

## Examen febrero 2022

4.A- Se hace pasar luz roja con longitud de onda de 760 nm a través de un aparato con dos ranuras (experimento de Young). Al mismo tiempo, por el aparato pasa luz visible monocromática de otra longitud de onda. Como resultado, la mayor parte del patrón que aparece en la pantalla es una mezcla de dos colores; sin embargo, el centro de la tercera franja brillante ( $m = 3$ ) de la luz roja aparece como un rojo puro, sin nada del otro color. ¿De las longitudes de onda que se encuentran en el espectro visible, cuál es la menor que cumple la condición para el fenómeno planteado?

Rango aproximado de longitudes de onda del espectro visible: 380 nm a 780 nm.

a) 382 nm

b) 398 nm

c) 415 nm

d) 427 nm

e) 447 nm

La franja se ve roja, por que en ese punto hay un máximo para la  $\lambda$  correspondiente al color rojo y un mínimo para otra longitud de onda  $\lambda'$ .

Condición de máximos:  $d \sin \theta = m\lambda$

Condición de mínimos:  $d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$

$$3\lambda = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda' \quad \lambda' = \frac{3\lambda}{m + \frac{1}{2}} = \frac{3(760)}{m + \frac{1}{2}} = \frac{2280}{m + \frac{1}{2}}$$

m	0	1	2	3	4	5	6
$\lambda$ (nm)	4560	1520	912	651	507	415	351



## Examen agosto 2022

5.A- Se ha producido un derrame de gasolina en el mar, formando una amplia película delgada. Al ser grabada desde un helicóptero que sobrevuela la zona del derrame y observa de manera normal la película, ¿de qué color se verá la mancha, sabiendo que su espesor es  $t = 232 \text{ nm}$ ? Datos:  $n_{\text{aire}} = 1,00$ ;  $n_{\text{agua}} = 1,33$ ;  $n_{\text{gasolina}} = 1,42$ .

a) Violeta:  $\lambda = 405 \text{ nm}$

b) Añil:  $\lambda = 439 \text{ nm}$

c) Azul:  $\lambda = 477 \text{ nm}$

d) Verde:  $\lambda = 542 \text{ nm}$

e) Amarillo:  $\lambda = 588 \text{ nm}$

f) Rojo:  $\lambda = 706 \text{ nm}$

$$t = 232 \text{ nm}$$

Interfase azul: aire-gasolina hay cambio de fase en  $180^\circ$

Interfase verde: gasolina-agua no hay cambio de fase en  $180^\circ$

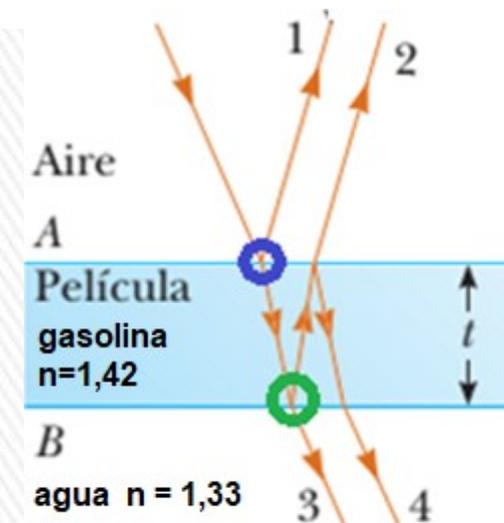
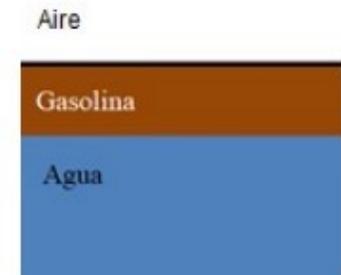
Hay 1 solo cambio de fase en  $180^\circ$ , por tanto:

La condición de máximos es entonces:

$$2nt = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$\lambda = \frac{2nt}{\left(m + \frac{1}{2}\right)} = \frac{2(1,42)(232)}{\left(m + \frac{1}{2}\right)} = \frac{658,88}{\left(m + \frac{1}{2}\right)}$$

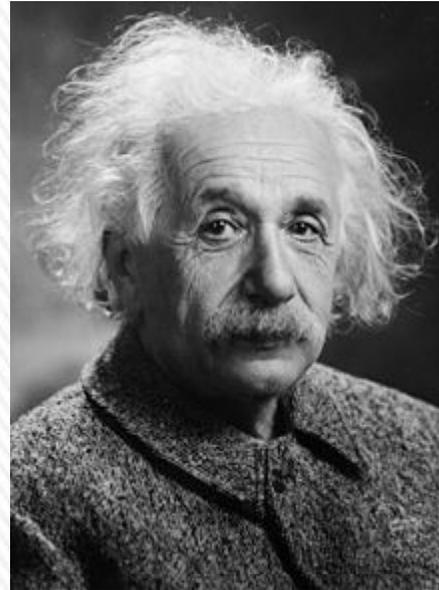
m	0	1	2	3
$\lambda \text{ (nm)}$	1318	439	264	188



## 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, de la termodinámica y del electromagnetismo, y parecía que tan sólo problemas experimentales y de cálculo podrían dificultar ulteriores progresos.

Sin embargo surgieron una serie de problemas que no podían explicarse...

**1) 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)

**2) 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).

**3) La catástrofe ultravioleta.** De acuerdo a la teoría clásica de la radiación del cuerpo negro, de Rayleigh-Jeans se predice que la radiación crece indefinidamente con la frecuencia, lo cual contradecía los resultados experimentales.

**4) El efecto fotoeléctrico-**

Sin embargo transcurridos sólo 20 años del siglo XX, la descripción del mundo físico se vio profundamente conmovida.

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

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

# CUANTIZACIÓN DE LA ENERGÍA

Cuando se examina 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 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 permiten una fácil comprensión de una gran variedad de observaciones como: 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. Estas consideraciones nos llevan al umbral de la **mecánica cuántica**, que *implica cambios radicales en nuestras ideas sobre la naturaleza de la radiación electromagnética y de la materia misma.*



# COMPORTAMIENTO CORPUSCULAR DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

¿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.

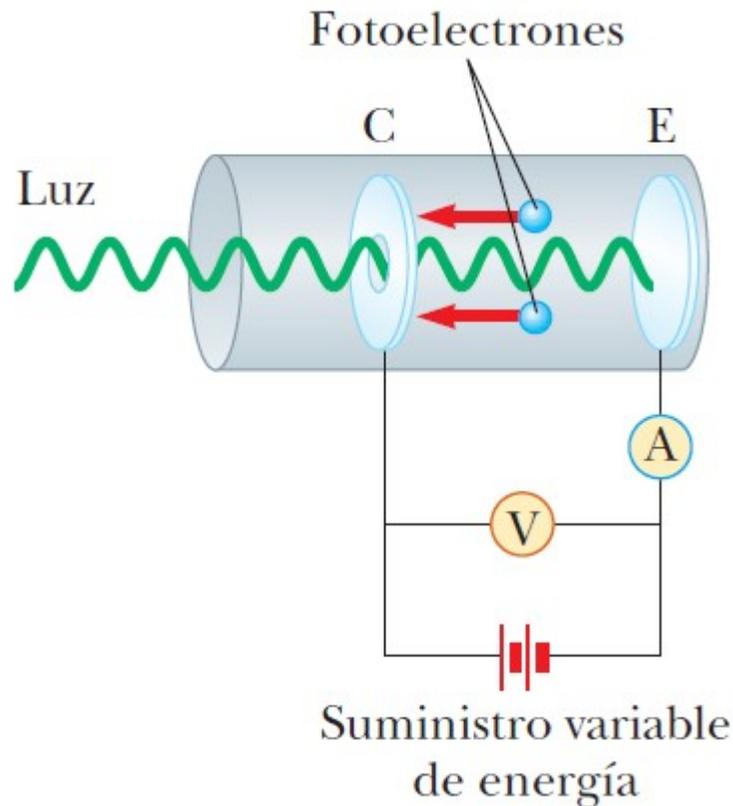
**Sin embargo, sus hipótesis no explicaban algunos resultados experimentales clave.**

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

*los espectros atómicos de líneas,  
y el efecto fotoeléctrico*



# EFEECTO FOTOELÉCTRICO



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

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.

