

Propiedades Ópticas de Metales

Ricardo E. Marotti

Abril 2015



* e-mail: khamul@fing.edu.uy

Instituto de Física
Facultad de Ingeniería
Universidad de la República
Montevideo, URUGUAY

Propiedades Ópticas de Metales

- Semiconductores y Metales.
 - Definición y Estructura Electrónica.
- Propiedades de Conducción Eléctrica.
 - Modelo de Drude.
- Propiedades Ópticas.
 - Modelo de Drude-Lorentz.
 - Metal Ideal (sin pérdidas).
 - Metal “Ideal” con pérdidas.
 - Metales Reales
 - Oscilación de Plasma.
 - SPR: Películas y Nanopartículas.

Propiedades Ópticas de Metales

- **Semiconductores y Metales.**
 - Definición y Estructura Electrónica.
- **Propiedades de Conducción Eléctrica.**
 - Modelo de Drude.
- **Propiedades Ópticas.**
 - Modelo de Drude-Lorentz.
 - Metal Ideal (sin pérdidas).
 - Metal “Ideal” con pérdidas.
 - Metales Reales
 - Oscilación de Plasma.
 - SPR: Películas y Nanopartículas.

Conducción Eléctrica

- “Superconductor”:
 $\rho \approx 0$ ($T < T_c$)
(+ efecto Meissner)

- Metal:
 $\rho \approx 1 - 100 \mu\Omega \text{ cm}$

- Aislante:
 $\rho > 10 \text{ G}\Omega \text{ cm}$

- Semiconductor ($T=300\text{K}$):
 $\rho \approx 1 \text{ m}\Omega \text{ cm} - 1 \text{ M}\Omega \text{ cm}$

Ley de Ohm:

$$\vec{\mathbf{J}} = \sigma \vec{\mathbf{E}}$$

$\vec{\mathbf{J}}$ \mapsto Densidad de Corriente Eléctrica

$\vec{\mathbf{E}}$ \mapsto Campo Eléctrico

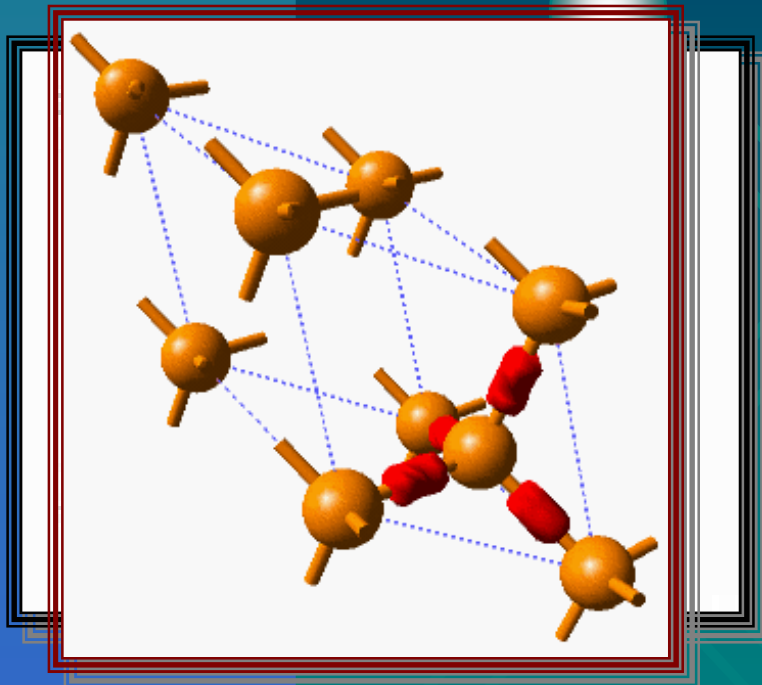
σ \mapsto Conductividad Eléctrica

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \mapsto \text{Resistividad Eléctrica}$$

Definición empírica
basada en diferencia
física: ocupación de
niveles en estructura
electrónica.

Materiales Cristalinos

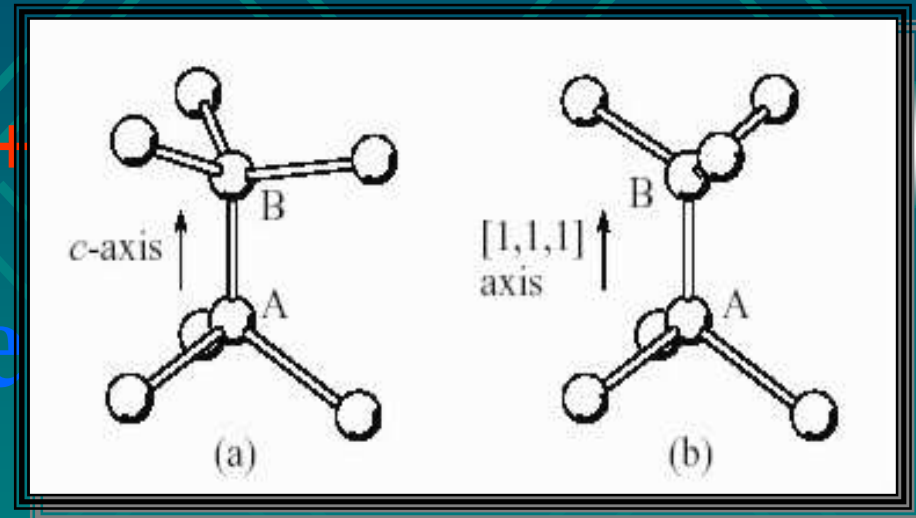
Diamante



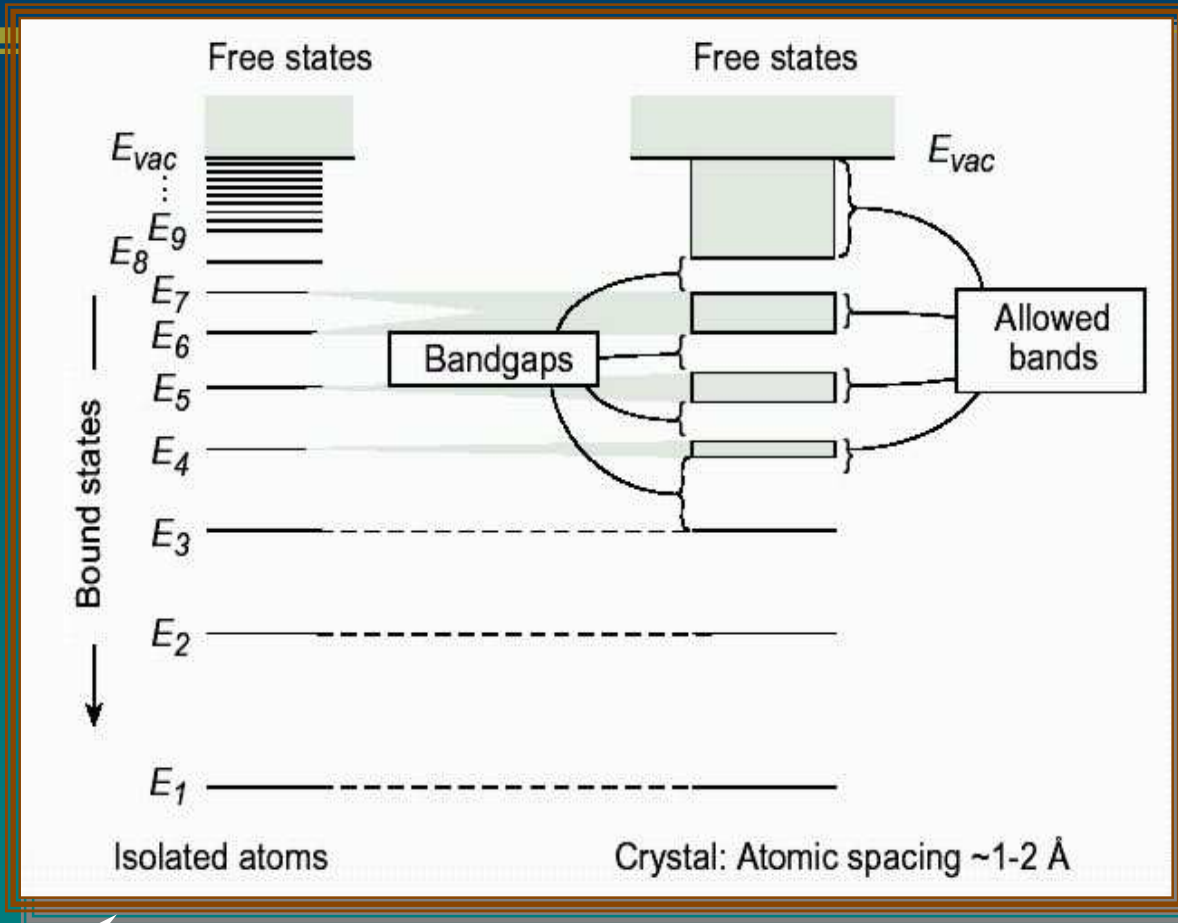
Wurtzite
(hexagonal)

Zincblende
(cúbica)

e^-
 $4e^-$
 e^-



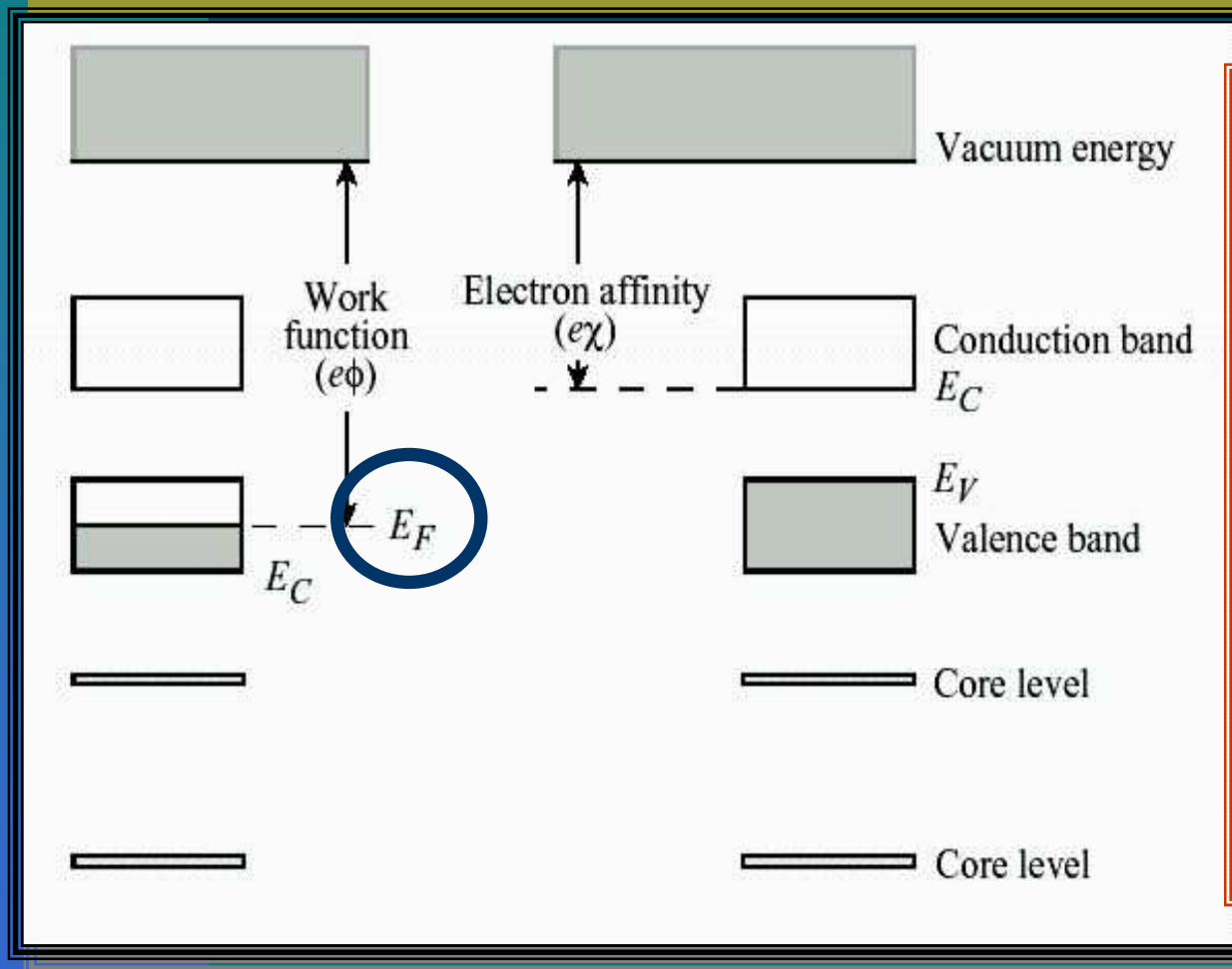
Transición Átomo-”Bulk”



Espaciamiento Interatómico

Densidad Volumétrica de Átomos

Bandas “Chatas”



Metal

**Aislante o
Semiconductor**

- **Gap de Energía:**

$$E_G = E_C - E_V$$

- **Semiconductores:**

$$E_G \sim k_B T$$

$$k_B = 1.38e^{-23} \text{ J/K} =$$

$$= 8.617e^{-5} \text{ eV/K}$$

T: Temperatura (K)

- $k_B T_0 \cong 26 \text{ meV}$

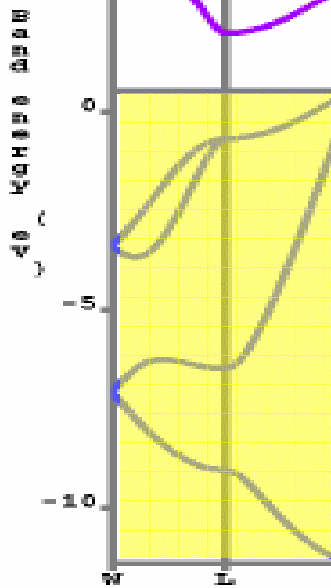
- **GaN, ZnO:**

$$E_G > 3 \text{ eV.}$$

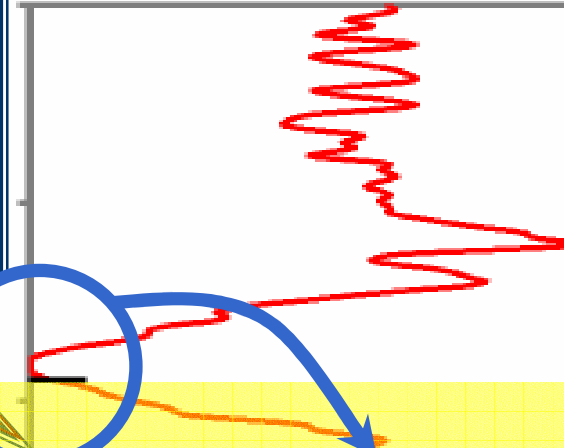
Estructura Electrónica (Caso Semiconductor: Silicio)

Densidad de Estados

Influye directamente
Propiedades Ópticas



Density of States of Si



“Gap” de Energía:
Región Prohibida

Estructura Electrónica de Bandas

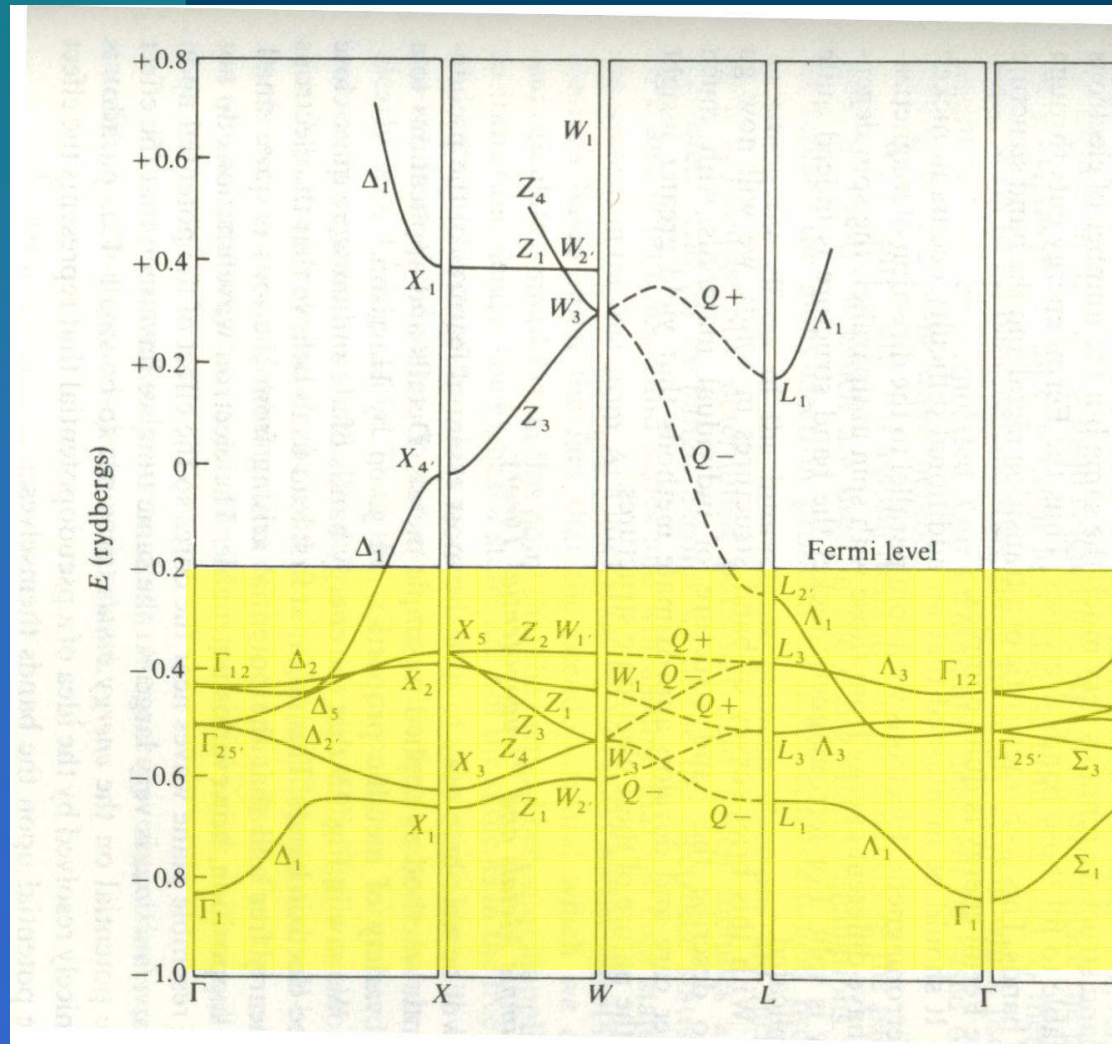
Relaciones de Dispersión

de ondas elec

$$\vec{p} = \hbar \vec{k}$$

viajando en el material.

Estructura Electrónica (Caso Metal: Cobre)

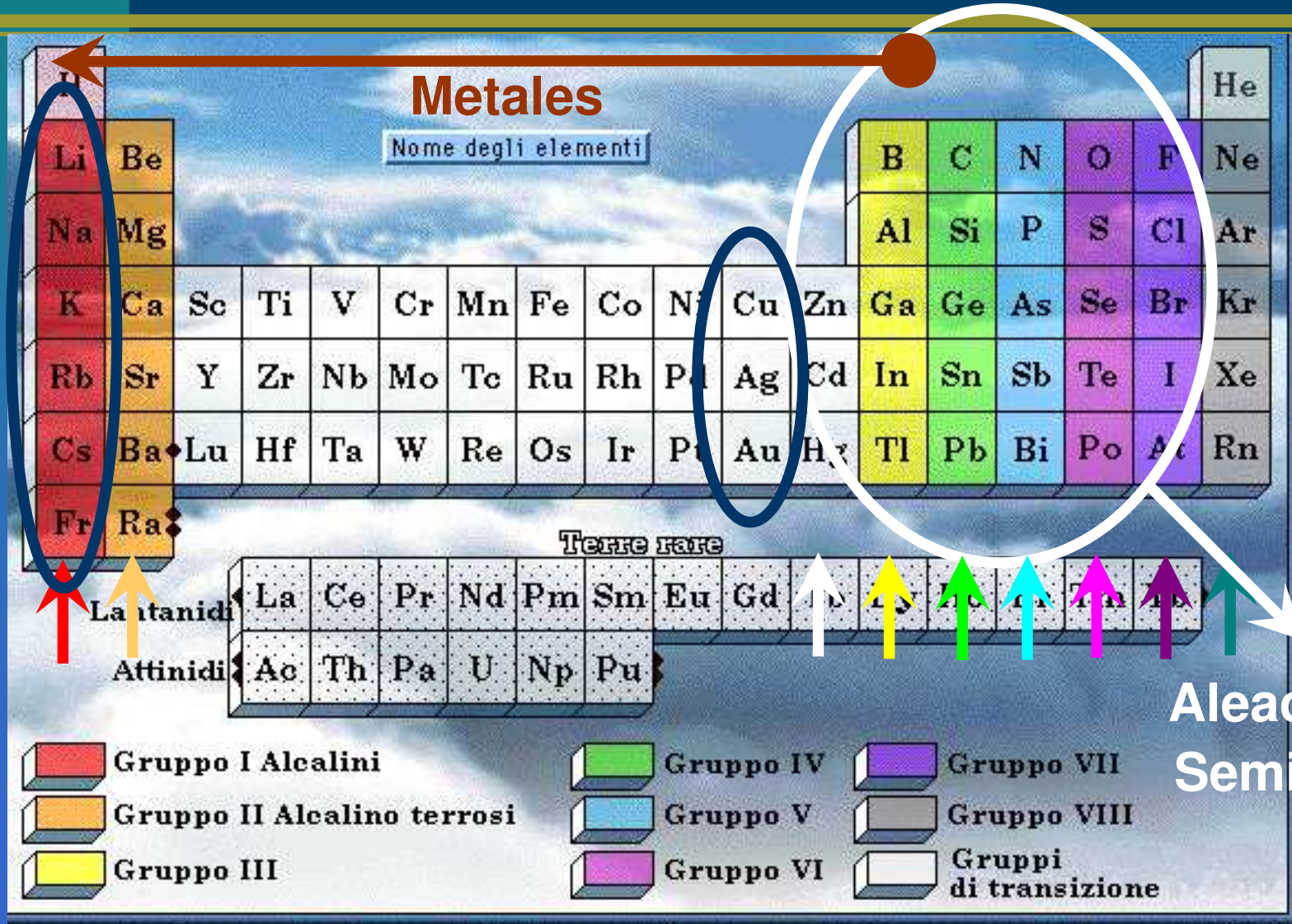


Banda llena o vacía no es aleatorio.

Como regla general depende si número de electrones es **impar** o **par**.

Consecuencia directa del **spin electrónico**.

Tabla Periódica de los Elementos

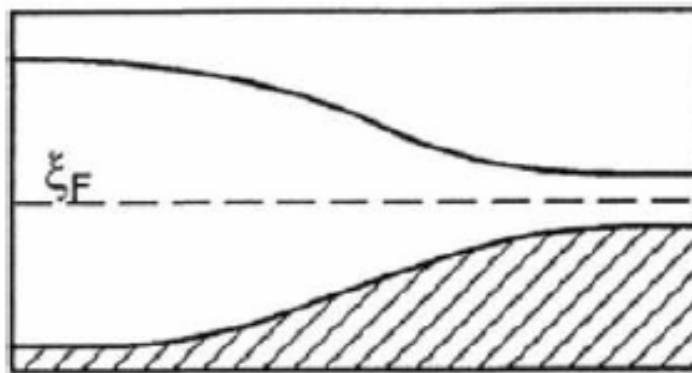


Aleaciones
Semicond.

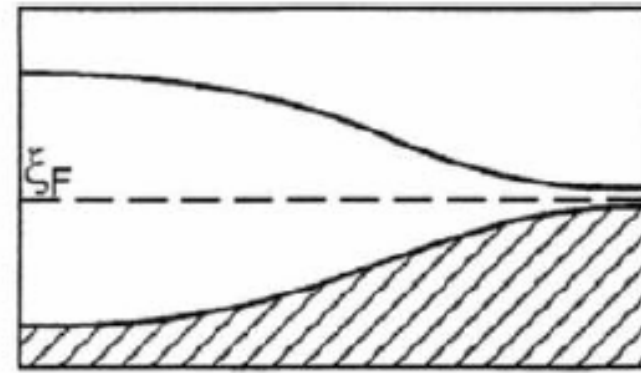
¿Por qué metales?

- Metales alcalinos:
 - Estados s parcialmente llenos.
- Metales de transición:
 - Estados s y d parcialmente llenos.
- Tierras raras:
 - Estados s y f parcialmente llenos.
- Metales trivalentes:
 - Estados p parcialmente llenos (No vale para columna IV en que hay hibridización sp^3).
- Metales divalentes (alcalinos terreos):
 - Estados s y p se superponen \Rightarrow semimetal.

