

El estroboscopio (Construcción, funcionamiento y usos)

Gerardo Melcher E.
Exprofesor Departamento de Física

El lector puede encontrar algunos aspectos de la biografía del profesor Gerardo Melcher en la primera parte del artículo "Física puertas afuera", en el número 2 de Eureka: Enseñanza de las ciencias físicas. En este artículo se invita al lector a construir y utilizar un valioso instrumento para la enseñanza de la Física, el estroboscopio, el que permite estudiar diversos fenómenos periódicos tal como nos muestra su autor. Este artículo apareció por primera vez en el número 2 de la Revista de Matemáticas y Física, Octubre de 1966.

Siendo este instrumento tan sencillo en cuanto a su construcción y manejo, no es tan elemental su uso como instrumento de medición. De hecho, los alumnos suelen tener serias dificultades para interpretar correctamente lo que ven en determinadas situaciones. Luego, en este artículo se analizan, en detalles, tres grupos de fenómenos periódicos fáciles de observar y de medir con el estroboscopio manual. Además se discuten algunos problemas generales de medición estroboscópica, el efecto de "cámara lenta" y finalmente se explica cómo usar el estroboscopio manual para hacer demostraciones en clases de los efectos estroboscópicos.

Comencemos con algunos detalles de construcción de este aparato.

En la figura que sigue (Figura 1), se da una versión de un estroboscopio manual. Si bien las medidas indicadas no son críticas, discos de radio menor resultan menos cómodos y ranuras más anchas o más angostas dificultan las observaciones. El disco puede fabricarse de cartón duro o mejor de madera prensada de unos 3 o 4 mm de espesor. Conviene pintarlo de negro opaco.

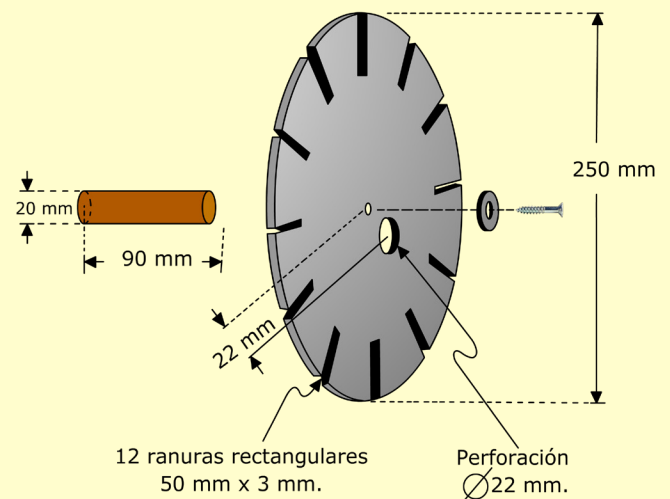


Figura 1. Detalle de construcción de un estroboscopio manual

Para observar frecuencias bajas, digamos menores que 10 s^{-1} , conviene tapar algunas ranuras con huincha negra adhesiva (huincha aisladora eléctrica). Deben taparse ranuras de modo que subsista simetría en el disco, es decir, al rotar el estroboscopio con velocidad angular constante, las ranuras deben aparecer frente

al ojo a intervalos de tiempo iguales. Así, por ejemplo, pueden taparse las ranuras 1, 3, 5, 7, 9, 11 o bien 1, 2, 4, 5, 7, 8, 10, 11 o pueden dejarse abiertas solo las ranuras 4, 8, 12 o 6, 12, según las necesidades del caso. A veces conviene usar el disco con solo una ranura abierta. Entonces es particularmente simple entender el funcionamiento.

