

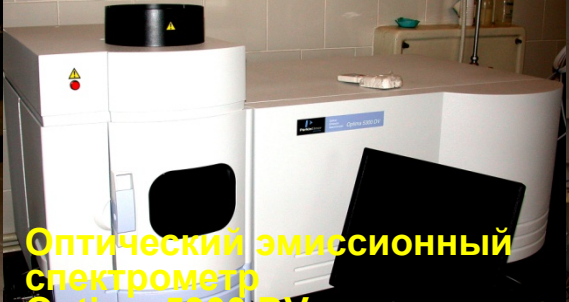
# Методы исследования неорганических веществ и материалов

Ю.Д.Третьяков  
А.В.Шевельков  
Е.А.Гудилин

Очень  
короткий  
обзор



**Вакуумный пост  
VOS Edwards**



**Оптический эмиссионный  
спектрометр**



**Анализатор  
поверхности**



**Просвечивающий  
электронный  
микроскоп JEM 2000**



**Оптический  
Микроскоп с  
термостолком  
Nikon Eclipse 600**



**Сканирующий Зондовый Микроскоп Интегра-Аура**  
<http://www.hsms.msu.ru/ckp.html>



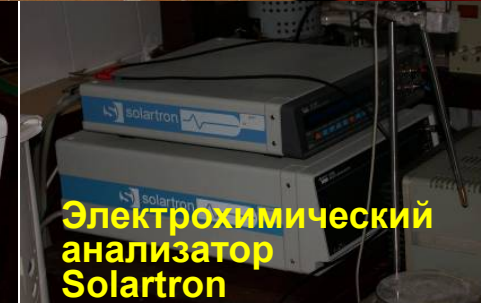
**Лиофилизатор  
Labconco Freezone**



**Термоанализатор  
Perkin Elmer  
Pyris Diamond**



**Спектрометры  
PerkinElmer  
Spectrum One (IR),  
Lambda 35 (UV),  
LS 55 (люминесц.)**



**Электрохимический  
анализатор  
Solartron**



**Цифровой электронный  
микроскоп Leo Supra 50 VP  
SEM / EDX / WDX**

# Типы методов исследований

Характеризация соединений – неотъемлемая часть **всех** исследований в неорганической химии

Различают (условно) методы исследования:

1. химические:  
хим. анализ, реакционная способность
2. физические:  
идентификация индивидуальных соединений и измерение их свойств
3. физико-химические:  
получение диаграмм "состав–свойство" в системах соединений

# Основная информация

1. Состав соединения
2. Идентификация соединения и фазовый анализ
3. Строение молекул
4. Кристаллическая структура соединений
5. Строение электронных оболочек и энергия электронов
6. Распределение зарядов в молекуле и кристалле
7. Особенности химической связи в молекуле и твердом теле
8. Динамика атомов и молекул в соединении
9. Термодинамические характеристики соединения
10. Реакционная способность соединений
11. Кинетика образования и распада соединений

# Основные группы методов

## Химический анализ

### Дифракционные методы

рентгенография, нейтронография, электронография

### Спектральные методы

колебательная спектроскопия (ИК, КР), резонансная спектроскопия (ЯМР, ЯКР, ЭПР, ЯГР), электронная спектроскопия (УФ-вид., ФЭС, РЭС, Оже)

### Термические методы

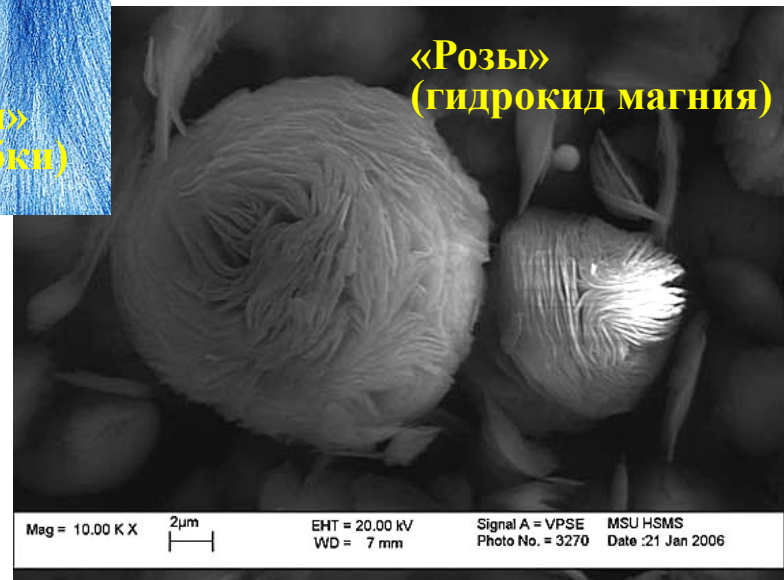
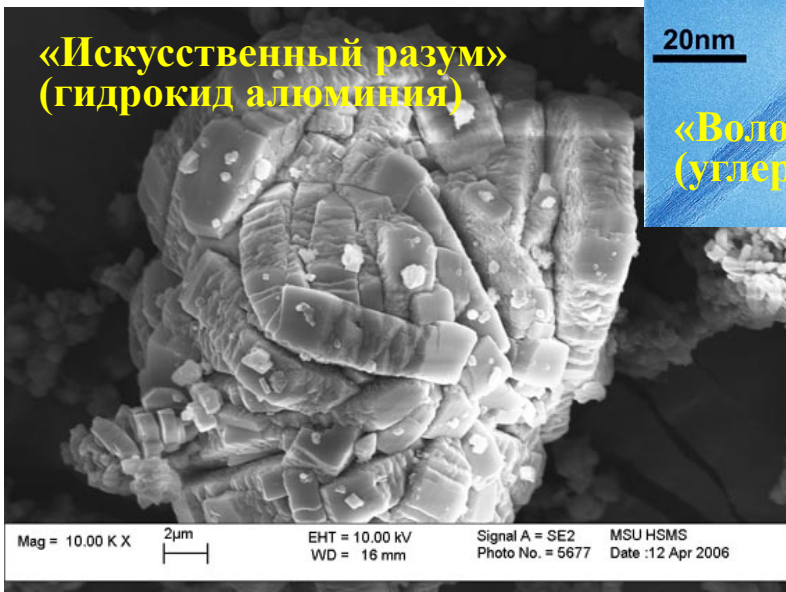
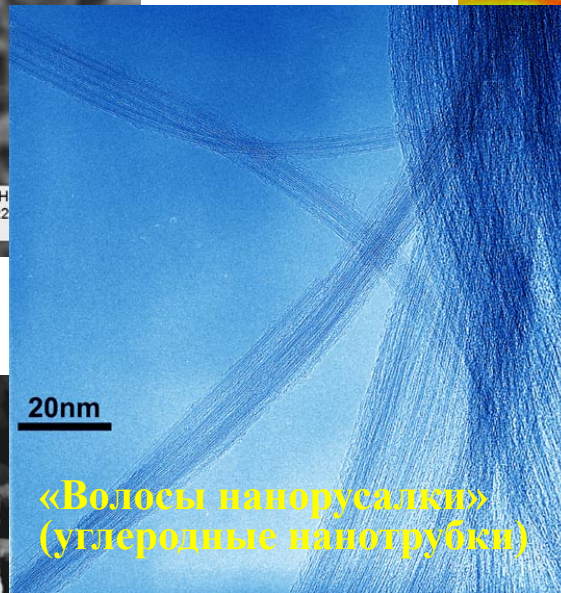
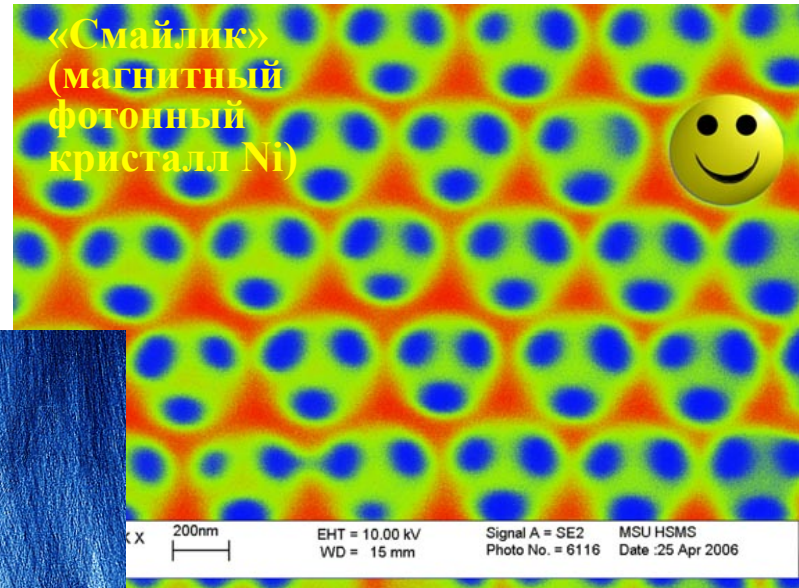
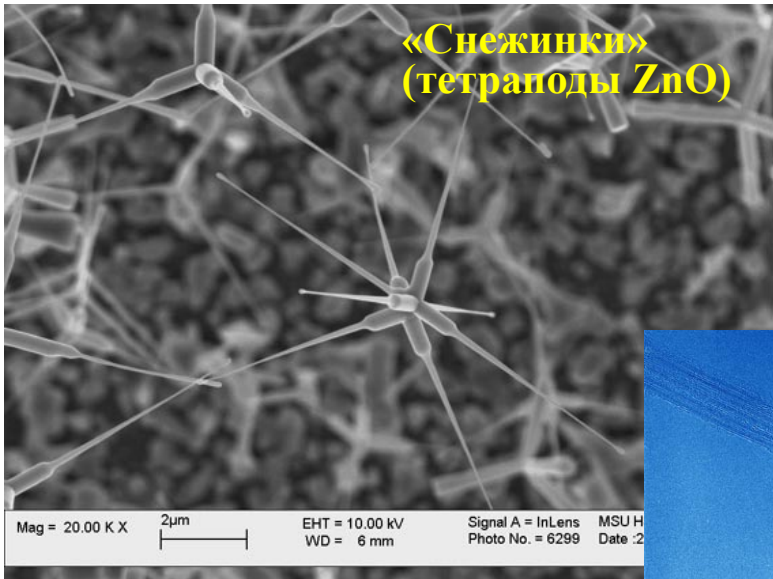
термография (ДТА, ДТГ), калориметрия (ДСК)

### Микроскопия

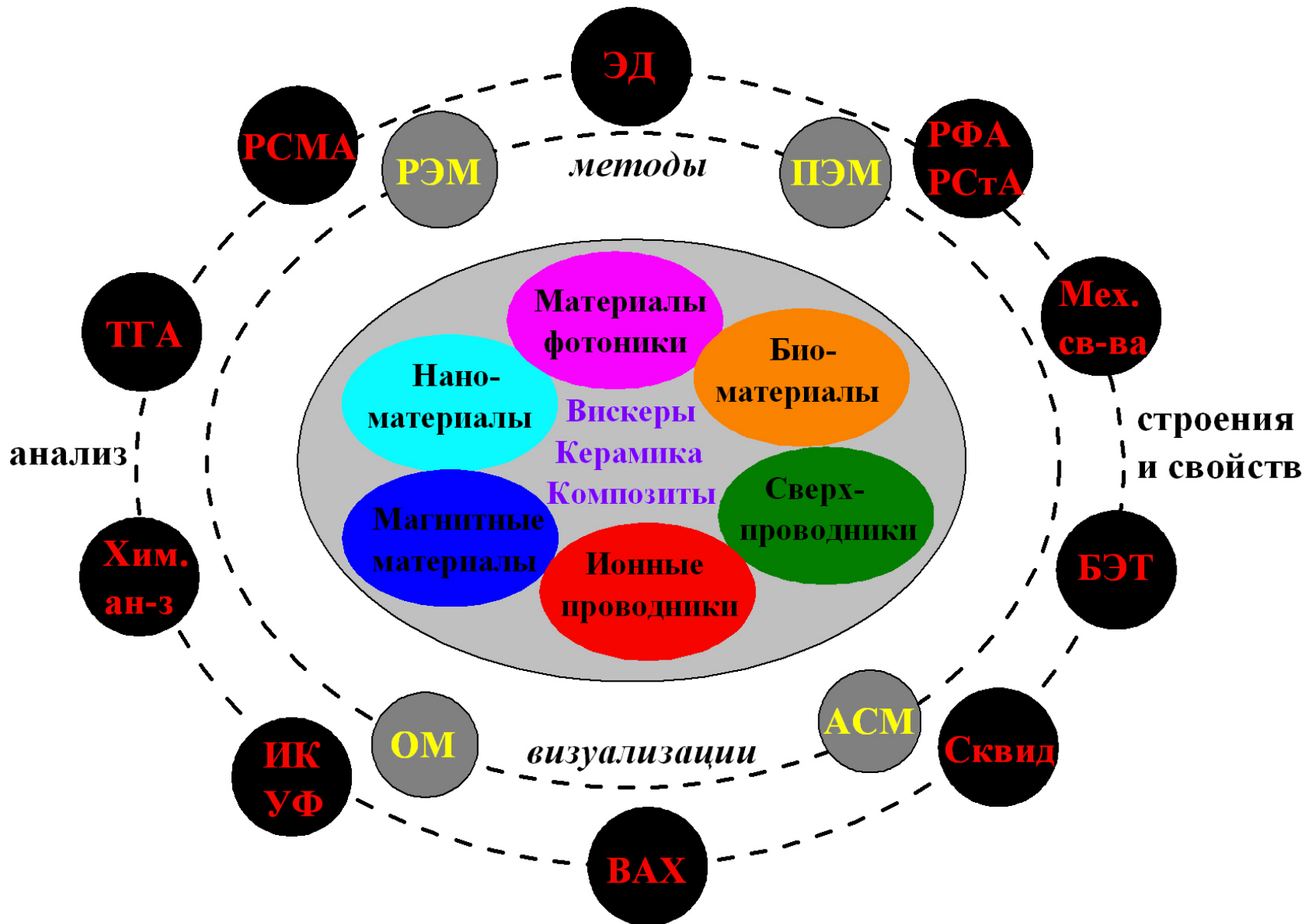
электронная микроскопия (ПЭМВС, АСМ, СЭМ), оптическая микроскопия

### Электрофизические и магнитные методы

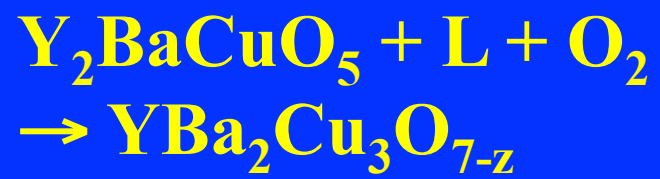
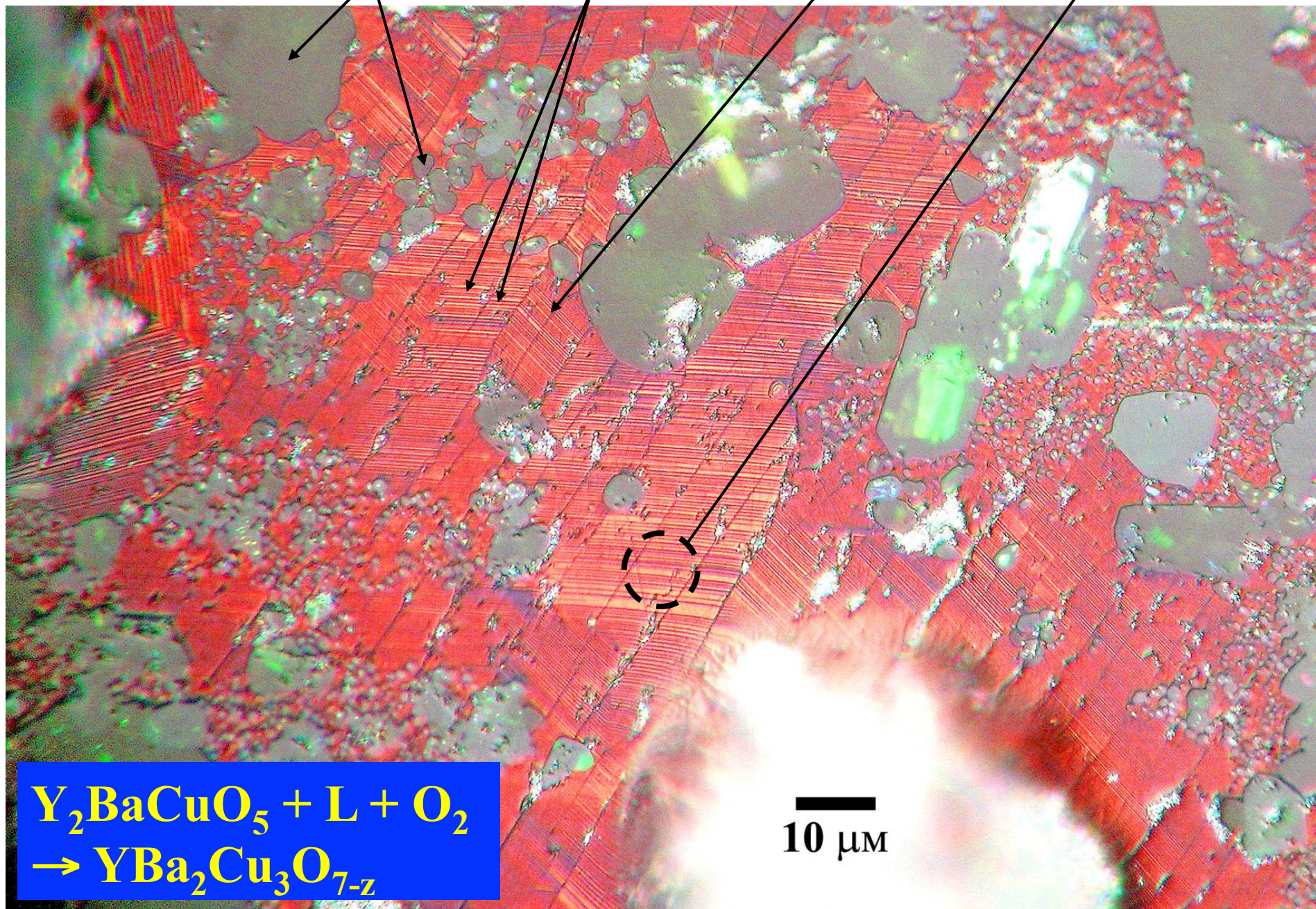
резистивные измерения, магнетохимия



# Комплексный подход



включения    ламели    границы зерен    двойники



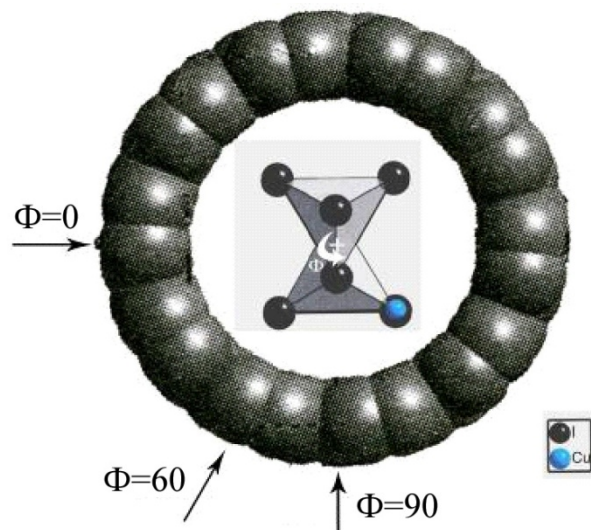
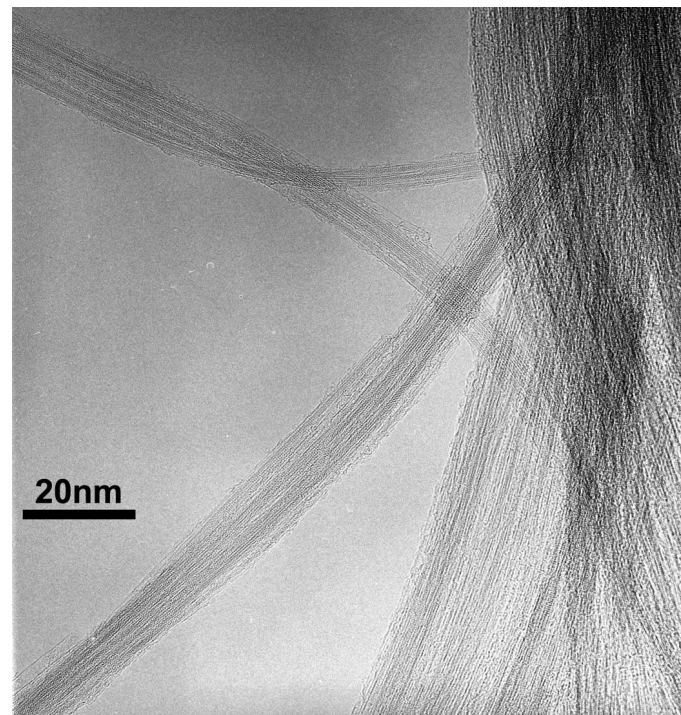
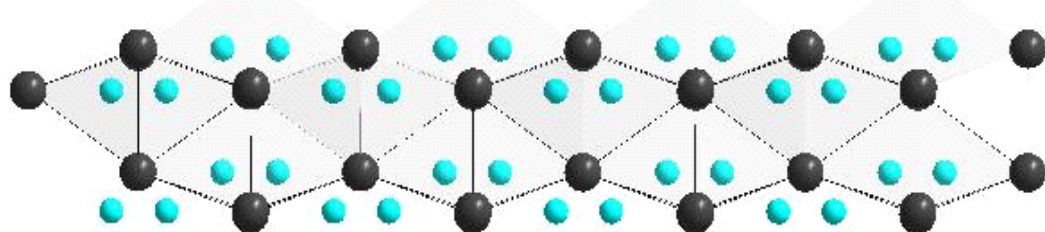
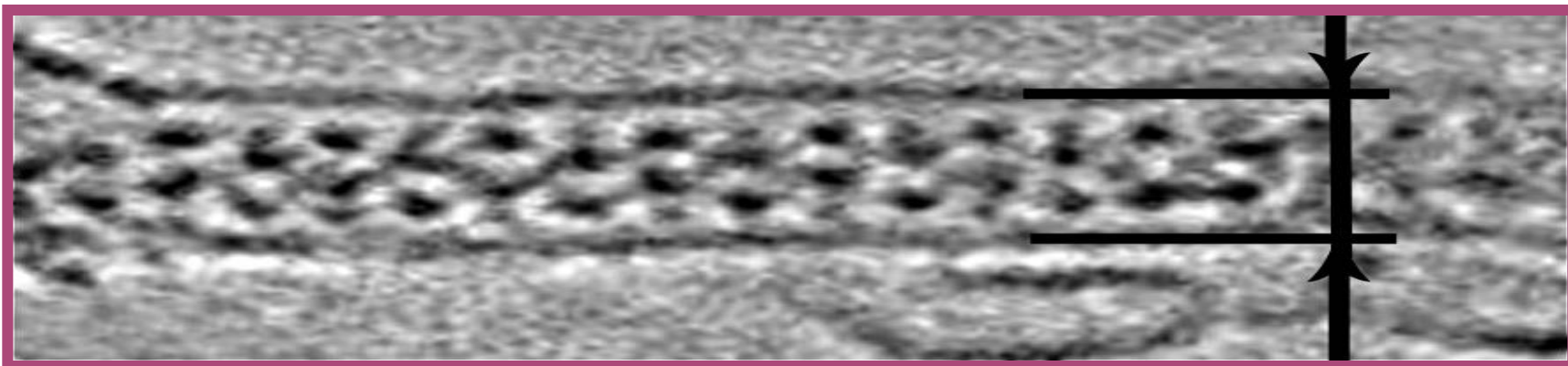
10 μm



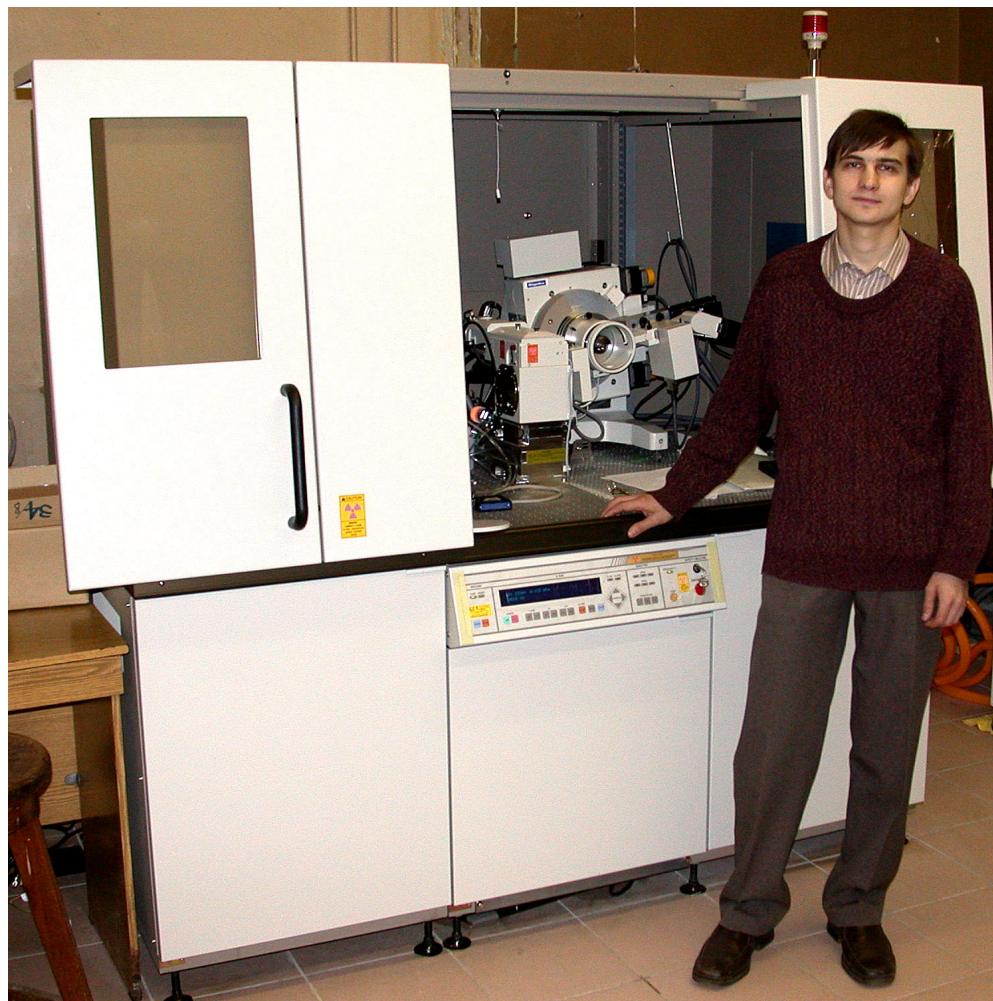
# Субангстремный электронный микроскоп высокого разрешения FEI Titan



# Интеркаляция в углеродные нанотрубки



# Рентгеновский дифрактометр с высокотемпературной приставкой



(Rigaku, Япония, 2006 г.)