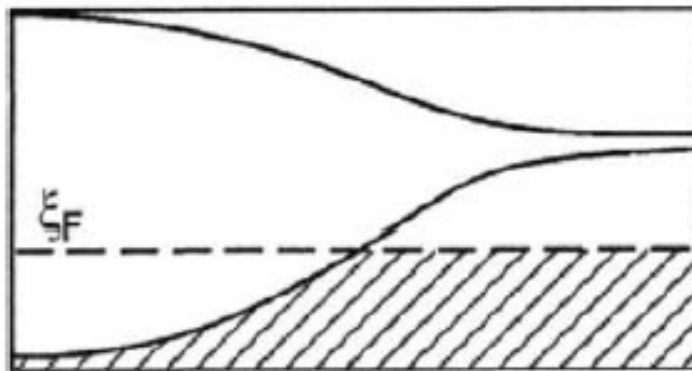
Semiconductores y Semimetales



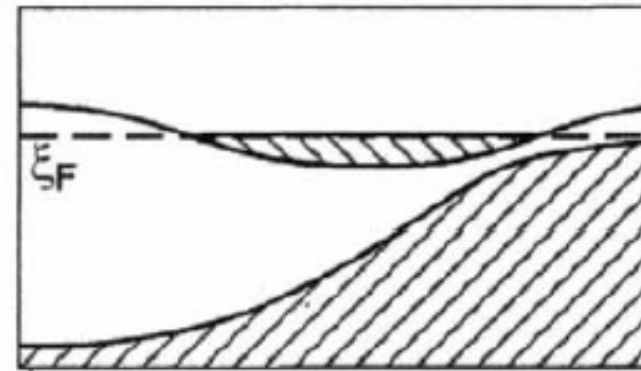
Insulators



Semiconductors



Metals



Semimetals

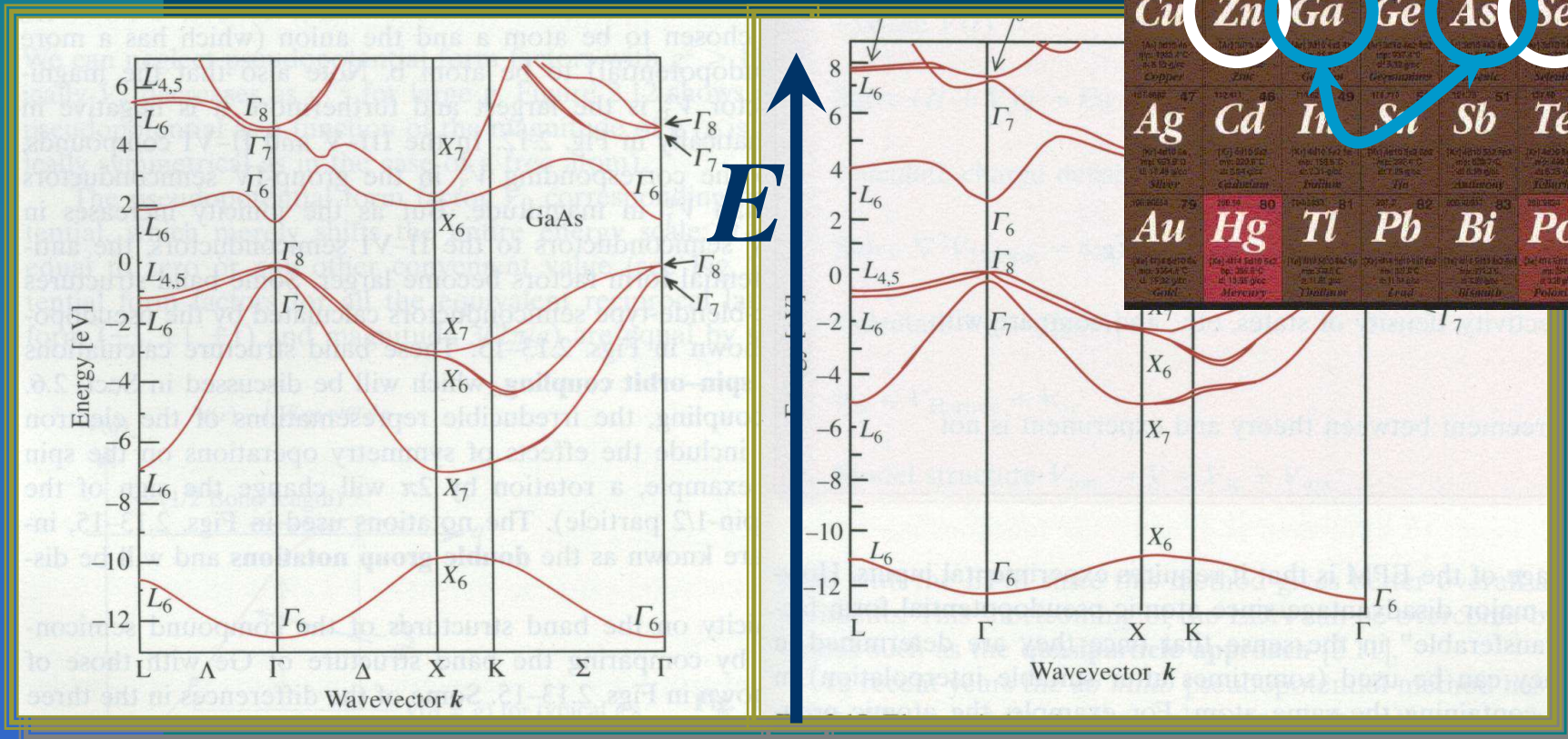
Hibridización

- Columna IV:
 - C: Aislante en estructura diamante (sp^3).
Conductor en estructura grafito (Hibridización sp^2 da lugar a un semimetal).
 - Si, Ge: Semiconductores.
 - Sn, Pb: Metales (Energía del gap E_g disminuye con masa atómica).
- Columna V y VI: Pueden ser semiconductores o semimetales.
 - Ej: S tiene hibridización d^2sp^3 .

Estructura Electrónica: GaAs vs ZnSe

II III IV V VI

	B	C	N	O	
	Al	Si	P	S	
	Zn	Ga	Ge	As	Se
	Ag	Cd	In	Sb	Te
	Au	Hg	Tl	Pb	Bi
					Po



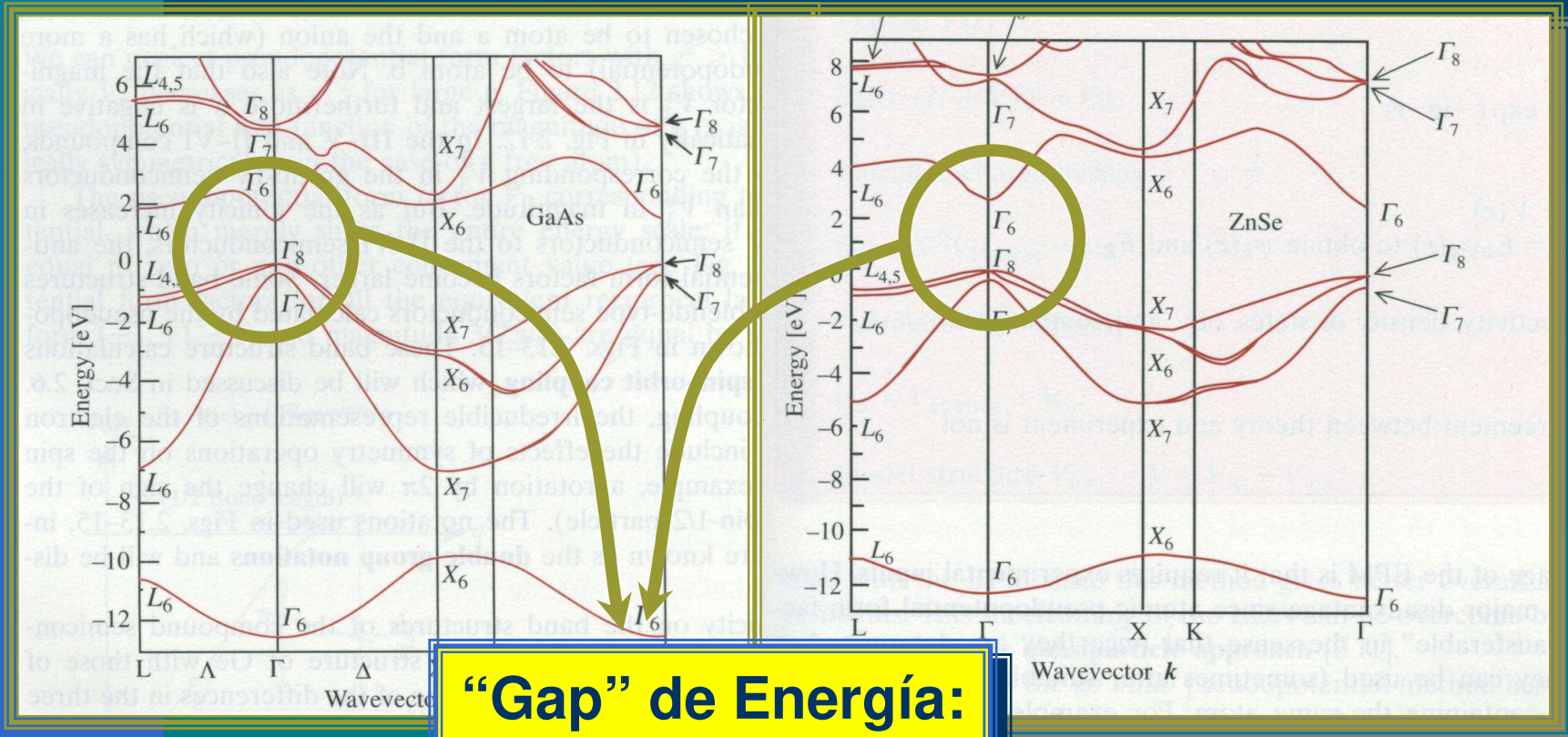
GaAs

$$\rightarrow \rightarrow$$

$$p = \hbar k$$

ZnSe

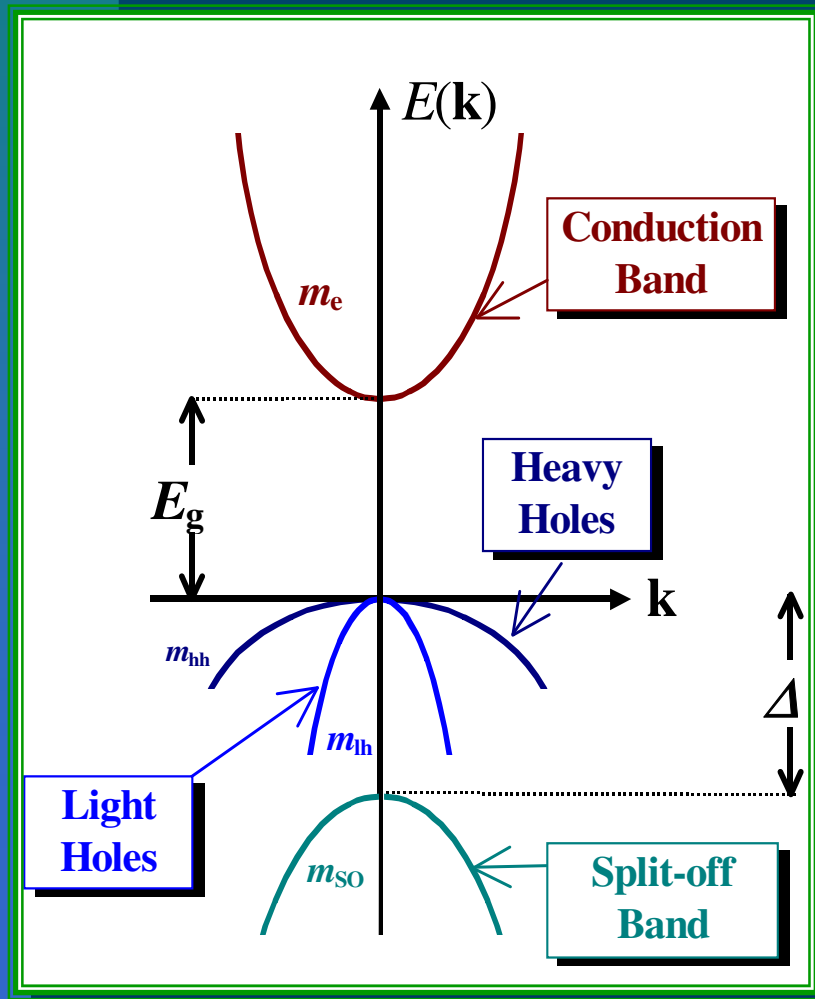
Estructura Electrónica: GaAs vs ZnSe



GaAs

ZnSe

Semiconductor Directo



- **Masa Efectiva:**

$$\frac{1}{m_e} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 E}{\partial k^2}$$

En un Cristal Ideal y Perfecto solo cambia la masa electrónica y el movimiento sigue siendo “libre”.

Propiedades Ópticas de Metales

- **Semiconductores y Metales.**
 - Definición y Estructura Electrónica.
- **Propiedades de Conducción Eléctrica.**
 - Modelo de Drude.
- **Propiedades Ópticas.**
 - Modelo de Drude-Lorentz.
 - Metal Ideal (sin pérdidas).
 - Metal “Ideal” con pérdidas.
 - Metales Reales
 - Oscilación de Plasma.
 - SPR: Películas y Nanopartículas.

Propiedades Ópticas de Metales

- Semiconductores y Metales.
 - Definición y Estructura Electrónica.
- **Propiedades de Conducción Eléctrica.**
 - **Modelo de Drude.**
- Propiedades Ópticas.
 - Modelo de Drude-Lorentz.
 - Metal Ideal (sin pérdidas).
 - Metal “Ideal” con pérdidas.
 - Metales Reales
 - Oscilación de Plasma.
 - SPR: Películas y Nanopartículas.

Teoría de Drude de los Metales

- Teoría clásica (1900) para Conductividad Eléctrica:

$$\langle \vec{\mathbf{F}} \rangle = -e \vec{\mathbf{E}} - \frac{m_e}{\tau} \vec{\mathbf{v}}$$

Fuerza media
sobre electrón
de carga $-e$

Fuerza impuesta
por un campo eléctrico \mathbf{E}

Fuerza Disipativa:

m_e : masa electrónica

\mathbf{v} : velocidad media

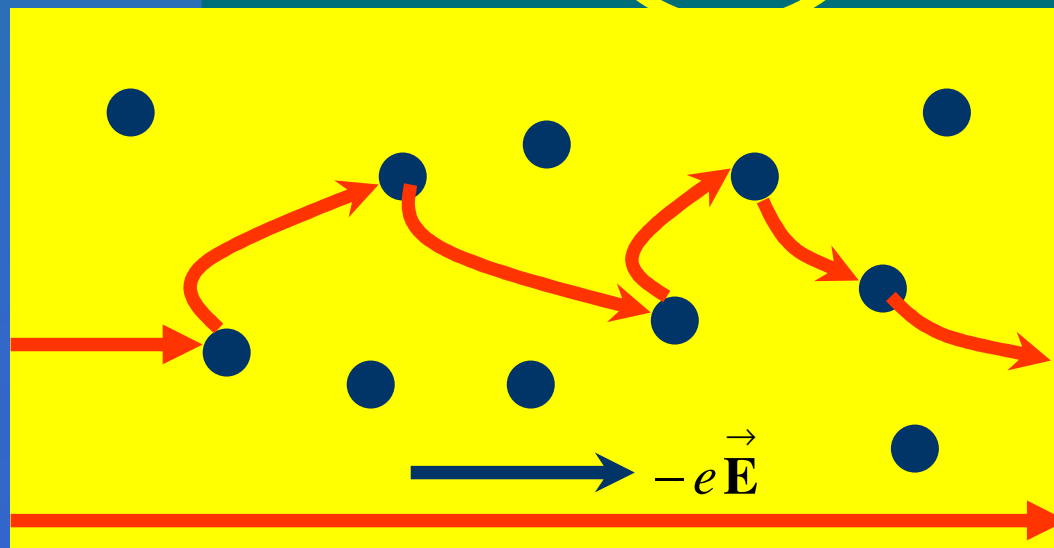
τ : Tiempo Característico

Teoría de Drude de los Metales

- Teoría clásica (1900) para Conductividad Eléctrica:

$$\langle \vec{\mathbf{F}} \rangle = -e \vec{\mathbf{E}} - \frac{m_e}{\tau} \vec{\mathbf{v}}$$

Fuerza Disipativa:



Material

Centros
de Colisión

Movimiento
Electrónico

Teoría de Drude de los Metales

- Teoría clásica (1900) para Conductividad Eléctrica:

$$\langle \vec{\mathbf{F}} \rangle = -e\vec{\mathbf{E}} - \frac{m_e}{\tau} \vec{\mathbf{v}} = 0$$



$$\vec{\mathbf{v}} = -\frac{e\tau}{m_e} \vec{\mathbf{E}}$$

Estacionario



$$\vec{\mathbf{J}} = -ne \vec{\mathbf{v}}$$

$$\vec{\mathbf{J}} = \sigma \vec{\mathbf{E}} \Rightarrow \sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{ne^2\tau}{m_e}$$

de corriente
Ley de Ohm
trica de electrones

Resistividad Eléctrica

$$\rho = \frac{m_e}{ne^2\tau} = \frac{1}{\sigma}$$

Resultado general más allá de la Teoría de Drude.

Teoría Semiclásica de Transporte de Boltzmann:

- Funciones de Distribución
- Sistema de Fuera de equilibrio
- τ : Tiempo de Relajación:

Describe las fuerzas que devuelven el sistema al equilibrio (ej: colisiones)

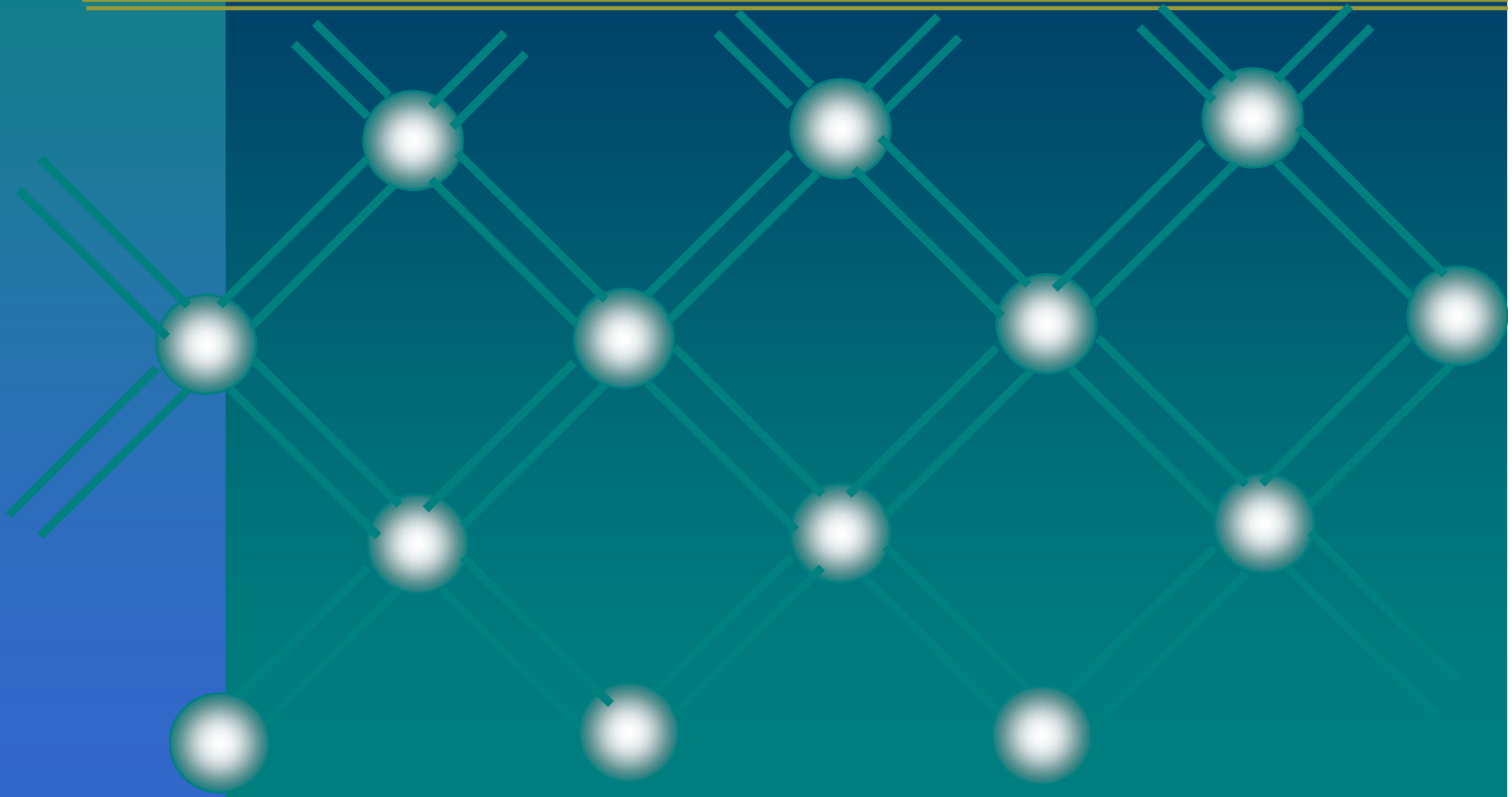
τ_1, τ_2 – Varios procesos:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2}$$

En metales (más importantes):

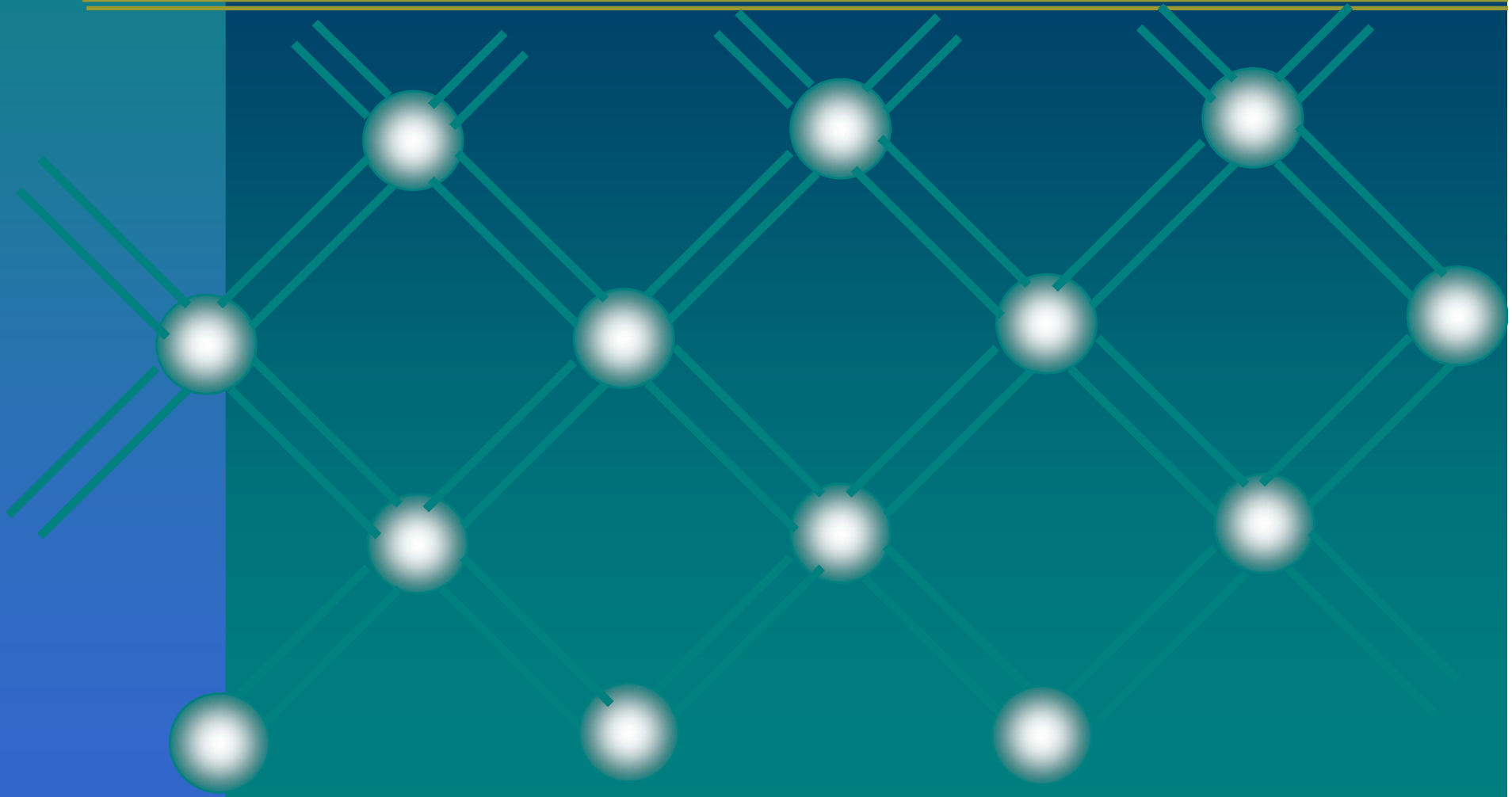
- 1) “Defectos” cristalinos.
- 2) “Fonones”: agitación térmica.

