

USOS Y APLICACIONES DE LA MICROSCOPIA ELECTRONICA DE TRANSMISION

*María Elena Gómez
Profesora Depto. de Física*

RESUMEN

Se presenta el principio de funcionamiento de un microscopio electrónico de transmisión, sus modos de operación e imagen característica respectiva, y su aplicación a la ciencia y la tecnología, con énfasis en su uso en ciencia de los materiales.

ABSTRACT

The fundamentals of transmission Electron Microscopy, its modes of operation and characteristic image, and its applications to science and thecnology are present with emphasis int its uses in material science.

1. INTRODUCCION

La microscopía electrónica es una técnica Interdisciplinaria con una fuerte fundamentación física. Para un uso completo de todas sus posibilidades y para la interpretación de sus resultados se requiere del conocimiento profundo de muchas ramas de la Física. Sin embargo, es posible expresar el contenido de esas teorías en un lenguaje accesible a un usuario "normal" de microscopía electrónica.

Aquí se presenta un compendio de esa visión general tratada en muchos textos de microscopía electrónica referenciada al final.

2. OPERACION Y CALIBRACION DE UN MICROSCOPIO ELECTRONICO

2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

2.1.1 COMPORTAMIENTO ONDULATORIO DE LOS ELECTRONES

En 1924 de Broglie postuló el famoso principio conocido como duali-

dad onda partícula para la materia, según el cual, así como a las ondas electromagnéticas se les puede asociar una partícula llamada fotón y por medio de él se explican los fenómenos corpusculares de la luz, a toda partícula con cantidad de movimiento p se le puede asociar una onda con longitud de onda λ tal que $\lambda = \frac{h}{p}$

En particular para los electrones que han sido acelerados a través de un potencial V en voltios, su longitud de onda asociada está dado por la expresión:

$$\lambda = \sqrt{\frac{150}{V(\text{vol})}} \text{ \AA}$$

La siguiente tabla muestra las longitudes de onda de los electrones para diferentes voltajes aceleradores y la correspondiente velocidad adquirida.¹

V(KV)	(A ⁰)	v(10 ¹⁰ cm/s)
40	0.0601	1.1216
60	0.0487	1.338
980	1.0410	1.506
100	0.0370	1.644
200	0.0251	2.079
1000	0.0087	2.822

Para efectos de comparación, la longitud de onda de la luz en el rango visible varía entre 4000 y 7000 A⁰, 10⁵ veces mayor que λ para los electrones; la de la radiación X varía entre 10A⁰ para Rayos-X blandos a 0.1A⁰ para Rayos-X duros, o sea 10³ veces mayor que para electrones.

2.1.2 MICROSCOPIA DE LUZ Y MICROSCOPIA DE ELECTRONES

El orden de magnitud de la longitud de onda de los electrones permite concebir la idea de que con la ayuda de lentes electromagnéticas, que enfoquen el haz de electrones se puede obtener un microscopio de alto poder de resolución. Esta idea se fue haciendo realidad, primeros en los 20 años de este siglo cuando se construyeron lentes para electrones (h. Bosh²) y en la década de los 30 cuando se obtuvieron las primeras imágenes de un microscopio con electrones como fuente de radiación.³

Los electrones emitidos por un filamento son acelerados por un ánodo y enfocados sobre el espécimen con ayuda de lentes magnéticas condensadoras y aberturas. (Fig. 1).

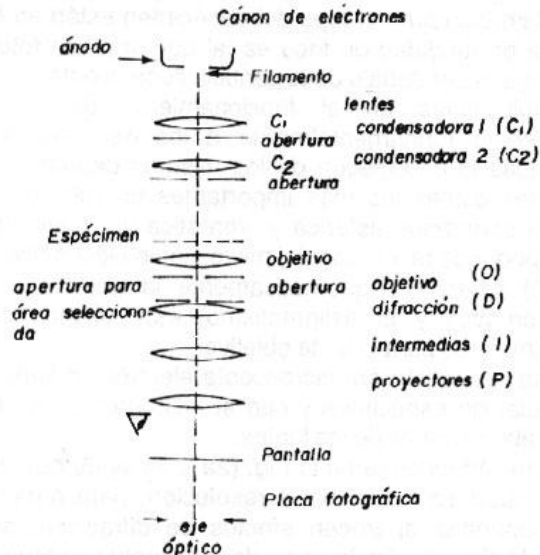


Fig. (1) Esquema de las partes que componen un Microscopio Electrónico de Transmisión⁴.

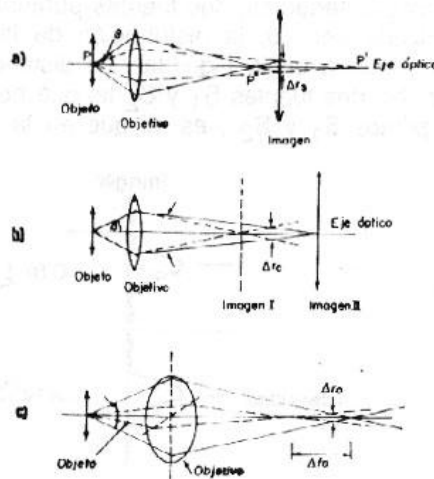


Fig. (2). Esquema de los principales defectos de las Lentes Electromagnéticas. a) Aberración esférica. b) Aberración cromática. c) Astigmatismo.