# Дифракционные методы

*наиболее важные методы при исследовании  
кристаллических твердых тел!*

**РФА, РСА, РГА**

## Методы:

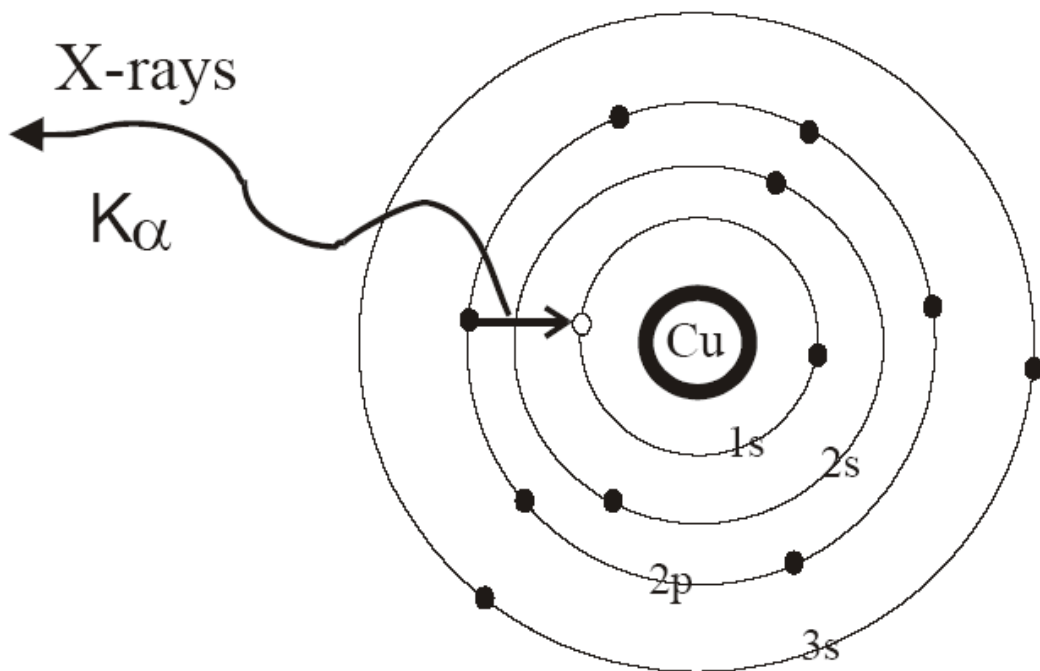
1. дифракция рентгеновских лучей
2. дифракция электронов
3. дифракция нейтронов

## Получаемая информация:

1. фазовый состав смеси (продуктов реакции)
2. идентификация твердых тел
3. параметры элементарной ячейки
4. размер частиц и степень аморфизации
5. кристаллическая структура твердого тела

# Рентгеновские «лучи»

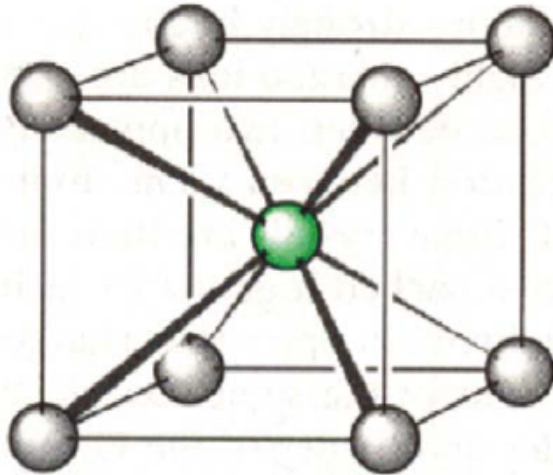
- ✓ Рентгеновские лучи образуются при бомбардировке металлической мишени электронами высокой энергии
- ✓ Электроны высокой энергии выбивают электроны внутренних оболочек атомов
- ✓ На место выбитых электронов перемещаются электроны с более удаленных оболочек, испуская при переходе рентгеновские лучи
- ✓ Длина волны рентгеновского излучения зависит от природы мишени



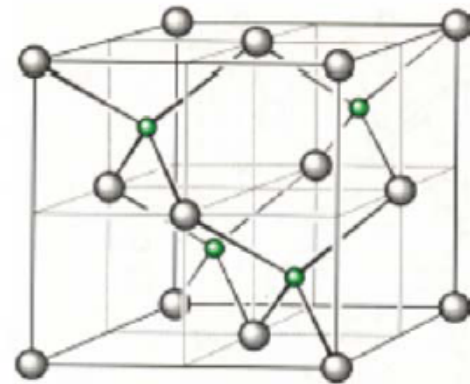
Cr	0.22909 nm
Fe	0.19373 nm
<b>Cu</b>	<b>0.15418 nm</b>
Mo	0.07107 nm
Ag	0.05608 nm

# Дифракция

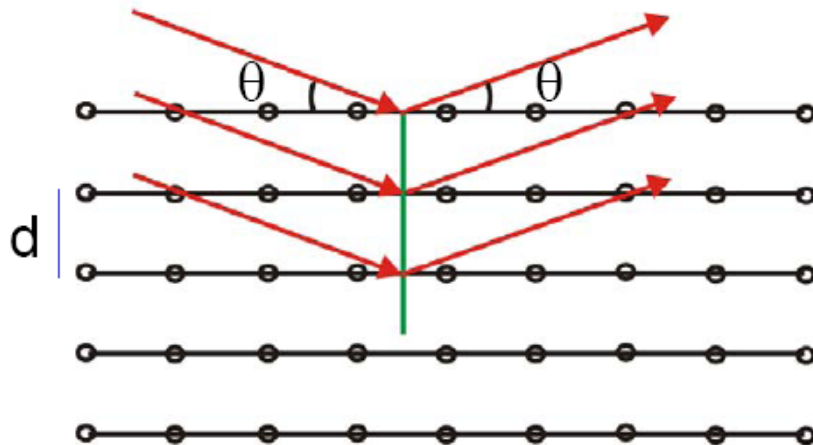
Рентгеновские лучи рассеиваются электронными оболочками атомов. Лучи, рассеянные разными атомами, интерферируют, складываясь или вычитаясь.



CsCl



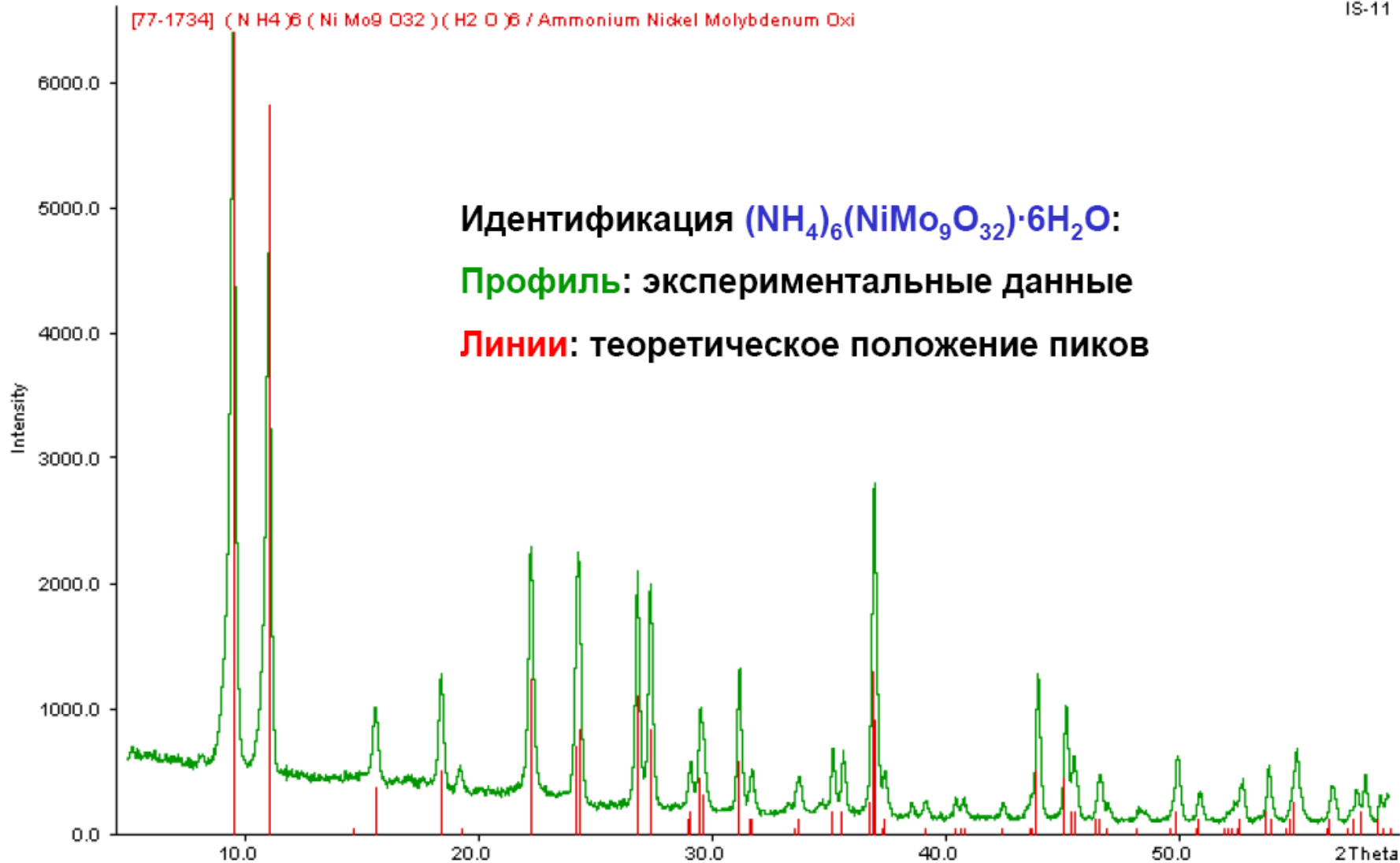
ZnS



Закон Брэгга:  
 $2d \sin \theta = n\lambda$

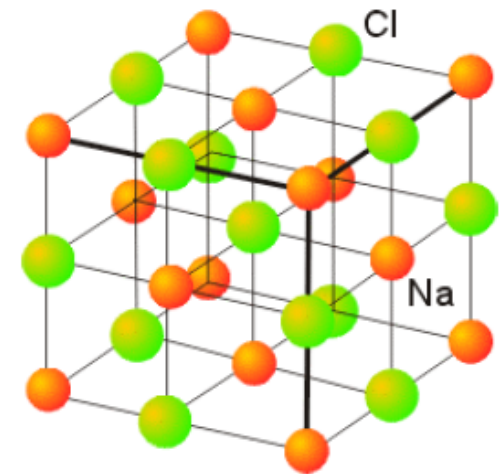
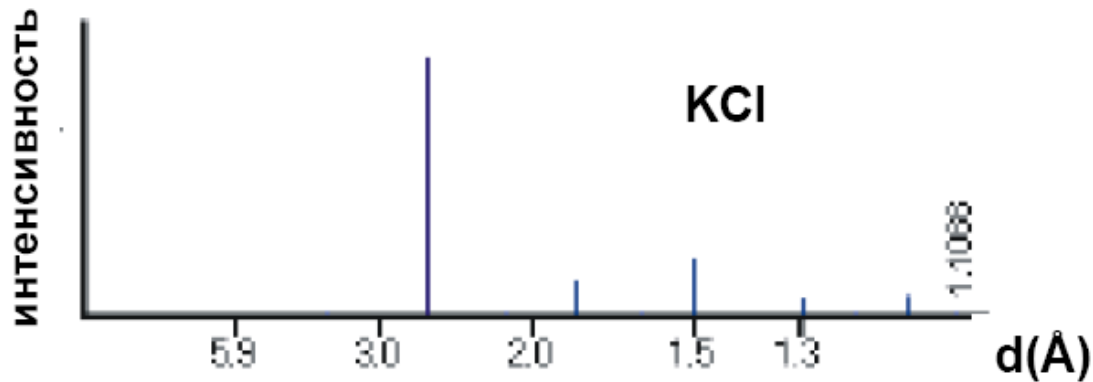
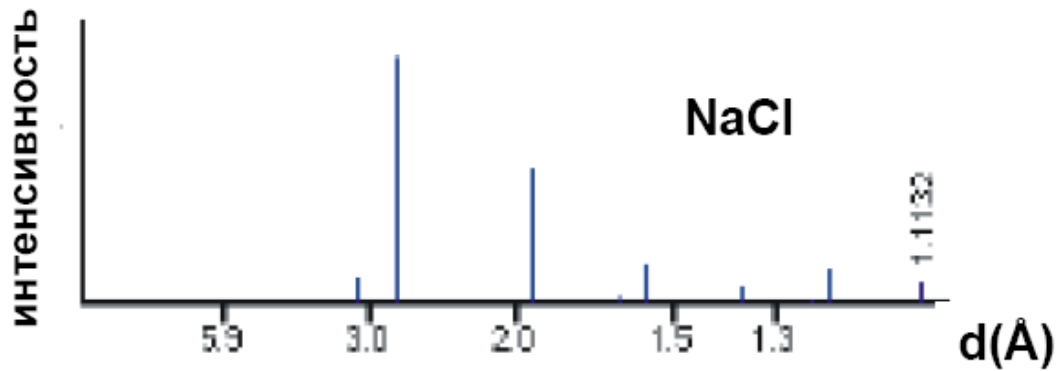
# Идентификация

IS-11



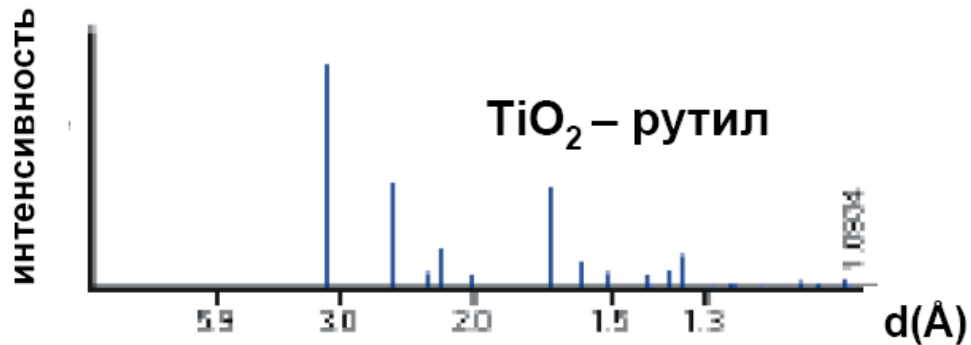
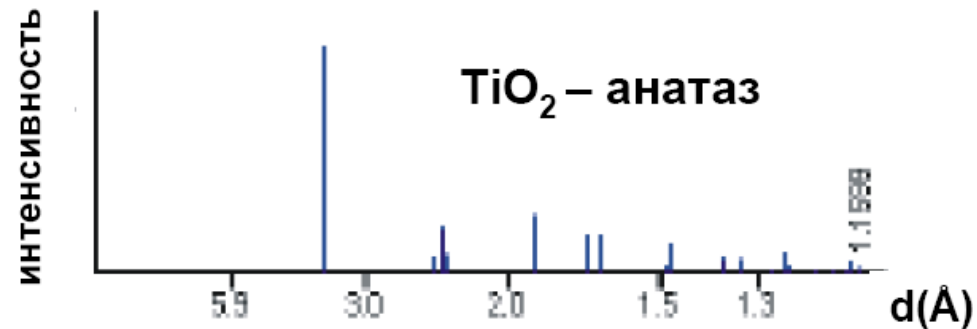
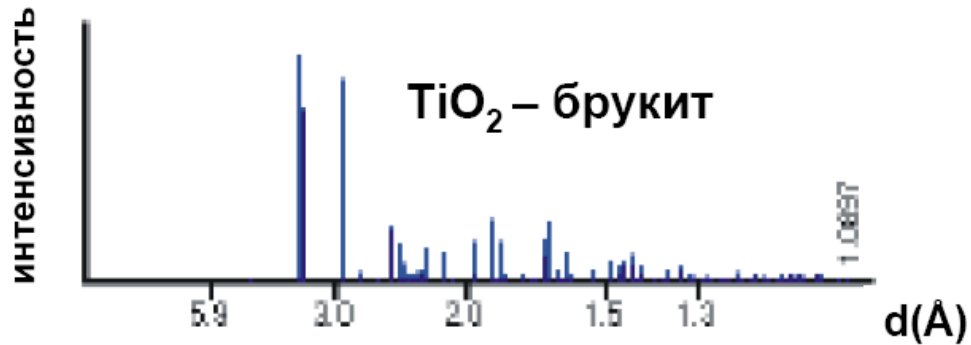
# Фазовый анализ

Фазы с разным составом,  
но одинаковой структурой

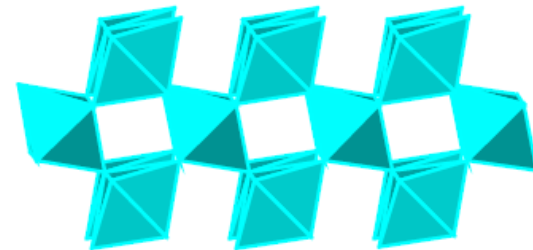
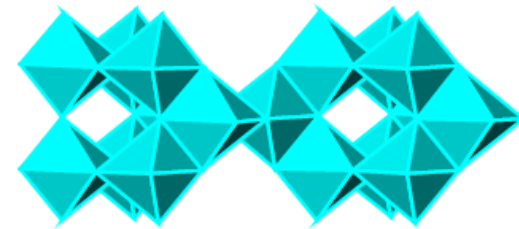
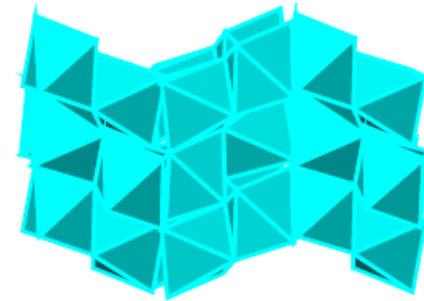




# Фазовый анализ



Фазы с одинаковым составом, но разными структурами



# Индицирование

Формулировка закона Брэгга с учетом особенностей кристаллического строения:

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda$$

$h, k, l$  – индексы Миллера, определяющие, на сколько частей соответствующая их набору плоскость делит элементарную ячейку.

Для *ортогональных* ячеек:  $1/d^2 = h^2/a^2 + k^2/b^2 + l^2/c^2$

(в частности для *кубической* ячейки  $1/d^2 = h^2/a^2$ )

Для *гексагональной* ячейки:  $1/d^2 = (4/3)([h^2 + k^2 + hk]/a^2) + l^2/c^2$

Процедура присвоения индексов Миллера каждому межплоскостному расстоянию для данного вещества называется индицированием. В результате процесса определяются параметры элементарной ячейки.

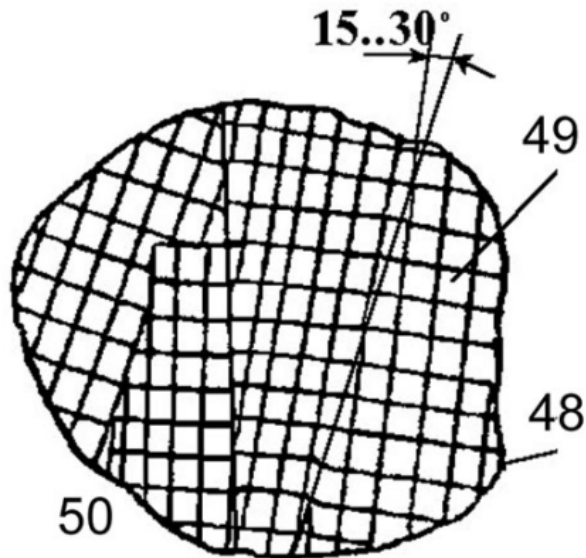
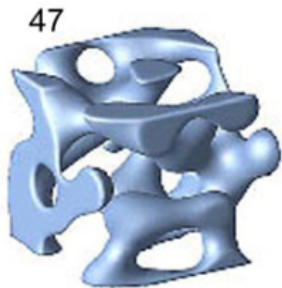
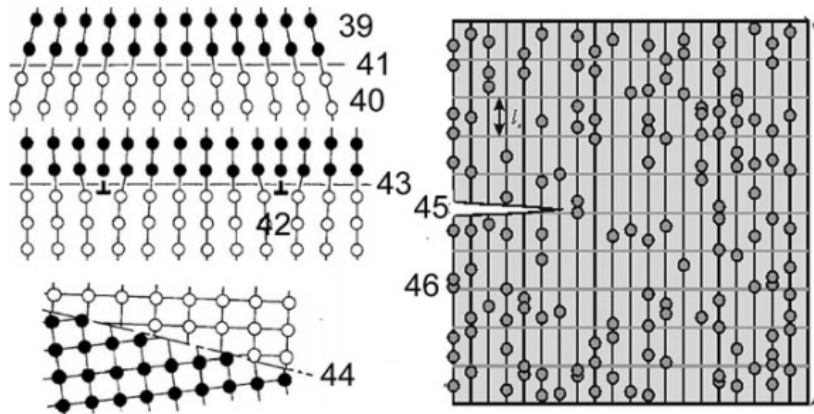
# Как индексировать рентгенограмму?