Defectos



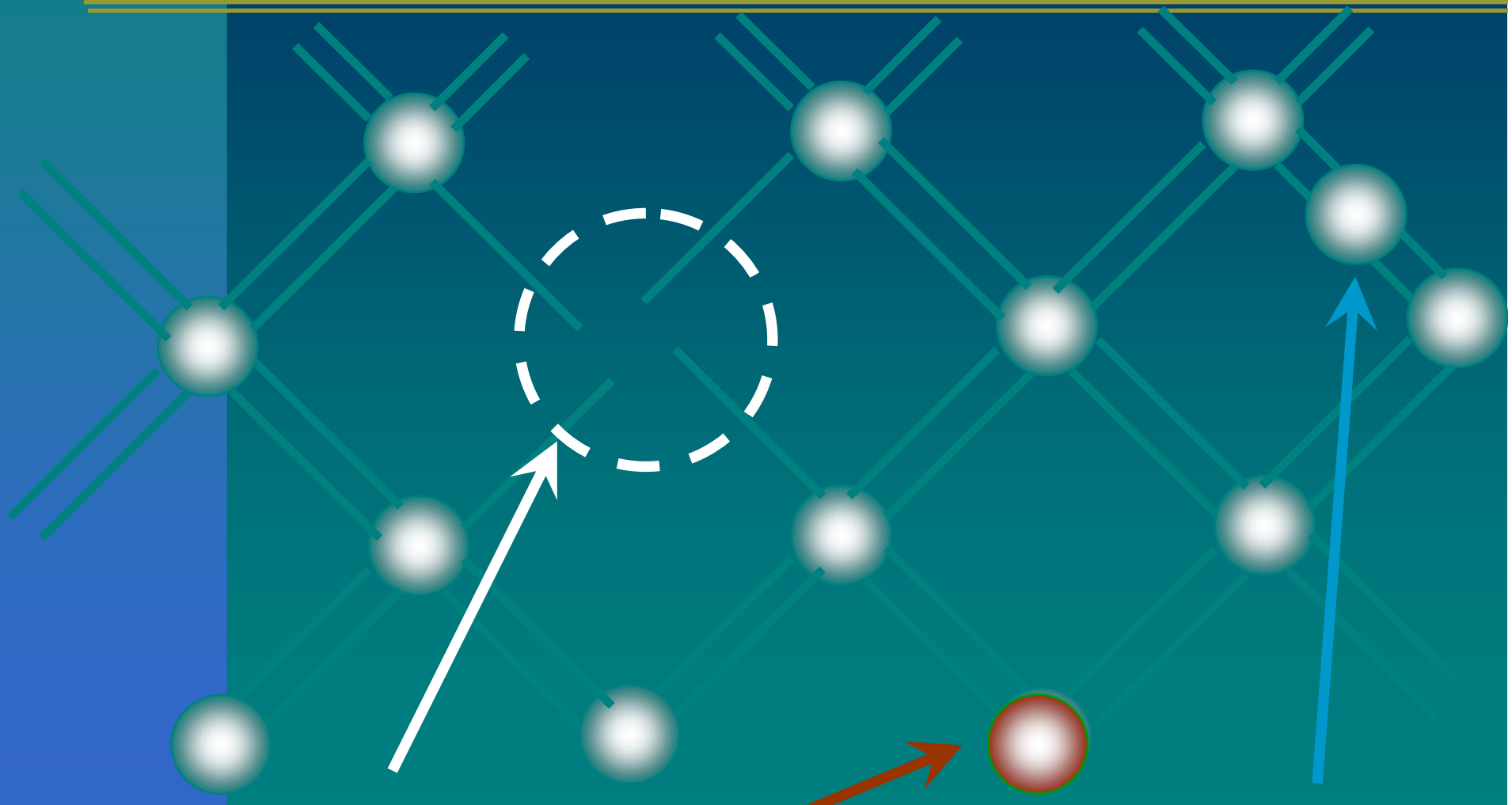
Para Drude: centros de colisión = núcleos atómicos

Defectos



En realidad: centros de colisión = Defectos.

Defectos

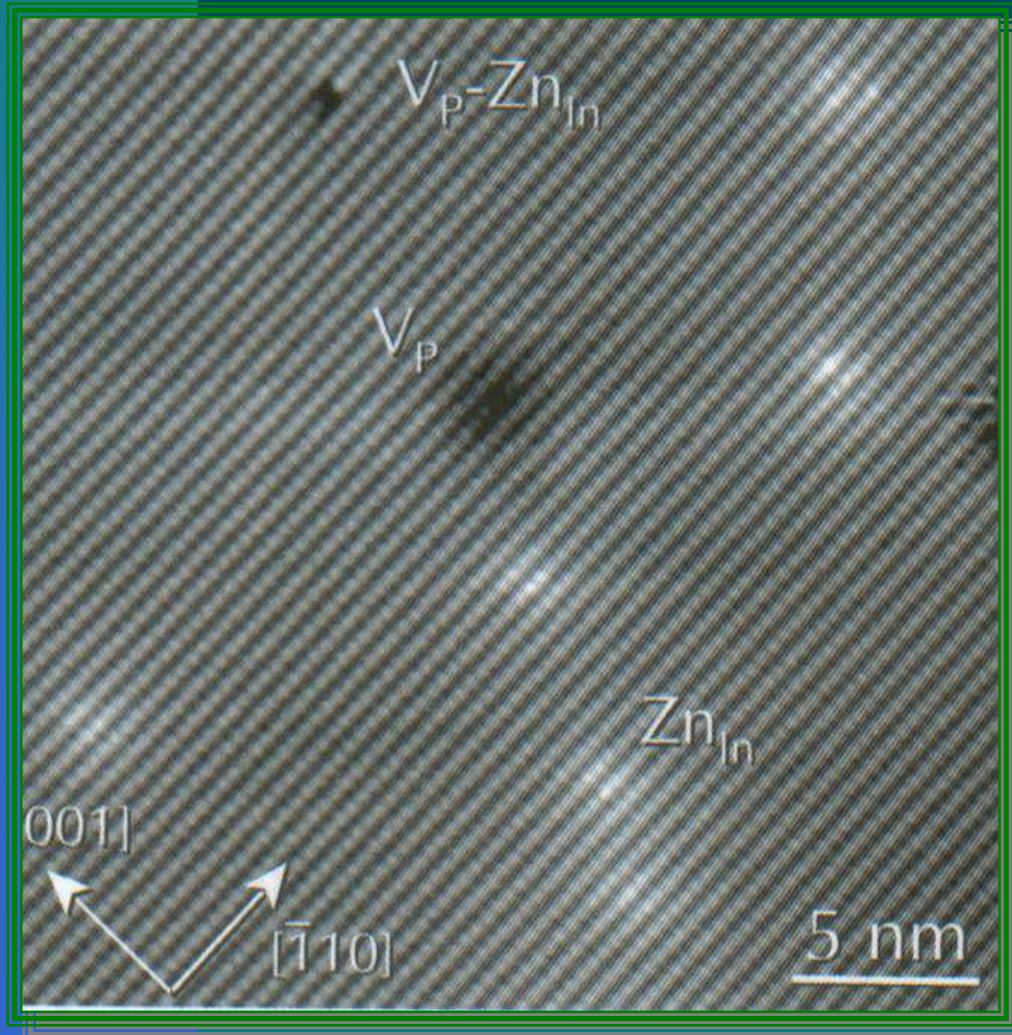


• Vacancias

• Impurezas

• Intersticiales

Defectos



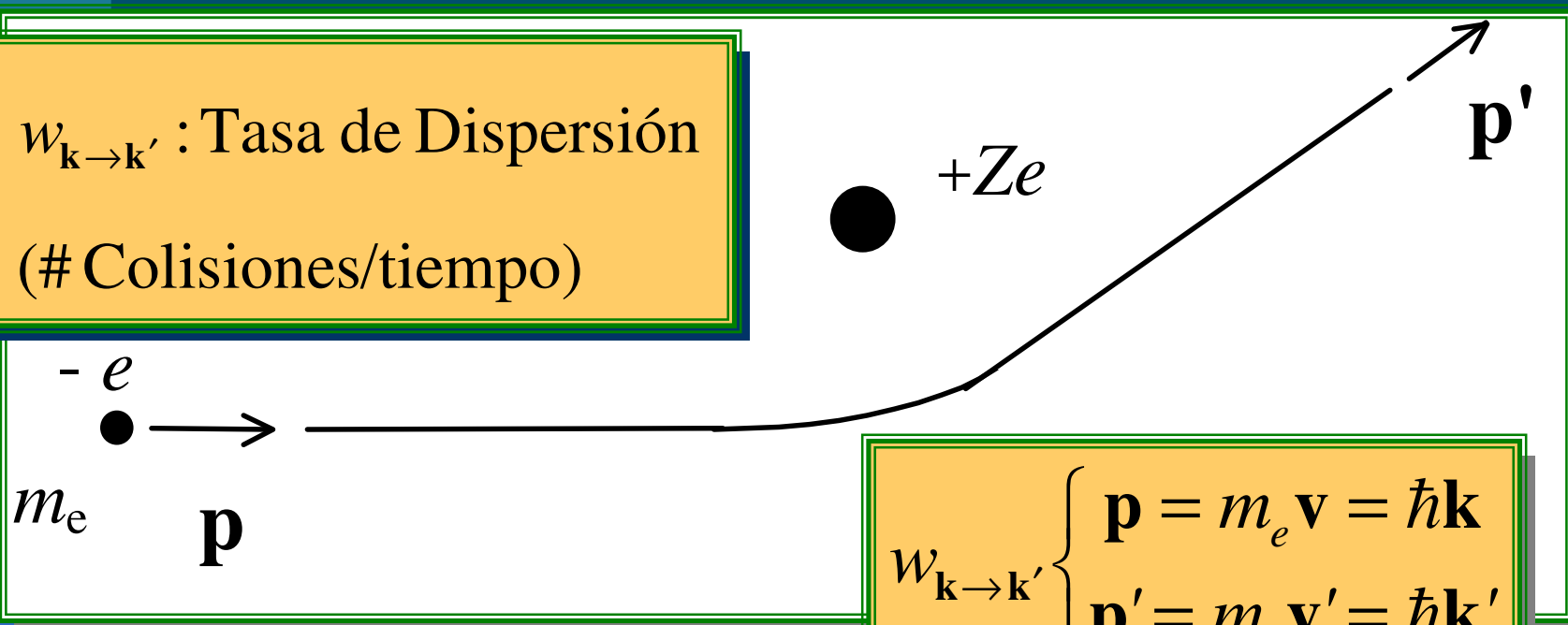
- P. Ebert, “Imaging defects and dopants”
Materials Today, June 2003, pag. 36.
- Imagen STM
- InP (110) con:
 - V_P : vacancia P.
 - Zn_{In} : Impureza Zn.
 - $V_{P-Zn_{In}}$: Complejos.

Ejemplo de Colisión:

Dispersión por Impureza

$\frac{1}{\tau} \Rightarrow w_{\mathbf{k} \rightarrow \mathbf{k}'}$: Tasa de Dispersión
(# Colisiones/tiempo)

$-e$
 m_e
 \mathbf{p}



$$w_{\mathbf{k} \rightarrow \mathbf{k}'} \begin{cases} \mathbf{p} = m_e \mathbf{v} = \hbar \mathbf{k} \\ \mathbf{p}' = m_e \mathbf{v}' = \hbar \mathbf{k}' \end{cases}$$

➤ Impureza Cargada.

➤ Impureza Neutra.

➤ Dispersión Elástica.

➤ Dispersión Inelástica.

Regla de Mathiesen

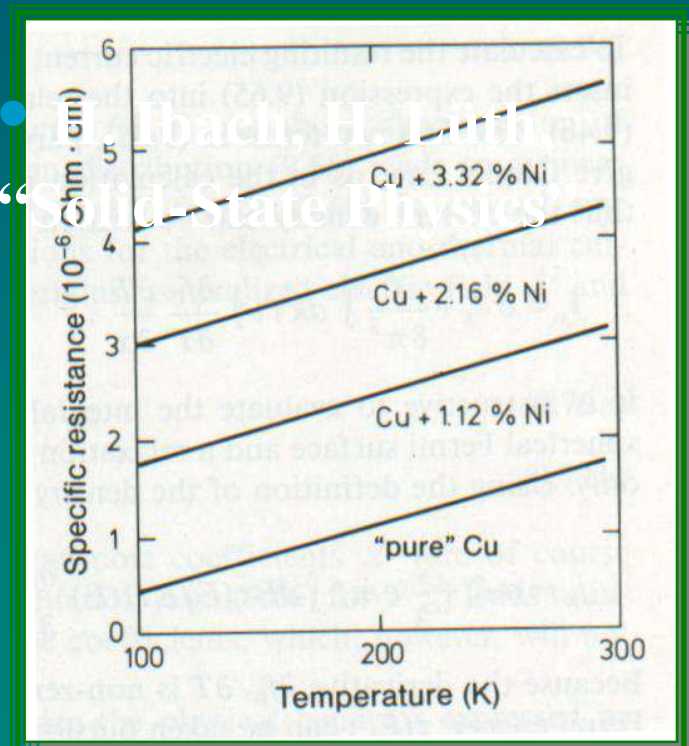
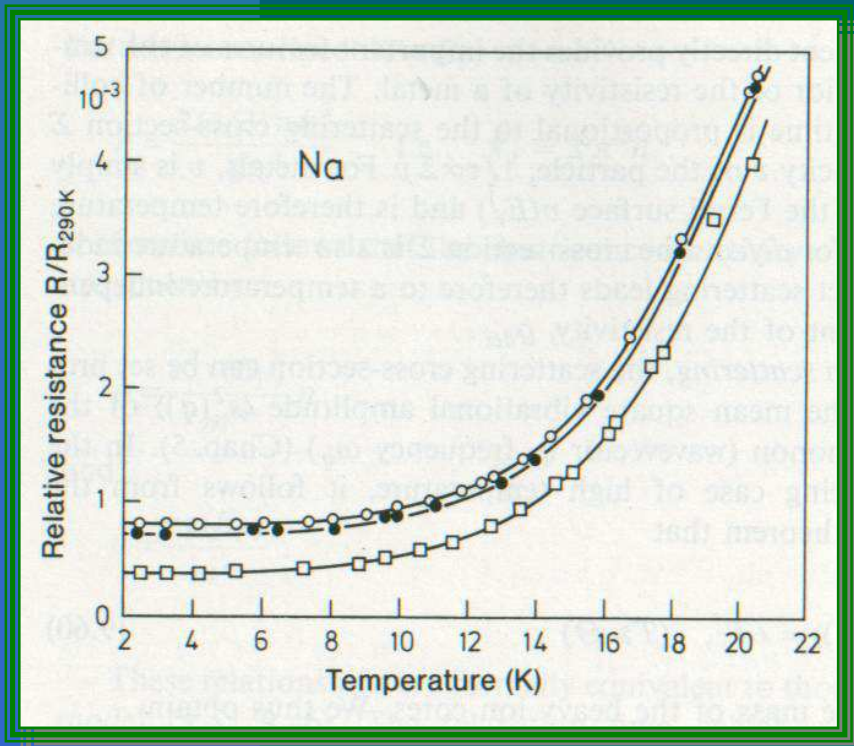
$$\rho \approx \rho_{\text{defectos}} + \rho_{\text{fonones}}(T)$$

$$\frac{1}{\tau} \approx \frac{1}{\tau_{\text{defectos}}} + \frac{1}{\tau_{\text{fonones}}}$$

- sección eficaz de dispersión
- velocidad (constante en metales)
- # centros de colisión = # defectos
- Temperatura T

Regla de Mathiesen

$$\rho \approx \rho_{\text{defectos}} + \rho_{\text{fonones}}(T)$$



• Ibach, H. Luth, "Solid-State Physics"

Regla de Mathiesen

$$\rho \approx \rho_{\text{defectos}} + \rho_{\text{fonones}}(T)$$

- **Coeficiente de Resistividad:**

$$r = \frac{\rho(300\text{K})}{\rho(0\text{K})}$$

Mide Pureza y Calidad del Cristal:

$r \sim 10^6$: Calidad Ultra Alta

$r \sim 1,1$: Aleaciones

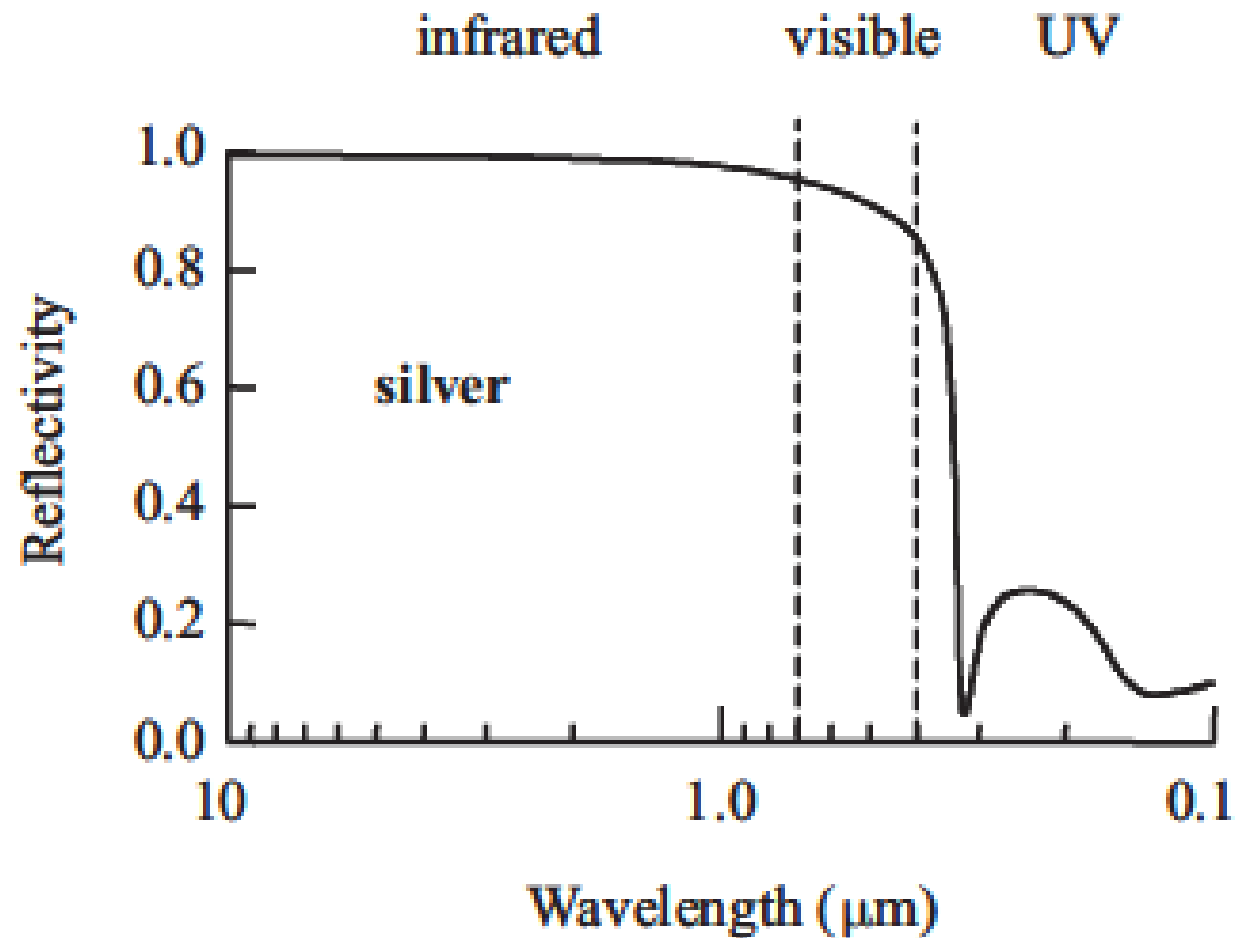
Propiedades Ópticas de Metales

- Semiconductores y Metales.
 - Definición y Estructura Electrónica.
- **Propiedades de Conducción Eléctrica.**
 - **Modelo de Drude.**
- Propiedades Ópticas.
 - Modelo de Drude-Lorentz.
 - Metal Ideal (sin pérdidas).
 - Metal “Ideal” con pérdidas.
 - Metales Reales
 - Oscilación de Plasma.
 - SPR: Películas y Nanopartículas.

Propiedades Ópticas de Metales

- Semiconductores y Metales.
 - Definición y Estructura Electrónica.
- Propiedades de Conducción Eléctrica.
 - Modelo de Drude.
- **Propiedades Ópticas.**
 - **Modelo de Drude-Lorentz.**
 - Metal Ideal (sin pérdidas).
 - Metal “Ideal” con pérdidas.
 - Metales Reales
 - Oscilación de Plasma.
 - SPR: Películas y Nanopartículas.

Propiedades Ópticas de Metales



Propiedades Ópticas de Metales

- Teoría de Drude – Lorentz:

$$\langle \vec{\mathbf{F}} \rangle = -e \vec{\mathbf{E}} + i\omega \frac{m_e}{\tau} \vec{\mathbf{r}} = -\omega^2 m_e \vec{\mathbf{r}}$$

$$\vec{\mathbf{E}} = \vec{\mathbf{E}}_0 \exp(-i\omega t)$$

$$\dot{\vec{\mathbf{v}}} = \dot{\vec{\mathbf{r}}} = -i\omega \vec{\mathbf{r}}$$

$$\vec{\mathbf{r}} = \vec{\mathbf{r}}_0 \exp(-i\omega t)$$

$$\dot{\vec{\mathbf{a}}} = \dot{\vec{\mathbf{v}}} = -i\omega \vec{\mathbf{v}} = -\omega^2 \vec{\mathbf{r}}$$



ética.
torio,

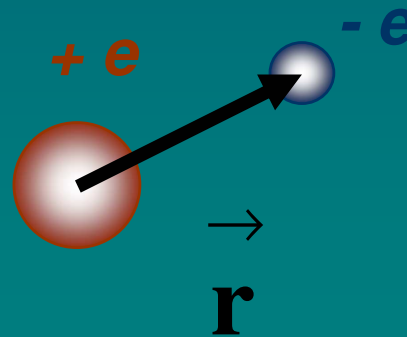
/T.

Propiedades Ópticas de Metales

- Teoría de Drude – Lorentz:

$$\langle \vec{\mathbf{F}} \rangle = -e \vec{\mathbf{E}} + i\omega \frac{m_e}{\tau} \vec{\mathbf{r}} = -\omega^2 m_e \vec{\mathbf{r}}$$

$$\vec{\mathbf{r}} = \frac{e \vec{\mathbf{E}}}{m_e \omega \left(\omega + \frac{i}{\tau} \right)}$$



$$\vec{\mathbf{P}} = -en \vec{\mathbf{r}}$$

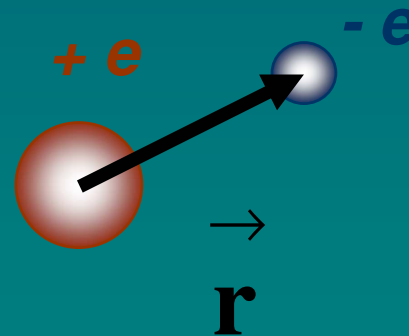
P: Polarización
Eléctrica

Propiedades Ópticas de Metales

- Teoría de Drude – Lorentz:

$$\vec{\mathbf{P}} = -\frac{e^2 n}{m_e} \frac{\vec{\mathbf{E}}}{\omega(\omega + i/\tau)}$$

$$\vec{\mathbf{r}} = \frac{e \vec{\mathbf{E}}}{m_e \omega(\omega + i/\tau)}$$



$$\vec{\mathbf{P}} = -en \vec{\mathbf{r}}$$

P: Polarización Eléctrica

Propiedades Ópticas de Metales

- Teoría de Drude – Lorentz:

$$\vec{\mathbf{P}} = -\frac{e^2 n}{m_e} \frac{\vec{\mathbf{E}}}{\omega\left(\omega + \frac{i}{\tau}\right)}$$

$$\vec{\mathbf{D}} = \epsilon_0 \vec{\mathbf{E}} + \vec{\mathbf{P}}$$

$$\eta^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega\left(\omega + \frac{i}{\tau}\right)}$$

$$\omega_p^2 = \frac{e^2 n}{\epsilon_0 m_e}$$

$$\vec{\mathbf{D}} = \epsilon \vec{\mathbf{E}}$$

$$\eta^2 = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

ϵ : Permitividad
 η : índice de refracción
 (Material)

Propiedades Ópticas de Metales

- Semiconductores y Metales.
 - Definición y Estructura Electrónica.
- Propiedades de Conducción Eléctrica.
 - Modelo de Drude.
- **Propiedades Ópticas.**
 - **Modelo de Drude-Lorentz.**
 - Metal Ideal (sin pérdidas).
 - Metal “Ideal” con pérdidas.
 - Metales Reales
 - Oscilación de Plasma.
 - SPR: Películas y Nanopartículas.

Propiedades Ópticas de Metales

- Semiconductores y Metales.
 - Definición y Estructura Electrónica.
- Propiedades de Conducción Eléctrica.
 - Modelo de Drude.
- **Propiedades Ópticas.**
 - Modelo de Drude-Lorentz.
 - **Metal Ideal (sin pérdidas).**
 - Metal “Ideal” con pérdidas.
 - Metales Reales
 - Oscilación de Plasma.
 - SPR: Películas y Nanopartículas.

