

# 第二章.材料的结构

## § 2.常见的晶体结构

### 一. 晶体化学基本原理

#### 1. 原子半径与离子半径

有效半径:

晶体结构中原子或离子处于相接触时的半径; 原子或离子间的静电引力和斥力达到平衡。

离子晶体：正负离子相接触的中心距，即为正负离子半径和。

共价晶体：相邻键合的中心距，即是两原子共价半径之和。

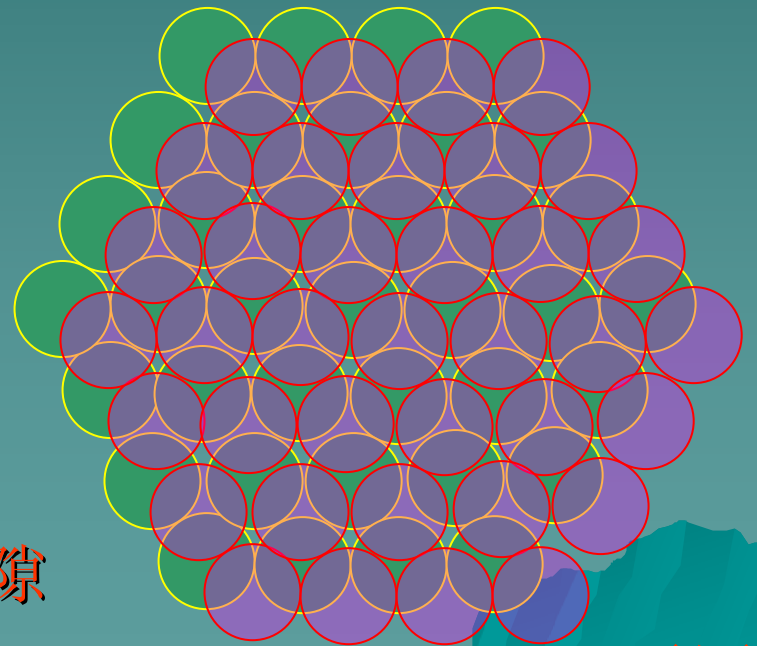
金属晶体：相邻原子中心距的一半，即是金属原子半径。

## 2. 球体紧密堆积原理

### 等大球体的紧密堆积

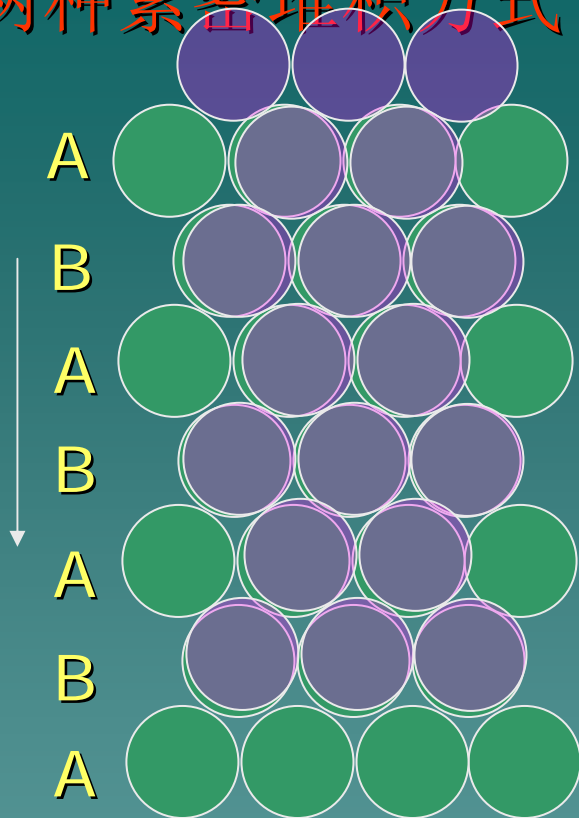
两种空隙：未穿透两层的空隙

连续穿透两层的空隙

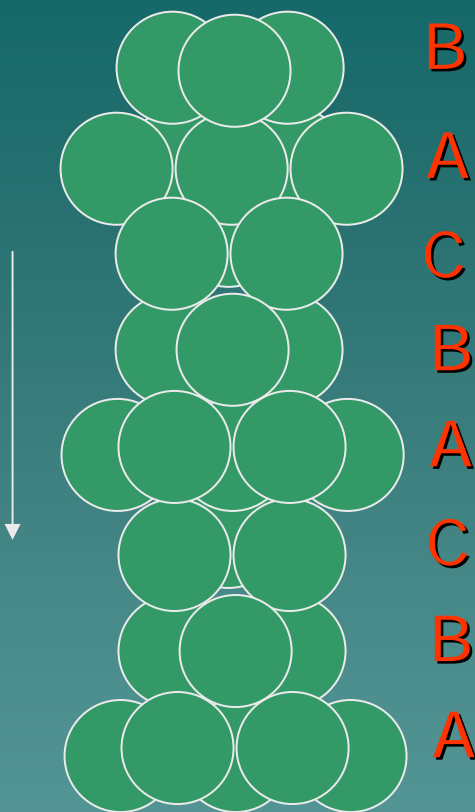


两层

# 球体的两种紧密堆积方式

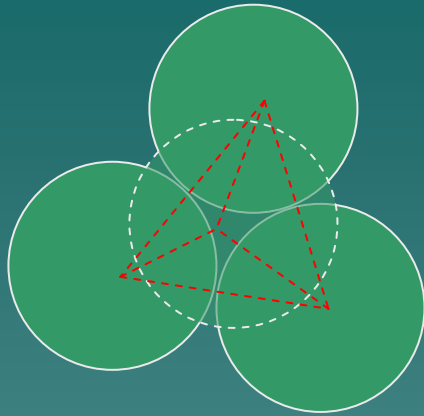


六方紧密堆积

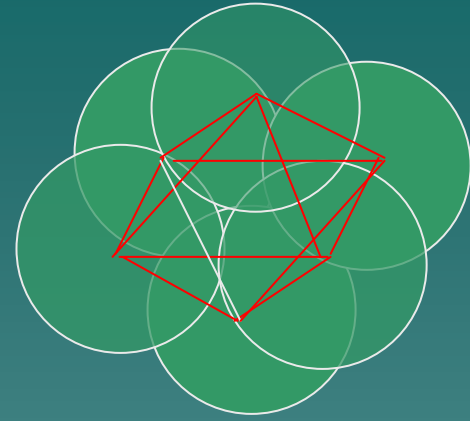


面心立方紧密堆积

形成两种空隙：八面体空隙，四面体空隙



四面体空隙



八面体空隙

## 不等大球体的紧密堆积

如离子晶体：负离子半径大于正离子半径，负离子作紧密堆积，正离子填充于其空隙中。



# Crystal Structures

## 1. Close-packed crystal structures

### 1.1 The packing of equal-sized spheres

- ◆ 能量最低原则：球体堆积密度愈大，系统内能愈小

# 密堆积的形式

六方密堆积

ABAB...

$A_3$

*hcp*

Hexagonal

Closest

Packing

立方密堆积

ABCABC...

$A_1$

*ccp*

Cubic Closest

Packing

**FCC**

Face-centered  
cubic

体心堆积

$A_2$

*bcc*

Body

centered

cubic

# 密堆积的空隙

- ◆ 四面体空隙
- ◆ 三顶一
- ◆ 二垂直二

- ◆ 八面体空隙
- ◆ 一四一
- ◆ 上三下三

空隙数目：

$$\frac{n \times 8}{4} = 2n$$

空隙数目：

$$n \times 6/6 = n$$



### 3. 原子和离子的配位数

一个原子或离子邻近周围的原子或异号离子的个数称为原子或离子的配位数：CN

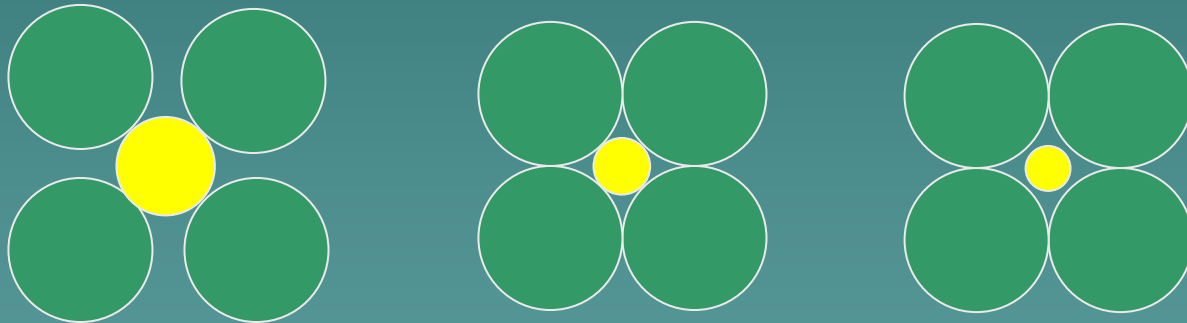
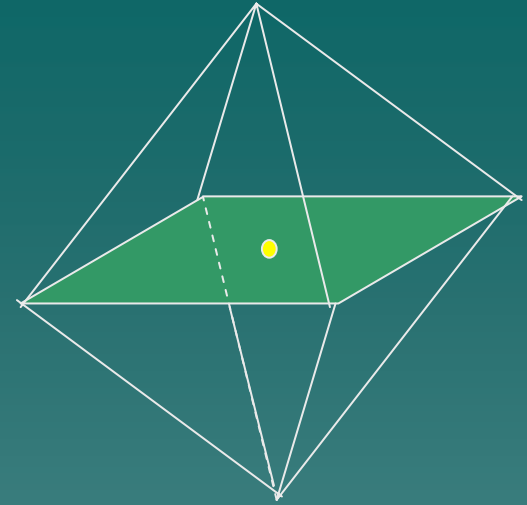
例：NaCl晶体中， $\text{Na}^+$ 周围有6个 $\text{Cl}^-$ ，即CN=6

半径对配位数的影响：

(1) . 正负离子半径与配位数的关系

CN	负离子多面体	半径比: $R_+/R_-$
2	哑铃型	0~0.155
3	三角形	0.155~0.225
4	四面体	0.225~0.414
6	八面体	0.414~0.732
8	立方体	0.732~1

(2). 八面体中离子半径比对晶体稳定性影响。



说明： a. 离子半径比数值大配位数大；  
b. 负负相离，正负相接最稳定。

## 临界半径比的计算:

密堆积的负离子恰好互相接触，并与中心的正离子也恰好接触的条件下，正离子半径与负离子半径之比。

例:

(1).四面体形:  $r^+/r^-$

如图，求紧密堆积时可容纳的最大正离子半径与负离子半径之比，负离子是互相接触的，正负离子也是互相接触的。

$$AO = r_+ + r_-, \quad AB = 2r_-,$$

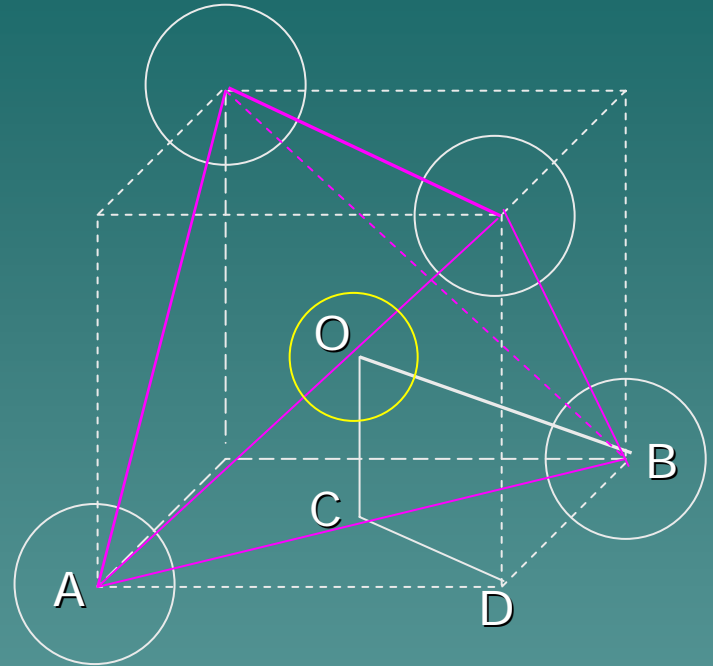
$$AC = r_-, \quad AD = \sqrt{2} r_-,$$

$$OC = \frac{\sqrt{2}}{2} r_-,$$

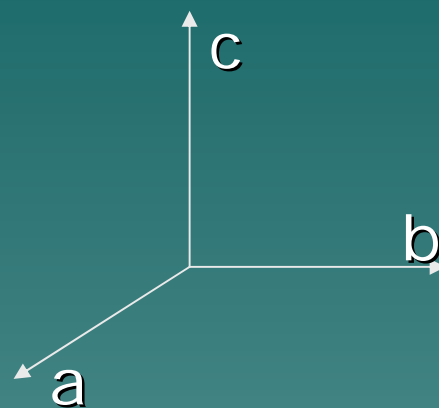
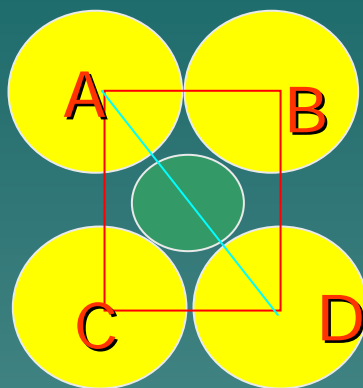
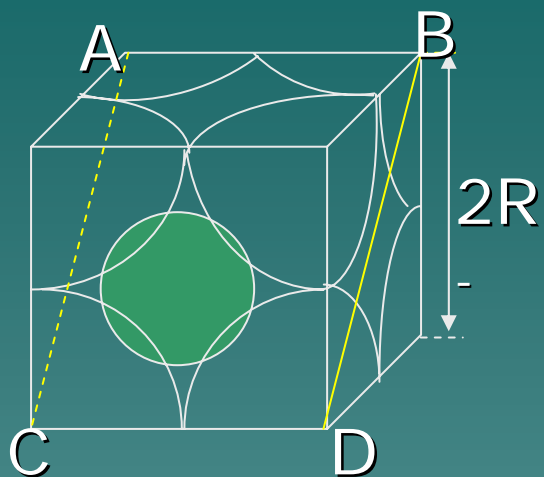
$$AC^2 + CO^2 = AO^2,$$

$$r_-^2 + \left(\frac{\sqrt{2}}{2} r_-\right)^2 = (r_- + r_+)^2,$$

$$\frac{3}{2} = \left(1 + r_+/r_-\right)^2 \quad r_+/r_- = \sqrt{\frac{3}{2}} - 1 = 0.225,$$