Пример – рентгенограмма **NaBr**

Кубическая симметрия:  $1/d^2 = h^2/a^2$

$d$ (Å)	$10^4/d^2$	$h^2 + k^2 + l^2$	hkl	$a$ (Å)
3.449	840.65	3	111	5.973843
2.987	1120.80	4	200	5.974000
2.112	2241.88	8	220	5.973638
1.801	3082.99	11	311	5.973241
1.725	3360.64	12	222	5.975575
1.493	4486.22	16	400	5.972000
1.370	5327.93	19	331	5.971692
1.336	5602.57	20	420	5.974774
1.219	6729.65	24	422	5.971856
1.149	7574.60	27	333	5.970379
1.055	8984.52	32	440	5.967981
1.009	9822.40	35	531	5.969325

$$a = 5.9723 \pm 0.0005 \text{ \AA}$$

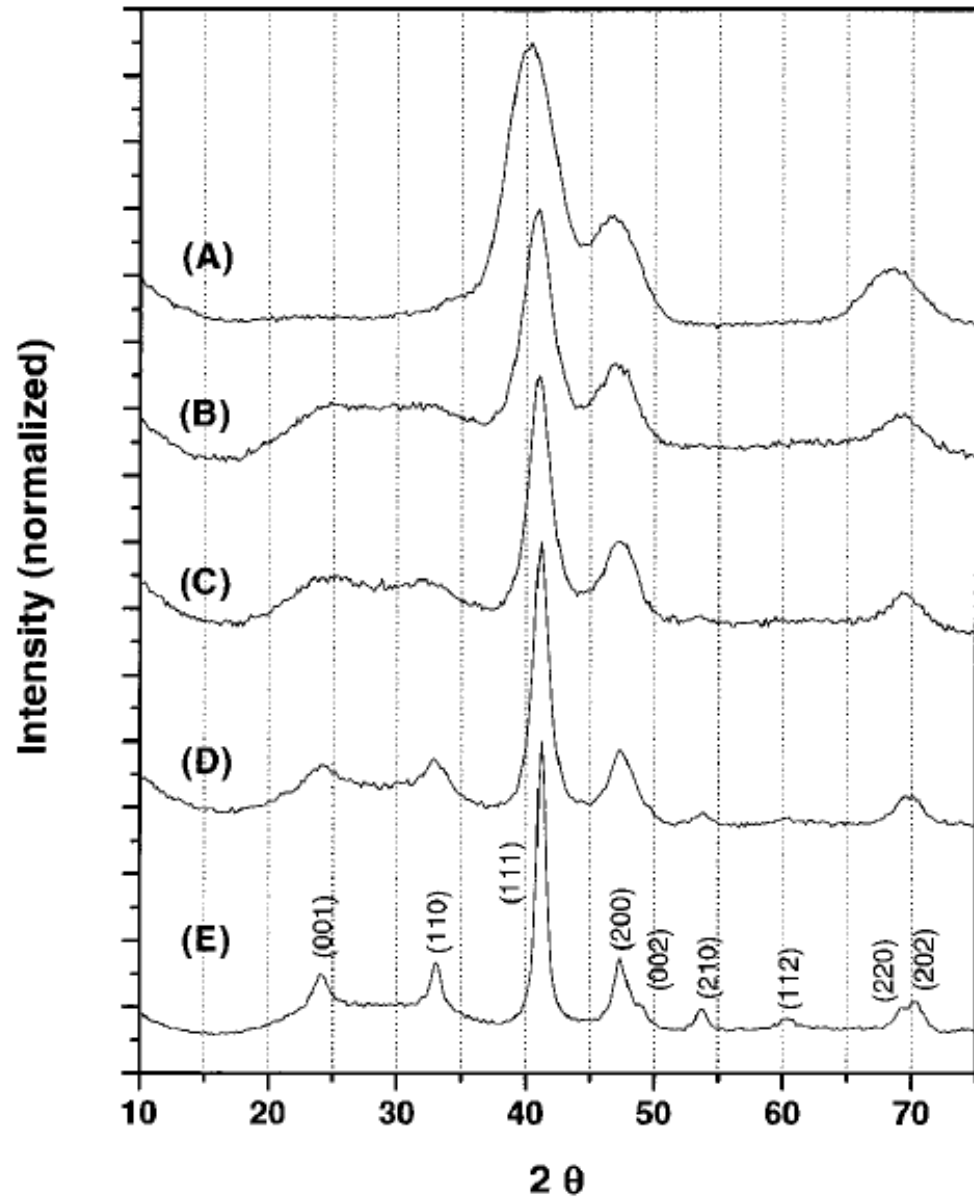


## Включения и мозаичная структура.

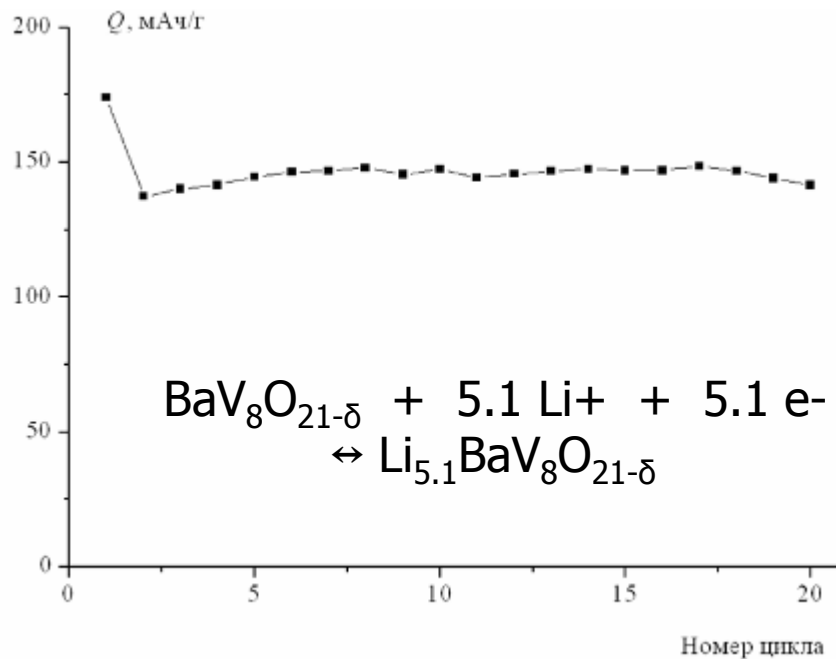
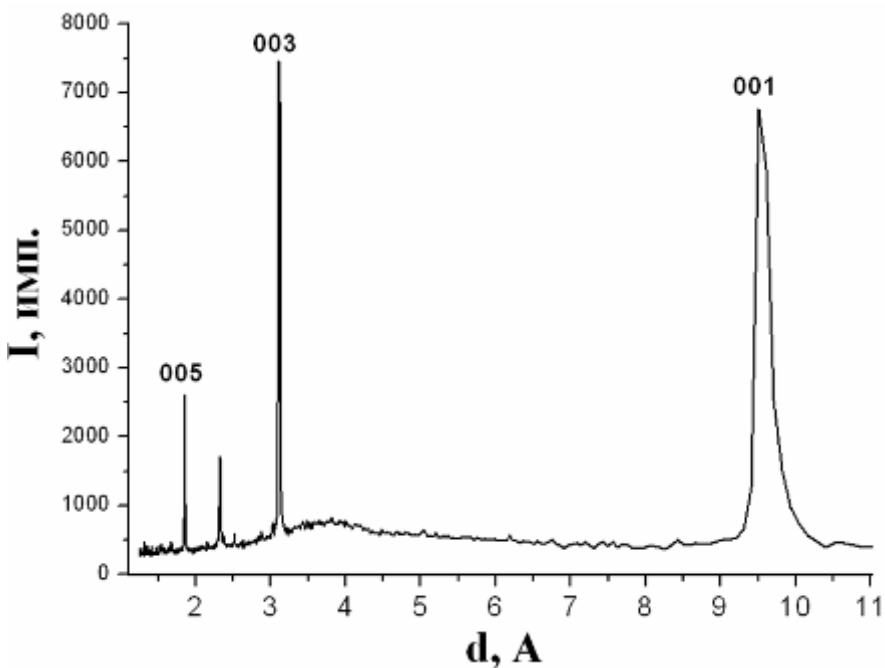
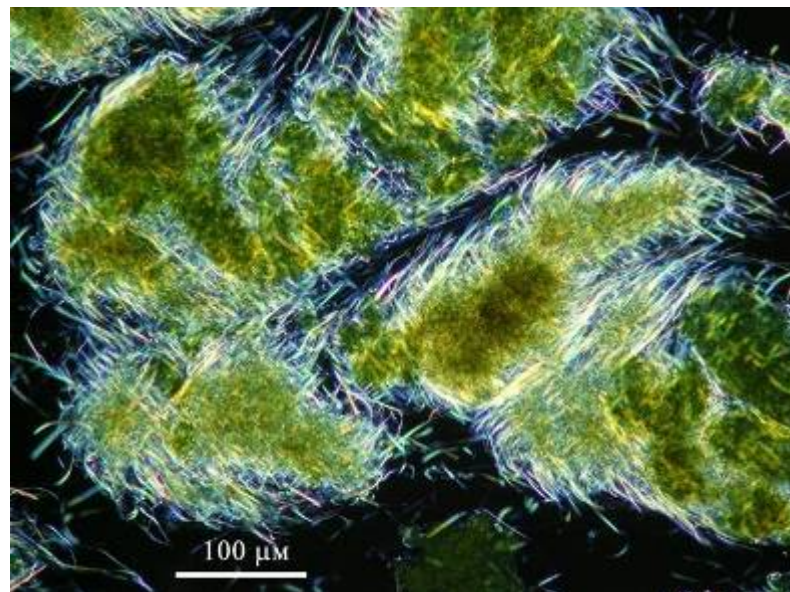
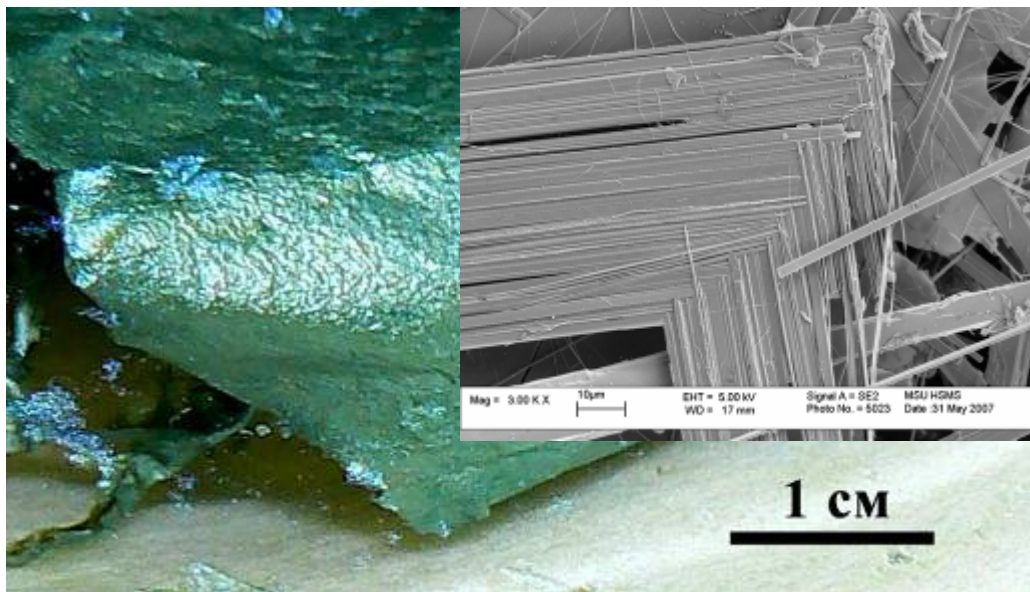
39 – 44 – строение границ раздела около включений, 39 – 41 – граница (41) когерентного включения, 39 – матрица, 40 – атомные ряды включения, 42 – дислокации несоответствия для полукogerентного включения (43), 44 – граница раздела некогерентного включения, 45-46 – включения (46) как стопор развития микротрещин (45), 47 – объемная реконструкция областей спинодального распада (флуктуации состава), 48-50 – доменное (мозаичное) строение зерен поликристаллического материала, 48 – поверхность зерна (высокоугловая граница), 49 – блоки мозаики (области когерентного рассеяния), 50 – низкоугловые границы между блоками.

# Уширение ренгеновских пиков

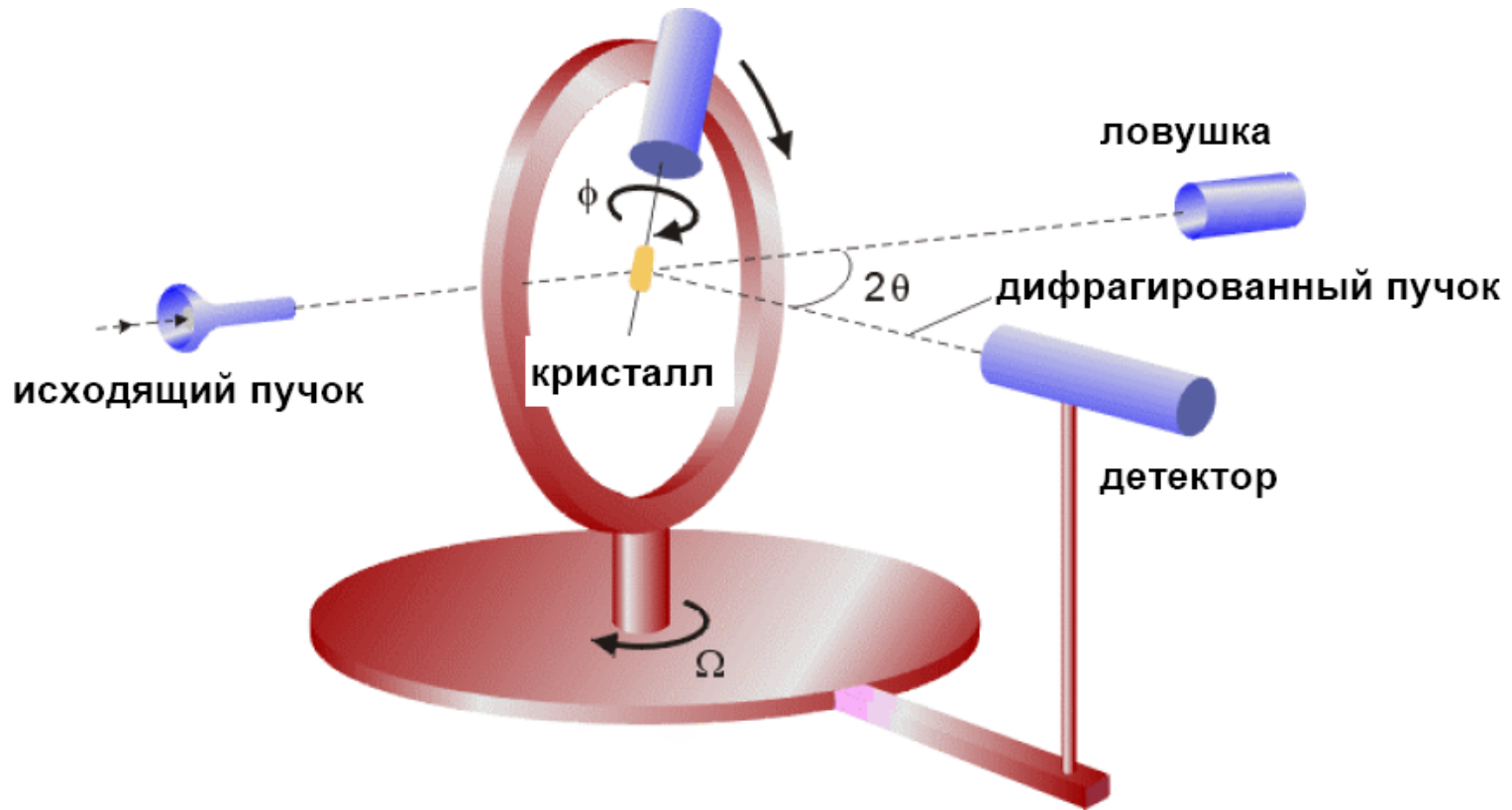
Fig. 2. XRD patterns (A) of as-synthesized 4-nm  $\text{Fe}_{52}\text{Pt}_{48}$  particle assemblies and a series of similar assemblies annealed under atmospheric  $\text{N}_2$  gas for 30 min at temperatures of (B)  $450^\circ\text{C}$ , (C)  $500^\circ\text{C}$ , (D)  $550^\circ\text{C}$ , and (E)  $600^\circ\text{C}$ . The indexing is based on tabulated fct FePt reflections (25). The diffraction patterns were collected with a Siemens D-500 diffractometer with  $\text{Cu K}\alpha$  radiation (wavelength  $\lambda = 1.54056 \text{ \AA}$ ).



# Наноионика



# Уточнение структуры

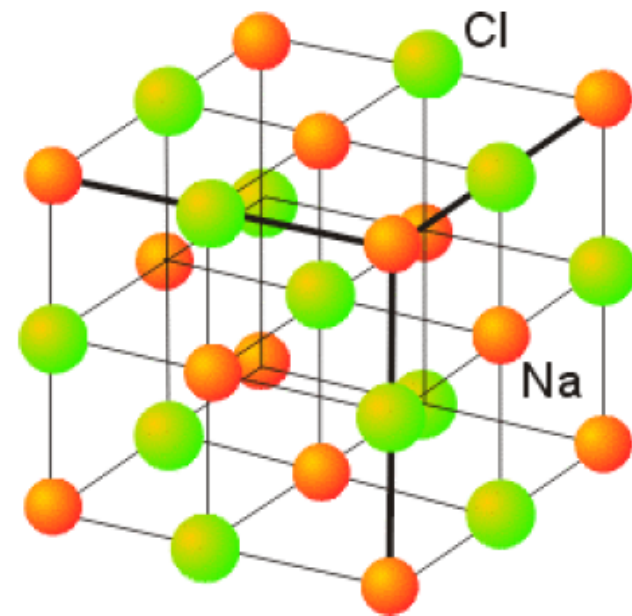
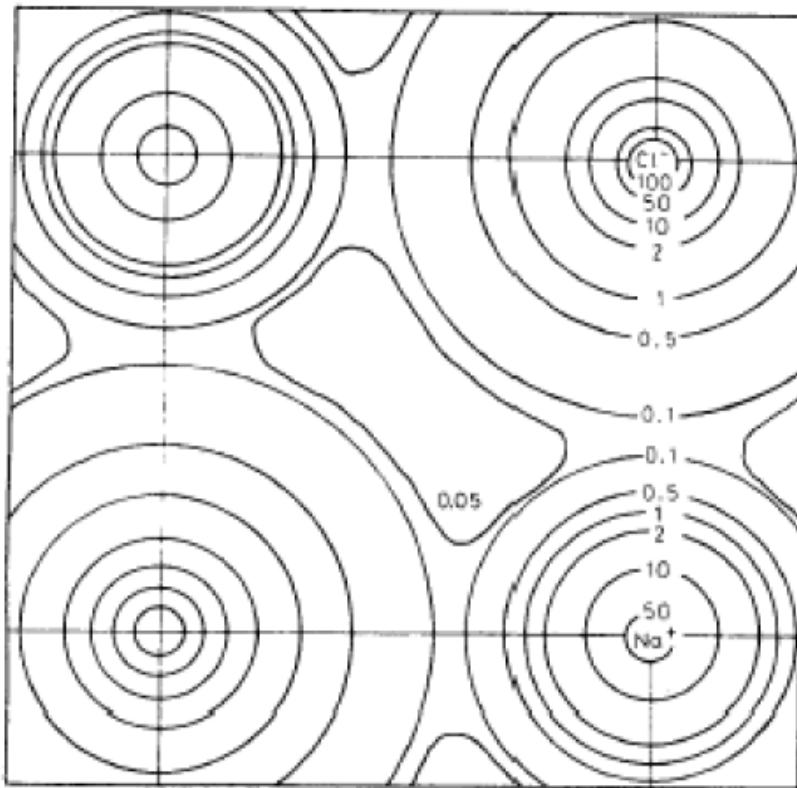


Основные параметры кристаллической структуры:

1. Сингония и параметры элементарной ячейки
2. Координаты атомов, длины связей и величины валентных углов
3. Фактор достоверности

# Электронная плотность

Электронная плотность по данным рентгеновской дифракции



Карта электронной плотности NaCl



## Особенности дифракции нейтронов

1. Нейтроны очень дороги – требуются реакторы для их получения
2. Используется для анализа кристаллических структур, содержащих легкие атомы – H, Li, B
3. Единственный метод для анализа магнитной структуры

## Особенности электронной дифракции

1. Можно использовать для очень малого количества вещества
2. Используется для анализа особенностей кристаллической структуры на очень тонких образцах

# Раман - спектрометр



Рамановский спектрометр Renishaw inVia Reflex (Англия) 19 млн. руб.

# Спектроскопия

## Что такое спектр?

1) Система атомов устойчива в определенных состояниях, которым соответствуют значения энергии  $E_0 < E_1 < E_2 < E_3 < \dots$

2) Переход из состояния с  $E_i$  в состояние с  $E_j$  связан с электромагнитным излучением или поглощением, причем

$$\Delta E = E_i - E_j = h\nu = hc/\lambda = hc\tilde{\nu} = kT$$

$h$  – постоянная Планка,  $6.626 \cdot 10^{-34}$  Дж · с

$\nu$  – частота излучения ( $\text{с}^{-1}$ , Гц)

$c$  – скорость света,  $2.997 \cdot 10^8$  м/с

$\lambda$  – длина волны излучения (м, см, нм)

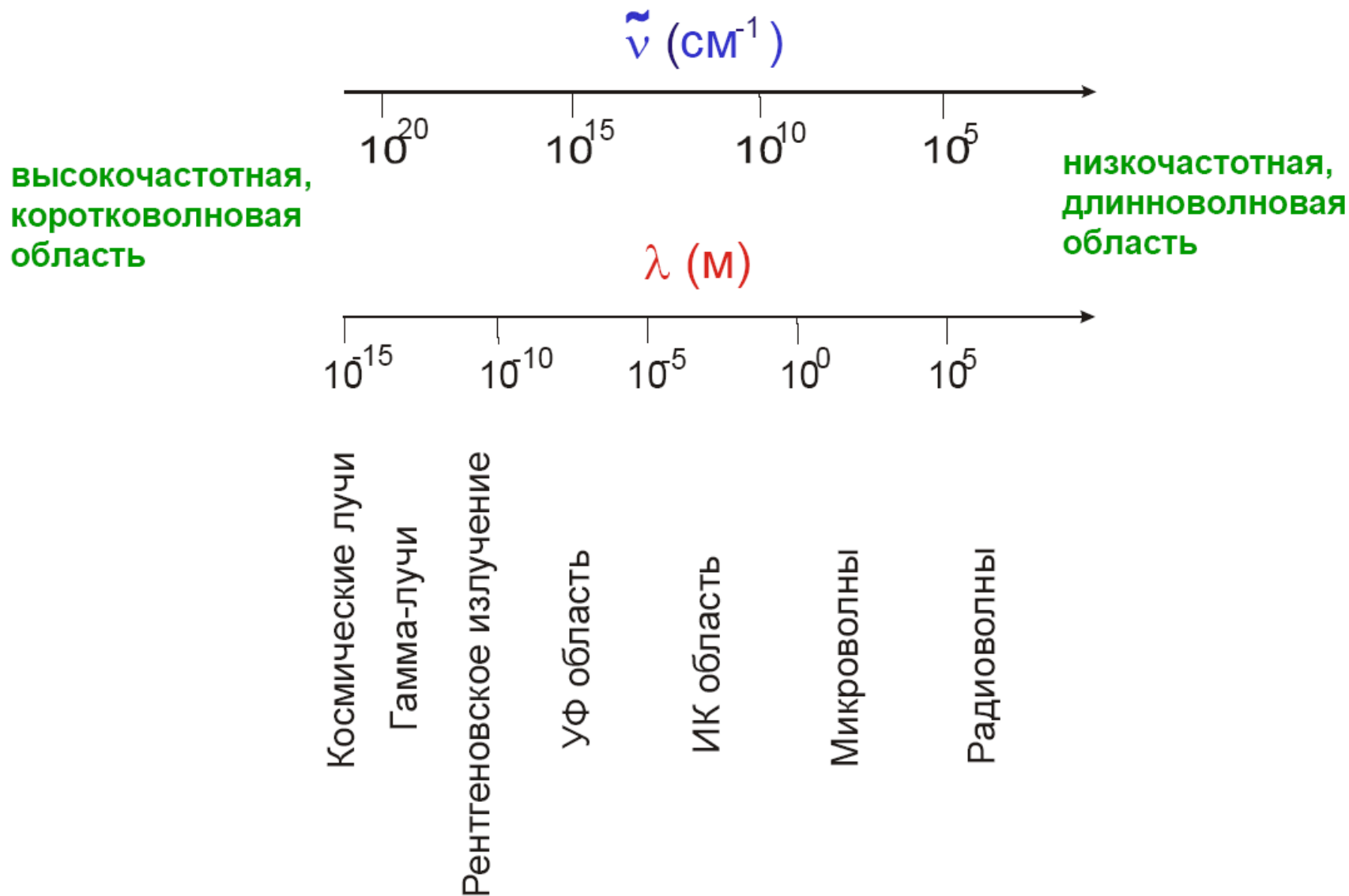
$\tilde{\nu}$  – волновое число ( $\text{см}^{-1}$ )

$k$  – константа Больцмана,  $1.381 \cdot 10^{-23}$  Дж/К

$T$  – абсолютная температура (К)

3) Набор дискретных переходов на разных частотах называется **спектром**

# Шкала частот



# Шкала

Шкала / спектр	гамма-лучи	X-лучи	УФ область	видимый свет	ИК область	микро-волны	радиоволны
частота, Гц	$10^{20}-10^{18}$	$10^{18}-10^{17}$	$10^{17}-10^{15}$	$10^{14}$	$10^{13}-10^{12}$	$10^{12}-10^9$	$10^9-10^7$
волновое число, $\text{см}^{-1}$	$10^{10}-10^8$	$10^8-10^7$	$10^7-10^5$	$10^4$	$10^3-10^2$	$10^2-10^{-1}$	$10^{-1}-10^{-3}$
длина волны, см	$10^{-10}-10^{-8}$	$10^{-8}-10^{-7}$	$10^{-7}-10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}-10^{-2}$	$10^{-2}-10^1$	$10^1-10^3$
энергия, эВ	$10^7-10^5$	$10^5-10^3$	$10^3-10^1$	1	$10^{-1}-10^{-2}$	$10^{-2}-10^{-5}$	$10^{-6}-10^{-7}$
спектроскопия	ЯГР	РФЭС	УФ-вид.		ИК, КР	ЭПР	ЯМР, ЯКР

# Радуга

Космические лучи

Гамма-лучи

Рентгеновское излучение

УФ область

ИК область

Микроволны

Радиоволны

Видимый свет

400 нм

700 нм

Ф

С

Г

З

Ж

О

К

30



# УФ-видимая спектроскопия

Электронные спектры обусловлены переходами между электронными энергетическими уровнями.

