

Строение кристаллических веществ  
и материалов

**лекция №10**

**Кристаллические структуры  
простых веществ**

**II. Неметаллы**

# p-Элементы, примыкающие к неметаллам

(H) ё	 кристаллы		 жидкости				 газы				1 H	2 He						
3 Li	4 Be	<div style="text-align: center;"> <p>← ГПУ</p> <p><b>293 К (20 °C)</b></p> <p>ГЦК →</p> </div>										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
55 Cs	56 Ba	57* La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
87 Fr	88 Ra	89** Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	ГЦК									
*Ln		58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu			
**An		90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr			

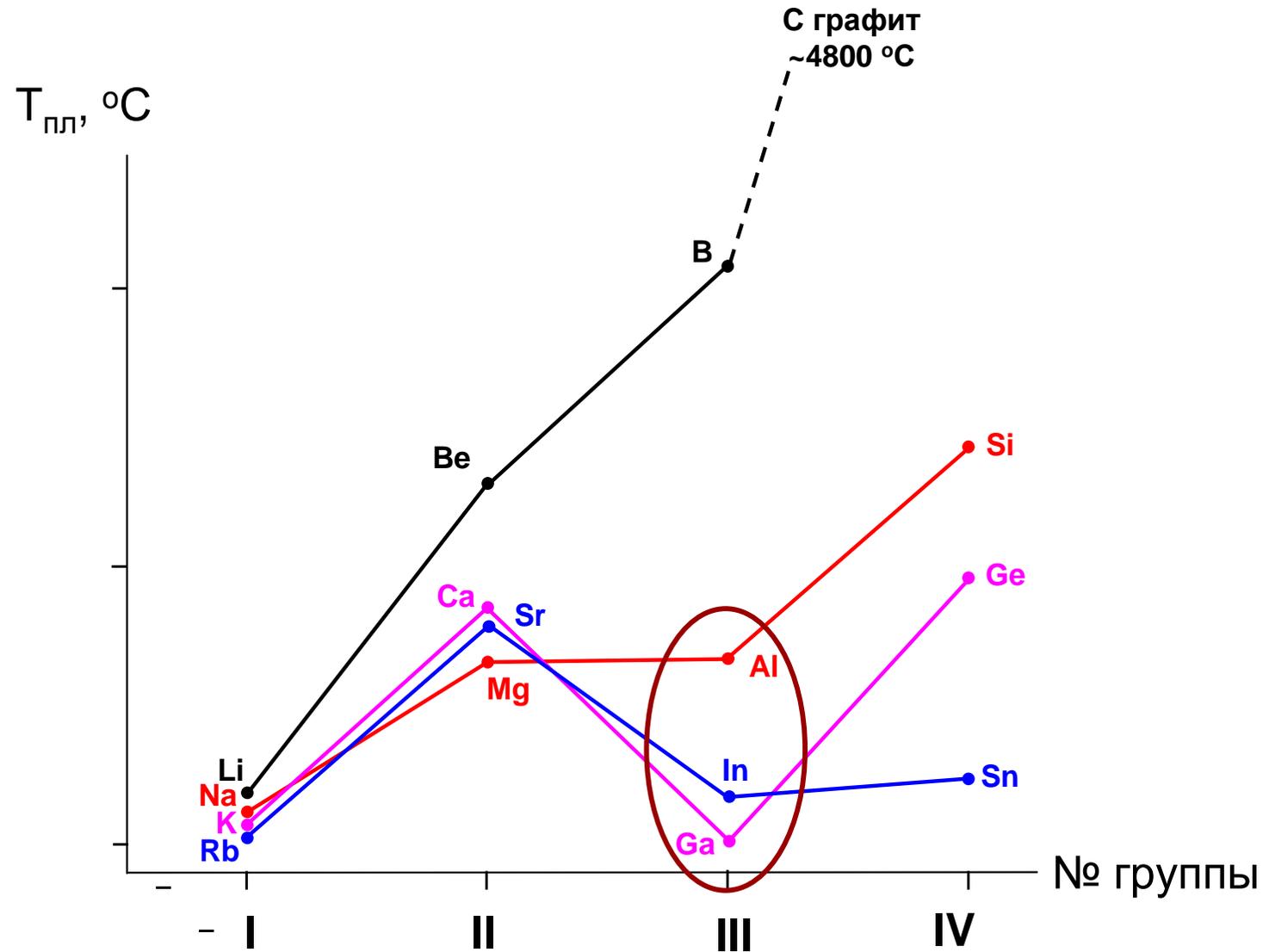
«Пограничные» металлы Ga, In, Tl, Pb, Bi:  
 $d(M-M)$  увеличены,  $T_{пл}$  понижена

к.ч., упаковка

кратч. М-М

<b>Zn</b> 6+6 ~ГПУ 2.66 Å	<b>Ga</b> 1+6 2.70 Å	<b>Ge</b> 4 2.44 Å	<b>As</b> 3+3 2.51 Å
<b>Cd</b> 6+6 ~ГПУ 2.97 Å	<b>In</b> 12 ~ГЦК 3.34 Å	$\beta$ - <b>Sn</b> 4+2+4 3.18 Å	<b>Sb</b> 3+3 2.90 Å
<b>Hg</b> 12 ~ГЦК 2.95 Å	<b>Tl</b> 12 ГПУ 3.40 Å	<b>Pb</b> 12 ГЦК 3.49 Å	<b>Bi</b> «3+3» 3.07 Å

# «Пограничные» металлы: связи М-М ослаблены



**Al:** ГЦК,  $3s^2$ -АО «выключены»

**In:** искаженная ГЦК

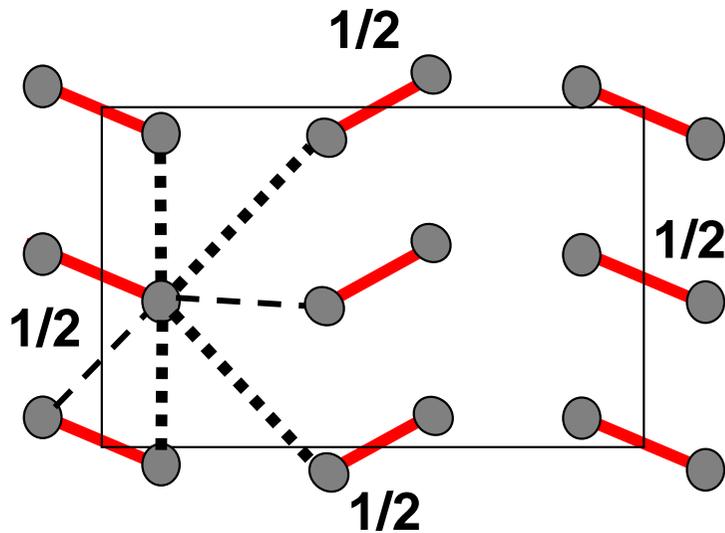
**Ga:** сильные искажения структуры,  $T_{пл} = 30$  °C

# Галлий, $T_{пл} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

пр. гр. Cmce,  $Z=8$

к.ч. = **1 + 6**    **2.47 Å**    2.70 – 2.79 Å

«гранецентрированная» ячейка: пары  $\text{Ga}_2$

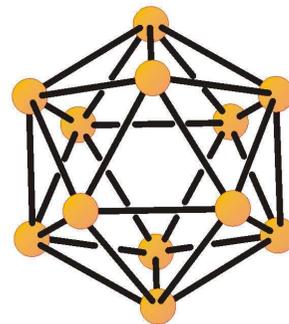
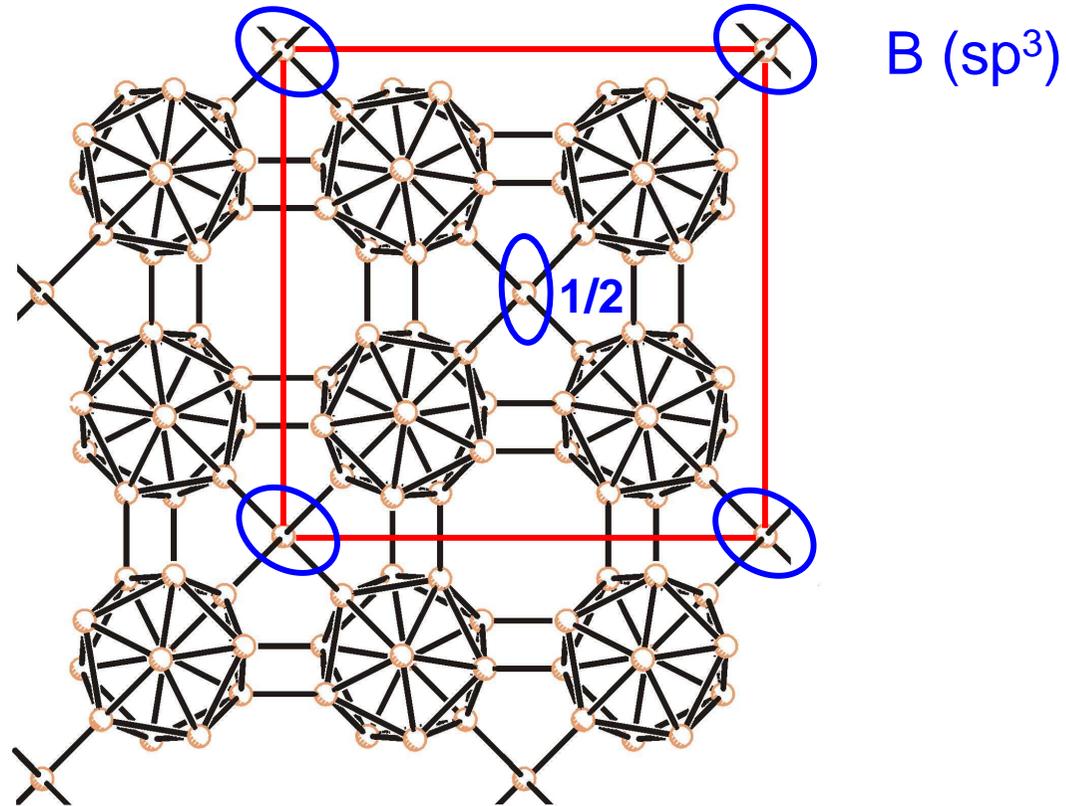


в жидком металле сохраняются «молекулы»  $\text{Ga}_2$  с расстоянием  $\text{Ga} - \text{Ga} \sim 2.50\text{ Å}$

удельное сопротивление ( $\times 10^{-6}$  ом/см):

	Al	2.5	
Zn	5.7	<b>Ga 40</b>	Ge ~90000
Cd	7.1	In 8.2	Sn 11.2

**а-Модификация тетрагонального бора**  
 **$P4_2/nnm$ ,  $Z = 50$**   
**(проекция вдоль оси  $c$ )**



икосаэдры  $B_{12}$

# Алмаз

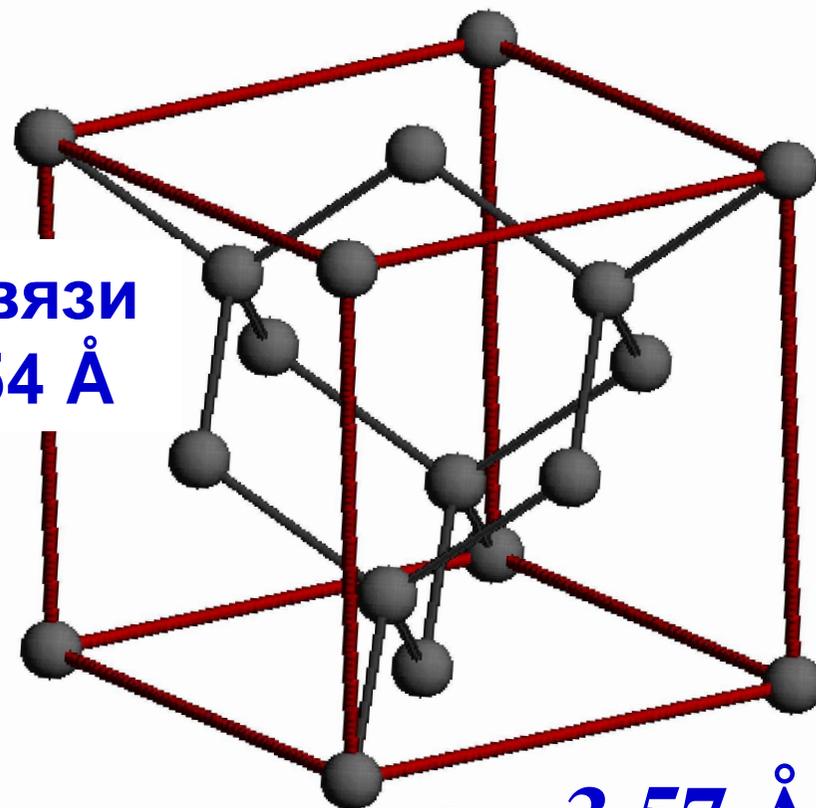
бесцветные и прозрачные кубические кристаллы

## Общий вид



## Атомная структура

длина связи  
C–C 1.54 Å

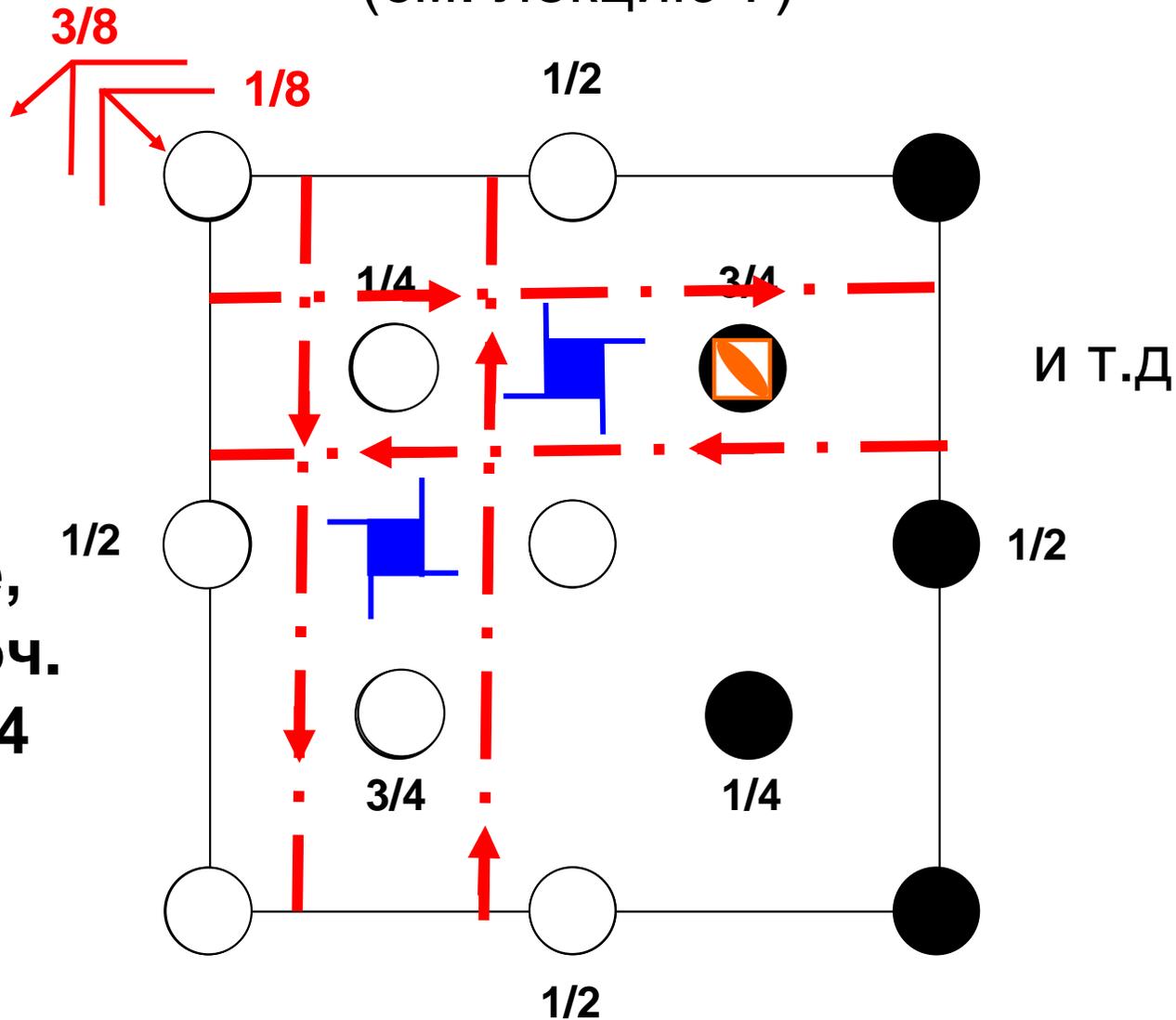


$a = 3.57 \text{ \AA}$

Бесцветный, сверхтвердый,  
диэлектрик, сильно преломляет свет.  
Сгорает в кислороде; при  $t > 800 \text{ }^\circ\text{C}$  темнеет  
(частично переходит в графит)