Propiedades Ópticas de Metales

Conductor Ideal : $\frac{1}{\tau} = 0$

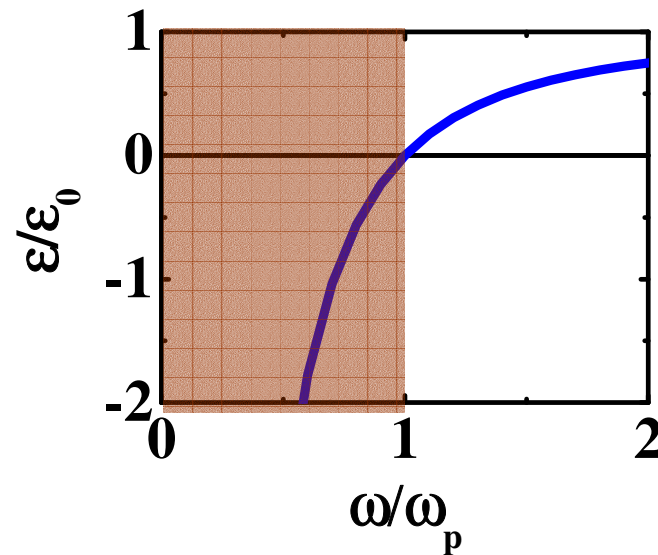
$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = 1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^2$$

$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \eta^2 \rightarrow$ Permitividad Relativa

$\eta = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} \rightarrow$ Índice de Refracción

$\omega_p \rightarrow$ Frecuencia de Plasma

$\omega = \frac{2\pi}{T} \rightarrow$ Frecuencia Óptica



- $\epsilon > 0$: Caso normal.
- $\epsilon < 0$: No hay propagación.

Propiedades Ópticas de Metales

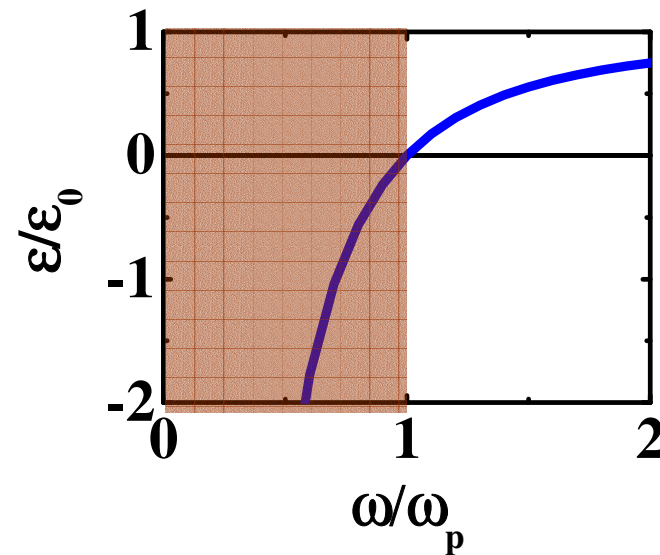
$$v = \frac{c}{\eta} = \frac{\omega}{k}$$

Velocidad de la luz :

$v \rightarrow$ en el medio,

$c \rightarrow$ en el vacío,

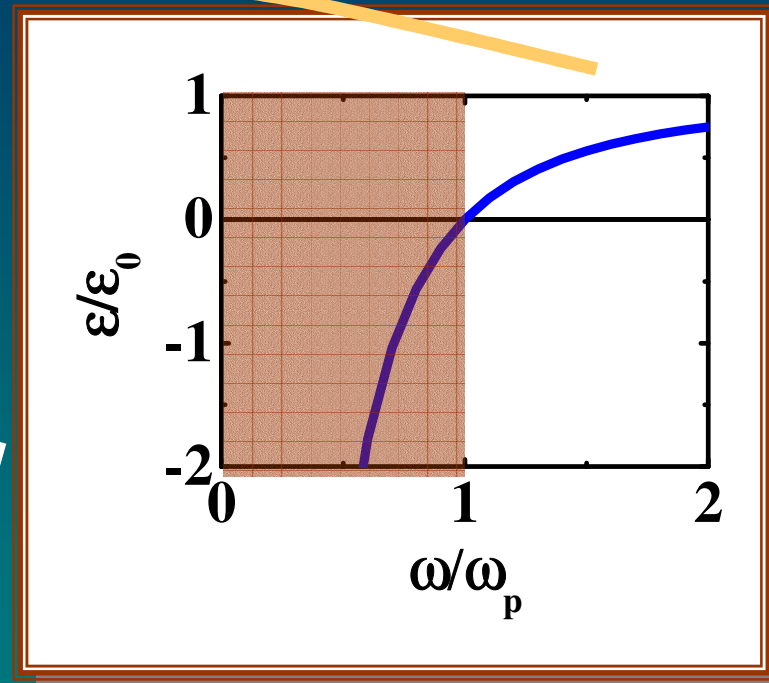
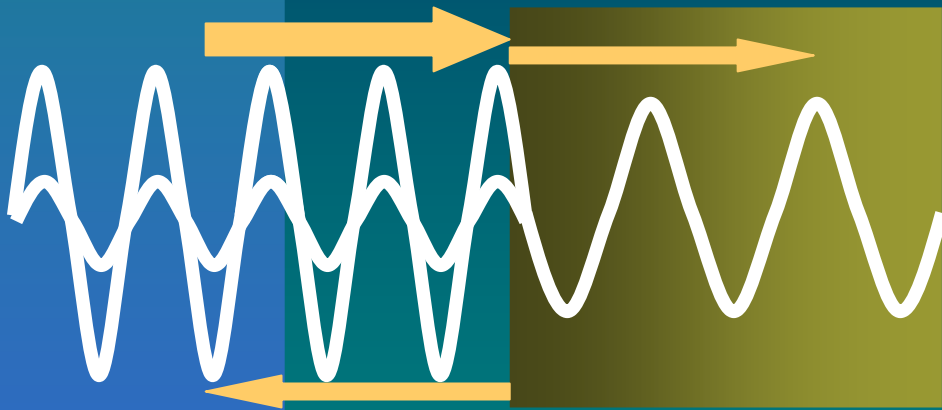
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \rightarrow \text{Número de Onda}$$



$$\exp[i(kx - \omega t)] = \exp\left[i\omega\left(\eta\frac{x}{c} - t\right)\right]$$

Propiedades Ópticas de Metales

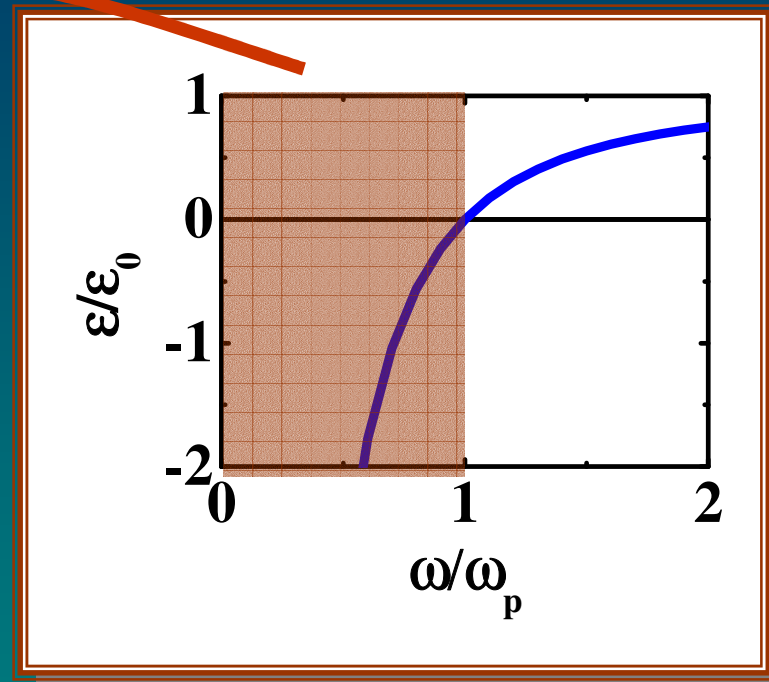
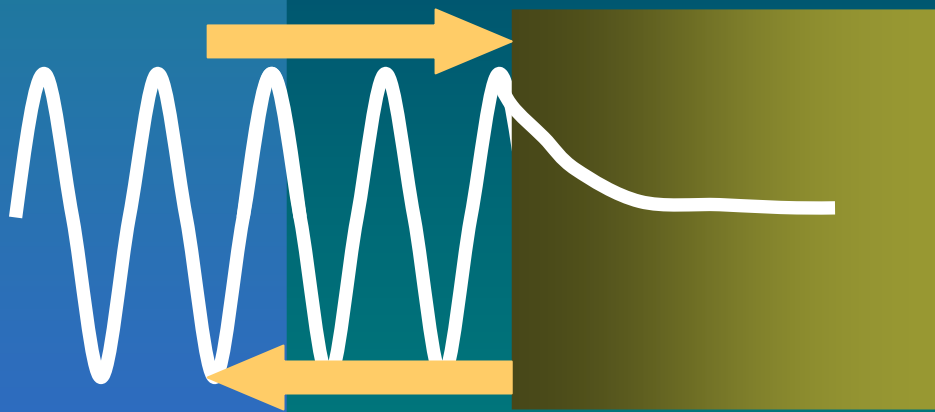
Caso Normal: $\epsilon > 0 \Rightarrow \eta \in \# \text{ real}$



$$\exp[i(kx - \omega t)] = \exp\left[i\omega\left(\eta\frac{x}{c} - t\right)\right]$$

Propiedades Ópticas de Metales

$\epsilon < 0 \Rightarrow \eta = i|\eta| \in \# \text{ imaginarios}$

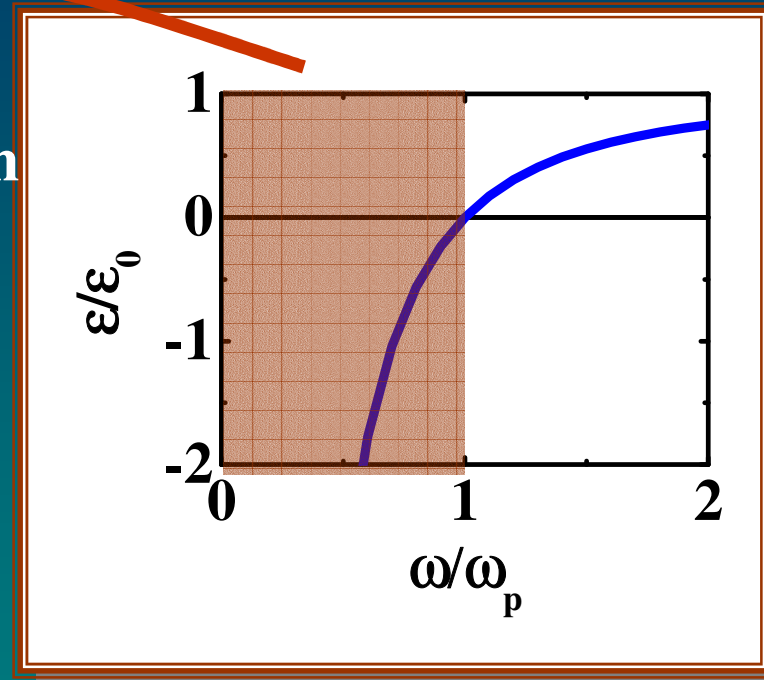


$$\exp[i(kx - \omega t)] = \exp\left[i\omega\left(\eta\frac{x}{c} - t\right)\right] = \exp\left[-\omega|\eta|\frac{x}{c} - i\omega t\right]$$

Propiedades Ópticas de Metales

$\epsilon < 0 \Rightarrow \omega < \omega_p$ no hay propagación

$$\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 n}{\epsilon_0 m_e}}$$



Metal	Electron effective mass	Electron density	Plasma frequency
	m_{eff}/m_0	n [1/m ³]	ω_p [eV]
Ag	1.1	5.86×10^{28}	8.58
Cu	1.3	8.47×10^{28}	9.48
Au	1.1	5.9×10^{28}	8.60



Corresponden al UV:

$$\hbar\omega_p = 8 \text{ eV} \rightarrow \lambda_0 = 155 \text{ nm}$$

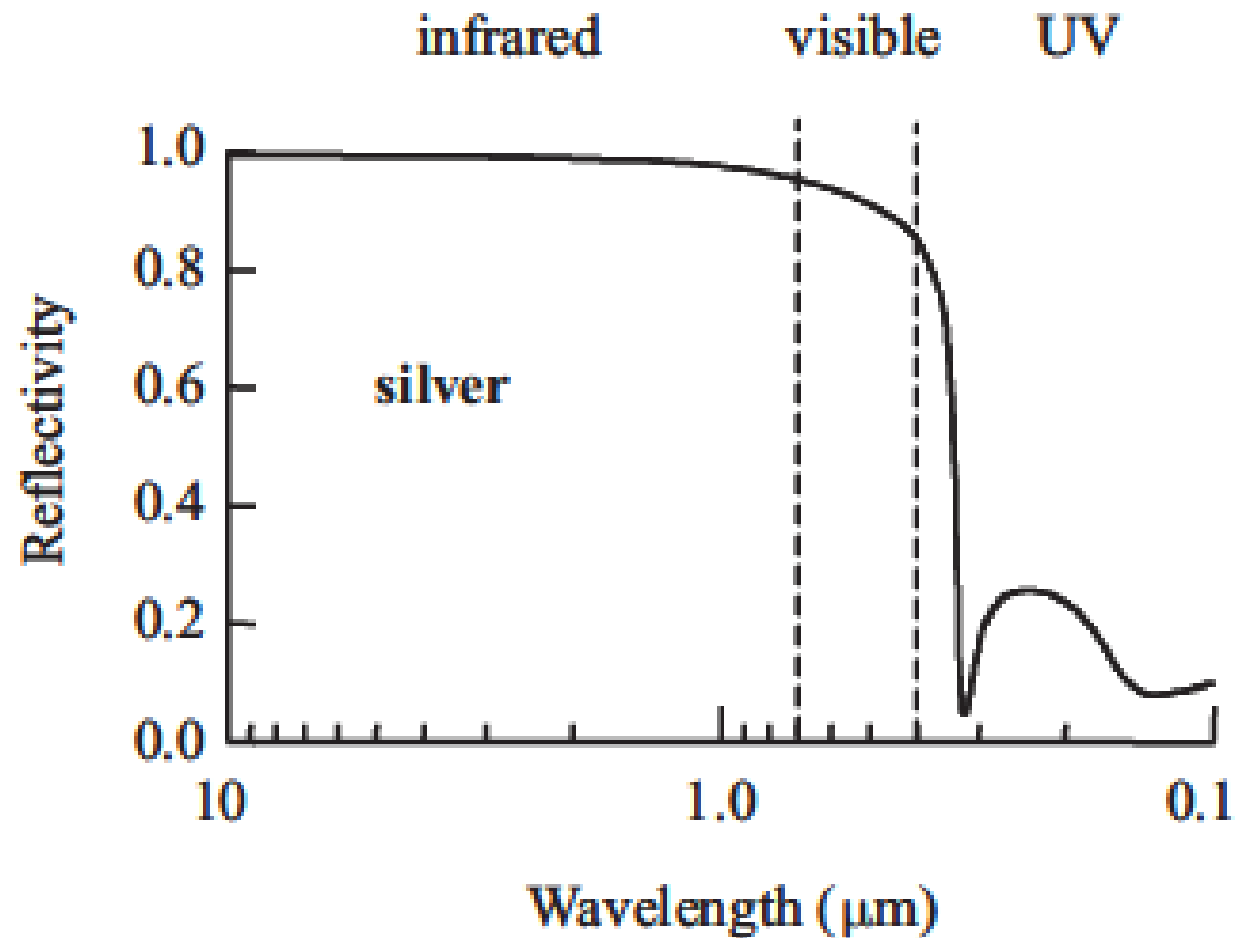
“No es oro todo lo que brilla”



<i>Metal</i>	Electron effective mass	Electron density	Plasma frequency
	m_{eff}/m_0	n [1/m ³]	ω_p [eV]
Ag	1.1	5.86×10^{28}	8.58
Cu	1.3	8.47×10^{28}	9.48
Au	1.1	5.9×10^{28}	8.60



Propiedades Ópticas de Metales



Reflectancia de la Plata

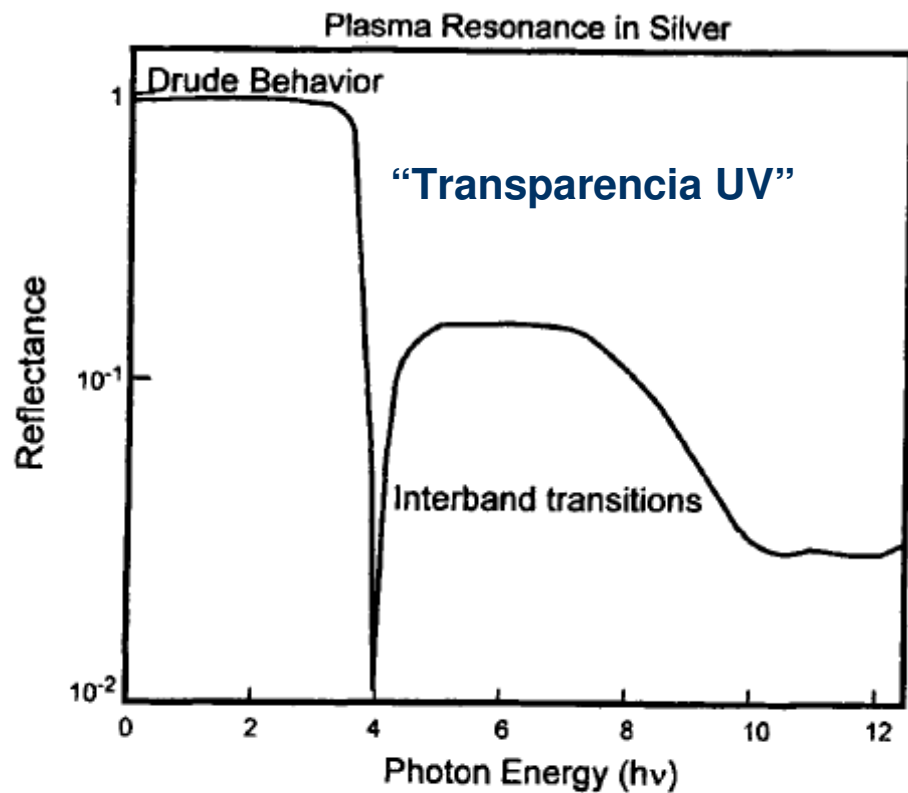
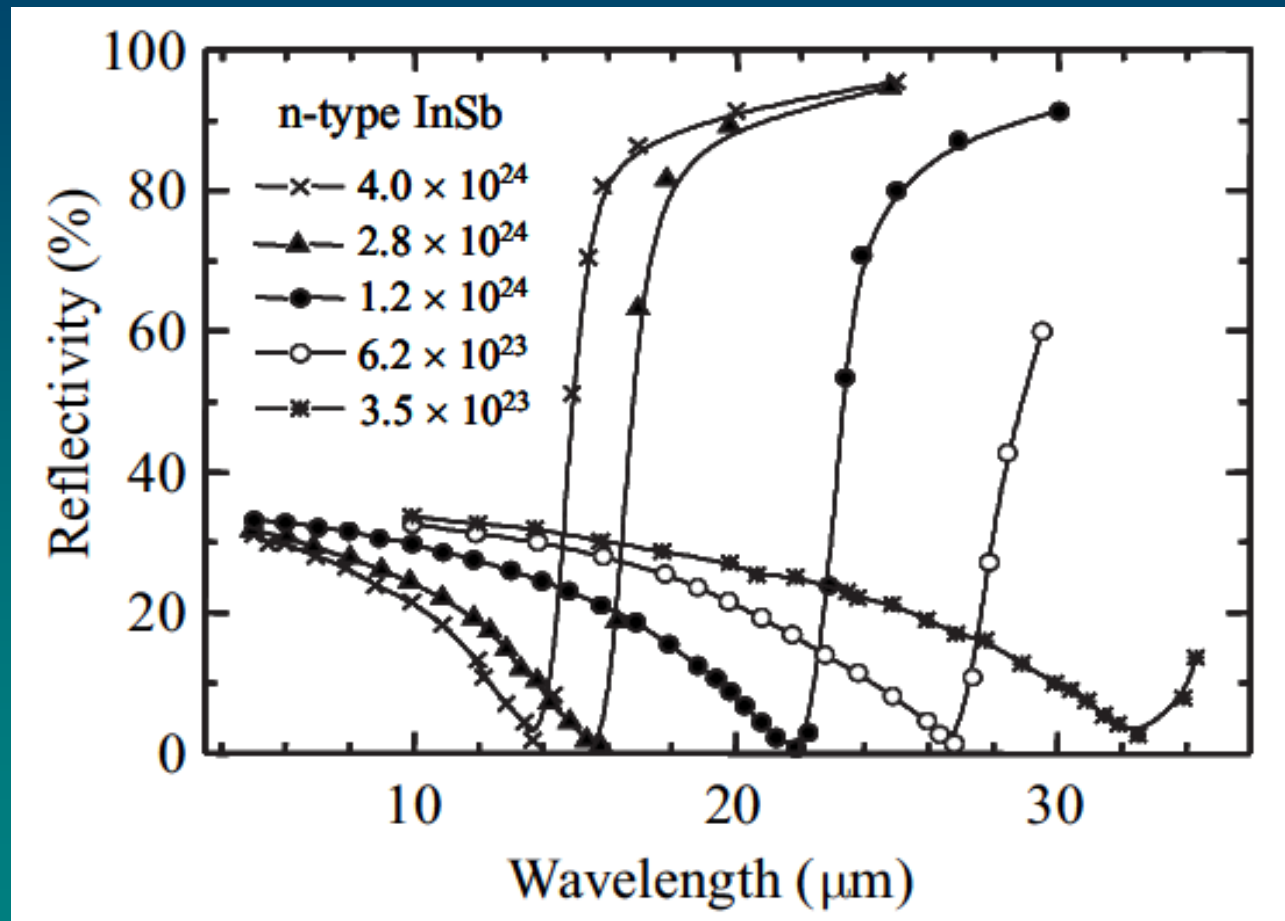


Figure 2.3: Reflectivity of silver showing Drude-like behavior in the IR and visible (from Irani, Huen, and Wooten 1971).

Reflectancia IR de Semiconductores



Propiedades Ópticas de Metales

- Semiconductores y Metales.
 - Definición y Estructura Electrónica.
- Propiedades de Conducción Eléctrica.
 - Modelo de Drude.
- **Propiedades Ópticas.**
 - Modelo de Drude-Lorentz.
 - **Metal Ideal (sin pérdidas).**
 - Metal “Ideal” con pérdidas.
 - Metales Reales
 - Oscilación de Plasma.
 - SPR: Películas y Nanopartículas.

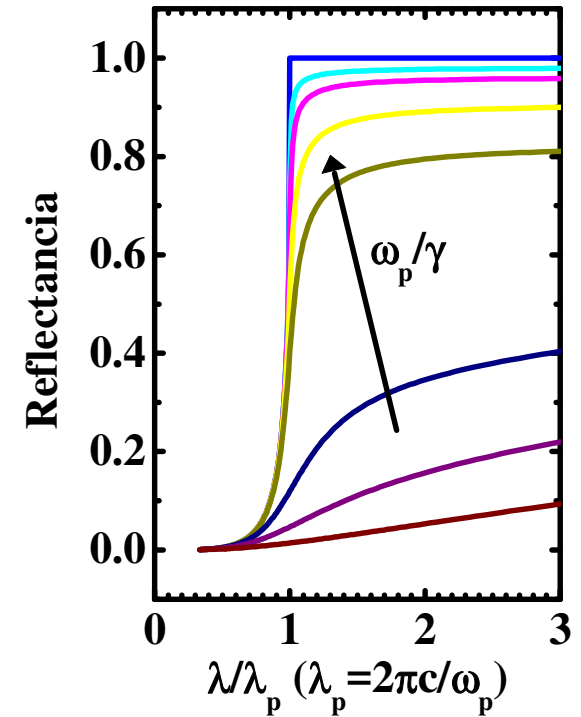
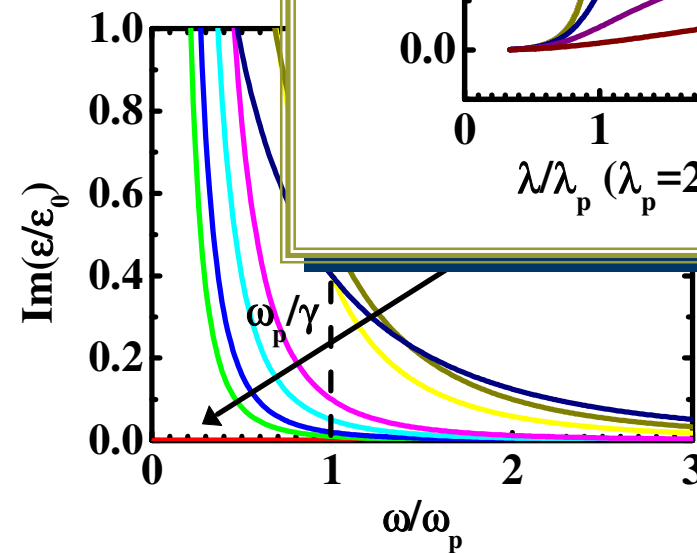
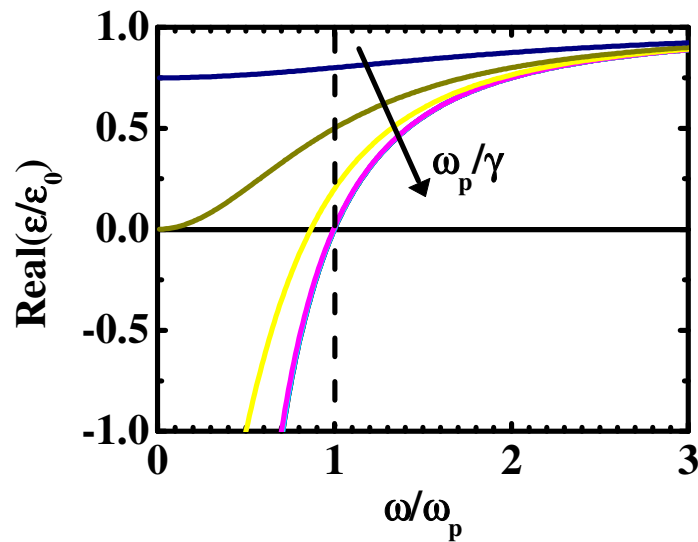
Propiedades Ópticas de Metales

- Semiconductores y Metales.
 - Definición y Estructura Electrónica.
- Propiedades de Conducción Eléctrica.
 - Modelo de Drude.
- **Propiedades Ópticas.**
 - Modelo de Drude-Lorentz.
 - Metal Ideal (sin pérdidas).
 - **Metal “Ideal” con pérdidas.**
 - Metales Reales
 - Oscilación de Plasma.
 - SPR: Películas y Nanopartículas.

