



Estabilización en frecuencia de láseres

Martín Drechsler



Esquema de la charla

- ¿A quien le sirve un láser con frecuencia estable?
- ¿Cómo se logra?
- ¿Cómo cuantifico la estabilidad?
- Estado del arte

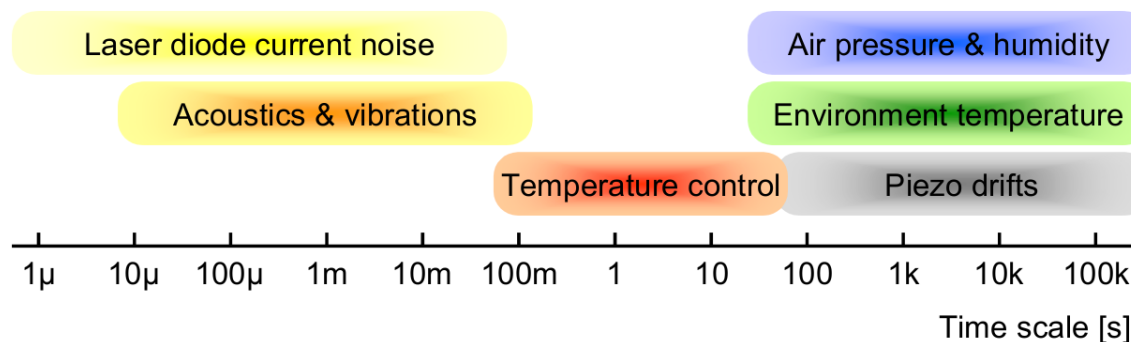


¿A quien le sirve un láser con frecuencia estable?

- Interferometría de ondas gravitacionales
(Lisa, Virgo, Lisa, etc)
- Espectroscopía de precisión
- Estándares de tiempo y frecuencia

¿Qué significa estabilizar en frecuencia?

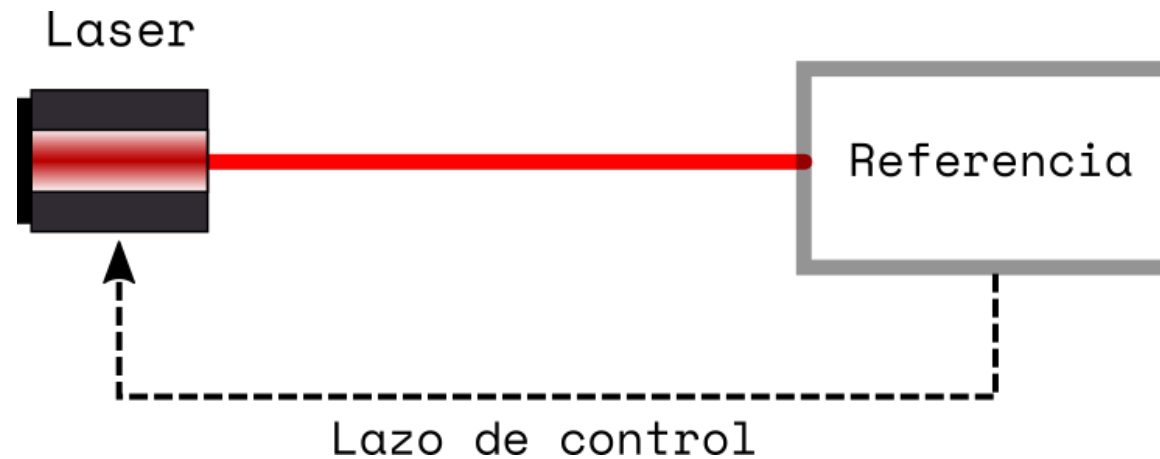
- Eliminar derivas
- Reducir ancho de banda



Neuhaus, R., & AG, T. P. (2009). Diode laser locking and linewidth narrowing. Retrieved online from <http://www.toptica.com>

- ¿Cómo se logra?

