

# UNA PROPUESTA PARA REGISTRAR EL DESPLAZAMIENTO DOPPLER DE ONDAS DE LUZ Y “OÍR” SUS BATIDOS

## A PROPOSAL TO DETECT DOPPLER SHIFT OF LIGHT WAVES AND “TO HEAR” ITS BEATS

**G. G. Romero<sup>1</sup>, E. E. Alanís<sup>1†</sup>, C. C. Martínez<sup>2</sup> y D. O. Domínguez<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Exactas – <sup>2</sup>Facultad de Ciencias Naturales – <sup>3</sup>Facultad de Ingeniería  
Grupo de Óptica Láser - Consejo de Investigación - Universidad Nacional de Salta  
Buenos Aires 177- 4400- Salta - Argentina  
*e-mail: romeropelayog@gmail.com*

Recibido 28/02/11; aprobado 11/08/11

A pesar que el corrimiento Doppler es un tópico bien conocido, el diseño de experimentos para su enseñanza utilizando ondas de luz no es simple. Esta es una de las razones por la que generalmente, en cursos de física básica, la enseñanza de este tema se lleva a cabo utilizando ondas sonoras. En este trabajo se describe una experiencia para detectar batidos Doppler utilizando una fuente de luz láser. El dispositivo propuesto es semejante a un interferómetro de Michelson en el que se han sustituido los espejos por dos superficies difusoras, una de las cuales se traslada a velocidad constante mientras que la otra permanece en reposo. La superposición coherente de la luz dispersada en ambas superficies, da lugar a un patrón de speckle dinámico cuyas fluctuaciones de intensidad contienen la frecuencia de batido entre el haz que ha experimentado el desplazamiento Doppler y el haz de referencia u oscilador local. Las fluctuaciones de intensidad son registradas por un fotodetector cuya señal se digitaliza por medio de la interfaz de sonido del sistema multimedia de una PC. Las señales son filtradas y demoduladas por software. Seleccionando adecuadamente la velocidad del difusor móvil, es posible lograr una modulación de frecuencia dentro del rango audible lo que permite “oír” los batidos por medio de un amplificador de audio.

Palabras Clave: Efecto Doppler, Interferometría, Speckle Dinámico.

Although the Doppler Effect is a well-known topic, the design of a teaching experiment using light waves is not simple. This is one of the reasons why, in basic physics courses; the teaching of this topic is usually conducted using sound waves. This work describes an experiment for detecting Doppler beats using a laser light source. The proposed device is similar to Michelson's interferometer in which the mirrors have been substituted for two diffuse surfaces, one of them moving with constant speed while the other remains at rest. The coherent superposition of the light dispersed in both surfaces, give rise to a dynamic speckle pattern, whose intensity fluctuations contains the beat frequency between the Doppler shifted beam and the reference beam, also called local oscillator. The intensity fluctuations are recorded by means of a photodetector whose signal is digitized with a sound interface of a multimedia system. The signals are filtered and demodulated by software. By properly selecting the speed of the moving diffuser, it is possible to achieve a modulation frequency within the audible range that allows "to hear" the beats through an audio amplifier.

Keywords: Doppler Effect, Interferometry, Dynamic Speckle

### I. INTRODUCCIÓN

Efecto Doppler es la variación de frecuencia que experimenta una onda cuando la fuente y el observador se encuentran en movimiento relativo. Esto se verifica en ondas mecánicas (acústicas) y en ondas electromagnéticas (ópticas) aunque la formulación matemática en ambos casos es un poco diferente. Este fenómeno ha sido de fundamental importancia en varios campos de la ciencia tales como el descubrimiento de la expansión del universo, la ecografía de alta resolución, la detección de exoplanetas, etc. para citar solo unos pocos ejemplos. Generalmente, para la enseñanza de este tema en cursos de física básica se utilizan ondas sonoras. Esto es así, debido a la facilidad que ofrece este tipo de ondas en la implementación de experimentos donde el desplazamiento en frecuencia es claramente percibido. El ejemplo más común es el sonido emitido por la sirena de una ambulancia cuyo tono se percibe agudo cuando se acerca al observador y más grave cuando se aleja.