La imagen o patrón de difracción del espécimen se enfoca con una lente objetivo y con ayuda de un sistema de lentes amplificadoras se proyecta sobre una pantalla fluorescente. La profundidad de campo es tal que tanto la base como el tope del espécimen están en foco simultáneamente, y la profundidad de foco es tal que la placa fotográfica puede estar ± 50 cms. o por debajo de la pantalla fluorescente.

Existen limitaciones en el funcionamiento de un microscopio electrónico, debido fundamentalmente a los defectos de las lentes electromagnéticas que adolecen de los mismos defectos de las lentes de vidrio, de los cuales los más importantes en relación con la lente objetivo son la aberración esférica y cromática y el astigmatismo, pues determinan el poder de resolución del microscopio electrónico.

La Fig. (2) muestra esquemáticamente la aberración esférica, la aberración cromática y el astigmatismo, este último corregible con ayuda de astigmatos para la lente objetivo.

El poder de resolución en microscopía electrónica tiene que ver con el tipo particular de espécimen y con el instrumento en sí, esto último función de las aberraciones de las lentes.

De la aberración esférica en la Fig. (2a.), se sigue que entre más pequeña sea la abertura mayor es la resolución, pero para aberturas de lentes muy pequeñas aparecen efectos de difracción, según se esquematiza en la Fig. (3). La imagen de una fuente puntual al atravesar una abertura circular es un disco central brillante rodeado por anillos oscuros concéntricos. Si tenemos, dos fuentes puntuales que atraviesan una abertura caracterizada por β , la distribución de la intensidad en el plano imagen, se muestra en la Fig. (3a). La distancia Δr_D más cerca que pueden estar las dos fuentes S_1 y S_2 tal que podamos distinguir o resolver los dos puntos S_1 y S_2 , es tal que en la imagen el primer

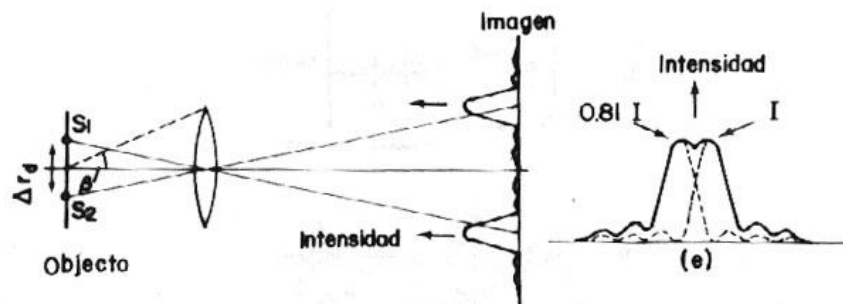


Fig.(3). Imagen de difracción o patrón de intensidad de dos fuentes puntuales a través de una abertura objetivo con ángulo. a) Imágenes completamente resueltas. b) Situación correspondiente al criterio de Rayleigh para el poder de resolución.

mínimo de uno de los dos, al superponerse con el patrón de intensidad del otro, coincide con el máximo del este; en esa situación el mínimo central tiene una intensidad de 0.81 del máximo. Esta condición es conocida como el criterio de Rayleigh y nos dice que el límite de resolución punto a punto es tal que

$$\Delta r_d = 0.161 \frac{\lambda}{\beta}$$

La abertura óptima es tal que

$$\beta = \left(\frac{\lambda}{C_e} \right)^{1/4}$$

dando un máximo de resolución

$$\Delta r_{\min} = \lambda^{3/4} C_e^{1/4}$$

para un voltaje acelerador de 100kv ($\lambda_e = 0.037\text{A}^\circ$), $\Delta r_{\min} \approx 2 \text{ a } 3\text{A}^\circ$

2.2 MODOS DE OPERACION

2.2.1 MODO DE CAMPO CLARO

Hasta el momento se ha presentado la microscopía electrónica desde el punto de vista de su analogía con la microscopía óptica, Fig.(4a.) y sus conceptos físicos comunes, pero existe una gran diferencia entre ellas y está en el mecanismo de formación de la imagen obtenida. En el caso de la luz un punto de la imagen es claro u

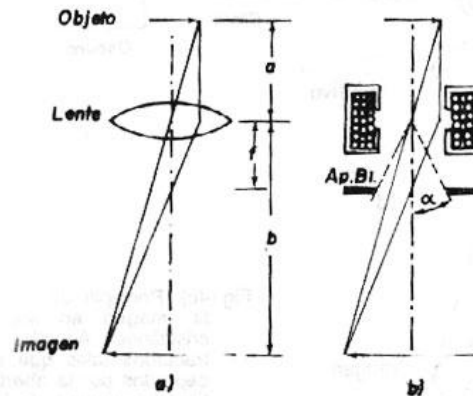


Fig. (4a.) Comparación esquemática entre la trayectoria de los rayos principales para una lente de vidrio para la luz. a) y una lente electromagnética para los electrones b).

oscuro dependiendo de las absorciones de la luz al atravesar el espécimen por ese punto, mientras que para electrones la absorción no es el efecto predominante, sino la mayor o menor dispersión elástica que experimenta el haz de electrones debido al potencial coulombiano del núcleo de los átomos que conforman el espécimen, y las superposiciones de esas ondas dispersadas en el plano imagen que resultan en un efecto de interferencia, que causa un contraste de difracción si el espécimen es cristalino, Fig. (4c). Ondas dispersadas elásticamente a ángulos grandes pueden ser absorbidas por una abertura de la lente objetivo (4b y c) y así decrece la intensidad transmitida y por lo tanto se puede aumentar el contraste en las imágenes.