## (2).立方体形: $r^+/r^-$



(101)面通过正离子中心，负离子在AB上相接触，沿对角线方向BD不接触。

$$BD^2 = (2R_-)^2 + (2R_-)^2; \quad BD^2 + AB^2 = AD^2;$$

$$2(2R_-)^2 + (2R_-)^2 = [2(R_+ + R_-)]^2;$$

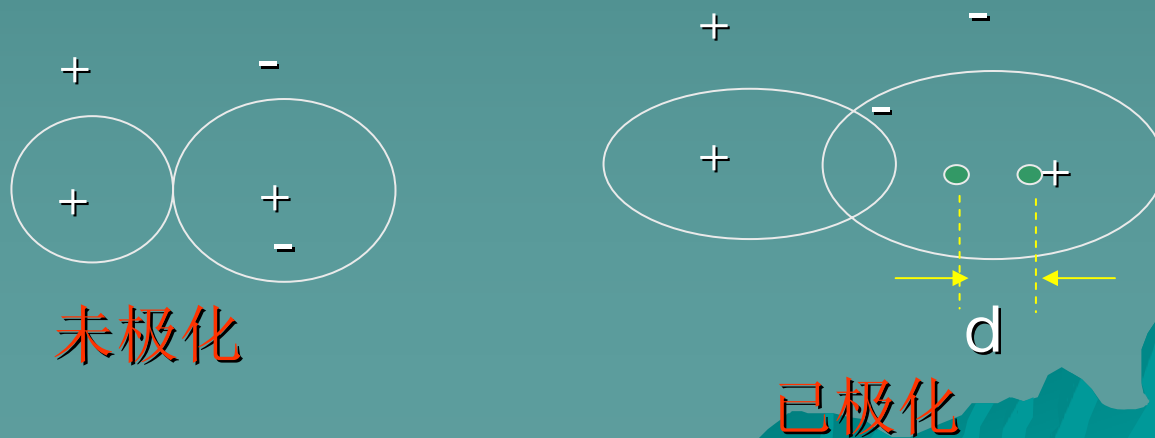
$$3(R_-)^2 = (R_+ + R_-)^2;$$

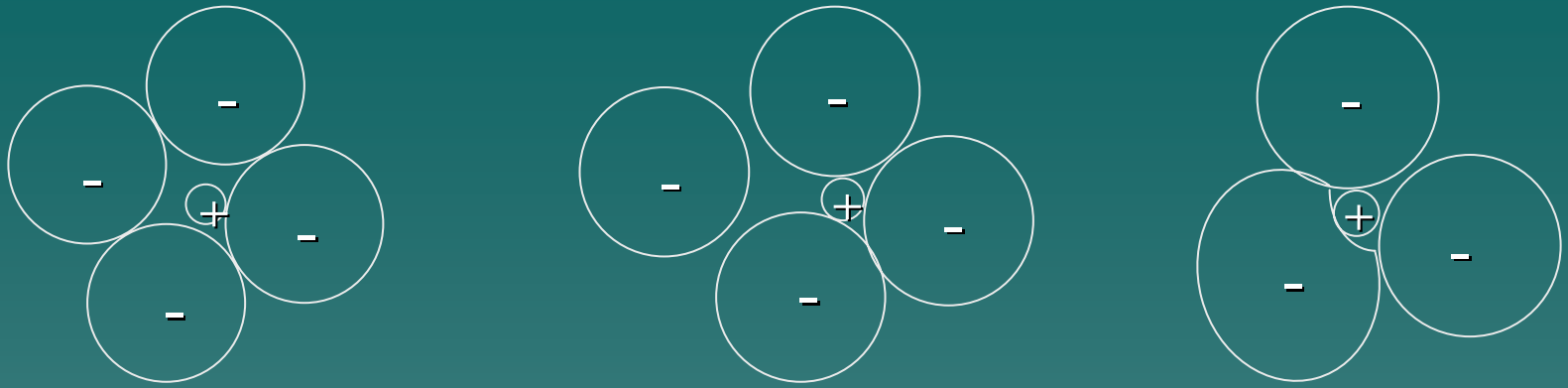
$$\frac{R_+}{R_-} = \sqrt{3} - 1 = 0.732$$

配位数不是绝对的，还受温度，压力，极化等情况的影响。

## 4. 离子的极化

在离子紧密堆积时，带电荷的离子所产生的电场，对另一离子的电子云发生作用，使其离子的大小和形状发生变化，即为极化现象。





如图中极化使原来带负电荷离子电子云发生变形，并使正负电荷中心分离，产生诱导偶极矩。

极化率：每个离子自身被极化的难易程度；

极化力：极化其它离子的能力。

正离子半径小，电价高，极化力表现突出，

如  $\text{Na}^+, 1.07; \text{Mg}^{2+}, 0.66; \text{Al}^{3+}, 0.47.$

负离子半径大，电价小的极化率突出，也即容易  
易被正离子极化，

如  $\text{Br}^-, 1.88; \text{I}^-, 2.13; \text{Al}^{3+}.$

**极化对晶体结构的影响：**



CN=6: 0.414~0.732

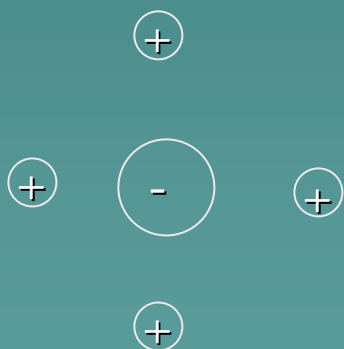
	AgCl	AgBr	AgI
$r_+ / r_-$	1.23/1.72 =0.715	1.23/1.88 =0.654	1.23/2.13 =0.577

配位数

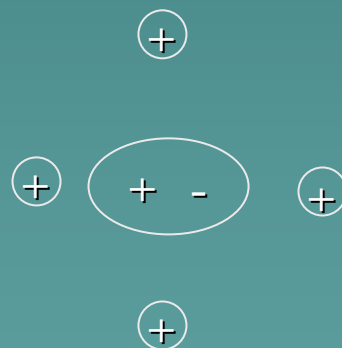
6

6

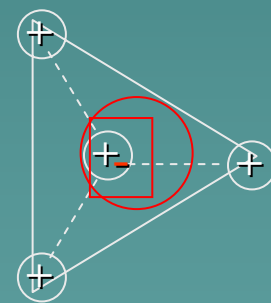
4



六配位



极化



四配位: 立方ZnS

{ 极化降低了离子配位数;  
极化导致键型从离子键过渡到共价键。

## 5. 结晶化学定律

哥希密特定律：晶体的结构取决于质点的数量关系，大小关系与极化性能。

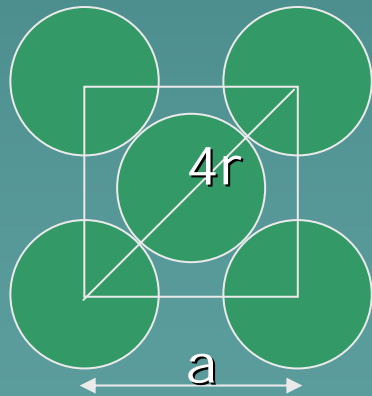
质点的数量关系，如：

$\text{TiO}_2$ :  $\text{AX}_2$ 型化合物，金红石型结构 1:2

$\text{Al}_2\text{O}_3$ :  $\text{A}_2\text{X}_3$ 型化合物，刚玉型结构 2:3

其中Ti:O为1: 2, Al:O (2: 3) , 质点的数量在此的体现不同, 大小关系是指离子半径比, 因此影响到配位数, 极化性能主要也是影响配位数。

例: 求面心立方密堆积的空间利用率:



解: (1). 求 $V_c$ ,

$$(4r)^2 = a^2 + a^2 \rightarrow 16r^2 = 2a^2, \text{ 即 } a = 2\sqrt{2}r$$

$$V_c = a^3 = (2\sqrt{2}r)^3 = 16\sqrt{2}r^3$$

(2). 求  $V_b$ ,

$$V_b = N * V, \quad N = 1/2 * 6 + 1/8 * 8 = 4$$

$$V_b = 4 * 4/3 \pi r^3 = 16/3 \pi r^3$$

(3).

$$\eta = \frac{V_b}{V_c} = \frac{\frac{16}{3} \pi r^3}{16 \sqrt{2} r^3} = \frac{\sqrt{2} \pi}{6} = 0.7405 = 74.05 \%$$

## 二. 典型金属的晶体结构

### 1. 原子紧密堆积方式

**面心立方结构：**属于面心立方紧密堆积

ABCABCABC.....: Al, Ni, Ag等

**密排六方结构：**属于六方紧密堆积

ABABAB.....: Be, Mg, Zn等

立方体心结构：属于体心立方紧密堆积

Nb,Mo,Cr等

## 2.原子的配位数与空隙

a.配位数	面心立方结构	12
	密排六方结构	12
	立方体心结构	8

b.空隙(间隙)

面心立方结构

n个八面体空隙： $r_b/r_a=0.225$

2n个四面体空隙： $r_b/r_a=0.414$

密排六方结构 {  $2n$ 个四面体空隙:  $r_b/r_a=0.225$   
 $n$ 个八面体空隙:  $r_b/r_a=0.414$

体心立方结构 { 四面体空隙:  $r_b/r_a=0.29$   
八面体空隙:  $r_b/r_a=0.15$

$r_a$ : 金属半径原子;  $r_b$ : 空隙半径。

### 3. 点阵常数与原子半径之间关系

晶胞3个棱边长度 ( $a, b, c$ ) 称为点阵常数或晶格常数。

## 4. 一个晶胞占有的原子数目

面心立方结构: 4  $\left( 000, \frac{1}{2} \frac{1}{2} 0, \frac{1}{2} 0 \frac{1}{2}, 0 \frac{1}{2} \frac{1}{2} \right)$

密排六方结构: 2  $\left( 000, \frac{2}{3} \frac{1}{3} \frac{1}{2} \right)$

立方体心结构: 2  $\left( 000, \frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2} \right)$

## 5. 堆积系数(K) $K=V/V_0$

$V$ : 一个晶胞中原子所占的体积

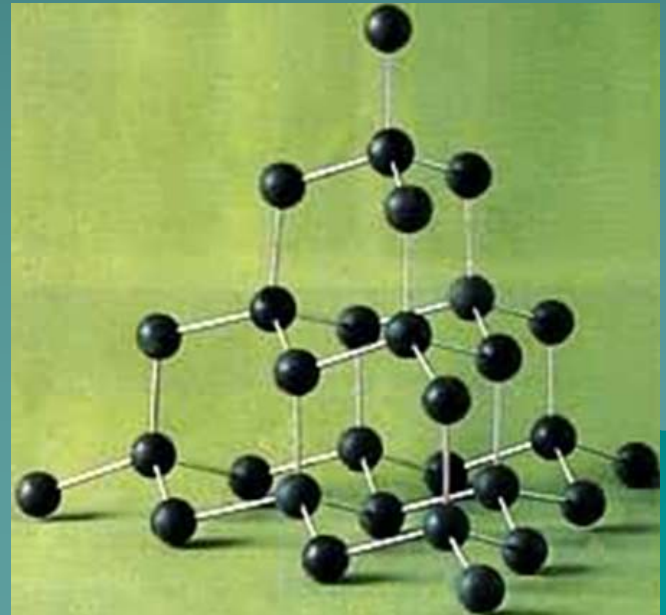
$V_0$ : 一个晶胞的体积



### 三. 共价晶体结构

元素周期表中IV, V, VI族元素, 许多无机非金属材料 and 聚合物都是共价键结合。共价晶体的共同特点是配位数服从8-N法则, 就是说结构中每个原子可形成8-N个键。共价晶体最典型的代表即为金刚石结构。

