

Cristalografia

Neste problema não será preciso avaliar os erros das medidas. A lista de equipamentos e recomendações para seu uso está no final do problema.

Introdução

Em cristalografia usamos um sincrotrão do tamanho de um estádio de futebol para medir distâncias da ordem de vários angstroms (por exemplo o comprimento da ligação peptídica entre os aminoácidos 1.3 Å).

O principal objeto de estudo na cristalografia é um cristal que pode ser pensado como um arranjo de átomos ou moléculas que se repete periodicamente no espaço. Este grupo de átomos que se repete chama-se célula unitária (unit cell). (fig. 1)

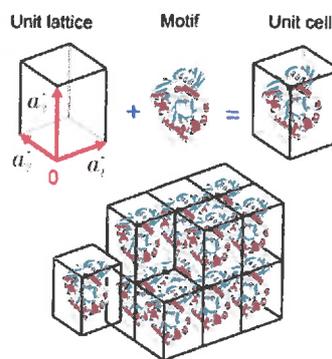


Figura. 1: Sabendo a célula unitária consegue-se representar o cristal inteiro.

Se $\rho(\vec{x})$ é uma função que descreve a estrutura da célula unitária (por exemplo, as posições dos átomos ou a densidade dos eletrões) e se $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$ são os vetores da rede (que podem não ser perpendiculares uns aos outros), então um cristal completo pode ser gerado usando a seguinte equação:

$$\rho(\vec{x} + e \cdot \vec{a}_1 + f \cdot \vec{a}_2 + g \cdot \vec{a}_3) = \rho(\vec{x}), \quad e, f, g, \in \mathbb{Z}. \quad (1)$$

No caso de cristais a 1D ou 2D basta um (\vec{a}_1) ou dois vetores (\vec{a}_1 e \vec{a}_2) respectivamente, para criar um cristal a partir da célula unitária.

A tarefa principal da experiência cristalográfica é determinar a estrutura cristalina (em particular, $\rho(\vec{x}), \vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$).

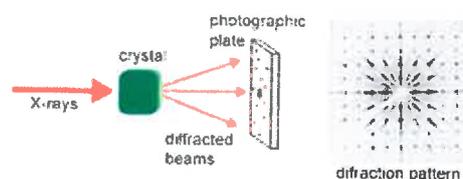


Figura. 2: Esquema de uma experiência cristalográfica

Devido à periodicidade do cristal, um método que pode ser usado para determinar a estrutura é a difração de raios X.

Em cristalografia (fig. 2) um feixe incidente com intensidade I_0 , comprimento de onda λ e vetor de onda \vec{k}_i , ($|\vec{k}_i| = 2\pi/\lambda$) atravessa o cristal (no caso de um cristal em 2D o vetor \vec{k}_i é perpendicular ao plano do cristal). O feixe difratado tem o mesmo comprimento de onda λ . Assim, o vetor \vec{k}_s difratado tem $|\vec{k}_s| = |\vec{k}_i|$ e a sua diferença de orientação em relação ao vetor correspondente do feixe incidente pode ser descrito pelo vetor de difração $\vec{q} = \vec{k}_s - \vec{k}_i$ (fig. 3). Sabe-se que $q = 2k_i \sin(\theta/2)$. Podemos supor que o ângulo θ entre \vec{k}_s e \vec{k}_i é muito menor que um, ou seja, $q \ll k_i$.

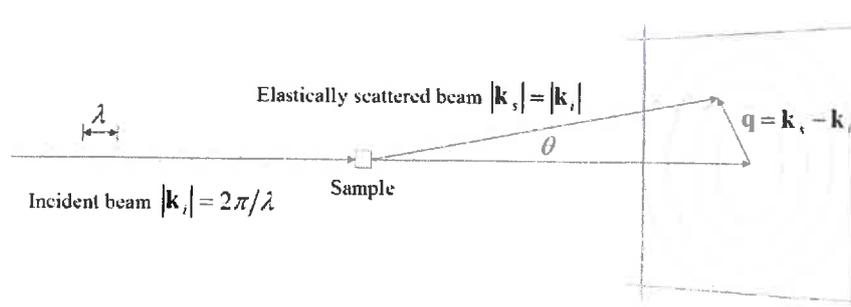


Fig. 3: O vetor de difração.

