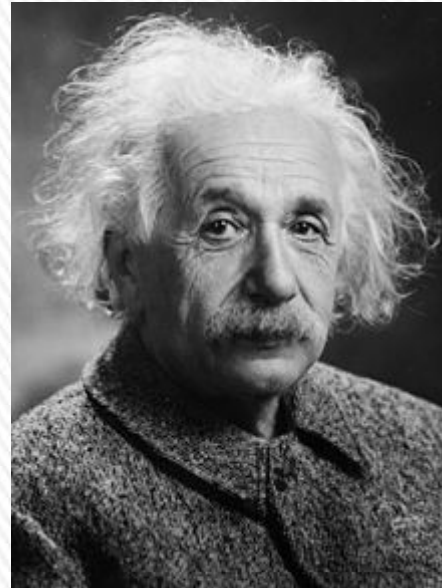


## 6.3- FÍSICA MODERNA



**Max Planck**  
(1858-1947).  
Nobel de Física 1918  
Considerado como el fundador de la teoría cuántica (1900)



**Albert Einstein**  
(1879-1955).  
Nobel de Física 1921  
Autor de la Teoría de la Relatividad,  
explicación del efecto fotoeléctrico.



**Louis Víctor de Broglie**  
(1892-1987).  
Nobel de Física 1929  
Ondas de materia,  
descubrimiento ondulatorio del electrón.

**Niels Bohr**  
(1885-1962).  
Nobel de Física 1922  
Estructura del átomo y mecánica cuántica

# LÍMITES DE LA FÍSICA CLÁSICA

Hacia fines del siglo XIX, muchos consideraban la física como una ciencia acabada. Se comprendían bien las leyes del movimiento y del electromagnetismo, incluidas las ondas luminosas, y parecía que tan sólo problemas experimentales y de cálculo podrían dificultar ulteriores progresos.

Sin embargo, transcurridos tan sólo 20 años del siglo XX, esta descripción del mundo físico se vio profundamente conmocionada.

Los problemas no resueltos en 1900 sólo resultaron explicables mediante hipótesis drásticas sin precedentes históricos.

La ilusión de una ciencia completa resultó ser tan sólo el fruto de una falta de experiencia con partículas de tamaño atómico y con objetos en movimiento con velocidades próximas a la de la luz.

Hacia 1912, los trabajos de Max Planck, Niels Bohr y Albert Einstein habían proporcionado una nueva imagen del mundo.

Establecieron los ingredientes iniciales pero cruciales de lo que hoy se conoce como mecánica cuántica.

Durante el mismo período, Einstein también desarrolló la teoría especial de la relatividad.

La mecánica cuántica y la relatividad son la base actual de nuestra comprensión de la naturaleza.

Como sus predicciones concuerdan con muchos tipos de experimentos, se deben considerar no como meras especulaciones sino como una descripción en gran parte correcta de la naturaleza.



# LÍMITES DE LA FÍSICA CLÁSICA

Esbozaremos los conceptos de la naturaleza corpuscular de la luz y la naturaleza ondulatoria de la materia.

Se debe reconocer desde el principio que mientras la “física moderna” nos ha obligado a cambiar nuestra filosofía de los procesos naturales, los procedimientos de la vieja “física clásica” siguen siendo esencialmente correctos en ciertas condiciones.

Éstas son que los objetos en consideración sean mucho mayores que los átomos y que sus velocidades sean mucho menores que las de la luz.

Casi todas las situaciones que hemos visto hasta ahora cumplían estas condiciones.

La mayor parte de las experiencias y observaciones cotidianas tienen que ver con objetos que se mueven con velocidades mucho menores que la velocidad de la luz.

La mecánica newtoniana se formuló para describir el movimiento de tales objetos y su formalismo es bastante exitoso para describir un amplio rango de fenómenos que ocurren a bajas velocidades.

Sin embargo, fracasa cuando se aplica a partículas que tienen velocidades que se aproximan a la de la luz. Experimentalmente, por ejemplo, es posible acelerar un electrón a una velocidad de  $0,99c$  (donde  $c$  es la velocidad de la luz) con el uso de una diferencia de potencial de muchos millones de volts.