*Чем определяются электронные спектры?*

Для **атомов**

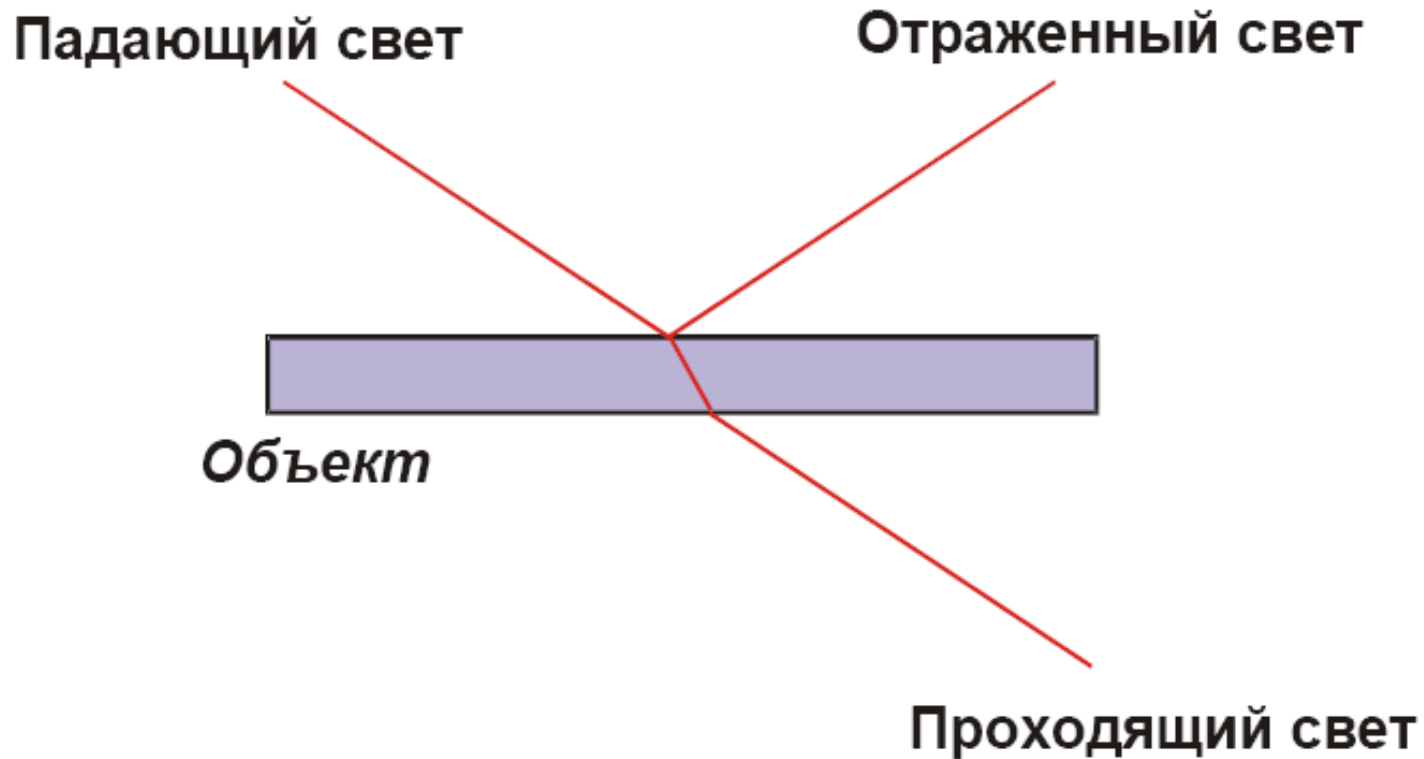
- электронной конфигурацией атомов

Для **комплексов**

- электронной конфигурацией центрального иона и его окружением

Электронные переходы в **комплексах** имеют энергию, соответствующую **УФ** и **видимой** областям электромагнитного спектра

# Дополнительные цвета



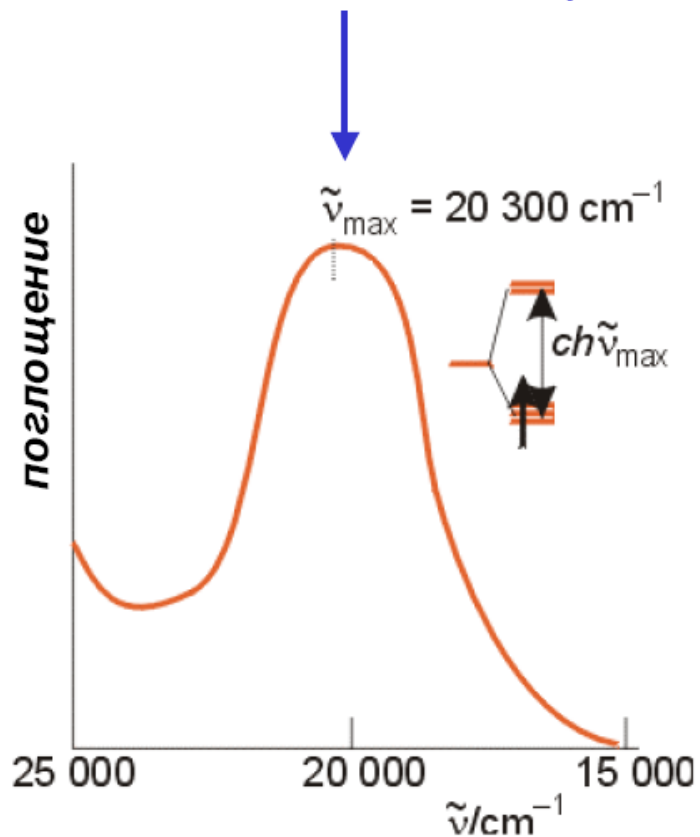
*Комплексы, поглощающие в видимой области спектра, имеют разную окраску в проходящем и отраженном свете*



# Окраска комплексов



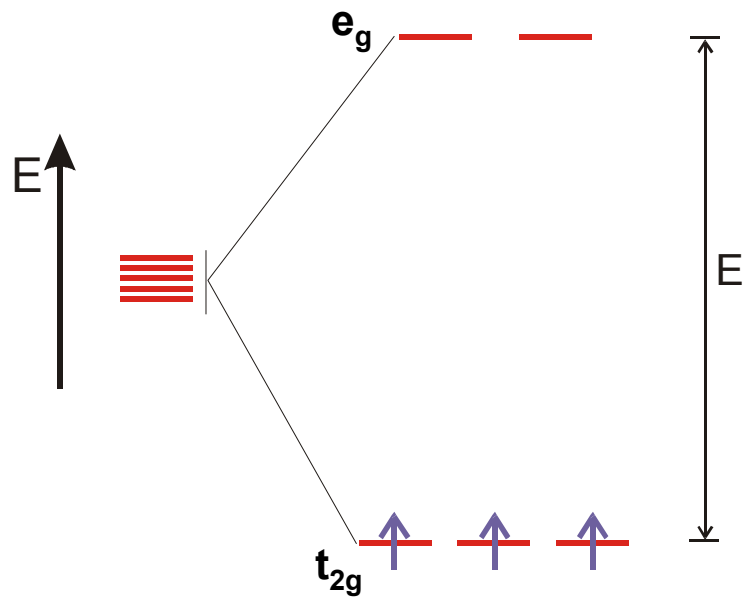
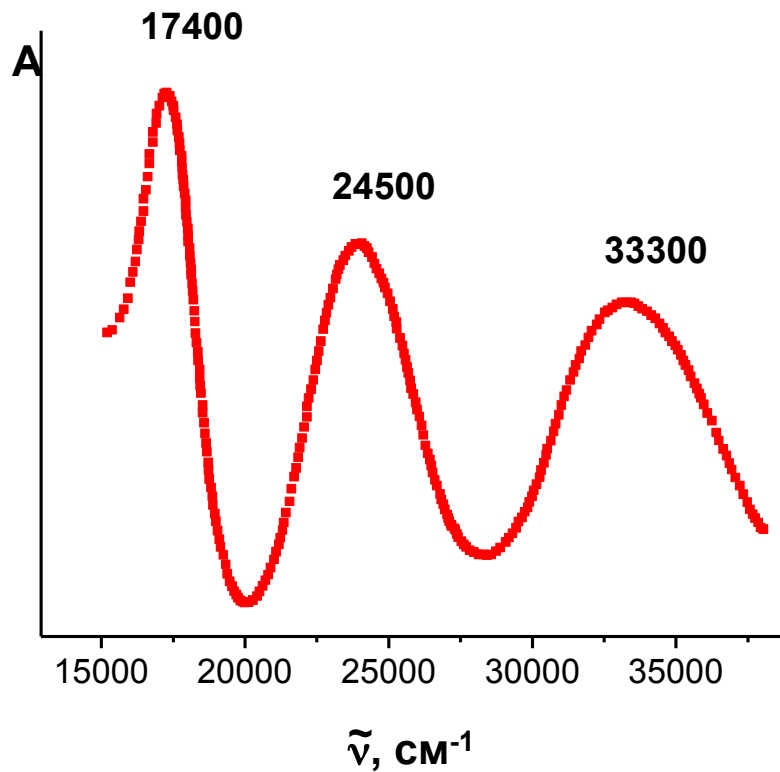
желтый; дополнительный – фиолетс



$$E = ch\tilde{\nu}_{\text{max}} N_A \text{ (кДж/моль)}$$



# УФ-видимый спектр $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$



Термы атомов !

Почему 3 линии в спектре ?

# Колебательная спектроскопия (ИК, КР)

Каждая молекула представляется как набор шариков (атомы) и пружин (связи между ними)

Применяется модель гармонического осциллятора:

При отклонении от равновесного положения возникает возвращающая сила  $F$ :

$$F = -kx$$

$k$  – силовая константа,  $x$  – параметр смещения.

Энергия колебания гармонического осциллятора:

$$E \sim h\nu = (h/2\pi) (k \cdot \mu)^{1/2}$$

( $\mu$  – эффективная масса)

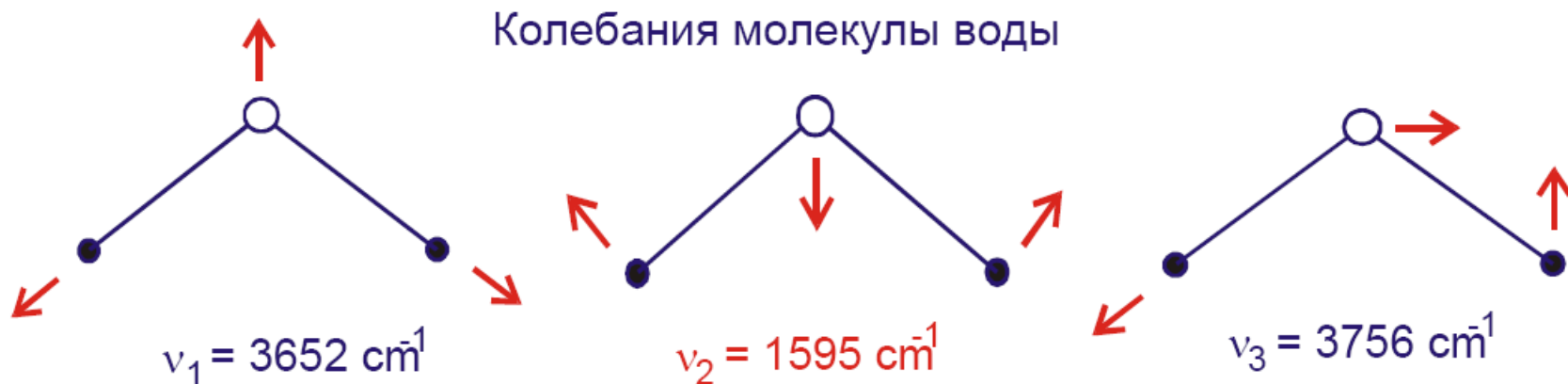
Колебания проявляются в диапазоне  $40 - 4000 \text{ см}^{-1}$

соответствует ИК-области

# Колебания молекул воды

Для каждой молекулы есть свой набор колебаний с характеристическими частотами

Их число определяется формулой  $3N-6$  или  $3N-5$  для линейных молекул



Частоты смещаются, если вода – лиганд. Смещение зависит от:

- 1) природы и степени окисления ц.а.
- 2) дентатности воды как лиганда

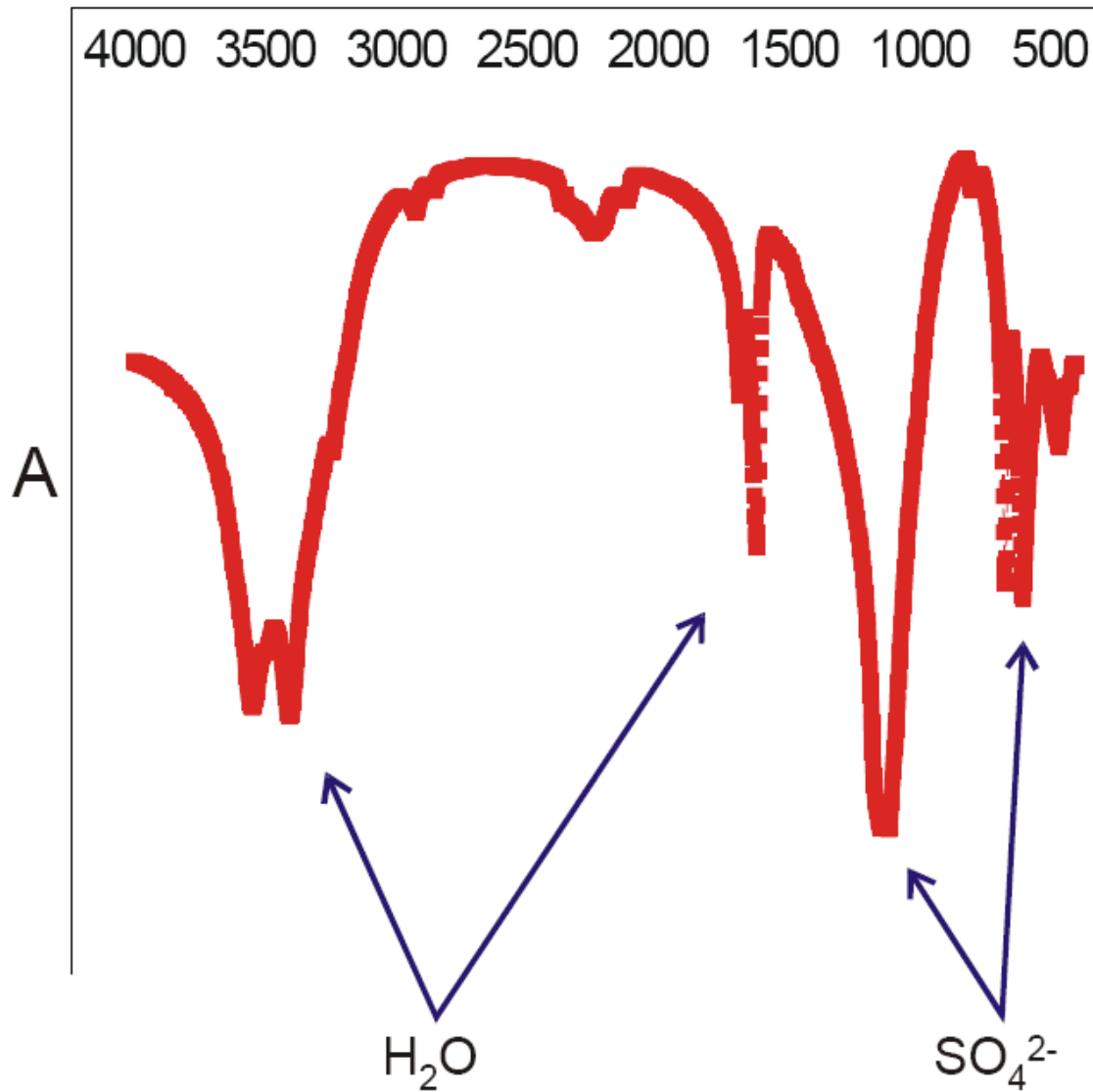
$\nu_1$   $\nu_3$  3600 - 3320  
 $\nu_2$  1650 - 1600

# Типичные частоты колебаний

Тип колебания	Диапазон частот	Тип колебания	Диапазон частот
<b>Валентные колебания</b>		<b>Деформационные колебания</b>	
$\nu$ (O–H)	3600–3000	$\delta$ (O–H), $\delta$ (N–H)	1650–1550
$\nu$ (C $\equiv$ C), $\nu$ (C $\equiv$ N)	2400–2100	$\delta$ (C–H)	1450–1250
$\nu$ (P–H), $\nu$ (C–H)	2250–2100	$\delta$ (C–O), $\delta$ (C–N)	1300–1000
$\nu$ (C=O)	1850–1650	$\delta$ (C–H), $\delta$ (N–H)	950–800
$\nu$ (C=C), $\nu$ (N=O), $\nu$ (C=N)	1750–1600	$\delta$ (Si–O), $\delta$ (P=O)	700–550
$\nu$ (N=N)	1650–1450	$\delta$ (S–O)	650–450
$\nu$ (Si–O), $\nu$ (P=O)	1300–1000		
$\nu$ (S–O)	1000–800		
$\nu$ (C–Cl)	750–690		

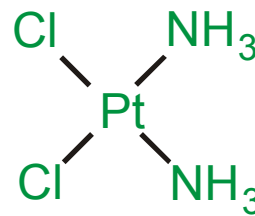
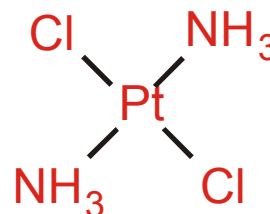
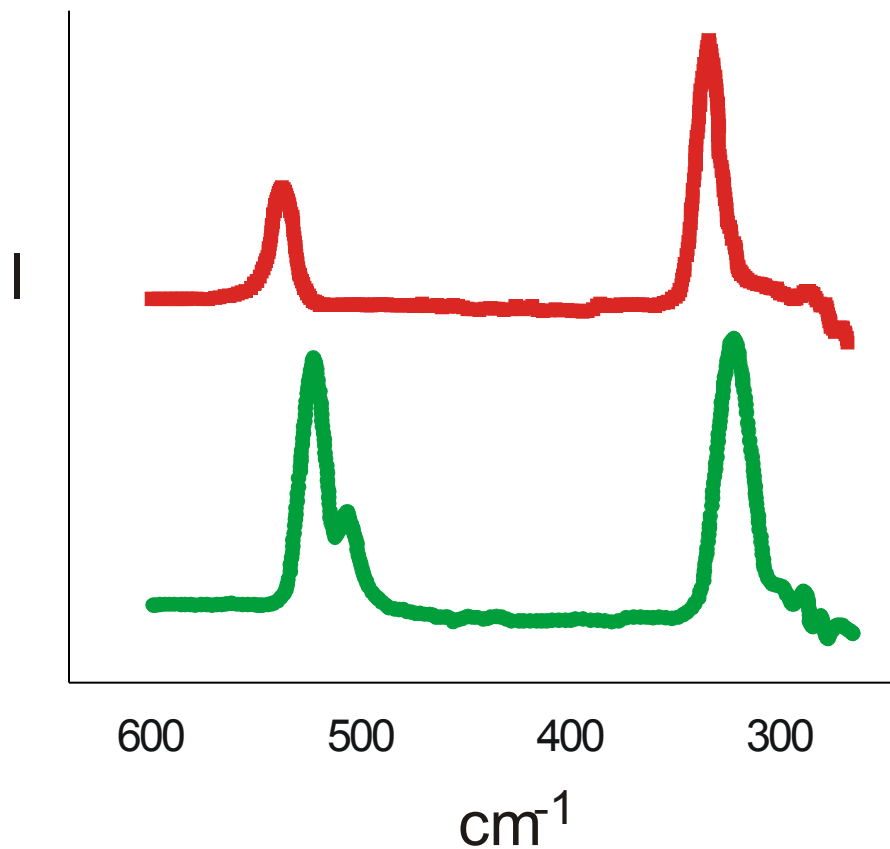
# Гипс

$\text{cm}^{-1}$



# Распознавание изомеров

КР-спектр цис и транс изомера  $\text{PtCl}_2(\text{NH}_3)_2$

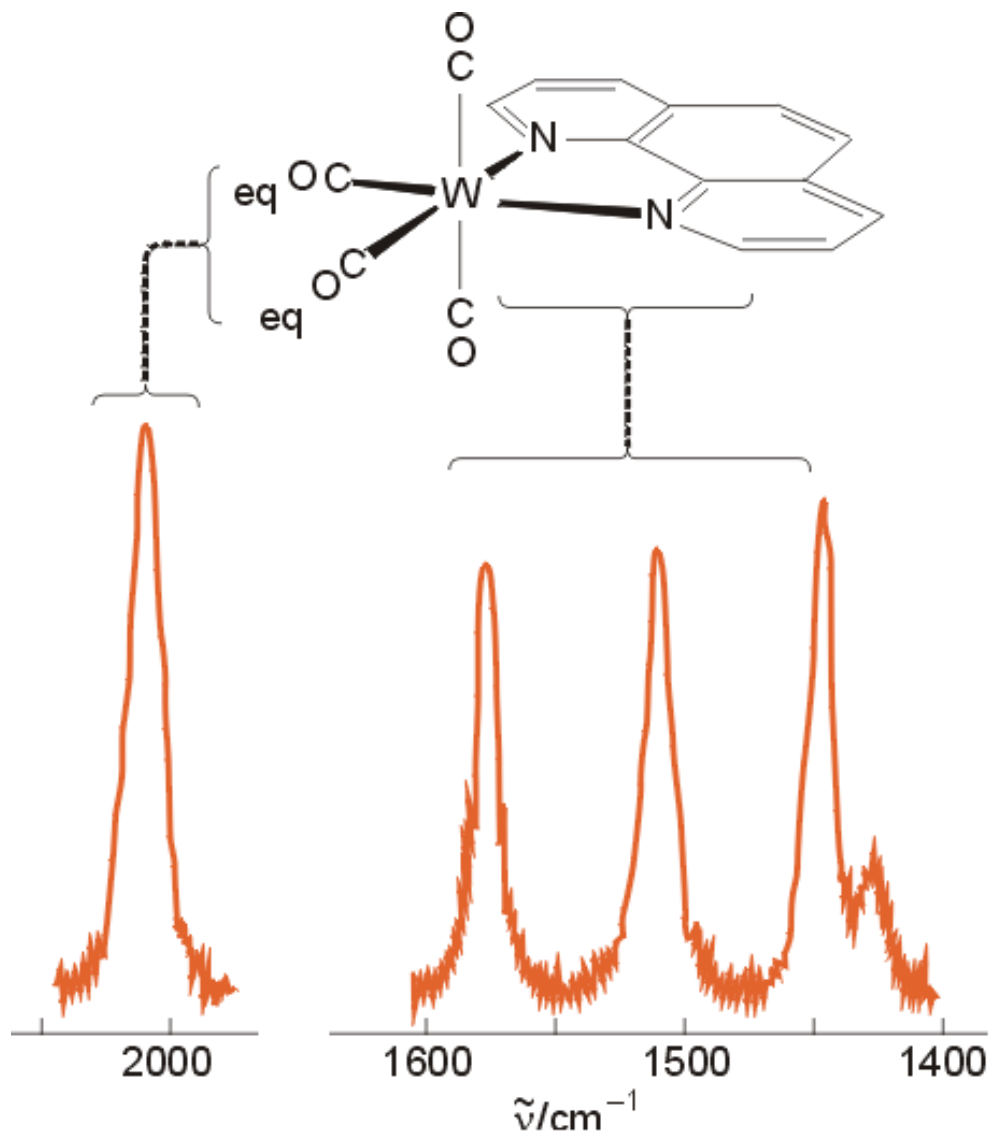


Характерные частоты:

Pt-Cl 300-350  $\text{cm}^{-1}$

Pt- $\text{NH}_3$  500-550  $\text{cm}^{-1}$

# Отнесение спектра сложной молекулы





# Спектроскопия ядерного магнитного резонанса (ЯМР)

1. Атомное ядро имеет спин  $I \geq 0$
2. Атомное ядро имеет квадрупольный момент, если  $I > \frac{1}{2}$
3. Свойства атомного ядра элемента зависят от числа нейтронов (изотопный эффект)

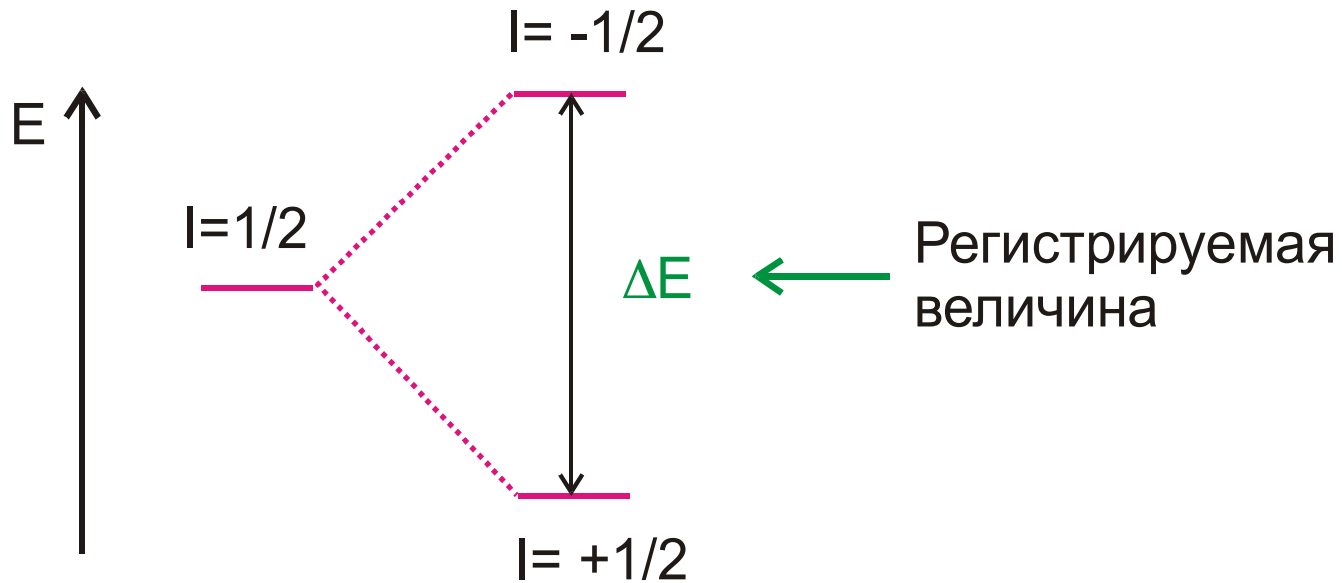
Для ЯМР-спектроскопии пригодны ядра, которые имеют:

1. Спин ядра  $I > 0$
2. Малый квадрупольный момент
3. Большую восприимчивость (произведение чувствительности ядра на распространенность изотопа)

В ЯМР-спектроскопии проявляется взаимодействие ядер с электронами

# Спектр ЯМР

Ядро с  $I > 0$  имеет  $2I + 1$  ориентаций относительно приложенного магнитного поля



Легче всего регистрировать спектр, если  $I = \frac{1}{2}$

В случае  $I \geq 1$  спектр осложняется квадрупольным взаимодействием.

