

АТОМНО-ЭМИССИОННЫЙ анализ



Доцент кафедры химической метрологии
ХНУ им. В.Н. Каразина

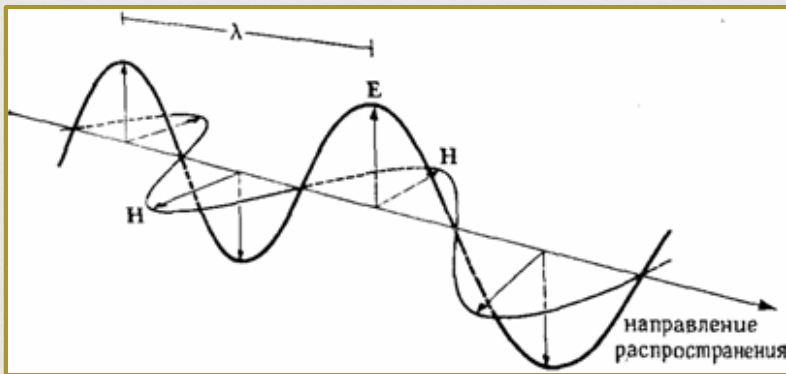
к.х.н.

К.Н. Беликов

Спектральные методы анализа



Излучение: волна и частица



Длина волны λ (м)

Скорость c (м/с)

(в вакууме $2.9979 \cdot 10^8$ м/с)

Частота ν (с⁻¹)

Волновое число (число волн на единицу расстояния) $1/\lambda$

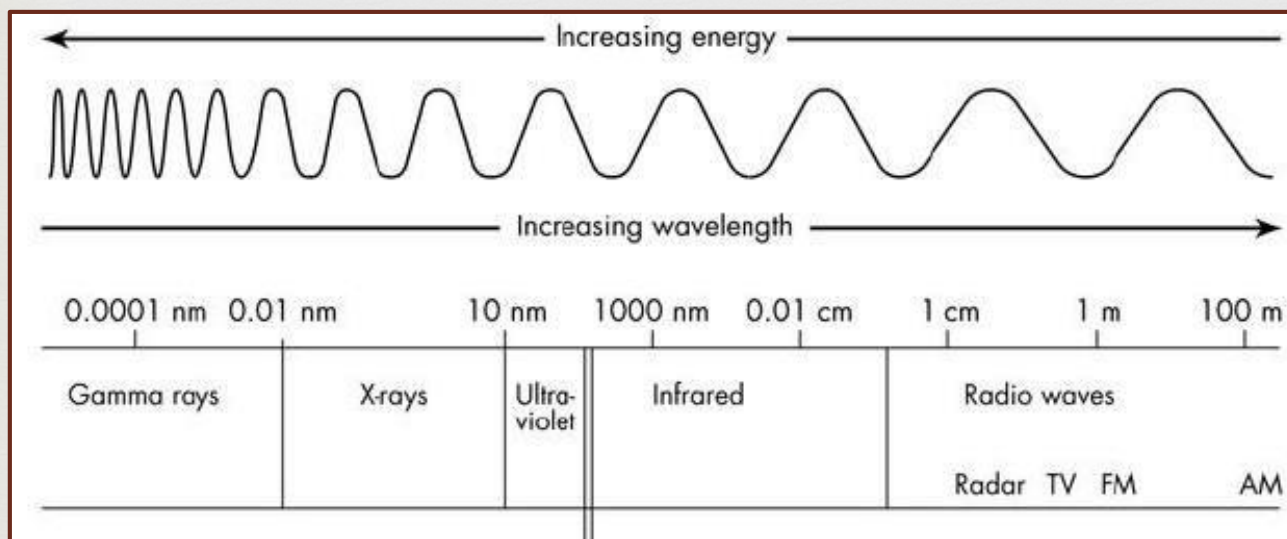
Энергия $E = h \nu$

Мощность излучения – количество энергии, переносимой излучением в единицу времени, $P = E \Phi = h \nu \Phi$ (ватт)

Интенсивность излучения – мощность излучения от точечного источника на единицу телесного угла (ватт/стерадиан)

Частота и длина волны

$$\lambda = c / \nu; \quad E = h \nu; \quad E = h c / \lambda$$



Излучение: волна и частица

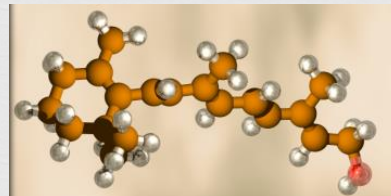
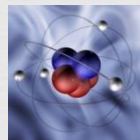
Излучение как волна



Взаимодействие с массой вещества:

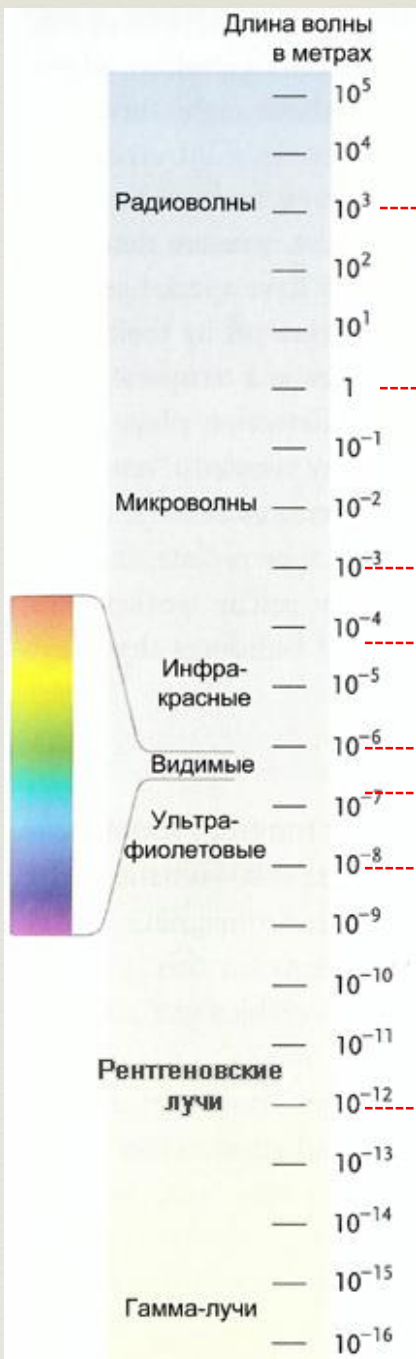
- ❖ Рассеяние;
- ❖ Поляризация и оптическая активность;
- ❖ Преломление (рефракция)

Излучение как частица



Взаимодействие с частицами вещества :

- ❖ Поглощение кванта;
- ❖ Испускание кванта;



Ядерный магнитный резонанс

Молекулярные вращения

Молекулярные вращения и низкочаст. кол.

Молекулярные колебания

$2 \cdot 10^{-8}$ - $7.5 \cdot 10^{-7}$ м - Переходы валентных электронов

10^{-8} - $2 \cdot 10^{-7}$ м - Переходы средних электронов

Переходы К- и L-электронов

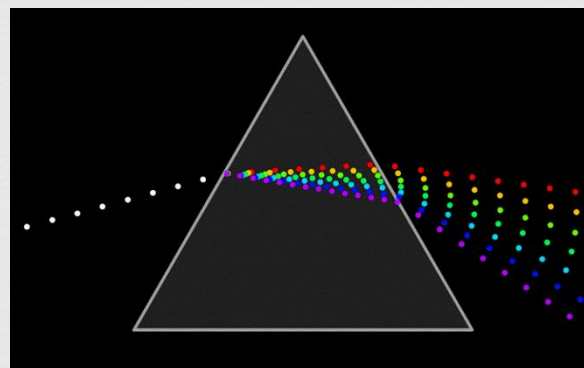
Переходы в ядре

Оптические методы

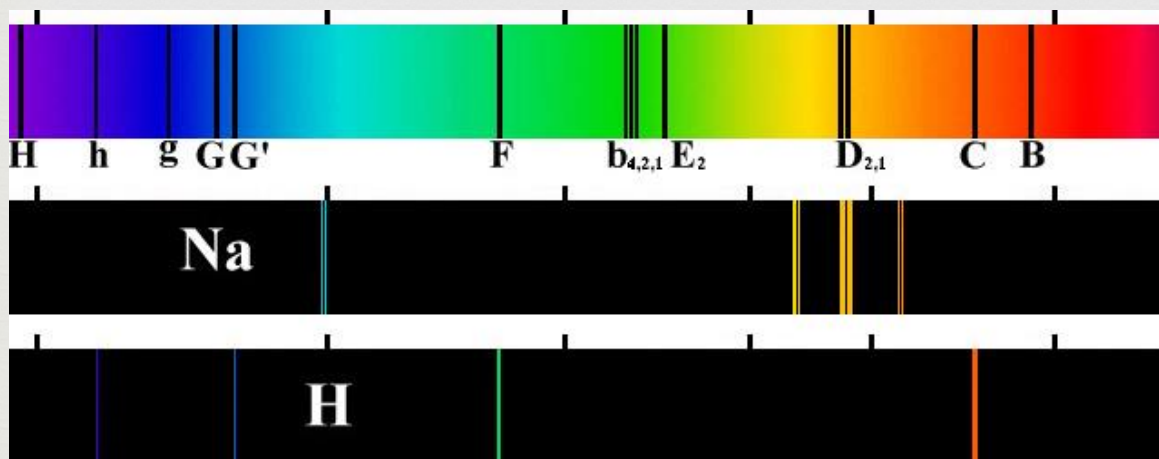
Дальняя УФ	10^{-8} - $2 \cdot 10^{-7}$ м	10-200 нм
Ближняя УФ	$2 \cdot 10^{-7}$ - $4 \cdot 10^{-7}$ м	200-380 нм
Видимая	$4 \cdot 10^{-7}$ - $7.5 \cdot 10^{-7}$ м	380-750 нм
Ближняя ИК	$7.5 \cdot 10^{-7}$ - $2.5 \cdot 10^{-6}$ м	0.75-2.5 мкм
Средняя ИК	$2.5 \cdot 10^{-6}$ - $5 \cdot 10^{-5}$ м	2.5-50 мкм
Дальняя ИК	$5 \cdot 10^{-5}$ - 0.001 м	50-1000 мкм

- 1) Применяются похожие приборы (линзы и зеркала для фокусирования, призмы, дифракционные решетки, интерференционные фильтры);
- 2) Частоты сравнимы с собственными частотами атомов и молекул.