Fig. (4b) Principio de formación de la imagen en especímenes amorfos⁵. Los núcleos de los átomos tipo B dispersan más fuerte que los átomos tipo A, haces que son interceptados por la abertura del objetivo y darán por lo tanto un contraste en la pantalla.

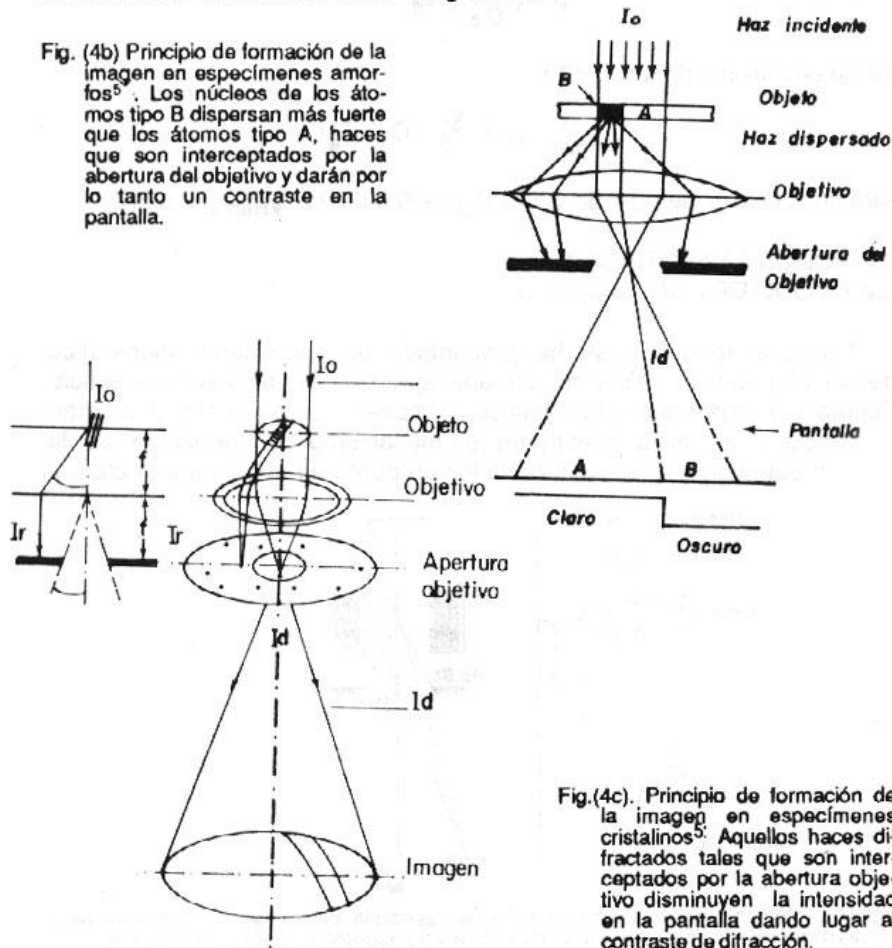


Fig.(4c). Principio de formación de la imagen en especímenes cristalinos⁵. Aquellos haces difractados tales que son interceptados por la abertura objetivo disminuyen la intensidad en la pantalla dando lugar al contraste de difracción.

Este modo de operación del microscopio se conoce como **Modo de Campo Claro**; se esquematiza en la Fig. (5a.). En el plano imagen de la lente objetivo donde se forma el primer patrón de difracción del espécimen, se coloca centrada la abertura objetivo. La lente intermedia amplifica esta primera imagen que luego con las lentes proyectoras llega a la pantalla. El diafragma de la lente objetivo puede tener una abertura del orden de 5 a 20m rad.

2.2.2 MODO DE DIFRACCION

El modo de difracción se obtiene cuando la imagen obtenida en el plano focal de la lente objetivo que contiene el primer patrón de difracción Fig. (5b) se enfoca sobre la pantalla. Esto se logra disminuyendo la excitación dada a las lentes intermedias lo cual hace que su distancia focal sea aumentada.

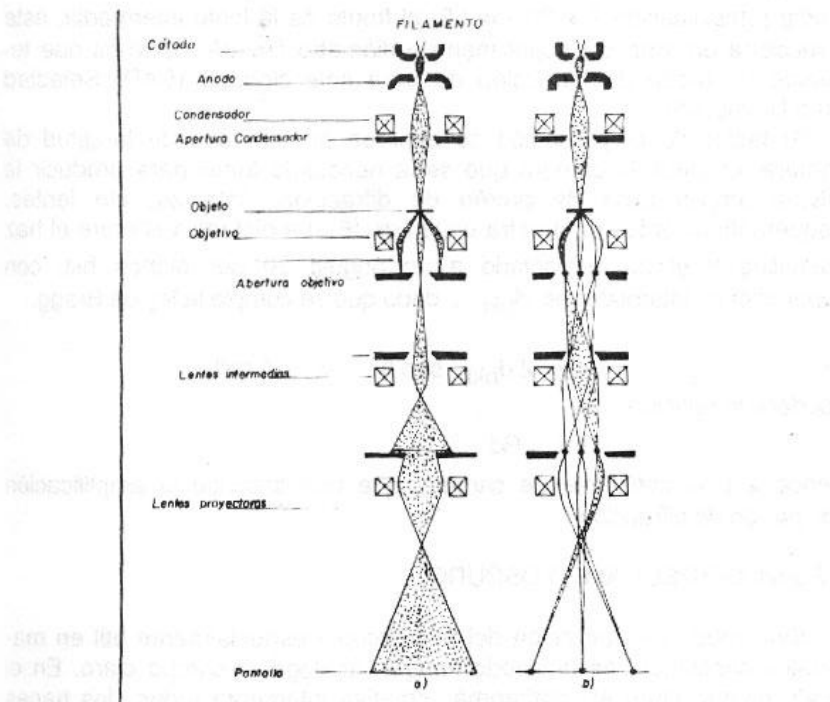


Fig.(5)Esquema de las partes que componen un microscopio electrónico de transmisión⁵ mostrando la trayectoria de los haces en el modo de campo claro y en el modo de difracción.

