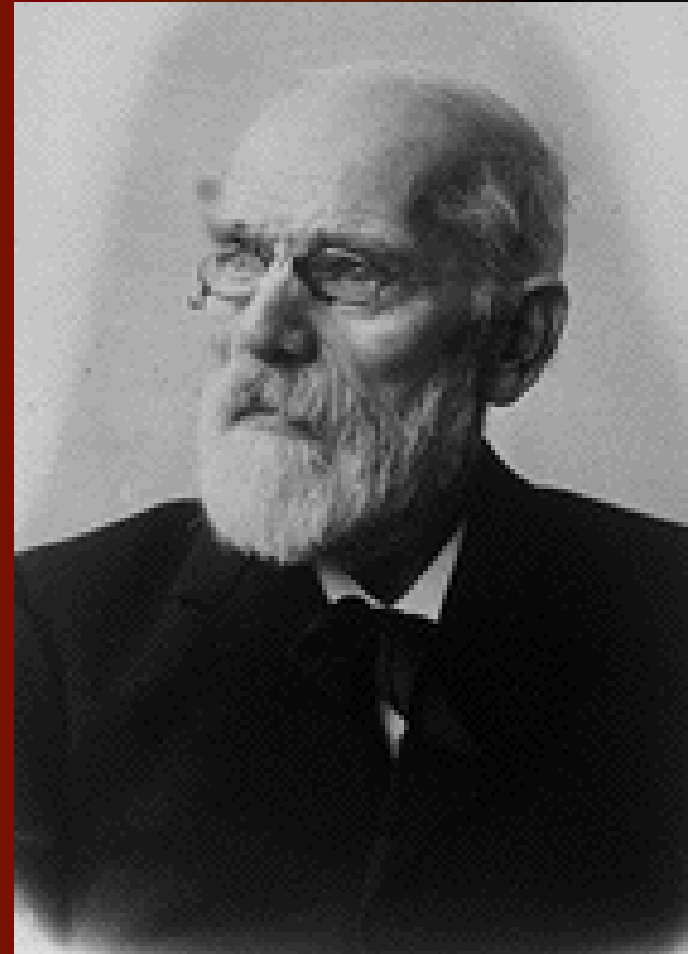


# Тема 7. Реальные газы, твердые тела и жидкости

- 7.1. Уравнение Ван-дер-Ваальса

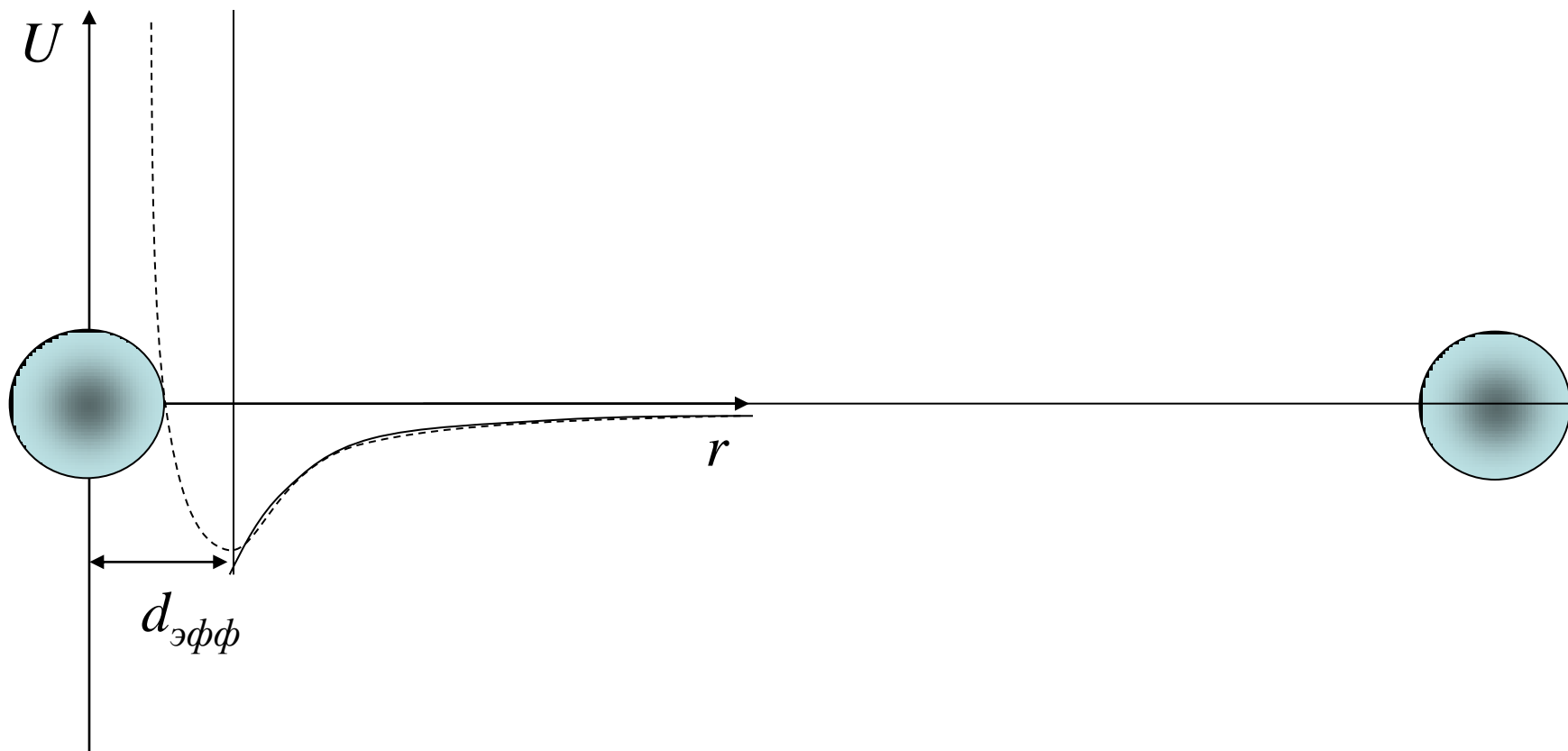


Ван-дер-Ваальс Ян  
(23.XI.1837–8.III.1923)

# Отклонение от уравнения идеального газа для азота при 0 С

$p$ , атм	$pV$ , атм·л
1	1,000
100	0,994
200	1,048
500	1,390
1000	2,069

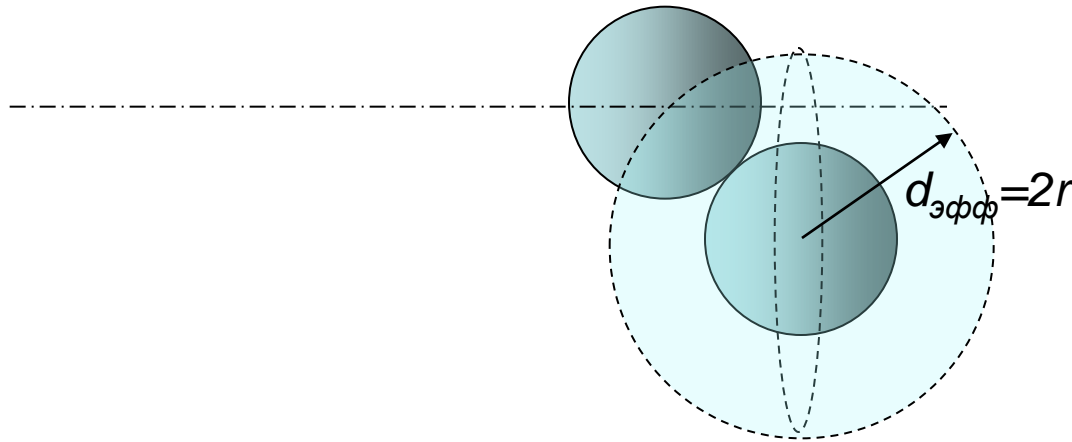
# Взаимодействие Ван-дер-Ваальса



# Эффективный объем молекулы

Эффективный радиус  $d_{эфф}$

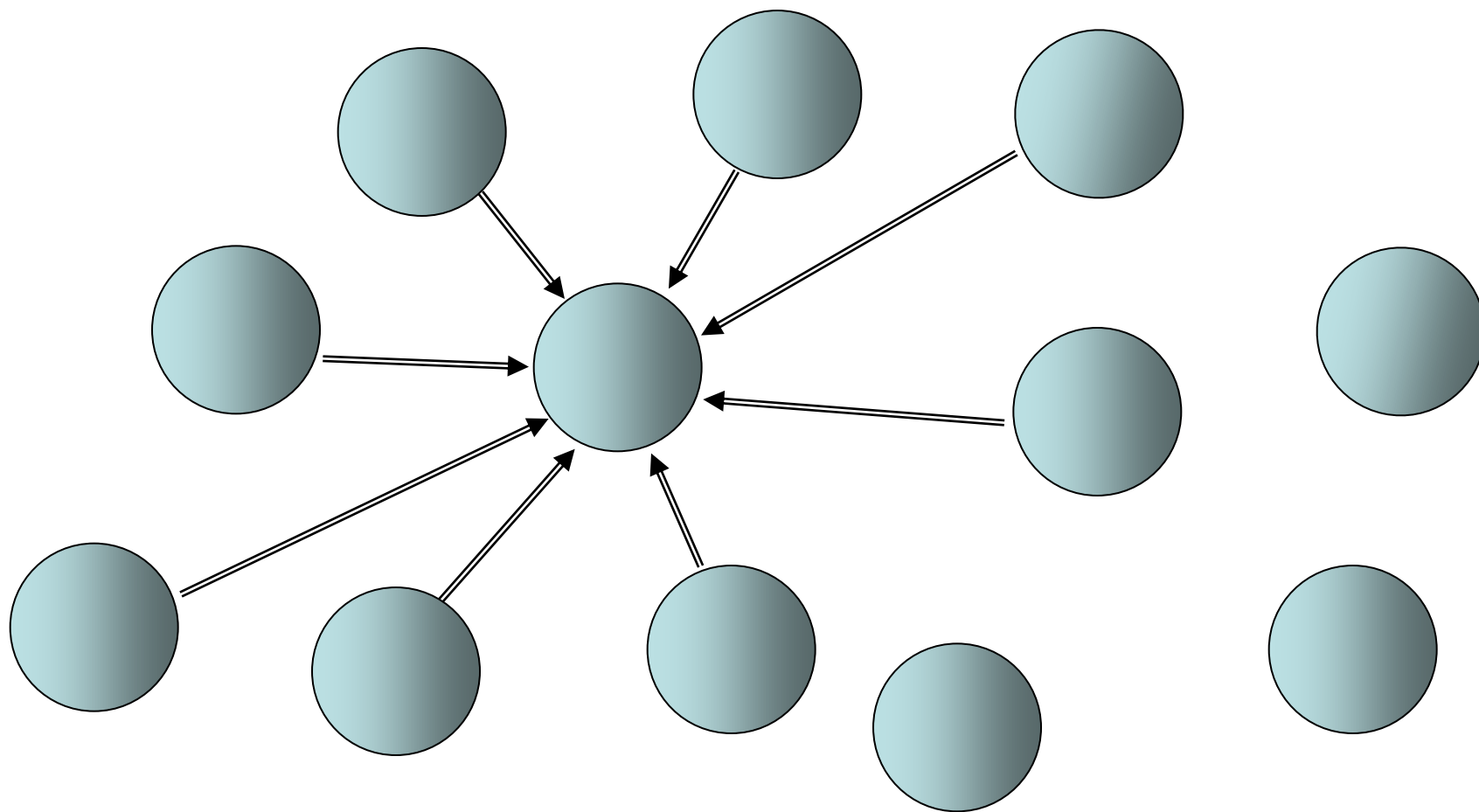
$$V_1 = \frac{4}{3} \pi d^3$$



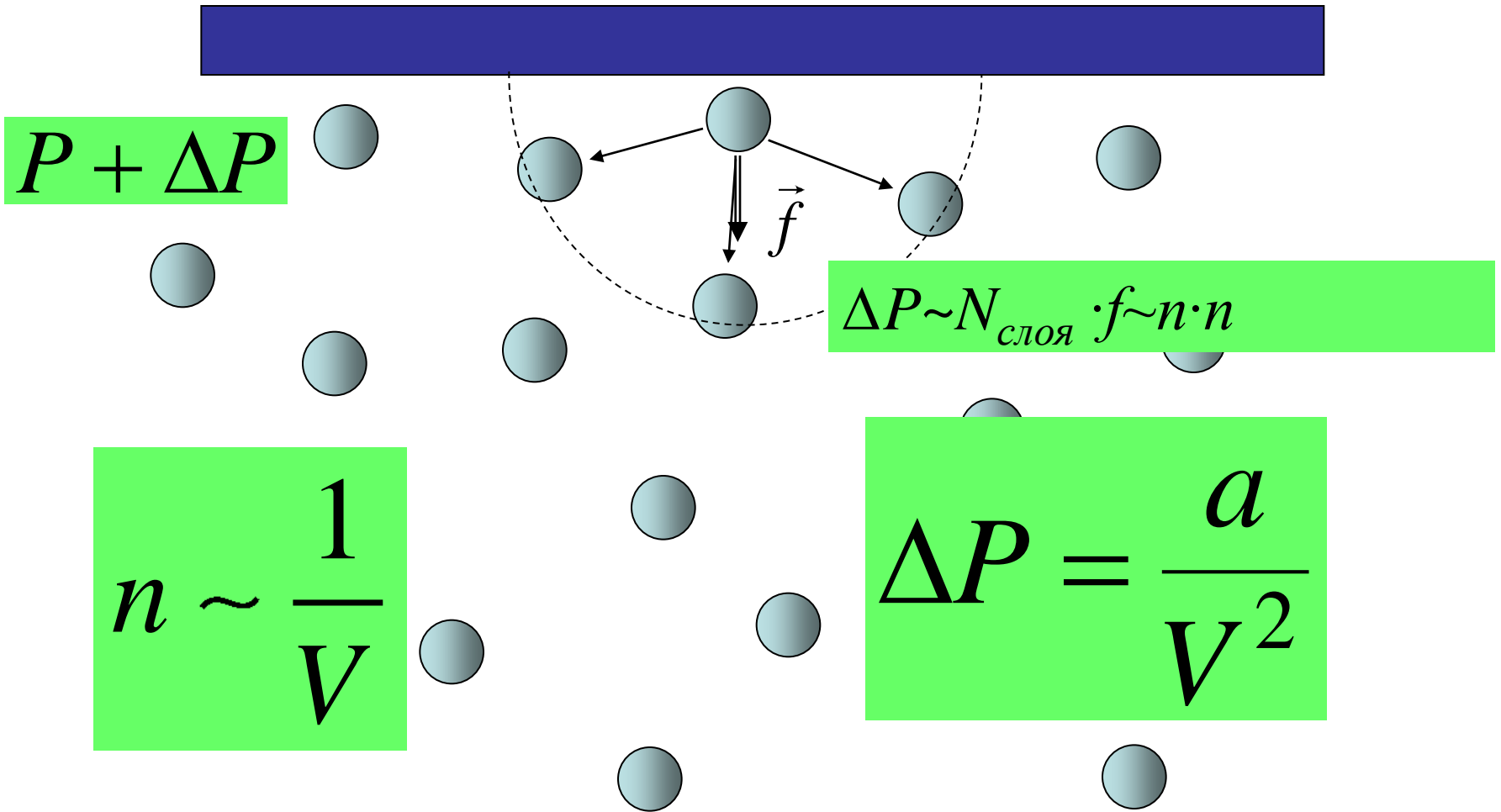
Поправка к уравнению состояния

$$\Rightarrow P(V - b) = RT$$

# Дополнительное сжатие газа



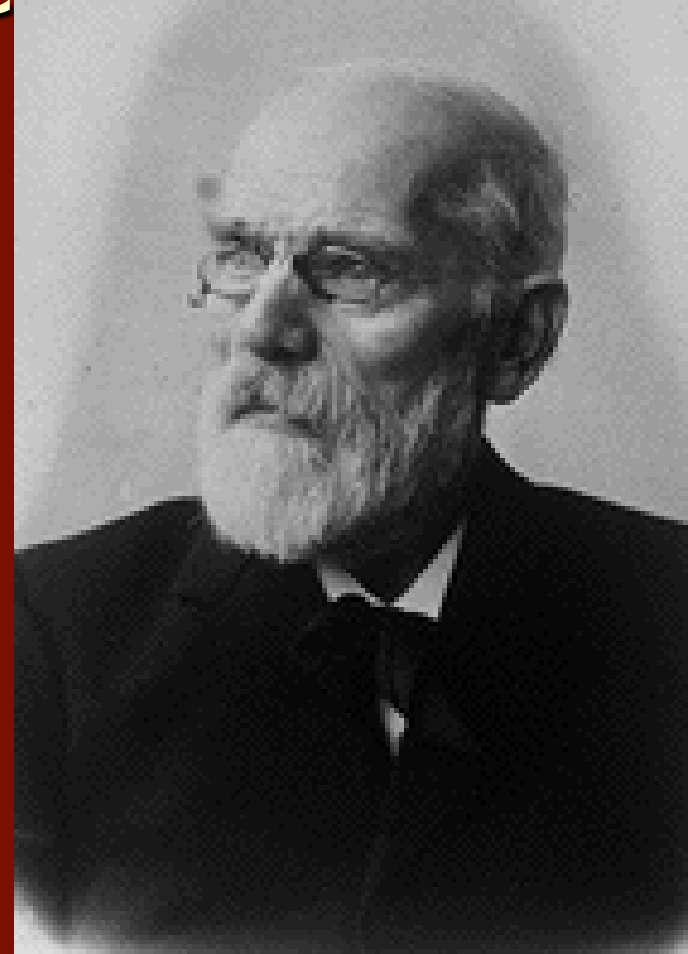
# Эффективное давление газа



$p$ , атм	$pV$ , атм·л	$\left(p + \frac{a'}{V^2}\right)(V - b')$ , атм·л
1	1,000	1,000
100	0,994	1,000
200	1,048	1,009
500	1,390	1,014
1000	2,069	0,893

# Тема 7. Реальные газы , твердые тела и жидкости

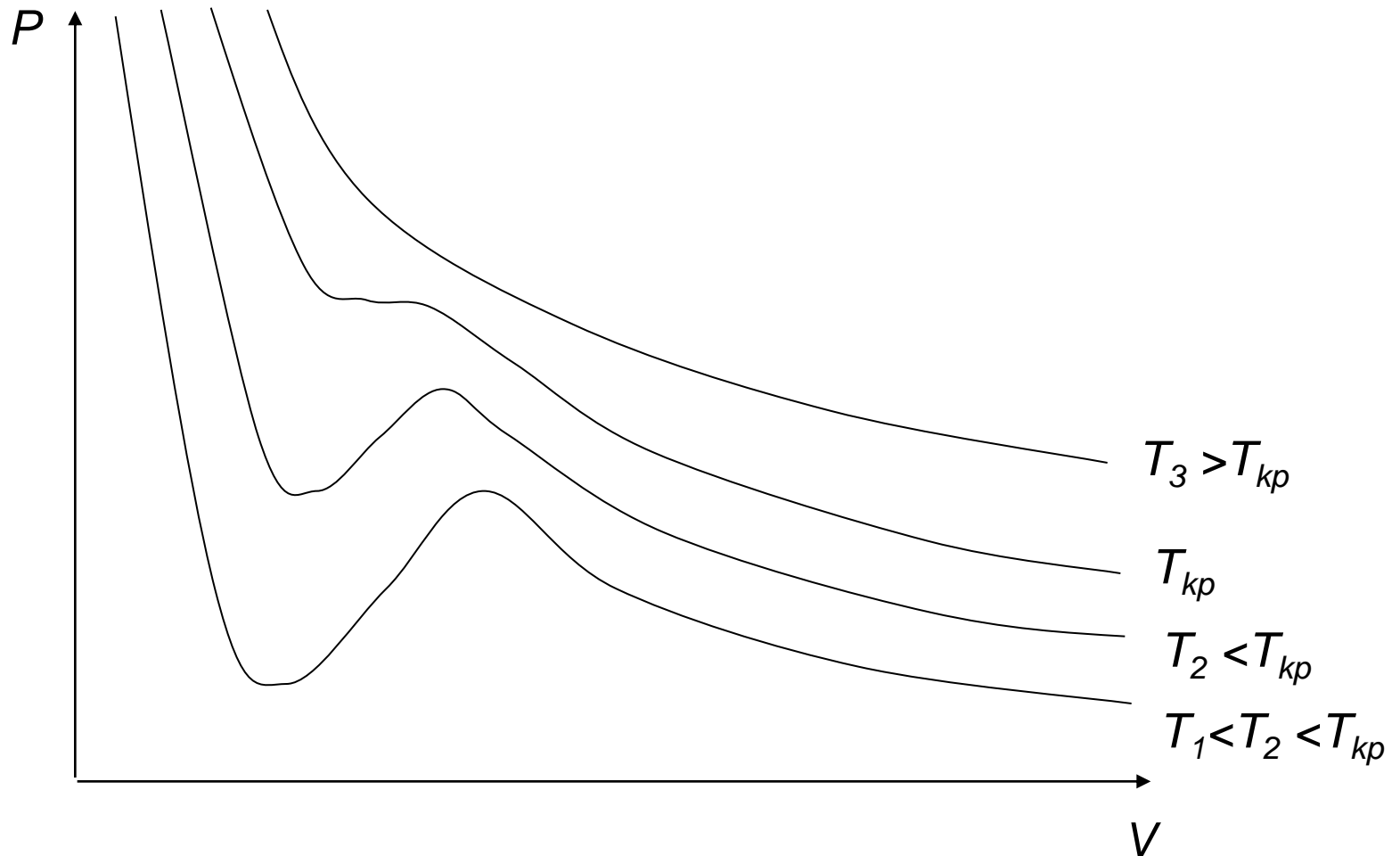
- 7.2. Изотермы реального газа

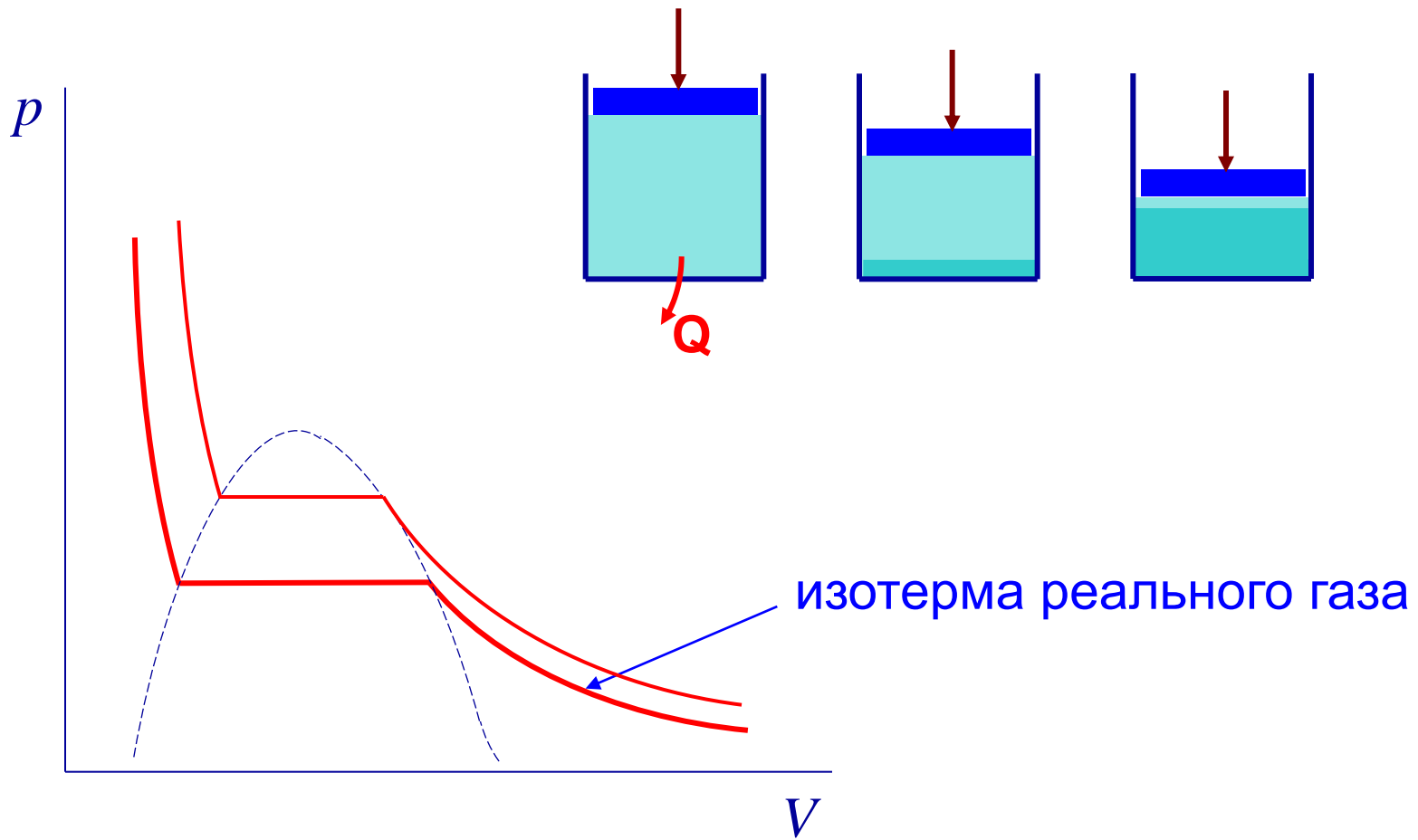


Ван-дер-Ваальс Ян  
(23.XI.1837–8.III.1923)