金刚石结构中每个碳原子具有4个等距离(0.154nm)的最近邻原子, 全部按共价键结合, 符合8-N规则。晶体结构属于

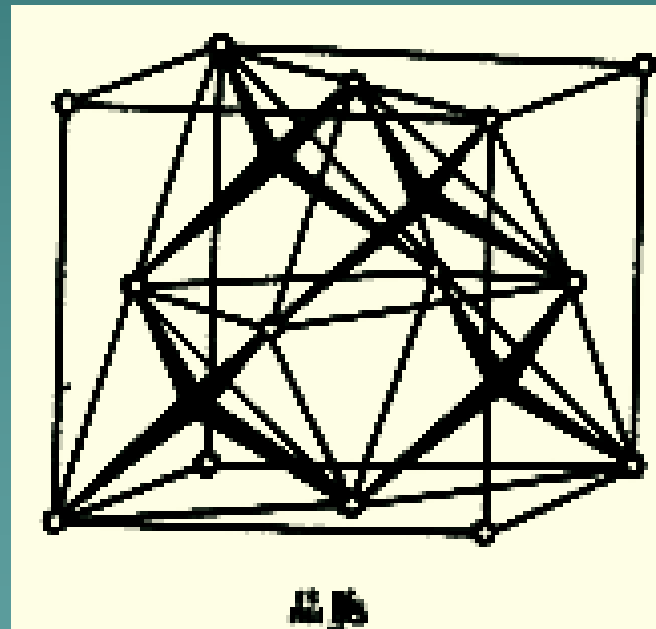


金刚石结构

复杂的面心立方结构，碳原子除按通常的fcc排列外，立方体内还有4个原子：

$$\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}, \frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4}, \frac{3}{4} \frac{1}{4} \frac{3}{4}, \frac{1}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4}$$

相当于晶体内其中四个四面体间隙的位置。故晶胞内共含8个原子。



## 四. 离子晶体结构

(1) 晶体半径:

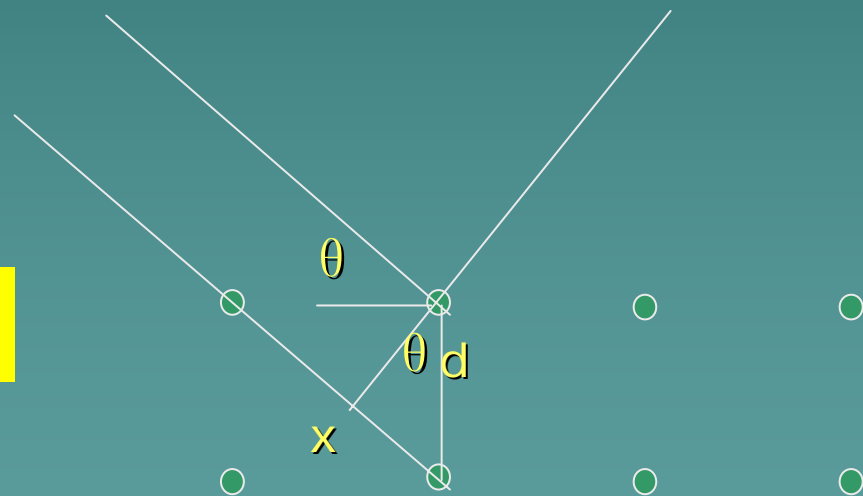
$$r_0 = r_{Na^+} + r_{Cl^-}$$

a. 定义: 两离子从远处向一起靠拢时斥力与引力平衡时的半径。

b. 测定方法:

$$\sin \theta = \frac{x}{d}$$

$$x = d \cdot \sin \theta$$

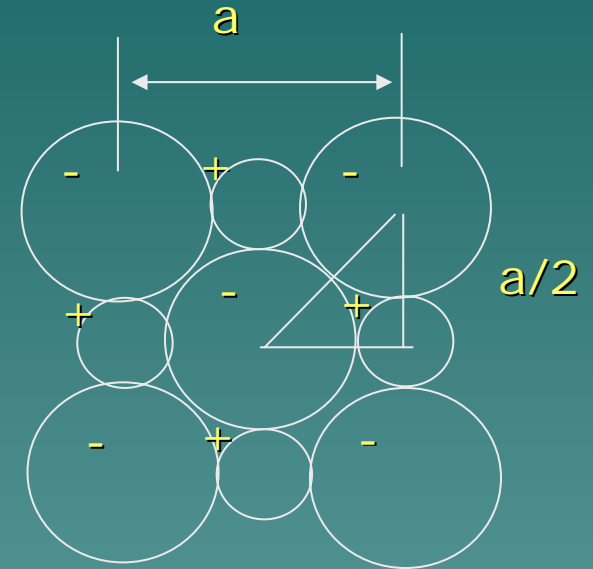


$$\text{光程差} = 2x = 2d \cdot \sin \theta = n\lambda$$

布拉格定律

# Linde 1920年测得NaCl型结构的化合物的晶胞参数a/2

	a/2 (nm)		a/2 (nm)
MgO	0.210	MnO	0.224
MgS	0.260	MnS	0.259
MgSe	0.273	MnSe	0.273



可以看出S化物和Se化物中负离子已经互相接触

$$(2r_s)^2 = \left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2, 4r_s^2 = \left(\frac{a}{2}\right)^2 \cdot 2, r_s = \frac{2.60}{\sqrt{2}} = 1.84 \text{ \AA}$$

例题：测得BeO,  $Al_2O_3$ ,  $BeAl_2O_4$ 摩尔体积分别为  
8.44 $cm^3$ , 26.0 $cm^3$ , 34.6 $cm^3$ , 请推出氧的离子  
半径(已知氧堆积方式为面心立方堆积)

解：(1). 体积为1:3:4, 符合氧含量比, 说明氧基本  
符合密堆积方式, 而Be, Al填充在空隙中;

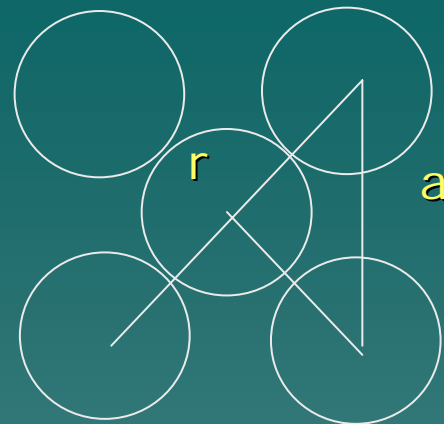
(2).  $(2r)^2 + (2r)^2 = a^2, a = 2\sqrt{2}r$ , 晶胞体积:  $V = a^3 = (2\sqrt{2}r)^3$

(3). 每个O的容积: 每个晶胞中所含氧离子的个

数:  $1/2 * 6 + 1/8 * 8 = 4$ , 故  $V_o = \frac{1}{4}V = \frac{1}{4}(2\sqrt{2}r)^3 = 4\sqrt{2}r^3$

#### (4). 氧离子半径:

$$V_N = N \cdot V_o, \text{由 } 8.44 \text{cm}^3 = 6.022 \times 10^{23} \times 4\sqrt{2}r^3, \\ \text{得: } r = 0.135 \text{nm}$$



### 五. 常见无机化合物晶体结构

1. *NaCl*型结构 立方晶系:  $F m\bar{3}m$

面心立方

垂直a有一对称面

沿a+b+c有一3次轴

垂直a+b有一对称面

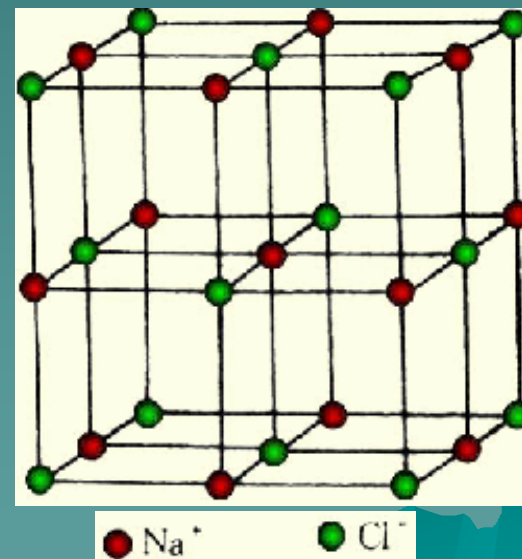


图 2.52 NaCl 晶体结构

配位数 Na: CN=6, Cl: CN=6

分子数 Na:  $\frac{1}{4} * 12 + 1 = 4$ , Cl:  $\frac{1}{8} * 8 + \frac{1}{2} * 6 = 4$ , 即Z=4

Na: 在棱心位置,  $[[00\frac{1}{2}]]$ ,  $[[\frac{1}{2}00]]$ ,  $[[0\frac{1}{2}0]]$ ,  
 $[[\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}]]$

Cl:  $[[000]]$ ,  $[[\frac{1}{2}\frac{1}{2}0]]$ ,  $[[0\frac{1}{2}\frac{1}{2}]]$ ,  $[[\frac{1}{2}\frac{1}{2}0]]$

堆积方式: ABCABC, 立方密堆积,

晶胞参数:  $a=0.564\text{nm}$ .

例题： (a). 求NaCl晶体的理论密度； (b). 画出(111)面原子排布； (c). 指出四面体空隙的位置。

解题： (a). NaCl的分子量为 $M=58.5\text{g/mol}$

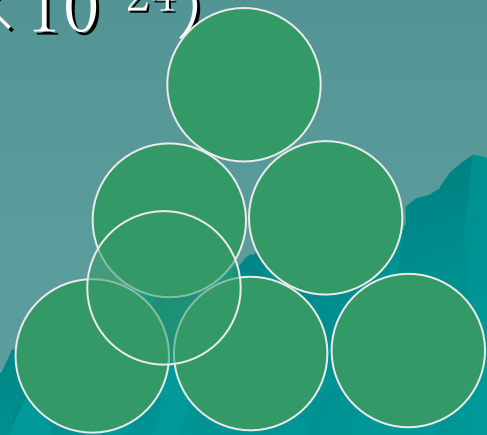
每个NaCl分子重 $58.5 / (6.02 \times 10^{23}) = 9.7176 \times 10^{-23}\text{g}$

晶胞容积： $V_c = 0.564^3 = 5.64^3 \times 10^{-24}\text{cm}^3$

每个晶胞的重量： $W = 4 \times 9.7176 \times 10^{-23}\text{g}$

密度： $\rho = W/V = 4 \times 9.7176 \times 10^{-23} / (5.64^3 \times 10^{-24})$   
 $= 2.167\text{g/cm}^3$