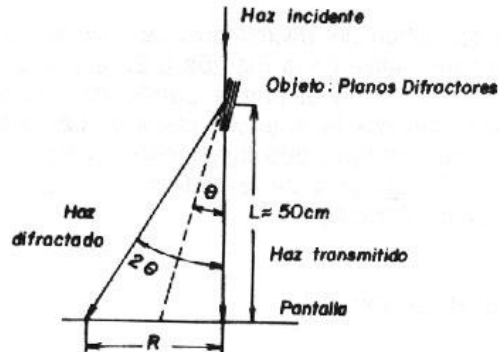


Fig. (6) Esquema que muestra la constante de cámara para la amplificación de un patrón de difracción en un TEM.⁵

La excitación de las lentes proyectoras permanece incambiable, y amplifica el segundo patrón de difracción, Fig. (5b). Si se coloca un diafragma selector de diámetro d en el plano imagen de la lente intermedia (amplificación $A \times 20 \rightarrow \times 50$) al frente de la lente intermedia, este selecciona un área del espécimen de diámetro $D \approx d/A$; decimos que tenemos un modo de difracción de área seleccionada (SAD: Selected Area Diffraction).

El factor de amplificación se expresa en términos de longitud de cámara, es decir la cámara que sería necesario tener para producir la misma amplificación de patrón de difracción, esto es, sin lentes. Esquemáticamente se muestra en la Fig. (6). La distancia R entre el haz transmitido y el haz difractado a un ángulo 2θ por planos hkl , con separaciones interplanares d_{hkl} , dado que se cumple la ley de Bragg.

$$\rightarrow n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta; \quad \theta < 1 \text{ rad}$$

obedece la relación:

$$\lambda L = Rd$$

siendo λL la constante de cámara, que nos describe la amplificación del patrón de difracción.

2.2.3 MODO DEL CAMPO OSCURO

Este modo de operación del microscopio especialmente útil en materiales cristalinos, es un modo imagen análogo al campo claro. En el modo campo claro el diafragma objetivo intercepta todos los haces difractados y solamente permite el paso del haz transmitido que forma la imagen. Cuando la abertura o diafragma del objetivo es desplazado o

intercepta el haz transmitido, entonces solamente el haz difractado que puede atravesar la abertura, Fig (7a), contribuye a la imagen, y por eso se llama campo oscuro. Esta imagen, como es lógico es de mala calidad debido a la aberración esférica y astigmatismo presentes en el haz difractado por no ir a lo largo del eje óptico. Con el fin de mantener la resolución del campo claro, lo que se hace es inclinar la iluminación incidente al espécimen el ángulo necesario, tal que el haz difractado vaya a lo largo del eje óptico, Fig (7b).

Existen otros modos de operación (haz débil, haz múltiple, microscopía de Lorentz y de barrido, microscopía analítica) menos comunes pero no por eso menos importantes, pero se salen del margen de este contexto.

2.3 CALIBRACION DE UN MICROSCOPIO

2.3.1 ALINEAMIENTO

Hay cuatro factores importantes en el control y calidad de la imagen en un microscopio.

1. Alineamiento del eje óptico de las lentes, en especial de la lente objetivo.
2. Ajuste del astigmatismo de la lente objetivo.
3. Condiciones de iluminación.
4. Inclinción del espécimen respecto al eje óptico (importantes en estudios de ciencia de materiales).

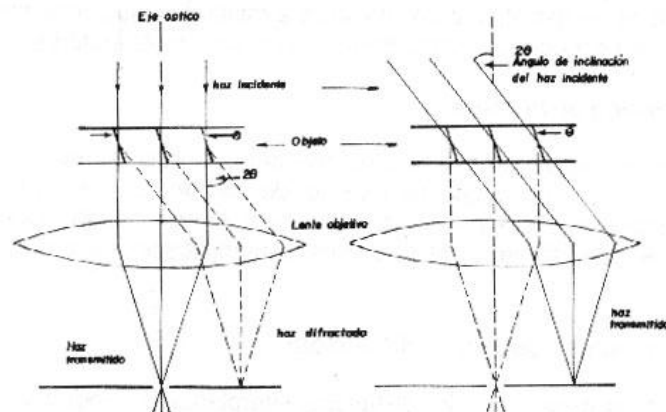
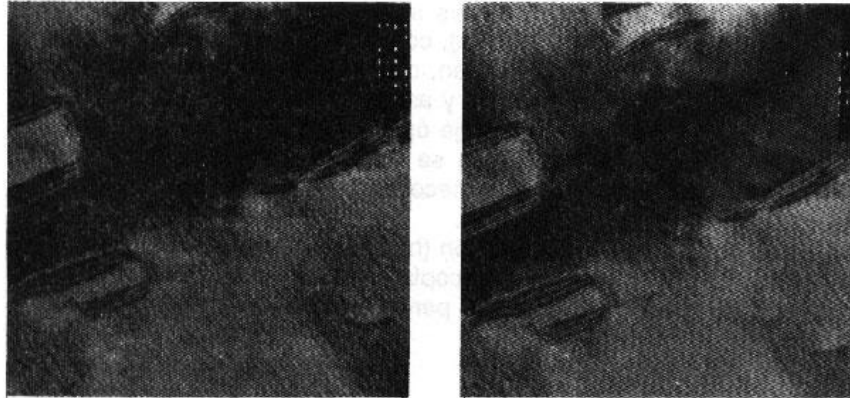