# Плоскости **d** («diamond») в структуре алмаза (см. лекцию 7)

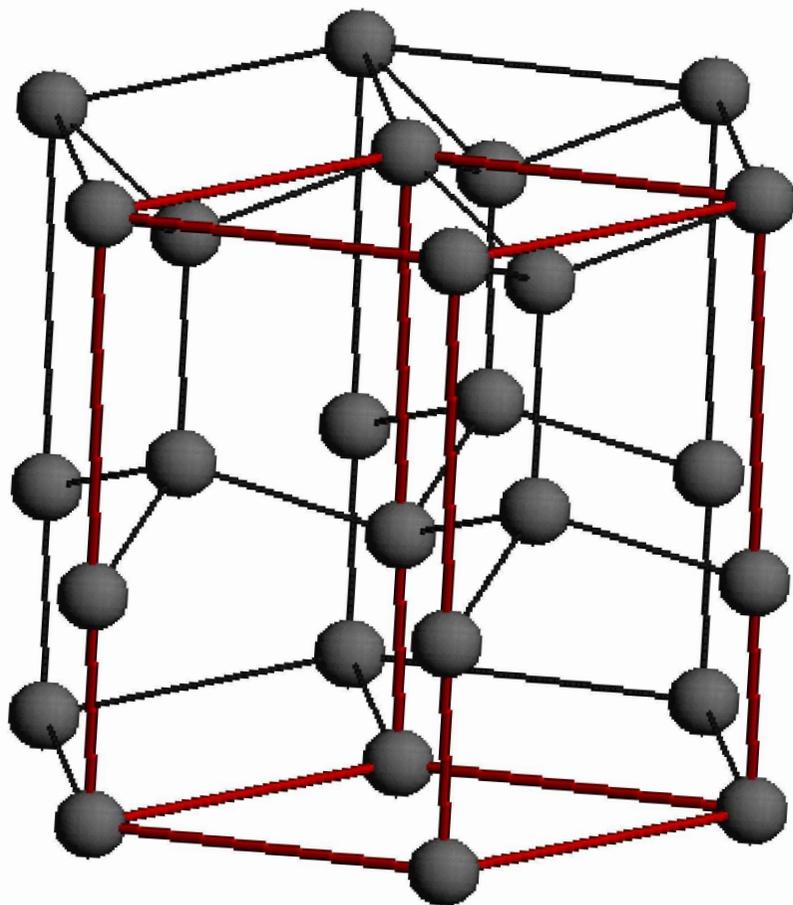
$Fd\bar{3}m$   
кратн. 192  
но  $Z=8$ :  
частное  
положение,  
порядок точ.  
группы = 24  
( $\bar{4}3m$ )



**плоскость d (001):**  
**не погашены  $hk0$   $h+k=4n$**

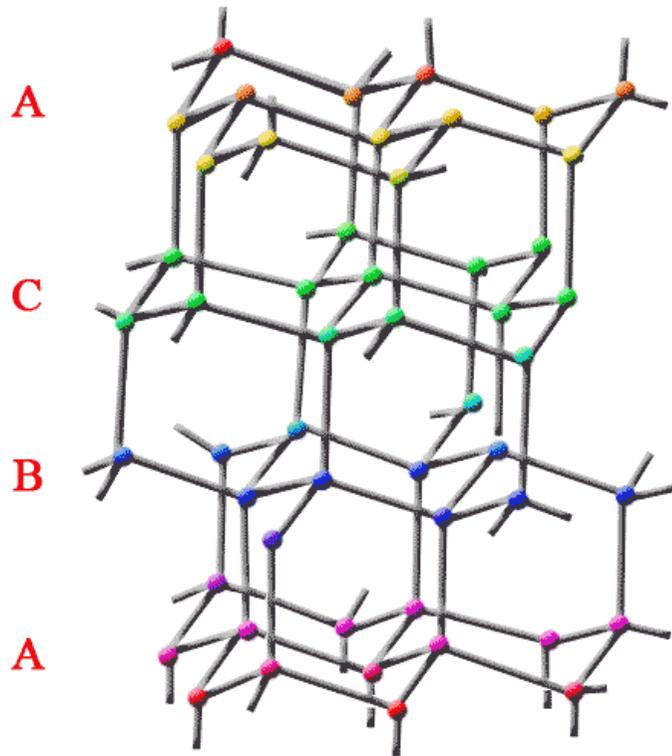
# Лонсдейлит

$P6_3/mmc$ ,  $Z=4$ ,  $a=2.52 \text{ \AA}$ ,  $c=4.18 \text{ \AA}$ ,



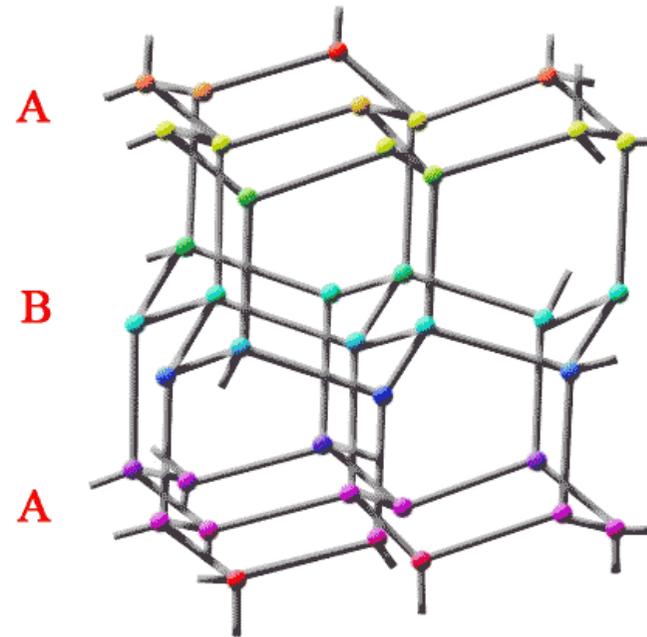
**Kathleen Lonsdale**  
1903-1971

## Алмаз



Обычный (кубический) алмаз. Получается из графита при очень высоком давлении и температуре выше 1500 °С

## Лонсдейлит



Гексагональный алмаз: **лонсдейлит**. Получается из аморфного углерода при ударном воздействии (в метеоритах)

Различаются расположением гофрированных слоев из 6-членных циклов  $C_6$  со структурой «кресла» (соседние слои химически связаны!)

# Наноалмаз

частицы алмаза с размерами в несколько нанометров. Получаются при взрыве («неполное сгорание» тротила)

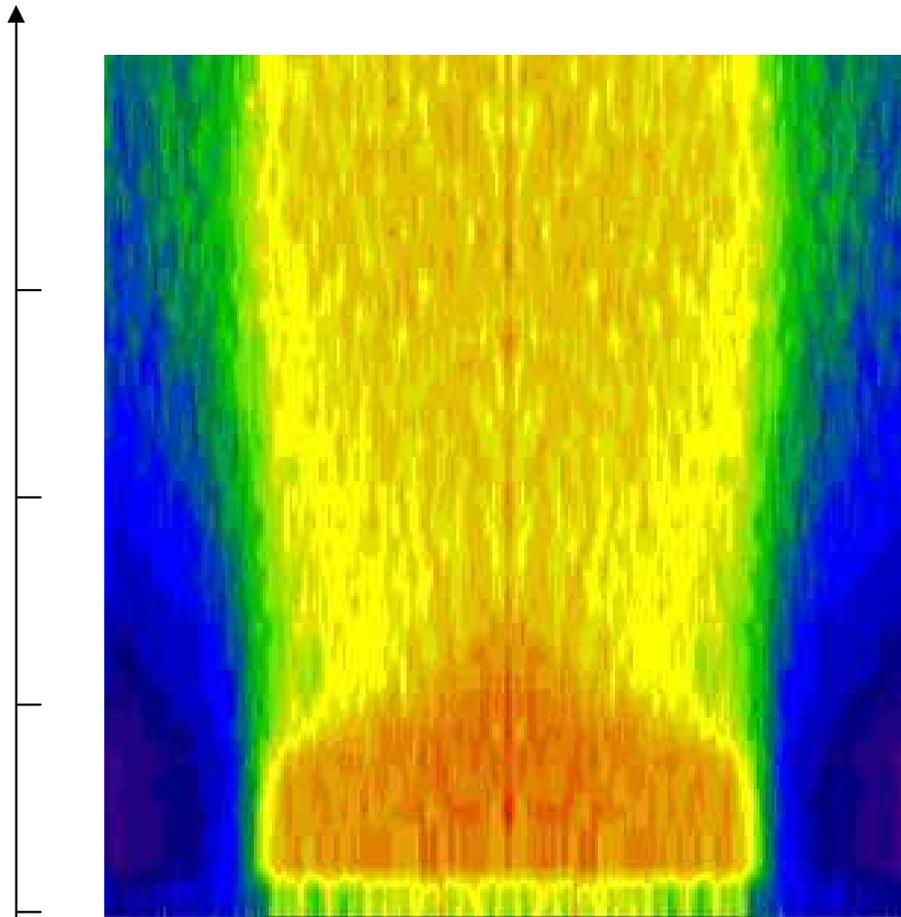


**Рис. 1.**Монтаж новой экспериментальной станции "Взрыв-1", предназначенной для исследования детонационных процессов при мощности взрыва до 50 г тротилового эквивалента.

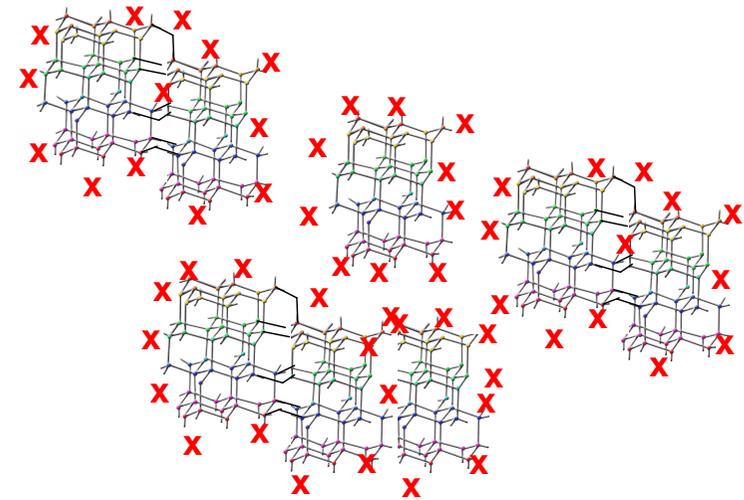
Исследования взрывного синтеза наноалмазов в Сибирском центре СИ

ядра кристаллической структуры алмаза в “шубе” из органических заместителей (ОН, С=О, СООН)

время, мкс



Оранжевая область - образование  
наноалмазов при взрыве тротила  
(интенсивность малоуглового рассеяния СИ)



**Применение наноалмазов:**  
**(1) для тонкой шлифовки**  
**(2) для смазки (!!)**  
**(3) в электронных блоках**  
**(4) в оптике**

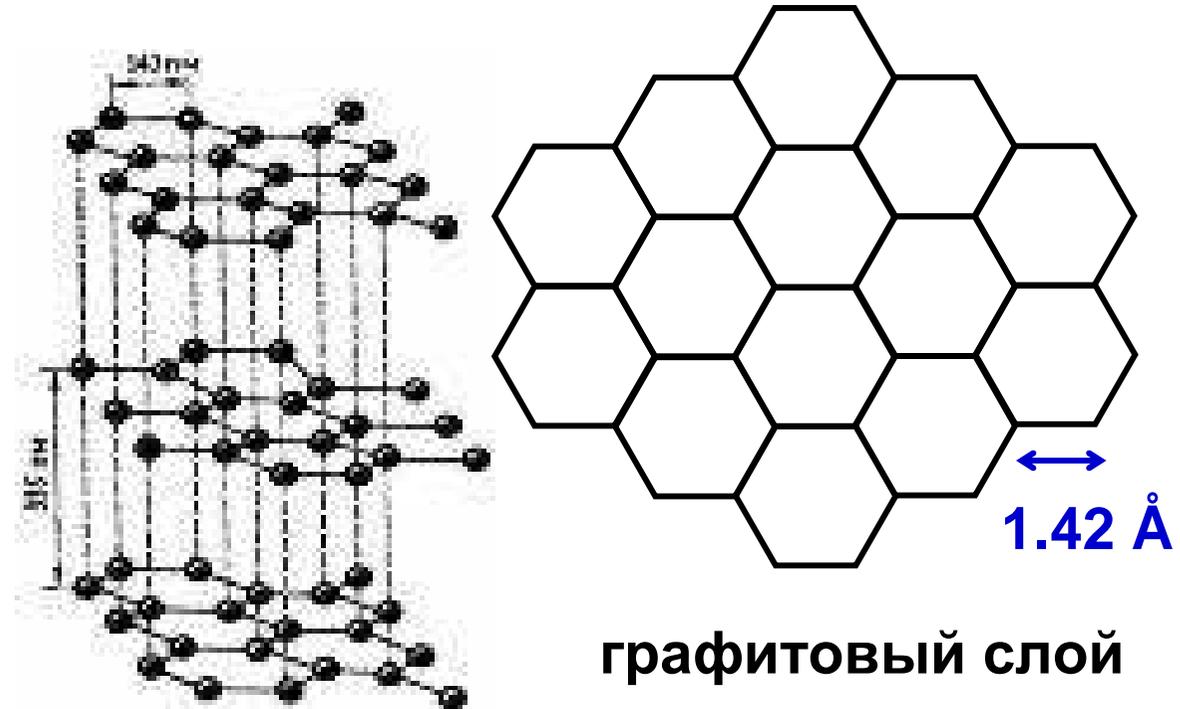
**и многое другое**

# $\alpha$ -Графит

## Общий вид

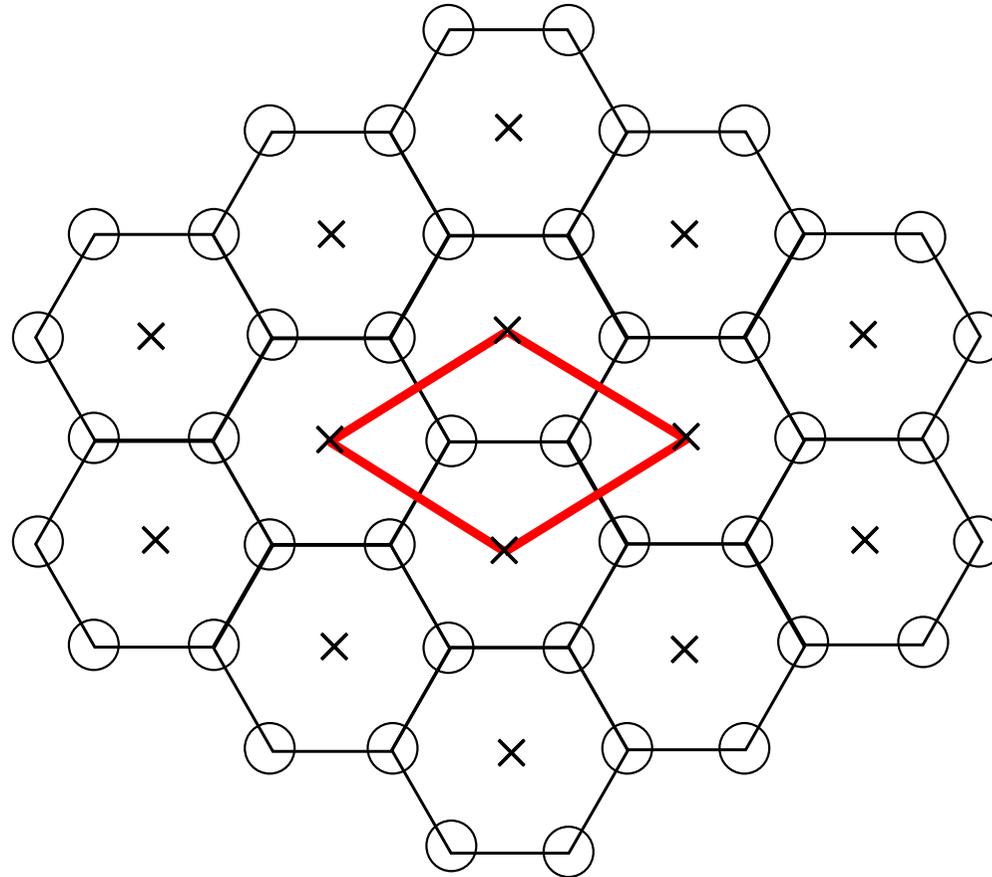


## Структура кристалла



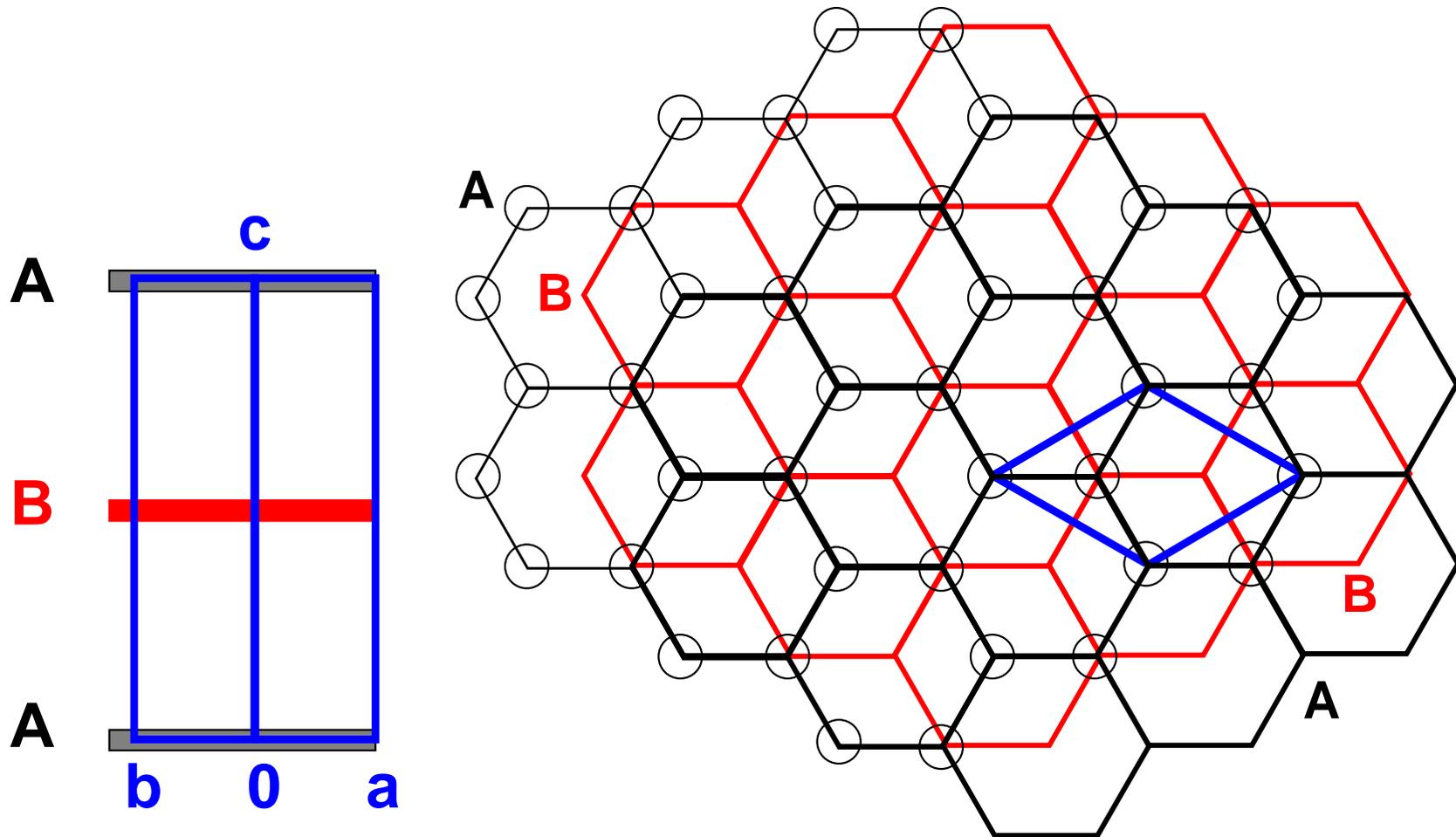
Непрозрачный, серый с металлическим блеском, мягкий (грифель, твердая смазка), хорошо проводит ток. В кислороде сгорает, в инертной атмосфере устойчив до 3500 °С. Хороший теплоизолятор. Переходит в алмаз под давлением около 100 тыс. атм. при температуре 1500 – 2000 °С.