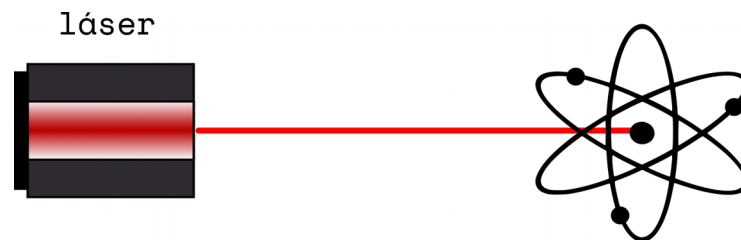
Se necesita una referencia contra la que comparar y corregir:



- ¿Cómo se logra?

Las dos alternativas más comunes son las siguientes:

- Utilizar de referencia una línea atómica

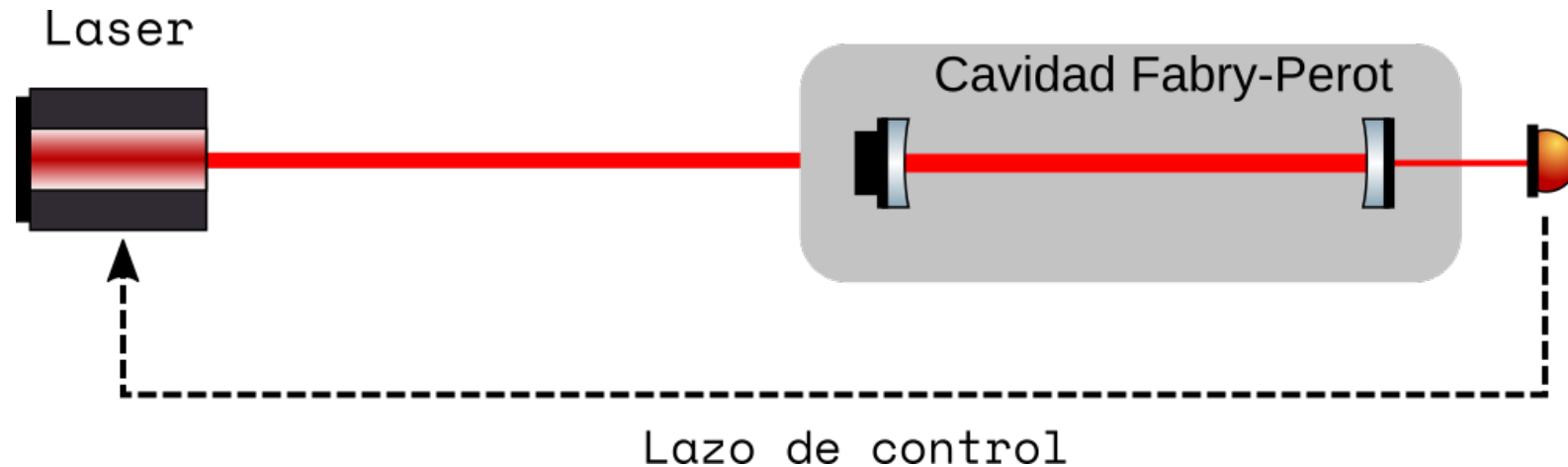


- Utilizar un resonador óptico

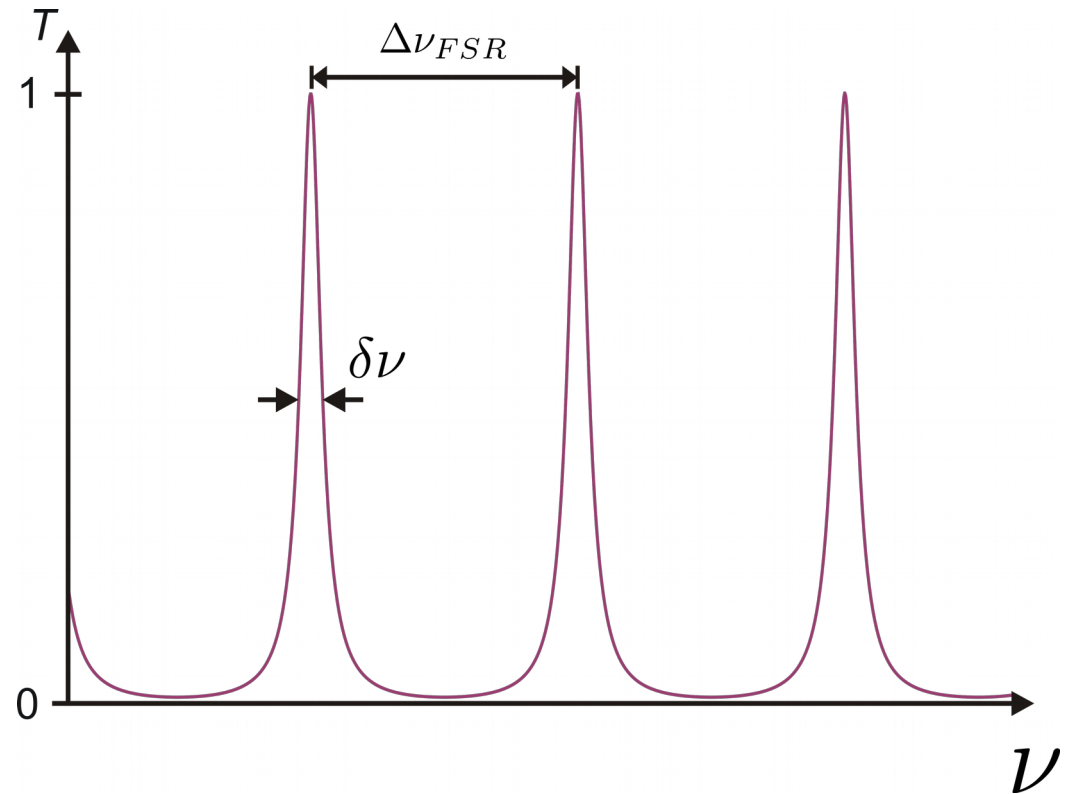
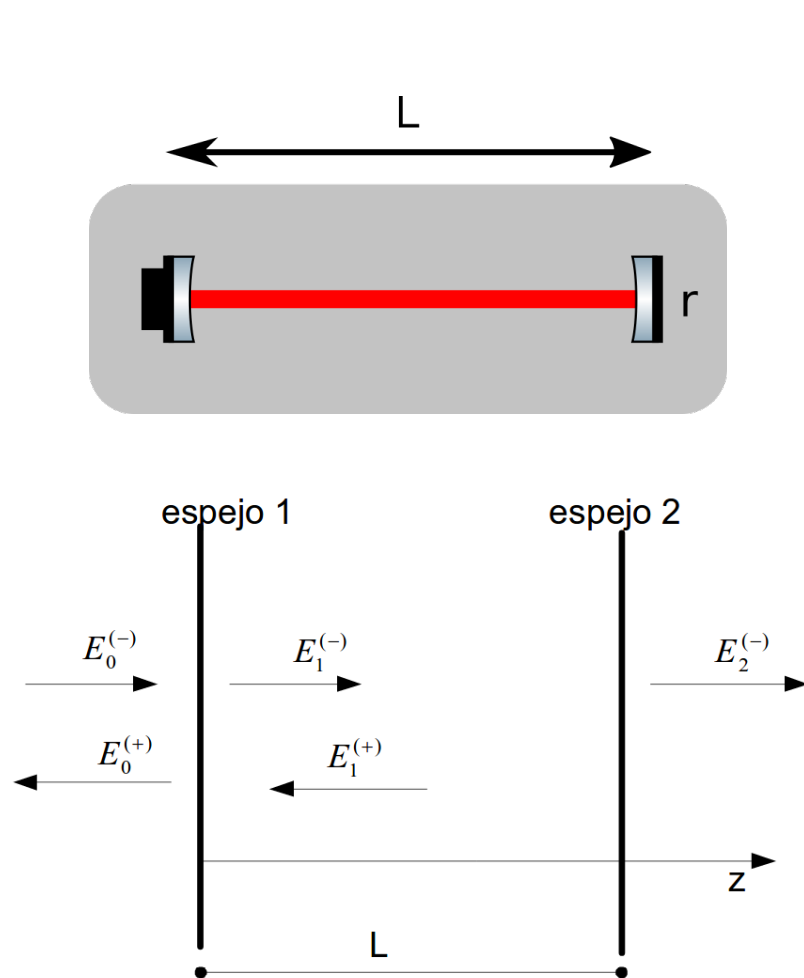


- ¿Cómo se logra?

