上讲回顾

- 引入了倒(动量)空间的一些概念
  - * 数学上，正、倒空间只是一个Fourier变化
  - * 倒格子
    - # 倒格子基矢、倒格矢
    - # Brillioun区
      - † 倒空间Wigner-Seitz原胞=第一Brillioun区

本讲目的：观测晶体结构的基础是什么？

1. 用衍射方法确定晶体结构的理论根据？
   →von Lauer条件
2. 能不能观察到衍射极大还有什么条件？
   →结构因子

第10讲、晶体结构衍射理论

1. 晶体衍射实验是一个重要的里程碑
2. Bragg定律
3. von Laue方程
4. 散射强度和结构因子

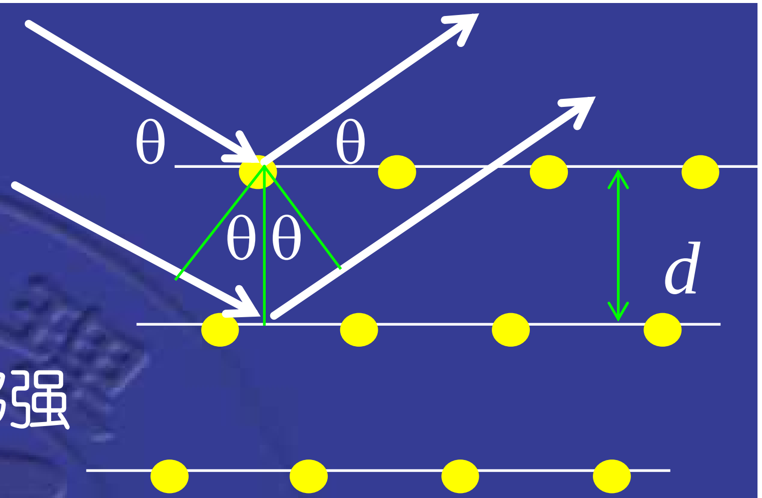
1、一个重要的里程碑

- 1912年von Laue把硫酸铜晶体作为光栅，试图测X射线波长，却得到了晶体结构衍射图象！
- 虽然现也有直接观察技术，但测量晶体结构，还是用衍射技术，因为它对周期结构最灵敏
  - * 直接观察晶体结构技术，如TEM、STM、FIM，但这些技术是观察点缺陷、位错、台阶、表面和界面的理想方法，因为可以直接反映这类结构的特征；
  - * 而晶体内部周期性结构的观察，还是靠衍射技术
- 晶体的衍射实验可以用X射线，以及粒子波长合适的实物粒子如中子、电子等作入射束
  - # X射线和电子作入射束，主要是被晶体中的电子散射，而中子则是被原子核散射

建立晶体衍射与结构的关系→衍射理论

- ~1912年→解释X射线晶体衍射的理论是经典的
  - * 后来，这些理论被推广到研究实物粒子衍射也是有效的，仅需用到量子力学中的粒子波概念
  - * 适合于X射线和非破坏性的高能电子弹性散射
- 运动学近似散射理论，它假定
  - * 入射束仅被单次散射；散射时原子位置保持刚性固定；并且是弹性散射，没有能量损耗
  - * 理论给出的衍射极大条件，但并不一定能观察到衍射极大，因为条件仅对格点有效，格点代表的是基本结构，因此，还要看具体结构。von Laue在1912年得到的是衍射极大的必要条件，不是充分条件
- 动力学理论需要量子力学，30’由von Laue建立

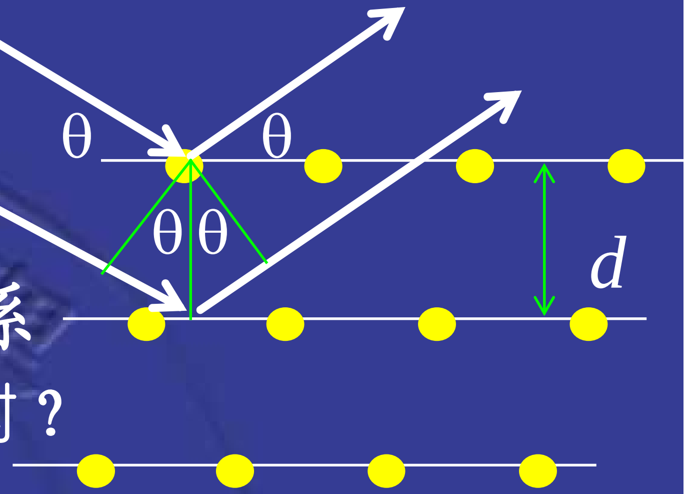
2、Bragg定律



- 根据光的反射定律
  * 入射角等于反射角，反射足够强
- Bragg因此假设
  1. 入射波从原子平面作镜面反射
  2. 对于可见光来说，可得足够强的反射光束；但对于X射线，透射率极大，而反射率极小，实际情况是只有入射的10^{-3}~10^{-5}部分被反射。所以Bragg又假定：每个平面只反射很小部分（另外部分穿透）
- 当反射波发生相长干涉时，就出现衍射极大
  * 两个面间光程差：光程差：$2d\sin\theta$
  * 加强条件：层与层之间的光程差为波长的*n*倍时，衍射极大→Bragg定律（Bragg 反射公式）