Йозеф Фраунгофер
1787-1826



Спектральный анализ



Роберт Вильгельм
Бунзен
1811–1899



Густав Роберт
Кирхгоф
1824 –1887



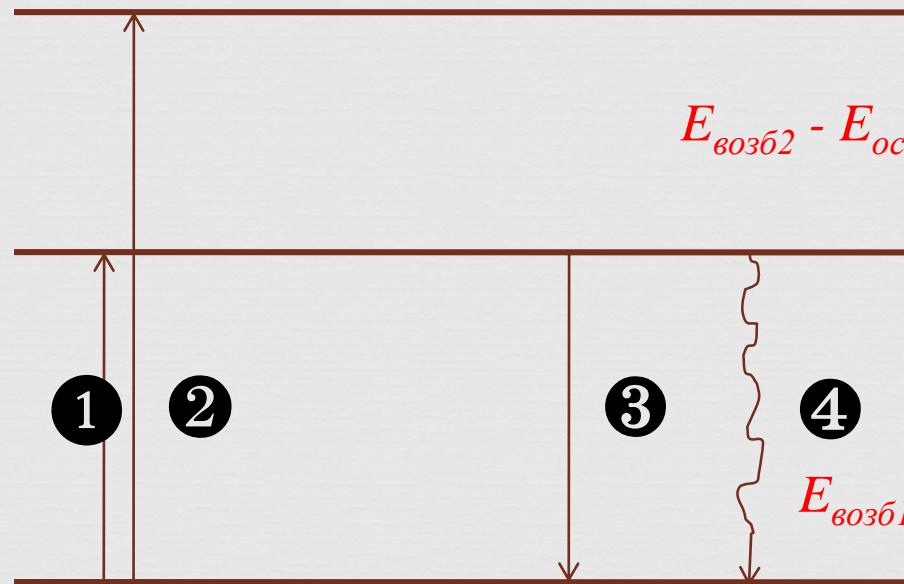
*«Каждый элемент имеет свой линейчатый спектр,
а значит строго определенный набор линий;
подобные линии можно использовать для анализа
состава веществ не только на Земле, но и на звездах»*

Поглощение и испускание света

Возбужденный уровень 2

Возбужденный уровень 1

Основной уровень



$$E_{\text{возб}2} - E_{\text{осн}} = h \nu_2;$$

$$E_{\text{возб}1} - E_{\text{осн}} = h \nu_1;$$

- 1,2 - поглощение;
- 3 - испускание;
- 4 - безызлучательный переход

Методы атомно-эмиссионной спектроскопии основаны на **термическом** возбуждении свободных или слабо связанных атомов и ионов и регистрации их оптических спектров испускания

Качественный анализ



сопоставление длины волны наблюдаемой линии со значениями из атласов (библиотек) спектральных линий

Количественный анализ

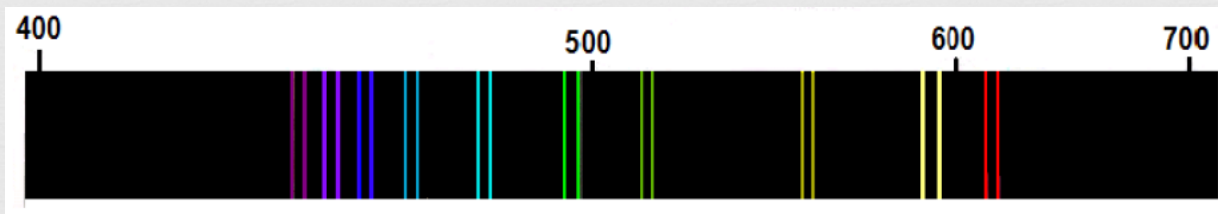
Уравнение Ломакина (1930 г.): $\lg I = b \lg C + \lg a$

Уравнение Шайбе (1931 г.): $I = aC^b$

Характеристики спектральных линий



Атомные спектры возникают при испускании или поглощении электромагнитного излучения ионами, свободными или слабо связанными атомами (в газах или парах) и состоят из отдельных спектральных линий (т.е. являются линейчатыми).



Эмиссионный спектр
паров натрия

Атомные спектры обладают ярко выраженной индивидуальностью: каждому элементу соответствует свой спектр нейтрального атома и спектры последовательно образующихся положительно заряженных ионов.

Возникновение оптических спектров и их характер определяет система валентных электронов атомов.

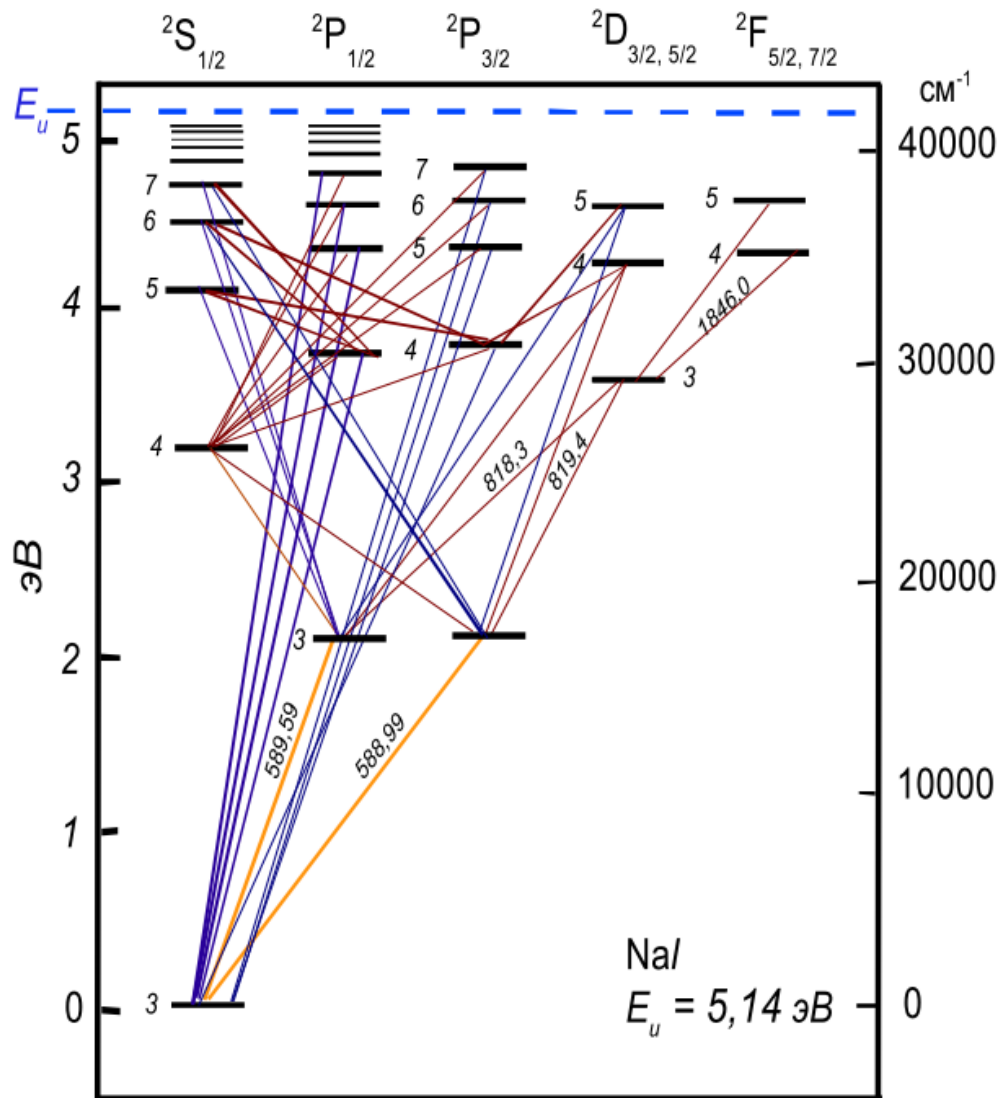


Схема электронных переходов в атоме натрия

Линии, обусловленные переходом электрона на основной уровень, принято называть **резонансными**.

Особое аналитическое значение имеют все резонансные линии, соответствующие переходам с первого возбужденного уровня.

Ввиду особой интенсивности этих линий, обеспечивающей большую чувствительность, их наиболее часто используют для аналитических целей.

По наличию в спектре образца характеристических для данного элемента линий можно провести **качественный элементный анализ объекта**.

Для получения **количественной информации** необходимо измерять **интенсивность спектральной линии** определяемого элемента.

Интенсивность эмиссионных спектральных линий

Интенсивность спектральной линии – это мощность электромагнитного излучения, спонтанно испускаемого единицей объёма вещества и обусловленного определенным квантовым переходом в атомах исследуемого элемента.

Интенсивность спектральной линии, соответствующей переходу атома из возбужденного состояния в состояние с меньшей энергией, связана с числом фотонов n , которые испускает источник за время Δt , и энергией фотона $h\nu$:

$$I = \frac{nh\nu}{\Delta t}$$

Число фотонов с энергией $h\nu$, испускаемых единицей объема газа, содержащего определяемый элемент, связано с числом атомов, которые находятся в возбужденном состоянии N_m и вероятностью спонтанного излучения по Эйнштейну A_{mk} (число переходов, происходящих за 1 секунду с уровня m на уровень k):

$$n = N_m A_{mk} \Delta t$$

$$I = N_m A_{mk} h\nu$$

Число атомов N_m , которые находятся в возбужденном состоянии, зависит от температуры T и описывается распределением Больцмана.

$$I = h\nu N A_{mk} \frac{g_m}{g_0} e^{-\frac{E_m}{kT}}$$

g_m, g_0 – статистические веса состояния m и основного состояния атома,
 E_m – энергия состояния m .

Интенсивность непосредственно связана с числом искомых атомов, находящихся в заданном объеме газовой фазы.

С ростом температуры возрастает отношение заселенностей уровней N_m/N и интенсивность линий.

Однако интенсивность атомных линий растет только до определенного значения температуры, а затем начинает понижаться. Это обусловлено протеканием **процессов ионизации**.

Увеличение энергии теплового столкновения приводит к тому, что часть атомов приобретает энергию, превышающую энергию ионизации и превращается в ионы.



В эмиссионном спектре появляются новые, ионные линии, а интенсивность атомных линий понижается.

$$I = (1 - \alpha) h\nu N A_{mk} \frac{g_m}{g_0} e^{-\frac{E_m}{kT}}$$

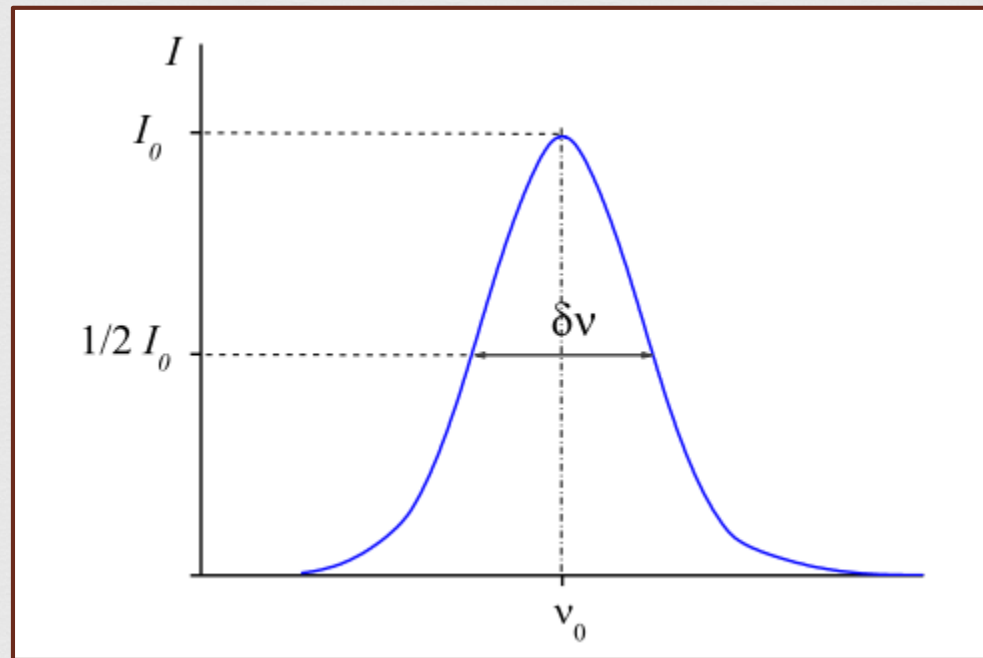
Таким образом, зависимость интенсивности линий от температуры проходит через максимум, называемый **оптимальной температурой**, положение которого для каждой линии каждого элемента различно. Наименьшая оптимальная температура характеризует линии элементов с низкой энергией ионизации.