En oposición, el diseño de experimentos utilizando ondas de luz no es tan simple<sup>(1)</sup>. Además, para que pudiera percibirse un cambio de color en la luz que emite una fuente en movimiento, su velocidad tendría que ser tan alta que sería difícil de alcanzar en el laboratorio. Si bien esas velocidades están presentes en fuentes naturales, como las estrellas, no podemos percibir un cambio en su color porque siempre las vemos en el mismo estado de movimiento; el ejemplo de la ambulancia, que se acerca y se aleja, no es aplicable en este caso. Sin embargo, podemos recurrir a un dispositivo relativamente simple que nos permitirá relacionar el desplazamiento Doppler de la luz con una señal acústica, fenómeno que podemos percibir con el oído.

### II FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Consideremos un interferómetro de Michelson con un espejo fijo ( $E_1$ ) y el otro ( $E_2$ ) se puede mover en la dirección del haz de luz, como esquemáticamente se

<sup>†</sup>Profesor Emérito – UNSa.

muestra en la Fig. 1. La distribución de luz en el patrón de interferencia obtenido a la salida del interferómetro va a depender de la alineación del interferómetro. Si el interferómetro es alineado en configuración de franjas de igual inclinación el patrón de interferencia consistirá de un conjunto de franjas circulares, como se muestra en el inserto de la Fig. 1. En el centro de este patrón se coloca un detector, D.

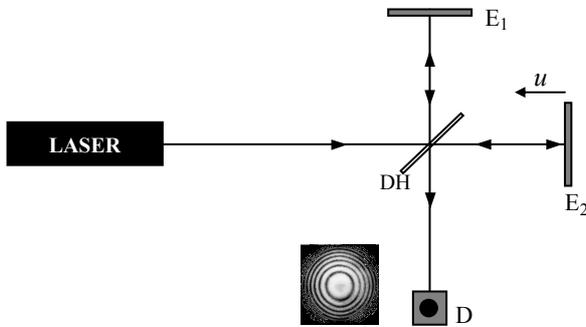


Figura 1: Interferómetro de Michelson. E1, espejo fijo; E2, espejo móvil; DH, divisor de haz; u, velocidad.

A medida que E2 se mueve, el detector D colocado a la salida del interferómetro registra una señal de intensidad fluctuante. Este hecho puede ser interpretado ya sea como un fenómeno de *Interferometría clásica* o como una *manifestación Doppler*<sup>(2)</sup>. En este análisis, la velocidad del espejo se supone constante y muy pequeña comparada con la velocidad de la luz  $c$  ( $u \ll c$ ) por lo que se ignoran los efectos relativistas.

En la interpretación interferométrica clásica<sup>(3)</sup>, el haz reflejado por E2 interfiere con el haz que proviene de E1 (haz de referencia). El detector D registrará una intensidad que depende de la diferencia de fase entre los dos haces en ese punto. Si E2 se mueve una distancia igual a  $\lambda/2$  ( $\lambda$  es la longitud de onda) la diferencia de camino óptico entre los dos haces cambia en  $\lambda$  y durante dicho desplazamiento el detector registra un ciclo completo de interferencia (digamos brillante-oscuro-brillante) al cruzar una franja de interferencia por la ventana del detector. Si  $N$  de estos ciclos se registran en un tiempo  $\Delta t$ , el número de ciclos en un segundo será  $f_o = N/\Delta t$ , es decir,  $f_o$  es la **frecuencia** de las oscilaciones de intensidad registradas por el detector D.