A amplitude complexa $F(\vec{q})$ do feixe difratado \vec{q} é chamada de **fator de estrutura** (uma vez que é determinada pela estrutura cristalina) e é denotada por $F(\vec{q})$. Possui um módulo $|F|$ e uma fase φ :

$$F(\vec{q}) = |F| \cdot \exp(i\varphi). \quad (2)$$

A intensidade do feixe difratado que é medida, $I(\vec{q})$, é igual ao quadrado do módulo da amplitude:

$$I = |F|^2 = FF^*. \quad (3)$$

A partir do processamento posterior dessas intensidades, a densidade $\rho(\vec{x})$ pode ser determinada. Os cristais analisados tanto podem ser constituídos por pequenas moléculas inorgânicas (sais ou compostos complexos) ou por enormes moléculas orgânicas (proteínas ou ADN), e a densidade $\rho(\vec{x})$ determina as posições dos átomos do composto na célula unitária do cristal. Nesse caso, raios-X coerentes com comprimento de onda de 1 – 10 Å (por exemplo, radiação de sincrotrão), são usados, correspondendo às distâncias típicas entre átomos. Se as distâncias forem maiores, um comprimento de onda diferente deve ser escolhido (por exemplo, a luz visível pode ser usada para grades ópticas).

Agora irá tentar ser um cristalógrafo por uma tarde. Na Parte A, usando o exemplo de uma rede de difração (cristal 1D), estudaremos as leis básicas. Nas partes B, C, D, irá determinar os parâmetros de rede, a simetria da célula unitária e a sua estrutura interna.

Parte A. Da fenda ao cristal

O exemplo mais simples de um cristal é uma rede de difração óptica que pode ser considerada como sendo um cristal unidimensional. Esse cristal tem como célula unitária, uma fenda (com largura b) e uma lacuna entre fendas (fig. 4A). O período da rede $a_1 = a$ é igual ao módulo do vetor unidimensional que gera o cristal.

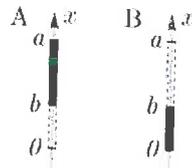


Fig. 4: Células unitárias (A e B) de um cristal 1D da rede de difração. As áreas não transparentes são mostradas em preto.

Quando observar esta difração de Fraunhofer produzida por uma rede de difração, a intensidade da luz I depende do ângulo de propagação da luz θ da seguinte forma:

$$I(\theta) = \frac{I_0}{N^2} \left(\frac{\sin\left(\frac{N\pi a \sin\theta}{\lambda}\right)}{\sin\left(\frac{\pi a \sin\theta}{\lambda}\right)} \right)^2 \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi b \sin\theta}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\pi b \sin\theta}{\lambda}\right)} \right)^2, \quad (4)$$

onde I_0 é a intensidade em $\theta = 0$, e N é o número de fendas iluminadas da rede de difração.

Para entender a Equação 4, note que:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1. \quad (5)$$

A.1	Re-escreva a equação 4 usando o vetor de difração q ($q \ll k_i$).	0.3pt
A.2	Encontre o vetor de difração q para o máximo número h (contado partir do máximo central) obtido a partir de uma rede de difração com período a .	0.2pt
A.3	Vamos supor que q_1 é o vetor de difração para o primeiro máximo. Escreva q em termos q_1 para os máximos da intensidade. Como estão relacionados q_1 e a ?	0.2pt
A.4	Observe a difração das amostras DG1 a DG5. Determine experimentalmente q_1 e a para cada amostra. Desenhe um esquema da montagem experimental utilizada, escreva as grandezas que está a medir e anote as fórmulas usadas nos cálculos realizados.	1.0pt
A.5	Realize uma experiência para determinar a razão a/b nas amostras DG3, DG4, e DG5. Explique o seu método usando fórmulas, diagramas e imagens. Sabe-se que $b \leq a/2$.	1.5pt

