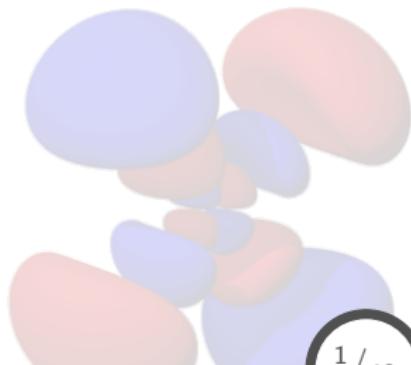


# Contenido

## 5. Defectos



# Contenido: Tema 05

## 5. Defectos

### 5.1 Clasificación de defectos

### 5.2 Defectos puntuales: propiedades termodinámicas

### 5.3 Defectos de línea: dislocaciones, fortaleza y crecimiento cristalino

### 5.4 Defectos de superficie: imperfecciones de empaquetamiento y fronteras de grano

# Contenido: Tema 05

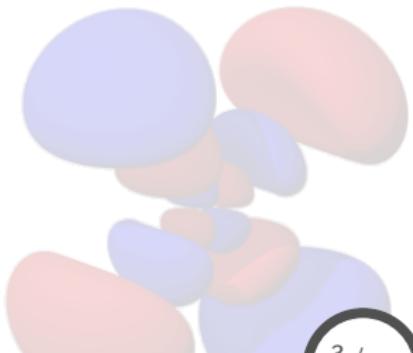
## 5. Defectos

### 5.1 Clasificación de defectos

5.2 Defectos puntuales: propiedades termodinámicas

5.3 Defectos de línea: dislocaciones, fortaleza y crecimiento cristalino

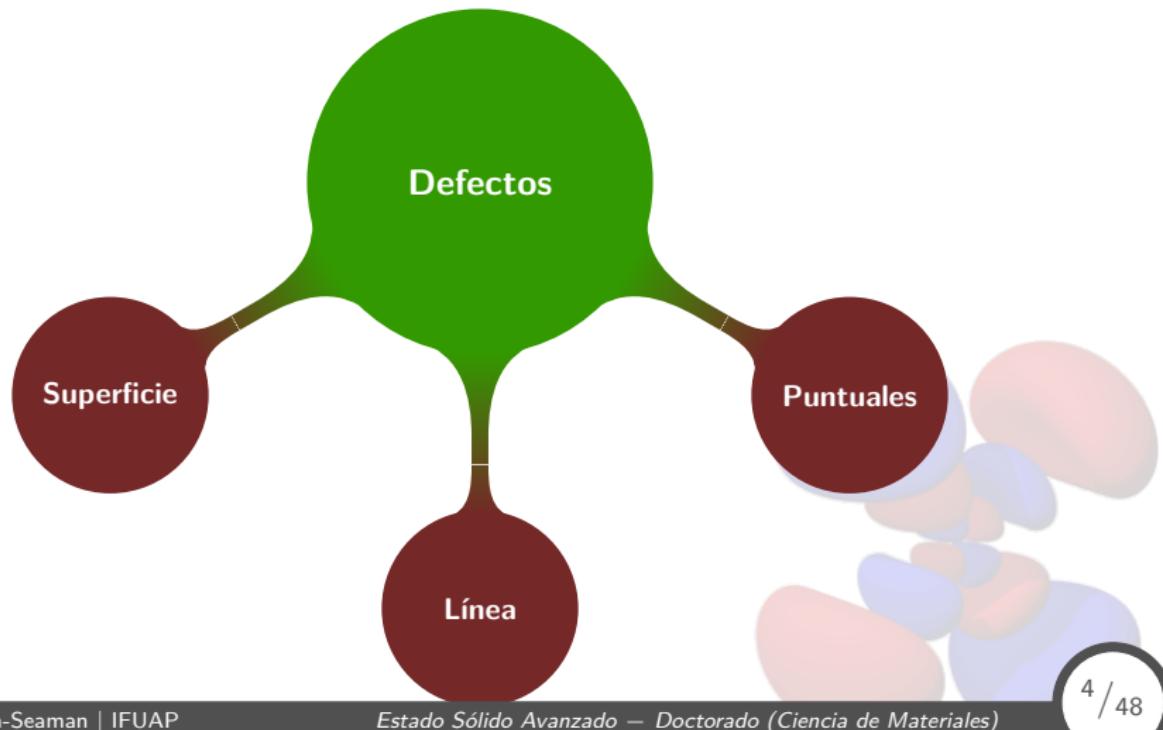
5.4 Defectos de superficie: imperfecciones de empaquetamiento y fronteras de grano



# Clasificación de defectos

## Fundamentos

Se define un **defecto** como una desviación de la periodicidad en un sólido, y se clasifican relativo a si la región de imperfección está delimitada en la escala atómica por una, dos o tres **dimensiones**.

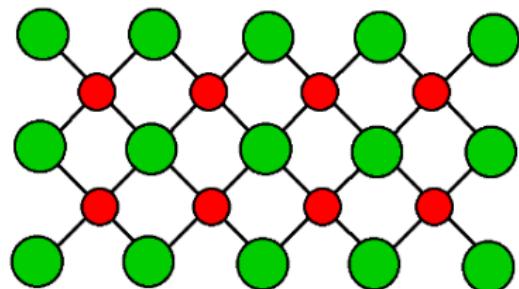


# Clasificación de defectos

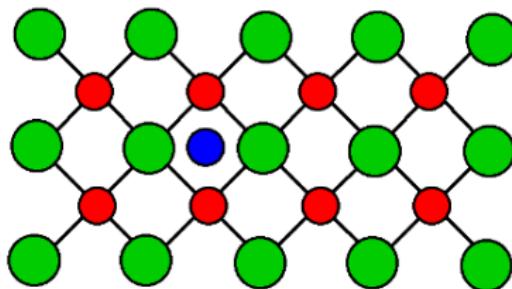
## Defectos puntuales

### Defectos intersticiales

Pueden ser de la misma especie(s) del material, o de especies externas, y ser causados por efectos térmicos o introducidos artificialmente por daño de radiación.



Red sin defectos



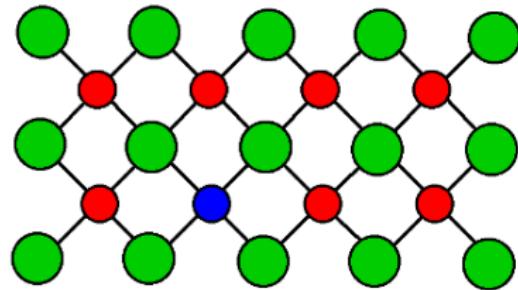
Impureza intersticial

# Clasificación de defectos

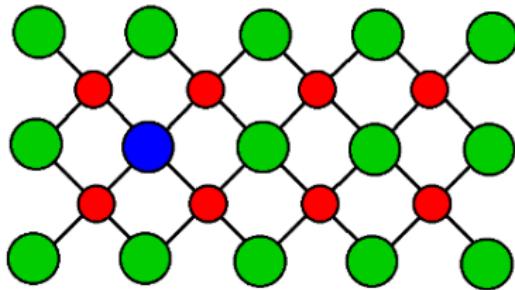
## Defectos puntuales

### Defectos substitucionales

Impurezas externas localizadas en lugar de la especie(a) atómica del material introducidas en el proceso de crecimiento.



Sustitución de un catión



Sustitución de un anión

# Clasificación de defectos

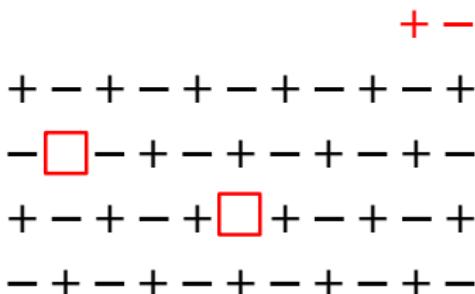
## Defectos puntuales

### Vacancias

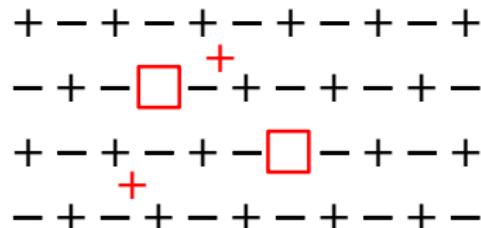
Son muy comunes en materiales en condiciones normales (ambiente) en equilibrio. Para sistemas **iónicos**, manteniendo la neutralidad del sistema, los casos más frecuentes son dos:

**Schottky:** Cuando el átomo que genera la vacancia se tranfiere a la **superficie**.

**Frenkel:** Cuando el átomo que genera la vacancia se tranfiere a un sitio **intersticial**.



Defecto Schottky



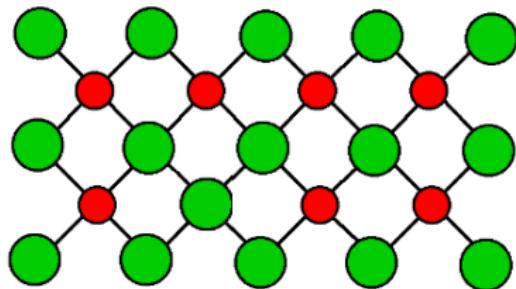
Defecto Frenkel

# Clasificación de defectos

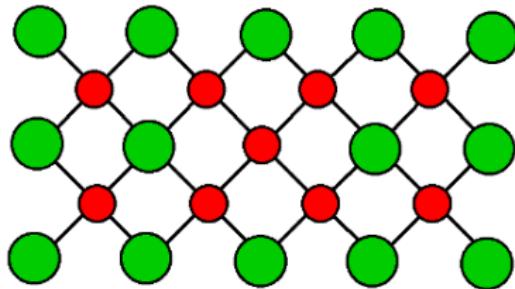
## Defectos puntuales

### Defectos de anti-sitios

En el caso de compuestos, los elementos constituyentes pueden no estar en su proporción química exacta.