De acuerdo con la mecánica newtoniana, si la diferencia de potencial aumenta por un factor de 4, la energía cinética del electrón es cuatro veces mayor y su velocidad debe duplicarse a  $1,98c$ .

# LÍMITES DE LA FÍSICA CLÁSICA

Sin embargo, los experimentos demuestran que la velocidad del electrón, así como la velocidad de cualquiera otra partícula que tenga masa, siempre permanece *menor que la velocidad* de la luz, sin importar el tamaño del voltaje acelerador.

La existencia de un límite de velocidad universal tiene consecuencias de largo alcance. Significa que los conceptos usuales de fuerza, cantidad de movimiento y energía ya no se aplican para objetos que se mueven rápidamente.

Una consecuencia menos obvia es que los observadores que se mueven con diferentes velocidades medirán diferentes tiempos y desplazamientos entre los mismos dos eventos.

Relacionar las mediciones realizadas por diferentes observadores es el tema de la **Relatividad** y permitió resolver el “problema del éter”.

Aunque muchos problemas se resolvieron con la teoría de la relatividad en la primera parte del siglo XX, muchos otros permanecieron sin resolverse.

Los intentos por explicar el comportamiento de la materia a nivel atómico con las leyes de la física clásica fueron fallidos.

Varios fenómenos, como la radiación electromagnética emitida por un objeto caliente (radiación de cuerpo negro), la emisión de electrones mediante metales iluminados (el efecto fotoeléctrico) y la emisión de líneas espectrales características de átomos de gas en un tubo de descarga eléctrica, no se podían comprender dentro del marco conceptual de la física clásica.



# LÍMITES DE LA FÍSICA CLÁSICA

Sin embargo, entre 1900 y 1930, una versión moderna de la mecánica, llamada **Mecánica Cuántica** o *mecánica ondulatoria*, tuvo enorme éxito para explicar el comportamiento de átomos, moléculas y núcleos.

Las primeras ideas de la teoría cuántica las introdujo Planck y la mayoría de los desarrollos matemáticos posteriores, interpretaciones y mejoras las realizaron otros físicos: Einstein, Bohr, Schrödinger, de Broglie, Heisenberg, Born y Dirac. Los problemas que plantearon los denominados “límites de la física clásica” se pueden sintetizar en los siguientes:

**a) El problema del éter y la incompatibilidad de la mecánica clásica y**

**el electromagnetismo** (la no invarianza de las ecuaciones de Maxwell ante las transformaciones galileanas) surgido a partir de los experimentos de Michelson y Morley que mostraron la invarianza de la velocidad de la luz, lo cual fue resuelto por la teoría de la Relatividad de Einstein

**b) La catástrofe ultravioleta.** De acuerdo a la teoría clásica de la radiación del cuerpo negro (objeto capaz de absorber toda la radiación que le llega sin reflejar nada)), elaborada por Rayleigh-Jeans se predice que la radiación crece indefinidamente con la frecuencia, lo cual contradecía los resultados experimentales; que se resolvió por Max Plank al plantear la cuantización de la energía.

**c) El efecto fotoeléctrico-** la emisión de electrones por un material al incidir sobre él una radiación electromagnética, que no puede ser explicada por la teoría clásica de ondas electromagnéticas, y resuelto por Einstein.

# LÍMITES DE LA FÍSICA CLÁSICA

**d) Problema de la estabilidad del átomo,** en su evolución de los modelos del pastel de pasas (electrón descubierto en 1897) y el modelo planetario de Rutherford (que con los experimentos de Geiger y Marsden en 1911 bajo supervisión de Rutherford descubren el núcleo atómico).

De acuerdo a la teoría clásica los electrones al estar acelerados radiarían energía y terminarían colapsando sobre el núcleo. Resuelto por Niels Bohr con su modelo para el átomo de hidrógeno.





# CUANTIZACIÓN DE LA ENERGÍA

Cuando se examina con atención la emisión, absorción y dispersión de la radiación electromagnética, descubrimos un aspecto totalmente distinto de la luz.

