

# Растворы (часть1)

## *Общие понятия*





- Термин «раствор» является общим и означает в случае «истинного» раствора распределение и распространение одного вещества в другом с формированием смешанной (**на молекулярном / атомном уровне**), однородной (гомогенной и изотропной) фазы, которая может быть газообразной, жидкой или твердой (ограничений на это нет).
- Отличие раствора от механической смеси (в которой **нет химического взаимодействия**) может отличаться уровнем (размером частиц), на котором происходит смешение
- Обычно считается, что раствор **не является** химическим соединением с сильными химическими связями, однако формирование химических связей в нем может все же наблюдаться без изменения «химической природы» и состава растворяемого вещества

# Нобелевские премии

- 1901 г. – Якоб Вант-Гофф (голл.) – первый Нобелевский лауреат, хим. кинетика, осмос
- 1903 г. – Сванте Аррениус (швед.) – электролитическая теория, диссоциация
- 1909 г. – Вильгельм Оствальд (нем.) – закон разведения, «оствальдовское созревание»
- 1925 г. – Рихард Зигмонди – коллоидная химия

**Раствор** – однофазная много-(двух-)компонентная система **переменного состава**

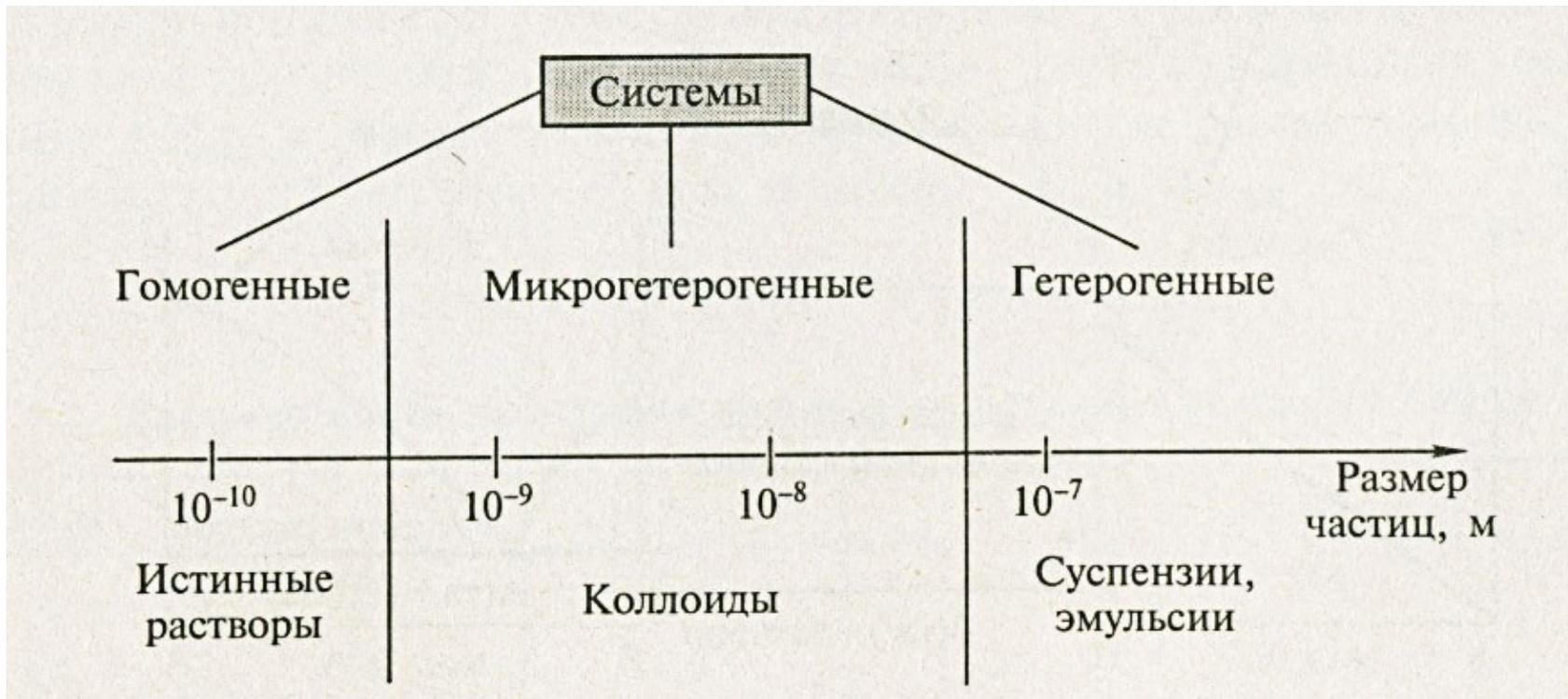
Простейшая бинарная система **A-B**

$E_{A-A} \sim E_{B-B} \gg E_{A-B}$  – механическая смесь  
(вода + бензол)

$E_{A-A} \sim E_{B-B} \ll E_{A-B}$  – хим. соединение  
( $K + 2Na = KNa_2$ )

$E_{A-A} \sim E_{B-B} \sim E_{A-B}$  – раствор  
(вода + спирт)





Гетерогенные системы, которые содержат границу раздела между введенной в растворитель фазой и самим растворителем, не являются истинными, но могут быть стабильны в течение продолжительного времени (специальный раздел химии - коллоидная химия).

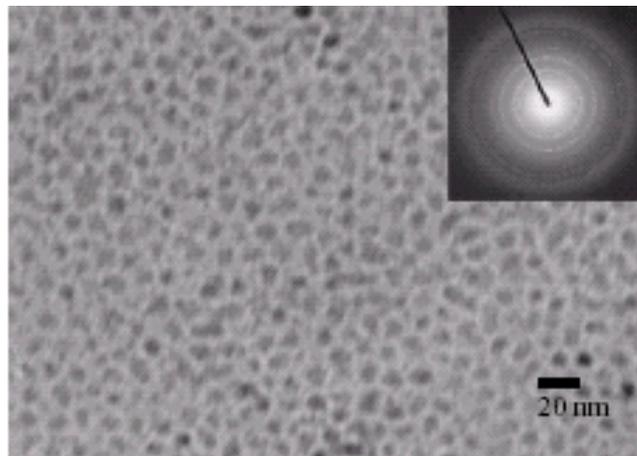
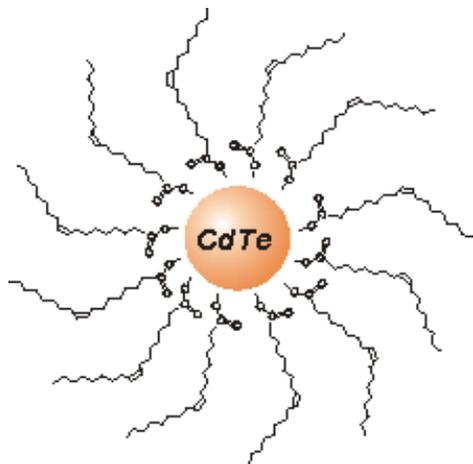
*Кока – кола = раствор Ж+Т (сахар в воде), Ж+Ж (фосфорная кислота в воде), Ж+Г (диоксид углерода в воде), коллоидный раствор*

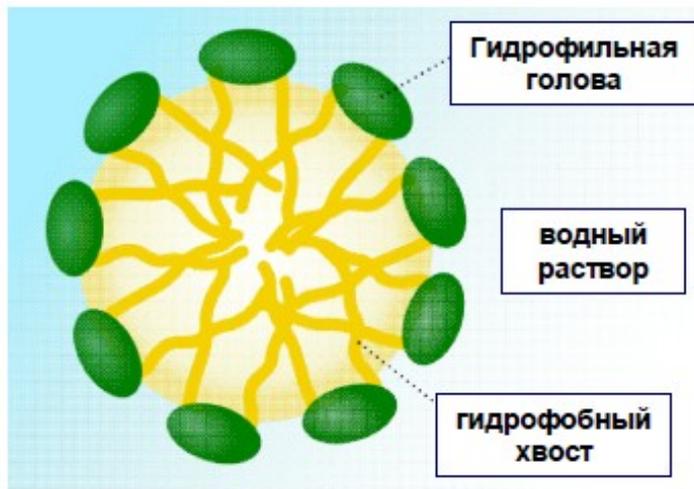
1. Дисперсные (раздробленные) системы - **гетерогенные** системы, содержащие в своем составе **микроскопические** однородные части: малые частицы, тонкие пленки, мембраны, волокна.
2. **Дисперсная фаза** – совокупность большого числа микроскопических однородных частей.
3. **Дисперсионная среда** – сплошная среда, окружающая дисперсную фазу.
4. **Монодисперсные/полидисперсные**: одинаковый/неодинаковый размер частиц дисперсной фазы.
5. **Свободнодисперсные/связнодисперсные**: отсутствие/наличие взаимодействия частиц в дисперсной фазе.



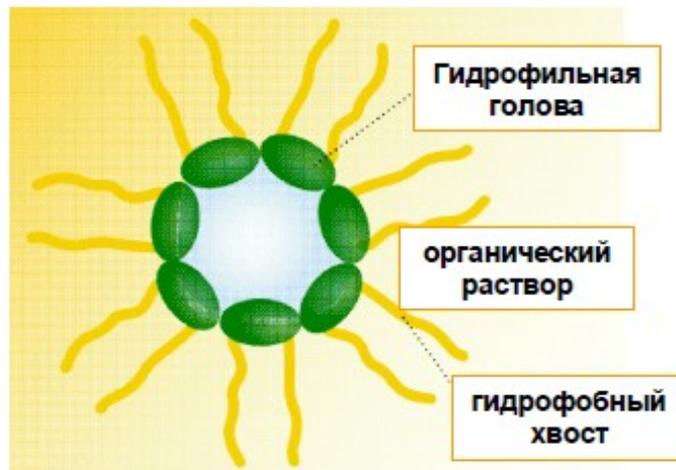


«Раствор» квантовых точек – золь (наноТ + Ж)



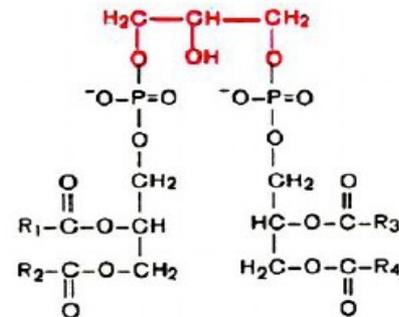
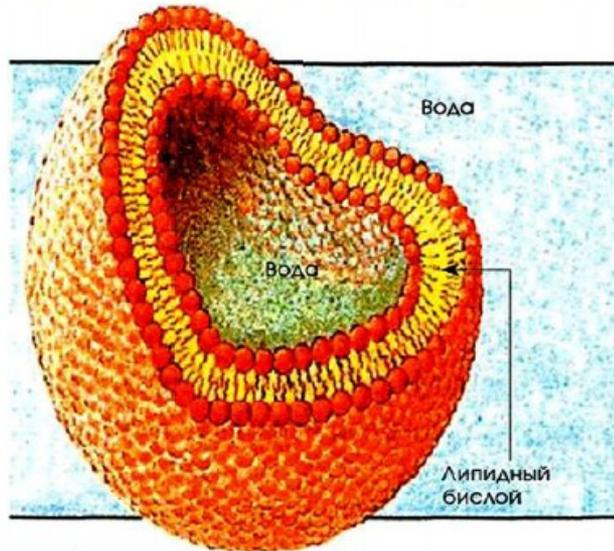