Como en cada ciclo el espejo E2 se desplaza  $\lambda/2$ , en el tiempo  $\Delta t$  el desplazamiento total será:

$$\Delta s = f_o \frac{\lambda}{2} \Delta t \quad (1)$$

con lo cual la velocidad de E2 vendrá dada por:

$$u = \frac{\Delta s}{\Delta t} = f_o \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

Utilizando la relación  $c = \lambda \nu$  (donde  $\nu$  es la frecuencia de la luz) y reacomodando la ec. 2, obtenemos que la frecuencia de las oscilaciones (o el número de franjas que en un segundo cruzan el detector) vendrá dada por:

$$f_o = \nu \left( \frac{2u}{c} \right) \quad (3)$$

El razonamiento en la interpretación Doppler es así: en el haz incidente,  $\nu$  ciclos de la onda ocuparán una

distancia  $c\Delta t$  (donde  $\Delta t = 1s$ ). Este será también el caso después de la reflexión si el espejo E2 es estacionario. En cambio, si el espejo se mueve hacia la fuente de luz a velocidad  $u$ , después de la reflexión estos  $\nu$  ciclos ocuparán una distancia  $(c-2u)\Delta t$ , puesto que en  $\Delta t = 1s$ , el espejo ha viajado ahora una distancia  $u\Delta t$  hacia la onda incidente. La frecuencia de la onda reflejada, que llega a D, será ahora mayor y vendrá dada por:

$$\nu' = \nu \left( \frac{c}{c-2u} \right) \quad (4)$$

Esta onda reflejada de frecuencia  $\nu'$  se mezcla con la que proviene del haz de referencia (oscilador local) de frecuencia  $\nu$  y produce un batido cuya frecuencia,  $f_b$ , es igual a la diferencia entre las dos frecuencias (Efecto Doppler)

$$f_b = \nu' - \nu = \nu \left( \frac{2u}{c} \right) \quad (5)$$

donde se ha utilizado la aproximación  $c \gg 2u$ . Esta es la frecuencia de las oscilaciones de intensidad registrada por el detector D y que es idéntica a la ec. (3) ( $f_o \equiv f_b$ ).

Intuitivamente no es obvio que ambas interpretaciones sean idénticas. La interpretación *interferométrica* involucra la superposición de dos ondas de la **misma frecuencia** y la detección de las correlaciones entre ambas a medida que una onda se “desliza” encima de la otra (máximos y mínimos de interferencia). La interpretación *Doppler*, en cambio, involucra la superposición de dos ondas de frecuencias **ligeramente distintas** y la detección de las pulsaciones o la frecuencia de batido resultante. Sin embargo, el análisis anterior muestra que la frecuencia detectada es la misma en ambos casos y las dos aproximaciones son, de hecho, dos formas de mirar al mismo fenómeno.

## II DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

El montaje del experimento descrito en el párrafo anterior, requiere del uso de espejos de primera superficie para evitar reflexiones múltiples. Estos elementos generalmente son costosos y no siempre se encuentran disponibles en un laboratorio de enseñanza de física básica. Además también se requiere de mucha destreza en el alineamiento del interferómetro. Estos inconvenientes pueden ser subsanados si se reemplazan los espejos por superficies difusoras. En este caso a la salida del interferómetro tendremos un campo de speckle que modula las franjas de interferencia<sup>(4)</sup>. El razonamiento expresado anteriormente es igualmente válido y las fluctuaciones de intensidad, “speckle dinámico”<sup>(5)</sup>, contendrán los batidos Doppler dados por la ecuación (5). La forma de extraer esta información se verá en la siguiente sección<sup>(6)</sup>.

La Fig. 2 muestra el arreglo experimental modificado en el que se reemplazaron los espejos por difusores hechos con láminas de aluminio despulido. Por medio de la lente L el haz láser es enfocado en la superficie de cada difusor, formando dos fuentes puntuales a partir de las cuales la luz es retrodispersada en todas direcciones. Esta configuración tiene dos importantes ventajas: la primera es que el interferómetro se vuelve menos sensible para su alineación<sup>(7)</sup> ya que las dos fuentes puntuales cuyos haces

interfieren se encuentran prácticamente en el mismo plano; la segunda ventaja consiste en que el tamaño de los granos de speckle se hace mayor y contienen varias franjas de interferencia, como se observa en el inserto de la figura 2, facilitando la detección de los batidos en el ruido de fondo del speckle dinámico.