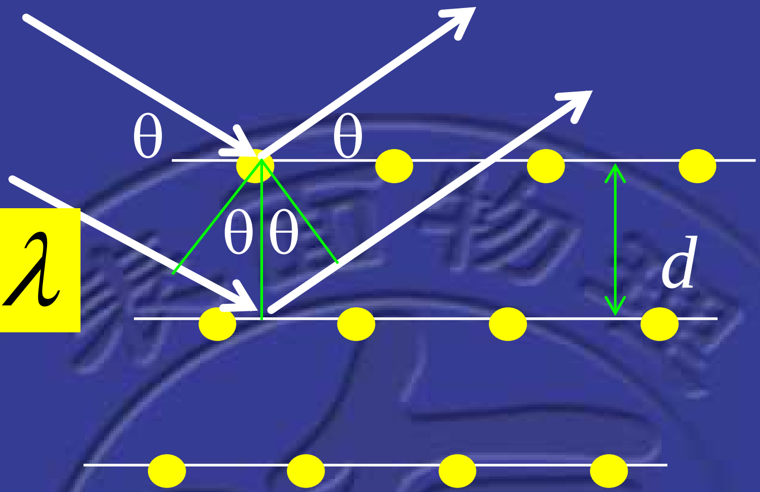
$$\boxed{2d\sin\vartheta = n\lambda}$$

分析 $2d\sin\vartheta = n\lambda$



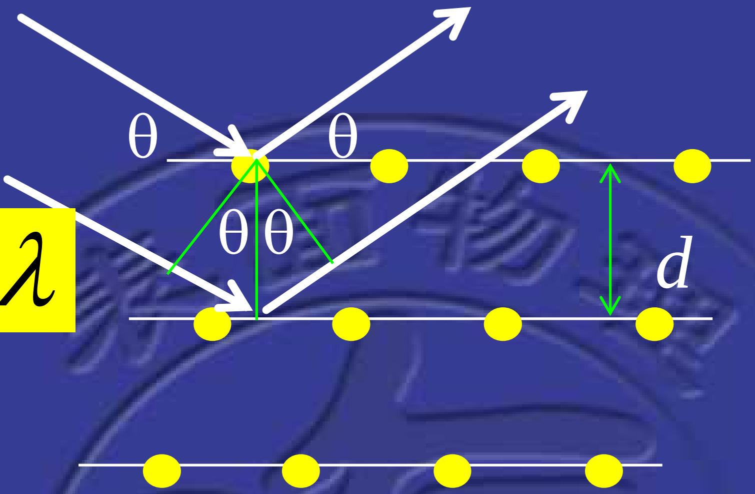
- 定律确定的是波长与面间距关系
  - * 即满足什么条件才发生Bragg反射？
- 不能用可见光！
  - * 因为只有 λ<2d才能发生Bragg反射
  - * 对同一簇反射面，要求 θ和 λ相匹配，因此，反射受严格限制，只有 θ和 λ的特殊耦合才会有同相位相加效应，产生衍射斑点
  - * 对于X射线，大部穿透，有足够多的原子平面参与

$$2d\sin\vartheta = n\lambda$$



质疑→ Bragg假定X射线被原子平面镜面反射，不同原子面反射波相长干涉，产生衍射极大。如是原子平面，那它们的面间距都相等，都等于*d*吗？

显然不是！

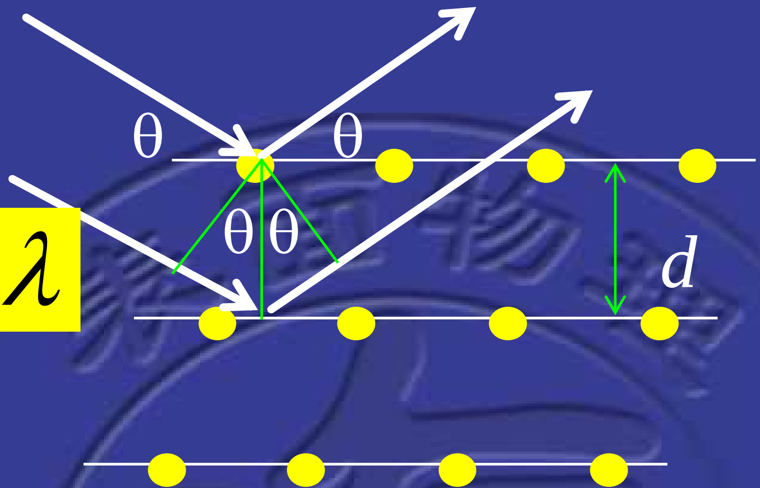


$$2d\sin\vartheta = n\lambda$$

质疑→原子面在什么情况下才能被看作镜面反射？这时波长与原子间距应该取什么关系？

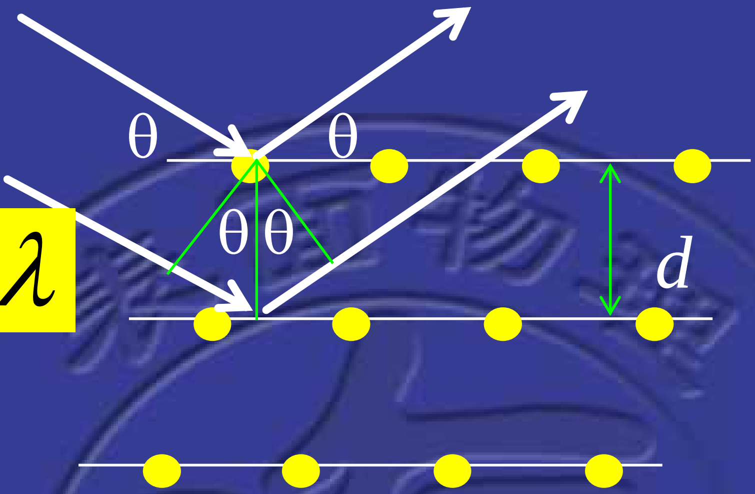
波长应大于大于原子间距！但这与入射束波长 $\lambda<2d$的限制显然矛盾！

$$2d\sin\vartheta = n\lambda$$



质疑→为绕过原子镜面反射的困难，Bragg假设不是全反射→那全反射还有没有衍射图象？

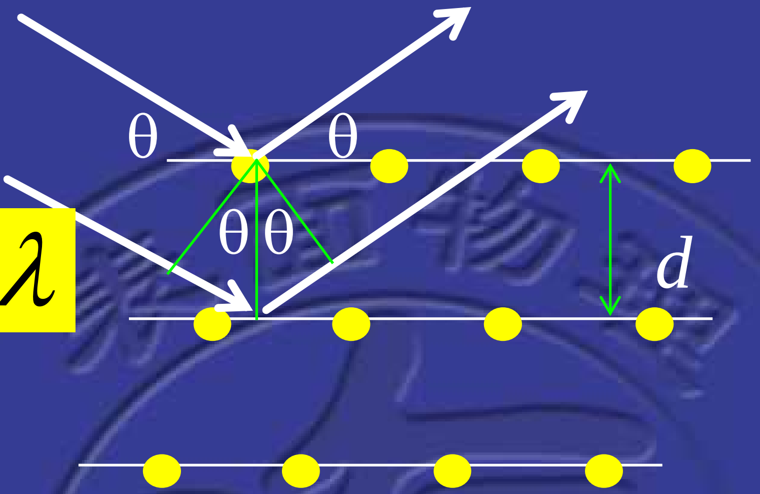
有！但不是X射线作入射束。比如高能电子衍射就利用全反射。全反射并不是入射波长>>原子间距所引起，而是采用掠入射。主要用于探测表面周期结构