# Графитовая сетка: атомы занимают $2/3$ позиций плотнейшего гексагонального слоя



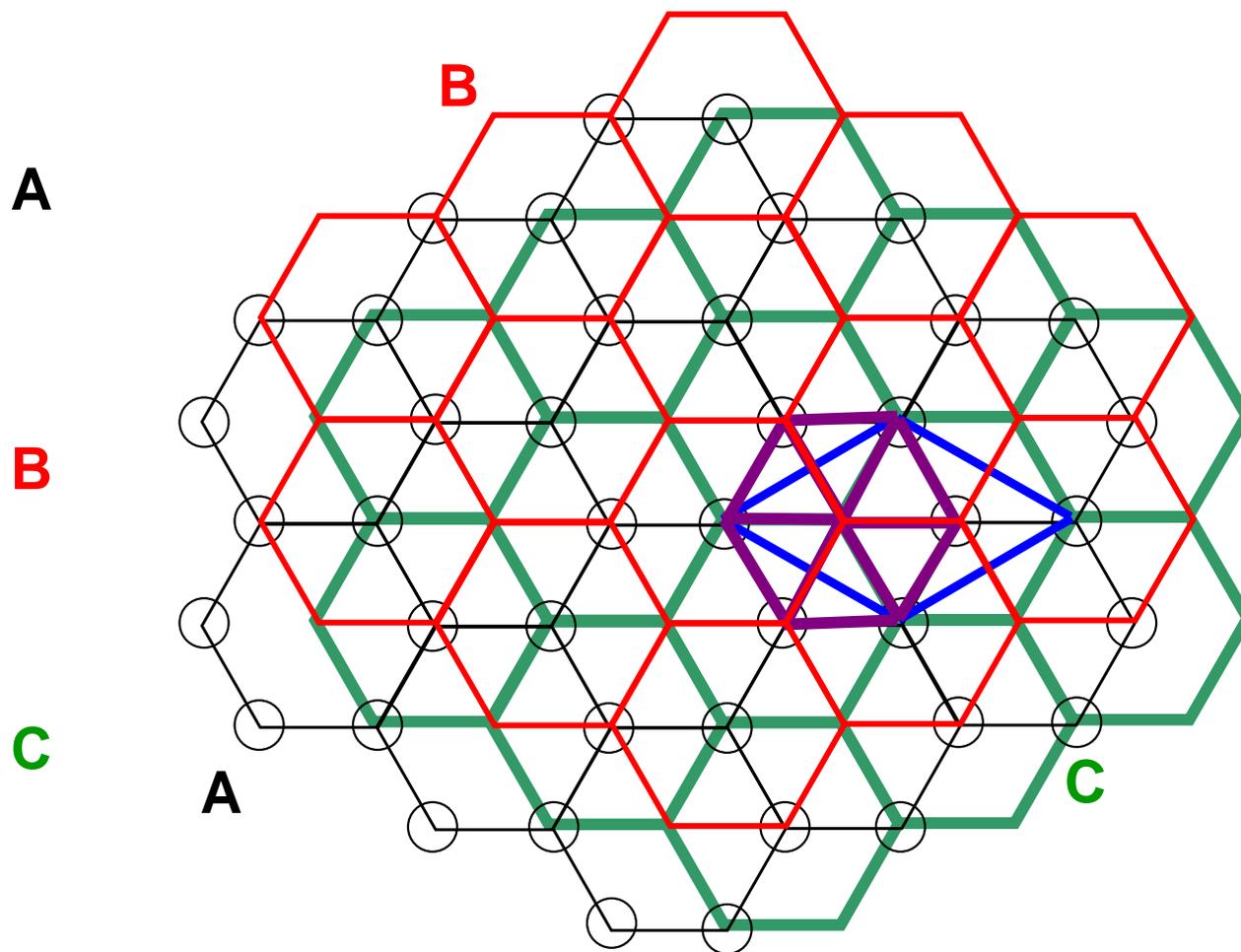
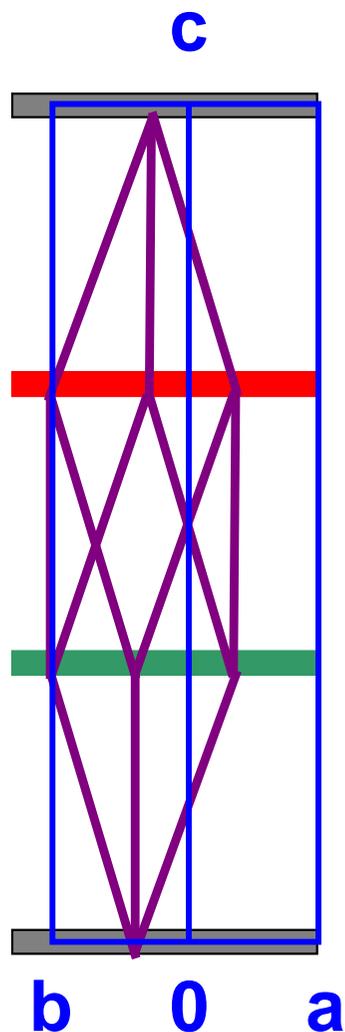
**доказывается построением:**  
в элементарной ячейке сетки 2 атома и 1 центр кольца

# $\alpha$ -Графит (...ABABAB...)



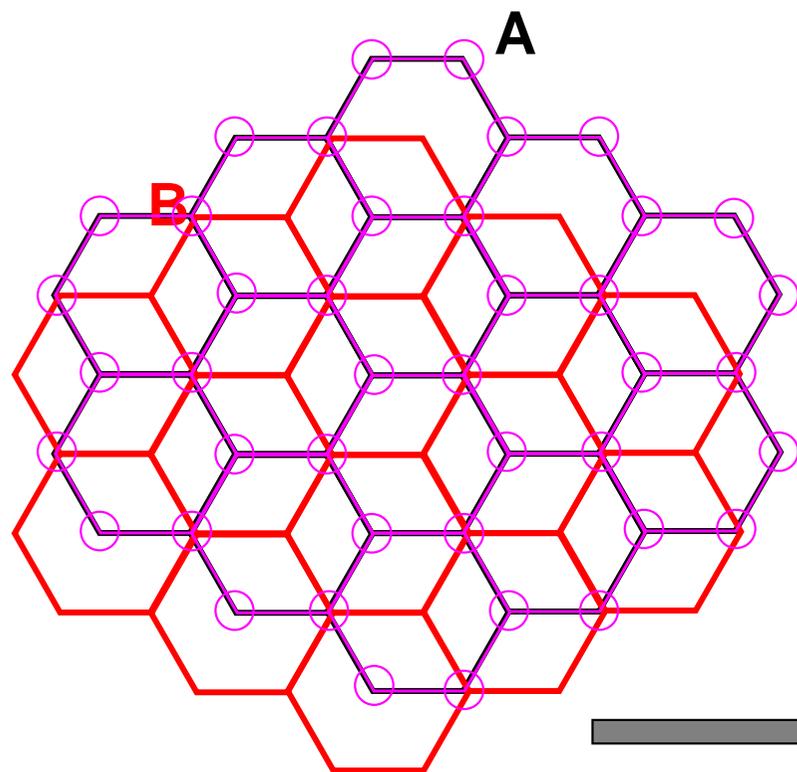
$a=2.46 \text{ \AA}$ ,  $c=6.70 \text{ \AA}$ ,  $P6_3/mmc$ ,  $Z=4$

# Ромбоэдрический графит (...ABCABC...)

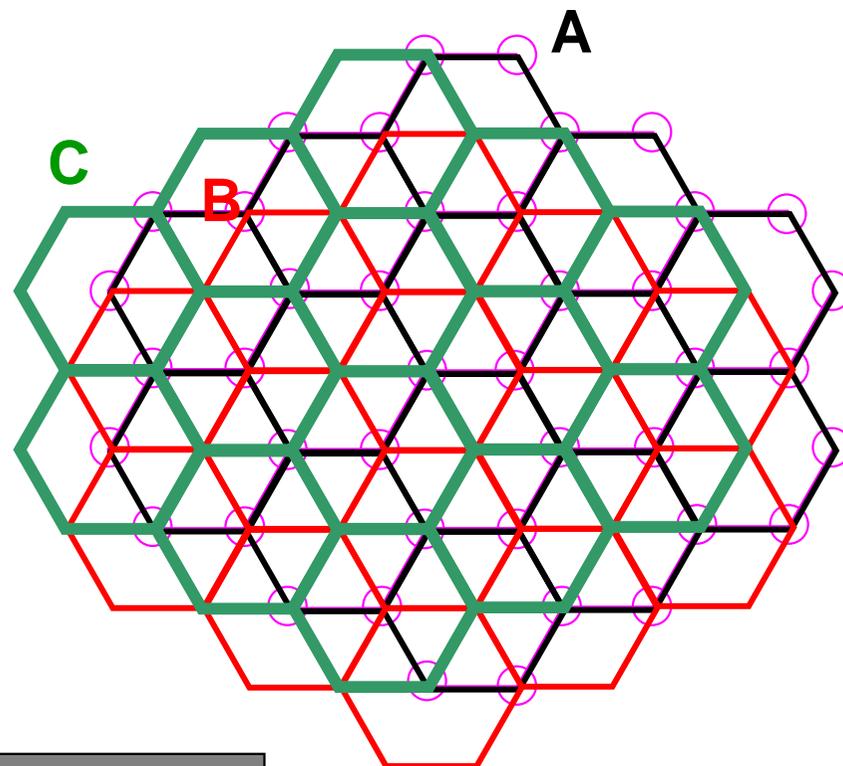


$a=2.46 \text{ \AA}$ ,  $c=10.05 \text{ \AA}$ , R  $\bar{3}m$ ,  $Z=6$   
(гексагональная установка)

Гексагональный  
 $\alpha$ -графит (...ABABAB...)

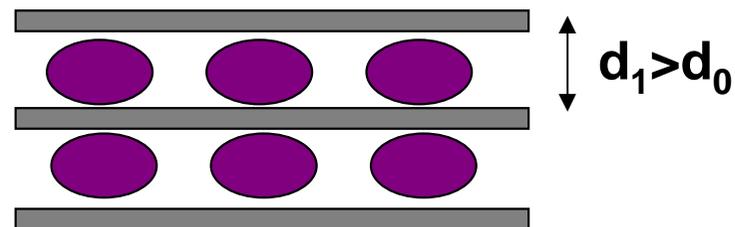
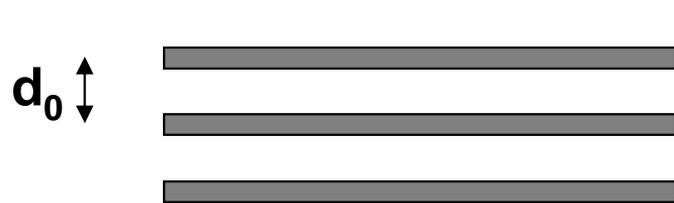


Ромбоэдрический  
 $\beta$ -графит (...ABCABC...)

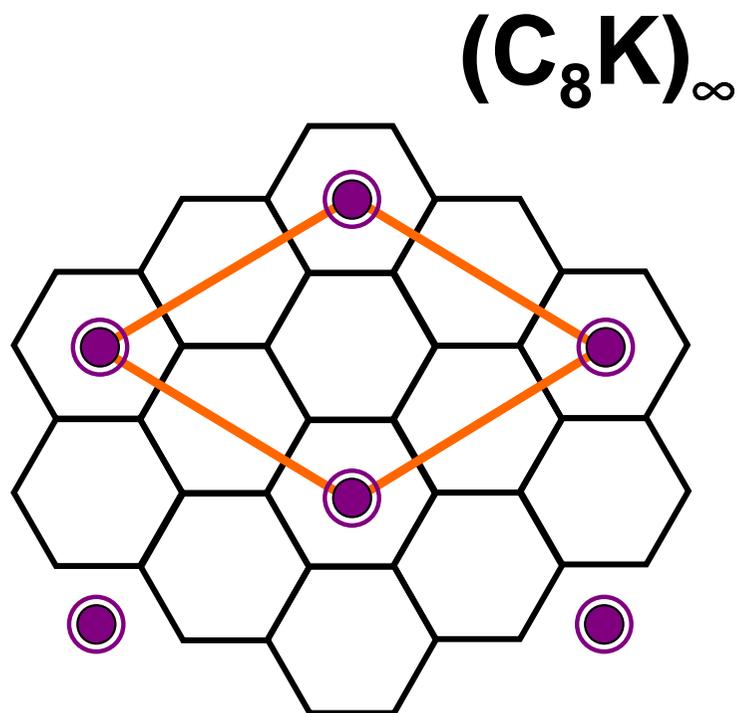


и еще бывает *тубулярный* (трубчатый) графит...

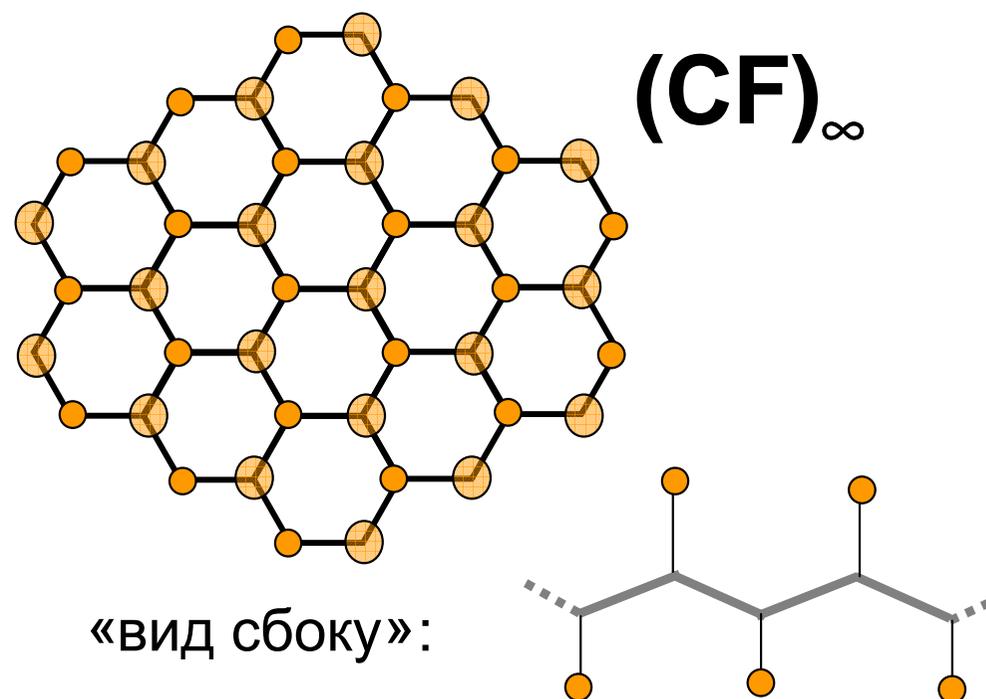
# Слоистые соединения внедрения (ССВ) графита