# Изотермы Ван-дер-Ваальса

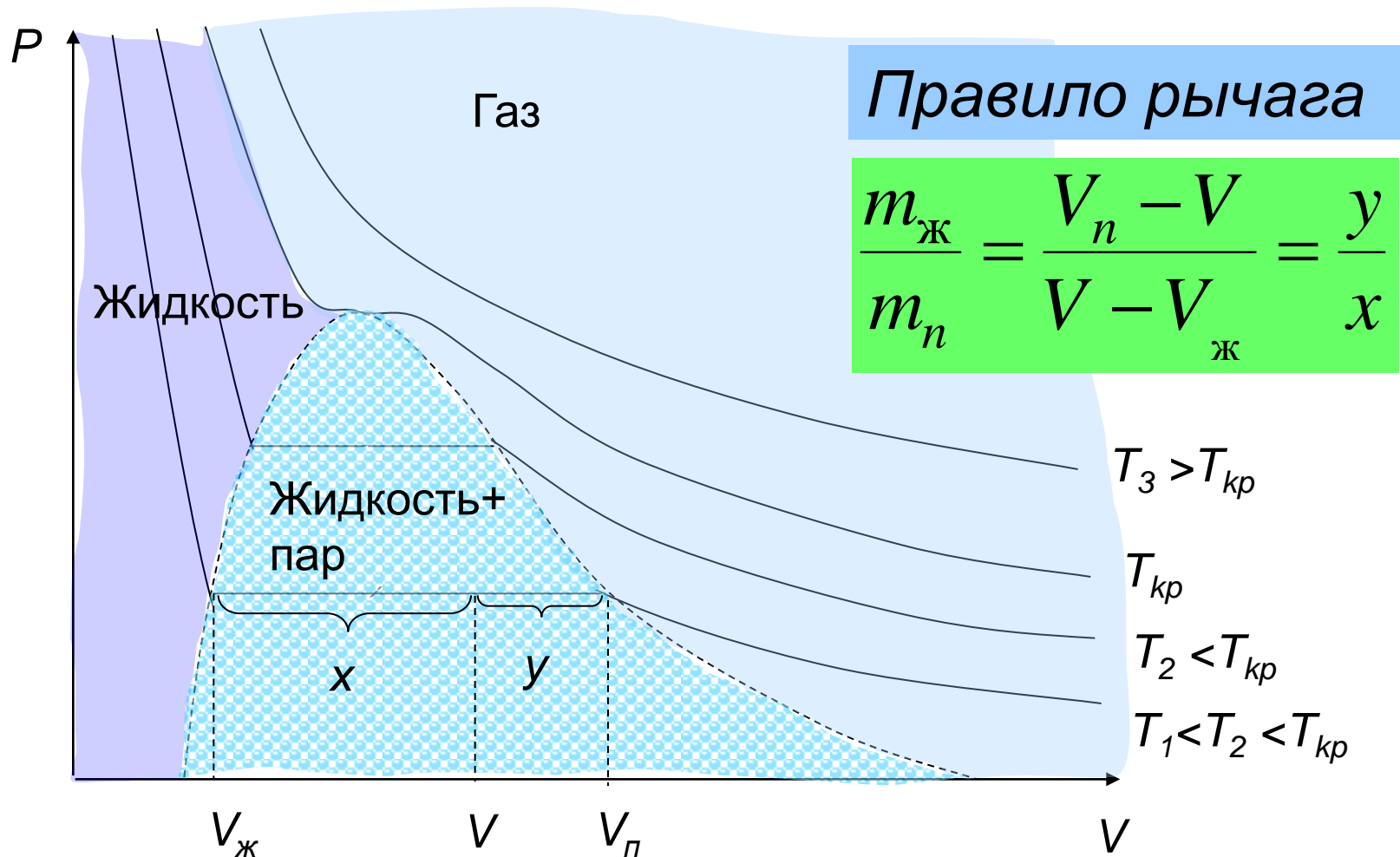


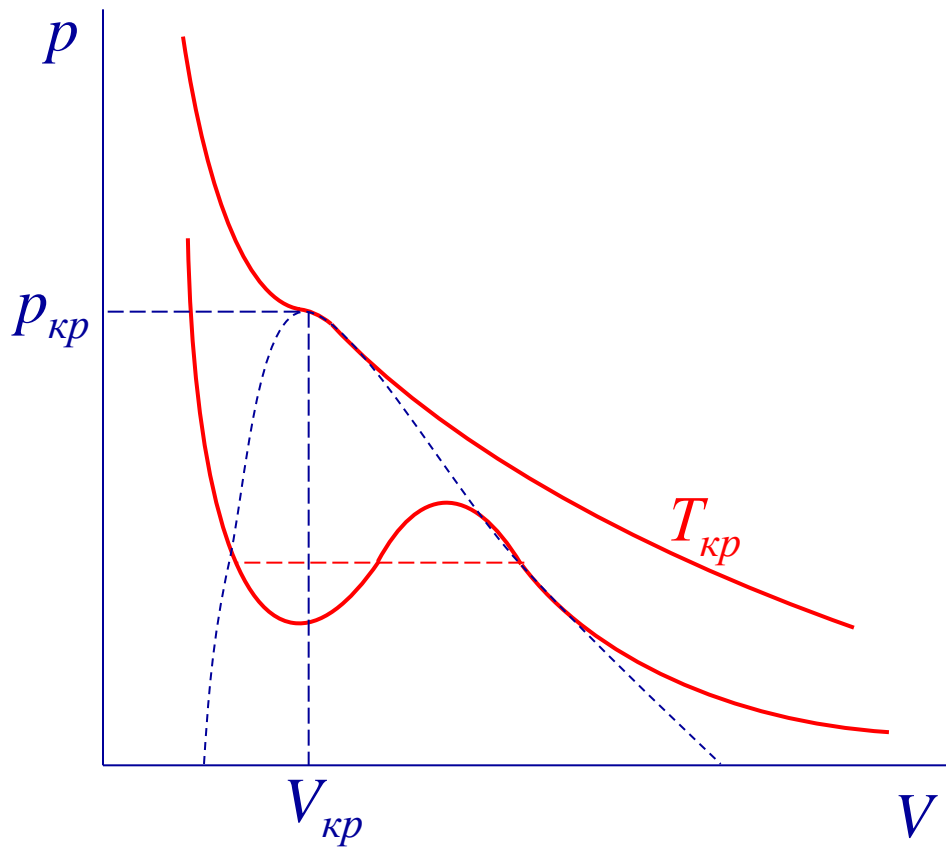


Сжижение  
углекислоты  
Опыт Кальете



# Изотермы реального газа и ЖИДКОСТИ



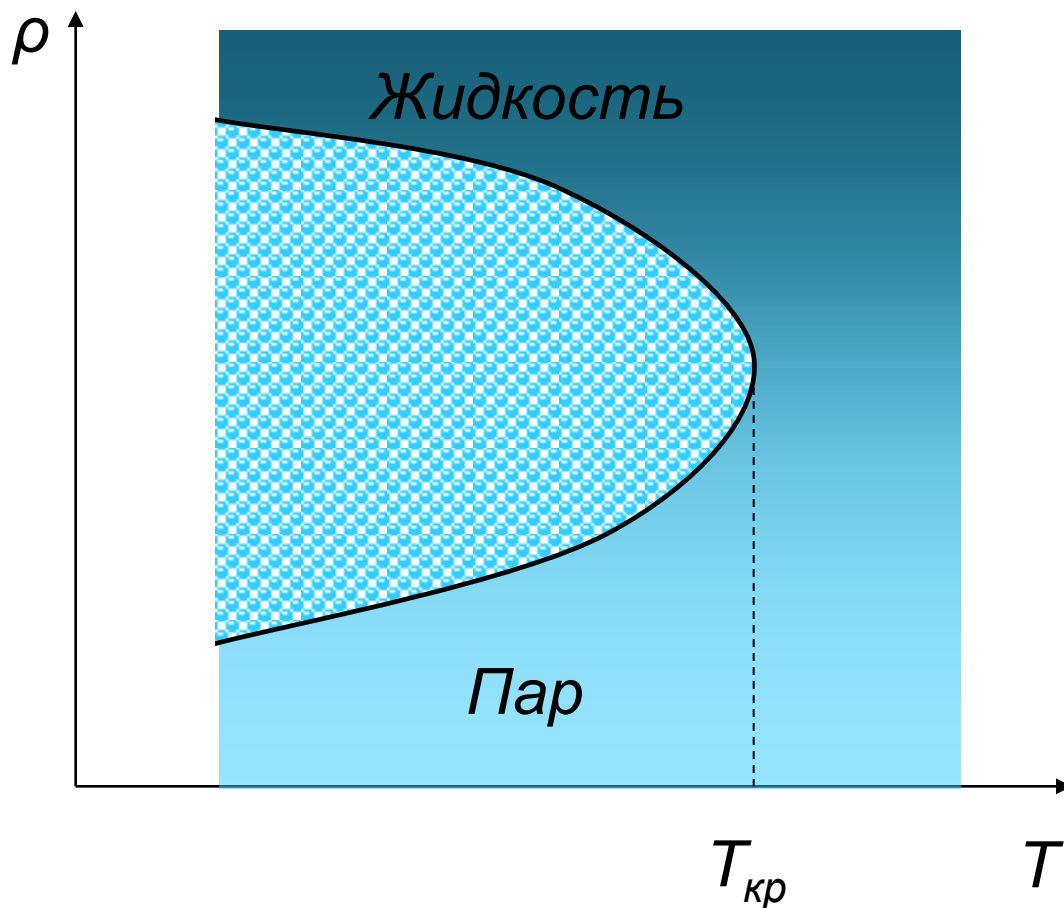


$$p_{кр} = \frac{a}{27b^2}$$

$$V_{кр} = 3b$$

$$T_{кр} = \frac{8a}{27Rb}$$

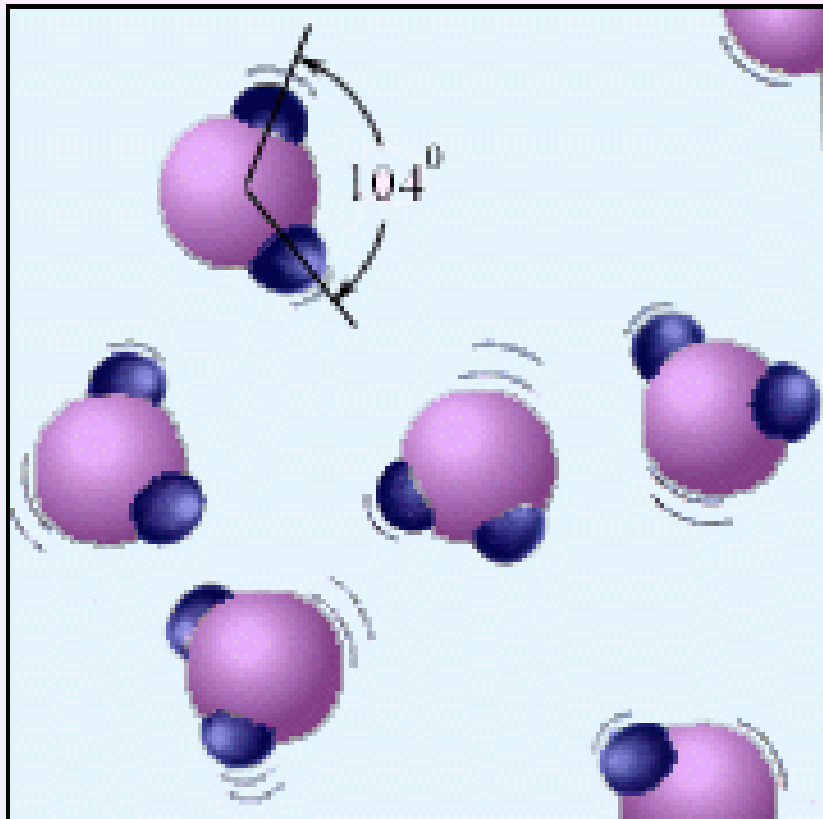
# Зависимость плотности жидкости и насыщенного пара от температуры



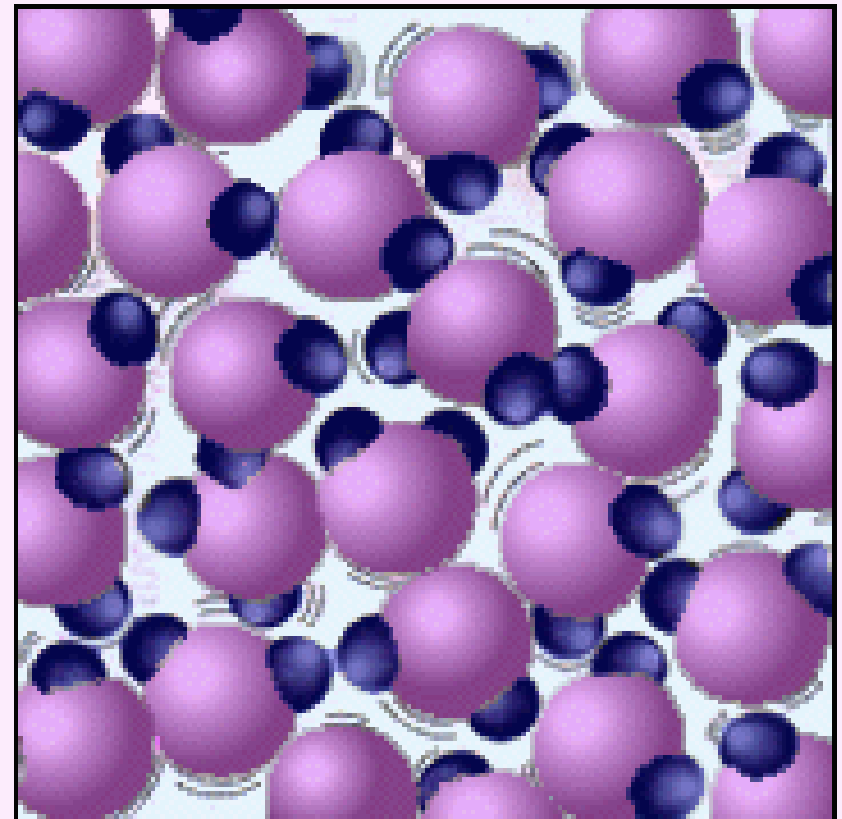


Сжижение  
метана

Водяной пар (1) и вода (2).  
Молекулы воды увеличены  
примерно в  $5 \cdot 10^7$  раз.



(1)

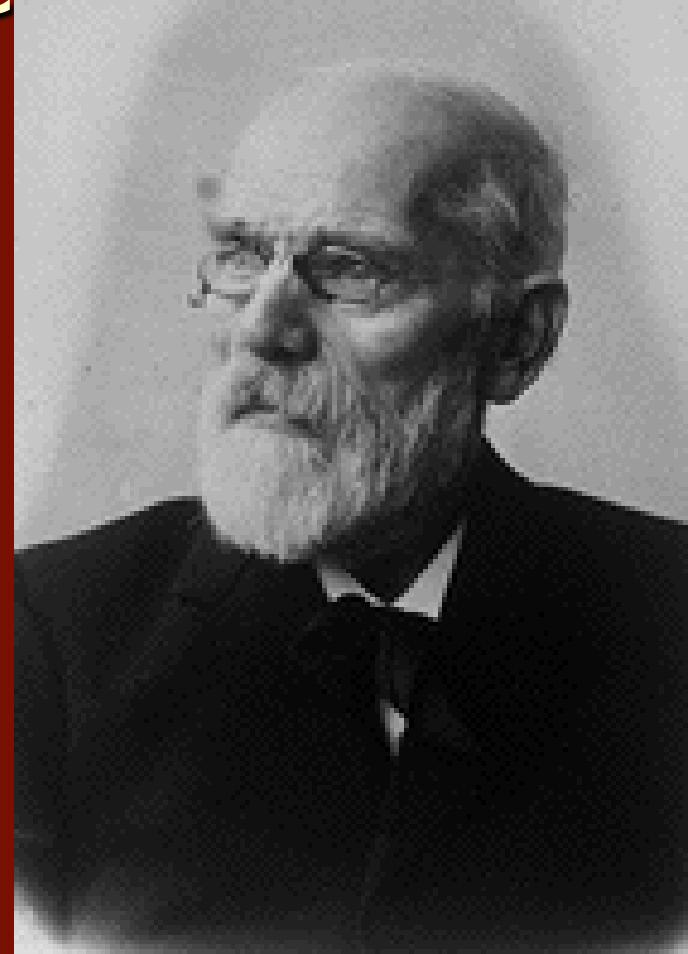


(2)



# Тема 7. Реальные газы , твердые тела и жидкости

- 7.3. Внутренняя энергия реального газа

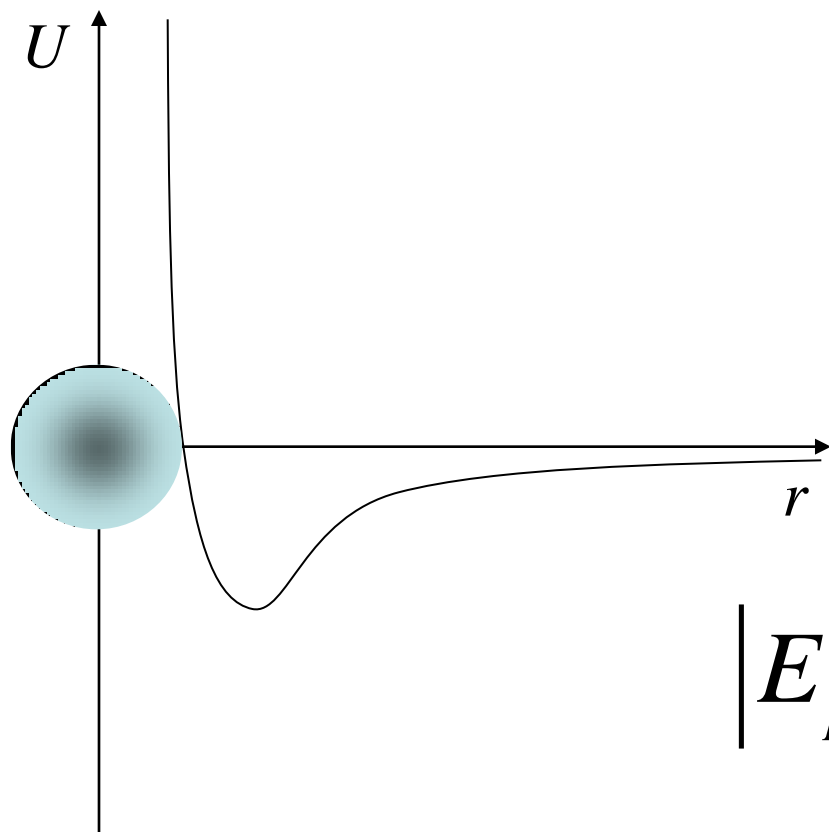


Ван-дер-Ваальс Ян  
(23.XI.1837–8.III.1923)

# Тема 7. Реальные газы , твердые тела и жидкости

- 7.4. Кристаллическое состояние

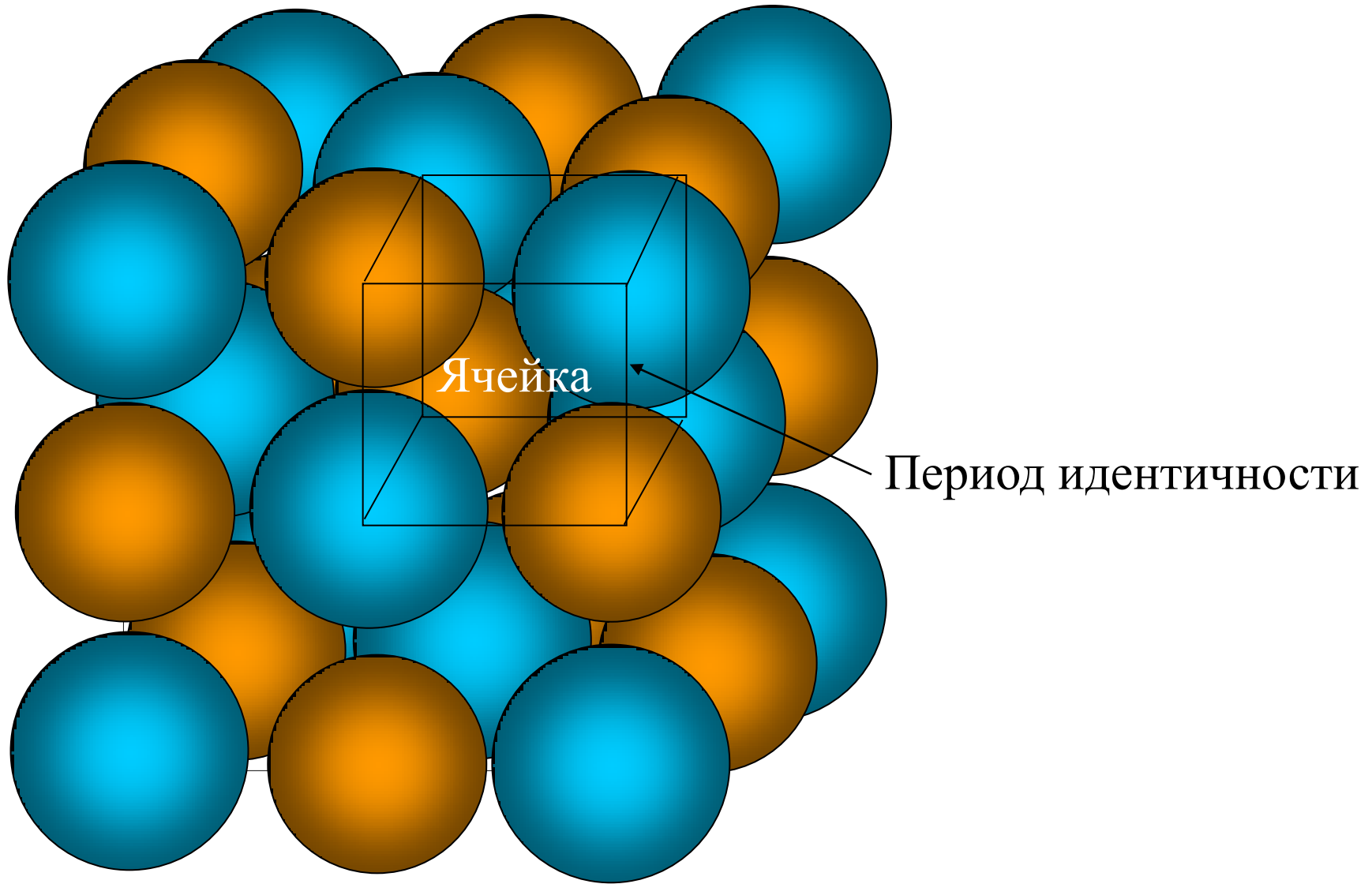
# Потенциал Леннарда - Джонса



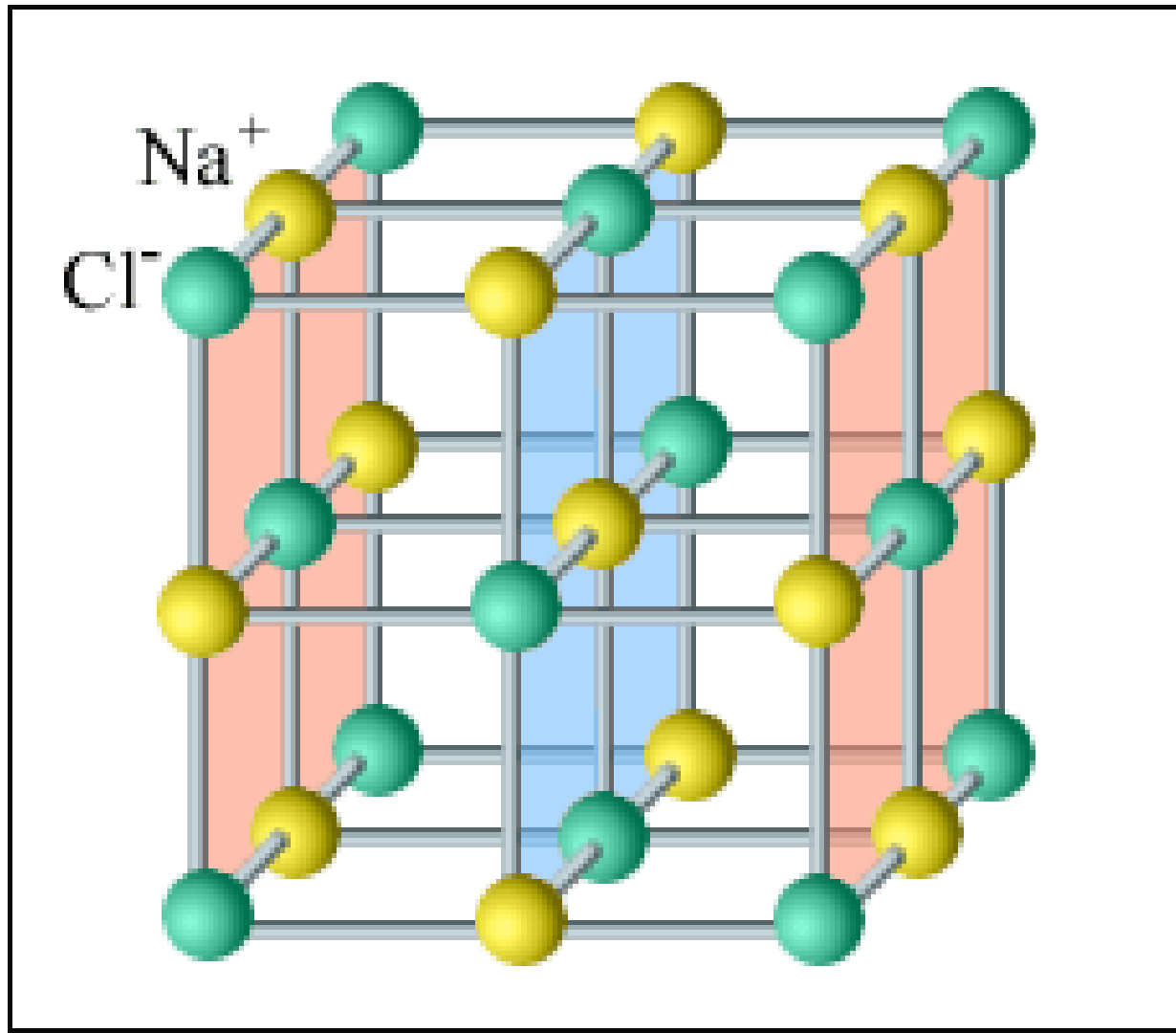
$$E_p = \frac{a_1}{r^{12}} - \frac{a_2}{r^6}$$