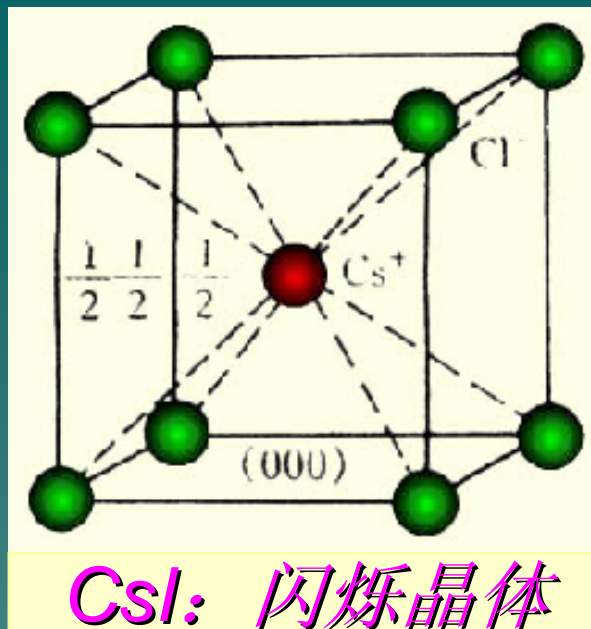
▽：四面体空隙





空间群:  $P m\bar{3}m$ , 立方晶系

空间群国际符号中规定三个位的方向



$P$ : 简单格子

垂直于 $a$ 有一对称面 $m$   
通过中心原子的平面

沿 $a+b+c$ 方向有  
一3次轴 $[111]$

垂直  $(a+b)$   
有一对称面

非体心立方结构

标高:  $Cl^- [[0, 0, 0]]$

$Cs^+ [[1/2, 1/2, 1/2]]$

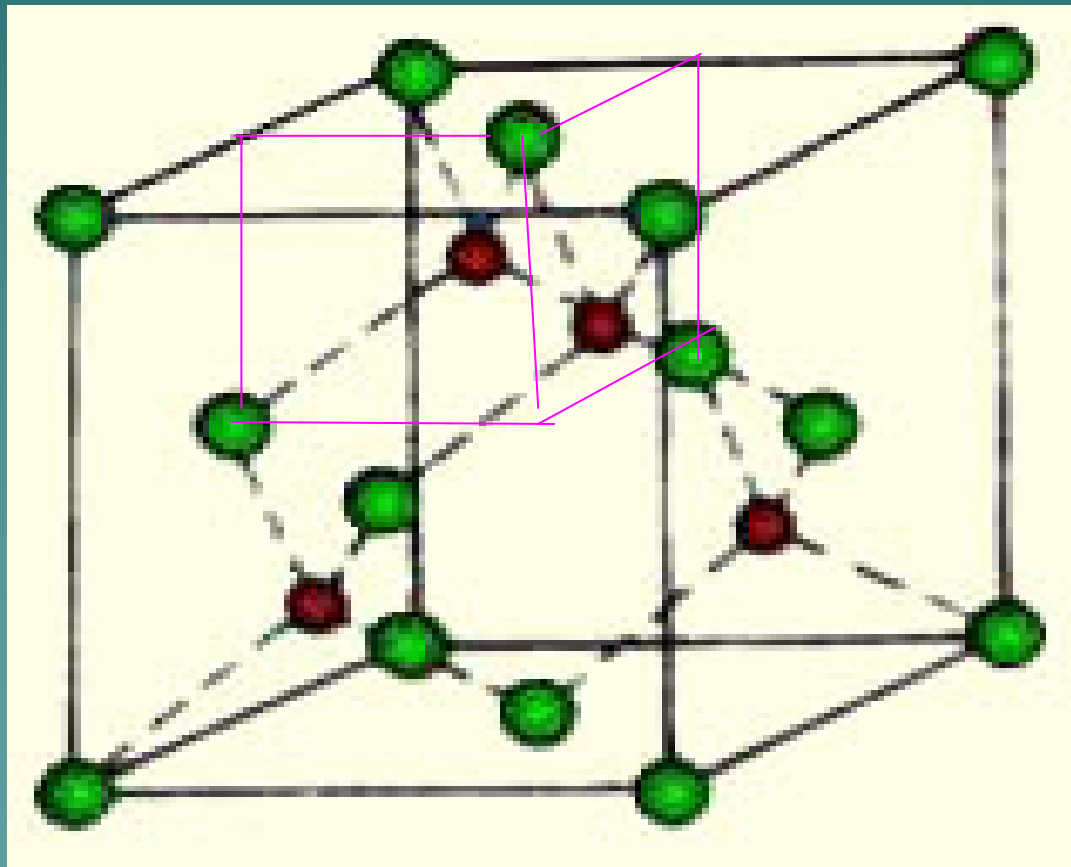
配位数: 8  $r_+/r_-=0.96$

分子数:  $Z=1$



### 3. $\beta$ -ZnS和 $\alpha$ -ZnS型结构

#### (1). $\beta$ -ZnS (闪锌矿)



$\beta$ -ZnS: 立方晶系

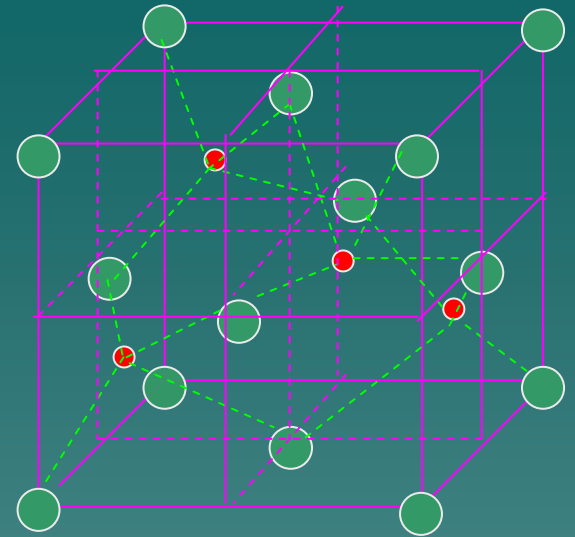
$F \bar{4} 3 m$

面心立方

沿a有一四次倒转轴

沿a+b+c有一3次轴

垂直于(a+b)有一对称面



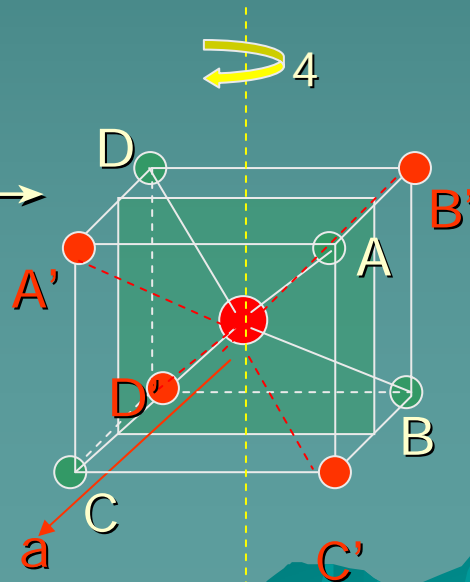
### (1). 倒转轴

先旋转90°，ABCD →

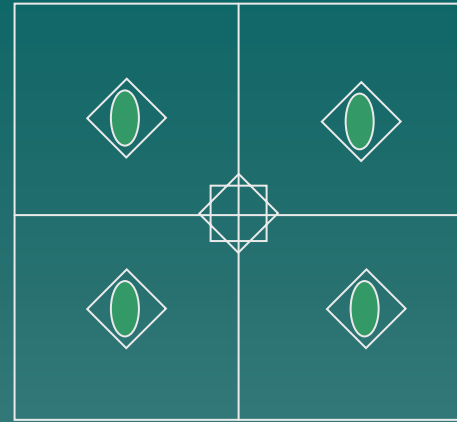
A' B' C' D'，再反映

A' → D; C' → B;

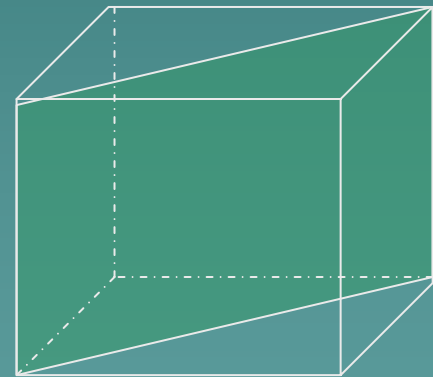
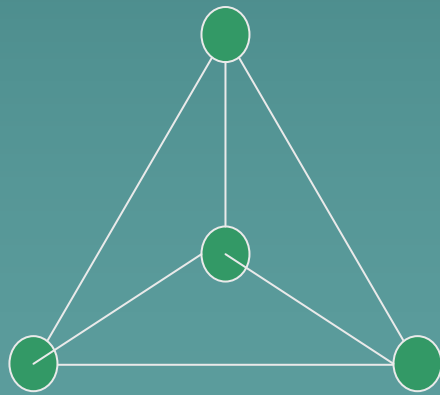
B' → A; D' → C



## (2). $\bar{4}$ 的位置及表示



(3). 3次轴  $a+b+c$ , 从Zn看正为三次轴, S原子同NaCl中的Cl



$m$ 垂直于 $a+b$

## (4). 投影图:

a. 以晶轴全高为100;

b. 确定投影面(001);

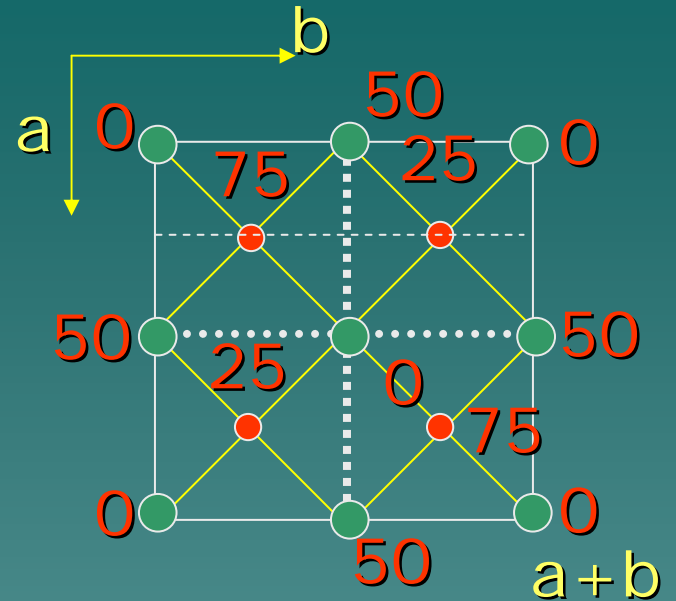
c. 对称关系:

对称面:  $\text{——}$   $\nearrow$   $a/2$ ;

轴滑移面:  $a\text{-----}$   $b\text{-----}$   $\swarrow$   $b/2$ ;  $c\text{.....}$   $c/2$

对面滑移面n:  $\text{---}\text{---}\text{---}$   $\nearrow$

$(a+b)/2$  或  $(a+c)/2$ ,  $(a+b+c)/2$

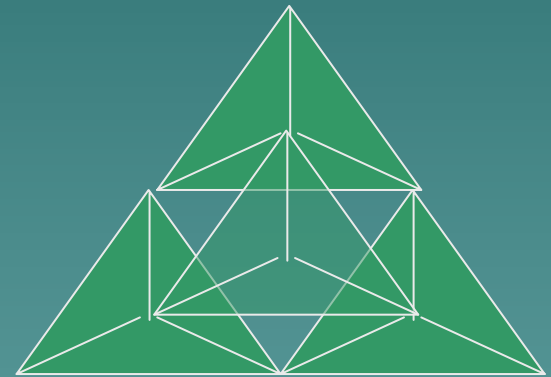
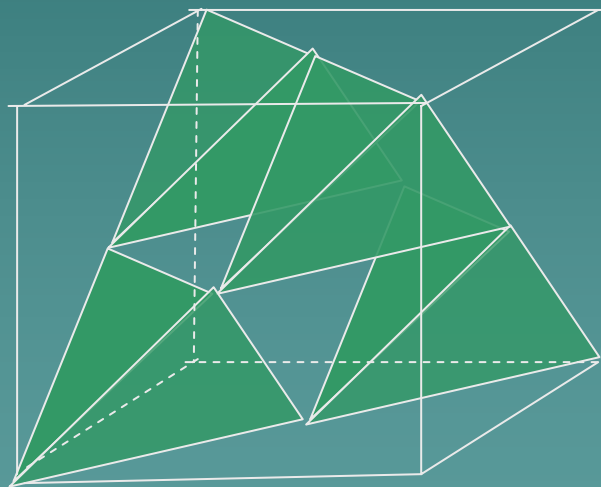


金刚石滑移面d:



$$\underline{(a+b)}/4 \text{ 或 } \underline{(a+c)}/4, \underline{(b+c)}/4$$

### (5). 多面体图

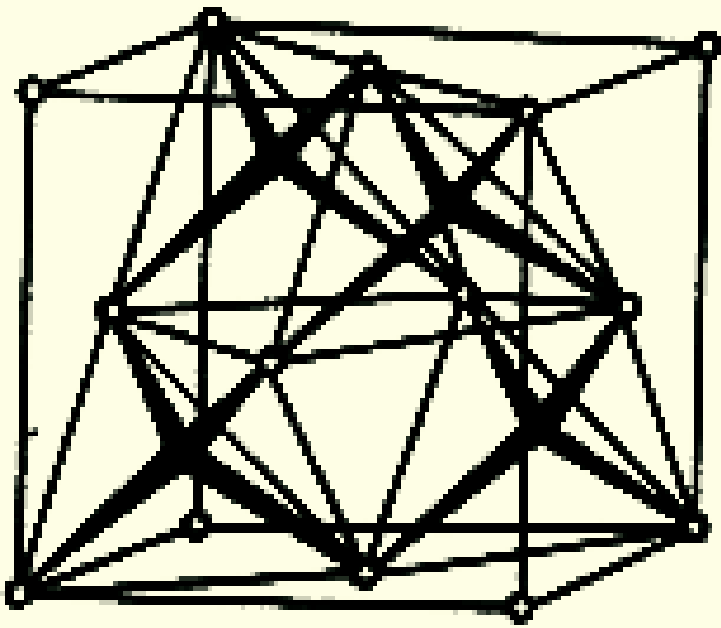


(111) 面

# 金刚石结构

点群:  $m\bar{3}m$

空间群:  $O_h^7 = Fd\bar{3}m(227)$

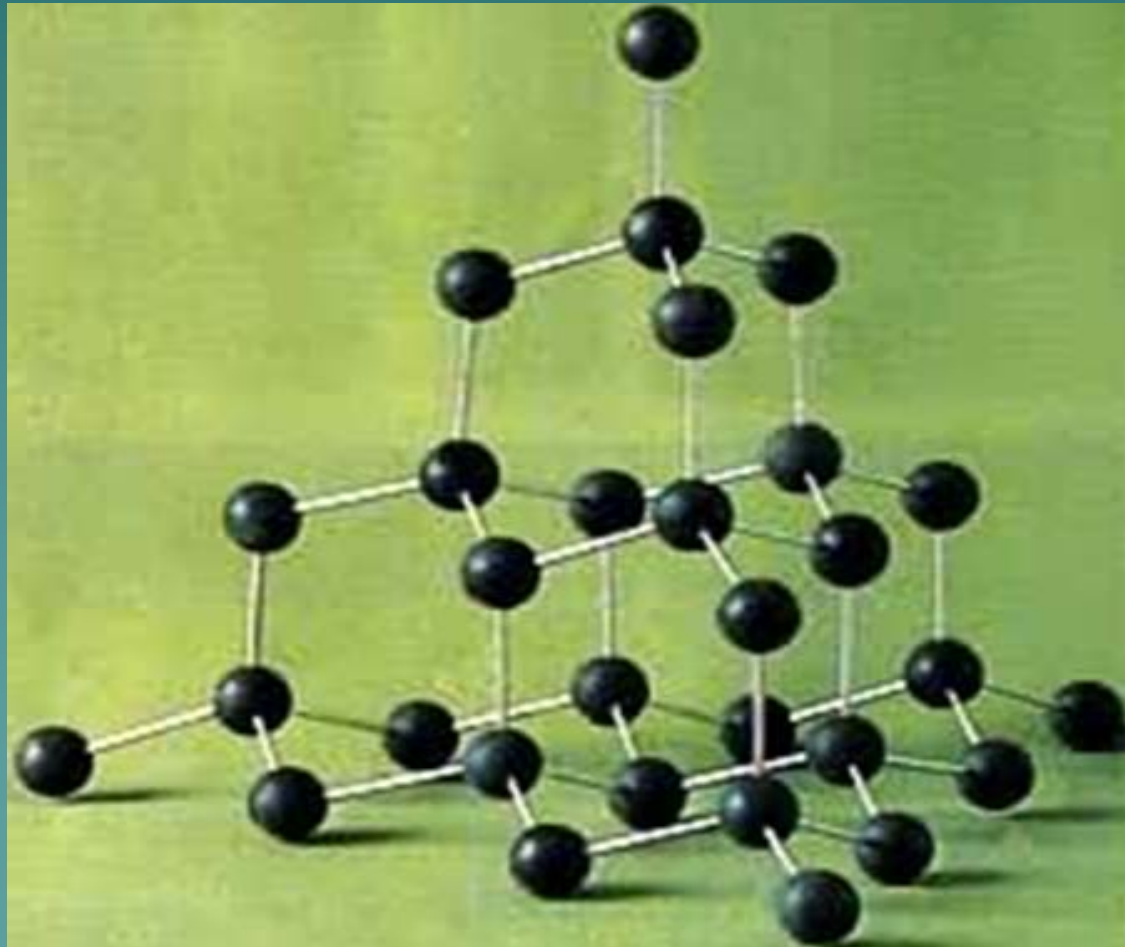


晶胞

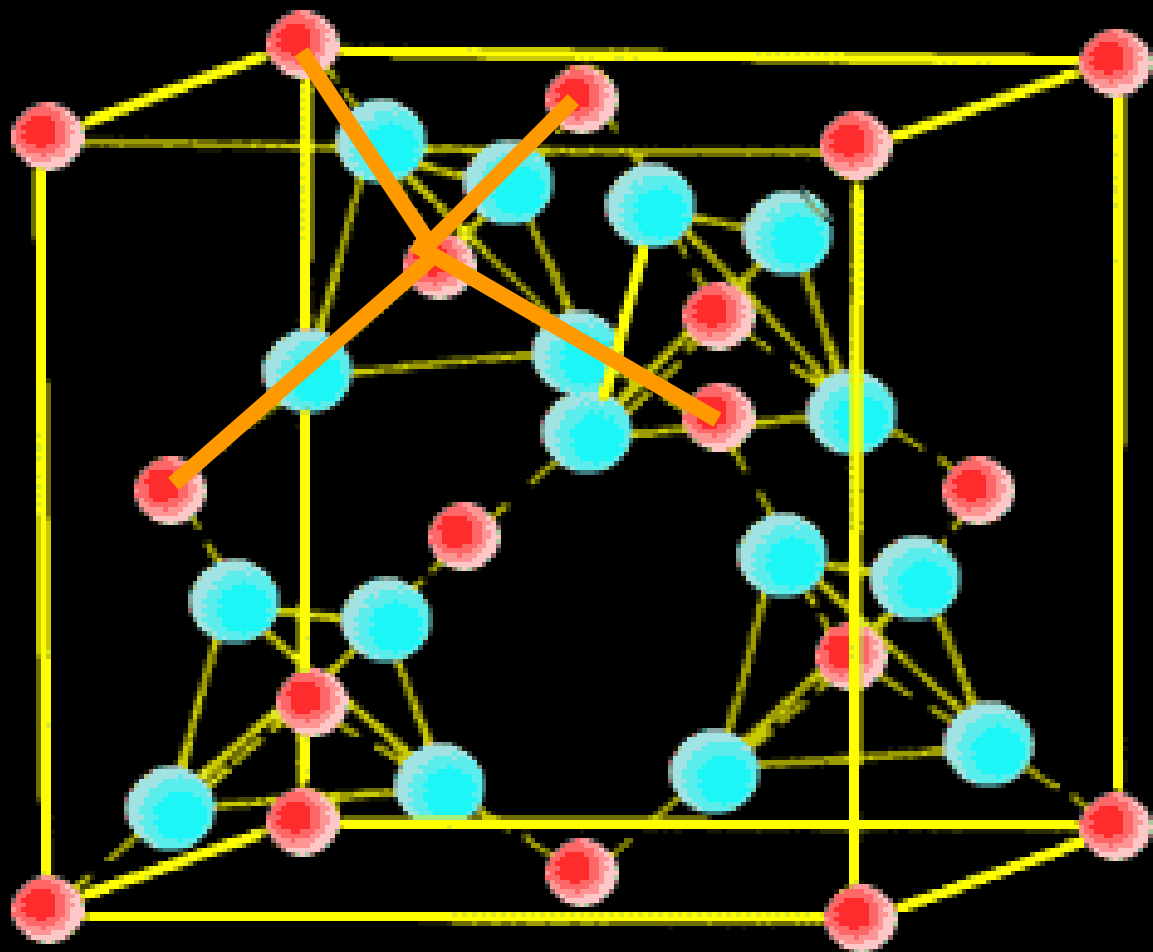
ZnS  
S-C,  
Zn-C

同型结构:

硅Si, 锗Ge







Zn---Si

S---Si

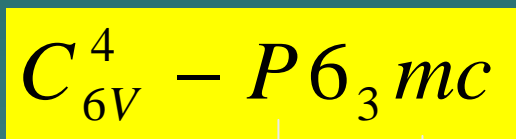
Zn-O-S

● 阳离子    ● 阴离子

图 2.57  $\beta$ -方石英结构

## (2). $\alpha$ -ZnS (纤锌矿)

(a). 空间群:

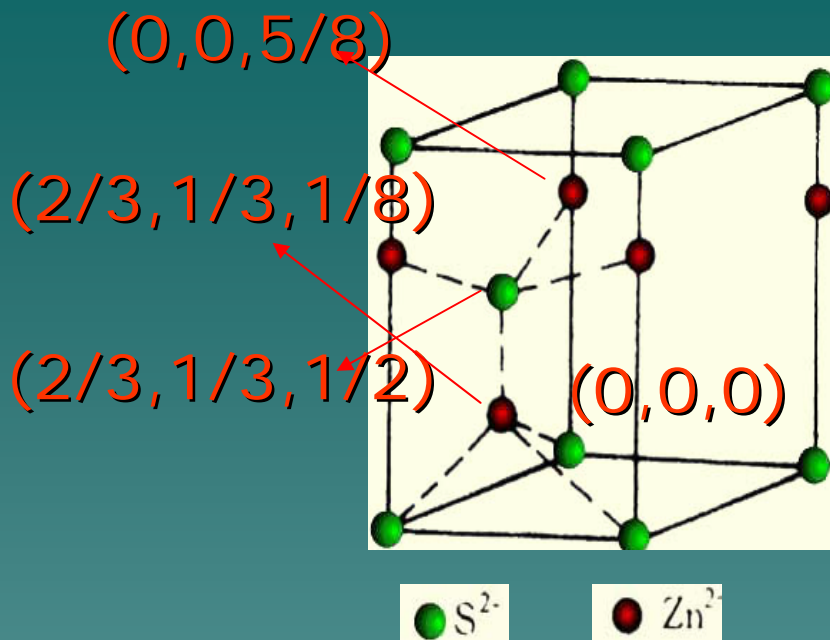


原始格子

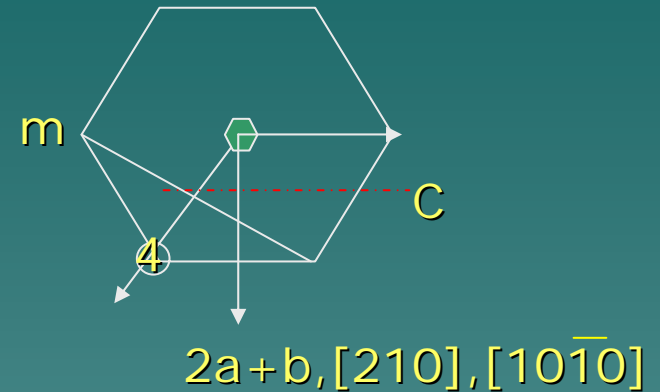
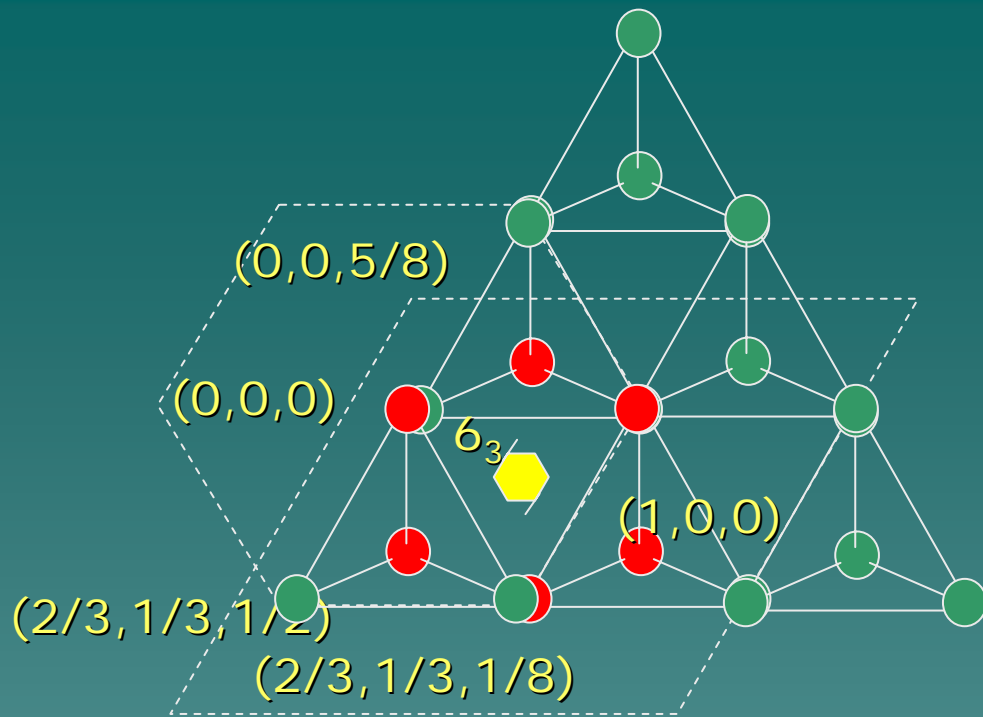
垂直(2a+b)有一c向滑移面