**Мицелла**



**Обращенная мицелла**

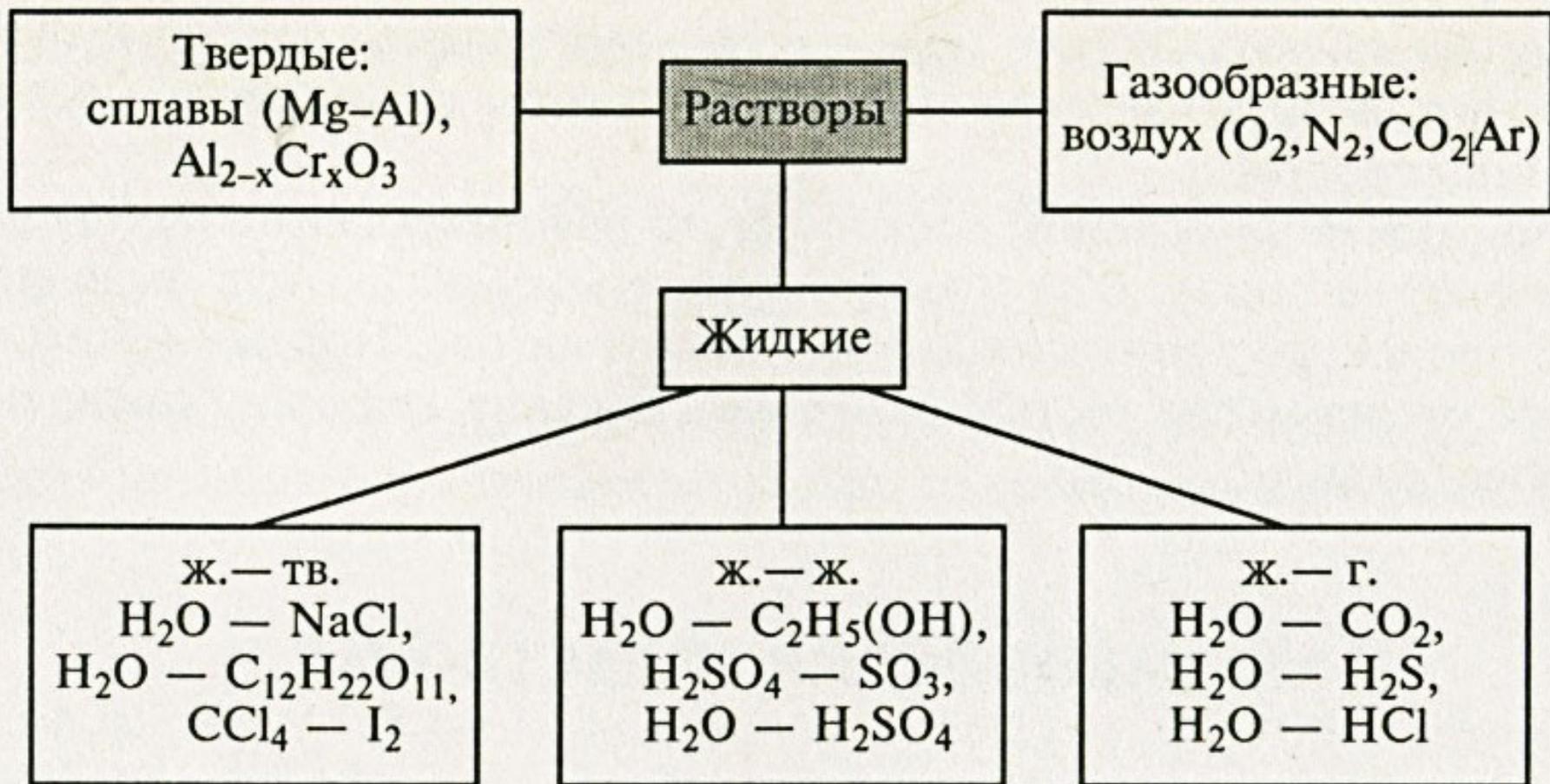
1. Липосома – сфера с толстой стенкой, снаружи и внутри – вода.
2. Стенка – двойной слой, состоящий из амфифильных молекул, например фосфолипидов (производных глицерина).



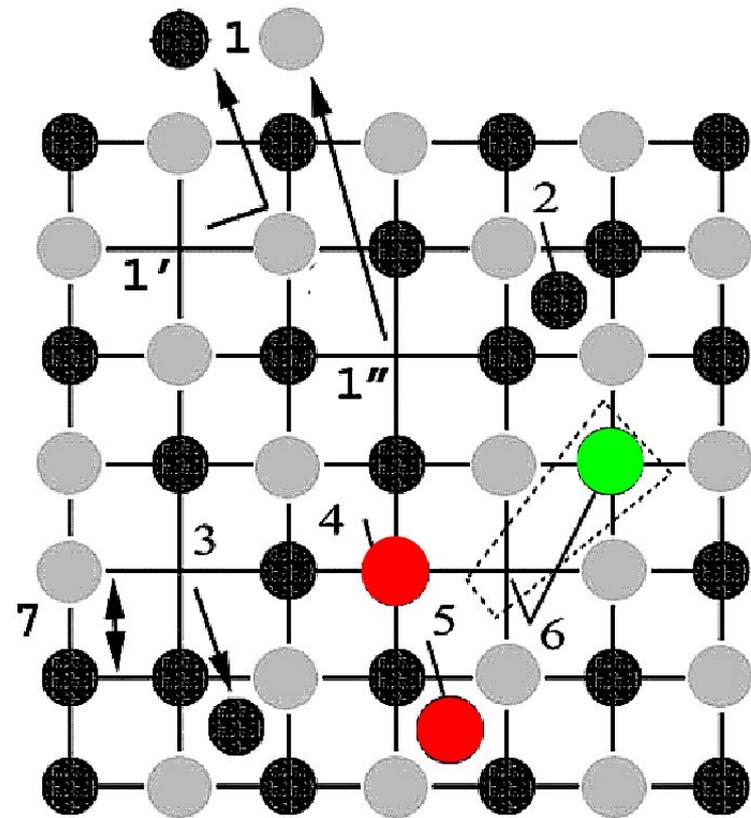
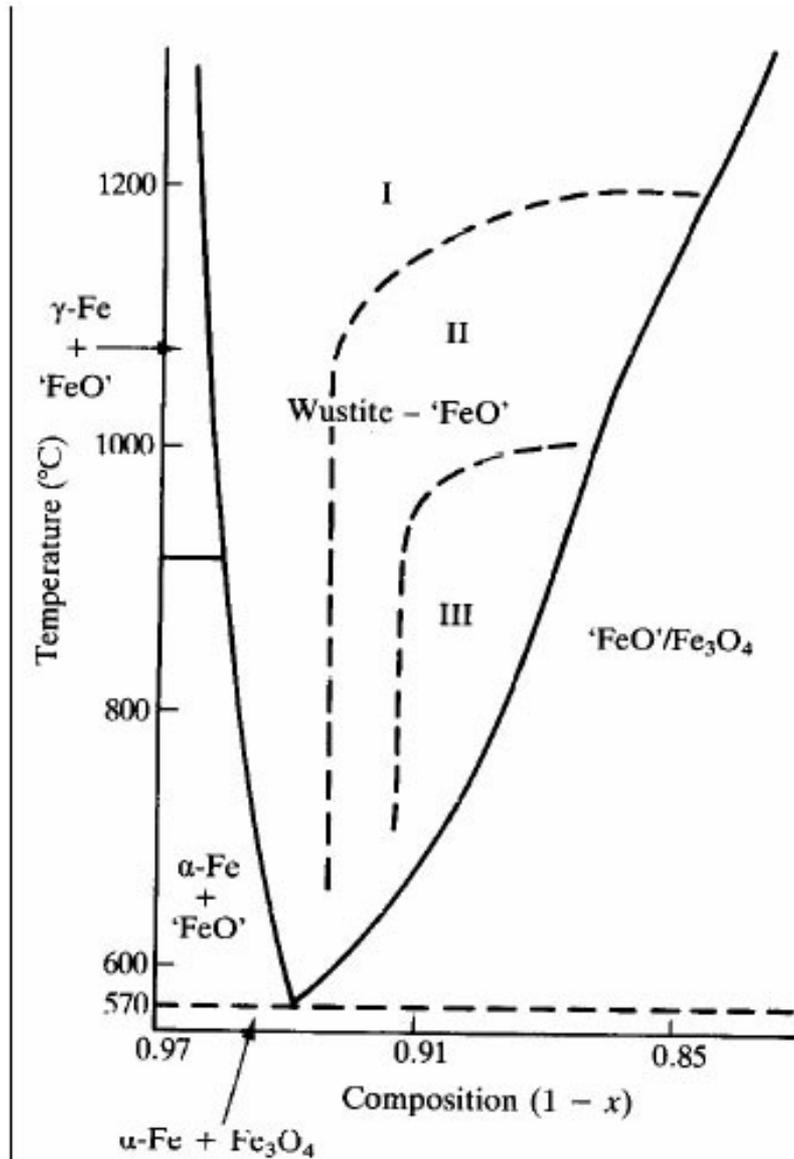
кардиолипин –  
типичный фосфолипид



- Коллоидные системы имеют важное значение в химии, биологии, технологии
- Истинные растворы полезны тем, что в них обычно наблюдается быстрая объемная диффузия компонентов, поэтому многие химические реакции протекают существенно быстрее
- «Коллоидные растворы» имеют большую по площади границу раздела между фазами, поэтому во всех превращениях в такой гетерогенной системе имеют большое значение процессы, протекающие на границе раздела, которая часто имеет достаточно сложную организацию