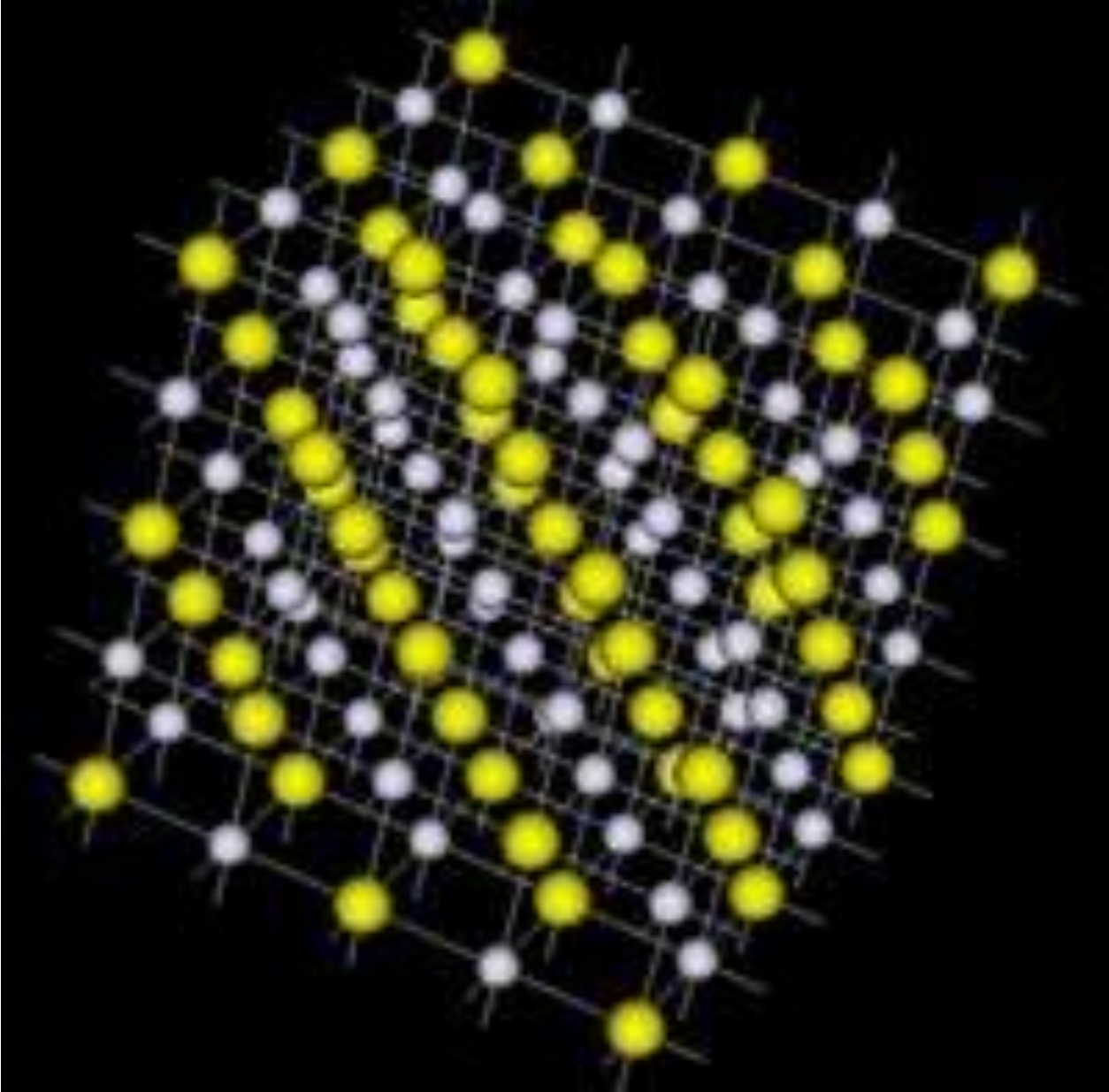
$$|E_p| < E_k$$

# Характерная черта кристаллов – анизотропия свойств

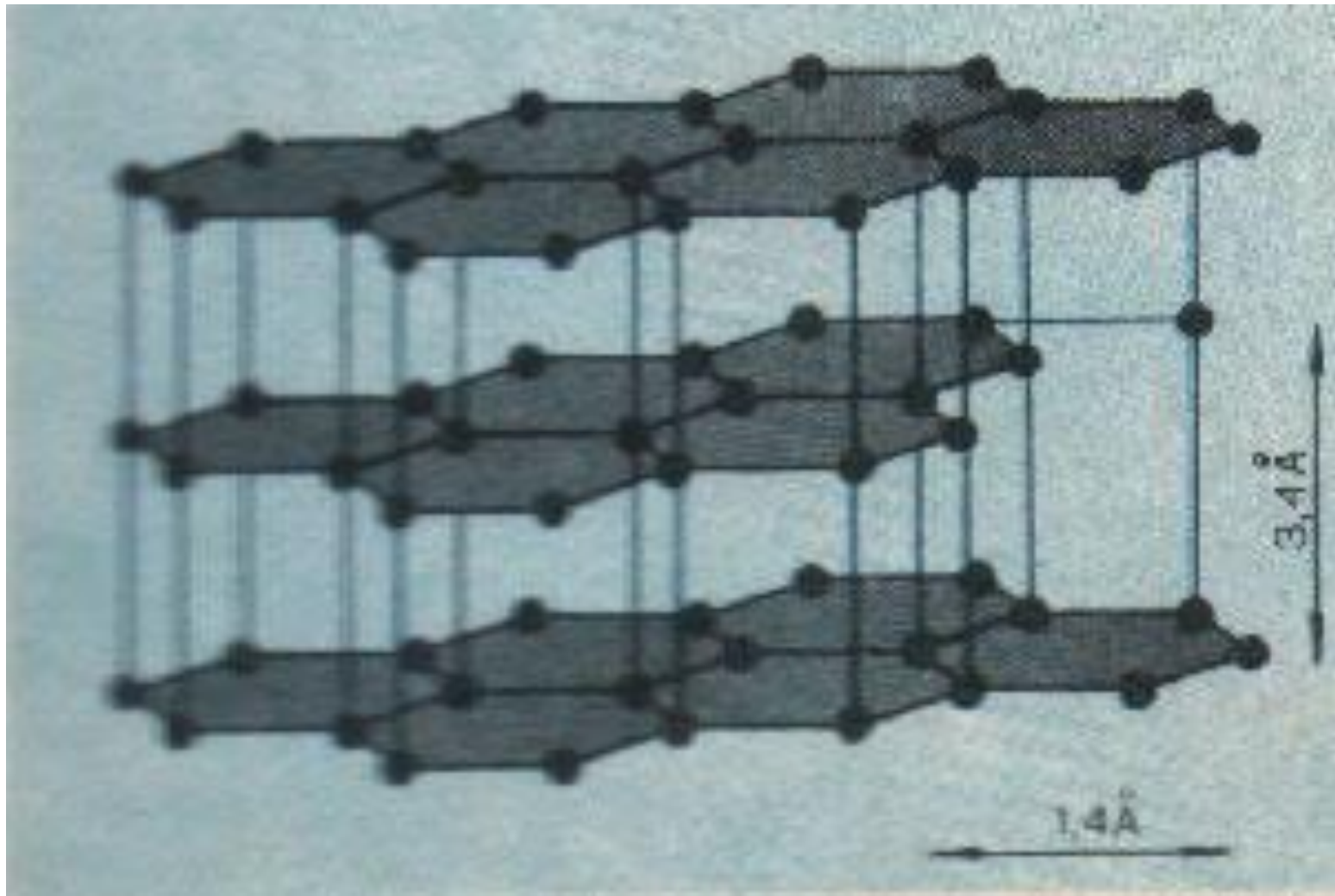


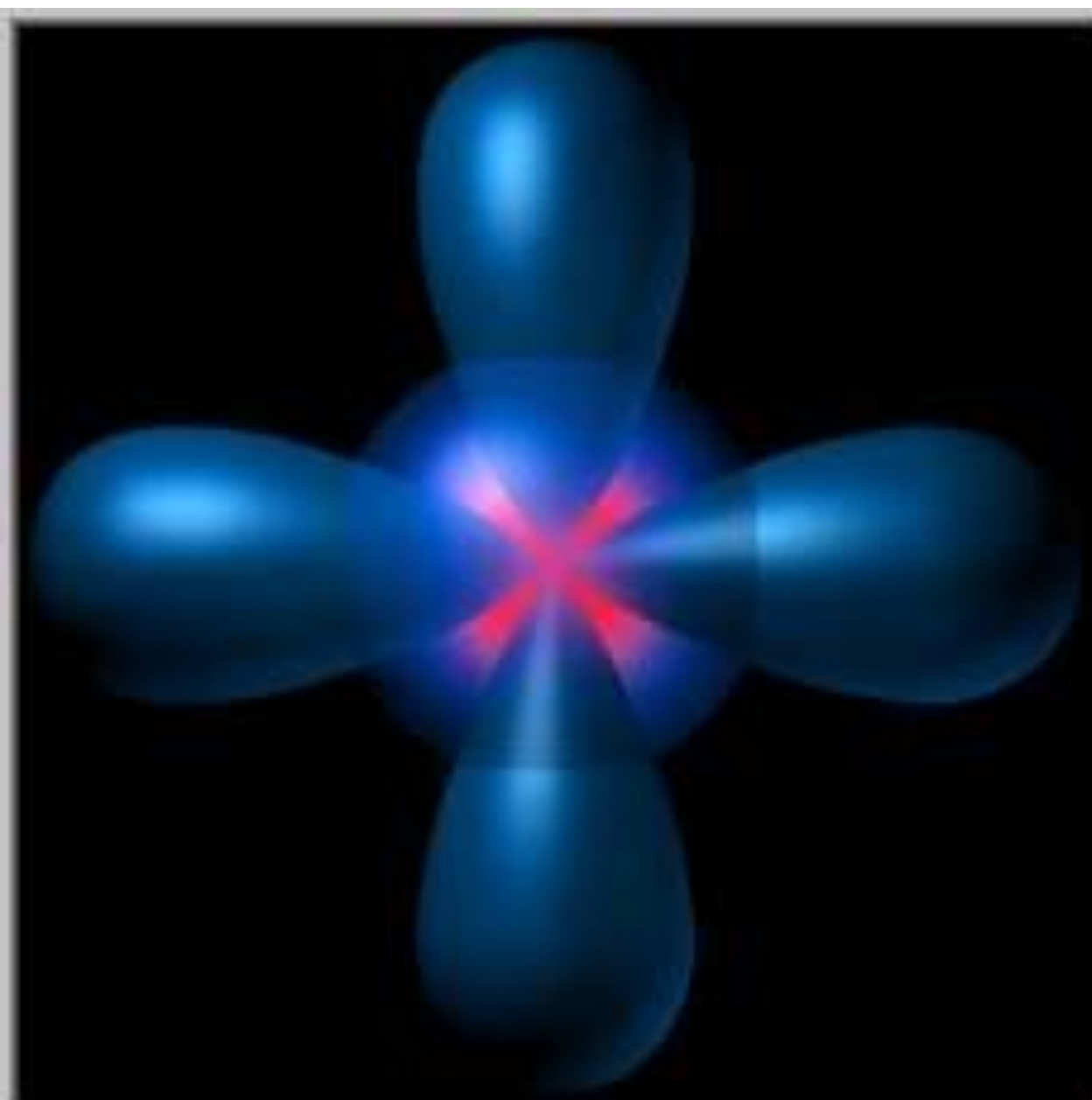
# Ионные кристаллы





# Атомные кристаллы (гомеополярная связь) Структура графита





${}^{12}_6\text{C}$   
 $2s^2 2p^2$  12.011

1S



2S



2P



${}^1_1\text{H}$

${}^4_2\text{He}$

${}^6_3\text{Li}$

${}^9_4\text{Be}$

${}^{10}_5\text{B}$

${}^{12}_6\text{C}$

${}^{14}_7\text{N}$

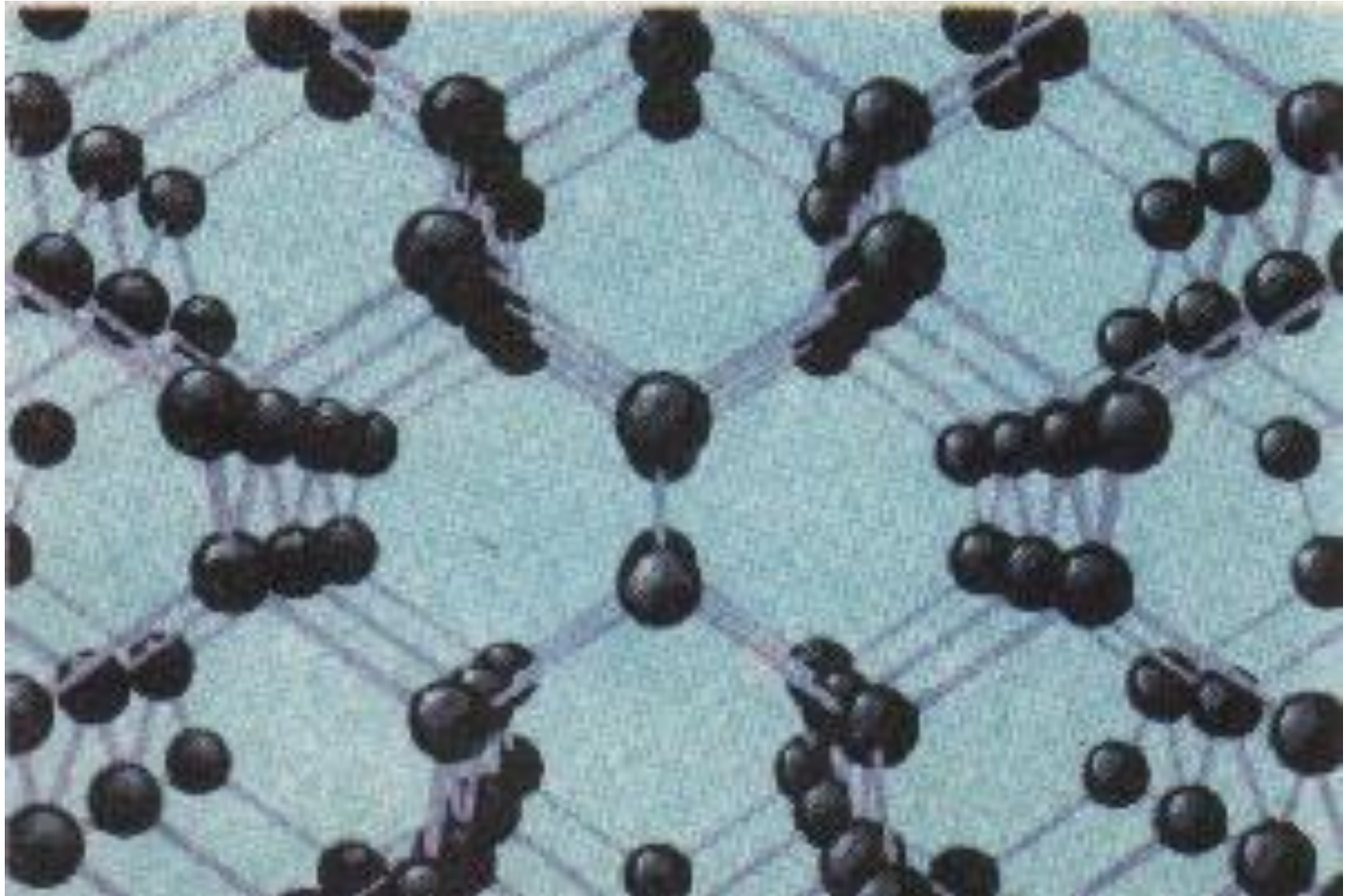
${}^{15}_8\text{O}$

${}^{18}_9\text{F}$

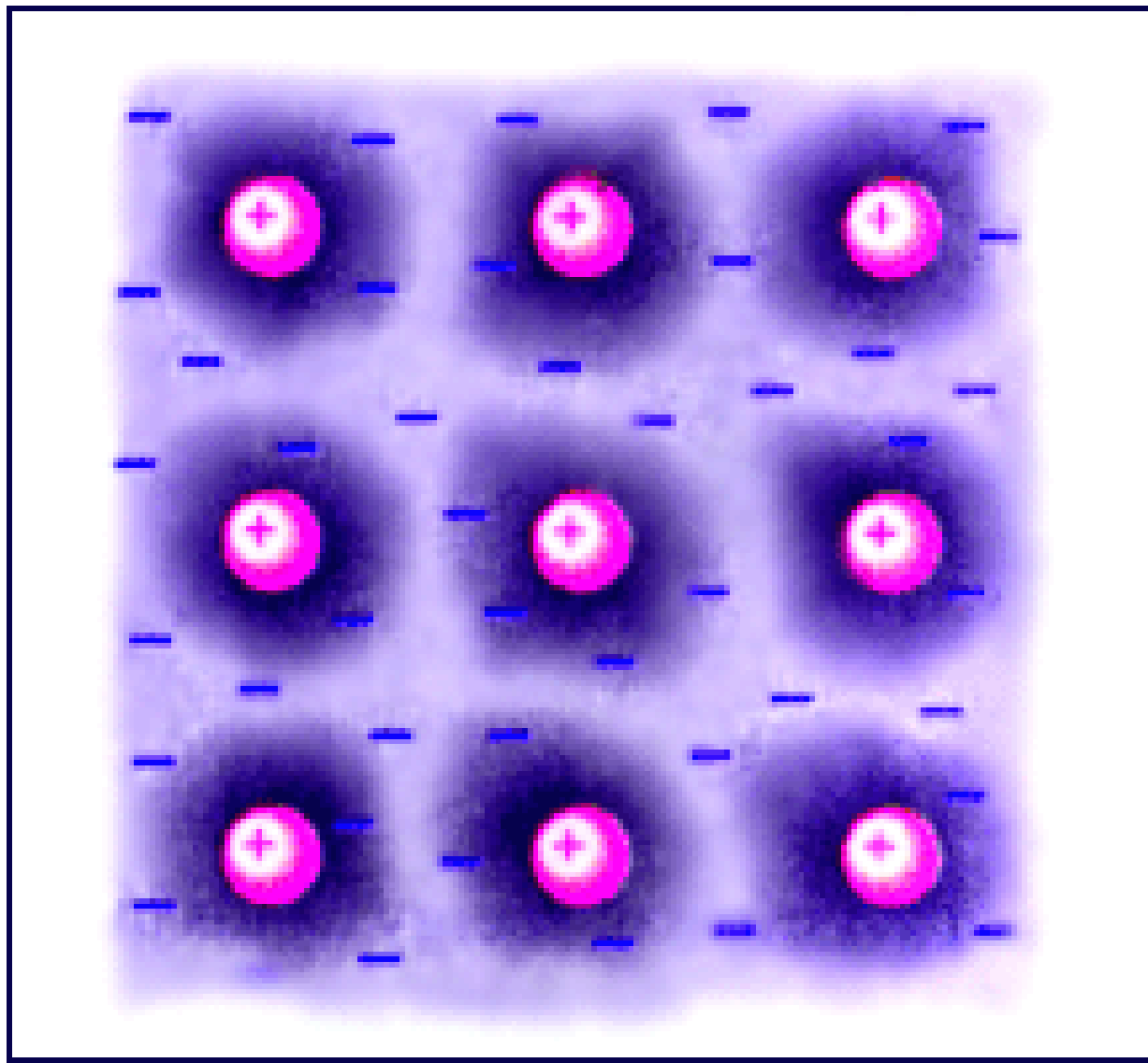
${}^{20}_{10}\text{Ne}$



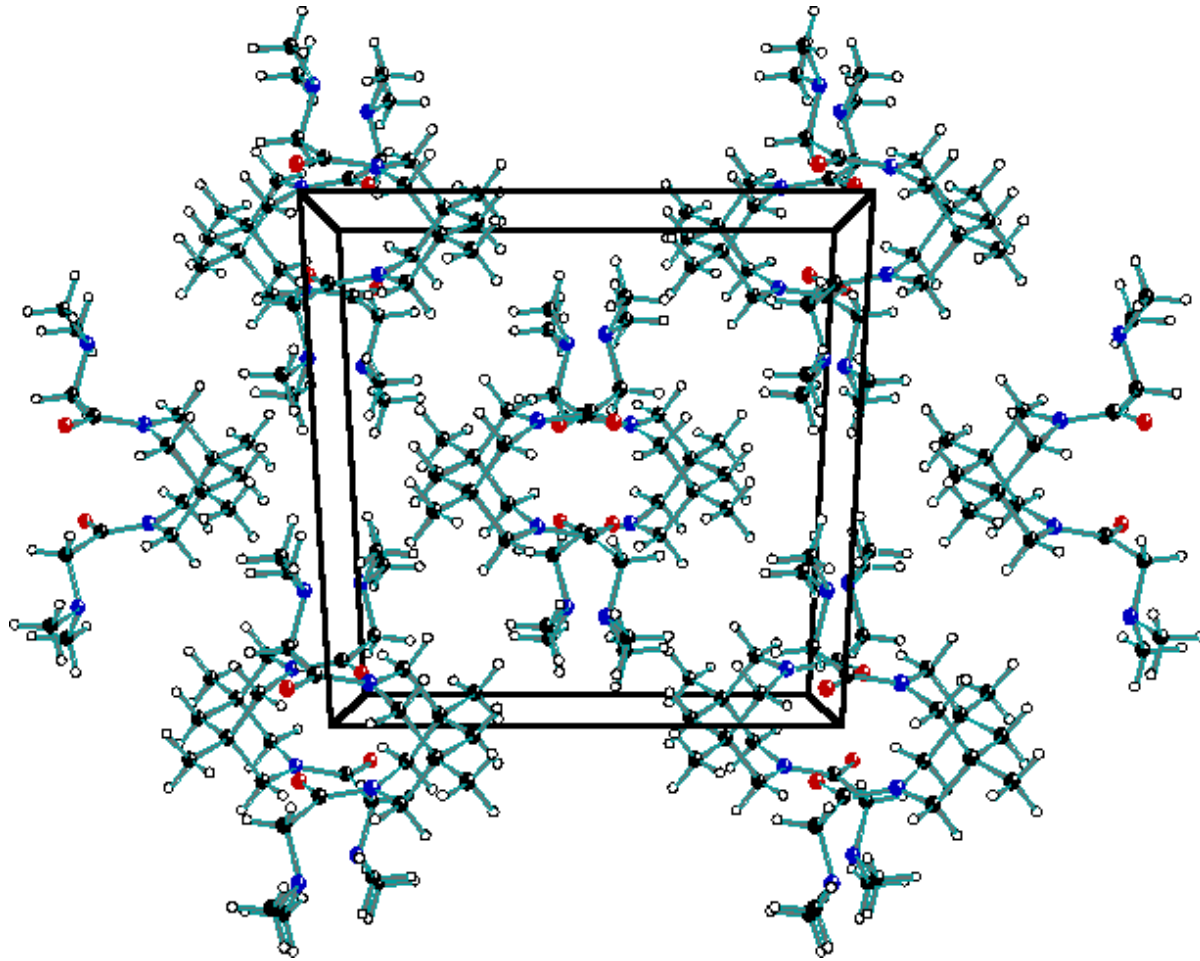
# Структура кристалла алмаза



# Структура металлического кристалла



# Молекулярные кристаллы



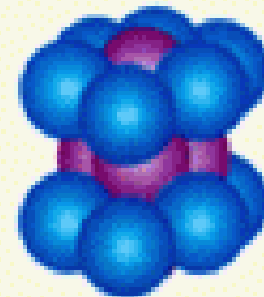
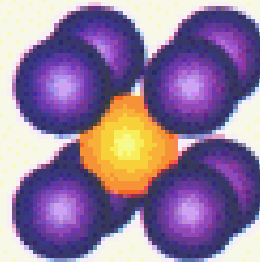
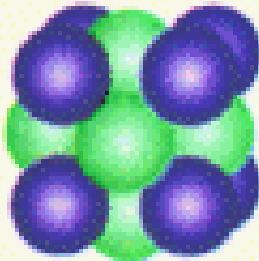
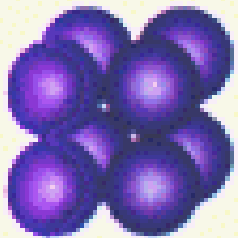
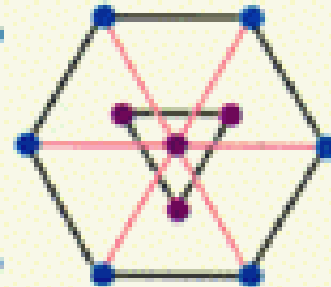
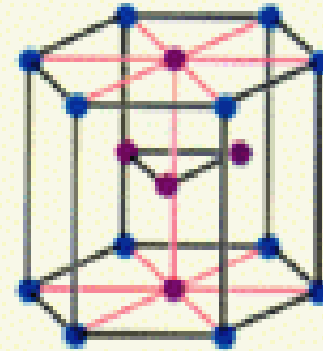
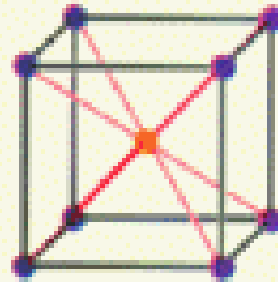
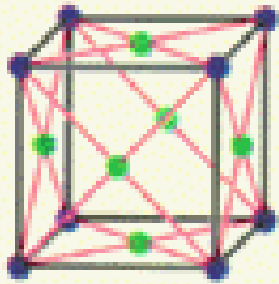
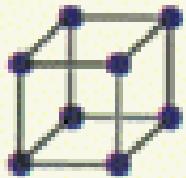
# Простые кристаллические решетки:

1 – простая кубическая решетка;

2 – гранецентрированная кубическая решетка;

3 – объемноцентрированная кубическая решетка;

4 – гексагональная решетка.