Минимальные значения пределов обнаружения достигаются при температурах, близких к оптимальной температуре.

Ширина спектральной линии

Ширина спектральной линии - это мера ее некогерентности.

Определяется как расстояние $\delta\lambda$ ($\delta\nu$) между точками контура спектральной линии, в которых интенсивность равна половине её максимального значения:



Три фактора, определяющие ширину линии – **естественная ширина** и уширения, обусловленные **эффектами Лоренца и Доплера**.

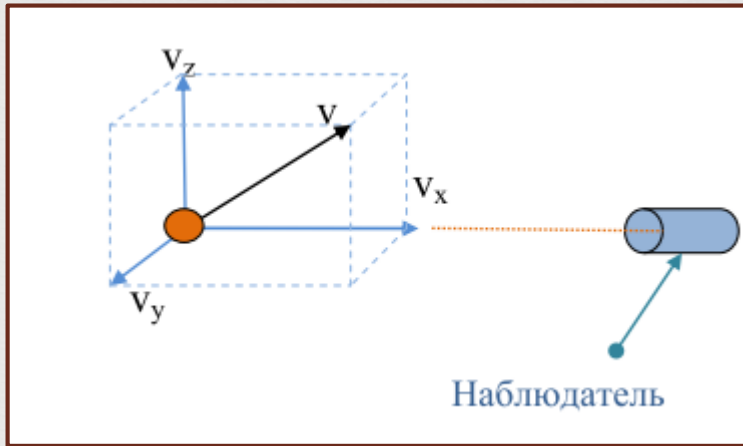
Естественная ширина спектральной линии обусловлена квазидискретным характером величины энергии возбужденного уровня:

$$\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{c} \frac{1}{2\pi\tau_k}$$

Если время жизни возбужденного состояния атомов составляет 10^{-8} с, то для резонансной линии $\lambda = 500$ нм ее естественная ширина составляет $1,33 \cdot 10^{-5}$ нм

Реальная ширина спектральных линий значительно выше, поскольку определяющий вклад в их ширину вносят **эффекты Доплера и Лоренца**.

Доплеровское уширение линий



$$\delta\lambda_D = 2\sqrt{2 \ln 2} \lambda_0 \sqrt{\frac{1000RT}{A_3 c^2}} = 7,2 \cdot 10^{-7} \lambda_0 \sqrt{\frac{T}{A_3}}$$

Для линии натрия ($A_3 = 23$) с длиной волны 589,0 нм при температуре $T = 2000$ °К доплеровская ширина равна $3,95 \cdot 10^{-3}$ нм, т. е. больше естественной ширины на два порядка.

Уширение спектральных линий, обусловленное эффектом Доплера, значительно превышает естественную ширину и зависит от температуры атомного пара, а также массы атома определяемого элемента.

Ударное уширение линий (эффект Лоренца)

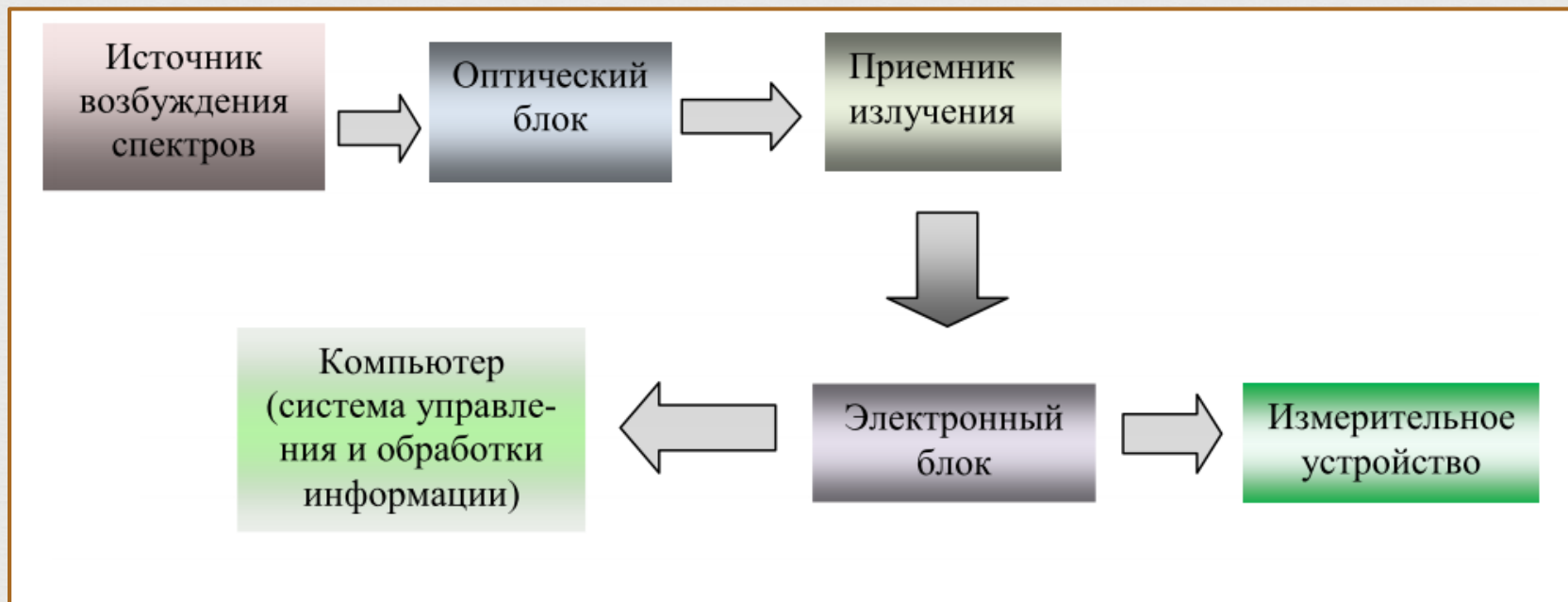
Процесс столкновения приводит к нарушению (обрыву) процесса излучения классического осциллятора. В результате этого наблюдаемое время жизни уменьшается. Это приводит к уширению контура излучаемой линии.

$$\delta\nu_L \approx \frac{1}{\tau_c} \approx \pi d^2 \frac{PN_A}{RT} \sqrt{\frac{kT}{m}} = \pi d^2 \frac{PN_A}{RT} \sqrt{\frac{3000RT}{A_3}} = \pi d^2 PN_A \sqrt{\frac{3000}{RTA_3}}$$

Для линии натрия ($A_3 = 23$) с длиной волны 589,0 нм при температуре $T = 8000$ °К лоренцевская ширина имеет величину порядка $2 \cdot 10^{-3}$ нм, т. е. больше естественной ширины на два порядка и близка к доплеровскому уширению.

Ударное уширение спектральных линий зависит от давления, температуры атомного пара, а также от диаметра и массы атома определяемого элемента.

Аппаратурное обеспечение



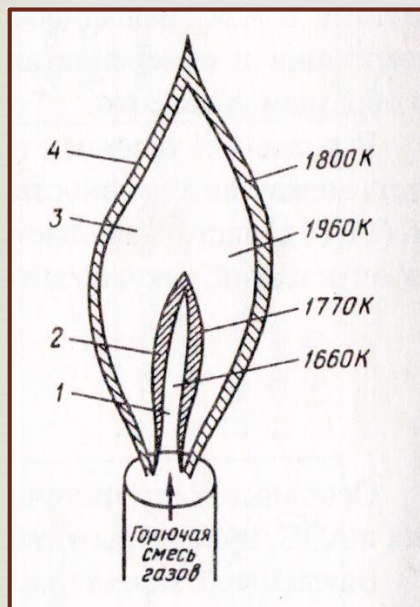
Источники возбуждения в АЭС

Источник	Условия	Температура, °С
Пламя	Жидкая проба впрыскивается в пламя; горючий газ и окислитель	От 900 до 3200

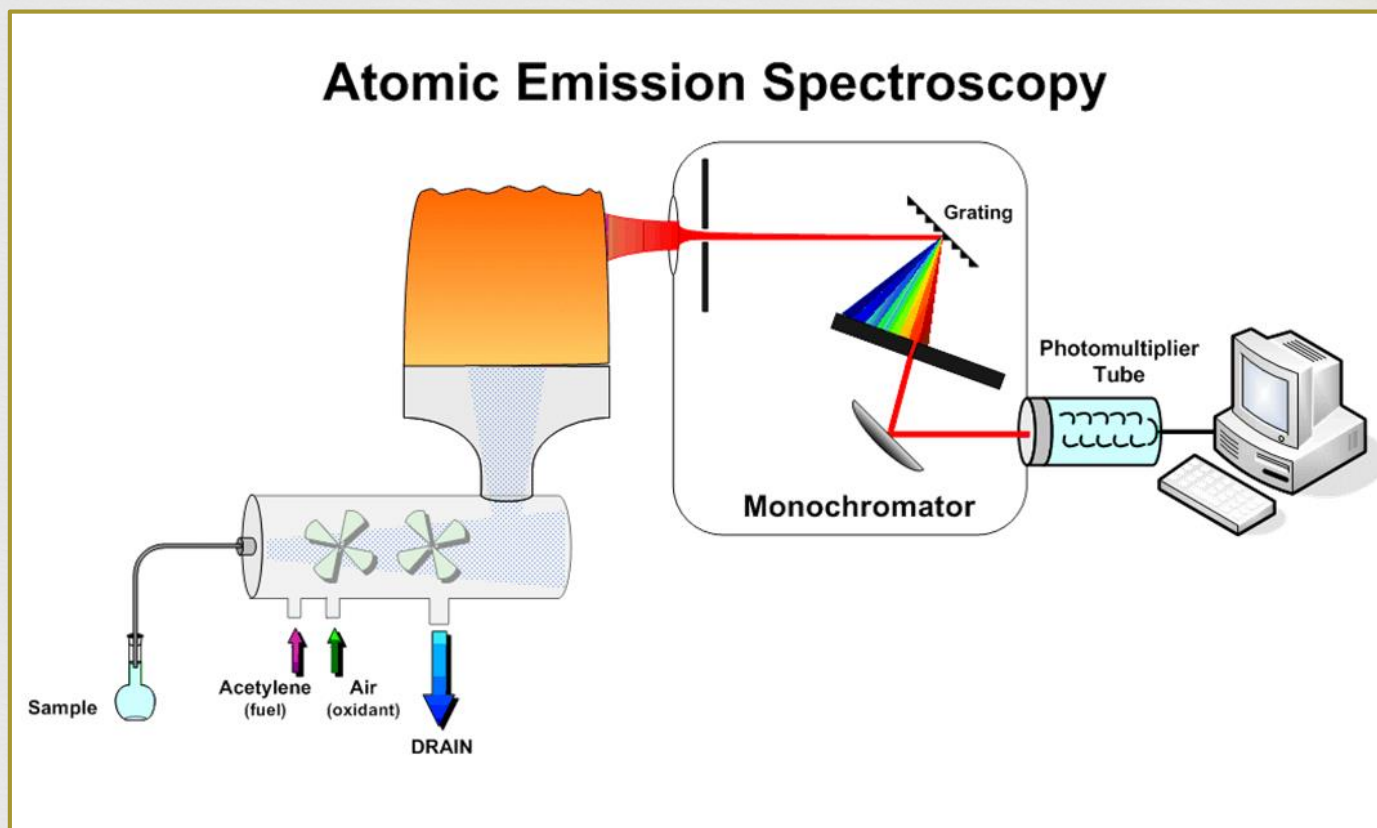
- Пламя должно быть высоко прозрачным (невысокая оптическая плотность во всем спектральном интервале от 190 до 860 нм).
- Собственное излучение пламени должно быть слабым.
- Эффективность атомизации в пламени должна быть как можно большей.
- Степень ионизации определяемого элемента должна быть низкой.