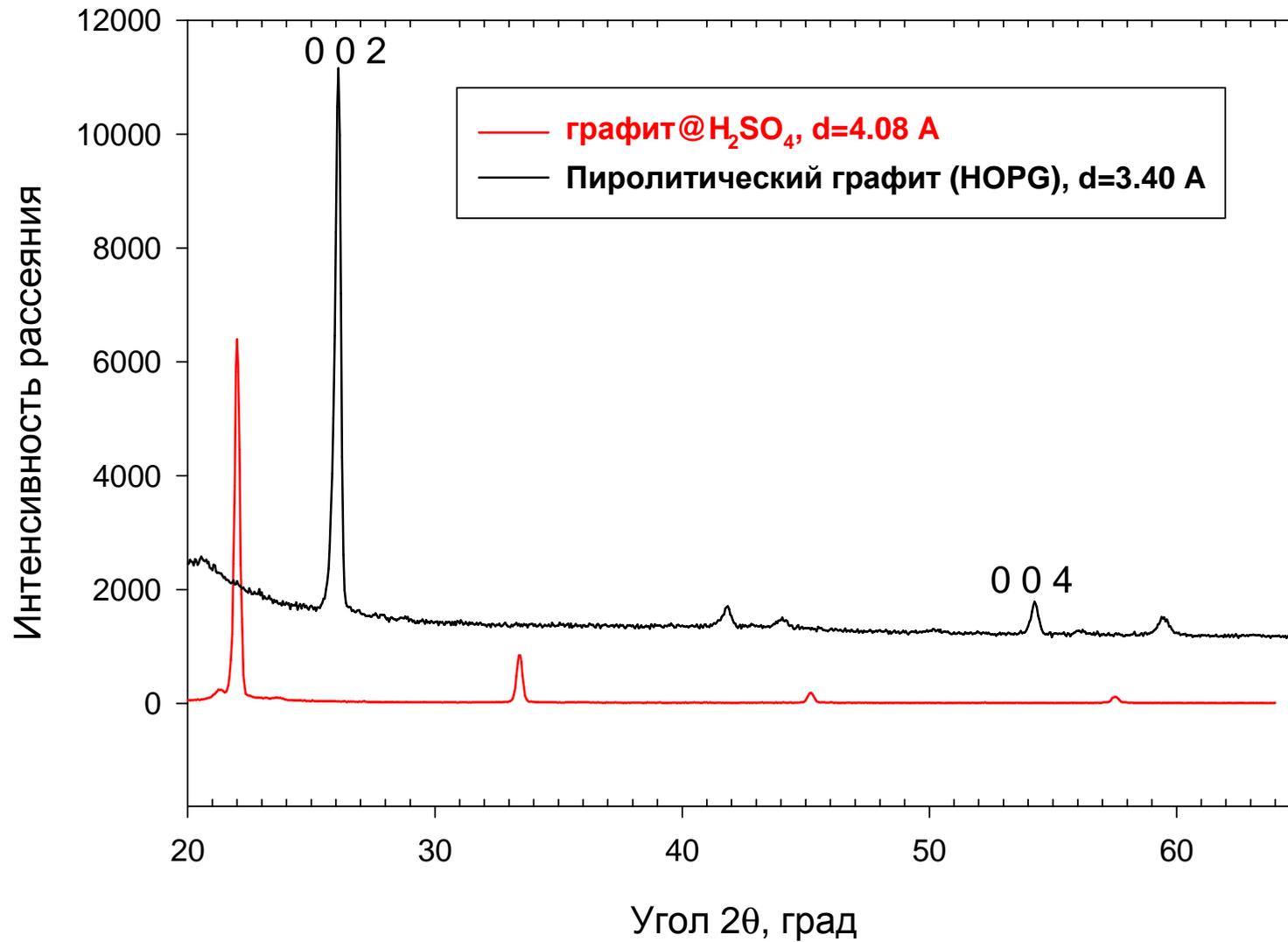
Пример 1:  
ССВ с калием



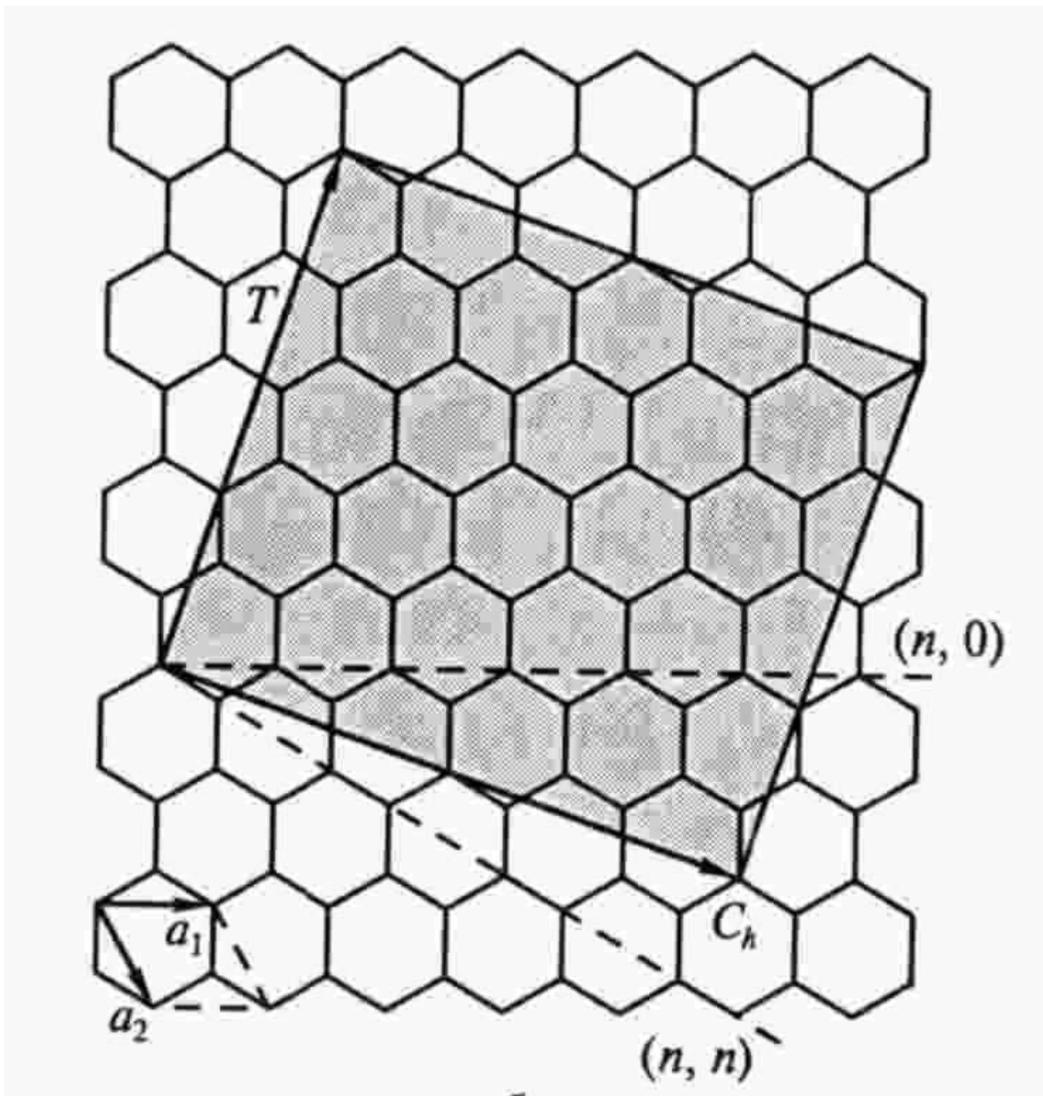
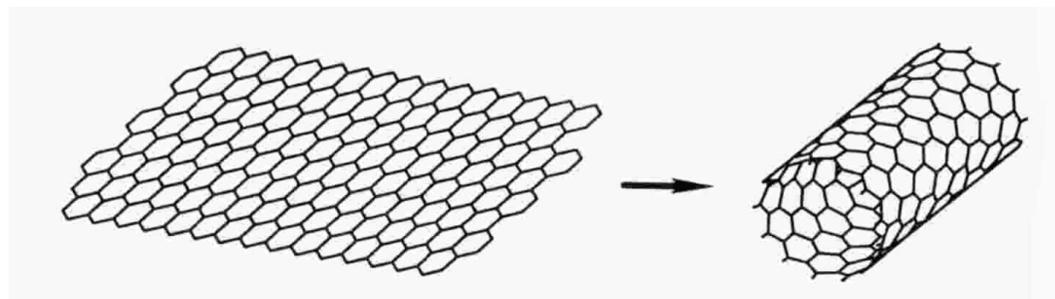
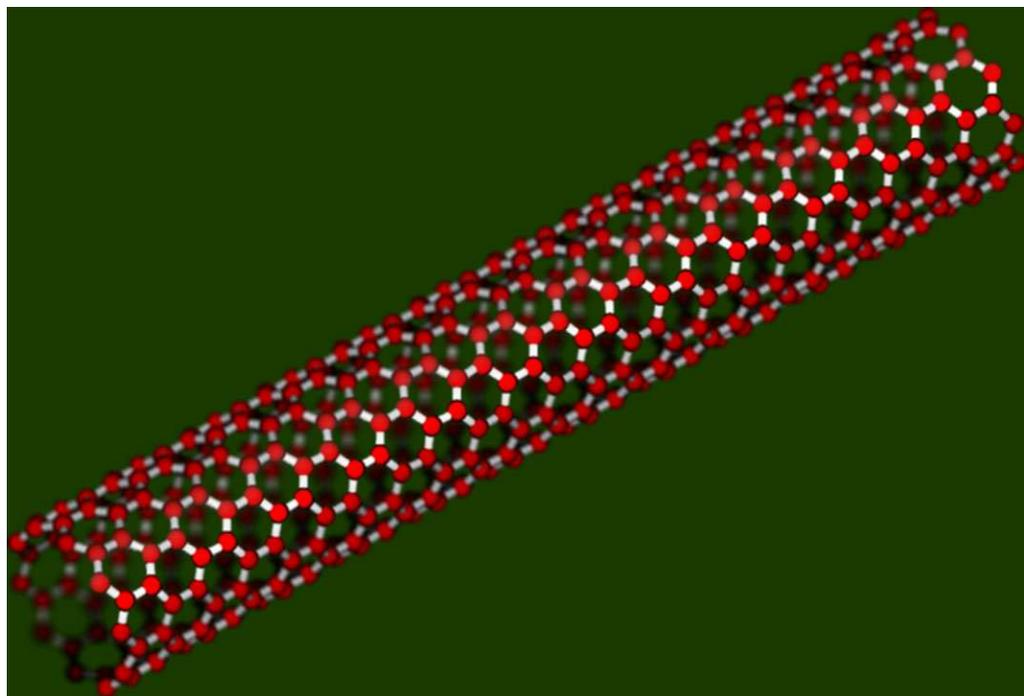
Пример 2:  
фторид графита



# Рентгенограммы графита и продукта внедрения $H_2SO_4$



# Нанотрубки углерода [n,m]



**Однослойные нанотрубки  
(single-wall nanotubes: SWNT),  
электронная микроскопия**



# Интеркалированные нанотрубки

**KI@SWNT**

**электронная микроскопия**

**реконструкция  
«начинки»  $(KI)_\infty$**

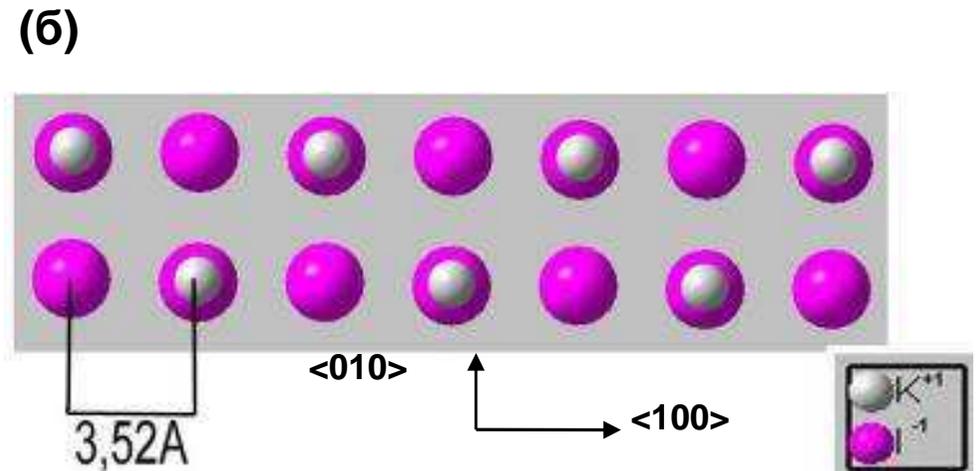
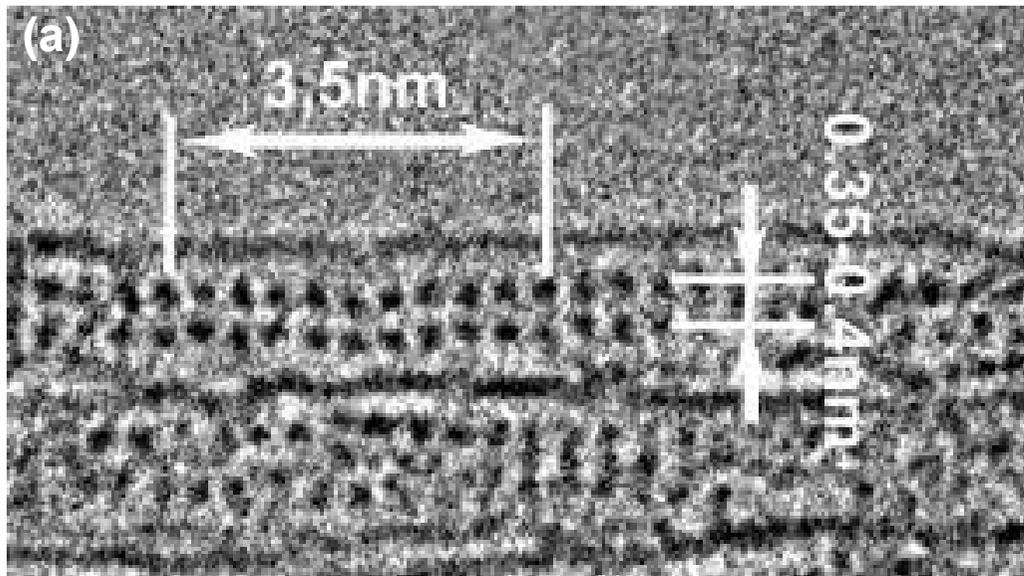
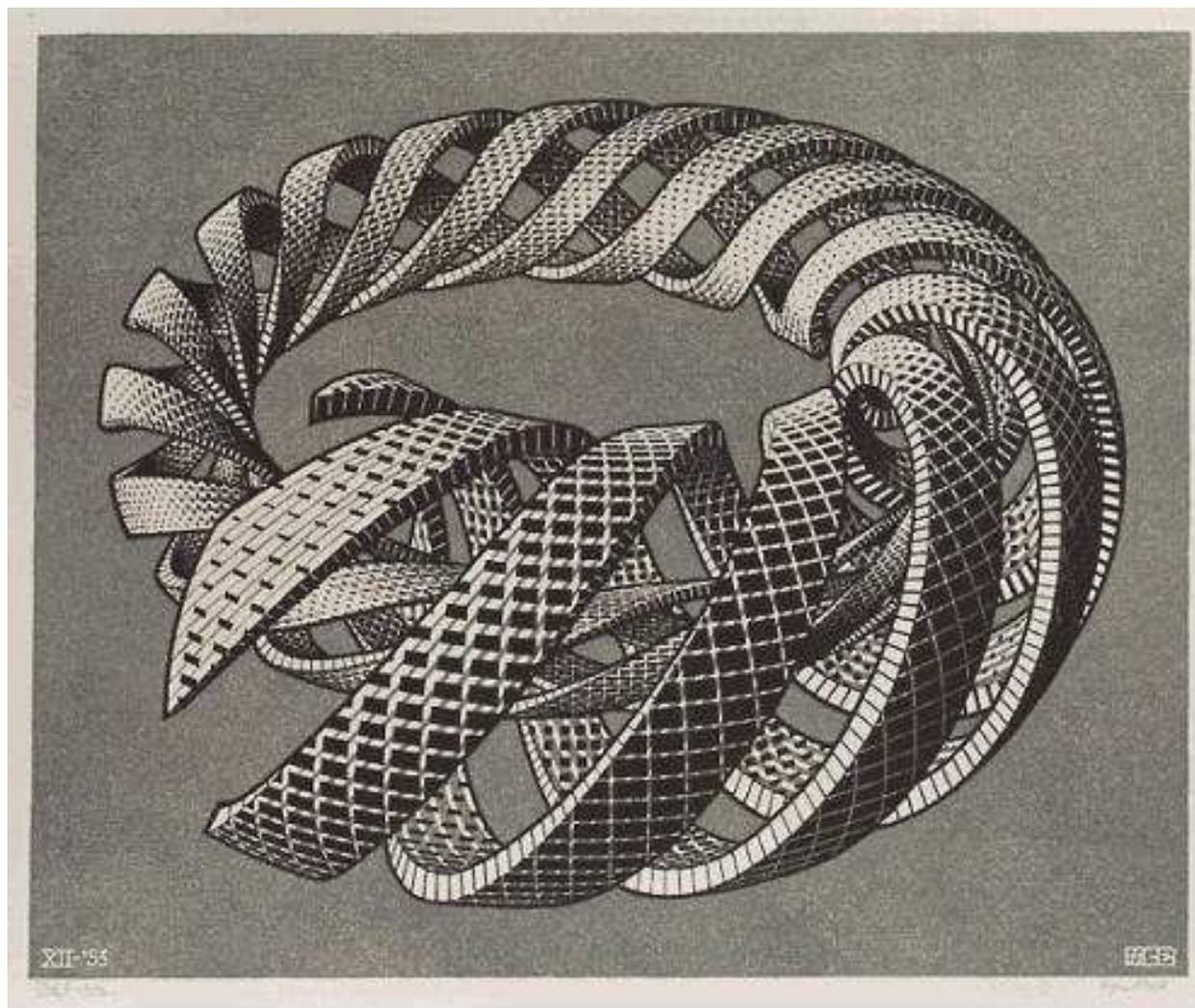


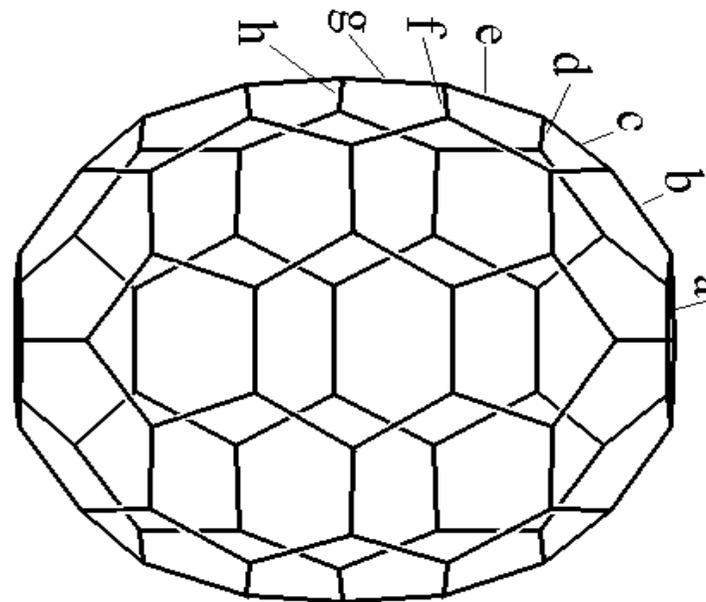
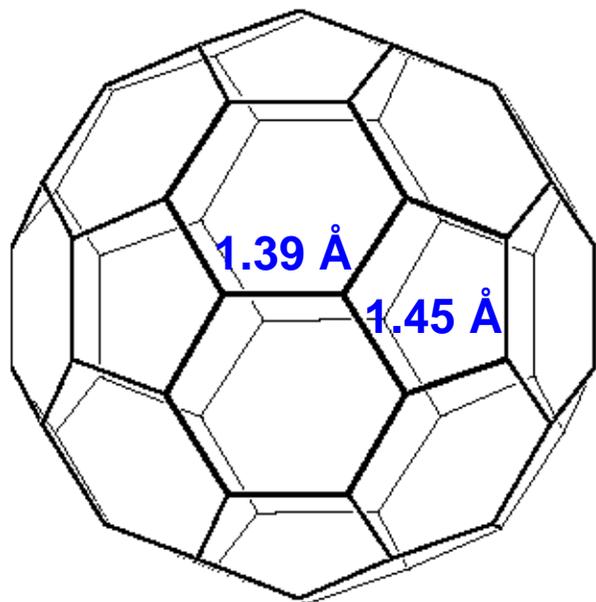
Рис. 4.9. ПЭМ изображение высокого разрешения композита KI@ОСНТ (а) и модель одномерного кристалла KI, состоящего из чередующихся колонок К-I и I-K (б).

