

ESTADO SÓLIDO I

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICAS

Curso Optativo - Primavera 2025

Omar De la Peña-Seaman



Instituto de Física (IFUAP)

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP)

Curso: Estado Sólido I

Información General

Período de clases (18 sem.)

6 enero — 30 mayo 2025

Horario

Lunes, Miércoles: 8–10 hrs.

Jueves: 8–9 hrs.

Criterios de evaluación

- Tareas de cada tema:
 - Entrega: **40%**
 - Quiz: **60%**

Bibliografía

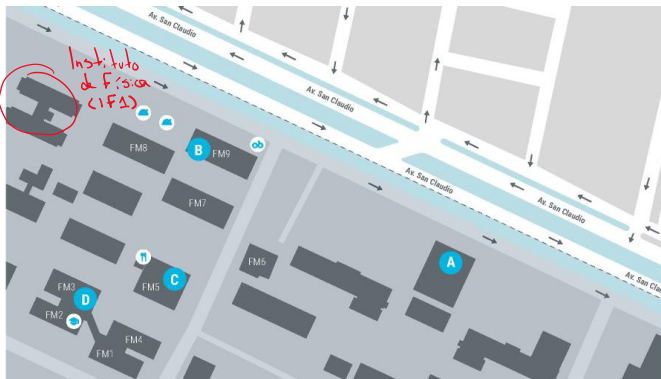
1. C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, 8th. edition (John Wiley, 2004).
2. H. Ibach & H. Lüth, *Solid State Physics*, 4th edition (Springer Verlag, 2009).
3. N.W. Ashcroft & D. Mermin, *Solid State Physics*, 1st edition (Saunders, College Publishing, 1976).
4. G. Burns, *Solid State Physics*, 1st edition (Academic Press, 1985).
5. R.M. Martin, *Electronic Structure: Theory and Practical Methods*, 1st edition (Cambridge Univ. Press, 2004).

Curso: Estado Sólido I

Medios de contacto

Para dudas y preguntas:

1. Grupo de Gmail: **Estado Sólido I (primavera 2025)**
2. Correo electrónico: **omar.seaman@correo.buap.mx**
3. Oficina: Instituto de Física "Luis Rivera Terrazas", Edificio **IF1**, oficina **214**.



Curso: Estado Sólido I

Información General

Contenido del curso

- | | |
|---|----------------|
| 1. Estructura cristalina | (2 sem.) |
| 2. Enlace químico | (2 sem.) |
| 3. Vibraciones de la red y propiedades térmicas | (2 & 1/2 sem.) |
| 4. Modelo del gas de electrones libres | (2 & 1/2 sem.) |
| 5. Electrón en un potencial periódico | (2 & 1/2 sem.) |
| 6. Estructura de bandas | (3 & 1/2 sem.) |
| 7. Semiconductores | (3 sem.) |

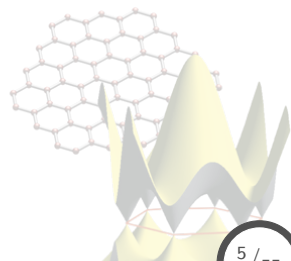
Fuente de consulta e información

Las sesiones de clase y las tareas estarán disponibles *on-line* al término de cada tema en la siguiente dirección:

http://www.ifuap.buap.mx/~oseaman/solid_state_physics_2025.html

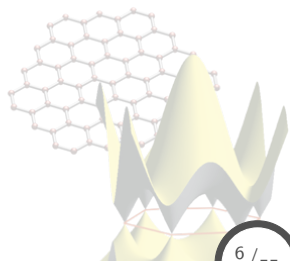
Contenido

1. Estructura cristalina



Contenido: Tema 01

1. Estructura cristalina
 - 1.1 Arreglo periódico de átomos: Bases, estructuras cristalinas, celda primitiva
 - 1.2 Estructuras cristalinas fundamentales, índices de Miller
 - 1.3 Red recíproca: Difracción de rayos X, ley de Bragg, amplitud de la onda dispersada
 - 1.4 Zonas de Brillouin
 - 1.5 Factores de estructura



Contenido: Tema 01

1. Estructura cristalina

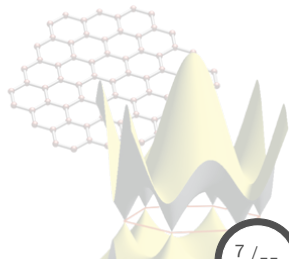
1.1 Arreglo periódico de átomos: Bases, estructuras cristalinas, celda primitiva

1.2 Estructuras cristalinas fundamentales, índices de Miller

1.3 Red recíproca: Difracción de rayos X, ley de Bragg, amplitud de la onda dispersada

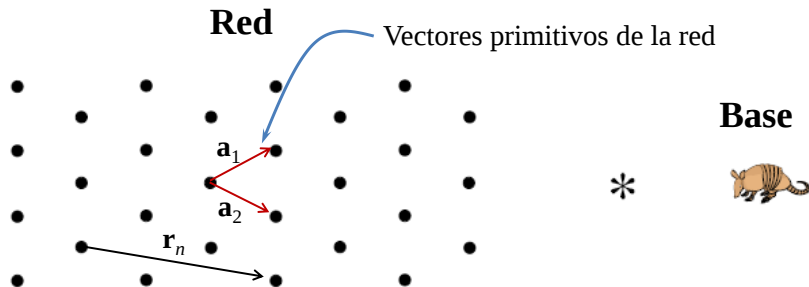
1.4 Zonas de Brillouin

1.5 Factores de estructura



Arreglo periódico de átomos

Fundamentos: Red y bases



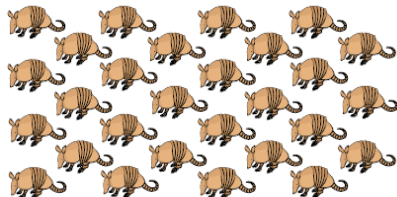
Vectores de la red

$$2D \quad \mathbf{r}_n = n_1 \mathbf{a}_1 + n_2 \mathbf{a}_2,$$

$$3D \quad \mathbf{r}_n = n_1 \mathbf{a}_1 + n_2 \mathbf{a}_2 + n_3 \mathbf{a}_3,$$

en donde $n_1, n_2, n_3 \in \mathbb{Z}$.

red + base = cristal periódico

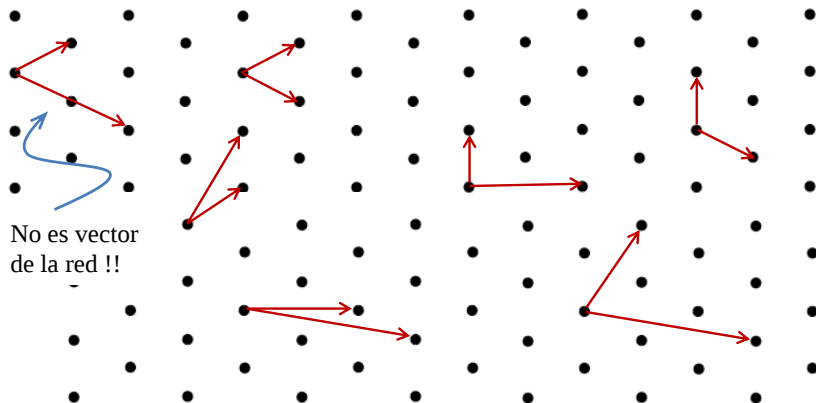


Arreglo periódico de átomos

Vectores primitivos de la red

La selección de los **vectores primitivos de la red** no es única, sin embargo ésta debe cumplir con la definición del **vector de la red**,

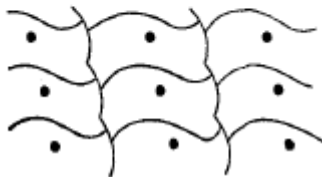
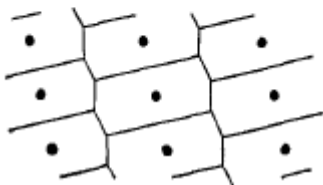
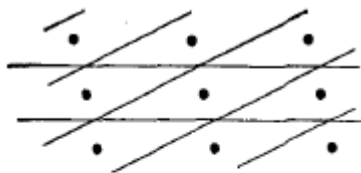
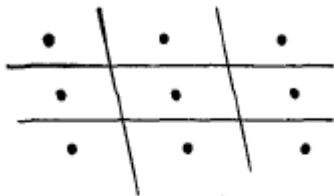
$$\mathbf{r}_n = n_1 \mathbf{a}_1 + n_2 \mathbf{a}_2 + n_3 \mathbf{a}_3 \quad \forall \quad n_1, n_2, n_3 \in \mathbb{Z}.$$



Arreglo periódico de átomos

Celda unitaria

La **celda unitaria**¹ llenará todo el espacio por medio de repeticiones de determinadas operaciones de traslación.