(1)

(2)

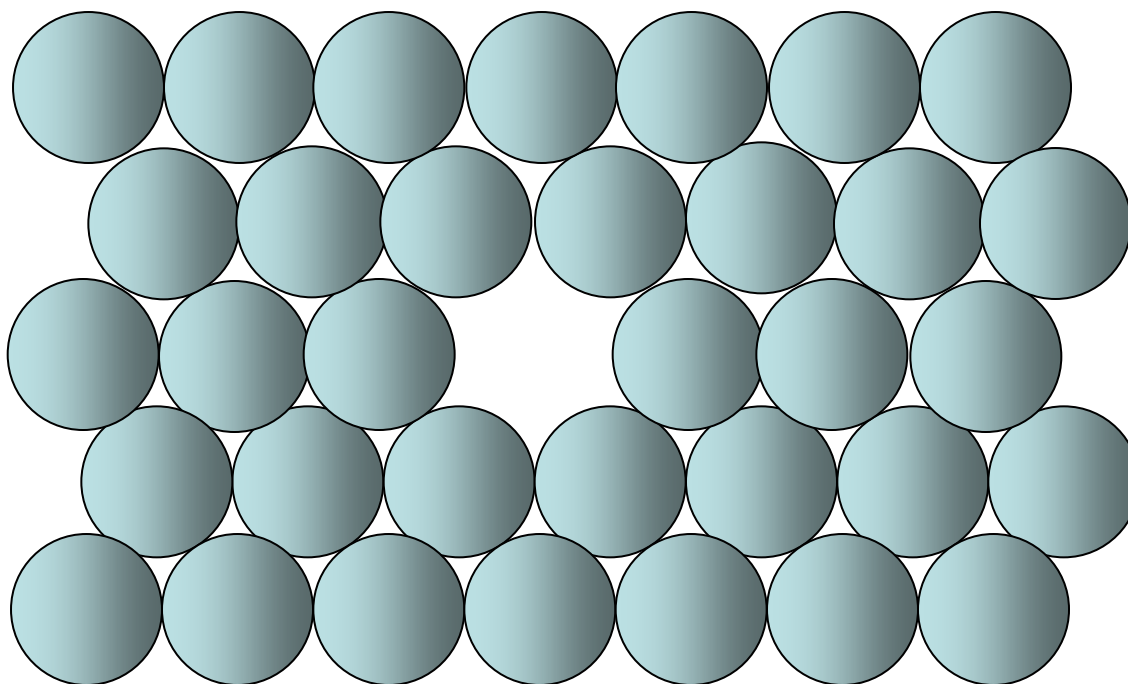
(3)

(4)

# Дефекты в кристаллах

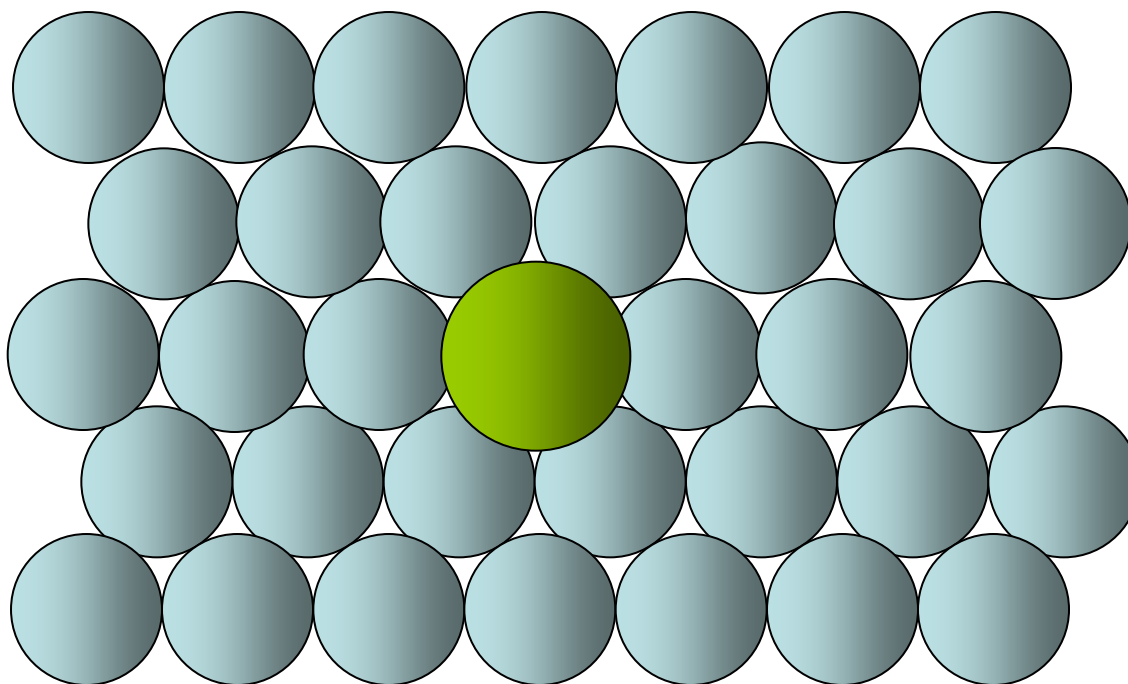
- а) точечные: вакансии, примеси замещения или внедрения;
- б) линейные: краевые и винтовые дислокации.

# Вакансия

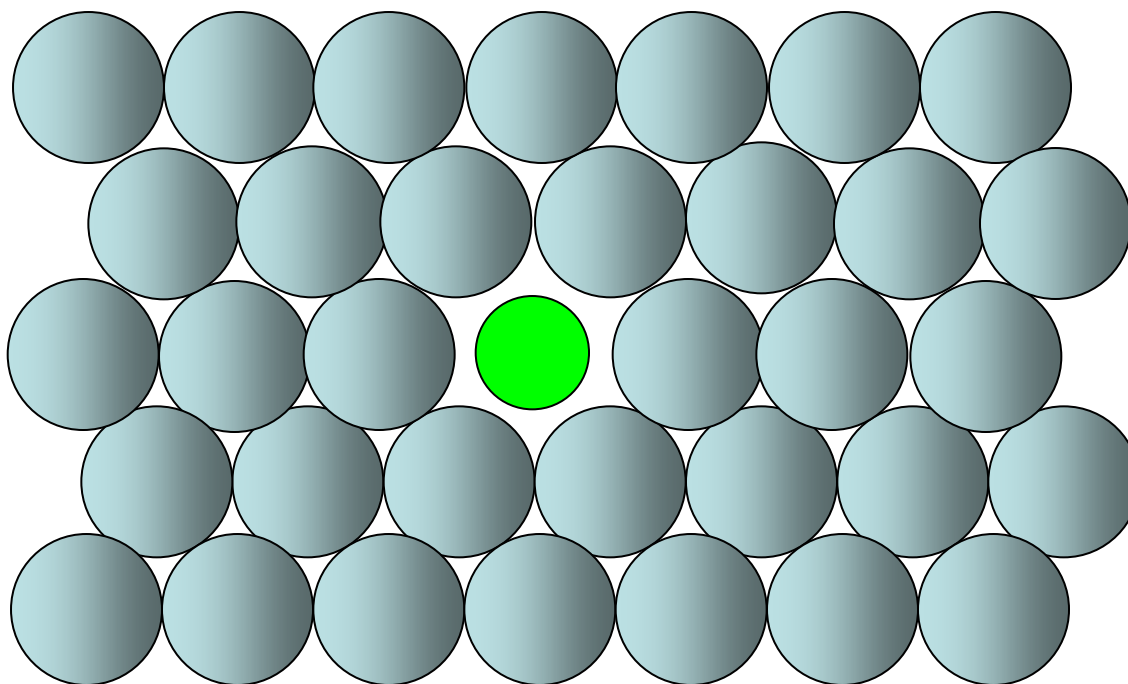


$$n_B = n_0 e^{-\frac{E_a}{kT}}$$

# Примесь замещения

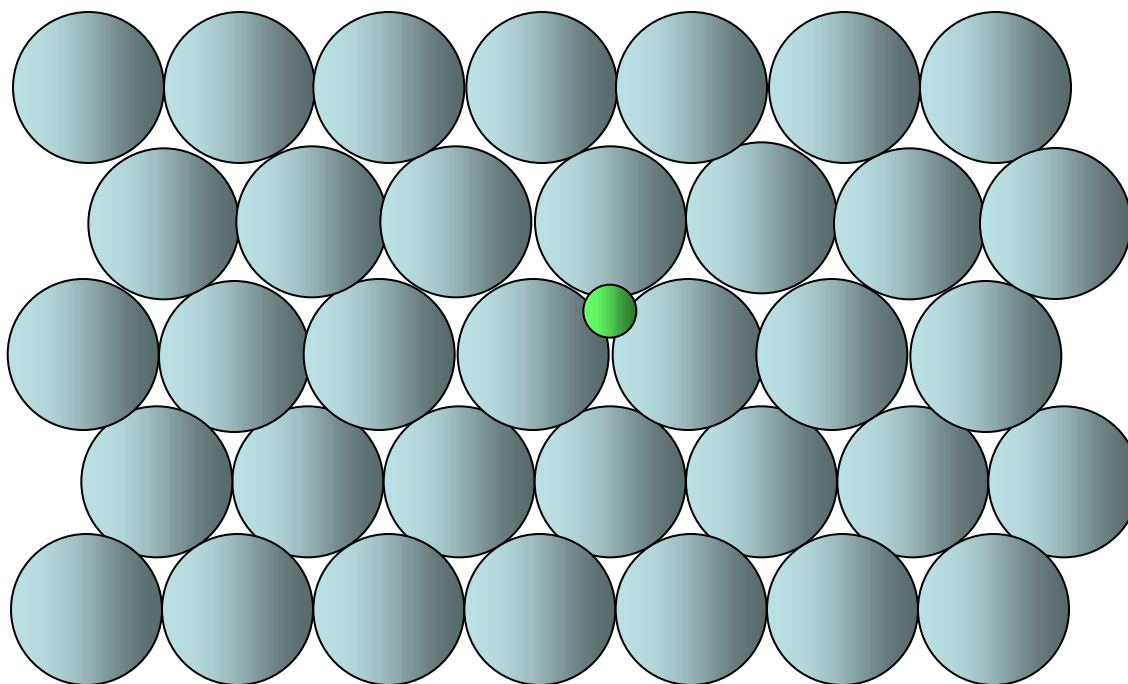


# Примесь замещения

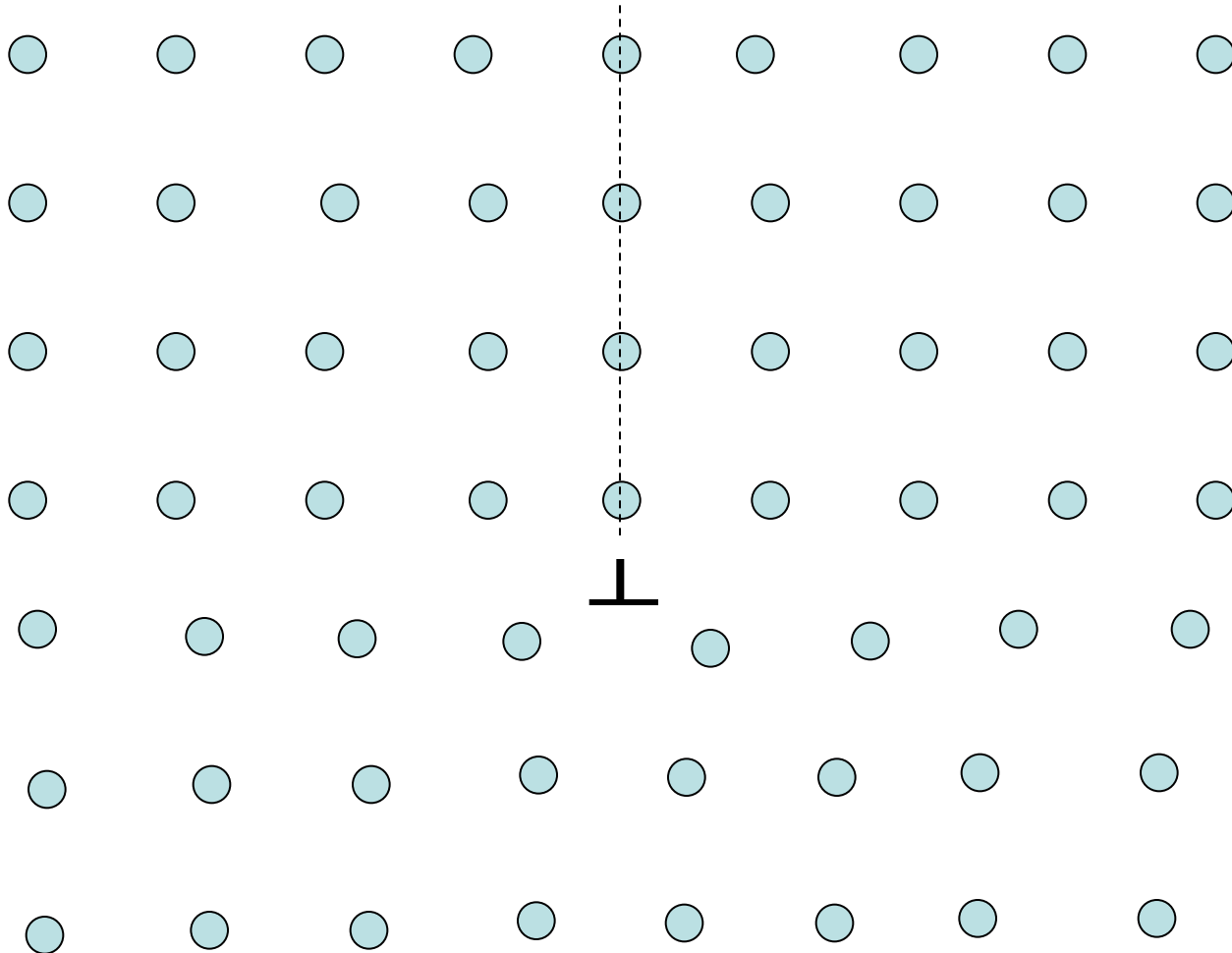




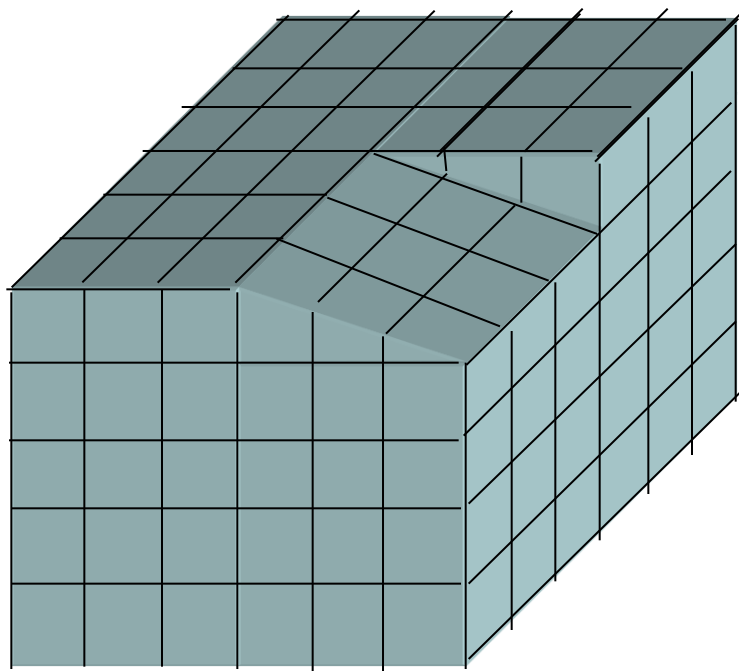
# Примесь внедрения



# Краевая дислокация



# Винтовая дислокация

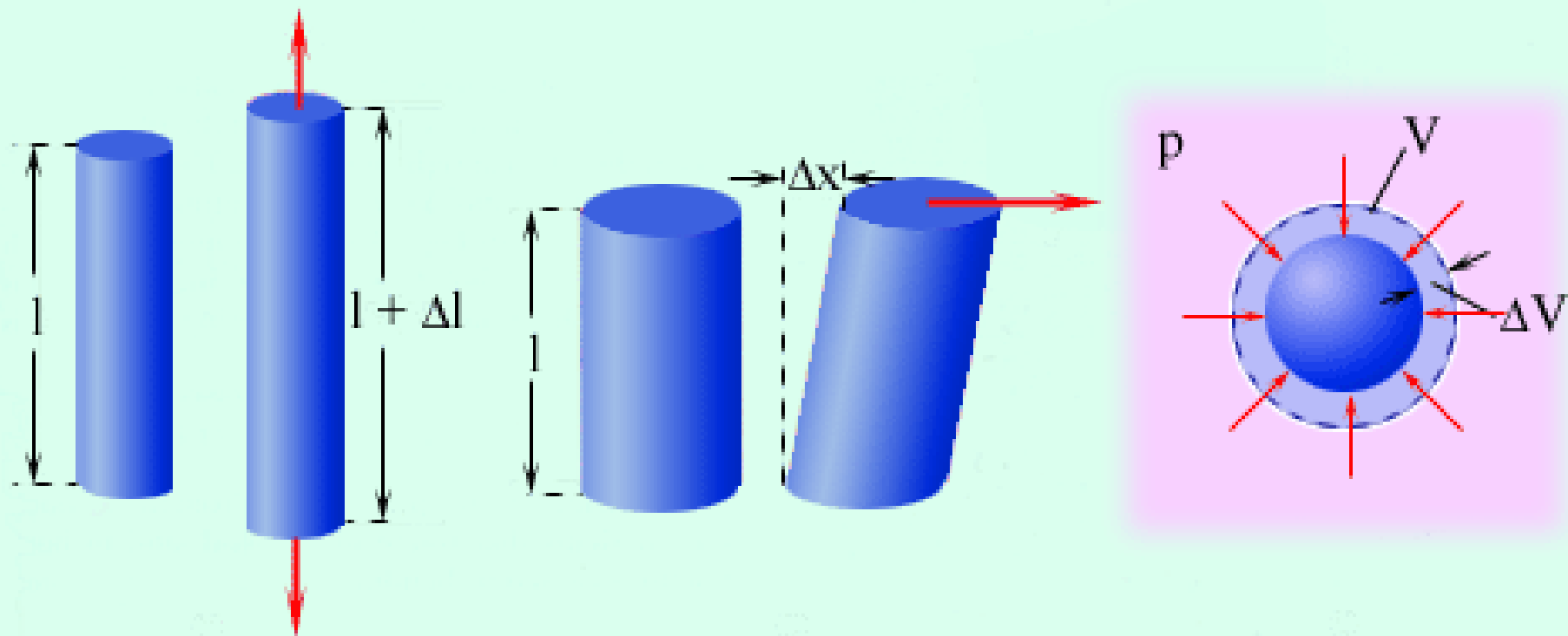


Некоторые виды деформаций твердых тел:

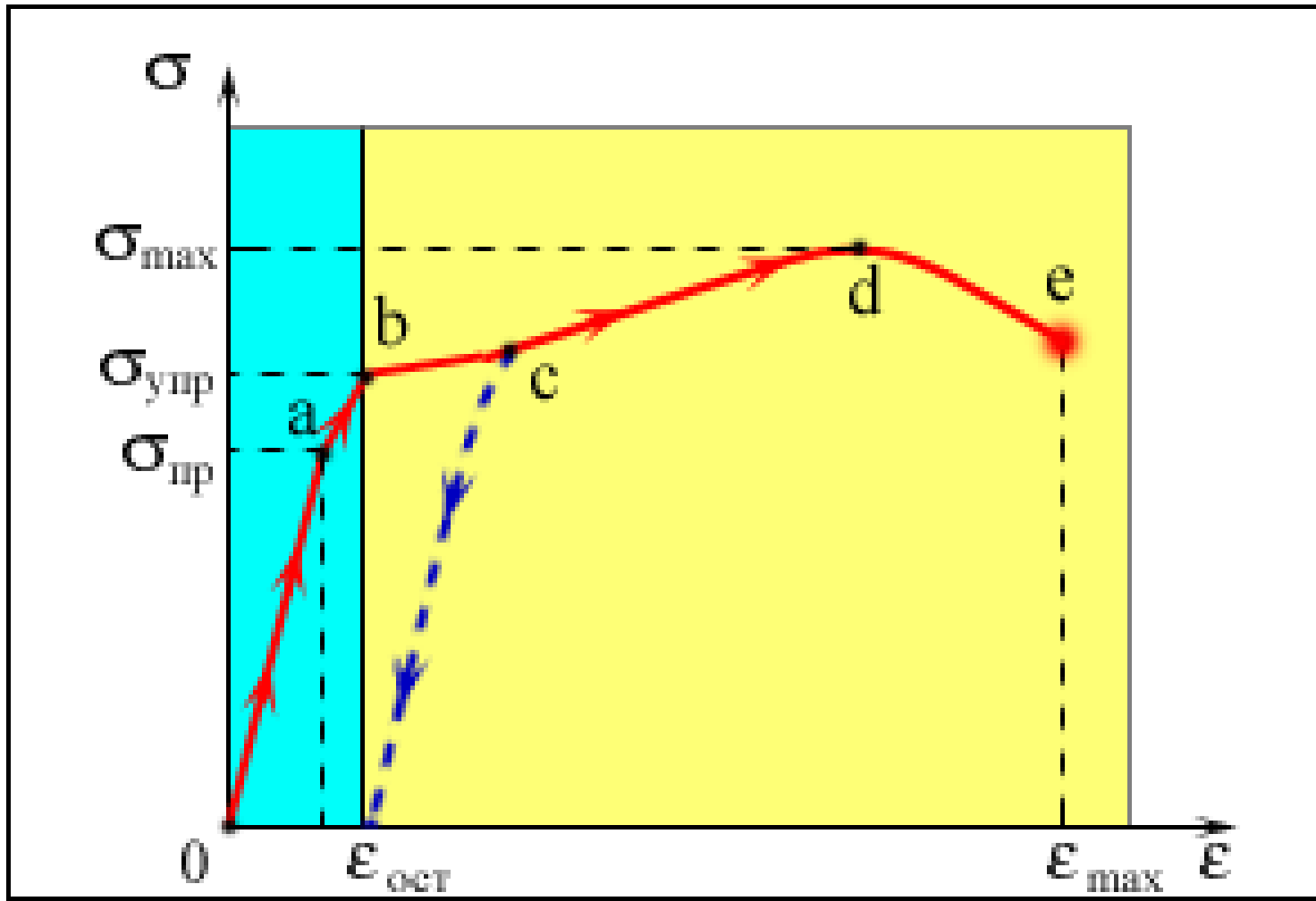
1 – деформация растяжения;

2 – деформация сдвига;

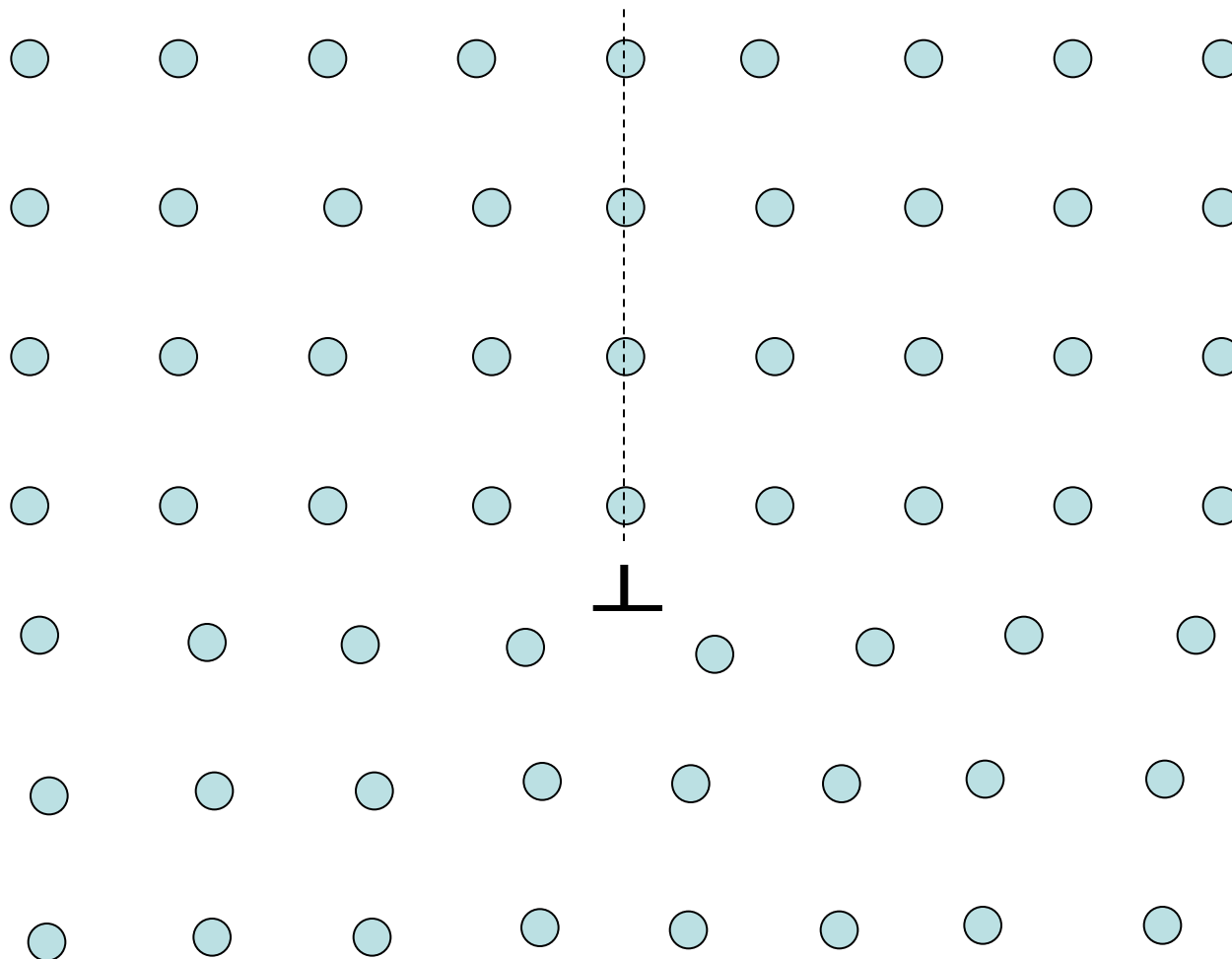
3 – деформация всестороннего сжатия



Типичная диаграмма растяжения для пластичного материала. Голубая полоса – область упругих деформаций