М.В.Чернышева, "Синтез одномерных структур на основе интеркалированных одностенных углеродных нанотрубок", химфак МГУ, 2008



**М. Эшер, «Спирали», 1953 г.**

# Молекулы фуллеренов $C_{60}$ и $C_{70}$



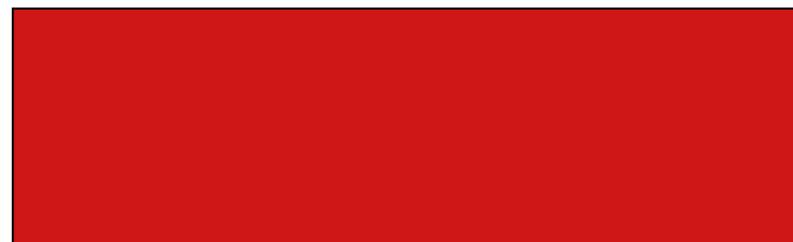
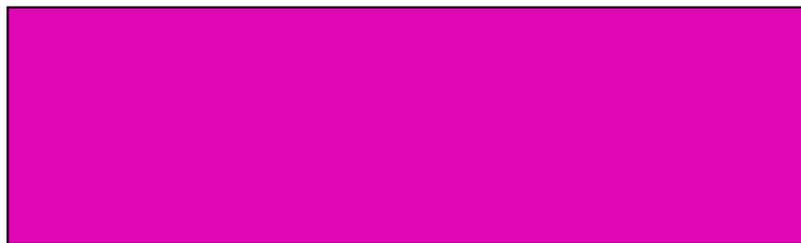
$C_{60}$  («футбольный мяч»,  $I_h$ )

$C_{70}$  («мяч для регби»,  $D_{5h}$ )

30 связей 6/6 (1.389 Å)  
60 связей 6/5 (1.450 Å)

Связи C—C 1.37 – 1.47 Å

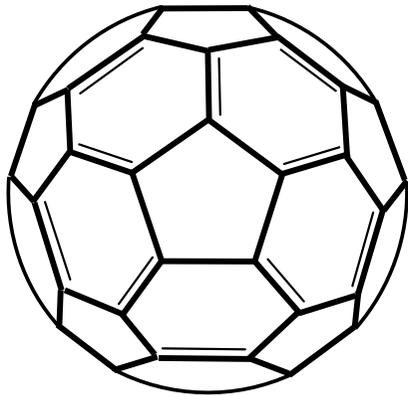
**R (центр-C) 3.540 Å**



Цвет раствора  $C_{60}$  в бензоле

Цвет раствора  $C_{70}$

# Как нарисовать футбольный мяч



Теорема Эйлера:

$$V - P + \Gamma = 2,$$

где  $V$  – число вершин,  $P$  – ребер,  
 $\Gamma$  – граней полиэдра,

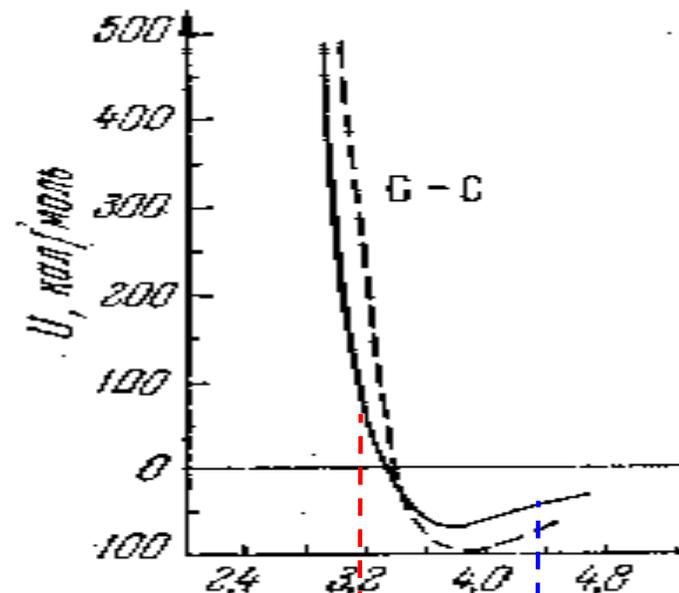
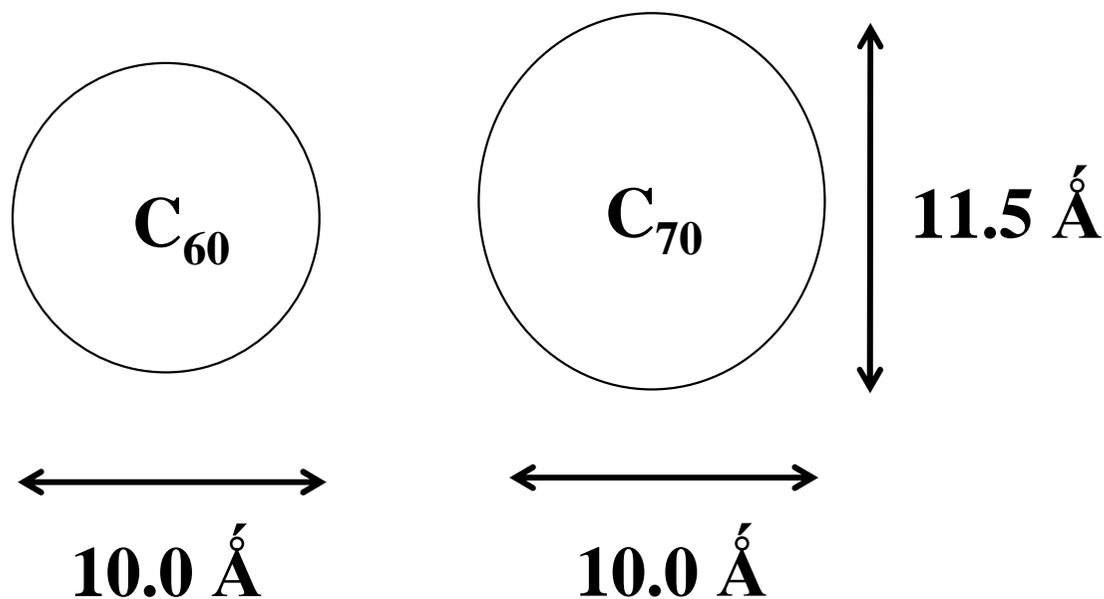
$$C_{60}: P = V + \Gamma - 2 = 60 + 32 - 2 = 90$$

30 связей 6/6 длиной 1.39 Å (как в бензоле)

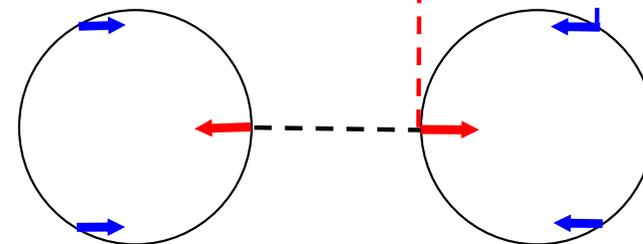
60 связей 6/5 1.45 Å (немного длиннее)

**Правило изолированных пятиугольников:  
в молекулах фуллеренов НЕ ДОЛЖНО БЫТЬ  
соседних пятичленных циклов**

# Ван-дер-ваальсовы размеры фуллереновых молекул в кристалле



кратчайшие невалентные контакты:  
отталкивание + притяжение  
удаленных атомов в молекулах



$C \dots C \sim 3.15 - 3.25 \text{ \AA}$   
(в графите  $3.35 \text{ \AA}$ )

# Полиморфные модификации C<sub>60</sub>

ГЦК-C<sub>60</sub>:

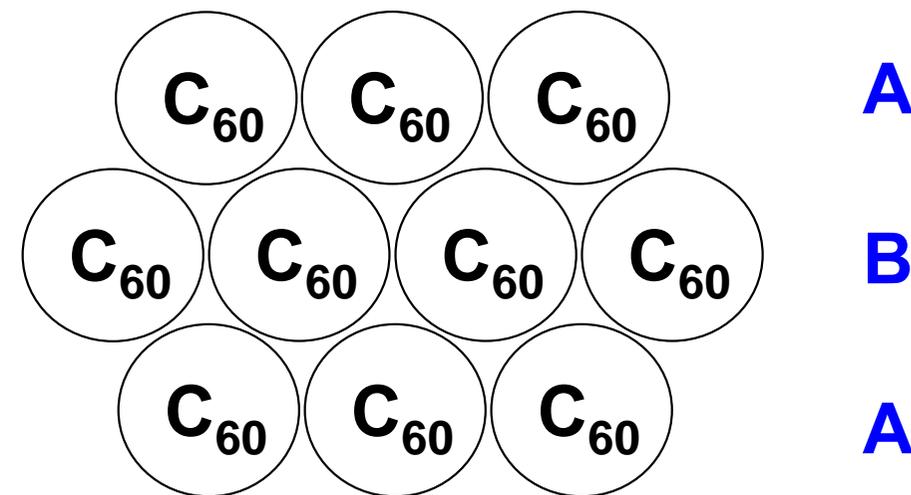
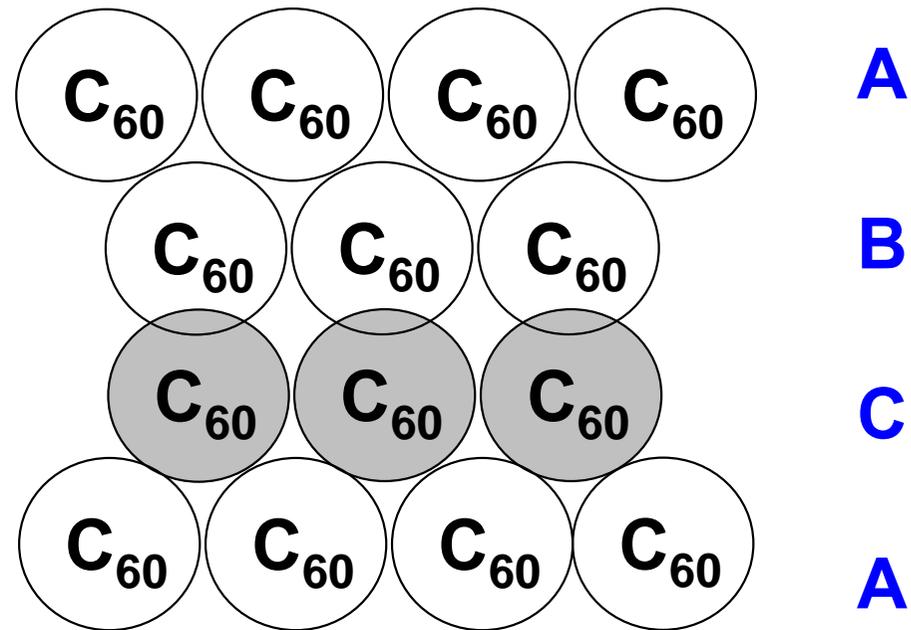
стабилен, 295 К:  $a=14.152 \text{ \AA}$ ,  
 $Fm\bar{3}m$ ,  $Z=4$  (4 молекулы C<sub>60</sub>,  
 ротационно разупорядочены);

<256 К:  $Fm\bar{3}m \rightarrow Pa\bar{3}$ ,  
 частичное упорядочение молекул

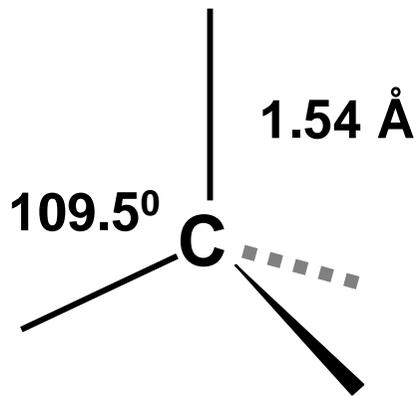


ГПУ-C<sub>60</sub>:

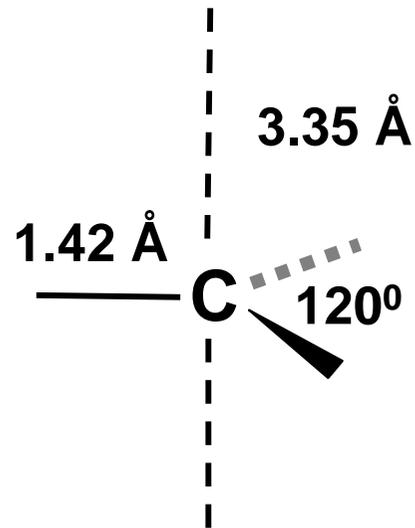
$P6_3/mmc$ ,  $c/a \approx 1.63$ ,  
 метастабилен, 295 К:  
 переход в ГЦК  
 $P6_3/mmc \rightarrow Fm\bar{3}m$



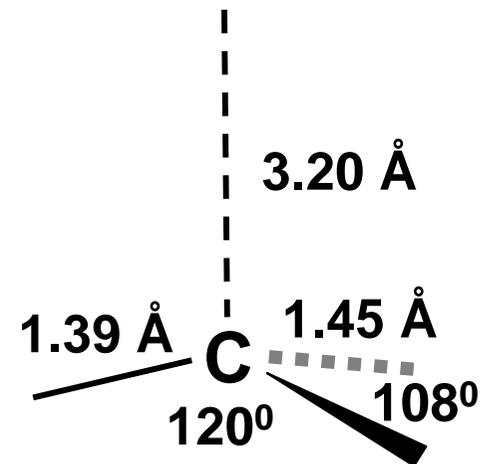
# Ближайшее окружение атома С в разных формах углерода



алмаз,  
лонсдейлит  
 $C(sp^3)$   
к.ч. 4



$\alpha$ -графит,  
 $\beta$ -графит  
 $C(sp^2)$   
к.ч. 3+2



фуллерен  $C_{60}$   
 $C(\sim sp^2)$   
к.ч. 3+1

# Еще одна форма углерода: КАРБИН

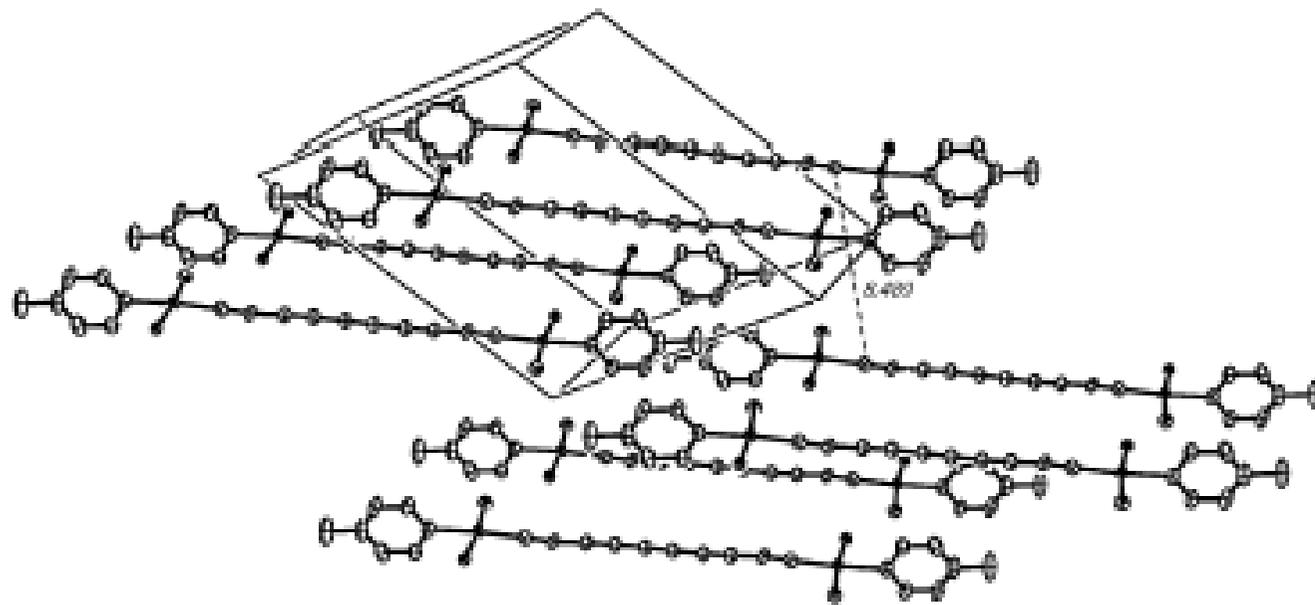
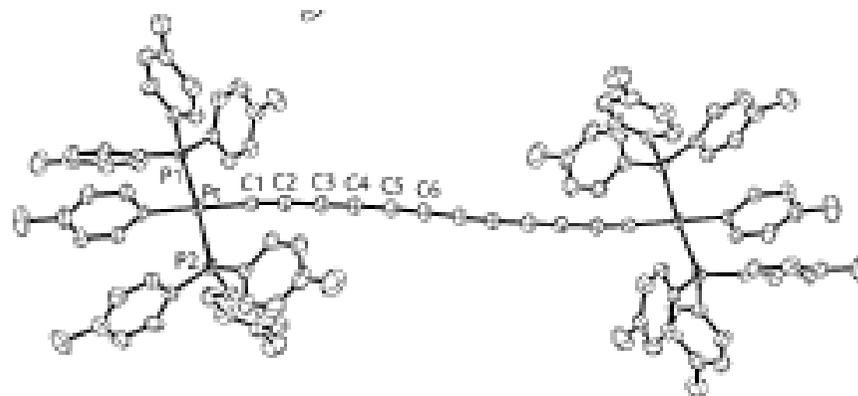
Белый или светло-серый, полимер, найден в метеоритах и кратерах вулканов, кристаллы чистого карбина не получены



Жидкий ацетилен  $\text{HC}\equiv\text{CH}$  взрывчат

Диацетилен  $\text{HC}\equiv\text{C}-\text{C}\equiv\text{CH}$  уже опасен!