# Вюстит

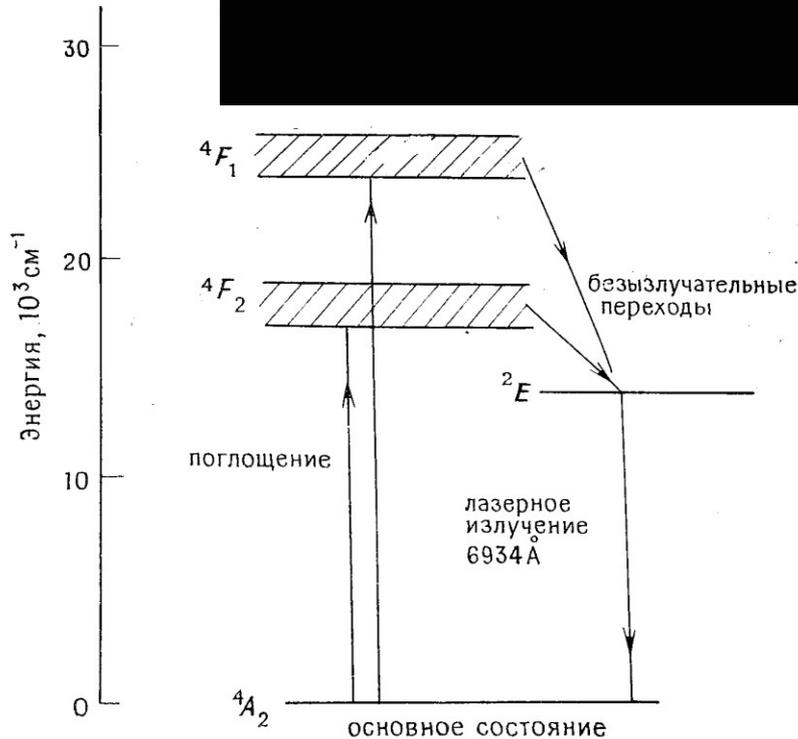
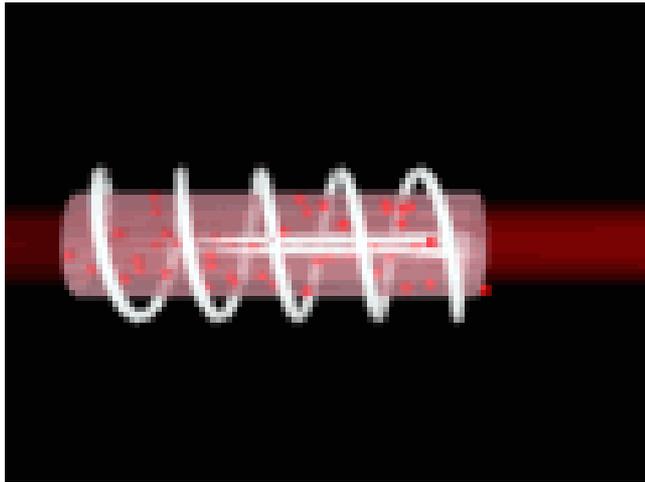


1', 1'' – вакансии, дефект по Шоттки,  
 2, 5 – междуузельный атом, 3 – дефект по Френкелю, 4, 6 – дефект замещения, 5 – дефект внедрения, 7 – антиструктурные дефекты

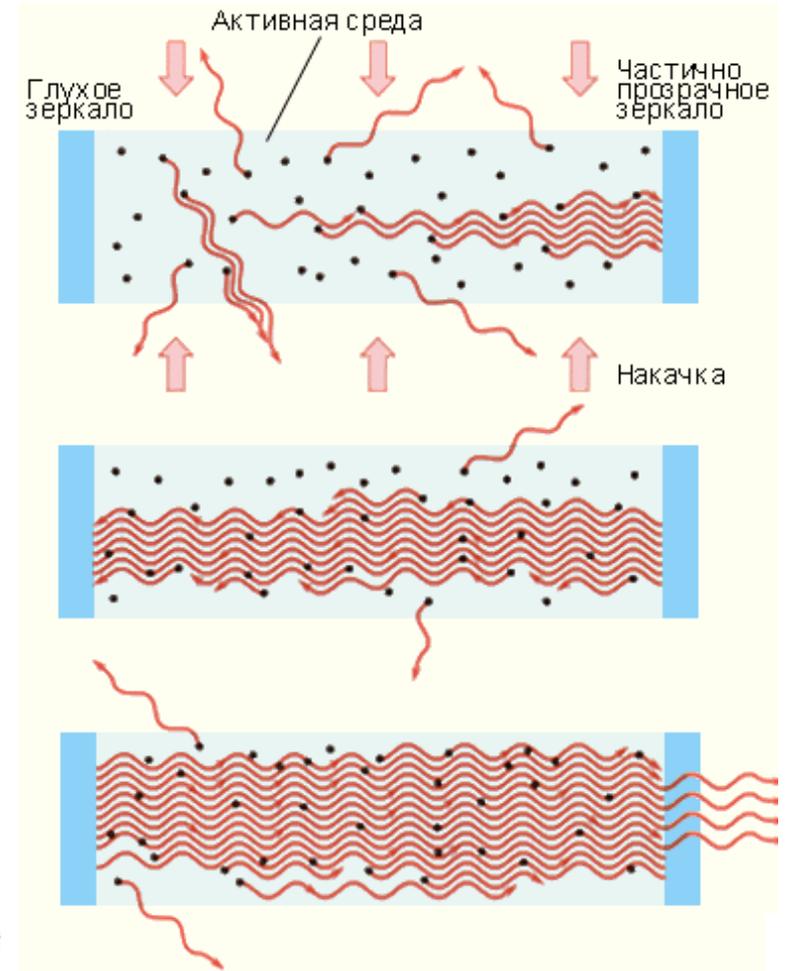
«Односторонняя», «высокотемпературная» фаза «FeO» (идеального состава не существует, фаза неустойчива при комнатной температуре)

# Рубиновый лазер (тв. р-р)

монокристалл  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , легированный  
(~0,05 масс. %  $\text{Cr}^{3+}$ )



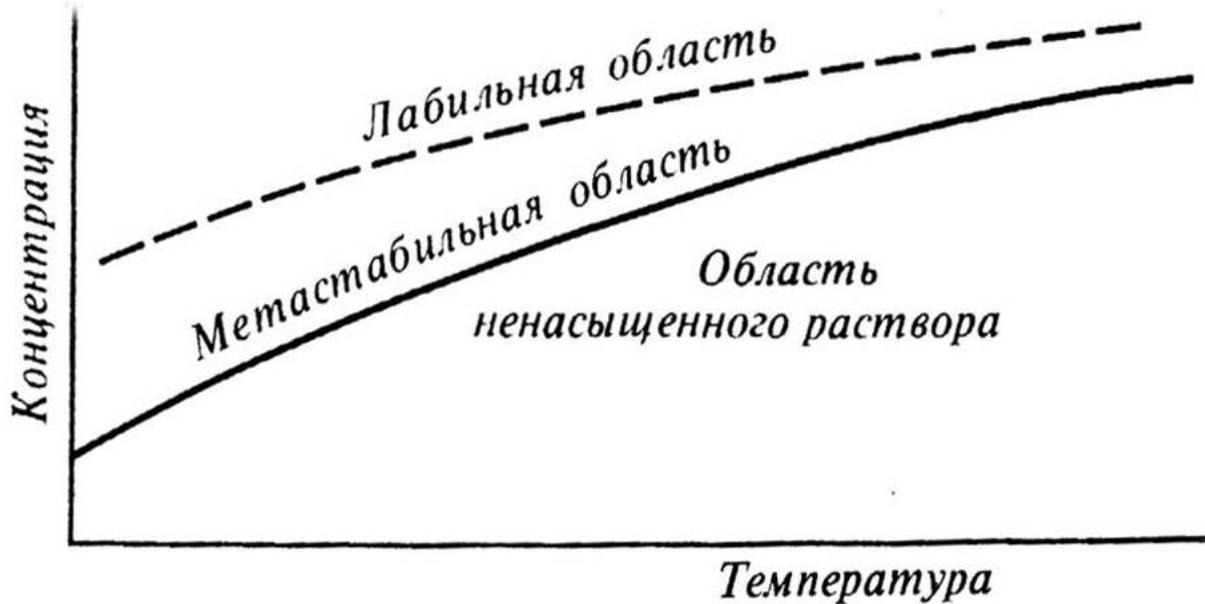
Энергетические уровни иона  $\text{Cr}^{3+}$  и лазерное излучение в кристалле рубина.





- Особенностью твердых растворов, как и любой твердой фазы, является наличие **точечных дефектов**, содержание которых зависит от нестехиометрии твердой фазы. В свою очередь, наличие таких дефектов способно существенно изменить физические свойства твердой фазы, чем часто пользуются при создании твердофазных материалов с заданными функциональными характеристиками.

# Пересыщение



1. изменение температуры (обычно - охлаждение)
2. изменение состава раствора (обычно – испарение растворителя или добавление «высаливателя», а также изменение ионной силы и pH)
3. кристаллизация при химической реакции

Стеклянная мозаика:  
стекло как переохлажденный  
расплав



- Осветлители:  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{As}_2\text{O}_3$ , ...
- Соединения  $\text{Fe}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и  $\text{CuO}$  – зеленый
- $\text{CrO}_3$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – желтый, коричневый
- $\text{CuO}$  и  $\text{CoO}$  – синий
- $\text{NiO}$  и  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  – фиолетовый
- $\text{CoO}$ ,  $\text{MnO}$  и  $\text{Se}$  – розовый
- Коллоидные  $\text{Cu}$  и  $\text{Au}$  – красно – рубиновый
- Молочное и опалесцирующее стекло – стеклокерамика или следы расслаивания
- 0.15-0.30%  $\text{AgCl}$  – фотохромные стекла



- Для **лабильной** системы происходит самопроизвольное выделение второй фазы, например, кристаллизация твердой фазы из жидкого раствора.
- **Метастабильное** состояние пересыщенного раствора может существовать бесконечно долго, если только систему искусственно из этого состояния не вывести и не довести до равновесного состояния, снимая пересыщение. Часто для растворов это достигается введением близкой по строению твердой фазы, выступающей в качестве затравок, на которой «релаксирует» пересыщение и происходит рост кристаллов твердой фазы, растворенной в растворе.