Fig. (7) Esquema que muestra la configuración de los haces incidente transmitido, difractado y la posición del diafragma de la lente objetivo para el modo de campo claro y el modo de campo oscuro ⁴. Las fotografías siguientes muestran la imagen en campo claro y campo oscuro de un espécimen de vanadio hidrogenado: En la imagen de campo oscuro solamente es claro lo que ha sido difractado por los planos hkl.



Son muy importantes todos y cada uno de estos factores, pues un mal alineamiento reduce el poder de resolución, o por malas condiciones de iluminación, se debe aumentar la intensidad del haz (disminuyendo la excitación de la primera lente condensadora) lo cual incrementa la contaminación de carbono, calienta localmente el espécimen, y la coherencia de la iluminación se reduce.

2.2.3 ANALISIS CUANTITATIVO Y CALIBRACION

Hay dos tipos de calibración: permanente y temporal, aquí nos referimos a la temporal, y para mayores exactitudes que requieren de una calibración específica, especialmente a los siguientes factores:

1. Amplificación de la Imagen:

Cuando se requieren precisiones menores al $\pm 2\%$ se requiere una calibración in situ con ayuda de réplicas de carbono por ejemplo, donde es posible con alto poder de resolución contar desde 600 hasta 2160 líneas por milímetro, observables a amplificaciones entre 100 y 200.000x.

2. Amplificación del patrón de difracción:

Cuando se desea calcular distancias interplanares o identificar patrones de difracción para identificar fases se requieren precisiones del $\pm 1\%$ hasta 0.1%. La calibración de la constante λL se puede lograr con especímenes muy estables como oro evaporado o cloruro de talio.

3. Angulo de rotación entre patrón de difracción e Imagen:

Especialmente útil en Ciencia de Materiales para la orientación de defectos o precipitados en la matriz cristalina. Se usan para la clibración monocristales de trióxido de Molibdeno.

Los factores que principalmente influyen en la descalibración del microscopio son la variación en la corriente de las lentes que cambia su magnetización; y la estabilidad y reproducibilidad de los voltajes aplicados (el voltaje acelerador por ejemplo, que influye fundamentalmente en la longitud de onda de los electrones).

3. MECANISMO DE FORMACION DE LA IMAGEN

3.1 INTERACCION DE LA RADIACION DE ELECTRONES CON LA MATERIA

Quando un haz de electrones incide sobre la materia, existen diferentes interacciones que dan lugar a la dispersión del haz incidente. En la Fig. (8) se pueden observar el haz incidente reflejado y trasmitido. La

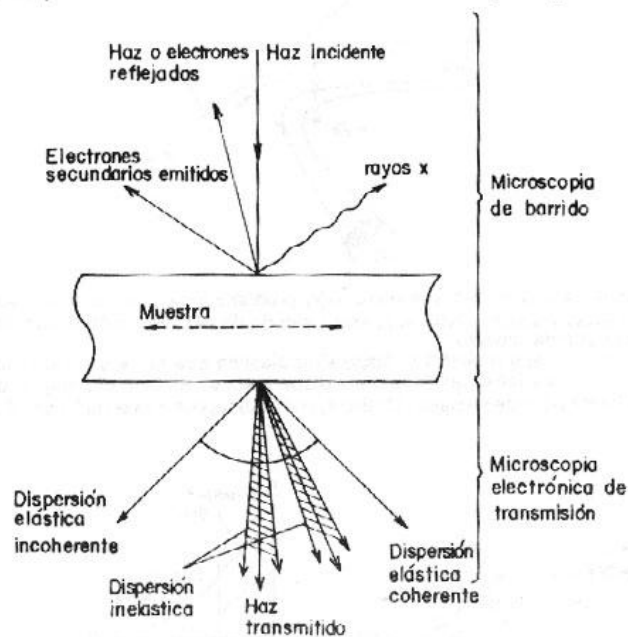


Fig. (8) Mecanismo de interacción de un haz de electrones con la materia: retrodispersión, dispersión coherente e incoherente y dispersión elástica e inelástica, emisión de electrones secundarios y fotones².

interacción puede ser elástica o inelástica, y en materiales cristalinos tendremos dispersión coherente e incoherente. El análisis de cada tipo de haz dispersado nos provee información sobre la estructura atómica del material. En microscopía electrónica de transmisión analizamos el haz transmitido, los haces dispersados elástica y coherentemente, y también los dispersados inelástica y coherentemente.