Чем больше  $I$ , тем сложнее спектр.

# Основные параметры ЯМР-спектра

Химический сдвиг

$$\delta = 10^6 \cdot (\nu - \nu_{\text{ref}}) / \nu_{\text{ref}}$$

$\nu$  – наблюдаемая частота в спектре

$\nu_{\text{ref}}$  – частота стандарта

химический сдвиг (выражается в м.д.)

$\nu_{\text{ref}}$  устанавливается для каждого ядра

$$\nu_{\text{ref}} (^1\text{H}) = \nu \text{ Si(CH}_3)_4 \quad \nu_{\text{ref}} (^{31}\text{P}) = \nu \text{ H}_3\text{PO}_4 \text{ (85\%)}$$

Если  $\delta < 0$ , то ядро экранировано

Если  $\delta > 0$ , то ядро дезэранировано

Например, в спектре  $^1\text{H}$ :

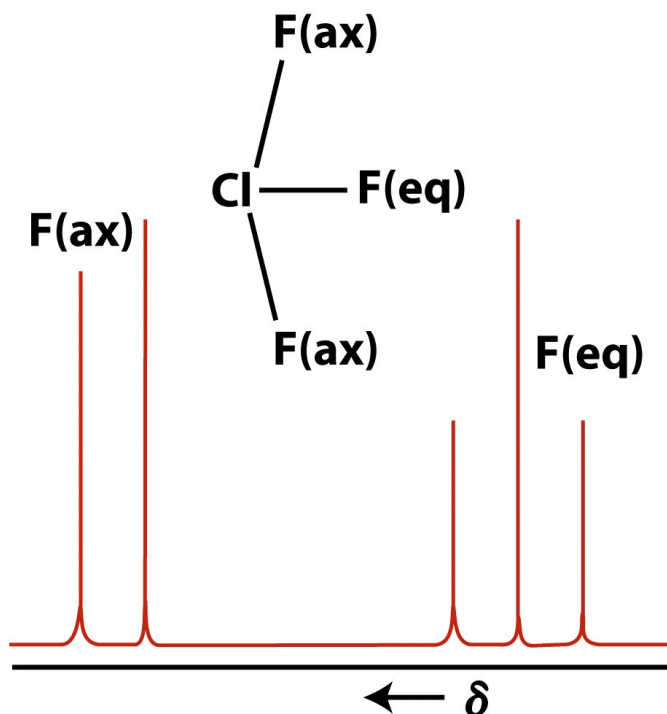
$$\delta < 0 \text{ для } \text{H-Co(CO)}_4 \quad \delta > 0 \text{ для } \text{H}_2\text{SO}_4$$

# Спин-спиновое взаимодействие – 1

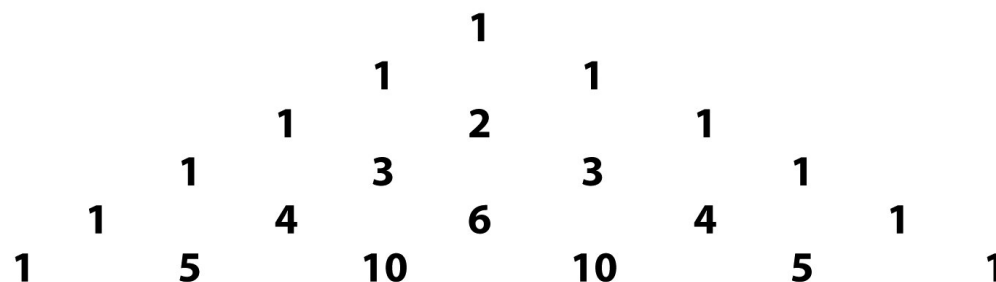
Расположенные близко друг от друга ядерные спины взаимодействуют

Число и спин взаимодействующих ядер определяют мультиплетность спектра  $M$

$$M = 2nI + 1$$



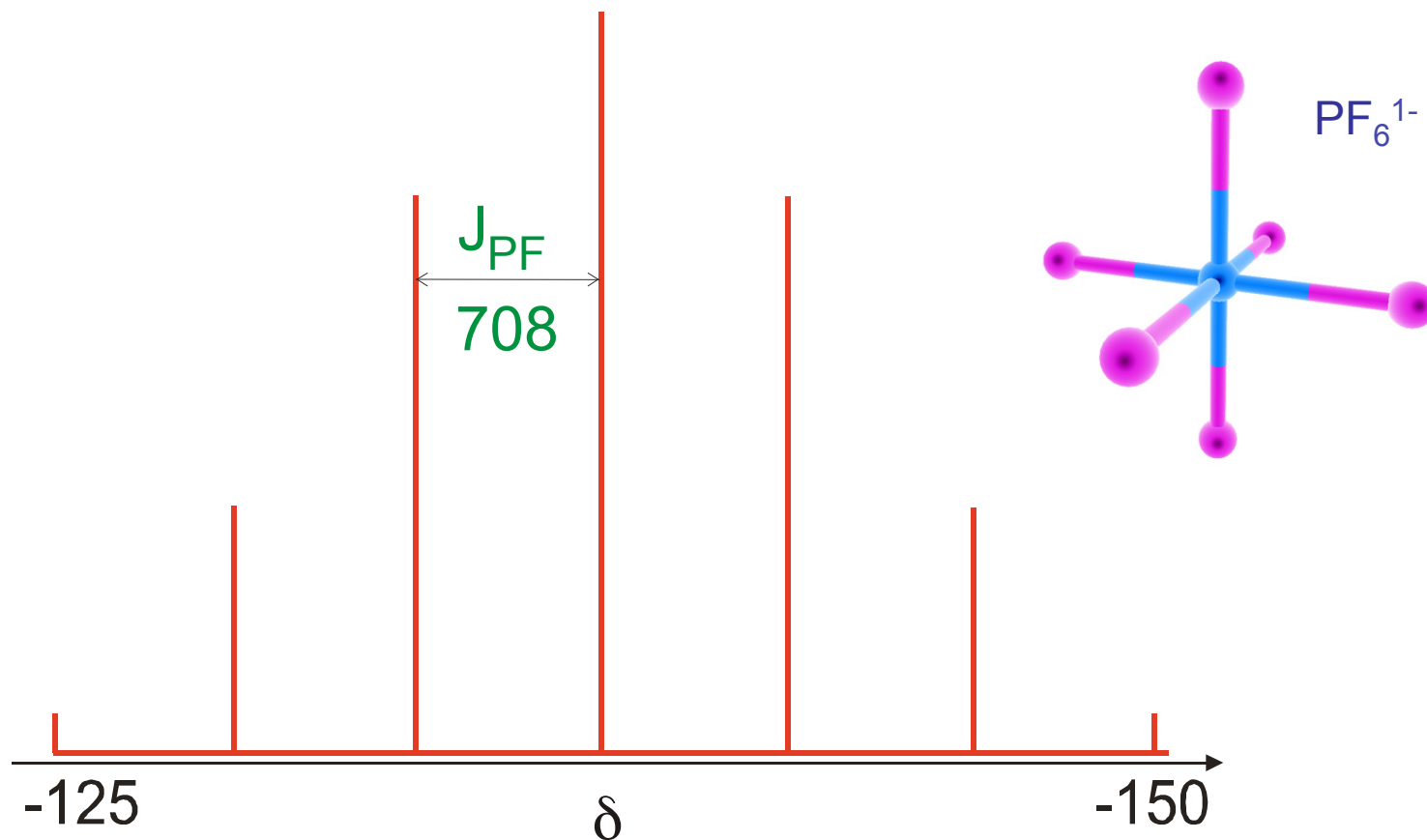
Интенсивность компонент спектра определяют по треугольнику Паскаля



**1** Pascal's triangle

# Спин-спиновое взаимодействие – 2

Сила взаимодействия выражается через константу спин-спинового взаимодействия  $J$  (Гц)



$^{31}\text{P}$  ЯМР спектр аниона  $\text{PF}_6^{1-}$  в растворе

# Другие резонансные методы

1. Спектроскопия электронного спинового резонанса (ЭСР),  
другое название – электронного парамагнитного резонанса (ЭПР)

Спектр возникает в результате резонансного поглощения электромагнитного излучения неспаренными электронами.

Позволяет получать информацию о:

- 1) Парамагнитных центрах
- 2) Концентрации парамагнитных примесей
- 3) Особенности химической связи
- 4) Распределении электронной плотности в кристалле

# Другие резонансные методы

## 2. Мессбауэровская спектроскопия (ЯГР)

Спектр возникает в результате резонансного поглощения без отдачи атомным ядром монохроматического  $\gamma$ -излучения, испускаемого радиоактивным источником.

Позволяет получать информацию о:

- 1) Электронной структуре атома в соединении
- 2) Симметрии распределения электронной плотности
- 3) Степени ионности химической связи

Основные мессбауэровские изотопы:

$^{57}\text{Fe}$ ,  $^{119}\text{Sn}$ ,  $^{121}\text{Sb}$ ,  $^{125}\text{Te}$ ,  $^{151}\text{Eu}$ ,  $^{191}\text{Ir}$ ,  $^{197}\text{Au}$

# «Кальмар»



**СКВИД-магнетометр S700 производства компании Cryogenic (Англия) 12 млн.руб.**



# Магнетохимия

При наличии неспаренного электрона возникает парамагнетизм

Соединения с неспаренным электроном парамагнитны

Соединения без неспаренных электронов диамагнитны

Парамагнитные вещества втягиваются магнитным полем,

Диамагнитные вещества выталкиваются магнитным полем

В веществе, помещенном в магнитное поле напряженностью  $H$ , развивается намагниченность  $M = \chi H$ ,

где  $\chi$  – магнитная восприимчивость.

$\chi$  мала и отрицательна для диамагнетиков,

$\chi$  мала и положительна для парамагнетиков

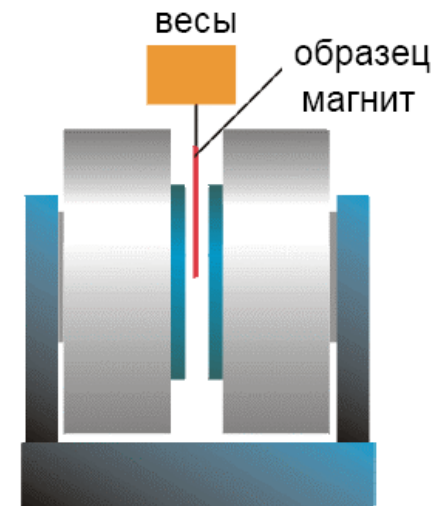
*а также*

$\chi$  велика и положительна для ферромагнетиков

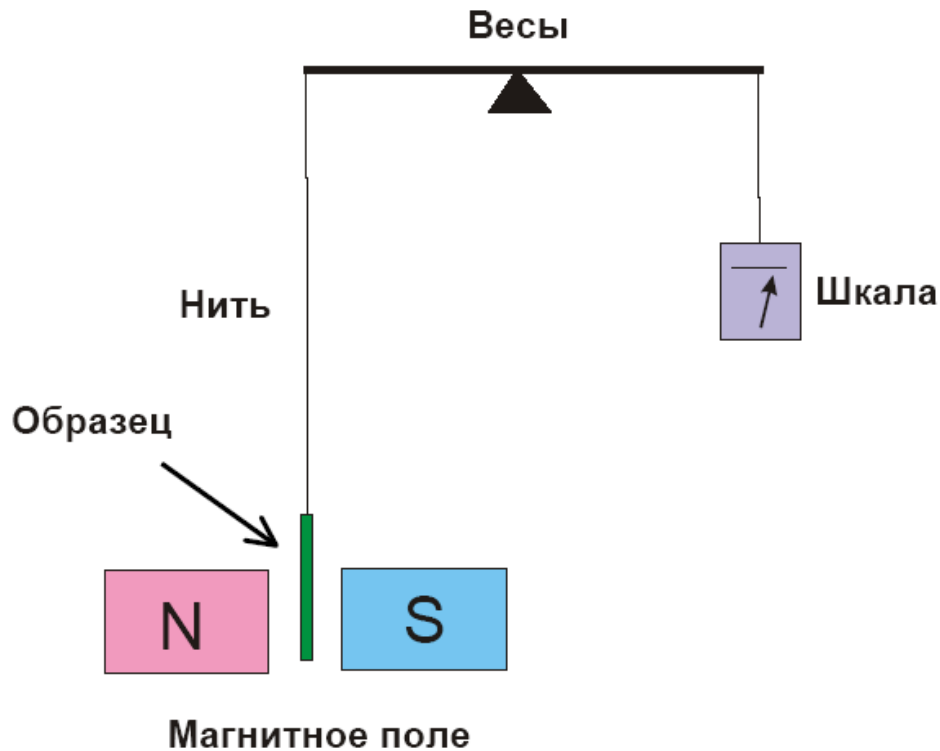
$\chi$  велика и отрицательна для сверхпроводников



А.Гейм  
«Шнобелевская  
премия» по физике  
2000 г.  
Нобелевская премия  
По физике,  
2010 г. (графен)



# Магнитные измерения



*Схема измерения магнитной восприимчивости*

Измеряется магнитная восприимчивость  $\chi$

Рассчитывается магнитный момент  $\mu$

$$\mu = \frac{\sqrt{3R}}{N_A} \sqrt{\chi T}$$

Магнитный момент выражается в магнетонах бора (мБ)

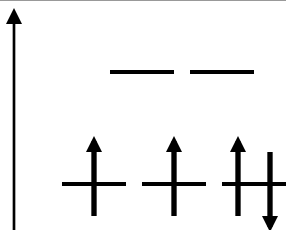
Предсказание для d-металлов:

$$\mu = \sqrt{n(n+2)} = 4 \sqrt{S(S+1)}$$

$n$  – число неспаренных электронов;  $S$  – суммарный спин

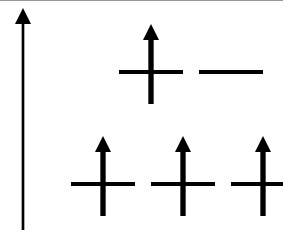
# Магнитные моменты октаэдрических комплексов

ИОН	$d^n$	$\mu_s$	$\mu_{obs}$
$Ti^{3+}$	$d^1$	1.73	1.6–1.8
$V^{4+}$	$d^1$	1.73	1.7–1.8
$V^{3+}$	$d^2$	2.83	2.7–2.9
$Cr^{3+}$	$d^3$	3.88	3.8–3.9
$Cr^{2+}$	$d^4$ (hs)	4.90	4.7–4.9
$Cr^{2+}$	$d^4$ (ls)	2.83	3.2–3.3



Сильное поле

$d^4$



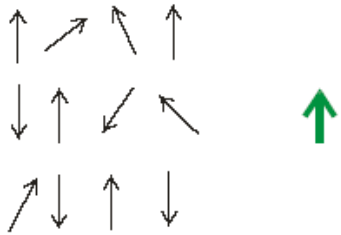
Слабое поле

$Co^{2+}$	$d^7$ (hs)	3.88	4.3–5.2
$Co^{2+}$	$d^7$ (ls)	1.73	1.8–1.9
$Ni^{2+}$	$d^8$	2.83	2.8–3.5
$Cu^{2+}$	$d^9$	1.73	1.7–2.2

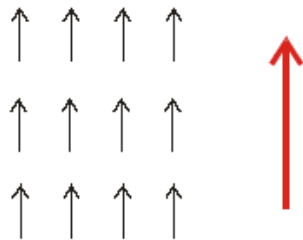
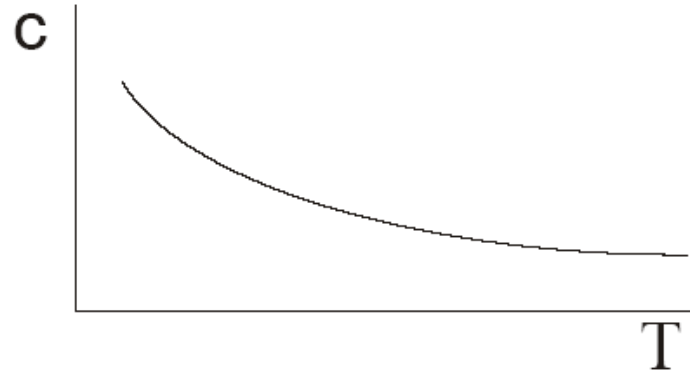
$\mu_s \neq \mu_{obs}$

{ межэлектронное отталкивание спаренных электронов  
спин-орбитальное взаимодействие (сильное для 4d и 5d)

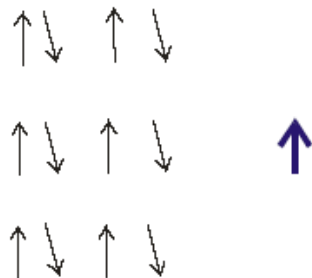
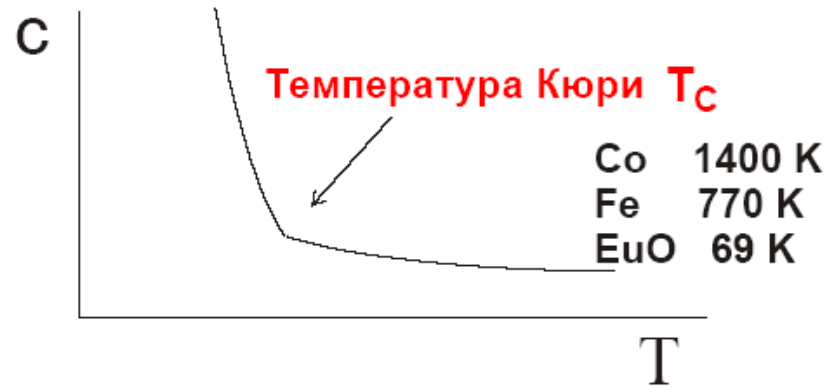
# Магнитные материалы



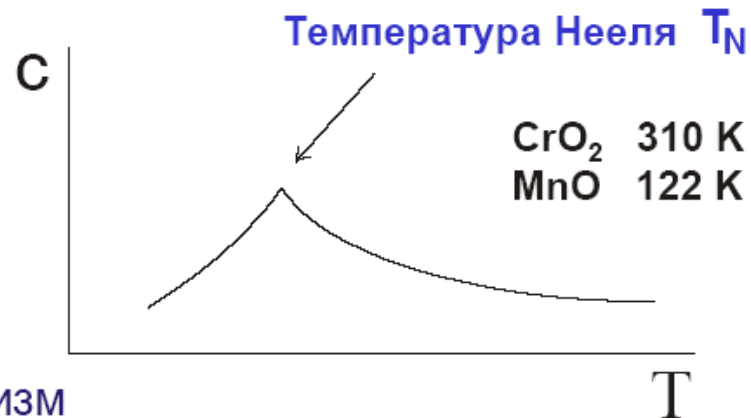
Парамагнетизм  
Кюри-Вейса



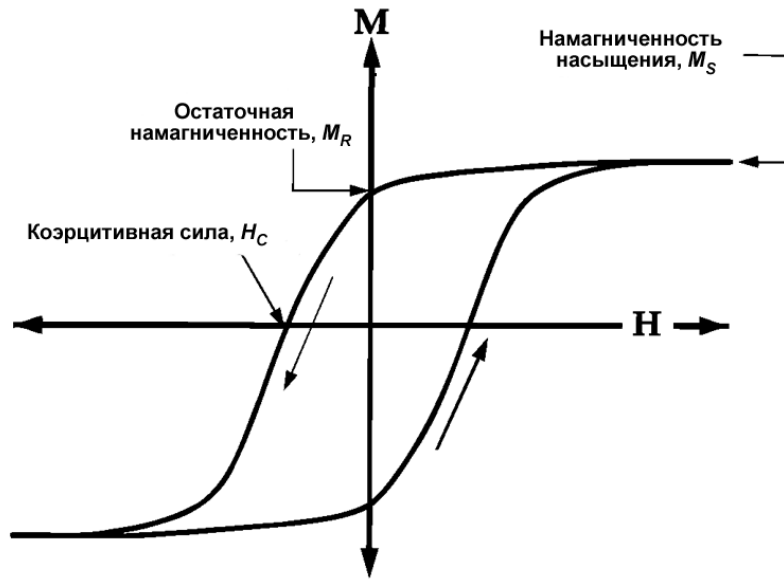
Ферромагнетизм



Антиферромагнетизм

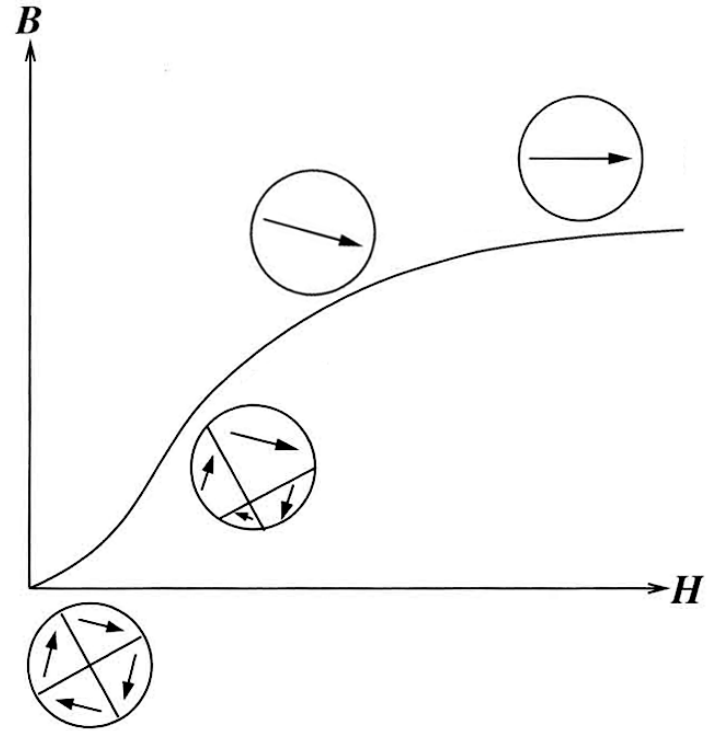


# Петля гистерезиса



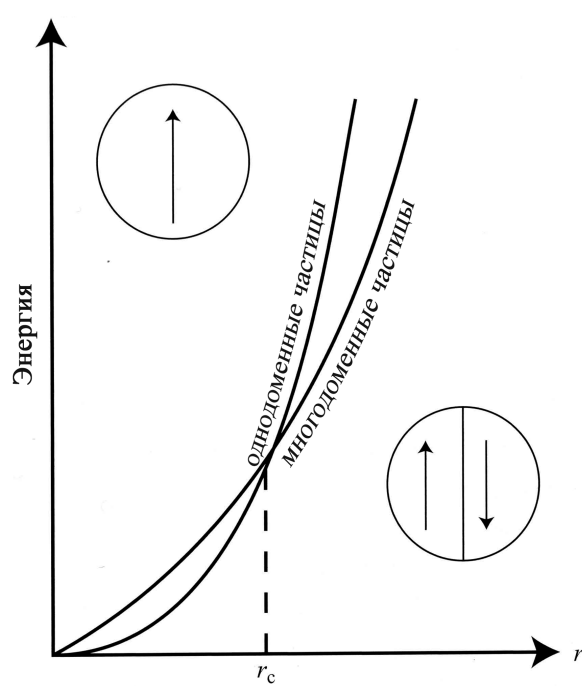
$$\bar{\mu} = \mu \left( \operatorname{cth} \left( \frac{\mu H}{kT} \right) - \frac{kT}{\mu H} \right),$$

**Петля гистерезиса и основные параметры магнитных материалов.**

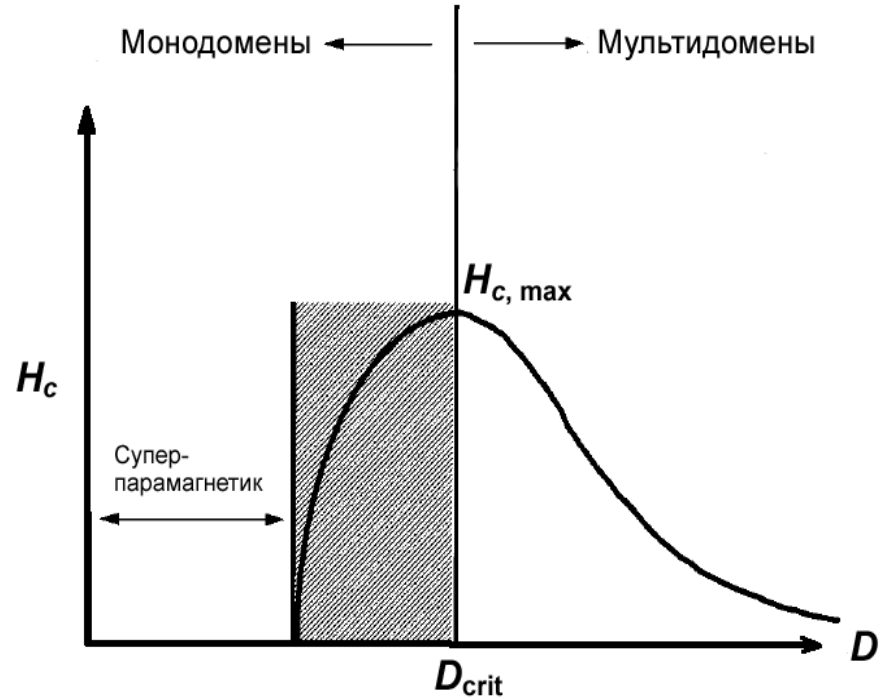


**Изменение доменной структуры в процессе намагничивания ферромагнитного материала.**

# Суперпарамагнетизм



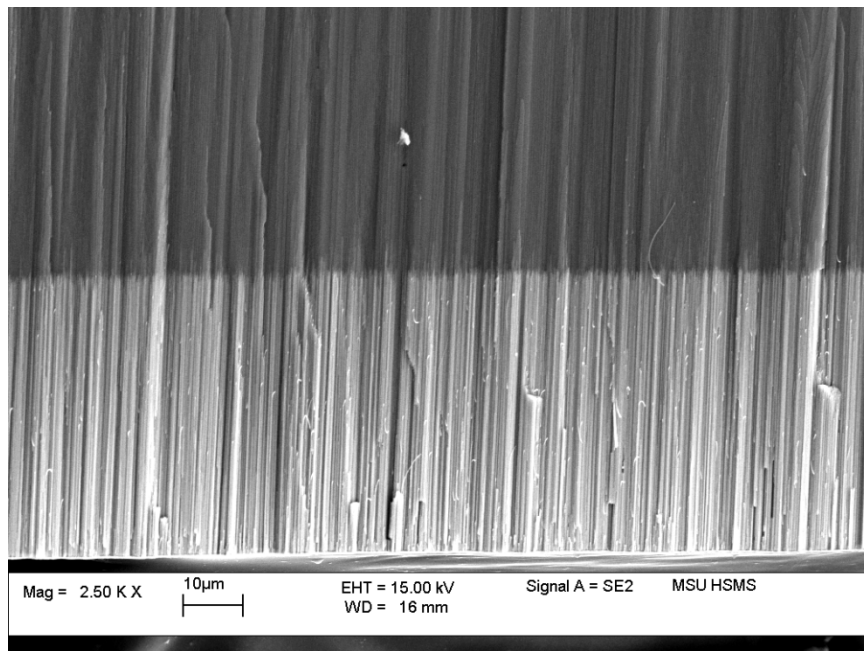
Относительная стабильность  
одно- и многодоменных частиц.