垂直a有一个对称面

沿C轴有一 $6_3$ 轴



螺旋轴:  $2_1, 3_1, 3_2; 4_1, 4_2, 4_3; 6_1, 6_2, 6_3, 6_4, 6_5$



(b). 堆积方式: ABAB型

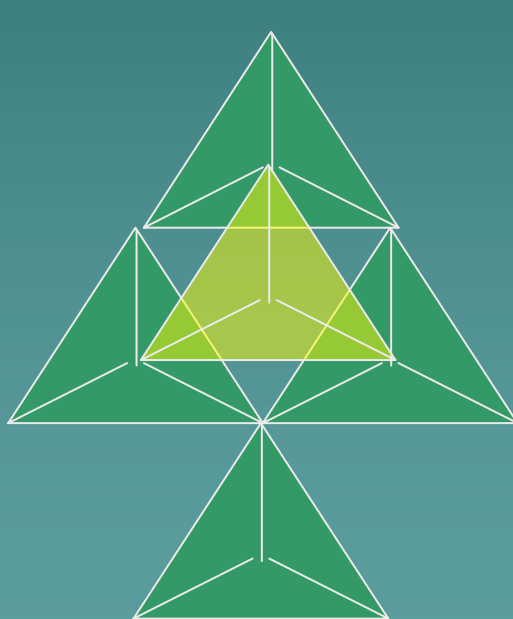
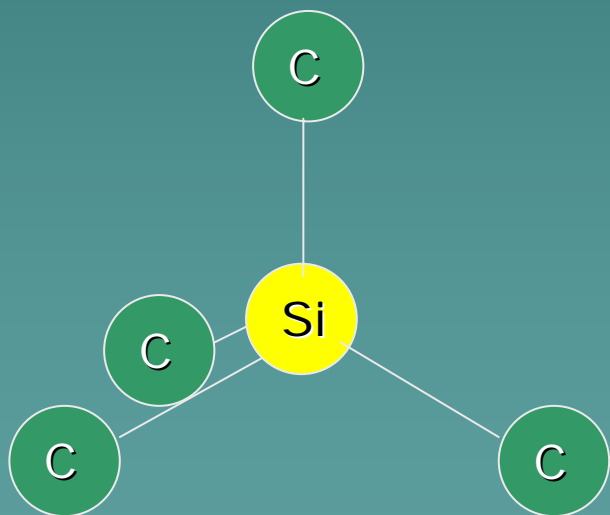
(c). 配位体: Zn填充四面体空隙一半

(d). 分子数: Zn  $1/3 \times 4 + 1/6 \times 2 + 1 = 2$ ,  
 S  $1/6 \times 4 + 1/12 \times 4 + 1$  Z=2



## 8. 碳化硅: SiC

莫氏硬度: 9, 热导率高, 能带间隙宽, 电子饱和速度和击穿电压高, 是制作高功率、高频率和高温器件的三高材料, 也是制作发蓝光的发光管和激光器的重要材料。



平行



反平行

熔点：2700℃，蒸汽压很高，单晶生长采用籽晶升华法。

结构复杂，有多种同质异构体，但是基本结构是由Si-C四面体堆积而成。有平行结合和反平行结合。假设四面体尖角向上的取向以a表示，向下以b表示，则平行堆积和反平行堆积分别表示为：aa和bb。常见结构有：

常见结构有：

$\alpha$  -型：

6H aaabbb H表示六方晶格，

15R aaabb R表示菱形六面体晶格，

4H aabb，

2H ab 纤锌矿型

$\beta$  -型： 3C aaa C表示面心立方晶格，闪锌矿型

## SiC单晶性能

材料特性	3C-SiC	6H-SiC
禁带宽度/eV	2.2	2.9
电子迁移率/cm <sup>2</sup> (Vs) <sup>-1</sup>	1000	600
空穴迁移率/cm <sup>2</sup> (Vs) <sup>-1</sup>	40	40
介电常数	9.7	9.7



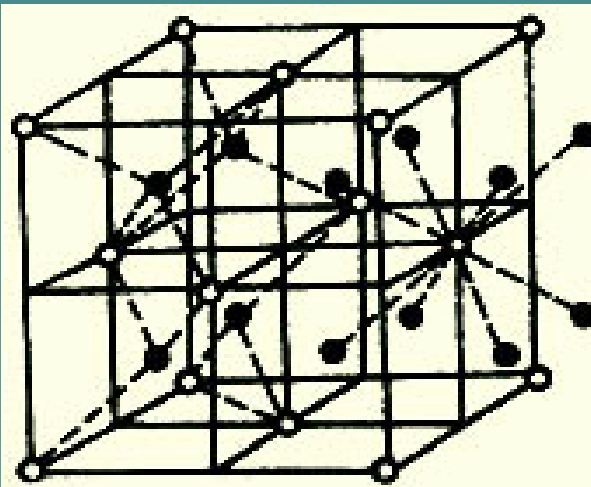
(e). 同型结构: ZnO, BeO, AlN

陶瓷, 熔点 $2500^{\circ}\text{C}$ 以上, 导热系数为 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的  
15~20倍, 对辐射稳定, 核反应堆材料。

## 4. $\text{CaF}_2$ (萤石) 型结构

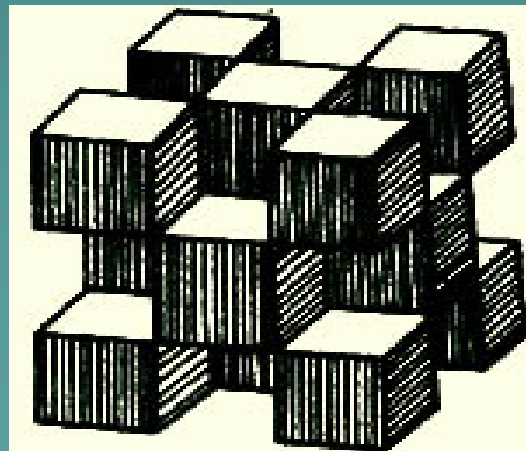
a. 立方晶系

空间群  $Fm\bar{3}m$

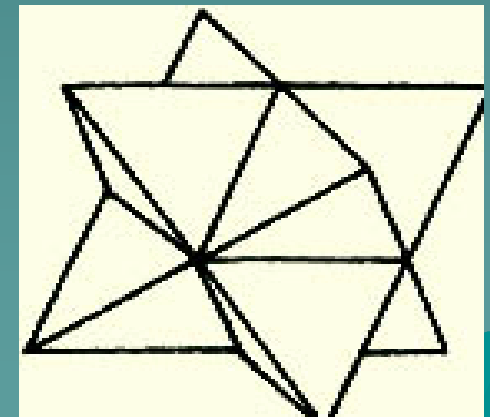


●  $\text{F}^-$  ○  $\text{Ca}^{2+}$

晶胞图



$[\text{CaF}_8]$ 多面体图



$[\text{FCa}_4]$ 多面体图

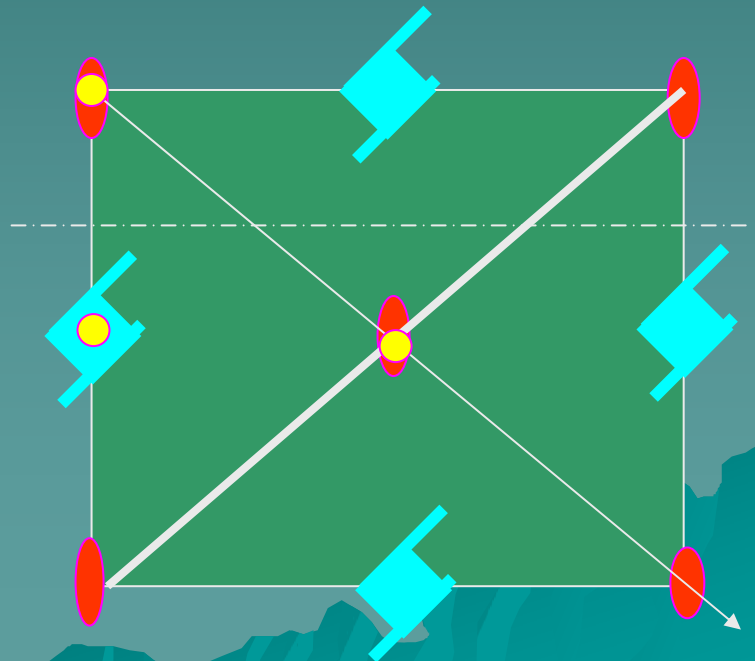
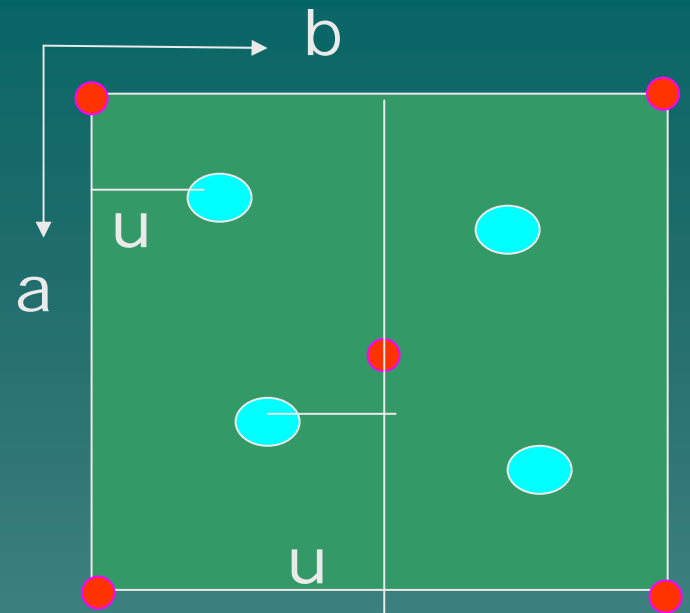
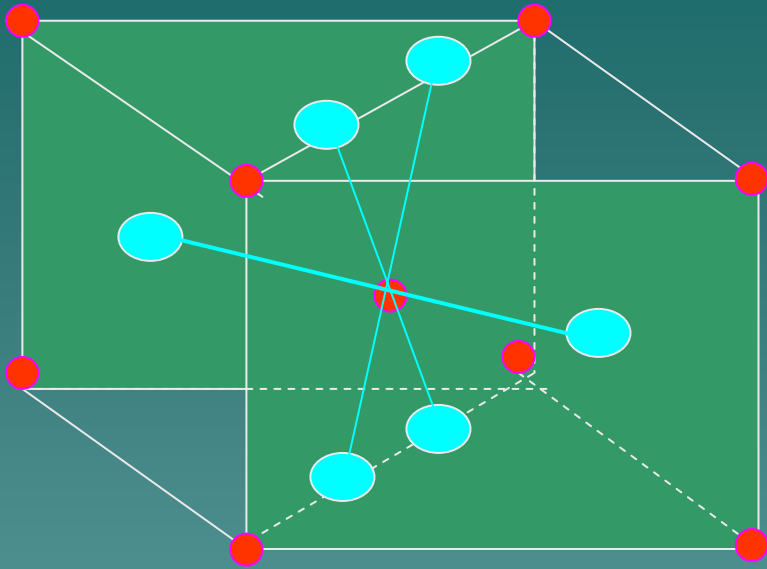
b. 配位数  $\text{Ca}^{2+}$ : CN=8,  $\text{F}^-$ : CN=4。填满全部四面体空隙

c. 性质: 在{111}面上有同号离子层, 故呈八面体解理, 即解理后呈八面体

$\text{Ca}^{2+}$ 离子坐标:  $000, \frac{1}{2} \frac{1}{2} 0, \frac{1}{2} 0 \frac{1}{2}, 0 \frac{1}{2} \frac{1}{2}$

$\text{F}^-$ 离子坐标:  $\frac{111}{444}, \frac{331}{444}, \frac{313}{444}, \frac{133}{444}, \frac{333}{444}, \frac{113}{444}, \frac{131}{444}, \frac{311}{444}$

# 5. $TiO_2$ (金红石) 型结构

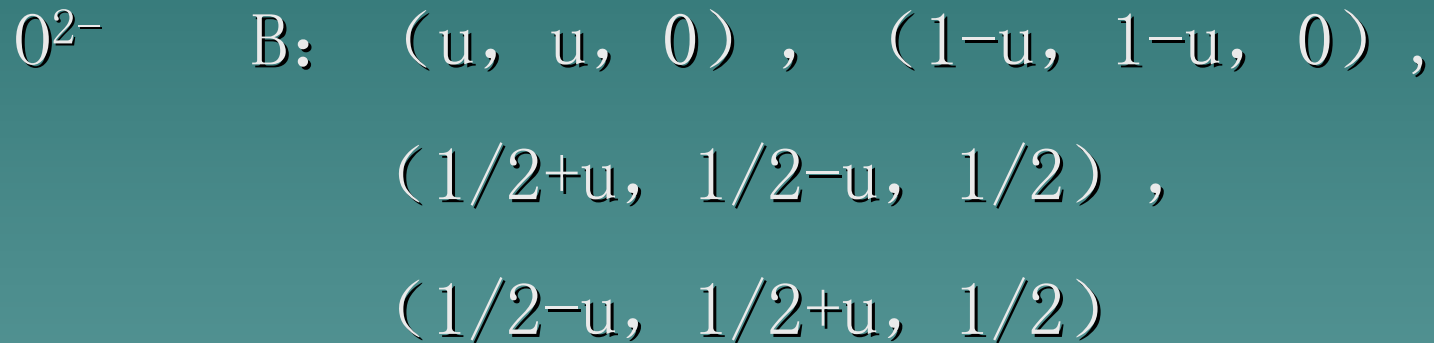


四方晶系，方位：c, a, a+b

空间群：

$$D_{4h}^{14} = P \frac{4_2}{m} nm$$

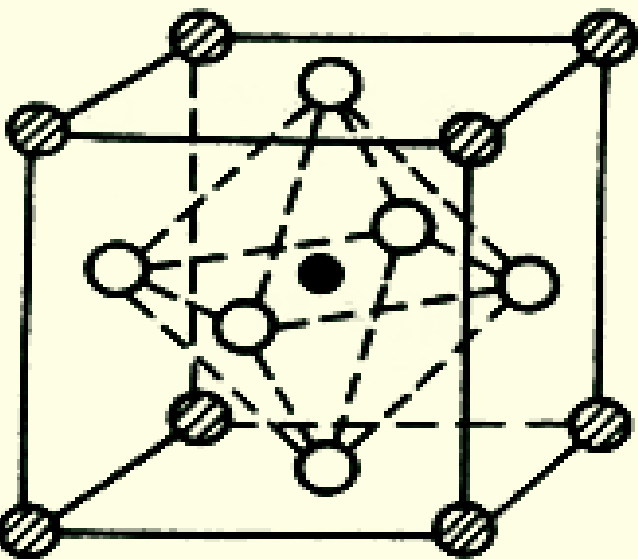
## 原子分子数坐标:



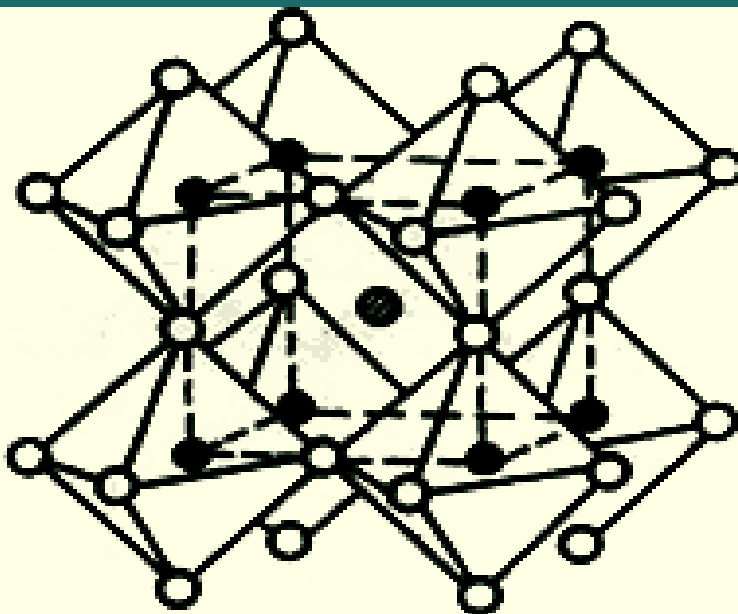
U为结构参数，不同化合物值不同，金红石 $u=0.31$



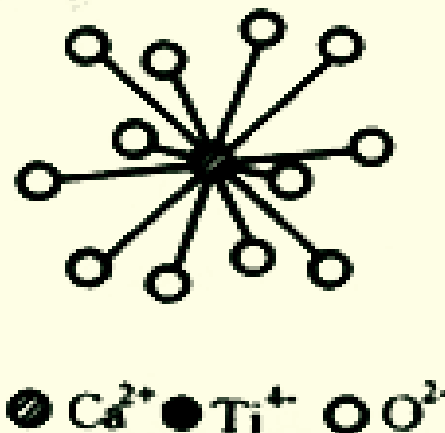
# 6. $\text{CaTiO}_3$ (钙钛矿) 型结构



晶胞结构



配位多面体的连接和  $\text{Ca}^{2+}$  配位数为 12 的情况



a. 立方晶系, 空间群:  $P m\bar{3}m$      $Z=1$      $0:1/2 \times 6=3$

b. 配位数  $\text{Ti}^{4+}$      $\text{CN}=6$

$$\text{Ti}^{4+} : \frac{r_+}{r_-} = \frac{0.061}{0.140} = 0.436$$

$$\text{Ca}^{2+} \quad \text{CN} = (1/2 \times 3) \times 8 = 12$$

$$\text{Ca}^{2+} : \frac{r_+}{r_-} = \frac{0.134}{0.140} = 0.96$$

c. 结构特点：形成八面体链

d. 结构稳定性：静电键强度

$$S_i = \frac{\text{化合价}}{\text{配位数}} = \frac{Z_i}{\text{CN}_i}$$

$$S_{\text{Ti}^{4+}} = 4/6 = 2/3,$$

$$S_{\text{Ca}^{2+}} = 2/12 = 1/6$$

对于一个氧来说：与两个Ti相联，与4个Ca相联

$$Z_0^{2-} = \sum_i \frac{Z_i}{\text{CN}_i} = 2 \times S_{\text{Ti}^{4+}} + 4S_{\text{Ca}^{2+}} = 2 \times \frac{2}{3} + 4 \times \frac{1}{6} = \frac{4}{3} + \frac{2}{3} = 2$$

对氧，正负电荷是平衡的，结构是稳定的。

## 6. 鲍林(Pauling)规则:

(1).适用范围: 离子晶体, 对共价键并具有部分离子键的晶体; 不适用共价键晶体。

(2).内容:

**第一规则** : a.位置 正负离子构成多面体, 正离子在中央, 负离子占据角顶;  
b.长度 正负离子间距为离子半径之和;  
c.配位数 正离子配位数取决于 $R_+/R_-$ , 与价数无关。



**第二规则：** 静电价规则，用于判定晶体稳定性

负离子的电价基本等于相邻正离子分配给这个负离子的静电键强度的总和：

$$Z^- = \sum_i S_i = \sum_i \frac{Z_i^+}{n_i}$$

静电键强度： $S = \text{电价} / \text{配位数}$  即， $S = Z^+ / n$

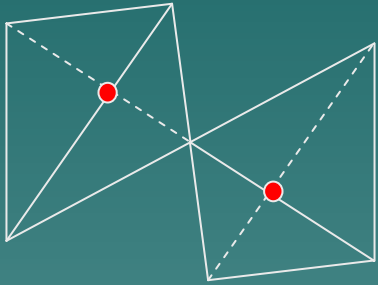
**第三规则：** 共顶，共棱，共面规则

共用棱特别是共用面，降低结构稳定性，在高电价低配位数的正离子时，该效应明显。

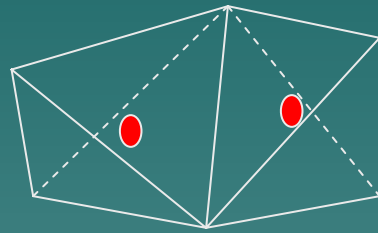
公用顶点数的增加，使两个多面体中心的正离

子间距离缩短，斥力增加，结构稳定性变差。

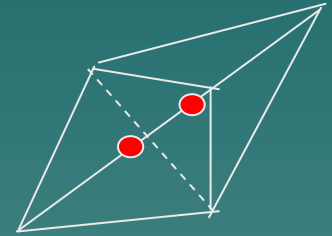
如四面体：



1



0.58



0.33

**第四规则：**

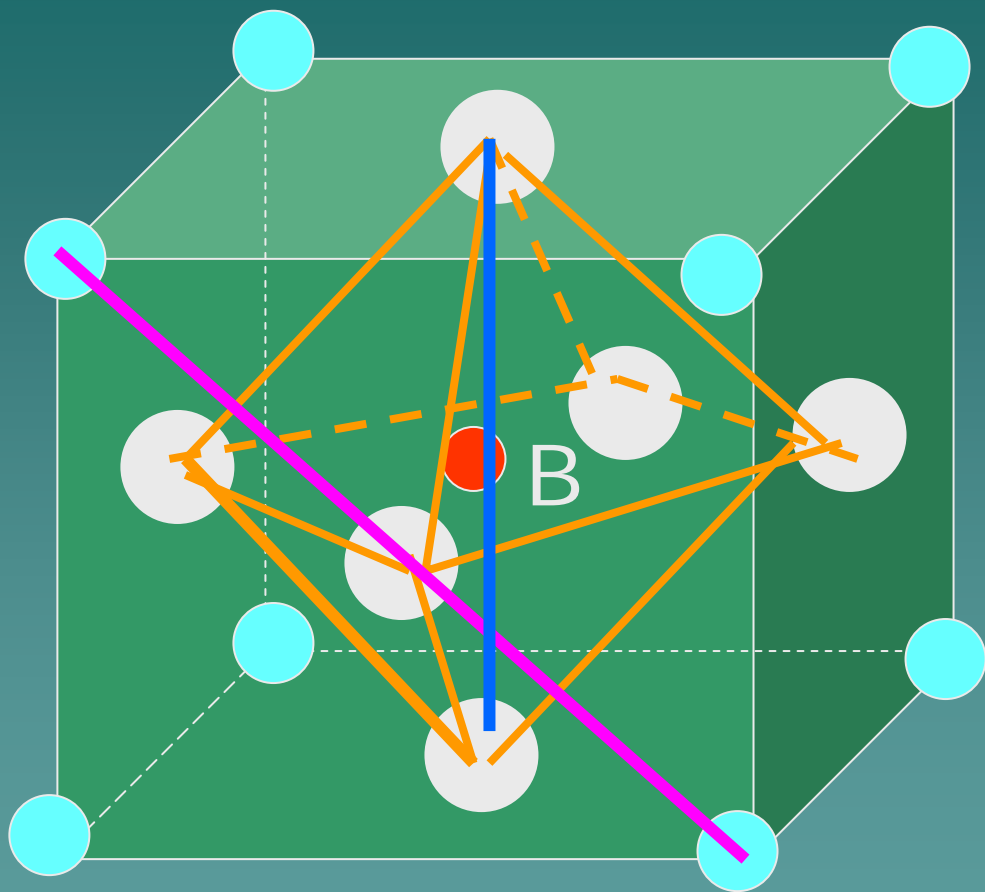
晶体中有一种以上正离子，则高电价正离子的低配位数多面体之间存在尽可能彼此互不结合的趋势，即正离子尽可能远离。

**第五规则：** 节省规则即同一结构中相同离子配位关系尽可能相同。

# 容忍因子 $t$

$$(2R_A + 2R_O)^2 = 2a^2$$

$$2R_B + 2R_O = a$$



$$R_A + R_O = t\sqrt{2}(R_B + R_O)$$

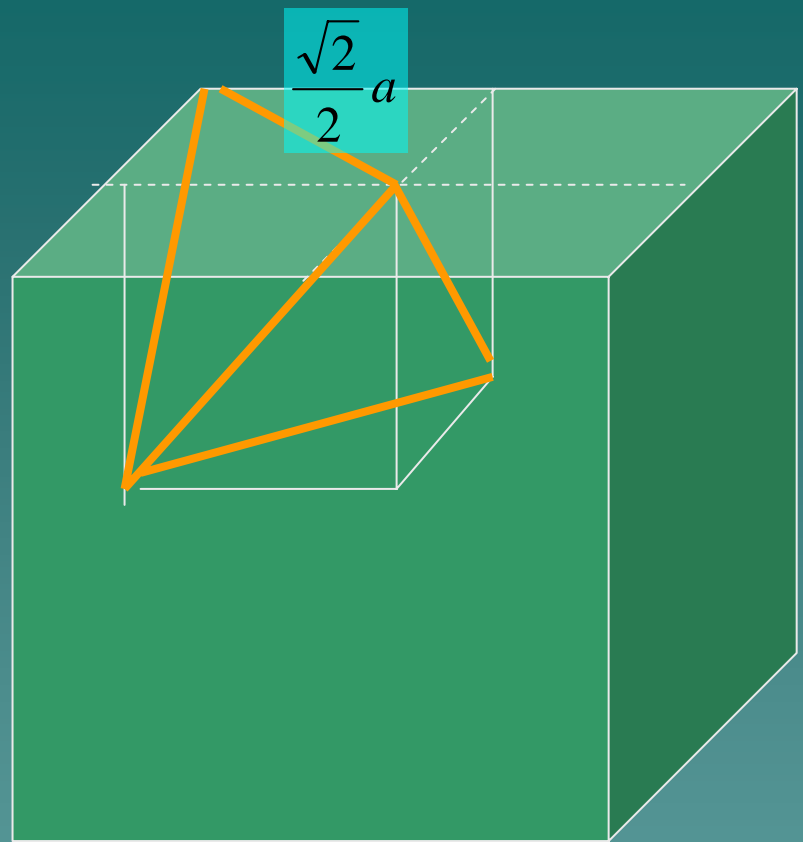
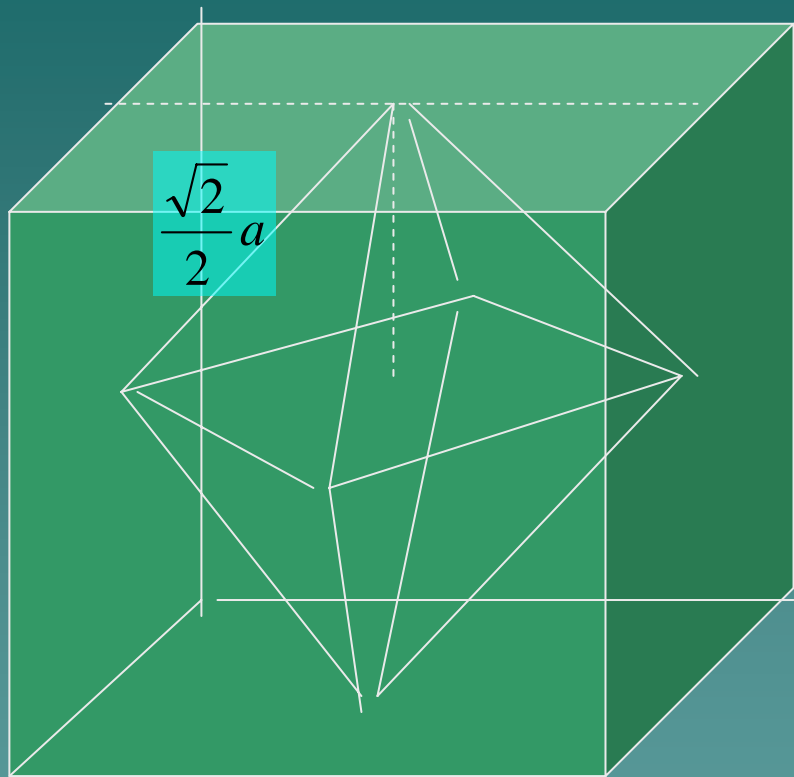
$$t = 0.77 - 1.10$$