$$2d \sin \vartheta = n\lambda$$

思考：如果假定Bragg定律中的反射面不是原子平面而是晶面，前面几个困难就迎刃而解了吗？

但晶面只是数学抽象，不是真实存在的实物平面！

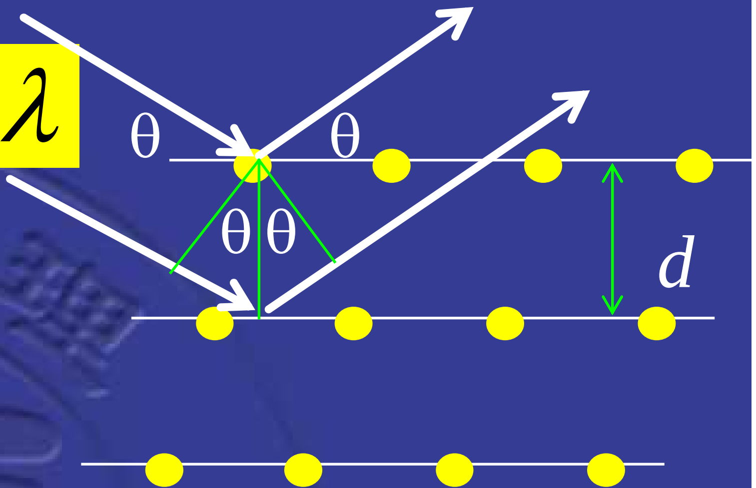


$$2d\sin\vartheta = n\lambda$$

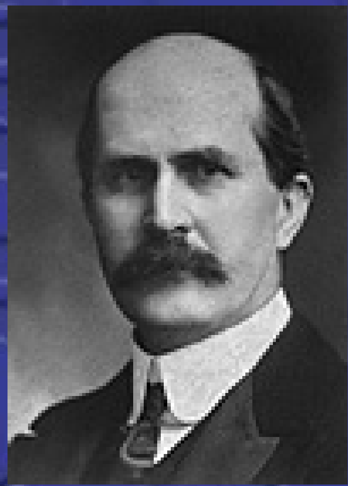
思考：Bragg定律的问题究竟出在什么地方？

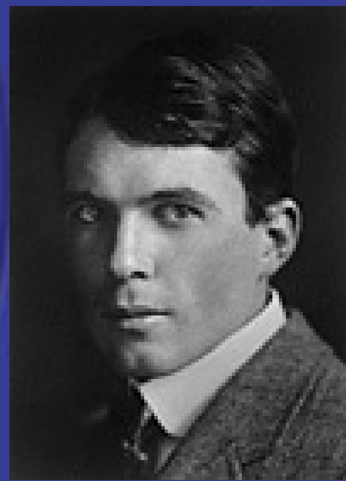
- 恰恰是在究竟被什么东西反射这一关键问题上，Bragg是模糊的，不清楚的！
- 被基元中的原子及电子，其代表是格点！这是von Laue早于Bragg得到的。Bragg画蛇添足，试图简化解释，不止把问题弄复杂，连物理都错了

但结论正确 $\boxed{2d\sin\vartheta = n\lambda}$

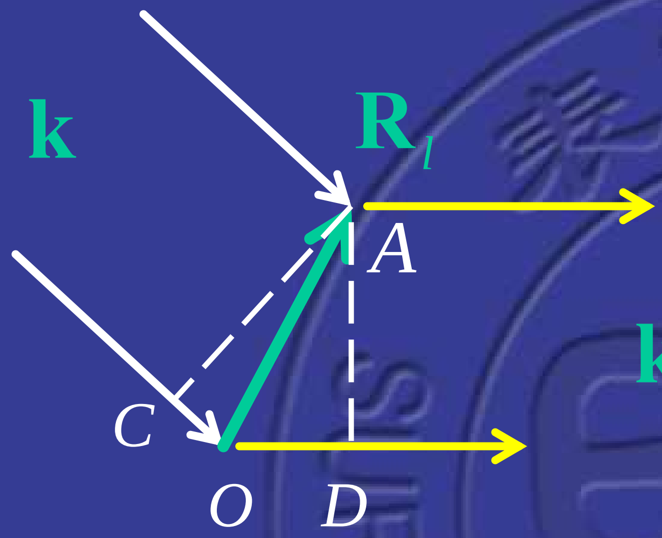


- 虽然物理图象模糊不清，但Bragg的结论正确，因为恰巧是von Laue公式的特例
- Bragg定律借鉴了光的反射定律和薄膜干涉，或受启发
  - * 初衷是解释von Laue衍射条件，简化实验测量
  - * 但物理上是有问题的，所以用一些假定来绕过这些问题
- Bragg父子在1915年因Bragg定律而得诺贝尔物理学奖





3、von Laue方程



$$\hat{\mathbf{k}} = \frac{\mathbf{k}}{k}$$

$$\hat{\mathbf{k}}' = \frac{\mathbf{k}'}{k'}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

- 本质：晶体衍射是入射的X射线与原子核外电子作用的结果；设仅受电子的弹性散射

  * $\mathbf{R}_l$是格矢
- 光程差：CO + OD

$$CO = -\mathbf{R}_l \cdot \hat{\mathbf{k}}$$

$$OD = \mathbf{R}_l \cdot \hat{\mathbf{k}}'$$

由此得加强条件：

$$\mathbf{R}_l \cdot (\hat{\mathbf{k}}' - \hat{\mathbf{k}}) = \mu\lambda$$

$$\mathbf{R}_l \cdot (\mathbf{k}' - \mathbf{k}) = 2\pi\mu$$

von Laue条件

- 光程差满足加强条件

$$\mathbf{R}_l \cdot (\mathbf{k}' - \mathbf{k}) = 2\pi\mu$$

$$\mathbf{R}_l = l_1\mathbf{a}_1 + l_2\mathbf{a}_2 + l_3\mathbf{a}_3$$

$$\mathbf{K}_h = h_1\mathbf{b}_1 + h_2\mathbf{b}_2 + h_3\mathbf{b}_3$$

$$\mathbf{K}_h \cdot \mathbf{R}_l = 2\pi n$$

$$\mathbf{k}' - \mathbf{k} = \mathbf{K}_h$$

von Laue 条件:
波矢改变等于倒格矢时，满足衍射加强的条件

讨论：Bragg和von Laue条件的等价关系

$$d = \frac{\mathbf{a}_1}{h_1} \cdot \frac{\mathbf{K}_h}{|\mathbf{K}_h|} = \frac{2\pi}{|\mathbf{K}_h|} \quad \Rightarrow \quad |\mathbf{K}_h| = \frac{2\pi}{d}$$