Defecto anti-sitio  $B_A$



Defecto anti-sitio  $A_B$

# Clasificación de defectos

## Defectos puntuales

### Centros de color

Generados por defectos (vacancias) y el potencial que lo rodea, el cual atrapa portadores de carga (electrones o huecos), tal que compense la carga faltante.

- + - + - + - + - + -  
+ - + - + - + - + - +  
- + - + - + - + - + -  
+ - + - + - + - + - +  
- + - + - + - + - + -

Cristal perfecto

- + - + - + - + - + - +  
+ - + - + - + - + - +  
- + - + - + - + - + - +  
+ - + - + - + - + - +  
- + - + - + - + - + - +

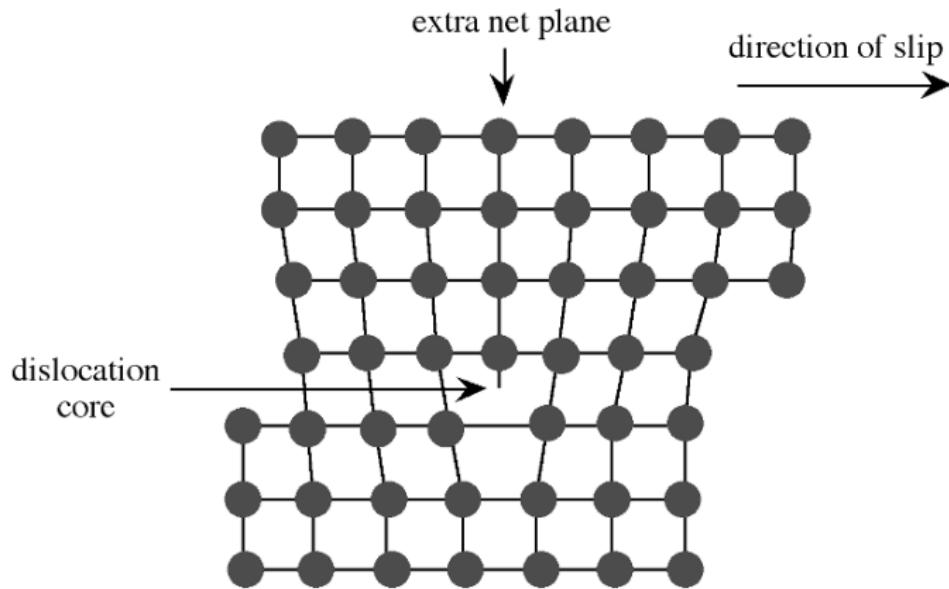
Cristal con centros de color

# Clasificación de defectos

## Defectos de línea

### Dislocaciones

Son importantes para determinar que tan fácil un cristal se puede deformar y se pueden relacionar con el crecimiento cristalino.

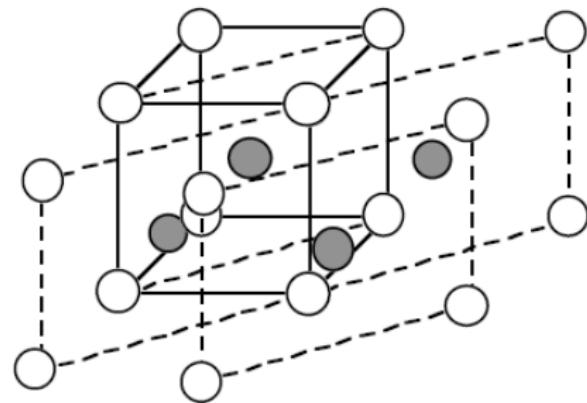


# Clasificación de defectos

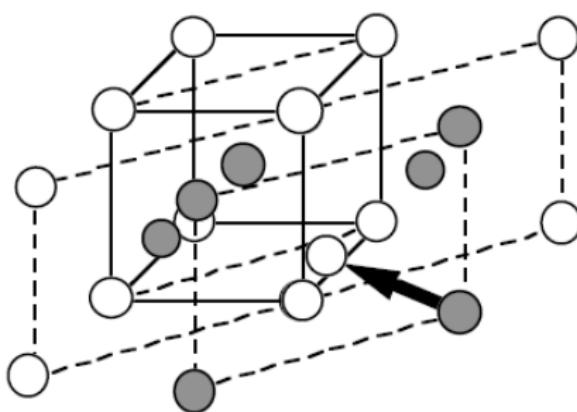
## Defectos de superficie

### Fallas de empaquetamiento

Se forman por fallas en la secuencia de apilamiento de planos atómicos en la formación de un cristal.



Planos {110} estructura ClCs



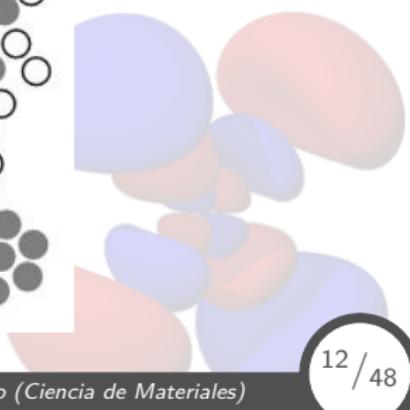
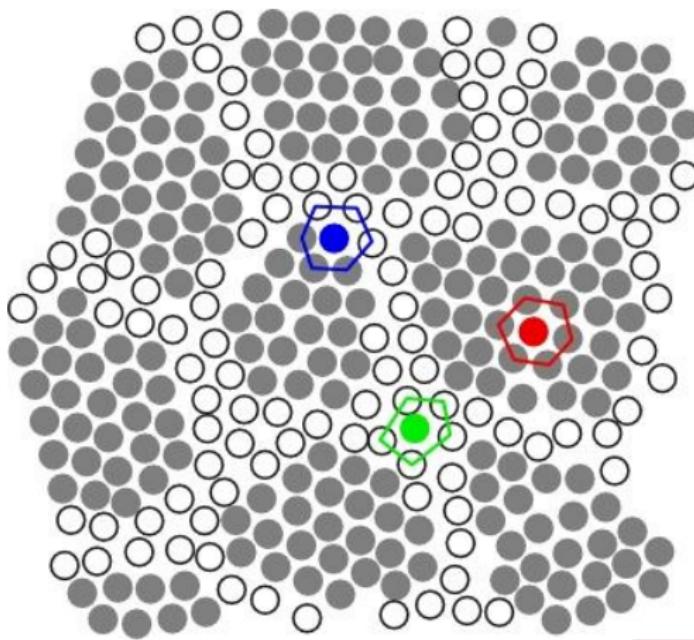
Frontera de antifase por  $(1/2)\langle 110 \rangle$

# Clasificación de defectos

## Defectos de superficie

### Fronteras de grano

Son formadas por la unión entre dos regiones de diferente orientación cristalina a lo largo de una superficie común.