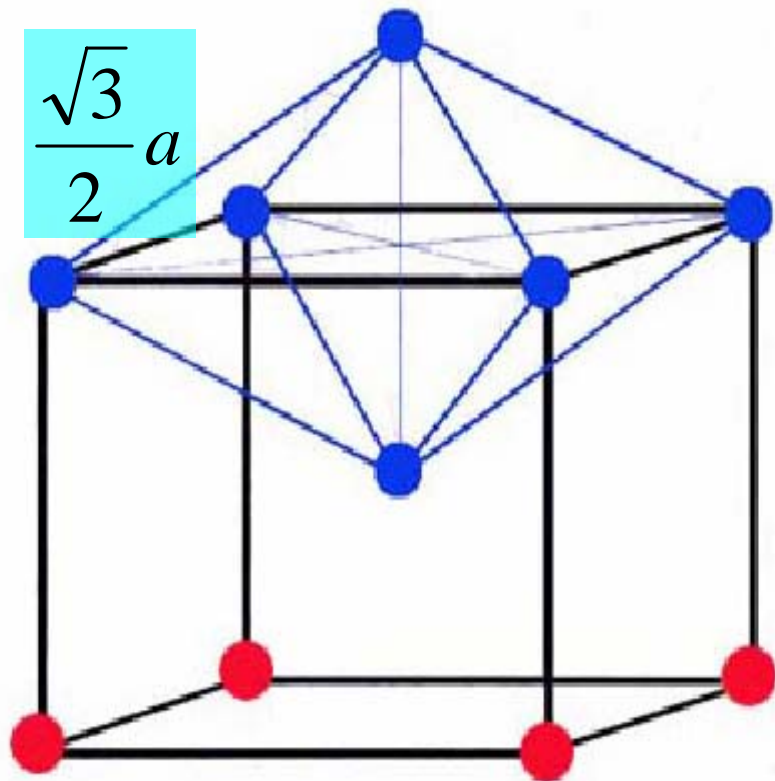
$\text{KNbO}_3, \text{BaTiO}_3,$

$\text{YAIO}_3$  (YAP)

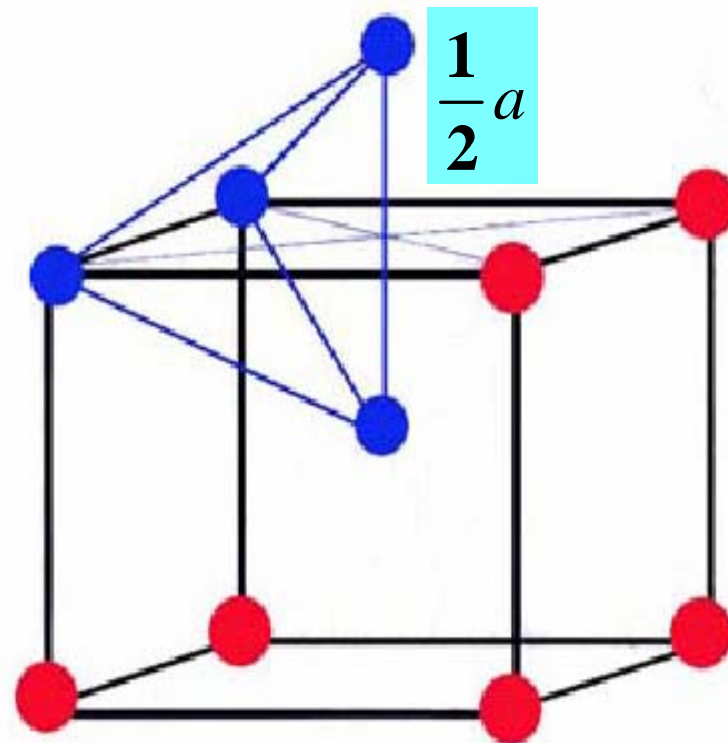
$\text{LaMnO}_3$  (CMR)

A





(a)



(b)

非正八面体间隙

$$R_o < R_t$$

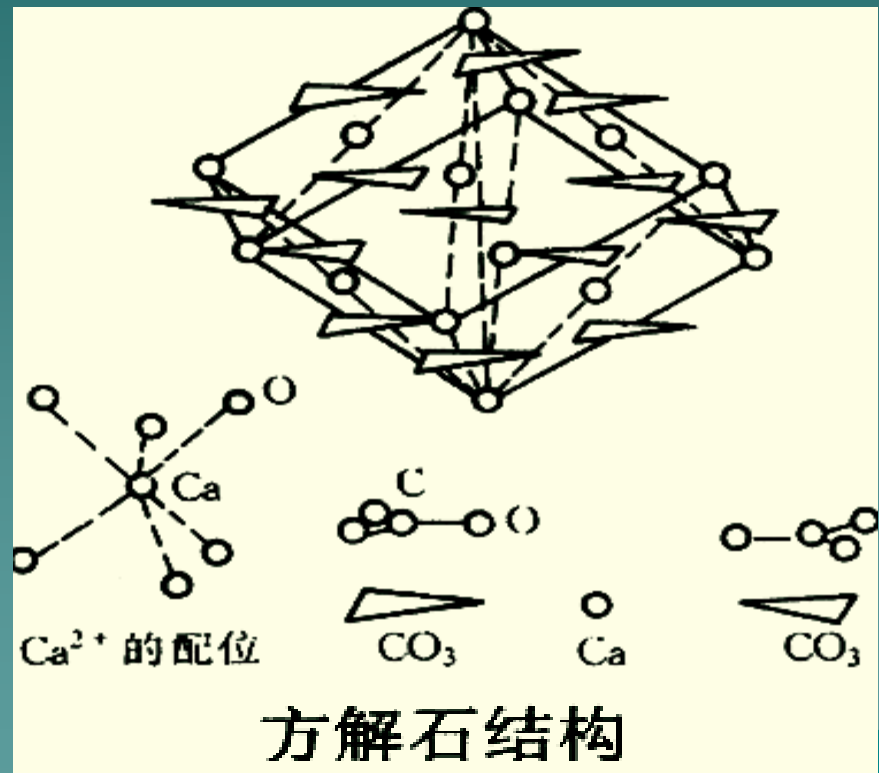
非正四面体间隙

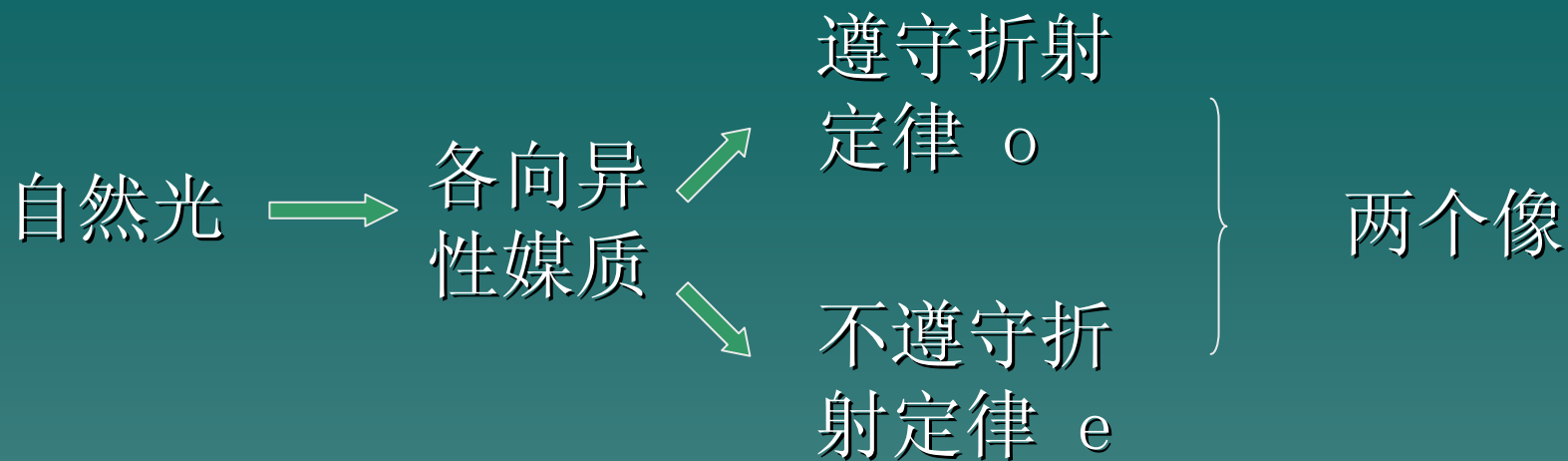
7.方解石：属三方晶系，空间群

$R \bar{3}c$

CaCO<sub>3</sub>双折射现象与微观结构的关系

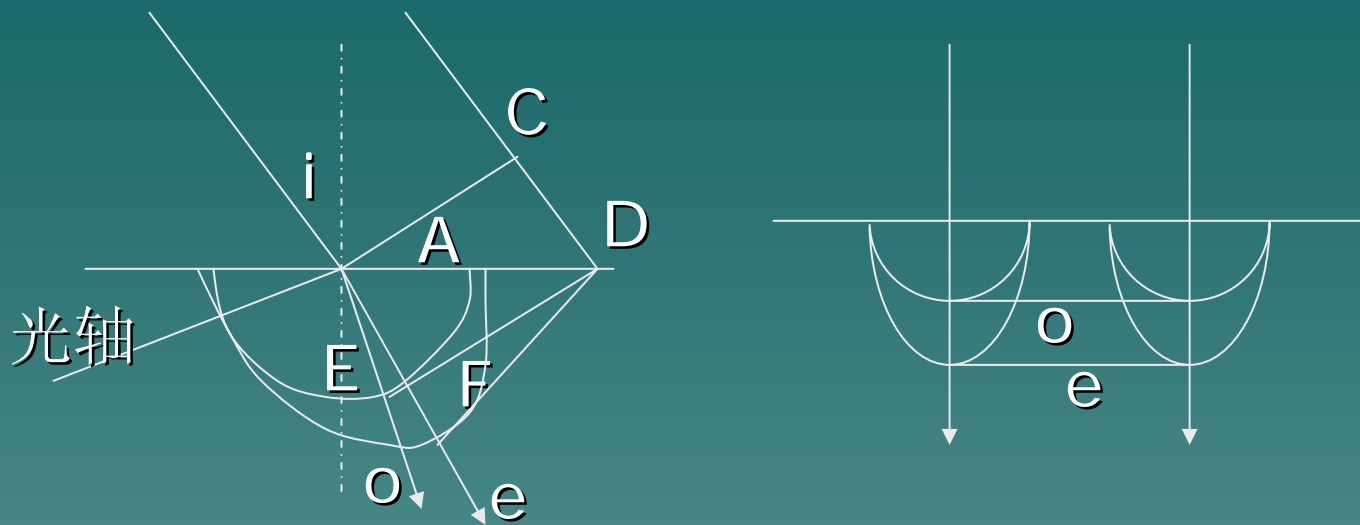
a. 双折射现象





## b. 惠更斯原理在双折射现象中的应用

$o$ 光速度在各方向上是相同的，所以在晶体中任一点所引起的子波波阵面为球面。 $e$ 光速度在各方向上是不同的，所以在同一点引起的子波波阵面是一旋转椭球面。



AC为入射波波阵面，当C传到D时，由A所示的两个子波：波阵面，一个球形，一个椭球形。DF为e光新波阵面，造成折射率不同。