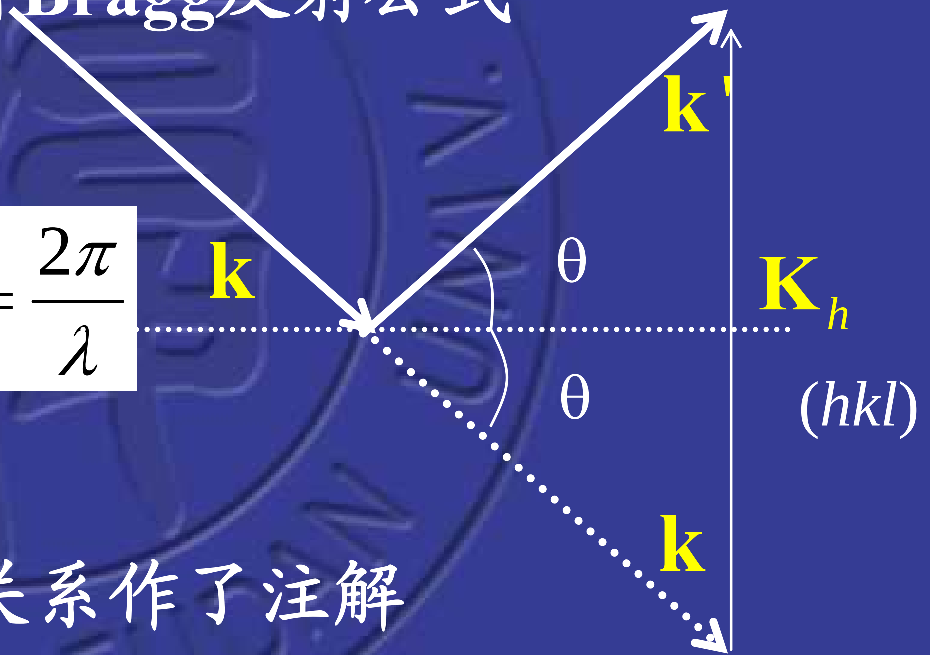
- 从von Laue条件即可得Bragg反射公式

$$|\mathbf{K}_h| = |\mathbf{k}' - \mathbf{k}| = 2k \sin\theta$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$2\pi / d = 2(2\pi/\lambda)\sin\vartheta$$

$$\boxed{2d \sin\vartheta = n\lambda}$$



- 这为$\mathbf{K}_h$与晶面方向的关系作了注解

 * $n\mathbf{K}_h$也满足

讨论： von Laue方程与Bragg定律的图象

- Bragg定律的所有疑问在von Laue方程中全无疑问，或在此基础上全都可以解决
  - * 而Bragg定律实际上只是von Laue方程中满足衍射极大的条件特例
- 注意：当时量子力学还未完全建立，但是von Laue方程物理图象就是在今天看来也是正确的
  - * X射线被电子在各个方向散射
  - * 由于原子核的周期性排列的，围绕着原子核的电子也可以被认为是周期性分布的
    - # 所以在某些方向上，散射波相消干涉；在某些方向上，散射波相长干涉，产生衍射极大

幸运总是眷顾有准备的脑袋

- **von Laue**的初衷并非晶体结构衍射
  - ＊ 初衷是测量**X**射线的波长——因为用普通光栅衍射来测**X**射线波长波长不行，**X**射线波长太短
- 得益于一个向他请教问题的博士生
  - ＊ **Sommerfeld**的博士生**Ewald**因研究晶体双折射图象，向**von Laue**请教晶体中偶极子与电磁波作用问题。**von Laue**这才得知，晶体中的原子间距是**1A**数量级。他意识到这是**X**射线的天然光栅！结果所得比初衷还要丰厚。 **von Laue**随后得到了硫酸铜晶体的衍射斑点，并给出了正确的理论解释
  - ＊ 从此揭开了晶体分析的序幕，也为固体物理学奠定了基础，这个事件是固体物理学发展史上的重要里程碑。**1914**年得到了诺贝尔物理学奖

这件事说明

1. 研究要干净，分析要透彻;
2. 不要轻易放过任何不明白的现象;
3. 学生也是老师的老师

→视野拓展→由von Lauer条件看B区边界

- 由von Laue条件，$\mathbf{k}'-\mathbf{k}=\mathbf{K}_h$
  - * 可以得到

$$\mathbf{k}-\mathbf{K}_h=\mathbf{k}' \Rightarrow (\mathbf{k}+\mathbf{K}_h)^2=\mathbf{k}'^2$$

