

**EFFECTO DOPPLER ÓPTICO**  
**Revisto con tecnología de hoy:**  
**Experimentos y problemas de interpretación**

*Comunicación efectuada por el Dr. Luis Bilbao  
en la Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires  
en la sesión privada extraordinaria  
del 13 de septiembre de 2008*



## Introducción

El origen de este trabajo fue el desarrollo de experiencias de laboratorio avanzado para la licenciatura en Ciencias Físicas. Se encará la repetición de viejos trabajos experimentales relativos a la propagación de la luz (experiencia de Fizeau en medios transparentes móviles, demostraciones de la velocidad de la luz, etc.), pero utilizando tecnología actual accesible en laboratorios de enseñanza.

En los cursos introductorios de Física se desarrollan experimentos relativos a la propagación de ondas mecánicas y electromagnéticas. En el mercado existen numerosos “kits” de enseñanza que cubren la mayoría de los principales experimentos en este campo. Sin embargo, en ninguno de ellos hay experimentos de efecto Doppler óptico.

En general, las demostraciones del efecto Doppler Óptico no son sencillas porque no es fácil mover las fuentes luminosas de manera suficientemente suave y uniforme ya que pequeñas perturbaciones tan pequeñas como una longitud de onda pueden producir un ruido considerable.

En este trabajo se muestra el desarrollo de un aparato basado en un espejo rotante para demostraciones del efecto Doppler óptico que permite, además, discutir sobre aspectos de interpretación tales como: a) Qué debe usarse en el cálculo del corrimiento Doppler producido por reflexión en un espejo: ¿la velocidad del espejo o la velocidad de la imagen?; b) Qué se observa con el movimiento de uno de los espejos de un interferómetro: ¿el batido Doppler o el movimiento de las franjas de interferencia?; c) En este último caso, ¿qué frecuencia debe usarse mientras el espejo está en movimiento?; d) ¿Es lo mismo mover una fuente que mover una imagen de ella mediante un espejo móvil?

## Antecedentes

La primera medición del efecto Doppler Óptico fue realizada por Aristarkh A. Belopolsky a comienzos del siglo XX [1], midiendo el corrimiento de las líneas espectrales del sol observadas luego de la reflexión múltiple en espejos móviles.

En la literatura hay antecedentes de aparatos demostrativos del efecto Doppler. Estos aparatos se basan en producir el movimiento de una fuente virtual generada por el movimiento de un espejo. La medición se hace mediante el batido Doppler de la señal de la imagen móvil y una señal de referencia. Dentro de este tipo de trabajos se puede destacar el uso de un interferómetro de Michelson con un brazo móvil [2-3], la reflexión en el canto de una plataforma giratoria [4] y el movimiento de un espejo montado sobre un tren a escala [5]. En todos estos casos las velocidades de los espejos han sido inferiores a 0.3 m/s, es decir, frecuencias de batido Doppler  $\leq 1$  MHz.

Experimentos a mayor frecuencia de batido, por ejemplo, 100 MHz (hoy en día muchos laboratorios de enseñanza poseen digitalizadores con este ancho de banda), requiere mover los espejos a velocidades mayores (por ejemplo, 10 m/s) lo cual es complicado en un laboratorio o aula. Para superar esta limitación, en un trabajo previo, los autores desarrollaron un aparato basado en un espejo rotante, obteniendo el batido de 2 haces que se reflejan en el espejo en distintas posiciones [6], siendo la frecuencia del batido proporcional a la velocidad de rotación del espejo.

A partir de ese aparato básico se desarrolló uno más avanzado, que permite intercambiar fácilmente entre 3 configuraciones distintas, denominadas, (1) Batido Doppler, (2) Tiempo de Vuelo y (3) Visibilidad, cuyo esquema se muestra en la Figura 1 (ver pág. 378). El batido Doppler se obtiene dejando sólo el primer detector (PM1 o detector “cercano”) y eliminado el divisor BS2 y los espejos M1 y M2. La configuración “Tiempo de Vuelo” se obtiene eliminado el divisor de haz BS2 (en la Figura 2 de la pág. 379 se muestra un ejemplo de las señales obtenidas con esta configuración).

