



# GRADO EN FÍSICA

## LABORATORIO DE FÍSICA III

CURSO 2015-2016

1<sup>er</sup> CUATRIMESTRE

### LABORATORIO DE ÓPTICA

#### PRÁCTICA: Interferómetro de Fabry-Perot

##### 1. Objetivos

- Medida de la longitud de onda media del doblete amarillo de sodio
- Medida de la separación espectral del doblete amarillo de sodio.
- Medida de la separación entre los espejos del interferómetro.

##### 2. Fundamentos Físicos

El fenómeno de interferencias múltiples se ilustra con el interferómetro de Fabry-Perot. En la Figura 1(a) se muestra un esquema del proceso de formación de las interferencias. El interferómetro de Fabry-Perot está formado por dos superficies altamente reflectantes paralelas entre sí. Parte de la luz que incide sobre el interferómetro entra en la cavidad formada por los dos espejos y sufre una serie de reflexiones y transmisiones en dichos espejos. Las ondas que salen del interferómetro se recolectan mediante una lente convergente y se obtiene una figura interferencial en forma de anillos en el plano focal de la lente, Figura 1(b).

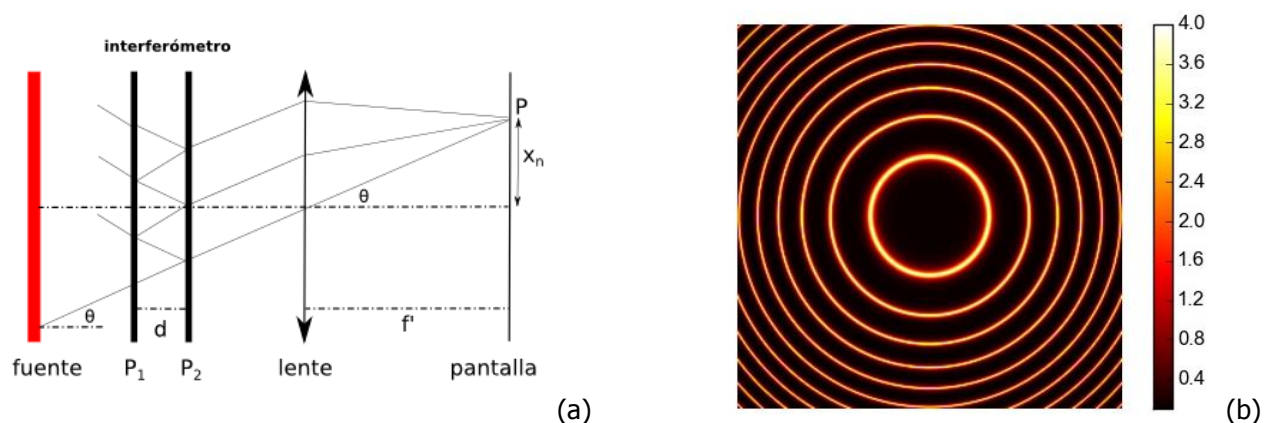


Figura 1. (a) Interferómetro de Fabry-Perot; la lente recombina los campos transmitidos para producir la figura de interferencias. (b) Patrón de interferencias monocromático usando la ecuación (1)

Los máximos de interferencias producidos por los interferómetros de Michelson y de Fabry-Perot están ubicados en las mismas posiciones angulares aunque, en el caso del interferómetro de Fabry-Perot, éstos son mucho más estrechos. Debido a ello, el interferómetro de Fabry-Perot es más eficiente a la hora de poder discriminar espectros discretos, como los de un doblete, Fig. 2.