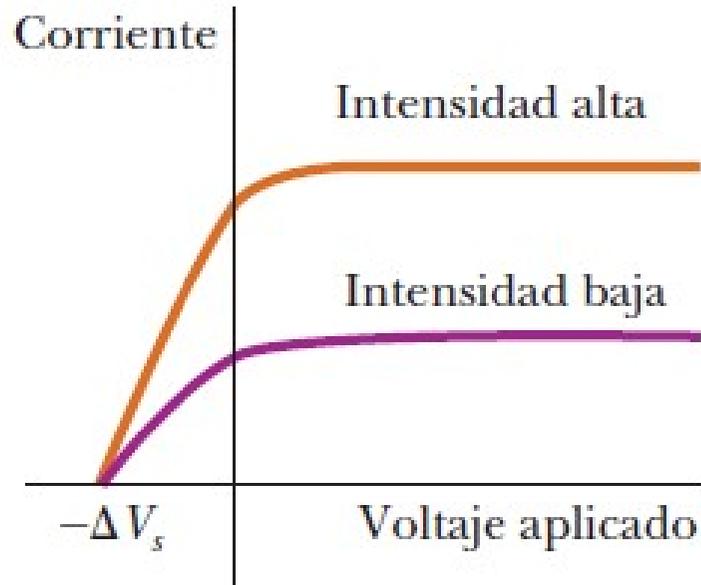
Sin embargo, cuando la placa E se ilumina con luz que tiene una  $\lambda$  más corta que cierta  $\lambda$  particular que depende del material utilizado para formar la placa E, el amperímetro detecta una corriente, lo que indica un flujo de cargas a través de la diferencia entre E y C.

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  $I$ .

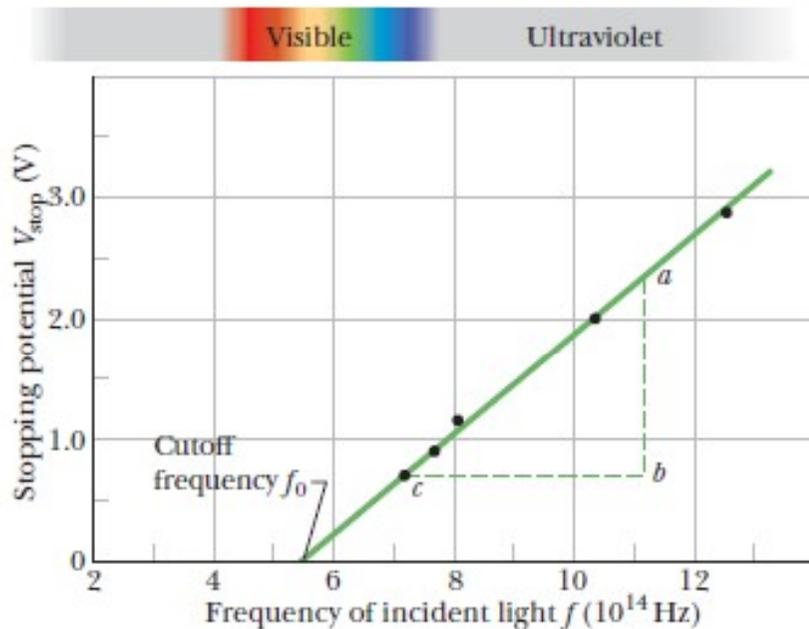
# EFEECTO FOTOELÉCTRICO

## 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.

# EFECTO 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 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.**

## EJEMPLO: Ejercicio 6.2.1

Se ilumina una superficie de potasio con luz ultravioleta de longitud de onda 2500Å. La función de trabajo del potasio vale 2,21 eV.