  - * 因弹性散射|**k**|=|**k'**|

$$\mathbf{k}\cdot\mathbf{K}_h=\frac{1}{2}\mathbf{K}_h^2$$

  - * 因此，von Lauer条件可写成

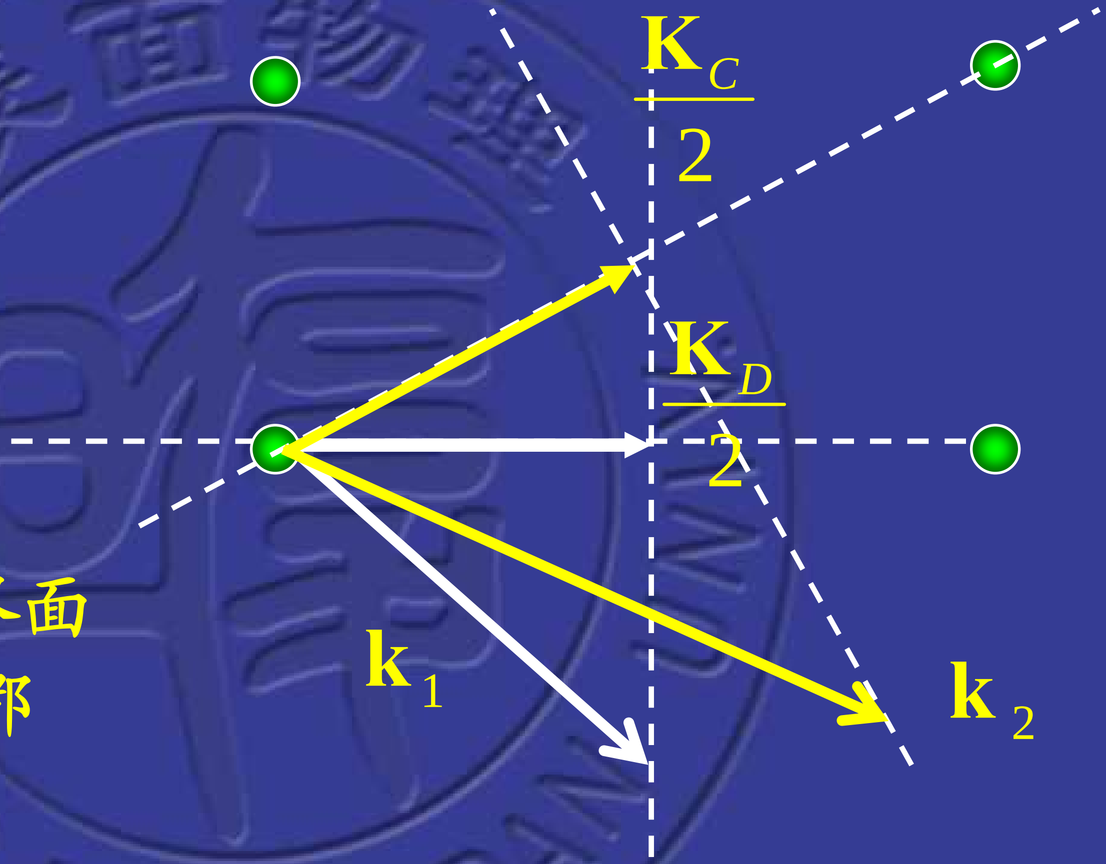
$$\mathbf{k}\cdot\frac{\mathbf{K}_h}{2}=\left(\frac{\mathbf{K}_h}{2}\right)^2$$

→视野拓展→由von Lauer条件看B区边界

- 由改写的von Laue条件

$$\mathbf{k}\cdot\left(\frac{\mathbf{K}}{2}\right)=\left(\frac{\mathbf{K}}{2}\right)^2$$

- 从原点出发到Brillioun区边界面上的任何矢量都满足衍射条件！



→视野拓展→由von Lauer条件看B区边界

- **Brillioun**区边界面上的任何矢量都满足衍射极大这个条件→重要性质

→能隙：该能量区域内无电子！

* 在电子不受原子作用(比如自由电子，因而无晶格也因而无**Brillioun**区边界)时，电子能量***E*(k)**是连续的
* 在电子受原子作用时(因而有晶格也因而存在**Brillioun**区边界)，电子受**Brillioun**边界的散射，连续能级会形成一个与**k**有关的能隙→在某些能量区域内，电子不允许存在！
* 能隙将原来连续分布的能量分割→即所谓能带
* →能带理论

设问： Bragg条件和von Laue方程仅给出衍射极大的条件，满足衍射条件是不是一定看得见衍射光斑？

这是一个与散射强度有关的问题。散射强度如果由于某些原因而等于零当然也看不到光斑。那么，散射强度与什么有关？

4、散射强度和结构因子

- 衍射束(光斑)的强度由什么来决定？
- von Laue方程也给出了物理原因：受电子散射
  - * 衍射强度由此得到
  - * X射线与晶体的相互作用，实际上是晶体中每个原子中电子分布对X射线的散射
  - * Bravais格子的结构决定了衍射极大的条件
- 一个原子中所有电子对X射线的散射总和可以归结为以这个原子为中心的散射

散射强度与哪些因素有关？

- 晶胞内原子具体位置决定了散射的位相（热振动对此有影响）
  →几何结构因子
- 每个原子中电子的数目和分布决定了该原子的散射能力
  →原子形成因子

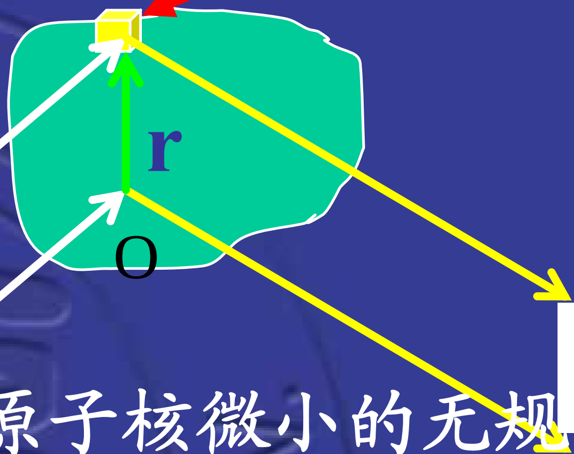
散射强度

$$e^{i(\mathbf{k}-\mathbf{k}')\cdot\mathbf{r}}$$

散射束位相差

- 散射束位相差←点电荷
  - * 考虑分布，则散射振幅为

$$F=\int \rho(\mathbf{r})e^{i(\mathbf{k}-\mathbf{k}')\cdot\mathbf{r}}d\mathbf{r}$$



- 与快速运动的电子相比，对原子核微小的无规热振动作平均后，电子分布仍可视为有周期性

$$\rho(\mathbf{r})=\rho(\mathbf{r}+\mathbf{R}) \longrightarrow \rho(\mathbf{r})=\sum \rho(\mathbf{K})e^{i\mathbf{K}\bullet\mathbf{r}}$$

- 散射振幅于是可写为 $F=\sum \rho(\mathbf{K})\int e^{i[\mathbf{K}-(\mathbf{k}'-\mathbf{k})]\cdot\mathbf{r}}d\mathbf{r}$
- 求和号中的积分只有在 $\mathbf{k}'-\mathbf{k}=\mathbf{K}$ 才不为零
  - * 这才是衍射极大的von Laue条件严格推导，前面导出von Laue方程时只考虑了光程差位相条件

电荷分布的Fourier展开

- 前面直接给出了因为电荷分布具有平移周期性，所以可作Fourier展开

$$\rho(\mathbf{r}) = \sum \rho(\mathbf{K}) e^{i\mathbf{K}\bullet\mathbf{r}}$$

- 展开系数是

$$\rho(\mathbf{K}) = V^{-1} \int \rho(\mathbf{r}) e^{-i\mathbf{K}\bullet\mathbf{r}} d\mathbf{r}$$