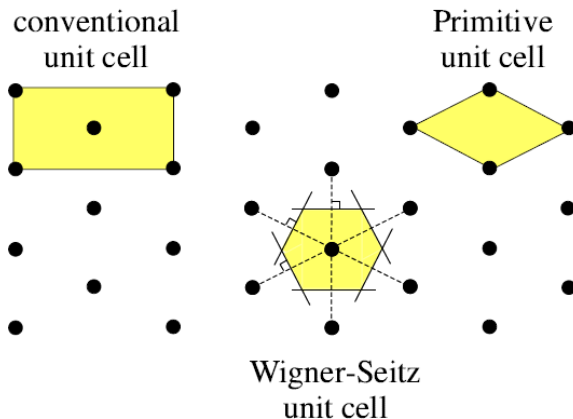
Siendo que la elección de la celda unitaria **no** es única.

¹Definida en términos de los **vectores de la red**.

Arreglo periódico de átomos

Celda primitiva

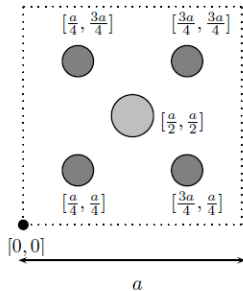
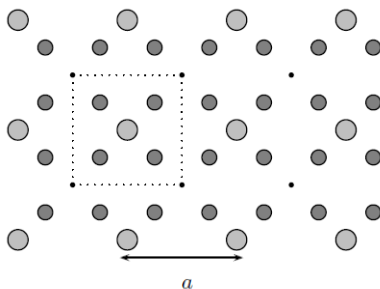
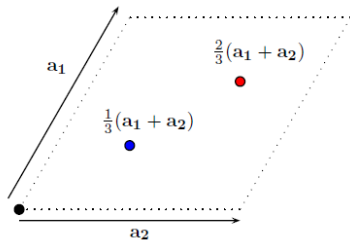
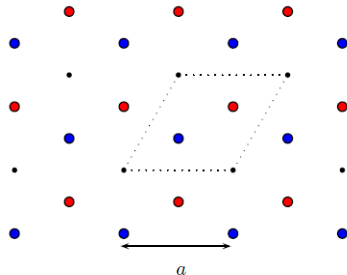
La **celda primitiva (unitaria)** es la celda de menor volumen en el cristal, y siempre contendrá sólo un **punto de la red**.



La base asociada a una **celda primitiva** se le conoce como **base primitiva** y es la que contiene **menos** puntos de red que cualquier otra.

Arreglo periódico de átomos

Base: Ejemplos



Contenido: Tema 01

1. Estructura cristalina

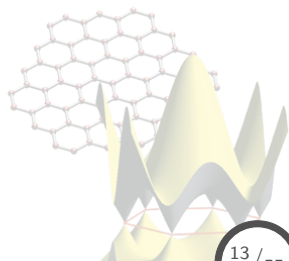
1.1 Arreglo periódico de átomos: Bases, estructuras cristalinas, celda primitiva

1.2 Estructuras cristalinas fundamentales, índices de Miller

1.3 Red recíproca: Difracción de rayos X, ley de Bragg, amplitud de la onda dispersada

1.4 Zonas de Brillouin

1.5 Factores de estructura

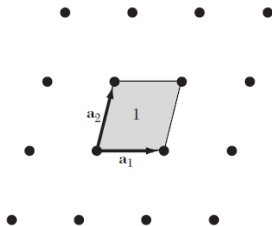


Estructuras cristalinas fundamentales, índices de Miller

Redes bidimensionales (2D)

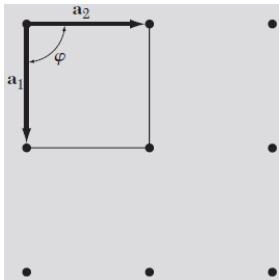
En dos dimensiones existen **cinco redes de Bravais**.

Red oblicua



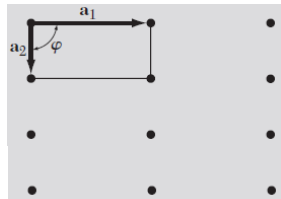
$$|\mathbf{a}_1| \neq |\mathbf{a}_2|; \quad \phi \neq \pi/2.$$

Red cuadrada



$$|\mathbf{a}_1| = |\mathbf{a}_2|; \quad \phi = \pi/2.$$

Red rectangular

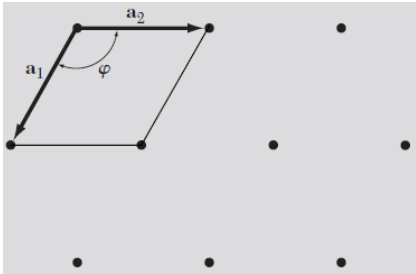


$$|\mathbf{a}_1| \neq |\mathbf{a}_2|; \quad \phi = \pi/2.$$

Estructuras cristalinas fundamentales, índices de Miller

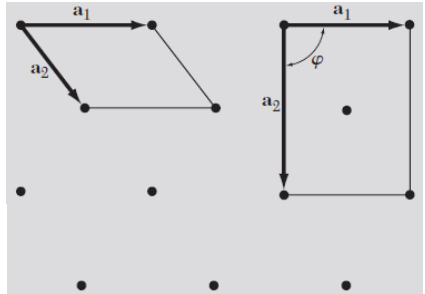
Redes bidimensionales (2D)

Red hexagonal



$$|\mathbf{a}_1| = |\mathbf{a}_2|; \quad \phi = 2\pi/3.$$

Red rectangular centrada



$$|\mathbf{a}_1| \neq |\mathbf{a}_2|; \quad \phi = \pi/2.$$

Estructuras cristalinas fundamentales, índices de Miller

Redes de Bravais en 3D

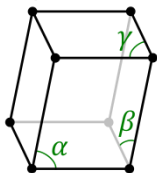
En tres dimensiones, existen **7** sistemas de redes diferentes, con **14** redes de Bravais.

System	Number of lattices	Restrictions on conventional cell axes and angles
Triclinic	1	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma$
Monoclinic	2	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$
Orthorhombic	4	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Tetragonal	2	$a_1 = a_2 \neq a_3$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Cubic	3	$a_1 = a_2 = a_3$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Trigonal	1	$a_1 = a_2 = a_3$ $\alpha = \beta = \gamma < 120^\circ, \neq 90^\circ$
Hexagonal	1	$a_1 = a_2 \neq a_3$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$

Estructuras cristalinas fundamentales, índices de Miller

Redes de Bravais en 3D

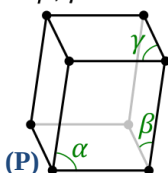
$$\alpha, \beta, \gamma \neq 90^\circ$$



$$a \neq b \neq c$$

Triclinic (P)

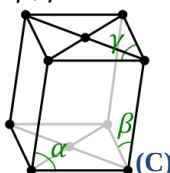
$$\alpha \neq 90^\circ$$
$$\beta, \gamma = 90^\circ$$



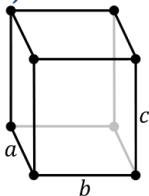
$$a \neq b \neq c$$

Monoclinic

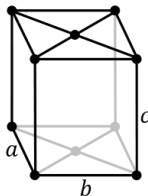
$$\alpha \neq 90^\circ$$
$$\beta, \gamma = 90^\circ$$



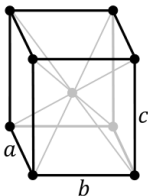
(P) $a \neq b \neq c$



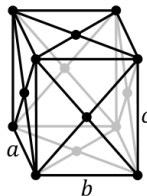
(C) $a \neq b \neq c$



(I) $a \neq b \neq c$

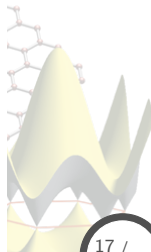


(F) $a \neq b \neq c$



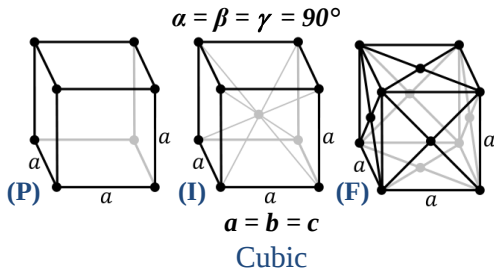
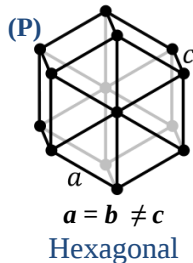
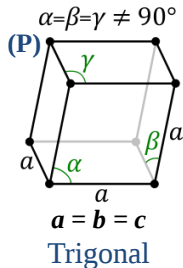
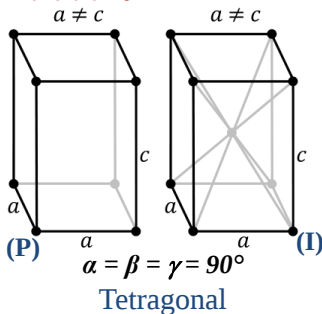
$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

