

Ondas (y Fotones)

Algunos ejemplos antes de empezar _____

1. Una gota de lluvia al caer en un charco de agua **perturba** el agua (medio material elástico), que da origen a una “olita” (onda superficial de agua) que se propaga por el charco.



2. El diafragma de una parlante vibra perturbando el aire circundante. Una onda de sonido es una onda de presión. El aire, debido al paso de la onda, se estratifica en capas perpendiculares a la dirección de propagación. Capas de baja densidad, y consecuentemente, de baja presión (rarificaciones), se intercalan con las de alta densidad y presión (compresiones), permutando sus estados con el paso de la onda.
3. Los electrones oscilantes en una antena emisora representan una perturbación en el campo electromagnético, que ellos mismos generan con su carga eléctrica y movimiento, dando así origen a una onda radio.

Pero, ¿qué es una onda? _____

Si se tira una piedra a un estanque de agua, en su superficie se producen olas, o mejor dicho, ondas superficiales de agua. Parte de la energía de la piedra se transfiere al lugar de impacto, y de ahí se propaga a distintos puntos de la superficie del agua. Es un hecho que fácilmente se puede comprobar si se deja un corcho flotando en el agua al paso de la onda: el corcho comenzará a subir y bajar, y al mismo tiempo, se moverá hacia adelante y hacia atrás. Nada de esto le ocurría al corcho, sin la transferencia de una fracción de la energía que portaba la piedra en el momento que tocaba la superficie del agua.

Las ondas son una forma de movimiento, y consecuentemente, una de las formas en como se propaga la energía. De hecho, las ondas representan la manera más común de propagación de energía de la que dispone la naturaleza.

En definitiva:

Una onda es la propagación de una perturbación en un medio material o en un campo físico (electromagnético o gravitatorio), con la consecuente transferencia de energía de un lugar del espacio a otro.

Clasificación de las ondas

En el laboratorio vimos distintos tipos de ondas: en cuerdas y en slinky. También sabemos que se producen en la superficie del agua cuando se dejan caer (por ejemplos) gotas de agua, y la luz, por todo lo dicho a principio del curso, es una onda, y el sonido producido por un diapason también es una onda.

Para clasificar las ondas se disponen de 3 criterios a saber:

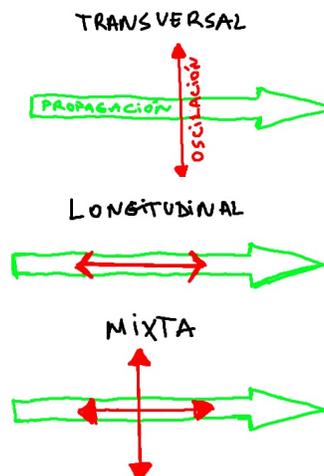
1. según la dirección de oscilación (vibración) respecto a la dirección de propagación de la onda, que en cuyo caso se tienen ondas:

- a) transversales: la dirección de las oscilaciones es perpendicular^a a la dirección de propagación de la onda (ej.: luz, ondas en cuerdas);

^aentre las direcciones forman un ángulo de 90 grados.

- b) longitudinales: la dirección de oscilación y propagación de la onda es la misma (ej.: sonido, ondas en resortes (slinky)...);

- c) mixtas: son a la vez transversales y longitudinales (ej.: ondas superficiales de agua...).



2. según su naturaleza, en:

- a) mecánicas¹ (ej.: sonido, ondas superficiales de agua, ondas en cuerdas...);
b) electromagnéticas (ej.: luz, radio, microondas, UV, infrarrojo, rayos X...).

3. según el número de dimensiones en el que se propaga la energía:

- a) 1-dimensional (ej.: ondas en cuerdas, slinky...);
b) 2-dimensional (ej.: ondas superficiales de agua...);
c) 3-dimensional (luz emitida por una lámpara, sonido emitido por las cuerdas vocales...).