Vemos que la energía de una onda electromagnética está **cuantizada**: se emite y absorbe en forma de paquetes semejantes a partículas de energía definida, llamados **fotones o cuantos**.

***La energía de un solo fotón es proporcional a la frecuencia de la radiación.***

También la energía interna de los átomos está cuantizada. Para una determinada clase de átomo individual, la energía no puede tener un valor cualquiera; sólo son posibles valores discretos, llamados **niveles de energía**.

Las ideas básicas de fotones y de niveles de energía nos ahorran un buen camino hacia la comprensión de una gran variedad de observaciones que de otra forma serían enigmáticas.

Entre ellas están los conjuntos únicos de longitudes de onda que emiten y absorben los elementos en estado gaseoso, la emisión de electrones desde una superficie iluminada, el funcionamiento de los láseres y la producción y dispersión de los rayos X.

Estos estudios de fotones y de niveles de energía nos llevan al umbral de la **mecánica cuántica**, que *implica tener algunos cambios radicales en nuestras ideas sobre la naturaleza de la radiación electromagnética y de la materia misma.*

# COMPORTAMIENTO CORPUSCULAR DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

## EMISIÓN Y ABSORCIÓN DE LA LUZ

¿Cómo se produce la luz?

Heinrich Hertz produjo ondas electromagnéticas al usar oscilaciones en un circuito resonante  $L-C$ .

Usó frecuencias del orden de  $10^8$  Hz, pero la luz visible tiene frecuencias del orden de  $10^{15}$  Hz, es decir, mucho mayores que cualquier frecuencia que pueda alcanzarse con los circuitos electrónicos convencionales.

Al final del siglo XIX, algunos físicos especulaban que las ondas en este intervalo de frecuencias podrían ser producidas por cargas eléctricas oscilantes dentro de átomos individuales.

**Sin embargo, sus hipótesis no explicaban algunos resultados experimentales clave.**

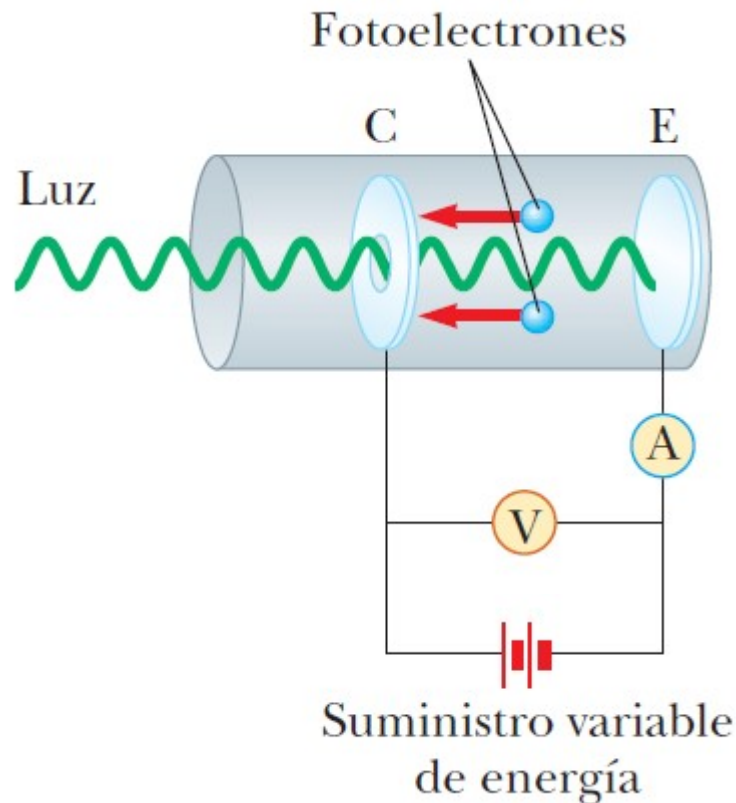
**Entre los grandes desafíos que enfrentaban los físicos en 1900 estaban cómo explicar:**

*los espectros de líneas,  
el efecto fotoeléctrico y  
la naturaleza de los rayos X.*





# EFEECTO FOTOELÉCTRICO



En 1887 Heinrich Hertz descubre este fenómeno: la luz que incide sobre ciertas superficies metálicas provoca la emisión de electrones de éstos (**fotocorrientes**).