# Contenido: Tema 05

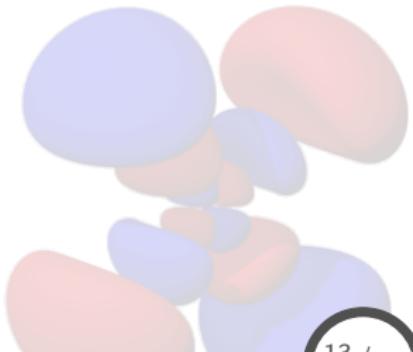
## 5. Defectos

5.1 Clasificación de defectos

**5.2 Defectos puntuales: propiedades termodinámicas**

5.3 Defectos de línea: dislocaciones, fortaleza y crecimiento cristalino

5.4 Defectos de superficie: imperfecciones de empaquetamiento y fronteras de grano



# Defectos puntuales: propiedades termodinámicas

## Consideraciones termodinámicas generales

Los defectos puntuales están presentes en un cristal aún en equilibrio térmico. Para demostrarlo, calculemos el **número de vacancias**  $n$  en un sistema en equilibrio mediante la **energía libre de Gibss**,

$$G = U - TS + PV.$$

Consideremos el cristal compuesto por  $N$  iones y  $n$  vacancias, tal que formen un cristal perfecto de  $N + n$  elementos, entonces como primera aproximación:

$$V(n) = (N + n)v_0 \quad \forall \quad v_0 = \text{vol. por ión en el cristal perfecto.}$$

Ahora, si analizamos el caso de un cristal al cual se le ha sustraído los  $n$  iones, quedando **vacancias** en esos sitios, podemos calcular la **energía libre de Helmholtz** de ese cristal imperfecto,

$$F_0(n) = U - TS.$$

# Defectos puntuales: propiedades termodinámicas

## Consideraciones termodinámicas generales

Para este cristal imperfecto, tomamos las siguientes consideraciones:

$n \ll N$ . Entonces  $F_0(n)$  depende sólamente del número de **vacancias**, mas no de su distribución espacial;

$S = S + S^{conf}$ .  $S^{conf}$  representa el desorden de las diferentes maneras de que  $n$  vacancias ocupen el total de  $N + n$  sitios:

$$\text{posibles maneras} \rightarrow \frac{(N+n)!}{N!n!},$$

$$\Rightarrow S^{conf} = k_B \ln \frac{(N+n)!}{N!n!}.$$

Por tanto, la energía libre de Gibbs vendrá dada como,

$$G = U - TS + PV,$$

$$\therefore G(n) = F_0(n) - TS^{conf}(n) + P(N+n)v_0.$$

# Defectos puntuales: propiedades termodinámicas

## Consideraciones termodinámicas generales

Ahora podemos determinar  $n$  tal que minimize  $G(n)$ ,

$$G(n) = F_0(n) - TS^{conf}(n) + P(N+n)v_0,$$

$$\therefore \frac{\partial G}{\partial n} = \frac{\partial F_0}{\partial n} - T \frac{\partial S^{conf}}{\partial n} + Pv_0.$$

Evaluando la parte de entropía configuracional,

$$S^{conf} = k_B \ln \frac{(N+n)!}{N!n!},$$

$$\Rightarrow \frac{\partial S^{conf}}{\partial n} = k_B \frac{\partial}{\partial n} [\ln (N+n)! - \ln N! - \ln n!] ,$$

Para evaluar aplicamos **fórmula de Stirling**:

$$\ln X! \approx X (\ln X - 1) \quad \forall \quad X \gg 1,$$

por tanto, tenemos:

$$\frac{\partial S^{conf}}{\partial n} = k_B \ln \frac{N+n}{n} \approx k_B \ln \frac{N}{n} \quad \forall \quad n \ll N.$$

# Defectos puntuales: propiedades termodinámicas

Consideraciones termodinámicas generales

Para la energía libre de Helmholtz,

$$\frac{\partial F_0}{\partial n} \approx \left. \frac{\partial F_0}{\partial n} \right|_{n=0} = \varepsilon \quad \forall \quad \varepsilon \neq \varepsilon(n) \quad \& \quad n \ll N.$$

Sustituyendo los resultados anteriores en  $\partial G / \partial n$ ,

$$\begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial n} &= \frac{\partial F_0}{\partial n} - T \frac{\partial S^{conf}}{\partial n} + Pv_0, \\ \Rightarrow \quad \frac{\partial G}{\partial n} &= \varepsilon - k_B T \ln(N/n) + Pv_0. \end{aligned}$$

Haciendo  $\partial G / \partial n = 0$  para encontrar el valor de  $n$  que **minimiza**  $G(n)$ , y por tanto, nos da el estado base,

$$n = Ne^{-(\varepsilon + Pv_0)/k_B T}.$$

# Defectos puntuales: propiedades termodinámicas

## Consideraciones termodinámicas generales

Para calcular  $\varepsilon$  expresamos la energía potencial total de la red de  $N+n$  sitios con  $n$  vacancias como:

$$U = U^{eq} + U^{ar},$$

entonces de la expresión de la función de partición se puede calcular  $F_0$ ,

$$e^{-\beta F_0} = \sum_U e^{-\beta U} = e^{-\beta U^{eq}} \sum_{U^{ar}} e^{-\beta U^{ar}} \quad \forall \quad \beta = \frac{1}{k_B T},$$

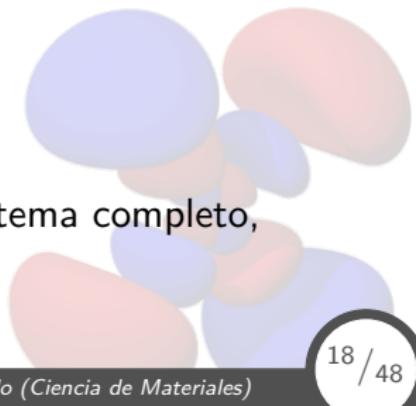
en donde  $U^{ar}$  corre en los eigenvalores de la parte armónica del Hamiltoniano.

Lo anterior da como resultado,

$$F_0 = U^{eq} + F^{ph},$$

$U^{eq}$  → energía potencial en equilibrio del sistema completo,

$F^{ph}$  → energía libre fonónica.



# Defectos puntuales: propiedades termodinámicas

## Consideraciones termodinámicas generales

De la expresión de la energía libre de Helmholtz,

$$F_0 = U^{eq} + F^{ph},$$

se tiene normalmente  $U^{eq} > F^{ph}$ , por lo que:

$$\varepsilon = \frac{\partial F_0}{\partial n} \Rightarrow \varepsilon_0 = \left. \frac{\partial U^{eq}}{\partial n} \right|_{n=0},$$

lo cual representa la energía potencial (independiente de la temperatura) necesaria para remover un ión del cristal.

A condiciones normales de presión se tiene  $Pv_0 \ll \varepsilon_0$ , por lo que

$$n = Ne^{-(\varepsilon + Pv_0)/k_B T} \Rightarrow n = Ne^{-\varepsilon/k_B T},$$

en donde  $\varepsilon_0 \sim \text{eV}$ , por lo que  $n/N$  es pequeño, pero ciertamente **diferente de cero**.

# Defectos puntuales: propiedades termodinámicas

## Consideraciones termodinámicas generales

Generalizando el análisis anterior al caso cuando se tienen mas de un tipo de defectos puntuales en un mismo sistema (ej. vacancias e intersticiales), se tiene,

$$n_j = N_j e^{-\varepsilon_j/k_B T} \quad \forall \quad \varepsilon_j = \left. \frac{\partial F_0}{\partial n_j} \right|_{n_j=0} \quad \& \quad n_j \ll N_j,$$

en donde:

$n_j$  → defectos puntuales del tipo  $j$ ,

$N_j$  → num. de sitios posibles donde el defecto de tipo  $j$  puede ocurrir.

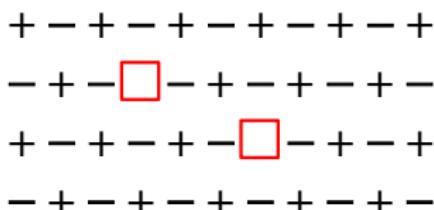
Además, de entre todos los  $n_j$  tipos de defectos posibles, aquel que posea el **mínimo** valor de  $\varepsilon_j$  será aquel más **abundante** en el cristal ( $n_j$  máximo).