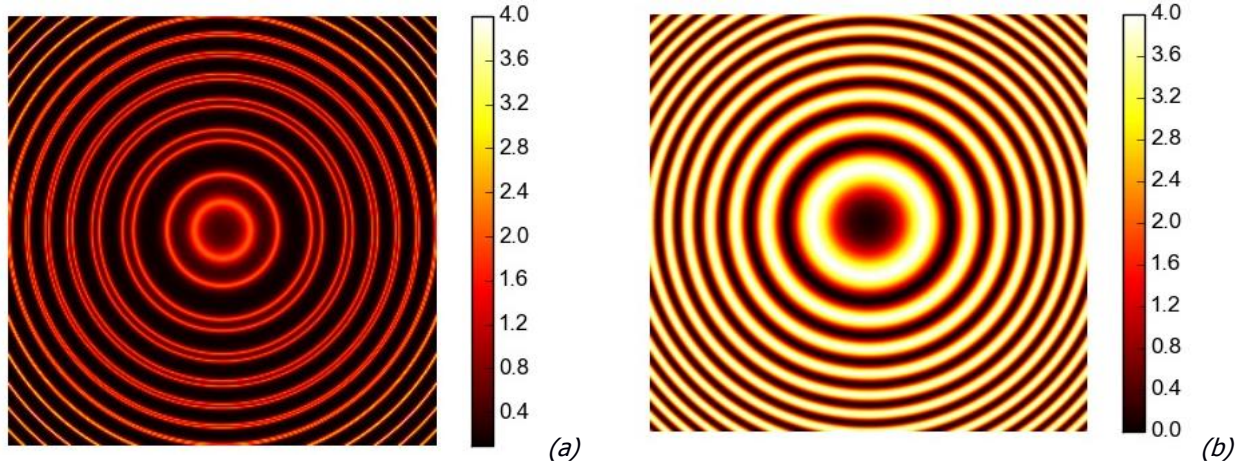


Figura 2. Simulación de la figura interferencial para un doblete en situación en la que el contraste no es máximo (a) para el interferómetro de Fabry-Perot. (b) para el interferómetro de Michelson.

El desarrollo teórico del interferómetro se ha visto en la asignatura Óptica de 2º curso en el grado en Física. Cuando se suma el campo de todas las ondas transmitidas, según la geometría de la Fig. 2(a), la distribución de intensidad a la salida del interferómetro resulta [1]

$$I = \frac{I_{max}}{1 + F \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)}, \quad (1)$$

donde  $\varphi = 2kd \cos\theta$  es el desfase introducido entre dos haces transmitidos consecutivos debido a la diferencia de camino óptico,  $I_{max} = I_0 t^4 / (1 - r^2)^2$  y  $F = 4r^2 / (1 - r^2)^2$  es la Fineza. Además,  $I_0$  es la intensidad de la onda incidente,  $r$  y  $t$  son los coeficientes de reflexión y transmisión de las láminas respectivamente (consideramos que ambas láminas son idénticas),  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz,  $\theta$  es el ángulo de observación,  $n$  es el índice de refracción del medio entre los espejos y  $d$  es la separación entre las láminas. De acuerdo con la ecuación (1), la figura interferencial tiene simetría cilíndrica respecto del eje del sistema, produciéndose una serie de anillos concéntricos como los mostrados en la Fig. 1(b). La Fineza da cuenta de lo estrecho que es cada uno de estos anillos. Los máximos de intensidad (el centro de los anillos), se producen cuando el denominador de la ecuación (1) toma el menor valor posible, es decir, cuando el argumento de la función seno es un múltiplo de  $\pi$ . Por ello, se formarán anillos de interferencia cuando se cumpla

$$2d \cos\theta_m = m\lambda, \quad (2)$$

donde  $m$  es el orden interferencial. Esta ecuación indica que para cada valor  $m$  existe un ángulo  $\theta_m$  que define la posición del anillo. El valor  $m$  evaluado en el centro de la figura interferencial ( $\theta_m = 0$ ) es  $m = 2d/\lambda$ , por lo que representa el número de longitudes de onda que caben en  $2d$ . Cualquier otro ángulo mayor que cero da lugar a órdenes interferenciales menores. Además, como la longitud de onda  $\lambda$  para el rango visible es muy pequeña, hace que el orden interferencial varíe notablemente con pequeñas variaciones de  $d$ , y por tanto la figura interferencial es muy sensible a pequeños desplazamientos entre espejos.