Un tubo de vidrio al vacío (fotocelda), contiene una placa metálica E (el emisor) conectado a la terminal negativa de una fuente de energía variable.

Otra placa metálica, C (colector), se mantiene a un potencial positivo mediante la fuente de energía.

Cuando el tubo se conserva en la oscuridad, el amperímetro lee cero, lo que indica que no hay corriente en el circuito.

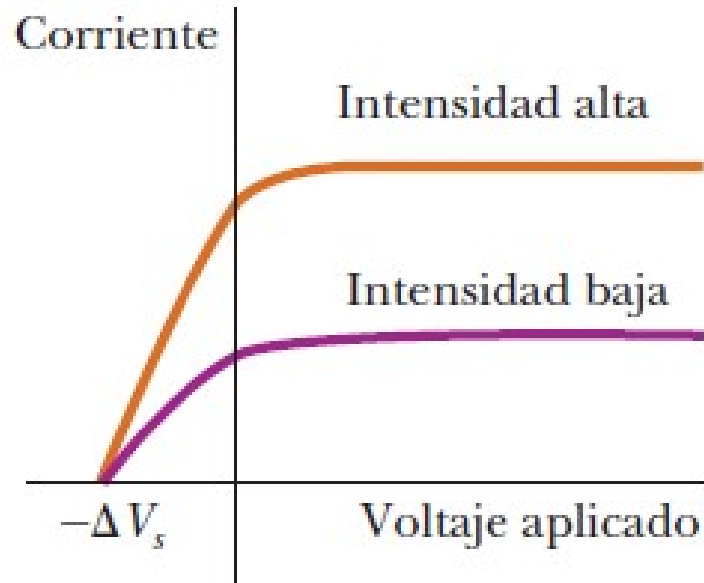
Sin embargo, cuando la placa E se ilumina con luz que tiene una  $\lambda$  más corta que cierta  $\lambda$  particular que depende del material utilizado para formar la placa E, el amperímetro detecta una corriente, lo que indica un flujo de cargas a través de la diferencia entre E y C.

Esta corriente surge de los fotoelectrones emitidos de la placa negativa E y recolectados en la placa positiva.



Los diversos experimentos se pueden resumir en las dos gráficas siguientes.

# EFEECTO FOTOELÉCTRICO



Corriente fotoeléctrica en función de la diferencia de potencial aplicada a dos intensidades de luz.

La corriente aumenta al incrementar la intensidad, pero con valores altos de  $V$  llega a un nivel de saturación.

Con voltajes iguales o más negativos que  $V_s$ , en donde  $V_s$  es el potencial de frenado, la corriente es igual a cero.

## Resultados experimentales:

Si  $V$  se hace suficientemente grande la corriente alcanza cierto valor de saturación.

Si el voltaje se invierte, la corriente no cae a cero, lo que muestra que los electrones son emitidos con una cierta energía cinética  $K$ .

Si se alcanza cierto valor  $V_s$  (**potencial de frenado**), corriente se anula. Por tanto es una medida de la **energía cinética máxima ( $K_{MÁX}$ )**

$$K_{MÁX} = eV_s \quad (1)$$

El valor de  $K_{MÁX}$  es independiente de la intensidad luminosa  $I$ .