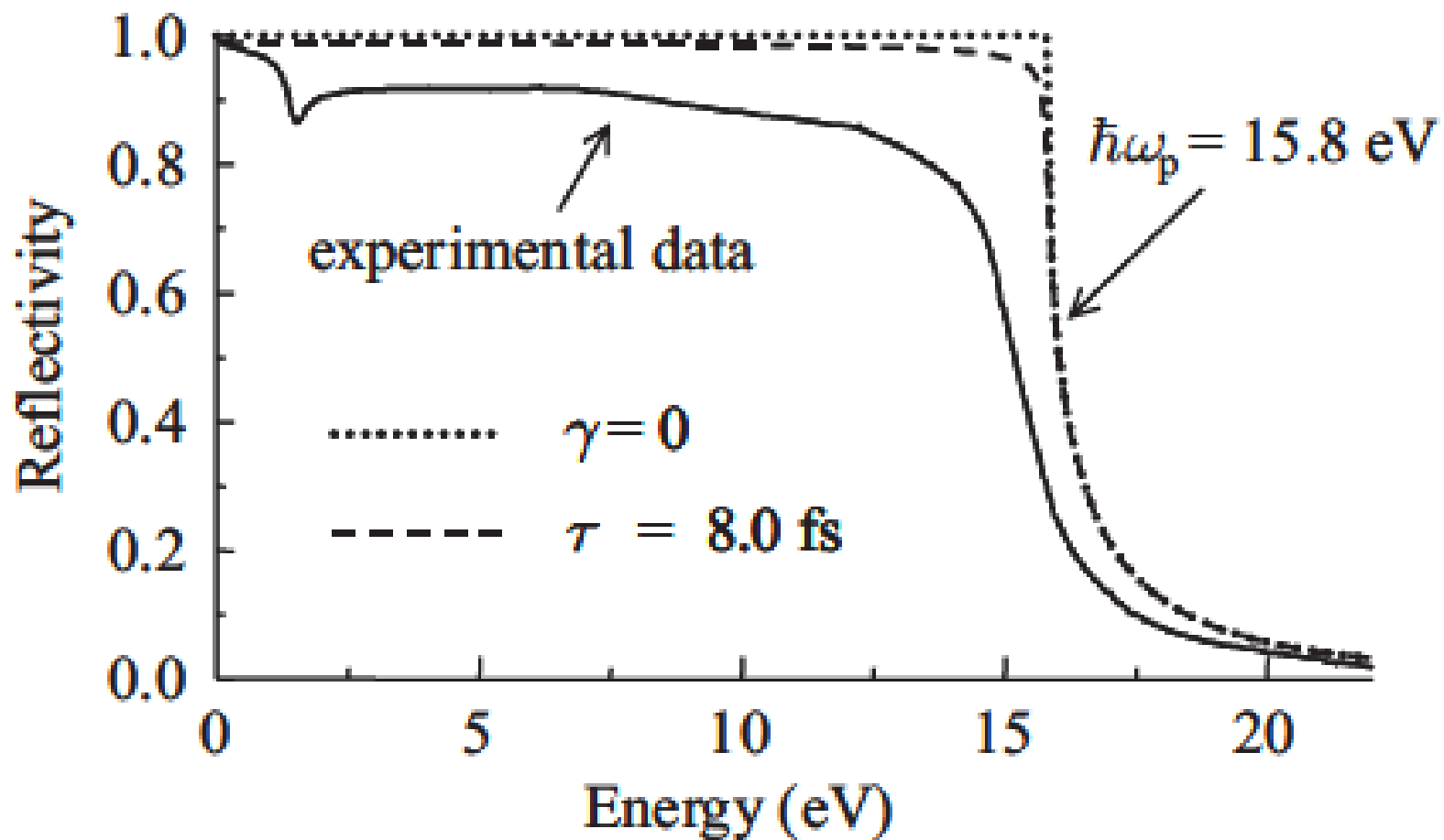
Influencia de las “Pérdidas”

Metal “ideal” con
pérdidas:
 $\gamma \neq 0$ (o eq. $\tau \neq \infty$)

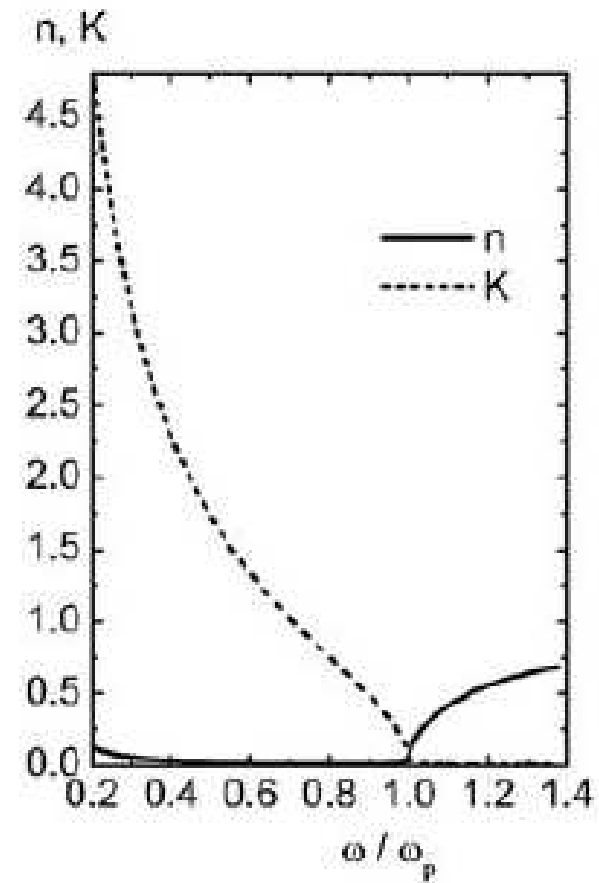
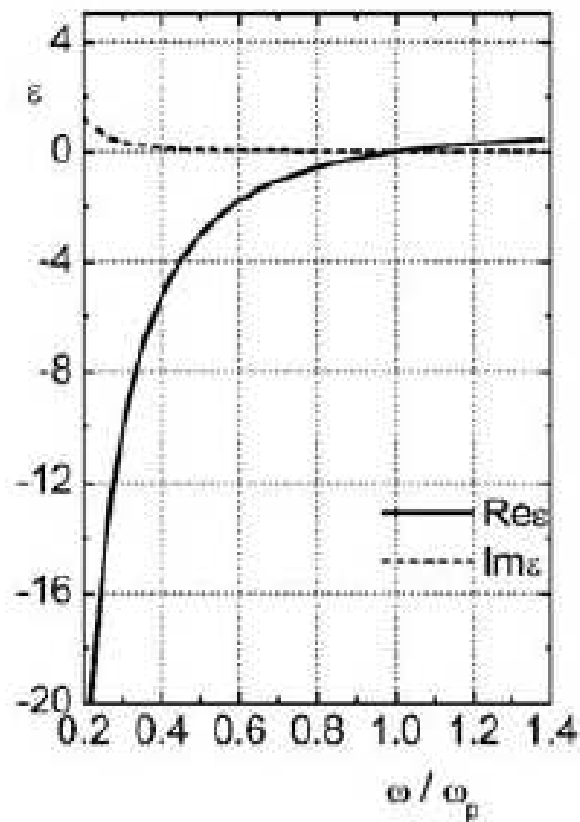
$$\epsilon_{eff} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)}$$



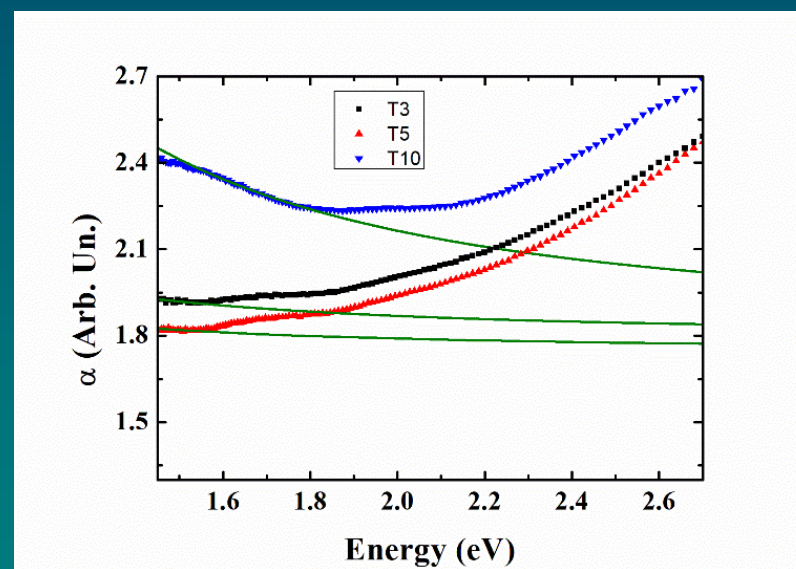
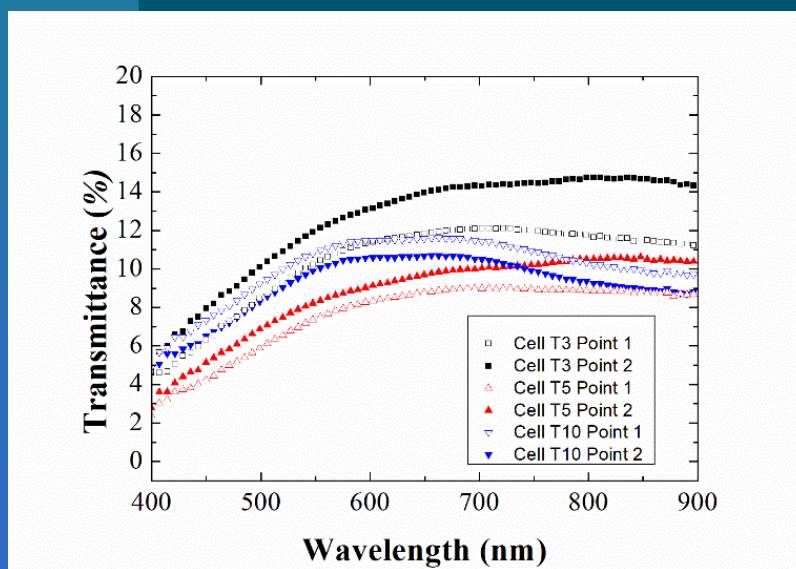
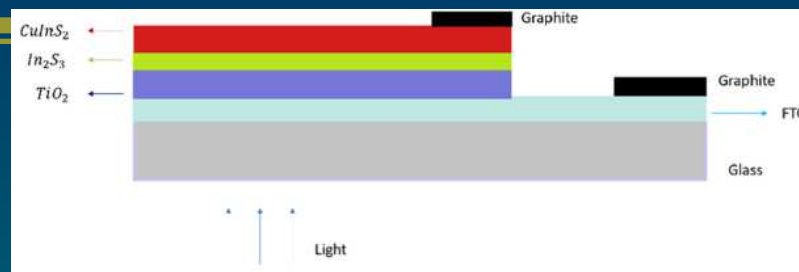
Reflectancia del Aluminio



Influencia de las “Pérdidas”



Absorción de Portadores Libres



Materials Chemistry and Physics 282 (2022) 125871

Charge dynamics in CuInS₂ photovoltaic devices with In₂S₃ as buffer layer

Enzo L. Spera, Carlos J. Pereyra, Yesica Di Iorio, Mariana Berruet, Marcela Vazquez, Ricardo E. Marotti

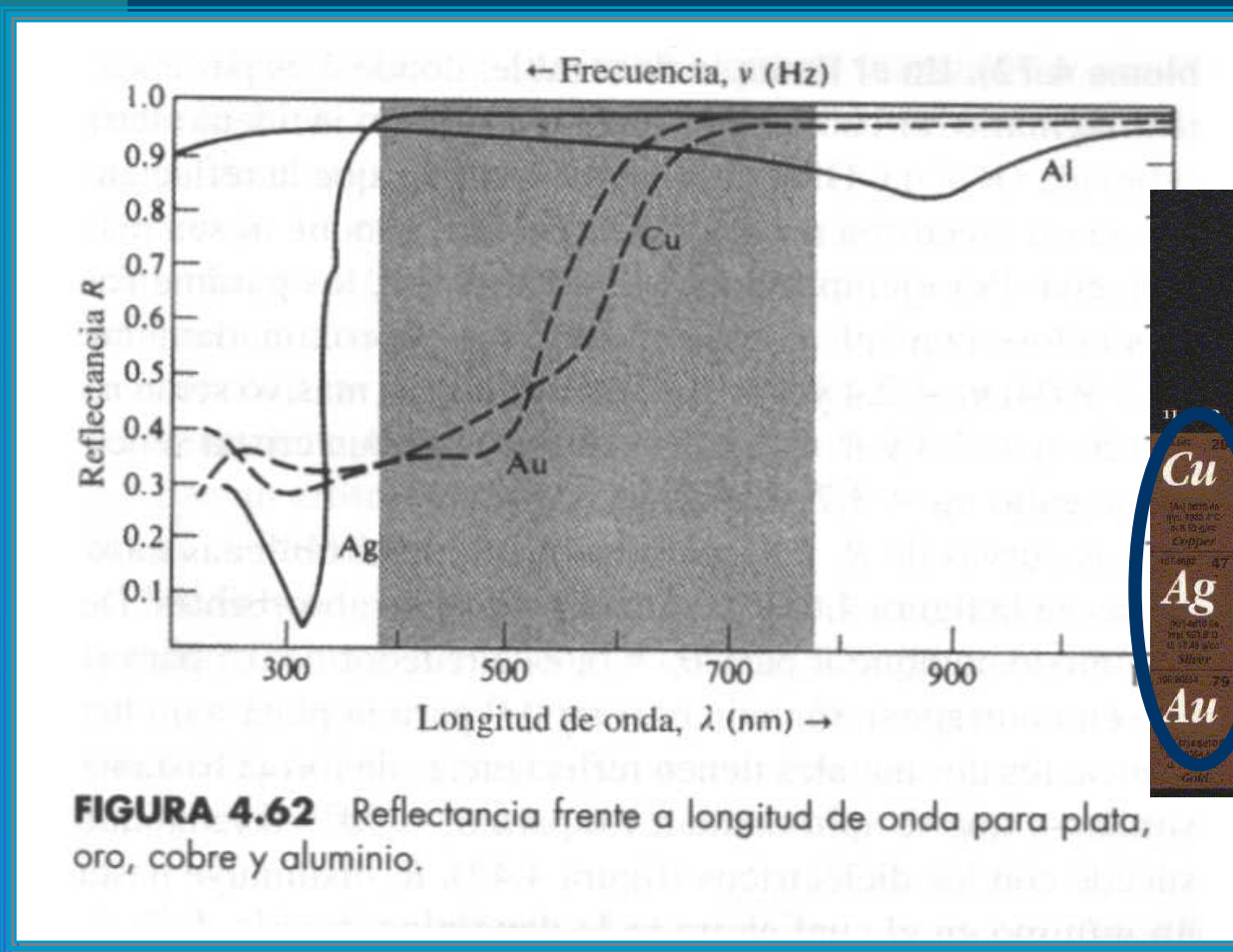
Propiedades Ópticas de Metales

- Semiconductores y Metales.
 - Definición y Estructura Electrónica.
- Propiedades de Conducción Eléctrica.
 - Modelo de Drude.
- **Propiedades Ópticas.**
 - Modelo de Drude-Lorentz.
 - Metal Ideal (sin pérdidas).
 - **Metal “Ideal” con pérdidas.**
 - Metales Reales
 - Oscilación de Plasma.
 - SPR: Películas y Nanopartículas.

Propiedades Ópticas de Metales

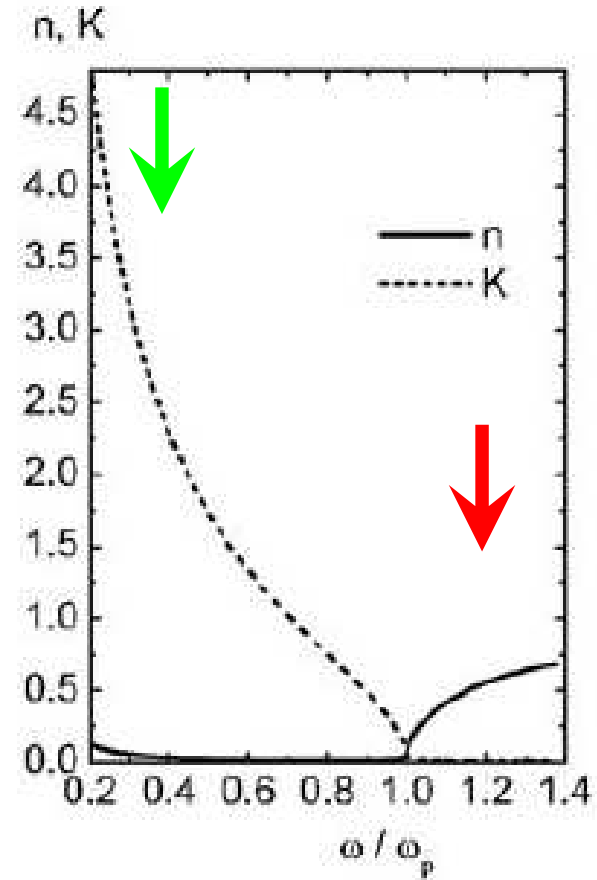
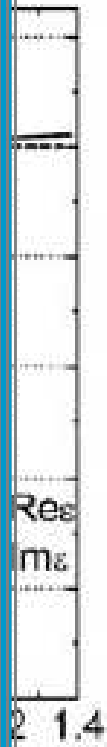
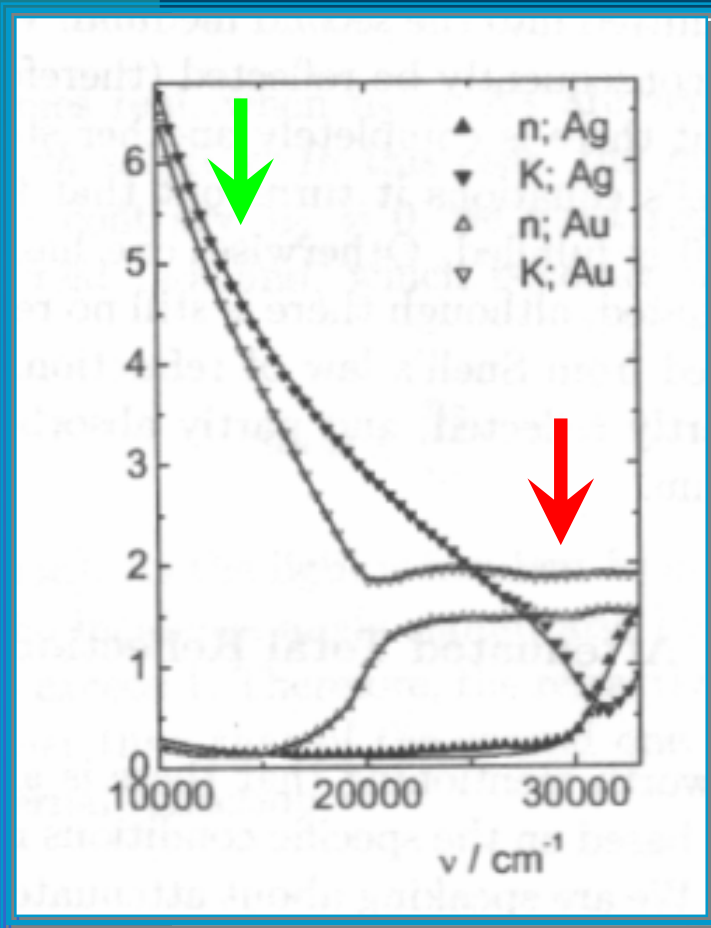
- Semiconductores y Metales.
 - Definición y Estructura Electrónica.
- Propiedades de Conducción Eléctrica.
 - Modelo de Drude.
- **Propiedades Ópticas.**
 - Modelo de Drude-Lorentz.
 - Metal Ideal (sin pérdidas).
 - Metal “Ideal” con pérdidas.
 - **Metales Reales**
 - Oscilación de Plasma.
 - SPR: Películas y Nanopartículas.

Reflectancia Metales Reales



	5	6	7	8	
	B	C	N	O	
	Al	Si	P	S	
Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se
Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te
Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po

Constantes Ópticas Metales Reales



Ag: OK

Au: OK en IR, No visible

Reflectancia Metales Reales

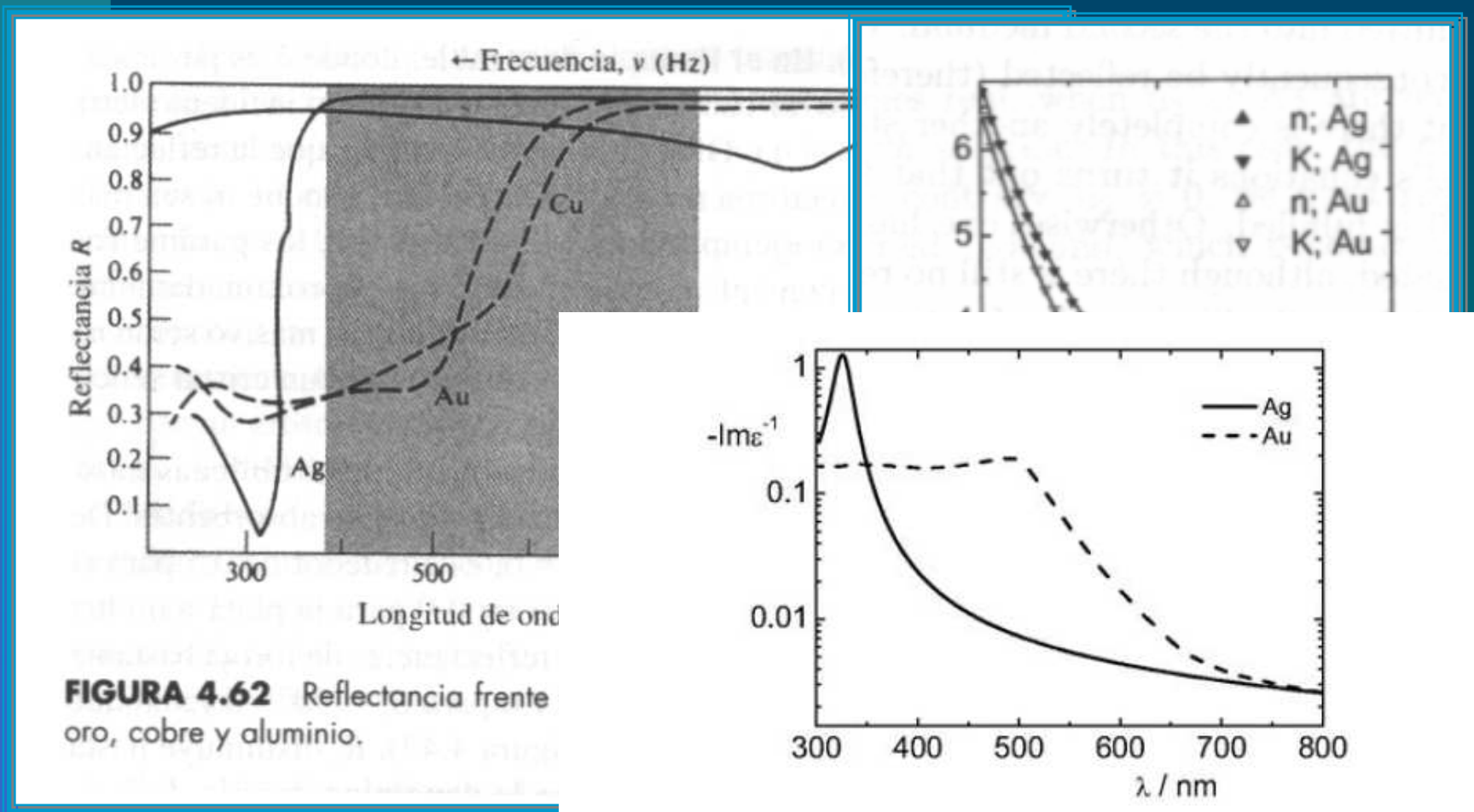


FIGURA 4.62 Reflectancia frente oro, cobre y aluminio.