Se necesita una referencia contra la que comparar y corregir:



- Interferómetro de Fabry-Perot

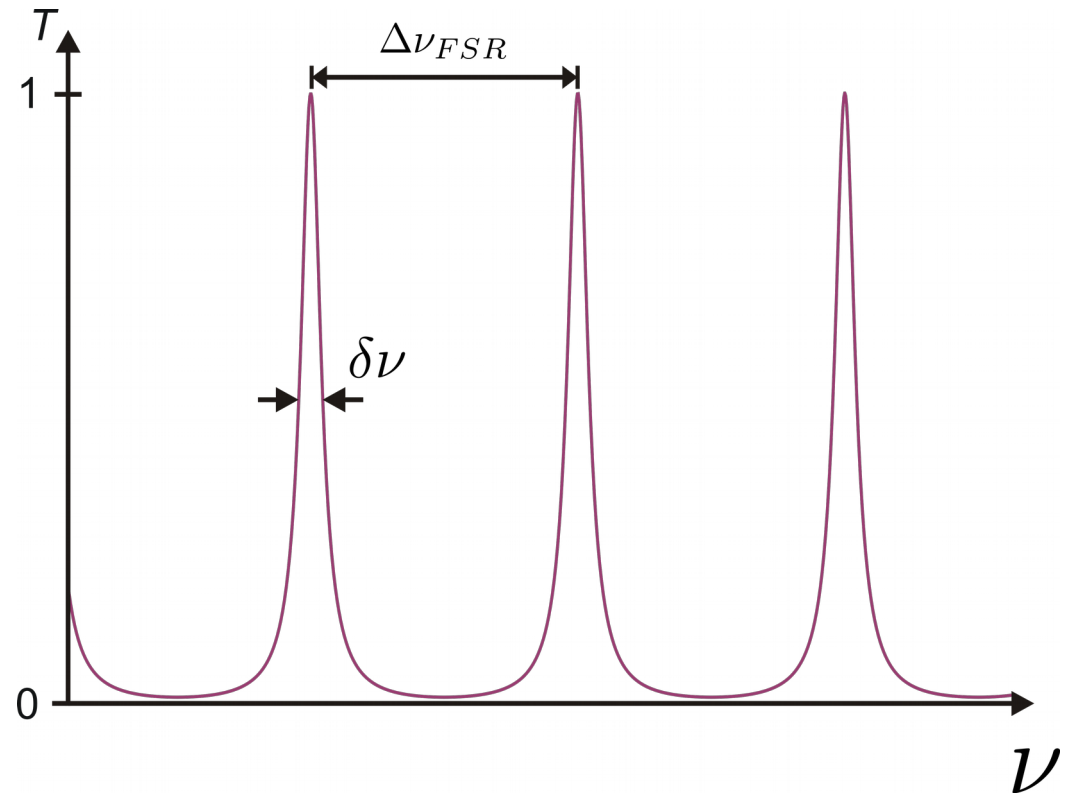


- Interferómetro de Fabry-Perot

$$\Delta\nu_{FSR} = \frac{c}{2L}$$

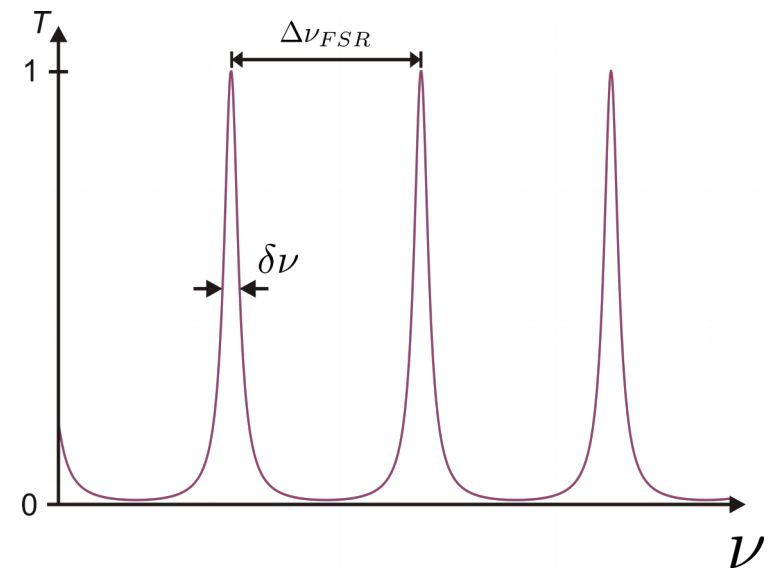