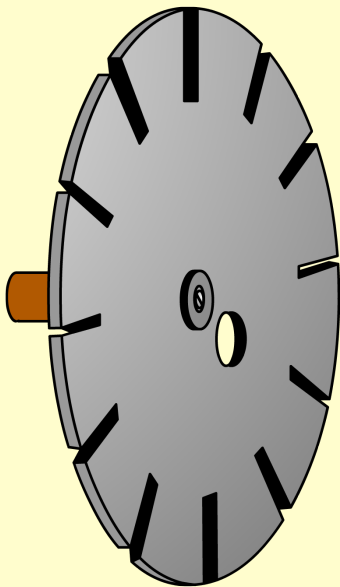
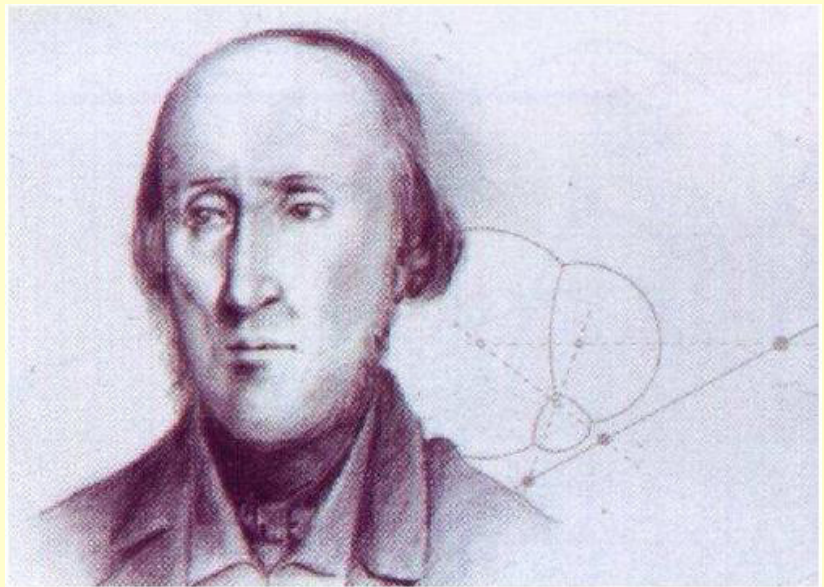


Figura 2
Estroboscopio manual armado



Joseph Plateau (1801- 1883), físico belga, entre sus contribuciones están el principio de la persistencia de la visión, inventó el fenaquistiscopio precursor del cinematógrafo, hizo investigación sobre capilaridad.

La idea de medir cortos intervalos de tiempo, que se repiten periódicamente, usando iluminación intermitente (estroboscópica), se debe al físico belga Joseph Plateau (1832). En lugar de iluminar estroboscópicamente un fenómeno periódico puede también iluminarse éste en forma continua e interrumpir periódicamente

la luz que llega al ojo del observador. Es esta la situación que se da al mirar a través de los calados de un disco que rota. Lo importante en uno u otro caso es, que al ojo llegue luz en forma intermitente. La frecuencia de los destellos que entran al ojo la llamamos frecuencia

estroboscópica. Se ve de inmediato que un estroboscopio con n ranuras que rota con m revoluciones/segundo es equivalente a un estroboscopio con una sola ranura que rota con $(n \cdot m)$ rev/s. Esta Consideración nos permite estudiar el funcionamiento del estroboscopio pensando en un disco con una sola ranura. En esos términos se hará el desarrollo que sigue; se logra así una simplificación en el lenguaje y se previenen confusiones.

¿Qué cosas interesa observar y medir con un estroboscopio?

Cualquier fenómeno periódico.

Agruparemos los fenómenos periódicos en la forma siguiente:

a) Cosas que giran: la plataforma de un tocadiscos, las aspas de un ventilador eléctrico, la polea de un motor eléctrico, la hélice de un avión, las ruedas de un automóvil, etc.

b) Cosas que oscilan: el martillo de un timbre eléctrico, la aguja de una máquina de coser, varillas que vibran, etc.

c) Cosas que pasan periódicamente por una región que se observa: los eslabones de una cadena transportadora, ondas en una cubeta de ondas, etc.