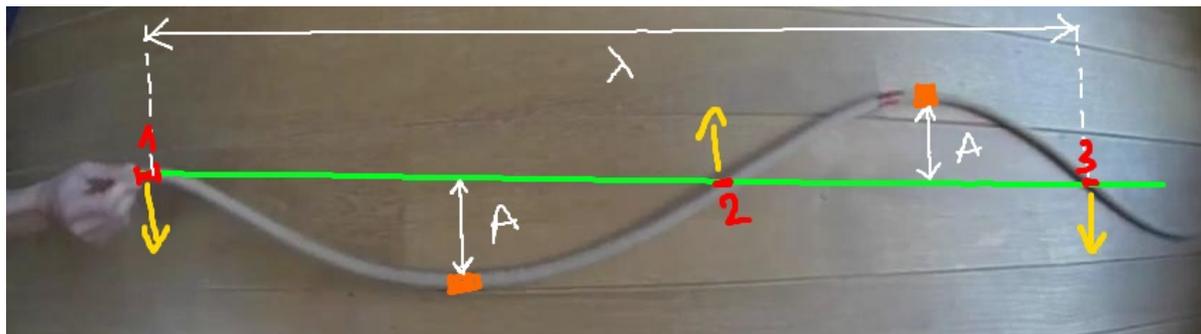
Onda propagándose en una cuerda muuuuy larga

Antes vean [éste](#) video, y presten especial atención a partir de los 43 segundos. Noten como un pedacito de la cuerda marcado con una cinta roja “sube y baja”. De hecho, ¡cualquier pedacito de la cuerda “sube y baja”!

¹La onda para su existencia necesita de un medio con propiedades elásticas

Longitud de onda

A continuación se muestra una captura de imagen correspondiente a un fotograma del video anterior.



A la distancia **mínima** que hay entre dos pedacitos de cuerda que “suben y bajan” en **sincronía**, se le denomina **longitud de onda**. En la captura de imagen, los pedacitos pintados de rojo 1 y 3 están separados por una longitud de onda. Notar que los pedacitos de cuerda 1 y 3 tienden a bajar en el siguiente fotograma, mientras que el pedacito rojo 2 tiende a subir. Por tal motivo se dice que los pedacitos de cuerda 1 y 3 **oscilan en fase**, mientras que los pedacitos 1 y 2 (o 2 y 3) lo hacen en **oposición de fase**.

A la longitud de onda se la representa la letra griega “lambda” (λ), y la unidad es el metro o algún múltiplo o submúltiplo del metro, como veremos más adelante.

Amplitud

La línea verde que aparece en la captura de imagen anterior, representa la posición de equilibrio cada pedacito de la cuerda. La **amplitud**, que la vamos a representar con A , representa el máximo apartamiento que tiene cada pedacito de la cuerda respecto a su posición de equilibrio. Los pedacitos de cuerda naranjas “están en amplitud”, es decir, están en su posición más lejana de su posición de equilibrio.

Período (o periodo)

Al tiempo que demora en “subir o bajar” (es decir, un **ciclo de oscilación**) cada pedacito de cuerda de le denomina **periodo** o **período**, se le representa con la T , y se mide en segundos. Más aun, *iel tiempo que demora la onda en recorrer una distancia igual a la longitud de onda coincide con el período!*

Frecuencia

A la cantidad de veces que cada pedacito de la cuerda “sube y baja” en un segundo, se le denomina **frecuencia** y se la representa con f . Dicho de otra manera, la frecuencia nos indica la cantidad de ciclos que se producen en un segundo. La unidad de la frecuencia es el **hertz** (Hz), en honor a **Heinrich Rudolf Hertz**.



Frecuencia y Período

Existe una relación muy simple entre la frecuencia y el período, dada por la ecuación:

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{o bien:} \quad T = \frac{1}{f}$$

Las ecuaciones anteriores significan que una magnitud es la inversa de la otra, es decir, “si crece una, decrece la otra”.