**Nota:** en este análisis se consideran **independientes** los posibles defectos puntuales en el cristal.

# Defectos puntuales: propiedades termodinámicas

## Consideraciones termodinámicas generales

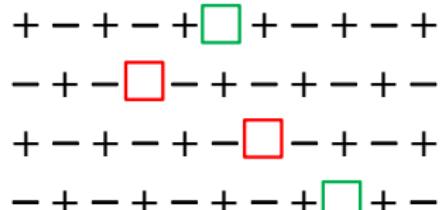
En el caso más general, los  $n_j$  defectos no son independientes, siendo relacionados por restricciones entre ellos, tal como la **neutralidad de carga**, la cual se puede lograr por los siguientes mecanismos:



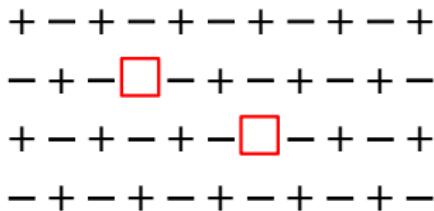
Vacancias de iones positivos



### Defecto Schottky



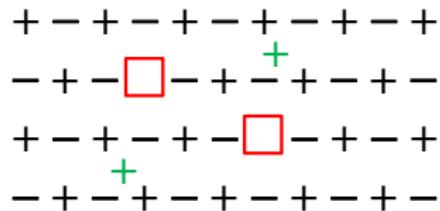
Inclusión: vacancias I. negativos



Vacancias de iones positivos



### Defecto Frenkel



Inclusión: I. intersticiales positivos

# Defectos puntuales: propiedades termodinámicas

## Consideraciones termodinámicas generales

Independientemente del mecanismo de neutralidad de carga, se tiene que la energía libre debe ser minimizada bajo la siguiente restricción:

$$\sum q_j n_j = 0,$$

donde  $q_j$  es la carga del  $j$ -ésimo tipo de defecto:

$q_j = +e \rightarrow$  **vacancia** de un ión **negativo** o un ión **positivo intersticial**,

$q_j = -e \rightarrow$  **vacancia** de un ión **positivo** o un ión **negativo intersticial**.

Así, la energía libre de Gibbs queda como,

$$\begin{aligned} G &\rightarrow G + \lambda \sum q_j n_j, \\ \Rightarrow \quad \frac{\partial G}{\partial n_j} &\rightarrow \frac{\partial G}{\partial n_j} + \lambda q_j, \\ \therefore \quad n_j &= N_j e^{-(\varepsilon_j + \lambda q_j)/k_B T}, \end{aligned}$$

en donde  $\lambda$  se determina exigiendo que la  $n_j$  obtenida satisfaga la restricción de neutralidad de carga.

# Defectos puntuales: propiedades termodinámicas

## Consideraciones termodinámicas generales

Como ya se comentó, el tipo de defecto con el **menor**  $\varepsilon_j$  será el defecto **dominante** en el cristal, lo cual ocurrirá para cada tipo de carga en el sistema (positiva o negativa):

$$n_+ = N_+ e^{-(\varepsilon_+ + \lambda e)/k_B T},$$

$$n_- = N_- e^{-(\varepsilon_- - \lambda e)/k_B T},$$

$$\forall \quad \varepsilon_{\pm} = \min_{q_j = \pm e} (\varepsilon_j).$$

Como las densidades de todos los otros tipos de defecto satisfacen la siguiente condición,

$$n_j \ll n_+ \quad \forall \quad q_j = +e \quad \& \quad n_j \ll n_- \quad \forall \quad q_j = -e,$$

la **neutralidad de la carga**, requiere por tanto, que se debe cumplir:

$$n_+ = n_-.$$

# Defectos puntuales: propiedades termodinámicas

## Consideraciones termodinámicas generales

Por tanto, tenemos dos condiciones que deben cumplir las densidades máximas de vacancias para cada carga:

$$n_{\pm} = N_{\pm} e^{-(\varepsilon_{\pm} \pm \lambda e)/k_B T},$$
$$n_+ = n_-.$$

Relacionando ambas condiciones:

$$n_+ n_- = N_+ N_- e^{-(\varepsilon_+ + \varepsilon_-)/k_B T},$$
$$\Rightarrow n_+^2 = N_+ N_- e^{-(\varepsilon_+ + \varepsilon_-)/k_B T},$$
$$\therefore n_+ = n_- = \sqrt{N_+ N_-} e^{-(\varepsilon_+ + \varepsilon_-)/2k_B T},$$

lo cual indica que la restricción de neutralidad **reduce** la concentración del defecto más **abundante**, e **incrementa** la concentración del más **abundante de carga opuesta**, tendiendo ambos al promedio geométrico de las densidades (en ausencia de restricciones).

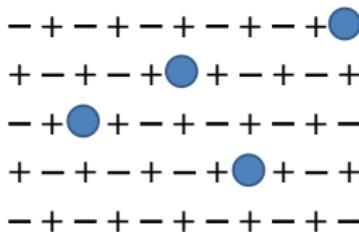
# Defectos puntuales: propiedades termodinámicas

## Centros de color

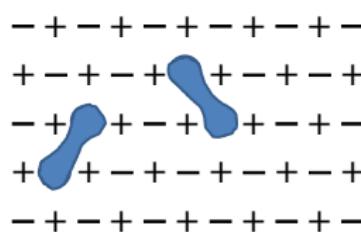
### Centros de color

Son generados por vacancias de iones **negativos**, los cuales son balanceados con carga electrónica **localizada** en la vecindad del defecto puntual, y se puede considerar tal densidad como ligada a un potencial efectivo **positivo**.

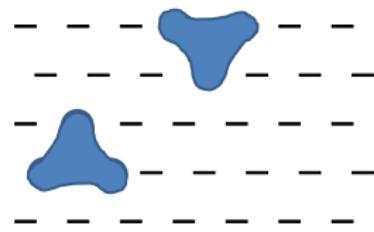
Centro F



Centro M



Centro R



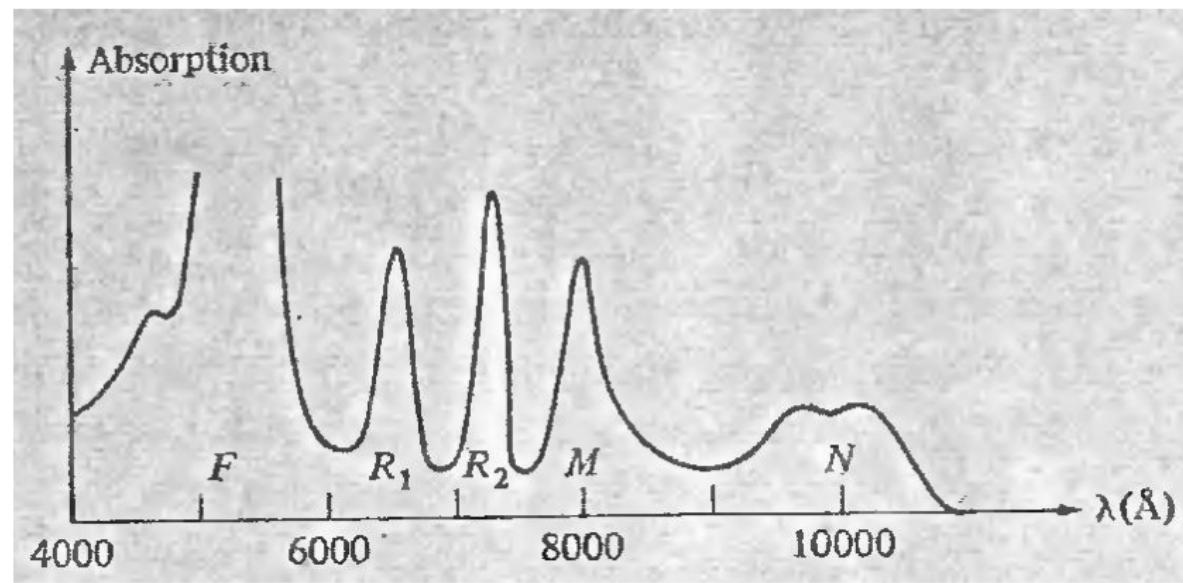
Dos vacancias vecinas enlazan dos electrones en el plano (100).

Tres vacancias vecinas enlazan tres electrones en el plano (111).

# Defectos puntuales: propiedades termodinámicas

## Centros de color

Los centros de color son detectados por medio de **absorción óptica**, en donde las diferencia principal con la excitación producida por un átomo es el **linewidth**, el cual será más ancho para un centro de color.