Fig. 6.8. Calculated dielectric loss function of silver and gold

Transiciones Electrónicas en Metales Reales

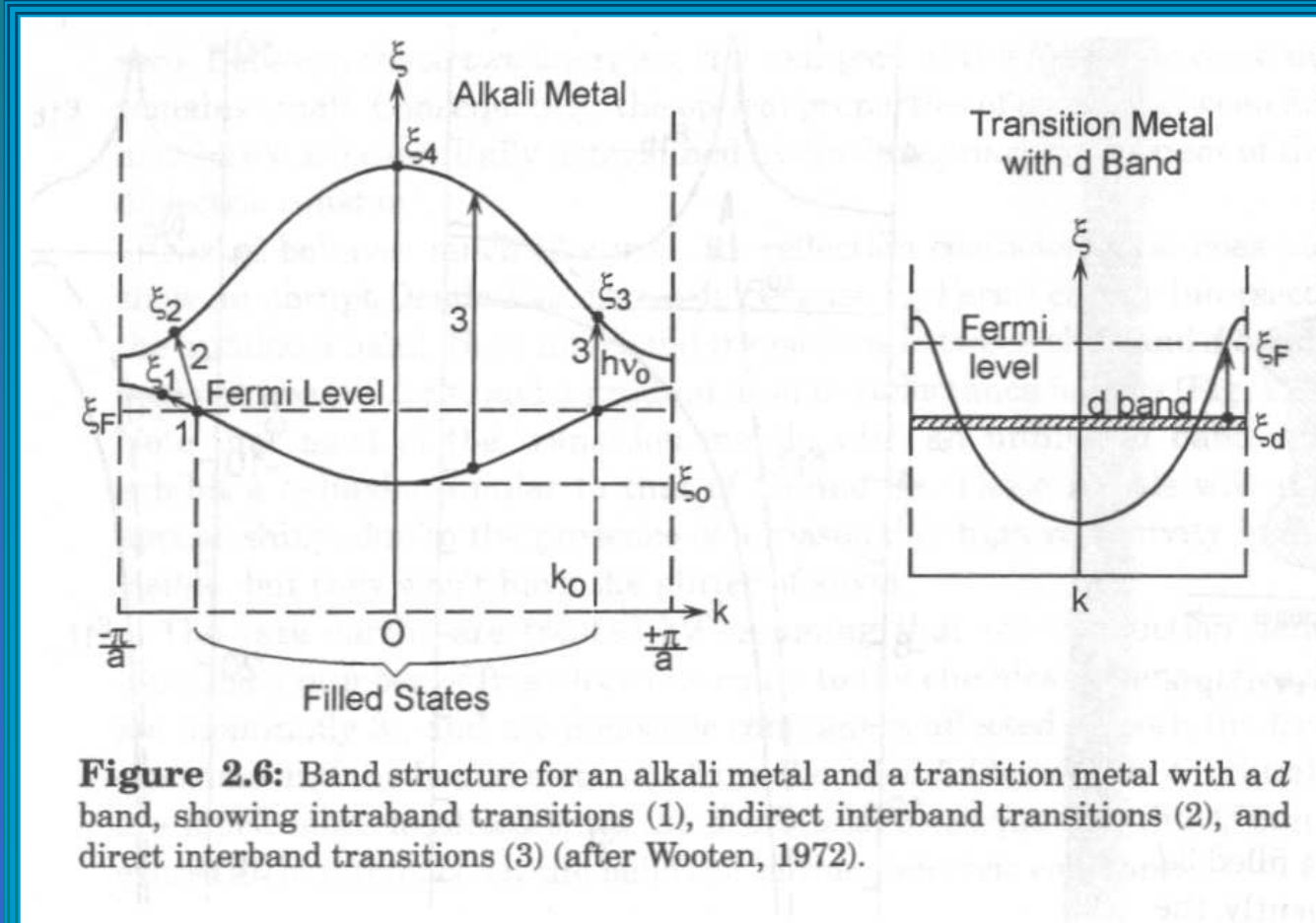


Figure 2.6: Band structure for an alkali metal and a transition metal with a d band, showing intraband transitions (1), indirect interband transitions (2), and direct interband transitions (3) (after Wooten, 1972).

Absorción domina en $\xi_3 - \xi_F < h\nu < \xi_4 - \xi_0$

Transiciones Electrónicas en Metales Reales

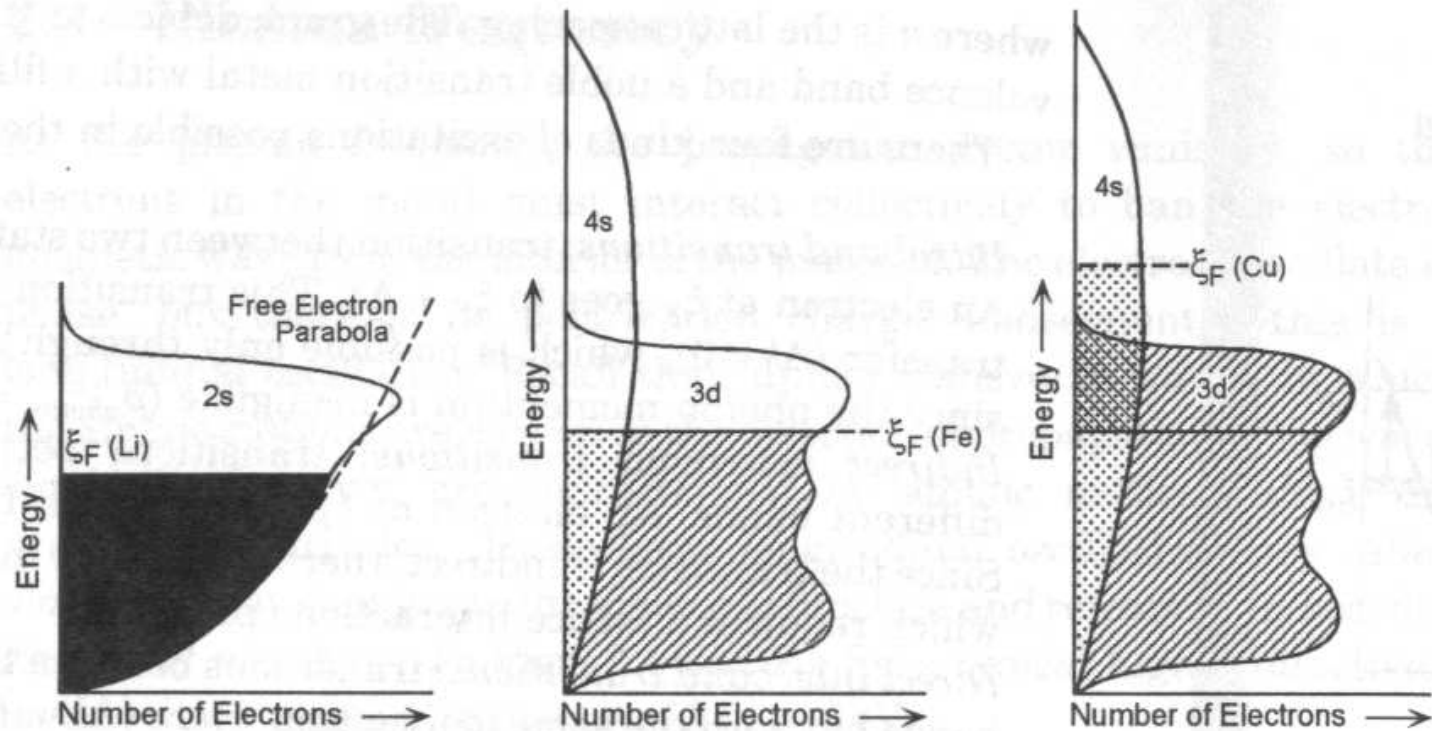


Figure 2.7: Electronic band structure of Li, Fe, and Cu, showing the overlap of *d* bands when present (after Slater 1951 and Nassau 1983).

Tabla Periódica de los Elementos

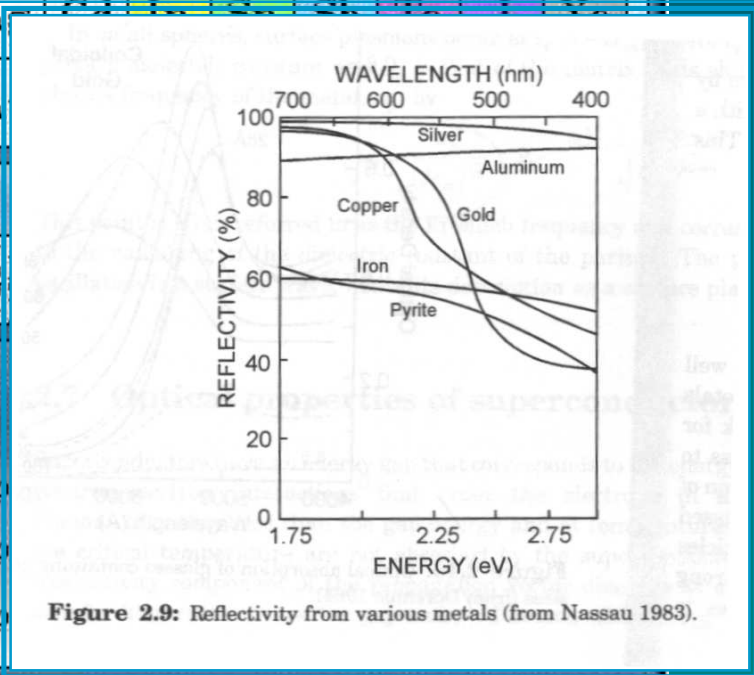
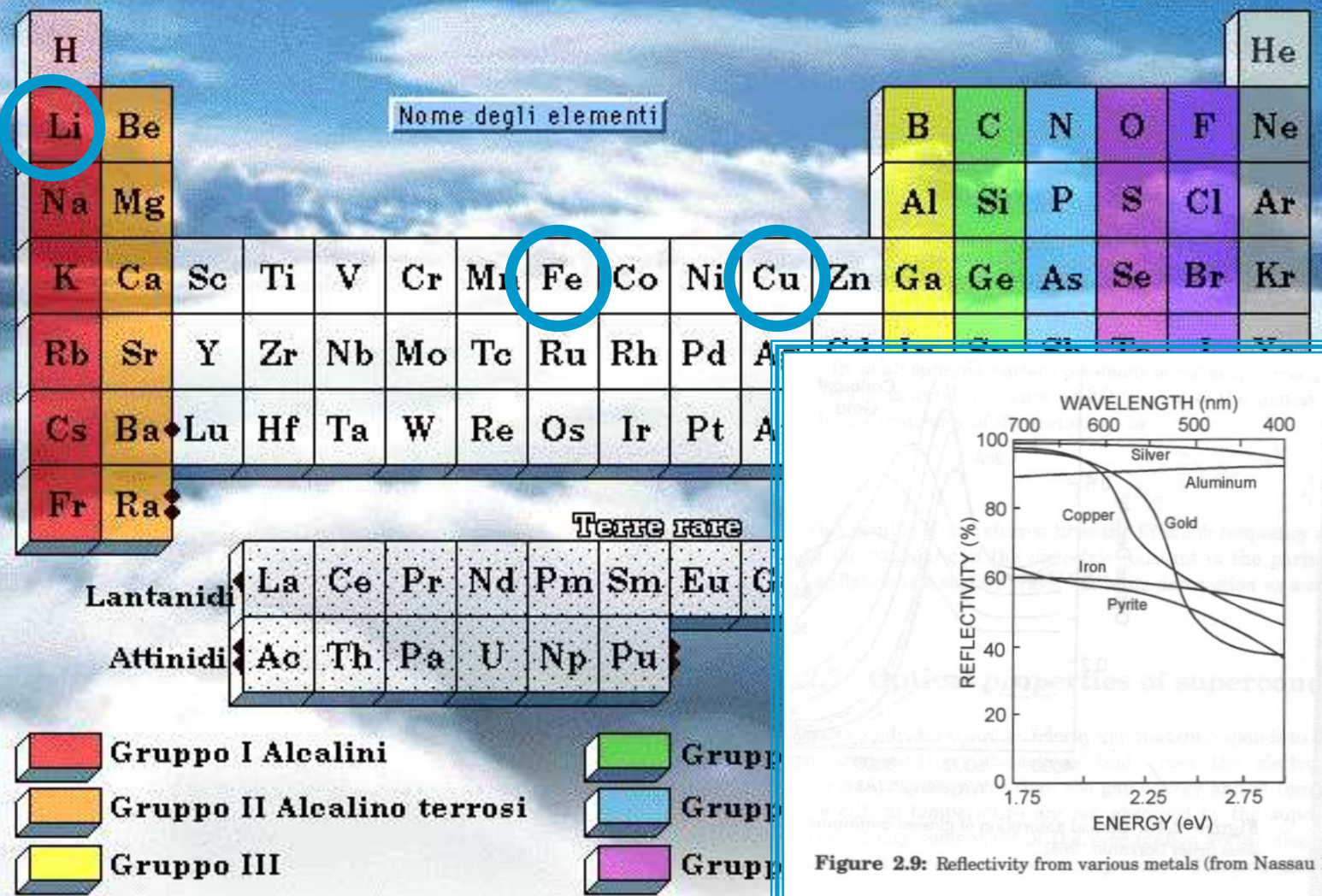


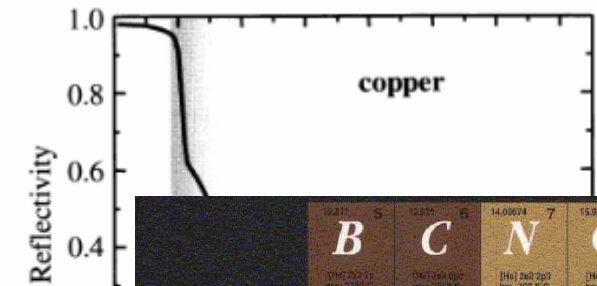
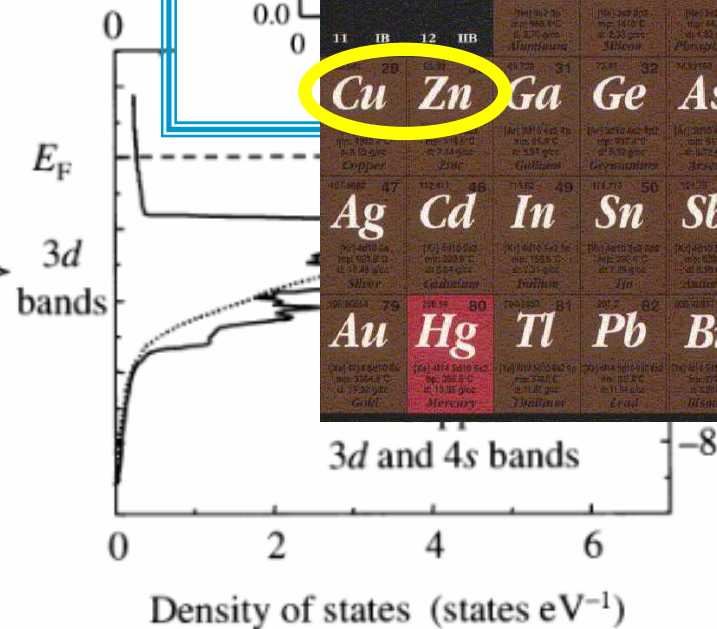
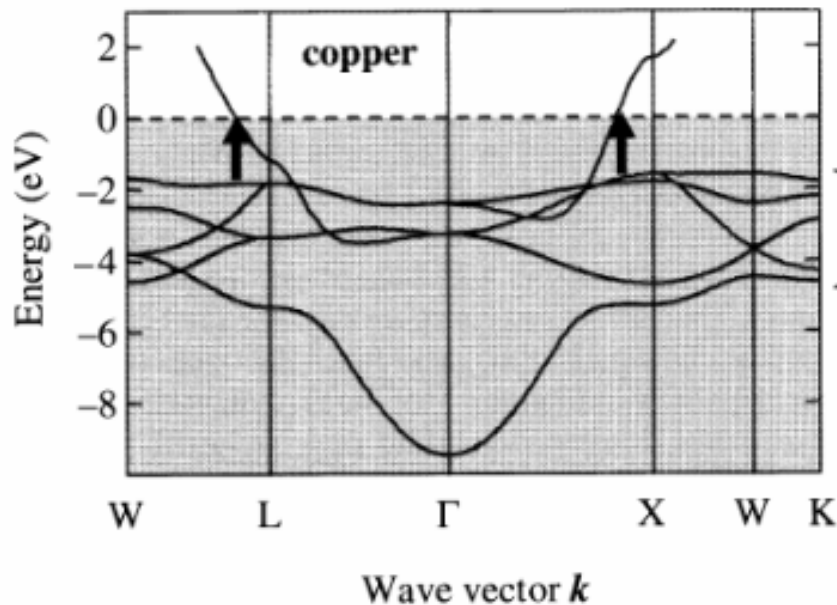
Figure 2.9: Reflectivity from various metals (from Nassau 1983).

Reflectancia Metales Reales

Cobre Borde de Absorción a ~ 2.2 eV

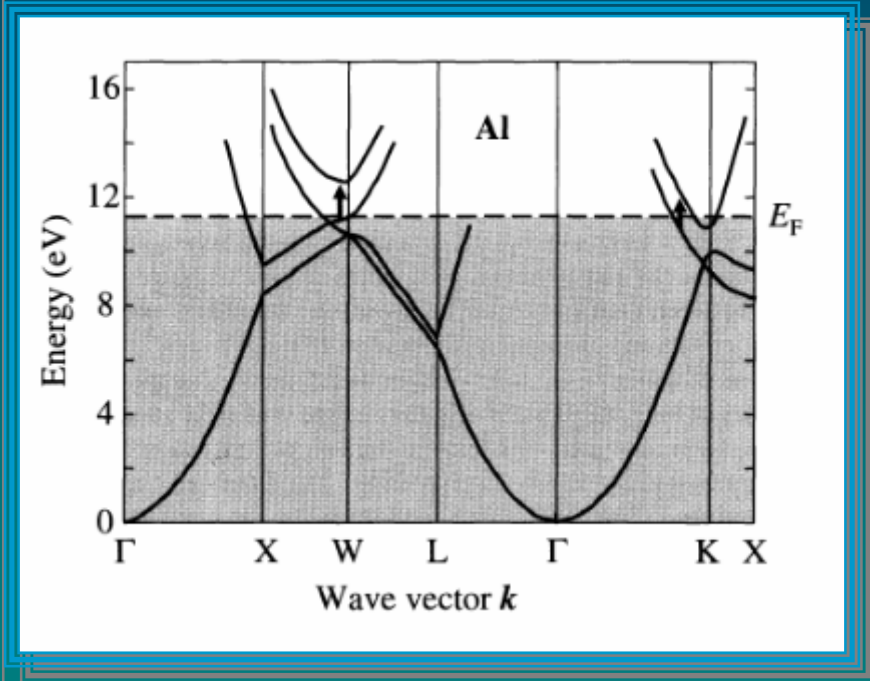
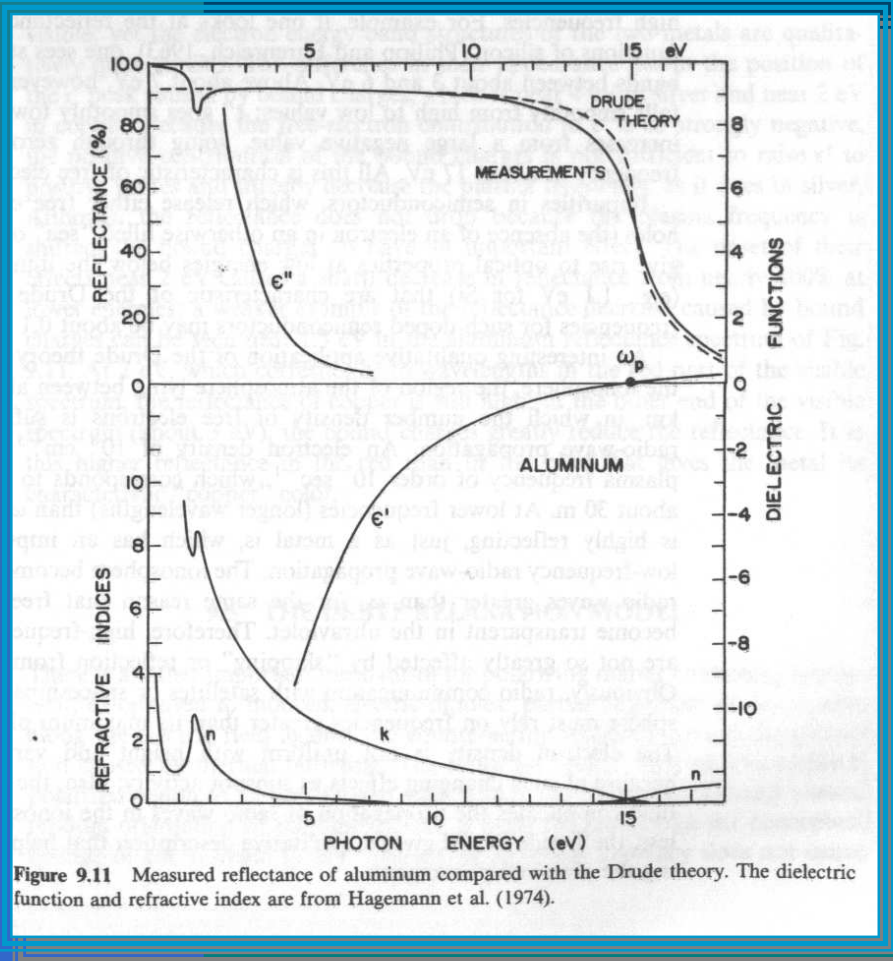
Bronce: Cu + Zn

+ electrones $\Rightarrow E_F$ aumenta \Rightarrow + amarillo



	5	6	7	8
	B	C	N	O
	Al	Si	P	S
	Cu	Zn	Ga	Ge
	Ag	Cd	In	Sn
	Au	Hg	Tl	Pb

Reflectancia Metales Reales



Aluminio

Bandas Paralelas ~ 1.5 eV

Propiedades Ópticas de Metales

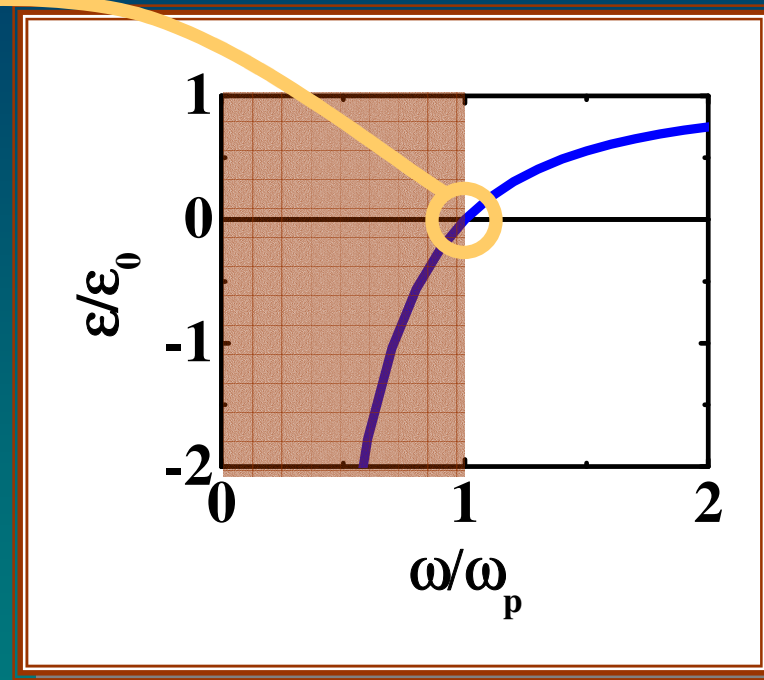
- Semiconductores y Metales.
 - Definición y Estructura Electrónica.
- Propiedades de Conducción Eléctrica.
 - Modelo de Drude.
- **Propiedades Ópticas.**
 - Modelo de Drude-Lorentz.
 - Metal Ideal (sin pérdidas).
 - Metal “Ideal” con pérdidas.
 - **Metales Reales**
 - Oscilación de Plasma.
 - SPR: Películas y Nanopartículas.

Propiedades Ópticas de Metales

- Semiconductores y Metales.
 - Definición y Estructura Electrónica.
- Propiedades de Conducción Eléctrica.
 - Modelo de Drude.
- **Propiedades Ópticas.**
 - Modelo de Drude-Lorentz.
 - Metal Ideal (sin pérdidas).
 - Metal “Ideal” con pérdidas.
 - Metales Reales
 - **Oscilación de Plasma.**
 - SPR: Películas y Nanopartículas.