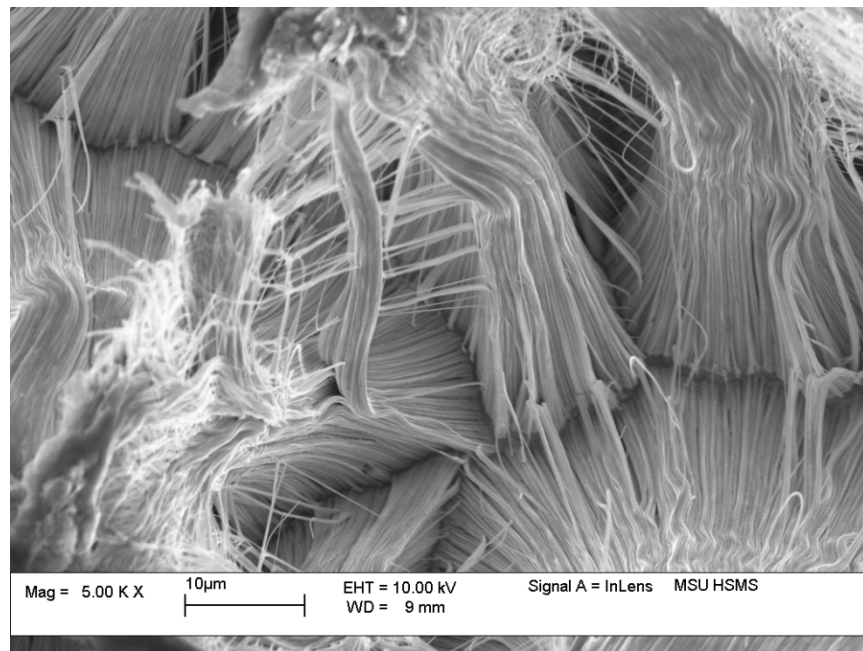
Зависимость коэрцитивной  
силы от размера частиц.

# Ферромагнитные нанопроволоки

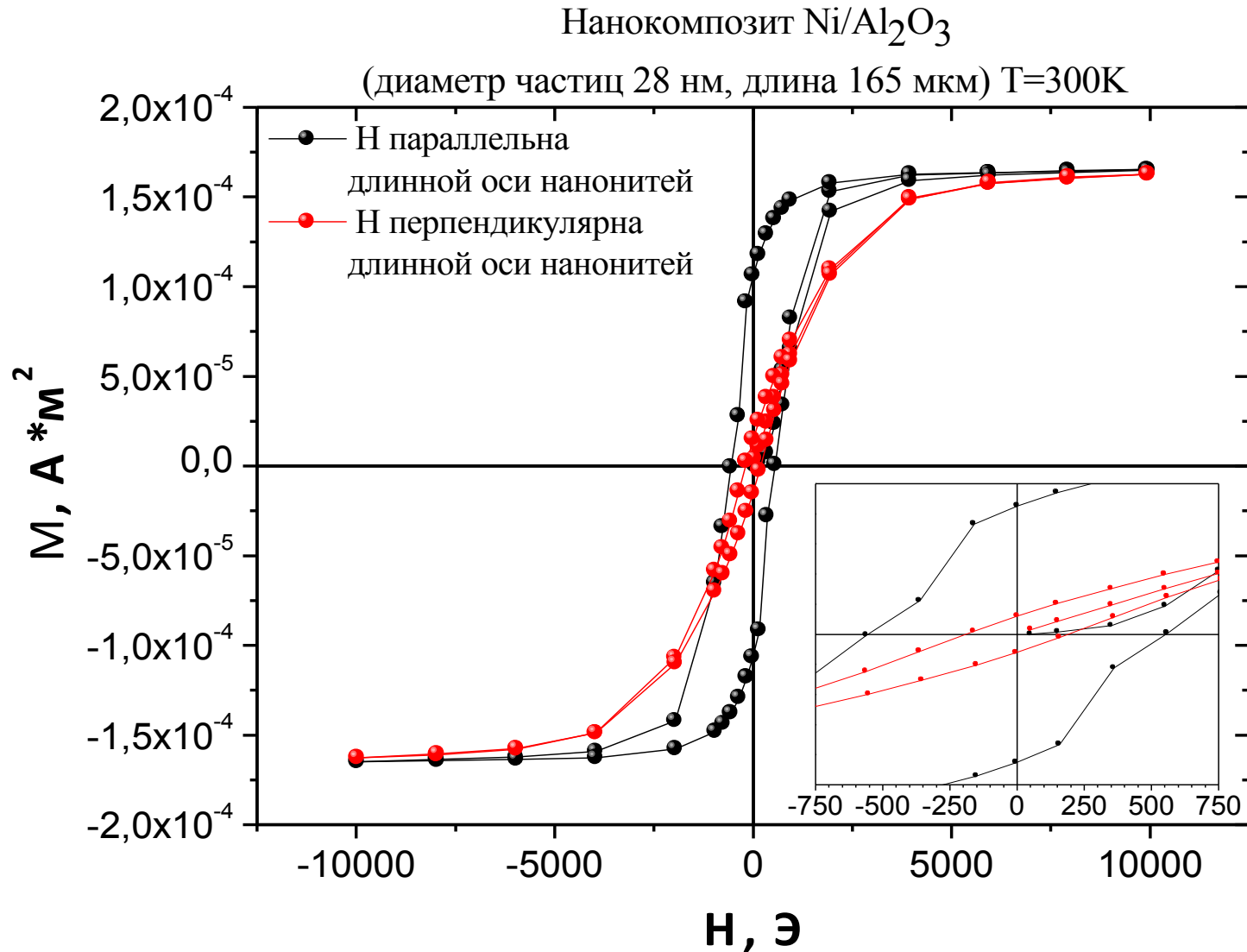
«Разрез»



Растворение пористой матрицы



# Анизотропия свойств





# Термический анализ



(Perkin Elmer США, 2002)

Диапазон температур – 20 - 1300°C

Скорость нагрева - от 0.01 - 100 °C/мин

Масса навески – от 5 до 200 мг

Материал тиглей - Pt

Чувствительность весов - 0.2 мкг

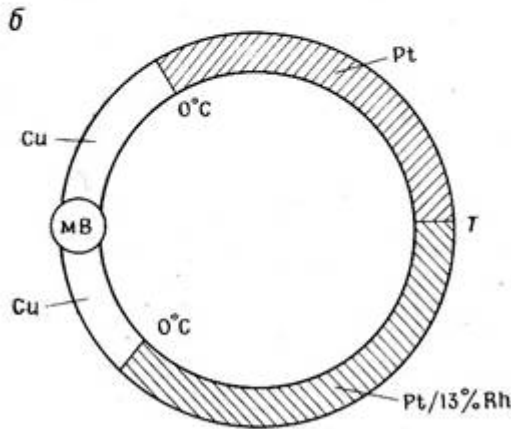
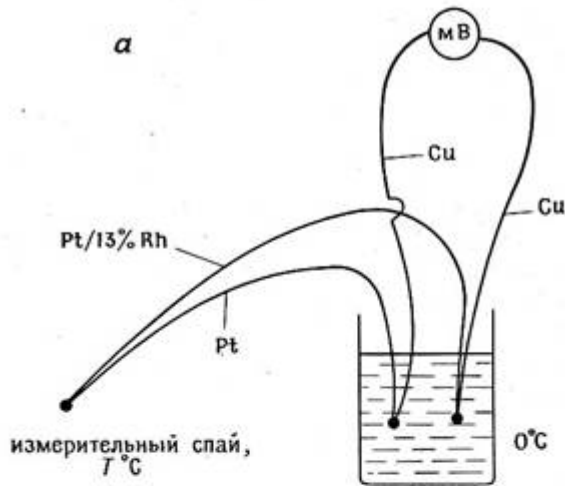
Атмосфера: воздух, инертный газ или вакуум (до 2 Торр)

Скорость потока газа - до 1000 мл/мин

Формат вывода: Excel файл

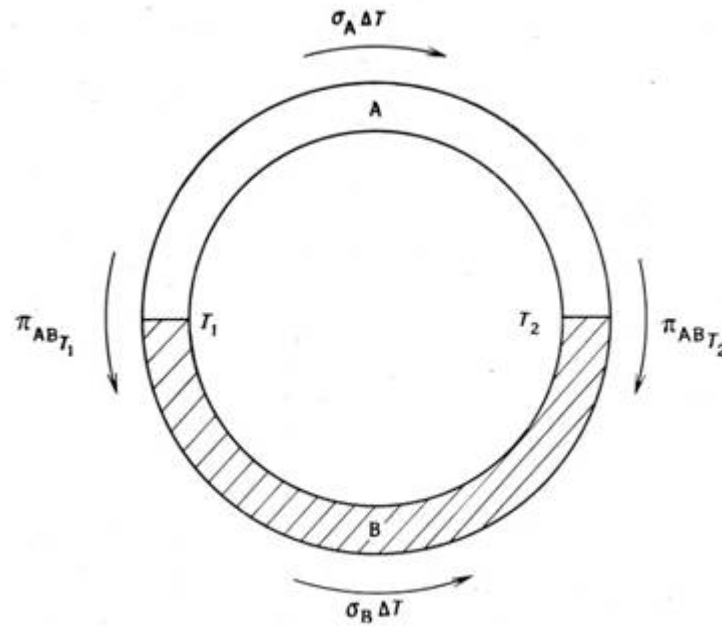
**Термоанализатор Perkin Elmer Pyris Diamond**

# Термопары



При  $0^{\circ}\text{C}$ :  $\pi_{\text{Pt,Cu}} - \pi_{\text{Pt/13\%Rh,Cu}} = \pi_{\text{Pt,Pt/13\%Rh}}$

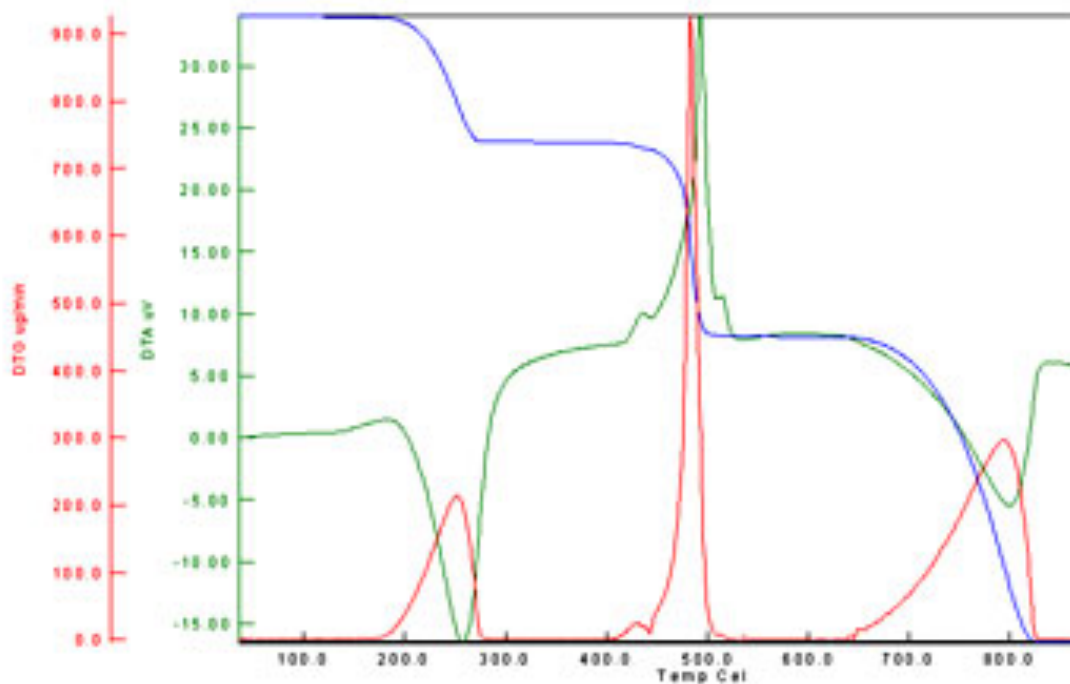
Схема цепи с термопарой.



Эффект Пельтье и Томсона в термопаре.

**В обоих контактах (измерительный и холодный спай) возникает как эдс Пельтье, так и эдс Томсона (различны температуры и температурные градиенты). Результирующая по всему контуру эдс равна их алгебраической сумме и, как правило, отлична от нуля. В результате по контуру будет идти ток, зависящий от разности температур спаев (эффект Зеебека).**

# Термогравиметрия, ТГА - ДТА



Термический анализ  $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (красная - DTG, синяя - TG, зеленая - DTA)

## Сканирующий Зондовый Микроскоп NT-MDT NTEGRA Aura



Атмосфера: съемка на воздухе или в вакууме до  $10^{-2}$  Торр  
Температура съемки: от комнатной до  $150^{\circ}\text{C}$   
Внешнее магнитное поле: до 0.2 Тл  
Максимальное поле сканирования:  $110 \times 110$  мкм  
Минимальные достижимые шумы: менее  $1 \text{ \AA}$

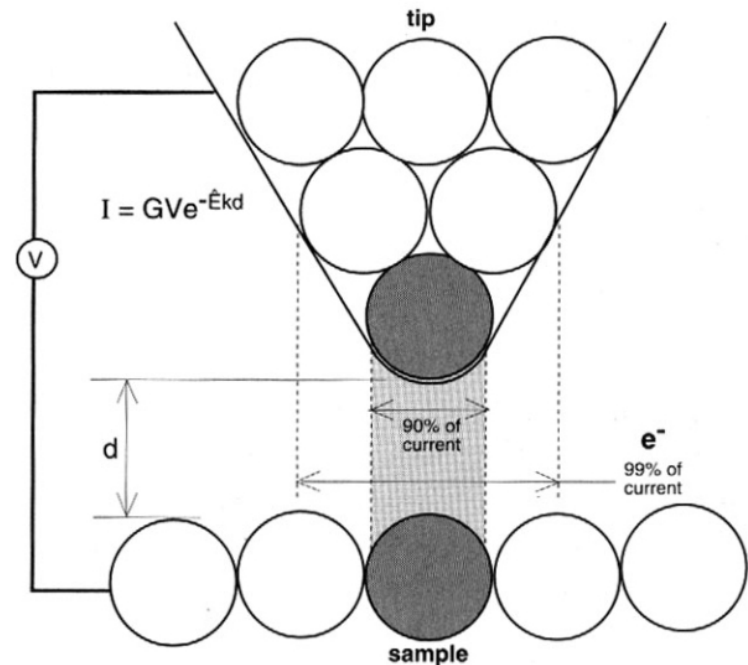
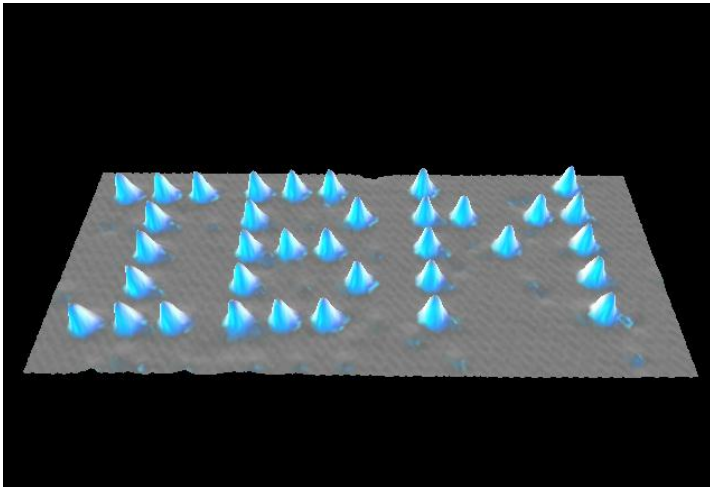
(NT-MDT, Россия 2005)

# Сканирующая Туннельная Микроскопия

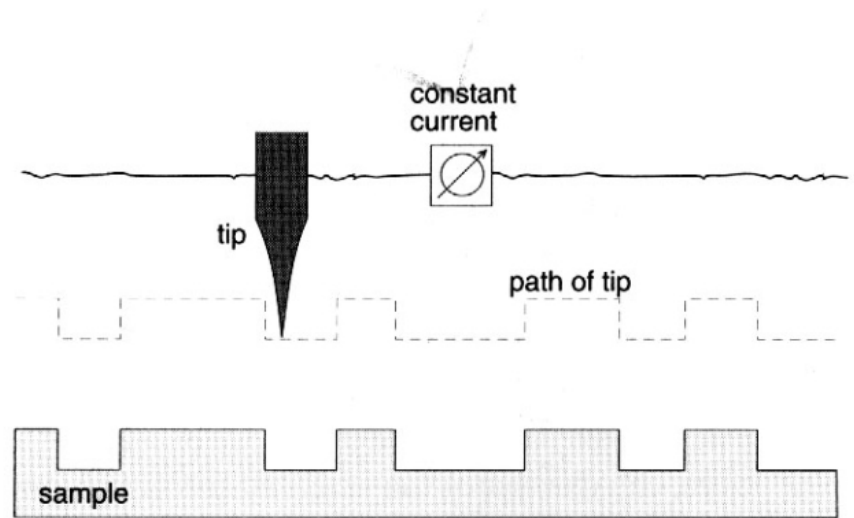
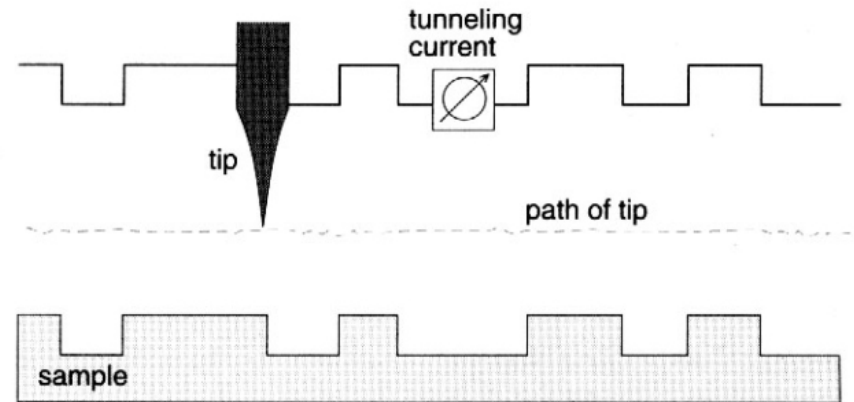
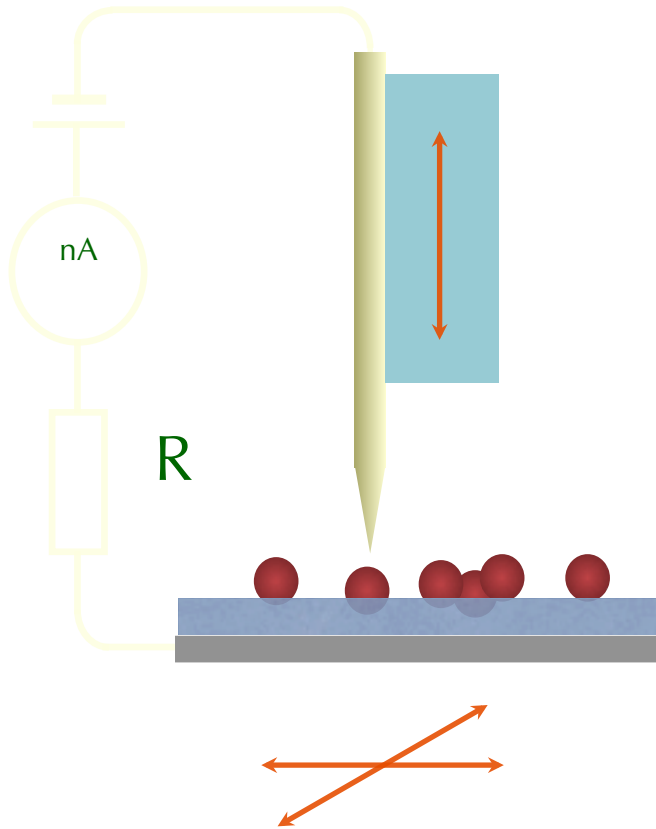


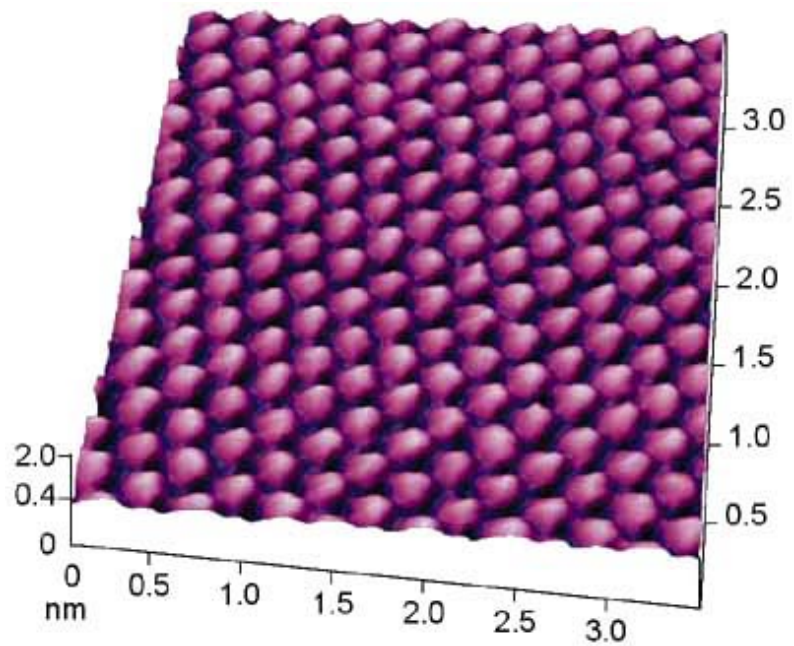
**Gerd Binnig** **Heinrich Rohrer**

- **1981** создание первого СТМ  
получение атомарного разрешения  
(IBM, Цюрих)
- **1986** Нобелевская премия