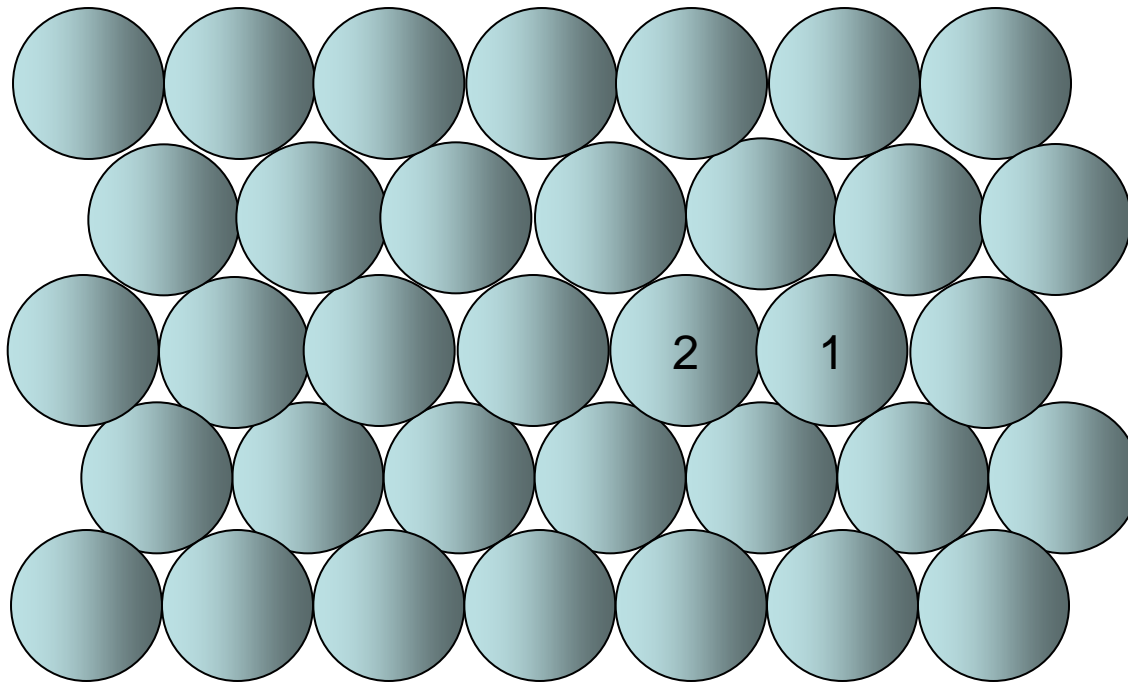
# Движение дислокации



# Тема 7. Реальные газы , твердые тела и жидкости

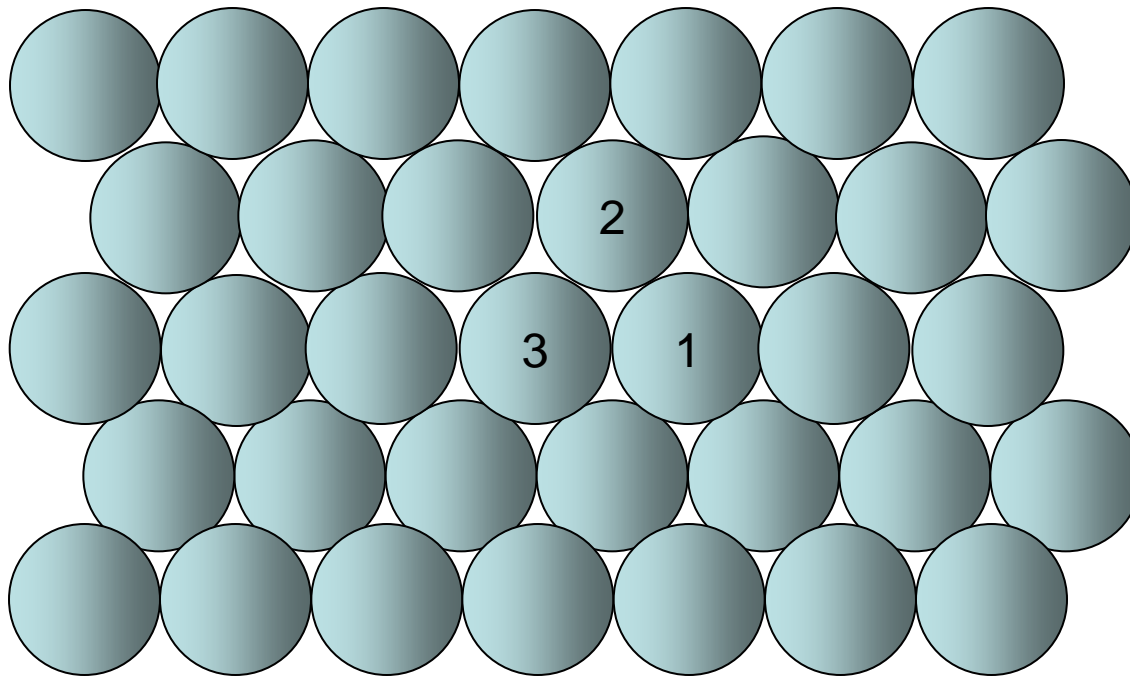
- 7.5. Диффузия в кристаллах

# Обменный механизм диффузии

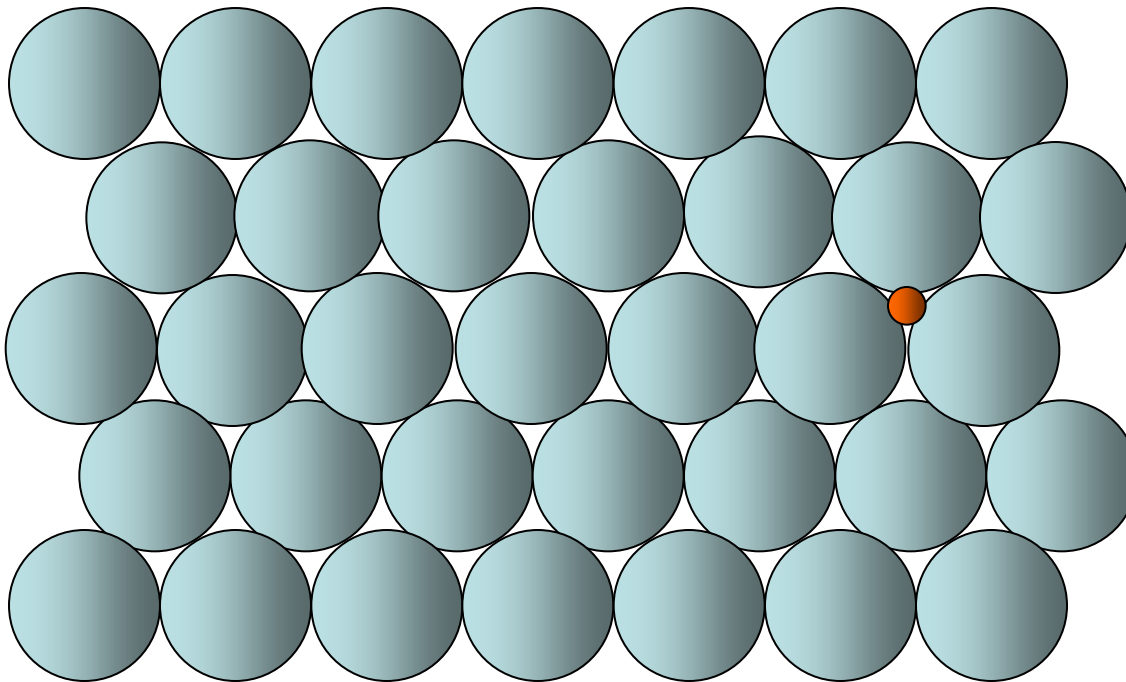




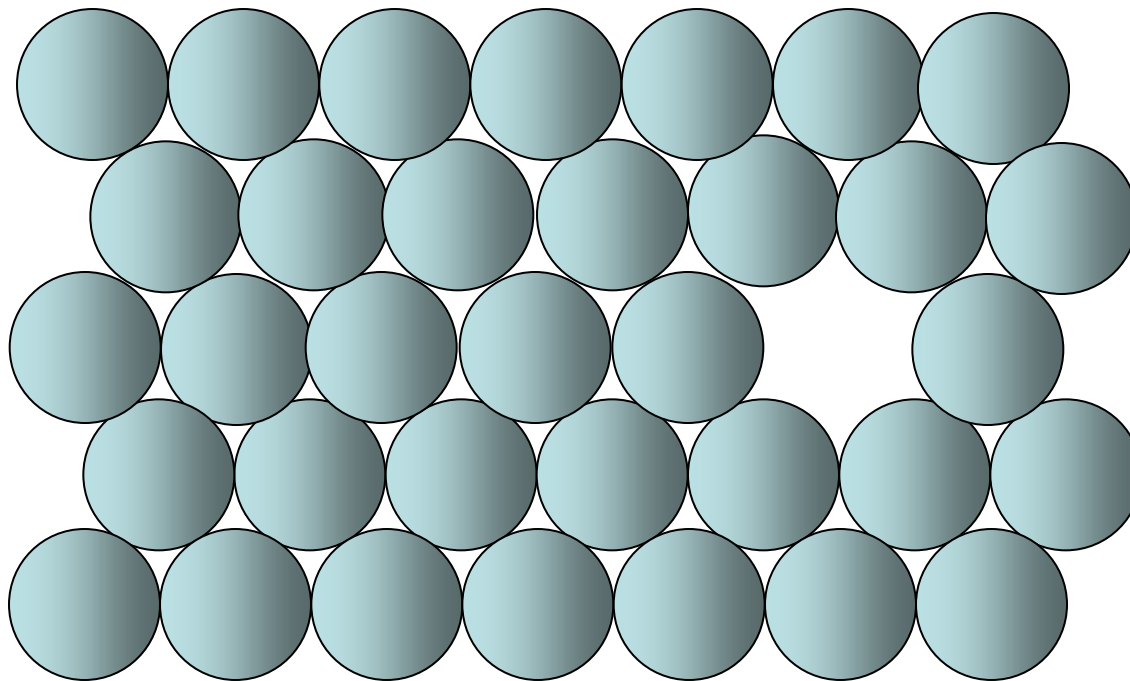
# Кольцевой механизм



# Диффузия атомов внедрения

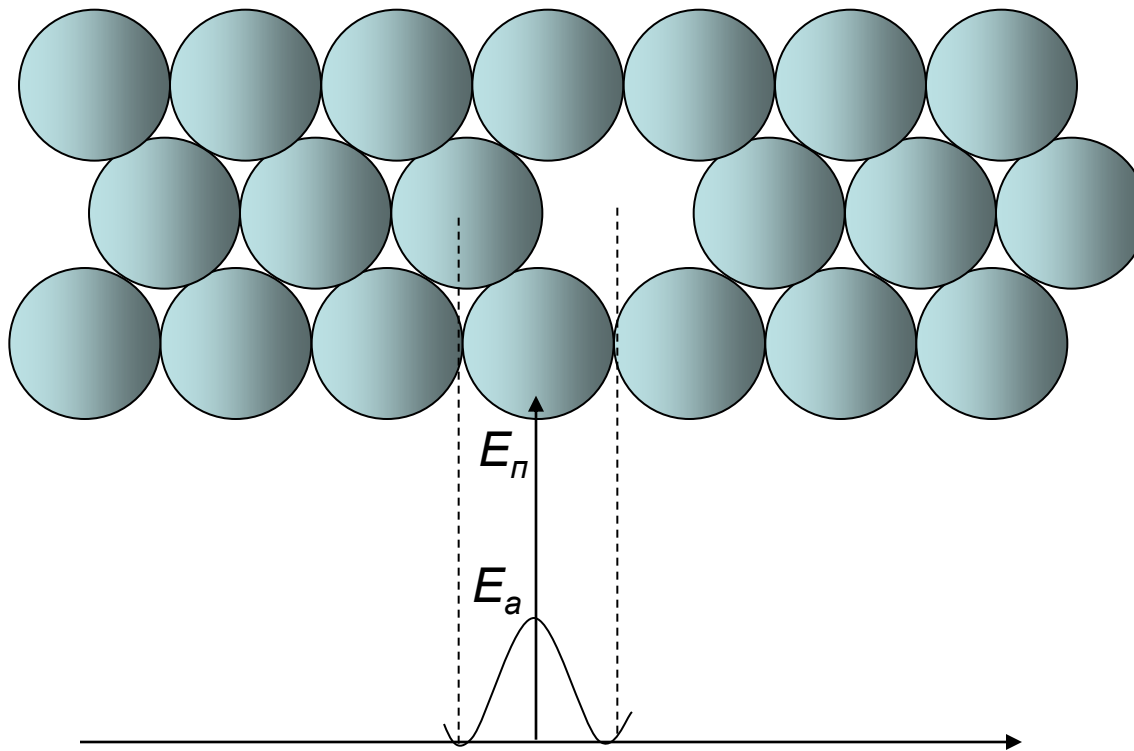


# Вакансионный механизм диффузии

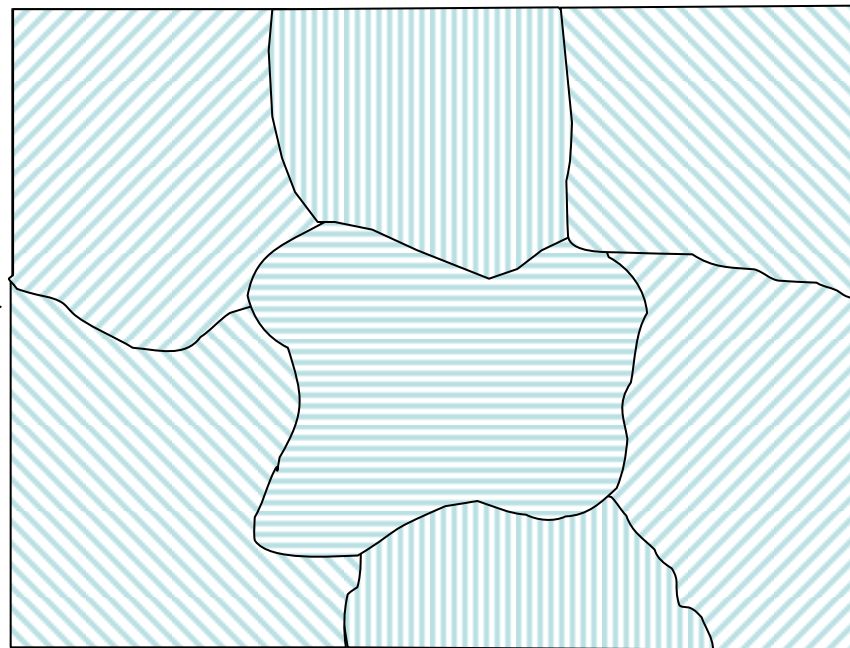
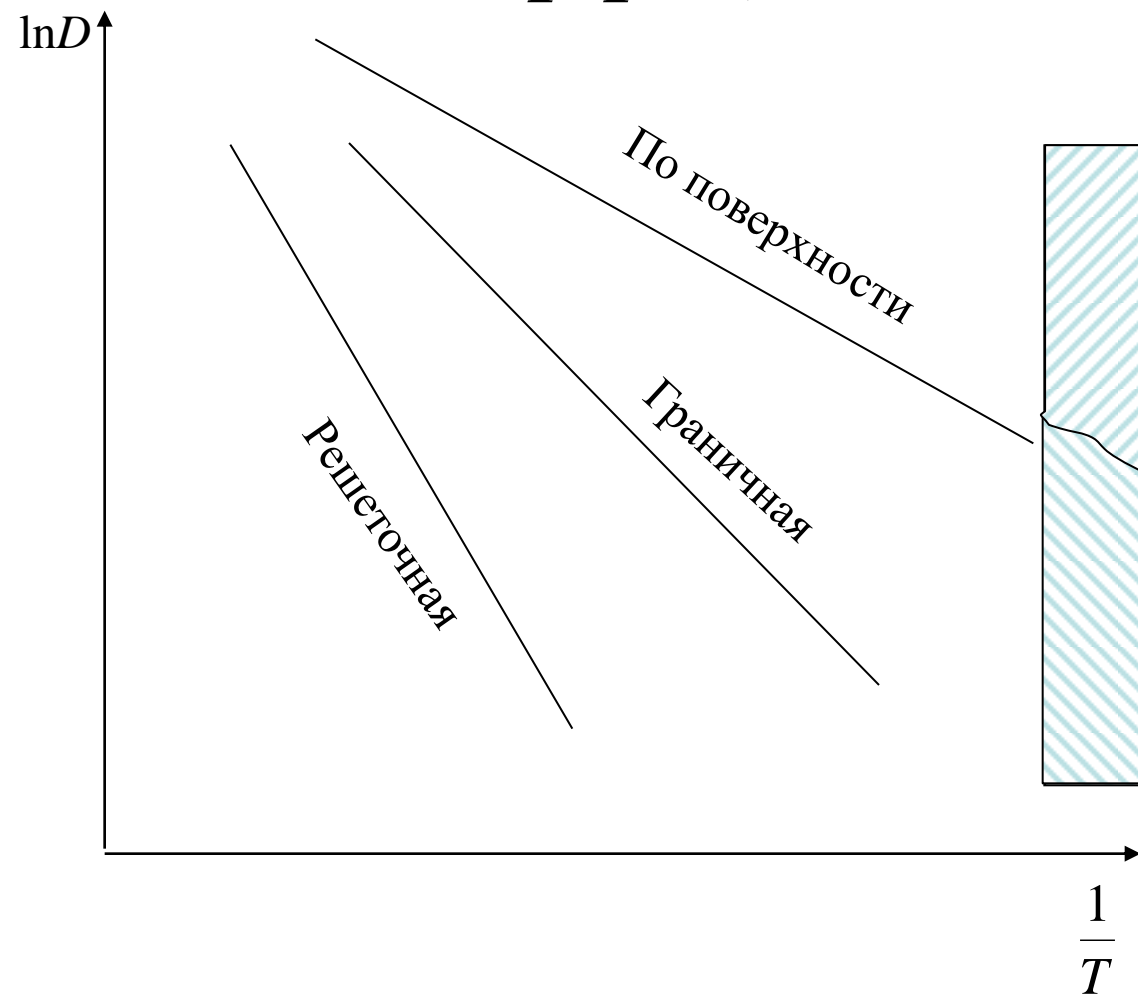


# Энергия активации

$$E_{\text{в}}:E_{\text{о}}:E_{\text{к}}:E_{\text{М}}=1:1,5:4:4$$



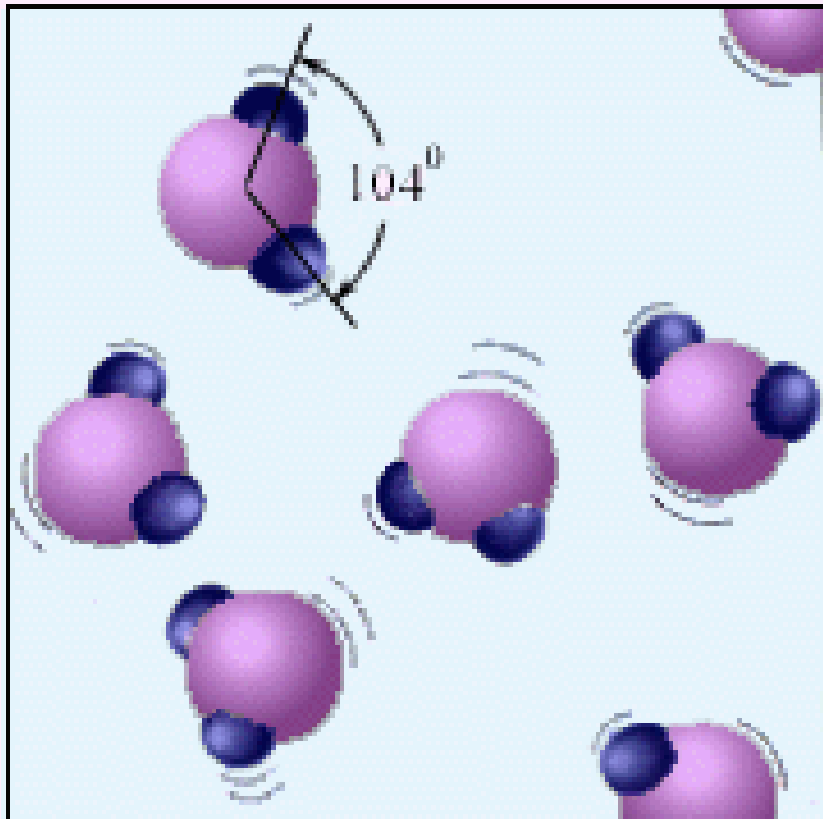
# Температурная зависимость коэффициента диффузии



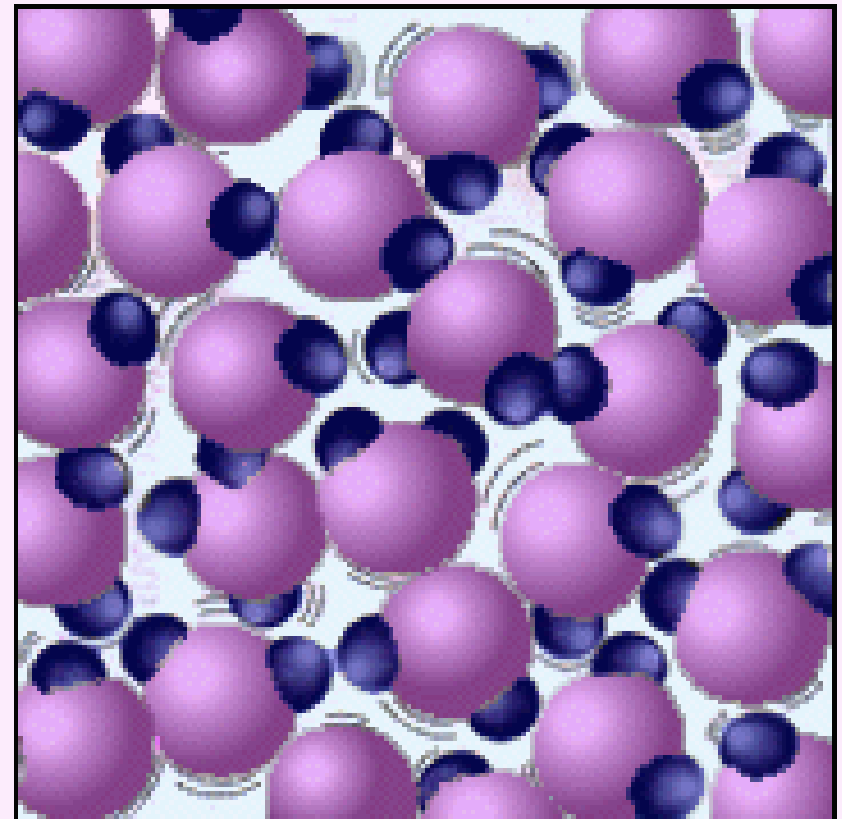
# Тема 7. Реальные газы , твердые тела и жидкости

- 7.6. Жидкости

Водяной пар (1) и вода (2).  
Молекулы воды увеличены  
примерно в  $5 \cdot 10^7$  раз.