Note que o período do cristal $a_1 = a$ é o responsável pela periodicidade dos máximos da difração, e que os parâmetros da célula unitária (neste caso a largura da fenda b) são os responsáveis pela intensidade dos máximos. Este facto é usado para simplificar o cálculo da intensidade relativa dos máximos usando o fator de estrutura $F(q)$:

$$F(q) \sim \int \rho(x) \exp(iqx) dx, \quad (6)$$

onde $\rho(x)$ é a transmissão (a razão entre as amplitudes da onda transmitida e da onda incidente para cada ponto da rede), e q é o vetor de difração, que descreve a posição no padrão de difração. A integração é realizada sob toda a célula unitária. Se substituirmos q pela posição dos vários máximos, será possível encontrar as intensidades relativas entre os máximos considerando que $I = |F|^2$. Considere que $\rho(x) \in \mathbb{R}$.

As posições dos máximos de intensidade da difração (chamados de **reflexos**) podem sempre ser representados como uma soma de vetores (chamados de **vetores de rede recíproca**):

1-D: $\vec{q} = h \cdot \vec{q}_1$, onde $h \in \mathbb{Z}$;

2-D: $\vec{q} = h \cdot \vec{q}_1 + k \cdot \vec{q}_2$, onde $h, k \in \mathbb{Z}$;

3-D: $\vec{q} = h \cdot \vec{q}_1 + k \cdot \vec{q}_2 + l \cdot \vec{q}_3$, onde $h, k, l \in \mathbb{Z}$.

Assim, cada reflexo para um cristal 3D pode ser denotado por três números (h, k, l) (e (h) para 1D e (h, k) para 2D) e tem sua própria amplitude complexa $F(h, k, l)$ e intensidade $I(h, k, l)$.

A.6 Escreva $\rho(x)$ para a célula unitária da rede de difração de A1 (fig. 4A). Use o sistema de coordenadas conforme mostrado na figura. Vamos supor que a célula unitária é tal que o período da rede a é p vezes maior que a largura da fenda b : $a = pb$, $p \in \mathbb{N}$. Calcule o fator de estrutura $F_A(h)$ desta célula unitária para o reflexo h . Escreva sua resposta usando h e q_1 . Que máximos (reflexos) têm intensidade igual a 0? Escreva a equação para os números h de tais máximos. 0.7pt

A.7 Vamos considerar uma nova célula unitária (fig. 4B) para uma outra rede de difração. Calcule o fator de estrutura $F_B(h)$ para esta célula unitária para o reflexo h . Quais reflexos desta rede de difração que têm intensidade 0? Escreva a equação para os números h de tais máximos. 0.7pt

A.8 Estas duas redes de difração descritas acima são iluminadas com luz da mesma intensidade. Encontre os quocientes $I_{A,h=0}/I_{B,h=0}$ e $I_{A,h=1}/I_{B,h=1}$. 0.4pt

Parte B. Cristal 2D

Nesta parte, irá realizar a primeira etapa na definição da estrutura de um cristal: encontrar os parâmetros de rede.

Os vetores da rede recíproca no caso de 2D

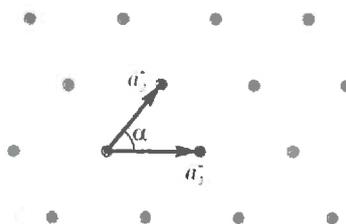


Fig. 5: Cristal 2D com vetores \vec{a}_1 e \vec{a}_2 como vetores de rede. Os pontos representam as posições dos átomos no cristal.

