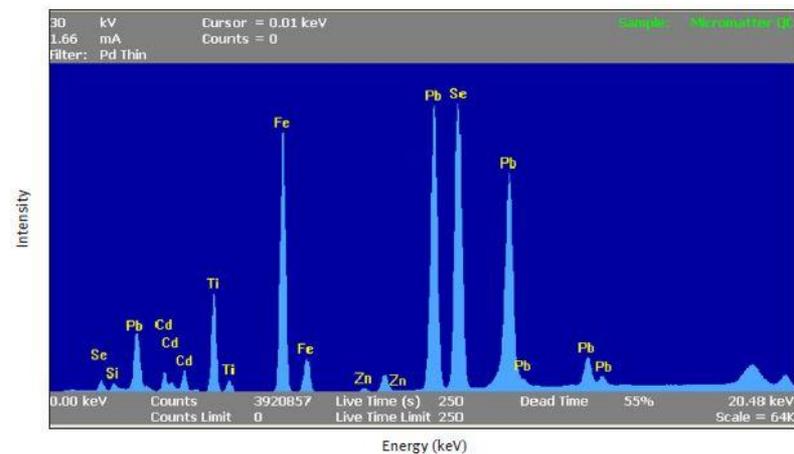


Спектры одного и того же образца, содержащего легкие элементы (Mg, Al, Si, Cl, S) полученные в атмосфере воздуха и гелия на приборе X-Art M.

Энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный спектрометр Shimadzu EDX-720 / 800HS



Энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный спектрометр QUANT'X

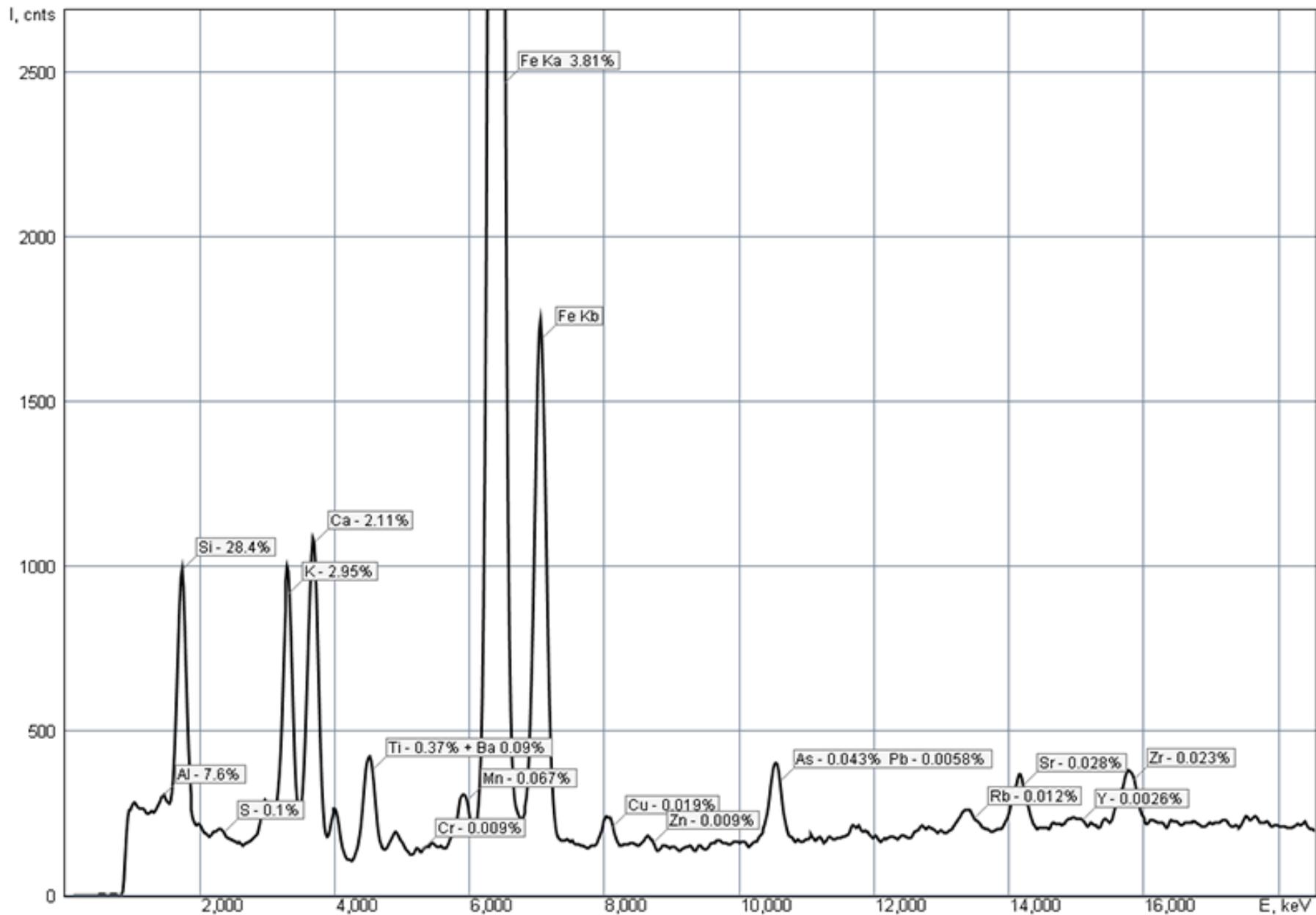


Ручные рентгеновские анализаторы металлов

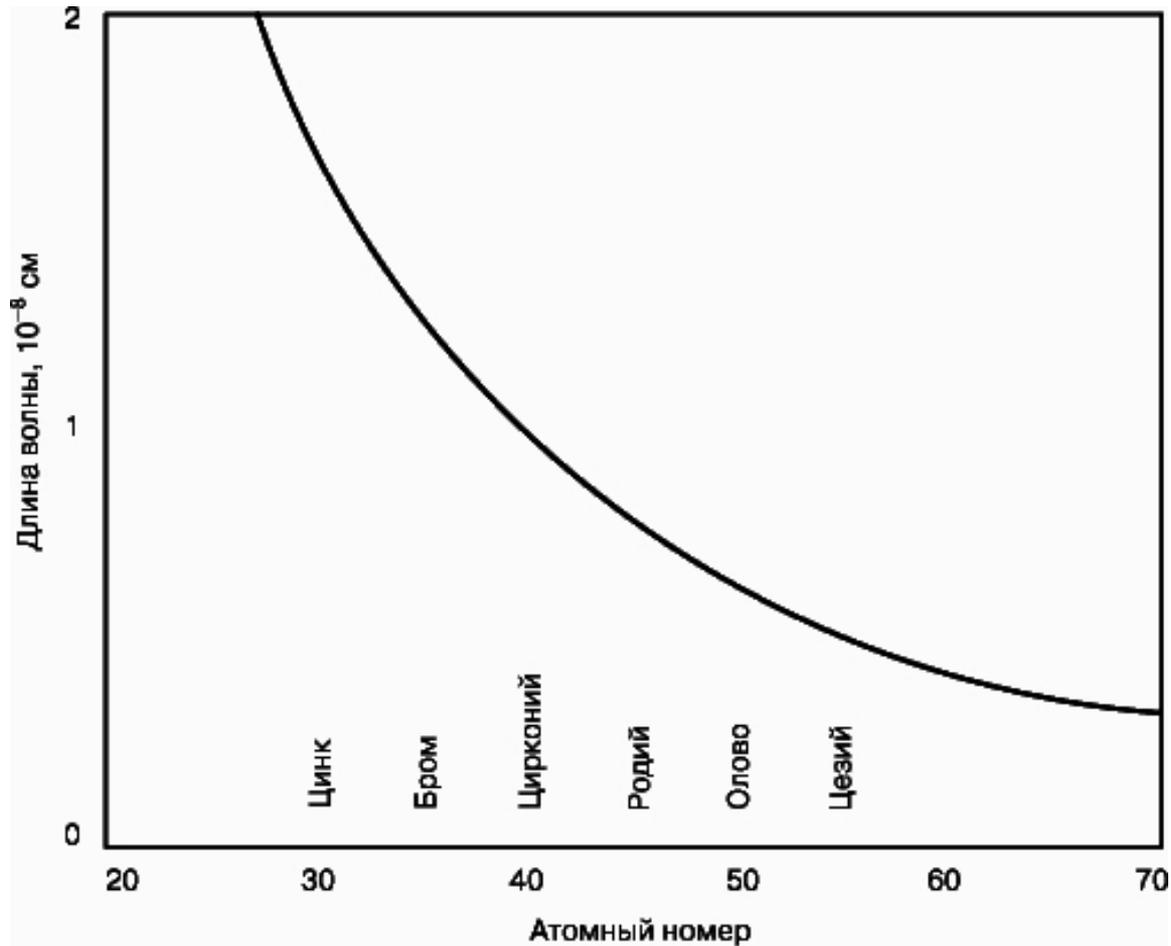


Качественный анализ

- **Для качественного анализа** предпочтительнее использовать приборы с волновой дисперсией, т.к. разрешающая способность их выше
- **По пикам полученного спектра** можно качественно определить, какие элементы присутствуют в образце
- Для идентификации элемента руководствуются положением его линии в спектре



Закон Мозли



Зависимость длин волн рентгеновского излучения, испускаемого химическими элементами от атомного номера