Состав горючей смеси	Температура пламени, °К
Метан - воздух	1970
Пропан-бутан - воздух	2200
Ацетилен - воздух	2450
Ацетилен - закись азота	3200
Водород - воздух	2300
Водород - закись азота	2900
Пропан-бутан - закись азота	2900

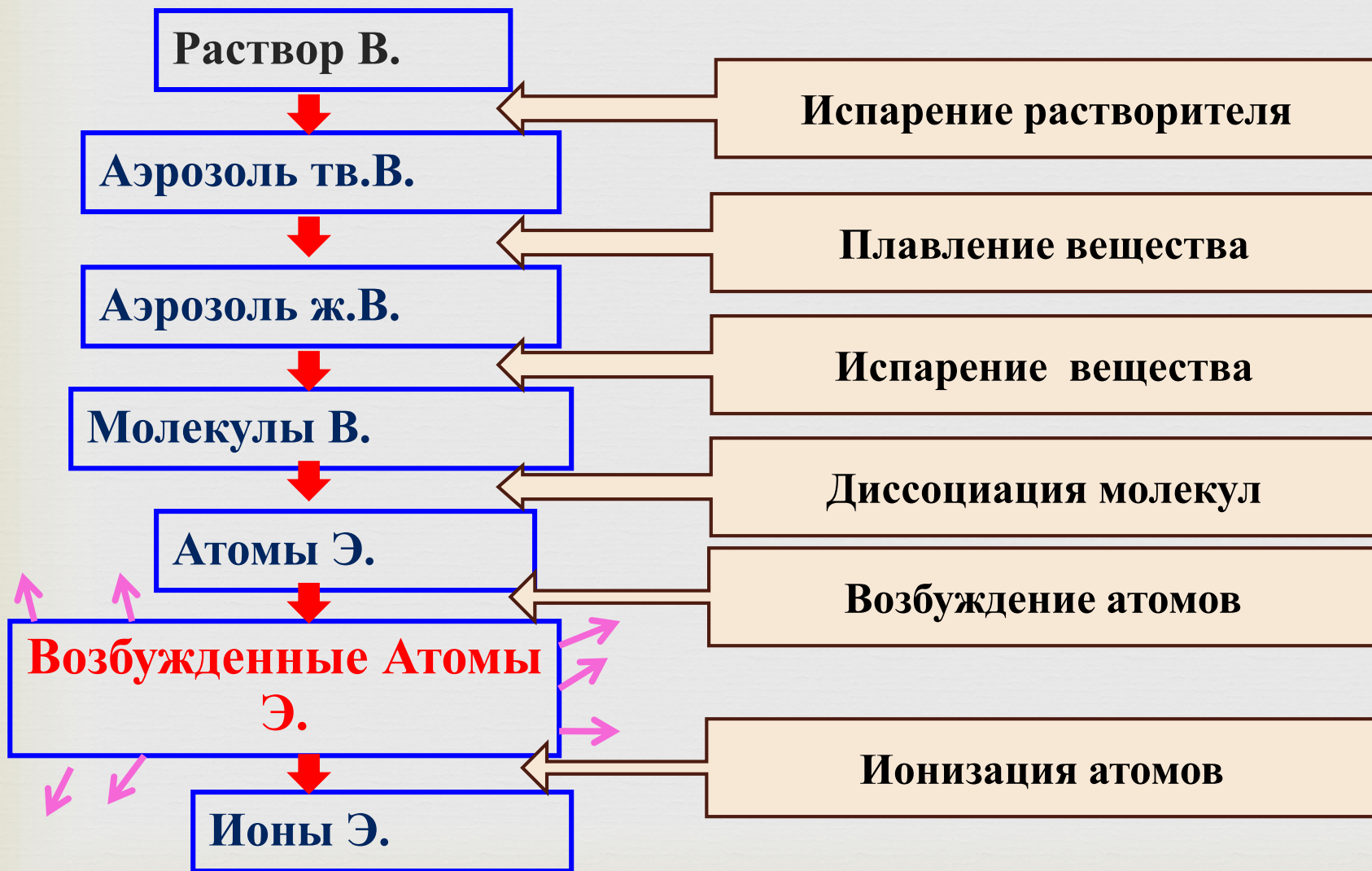
Пламенная атомно-эмиссионная спектроскопия



- 1 - восстановительная зона;
- 2 - внутренний конус;
- 3 - окислительная зона;
- 4 - внешний конус



Процессы в атолизаторе



Спектроскопические буферы

Физико-химические помехи:

- ✓ неполнота испарения и атомизации;
- ✓ образование тугоплавких и малодиссоциированных соединений;
- ✓ ионизация:



Добавляемые вещества:

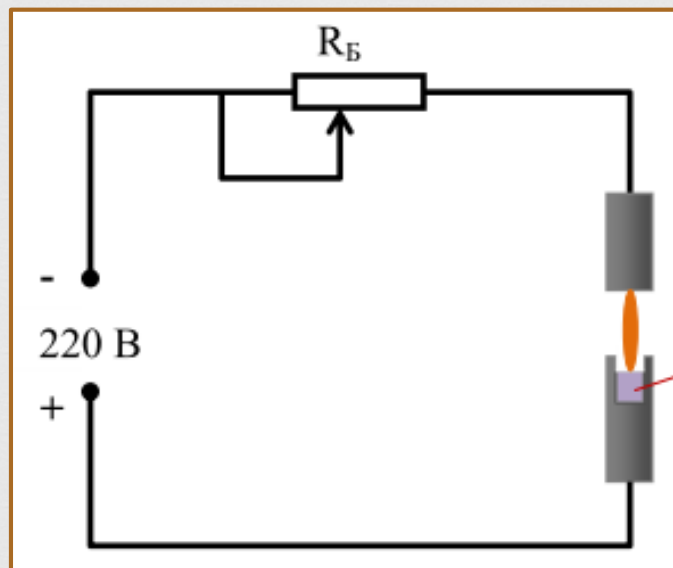
- ✓ ПАВ;
- ✓ соли La;
 комплексообразователи;
- ✓ легкоионизируемые элементы
 $K = K^+ + e$

Типы буферов:

- Освобождающие
- Защитные
- Испаряющие
- Ионизационные

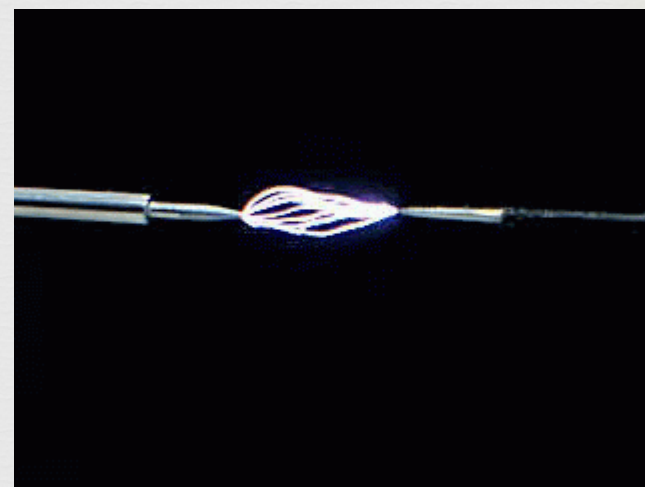
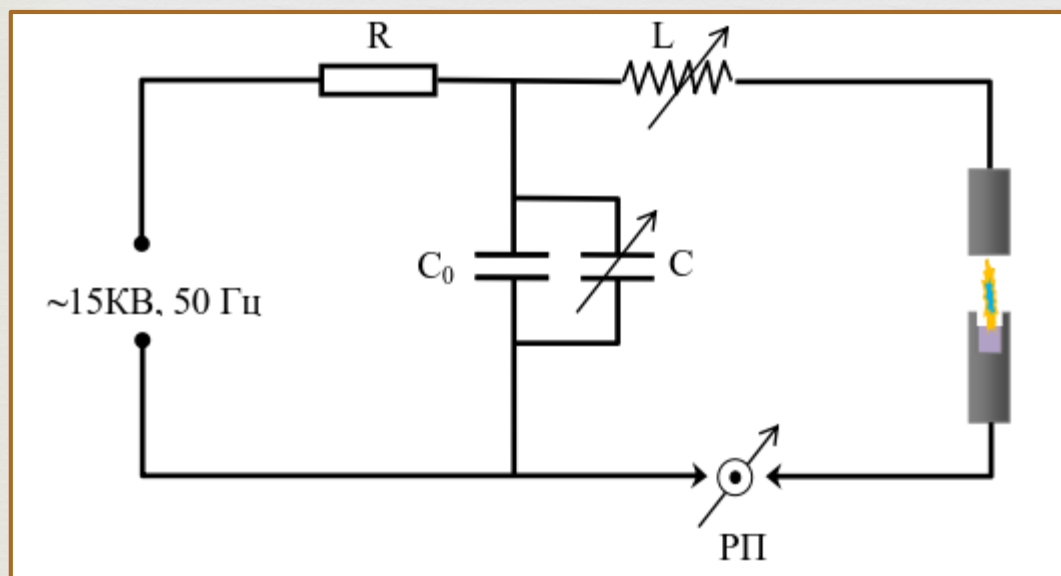
Источники возбуждения в АЭС