### 3. Realización experimental

La práctica consta de los siguientes elementos: un interferómetro de Fabry-Perot, un anteojo y una lámpara espectral de sodio. Esta última emite un doblete de mucha intensidad compuesto por dos líneas espectrales muy próximas. En la Figura 3 se muestra un esquema de la disposición experimental de la fuente, los espejos y la óptica de observación. El espejo 1 tiene un tornillo micrométrico graduado que permite su desplazamiento, de forma que se puede seleccionar la distancia  $d$  entre espejos. Asimismo, el espejo 2 tiene 2 tornillos (tornillos de paralelismo) que permiten girarlo vertical y horizontalmente para realizar la alineación entre espejos. Por otro lado, se utiliza un anteojo (ver práctica *Visión y telescopio*) para observar en el plano focal imagen de la lente del anteojo cumpliéndose la condición de la Fig. 1(a). La observación con el anteojo se realiza a través de su ocular, que tiene un tornillo micrométrico acoplado que permite desplazar de forma controlada una línea de referencia sobre el patrón de anillos. Estos anillos también se pueden observar a simple vista sin más que enfocar nuestros ojos al infinito estando la retina en el plano focal de la lente del ojo.

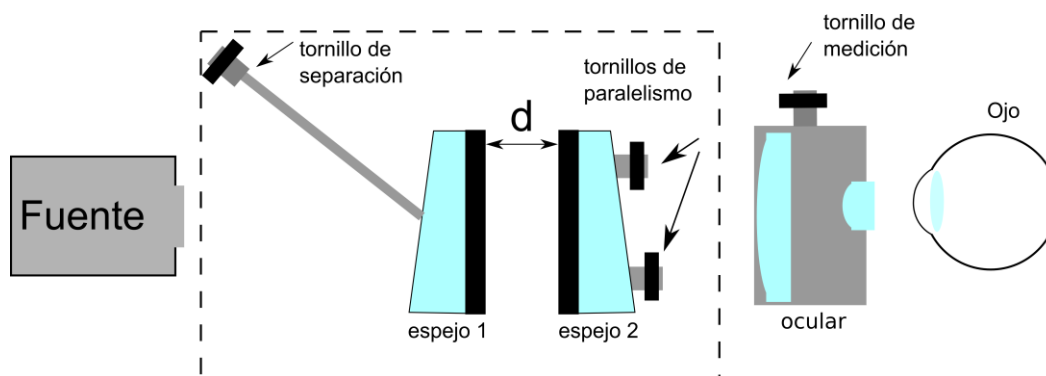


Figura 3. Esquema del interferómetro de Fabry-Perot.

En la Fig. 4 se muestra las fotografías del interferómetro de Fabry-Perot que se va a utilizar en la práctica. En Fig. 4(a) se identifican los elementos descritos en la Fig. 3, mientras que las Fig. 4(b)-(c) muestran el interferómetro con y sin anteojo acoplado.