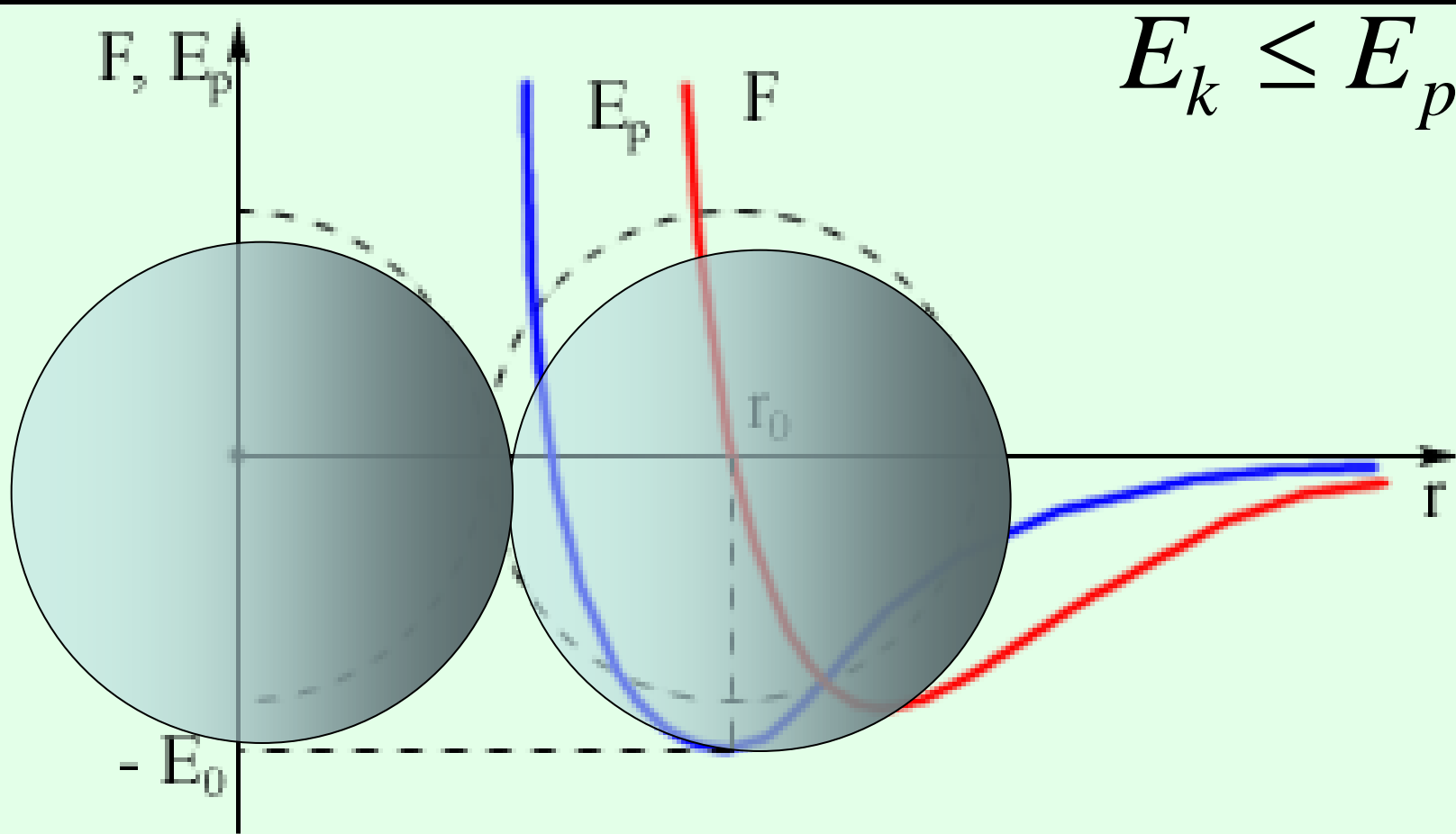


(1)



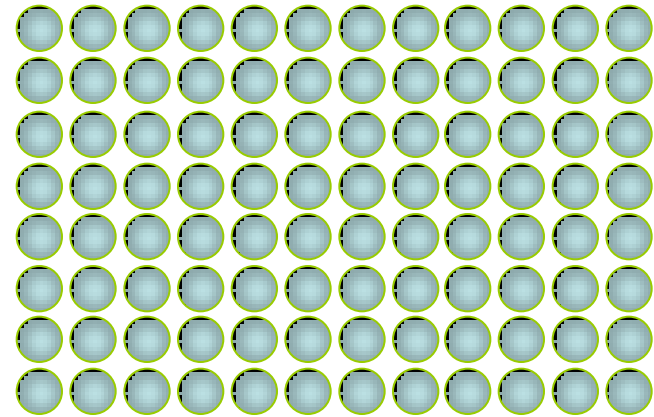
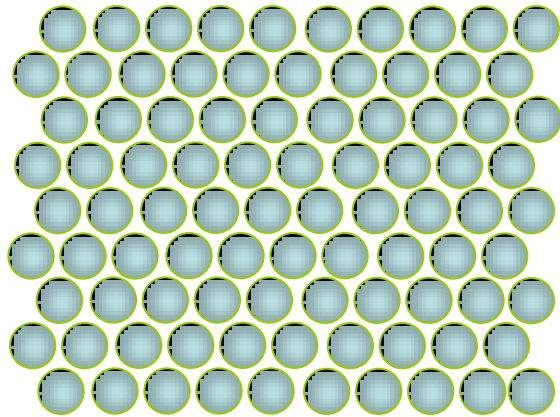
(2)

# Взаимодействие Ван-дер-Ваальса

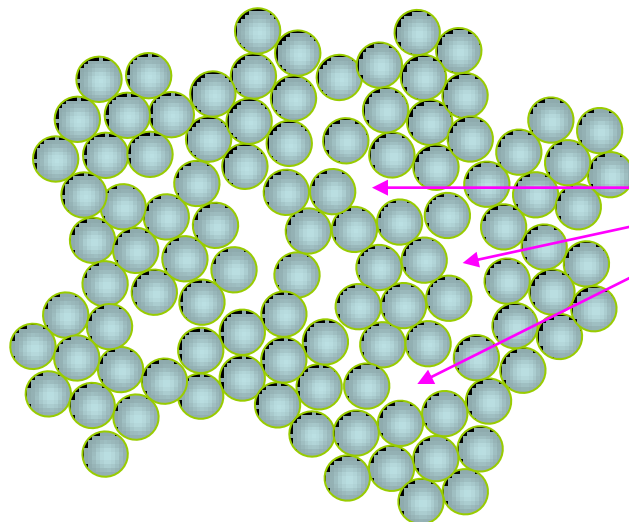




## В кристаллах – дальний порядок

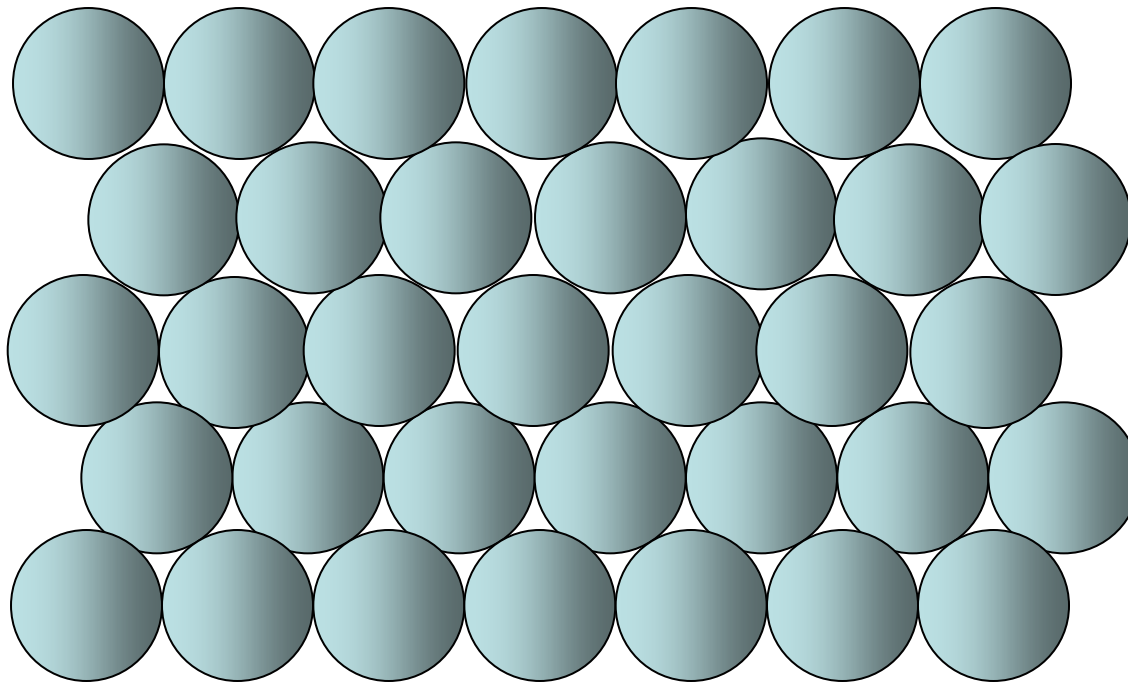


## В жидкостях – ближний порядок



микрощели – «дырки»  
( $\sim 10\% V$ )

# Дырочная модель жидкости

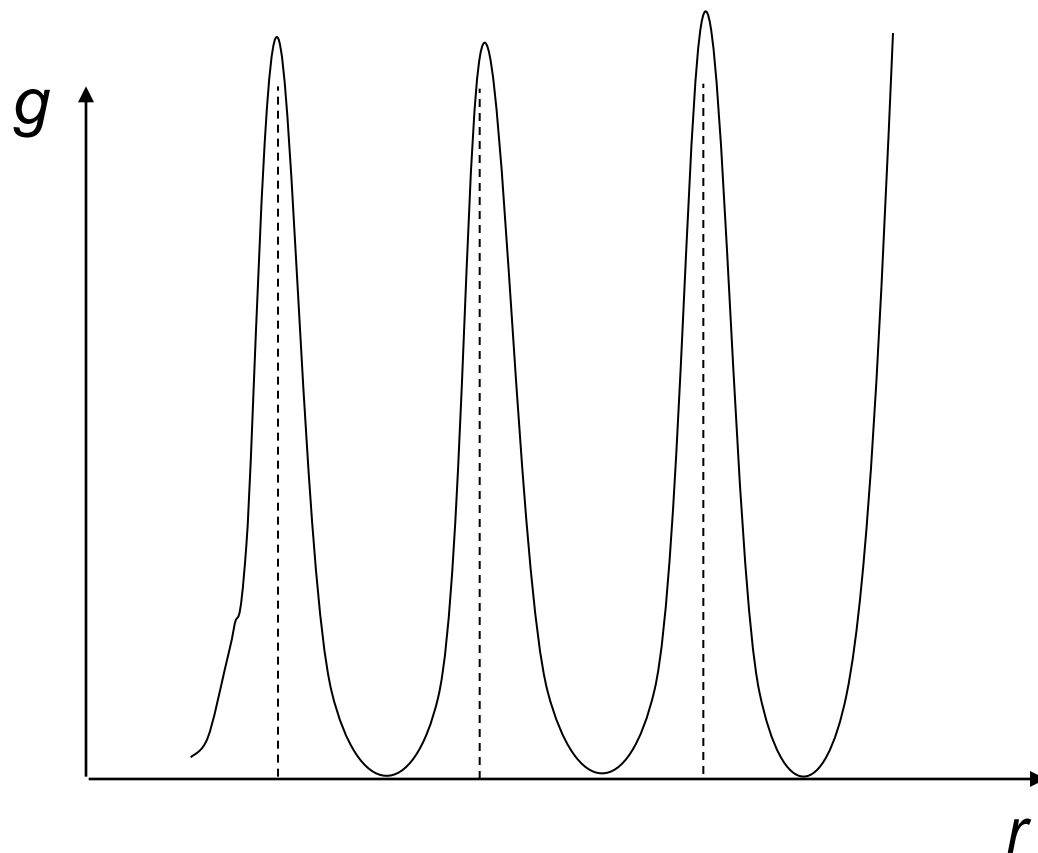


$$T_1$$
$$T_3 > T_2 > T_1$$

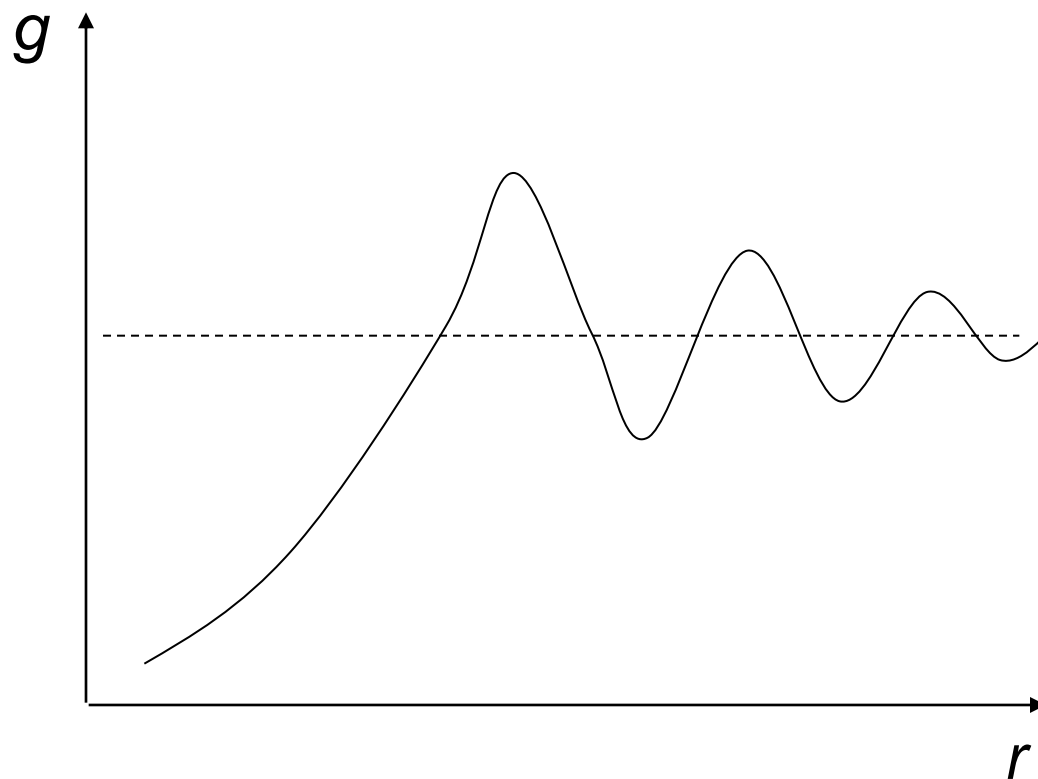
$$T_2 > T_1$$

$$n_B = n_0 e^{-\frac{E_a}{kT}}$$

# Парная функция распределения плотности для кристалла



# Парная функция распределения плотности для жидкости



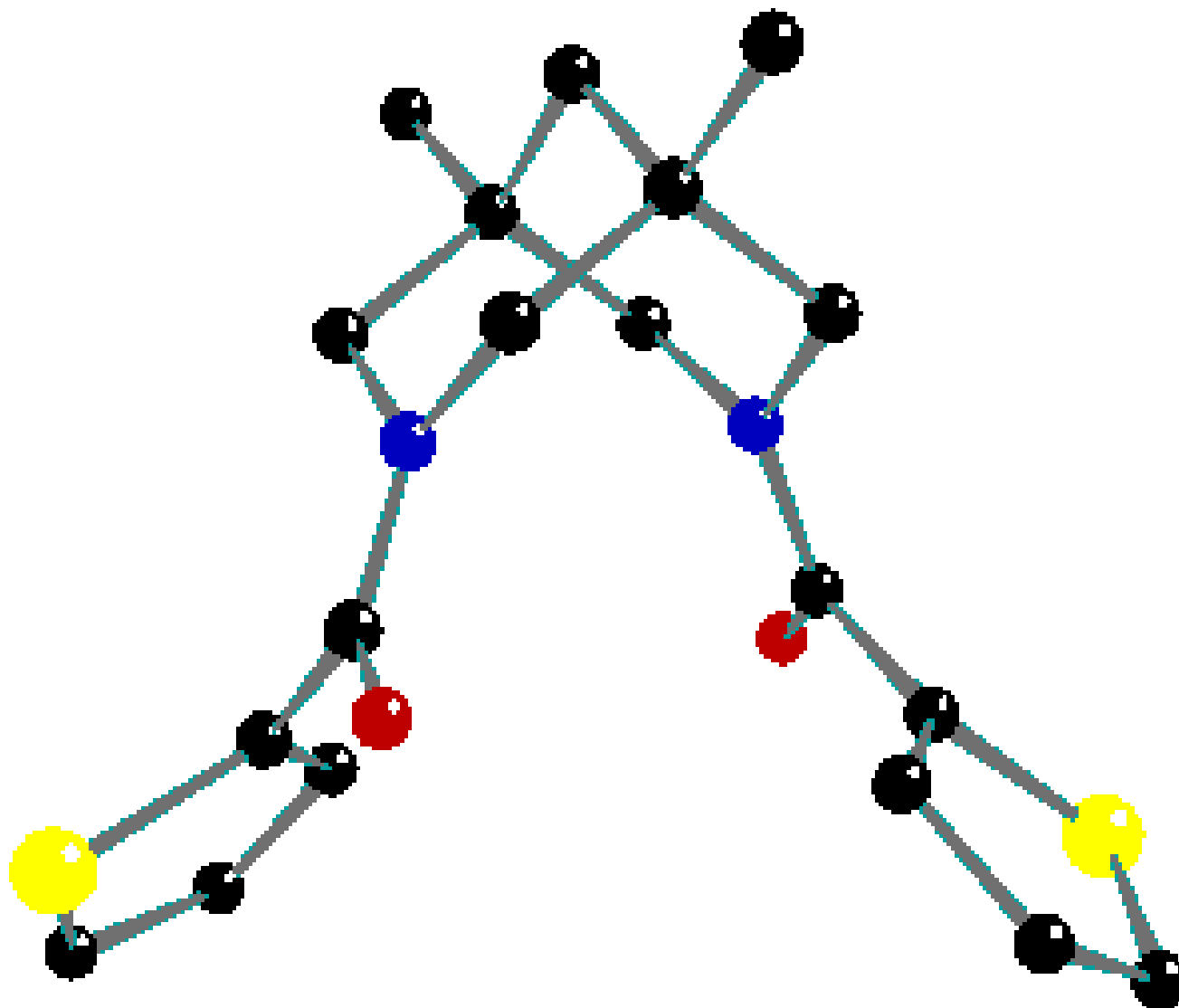
# Температурная зависимость динамической вязкости

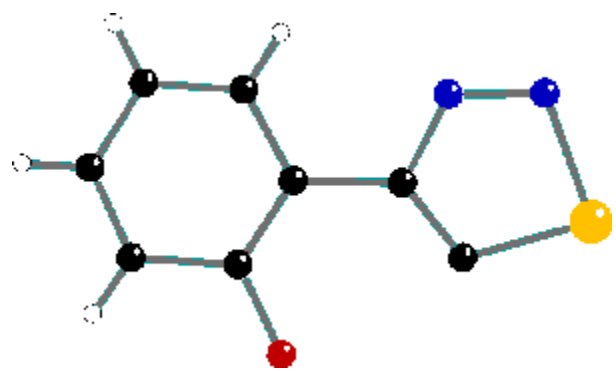
$$\eta = A e^{\frac{W}{kT}}$$

# Тема 7. Реальные газы , твердые тела и жидкости

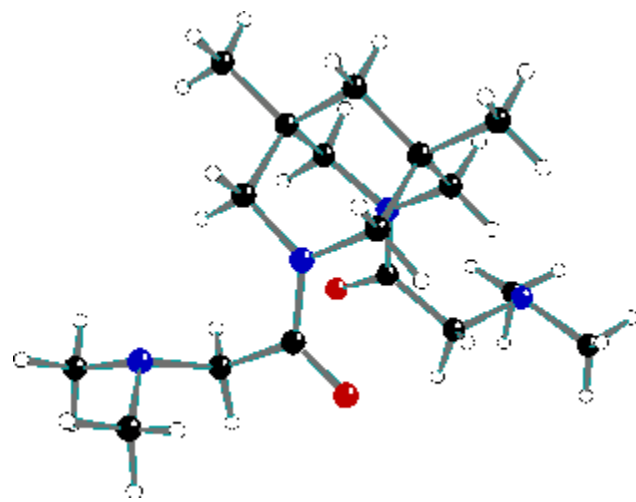
- 7.7. Жидкие кристаллы

# Модели молекулярных структур

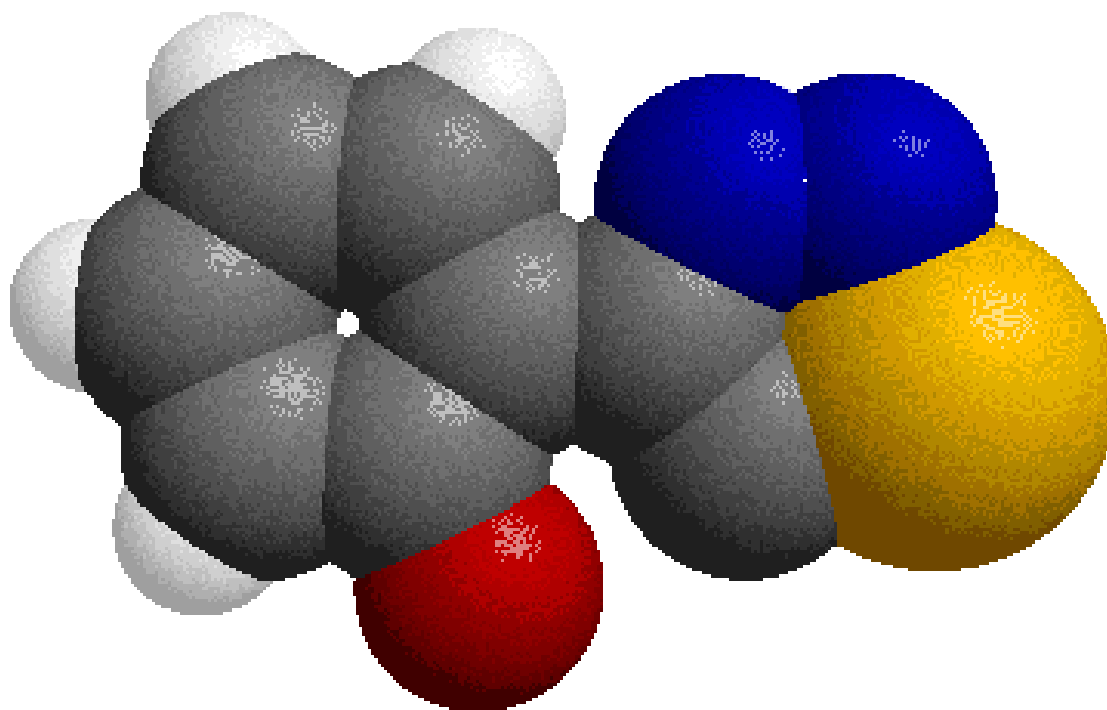




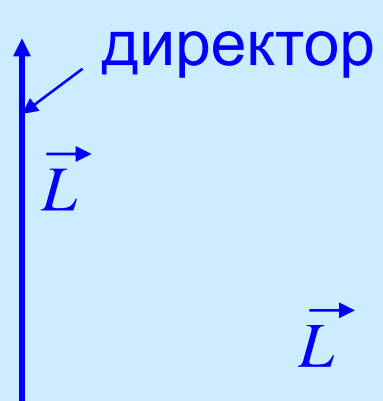
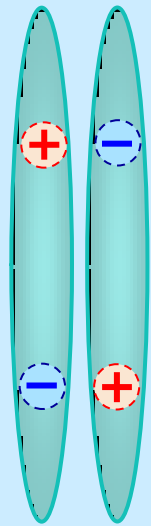




# Модели молекулярных структур



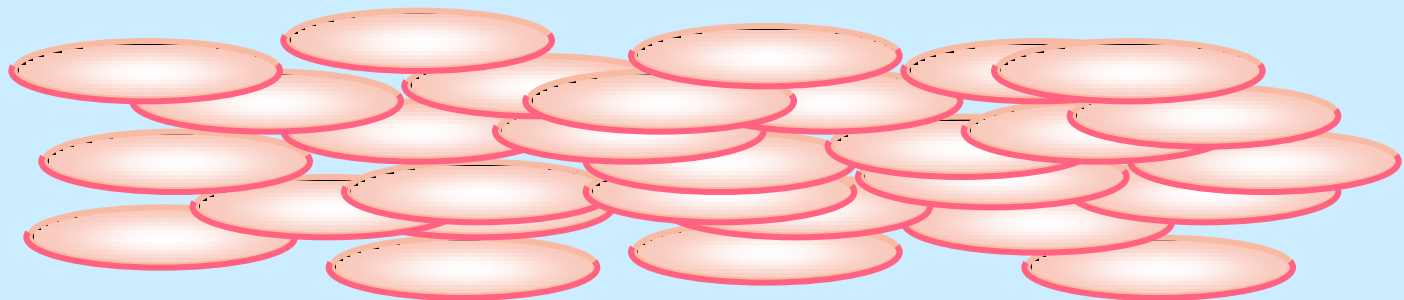
## Стержнеобразные молекулы



$$|\vec{L}| = 1$$

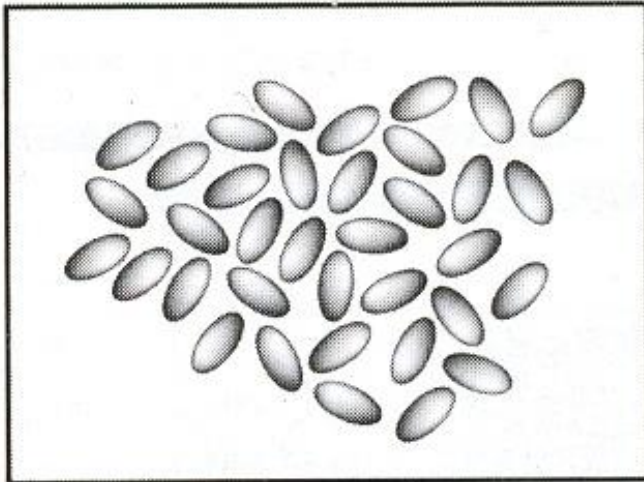
$\vec{L}$  и  $-\vec{L}$  – эквивалентны