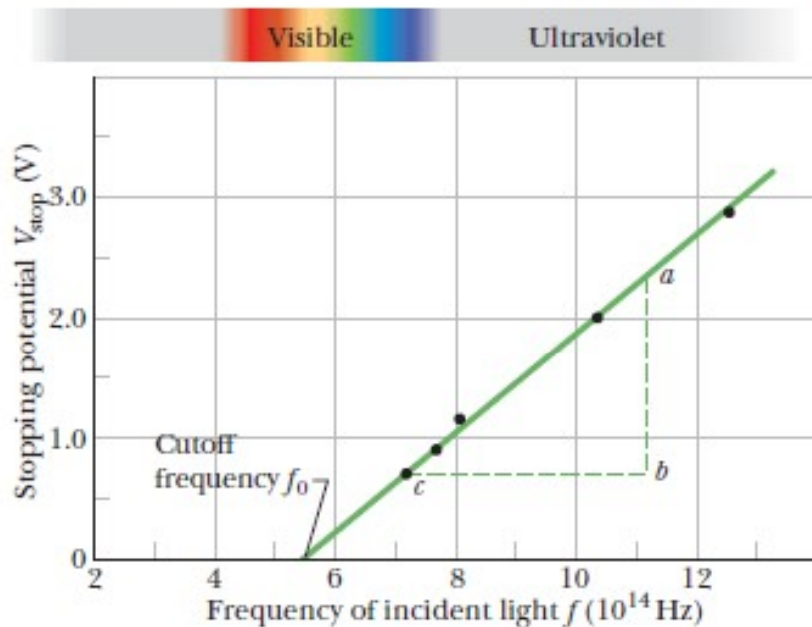
# EFEECTO FOTOELÉCTRICO

## Potencial retardador- frecuencia de luz incidente

Electrons can escape only if the light frequency exceeds a certain value.

The escaping electron's kinetic energy is greater for a greater light frequency.

Existe una frecuencia  $f_U$ , llamada **frecuencia de corte o umbral** por debajo de la cual no ocurre efecto fotoeléctrico.



El potencial de frenado  $V_{STOP}$  como una función de la frecuencia  $f$  de la luz incidente sobre un blanco de sodio.

### Hechos que no puede explicar la teoría electromagnética clásica:

1.  $K_{MAX}$  de los electrones arrancados de la placa es independiente de la intensidad de iluminación  $I$  ( $V_S$  no depende de  $I$ ).
2. Para frecuencias menores a  $f_U$  no ocurre el fenómeno fotoeléctrico cualquiera sea el valor de  $I$ .
3. Emisión casi instantánea ( $< 10^{-9}$  s después de que se ilumina incluso con intensidades de luz muy bajas).
4.  $K_{MAX}$  de los fotoelectrones aumenta al incrementarse la frecuencia de la luz.

# EFEECTO FOTOELÉCTRICO

## Explicación de Einstein (1905)

La luz viaja en el espacio en forma de “paquetes de onda” llamados **fotones** cuya energía está cuantizada y vale:  $E = h.f$  (2)

Siendo  $h$  la constante de Planck:  $h = 6,626 \times 10^{-34}$  J.s y  $f$  la frecuencia.

Cuando el fotón incide sobre la placa, su energía se invierte:

- trabajo de extracción del electrón ( $\phi$  **función trabajo** energía mínima necesaria para que un electrón escape de las fuerzas atractivas del metal característica del metal de la placa) y,
- proporcionarle energía cinética  $K$ .

Si el electrón no colisiona cuando escapa (no “hay pérdidas”) se cumple:

$$h.f = K_{MÁX} + \phi \quad (3)$$

Si se duplica la intensidad de la iluminación se duplica en número de fotones incidentes y por tanto también los electrones arrancados, lo que duplica la corriente de saturación.

El potencial de frenado ( $V_S \approx K_{MÁX}/e$ ) es independiente del número de fotones, y por tanto de la intensidad de iluminación  $I$ .

$$h.f = eV_S + \phi \quad V_S = (h.f / e) - (\phi / e)$$



# FOTONES Y ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

El efecto fotoeléctrico y otros fenómenos muestran que cuando la radiación electromagnética interactúa con la materia, se comporta como si estuviera compuesta de partículas:

con energía  $E = hf$  y *cantidad de movimiento*  $p = h/\lambda$ .

La luz se describe en términos de fotones con cierta energía y cantidad de movimiento.

La luz y otras ondas electromagnéticas exhiben efectos de interferencia y de difracción, que son entendibles solo mediante una interpretación ondulatoria.