Vamos considerar a difração num cristal bidimensional. O cristal 2D de átomos pontuais é mostrado na fig. 5. Os vetores da rede \vec{a}_1 e \vec{a}_2 têm um ângulo $\alpha \leq 90^\circ$ entre eles.

Se o plano do cristal 2D for colocado perpendicularmente ao feixe, então irá aparecer um padrão de difração periódico no ecrã atrás do cristal. A posição dos máximos nesse padrão é descrita pela expressão $\vec{q} = h \cdot \vec{q}_1 + k \cdot \vec{q}_2$, onde $h, k \in \mathbb{Z}$.

Pode ter uma ideia desse padrão de difração observando os padrões de difração obtidos com as amostras UC1-UC7.

- B.1** Encontre o ângulo β entre os vetores \vec{q}_1 e \vec{q}_2 e os seus comprimentos q_1, q_2 . Note que esses vetores devem ter comprimento mínimo e o ângulo entre eles deve ser $\leq 90^\circ$. Expresse sua resposta usando os parâmetros de cristal a_1, a_2, α (fig. 5). 1.0pt

Amostras UC1-UC4: os cristais 2D mais simples

Vamos considerar quatro cristais 2D A, B, C, D (fig. 6). Estes cristais têm uma célula unitária quadrada com vetores de rede perpendiculares com comprimento igual. A célula unitária de cada cristal contém um átomo (um quadrado não transparente com um lado b num filme transparente). As células unitárias C e D também contêm átomos deslocados de um tipo diferente. No cristal C, o tamanho do átomo do segundo tipo b' é maior que o do primeiro: $b' > b$. No cristal D, o segundo átomo tem o mesmo tamanho que o primeiro e está deslocado meio de período da rede para a direita e meio período da rede para cima.

- B.2** Para os cristais A e D, obtenha o módulo da amplitude complexa $|F(h, k)|$ para o reflexo com índices (h, k) . Expresse a sua resposta em termos de a (período do cristal) e b (tamanho do átomo). Basta indicar uma expressão que seja verdadeira para todos os reflexos, exceto para o central ($h = 0, k = 0$). 1.0pt

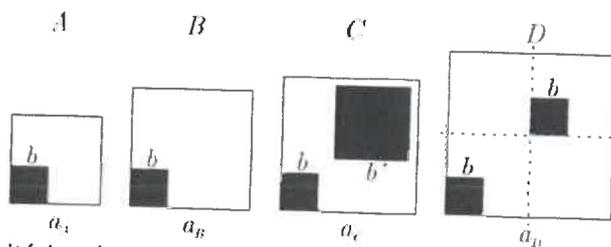


Fig. 6: As células unitárias dos cristais A-D são quadradas. Sabe-se que $a_B > a_A$. As outras proporções entre os tamanhos não são conhecidas.

- B.3** Observe os padrões de difração das amostras UC1-UC4. Determine experimentalmente o período da rede cristalina $a_{UC1}, a_{UC2}, a_{UC3}, a_{UC4}$ para cada uma das amostras UC1-UC4. 0.6pt

- B.4** Para cada uma das amostras UC1-UC4, encontre a estrutura cristalina correspondente na fig. 6. Explique sua escolha usando diagramas, imagens e fórmulas. 0.4pt

B.5 Determine o tamanho do átomo b .

0.8pt

Amostras UC5-UC7: Ainda sobre Cristais 2D Simples

B.6 Observe os padrões de difração das amostras UC5, UC6, e UC7. Determine experimentalmente os parâmetros a_1 , a_2 e o ângulo α para cada uma das amostras. Com a ajuda de diagramas e figuras, explique quais parâmetros do padrão de difração que usou na determinação dos parâmetros de rede.

1.2pt

Parte C. Simetrias dos cristais

A segunda etapa após calcular os parâmetros da célula unitária é determinar a sua simetria.