# Contenido: Tema 05

## 5. Defectos

5.1 Clasificación de defectos

5.2 Defectos puntuales: propiedades termodinámicas

**5.3 Defectos de línea: dislocaciones, fortaleza y crecimiento cristalino**

5.4 Defectos de superficie: imperfecciones de empaquetamiento y fronteras de grano



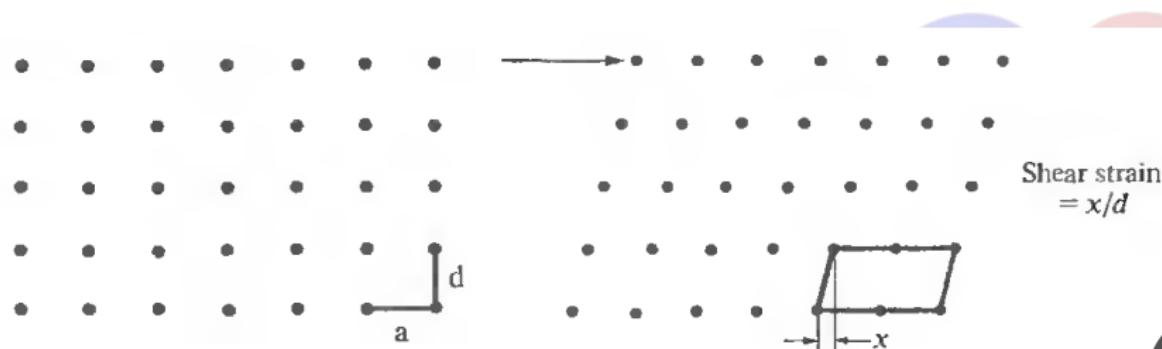
# Defectos de línea

## Deformaciones plásticas

Estimemos la fuerza necesaria para deformar **plásticamente** un cristal perfecto, considerando lo siguiente:

- Un cristal como una familia de planos de red paralelos, separados una distancia  $d$ .
- Una **deformación cortante** es la cual cada plano es desplazado de manera paralela una distancia  $x$  con respecto al plano inferior, en una dirección  $\hat{n}$  específica.
- La ganancia de energía  $u(x)$ , para  $x$  pequeños, será del tipo:

$$u(x) \propto x^2 \quad \forall \quad x = 0 \rightarrow \text{posición de equilibrio.}$$



# Defectos de línea

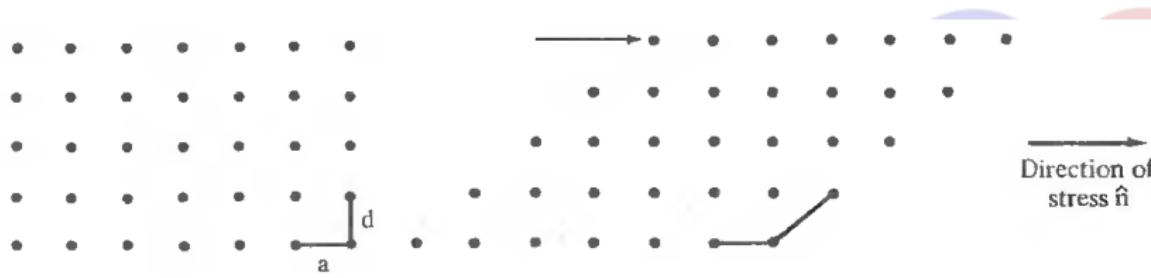
## Deformaciones plásticas

En este caso, la expresión de la energía vendrá dada por:

$$u = \frac{1}{2} \left( \frac{x}{d} \right)^2 G,$$

en donde  $G$  es del tamaño de una **cte. elástica** típica, del orden de  $10^{11} - 10^{12}$  dynes/cm<sup>2</sup>.

Si analizamos el caso cuando  $x$  es muy **grande**, del orden del parámetro de red del cristal, con  $\hat{n} \parallel a$ , tendremos:



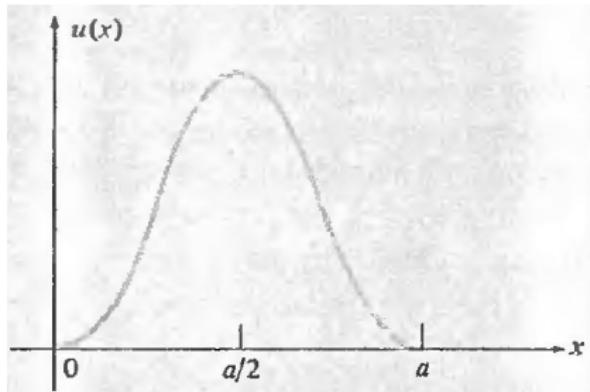
# Defectos de línea

## Esfuerzo cortante

Tal caso nos indicará que  $u(x)$  será **periódica**:

$$u(x + a) = u(x),$$

y tal periodicidad se traduce en que la **fuerza** necesaria para mantener el desplazamiento  $x$  **no crece** indefinidamente.



**Esfuerzo cortante** : fuerza  $\sigma(x)$  por unidad de área del plano, necesaria para mantener el desplazamiento  $x$ .

El esfuerzo cortante  $\sigma(x)$  viene dado por,

$$\sigma = \frac{1}{NA} \frac{d}{dx} (Vu) = d \left( \frac{du}{dx} \right) \quad \forall \quad V = ANd,$$

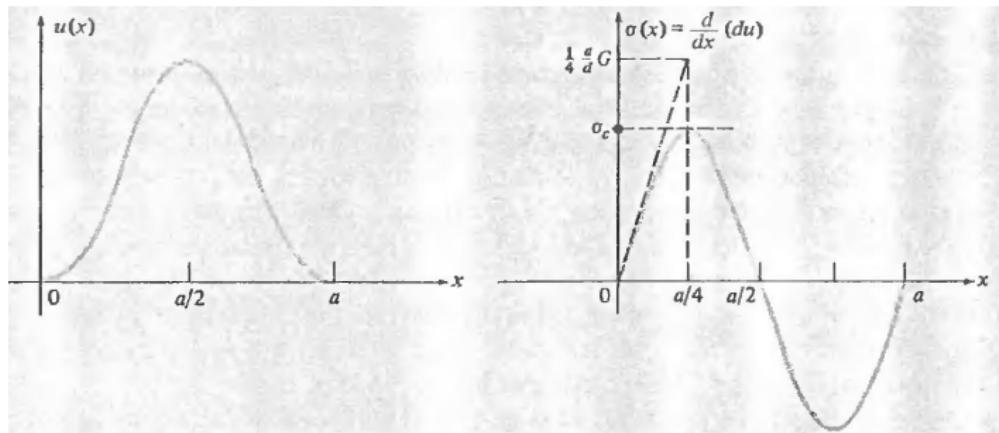
en donde se tienen  $N$  planos de área  $A$  en el volumen  $V$ .

# Defectos de línea

## Esfuerzo cortante

El valor **máximo** de  $\sigma(x)$  se encuentra  $0 \leq x \leq a/2$ , el cual se estima extrapolando la región donde tiene comportamiento lineal<sup>1</sup> hasta  $a/4$ :

$$\sigma_c \approx \frac{d}{dx} \left[ \frac{1}{2} G \frac{x^2}{d} \right]_{a/4} = \frac{1}{4} \frac{a}{d} G \approx 10^{11} \text{ dynes/cm}^2.$$



Comparando con sistemas *single crystals*, el estimado se encuentra muy por arriba de lo medido experimentalmente:  $10^7$  dynes/cm<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>aprox. sólo válida para  $x \ll a$ .

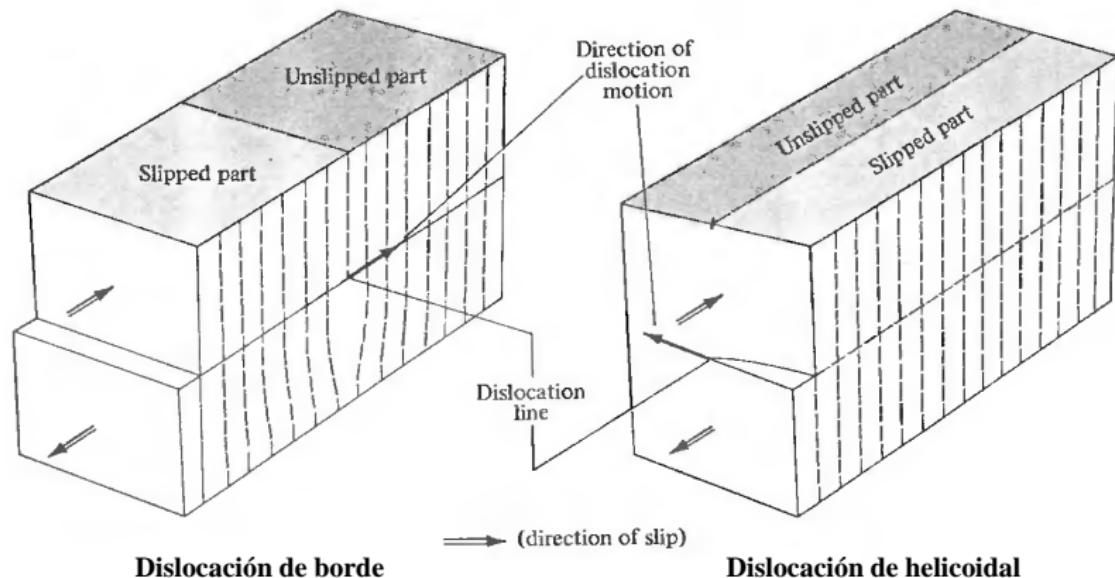
# Defectos de línea

## Dislocaciones

La diferencia del esfuerzo cortante **crítico**  $\sigma_c$ , entre el modelo y el experimento, proviene de no tomar en cuenta los **defectos de línea** conocidos como **dislocaciones**:

### Dislocación de borde

### Dislocación helicoidal o de tornillo

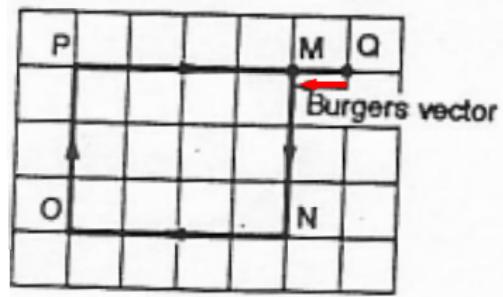
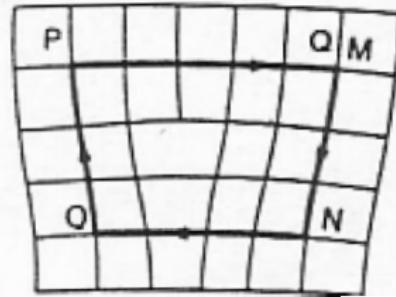


# Defectos de línea

## Vector de Burgers

Una manera de describir una dislocación es mediante el **vector de Burgers**, cuya definición es la siguiente:

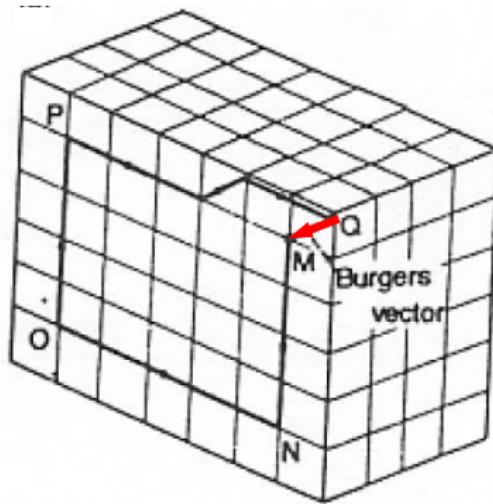
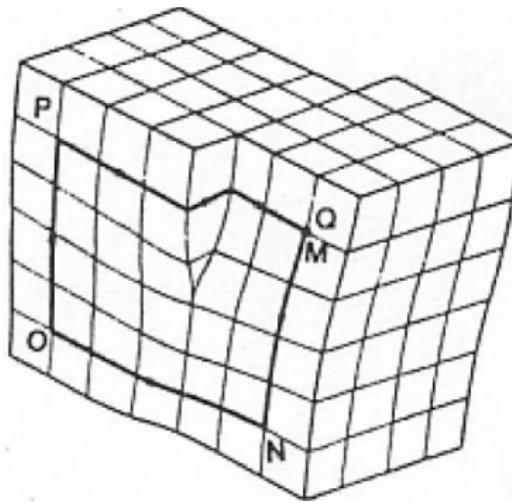
- Se construye un camino **cerrado** mediante puntos de la red de Bravais, rodeando la línea de dislocación.
- Se realiza la misma trayectoria (con los mismos vectores) en una región libre de defectos de línea.
- Si el punto inicial y final en la región considerada perfecta no coinciden, entonces existe una **dislocación**.
- Tal diferencia  $\neq 0$  se le conoce como **vector de Burgers**.



# Defectos de línea

## Vector de Burgers

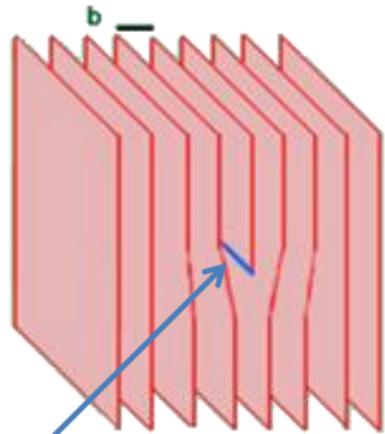
El mismo procedimiento se puede realizar con **dislocaciones helicoidales** o de **tornillo**.



# Defectos de línea

Vector de Burgers

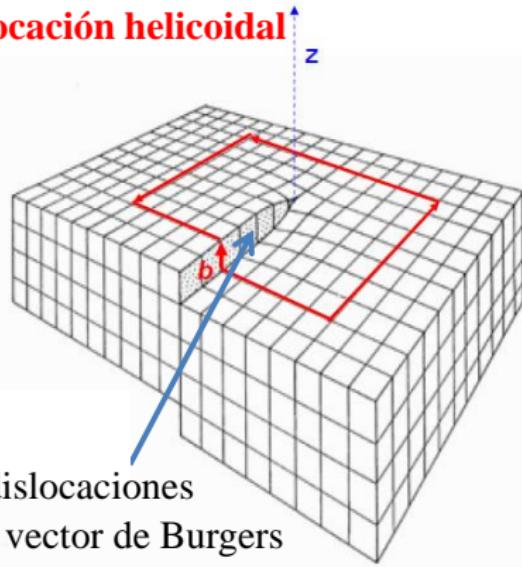
## Dislocación de borde



Línea de dislocaciones

$\mathbf{b}$ : vector de Burgers

## Dislocación helicoidal



Plano de dislocaciones

$\mathbf{b}$ : vector de Burgers

**Dislocación de borde** : el vector de Burgers es **perpendicular** a la línea de dislocaciones.

**Dislocación helicoidal** : el vector de Burgers es **paralelo** al plano de dislocaciones.

# Defectos de línea

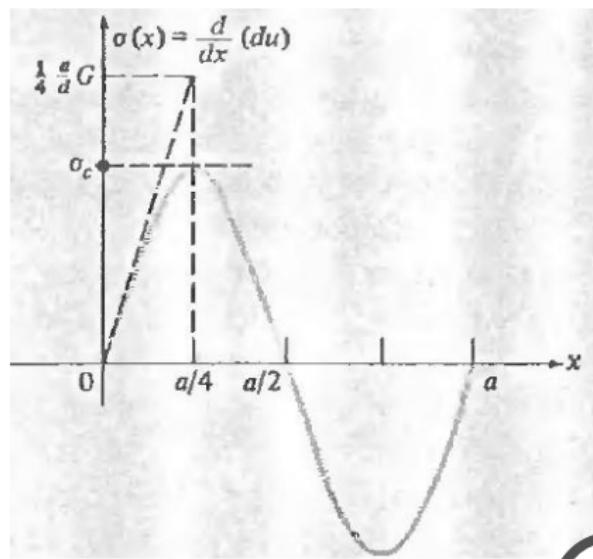
## Fortaleza cristalina

La **fortaleza cristalina** de un material nos indica que tan resistente es a la **deformación plástica**.

Consideremos nuevamente el efecto de **deslizamiento** en un cristal, determinado por el esfuerzo cortante **crítico**:  $\sigma_c$ ,

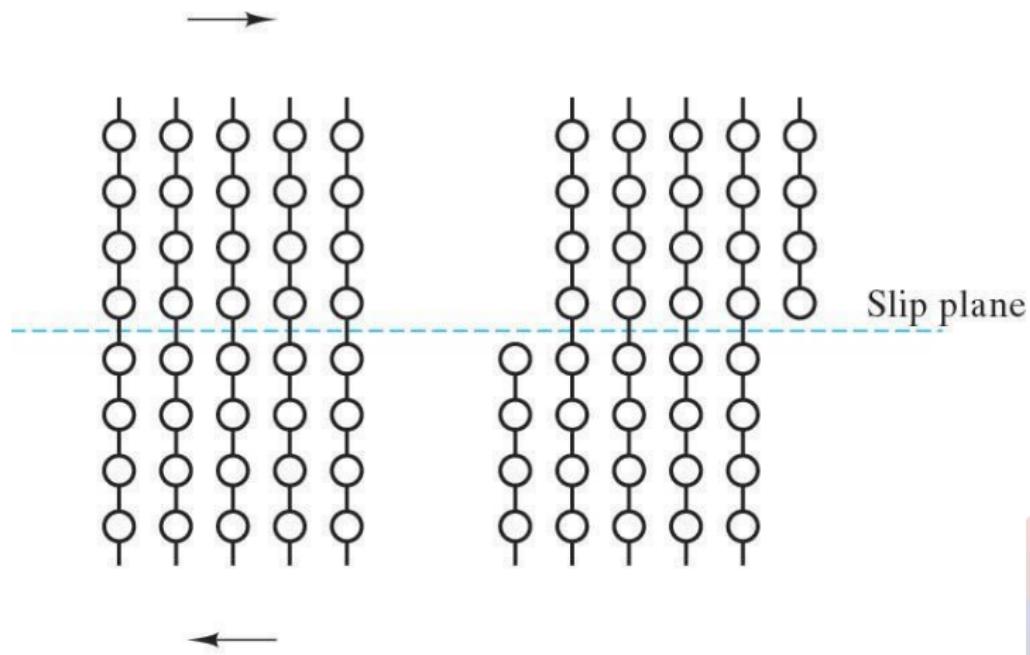
Diferencia modelo-experimento:  
 $10^4$  dynes/cm<sup>2</sup> !!