Velocidad

El tipo de onda que vamos a estudiar son especialmente simples, y ya saben de tercer año, que si la velocidad de “algo” que se mueve no cambia, la podemos calcular así:

$$v = \frac{d}{t}$$

Si el tiempo que demora la onda en recorrer una distancia igual a longitud de onda es igual al período, es decir: $d = \lambda$ y $t = T$, entonces la ecuación de “tercer año” para las ondas “simples” se convierte en:

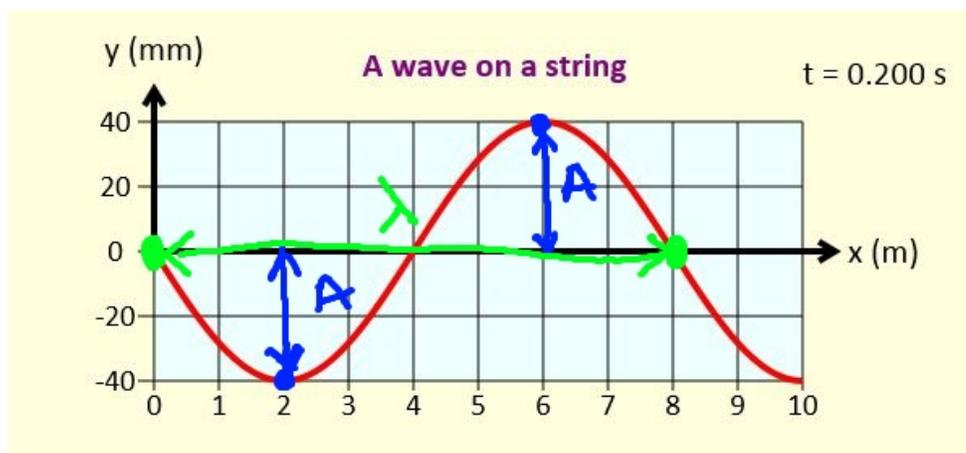
$$v = \frac{\lambda}{T}$$

Queda para ustedes deducir esta otra ecuación equivalente a la anterior, para calcular la velocidad de propagación de una onda “simple”:

$$v = f \cdot \lambda$$

Ejemplo

En clase hicimos uso de un simulador de ondas que se propagan a lo largo de una cadena o cuerda tensa. A continuación se muestra una captura de imagen del simulador estando en pausa, donde se ve la onda justo en ese instante de tiempo. El extremo de la cadena en el origen de coordenadas oscila con una frecuencia $f = 10$ Hz.



1. Clasificar la onda sabiendo que se trata de una onda que se propaga por un hilo muy largo.

2. A partir de la “foto” del hilo determinar:
 - a) la amplitud, y
 - b) la longitud de onda.
3. Calcular el periodo de oscilación, sabiendo que el oscilador que produce la onda oscila con una frecuencia $f = 10 \text{ Hz}$.
4. Hallar la velocidad de propagación de la onda.

Respuestas

1. Como la onda se propaga por un hilo tenso, la onda es:
 - mecánica;
 - transversal; y
 - 1-dimensional
2. a) La amplitud es igual a $A = 40 \text{ mm} = 0,04 \text{ m}$.
 b) De la figura se deduce que la longitud de onda es $\lambda = 8 \text{ m}$.
3. Para calcular el período disponemos de la ecuación:

$$T = \frac{1}{f}$$

Como la frecuencia es $f = 10 \text{ Hz}$, según la ecuación anterior, resulta que:

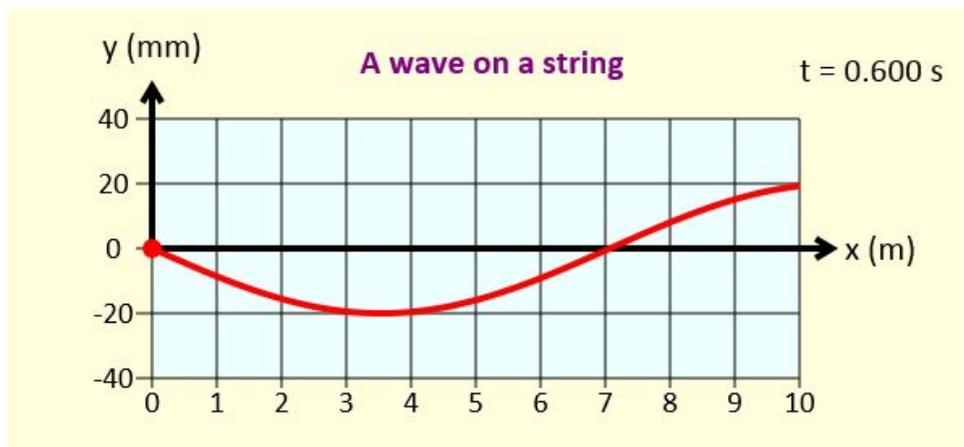
$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{10 \text{ Hz}} = 0,1 \text{ s}$$

4. Finalmente, para calcular la velocidad de propagación de esta onda disponemos de esta ecuación:

$$v = f \cdot \lambda = 10 \text{ Hz} \cdot 8 \text{ m} = 80 \text{ m/s}$$

Problema

Repetir el ejemplo anterior, si ahora se sabe que la frecuencia es $f = 5 \text{ Hz}$, y la “forma” de la onda es la que se muestra a continuación.



Reflexión de ondas

Cuando una onda se refleja (“rebota”), *en general se produce un cambio en su dirección y sentido de propagación, sin afectar el valor de la velocidad de propagación*². En particular, si la onda es unidimensional, el cambio producido por la reflexión se limita solo a una inversión en el sentido de propagación: la onda reflejada “regresa por el mismo camino”. Es la reflexión que se ve fácilmente en las ondas producidas en las cuerdas y en el slinky (resorte largo).

Eco y reverberación (del sonido)

Nuestro cerebro está preparado para distinguir claramente entre dos sonidos consecutivos siempre que estén separados por un tiempo igual a una décima de segundo, es decir, por un $t = 0,1$ s. Si asumimos que el sonido en el aire se propaga con una velocidad de 340 m/s, en una décima de segundo recorrió una distancia:

$$d = v \cdot t = 340 \text{ m/s} \cdot 0,1 \text{ s} = 34 \text{ m}$$

Supongamos ahora que delante de nosotros hay un muro enorme situado a 17 m, justo a mitad de camino de los 34 m calculados anteriormente. Si alguien emite un sonido (dice “hola”), el sonido recorrerá 17 m hasta el muro, se reflejará en él, y recorrerá 17 m hasta llegar nuevamente hasta nuestros oídos. . . esa onda de sonido reflejada es lo que llamamos **eco**.

¿Pero que pasaría si el muro está más cerca de nosotros, a menos de 17 m? El fenómeno que se produce (indeseable para mantener una conversación) se denomina **reverberación**: la onda sonora emitida se superpone con la onda reflejada provocando una sensación de “alargamiento” del sonido.

Para evitar el problema que origina la reverberación (por ejemplo, en salas de teatro, auditorios, bibliotecas, estudios de grabación, etc) es revestir paredes techos y pisos del lugar, con materiales porosos por su capacidad de absorción de la energía “sonora”, y consecuente atenuación de la onda reflejada. Materiales que pueden servir para este propósito son placas de corcho, fieltro, alfombras, cortinas gruesas, etc.

Una **cámara anecoica** es “ingeniería” llevada al extremo para evitar los ecos y la reverberación.