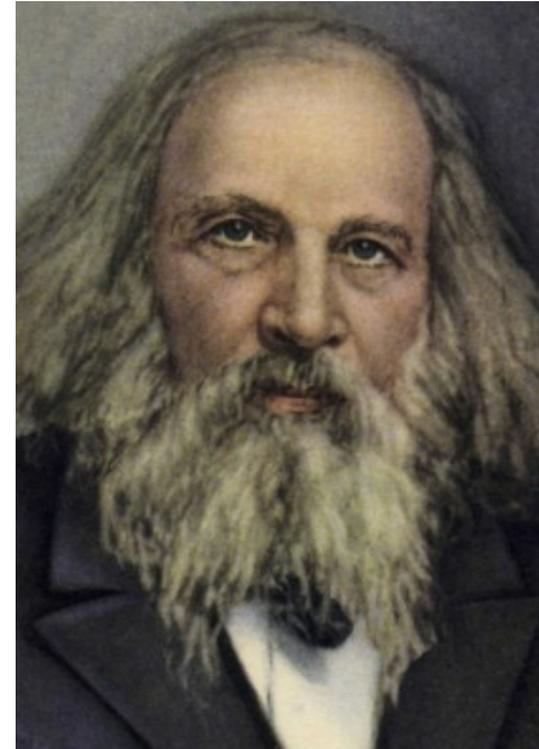
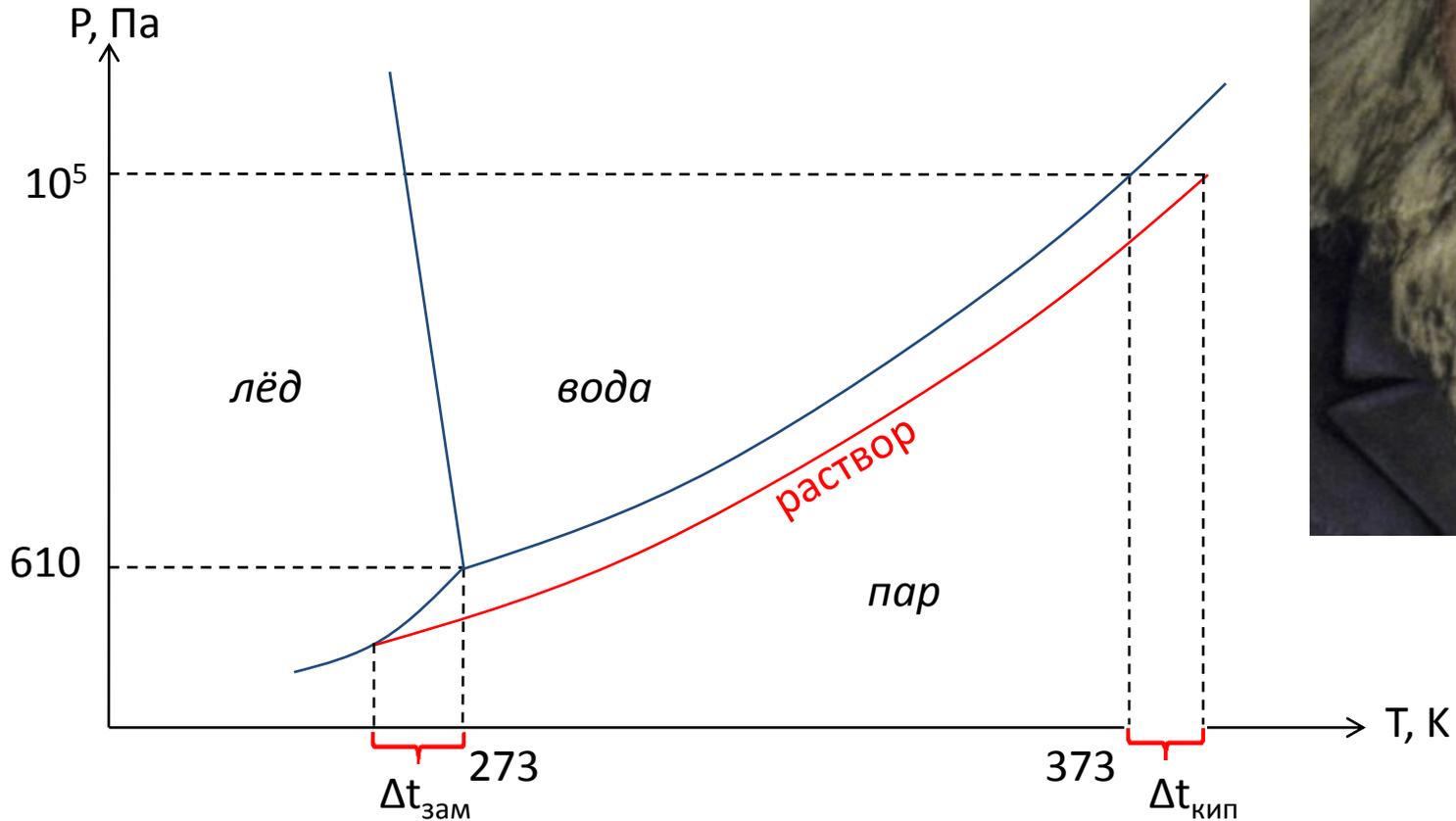
## Раствор – фаза переменного состава

Массовая доля	$w_i = g_i / \sum_i g_i$
Мольная доля	$x_i = n_i / \sum_i n_i$
Молярность	$C_i = n_i / V(\text{р-ра})$
Моляльность	$m_i = n_i / g(\text{р-ля})$

Все эти величины – **ИНТЕНСИВНЫЕ**,  
то есть не зависят от количества раствора

# Теории растворов

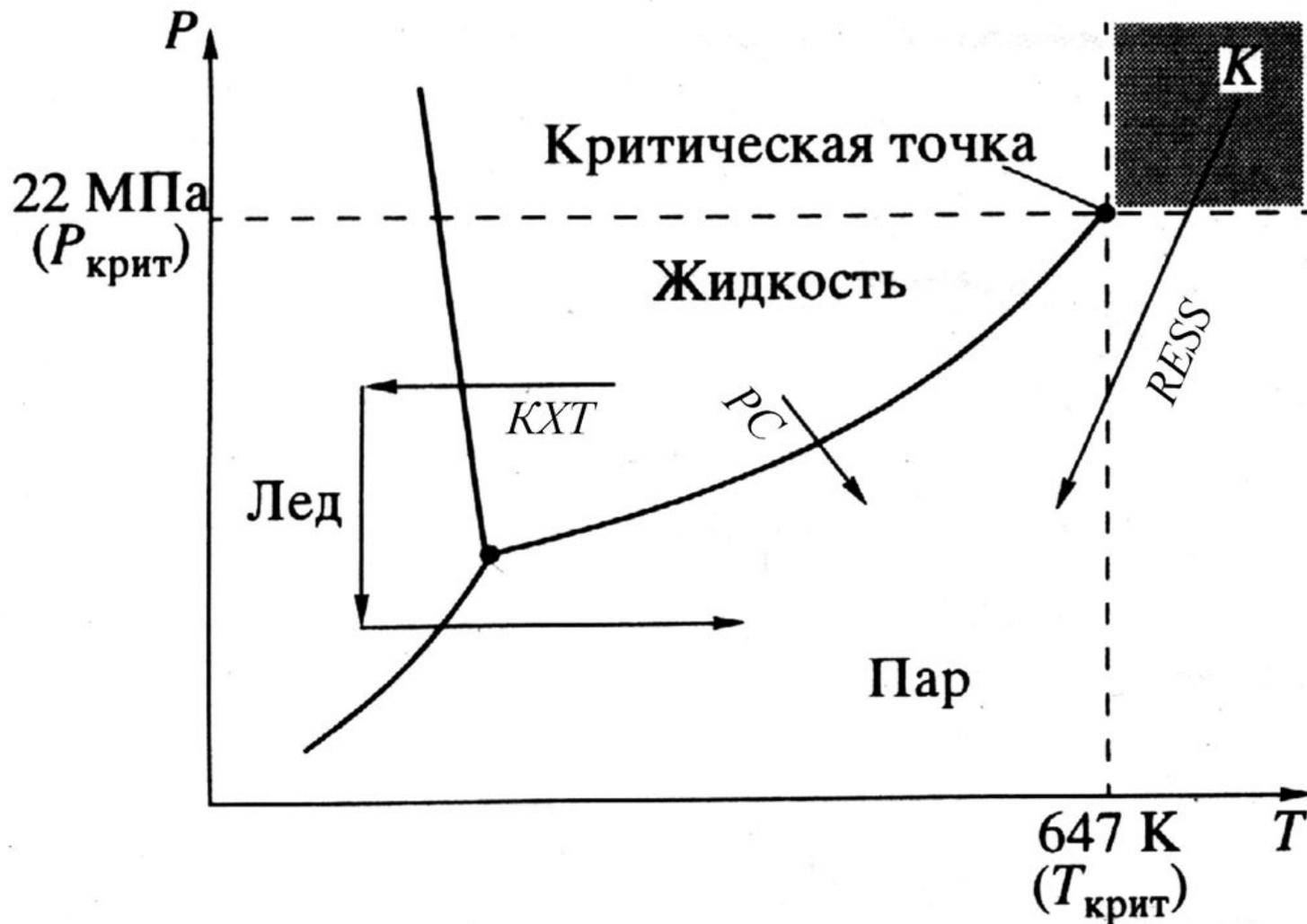
Физическая - идея индифферентности и подобия газовым системам (С.Аррениус)  
Химическая теория (Д.И.Менделеев)



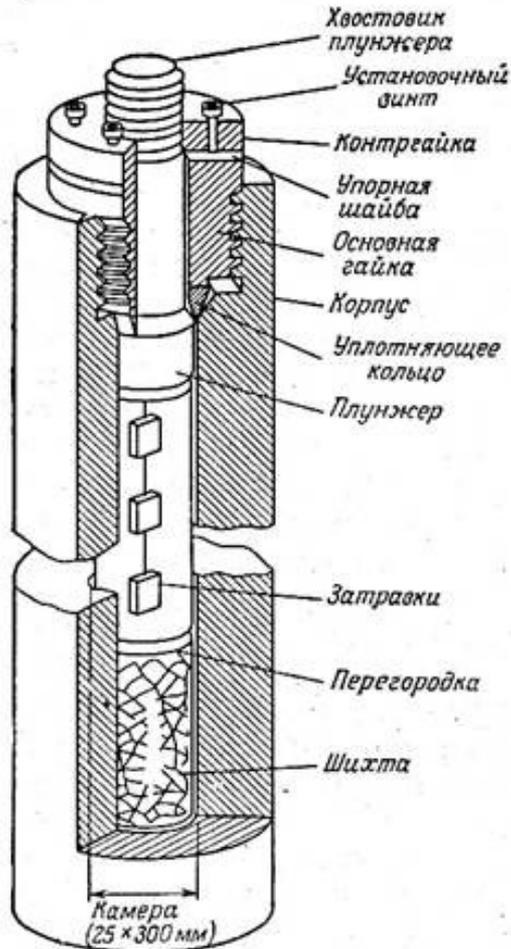


- Идея подобия индифферентным системам типа смесей идеальных газов позволяет оперировать простыми уравнениями состояния и создавать простые и элегантные теории (тем не менее, весьма упрощенными).
- Введение возможности химических взаимодействий делает большинство систем реалистичными и позволяет учитывать химическую природу растворителя и растворенных веществ, однако такие взаимодействия в реальных системах существенно усложняют их математическое (физико – химическое) описание.

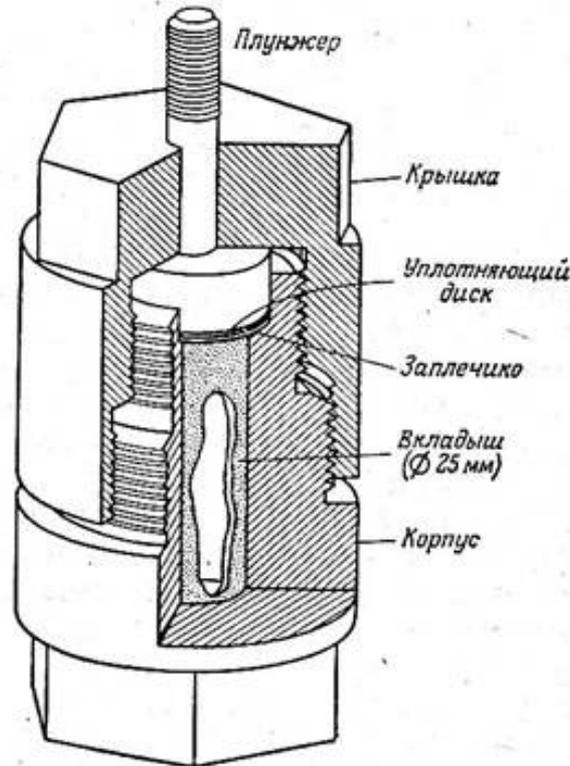
# Методы химической гомогенизации



# Гидротермальный рост



Фиг. 7.8. Модифицированный автоклав Бриджмена для выращивания кристаллов в гидротермальных условиях.