Hay que **necesita aceptar ambos modelos y admitir que no es posible describir la naturaleza verdadera de la luz en función de ninguna concepción clásica única.**

**El modelo de partícula y el modelo ondulatorio de la luz se complementan.**

# PROPIEDADES ONDULATORIAS DE LA MATERIA

Todas las observaciones a gran escala pueden ser interpretadas considerando ya sea una explicación ondulatoria o una explicación de partículas, pero en el mundo de los fotones y de los electrones, esta distinción no está hecha con tanta claridad. Todavía más desconcertante es el hecho de que, bajo ciertas condiciones, éstas que sin ninguna ambigüedad se identifican como “partículas” **¡exhiben características ondulatorias!**

En su disertación doctoral en 1923, Louis de Broglie postuló que **ya que los fotones tienen a la vez características ondulatorias y de partículas, es posible que todas las formas de la materia tengan ambas propiedades.**

Esta era una idea en extremo revolucionaria que en esas fechas no tenía confirmación experimental.

Según De Broglie, los electrones, justo igual que la luz, tienen una naturaleza dual partícula-onda.

La cantidad de movimiento de un fotón puede ser expresada de la forma:  $p = \frac{h}{\lambda}$

Esta ecuación muestra que la longitud de onda del fotón puede especificarse por su cantidad de movimiento:  $\lambda = h/p$ .





# PROPIEDADES ONDULATORIAS DE LA MATERIA

De Broglie sugirió que las partículas materiales que tengan una cantidad de movimiento  $p$  tienen una longitud de onda característica dada por la misma expresión,  $\lambda = h/p$ .

Como  $p = mv$  es la magnitud de la cantidad de movimiento de una partícula de masa  $m$  y de rapidez  $v$  De Broglie sugirió que las partículas materiales que tengan una cantidad de movimiento  $p$  tienen una longitud de onda característica (**longitud de onda de De Broglie**) de dicha partícula es igual a:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

Además, en analogía con los fotones, De Broglie postuló que las partículas obedecen la relación de Einstein  $E = hf$ , donde  $E$  es la energía total de la partícula. En tal caso, la frecuencia de una partícula es

$$f = \frac{E}{h}$$

La naturaleza dual de la materia resulta evidente en estas dos últimas ecuaciones, ya que cada una contiene a la vez conceptos de partículas ( $p$  y  $E$ ) y cantidades ondulatorias ( $\lambda$  y  $f$ ).

Si se consideran efectos relativistas:  $p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$



# PROPIEDADES ONDULATORIAS DE LA MATERIA

El hecho de que estas relaciones se establecieran experimentalmente para fotones hizo que la hipótesis de De Broglie se aceptara con más facilidad.

El experimento Davisson-Germer en 1927 confirmó la hipótesis de De Broglie al demostrar que los electrones que se dispersan de cristales forman un patrón de difracción.

Los planos regularmente espaciados de los átomos en regiones cristalinas de un blanco de níquel actúan como una rejilla de difracción para ondas de materia de electrones.

**Ejemplo:** a) Comparar la  $\lambda$  de De Broglie para un electrón ( $m_e = 9,11 \times 10^{-31}$  kg) que se mueve con una velocidad igual a  $1,00 \times 10^7$  m/s, con la de una pelota de béisbol de 0,145 kg de masa que se lanza a 45,0 m/s.

$$\lambda_e = \frac{h}{m_e v} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{(9,11 \times 10^{-31})(1,00 \times 10^7)} = 7,28 \times 10^{-11} \text{ m}$$

$$\lambda_b = \frac{h}{m_b v} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{(0,145)(45,0)} = 1,02 \times 10^{-34} \text{ m}$$

La longitud de onda del electrón corresponde a la de los rayos X en el espectro electromagnético. La pelota de béisbol, en contraste, tiene una longitud de onda mucho menor que cualquier abertura a través de la cual posiblemente pudiera pasar la pelota, de modo que no se podrían observar efectos de difracción.

Por lo general es cierto que las propiedades ondulatorias de los objetos a gran escala no se pueden observar.



# Microscopio electrónico

Es un dispositivo práctico basado en las propiedades ondulatorias de los electrones.

La figura muestra un **microscopio electrónico de transmisión**, usado para ver delgadas muestras planas.

Tiene un poder de resolución mucho mayor que el óptico porque puede acelerar electrones a energías cinéticas muy altas, lo que les da  $\lambda$  muy cortas.