Orthorhombic



Estructuras cristalinas fundamentales, índices de Miller

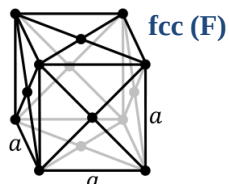
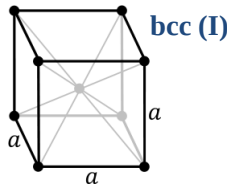
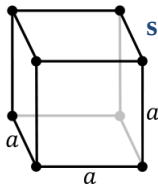
Redes de Bravais en 3D



Estructuras cristalinas fundamentales, índices de Miller

Propiedades de redes cúbicas

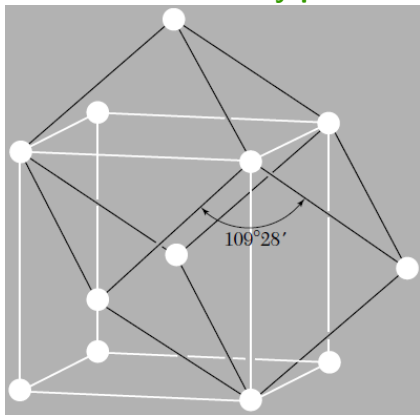
	Simple	Body-centered	Face-centered
Volume, conventional cell	a^3	a^3	a^3
Lattice points per cell	1	2	4
Volume, primitive cell	a^3	$\frac{1}{2}a^3$	$\frac{1}{4}a^3$
Lattice points per unit volume	$1/a^3$	$2/a^3$	$4/a^3$
Number of nearest neighbors	6	8	12
Nearest-neighbor distance	a	$3^{1/2} a/2 = 0.866a$	$a/2^{1/2} = 0.707a$
Number of second neighbors	12	6	6
Second neighbor distance	$2^{1/2}a$	a	a
Packing fraction ^a	$\frac{1}{6}\pi$ =0.524	$\frac{1}{8}\pi\sqrt{3}$ =0.680	$\frac{1}{6}\pi\sqrt{2}$ =0.740



Estructuras cristalinas fundamentales, índices de Miller

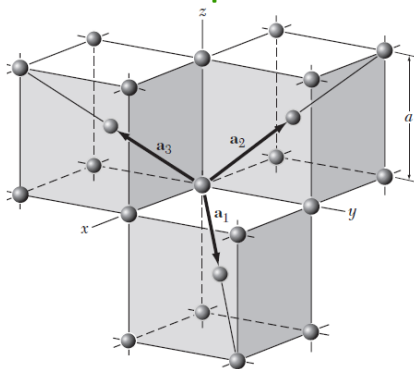
Propiedades de redes cúbicas: bcc

Celda convencional y primitiva



La arista de la celda primitiva es $\sqrt{3}a/2$ con un ángulo de $109^{\circ}28'$.

Vectores primitivos



$$\mathbf{a}_1 = (\hat{x} + \hat{y} - \hat{z}) a/2,$$

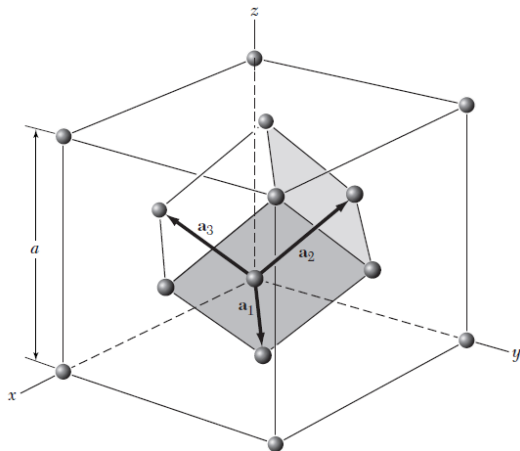
$$\mathbf{a}_2 = (-\hat{x} + \hat{y} + \hat{z}) a/2,$$

$$\mathbf{a}_3 = (\hat{x} - \hat{y} + \hat{z}) a/2.$$

Estructuras cristalinas fundamentales, índices de Miller

Propiedades de redes cúbicas: fcc

Celda convencional y primitiva

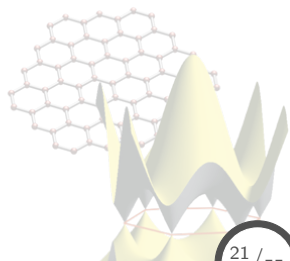


Vectores primitivos

$$\mathbf{a}_1 = (\hat{\mathbf{x}} + \hat{\mathbf{y}}) a/2,$$

$$\mathbf{a}_2 = (\hat{\mathbf{y}} + \hat{\mathbf{z}}) a/2,$$

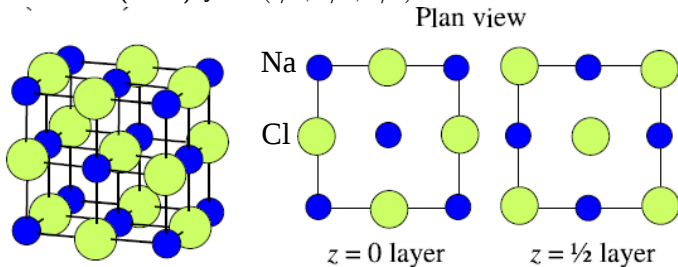
$$\mathbf{a}_3 = (\hat{\mathbf{z}} + \hat{\mathbf{x}}) a/2.$$



Estructuras cristalinas fundamentales, índices de Miller

Estructuras cristalinas comunes: Cloruro de sodio (NaCl), B1

La estructura NaCl (B1) es una red **fcc** compuesta por una base de **dos** átomos, Na:(000) y Cl:(1/2, 1/2, 1/2).



Existen **cuatro** unidades de la base en la celda unitaria (convencional), siendo las posiciones² de los átomos:

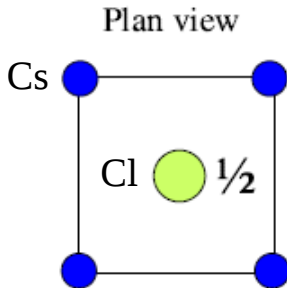
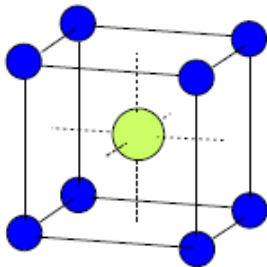
$$\begin{array}{llll} \text{Na :} & (000); & \left(\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0\right); & \left(\frac{1}{2} 0 \frac{1}{2}\right); & \left(0, \frac{1}{2} \frac{1}{2}\right). \\ \text{Cl :} & \left(\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}\right); & \left(00 \frac{1}{2}\right); & \left(0 \frac{1}{2} 0\right); & \left(\frac{1}{2} 00\right). \end{array}$$

²En términos de la celda convencional.

Estructuras cristalinas fundamentales, índices de Miller

Estructuras cristalinas comunes: Cloruro de cesio (CsCl), B2

La estructura CsCl (B2) es una red **cúbica simple (sc)** compuesta por una base de **dos** átomos, Cs:(000) y Cl:($1/2, 1/2, 1/2$).

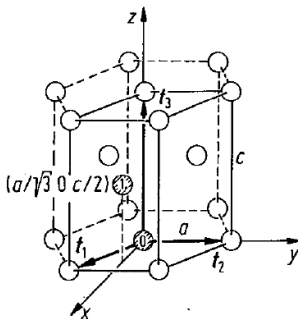
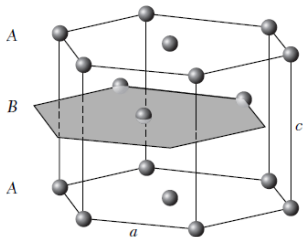


Existe sólo **una** unidad de la base en la celda unitaria (convencional), cuyos átomos tienen las posiciones de una bcc: Cl en el centro, y Cs en las esquinas.

Estructuras cristalinas fundamentales, índices de Miller

Estructuras cristalinas comunes: Hexagonal compacta (hcp)

La estructura hcp es una red primitiva **hexagonal**, compuesta por una base de **dos** átomos.



Vectores primitivos

$$\mathbf{t}_1 = \left(\sqrt{3}a/2, -a/2, 0 \right);$$

$$\mathbf{t}_2 = (0, a, 0);$$

$$\mathbf{t}_3 = (0, 0, c).$$

Posiciones de la base

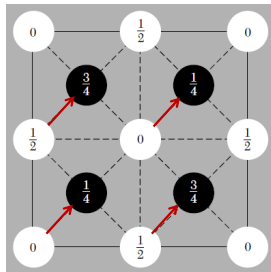
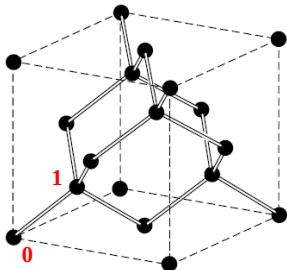
$$\text{atom}_0 = (0, 0, 0)_C = (0, 0, 0)_P;$$

$$\begin{aligned} \text{atom}_1 &= \left(a/\sqrt{3}, 0, c/2 \right)_C, \\ &= (2a/3, a/3, c/2)_P. \end{aligned}$$

Estructuras cristalinas fundamentales, índices de Miller

Estructuras cristalinas comunes: Diamante

La estructura **diamante** consta de una red primitiva **fcc**, compuesta por una base de **dos** átomos **idénticos**, por tanto cuenta con **ocho** átomos en la celda.