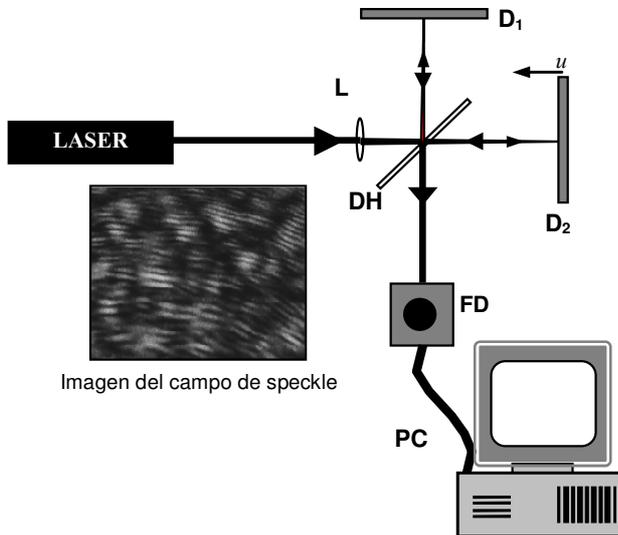


Figura 2: Dispositivo experimental. D: difusor; u: velocidad; DH: divisor de Haz; FD: fotodetector; L: lente

El láser utilizado es un láser de He-Ne de longitud de onda de 632,8 nm. El difusor  $D_2$  se monta en un dispositivo trasladador controlado por computadora. La ventana del Fotodetector se diafragma por medio de un *pinhole* cuyo diámetro es mucho menor que la distancia entre franjas, a fin de asegurar que se resuelven las franjas de interferencia. La señal registrada por el fotodetector colocado en el campo de speckle, es digitalizada a través de la entrada de micrófono (o auxiliar) de la placa de sonido de la PC y puede guardarse en formato "wav". Si la velocidad  $u$  del difusor se elige para que la frecuencia de batido  $f_b$  caiga dentro del rango de frecuencias de audio, entonces es posible "oir" estas pulsaciones a través de los parlantes del sistema. El tono del sonido será tanto más agudo cuanto mayor sea la velocidad del difusor, en correlación con el mayor corrimiento Doppler de la frecuencia de la luz al reflejarse en el difusor móvil.

Si se dispone de un software para manipular señales de audio se puede utilizar para mostrar la distribución de frecuencia de las fluctuaciones de intensidad. Como ejemplo en la Fig. 3 se muestra el entorno gráfico del Programa *Sound Forge*.

En esta gráfica se muestra una porción de una señal típica producida por el desplazamiento de las franjas de interferencia por la ventana del detector. En el inserto se muestra la gráfica de la distribución de frecuencia (FFT) a cuyo pie figuran datos característicos, tales como la frecuencia media del espectro.

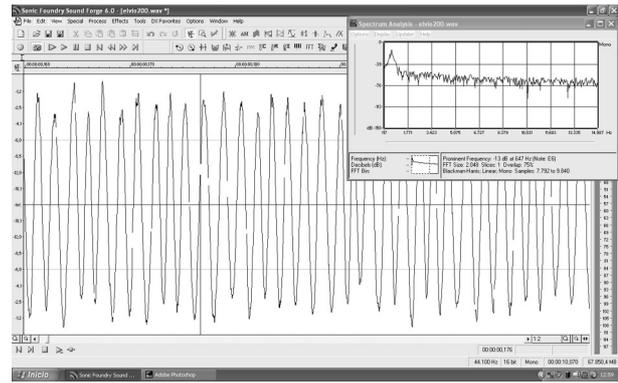


Figura 3: Entorno gráfico programa *Sound Forge*. Señal típica y distribución de frecuencias.

### III PROCESAMIENTO DE LOS DATOS Y EXTRACCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Particularmente en este trabajo la frecuencia de los batidos Doppler se determina a partir del espectro de las fluctuaciones de intensidad  $I(t)$  de los patrones de speckle dinámico obtenidos a medida que el difusor móvil se desplaza una cierta distancia a diferentes velocidades. El espectro, Transformada de Fourier de la señal  $I(t)$ :

$$F[I(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} I(t) e^{-i2\pi vt} dt \quad (6)$$

exhibirá un pico correspondiente en la frecuencia de batido el que puede correlacionarse con la velocidad del difusor usando la ec. 3. El cálculo de la transformada de Fourier se lleva a cabo numéricamente mediante el algoritmo de la Fast Fourier Transform (FFT) disponible en los paquetes de utilitarios de algunas planillas de cálculo (Q-PRO, EXCEL, etc).