La dispersión elástica es la interacción que mayor contribución tiene en el contraste de una imagen de microscopía electrónica. Esta dispersión se puede describir con el concepto de sección eficaz: los electrones al ser dispersados por el núcleo de los átomos debido a la interacción coulombiana, describen una trayectoria hiperbólica, cuya curvatura va a depender de la mínima distancia que las dos partículas se aproximen, o parámetro de impacto; entre mayor sea la distancia menor es el ángulo de dispersión θ , Figura (9a). Desde el punto de vista ondulatorio, cuando incide una onda plana sobre el átomo A, este actúa como una nueva fuente puntual de ondas secundarias que se propaga formando un ángulo 2θ con la radiación incidente, Fig. (9b). La

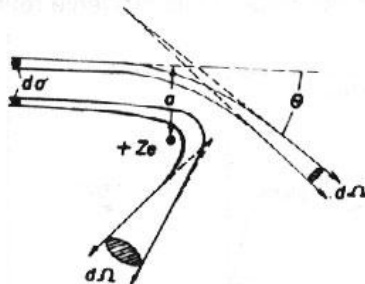
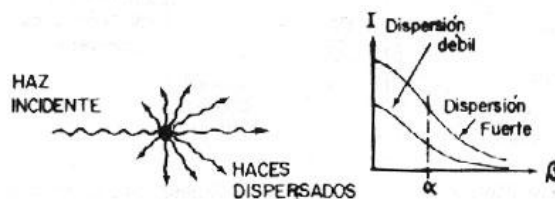


Fig.(9a) Esquema que muestra la dispersión predominante que sufre un haz de electrones cuando interactúa con un átomo siendo $d\sigma/d\Omega$ la sección eficaz diferencial y a el parámetro de impacto.

Fig. (9b) Esquema que muestra la dispersión elástica que sufre una onda (o un haz) de electrones: la intensidad de la onda dispersada es función del ángulo de dispersión de la forma β/λ y de su peso atómico z , como se representa en la Figura 9-c.



eficiencia de dispersión del átomo se describe en términos del factor de dispersión que depende del ángulo de dispersión θ y de la longitud de onda λ en la forma θ/λ , Fig. (9c) y del peso atómico z del átomo dispersor. La dispersión a ángulos grandes es absorbida por la abertura del objetivo, lo cual causa un decrecimiento en la intensidad transmitida. Este tipo de contraste se conoce como contraste de dispersión.

En un material cada átomo es fuente de ondas secundarias, las cuales se superpondrán y darán lugar a efectos de interferencia, es decir máximos y mínimos de intensidad dependiendo de la diferencia de fase de las ondas superpuestas en un punto dado del espacio. Si el material es amorfo éste produce un contraste de fase, Fig. 10-b, y si es cristalino, dado su arreglo atómico periódico la diferencia de caminos Δr entre ondas dispersadas por planos vecinos, separados una distancia d , Fig. 10c, interfieren constructivamente ($\Delta r = n\lambda$) si cumple con la ley de Bragg expresada de la forma, Fig. 11a.:

$$\lambda n = 2d_{hkl} \text{ sen } \theta$$

y es la mayor contribución al llamado contraste de difracción en la formación de la imagen de especímenes cristalinos. d_{hkl} es la diferencia entre planos cristalográficos paralelos. La ley de Bragg nos da el camino teórico para la interpretación de las imágenes obtenidas, y para el análisis cuantitativo del patrón de difracción Fig. 11-b y c y las constantes de red del material, claro está en especímenes cristalinos.

3.2 TEORIA CINEMATICA Y TEORIA DINAMICA

La obtención de la ley de Bragg tiene en cuenta que la intensidad dispersada en una dirección \vec{k} del espacio para todos los átomos de un cristal c , es proporcional a la superposición de todas las ondas secundarias emitidas por un átomo. Así la solución a esto es una función que depende de la forma del cristal, su orientación con respecto al haz incidente \vec{k}_0 , y la dirección de observación del haz dispersado \vec{k} , Fig. (11b).

Este tratamiento tan simple nos permite sin embargo, interpretar fenómenos o imágenes tales como el contraste de franjas en cristales en forma de cuña Fig (12), la longitud y el contraste de dislocación, Fig. (14). Esto es válido cuando la intensidad dispersada I_r es prácticamente nula y la intensidad del haz transmitido I_t es prácticamente la

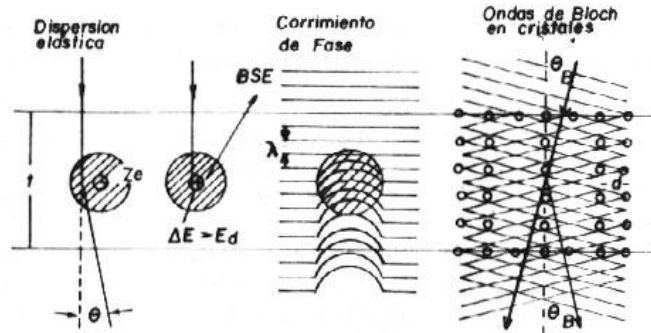


Fig. (10) Esquema que muestra la interacción elástica entre el haz de electrones y el espécimen: a) dispersión a ángulo pequeño y retrodispersión. b) Corrimiento de fase que experimenta la onda debido a la interacción coulombiana con los núcleos de los átomos del material. c) Si el potencial coulombiano es periódico como en el caso de materiales y cristalinos, la onda asociada al haz de electrones se propaga y difracta como onda de Bloch.