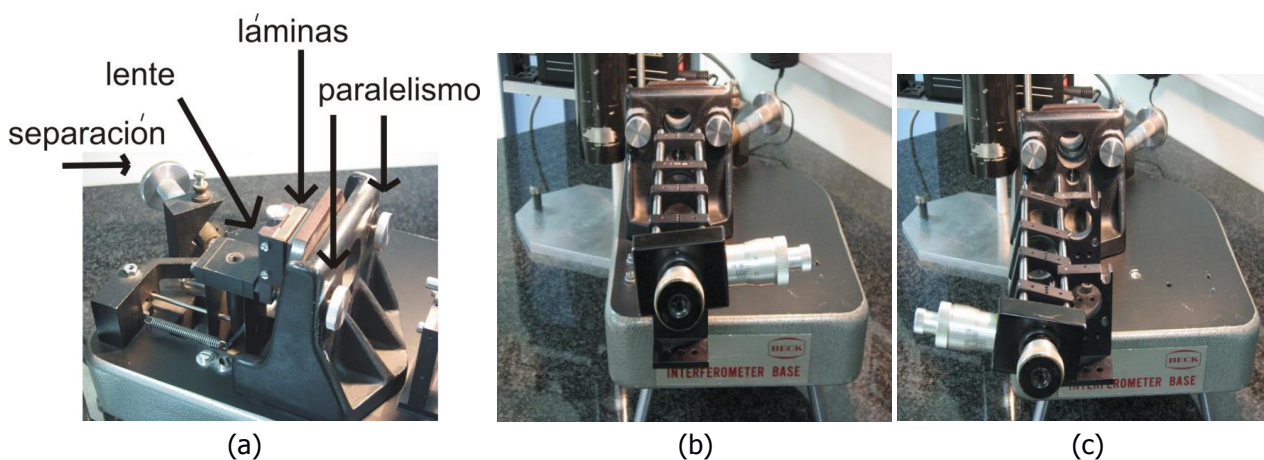


Figura 4. (a) Montaje experimental del interferómetro de Fabry-Perot y modo de observación (b) con ocular y (c) sin él.

**NOTA: EL DESPLAZAMIENTO DEL ESPEJO MÓVIL (TORNILLO DE SEPARACIÓN) CORRESPONDE A LA QUINTA PARTE DE LA LECTURA EN EL TORNILLO MICROMÉTRICO.**

### 3.1 Ajuste del interferómetro

El proceso de interferencias es muy sensible a los parámetros mecánicos, tales como el paralelismo de los espejos o su distancia  $d$ , por lo que se requiere un cuidadoso alineamiento. Para observar los anillos las dos láminas del interferómetro deben estar paralelas. Con el fin de llegar a esta situación se retirará el antejo girándolo hacia un lado como se ilustra en Fig. 4(c). Utilizamos la lámpara espectral de sodio como fuente de luz poniéndola cerca del cuerpo del interferómetro. Así, se observarán varias imágenes de la fuente. Se girarán entonces los tornillos de paralelismo, Fig. 3 y Fig. 4(a) del espejo de salida del interferómetro hasta que estas imágenes coincidan perfectamente. En esta situación los espejos estarán aproximadamente paralelos y podrán observarse franjas de interferencia. Se continuará el ajuste de la alineación hasta obtener anillos concéntricos y se volverá a colocar antejo, realizándose un ajuste fino en esas condiciones. A la hora de realizar este ajuste hay que tener en cuenta que la visibilidad con la que se observan las franjas de interferencia es mayor para ciertas distancias entre las láminas.

### 3.2 Medida de la longitud de onda media del doblete amarillo del sodio

Disponga el interferómetro en condiciones de máxima visibilidad, es decir, en las que los sistemas de anillos de las dos longitudes de onda del doblete amarillo del sodio coinciden, Figura 1(b). Nos fijaremos únicamente en el centro de la figura de interferencia  $\theta=0$ . Aparece un máximo de intensidad en el centro del patrón de franjas cuando se cumple  $2d = m\lambda$  de forma que un desplazamiento del espejo igual a  $\lambda/2$  incrementa en una unidad el orden interferencial  $m$ , apareciendo el siguiente máximo de intensidad. Por tanto midiendo el número de máximos que aparecen para un cierto desplazamiento de los espejos se puede determinar la longitud de onda. Hay que tener en cuenta que cuanto mayor sea este desplazamiento, menor será la incertidumbre relativa cometida en el cálculo de la longitud de onda. El procedimiento consiste en fijar un desplazamiento  $x$  para el espejo móvil y medir el número de anillos  $M$  que aparecen o desaparecen por el centro de la figura interferencial. Idee un método de medida de la longitud de onda media del doblete de sodio para que su error relativo sea menor del 10%. Suponga para esto último que puede estimar a priori la longitud de onda media como 590 nm. Solo cuente una vez y considere que el error cometido al contar franjas es de  $\pm 1/2$  franja.