- 因为周期性，可把积分局限在原胞内，即

$$\rho(\mathbf{K}) = \Omega^{-1} \int_{\Omega} \rho(\mathbf{r}) e^{-i\mathbf{K}\bullet\mathbf{r}} d\mathbf{r} = \Omega^{-1} S_{\mathbf{K}}$$

- 于是

$$S_{\mathbf{K}} = \int_{\Omega} \rho(\mathbf{r}) e^{-i\mathbf{K}\bullet\mathbf{r}} d\mathbf{r}$$

  * 这就是几何结构因子

几何结构因子

$$S_{\mathbf{K}}=\int_{\Omega}\rho(\mathbf{r})e^{-i\mathbf{K}\cdot\mathbf{r}}d\mathbf{r}$$

$$\rho(\mathbf{r})=\sum_{j=1}^{s}\rho_j(\mathbf{r}-\boldsymbol{\tau}_j)$$

$$S_{\mathbf{K}}=\sum_j\int_{\Omega}\rho_j(\mathbf{r}-\boldsymbol{\tau}_j)e^{-i\mathbf{K}\cdot\mathbf{r}}d\mathbf{r}=\sum_j e^{-i\mathbf{K}\cdot\boldsymbol{\tau}_j}\int_{\Omega}\rho_j(\mathbf{r})e^{-i\mathbf{K}\cdot\mathbf{r}}d\mathbf{r}=\sum_j f_j e^{-i\mathbf{K}\cdot\boldsymbol{\tau}_j}$$

$$\boxed{S_{\mathbf{K}}=\sum_j f_j e^{-i\mathbf{K}\cdot\boldsymbol{\tau}_j}}$$

$$f_j=\int_{\Omega}\rho_j(\mathbf{r})e^{-i\mathbf{K}\cdot\mathbf{r}}d\mathbf{r}$$

- 几何结构因子：原胞内所有原子的散射波，在所考虑的方向上的振幅与一个电子作为点电荷的散射振幅之比
  - * 几何结构因子反映原胞内原子的具体分布对散射的影响

原子形成因子

$$f_j = \int \rho_j(\mathbf{r}) e^{-i\mathbf{K}\cdot\mathbf{r}} d\mathbf{r}$$

$$\mathbf{K} \to 0$$

$$f_j = \int \rho_j(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = Z_j$$

- 原子形成因子：原子j的电荷分布对散射的影响

散射强度——消光条件

- 几何结构因子

$$S_{\mathbf{K}_h} = \sum_j f_j \, e^{-i\mathbf{K}_h \cdot \boldsymbol{\tau}_j}$$

$$\mathbf{K}_h = h\mathbf{u} + k\mathbf{v} + l\mathbf{w}$$

$$\boldsymbol{\tau}_j = x_j\mathbf{a} + y_j\mathbf{b} + z_j\mathbf{c}$$

$$\mathbf{K}_h \cdot \boldsymbol{\tau}_j = 2\pi(hx_j + ky_j + lz_j)$$

(*hkl*)：Miller指数，用晶胞

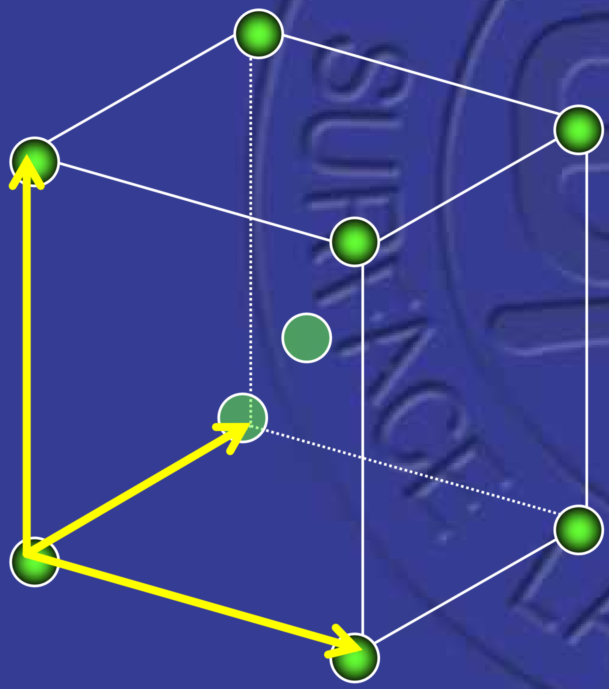
x_j, y_j, z_j：分数

散射强度 $$I_{hkl} \propto |S_{hkl}|^2 = S_{hkl} S_{hkl}^*$$

结构因子有可能使von Laue条件允许的某些衍射斑点消失！

如何确定几何结构因子举例

- bcc结构因子



$$\boldsymbol{\tau}_j : (0.0,0.0,0.0);\quad (0.5,0.5,0.5)$$

$$\boldsymbol{\tau}_j = x_j\mathbf{a} + y_j\mathbf{b} + z_j\mathbf{c}$$

$$S_{\mathbf{K}_h} = \sum_j f_j\, e^{-i\mathbf{K}_h \boldsymbol{\tau}_j}$$

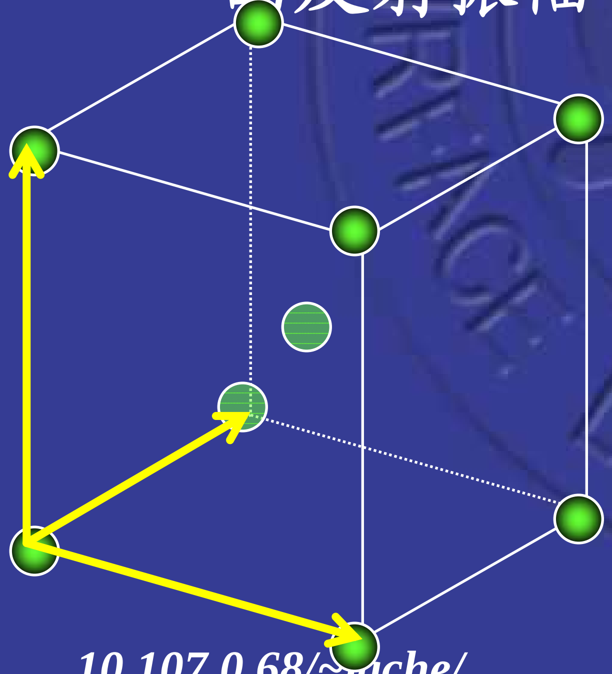
$$\mathbf{K}_h \cdot \boldsymbol{\tau}_j = 2\pi(hx_j + ky_j + lz_j)$$