En la Fig. 4 a) se muestra una porción de una señal típica en la que claramente se observan las franjas de interferencia moduladas por el grano de speckle. Una forma práctica para mostrar a los estudiantes este hecho, consiste en bloquear el haz de referencia para que desaparezcan las franjas de interferencia, en cuyo caso el fotodetector registrará sólo las variaciones de intensidad del speckle, producidas por el hecho de que  $D_2$  se encuentra en movimiento, como se observa en Fig. 4 b).

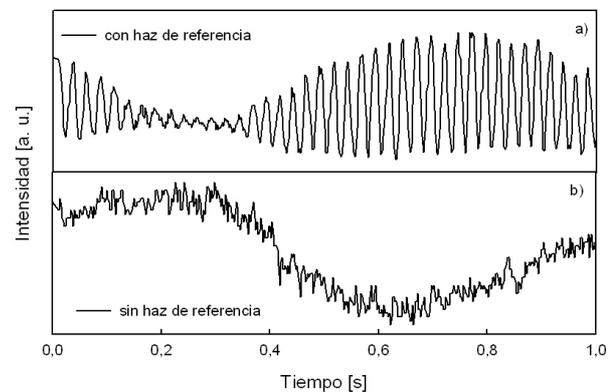


Figura 4: Señal típica registrada por el fotodetector. a) con haz de referencia y b) sin haz de referencia

En planilla de cálculo, se lee esta señal y se obtiene el espectro de la misma utilizando la herramienta de análisis "Fourier". El resultado que arroja esta función es una

columna de números complejos de la cual se obtiene el módulo usando la función "IMABS( )". Este paso permite obtener como resultado una columna de números reales que representa el espectro de la señal. Una representación gráfica del espectro obtenido cuando el difusor se mueve a una velocidad  $u = 1 \times 10^{-5}$  m/s se muestra en la Fig. 5. Se advierte un pico muy pronunciado para una frecuencia de 31,4 Hz, resultado consistente con el valor que arroja, para esta velocidad, la ec. 3. En este caso la diferencia entre el valor teórico y el obtenido por medio del experimento es del orden de 1,5 %.

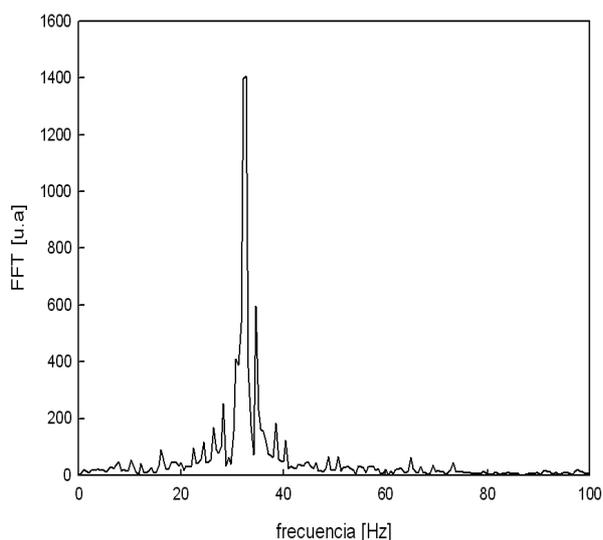


Figura 5: Espectro de las fluctuaciones de intensidad para  $u = 1 \times 10^{-5}$  m/s.

Se repitió el experimento para diferentes velocidades del difusor. Los valores medidos de la frecuencia de batido Doppler en función de los valores correspondientes dados por la ec. (5). se muestran en la Fig. 6. la correlación entre los valores experimentales y los teóricos es muy buena.