Cualidades del sonido

Las cualidades del sonido (las más importantes) son:

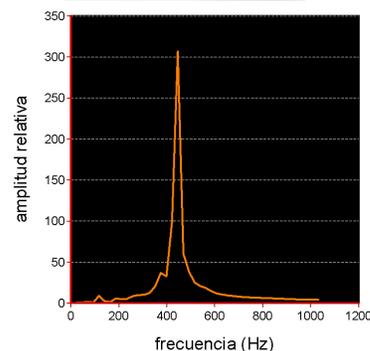
intensidad (o “volumen sonoro”), asociado a la amplitud de la onda de sonido, y se mide en decibelios (dB). Así los sonidos pueden ser “fuertes” o “débiles”. Nuestros oídos tienen lo que se denomina un **umbral de audición** (varía con la edad) por debajo del cual no percibimos el sonido, y un umbral de dolor (120 dB), a partir del cual la presión producida por el sonido³ sobre los tímpanos se vuelve doloroso.

tono, asociado a la frecuencia de la onda. Así se pueden tener tonos graves (baja frecuencia), o tonos agudos (alta frecuencia).

²Ya que la velocidad de propagación de una onda depende del medio en el que se propaga, y como la onda incidente y la reflejada se propagan en el **mismo** medio: ¡el valor de sus velocidades de propagación deben ser iguales!

³Si, el sonido es una **onda de presión**.

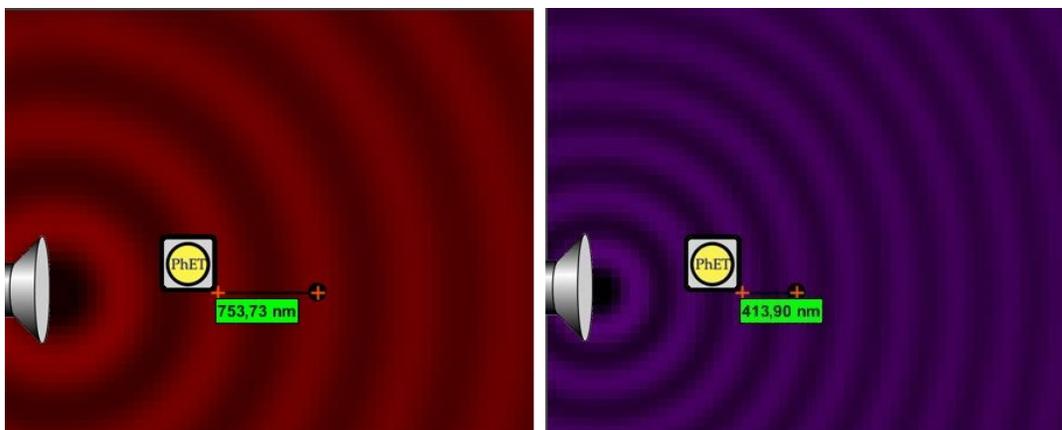
timbre, que nos permite distinguir entre la misma nota musical producida con igual intensidad, pero con distintos instrumentos musicales. Los sonidos que llegan a nuestros oídos son en realidad una mezcla compleja de muchos sonidos. Los sonidos “puros” (de una sola frecuencia o monofrecuenciales), como el producido por el diapasón del laboratorio, son también una **mezcla**^a de sonidos con frecuencias muy próximas a un valor central de frecuencia, denominada frecuencia fundamental o frecuencia pico. A la derecha se ve como el sonido “puro” de un diapasón produce un pico de frecuencia en el entorno de los 440 Hz. Los sonidos con frecuencias inferiores a la frecuencia pico se les denominan **subtonos**, y **sobretonos** a los sonidos con frecuencias superiores a la frecuencia pico. Son los subtonos y sobretonos los que determinan el timbre del sonido.



^aAlgo similar ocurre (como veremos más adelante) con la luz. Lo que llamamos luz **monocromática** (un solo color), en realidad está formada por una gama estrecha de colores asociados a frecuencias con valores muy próximos entre sí. De ejemplo de luz “monocromática” (con comillas), sirve la luz producida por un láser.

Color, longitud de onda y frecuencia

Usando **éste** simulador, pudimos observar que el color de la luz depende de la longitud de onda.