Posiciones de la base

$$\text{atom}_0 = (0, 0, 0);$$

$$\text{atom}_1 = \left(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}\right).$$

La estructura **diamante** se puede considerar como una **celda fcc doble**, siendo una de ellas desplazada $(1/4, 1/4, 1/4)$ sobre la diagonal del cuerpo.

Estructuras cristalinas fundamentales, índices de Miller

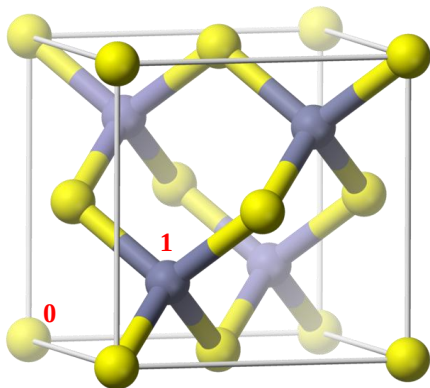
Estructuras cristalinas comunes: Zincblenda

- La **zincblenda** (ZnS) es una estructura tipo **diamante**, compuesta por una base de **dos** átomos de **diferente** especie.
- Las coordenadas de la base son:

$$\text{Zn} @ 0 : \Rightarrow (0, 0, 0);$$

$$\text{S} @ 1 : \Rightarrow \left(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4} \right).$$

- La celda convencional es una **cúbica simple** que cuenta con **4** moléculas de ZnS por celda.
- La zincblenda **no** posee **simetría de inversión**.



Estructuras cristalinas fundamentales, índices de Miller

Estructuras cristalinas y parámetros estructurales de elementos

Table 3 Crystal structures of the elements

The data given are at room temperature for the most common form, or at the stated temperature in deg K. (Inorganic Crystal Structure Database (ICSD) online).

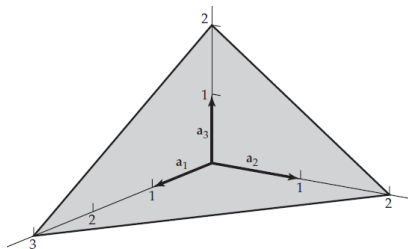
Table 3 Crystal structures of the elements																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
The data given are at room temperature for the most common form, or at the stated temperature in deg K. (Inorganic Crystal Structure Database (ICSD) online).																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
H ¹ 4K																He ⁴ 2K																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
hcp																hcp																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
3.75																3.57																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
6.12																5.83																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
Li 78K		Be														B		C		N 20K		O		F		Ne 4K																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
bcc		hcp														rhomb.		diamond		cubic		complex				fcc																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
3.491		2.27																3.567		5.66		(O ₂)				4.46																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
		3.59																		(N ₂)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Na 5K		Mg		Crystal structure														Al		Si		P		S		Cl		Ar 4K																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
bcc		hcp		a lattice parameter, in Å														fcc		diamond		complex		complex		complex		fcc																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
4.225		3.21		c lattice parameter, in Å														4.05		5.430						(Cl ₂)		5.31																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
		5.21																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
K 5K		Ca		Sc		Ti		V		Cr		Mn		Fe		Co		Ni		Cu		Zn		Ga		Ge		As		Se		Br		Kr 4K																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
bcc		fcc		hcp		hcp		bcc		bcc		cubic		bcc		hcp		fcc		fcc		hcp		complex		diamond		rhomb.		hex.		complex		fcc																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
5.225		5.58		3.31		2.95		3.03		2.88		complex		2.87		2.51		3.52		3.61		2.66				5.658				chains		(Br ₂)		5.64																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
				5.27		4.68								4.07								4.95																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
Rb 5K		Sr		Y		Zr		Nb		Mo		Tc		Ru		Rh		Pd		Ag		Cd		In		Sn (α)		Sb		Te		I		Xe 4K																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
bcc		fcc		hcp		hcp		bcc		bcc		hcp		hcp		fcc		fcc		fcc		hcp		tetr.		diamond		rhomb.		hex.		complex		fcc																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
5.585		6.08		3.65		3.23		3.30		3.15		2.74		2.71		3.80		3.89		4.09		2.98		3.25		6.49				chains		(I ₂)		6.13																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
				5.73		5.15						4.40		4.28								5.62		4.95																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Cs 5K		Ba		La		Hf		Ta		W		Re		Os		Ir		Pt		Au		Hg		Tl		Pb		Bi		Po		At		Rn																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
bcc		bcc		hex.		hcp		bcc		bcc		hcp		hcp		fcc		fcc		fcc		rhomb.		hcp		fcc		rhomb.		sc		—		—																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
6.045		5.02		3.77		3.19		3.30		3.16		2.76		2.74		3.84		3.92		4.08				3.46		4.95				3.34																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
		ABAC		5.05								4.46		4.32								5.52																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
Fr		Ra		Ac														Ce		Pr		Nd		Pm		Sm		Eu		Gd		Tb		Dy		Ho		Er		Tm		Yb		Lu																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
—		—		fcc														fcc		hex.		hex.		—		complex		bcc		hcp		hcp		hcp		hcp		hcp		hcp		fcc		hcp																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
				5.31														5.16		3.67		3.66						4.58		3.63		3.60		3.59		3.58		3.56		3.54		5.48		3.50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
																				ABAC								5.78		5.70		5.65		5.62		5.59		5.56				5.55																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	

Estructuras cristalinas fundamentales, índices de Miller

Índices de Miller

La orientación de un plano es determinada por los **índices de Miller**, los cuales se obtienen mediante el siguiente procedimiento.

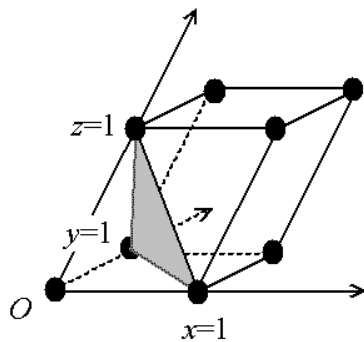
1. Encontrar las intersecciones del plano con los ejes en términos de los **vectores de la red**.
2. Tomar los **recíprocos** de los números encontrados. Si la intersección es el **infinito**, entonces el índice es **cero**.
3. Reducirlos a tres enteros con la **misma proporción**.
4. El resultado, expresado en paréntesis (*hkl*), se le conoce como el **índice del plano**.



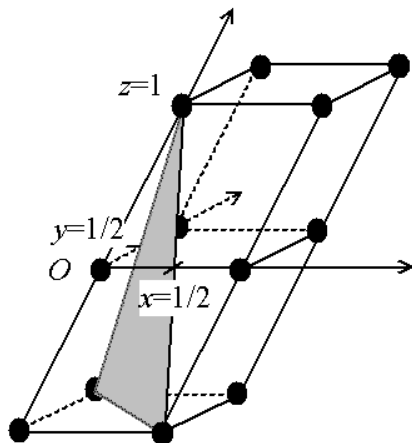
1. $3a_1, 2a_2, 2a_3 \Rightarrow 3, 2, 2.$
2. $1/3, 1/2, 1/2.$
3. $6/3, 6/2, 6/2 \Rightarrow 2, 3, 3.$
4. **(2 3 3).**

Estructuras cristalinas fundamentales, índices de Miller

Índices de Miller: Ejemplos



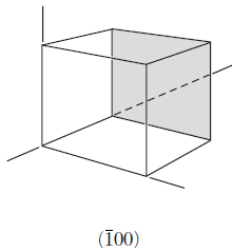
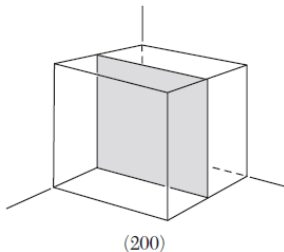
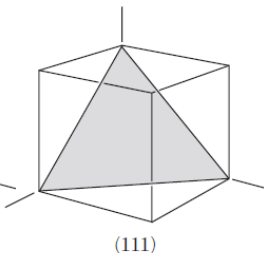
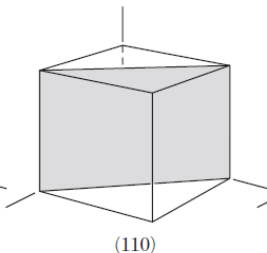
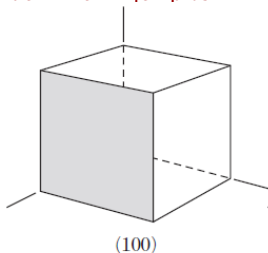
1. $1\hat{x}, 1\hat{y}, 1\hat{z}$;
2. $1, 1, 1$;
3. $1, 1, 1$;
4. (111) .