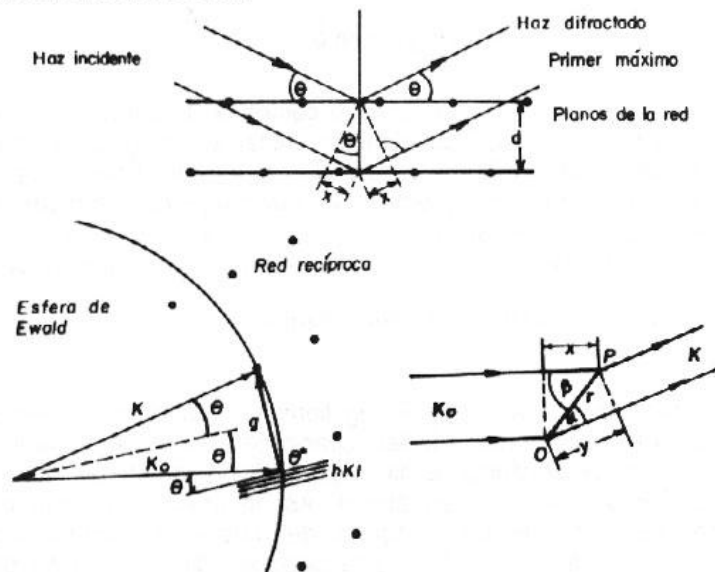


Fig. (11) a) Esquema que muestra la condición de Bragg para un par de planos hkl de un cristal separados una distancia d , cuando incide una onda con un ángulo θ con respecto al cristal; si la diferencia de caminos de un múltiplo entero de $n\lambda$, hay un máximo de intensidad.
 Fig. b y c Esquema que muestra la red recíproca de un cristal y la construcción de la esfera de Ewald para un haz que incide con dirección k_0 y es dispersado con dirección k , Fig. 9-b, de tal manera que se cumple la condición de Bragg cuando $k - k_0 = g$ es perpendicular a los planos que han dispersado el haz, siendo g un vector de la red recíproca.

intensidad del haz incidente I_0 , $I_r \ll I_0$. Sin embargo, cuando $I_r \lesssim I_0$, por ejemplo cuando se está en la condición exacta de Bragg, o cuando hay retrodispersión lo que aumenta la intensidad incidente, la teoría cinemática ya no es completamente válida, sino que esos efectos los trata lo que se le conoce como la teoría dinámica de la difracción, cuyo tratamiento exacto requiere la solución exacta de la ecuación de Schrodinger.

Un mejor entendimiento del tratamiento, y sus efectos sobre la interpretación de la imagen en estas dos teorías, se sale del contexto de esta charla.

4. PRINCIPALES APLICACIONES E INVESTIGACIONES TIPICAS

4.1 CONTRASTE DE DIFRACCION E IMAGEN DE ESTRUCTURAS CRISTALINAS

Una imagen de un cristal se puede obtener con el haz transmitido, es decir imagen de campo claro; o con uno de los haces difractados, es decir, imagen de campo oscuro. La intensidad transmitida depende del espesor, dando lugar a las franjas de espesor Fig. (12), y de la orientación de los planos cristalinos con respecto al haz incidente, dando lugar a las franjas de curvatura (bond contours). Fig. (13).