Propiedades Ópticas de Metales: Modo Colectivo Plasmón

$$\eta^2 = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$
$$\epsilon(\omega_p) = 0$$

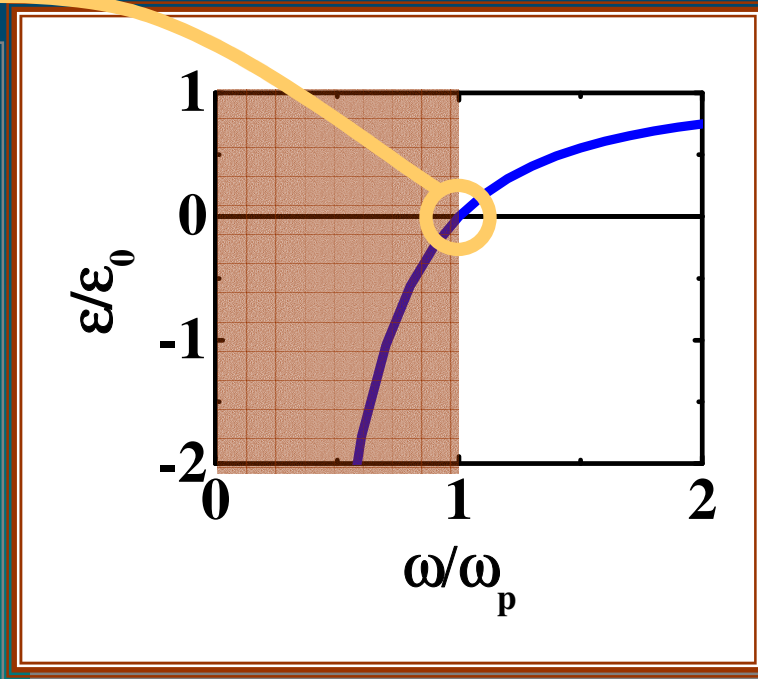
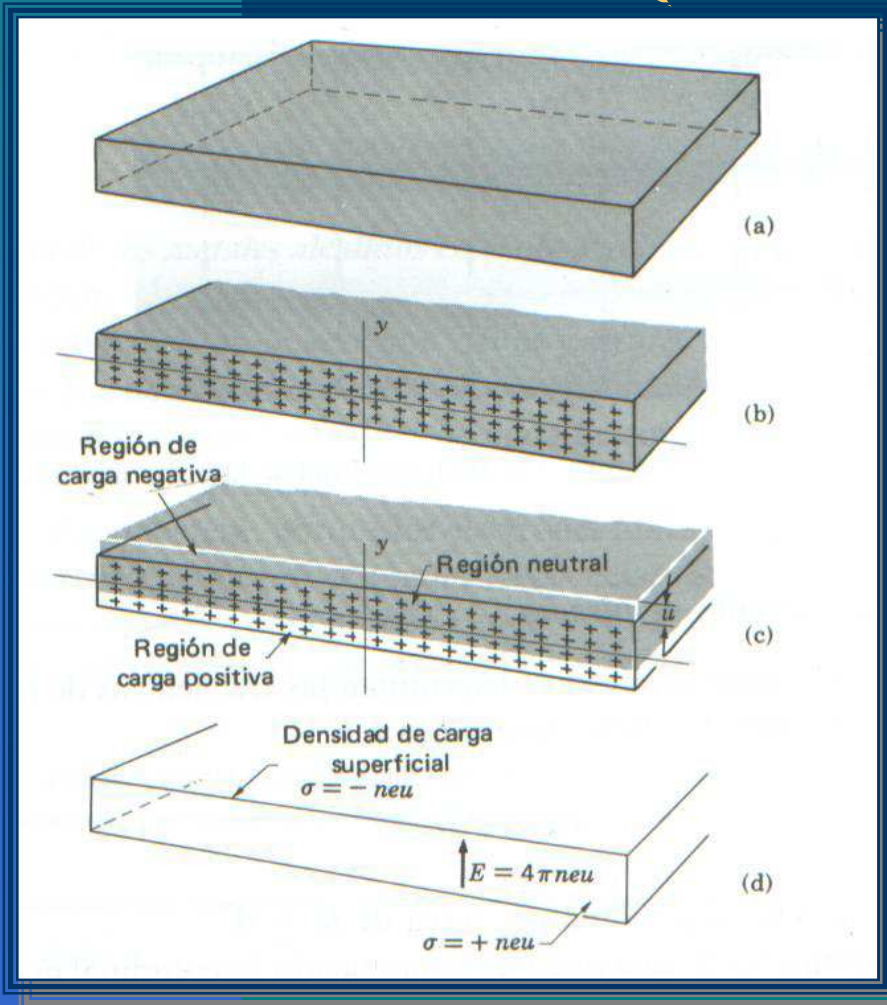


$$\vec{\mathbf{D}} = \epsilon \vec{\mathbf{E}} = 0$$

$$\vec{\mathbf{D}} = \epsilon_0 \vec{\mathbf{E}} + \vec{\mathbf{P}}$$

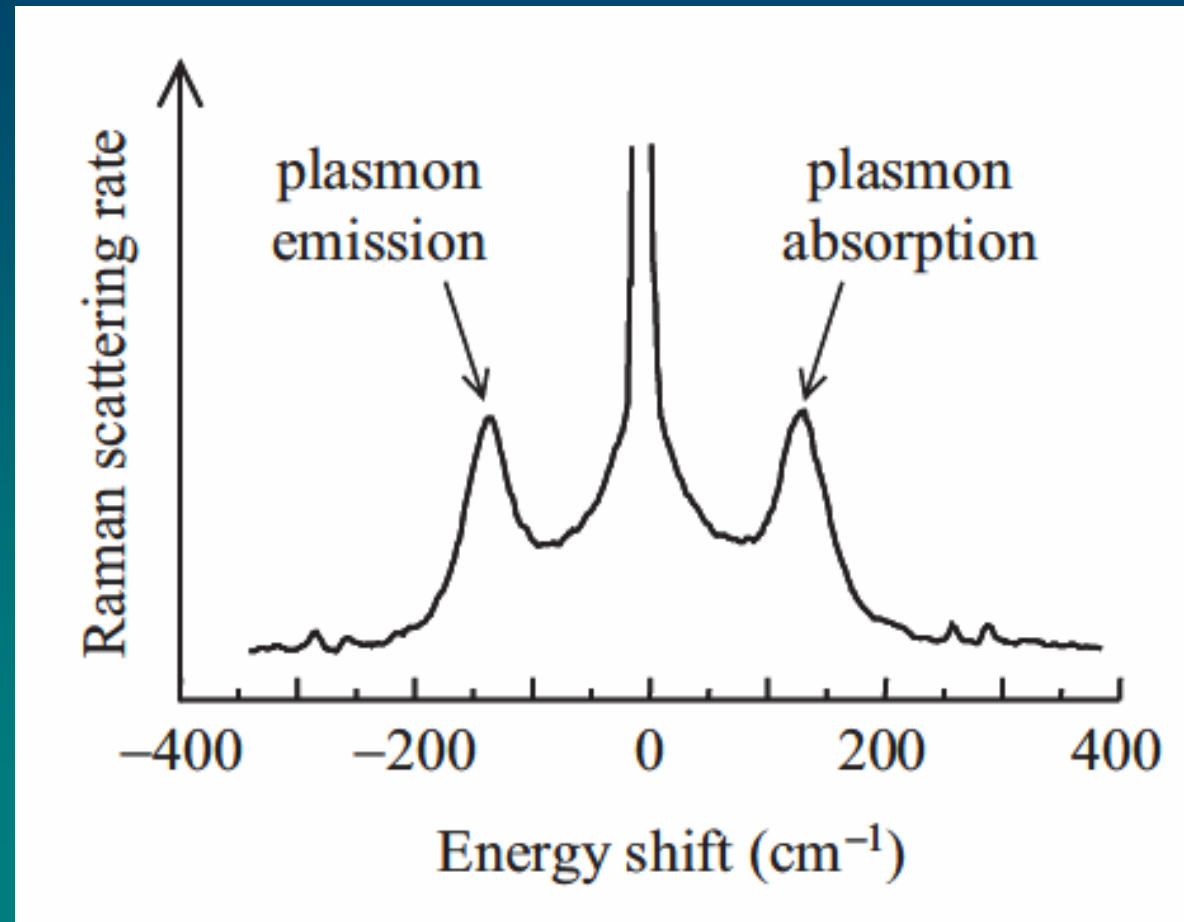
$$\epsilon_0 \vec{\mathbf{E}} = -\vec{\mathbf{P}}$$

Modo Colectivo Plasmón



$$\epsilon_0 \vec{E} = -\vec{P}$$

Raman en GaAs



Propiedades Ópticas de Metales

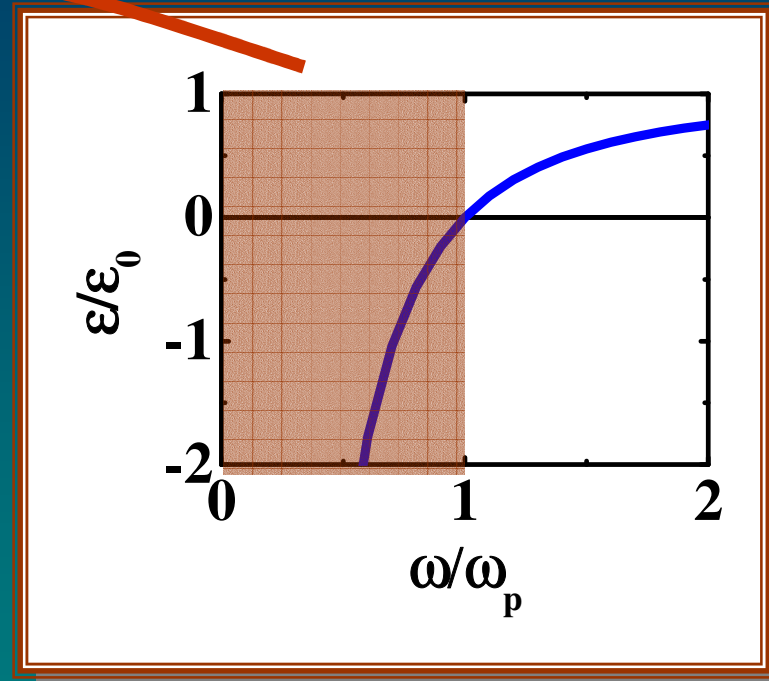
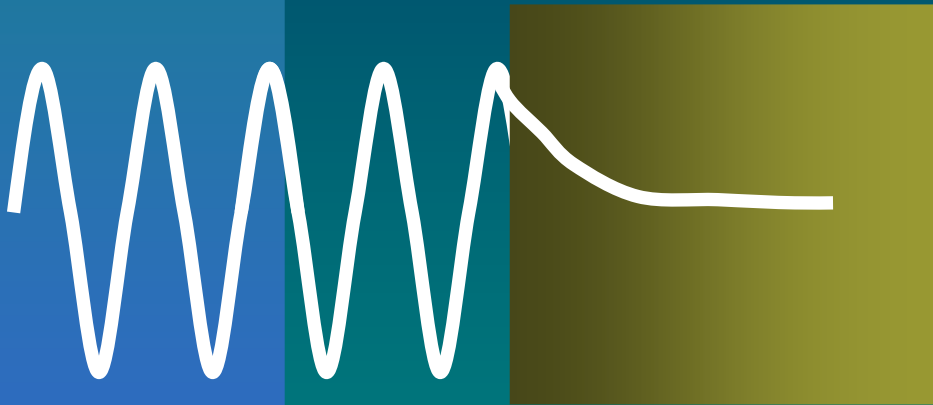
- Semiconductores y Metales.
 - Definición y Estructura Electrónica.
- Propiedades de Conducción Eléctrica.
 - Modelo de Drude.
- **Propiedades Ópticas.**
 - Modelo de Drude-Lorentz.
 - Metal Ideal (sin pérdidas).
 - Metal “Ideal” con pérdidas.
 - Metales Reales
 - **Oscilación de Plasma.**
 - SPR: Películas y Nanopartículas.

Propiedades Ópticas de Metales

- Semiconductores y Metales.
 - Definición y Estructura Electrónica.
- Propiedades de Conducción Eléctrica.
 - Modelo de Drude.
- **Propiedades Ópticas.**
 - Modelo de Drude-Lorentz.
 - Metal Ideal (sin pérdidas).
 - Metal “Ideal” con pérdidas.
 - Metales Reales
 - Oscilación de Plasma.
 - **SPR: Películas y Nanopartículas.**

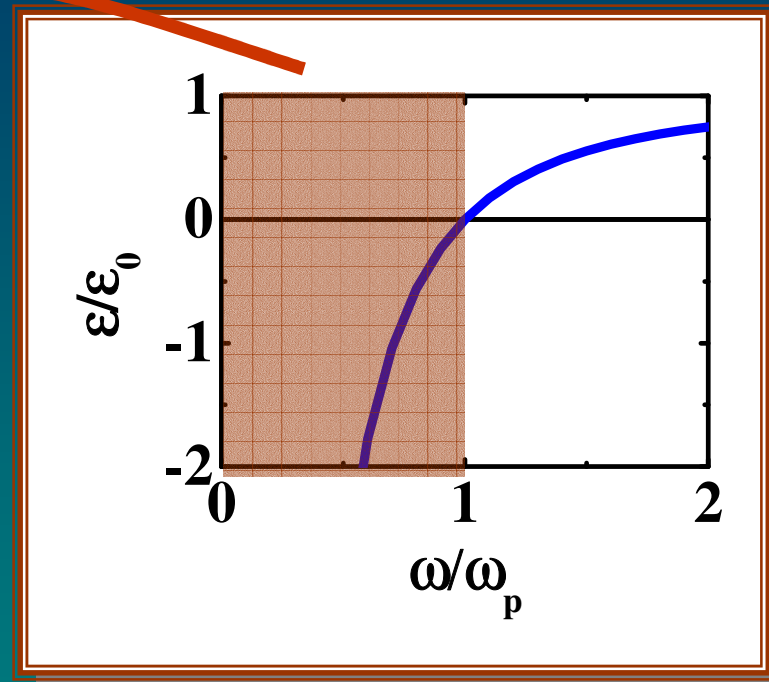
Modo Plasmón Superficial

$\epsilon < 0 \Rightarrow \eta = i|\eta| \in \# \text{ imaginarios}$



Modo Plasmón Superficial

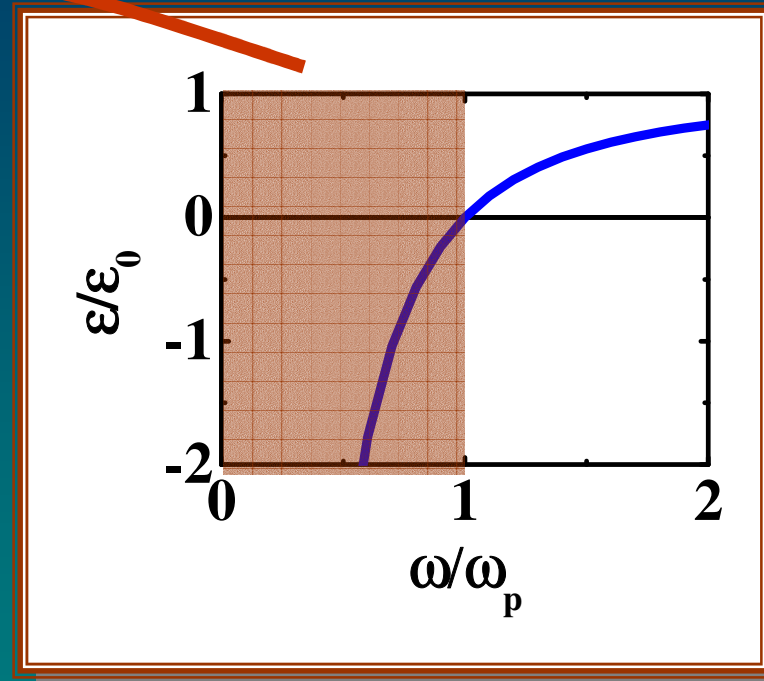
$\epsilon < 0 \Rightarrow \eta = i|\eta| \in \# \text{ imaginarios}$



- El campo electromagnético está confinado en la superficie.
- Puede llegar a ser muy grande.

Modo Plasmón Superficial

$\epsilon < 0 \Rightarrow \eta = i|\eta| \in \# \text{ imaginarios}$



$$\eta^2 = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

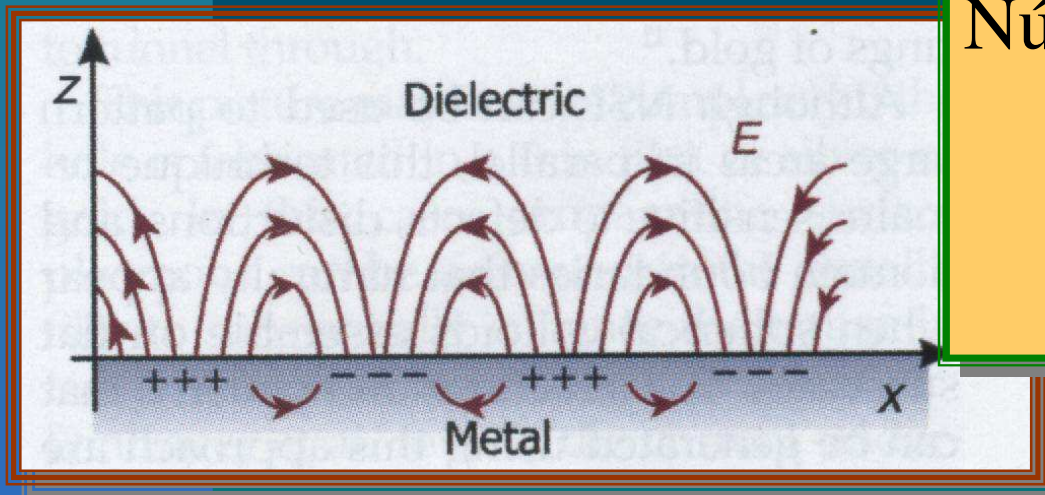
Condición de Borde:

$$\frac{\epsilon(\omega)}{\epsilon_0} + 1 = 0$$



$$\omega = \frac{\omega_p}{\sqrt{2}}$$

Modo Plasmón Superficial



$$\text{Número de onda : } q = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$q^2 c^2 = \frac{\epsilon(\omega)\omega^2}{\epsilon(\omega)+1}$$

$$\lambda \ll \lambda_0$$

$$\eta^2 = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

Condición de Borde :

$$\frac{\epsilon(\omega)}{\epsilon_0} + 1 = 0$$



$$\omega = \frac{\omega_p}{\sqrt{2}}$$

Plasmones

➤ Volumétrico:

$$\omega = \omega_p$$

➤ Superficial:

$$\omega = \frac{\omega_p}{\sqrt{2}}$$

➤ Esférico:

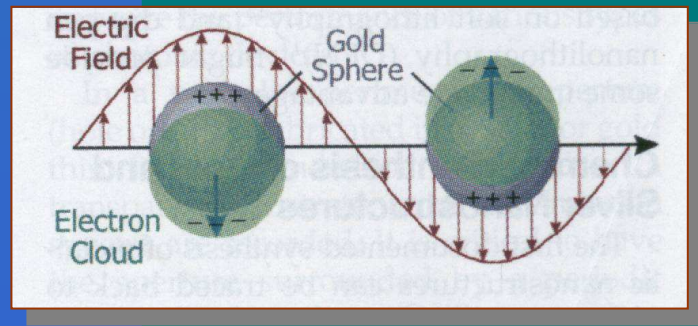
$$\omega = \frac{\omega_p}{\sqrt{3}}$$

Interface Metal –
Dieléctrico (ϵ_m):

$$\omega = \frac{\omega_p}{\sqrt{1 + \frac{\epsilon_m}{\epsilon_0}}}$$

$$\omega = \frac{\omega_p}{\sqrt{1 + 2 \frac{\epsilon_m}{\epsilon_0}}}$$

$$R \ll \lambda$$



SPR: Resonancia Plasmones Superficiales

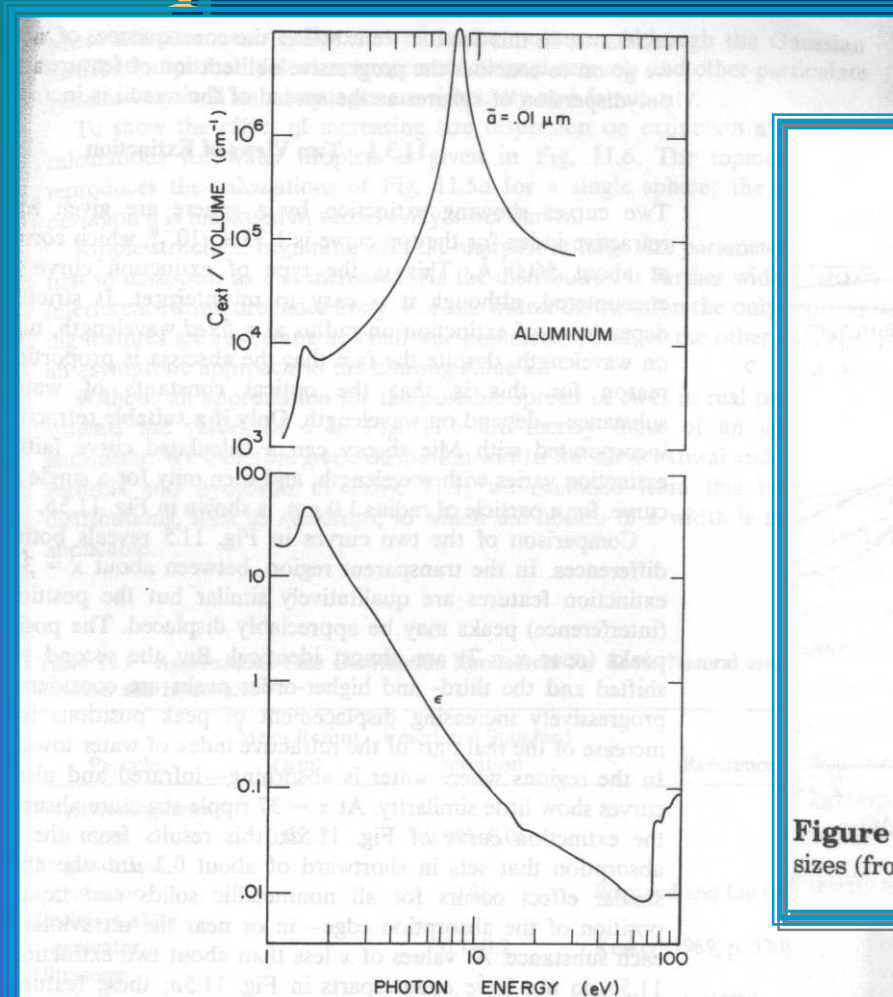


Figure 11.4 Calculated extinction by a polydispersion of aluminum spheres (top) compared with the bulk absorption spectrum of aluminum (bottom).

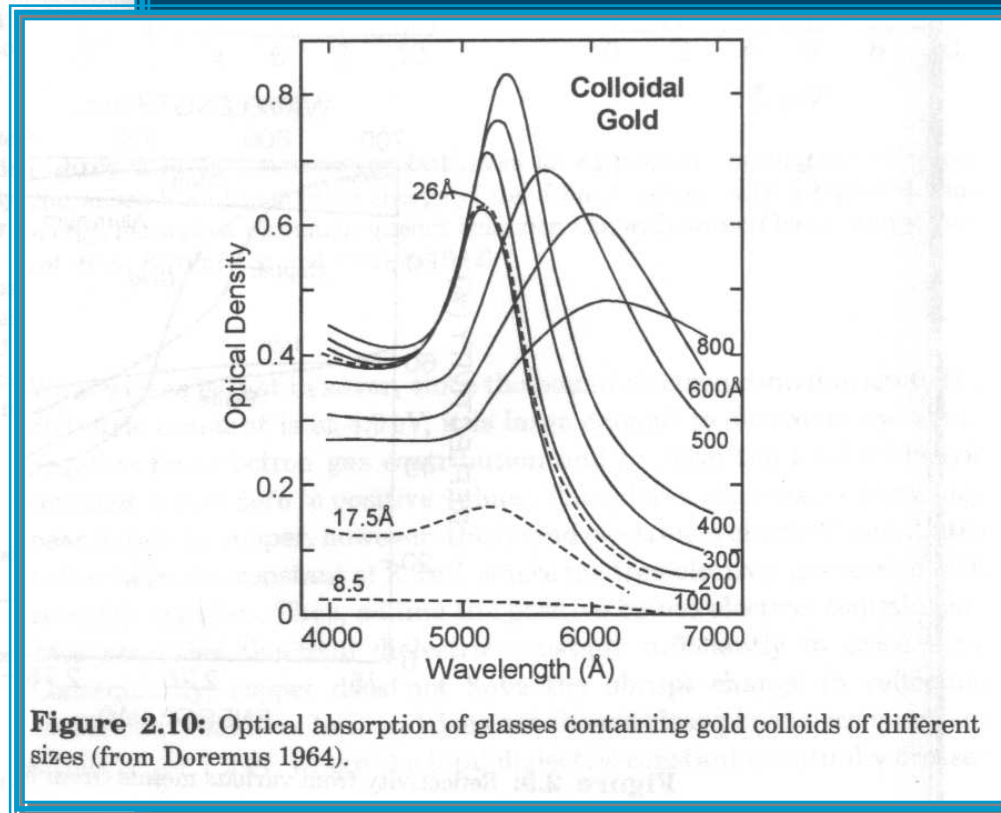


Figure 2.10: Optical absorption of glasses containing gold colloids of different sizes (from Doremus 1964).