1. $(1/2)\hat{x}, (1/2)\hat{y}, 1\hat{z}$;
2. $2, 2, 1$; ... 4. (221) .

Estructuras cristalinas fundamentales, índices de Miller

Índices de Miller: Ejemplos

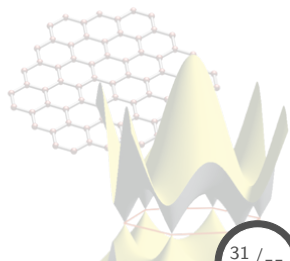


Si el plano corta un eje en la sección **negativa**, se coloca un guión por encima del índice correspondiente: ($h \bar{k} l$).

Contenido: Tema 01

1. Estructura cristalina

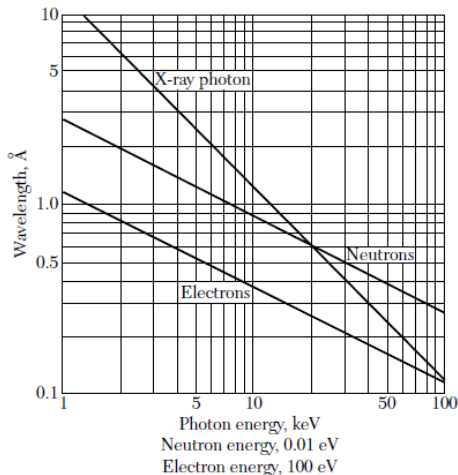
- 1.1 Arreglo periódico de átomos: Bases, estructuras cristalinas, celda primitiva
- 1.2 Estructuras cristalinas fundamentales, índices de Miller
- 1.3 Red recíproca: Difracción de rayos X, ley de Bragg, amplitud de la onda dispersada
- 1.4 Zonas de Brillouin
- 1.5 Factores de estructura



Red recíproca: Difracción de rayos X

Procesos de difracción: Rayos X

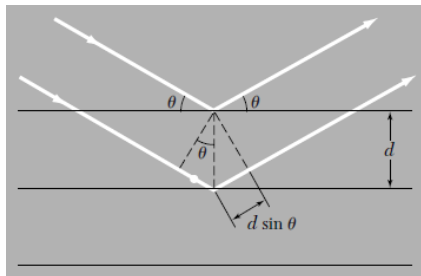
La estructura cristalina se analiza por medio de procesos de **difracción** de fotones, neutrones y/o electrones.



- Rango de valores de parámetro de red: **3.0 – 20.0 Å**.
- Se requiere de una **longitud de onda** similar al parámetro de red, para extraer información del cristal.
- Fuente ideal (parámetros de red pequeños): **neutrones**, con la problemática de baja disponibilidad de fuentes.
- Fuente más adecuada (rango amplio): **rayos X**.

Red recíproca: Difracción de rayos X

Ley de Bragg



Red formada por planos paralelos separados una distancia d .

Para que los rayos **difractados** sean observados, se debe tener una interferencia **constructiva** de todos los planos del cristal:

dif. de recorrido = mult. entero de λ ,

$$\Rightarrow 2d \sin \theta = n\lambda.$$

lo que se conoce como la **ley de Bragg**.

Consideraciones

- Ondas incidentes son reflejadas **elásticamente** y de manera **especular** ($\theta_{in} = \theta_{out}$).
- Los planos que dan origen a la difracción son **paralelos** (formados por los átomos del cristal).
- Cada plano refleja sólo una **pequeña** fracción de radiación.

Red recíproca: Difracción de rayos X

Ley de Bragg

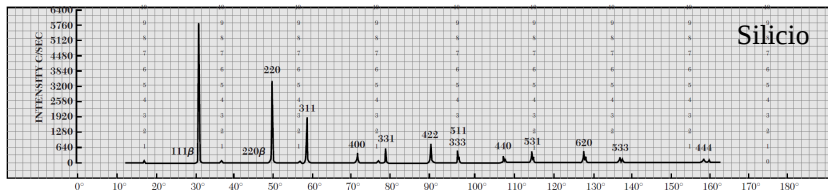
De la **ley de Bragg** se observa:

$$2d \sin \theta = n\lambda,$$

$$\text{pero: } \sin \theta \leq 1 \Rightarrow \lambda \leq 2d.$$

Es por ello que λ de la fuente debe ser pequeña (comparable al parámetro de red) $\therefore$ el rayo incidente debe ser **muy energético**.

Sólo determinados valores de θ aportan una interferencia **constructiva** de todos los planos, dando una dispersión **intensa**.



Normalmente cada plano refleja de 10^{-3} a 10^{-5} de la radiación incidente, por lo que se necesitan del orden de 10^3 a 10^5 planos que contribuyan a la formación del haz dispersado.

Red recíproca: Difracción de rayos X

Amplitud de la onda dispersada

Para determinar la **intensidad** de la dispersión, se debe considerar la influencia de la **base atómica** del cristal, es decir, la distribución espacial de la **densidad electrónica**, $n(\mathbf{r})$.

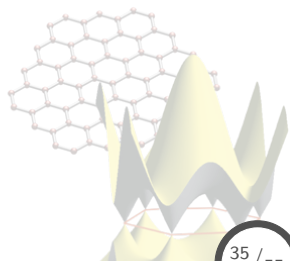
Para un cristal, el vector $\mathbf{T}$ representa la periodicidad del mismo,

$$\mathbf{T} = u_1\mathbf{a}_1 + u_2\mathbf{a}_2 + u_3\mathbf{a}_3 \quad \forall \quad u_i \in \mathbb{Z} \quad \& \quad \mathbf{a}_j = \text{vectores base,} \\ \Rightarrow \quad n(\mathbf{r}) = n(\mathbf{r} + \mathbf{T}).$$

Explotando las propiedades de **periodicidad** del sistema, se puede expresar $n(\mathbf{r})$ en el espacio de Fourier,

$$n(\mathbf{r}) = \sum_{\mathbf{G}} n_{\mathbf{G}} e^{i\mathbf{G} \cdot \mathbf{r}}, \\ \forall \quad n_{\mathbf{G}} = \frac{1}{V_c} \int_{cell} dV n(\mathbf{r}) e^{-i\mathbf{G} \cdot \mathbf{r}},$$

en donde V_c es el volumen del cristal.



Red recíproca: Difracción de rayos X

Amplitud de la onda dispersada

De la expansión de la **densidad** en el espacio de Fourier, se deben determinar los **G** que hacen **invariante** $n(\mathbf{r})$ ante **T**, los cuales son definidos como,

$$\mathbf{G} = v_1 \mathbf{b}_1 + v_2 \mathbf{b}_2 + v_3 \mathbf{b}_3 \quad \forall \quad v_i \in \mathbb{Z},$$

en donde los $\mathbf{b}_i$ son los vectores base de la red **recíproca**, y vienen definidos en términos de los $\mathbf{a}_j$'s:

$$\mathbf{b}_i = 2\pi \frac{\mathbf{a}_j \times \mathbf{a}_k}{\mathbf{a}_i \cdot (\mathbf{a}_j \times \mathbf{a}_k)} \quad \forall \quad \mathbf{b}_i \cdot \mathbf{a}_j = 2\pi \delta_{ij}.$$

Con esta definición, se calcula la propiedad de periodicidad de $n(\mathbf{r})$,

$$n(\mathbf{r} + \mathbf{T}) = \sum_{\mathbf{G}} n_{\mathbf{G}} e^{i\mathbf{G} \cdot \mathbf{r}} e^{i\mathbf{G} \cdot \mathbf{T}} = \sum_{\mathbf{G}} n_{\mathbf{G}} e^{i\mathbf{G} \cdot \mathbf{r}} = n(\mathbf{r}),$$

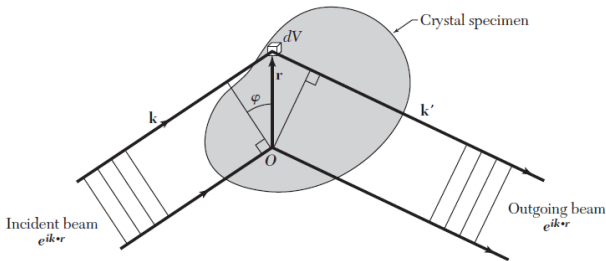
donde: $e^{i\mathbf{G} \cdot \mathbf{T}} = \exp [i(v_1 \mathbf{b}_1 + v_2 \mathbf{b}_2 + v_3 \mathbf{b}_3) \cdot (u_1 \mathbf{a}_1 + u_2 \mathbf{a}_2 + u_3 \mathbf{a}_3)] ,$
 $= \exp [i2\pi(v_1 u_1 + v_2 u_2 + v_3 u_3)] = 1.$

Red recíproca: Difracción de rayos X

Amplitud de la onda dispersada: Condiciones de difracción

Teorema

El set/conjunto de vectores recíprocos de la red ($\mathbf{G}$) determinan los posibles rayos X reflejados.