La configuración Tiempo de Vuelo sirve para demostraciones de la velocidad de propagación de la luz mediante la medición del retraso entre señales que recorren distinto camino. Midiendo esta diferencia de distancias y la diferencia de tiempo de llegada se puede obtener la velocidad de propagación en el medio donde se propaga la luz.

En la configuración Visibilidad, la superposición de las señales “cercana” y “lejana” permite obtener un mínimo de intensidad cuando el desfase entre ellas es de  $\pi$  radianes. Agregando un controlador electrónico de la velocidad, se podría automatizar la búsqueda del mínimo, de manera de facilitar su uso como aparato demostrativo.

## Discusión

Es bien sabido que para calcular el efecto Doppler producido por un espejo móvil, debe usarse la velocidad del espejo y no aquella de la fuente virtual [7]. Sólo en el caso de un espejo plano, los resultados coinciden a primer orden. Esto puede verse inmediatamente en el caso de incidencia normal. Por un lado, en un espejo plano que se mueve con velocidad  $u$  (acercándose al detector), la velocidad de la imagen es  $v = 2u$ . Por otro lado, la frecuencia Doppler reflejada en el espejo es

$$f' = f \frac{1 + \frac{u}{c}}{1 - \frac{u}{c}} \quad (1)$$

mientras que la frecuencia de una fuente móvil con velocidad  $v = 2u$  es

$$f' = f \sqrt{\frac{1 + \frac{2u}{c}}{1 - \frac{2u}{c}}} \quad (2)$$

Las ecuaciones (1) y (2) son iguales sólo a primer orden en  $u/c$ .

Otro problema de interpretación está dado por la equivalencia o no entre mover una fuente y mover una imagen de la fuente. Supongamos que en el instante  $t$  un espejo plano se encuentra en la posición  $x$  y se mueve con velocidad  $u$ . La frecuencia Doppler correspondiente alcanzará a un detector, ubicado en la posición  $x'$ , en un instante posterior dado por

$$t' = t + \frac{x' - x}{c} \quad (3)$$

El cambio de fase medido en el detector cuando el espejo pasa de la posición  $x_1$  a la posición  $x_2$ , que se obtiene integrando (1), teniendo en cuenta el retraso (3), resulta

$$\Delta\Phi_{\text{imagen}} = -2k_0(x_2 - x_1) - \omega_0(t'_2 - t'_1) \quad (4)$$

En cambio, para una fuente móvil, se debe integrar (2) lo que lleva a

$$\Delta\Phi_{\text{fuente}} = -k_0(x_2 - x_1) - \omega_0(t'_2 - t'_1) + \omega_0 \int_{t'_1}^{t'_2} \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) dt \quad (5)$$

siendo

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (6)$$

Comparando (4) y (5) se ve que en el caso del espejo el cambio de fase medido depende sólo de la posición mientras que en el caso de la fuente móvil también depende de la historia de la velocidad, dada por la integral del miembro derecho de (5). Esto puede entenderse asociando la fase de una fuente a su “edad” (debido a que la fase es proporcional al número total de pulsaciones de la fuente) y, al igual que la paradoja relativista de los mellizos, la edad dependerá no sólo de su posiciones inicial y final, sino también de la historia del camino recorrido. Notar que dicha integral es de segundo orden en  $v/c$  por lo cual puede ser despreciada en muchos problemas prácticos.

Por último, hay que destacar que en el uso de la equivalencia mencionada aquí arriba, cuando se calcula el corrimiento de franjas de interferencia, Ec. (4) o Ec. (5), debe usarse la frecuencia propia,  $\omega_0$ , aunque el espejo o la fuente se estén moviendo; en cambio, si se calcula mediante el efecto Doppler hay que usar la frecuencia corrida, Ec. (1) o Ec. (2).

## Conclusiones

El estado actual de la electrónica (fotodiodos, digitalizadores, computadoras) permite la realización e interpretación de distintas experiencias de efecto Doppler óptico con dispositivos sencillos y económicos.

Para calcular el efecto Doppler producido por un espejo móvil, debe usarse la velocidad del espejo y no aquella de la fuente virtual. Sólo en el caso de un espejo plano, los resultados coinciden a primer orden.