Но карбиновую цепочку  $\dots-\text{C}\equiv\text{C}-\text{C}\equiv\text{C}-\dots$  можно **СТАБИЛИЗИРОВАТЬ**, если присоединить к ней атомы металла

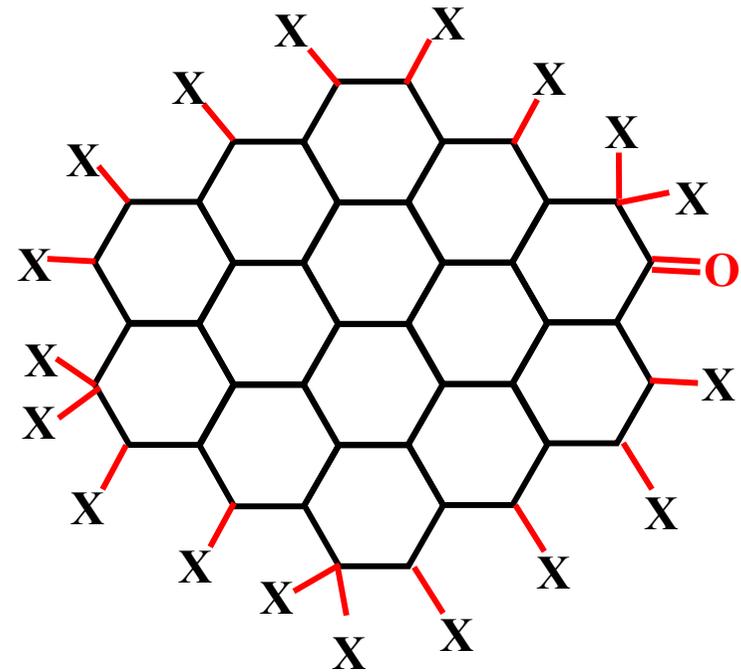
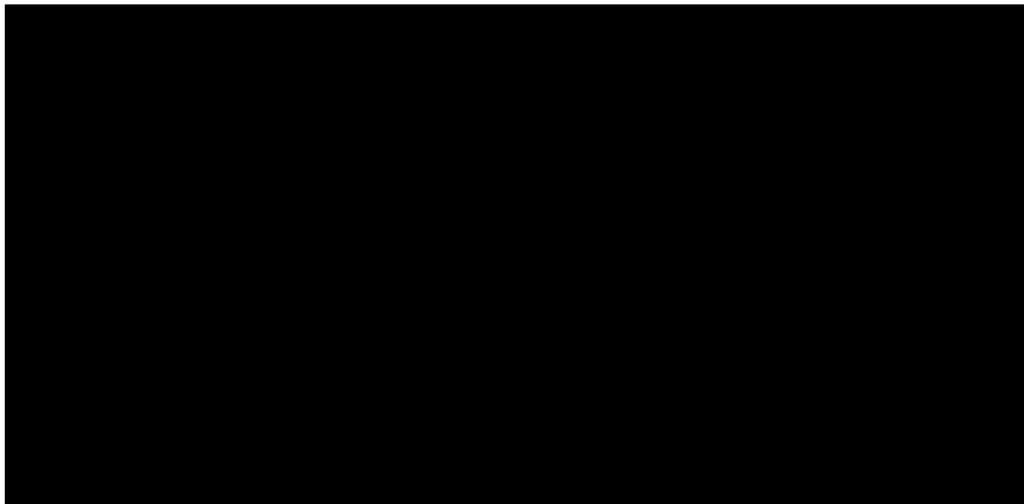


Олигомеры  $\text{C}_6 - \text{C}_{28}$   
Q. Zheng, et al.,  
*Chem. Eur. J.* 2006,  
**12**, 6486 – 6505

# Сажа

аморфный углерод (не образует кристаллов)

Получается при неполном сгорании или термическом разложении углеводородов. Состоит из микрочастиц, по структуре напоминающих графит. Обычно содержит 1-2 ат.% водорода. Проводит электрический ток, сгорает на воздухе, химически гораздо активнее графита и алмаза.



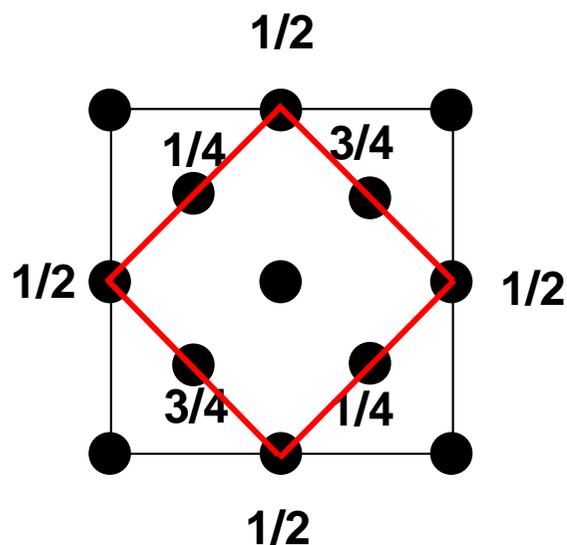
**X = H, OH, COOH и т.д**

# Кремний, германий, олово

Алмазоподобные  
кубические модификации

	X–X, Å	$\Delta E$ , эВ	
<b>C</b>	<b>1.54</b>	<b>5.2</b>	диэлектрик
<b>Si</b>	<b>2.34</b>	<b>1.1</b>	полупроводник
<b>Ge</b>	<b>2.44</b>	<b>0.67</b>	полупроводник
<b><math>\alpha</math>-Sn</b>	<b>2.80</b>	<b>0.08</b>	узкозонный полупроводник

**Si,  $p > 200$  кбар,  
Ge,  $p > 120$  кбар –  
тетрагональные, тип  $\beta$ -Sn,  
металлич. проводимость**



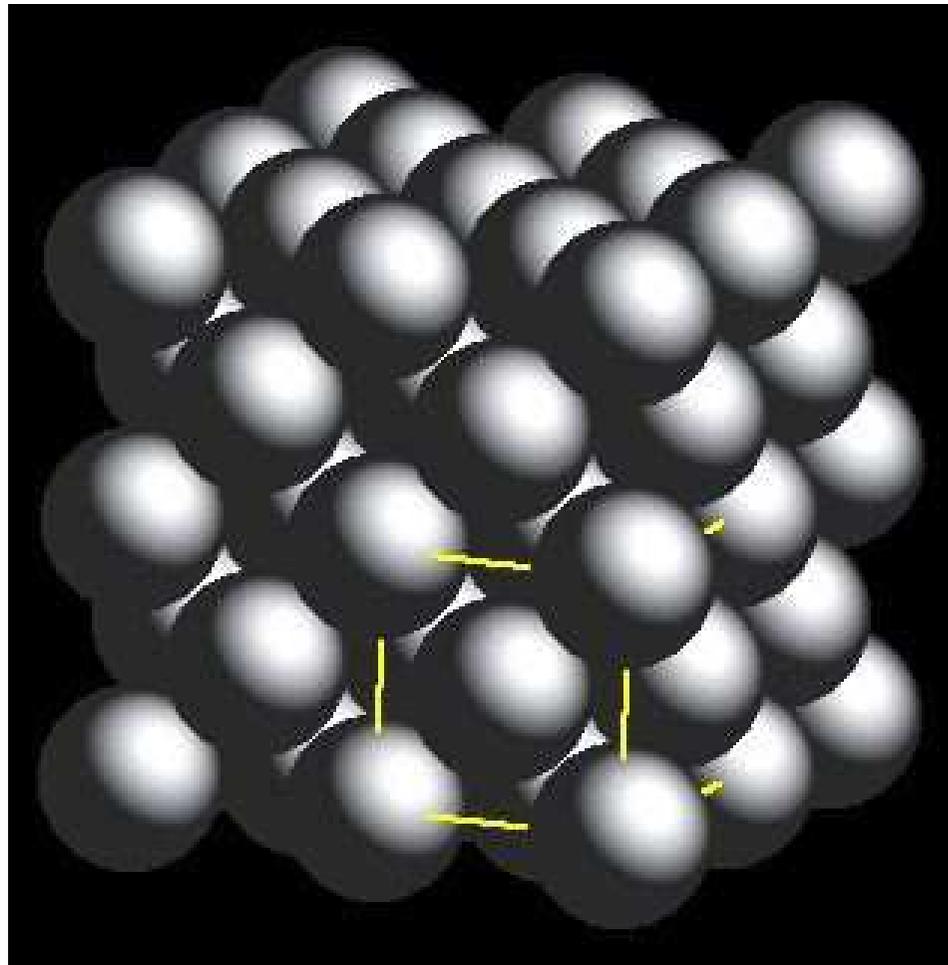
$\beta$ -Sn (белое олово, металл):  
сжатие  $\alpha$ -Sn вдоль  $c$ , Sn–Sn 3.02 ( $\times 4$ ) + 3.18 ( $\times 2$ ) Å

**$F d \bar{3} m \rightarrow I 4_1/amd$**

плотность:  $\alpha$ -Sn 5.75 г/см<sup>3</sup>,  $\beta$ -Sn 7.31 г/см<sup>3</sup>

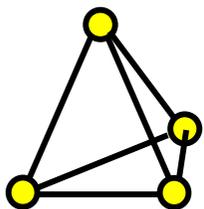
$\beta$ -Sn метастабильно ниже 13 °С,  
фазовый переход: «оловянная чума»

# Pb: металл, ГЦК



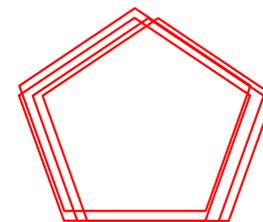
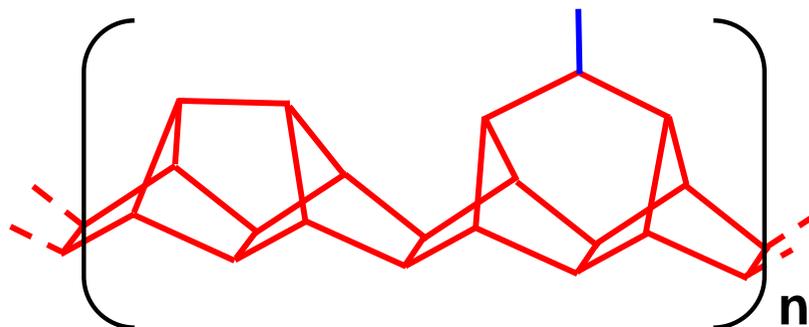
Элемент	C гр.	Si	Ge	$\beta$ -Sn	Pb
к.ч.	3(+2)	4	4	4+2	12
плотн. г/см <sup>3</sup>	2.2	2.3	5.3	7.3	11.3
$T_{пл}$ , °C	~4800	1415	937	773	327

# Фосфор



**белый:** метастабилен, триклинный, центры молекул  $P_4$  по ГЦК-мотиву

**красный:** стабилен, аморфный, фрагменты цепочек фиолетового фосфора

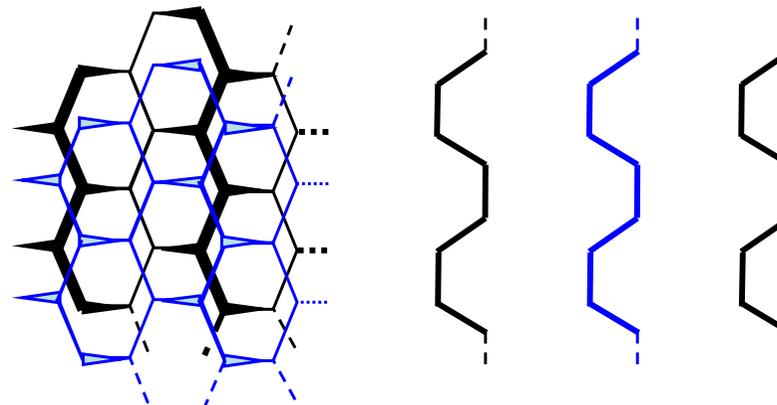


**фиолетовый (фосфор Гитторфа):** перекристаллизацией красного Р из жидкого Рb или Vi; моноклинный, связанные скрещенные «трубки» ...  $-P_2 - P_8 - P_9 - P_2 - \dots$ ; **волокнистый** (2005 г.): триклинный, параллельные связанные «трубки» ...  $-P_2 - P_8 - P_9 - P_2 - \dots$

**черный:** стабилен,  $Cmce$ ,  $Z=8$ , складчатые двойные слои ...ABAB... из «кресел» (2 проекции)

> 83 кбар: тип  $\alpha$ -As

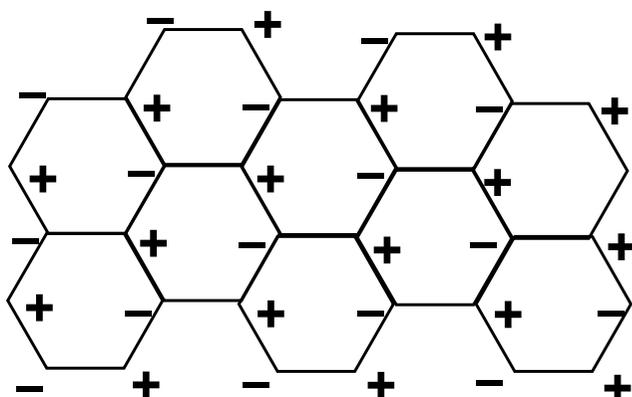
> 111 кбар: ПК (тип  $\alpha$ -Po)



# Мышьяк, сурьма, висмут

желтый мышьяк: молекулы  $As_4$

серый мышьяк ( $\alpha$ -As): R  $\bar{3}m$ , гофрир. слои, ...ABCABC...



X-X, Å    X...X, Å    X...X/X-X

<b>P</b>	<b>2.22</b>	<b>3.59</b>	<b>1.62</b>
<b>As</b>	<b>2.51</b>	<b>3.15</b>	<b>1.25</b>
<b>Sb</b>	<b>2.87</b>	<b>3.37</b>	<b>1.17</b>
<b>Bi</b>	<b>3.10</b>	<b>3.47</b>	<b>1.12</b>

сурьма, 1 бар: тип  $\alpha$ -As

> 85 кбар: тип  $\alpha$ -Po

>100 кбар: ГПУ

висмут, 1 бар: тип  $\alpha$ -As, но близок к  $\alpha$ -Po, к.ч. 3+3 (см. табл.)