La diferencia de fase entre el rayo incidente y el reflejado es,

$$\exp [i (\mathbf{k} - \mathbf{k}') \cdot \mathbf{r}] ,$$

en donde $\mathbf{k}$ representa el vector de onda del rayo incidente, y $\mathbf{k}'$ el correspondiente al reflejado.

Red recíproca: Difracción de rayos X

Amplitud de la onda dispersada: Condiciones de difracción

La **amplitud** de la onda dispersa, por unidad de volumen, se considera proporcional a la concentración local de **carga** $n(\mathbf{r})$.

Por tanto, la **amplitud total** A de la onda dispersada (radiación electromagnética) en dirección $\mathbf{k}'$ es proporcional a:

$$\begin{aligned} A \propto F &= \int dV n(\mathbf{r}) \exp [i(\mathbf{k} - \mathbf{k}') \cdot \mathbf{r}] , \\ &= \int dV n(\mathbf{r}) \exp [-i\Delta\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}] \quad \forall \quad \Delta\mathbf{k} = \mathbf{k}' - \mathbf{k}, \end{aligned}$$

en donde F se le conoce como la **amplitud de dispersión**, y $\Delta\mathbf{k}$ como el **vector de dispersión**.

Introduciendo ahora la expresión de $n(\mathbf{r})$ en el espacio de Fourier,

$$\begin{aligned} F &= \sum_{\mathbf{G}} \int dV n_{\mathbf{G}} \exp [i(\mathbf{G} - \Delta\mathbf{k}) \cdot \mathbf{r}] \quad \forall \quad n(\mathbf{r}) = \sum_{\mathbf{G}} n_{\mathbf{G}} \exp [i\mathbf{G} \cdot \mathbf{r}] , \\ &= n_{\mathbf{G}} V, \quad \text{cuando } \Delta\mathbf{k} = \mathbf{G}. \end{aligned}$$

Red recíproca: Difracción de rayos X

Amplitud de la onda dispersada: Dispersión inelástica

En el caso de **dispersión inelástica**, la energía de los fotones $\hbar\omega$ se **conserva**:

$$\hbar\omega = \hbar\omega' \rightarrow \hbar c|\mathbf{k}| = \hbar c|\mathbf{k}'| \rightarrow |\mathbf{k}| = |\mathbf{k}'|.$$

Ahora, de la condición para que exista dispersión, se tiene:

$$\Delta\mathbf{k} = \mathbf{G} \rightarrow \mathbf{k}' - \mathbf{k} = \mathbf{G} \rightarrow \mathbf{k} + \mathbf{G} = \mathbf{k}' \rightarrow (\mathbf{k} + \mathbf{G})^2 = \mathbf{k}'^2,$$

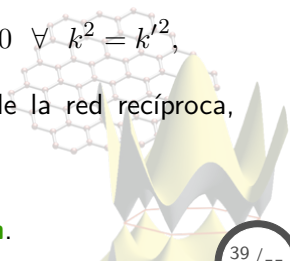
expandiendo:

$$k^2 + 2\mathbf{k} \cdot \mathbf{G} + G^2 = k'^2 \rightarrow 2\mathbf{k} \cdot \mathbf{G} + G^2 = 0 \quad \forall \quad k^2 = k'^2,$$

debido a que tanto $\mathbf{G}$ como $-\mathbf{G}$ son vectores de la red recíproca, entonces:

$$2\mathbf{k} \cdot \mathbf{G} = G^2,$$

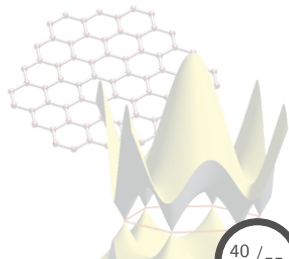
lo que se conoce como la **condición de difracción**.



Contenido: Tema 01

1. Estructura cristalina

- 1.1 Arreglo periódico de átomos: Bases, estructuras cristalinas, celda primitiva
- 1.2 Estructuras cristalinas fundamentales, índices de Miller
- 1.3 Red recíproca: Difracción de rayos X, ley de Bragg, amplitud de la onda dispersada
- 1.4 Zonas de Brillouin**
- 1.5 Factores de estructura



Zonas de Brillouin

Condición de difracción y celda recíproca primitiva

La **primera zona de Brillouin** (IBZ) se define como una celda primitiva de Wigner-Seitz (WS) en el espacio recíproco.

De la condición de difracción,

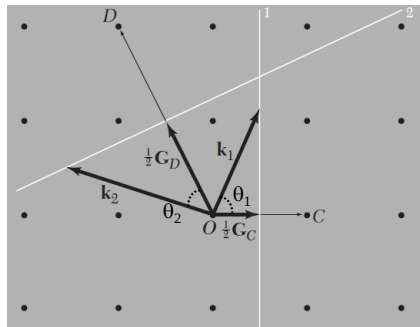
$$2\mathbf{k} \cdot \mathbf{G} = G^2 \Rightarrow \mathbf{k} \cdot \left(\frac{\mathbf{G}}{2}\right) = \left(\frac{G}{2}\right)^2,$$

Analizando para $\mathbf{k}_1$,

$$\mathbf{k}_1 \cdot (\mathbf{G}_C/2) = k_1(G_C/2)\cos\theta_1,$$

$$\text{pero: } \cos\theta_1 = (G_C/2)/k_1,$$

$$\Rightarrow \mathbf{k}_1 \cdot (\mathbf{G}_C/2) = (G_C/2)^2.$$



Para $\mathbf{k}_2$:

$$\mathbf{k}_2 \cdot (\mathbf{G}_D/2) = k_2(G_D/2)\cos\theta_2,$$

$$\text{pero: } \cos\theta_2 = (G_D/2)/k_2,$$

$$\Rightarrow \mathbf{k}_2 \cdot (\mathbf{G}_D/2) = (G_D/2)^2.$$

$\therefore$ la IBZ exhibe **todos** los $\mathbf{k}$ que pueden ser difractados en un cristal siguiendo la **ley de Bragg**.

Zonas de Brillouin

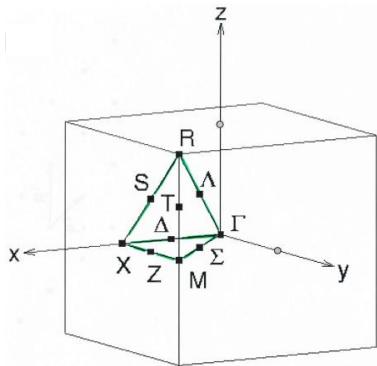
Primera zona de Brillouin: Cúbica simple (sc)

Red primitiva

$$\mathbf{a}_1 = (1, 0, 0) a,$$

$$\mathbf{a}_2 = (0, 1, 0) a,$$

$$\mathbf{a}_3 = (0, 0, 1) a.$$



Red recíproca primitiva

$$\mathbf{b}_1 = (1, 0, 0) 2\pi/a,$$

$$\mathbf{b}_2 = (0, 1, 0) 2\pi/a,$$

$$\mathbf{b}_3 = (0, 0, 1) 2\pi/a.$$

Puntos de alta simetría

Notación	Primitivas	Cartesianas
Γ	$(0, 0, 0)$	$(0, 0, 0)\pi/a$
X	$(\frac{1}{2}, 0, 0)$	$(1, 0, 0)\pi/a$
M	$(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0)$	$(1, 1, 0)\pi/a$
R	$(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$	$(1, 1, 1)\pi/a$

La región denotada por los **puntos de alta simetría** se le conoce como la **irreducible** de la IBZ, ocupando una fracc. de 1/48.

Zonas de Brillouin

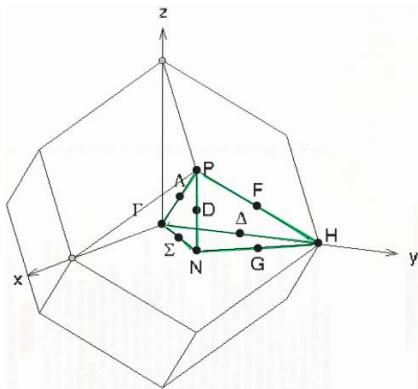
Primera zona de Brillouin: bcc

Red primitiva

$$\mathbf{a}_1 = (-1, 1, 1) a/2,$$

$$\mathbf{a}_2 = (1, -1, 1) a/2,$$

$$\mathbf{a}_3 = (1, 1, -1) a/2.$$



Red recíproca primitiva

$$\mathbf{b}_1 = (0, 1, 1) 2\pi/a,$$

$$\mathbf{b}_2 = (1, 0, 1) 2\pi/a,$$

$$\mathbf{b}_3 = (1, 1, 0) 2\pi/a.$$

Puntos de alta simetría

Notación	Primitivas	Cartesianas
Γ	$(0, 0, 0)$	$(0, 0, 0)\pi/a$
H	$(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$	$(0, 2, 0)\pi/a$
P	$(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4})$	$(1, 1, 1)\pi/a$
N	$(0, 0, \frac{1}{2})$	$(1, 1, 0)\pi/a$

La **irreducible** ocupa una fracción de $1/48$ de la IBZ.