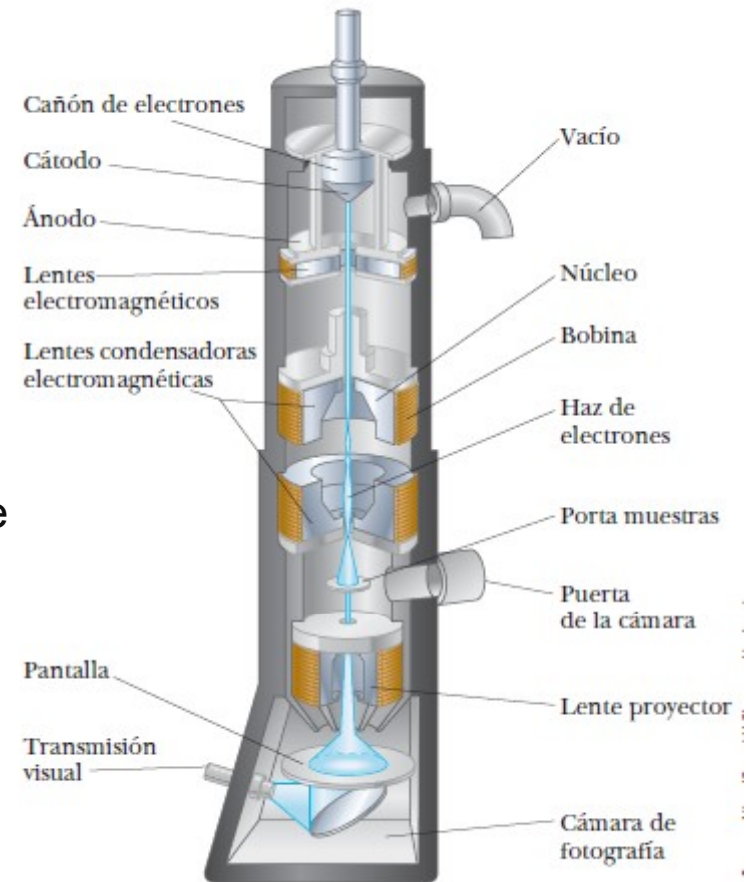
Ningún microscopio puede resolver detalles que sean significativamente menores que la  $\lambda$  de la radiación que se usa para iluminar el objeto.

Las  $\lambda$  de los electrones en un microscopio electrónico son menores que las  $\lambda$  visibles por un factor de más o menos  $10^{-5}$ .

El haz de electrones en un microscopio electrónico se controla mediante desviación electrostática o magnética, que actúa sobre los electrones para enfocar el haz a una imagen.

Sin embargo, debido a limitaciones en las lentes electromagnéticas usadas, la mejora en resolución sobre los microscopios ópticos sólo es de un factor aproximado de dos órdenes de magnitud menor que el implicado por la longitud de onda del electrón.

En lugar de examinar la imagen a través de un ocular como en el óptico, el observador mira una imagen formada sobre una pantalla fluorescente. (La pantalla de visualización debe ser fluorescente porque de otro modo la imagen producida no sería visible.)



# PROPIEDADES ONDULATORIAS DE LA MATERIA

Confirmaciones experimentales (1927): Medición directa de  $\lambda$  de electrones (Davisson y Germer): dispersión de electrones en un blanco de níquel y observaron la difracción de los mismos.

G.P. Thomson: difracción de electrones en la transmisión de los mismos a través de hojas metálicas delgadas.

Posteriormente: se observó difracción de neutrones, protones y otras partículas.

## DUALIDAD ONDA-PARTÍCULA

La luz, normalmente considerada como una onda, presenta propiedades corpusculares cuando interacciona con la materia, mientras que los electrones, considerados partículas, presentan propiedades ondulatorias.

Todos los fenómenos (electrones, átomos, luz, sonido, etc.) tienen características tanto de ondas como partículas.

Conceptos partículas y ondas clásicas no describen adecuadamente comportamiento de ningún fenómeno.

Se debe adoptar la dualidad onda-partícula.