## Дискообразные молекулы

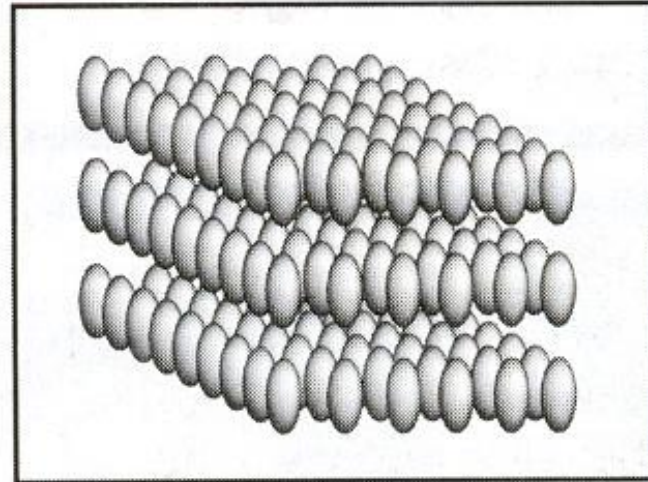


# Разновидности жидких кристаллов

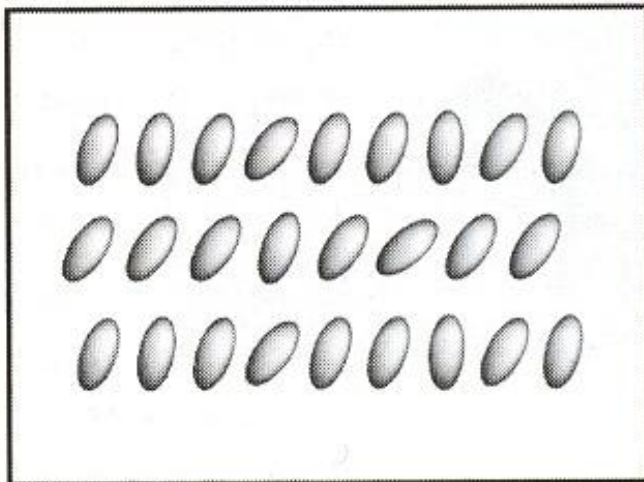
Изотропный



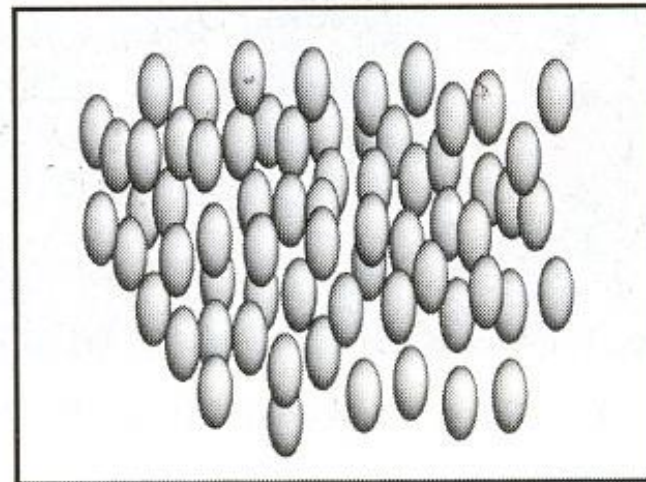
Смектик

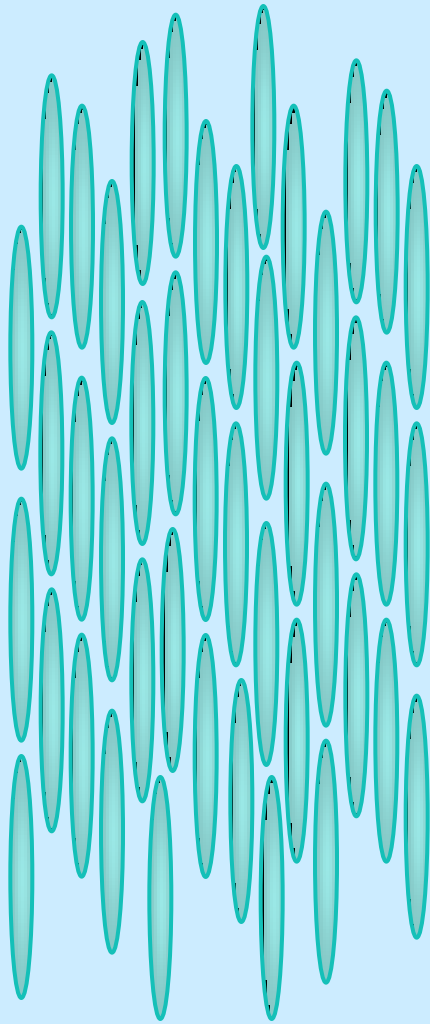


Смектик С



Нематик





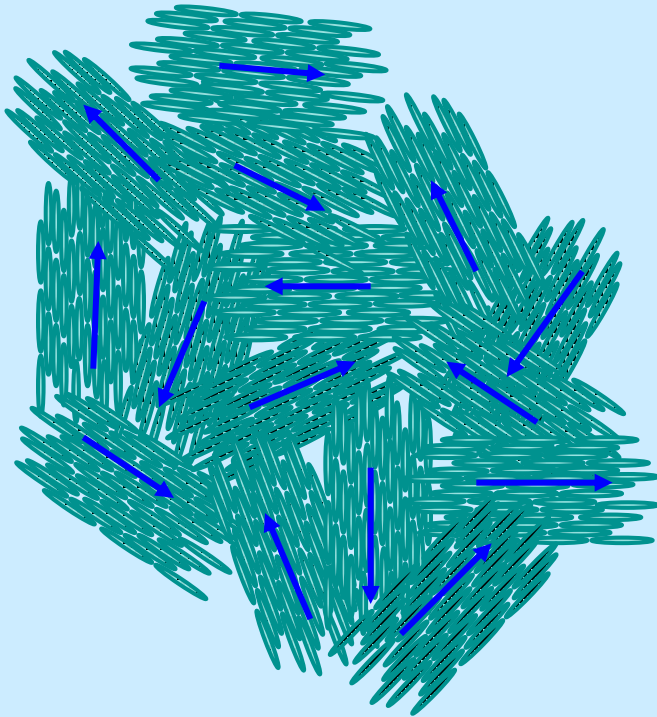
# Нематики

(греч. νημα – нить)

$$\rho(\vec{r}) = \text{const}$$

$$\vec{L}(\vec{r}) = \text{const}$$

# Доменная структура нематиков

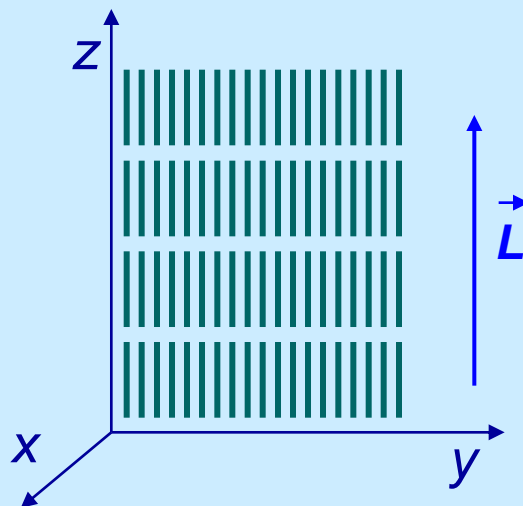
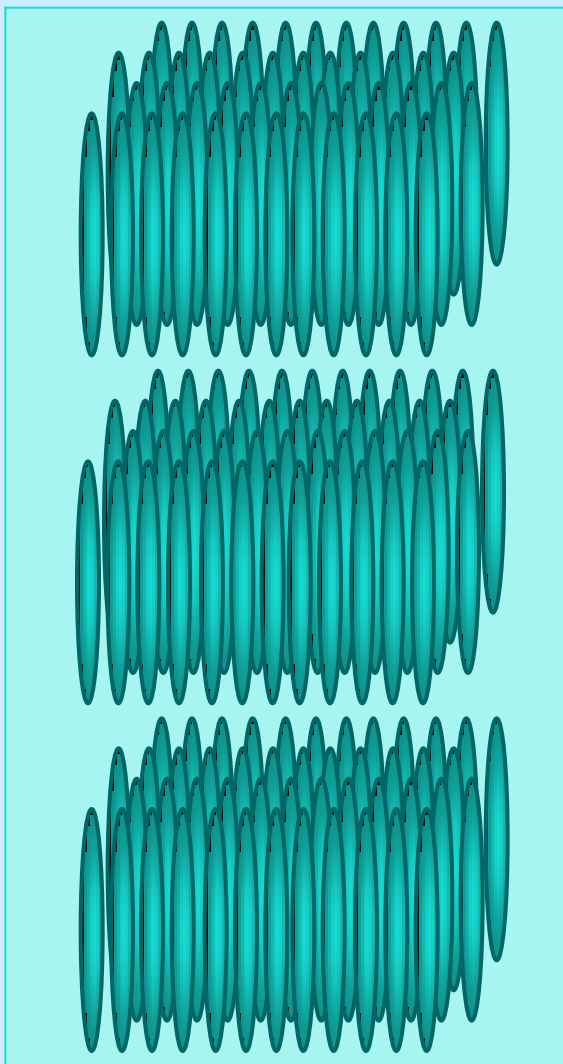


домены:  $\sim 0,01 - 0,1$  мм

хаотическое распределение  
доменов:

$$|\vec{L}| = 0$$

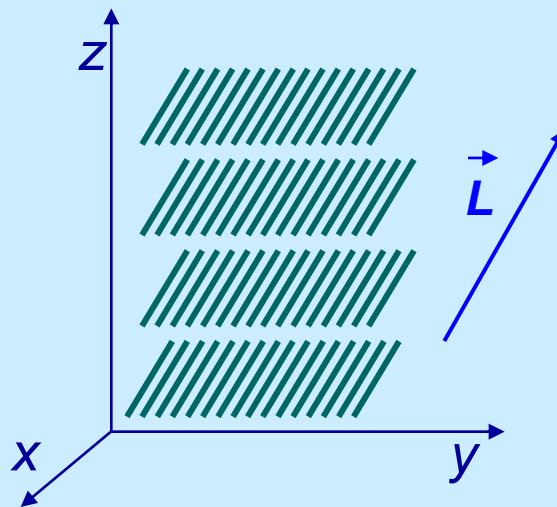
# Смектики (греч. σμῆμα – мыло)



$$\vec{L}(\vec{r}) = const$$

$$\rho(x, y) = const$$

$$\rho(z) = \rho(z + b)$$



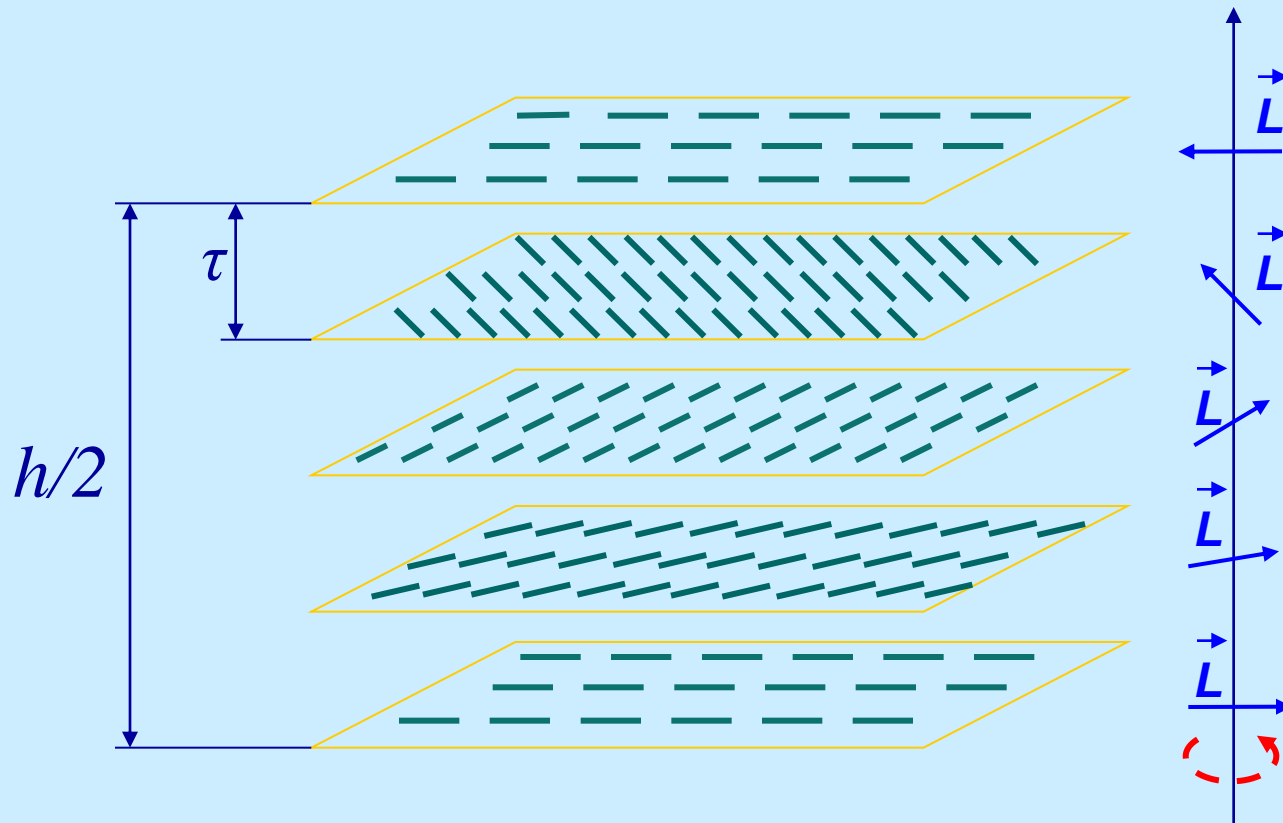
текучесть



упругость



# Холестерики



Шаг спирали:  $h = 2\pi\tau / \varphi$

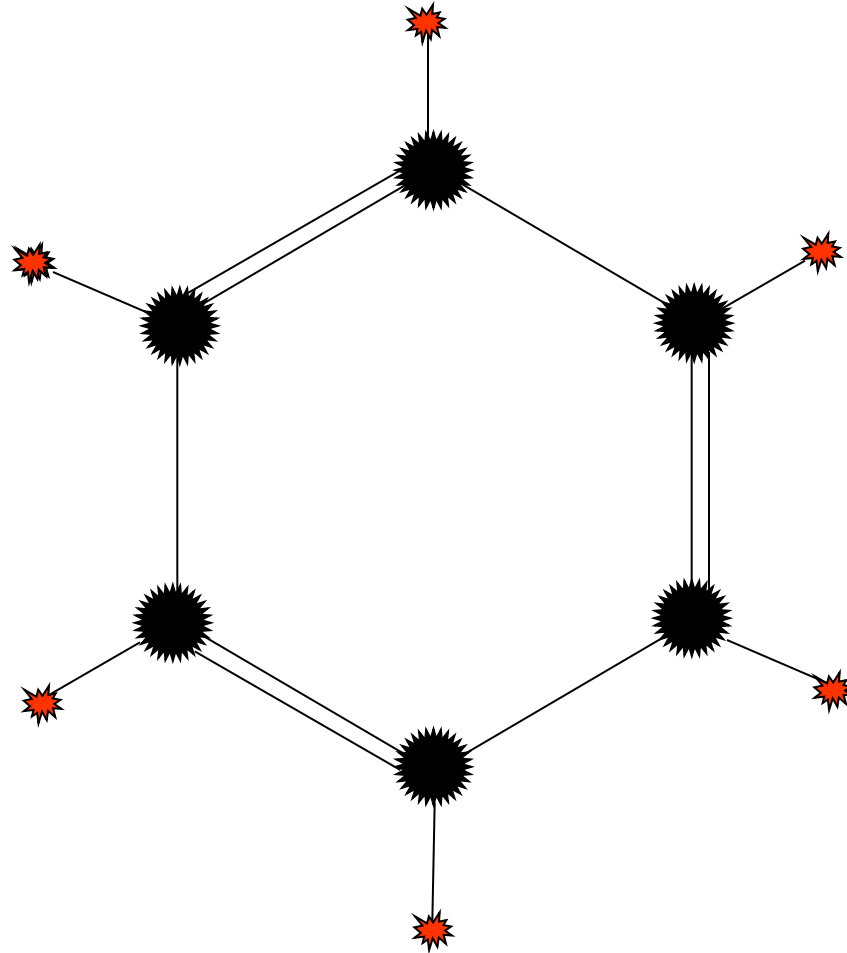
$\tau$  – толщина слоя  
(~ поперечный размер молекул)

$\varphi$  – дискретный угол поворота директора  
(молекул соседних слоев)

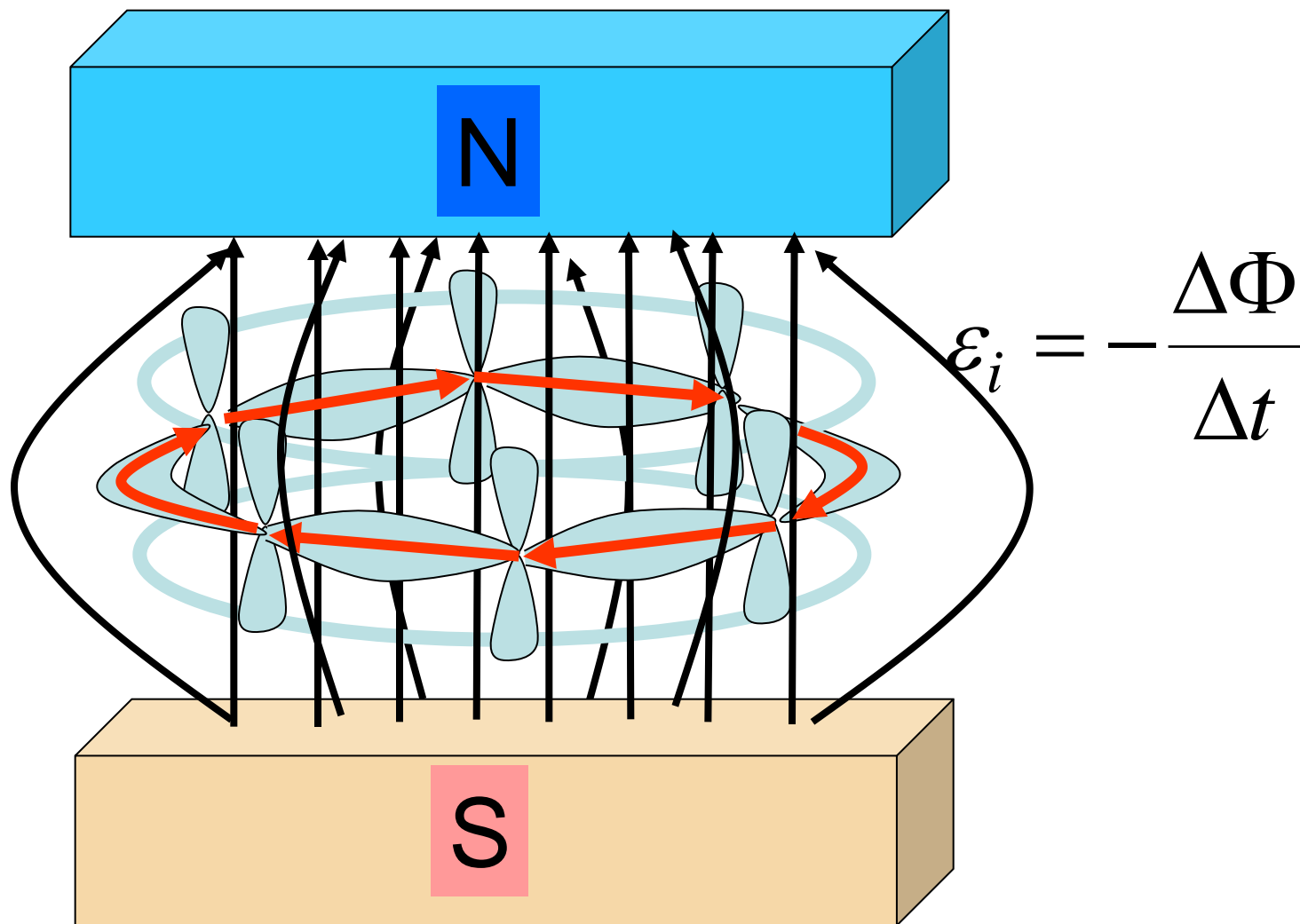


# Бензол $C_6H_6$

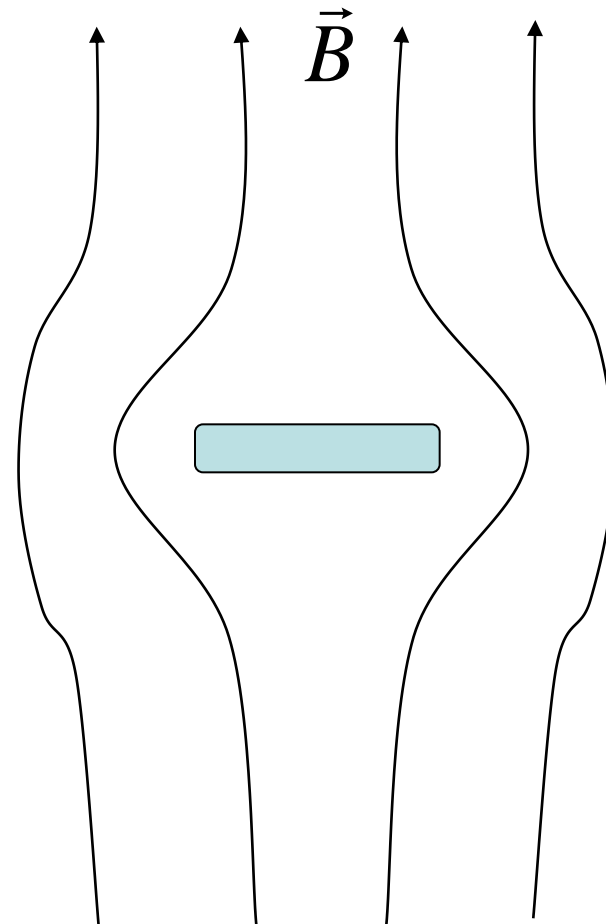
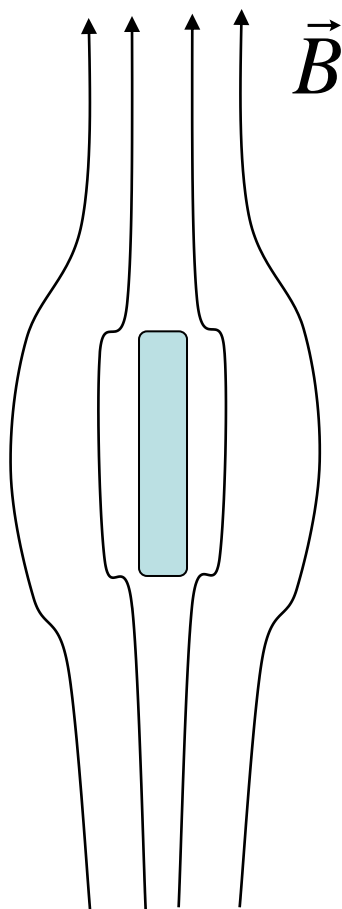
30 «внешних» электронов



# Связи в молекуле бензола



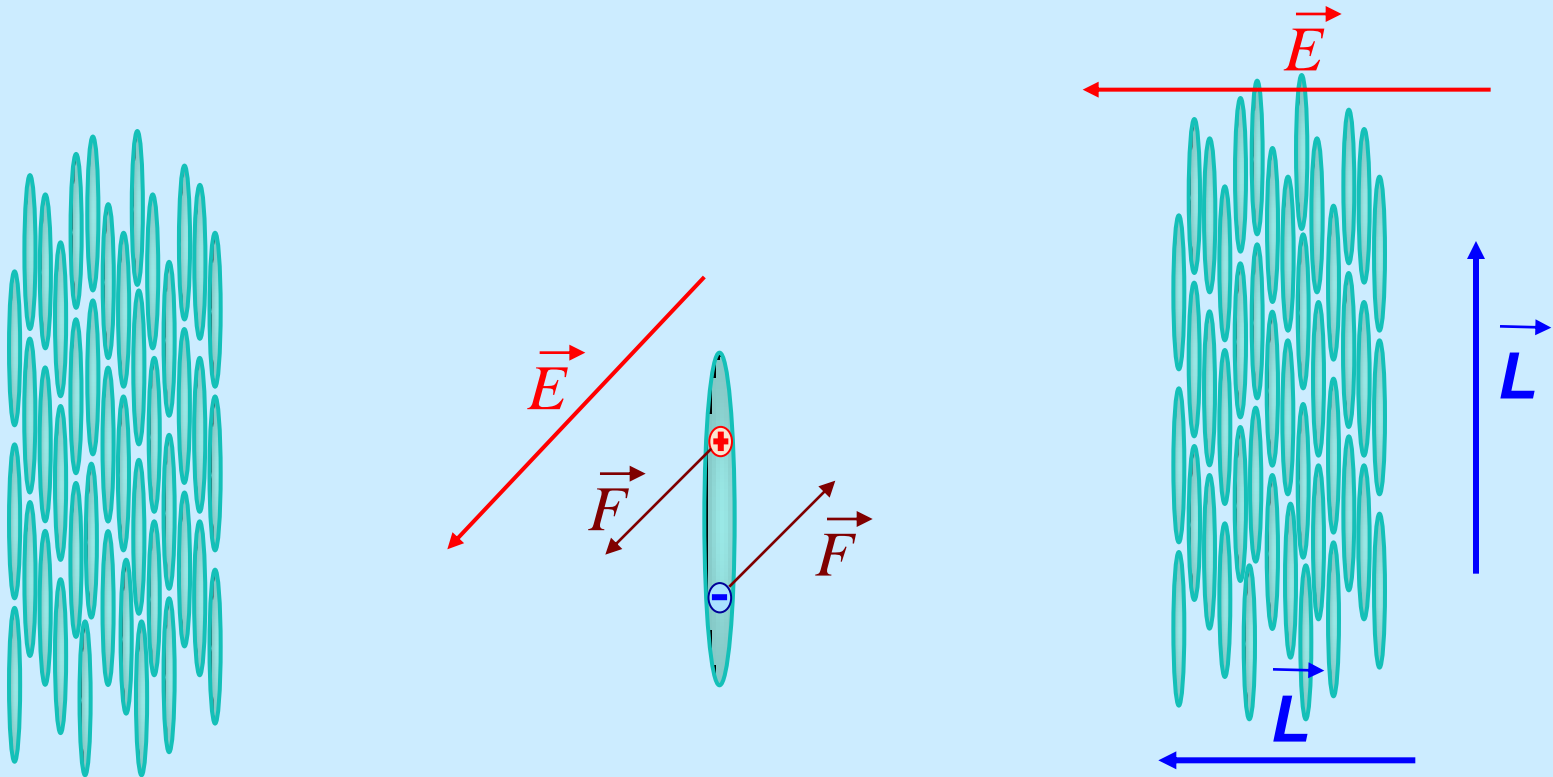
# Влияние ЭМ полей на жидкие кристаллы



Энергетически выгодная  
конфигурация

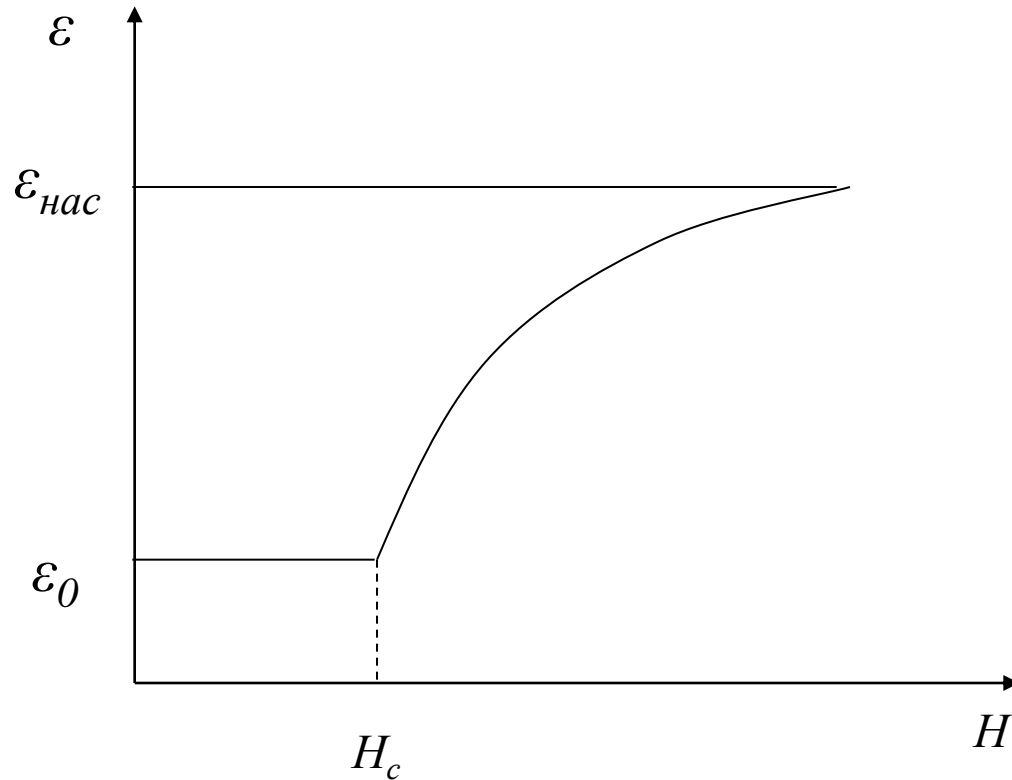
# Эффект Фредерикса в электрическом поле

В.К.Фредерикс и В.Н.Цветков – советские ученые, в 1927 году впервые исследовали необычные электрические и оптические свойства ЖК.