Veamos en detalle un ejemplo de cada grupo, pues las situaciones no son exactamente iguales. Comencemos con



a) **Un disco que gira**

Si el disco es liso, el ojo no tiene referencia alguna para apreciar el giro, por lo tanto debemos hacerle alguna marca. Un punto con tiza basta, pero es mejor marcar un radio. No conviene macar un diámetro porque se produce una complicación que veremos más adelante. Imaginemos entonces un disco (con un radio marcado sobre él) que gira con una frecuencia ν rev/s, que llamaremos frecuencia del disco. Observamos su movimiento mirando a través de un estroboscopio con una sola ranura.

Hacemos girar el estroboscopio y variamos su velocidad de giro hasta que el disco, con el radio marcado, aparenta estar "detenido". Este efecto aparece para varias frecuencias estroboscópicas, hecho que confunde al principiante. Con frecuencias estroboscópicas altas en general, se observa detención aparente con imágenes múltiples, es decir, el radio marcado se ve detenido simultáneamente en varias posiciones. Bajando paulatinamente la frecuencia estroboscópica se llega a una imagen detenida doble. Bajando más la frecuencia, aparece una imagen detenida simple que llamaremos "primera imagen simple". Para varias frecuencias más bajas se vuelve a ver detenido el radio y siempre se ven imágenes simples. Durante todo este proceso la frecuencia de rotación del disco observado la suponemos constante.

Analicemos paso a paso estas observaciones. Preguntémonos primero cuál es el aspecto de la imagen cuando la frecuencia estroboscópica coincide con la frecuencia del disco. Pensando en un estroboscopio con una sola ranura, esto corresponde al caso de dos cuerpos que rotan sincrónicamente. Cada vez que la ranura pasa frente al ojo, vemos el radio marcado sobre el disco en cierta posición, de modo que el radio aparenta estar detenido y lo vemos en una sola posición y siempre en la misma. En el caso de sincronía vemos una "imagen simple".

¿Qué pasa si la frecuencia estroboscópica es igual a la mitad de la frecuencia del disco? Entonces, por cada vuelta completa del estroboscopio, el disco ha girado en dos vueltas completas. Luego, cada vez que llega luz al ojo, el radio está de nuevo en una cierta posición que no cambia. De nuevo vemos una imagen simple. Llamando ν_{estrob} a la frecuencia estroboscópica y ν a la frecuencia del disco observado, tenemos la condición para ver imágenes simples: $\nu_{\text{estrob}} = \nu$ y $\nu_{\text{estrob}} = \nu/2$. Un argumento similar al anterior nos permite extender esto y decir que, en general, se ven imágenes simples cuando $\nu_{\text{estrob}} = \nu/k$ ($k = 1, 2, 3, \dots$).

Veamos ahora qué sucede cuando la frecuencia estroboscópica ν_{estrob} es igual al doble de la frecuencia del disco observado. Entonces, por cada vuelta completa del estroboscopio, el disco ha dado solo media vuelta. Al ojo llegan destellos de luz de dos posiciones del radio. Vemos al disco "detenido" con el radio en dos posiciones, formando un diámetro. Es la "imagen doble" que resulta con $\nu_{\text{estrob}} = 2\nu$. Si $\nu_{\text{estrob}} = 3\nu$ veríamos al radio en 3 posiciones formando una estrella simétrica de 3 radios. Es la "imagen triple". En general, podemos decir que se observan imágenes múltiples cuando se cumple $\nu_{\text{estrob}} = j \cdot \nu$ ($j = 1, 2, 3, \dots$).

En lo que sigue, limitaremos el estudio a imágenes simples, dobles y triples.

La figura 4 resumen estas consideraciones.



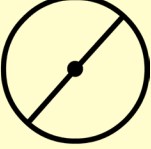
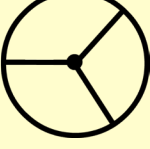
- a)  aspecto del disco que se observa.
- b)  imagen simple $v_{\text{estrob}} = v$ y también $v_{\text{estrob}} = v/k$ ($k = 1, 2, 3, \dots$).
- c)  imagen doble $v_{\text{estrob}} = 2v$,
- d)  imagen triple $v_{\text{estrob}} = 3v$.