Источник	Условия	Температура, °С
Электрическая дуга (эл. разряд между электродами)	10-25, 220 В, Проба наносится на электрод	3000-7000



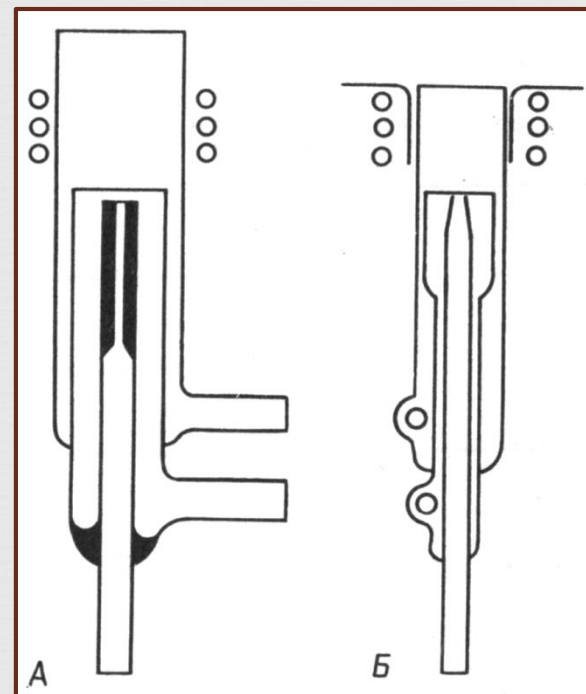
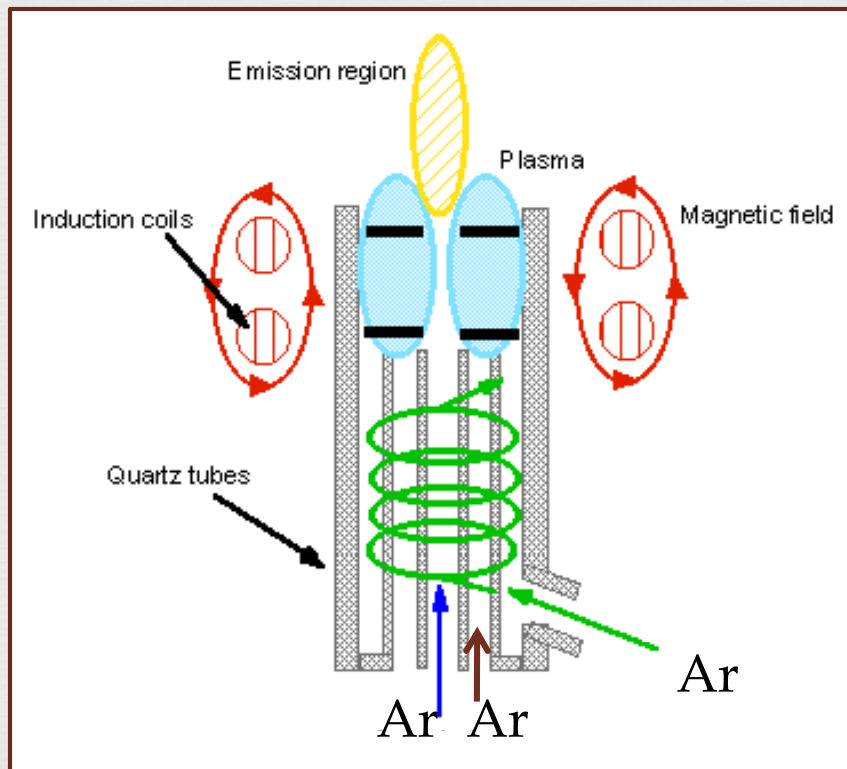
Источники возбуждения в АЭС

Источник	Условия	Температура, °С
Электрическая искра (короткие разряды между электродами)	15-40 кВ, 120 вспышек в секунду, 10^4 - 10^5 Гц	От 7000 до 10000 и 12000 - 30000 в канале искры



Источники возбуждения в АЭС

Источник	Условия	Температура, °С
Горелка с индуктивно-связанной плазмой (ИСП)	Плазма в магнитном поле. Жидкая проба	7000 до 10000



Типы горелок: А – горелка Гринфилда;
Б – горелка Фассела-Скотта

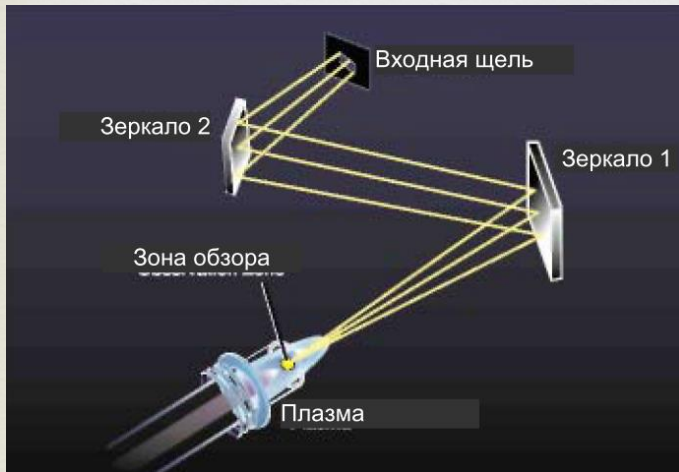
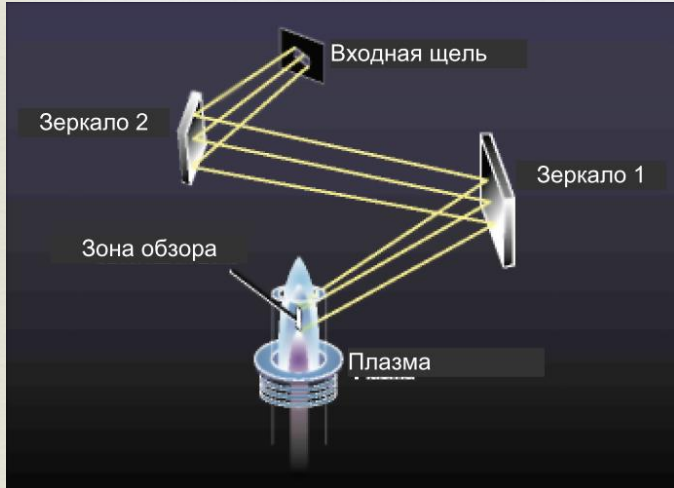
Индуктивно-связанная плазма (ИСП) – это тип газового разряда, возбуждаемого переменным магнитным полем при помощи индукционной катушки (индуктора).

ИСП зажигается и поддерживается за счёт циклических индуцированных вихрей электрического тока свободных электронов (и ионов) в плазме.

Работающая при атмосферном давлении ИСП впервые описана Ридом в 1961 г. и использовалась как метод выращивания кристаллов при высокой температуре.



Сравнение пределов обнаружения для спектрометров Vista-Pro (Varian) с радиальным и аксиальным расположением горелки



Элемент	Длина волны, нм	Предел обнаружения (3σ), мкг/л	
		Vista-Pro Radial	Vista-Pro Axial
Al	167,016	0,9	0,2
As	188,979	5	1,5
B	249,773	0,6	0,1
Ba	455,403	0,15	0,03
Be	234,861	0,05	0,01
Ca	396,847	0,06	0,01
Cd	214,438	0,6	0,05
Co	238,892	1	0,2
Cr	267,716	0,9	0,15
Cu	327,396	1	0,3
Fe	259,940	0,8	0,1
K	766,490	4	0,3
Li	670,784	1	0,06
Mg	279,553	0,04	0,01
Mn	257,610	0,08	0,03
Na	589,592	2	0,15
Ni	231,604	1,4	0,3
P	177,432	5	2
Pb	220,353	5	0,8
S	181,971	10	5
Ti	334,941	0,2	0,1
Zn	213,856	0,8	0,2

Плазма обладает высокой стабильностью.
 При температурах 6000 – 10000 °К полностью диссоциирует подавляющее большинство соединений, что позволяет устранить влияние состава пробы на результаты анализа.

Обзор плазмы при анализе методом АЭС-ИСП

Какой вариант обзора плазмы выбрать:



Радиальный?



Аксиальный?

Обзор плазмы при анализе методом АЭС-ИСП

Правильный ответ: двойной обзор



Радиальный



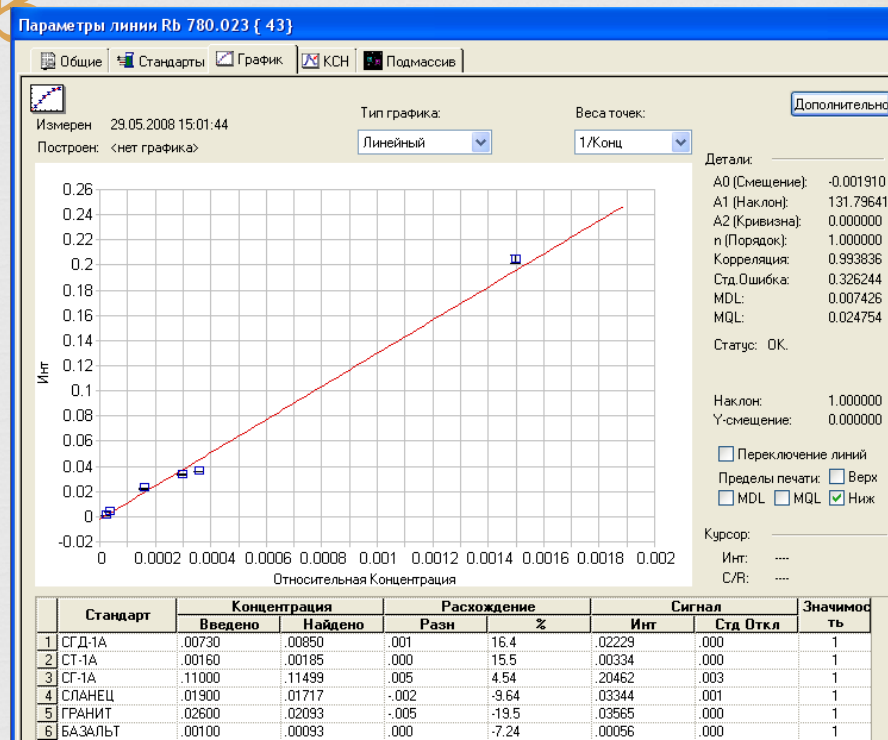
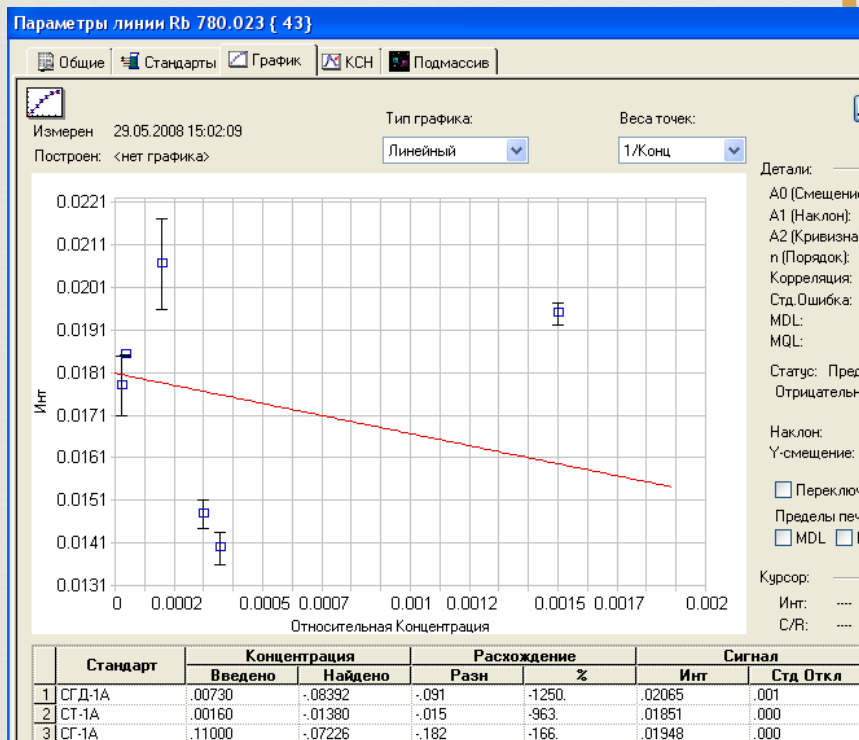
Аксиальный