Эффект Фредерикса имеет пороговый характер: переориентация директора происходит при условии  $M_{\text{крут.эл}} \geq M_{\text{крут.упруг}}$

# Эффект Фредерикса (1927 г.)

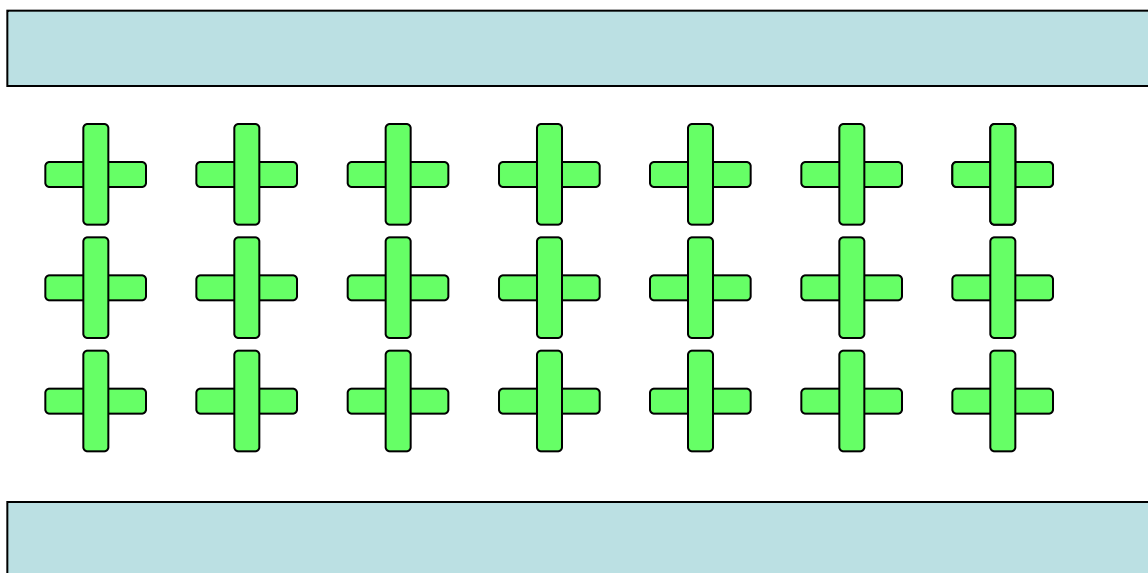


$H_c d = \text{const}$  ( $d$  – толщина слоя нематика)

$E_c d = \text{const}$

# Эффект деформации вертикально ориентированной фазы

$$E > 0 \quad E = 0$$



# Положение жидких кристаллов на поверхности

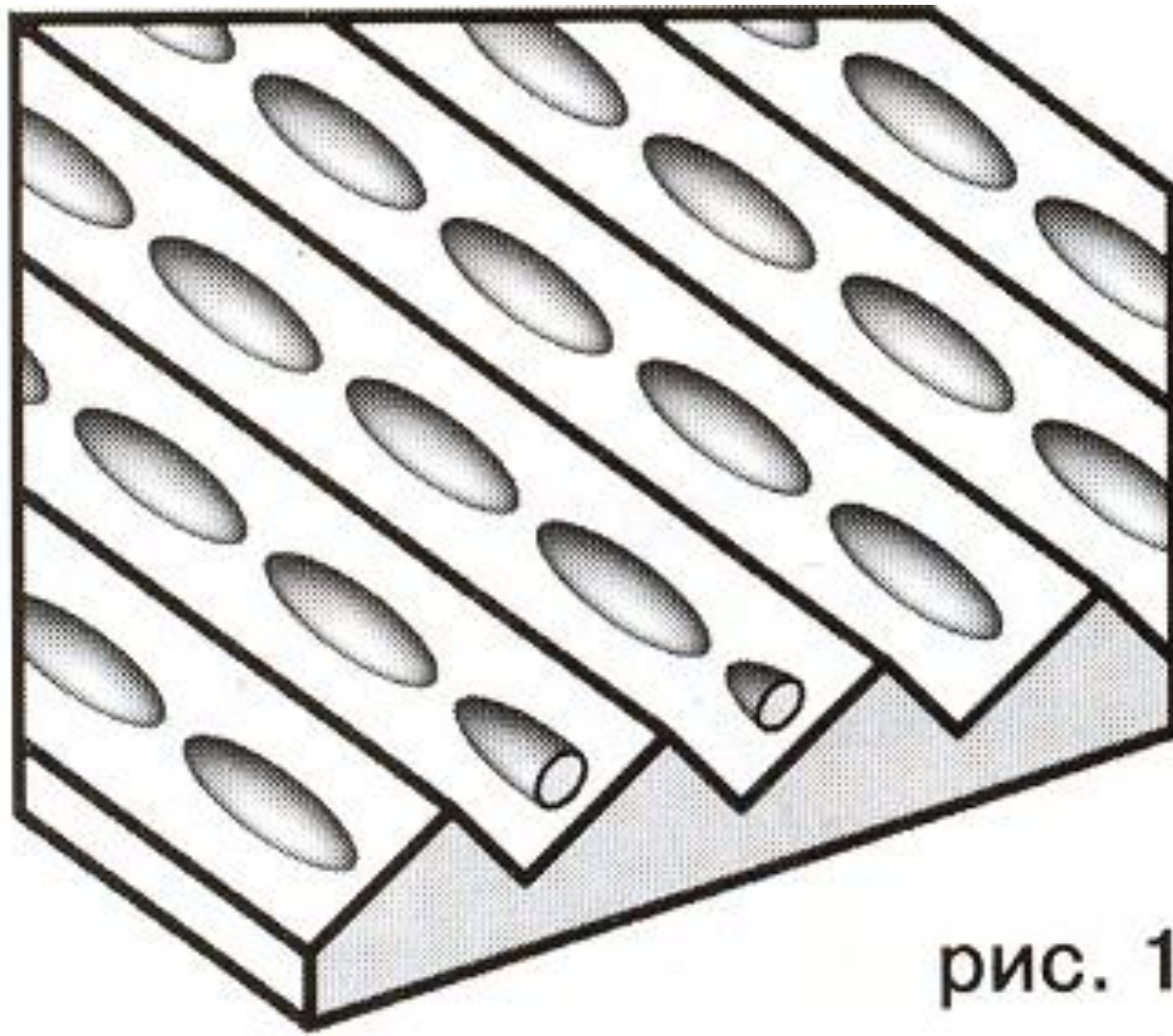
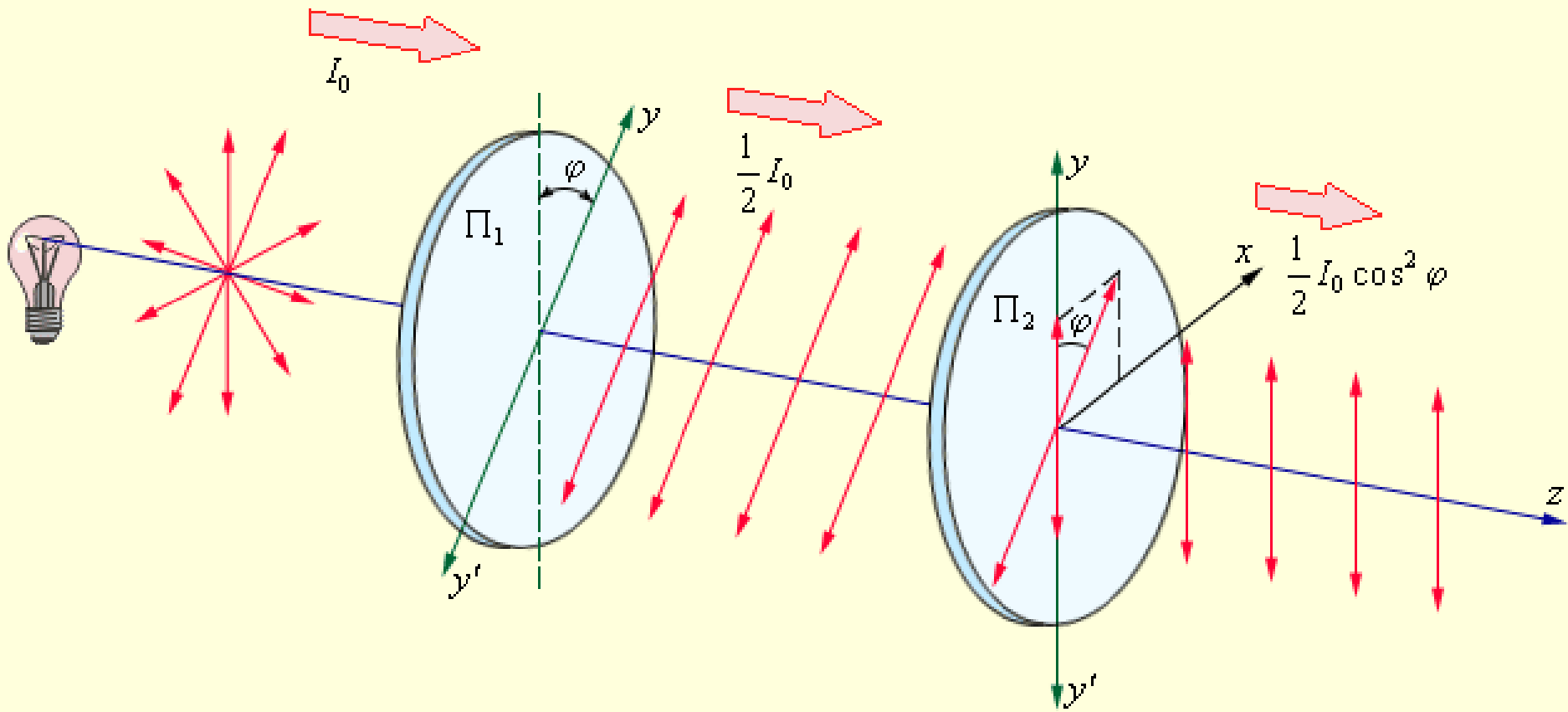


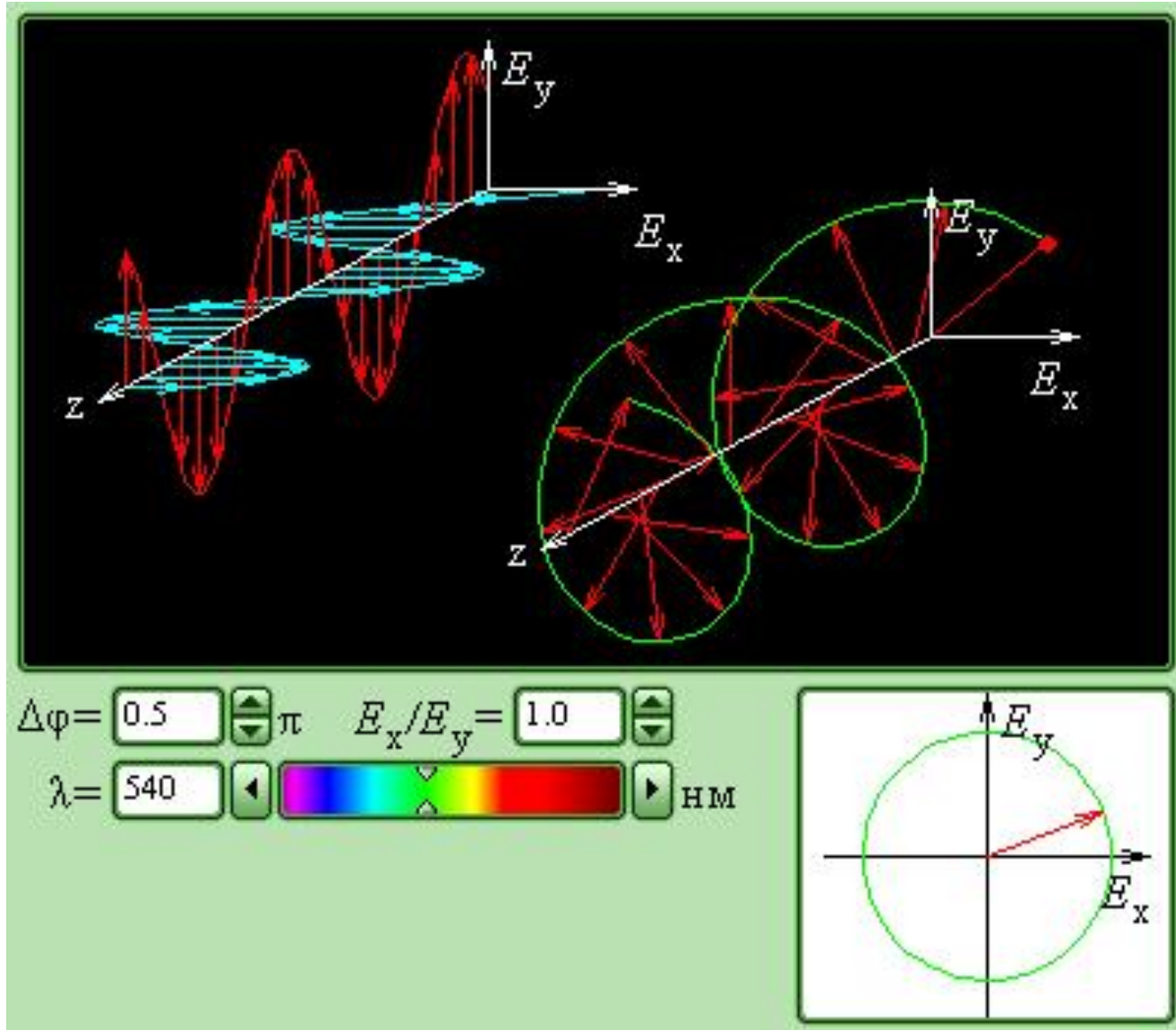
рис. 1

# Естественный и плоскополяризованный свет

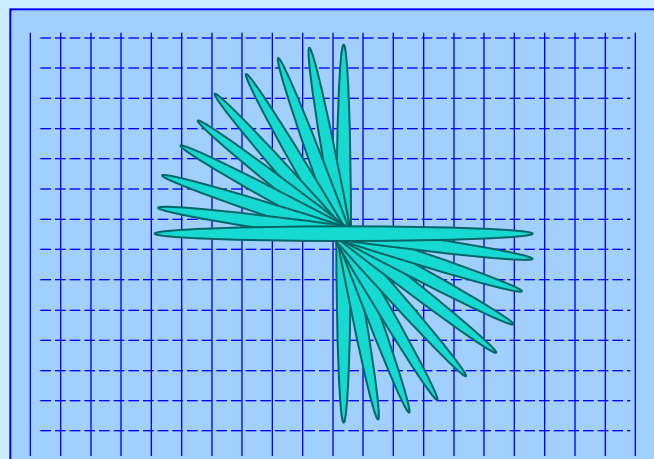
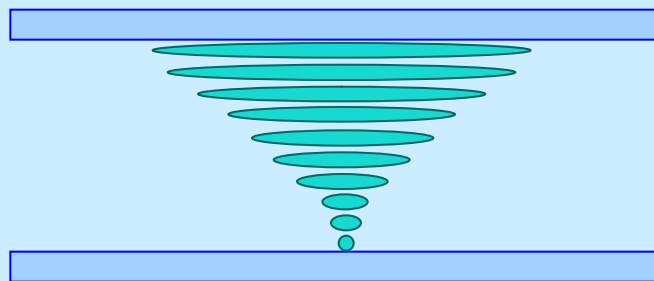




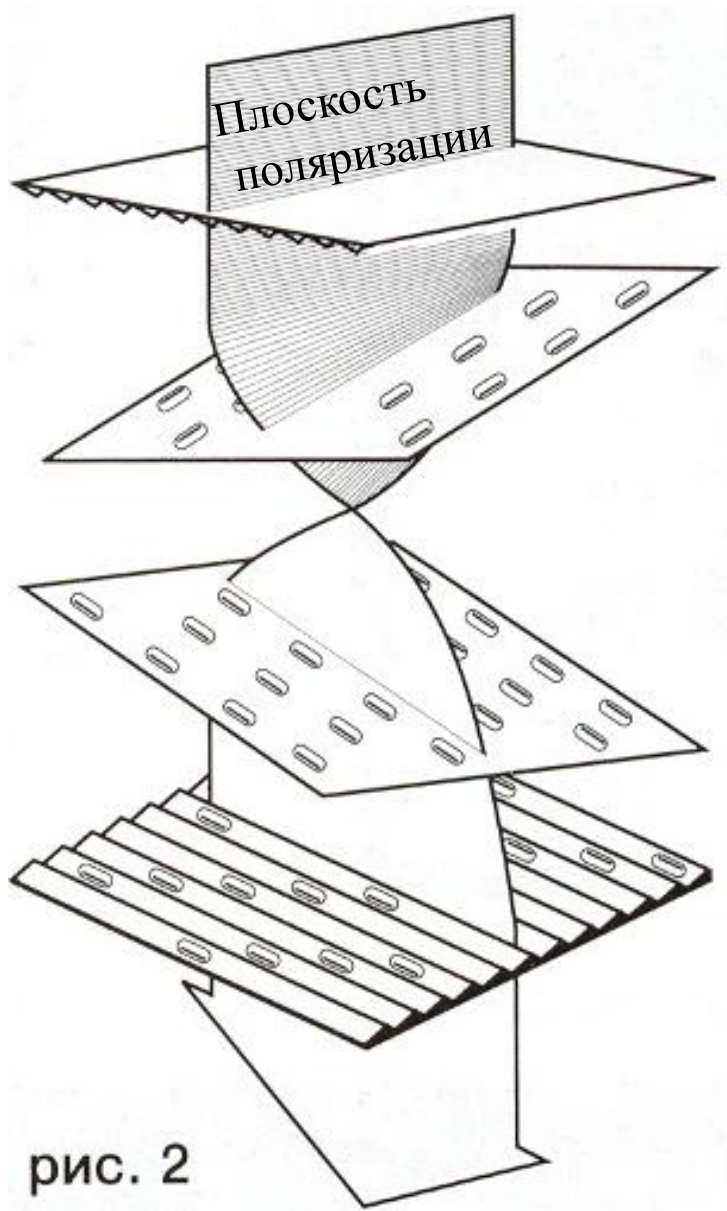
# Модель 3.15. Поляризация света



# Организация твист-ориентации

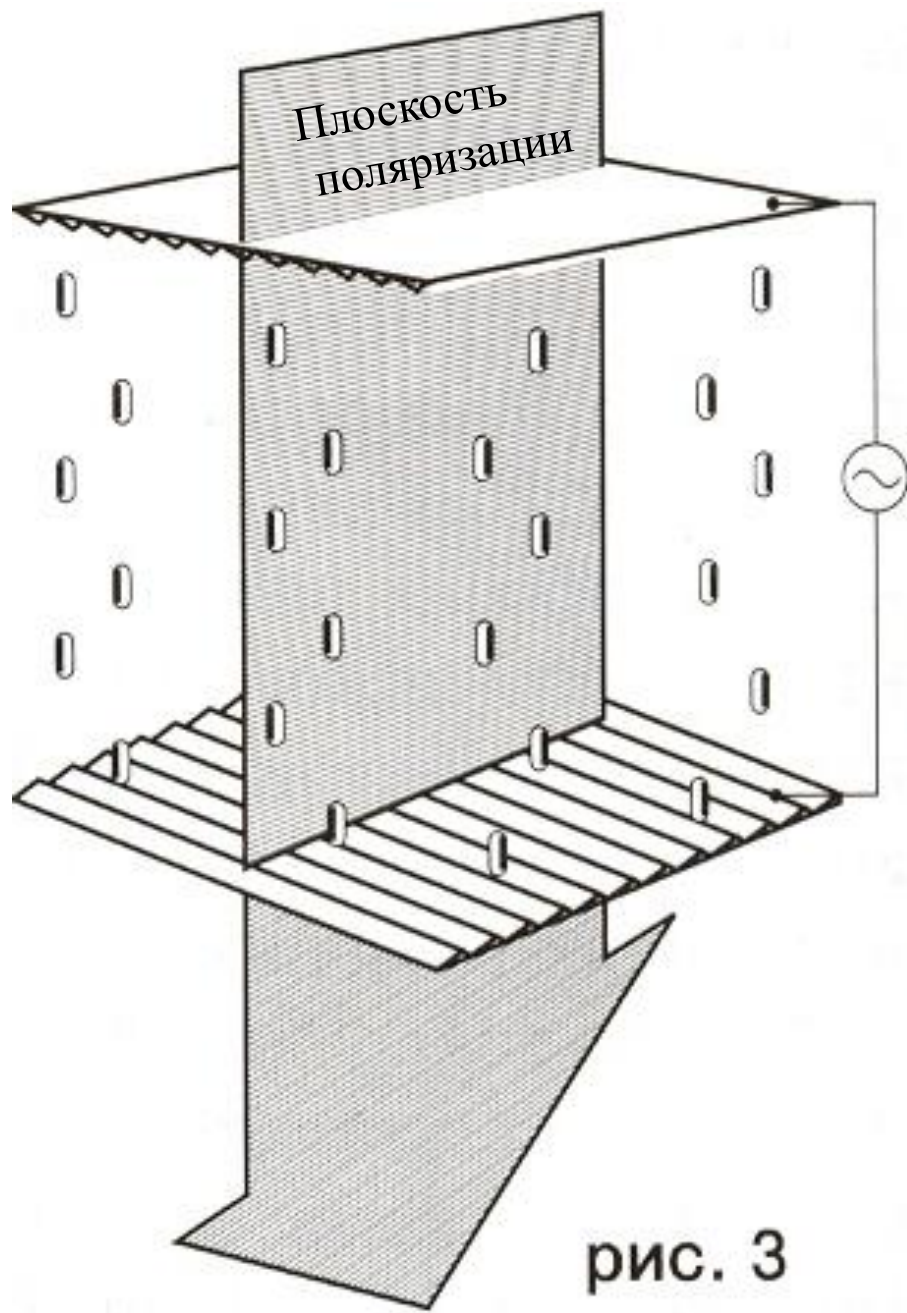


# «Твист-эффект»



$$E_{эл} = 0$$

рис. 2



$$E_{эл} > 0$$

рис. 3

Ячейка  
Керра





# Принцип работы жидкокристаллического дисплея