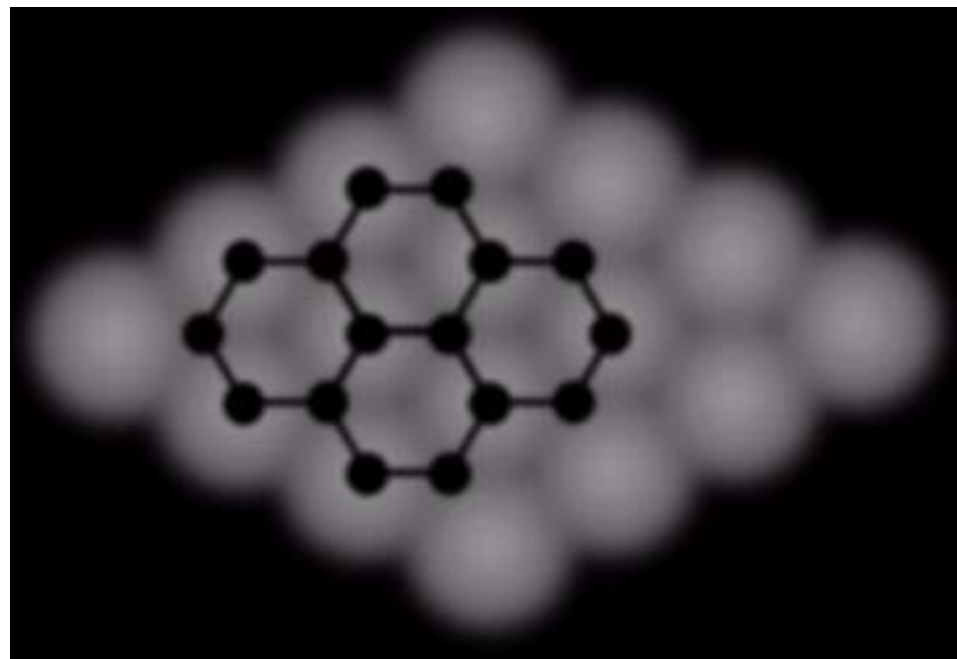


# Сканирующая Туннельная Микроскопия

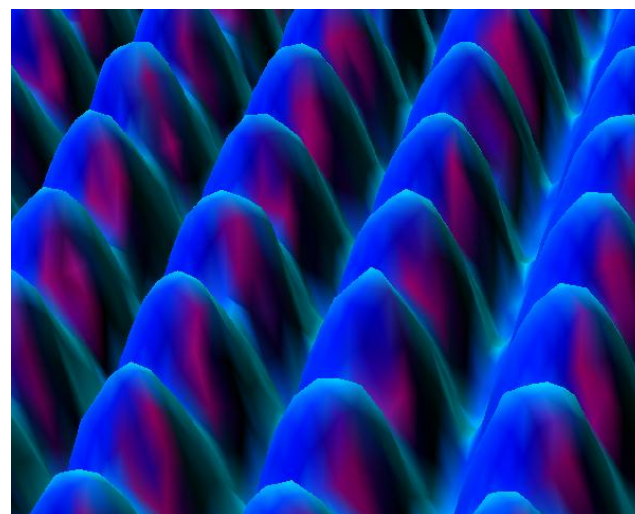
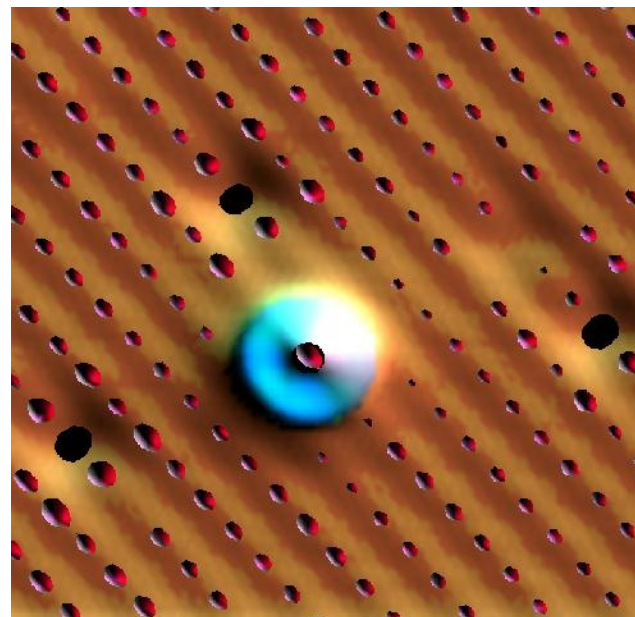
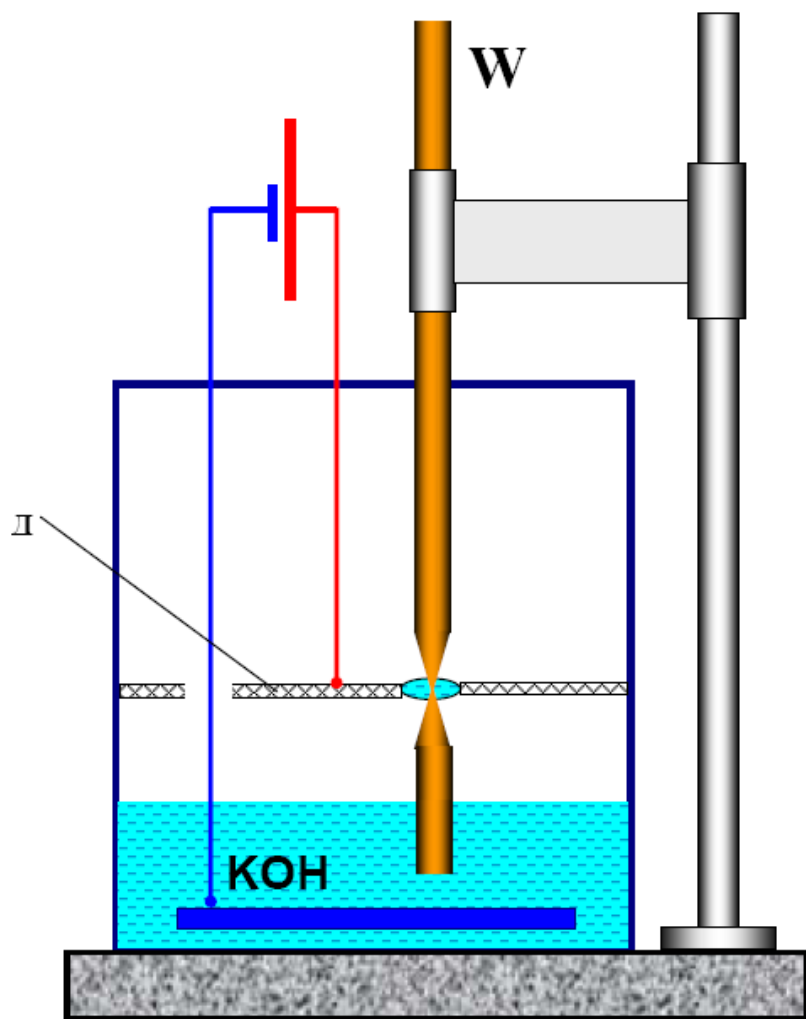




**Пиролитический  
графит в вакууме**

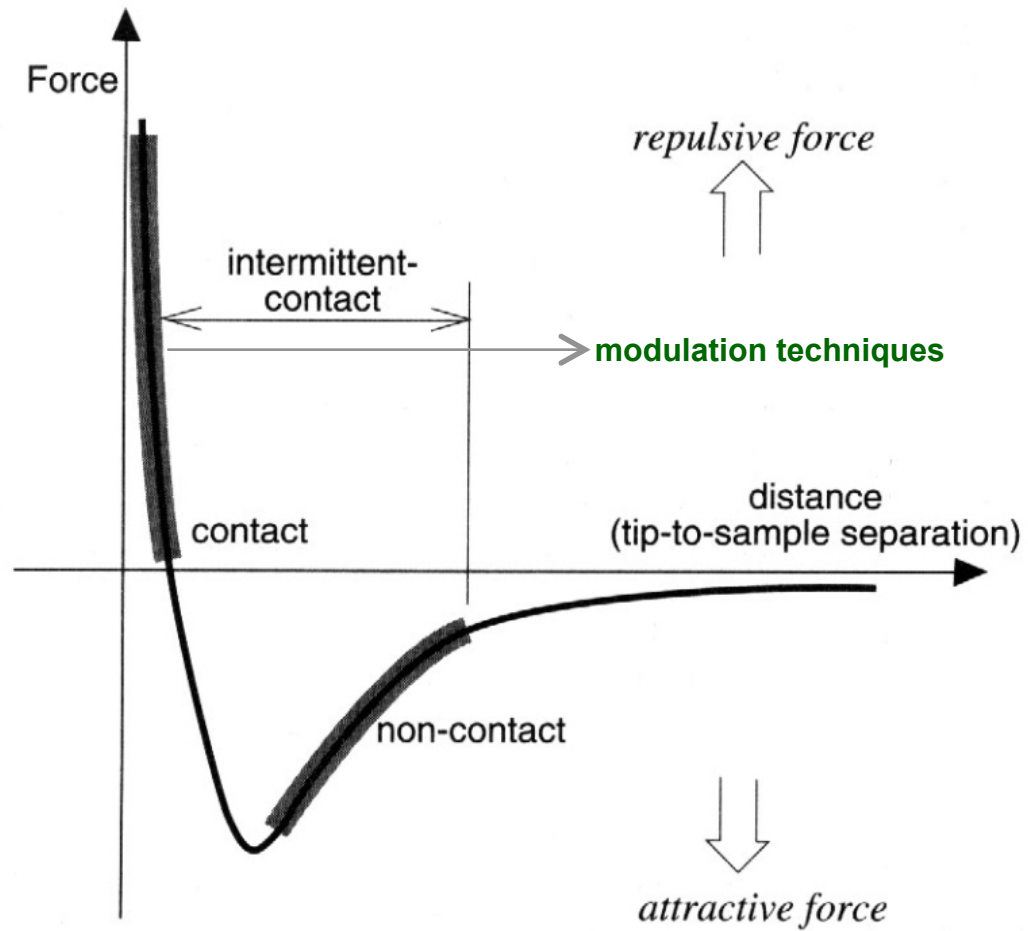


# СТМ Зонды

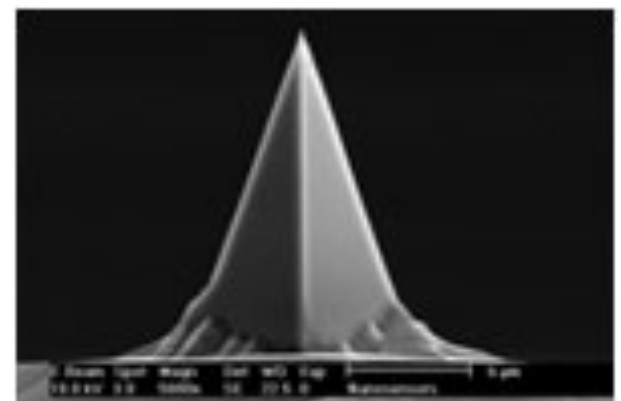
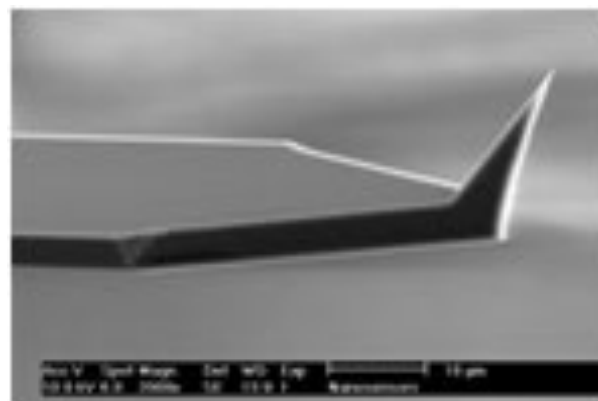
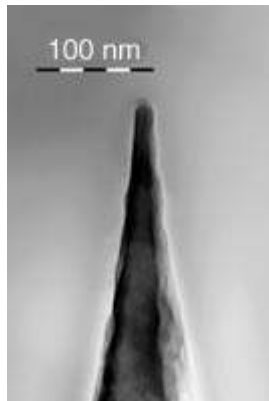
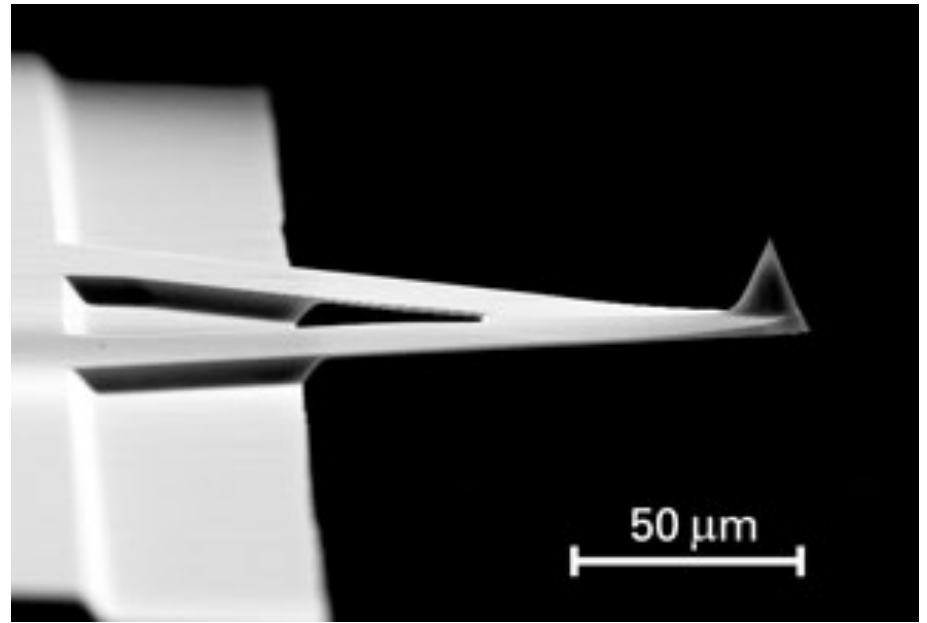
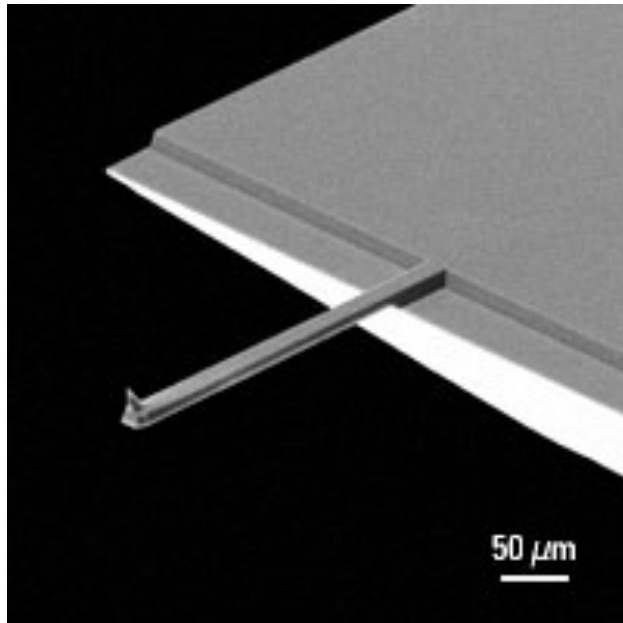




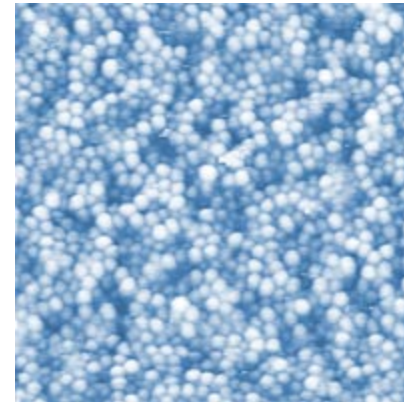
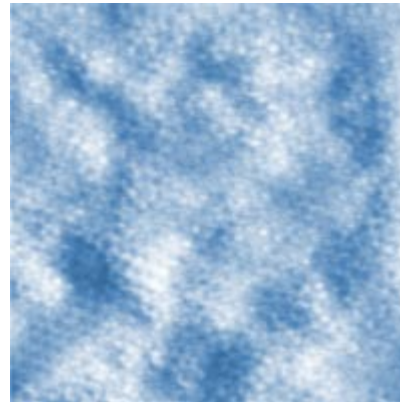
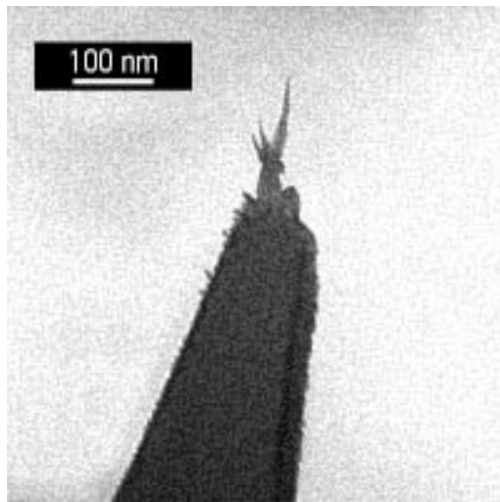
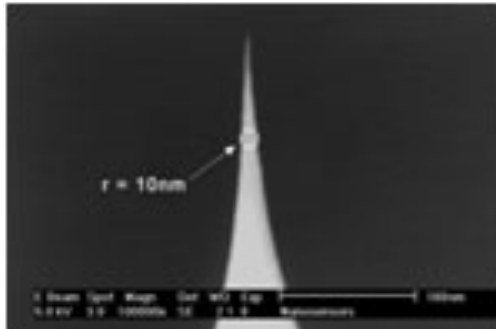
# Атомно-Силовая Микроскопия



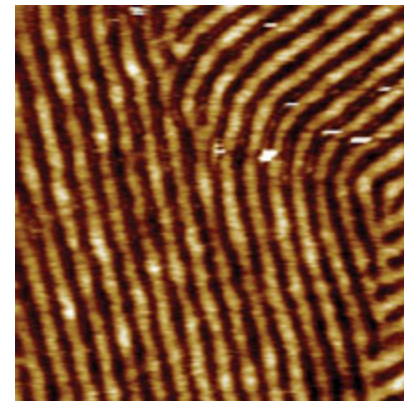
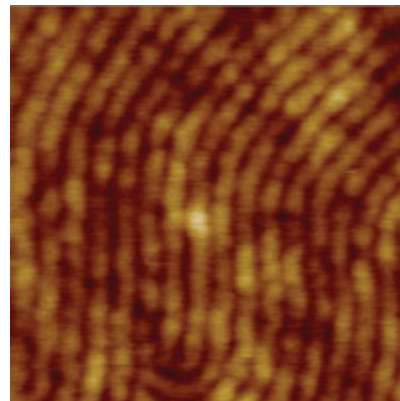
# АСМ Зонды



# АСМ Зонды высокого разрешения

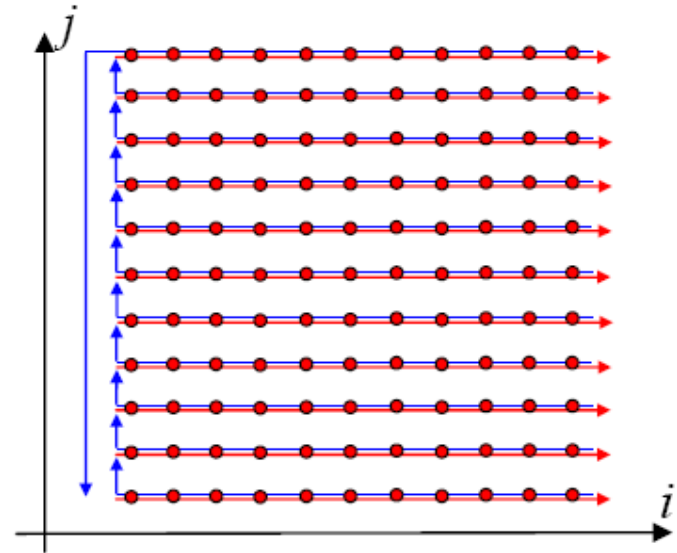
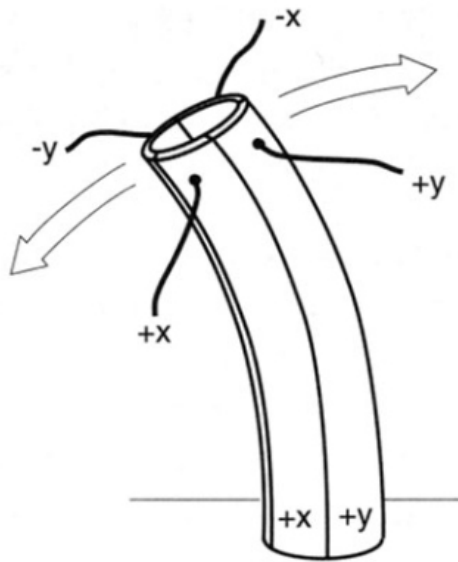


дендримеры

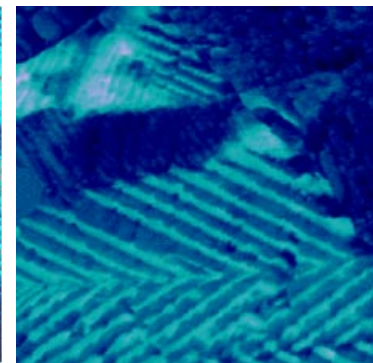
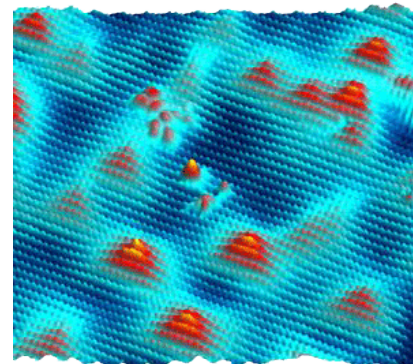


жидкие кристаллы

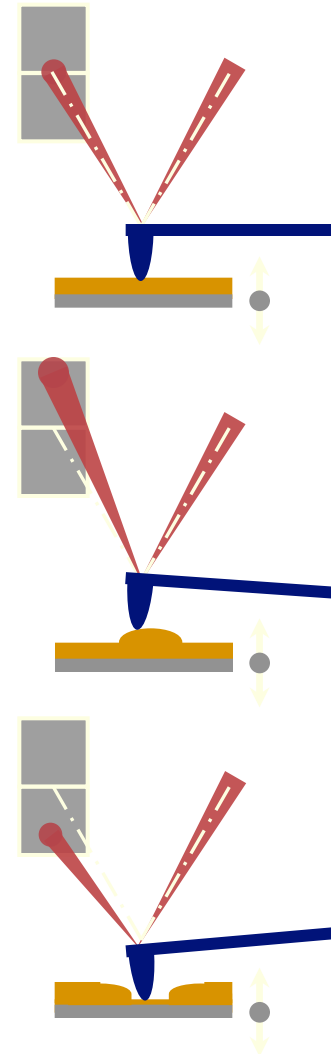
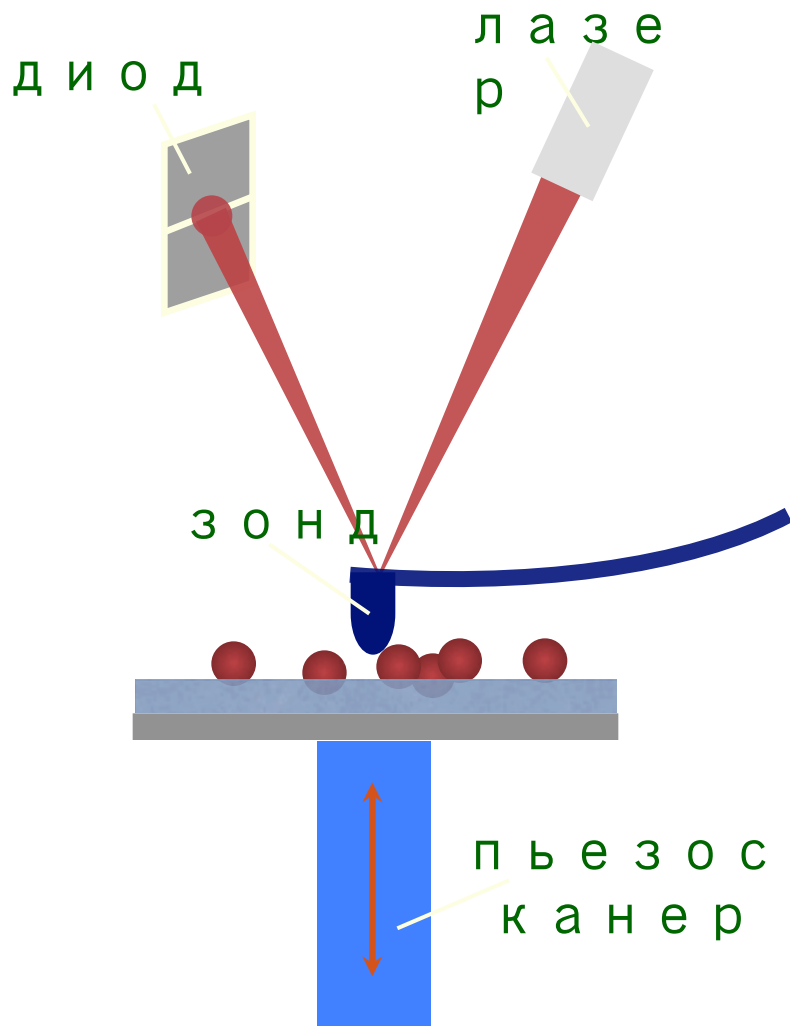
# Сканирующая Зондовая Микроскопия