Двойной обзор необходим, чтобы использовать точность радиального обзора плазмы и высокую чувствительность аксиального обзора плазмы

Аксиальное наблюдение – для максимальной чувствительности при определении следовых количеств

Радиальное наблюдение при определении Rb

Аксиальное наблюдение при определении Rb



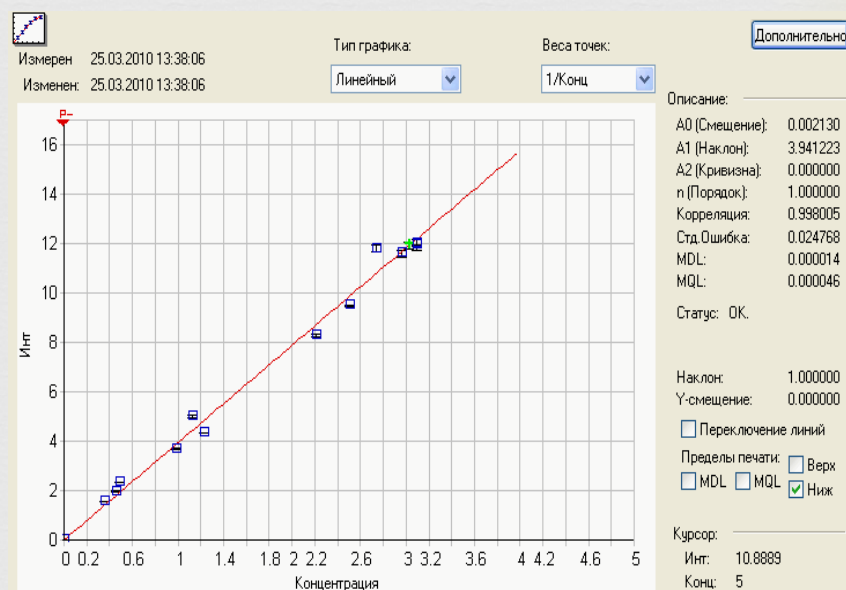
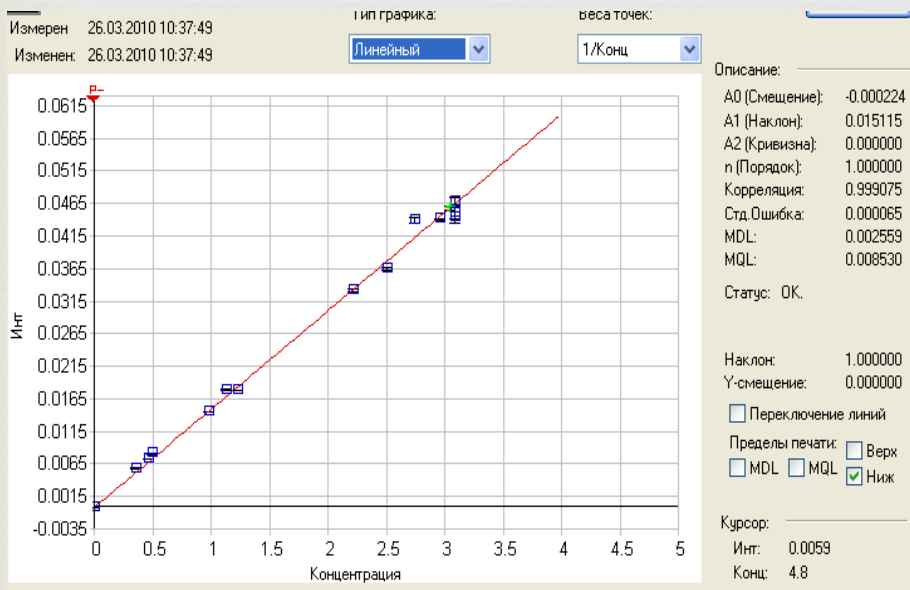
При радиальном обзоре плазмы чувствительность и точность при измерении интенсивности сигналов рубидия неудовлетворительна

Радиальное наблюдение – для максимальной точности при определении матричных элементов

Радиальное наблюдение при определении Калия, Коэффициент корреляции – 0.9991



Аксиальное наблюдение при определении Калия, Коэффициент корреляции – 0.9980



При радиальном обзоре плазмы воспроизводимость и точность определения матричных элементов лучше

Основные достоинства метода ICP-AES



- Возможность определения в аргонной плазме всех элементов, в том числе трудновозбудимых, а также образующих тугоплавкие соединения
- Линейный динамический диапазон до пяти порядков, что делает этот метод анализа уникальным среди спектральных методов
- Низкие пределы обнаружения. Для большинства элементов - на уровне долей ppb

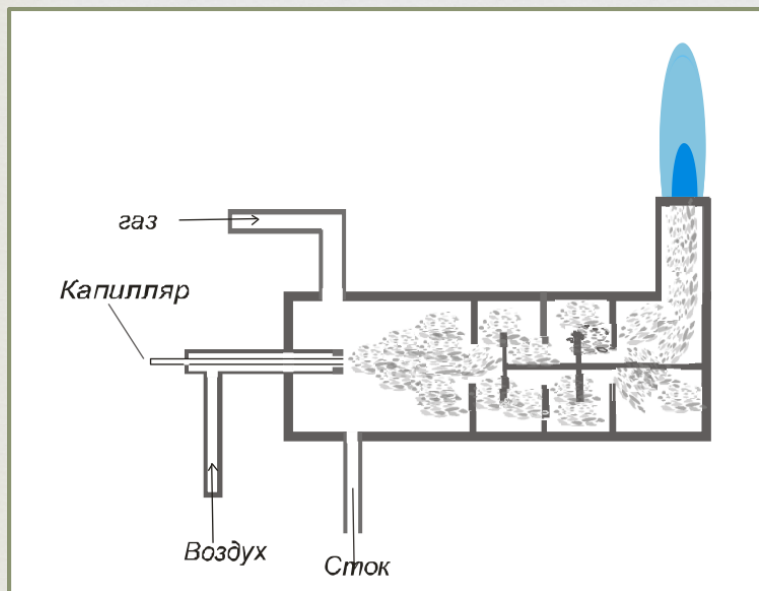
- Возможность одновременного определения в образце до 70 элементов
- Малый расход анализируемого раствора, что делает метод пригодным для исследования биологических проб и нанообъектов
- Высокая воспроизводимость и точность анализа
- Автоматизация, компьютерное управление, высочайшая продуктивность анализа

Источники возбуждения в АЭС

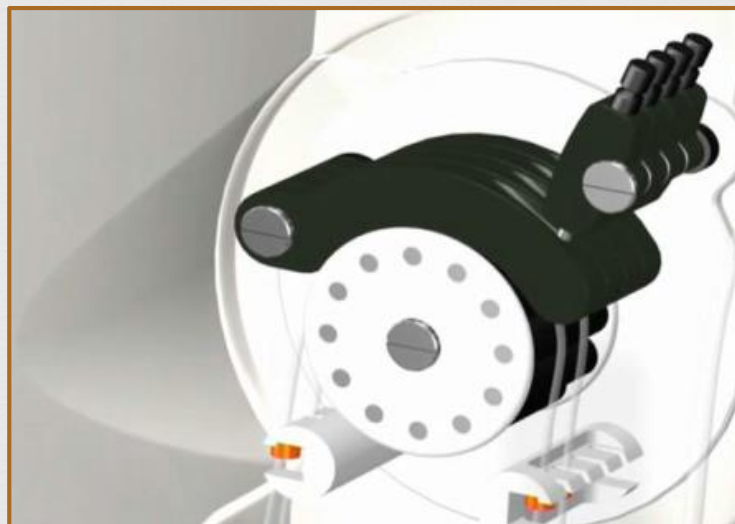
Источник	Спектр, прецизионность	Условия возбуждения
Пламя	Достаточно яркий и стабильный. Линий немного. s_r 1-5 %	Mg, Cu, Mn, Tl, ЩМ и ЩЗМ.
Электрическая дуга	Яркий. Линий очень много (радикалы, атомы, ионы). s_r 5-20 %	Почти все элементы; Низкая воспроизводимость условий возбуждения.
Электрическая искра	Яркость низкая, s_r 1-10 %	Стабильные. Меньше самопоглощение. Низкие пределы определения.
Горелка с индуктивно-связанной плазмой (ИСП)	Стабильный спектр, прецизионный сигнал. $s_r < 1$ %	Стабильные. Почти все элементы. Низкие пределы определения. Высокая концентрация электронов.