Simetrias: Teoria

As células unitárias dos cristais reais geralmente contêm as várias moléculas dispostas espacialmente em posições que têm algum tipo de simetria (fig. 7). O conhecimento dessas simetrias simplifica bastante o processo de definição da estrutura do cristal. A simetria da célula unitária define também as simetrias no espaço recíproco e as ausências sistemáticas (reflexos que aparecem com intensidade zero para cada célula unitária com tal simetria). A ausência sistemática é determinada por condições especiais para h e k (fig. 8).

Simetrias típicas para intensidades dos reflexos:

- **simetria de reflexão** ao longo de uma linha reta. Esta reta é chamada de eixo de simetria e é denotada pela equação desta linha;
- **simetria rotacional** de ordem m (denotada como C_m em relação a um centro de rotação específico, $m \in \mathbb{N}$). Quando girada por um ângulo de $360^\circ \cdot n/m$, $n \in \mathbb{Z}$, a imagem fica inalterada).

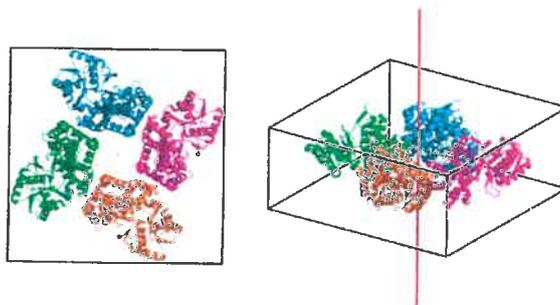


Fig. 7: Esta célula unitária tem a simetria rotacional C_4 : rotação em torno do eixo vermelho por $n \cdot 90^\circ$ graus, $n \in \mathbb{Z}$ dá a mesma célula.

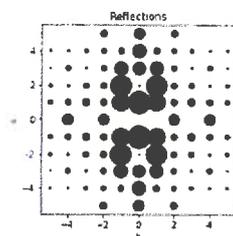


Fig. 8: Os reflexos ($h = 2n + 1, k = 0$) estão sistematicamente ausentes. Nota: reflexo (0,0) com intensidade relativamente alta é omitido aqui para maior clareza.

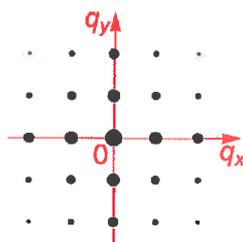


Fig. 9: Difração de um cristal 2D

Vamos considerar o padrão de difração (fig. 9) de um cristal 2D com vetores de rede perpendiculares iguais entre si ($a_1 = a_2$). Este padrão de difração é mostrado na figura (apenas reflexos $|h|, |k| \leq 2$ são mostrados).

- | | | |
|------------|--|-------|
| C.1 | Especifique os índices h e k para o ponto que será o centro de rotação. Que ordens de simetria rotacional m são possíveis para esta imagem? Marque todos os eixos possíveis de simetria de reflexão na imagem. Dê um nome a cada eixo de simetria. | 0.3pt |
|------------|--|-------|

O eixo de simetria é uma reta, o que significa que ela pode ser indicada como uma equação da reta $c_1 \cdot q_x + c_2 \cdot q_y = d$, onde c_1, c_2, d são constantes.

- | | | |
|------------|---|-------|
| C.2 | Especifique a equação da reta para cada eixo de simetria de reflexão desenhado na tarefa anterior. Indique que equação corresponde a que linha. | 0.2pt |
|------------|---|-------|

- | | | |
|------------|---|-------|
| C.3 | Para cada simetria rotacional e eixo de simetria de reflexão, anote a designação apropriada (C_m para rotação e equação para simetria do espelho) e assim como a equação para as intensidades $I(q_x, q_y)$, que devem ocorrer se este elemento de simetria estiver presente. | 0.4pt |
|------------|---|-------|