3D и 2D визуализация

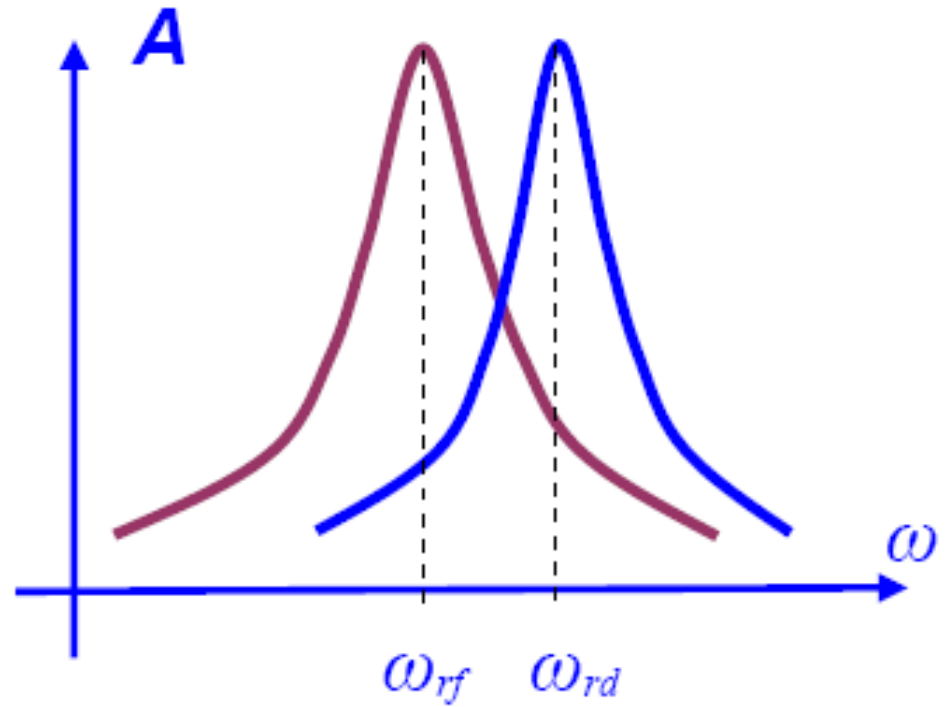
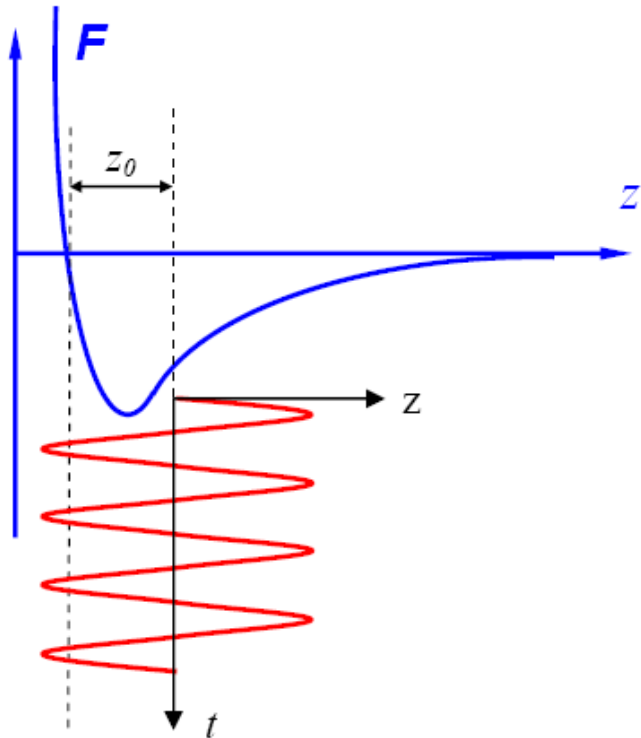


# Атомно-Силовая Микроскопия

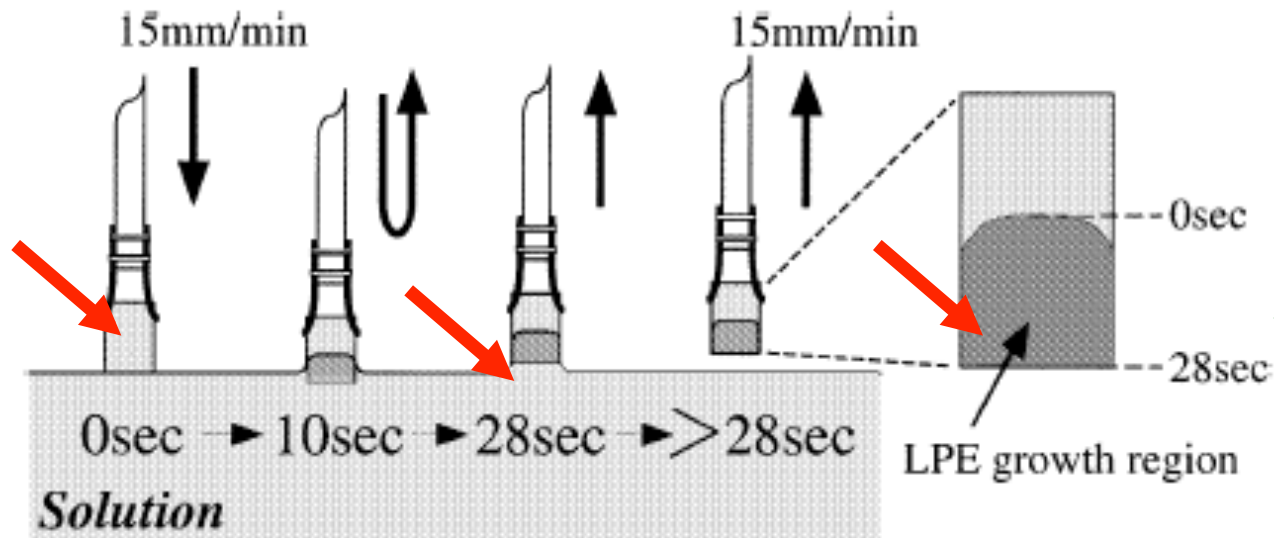


# Атомно-Силовая Микроскопия

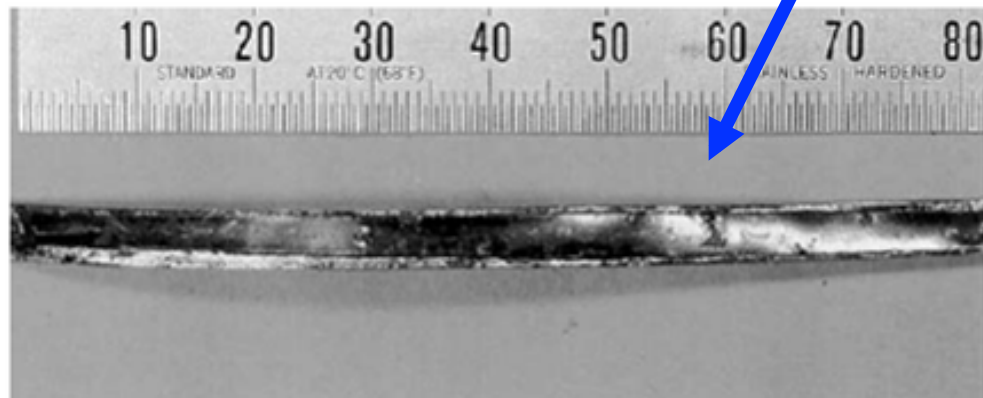
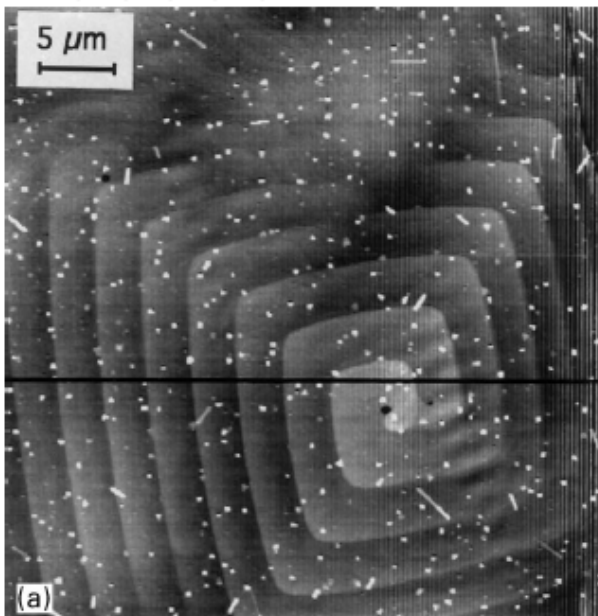
## tapping mode™ и безконтактные режимы



# Жидкофазная эпитаксия

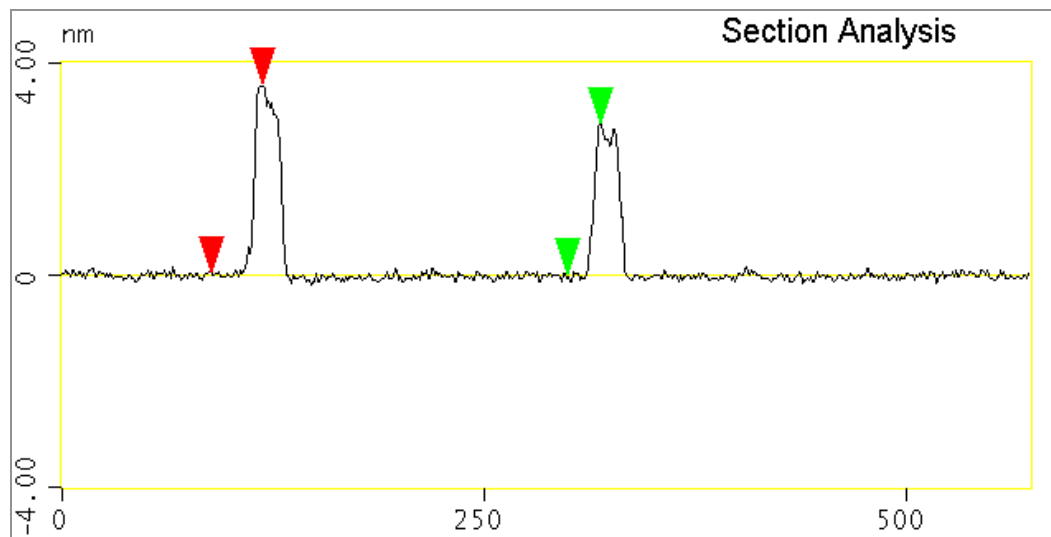
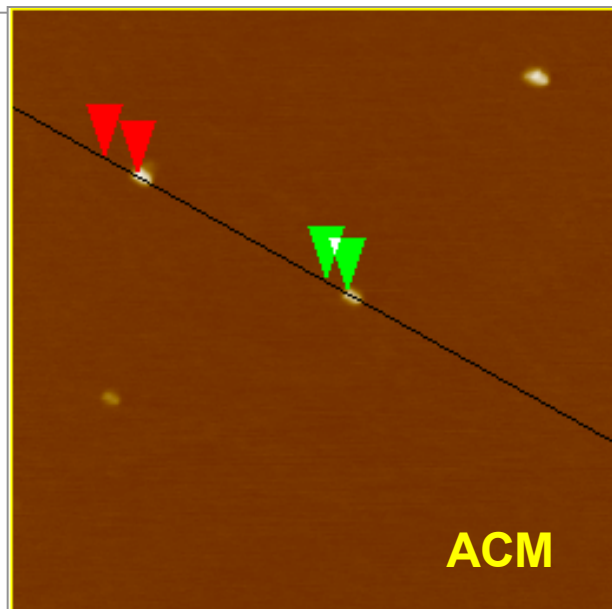
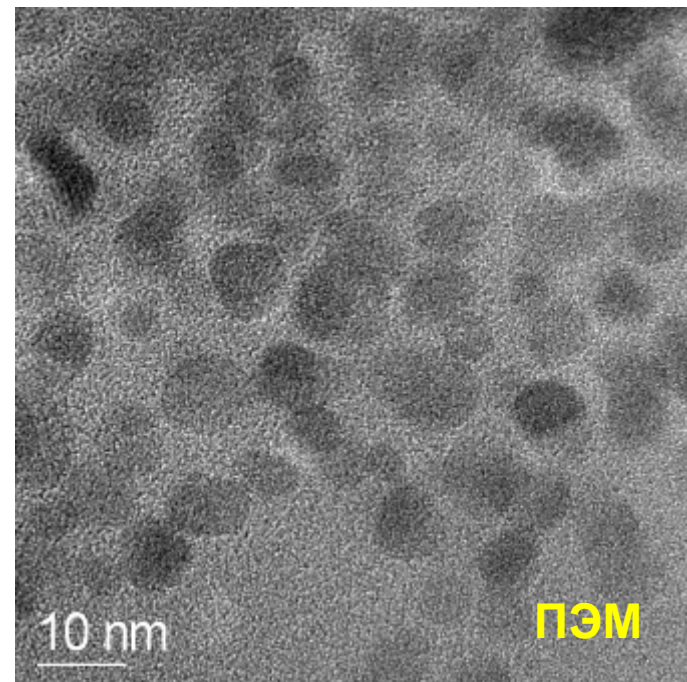
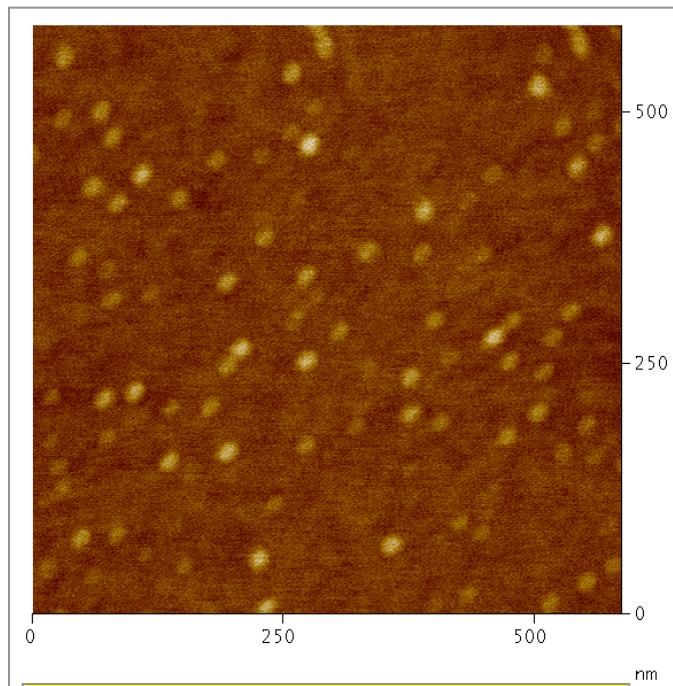


**BaF<sub>2</sub>, Ag... +  
1% O<sub>2</sub> / 99% N<sub>2</sub>:  
ЖФЭ при 880°C**



**Полигональная (макро)спираль**

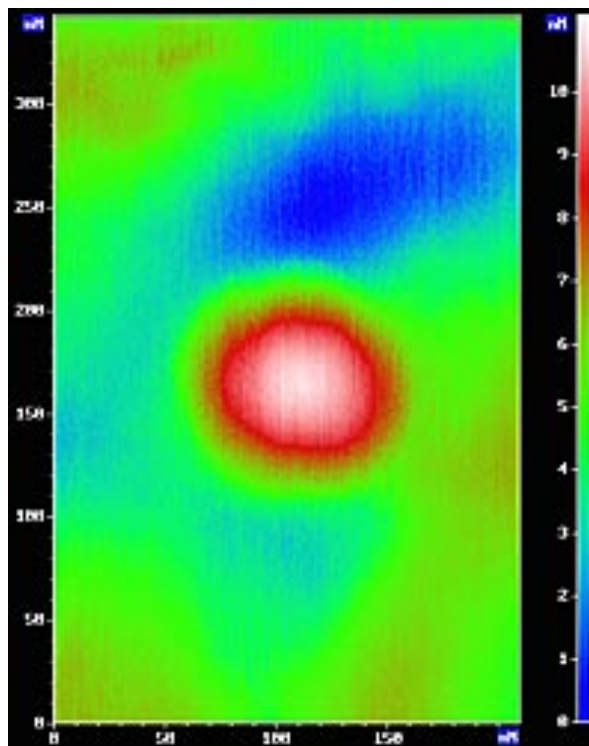
# Магнитные наночастицы $\text{Fe}_2\text{O}_3$



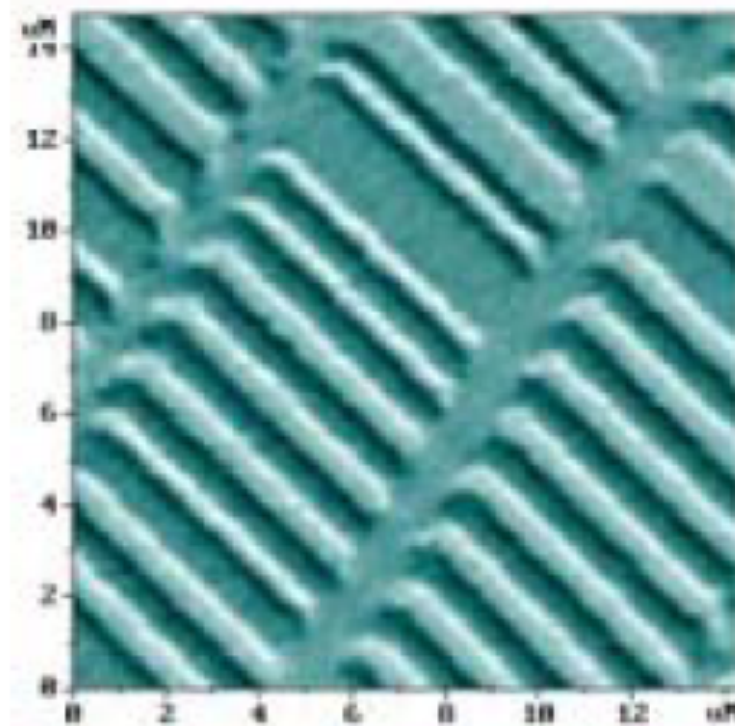


# Магнитные АСМ Зонды

Со-Сг покрытие  
300 – 400 Ое



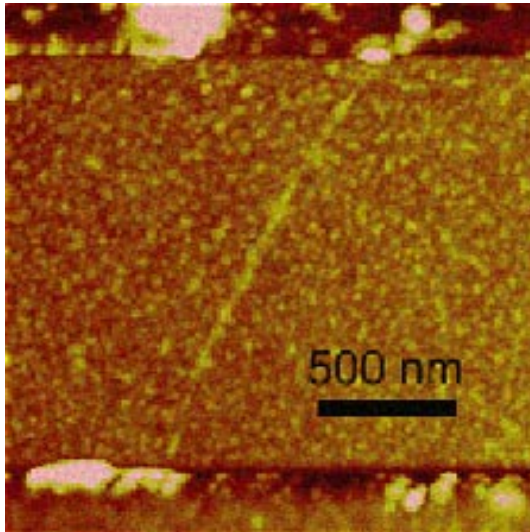
Со наночастица



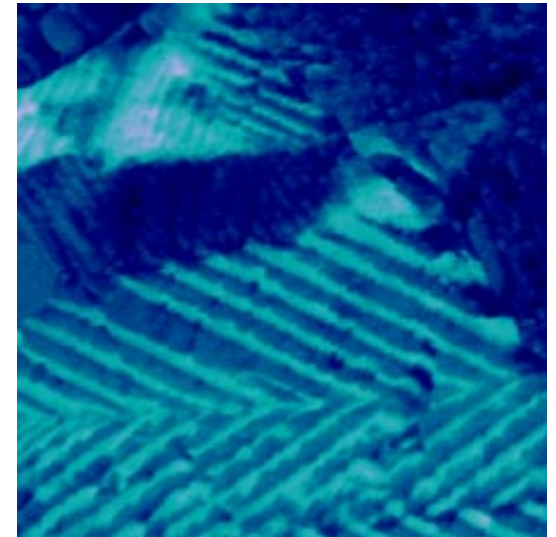
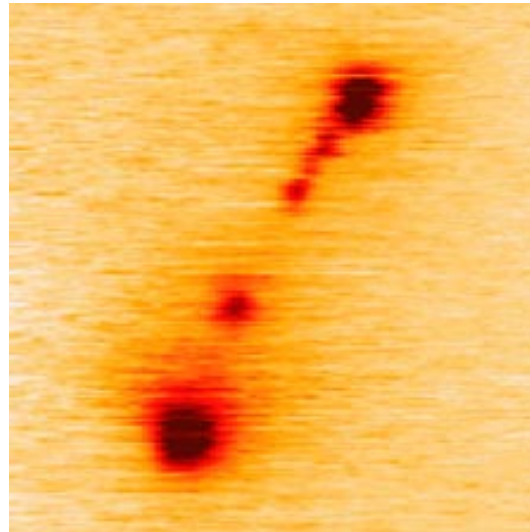
поверхность жесткого диска

# Проводящие АСМ Зонды

Ti-Pt, Pt, Cr-Au, PtIr покрытия  
зонды из высоколегированного кремния

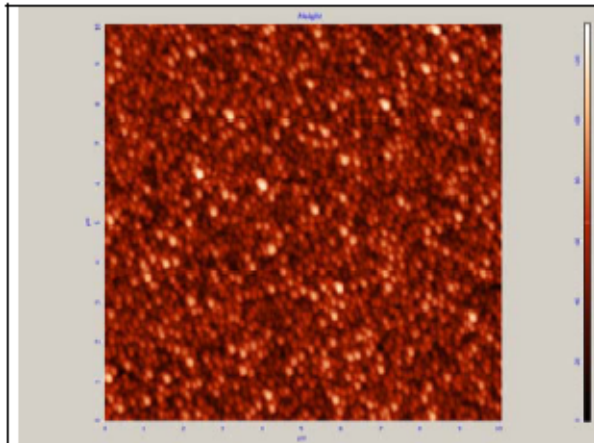


SWNT

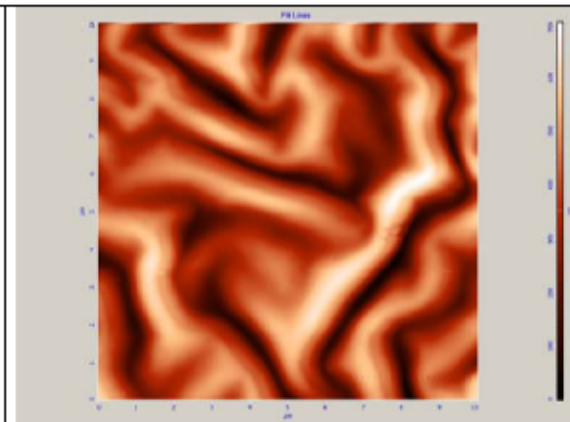


BaTiO<sub>3</sub>

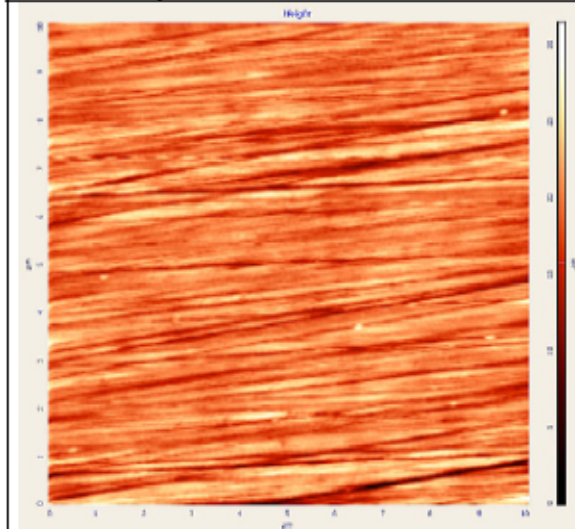
# Примеры изображений



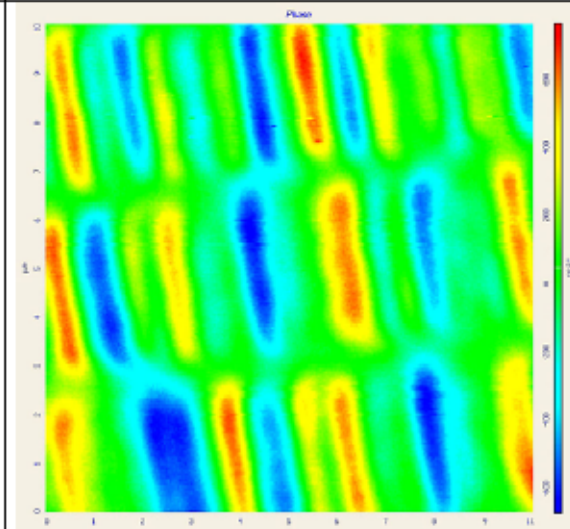
Тонкая пленка люминесцентного комплекса на проводящей подложке ITO (получение OLED)



Толстая пленка люминесцентного комплекса на проводящей подложке ITO (получение OLED)



Поверхность магнитного носителя (жесткого диска) компьютера в контактной моде



Поверхность магнитного носителя (жесткого диска) компьютера магнито-силовой моде