Razón de discrepancia: presencia de **dislocaciones** y su propagación.



# Defectos de línea

Fortaleza cristalina

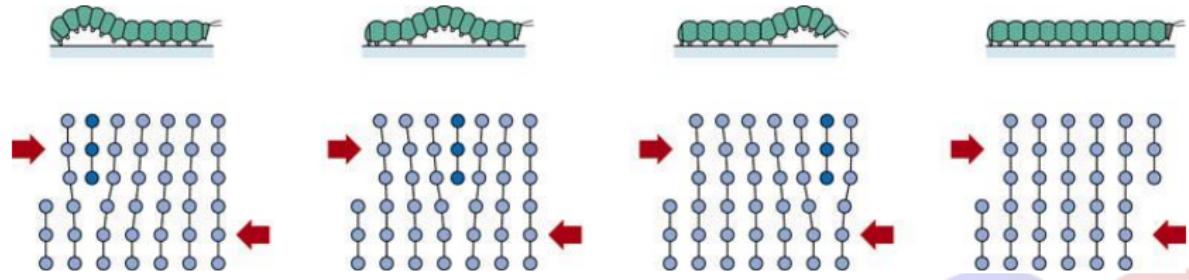


En un **cristal perfecto** se tiene que el efecto de deslizamiento se debe realizar rompiendo enlaces y restaurándolos de forma continua, obteniendo una gran **fortaleza cristalina** en el material.

# Defectos de línea

Fortaleza cristalina

En cambio, para un **cristal imperfecto**, el deslizamiento se da mediante la **propagación de dislocaciones**,



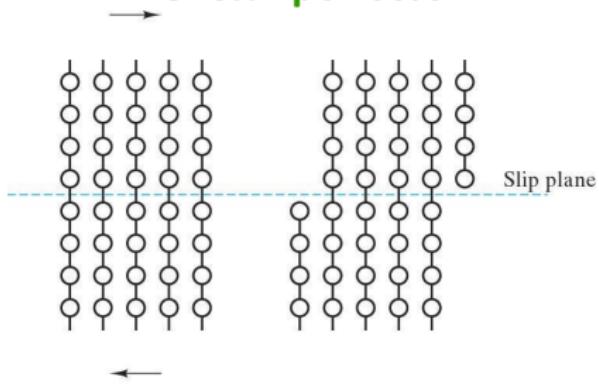
lo cual es energéticamente más favorable y menos costoso, induciendo el fenómeno de **plasticidad** y **ductilidad** en el material, reduciendo su fortaleza cristalina.

# Defectos de línea

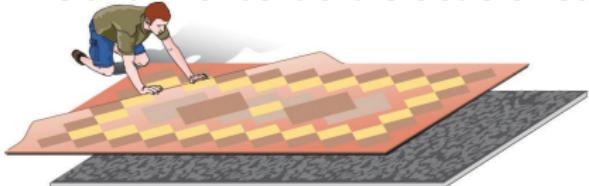
## Fortaleza cristalina

Existen dos diferentes condiciones para que un material posea una alta fortaleza cristalina:

### Cristal perfecto



### Enclavamiento de dislocaciones



(a) Dislocation



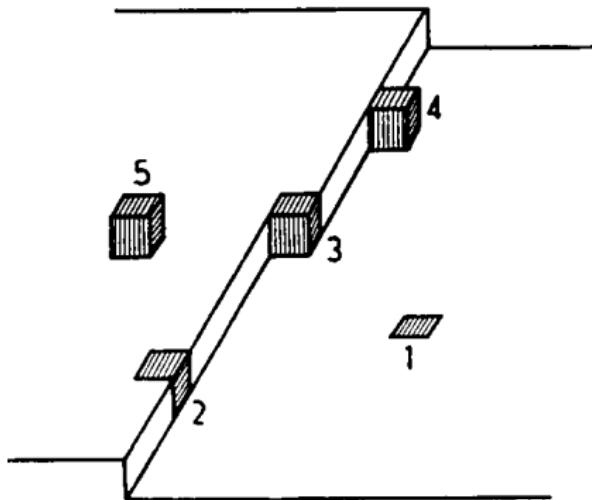
(b) Pinning

Por tanto, mientras **mayor** sea el número de defectos y dislocaciones, **mayor** será la fortaleza del material y su resistencia al deslizamiento de planos.

# Defectos de línea

## Crecimiento cristalino

**El crecimiento cristalino** está determinado por la superficie del sustrato/material sobre el cual se esta creciendo, así como del número de enlaces sin saturar que contenga el sitio.



| Posición           | Enlaces saturados |
|--------------------|-------------------|
| en la cara (1)     | 5                 |
| en escalón (2)     | 4                 |
| en <i>kink</i> (3) | 3                 |
| sobre escalón (4)  | 2                 |
| sobre cara (5)     | 1                 |

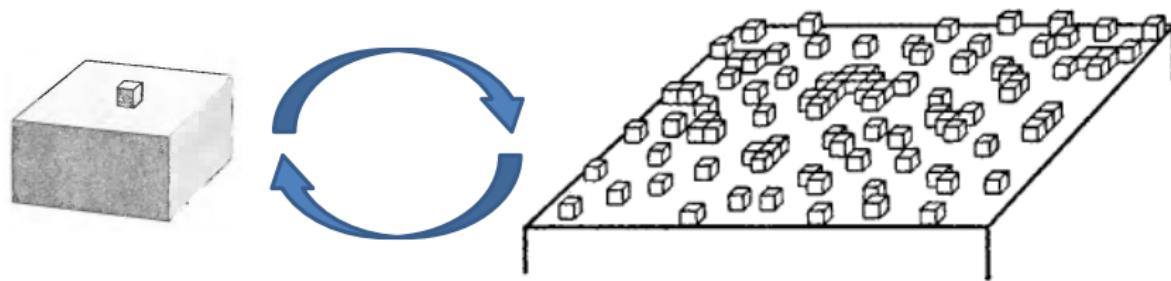
Con lo cual es energéticamente más favorable que un átomo se adsorba en un sitio con **alto número** de enlaces sin saturar, que en uno con **bajo número**.

# Defectos de línea

## Crecimiento cristalino

### Nucleación de capas

- Ocurre cuando se tiene una superficie **limpia** y **libre** de defectos en una atmósfera del mismo material.
- Cada átomo es absorbido/enlazado a la superficie **debilmente**.
- La razón de crecimiento del cristal es muy **lenta**.



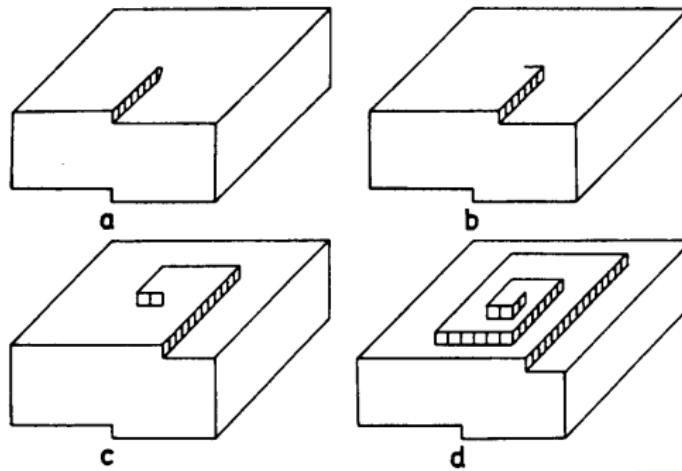
Este proceso se repite capa por capa, hasta obtener el cristal de las dimensiones deseadas.