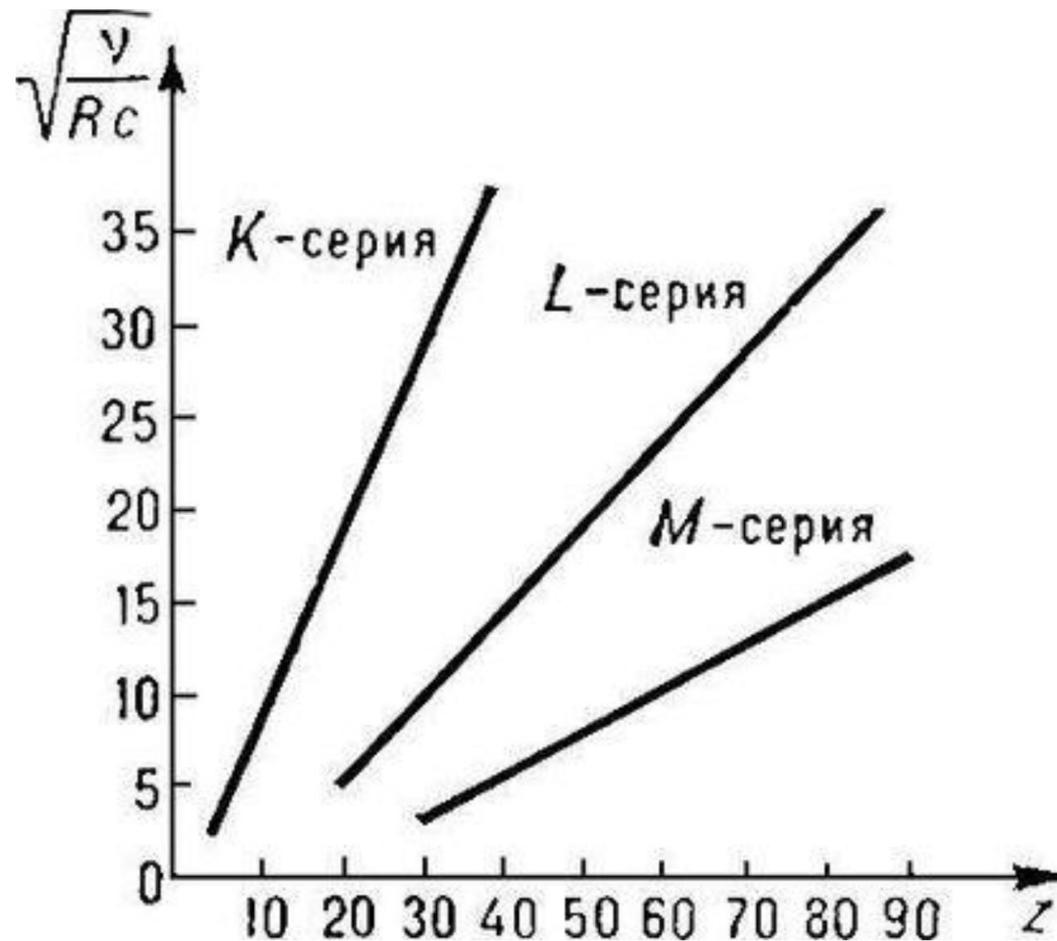
Закон Мозли

$$\nu = A(z - \sigma)^2$$

z – атомный номер элемента,
 A , σ – константы для всех
элементов в пределах одной
серии линий

**Квадратный корень из частоты
характеристического излучения
есть линейная функция
порядкового номера элемента**

- Установленная Мозли
зависимость позволяет по
измеренной длине волны или
частоте рентгеновской линии
точно узнать атомный номер
исследуемого элемента



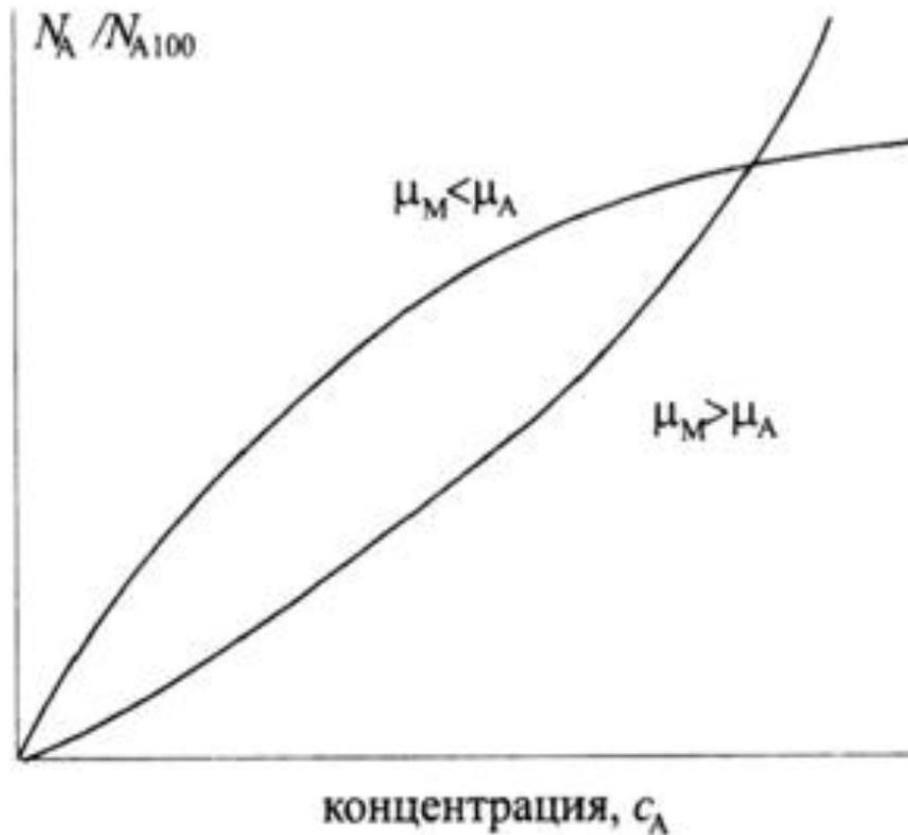
Количественный анализ

- Важная особенность метода РФА – наличие **матричных эффектов**, вызванных физическими причинами
- Помимо непосредственного возбуждения атомов определяемого элемента первичным рентгеновским излучением, могут наблюдаться и другие взаимодействия излучения с веществом:
- Возбуждение атомов определяемого элемента под действием **вторичного излучения от атомов** элементов матрицы, что приводит к завышению аналитического сигнала
- **Поглощение первичного излучения** атомами матрицы, при этом АС оказывается заниженным
- **Поглощение вторичного излучения**, испускаемого атомами определяемого элемента, атомами матрицы (вторичное поглощение), что тоже приводит к занижению АС