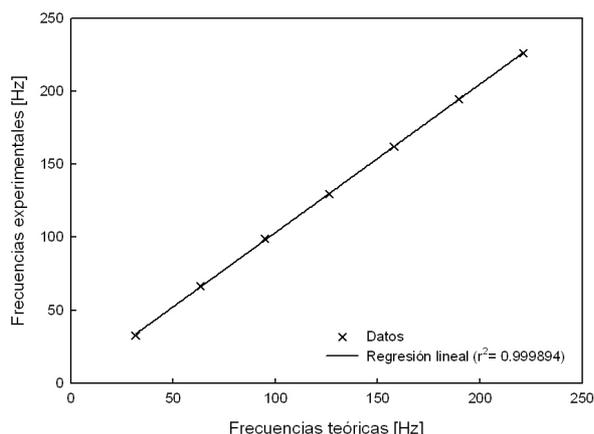


Figura 6: Frecuencias de batido medidas y calculadas para distintas velocidades de  $D_2$ .

## CONCLUSIONES

Se presenta una manera simple para detectar el desplazamiento Doppler de la frecuencia de la luz, que ocurre cuando la fuente se mueve respecto del observador, utilizando un dispositivo experimental sencillo y un método de medición relativamente simple.

Este corrimiento se detecta indirectamente a través de los batidos producidos cuando se superpone un haz de referencia con el haz corrido en frecuencia, que se ha retrodispersado en un difusor móvil. Estas pulsaciones de la luz son detectadas por un fotodetector cuya señal de salida se envía a un amplificador de audio y pueden "oírse" por los parlantes, provisto que la velocidad del difusor sea tal que la frecuencia de batido caiga en el rango audible (\*). La señal de salida también se digitaliza y se procesa en una planilla de cálculo a fin de calcular la frecuencia de los batidos mediante la transformada rápida de Fourier. Se ha encontrado una buena correlación entre los batidos Doppler y la velocidad del difusor. El experimento es fácil de implementar permitiendo introducir en cursos avanzados de Óptica algunas ideas sobre, speckle dinámico, procesamiento de señales y manejo de planillas de cálculo para el procesamiento de la información óptica. En cursos más básicos se puede utilizar esta propuesta, evitando los cálculos, en experiencias demostrativas para reforzar el entendimiento de que el fenómeno Doppler está presente siempre que exista movimiento relativo entre la fuente y el observador independientemente del tipo de ondas que se trate (mecánicas o electro magnéticas).

(\*) Por ejemplo, para  $u$  entre 10 y 1000  $\mu\text{m/s}$ , las frecuencias de batido estarían comprendidas entre 30 y 3000 Hz. Para el desplazamiento del difusor, en este trabajo se ha utilizado un trasladador lineal accionado por computadora que permite establecer con precisión la velocidad dentro de un amplio rango. Sin embargo, si se dispone de un interferómetro de Michelson comercial, es posible diseñar un sistema sencillo para mover el tornillo micrométrico que actúa sobre el espejo móvil. La elección del rango de velocidades estará condicionada por la especificación del mecanismo reductor, pero siempre es posible realizar la experiencia propuesta de un modo cualitativo.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por PME 1390/2 ANPCyT, el Consejo de Investigación (Proyecto N° 1888) y la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de Salta.

## REFERENCIAS

1. Luis Bernal and Luis Bilbao, "Optical Doppler shift measurement using a rotating mirror", Am. J. Phys. 75 (3) 216-219 (2007).
2. J. D. Bries, J. Opt. Soc. Am. A. 13 (2). 345-350 (1996).
3. J. C. Dainty, ed. "Laser Speckle and Related Phenomena", Springer-Verlag, 2ª ed. (1984).
4. Robert Guenther, "Interference" chap. 4 in Modern Optics. John Wiley and Sons, Inc. (1990).
5. H. J. Rabal, R. Braga Eds. Dynamic Laser Speckle and Applications. CRS Press, J. Taylor and Francis Publisher. (Boca Raton, FL, USA) (2009)
6. G. Romero, E. Alanís and H. Rabal, "Statistics of the dynamics speckle produced by rotating diffuser and its application to the assessment of paint drying". Opt. Eng. 39, 1652-1658 (2000).
7. E. Alanís et al, "An inexpensive interferometric set-up for measuring microscopic displacements". The Physics Teacher, 42 (4) 223-225 (2004).