Фиг. 7.9. Автоклав Мори для выращивания кристаллов в гидротермальных условиях.

Гидротермально выращенные кристаллы пьезокварца





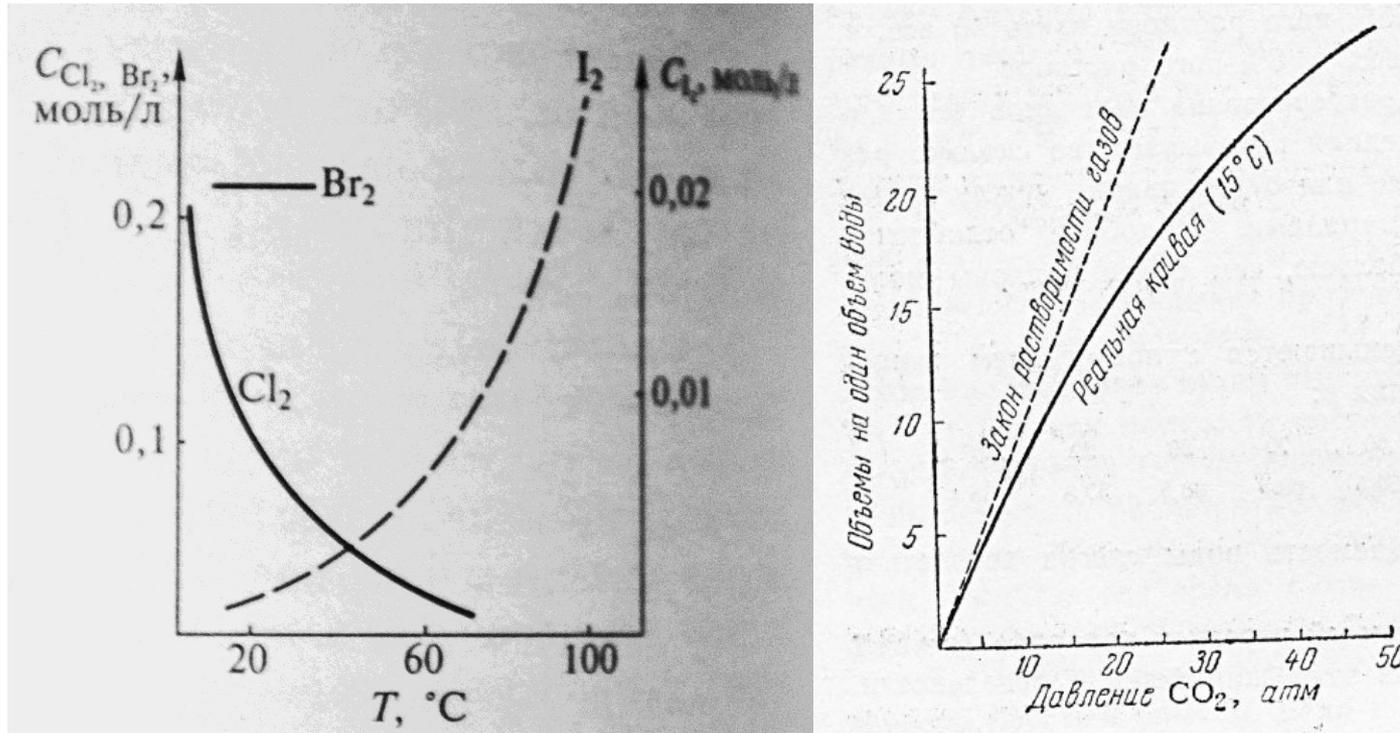
- Расплавы на фазовых диаграммах также являются «растворами» одних компонентов в других. При изменении температуры (или других условий) состав раствора компонентов в расплаве может также изменяться и приводить к формированию тех или иных твердых (кристаллических) фаз определенного состава.
- Фазовые диаграммы позволяют определить, при каких условиях из расплава какого состава получается твердая фаза заданного состава.
- Такие «надсолидусные» фазовые диаграммы часто применяют для проектирования оборудования для роста монокристаллов и поликристаллических функциональных и конструкционных материалов.

# Гололед



При добавлении соли к снегу формируются низкотемпературные эвтектики, то есть снег и лед переходят в состояние «полужидкой» массы, которая, как считается, снижает риск падения по сравнению с чистым гладким льдом (плюс повышает риск порчи обуви).

# Растворимость газов в воде



$$\Delta G_p < 0$$

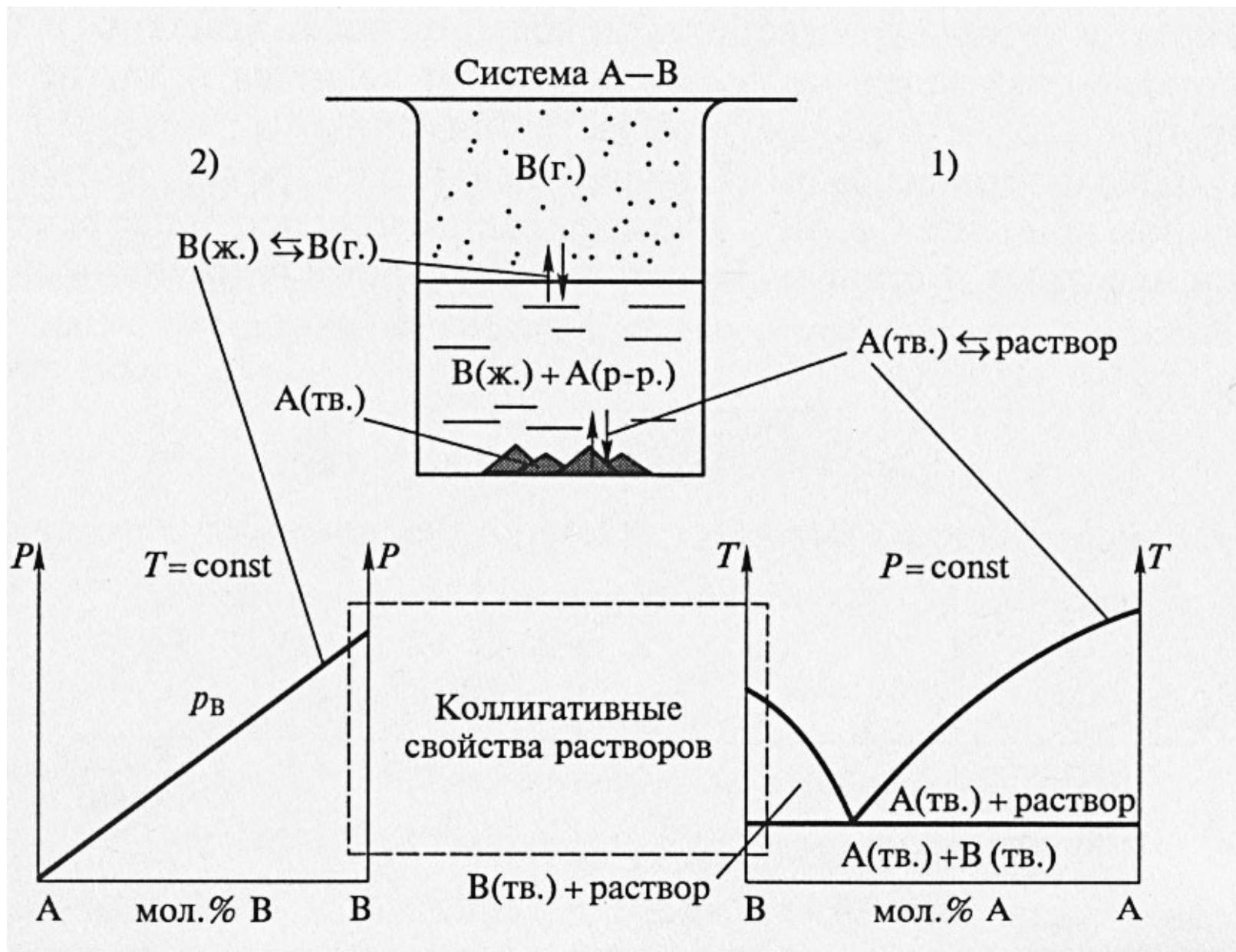
$$\Delta H_p - T\Delta S_p < 0 \rightarrow T\Delta S_p > \Delta H_p$$

$$\Delta S_p > \Delta H_p / T > 0$$

увеличение беспорядка

Падение растворимости **газов** с температурой: энтальпийные эффекты слабы, энтропия может уменьшаться! Как правило, увеличение растворимости **твердых тел** с температурой: затраты энергии на разрушение кристаллической решетки за счет возрастания энтропии

# Раствор как система



$\mu_{i(g)} = \mu_{i(j)}$  – условие равновесия

По определению для паровой фазы

$$\mu_{i(g)} = \mu_{i(g)}^{\circ} + RT/\ln p_{H_2O}$$

Для жидкой фазы – раствора

$$\mu_{i(j)} = \mu_{i(j)}^{\circ} + RT/\ln a_i = \mu_{i(j)}^{\circ} + RT/\ln(1-N_j)$$

Равновесие «пар – чистая вода»

$$\mu_{i(g)}^{\circ} + RT/\ln p_{H_2O}^{\circ} = \mu_{i(j)}^{\circ}$$

Равновесие «пар – раствор»

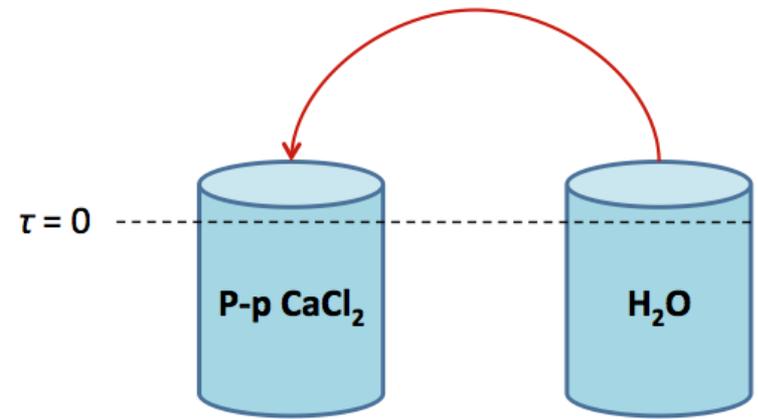
$$\mu_{i(g)}^{\circ} + RT/\ln p_{H_2O} = \mu_{i(j)}^{\circ} + RT/\ln(1-N_j)$$

Из (7.5) – (7.4)

$$p_{H_2O}/p_{H_2O}^{\circ} = 1-N_j$$

$$\frac{p_{H_2O} - p_{H_2O}^{\circ}}{p_{H_2O}^{\circ}} = \frac{\Delta p_{H_2O}}{p_{H_2O}^{\circ}} = N_j$$