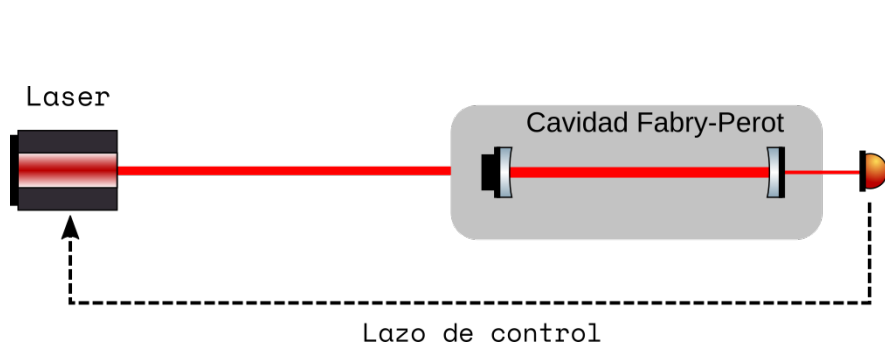
$$\delta\nu = \frac{\Delta\nu_{FSR}}{\mathcal{F}}$$

$$\mathcal{F} = \frac{\pi}{1 - r^2}$$



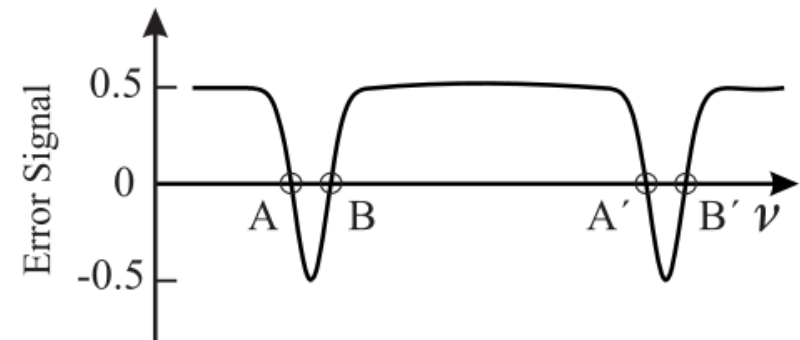
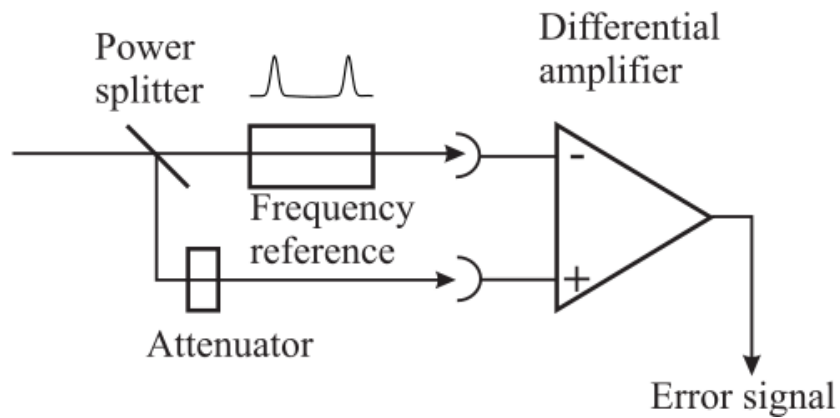
$$\nu_n = n \Delta\nu_{FSR}$$