Системы ввода пробы в атомизатор

Пламя



Плазма



Перистальтический насос

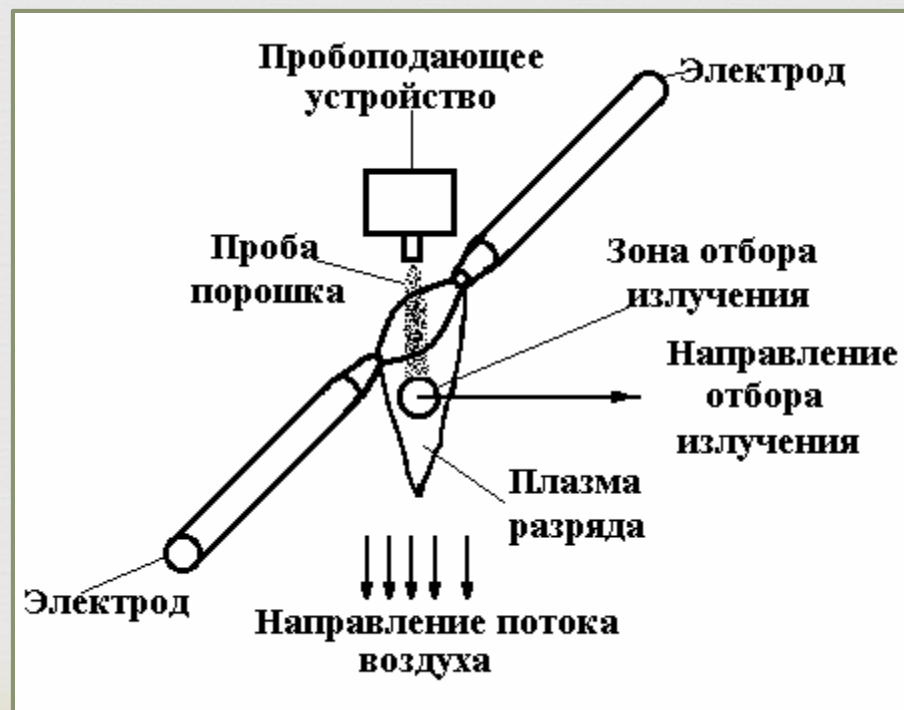


Распылитель

Возбуждение в дуге или искрой



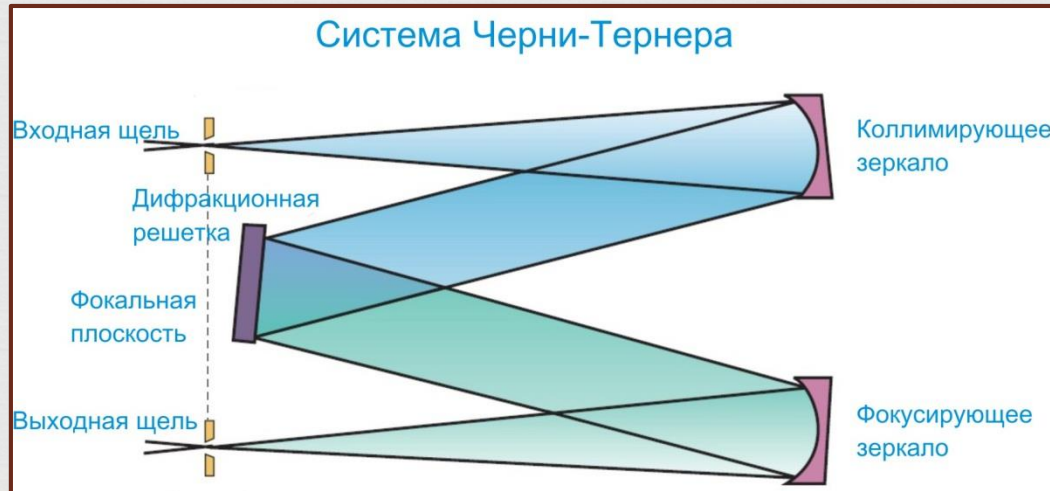
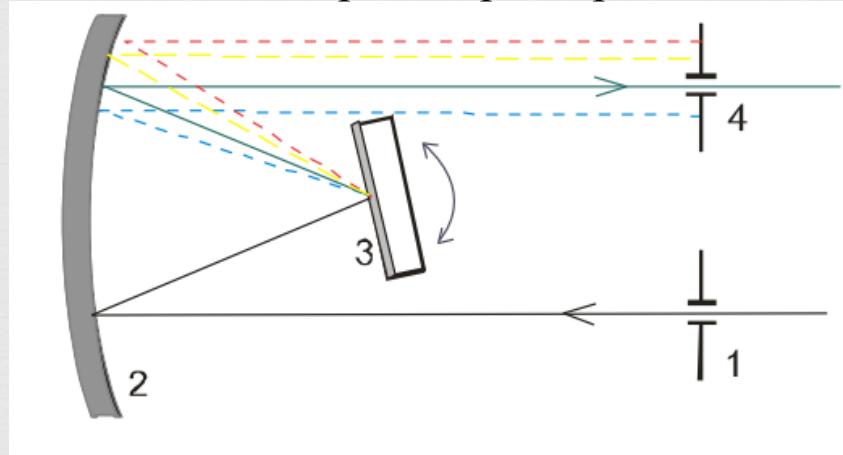
Электрод с кратером для пробы



Метод просыпки-вдувания

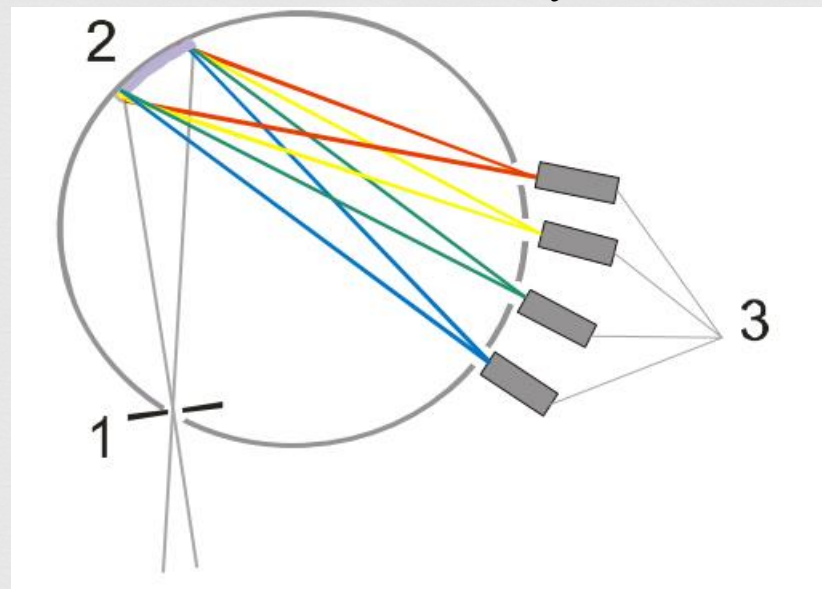
Монохроматоры

Монохроматор Эберта



Полихроматоры

Схема Пашена-Рунге



1 – входная щель; 2 – дифракционная решетка; 3 – выходные щели и детекторы

The hermetically-sealed VistaChip II requires no purging, reducing argon consumption and instrument warm-up time.

Computer controlled mirror enables the plasma viewing position to be automatically optimized when the plasma torch is replaced, getting you up and running fast.

The CaF₂ prism cross-disperser provides excellent UV performance.

The echelle polychromator has no moving parts and is thermostatted to provide excellent long-term stability.

The computer-optimized echelle optical design uses fewer components, ensuring high light throughput and better signal-to-noise, detection limits and spectral resolution.

Разрешающая способность
< 10 пм

Приемники оптического излучения и классификация методов АЭС на основе способов регистрации сигнала

Детектор	Область спектральной чувствительности, <i>нм</i>	Время срабатывания, <i>с</i>	Чувствительность
Человеческий глаз	400 – 700	0,1	Умеренная
Вакуумный фотоэлемент	190 – 1100 (зависит от катода)	10^{-9}	Высокая
Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ)	105 – 1100 (зависит от катода)	10^{-8}	Очень высокая
Лавинный фотодиод	450 – 1200	10^{-10}	Умеренная
Фоторезистор (CdS)	400 – 800	0,1	Низкая
Кремниевый фотодиод	350 – 1200	10^{-8}	Высокая
Приборы с зарядовой связью (ПЗС)	<180 – 1000	10^{-8}	Очень высокая

Спектрографический анализ

- Фотографирование спектра

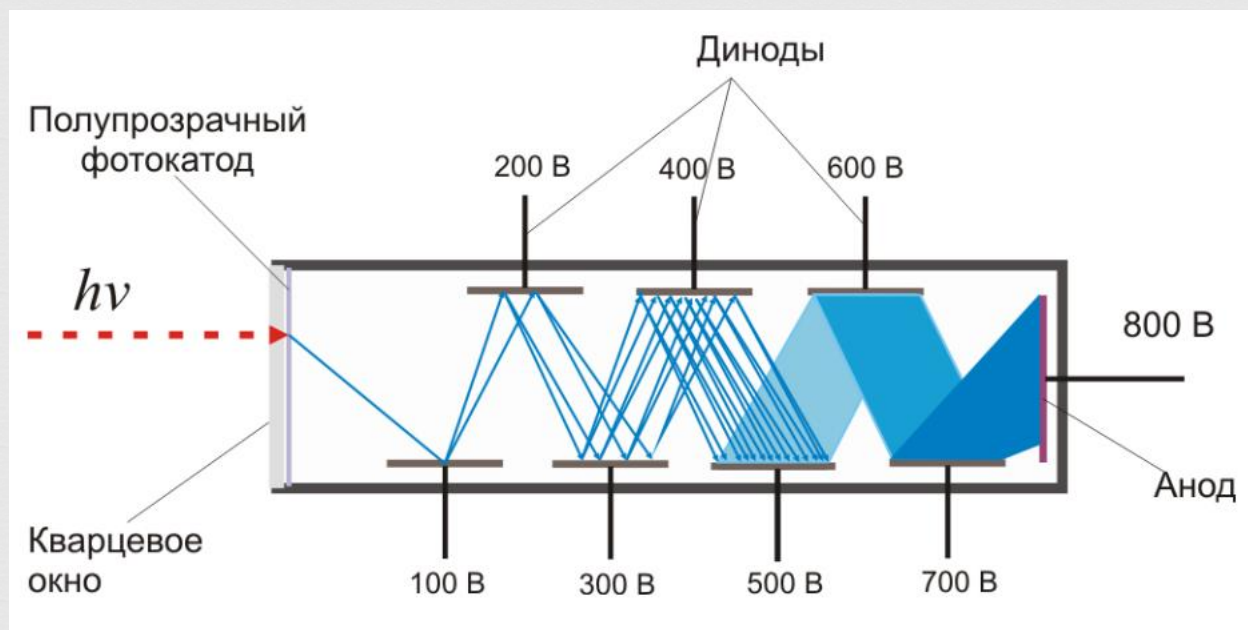
Спектрометрический анализ

- Прямое измерение интенсивности линий

Визуальный анализ

- Стилоскоп

Фотоэлектронный умножитель



Полупроводниковый детектор

Количественный анализ



Метод внешнего стандарта

Градуировка – последовательность действий, направленная на установление соответствия между показаниями измерительной системы и соответствующими характеристиками образцов сравнения



Линейная и нелинейная аппроксимация МНК зависимости аналитического сигнала от концентрации элемента

$$I = a + bC; I = a + b_1C + b_2C^2 \text{ и др.}$$

Мешающие влияния



Правильность анализа → отсутствие систематических погрешностей

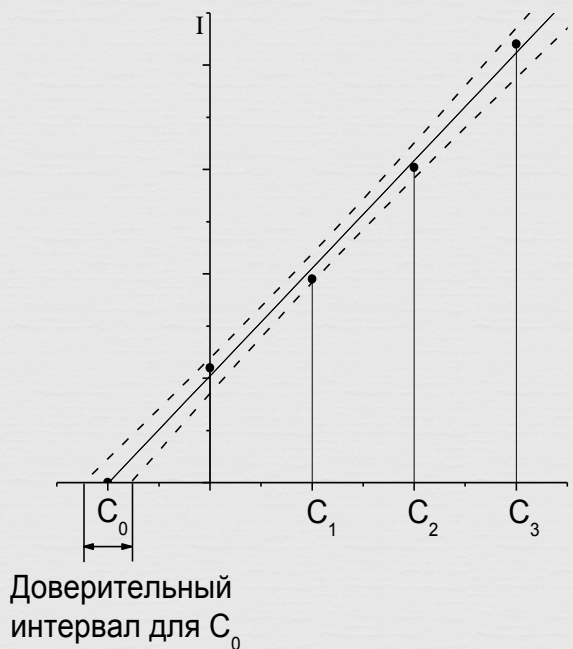
При условии хорошей воспроизводимости сигналов основной причиной погрешностей является неадекватность градуировочных функций



Методы коррекции матричных эффектов

- Отделение анализируемых элементов от матрицы;
- Поддержание одинакового состава анализируемых и градуировочных образцов;
- Метод внутреннего стандарта;
- Метод стандартных добавок;
- Тщательный выбор условий возбуждения спектров;
- Хемометрические методы

Метод стандартных добавок



Эффективен для устранения матричных влияний в случае невозможности использования адекватных градуировочных образцов

Существенным недостатком МСД является то, что начальное содержание аналита оценивается в области больших доверительных интервалов.