Первый закон Рауля



$$\Delta T_{\text{зам}} = K \cdot m$$

$$\Delta T_{\text{кип}} = E \cdot m$$

$$M = \frac{K \cdot b \cdot 1000}{B \cdot \Delta T_{\text{зам}}} = \frac{E \cdot b \cdot 1000}{B \cdot \Delta T_{\text{кип}}}$$

$m$  – моляльная концентрация

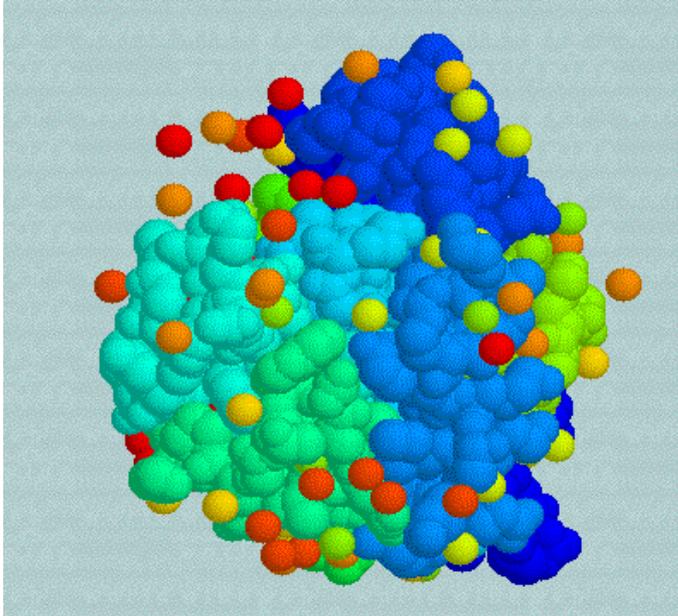
$E$  – эбулиоскопическая константа

$K$  – криоскопическая константа

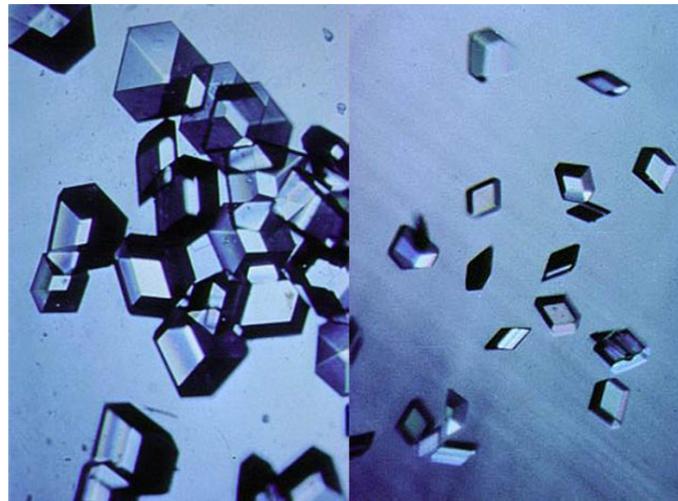
$b$  – масса растворенного вещества,

$B$  – масса растворителя

# Рост кристаллов белков и биомакромолекул

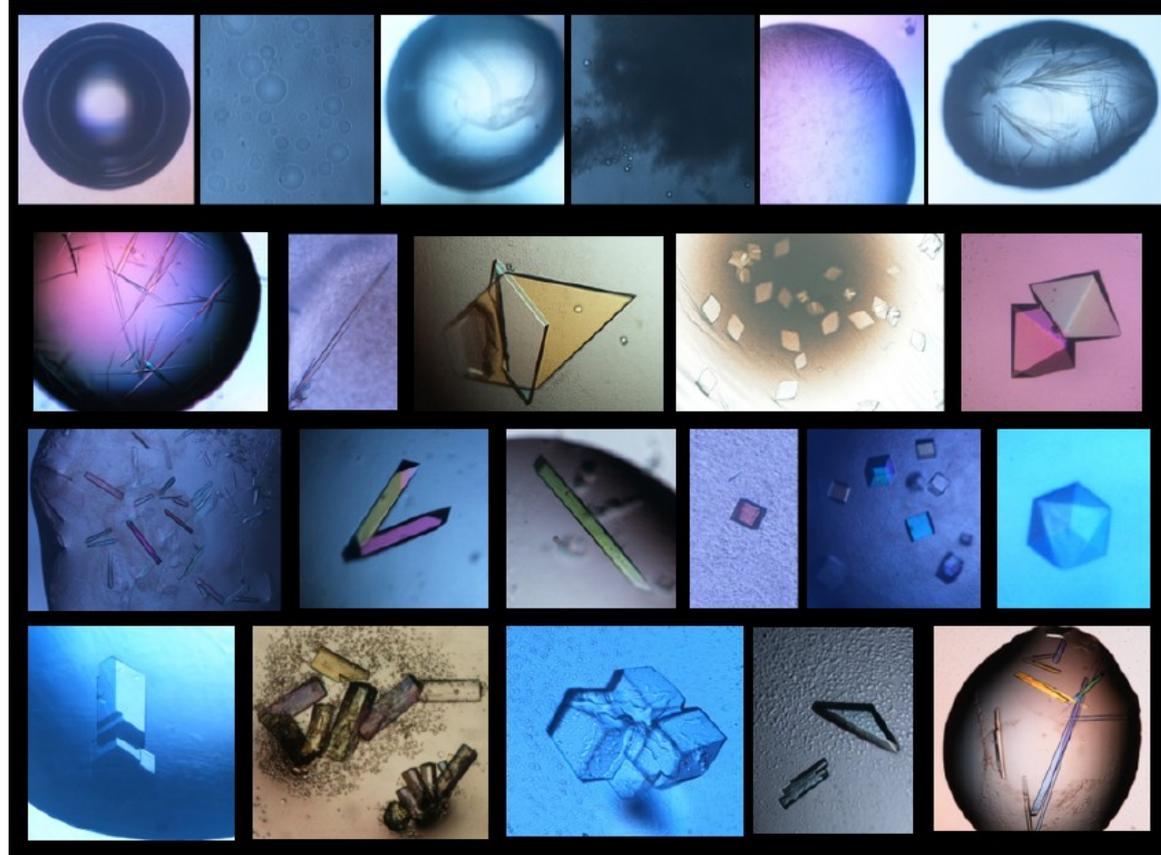


Рентгеноструктурный анализ

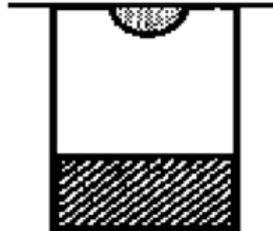


«Космос»

Земля



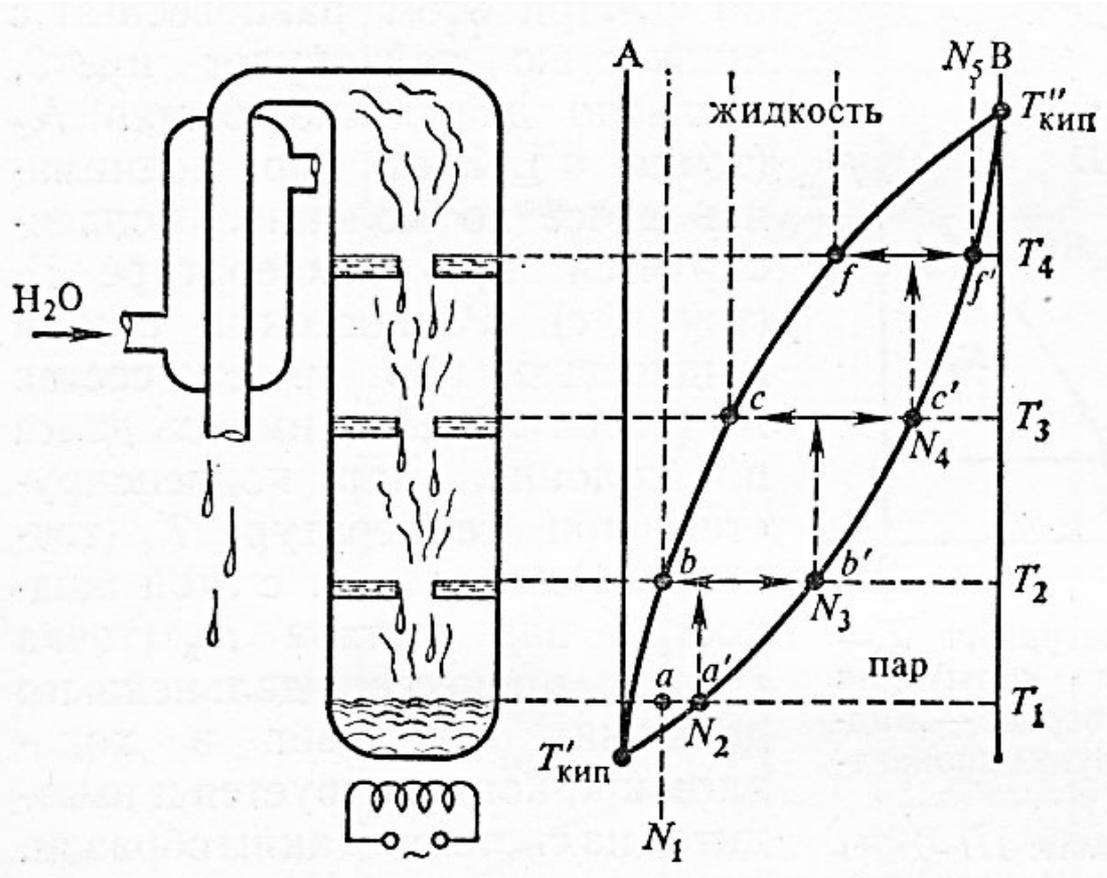
Hanging Drop  
with Protein



Reservoir with  
Precipitant

-Осадитель  
( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ )  
-pH  
-ПАВ

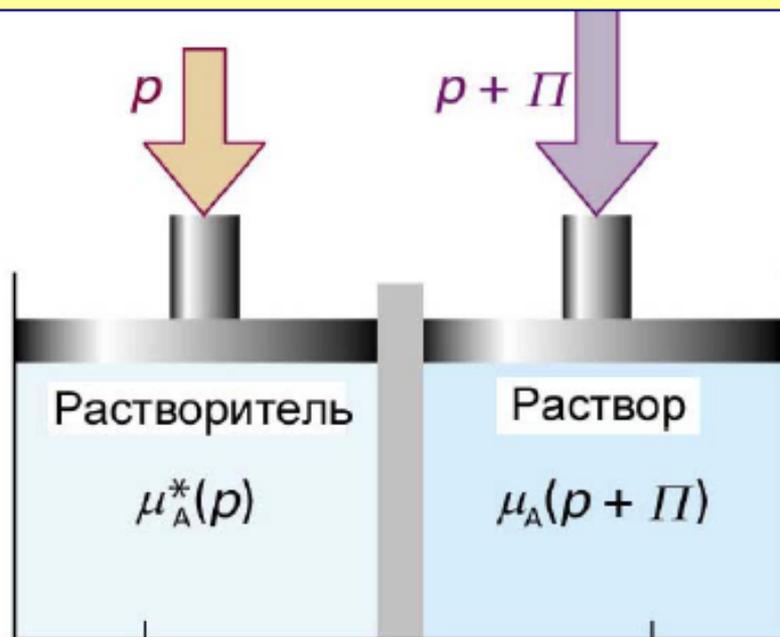
# Перегонка (ректификация)



- Ректификация – важнейший промышленный процесс, использующий знания о физико-химическом состоянии и фазовых диаграммах многокомпонентных систем.
- Разделение происходит многоэтапно, с изменением температуры (и / или давления). В технологии эта эффективность описывается количеством изотермических «тарелок», обогащающих жидкую (газообразную) фазу одним из компонентов в соответствии с фазовой диаграммой.