• Interferómetro de Fabry-Perot



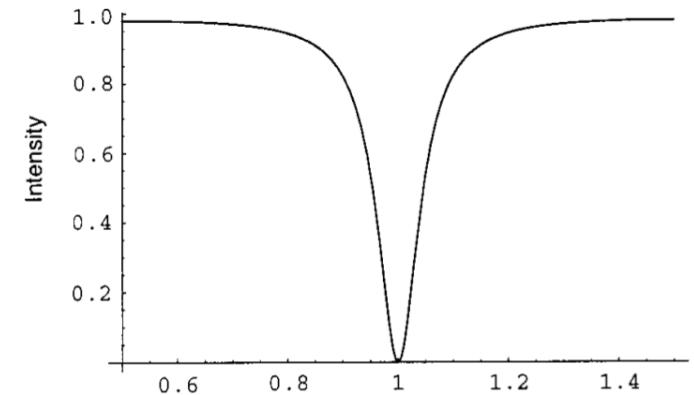
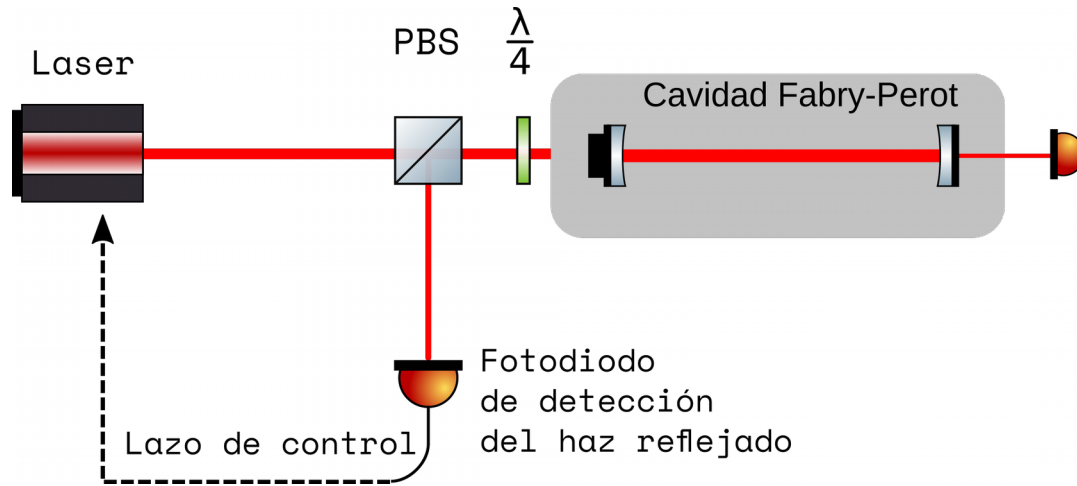
Hay varios problemas con estabilizar a un pico:

- ¿Cómo saber para que lado me fui?
- Tiempo de respuesta dado el ancho de banda de la cavidad
- No distingo ruido en frecuencia de ruido en intensidad



Hay varios problemas con estabilizar a un pico:

- ~~¿Cómo saber para que lado me fui?~~
- Tiempo de respuesta dado el ancho de banda de la cavidad
- ~~No distingo ruido en frecuencia de ruido en intensidad~~