El corrimiento de franjas por el movimiento de un espejo en un interferómetro, puede ser interpretado mediante la variación de la diferencia de camino o por el efecto Doppler. En el primer caso, el cálculo debe hacerse usando la frecuencia propia de la fuente y no la frecuencia corrida por Doppler, aun cuando el espejo se está moviendo.

Si la interferencia se produce por el movimiento relativo de dos fuentes coherentes, el desfase depende de la velocidad y del camino, de manera análoga a la paradoja de los mellizos.

## Agradecimiento

Trabajo financiado parcialmente por la UBA subsidio X206/04.

## Referencias

- [1] Aristarkh A. Belopolsky, *Astrophysical Journal*, Vol. XIII, 15-24, 1901.
- [2] Darrell K. Hutchins, *American Journal of Physics*, 44 (3), 391-392, 1976.
- [3] Richard H. Belansky and Keith H. Wanser, *American Journal of Physics*, 61 (11), 1014-1019, 1993.
- [4] T. D. Nichols, D. C. Harrison, and S. S. Alpert, *American Journal of Physics*, 53 (7), 657-660, 1985.
- [5] T. James Belich, Ryan P. Lahm, Richard W. Peterson, and Chad D. Whipple, *American Journal of Physics*, 65 (3), 186-190, 1997.
- [6] Luis Bernal, Luis Bilbao, *American Journal of Physics*, 75, 216-219, 2007.
- [7] T. P. Gill, *The Doppler Effect* (Logos Press & Academic Press, London, 1965), p. 134.