Fig. 12

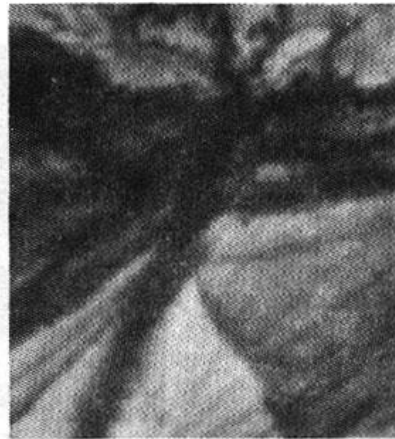


Fig. 13

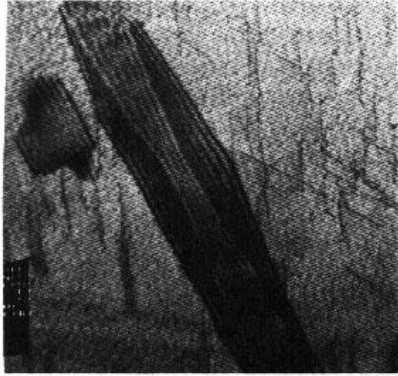


Fig.14

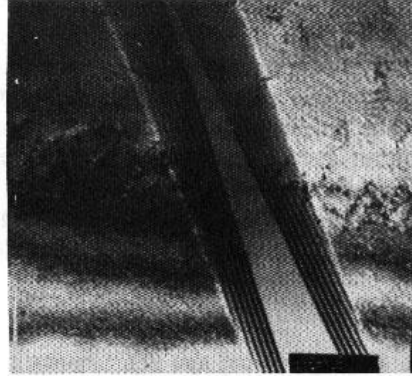


Fig. 15

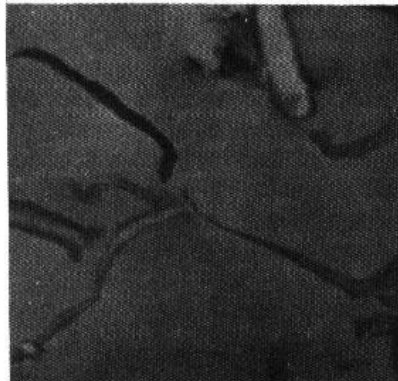


Fig. 16

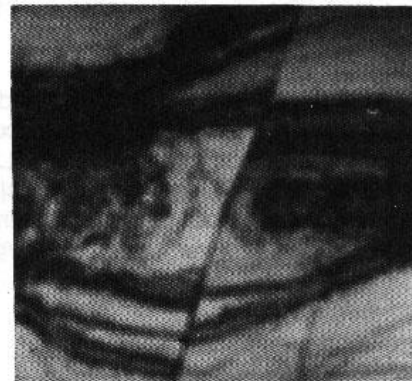


Fig. 17

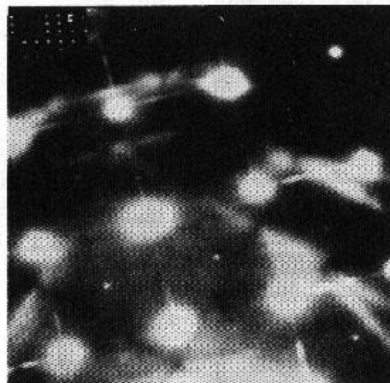


Fig. 18

Entre las aplicaciones más importantes del contraste de difracción está la obtención de imágenes de defectos cristalinos, tales como dislocaciones, Fig. (14), fallas de apilamiento Fig. (15), fronteras antifase o de granos, Fig. (16), que permiten obtener información de la microestructura y morfología de estos tipos de defectos en ciencias de materiales.

4.2 CONTRASTE DE FASE Y MICROSCOPIA DE ALTA RESOLUCION

La superposición coherente del haz y un haz difractado da una imagen de plano de la red. La formación de este tipo de imagen es debido a un contraste de fase, útil en la microscopía de planos cristalinos, conocida como microscopía de alta resolución, y en la observación y análisis de especímenes amorfos.

4.3 MODO DE DIFRACCION

En el modo de difracción se pueden obtener tres tipos de patrones: Anillos, puntos y líneas Kikuchi. Los anillos de difracción aparecen en el caso de materiales con tamaño de grano muy pequeño o con alto grado de policristalinidad, como en el caso de materiales crecidos en forma de película delgada, cuya orientación de planos cristalinos de un grano a otro es al azar. En este caso el patrón de difracción producido se compone de conos que al corte con el plano de la película producen anillos concéntricos, cada uno correspondiendo a un plano de la red específica hkl , Fig. (17). El mayor uso consiste básicamente en la identificación de las fases que existen dentro del material.

En el caso de especímenes monocristalinos o policristalinos pero con un tamaño de grano lo suficientemente grande, el patrón de difracción obtenido son puntos o reflexiones cada uno correspondiendo a un conjunto de planos hkl Fig. (18). Este tipo de patrón de difracción es de gran utilidad en investigaciones de ciencia de materiales, pues permite entre otras cosas obtener información en los siguientes aspectos:

1. Orientación del haz con respecto al espécimen.
2. Orientaciones relativas entre fases, entre granos, de fases o precipitados con respecto a la matriz, etc.
3. Identificación de precipitados, fases.
4. Detalles de los defectos estructurales de especímenes y su orientación (vector de burger de dislocaciones).

En el caso de especímenes monocristalinos de alta perfección o densidad de defectos muy bajos, se obtienen las líneas Kikuchi, que entre otros aspectos son de gran utilidad en investigaciones metalúrgicas, pues representan una gran ayuda al microscopista por ejemplo en la determinación de la condición exacta de Bragg, o en su caso del signo de la desviación de la condición de Bragg, etc.

En especímenes biológicos, que son de carácter amorfo en general, el contraste obtenido es debido esencialmente a un contraste de dispersión. Permite obtener imagen e información microestructural y morfología de diferentes materiales biológicos (células y sus partes, virus, y sus partes, etc.) y es de gran utilidad al microscopista en investigaciones biológicas.

5. CONCLUSIONES

El microscopio electrónico es una herramienta fundamental para la investigación en diferentes campos de la ciencia, cuando se trata de analizar, de observar, partículas microscópicas o, en el caso de Ciencias de Materiales, los precipitados o defectos de la red. En este último caso tal vez el uso más importante es el análisis cristalográfico de los materiales.

6. DESCRIPCION DE LAS FOTOGRAFIAS

- Figura 12. Micrografía que muestra el contraste de franjas de espesor
- Figura 13. Micrografía que muestra los contornos en cristales curvados.
- Figura 14. Micrografía que muestra la imagen de una dislocación.
- Figura 15. Micrografía que muestra la imagen característica de fallas de apilamiento.
- Figura 16. Micrografía que muestra la imagen característica de una frontera antifase (a) y frontera de grano (b).
- Figura 17. Patrón de difracción característico de un espécimen policristalino.
- Figura 18. Patrón de difracción característico de un espécimen monocristalino.

7. BIBLIOGRAFIA

1. J.W. Edington. Practical Electron Microscopy in Material Science: Electron diffraction in the Electron Microscope. McMillan Philips Technical Library ,1975.
2. Heidenreich R. D. Fundamentals of transmission Electron Microscopy interscience Publishers N. Y., 1964.
3. Andrews K.W., Dyson D. J., S. R. Kaown. Interpretation of Electron Diffraction Pattern. Hilger-Watss-London-1967
4. J.W. Edington. Practical Electron Microscopy in Material Science; The Operational and Calibration of the electron microscope.
5. M.V. Heimendahl. Einführung in die Elektronenmicroscopie: Grundlagen, Forschungund Entwicklung. Werkstoffkunde, 1970..
6. B. Beeston R. Horne, R. Markhan. Practical Methods in electron Microscopy. Ed. by Andrey Glausest. North Holland, 1972.
7. Ludwig Reimer. Trnsmision Electron Microscopy; Physics of Image Formation and Microanalysis. Springen Series in Optical Sciences-Springer Verlag, 1984.