Para esos tonos de rojo y violeta, el simulador nos dio las siguientes medidas:

- luz roja: $\lambda = 753,73 \text{ nm} \cong 754 \times 10^{-9} \text{ m}$
- luz violeta: $\lambda = 413,90 \text{ nm} \cong 414 \times 10^{-9} \text{ m}$

Es decir, *la longitud de onda de la luz roja es casi el doble de larga, que la longitud de onda de la luz violeta.*

¿Pero que ocurrirá con la frecuencia? Ya sabemos que la velocidad de la luz en el vacío (y en el aire casi lo mismo), es igual para todos los colores: $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$ (¿se acuerdan?), y también sabemos que hay una relación entre la velocidad de propagación de la onda, la longitud de onda y la frecuencia, dada por la ecuación:

$$v = f \cdot \lambda$$

que para la luz cuando se propaga en el vacío, la podemos escribir así:

$$3,0 \times 10^8 \text{ m/s} = f \cdot \lambda$$

y despejando la frecuencia de la ecuación anterior resulta:

$$f = \frac{3,0 \times 10^8 \text{ m/s}}{\lambda}$$

Así para la luz roja obtenemos la siguiente frecuencia:

$$f_{\text{roja}} = \frac{3,0 \times 10^8 \text{ m/s}}{\lambda_{\text{roja}}} = \frac{3,0 \times 10^8 \text{ m/s}}{754 \times 10^{-9} \text{ m}} \cong 3,9 \times 10^{14} \text{ Hz} \quad (\text{guaaaau!!!})$$

y para la luz violeta:

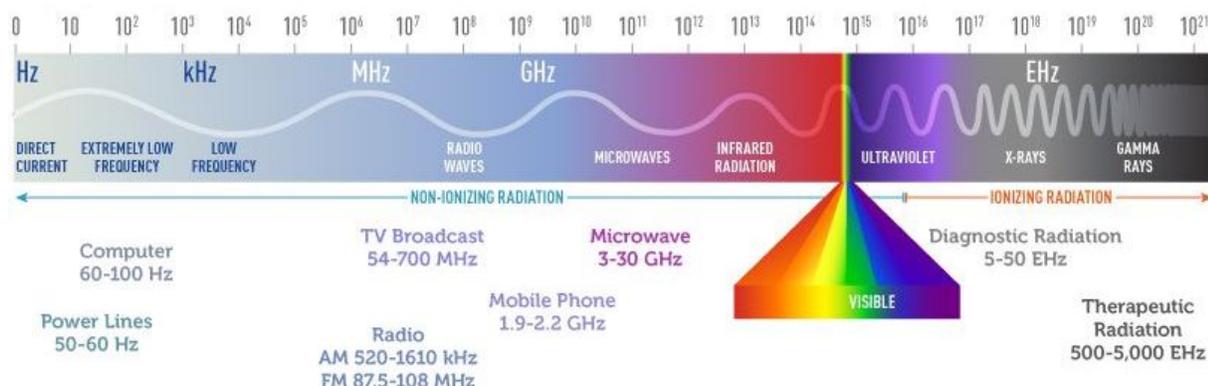
$$f_{\text{violeta}} = \frac{3,0 \times 10^8 \text{ m/s}}{\lambda_{\text{violeta}}} = \frac{3,0 \times 10^8 \text{ m/s}}{414 \times 10^{-9} \text{ m}} \cong 7,2 \times 10^{14} \text{ Hz} \quad (\text{otro guaaaau!!!})$$

Así podemos concluir que, a medida que recorremos el arco iris del rojo al violeta:

1. la longitud de onda se acorta; y
2. la frecuencia aumenta.

Espectro Electromagnético (EM)

A continuación el espectro electromagnético en todo su esplendor (el crédito de la imagen que tomé prestada le corresponde al [National Cancer Institute](#) de EE.UU).



El espectro electromagnético (EM) no es otra cosa que una división⁴ en zonas, delimitada por cierto valores de frecuencias crecientes⁵. Así, vamos a encontrar una zona del espectro EM delimitada entre las frecuencias $3,85 \times 10^{14} \text{ Hz}$ y $7,89 \times 10^{14} \text{ Hz}$, a lo que le llamamos **luz**, y que representa menos del 1% del todo el espectro EM!