$$S_{\mathbf{K}_h} = f(1+e^{-i\pi(h+k+l)})$$

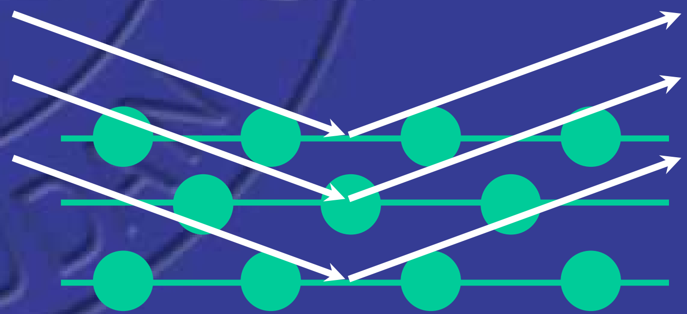
$$= \begin{cases} 0 & h+k+l = \text{奇数} \\ 2f & h+k+l = \text{偶数} \end{cases}$$

思考：$h+l+k$=奇数，S_K=0，衍射光斑消失！比如(001)面，bcc结构(001)这个晶面(不是这个晶面方向的晶面族)衍射斑点消失？为什么？物理图象？

相邻晶面产生相位差都是π，所以产生的反射振幅之和为零，不产生衍射光斑



$$1+e^{-i\pi}=1-1=0$$



例：fcc结构因子

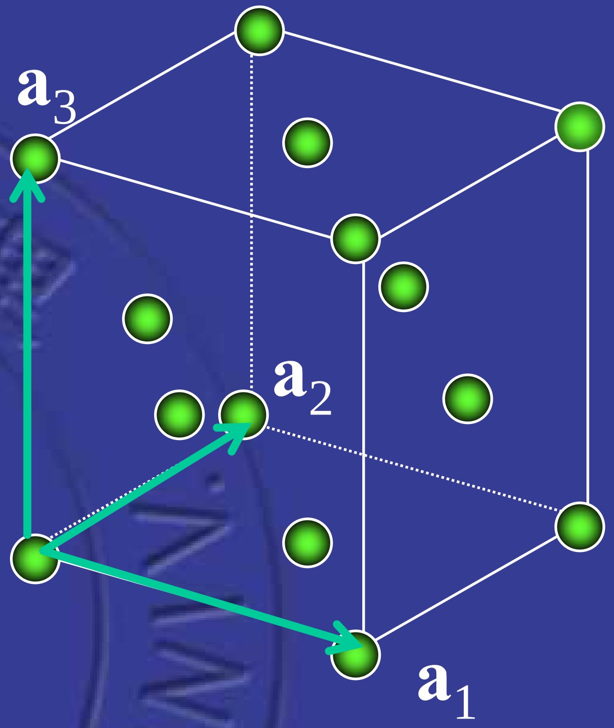
$\boldsymbol{\tau}_j : (0.0,0.0,0.0) ; (0.0,0.5,0.5);$

$(0.5,0.5,0.0); \ (0.5,0.0,0.5)$

$$\boldsymbol{\tau}_j = x_j\mathbf{a} + y_j\mathbf{b} + z_j\mathbf{c}$$

$$S_{\mathbf{K}_h} = \sum_j f_j e^{-i\mathbf{K}_h \boldsymbol{\tau}_j}$$

$$\mathbf{K}_h \cdot \boldsymbol{\tau}_j = 2\pi(hx_j + ky_j + lz_j)$$



$$S_{\mathbf{K}_h} = f(1 + e^{-i\pi(k+l)} + e^{-i\pi(h+l)} + e^{-i\pi(h+k)})$$

$$S_{\mathbf{K}_h} \neq 0 \qquad h,k,l\text{全为奇数或偶数}$$

也许要问：这里的消光的例子都是晶胞！如不用密勒指数，而用晶面指数，还会有消光吗？消光在这里的真实含义是什么？

晶胞可以包含一个以上的格点。如果把晶胞看作基本结构，也可用一个点来代表，我们把它叫做结点，以区分格点。那么，结点也满足平移对称性。在正空间，结点数等于或小于格点数；但是，在倒空间，倒结点数就大于等于倒格点数！倒格点代表晶面，密勒指数对应倒结点。这两个例子的消光，就是消除所有不是格点的结点

也许再问：不用密勒指数，而用晶面指数，就不存在消光现象了？

如果原胞内只有一个原子，是的！但是原胞内可能并不止一个原子。所以，有两类消光，一类是指密勒指数对应的消光现象，我们前面说了，对应的是结点，另一类请看下面金刚石结构的例子

例：金刚石结构的几何结构因子

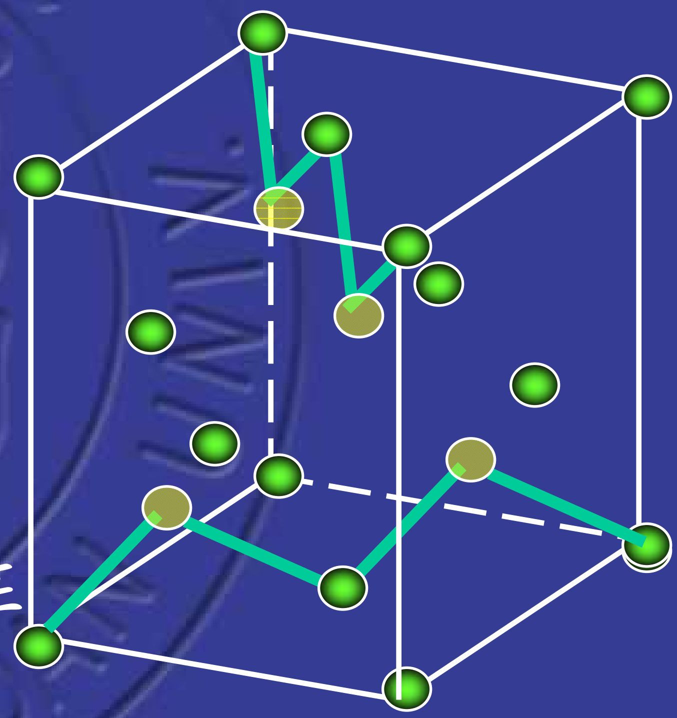
- 基矢：a=*a*i, b=*a*j, c=*a*k
- 晶胞含8个原子：(用基矢表示)
- 8个顶角由8个晶胞共享，各1/8，只计1个