**Осмоз** – перенос растворителя через полупроницаемую мембрану в сторону более концентрированных растворов.

Примеры: 1) мацерация кожи в чистой воде; 2) высыхание растений на засоленных почвах.



Уравнение Вант-Гоффа  
для осмотического давления

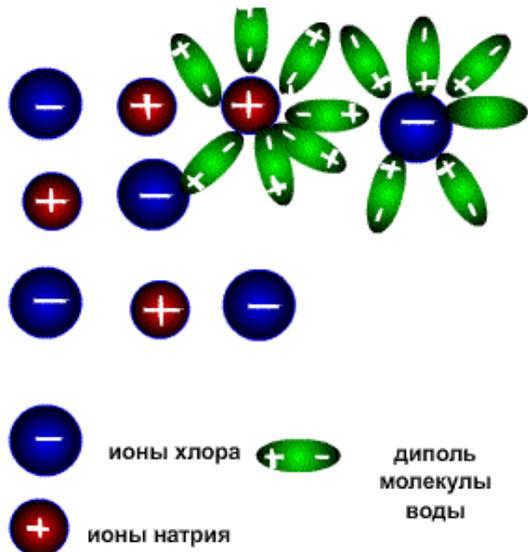
$$\Pi = cRT$$

Приближения: 1) раствор – разбавленный ( $x_2 \ll 1$ );  
2) раствор – идеальный; 3) растворитель – несжимаемый.

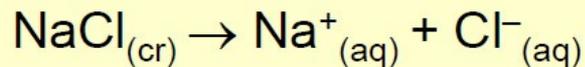
- Осмос важен для всего живого, поскольку мембраны клеток полупроницаемы, а клетка правильно функционирует, если находится в физиологической среде с определенным уровнем растворенных веществ, иначе осмотическое давление заставит их съежиться или, напротив, лопнуть и погибнуть.
- Осмос важен для жизни растений, в том числе, корневая система многих из них просто неспособна добыть воду из почвы на солончаках.
- В практическом плане мембраны и осмотические эффекты позволяют получать чистую (пресную) воду, без которой невозможна жизнь человека.



# Электролитическая диссоциация



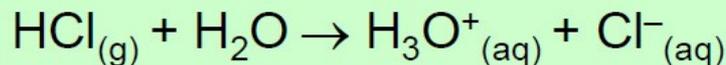
## 1. Ионные соединения.



Ион-дипольное взаимодействие с растворителем:

- разрушение кристаллической решетки
- гидратация ионов

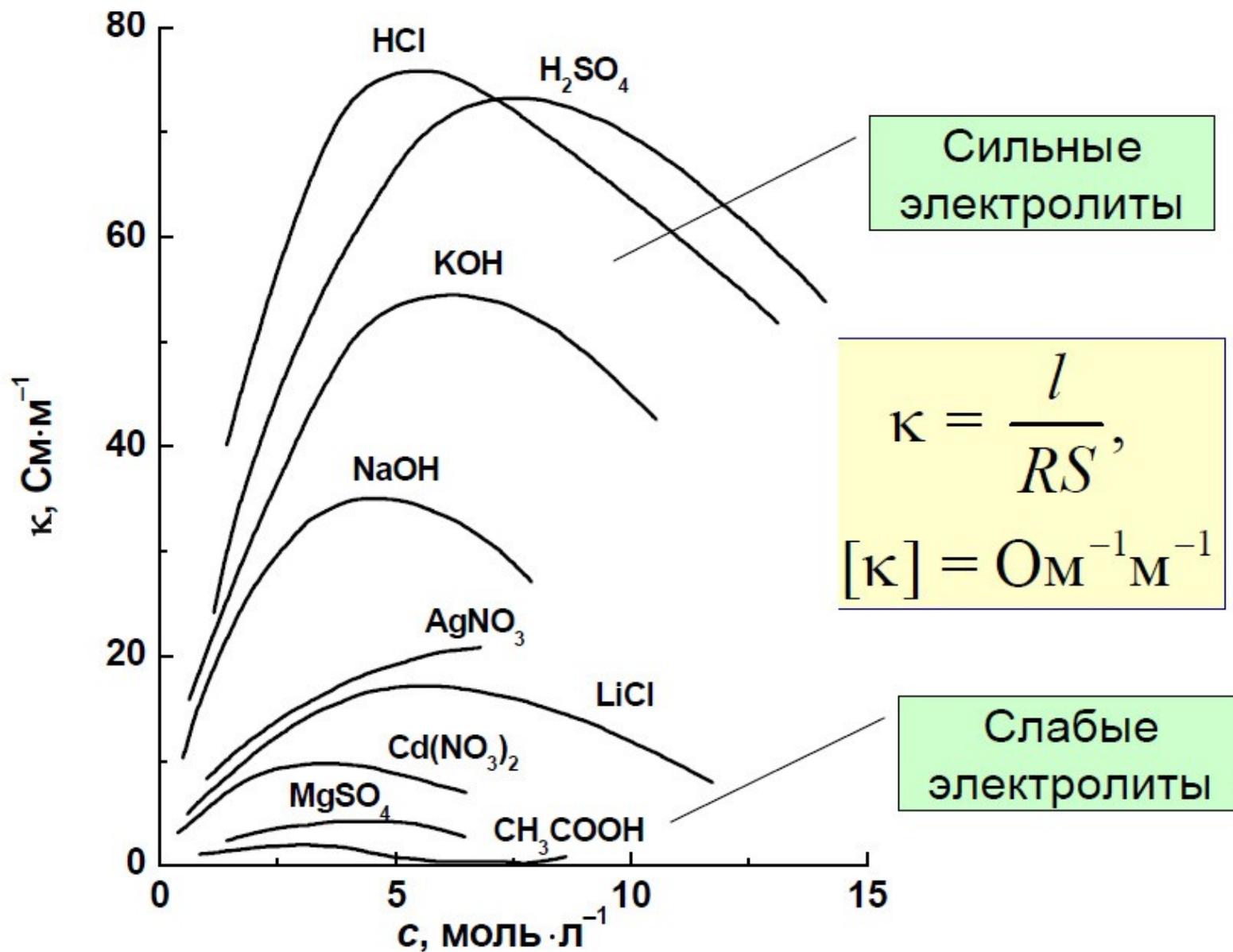
## 2. Молекулярные соединения.



- разрыв ковалентной связи
- протонирование воды
- гидратация ионов

- В 1887 г. С.Аррениусом и В.Оствальдом создана теория электролитической диссоциации.
- С.Аррениус: физическая теория растворов, в растворах находятся свободные ионы.
- И.А.Каблуков и В.А.Кистяковский: химическая теория растворов Д.И.Менделеева - при растворении электролита происходит его химическое взаимодействие с водой, в результате которого электролит диссоциирует на ионы.

# Сильные и слабые электролиты



Степень диссоциации (число распавшихся по отношению к общему количеству молекул) зависит от природы растворенного вещества, природы растворителя (полярности, диэлектрической проницаемости), концентрации раствора, температуры, наличия одноименного иона...

Электролиты	Сильные	Слабые
Кислоты	HCl, HBr, HI, HNO <sub>3</sub> , HClO <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> S, HCN, HNO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> , HClO, H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> и органические кислоты
Основания	KOH, NaOH, Ca(OH) <sub>2</sub> , Ba(OH) <sub>2</sub>	растворимые: NH <sub>3</sub> , амины; нерастворимые: большинство гидроксидов металлов (Al(OH) <sub>3</sub> , Zn(OH) <sub>2</sub> )
Соли	NaCl, Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> — почти все соли, в том числе и комплексные: $[Cu(NH_3)_4]SO_4 \rightleftharpoons (Cu(NH_3)_4)^{2+} + SO_4^{2-}$	HgCl <sub>2</sub> ; комплексные ионы, например: $[Cu(NH_3)_4]^{2+} \rightleftharpoons Cu^{2+} + 4NH_3$
Основные характеристики	Кажущаяся степень диссоциации ( $\alpha_{каж}$ ), активность ( $a$ ), коэффициент активности ( $\gamma$ ), ионная сила раствора ( $I$ )	Степень диссоциации ( $\alpha$ ), константа диссоциации ( $K_{дисс}$ ), концентрация ( $C$ ), при больших концентрациях — активность ( $a$ )

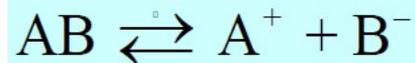
Слабые электролиты при ~0.1 М имеют степень диссоциации <0.3%  
Сильные электролиты (почти) полностью диссоциируют на ионы, для них степень диссоциации >0.3 (не рассматривают константу диссоциации, но вводят кажущуюся степень диссоциации).

# Константа диссоциации (слабые электролиты)



$$K = K_{\text{дисс}} = \frac{a_{A^+} a_{B^-}}{a_{AB}} = \exp\left(-\frac{\Delta G_T^\circ}{RT}\right)$$

Для бинарного электролита



$$[A^+] = [B^-] = \alpha c, \quad [AB] = c(1 - \alpha)$$

$$K = \frac{[A^+][B^-]}{[AB]} = \frac{\alpha^2}{1 - \alpha} c \stackrel{\alpha < 0.01}{\approx} \alpha^2 c \quad \alpha \approx \sqrt{\frac{K}{c}}$$

# Сильные электролиты

$$I_c = \frac{1}{2} \sum_{B=1}^n c_B z_B^2$$

- ионная сила раствора (сильные электролиты)

— мера «интенсивности электрического поля», создаваемого ионами в растворе, полусумма произведений из концентрации всех ионов в растворе на квадрат их заряда. В теории сильных следует рассматривать не концентрации, а **активности**, в теории Дебая - Хюккеля существует связь между коэффициентом активности иона и ионной силой раствора:  $\log(\gamma_i) = -Az_i^2\sqrt{I}$  где  $\gamma$  — коэффициент активности,  $A$  — постоянная, не зависящая от заряда иона и ионной силы раствора, но зависящая от температуры и диэлектрической постоянной растворителя: вода — 82, диметилсульфоксид — 47, ацетонитрил — 37, диметилформамид — 37, этиловый спирт — 26, аммиак — 25, ацетон — 22...