При условии, что объемы добавок пренебрежимо малы по сравнению с объемом пробы, начальное содержание аналита рассчитывают по формуле (для одной добавки):

$$C_0 = C_1 I_0 / (I_1 - I_0)$$

Метод внутреннего стандарта

Позволяет улучшить правильность анализа за счет компенсации временного дрейфа сигнала и нивелирования (в ряде случаев) матричных эффектов

При проведении калибровки внутренний стандарт добавляют в смесь стандартных образцов и проводят вычисление факторов отклика:

$$k_1 = (I_{\text{СТ}}^{\text{IS}}/I_{\text{СТ}}^1) * (C_{\text{СТ}}^1/C_{\text{СТ}}^{\text{IS}}), \text{ и т.д.},$$

где

k_1 – фактор отклика для 1-ого аналита,

$I_{\text{СТ}}^1$ – сигнал стандарта 1-ого аналита,

$I_{\text{СТ}}^{\text{IS}}$ – сигнал внутреннего стандарта,

$C_{\text{СТ}}^1$ – концентрация 1-ого аналита в стандартном образце,

$C_{\text{СТ}}^{\text{IS}}$ – концентрация внутреннего стандарта в стандартном образце.

$$C_{\text{ан}}^1 = k_1 * (C^{\text{IS}} / I^{\text{IS}}) * I_{\text{ан}}^1$$

где

$C_{\text{ан}}^1$ – концентрация 1-ого аналита в объеме пробы,

k_1 – фактор отклика для 1-ого аналита,

$I_{\text{ан}}^1$ – сигнал 1-ого аналита,

I^{IS} – сигнал внутреннего стандарта,

C^{IS} – концентрация внутреннего стандарта в объеме пробы.

Преимущества метода:

- при использовании метода внутреннего стандарта ни объем вводимой пробы, ни точность ее дозирования никак не влияют на точность количественного анализа;
- возможность в каждом проводимом определении контролировать потери аналитов на любой стадии подготовки пробы;

Элементы, определяемые методом ICP-AES



1	ICP-AES spectrometer TRACE SCAN Advantage Thermo Jarrell Ash Corp.																2
3	4											5	6	7	8	9	10
Li 0.03	Be 0.2											B 1.0	C	N	O	F	Ne
11	12											13	14	15	16	17	18
Na 2.0	Mg 0.02											Al 0.3	Si 4.0	P 20.0	S 25.0	Cl	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K 10.0	Ca 0.02	Sc 0.2	Ti 0.3	V 1.0	Cr 0.6	Mn 0.1	Fe 0.5	Co 0.75	Ni 1.0	Cu 0.5	Zn 0.3	Ga 0.2	Ge 0.2	As 5.0	Se 5.0	Br 20.0	Kr
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb 12.0	Sr 0.05	Y 0.3	Zr 0.9	Nb 0.9	Mo 1.0	Tc	Ru 0.8	Rh 0.8	Pd 0.8	Ag 0.75	Cd 0.3	In 1.5	Sn 3.0	Sb 5.0	Te 3.0	I 10.0	Xe
55	56	57-71 La-Lu ~2	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs 20.0	Ba 0.09		Hf 1.0	Ta 0.9	W 1.1	Re 0.6	Os 0.5	Ir 0.4	Pt 0.2	Au 0.1	Hg 2.0	Tl 5.0	Pb 4.0	Bi 5.0	Po	At	Rn
87	88	89-103 Ac-Lr	104	105													
Fr	Ra		Rf	Db													

38

Sr

0.05

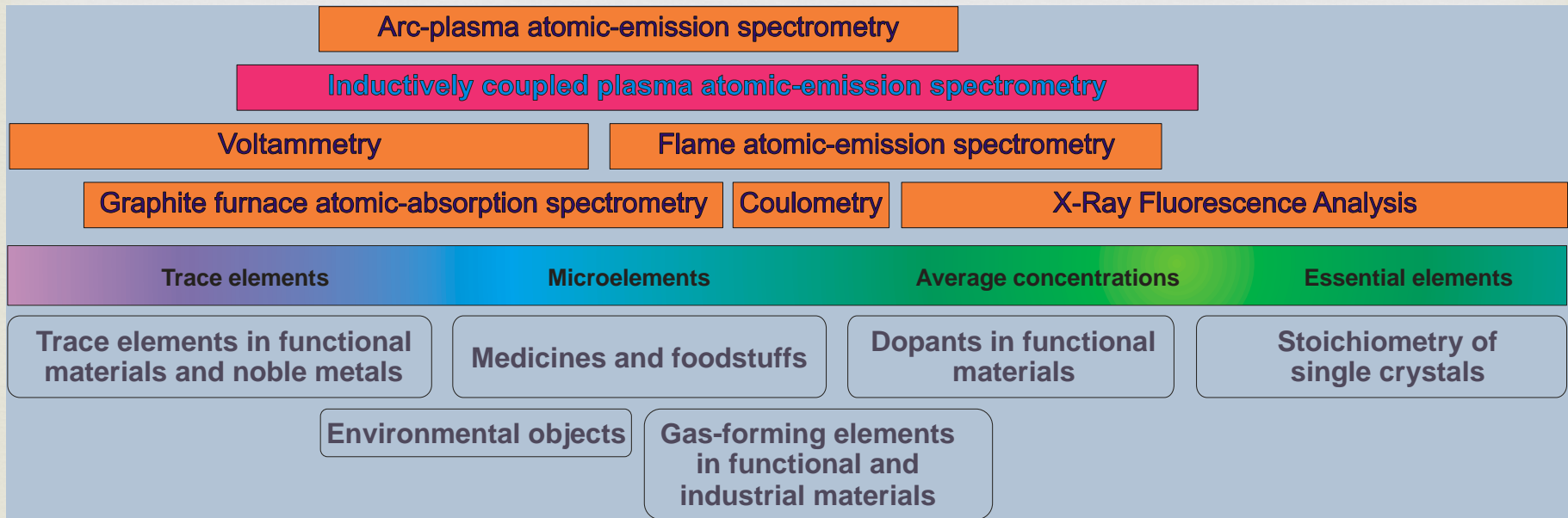
- ← Порядковый номер элемента
- ← Символ элемента. Зеленым цветом обозначены элементы, определяемые спектрометром
- ← Предел обнаружения, $\mu\text{г/л}$ (3σ -критерий)

Сравнительная характеристика методов атомно-эмиссионной спектроскопии

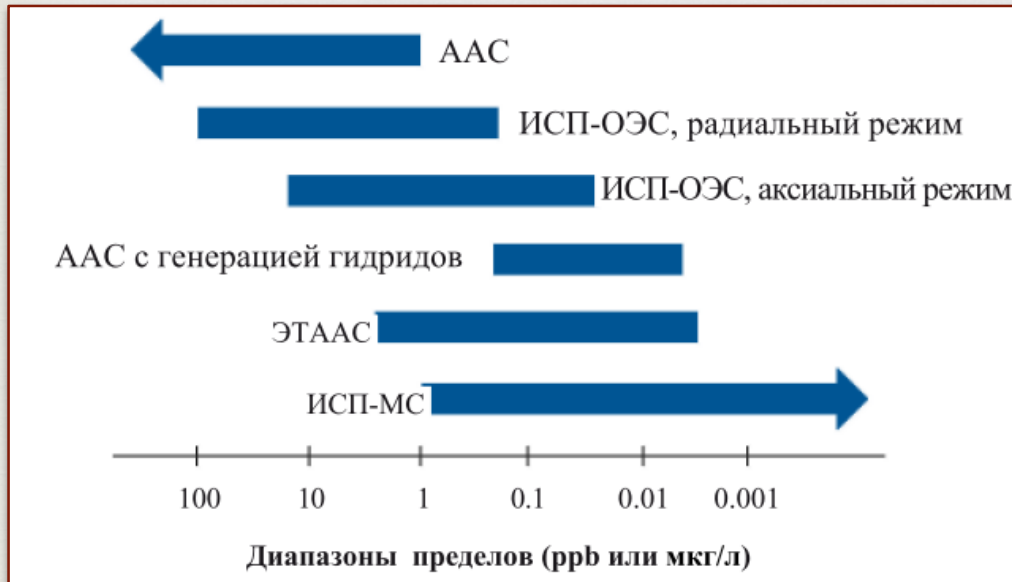


Метод	Характеристика атомизатора	Воспроизводимость результатов Пределы обнаружения	Состояние анализируемой пробы
Пламенная АЭС	T = 900 – 3000 °C Высокая стабильность	$s_r = 0,01-0,05$ $c_{min} = 10^{-7} \%$	Раствор
АЭС с дуговым возбуждением	T = 3000 – 7000 °C Низкая стабильность	$s_r = 0,05-0,2$ $c_{min} = 10^{-5} \%$	Твердая
АЭС с искровым возбуждением	T = 7000 – 12000 °C Средняя стабильность	$s_r = 0,01-0,1$ $c_{min} = 10^{-3} \%$	Твердая
ICP-AES	T = 6000 – 10000 °C Очень высокая стабильность	$s_r = \leq 0,01$ $c_{min} = 10^{-8} \%$	Раствор, твердая (с приставкой для испарения пробы)

Место методов атомно-эмиссионной спектроскопии среди других физических методов анализа



Пределы обнаружения



Рабочий аналитический диапазон



Основные области применения

- Metallургия;
- Геология;
- Биология и медицина;
- Функциональные материалы;
- Продукты питания;
- Топливная промышленность и т.д.

15 элементов в
SiC

Определение U в
горных породах

Cr(III), Cr(VI) в
природных водах

Косвенное
определение
ПАВ в воде

22 элемента в
атмосферных
аэрозолях

Чудинов Э.Г. Итоги науки и техники. ВИНТИ.
Сер. аналитическая химия. – 1990. - 2. - 251 с.