  (0,0,0)
- 3对面心，每个面由2个晶胞共享，各1/2，计3个

  (0,0.5,0.5); (0.5,0,0.5); (0.5,0.5,0)
- 另外有4个在完全在晶胞内，在4条对角线上(四面体中心)

  (0.25,0.25,0.25); (0.75,0.75,0.25);

  (0.75,0.25,0.75); (0.25,0.75,0.75)



- 立方晶系，基矢：**a**=a**i**, **b**=a**j**, **c**=a**k**，所以

$$\mathbf{K}=\frac{2\pi}{a}\left(h\hat{\mathbf{i}}+l\hat{\mathbf{j}}+k\hat{\mathbf{k}}\right)$$

- 结构因子为 $$S_{\mathbf{K}}=\sum_i f_i e^{-i\mathbf{K}\bullet\boldsymbol{\tau}_i}$$

- 晶胞内位矢为

  (0,0,0); (0,0.5,0.5); (0.5,0,0.5); (0.5,0.5,0); (0.25,0.25,0.25); (0.75,0.75,0.25); (0.75,0.25,0.75); (0.25,0.75,0.75)

- 几何结构因子

$$S_{\mathbf{K}}=f\left(1+e^{-i\pi(h+k)}+e^{-i\pi(h+l)}+e^{-i\pi(k+l)}+e^{-i\pi(h+l+k)/2}+e^{-i\pi(3h+l+3k)/2}+e^{-i\pi(h+3l+3k)/2}+e^{-i\pi(3h+3l+k)/2}\right)$$

- 金刚石的结构因子也可以写成两项的乘积，一项是面心立方的相因子

$$\left(1+e^{-i\pi(h+l)}+e^{-i\pi(k+l)}+e^{-i\pi(h+k)}\right)$$

- 另一项可由面心立方结构沿对角线移动**1/4**的对角线长度得到，这个因子是由这样两个原子，即一个在原点，一个在对角线**1/4**长度距离的相位差，相当于**(0,0,0)**和**(0.25,0.25,0.25)**的相因子

$$\left(1+e^{-i\pi(h+l+k)/2}\right)$$

- 这两个相因子的乘积就是金刚石结构的几何结构因子，消光条件就容易判断

$$S_{\mathbf{K}}=f\left(1+e^{-i\pi(h+l+k)/2}\right)\left(1+e^{-i\pi(h+l)}+e^{-i\pi(k+l)}+e^{-i\pi(h+k)}\right)$$

金刚石结构的属面心立方格子。它的结构因子可以分成两个因子的乘积：其中面心立方格子相因子给出的消光条件，消除的是立方晶胞对应的倒结点，相对于面心立方格子的倒格子所多余的倒结点；而沿对角线移动1/4对角线长度所得的相因子就导致另一类消光：是原胞内原子分布结构引起的相干散射而产生的消光

本讲小结：兼答本讲目的所提问题

- 晶体结构衍射理论
  * 衍射极大条件
    # Bragg定律
    # von Laue方程→布里渊区边界
  * 散射强度
    # 几何结构因子 $S_{\mathbf{K}}=\sum_j f_j\, e^{-i\mathbf{K}\cdot\boldsymbol{\tau}_j}$
    # 原子形状因子 $f_j=\int \rho_j(\mathbf{r})e^{-i\mathbf{K}\cdot\mathbf{r}}d\mathbf{r}$
- 两种不同类型的消光
  1. 与晶胞所导致的多余的倒结点有关的消光
  2. 与原胞内原子分布引起的相干散射有关的消光

新引入概念

- 衍射极大条件
  - * Bragg反射面
  - * von Laue条件
- 散射振幅
  - * 几何结构因子
  - * 原子形成因子

习题：

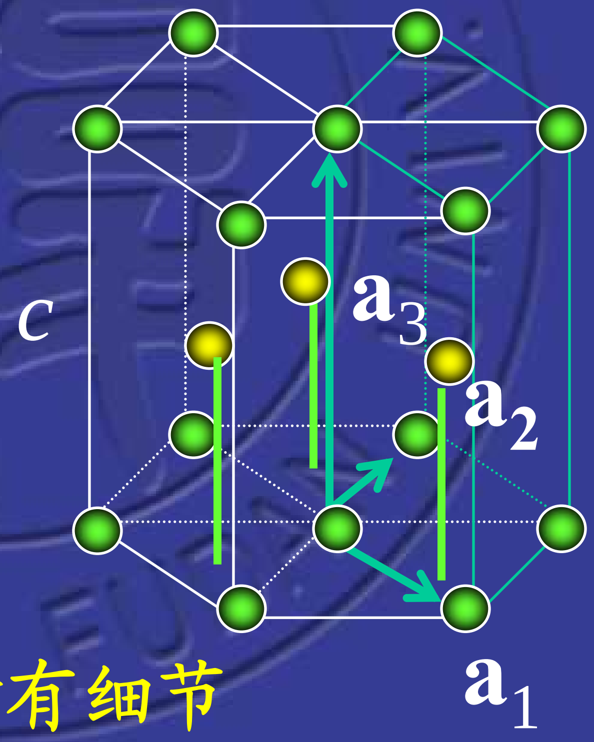
10. 六角密堆积结构，试确定

① 晶胞、基矢、晶胞内原子位矢；

② 倒格子基矢；

③ 几何结构因子；

④ 讨论其消光条件。



要能够独立完成，熟记所有细节

课堂讨论题

- 衍射理论依赖于晶格的平移周期性，但衍射理论假定之一是假定原子刚性固定。如果温度升高，原子作热振动，即使是微小的振动，也偏离了平衡位置，平移周期性必被破坏。设问：这时，衍射极大条件还满足吗？
  - * 实验指出，微小的热振动只影响散射强度，而不影响衍射束宽度！
- 这是为什么？

偏离平衡位置的是原子核，而X射线主要是受电子散射！与快速运动的电子相比，对原子核微小的无规偏移作热平均后即可得这个结论。散射是受电子的散射。