Oro

Aluminio: “Bulk” vs “Nano”

“No es oro todo lo que brilla”



<i>Metal</i>	Electron effective mass	Electron density	Plasma frequency
	m_{eff}/m_0	n [1/m ³]	ω_p [eV]
Ag	1.1	5.86×10^{28}	8.58
Cu	1.3	8.47×10^{28}	9.48
Au	1.1	5.9×10^{28}	8.60



“No es oro todo lo que brilla”

“No todo lo que es oro brilla”

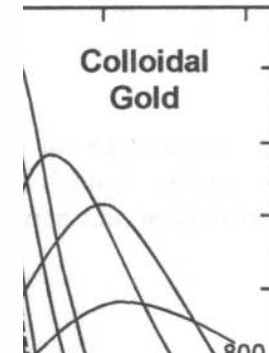
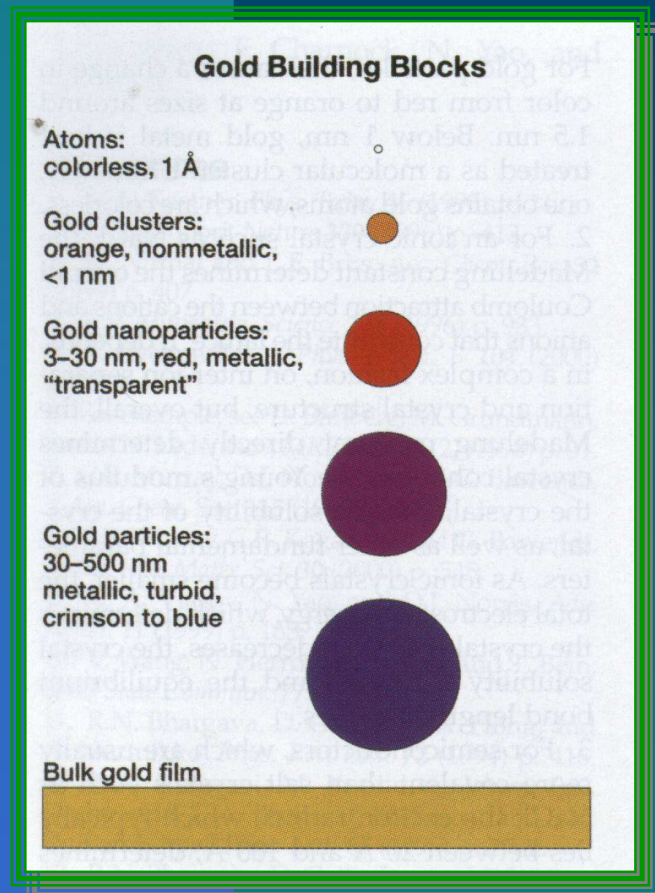
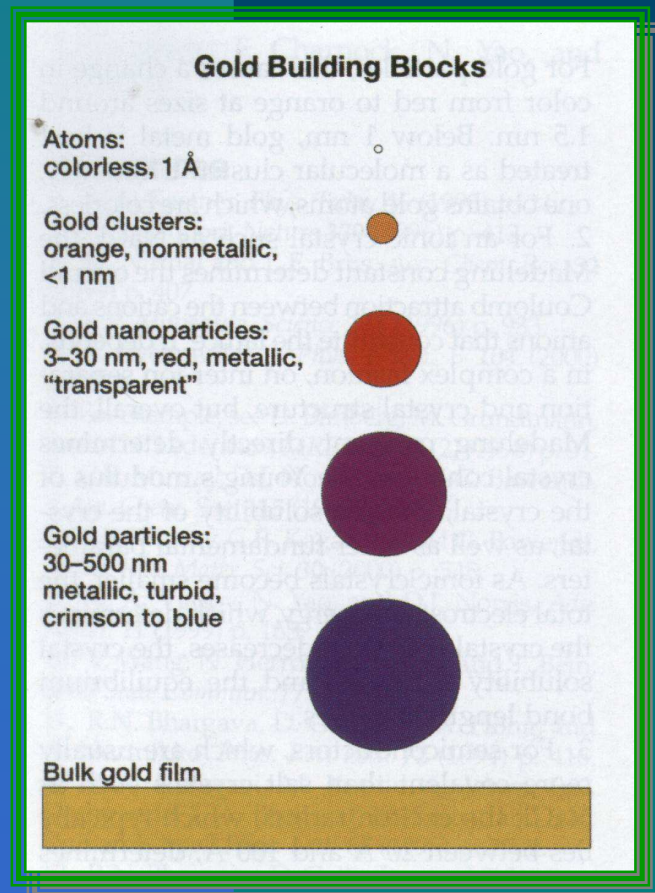
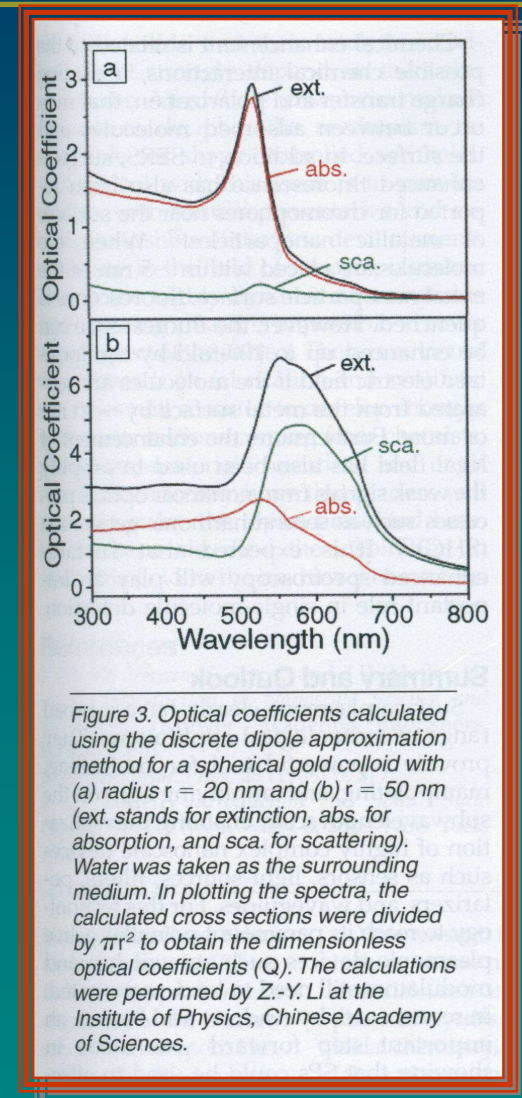


Figure 2.10: Optical absorption sizes (from Doremus 1964).

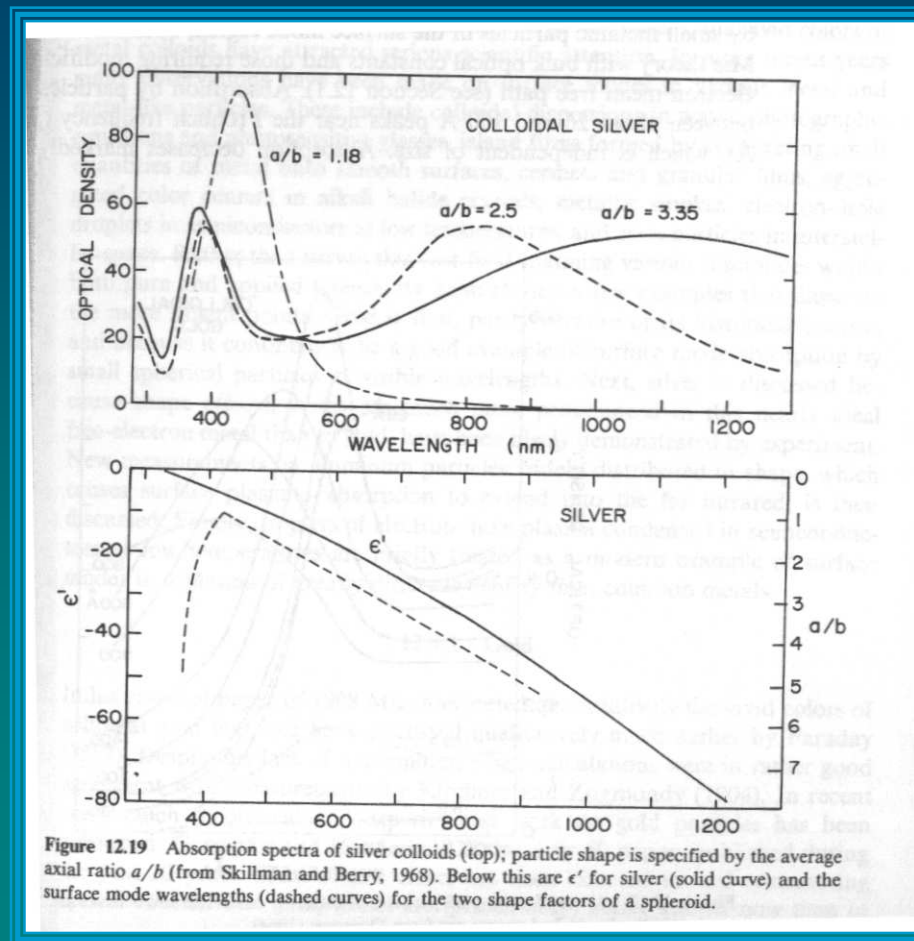
“No es oro todo lo que brilla” “No todo lo que es oro brilla”



Copa de Licurgo, S IV DC



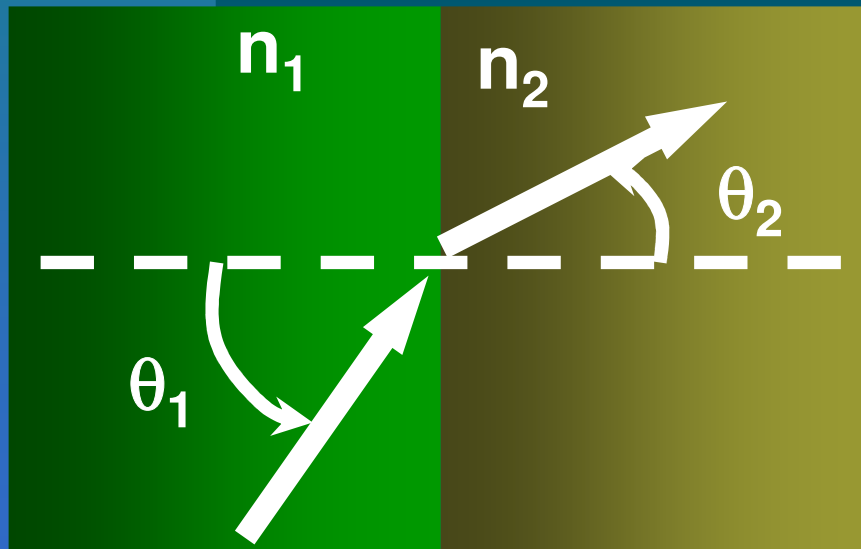
SPR: Resonancia Plasmones Superficiales



Plata

“Metamateriales”

➤ Ley de Snell:

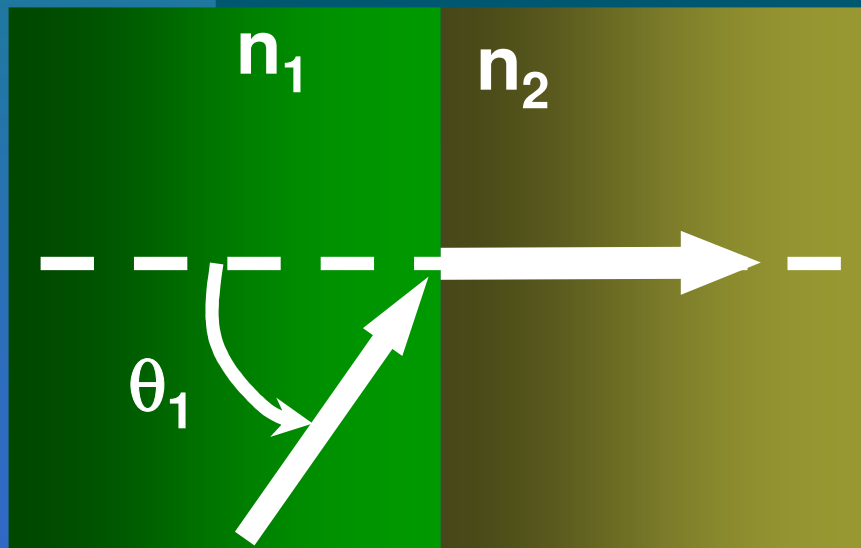


$$n_1 \operatorname{sen}\theta_1 = n_2 \operatorname{sen}\theta_2$$

$$n_1 < n_2 \Rightarrow \theta_1 > \theta_2$$

“Metamateriales”

➤ Ley de Snell:



$$n_1 \operatorname{sen}\theta_1 = n_2 \operatorname{sen}\theta_2$$

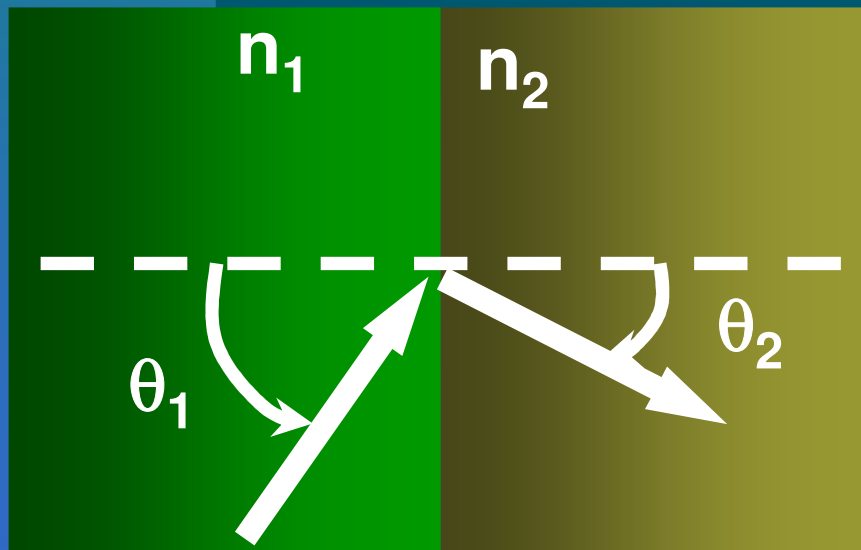
$$n_1 < n_2 \Rightarrow \theta_1 > \theta_2$$

$$n_1 = 0 \Rightarrow \theta_2 = 0$$

Emisor Perfecto

“Metamateriales”

➤ Ley de Snell:



$$n_1 \operatorname{sen}\theta_1 = n_2 \operatorname{sen}\theta_2$$

$$n_1 < n_2 \Rightarrow \theta_1 > \theta_2$$

$$n_1 = 0 \Rightarrow \theta_2 = 0$$

$$?? \operatorname{sig}(n_1) \neq \operatorname{sig}(n_2) ??$$

$$\Rightarrow \operatorname{sig}(\theta_1) \neq \operatorname{sig}(\theta_2)$$



Colimador Perfecto

“Left Handed Materials”

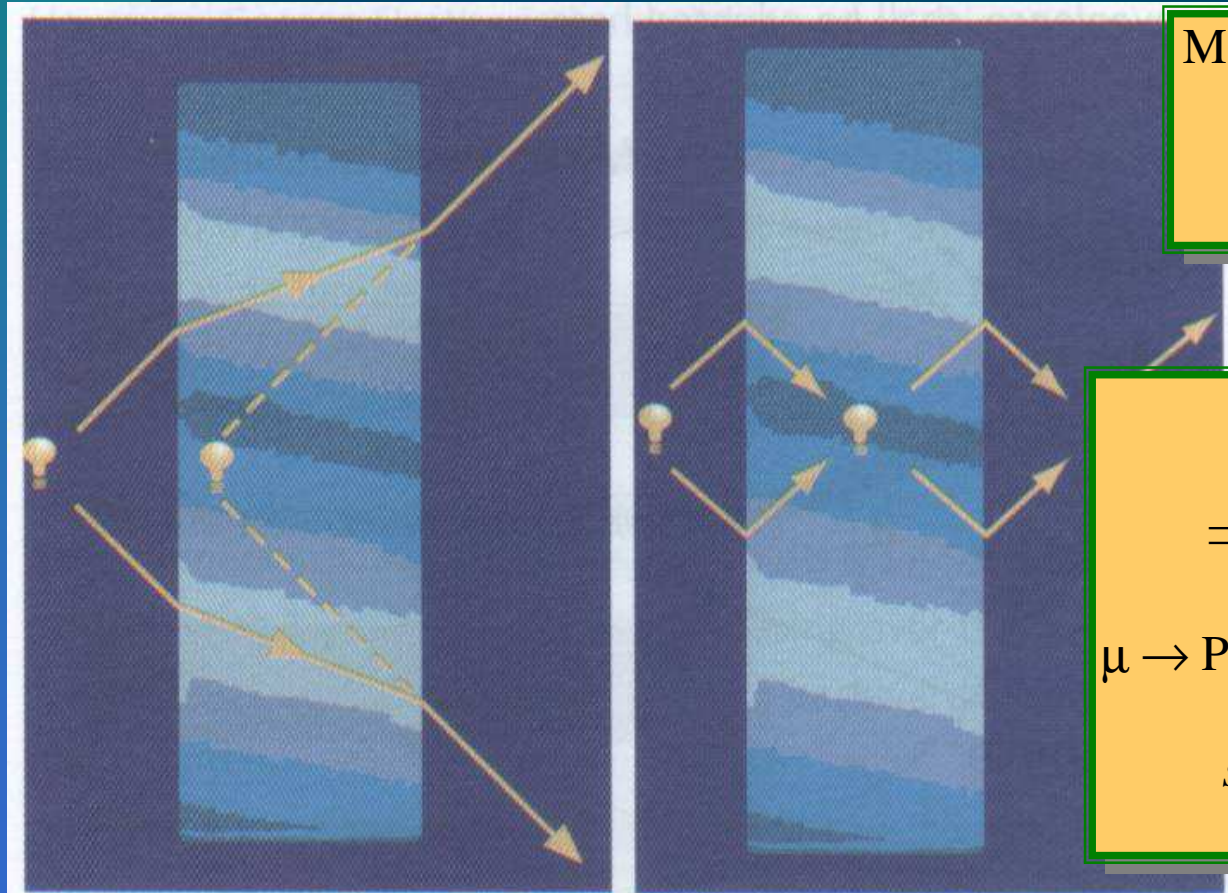


Fig. 1 An electromagnetic source incident on a slab of transparent right-handed material

Material Normal

Índice de Refracción Negativo

Material No Magnético :

$$\eta^2 = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \Rightarrow \eta = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}}$$

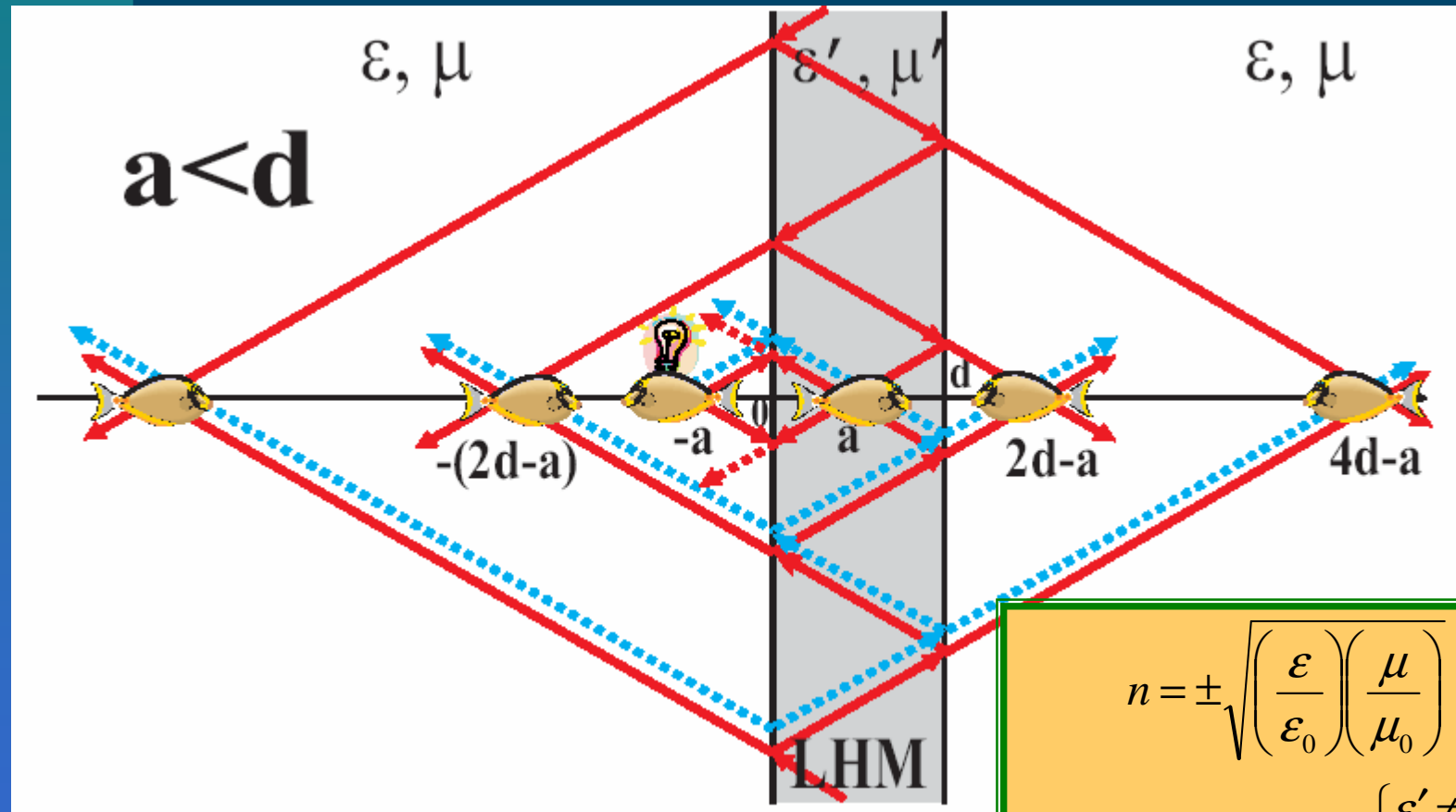
En otro caso :

$$\Rightarrow \eta = \pm \sqrt{\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)\left(\frac{\mu}{\mu_0}\right)}$$

$\mu \rightarrow$ Permeabilidad Magnética

$$si \begin{cases} \epsilon < 0 \\ \mu < 0 \end{cases} \Rightarrow \eta < 0$$

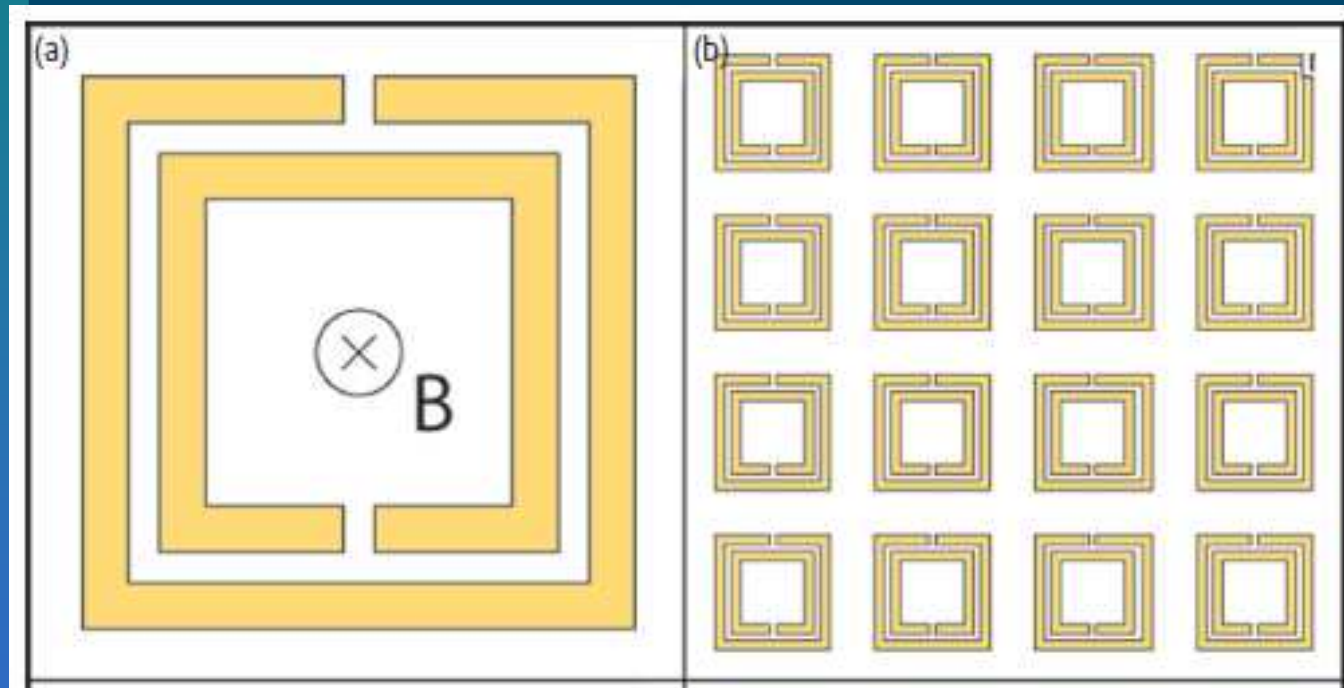
“Left Handed Materials”



$$n = \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)\left(\frac{\mu}{\mu_0}\right)}$$

$$n' = -n \quad \text{pero con:} \quad \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon' \neq -\varepsilon \\ \mu' \neq -\mu \end{array} \right\}$$

Permeabilidad Negativa



$$\mu_{eff} = 1 - \frac{F\omega^2}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\omega\Gamma}$$