- a) ¿Cuál es la máxima energía cinética de los electrones emitidos?  
b) Suponiendo que la luz ultravioleta tiene una intensidad 2,00 W/m<sup>2</sup>, calcule el número de electrones emitidos por unidad de área y por unidad de tiempo.

Datos:  $\lambda = 2500\text{Å}$        $\phi = 2,21\text{ eV}$

$$h \cdot f = K_{MÁX} + \phi$$

Pero:  $f = c/\lambda$

$$\frac{h \cdot c}{\lambda} = K_{MÁX} + \phi \Rightarrow K_{MÁX} = \frac{h \cdot c}{\lambda} - \phi$$

Conversión muy útil:

$$h \cdot c = 12410\text{ eV} \cdot \text{Å}$$

$$K_{MÁX} = \frac{h \cdot c}{\lambda} - \phi = \frac{12410}{2500} - 2,21 = 4,964 - 2,21 = 2,754\text{ eV}$$

Cada fotón tiene una energía de 4,964 eV.

$$K_{MÁX} = 2,75\text{ eV} = 4,43 \times 10^{-19}\text{ J}$$

$$1\text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19}\text{ J}$$

b) Supongo que cada fotón provoca la emisión de un electrón.

En cada segundo, y en cada m<sup>2</sup> incide una energía de 2,00 J, por tanto debo saber cuántos fotones con 4,964 eV de energía se liberarían...

$$2,00\text{ J} = 2,00\text{ J} \times \frac{1\text{ eV}}{1,602 \times 10^{-19}\text{ J}} = 1,248 \times 10^{19}\text{ eV}$$

$$N = \frac{E}{hf} = \frac{1,248 \times 10^{19}}{4,964} = 2,515 \times 10^{18}$$

**Se emite  $2,51 \times 10^{18}$  fotoelectrones por unidad de área y tiempo.**

## EJEMPLO: Ejercicio 6.2.2

El emisor de un tubo fotoeléctrico tiene una longitud de onda umbral de 6000 Å. Calcular la longitud de onda de la luz incidente si el potencial de frenado para esta luz es de 2,50 V.

Datos:  $\lambda_U = 6000 \text{ \AA}$        $V_s = 2,50 \text{ V}$

La función de trabajo  $\phi$  cumple que:  $\phi = hf_U = \frac{hc}{\lambda_U}$

$$\phi = hf_U = \frac{hc}{\lambda_U} = \frac{12410}{6000} = 2,068 \text{ eV}$$

$$K_{MÁX} = eV_s = 2,50 \text{ eV}$$

$$\frac{h \cdot c}{\lambda} = K_{MÁX} + \phi \quad \lambda = \frac{h \cdot c}{K_{MÁX} + \phi} = \frac{12410}{2,50 + 2,068} = 2716 \text{ \AA}$$

$$\lambda = 272 \text{ nm}$$

# PROPIEDADES ONDULATORIAS DE LA MATERIA

A nivel macroscópico todas las observaciones pueden ser interpretadas considerando una explicación ondulatoria o una explicación a través de partículas, pero a nivel microscópico esta distinción no es tan clara.

Todavía más desconcertante que el comportamiento corpuscular de la radiación es el hecho que bajo ciertas condiciones las 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 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.

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

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

$$\lambda_e = \frac{h}{m_e v} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{(9,11 \times 10^{-31})(1,00 \times 10^7)} = 7,28 \times 10^{-11} \text{ m}$$
$$\lambda_b = \frac{h}{m_b v} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{(0,145)(45,0)} = 1,02 \times 10^{-34} \text{ m}$$

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.