Figura 4

En el caso de frecuencias bajas, las imágenes múltiples no se ven simultáneamente, más bien se ve al radio saltar sucesivamente a las posiciones que corresponden a la multiplicidad de la imagen.

Tratándose del problema de medir frecuencias, puede operarse con cualquiera de las situaciones b, c, d, tomado en cuenta la multiplicidad de la imagen. El método más directo, con el mínimo de cálculos, sería observar la situación b. Pero entonces debemos asegurarnos previamente que estamos viendo la "primera imagen simple" y no otra imagen simple.

El procedimiento indicado es buscar la "imagen doble" y luego reducir la frecuencia estroboscópica paulatinamente hasta que se vuelva a detener el radio. Esa es la "primera imagen simple" y solo para ella rige $v_{\text{estrob}} = v$.

Ahora solo resta medir la frecuencia estroboscópica. Mientras un alumno mantiene fija la "primera imagen simple" y cuenta las vueltas que está dando, otro mira el segundero de un reloj y avisa al compañero para que comience la cuenta. En general, basta contar por un intervalo de unos 10 segundos.

b) Un oscilador

Debemos distinguir tres casos de observación del oscilador: I) cuando está en posición extrema de su movimiento; II) cuando está en el punto medio de la oscilación y III) cuando está en una posición que no es media ni extrema.

En el oscilador pueden superponerse varias imágenes cuando se trata de imágenes múltiples, de modo que no siempre basta con contar el número de imágenes para conocer la multiplicidad. Con el fin de dejar bien en claro este asunto introduciremos un artificio. Consideraremos al

movimiento del oscilador como una componente del movimiento de un cuerpo P que rota. En la Fig. 5 (a) se muestra a un cuerpo P que sigue una trayectoria circular. Observando este movimiento desde la derecha, desde la cara ABCD Fig. 5 (b), se ve solo la componente vertical del movimiento circular, y ésta es oscilatoria. Si el cuerpo P gira con velocidad angular constante, la componente vertical del movimiento es una oscilación armónica simple. Si el cuerpo P gira con velocidad angular variable, pero periódica, la componente vertical correspondería a otro tipo de movimiento oscilatorio.