LUIS BILBAO  
Instituto de Física del Plasma, CONICET-UBA

LUIS BERNAL  
Departamento de Física, Universidad Nacional  
de Mar del Plata

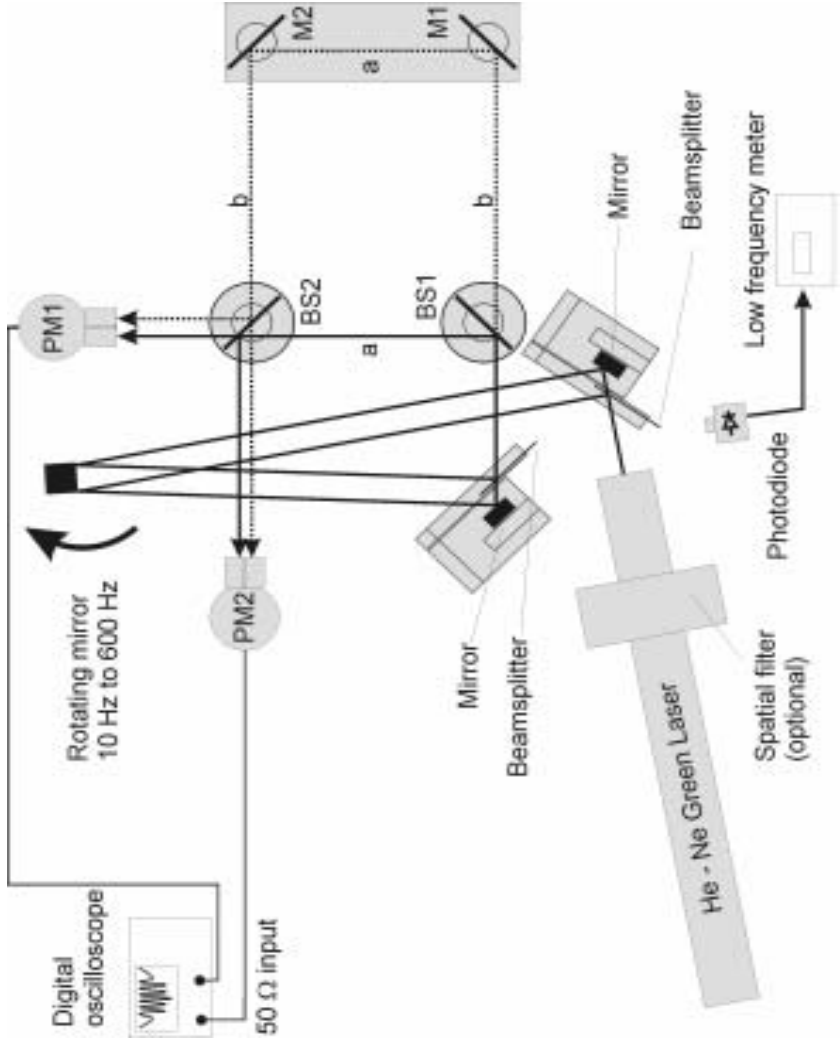


Figura 1. Esquema del aparato basado en un espejo rotante que permite 3 configuraciones distintas: a) Visualización del efecto Doppler (quitando BS2, M1 y M2), b) Medición por Tiempo de vuelo (quitando BS2), y c) Medición por Visibilidad (configuración mostrada en la figura). PM1 y PM2 son los detectores, BS1 y BS2 son divisores de haz, y M1 y M2 espejos planos.

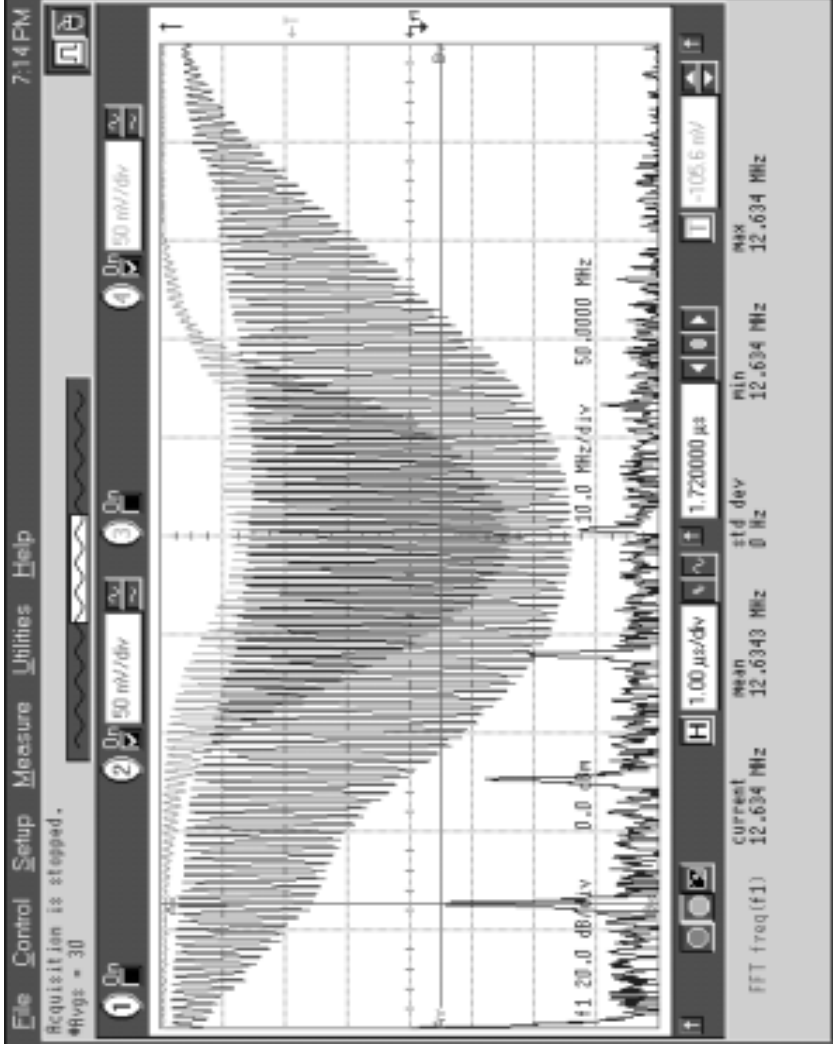


Figura 2. Batidos Doppler observados en la configuración Tiempo de Vuelo. El trazo superior corresponde al detector "cercano" (PM1), mientras que el trazo inferior (más ancho) corresponde al "lejano" (PM2). Se muestra también, en la parte más baja, la transformada de Fourier del detector PM1.