Zonas de Brillouin

Primera zona de Brillouin: fcc

Red primitiva

$$\mathbf{a}_1 = (0, 1, 1) a/2,$$

$$\mathbf{a}_2 = (1, 0, 1) a/2,$$

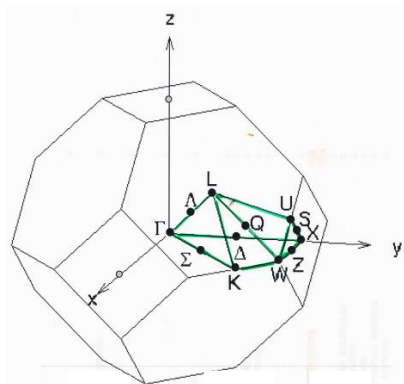
$$\mathbf{a}_3 = (1, 1, 0) a/2.$$

Red recíproca primitiva

$$\mathbf{b}_1 = (-1, 1, 1) 2\pi/a,$$

$$\mathbf{b}_2 = (1, -1, 1) 2\pi/a,$$

$$\mathbf{b}_3 = (1, 1, -1) 2\pi/a.$$



Puntos de alta simetría

Notación	Primitivas	Cartesianas
Γ	$(0, 0, 0)$	$(0, 0, 0)\pi/a$
X	$(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0)$	$(0, 2, 0)\pi/a$
L	$(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$	$(1, 1, 1)\pi/a$
W	$(\frac{3}{4}, \frac{1}{2}, \frac{1}{4})$	$(1, 2, 0)\pi/a$
Δ	$(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, 0)$	$(0, 1, 0)\pi/a$
K	$(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2})$	$(3, 3, 0)\pi/2a$

La **irreducible** ocupa una fracción de $1/48$ de la IBZ.

Zonas de Brillouin

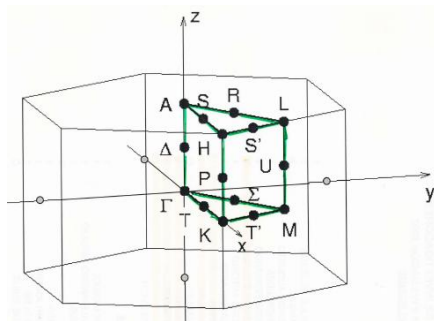
Primera zona de Brillouin: hcp

Red primitiva

$$\mathbf{a}_1 = (1, -\sqrt{3}, 0) a/2,$$

$$\mathbf{a}_2 = (1, \sqrt{3}, 0) a/2,$$

$$\mathbf{a}_3 = (0, 0, 1) c.$$



Red recíproca primitiva

$$\mathbf{b}_1 = (1, -1/\sqrt{3}, 0) 2\pi/a,$$

$$\mathbf{b}_2 = (1, 1/\sqrt{3}, 0) 2\pi/a,$$

$$\mathbf{b}_3 = (0, 0, 1) 2\pi/c.$$

Puntos de alta simetría

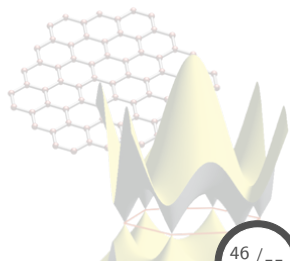
Notación	Primitivas	Cartesianas
Γ	$(0, 0, 0)$	$(0, 0, 0)\pi/a$
K	$(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, 0)$	$(2, 0, 0)2\pi/3a$
M	$(0, \frac{1}{2}, 0)$	$(3, \sqrt{3}, 0)\pi/3a$
A	$(0, 0, \frac{1}{2})$	$(0, 0, 1)\pi/c$
H	$(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2})$	$(\frac{4}{a}, 0, \frac{3}{c})\pi/3$
L	$(0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$	$(\frac{3}{a}, \frac{\sqrt{3}}{a}, \frac{3}{c})\pi/3$

La **irreducible** ocupa una fracción de $1/24$ de la IBZ.

Contenido: Tema 01

1. Estructura cristalina

- 1.1 Arreglo periódico de átomos: Bases, estructuras cristalinas, celda primitiva
- 1.2 Estructuras cristalinas fundamentales, índices de Miller
- 1.3 Red recíproca: Difracción de rayos X, ley de Bragg, amplitud de la onda dispersada
- 1.4 Zonas de Brillouin
- 1.5 Factores de estructura



Factores de estructura

Análisis de Fourier

Como ya se ha visto, una vez determinada la condición de difracción, la amplitud de la onda dispersada es,

$$F = \int dV n(\mathbf{r}) \exp[-i\Delta\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}] \quad \forall \quad \Delta\mathbf{k} = \mathbf{G},$$

lo cual para N celdas se expresa como,

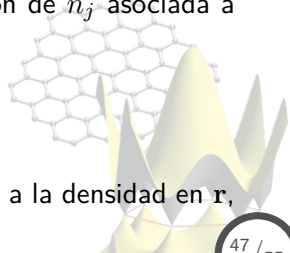
$$F_{\mathbf{G}} = N \int_{cell} dV n(\mathbf{r}) \exp[-i\mathbf{G} \cdot \mathbf{r}] = N S_{\mathbf{G}},$$

en donde $S_{\mathbf{G}}$ se le conoce como los **factores de estructura**.

Considerando ahora a $n(\mathbf{r})$ como una superposición de n_j asociada a cada átomo j de la celda,

$$\Rightarrow n(\mathbf{r}) = \sum_{j=1}^s n_j(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j),$$

en donde $n_j(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j)$ es la contribución del átomo j a la densidad en $\mathbf{r}$, y s el total de átomos en la base.



Factores de estructura

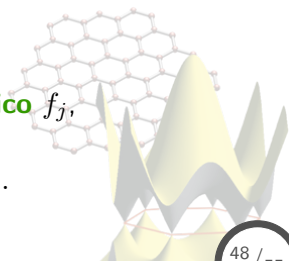
Factores de forma atómico

Sustituyendo la descripción de la densidad electrónica $n(\mathbf{r})$ en los factores de estructura,

$$\begin{aligned} S_{\mathbf{G}} &= \int_{cell} dV n(\mathbf{r}) \exp[-i\mathbf{G} \cdot \mathbf{r}], \\ &= \sum_j \int_{cell} dV n_j(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j) \exp[-i\mathbf{G} \cdot \mathbf{r}], \\ &= \sum_j \exp[-i\mathbf{G} \cdot \mathbf{r}_j] \int_{cell} dV n_j(\boldsymbol{\rho}) \exp[-i\mathbf{G} \cdot \boldsymbol{\rho}] \quad \forall \quad \boldsymbol{\rho} = \mathbf{r} - \mathbf{r}_j, \\ &= \sum_j f_j \exp[-i\mathbf{G} \cdot \mathbf{r}_j], \end{aligned}$$

en donde se ha definido el **factor de forma atómico** f_j ,

$$f_j = \int_{cell} dV n_j(\boldsymbol{\rho}) \exp[-i\mathbf{G} \cdot \boldsymbol{\rho}].$$



Factores de estructura

Factores de estructura y de forma atómico

De las expresiones del factor de estructura y el factor de forma atómico, se obtuvo lo siguiente:

$$S_{\mathbf{G}} = \sum_j f_j \exp[-i\mathbf{G} \cdot \mathbf{r}_j] \quad \forall \quad f_j = \int_{cell} dV n_j(\boldsymbol{\rho}) \exp[-i\mathbf{G} \cdot \boldsymbol{\rho}],$$

lo cual expresado para el átomo j ,

$$\mathbf{r}_j = x_j \mathbf{a}_1 + y_j \mathbf{a}_2 + z_j \mathbf{a}_3,$$

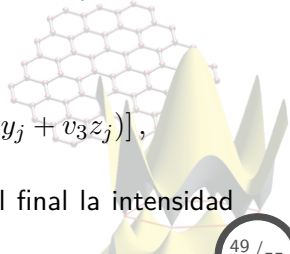
y el vector $\mathbf{G}$ de la reflexión etiquetado por v_1, v_2, v_3 , se tiene:

$$\begin{aligned} \mathbf{G} \cdot \mathbf{r}_j &= (v_1 \mathbf{b}_1 + v_2 \mathbf{b}_2 + v_3 \mathbf{b}_3) \cdot (x_j \mathbf{a}_1 + y_j \mathbf{a}_2 + z_j \mathbf{a}_3), \\ &= 2\pi (v_1 x_j + v_2 y_j + v_3 z_j), \end{aligned}$$

por tanto, el **factor de estructura** es,

$$S_{\mathbf{G}}(v_1, v_2, v_3) = \sum_j f_j \exp[-2\pi i (v_1 x_j + v_2 y_j + v_3 z_j)],$$

expresión que puede ser real o compleja, ya que al final la intensidad involucra la cantidad $S \cdot S^*$.