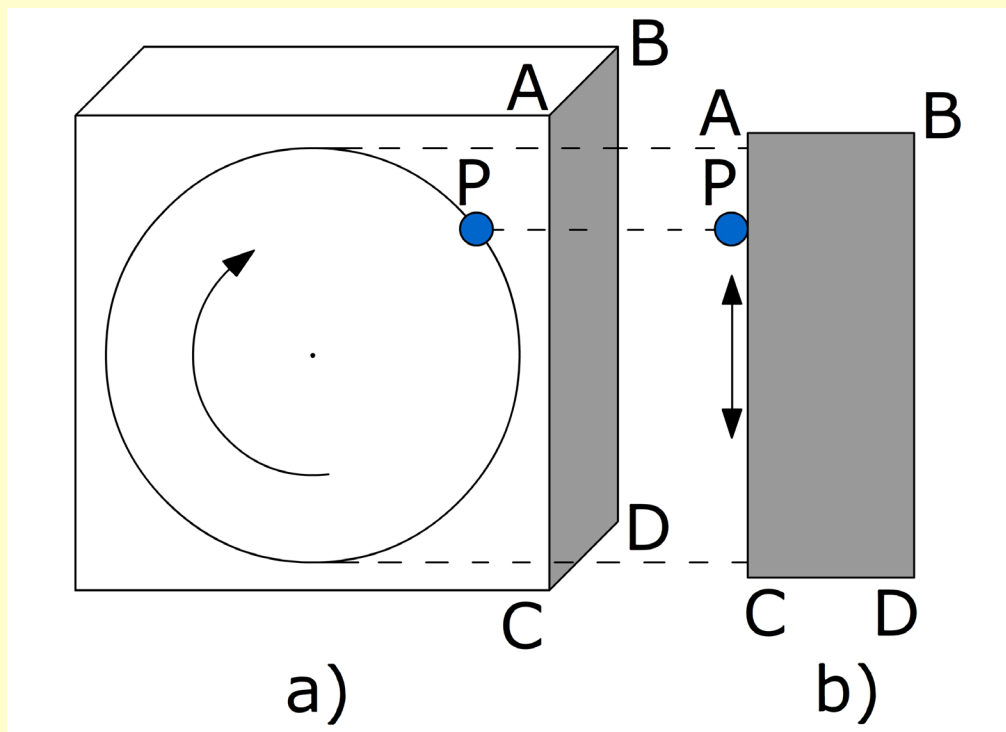


Figura 5

En los diagramas que siguen, junto con dibujar al oscilador en estudio, se da el movimiento circunferencial del cuerpo P y la componente vertical de su movimiento. Esa componente vertical es análoga al movimiento del oscilador. Esto nos permitirá ver más claramente lo que sucede en cada caso. Además, denotaremos la imagen doble en una misma posición por dos circulitos próximos. Para el observador estas dos imágenes se superponen y él ve una sola imagen. Ahora podemos trasladar toda la argumentación desarrollada

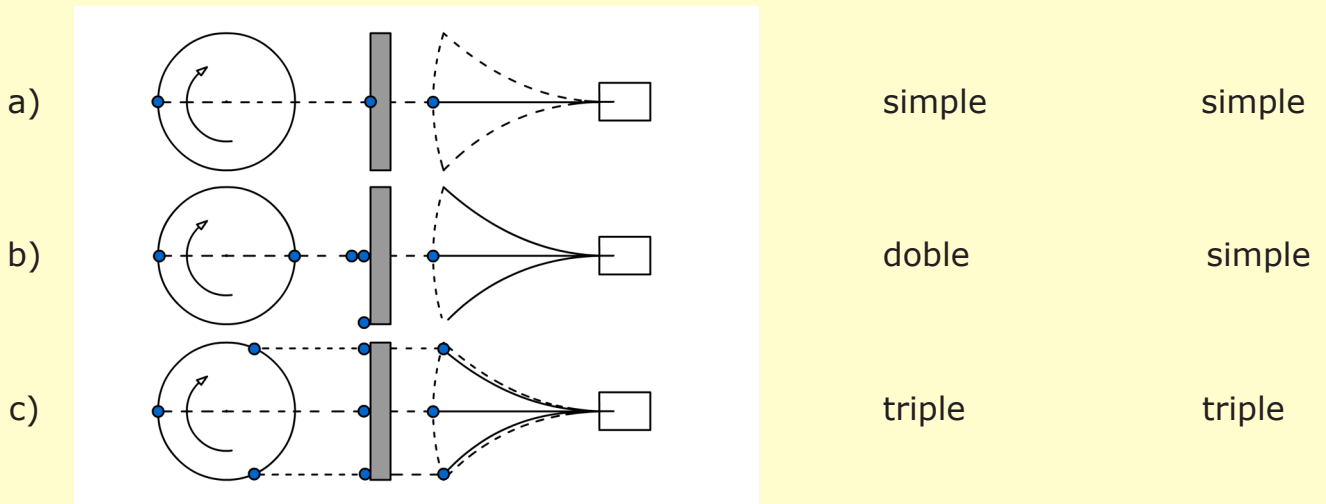
antes para el movimiento giratorio (radio marcado) al movimiento circunferencial del cuerpo P. Luego nos imaginamos observando solo la componente vertical de ese movimiento y estaremos en el caso del oscilador.

No repetiremos los argumentos dados anteriormente y, en consecuencia, resulta lo que se indica en los diagramas que siguen.