### 3.3 Medida de la separación espectral del doblete amarillo de sodio

La lámpara de sodio emite un doblete amarillo de mucha intensidad compuesto por dos longitudes de onda,  $\lambda_1 = \lambda - \delta\lambda/2$  y  $\lambda_2 = \lambda + \delta\lambda/2$  espectralmente muy próximas ( $\delta\lambda \ll \lambda$ ). Estas líneas espectrales son incoherentes entre sí, por lo que cada longitud de onda genera un patrón de franjas de interferencia independiente. Por ello, la intensidad total en el plano de observación es la suma de las intensidades producidas por cada una de las longitudes de onda. Las posiciones de los máximos de intensidad de cada figura interferencial vienen dadas por la ecuación (2) particularizada para cada longitud de onda. Habrá desplazamientos  $d$  en el que los dos patrones se solapen, como en la Fig. 1(b). Mientras que en otros desplazamientos  $d$ , los máximos de un patrón coincidirán con posiciones intermedias del otro, como en la

Fig. 2(a). En el primer caso decimos que estamos en posiciones  $d$  de máxima visibilidad mientras que el segundo caso corresponderá con posiciones de mínima visibilidad si un patrón de franjas coincide exactamente en las posiciones de los mínimos del otro patrón. La separación espectral del doblete cumple la siguiente relación [2]

$$\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2(d_a - d_b)}, \quad (3)$$

donde  $d_a$  y  $d_b$  son dos posiciones consecutivas de máxima visibilidad (o de forma equivalente de mínima visibilidad). La diferencia  $d_a - d_b$  es constante en todo el rango del tornillo micrométrico, por lo que es independiente del valor que tome la primera medida  $d_a$ . Teniendo en cuenta esto, diseñe un procedimiento experimental para determinar  $\delta\lambda$ .

### 3.4 Medida de la separación entre los espejos del interferómetro

Disponga el interferómetro en condiciones de máxima visibilidad. Una vez conocida la longitud de onda media del doblete de sodio, es posible también conocer la separación entre espejos,  $d$ . Teniendo en cuenta el Anexo y sabiendo que en el ocular hay un tornillo micrométrico que desplaza una cruz de referencia, idee un método para determinar la separación entre espejos. La focal imagen de la lente del anteojo es  $f' = 100$  mm. ¿Sabría determinar el orden interferencial del anillo más cercano al centro y del más alejado?

#### Anexo: Cálculo de la distancia entre espejos a partir de la pendiente de ajuste

Se parte de la ecuación (2) donde se obtiene las posiciones angulares de los máximos interferenciales  $2d \cos\theta_m = m\lambda$ . Para una distancia  $d$  fija, el anillo central tiene el orden interferencial mayor (mayor  $m$ ) puesto que para el resto de los anillos  $\cos\theta < 1$ . Por otra parte, el radio del anillo brillante de orden  $m$  será  $x' = f' \tan\theta_m$ , siendo  $f'$  la focal imagen de la lente convergente del anteojo en cuyo plano focal imagen se observa la figura de interferencias. Si nos limitamos a observar las interferencias en un pequeño entorno del centro (ángulos  $\theta$  pequeños), se cumplen las siguientes aproximaciones

$$\cos\theta \approx 1 - \frac{1}{2}\theta^2, \quad \tan\theta \approx \theta = \frac{x_m}{f'} \quad (4)$$

Introduciendo estas aproximaciones en la ecuación (2), llegamos a

$$\frac{m\lambda}{2d} \approx 1 - \frac{1}{2}\theta^2 \Rightarrow \theta^2 \approx 2 - \frac{m\lambda}{d} \quad (5)$$

Si llamamos  $D_m = 2x_m$  al diámetro del anillo  $m$ -ésimo, tendremos  $D_m^2 = 4(f'\theta)^2$ . Utilizando esta última expresión junto con (5) se obtiene finalmente

$$D_m^2 = -\frac{4f'^2\lambda}{d}m + 8f'^2 \quad (6)$$

la cual relaciona el cuadrado del diámetro de los anillos  $D_m^2$  con el orden  $m$  del mismo de forma lineal. Es de notar que anillos consecutivos les corresponden órdenes interferenciales consecutivos.

## **4. Bibliografía**

### **Básica**

- [1] M. Born y E. Wolf, *Principles of optics* (Pergamon Press, Oxford, Reino Unido, 1975).
- [2] E. Hecht y A. Zajac, *Óptica* (Addison-Wesley Iberoamericana, Wilmington, EE.UU., 1986).