Factores de estructura

Factores de estructura: bcc

Considerando a la celda bcc como una **cúbica** (convencional) con una base de **dos** átomos **idénticos**, cuyas coordenadas son:

$$\text{atom}_1 \Rightarrow (x_1, y_1, z_1) = (0, 0, 0),$$

$$\text{atom}_2 \Rightarrow (x_2, y_2, z_2) = (1/2, 1/2, 1/2),$$

por tanto, los factores de estructura serán,

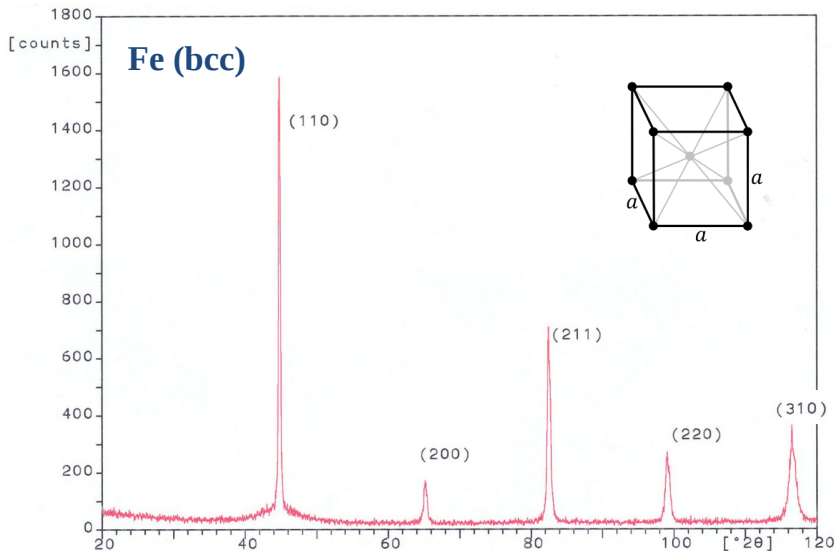
$$\begin{aligned} S(v_1, v_2, v_3) &= \sum_j f_j \exp[-2\pi i (v_1 x_j + v_2 y_j + v_3 z_j)], \\ &= f \{1 + \exp[-\pi i (v_1 + v_2 + v_3)]\}. \end{aligned}$$

De la expresión anterior se observan los siguientes posibles comportamientos:

$$S = 0 \quad \forall \quad \sum_{i=1}^3 v_i = \text{impar} \quad \& \quad S = 2f \quad \forall \quad \sum_{i=1}^3 v_i = \text{par}.$$

Factores de estructura

Factores de estructura: bcc



Factores de estructura

Factores de estructura: fcc

Considerando la celda fcc como una **cúbica** (convencional) con una base de **cuatro** átomos **idénticos**, con las sig. coordenadas,

$$\text{atom}_1 = (x_1, y_1, z_1) = (0, 0, 0), \quad \text{atom}_2 = (x_2, y_2, z_2) = \left(0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right),$$

$$\text{atom}_3 = (x_3, y_3, z_3) = \left(\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}\right), \quad \text{atom}_4 = (x_4, y_4, z_4) = \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0\right),$$

por tanto, los factores de estructura vienen expresados como,

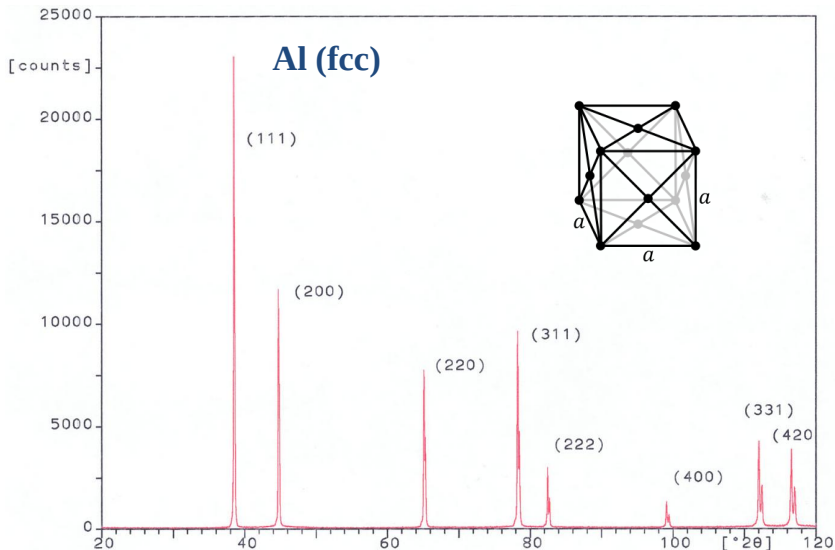
$$\begin{aligned} S(v_1, v_2, v_3) &= \sum_j f_j \exp[-2\pi i (v_1 x_j + v_2 y_j + v_3 z_j)], \\ &= f \{1 + \exp[-\pi i (v_2 + v_3)] + \dots \\ &\quad \dots + \exp[-\pi i (v_1 + v_3)] + \exp[-\pi i (v_1 + v_2)]\}. \end{aligned}$$

Observando los siguientes posibles comportamientos:

$$\begin{aligned} S=4f \quad \forall \quad v_1, v_2, v_3 \text{ pares}, & \quad S=4f \quad \forall \quad v_1, v_2, v_3 \text{ impares}, \\ S=0 \quad \forall \quad v_i \text{ par}, v_j, v_k \text{ impares}, & \quad S=0 \quad \forall \quad v_i \text{ impar}, v_j, v_k \text{ pares}. \end{aligned}$$

Factores de estructura

Factores de estructura: fcc



Factores de estructura

Factor de forma atómico

De la expresión definida para el **factor de forma atómico**, f_j :

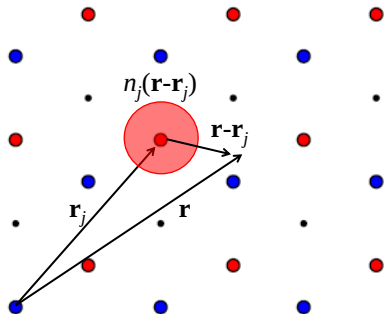
$$f_j = \int_{cell} dV n_j(\boldsymbol{\rho}) \exp[-i\mathbf{G} \cdot \boldsymbol{\rho}] \quad \forall \quad \boldsymbol{\rho} = \mathbf{r} - \mathbf{r}_j,$$

se observa que involucra las siguientes propiedades:

- **Número** y **distribución** de los electrones de los átomos.
- **Longitud de onda** y **ángulo** de la radiación dispersada.

Considerando que $n_j(\boldsymbol{\rho})$ es esféricamente simétrica y $\mathbf{G} \cdot \boldsymbol{\rho} = G\rho \cos \alpha$,

$$\Rightarrow f_j = 4\pi \int d\rho n_j(\rho) \rho^2 \frac{\text{Sen } G\rho}{G\rho}.$$



Factores de estructura

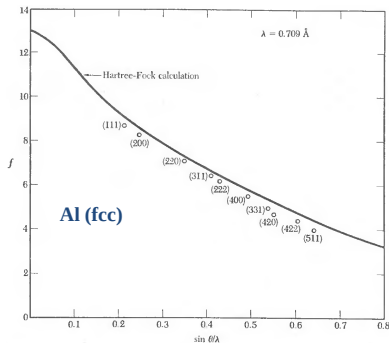
Factor de forma atómico

De la expresión obtenida,

$$f_j = 4\pi \int d\rho n_j(\rho) \rho^2 \frac{\text{Sen } G\rho}{G\rho},$$

$$\text{con } \frac{\text{Sen } G\rho}{G\rho} = \frac{\text{Sen } [4\pi\rho(\text{Sen } \theta/\lambda)]}{4\pi\rho(\text{Sen } \theta/\lambda)},$$

se puede ver el comportamiento decadente de f_j respecto a $\text{Sen } \theta/\lambda$.



Ahora, considerando que n_j se **concentra en un punto** $\Rightarrow \rho \rightarrow 0$,

$$\text{Sen } G\rho / G\rho \rightarrow 1,$$

lo cual implica:

$$f_j = 4\pi \int d\rho n_j(\rho) \rho^2 = Z \quad \forall \quad \rho \rightarrow 0,$$

en donde Z representa el **número atómico** del elemento.