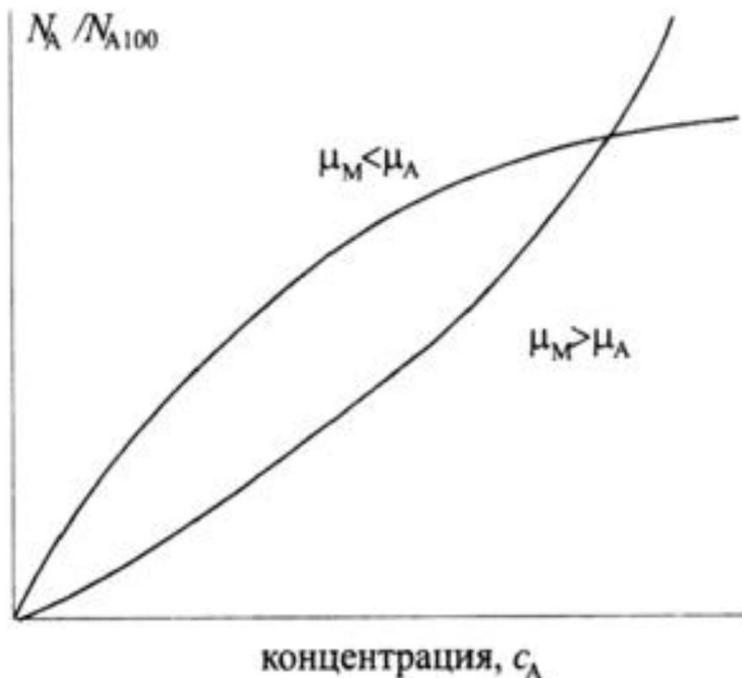
- В РФА детекторы регистрируют число импульсов в единицу времени – так называемую **скорость счета**, пропорциональную концентрации определяемого элемента **A**
- В условиях матричных эффектов **M** имеет место соотношение:

$$\frac{N_A}{N_{A100}} = \frac{\mu_A c_A}{\mu_A c_A + \mu_M c_M}$$

- N_A - скорость счета, измеренная для пробы
- N_{A100} - скорость счета для чистого вещества A
- $\mu_{A,M}$ - массовые коэффициенты поглощения (ослабления) для элементов A, M
- $c_{A,M}$ - концентрация элементов A, M



Зависимость относительной скорости счета от концентрации определяемого элемента при различных соотношениях коэф. ослабления



Зависимость относительной скорости счета от концентрации определяемого элемента при различных соотношениях коэф. ослабления

- Зависимость скорости счета от концентрации A линейна, если коэф-ты ослабления $\mu_{A,M}$ равны
- В любом другом случае градуировочный график будет нелинейным
- В настоящее время разработано много способов коррекции матричных эффектов
- Важнейшие из них следующие

Коррекция матричных эффектов

- **1. Метод внешнего стандарта** (метод градуировочного графика)

- График зависимости $I = f(c_A)$ строят для стандартных образцов, соответствующих по составу анализируемой пробе
- при этом матричные эффекты в равной степени сказываются на скорости счета и для СО, и для пробы

$$c_A = c_{cm} \frac{I_A}{I_{cm}}$$

- I_A, I_{cm} - интенсивности пробы и стандарта
- c_A, c_{cm} - концентрация элемента в пробе и стандарте

Коррекция матричных эффектов

- **2. Метод внутреннего стандарта**

В анализируемую пробу добавляют известное количество не содержащегося в ней элемента B , который называют внутренним стандартом или элементом сравнения

- Концентрацию A определяют с помощью соотношения :

$$c_A = c_B \frac{I_A}{I_B}$$

- Элемент сравнения должен отвечать ряду требований, чтобы избежать появления мешающих эффектов