черный фосфор: полупроводник

As, Sb, Bi: металлическая электропроводность

# Сера

$\alpha$ - $S_8$ : (орто)ромбическая,  
стабильна при  $T < 96^\circ\text{C}$

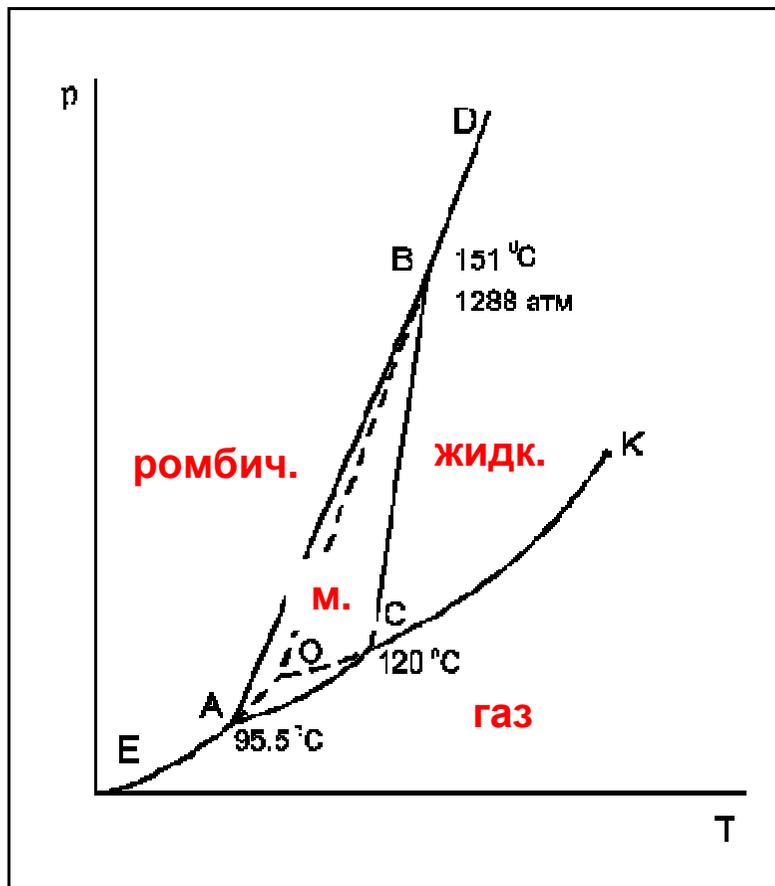
**Fddd, Z=16**

(молекулы в позициях 2)

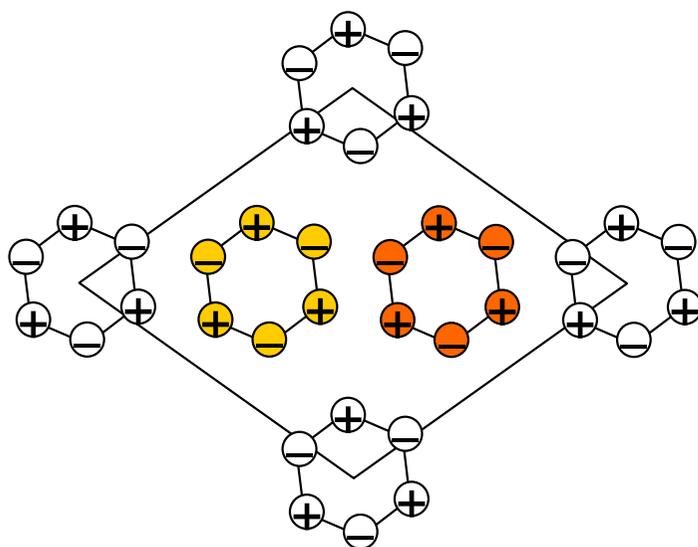
$\beta$ - $S_8$ : моноклинная,

**P2<sub>1</sub>/a, Z=6 (1,  $\bar{1}$ )**

стабильна при  $113 < T < 125^\circ\text{C}$



В.И.Путляев, В.В.Еремин

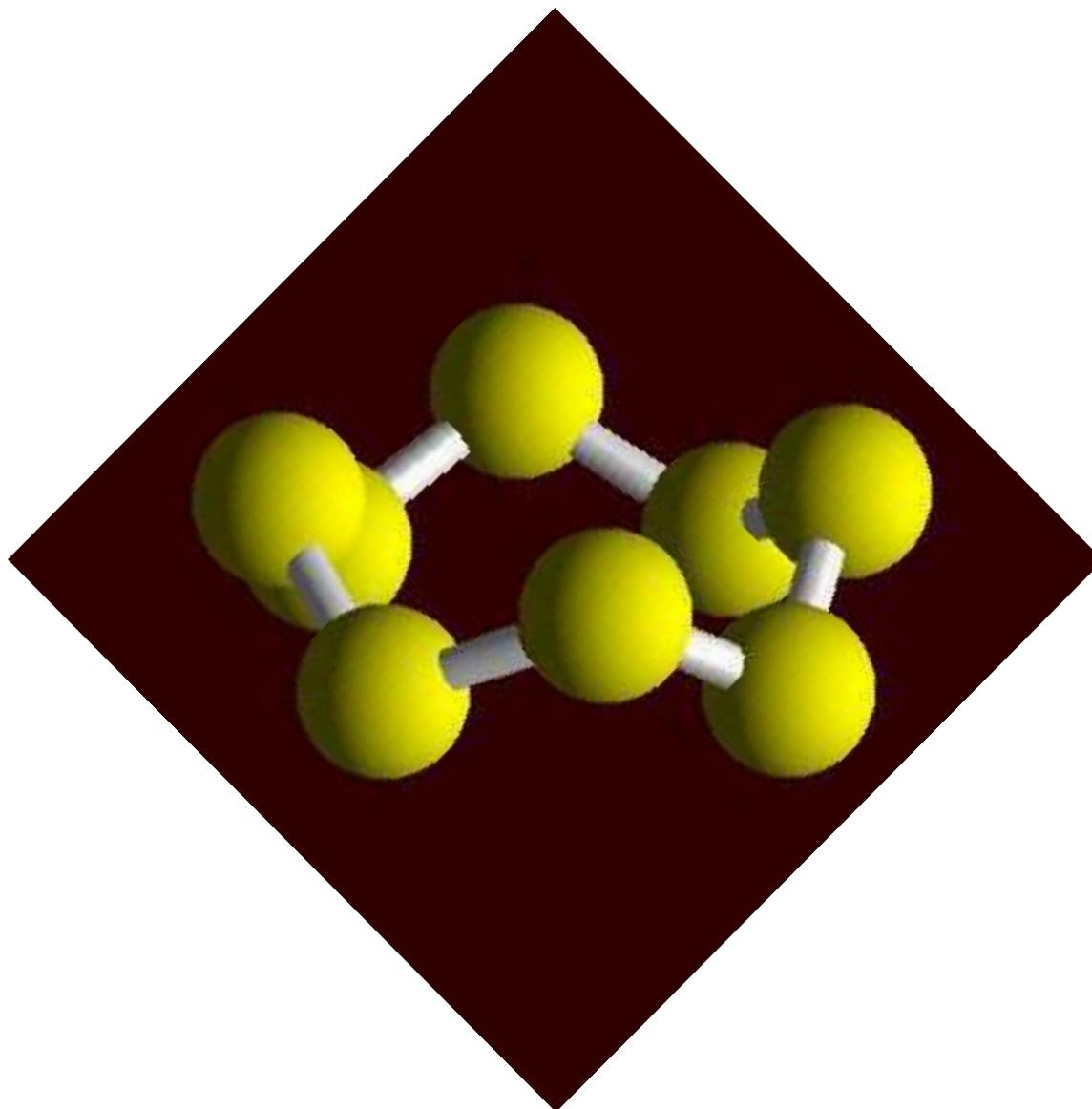


**$S_6$** : ромбоэдрическая сера, R  $\bar{3}$ , Z=6

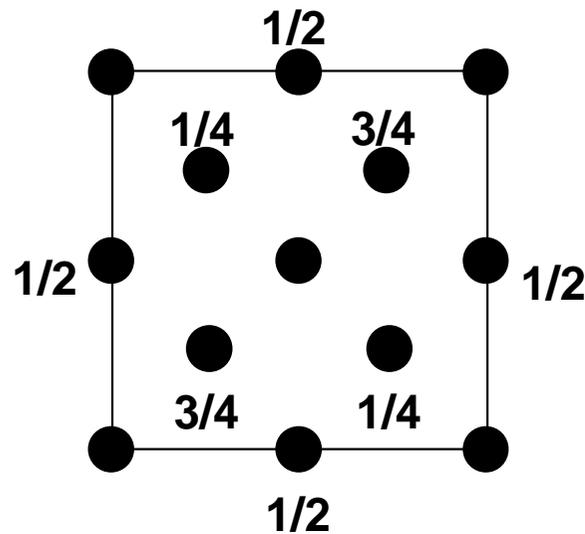
**$S_6 - S_{20}$** : аллотропные модификации  
(кристаллы из циклических молекул  $S_m$ )

Бесконечные цепочки  **$S_\infty$** : пластическая сера (аморфн.),  
волокнистая сера (кристаллич.)

Молекула  $S_8$ : «корона»,  $\bar{8}2m (D_{4d})$

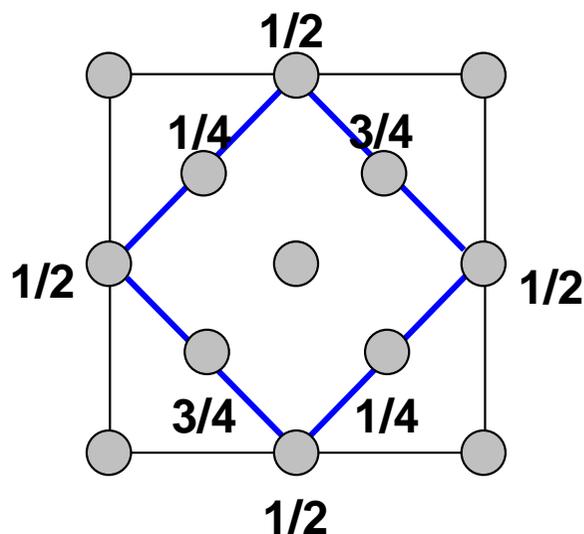


# Искажения решетки алмаза



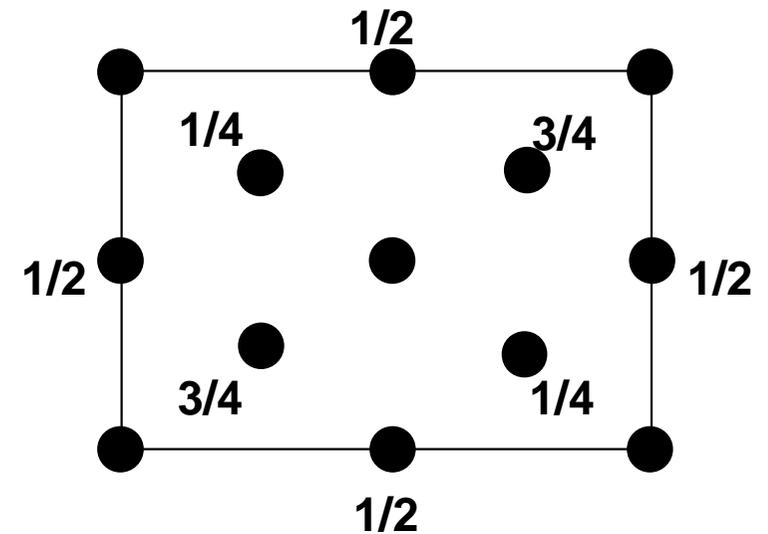
$F d \bar{3} m$

алмаз:  $Z=8$ ,  
позиция  $\bar{4}3m$



$I 4_1/amd$

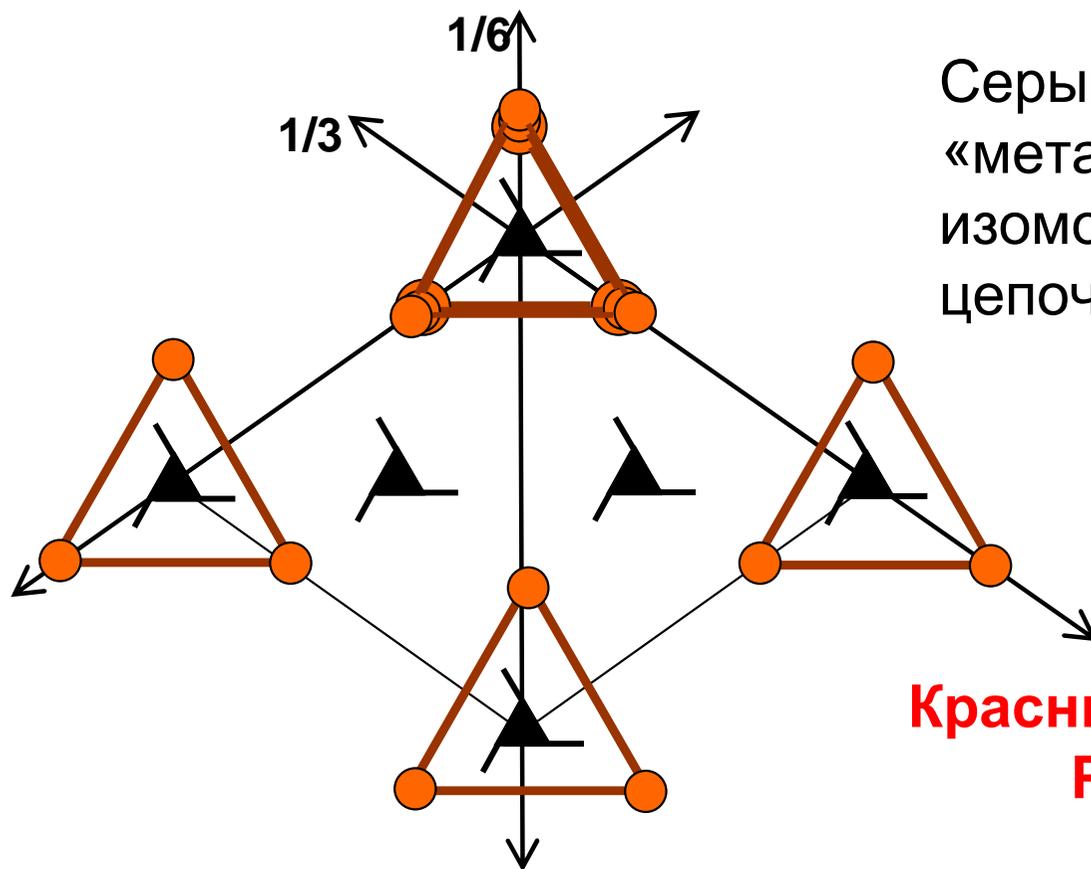
$\beta$ -Sn:  $Z=2$ ,  
позиция  $\bar{4}2m$



$Fddd$

$Z=8$ : позиция  $222$   
 $\alpha$ -S<sub>8</sub>:  $Z=16$ ,  
молекулы  
в позиции на оси 2

# Селен, теллур, полоний



Серый селен,  
«металлический» теллур:  
изоморфные кристаллы,  
цепочки  $\text{Se}_\infty$ ,  $\text{Te}_\infty$  вокруг осей  $3_1$

простр. группа  **$P 3_1 21$**

**Красный селен: моноклинный,  
 $P2_1/c$ , молекулы  $\text{Se}_8$**

	X-X, Å	X...X, Å	X...X/X-X
$\text{S}_8$	2.04	3.37	1.65
$\text{Se}_8$	2.34	3.35	1.43
серый Se	2.37	3.44	1.45
Te	2.84	3.50	1.23

$\alpha$ -Po: ПК, к.ч. 6,  
Po-Po 3.34 Å

# Простейшие ван-дер-ваальсовы кристаллы

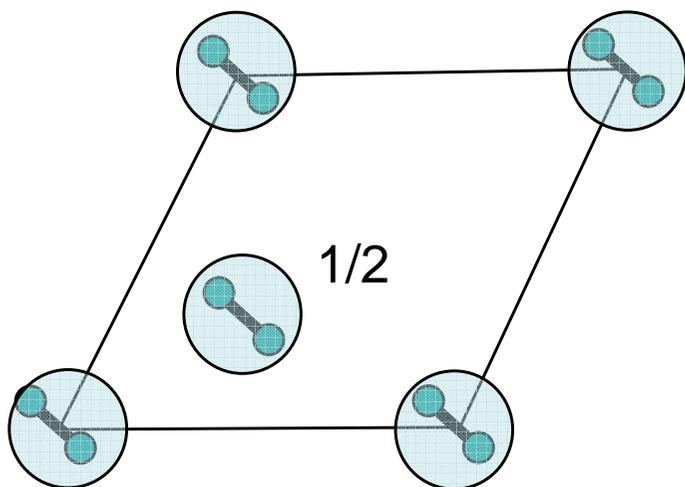
Инертные газы He (1.7K, 30 бар): ГПУ,  $P6_3/mmc$ ,  $Z=2$ ,  $a=3.65$ ,  $c=5.95$  Å  
Ne – Xe: ГЦК,  $Fm\bar{3}m$   $c/a = 1.629$

## Двухатомные молекулы

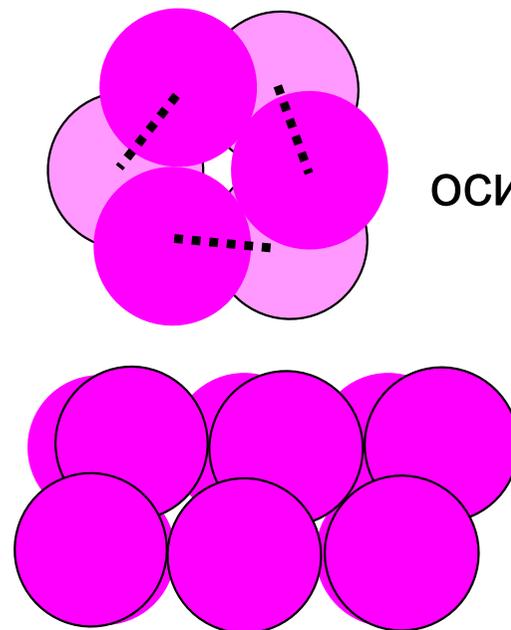
$H_2$  (4 K, 1 бар):  $P6_3/mmc$ ,  $Z=2$ ,  $a=3.78$ ,  $c=6.17$  Å

$\beta-N_2$  (50 K, 1 бар):  $P6_3/mmc$ ,  $Z=2$ ,  $a=4.04$ ,  $c=6.63$  Å

ротационная мезофаза,  
«ГПУ»



упорядоченные кристаллы:  
плотнейшая упаковка «гантелей»



**тип  $\alpha-N_2$**   
оси молекул скрещены

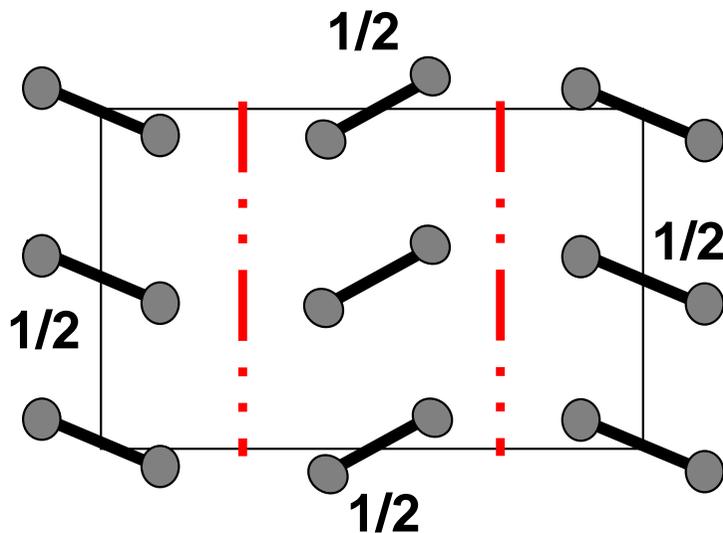
**тип  $Cl_2$**   
молекулы в слое  
наклонены в одну  
сторону