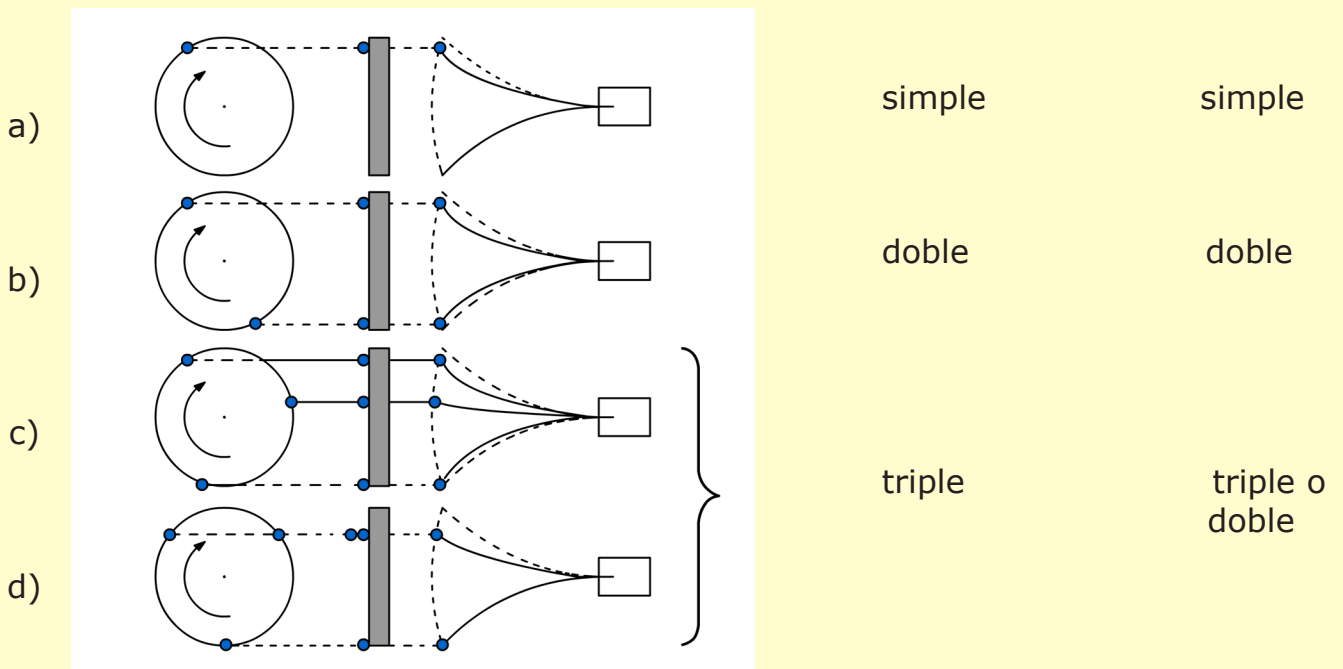
I. Observando una posición extrema del oscilador:

	Movimiento circunferencial de referencia	Componente Vertical	Oscilador	Multiplicidad de la imagen <i>real</i>	Multiplicidad de la imagen <i>observada</i>
a)				simple	simple
b)				doble	doble
c)				triple	doble

II. Observando la posición media del oscilador:



III. Observando una posición que no es media ni extrema:



Los diagramas muestran las diferentes posibilidades de imágenes "detenidas" hasta frecuencias estroboscópicas

v_{estrob} iguales a 3 veces la frecuencia del oscilador v_{oscil} .

Veamos qué nos dicen los diagramas. Cuando se ven p. ej. imágenes dobles puede corresponder a los casos I-b, I-c, III-b, III-d. Cuando se ve una imagen simple pueden ser los casos I-a, II-a, II-b, III-a. Para medir frecuencias no conviene observar posiciones medias, pues los casos II-a y II-b tienen el mismo aspecto y resulta complicado decidir la situación. Conviene observar según I o III. Primero se busca la imagen doble y en seguida, bajando la frecuencia estroboscópica, se ubica la "primera imagen simple". Entonces $v_{\text{estrob}} = v_{\text{oscil}}$ igual que en el caso del disco que gira.