- 3. Матричные эффекты можно уменьшить с помощью специальной пробоподготовки. Например, пробу можно **сильно разбавить** слабо поглощающим материалом – **сахарозой или целлюлозой**
- 4. Возможна коррекция **расчетным путем** – с использованием теоретических представлений о взаимодействии вещества с излучением (учитываются коэф-ты ослабления, выход флуоресценции, угол облучения поверхности образца, положение краев поглощения и т.д.)
- 5. **эмпирический математический подход** – создается формальная матем. модель, описывающая зависимость интенсивности линий от концентрации в виде функции (обычно полинома), учитывающей взаимные влияния элементов
- Используются и некоторые другие варианты

Практическое применение РФЛА

- Традиционно методом РФЛА **определяют главные компоненты** – при анализе материалов металлургической, строительной, стекольной, керамической, топливной промышленности, в геологии
- В последнее время наблюдается расширение сферы применения метода в медицине и научно-исследовательских целях
- Методом РФЛА принципиально возможно определить 87 элементов от бора до урана
- **Определение легких элементов, однако, вызывает трудности,** поскольку для элементов с малым порядковым номером **выход флуоресценции невелик.** Кроме того, излучение легких элементов лежит в длинноволновой области. Такое излучение характеризуется малой проникающей способностью лишь около 1 мкм, поэтому регистрируемая интенсивность излучения мала
- В силу этих причин даже натрий можно определять лишь в некоторых типах приборов

Практическое применение РФЛА

- Методом РФЛА анализируют главным образом **твердые образцы** - порошкообразные, стеклообразные, металлические
- Порошки должны иметь **размер зерен менее 300 мкм** для того, чтобы эффекты, связанные с рассеянием излучения, были воспроизводимыми. Образцы предварительно прессуют в таблетки без наполнителя или в смеси с целлюлозой, графитом либо поливиниловым спиртом.
- Для гомогенизации пробы можно использовать и метод **плавления**. В этом случае образец сплавляют с боратом натрия или лития в однородную стеклообразную массу. Этот способ пробоподготовки первоначально применяли при рентгенофлуоресцентном анализе продуктов стекольного производства.
- Металлические образцы анализируют непосредственно

Практическое применение РФЛА

- Важная особенность РФС состоит в том, что это **неразрушающий метод анализа**
- Он исключительно удобен для анализа приповерхностного слоя материалов и произведений искусства
- незаменимым благодаря наличию портативных спектрометров с радиоактивными источниками излучения и детекторов с энергетической дисперсией
- Такие приборы можно легко доставить непосредственно к анализируемому объекту.

Практическое применение РФЛА

- Наряду с главными компонентами, метод РФС позволяет определять и **сопутствующие**, а также – после концентрирования – **следовые** компоненты
- Однако для определения следов лучше использовать не традиционный, а один из современных вариантов РФС с энергетической дисперсией, называемый РФС с полным отражением
- Абсолютные пределы обнаружения в этом методе достигают нескольких нг. Кроме того, одна и та же градуировочная зависимость может быть использована для анализа образцов с разными матрицами.

Некоторые аналитические задачи, легко решаемые при использовании РФ-спектрометров

- Массовый анализ горных пород и руд
- Экспрессное определение состава продуктов обогащения руд
- Определение элементов в легированных сталях
- Анализ археологических объектов (монет, серег, колец, шлаков, костей)
- Определение редкоземельных элементов в модельных материалах для захоронения высокоактивных отходов
- Определение драг. металлов в продуктах переработки плат электроники
- Определение характеристических элементов в косметической продукции
- Идентификация драгоценных камней и сплавов
- Исследование состава строительных материалов на предмет соответствия ГОСТ
- Химическое картирование горных выработок полевошпатowego сырья
- Экспресс анализ осадков при электролитической очистке воды
- Анализ примесей в металлах
- Определение марок сплавов
- Обнаружение отклонений в технологических процессах по составу промежуточных продуктов