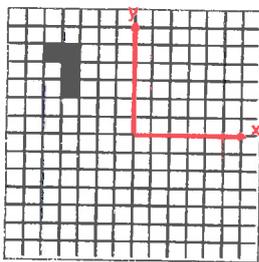
- | | | |
|------------|--|-------|
| C.4 | Escreva a equação para as intensidades dos reflexos (h, k) e $(-h, -k)$. Que simetria da questão C1 corresponde a esta equação? Justifique. | 0.2pt |
|------------|--|-------|

Vamos considerar alguns cristais que têm células unitárias como as descritas na fig. 10. Os quadrados pretos representam elementos não transparentes, os quadrados brancos representam elementos transparentes. A célula unitária do cristal 2 foi obtida pela simetria de reflexão da célula unitária inicial em

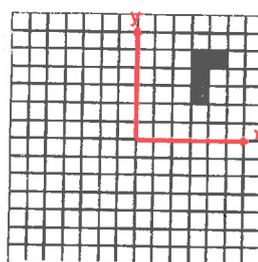
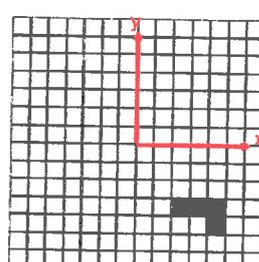
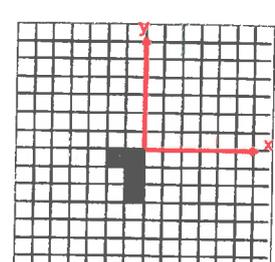
relação ao eixo $x = 0$. A célula unitária do cristal 3 foi obtida pela simetria de reflexão da célula unitária inicial em relação ao eixo $y = x$. O cristal 4 é obtido deslocando o original pelo vetor (x_1, y_1) .

- C.5** Usando a definição do fator de estrutura e a simetria, encontre os fatores de estrutura $f_2(q_x, q_y)$, $f_3(q_x, q_y)$, $f_4(q_x, q_y)$ para os cristais 2, 3, 4, respectivamente. Expresse sua resposta em termos do fator de estrutura $F(q_x, q_y) = f_1(q_x, q_y)$ do cristal 1. 0.4pt

- C.6** Vamos considerar um cristal 2D arbitrário (fig. 5). Indique quais ordens de simetria rotacional m que se podem encontrar em cristais 2D. Explique a sua resposta. 0.5pt



1. initial

2. $x = 0$ 3. $y = x$ 

4. moved

Fig. 10: As células unitárias dos cristais 2, 3, 4 foram obtidas a partir de 1 usando diferentes simetrias.

Simetrias: observe experimentalmente

A folha de respostas contém células unitárias para as amostras **PG1-PG9**. Tendo estudado a simetria das células unitárias e os padrões de difração, assim como os reflexos sistematicamente ausentes, iremos encontrar a correspondência entre a amostra e a célula unitária.

- C.7** Determine que simetrias têm os cristais com as células unitárias K, L, M, N , e P, Q, R, S, T . (a fig. está na folha de respostas). Desenhe os eixos de simetria de reflexão, e na parte inferior da imagem indique quais as simetrias rotacionais que estão presentes. 0.9pt

- C.8** Observe os padrões de difração das amostras **PG 1, 2, 5, 8**. Essas amostras correspondem às células unitárias K, L, M, N . Determine que simetrias têm os tais padrões de difração. Encontre a correspondência entre os padrões observados e as células unitárias. 0.8pt

As simetrias dos padrões de difração podem ser calculadas usando a regra da soma (a amplitude complexa de um objeto complexo é a soma das amplitudes complexas das partes desse objeto) e o conhecimento de como as simetrias mudam as amplitudes complexas de cada um dos termos. Além disso, a regra da soma permite definir ausências de picos intensidade.