### **Específica**

- [3] M Vaughan, *The Fabry-Perot Interferometer: History, Theory, Practice and Applications* (CRC Press, 1989)  
ISBN 852741383
- [4] G. Hernandez, *Fabry-Perot Interferometers* (Cambridge University Press, 1986) ISBN 0-521-32238-3.



## Plantilla

**El informe de esta práctica debe contener única y exclusivamente las respuestas solicitadas en esta plantilla. En esta plantilla debe calcular las incertidumbres de los resultados**

**Nota:** Considere que los desplazamientos reales del espejo móvil  $d$  corresponde a la quinta parte de la lectura en el tornillo micrométrico.

### Ajuste el interferómetro

- Explique el proceso de ajuste del interferómetro y los problemas que haya podido encontrar.
- ¿Cómo sabe que el interferómetro está ajustado?

### Medida de la longitud de onda media del doblete amarillo de sodio

- Explique brevemente el procedimiento experimental para determinar la longitud de onda media  $\lambda$  de la fuente de luz.
- Exponga los cálculos para obtener un error relativo del 10% en la longitud de onda.
- Considere una única tanda de medidas y un error de  $\pm 1/2$  franja en el número total de franjas. Exponga los resultados de todas las medidas realizadas y la longitud de onda calculada con su error.
- ¿Cómo sabe que el hecho de que la lámpara de sodio esté formada por un doblete no le está afectando a la medida?

### Medida de la separación espectral del doblete amarillo de sodio

- Explique brevemente el procedimiento experimental para determinar la separación espectral  $\delta\lambda$  del doblete amarillo de sodio.
- Exponga todas las medidas realizadas y los cálculos para obtener la separación espectral  $\delta\lambda$ , con su error.

### Medida de la separación $d$ entre las placas del interferómetro

- Explique brevemente el procedimiento experimental para determinar la separación  $d$  entre espejos. Una vez fijado  $d$  no cambiarlo en todo este apartado.
- Exponga los resultados de todas las medidas realizadas y los cálculos para obtener el valor de  $d$  con su error.
- Determine el orden interferencial  $m$  del anillo más cercano al centro y del más lejano, considerando que la focal imagen de la lente del anteojo es  $f' = 100$  mm.

**Debe añadir aquí alguna observación o idea que no esté incluido en lo anterior**

## Fenómenos interesantes para los curiosos

### En este apartado no se evaluarán las preguntas solicitadas

- ¿Por qué para que opere correctamente el interferómetro de Fabry-Perot es necesario que los dos espejos sean altamente reflectantes? ¿Qué pasaría si en vez de espejos se ponen láminas de vidrio?
- ¿Puede encontrar una relación entre las intensidades de los haces transmitidos por el interferómetro?

### 5. Quiero saber más

**Etalón.** Una forma robusta de interferómetro de Fabry-Perot es el etalón, compuesto por una placa de un medio transparente con dos superficies paralelas altamente reflectantes, ver [https://en.wikipedia.org/wiki/Fabry%E2%80%93Perot\\_interferometer](https://en.wikipedia.org/wiki/Fabry%E2%80%93Perot_interferometer). El haz que entra en el etalón se refleja múltiples veces en las intercaras y solamente una pequeña parte del haz es capaz de salir del etalón en cada reflexión. De esta forma se producen múltiples haces, con una amplitud parecida y desfasados entre sí.

El interferómetro de Fabry-Perot presenta características que lo hacen idóneo para diversas aplicaciones actuales, entre las que destacamos:

#### Selección de frecuencias

- **Multiplexadores de longitudes de onda.** Las redes de telecomunicaciones utilizan etalones con materiales de muy bajo coeficiente de dilatación para desarrollar sistemas de multiplexado donde muchas longitudes de onda (bastante cercanas entre sí) viajan por una misma fibra óptica, cada una con información distinta. Para extraer una única longitud de onda se puede utilizar un etalón Fabry-Perot.
- **Espectrómetros de elevada resolución.** Por ejemplo, se puede utilizar un etalón Fabry-Perot para observar el efecto Zeeman, donde las líneas espectrales están demasiado cercanas para distinguirlas con un espectrómetro normal.
- **Aplicaciones astronómicas.** Los etalones son suficientemente robustos para poder incluirlos en misiones aeroespaciales. Por ejemplo, se utiliza un etalón Fabry-Perot para seleccionar una única transición atómica y poder formar la imagen. Por ejemplo se puede utilizar la línea H-alpha (el electrón cae del tercer al segundo nivel más bajo de energía, lo cual es común en las "emission nebulae" y en las protuberancias solares) o la línea Ca-K. Muchas estrellas, incluyendo el sol, presentan fuertes líneas de absorción de calcio ionizado fundamentalmente la línea K en 3933.7 Å. En las estrellas con baja temperatura, esta línea puede indicar una fuerte actividad magnética en la cromosfera. La medida de variaciones periódicas de las regiones activas en esta línea se pueden utilizar para medir el periodo de rotación de las estrellas.



## Cavidad resonante

Cuando el coeficiente de reflexión de los espejos es muy alto ( $r > 0.99$ , por ejemplo) la mayor proporción de la luz es reflejada de nuevo entre los espejos. Esto hace que la luz se entretenga una gran cantidad de tiempo antes de salir del interferómetro de Fabry-Perot. Se permiten, pues, efectos de gran interés en la Física:

- **Resonadores Láser.** En la mayoría de los láseres se utiliza una cavidad resonante, donde uno de los espejos tiene una reflectancia del 100%. Se hace pasar muchas veces la luz a través de la zona de excitación para favorecer el fenómeno de emisión estimulada. También, debido a la capacidad que tiene el interferómetro de Fabry-Perot para seleccionar longitudes de onda, se puede ajustar la longitud de onda del láser controlando la distancia entre los dos espejos. Para aumentar las tolerancias mecánicas los espejos no suelen ser planos, sino curvos. Los diodos laser de semiconductor suelen tener una disposición plana, debido a la dificultad de fabricación.
- En **detección de ondas gravitatorias** se suele utilizar una cavidad Fabry-Perot para almacenar los fotones durante más de 1 milisegundo. Esto aumenta el tiempo en el cual una onda gravitatoria puede interactuar con la luz, mejorando la resolución de los sistemas. [http://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational\\_wave](http://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational_wave). Los detectores gravitatorios [LIGO](#) and [Virgo](#) utilizan un interferómetro Michelson con una cavidad Fabry-Perot de varios kilómetros de longitud.
- En este mismo sentido, en el artículo de S Gleyzes et al. "Quantum jumps of light recording the birth and death of a photon in a cavity" Nature 446, 297-300 (15 March 2007) 10.1038/nature05589 se propone un sistema para detectar la creación de fotones. Se utiliza una cavidad Fabry-Perot para hacer pasar el fotón múltiples veces cerca de un átomo y demostrar la observación directa de partículas cuánticas individuales sin destruirlas.

## Sensores

- Debido a la gran sensibilidad que tienen los interferómetros de Fabry-Perot, se pueden utilizar como sensores muy sensibles, para medir propiedades a partir de la cantidad de luz que el interferómetro transmite. Por ejemplo, se pueden utilizar como sensores de desplazamientos entre los dos espejos, como acelerómetros. Uno de los espejos es rígido y el otro se ve sometido a las fuerzas de aceleración que lo alejan o separan de su posición de equilibrio. Se producen desplazamientos nanométricos que se pueden medir a partir de la rampa de subida o bajada en la transmitancia de uno de los picos. <http://mems.eng.uci.edu/research/accelerometers-based-on-fabry-perot-interferometers/>. También se pueden utilizar como sensores de fibra óptica: <http://physics-animations.com/sensors/English/interf.htm>

**Vida Animal:** [Tapetum lucidum](#). Es una membrana de tejido reflectante presente en el ojo de muchos animales vertebrados. El principio de funcionamiento de esta capa se deduce de la óptica de láminas delgadas, presenta cierta iridiscencia, y da lugar a una fuerte retroiluminación de los ojos de los animales (gatos, perros, lémures, mapaches,...). El Tapetum Lucidum está inmediatamente detrás de la retina por lo que la luz que refleja interfiere con la luz incidente sobre los fotorreceptores de la retina mejorando la visión nocturna de estos animales.