Observando imágenes múltiples y variando ligeramente la frecuencia (lo que siempre sucede al girar manualmente el estroboscopio) se va pasando p. ej. del caso I-c (2 imágenes) al caso III-c (3 imágenes) o al caso II-c (3 imágenes). De modo que a ratos se ven dos imágenes, después tres etc. Igual pasa en el caso de imagen doble, a ratos se ven dos imágenes y de repente una sola imagen, caso II-b. Esto avisa que aun estamos operando con imágenes múltiples.

c) Cosas periódicas que pasan por una región que se observa

Veamos el caso de observar ondas periódicas en la cubeta proyectadas sobre un papel blanco dispuesto debajo de la cubeta.

Si la frecuencia estroboscópica es igual a la frecuencia de las ondas, vemos detenido el cuadro de ondas, pues en el periodo T en que el estroboscopio da una vuelta, el monte de la onda (línea brillante) se ha trasladado en λ (λ = longitud de onda). Luego, otro monte ocupó su lugar, y no se observa cambio alguno. La distancia entre dos líneas brillantes consecutivas es la longitud de onda λ en proyección. Fig. 6-a.

Caso $v_{\text{estrob}} = 2 v_{\text{onda}}$. Para una vuelta del estroboscopio, la onda ha avanzado sólo $\lambda/2$. Por lo tanto se ve duplicado el número de ondas y la distancia entre dos líneas brillantes consecutivas es $\lambda/2$ en la proyección. Fig.6-b.

Con $v_{\text{estrob}} = 3 v_{\text{onda}}$ la distancia entre dos ondas consecutivas es $\lambda/3$ en proyección. Fig.6-c.

Para medir la longitud de onda λ , se coloca una regla en la región observada orientándola a lo largo del sentido de propagación de las ondas. Se mira a través del estroboscopio y se ubica cualquiera imagen simple (no necesita ser la primera). Con ella se mide λ . El método funciona para ondas periódicas rectas o circulares. Al final se calcula la longitud de onda en agua de acuerdo con la geometría de la proyección.

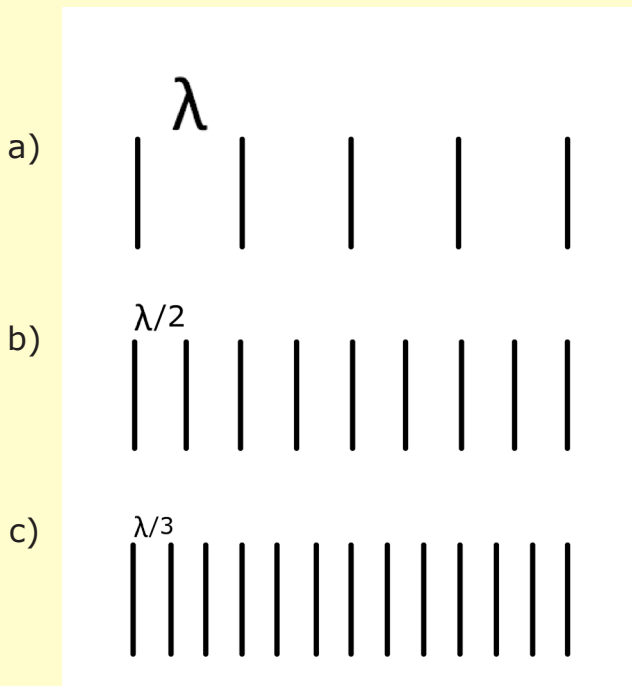


Figura 6
Ondas Periódicas

Algunas consideraciones generales acerca de medición de frecuencia.

En el estudio de frecuencias altas, puede a veces no ser posible obtener la imagen estroboscópica doble. No sabemos entonces si la imagen simple que observamos es la primera u otra de las que aparecen, cuando la frecuencia estroboscópica es un submúltiplo de la frecuencia por determinar. En estos casos $v_{\text{estrob}} = v/k$, (v = frecuencia por determinar). El número k se desconoce en este caso. Podemos calcular la frecuencia v a partir de dos frecuencias estroboscópicas sucesivas, que dan sendas imágenes simples. Sean v_1 y v_2 estas frecuencias estroboscópicas. Entonces v_1 es un submúltiplo de v , a saber:

$$v_1 = \frac{v}{k} \quad \text{y } v_2 \text{ es el submúltiplo siguiente}$$

$$v_2 = \frac{v}{(k+1)}$$

Eliminando k de estas ecuaciones obtenemos la expresión:

$$v = \frac{v_1 \cdot v_2}{v_1 - v_2}$$

Eligiendo un intervalo de tiempo, entre dos destellos sucesivos, un poco mayor o un poco menor que el periodo del movimiento que se está observando, el fenómeno aparece sucesivamente en diferentes puntos muy vecinos de la trayectoria. Si es una marca que rota, se la ve avanzar lentamente en uno u otro sentido, obteniéndose la impresión de "cámara lenta". Esto vale igual para todos los fenómenos periódicos y para sus imágenes simples y múltiples. Durante la observación en estas condiciones, el fenómeno aparece desarrollándose con lentitud poseyendo, por

cierto, un periodo que llamaremos "aparente". "La frecuencia aparente" correspondiente, v_{ap} , está relacionada con la frecuencia v , verdadera del fenómeno y con la frecuencia estroboscópica v_{estrob} . En el caso de rotaciones, la rotación aparente puede tener el sentido de giro del rotador observado o sentido retrógrado, según si v_{estrob} es respectivamente mayor o menor que v .

Operando en la vecindad de la frecuencia que da la "primera imagen simple" rigen las siguientes relaciones:

$$v = v_{estrob} + v_{ap}$$

cuando $v_{estrob} < v$ (giro aparente directo)

$$v = v_{estrob} - v_{ap}$$

cuando $v_{estrob} > v$ (giro aparente retrógrado).

En el primer caso, entre dos destellos consecutivos, la marca que rota realiza una revolución completa, más una fracción de revolución y en el segundo caso no alcanza a completar una revolución. Los demás casos, considerando imágenes múltiples o imágenes simples que no sean la primera, se obtienen combinando las relaciones con los razonamientos desarrollados antes.

Hasta aquí hemos estudiado el estroboscopio desde el punto de vista del manejo individual. El disco puede ser usado también para demostraciones en clase, de modo que todo un curso pueda ver efectos estroboscópicos. No tiene sentido desarrollar mediciones en las demostraciones en clase, pero sí tiene sentido mostrar cosas como el "efecto de cámara lenta" o "dilatación estroboscópica del tiempo", como suele llamarse.

Para demostraciones en clases, hay que iluminar estereoscópicamente el fenómeno periódico que se quiere presentar. Una manera muy simple de realizar esto es trabajar en una sala semiobscura e iluminar el fenómeno periódico con un proyector de diapositivas. La iluminación estroboscópica se logra haciendo girar el disco estroboscópico frente al proyector, próximo al objetivo, de modo que la luz pase por los calados del disco estroboscópico. El disco se puede girar manualmente.

Resulta impresionante mostrar en esta forma diversos fenómenos como la rotación de un radio marcado sobre un disco, vibración del martillo de un timbre eléctrico o de una varilla de acero. Se pueden mostrar las imágenes simples y múltiples, el efecto de cámara lenta, giro aparente en un sentido o en otro, etc. Particularmente interesante resulta observar la vibración de una lámina de acero en "cámara lenta". En este caso se ven muy bien las extrañas flexiones de dicha varilla mientras vibra.

Los efectos que se logran son totalmente equivalentes a los que da la mejor fuente estroboscópica electrónica.

Para terminar, deseo recalcar que en ningún caso debemos abrumar al alumno con detalles sobre observación y teoría estroboscópica. Este artículo es extenso y contiene muchos detalles y ha sido escrito para los colegas que se interesan por comprender las complicaciones de los métodos estroboscópicos y para aquellos que gustan de jugar con este aparato. Los alumnos usarán el estroboscopio como "simple" instrumento para medir cortos intervalos de tiempo y para medir longitudes de onda al trabajar en la cubeta de ondas. Basta mostrarles a ellos la "primera imagen simple" y la "imagen doble". Con eso pueden realizar perfectamente las mediciones que ellos necesiten.