C.9 Observe a difração das amostras **PG 3, 4, 6, 7, 9**. Essas amostras correspondem às células unitárias *P, Q, R, S, T*. Encontre a correspondência entre as amostras e as células unitárias. Explique sua solução usando fórmulas, diagramas e imagens. 1.0pt

C.10 Observe o padrão de difração da amostra UC8. Esta amostra poderia ser um cristal? Explique sua resposta. 0.3pt

Parte D. As fases são importantes...

Depois de determinar os parâmetros da célula unitária e sua simetria, está na altura da última etapa: determinar o conteúdo da célula unitária.

Problema da fase...

Quando a radiação é difratada pelo cristal, as amplitudes complexas podem ser calculadas usando a seguinte fórmula (é chamada de transformada de Fourier)

$$F(\vec{q}) \sim \int \rho(\vec{x}) \cdot \exp(i\vec{q}\vec{x}) d\vec{x}. \quad (7)$$

Para determinar a estrutura de um cristal a partir dos padrões de difração, é necessário realizar a transformada inversa de Fourier:

$$\rho(\vec{x}) \sim \int F(\vec{q}) \cdot \exp(-i\vec{q}\vec{x}) d\vec{q}. \quad (8)$$

Uma vez que temos reflexos discretos, a fórmula acima pode ser escrita da seguinte forma

$$\rho(\vec{x}) \sim \sum |F(\vec{q})| e^{i\varphi} \cdot \exp(-i\vec{q}\vec{x}), \quad (9)$$

onde a soma é realizada sobre todos os reflexos. Na verdade, é suficiente obter apenas os reflexos mais brilhantes, já que sua contribuição para o total é a maior.

As intensidades medidas experimentalmente $I(\vec{q})$ permitem determinar apenas o módulo $|F(\vec{q})|$. Infelizmente, as intensidades não contêm informações sobre as fases φ , então é impossível calcular diretamente $\rho(\vec{x})$ a partir das intensidades. Esse problema é chamado de problema da fase.

A maneira usual de resolver o problema da fase é obter algumas fases aproximadas, usá-las para calcular a densidade do cristal, e depois atualizar as fases usando essa densidade calculada, e repetir o processo até que a estrutura obtida seja satisfatória.

Existem vários métodos para obter as fases iniciais. Supõe-se que exista uma estrutura cristalina conhecida e que os cristais conhecidos e desconhecidos sejam estruturalmente semelhantes. Nesse caso, pode simplesmente usar as fases calculadas a partir da estrutura conhecida com as intensidades medidas na transformada inversa de Fourier (9) para a estrutura desconhecida.

...que é resolvido com sucesso

Tem 3 cristais 2D diferentes: MR0, MR1, MR2. A célula unitária de cada um é um quadrado 4x4, com alguns quadrados não transparentes ($\rho = 0$), e outros transparentes ($\rho = 1$). A célula unitária MR0 é conhecida (fig. 11). As estruturas MR1 (possíveis variações são mostradas na fig. 12) e MR2 (contém 7 quadrados brancos) são desconhecidas, mas você sabe que elas são bastante semelhantes a MR0.

Usando a abordagem acima, irá definir as estruturas MR1 e MR2. As fases dos reflexos (em radianos) com $|h|, |k| \leq 2$ foram calculadas preliminarmente (fig. 13) para a estrutura MR0 (no sistema de coordenadas mostrado na fig. 11). Pista: as partes imaginárias das densidades $\text{Im}\rho(\vec{x})$ são iguais a zero com boa precisão, o que significa que é suficiente contar apenas a parte real de cada termo na soma (9).

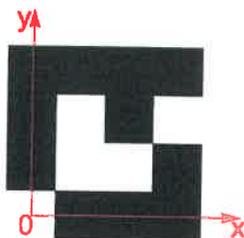


Fig. 11: Estrutura MR0 com o seu sistema de coordenadas. Quadrados brancos - transparentes, pretos - não transparentes.



Fig. 12: Possíveis células unitárias do cristal MR1.