- Для сильных электролитов важно, чтобы ионы «чувствовали» притяжение или отталкивание друг от друга в существенно меньшей степени, чем в пустоте (вакууме), что облегчает растворение и должно, в свою очередь, зависеть от диэлектрической проницаемости растворителя.
- Ионная сила – обобщенный параметр, описывающий «среднее» поле от уже растворенных ионов.
- В теории Дебая – Хюккеля не учитывается химическая природа растворителя, хотя во многих других теориях координирующая способность молекул растворителя является ключевым параметром, и это выражается «акцепторными» и «донорными» числами конкретного растворителя, что позволяет предсказать их растворяющую способность по отношению к тем или иным классам растворяемых веществ.

# Произведение растворимости

Равновесие в насыщенном растворе малорастворимого сильного электролита можно записать следующим образом:



Константа этого равновесия называется *произведением растворимости* (ПР):

$$K = \frac{a_{A^+} a_{B^-}}{a_{AB_{\text{тв}}}} = C_{A^+} C_{B^-} = \text{ПР}_{AB} = \exp\left(\frac{-\Delta G_T^\circ}{RT}\right). \quad (1.65)$$

В этом уравнении преобразования сделаны в предположении, что  $a_{AB} = 1$ ,  $a_{(\text{ионов})} = C$ , так как  $C \ll 1$ . Используя уравнение изотермы химической реакции (1.31) для этого равновесия, можно определить условия выпадения и растворения осадка, если  $C'$  — концентрации ионов в растворе:

Растворение происходит самопроизвольно:  $\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln(C'_{A^+} C'_{B^-}) < 0$

$$\Delta G = -RT \ln \text{ПР} + RT \ln(C'_{A^+} C'_{B^-}) < 0$$

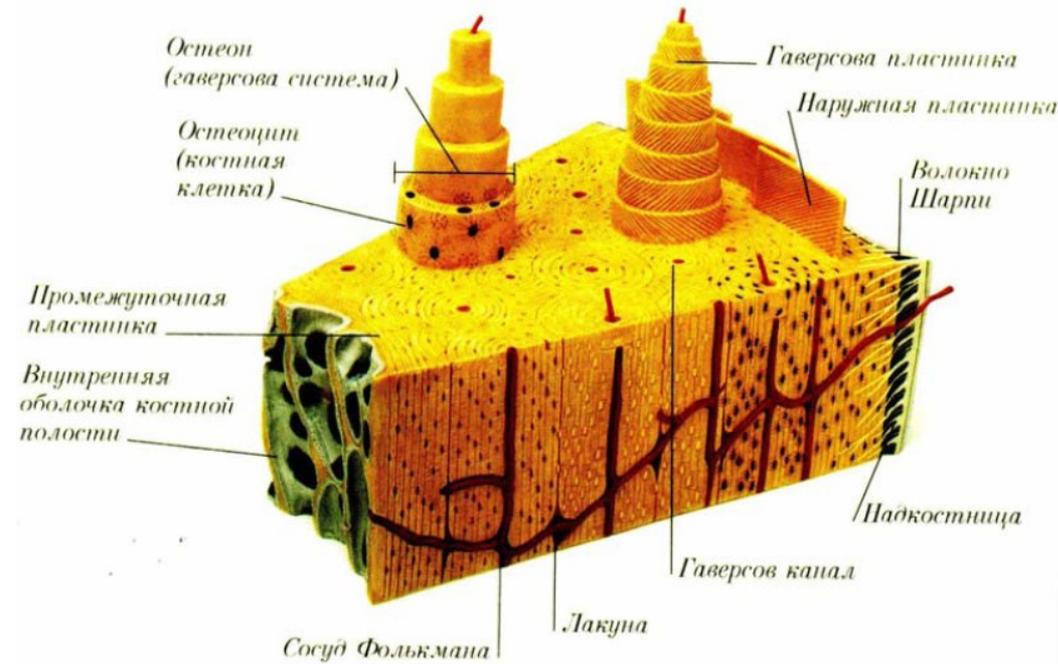
Условие выпадения осадка:

$$C'_{A^+} C'_{B^-} > \text{ПР}$$

Условие растворения осадка:

$$C'_{A^+} C'_{B^-} < \text{ПР}$$

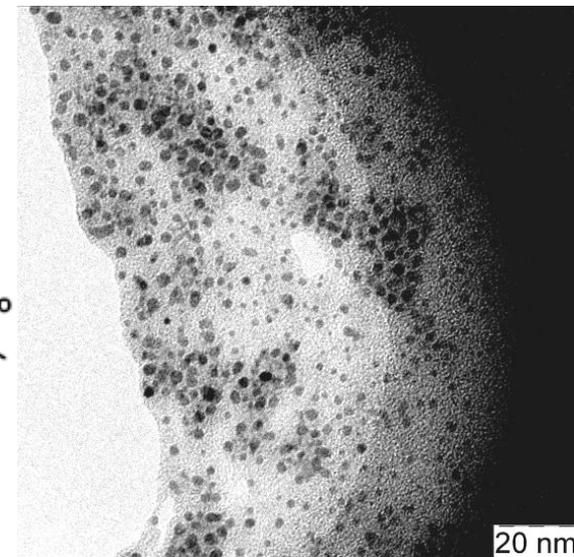
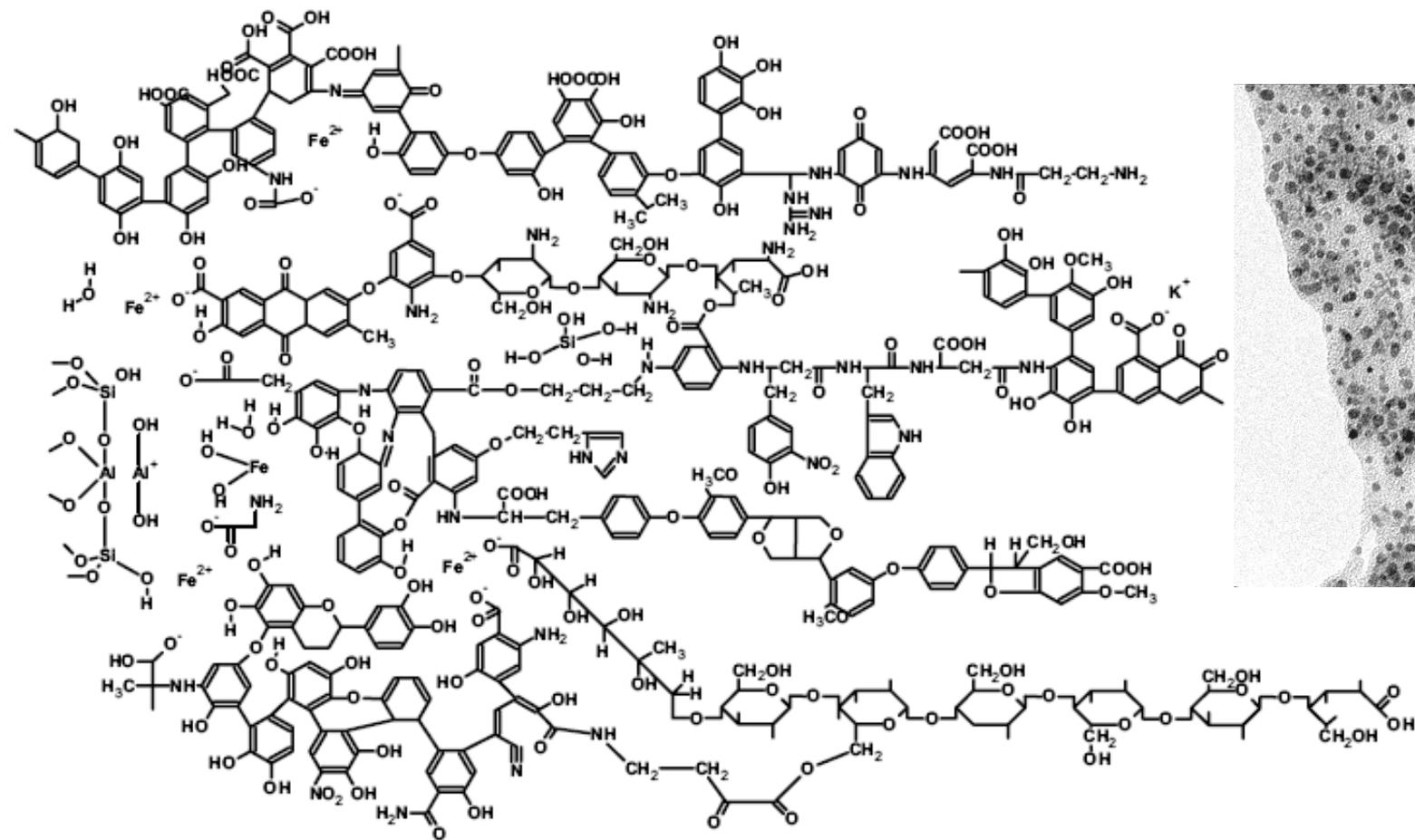
# Гидроксилапатит



Химическая формула	Обозначение	Ca/P	Интервал pH	pPP (37 °C)
$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	MCPM	0.5		раств.
$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	MCP	0.5	< 1.5	раств.
$\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	DCPD	1		6.63
$\text{CaHPO}_4$	DCP (CP)	1	2 – 4	7.02
$\text{Ca}_8(\text{HPO}_4)_2(\text{PO}_4)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	OCP	1.33	6 – 7	95.9
$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$	HAP	1.5 – 1.67	> 5	117.2
Аморфный	ACP	1.33–1.67		
$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (α-, β-)	α-, β-TCP (C <sub>3</sub> P)	1.5		29.5
$\text{Ca}_4\text{P}_2\text{O}_9$	TetCP (C <sub>4</sub> P)	2		42.4

$$\text{pIP(плазмы крови)} = -\lg ([\text{Ca}^{2+}]^{10} [\text{PO}_4^{3-}]^6 [\text{OH}^-]^2) = 96$$

# Гуминовые кислоты – «ветвистые» полиэлектролиты





- Природные полиэлектролиты — важнейший класс электролитов. Если они имеют высокомолекулярную природу, то вряд ли смогут образовать истинный раствор, однако будут активно взаимодействовать с окружающими растворами за счет электростатических сил и координации с ионами.
- Искусственные полиэлектролиты используются для создания ион-обменных смол, которые применяются для очистки воды как недорогая альтернатива дистилляции.

# Основное

- Раствор — гомогенная фаза переменного состава, формирующаяся при растворении вещества в растворителе, при этом растворяемое вещество и растворитель могут быть одной из возможных комбинаций жидких, газообразных или твердофазных веществ.
- Растворы — одно из ключевых понятий химии, биологии, технологии, поскольку, как правило, их использование позволяет существенно ускорить протекание химических (и биологических) процессов.
- Модели описания растворов многообразны, но отличаются для сильных и слабых электролитов. Алхимический принцип «подобное растворяется в подобном» имеет вполне реальные физико — химические предпосылки.
- Свойства растворов определяются концентрацией растворенного вещества, а также химической природой компонентов.