⁴Artificial, hecha por y para la humanidad.

⁵O longitudes de ondas **decrecientes**.

El bueno de **Max Planck** en 1900, después de ocho semanas de intensa maquinación intelectual, encontró una ecuación simple pero fundamental para la Física, y es la que figura a continuación:

$$E = h \cdot f$$

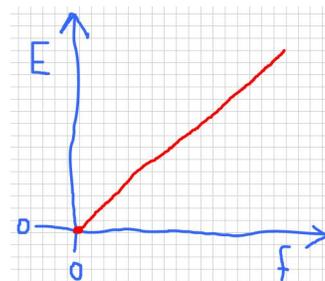
siendo:

- E , la energía de los fotones,
- f , la frecuencia de la onda EM correspondiente, y
- h , la **constante de Planck**, en su merecido honor.



Pero, ¿por qué es tan importante en Física la ecuación de Planck? La ecuación anterior es re-importante, porque (entre otras cosas) “unifica” dos “mundos” bien distintos: el de los fotones con el de las ondas EM.

Matemáticamente, la ecuación de Planck establece una relación de **proporcionalidad directa** entre la frecuencia de la onda EM, y la energía de los fotones. Ahora, ¿qué significa proporcionalidad directa? Significa que si se duplica la frecuencia de la onda EM se duplica la energía de los fotones, si se triplica la frecuencia de la onda EM se triplica la energía de los fotones, y así sucesivamente. Si existe proporcionalidad directa entre dos magnitudes (en este caso, entre E y f) entonces la grafica tiene la “forma” de la derecha.



Del curso de tercer año, saben que la unidad de energía “preferida” de los físicos es el **joule** (J). Pero el joule es una unidad de energía enooooorme para medir la energía de los fotones. Por eso los físicos, inventaron una unidad más apropiada para medir la energía de los fotones, y otras partículas de ese “zoológico” súper microscópico: el **electrón-voltio** (eV). El valor de la constante de Planck, **cuando la energía se expresa en electrón voltios**, vale aproximadamente:

$$h \cong 4,14 \times 10^{-15} \text{ eV/Hz}$$

Ejercicio: calcular la energía (en electrón-voltio) de los fotones “rojos” y “violetas”.

Para finalizar, comentar que nuestras retinas solo son sensibles a tres colores, o mejor dicho, a los fotones de “color” (energía) rojo, verde, y azul. . . el resto de los colores los produce el cerebro haciendo las combinaciones “justas” de los tres colores anteriores.

En resumidas cuentas

En clase vimos lo que es un diapasón y como vibra, medimos su frecuencia pico con el frecuencímetro de una app del celu, y con la misma app generamos tonos graves y agudos que asociamos con frecuencias crecientes, y de yapa, escuchamos el sonido “blanco”.

Podemos hacer cierto paralelismo entre la luz propagándose en el vacío, y el sonido propagándose en el aire en condiciones de Temperatura y Presión Normal (TPN):

La luz en el vacío se propaga con una velocidad de $3,0 \times 10^8$ m/s.	El sonido se propaga en el aire a TPN, con una velocidad de 343 m/s.
Cada color del arco iris tiene asociada una frecuencia.	Cada tono de sonido tiene asociado una frecuencia.
Al recorrer el arco iris del rojo al violeta, la frecuencia aumenta.	Al recorrer los tonos del más grave al más agudo, la frecuencia aumenta.
La luz esta comprendida entre la frecuencias $3,85 \times 10^{14}$ Hz y los $7,89 \times 10^{14}$ Hz.	El sonido audible esta comprendido entre los 20 Hz y los 20 000 Hz.
Solo podemos ver cerca del 1 % de toda la radiación EM existente, que llamamos luz.	Solo podemos escuchar cerca del 1 % de todos los sonidos que pueden existir, y son los sonidos audibles.
La luz blanca esta formada por todos los colores de arco iris.	El sonido “blanco” esta formado por todos los sonidos audibles.