	2	3.142	0.4636	0	-0.4636	3.142
	1	0	-0.4636	2.034	-1.571	0
	0	3.142	-1.571	0	1.571	3.142
k	-1	0	1.571	-2.034	0.4636	0
	-2	3.142	0.4636	0	-0.4636	3.142
		-2	-1	0	1	2
		h				

Fig. 13: Fases dos reflexos (em radianos) para a estrutura MR0 para os reflexos $|h| \leq 2$, $|k| \leq 2$.

D.1 O cristal (MR0 ou MR2) é iluminado com luz com uma intensidade I_0 . Encontre a intensidade do máximo em $\vec{q} = 0$. 1.0pt

9. Agulha
10. Fita adesiva
11. Chave de fendas
12. Régua
13. Clipes grandes (2 un.)
14. Fita métrica
15. Slides ("Diffraction grating", "Unit cell", "Plane group", "Molecular replacement") com amostras
16. Película para reduzir a intensidade do laser
17. Clipes pequenos (4 un.)
18. Suporte de slides (precisa ser montado)
19. Papel milimétrico
20. Cartão
21. Pasta com película magnética

Amostras

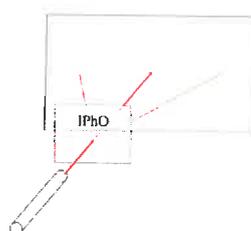


Fig. 15: Coloque e ilumine as amostras como mostrado.

As amostras devem ser iluminadas com um laser da seguinte maneira. Posicione a amostra de forma que a legenda (título do slide em inglês) fique na parte superior do slide e seja lida da esquerda para a direita. Neste caso, o laser deve incidir à frente do slide, e o ecrã de observação deve estar atrás do slide (fig. 15).

Detector de intensidade



Fig. 16: Detalhes do detector de intensidade.

Para medir intensidades, use o fotodiodo conectado a um voltímetro, resistência e pilha de acordo com o circuito mostrado na fig. 17. Neste circuito, a corrente através do diodo é proporcional à intensidade da luz incidente.

Preste atenção à polaridade da ligação. Na pilha, o fio vermelho é positivo. Comece por usar uma resistência de 10k Ohm, caso as intensidades medidas sejam muito pequenas - use uma resistência de 200k Ohm.

Para usar os conectores (fig. 18), faça o seguinte: levante a alavanca, insira o fio no conector e baixe a alavanca. Todos os três pontos de conexão estão eletricamente conectados uns aos outros.

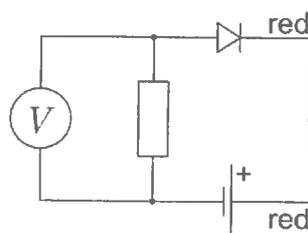


Fig. 17: Circuito de detector de intensidade. Preste atenção à polaridade da conexão.



Fig. 18: Esquema de conector elétrico. Todos os três pontos de conexão estão eletricamente conectados uns aos outros.

Laser

Monte o laser no suporte 8. Use um clip grande para fixar o laser. Se precisar tornar o feixe de laser mais estreito, feche o orifício do laser com fita adesiva e faça um orifício menor nele com a agulha. Se quiser reduzir a intensidade do laser - use a película escurecedora. A figura 19 mostra as fotos do que foi descrito acima.

ATENÇÃO! A exposição direta ao feixe de laser é perigosa para os olhos. Não aponte o feixe de laser para si mesmo ou outras pessoas. Se você não usar o laser, desligue-o.

ATENÇÃO! A agulha afiada é perigosa. Use-a com cuidado. Quando não estiver em uso, coloque a agulha na capa protetora.



Fig. 19: O laser é mantido ligado usando um clip grande. Para reduzir o diâmetro do feixe, use fita adesiva e uma agulha. Uma película translúcida num suporte (clip grande) é usada para reduzir a intensidade do laser.