# Defectos de línea

## Crecimiento cristalino

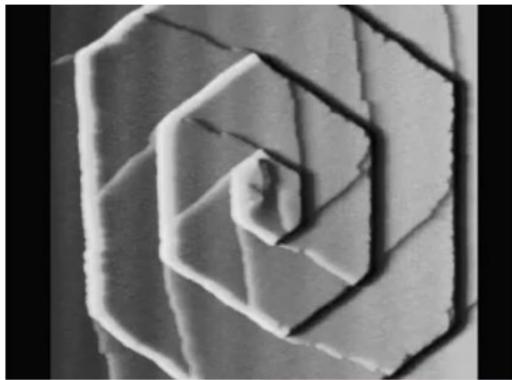
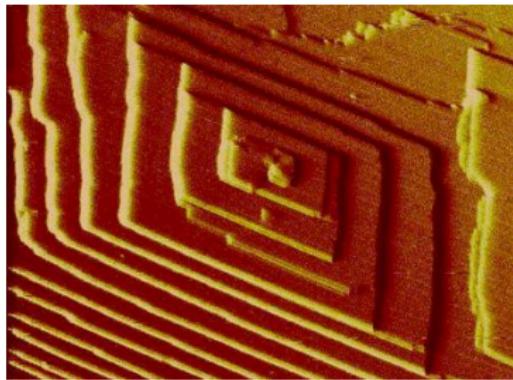
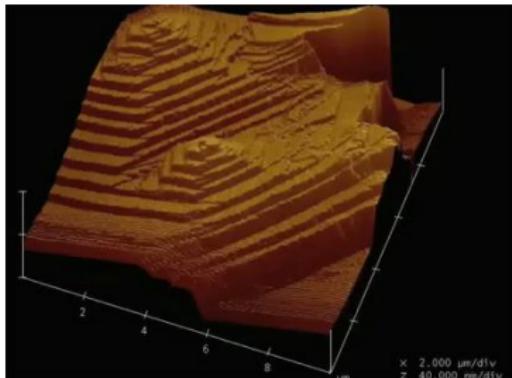
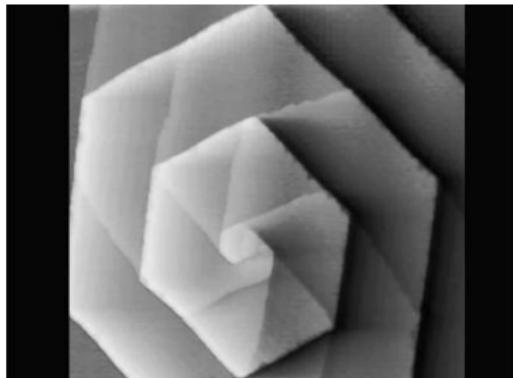
### Crecimiento en presencia de una dislocación helicoidal

- La superficie presenta dislocaciones tipo **helicoidales**.
- Los átomos absorbidos son fuertemente atraídos a los sitios **kink** generados por la dislocación.
- No es necesario crecer capa por capa del cristal, ya que siempre habrá un plano de dislocación disponible, acelerando el crecimiento del cristal.



# Defectos de línea

## Crecimiento cristalino



# Contenido: Tema 05

## 5. Defectos

5.1 Clasificación de defectos

5.2 Defectos puntuales: propiedades termodinámicas

5.3 Defectos de línea: dislocaciones, fortaleza y crecimiento cristalino

5.4 Defectos de superficie: imperfecciones de empaquetamiento y fronteras de grano

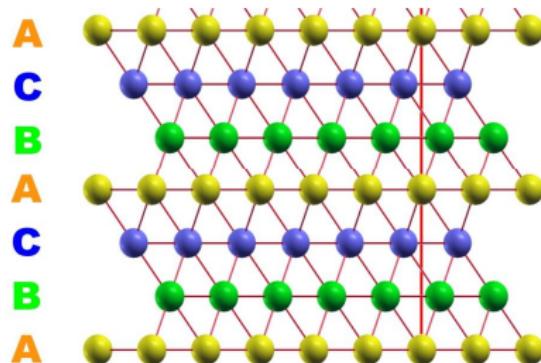
# Defectos de superficie

## Imperfecciones de empaquetamiento

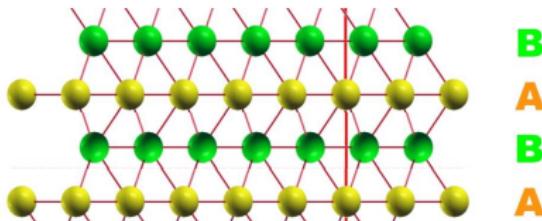
las **imperfecciones de empaquetamiento** ocurren cuando un plano pierde la periodicidad del cristal, y se dan de manera común en casos como por ejemplo:

fcc: ordenamiento ABCABCABC ... en la dirección (111),

hcp: ordenamiento ABAB AB... en la dirección (001).



Estructura fcc con planos (111) sucesivos

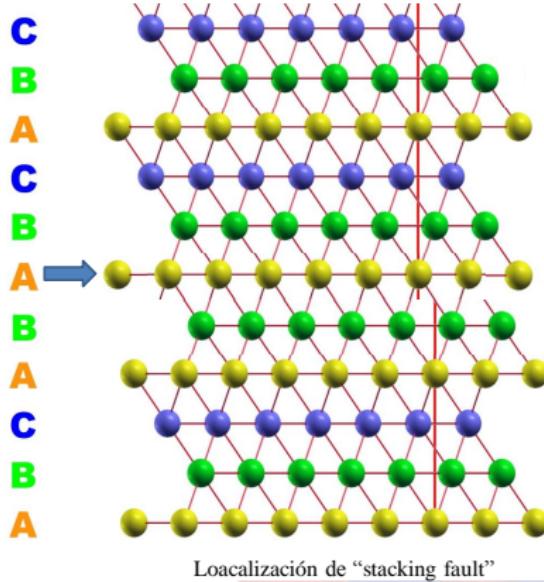
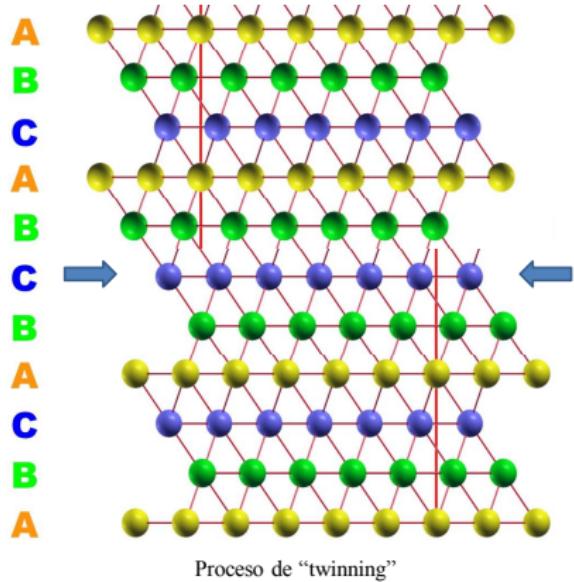


Estructura hcp con planos (001) sucesivos

# Defectos de superficie

## Tipos de imperfecciones de empaquetamiento

Dos de los casos más comunes en las imperfecciones de empaquetamiento son los de **twinning**, y el conocido simplemente por **stacking fault**.



# Defectos de superficie

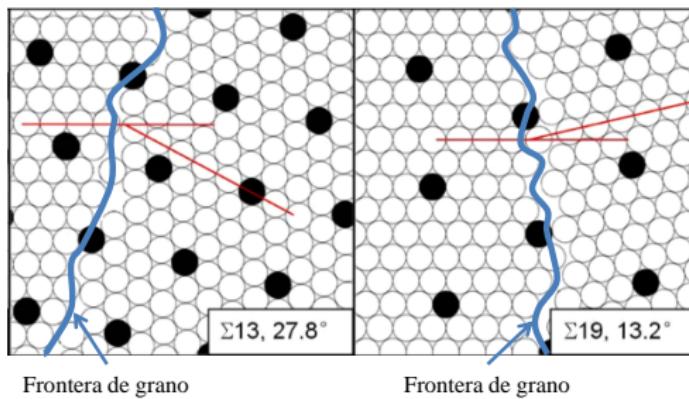
Fronteras de grano

## frontera de grano

Se define como la unión de dos *single crystals* de diferente orientación a lo largo de una superficie plana común entre ellos.

**low-angle:** cuando la diferencia en orientación de las diferentes fases es **pequeña**.

**high-angle:** cuando la diferencia en orientación de las diferentes fases es **grande** ( $> 25^\circ$ ).



# Defectos de superficie

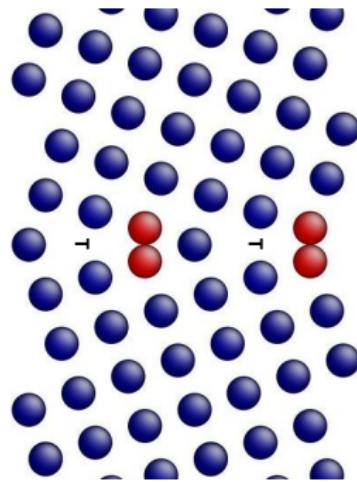
Fronteras de grano: ejemplos *low-angle*

Dentro de las fronteras **low-angle**, se tiene la siguiente clasificación,

**tilt:** se forma de una secuencia lineal de dislocaciones de **borde**.

**twist:** es formada de una secuencia de dislocaciones **helicoidales**.

Frontera tilt



Frontera twist