## Структурный тип Cl<sub>2</sub>

*Cmce*, Z=4

Cl<sub>2</sub>, Br<sub>2</sub>, I<sub>2</sub>, CS<sub>2</sub>

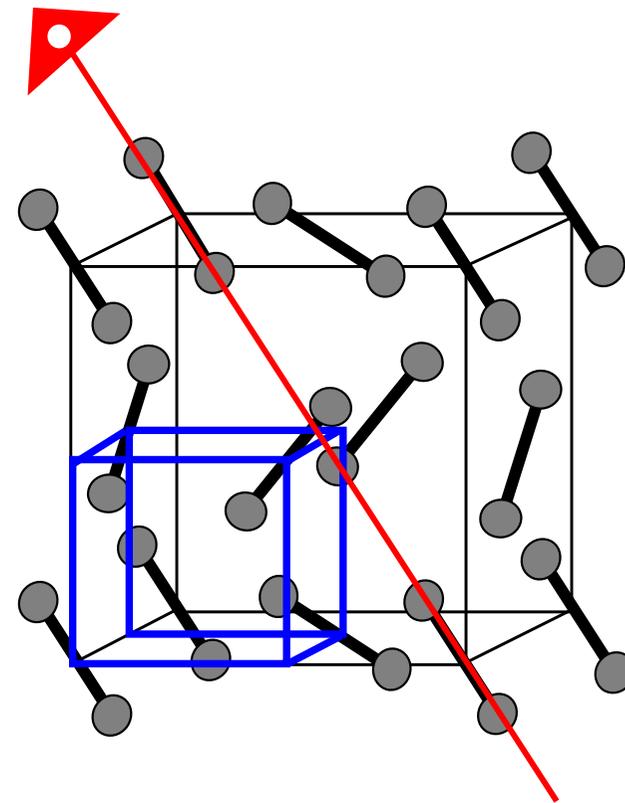
плоскости  $e = a, b$



## Структурный тип $\alpha$ -N<sub>2</sub>

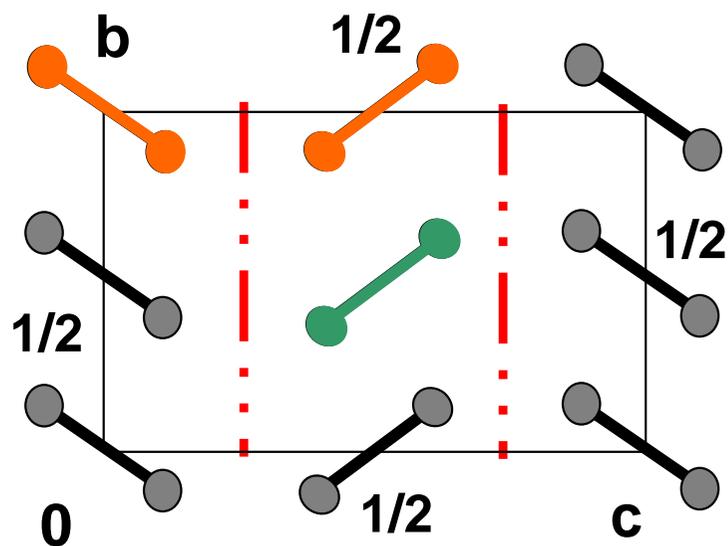
*Ra*  $\bar{3}$ , Z=4

оси A<sub>2</sub> по диагоналям октантов  
полиморфы N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>



	X-X, Å	X...X, Å в слое	X...X, Å межслоевое
Cl <sub>2</sub>	1.98	3.32	3.74
Br <sub>2</sub>	2.27	3.31	3.99
I <sub>2</sub>	2.67	3.50	4.27

# Плоскости **e** в структурном типе $CI_2$ (*Cmce*, $Z=4$ )



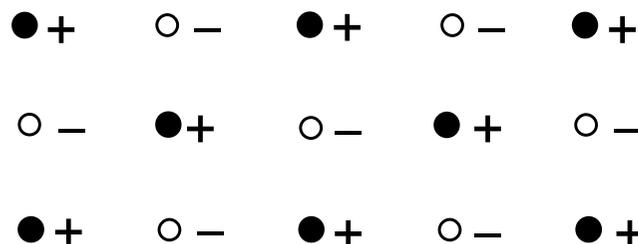
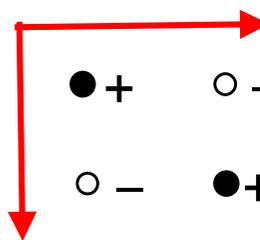
ПЛОСКОСТЬ *a*  
+  
ПЛОСКОСТЬ *b*

**ПЛОСКОСТЬ *e* = *a*, *b***

Графические обозначения и система эквивалентных позиций (см. лекцию 7)

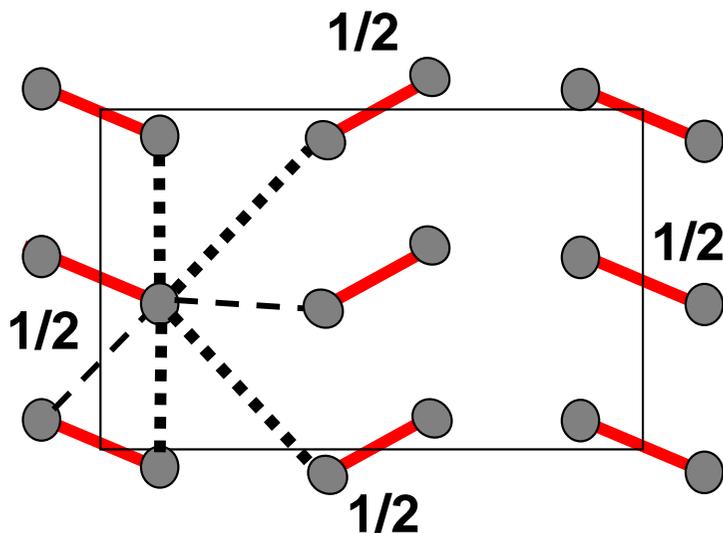


ПЛОСКОСТЬ **e**, перпендикулярная к плоскости рисунка



ПЛОСКОСТЬ **e**, параллельная плоскости рисунка

# Геометрическое подобие галлия и хлора



Ga,  $T_{пл} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$   
пр. гр. Cmce,  $Z=8$

к.ч. = 1 + 6

2.47 Å 2.70 – 2.79 Å

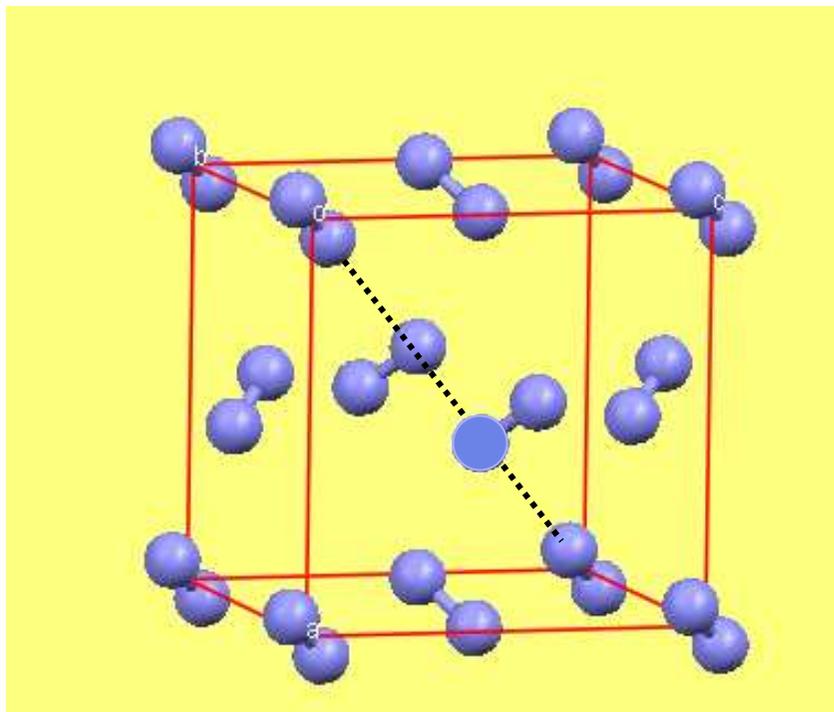
Cl<sub>2</sub>,  $T_{пл} = -101 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{кип} = -34 \text{ }^\circ\text{C}$   
пр. гр. Cmce,  $Z=4$

к.ч. = 1 + 10

(1.98 Å, 3.3 – 3.7 Å)

позиции атомов Ga –  
как в структурном типе Cl<sub>2</sub> !

# Упаковка молекул $N_2$ в $\alpha$ -азоте



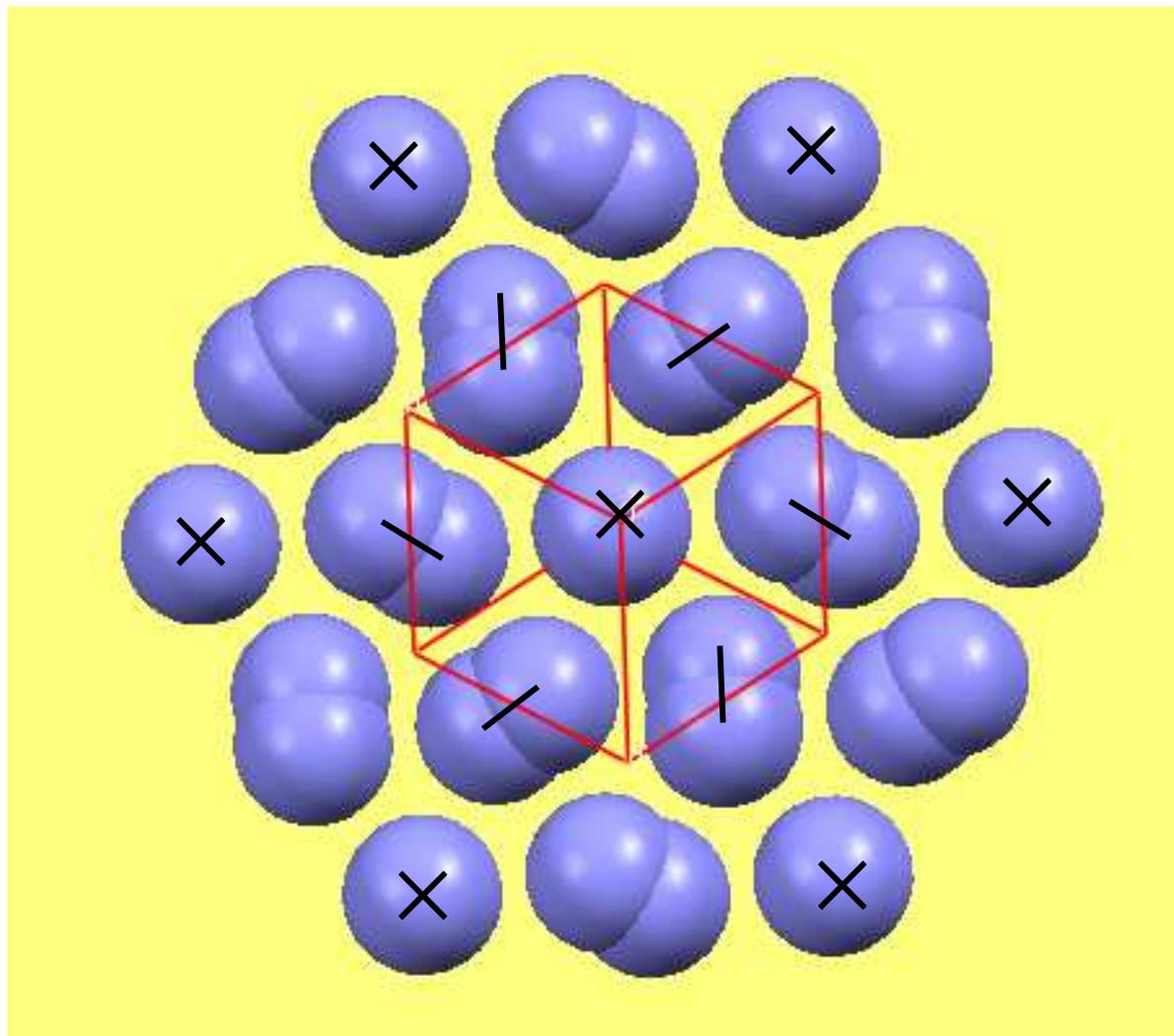
$\alpha$ - $N_2$ :  $T < 21$  K

$R\bar{3}$ ,  $Z=4$

$\beta$ - $N_2$ :  $21\text{K} < T < 63$  K

$R\bar{6}_3/mmc$ ,  $Z=2$

разупорядочен



$CO_2$ : тип  $\alpha$ - $N_2$ ;  $CS_2$ : тип  $Cl_2$

# Полиморфные модификации кислорода

O<sub>2</sub>, 1 бар:

90–55 К голубая жидкость

55–44 К  $\gamma$ -O<sub>2</sub> кубич.

44–24 К  $\beta$ -O<sub>2</sub> ромбоэдрич.

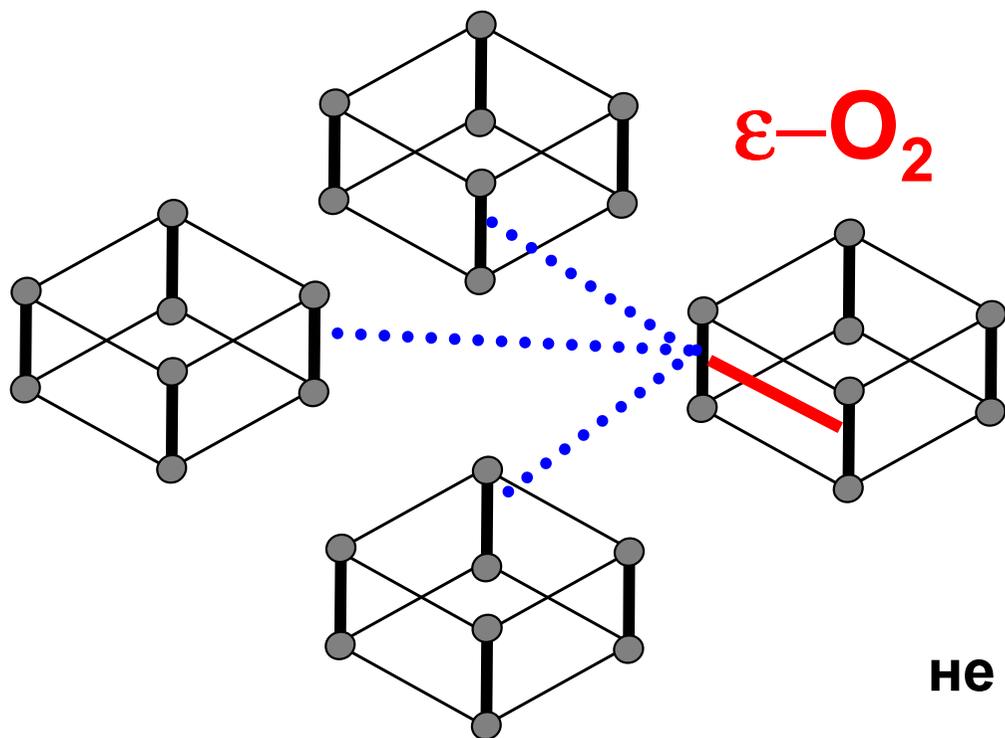
<24 К  $\alpha$ -O<sub>2</sub> монокл.

кислород, 300 К

~100 кбар  $\delta$ -O<sub>2</sub>, оранжевые кристаллы

100 – 960 кбар  $\epsilon$ -O<sub>2</sub> темно-красные

>960 кбар  $\zeta$ -O<sub>2</sub> металлический



O–O : 1.20–1.21 Å

2.18 – 2.19 Å

2.57 – 2.61 Å

$O_8 = (O_2)_4$

РОМБОИД (*mmm*)

не путать с ромбоэдром!

# Мотивы расположения атомов в неметаллах

## Группы элементов-аналогов

Мотив	C	N	O	F
0D	фуллерены	$N_2, P_4, As_4$	$O_2, S_n, Se_8$	$X_2 (X=F, Cl, Br, I)$
1D	нанотрубки, карбин	фосфор Гитторфа	волокнистая сера; серый Se; Te	–
2D	$\alpha$ - и $\beta$ -графит	черный P, серый As; Sb	–	–
3D	алмаз (Si, Ge, $\alpha$ -Sn), лонсдейлит	фазы P и As высокого давления	$\alpha$ -Po	–
аморф- ные	сажа	красный P	пластическая сера (цепочки)	–

# Невалентные контакты X...X в неметаллах

	X-X, Å	X...X в слое	X...X межсл.	X...X / X-X
Cl <sub>2</sub>	1.98	3.32	3.74	1.68
Br <sub>2</sub>	2.27	3.31	3.99	1.46
I <sub>2</sub>	2.67	3.50	4.27	1.31

	X-X, Å	X...X	X...X / X-X
S <sub>8</sub>	2.04	3.37	1.65
Se <sub>8</sub>	2.34	3.35	1.43
серый Se	2.37	3.44	1.45
Te	2.84	3.50	1.23

	X-X, Å	X...X	X...X / X-X
P	2.22	3.59	1.62
As	2.51	3.15	1.25
Sb	2.87	3.37	1.17
Bi	3.10	3.47	1.12

усиление  
невалентных  
взаимодействий  
для тяжелых  
элементов  
в подгруппе

# Дисперсионные силы в неметаллах