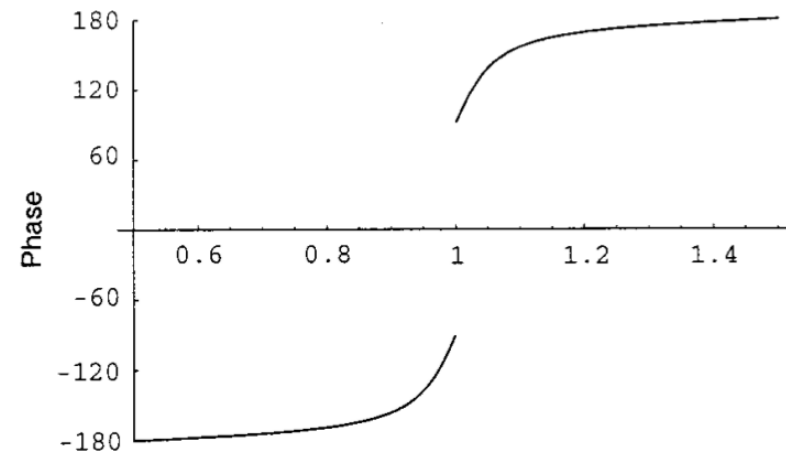
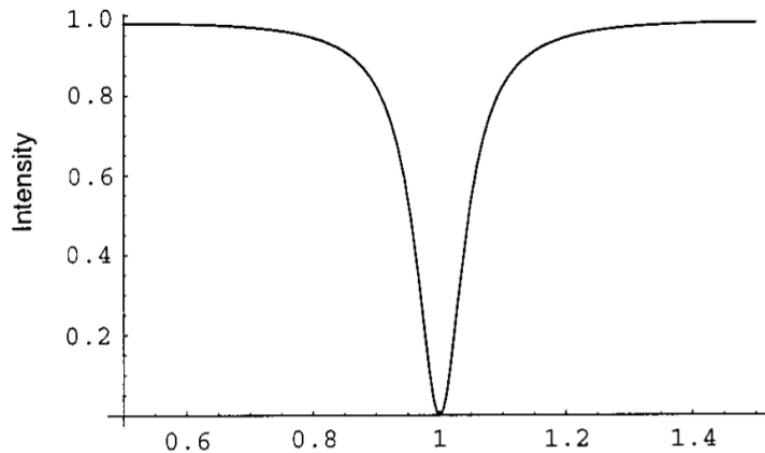


Hay varios problemas con estabilizar a un pico:

- ¿Cómo saber para que lado me fui?
- Tiempo de respuesta dado el ancho de banda de la cavidad
- ~~No distingo ruido en frecuencia de ruido en intensidad~~

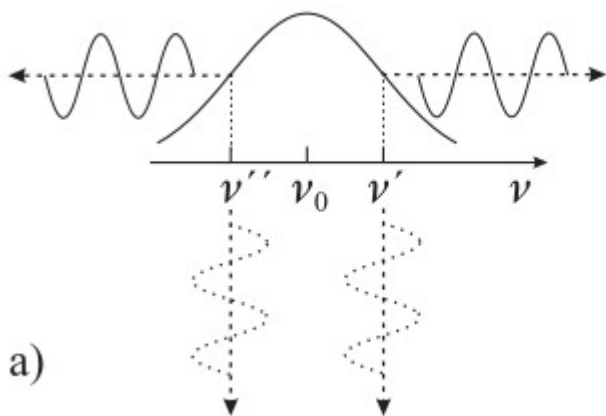
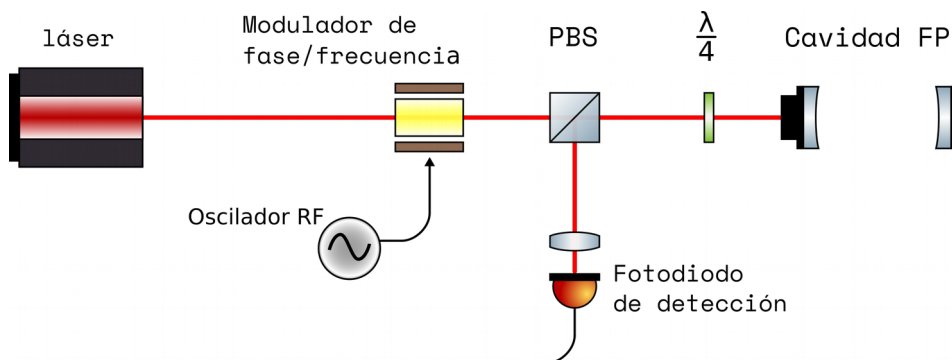
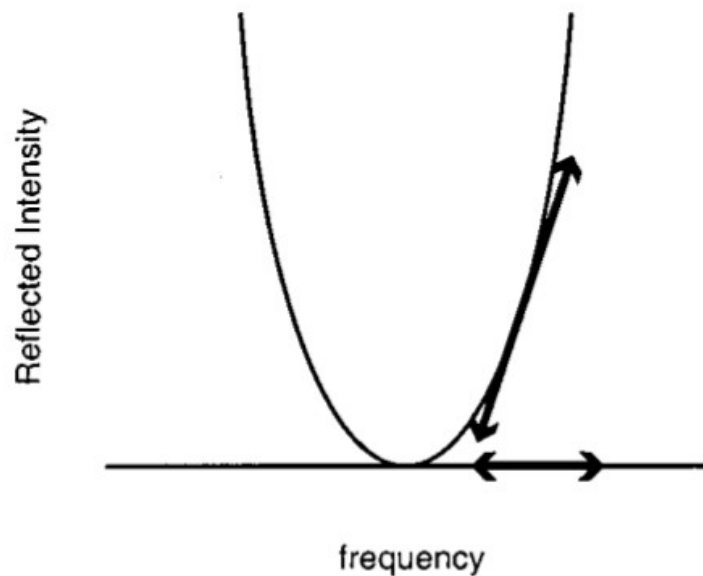
El campo reflejado tiene la siguiente
Amplitud compleja:

$$F(\omega) = E_{\text{ref}}/E_{\text{inc}} = \frac{r \left(\exp\left(i \frac{\omega}{\Delta \nu_{\text{fsr}}}\right) - 1 \right)}{1 - r^2 \exp\left(i \frac{\omega}{\Delta \nu_{\text{fsr}}}\right)}$$

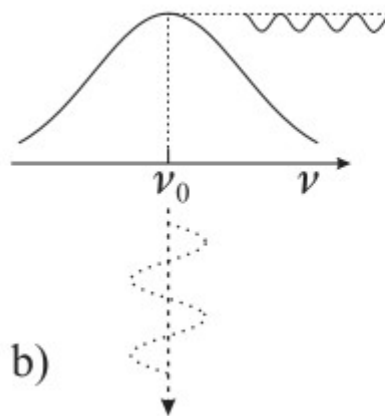


Si pudiera medir la fase, se para que
lado se corrió la frecuencia

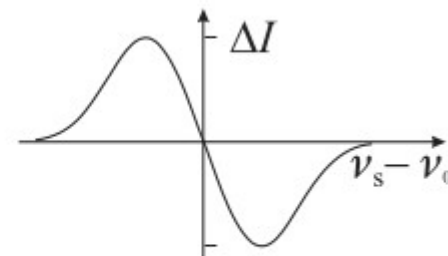
El truco es modular la frecuencia del láser!



a)

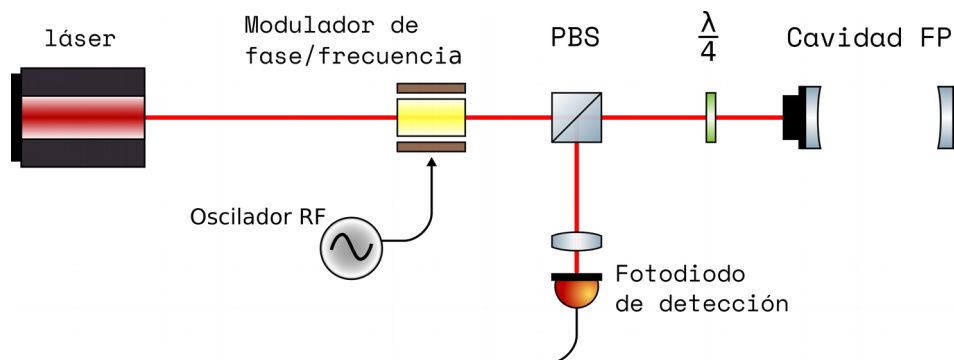
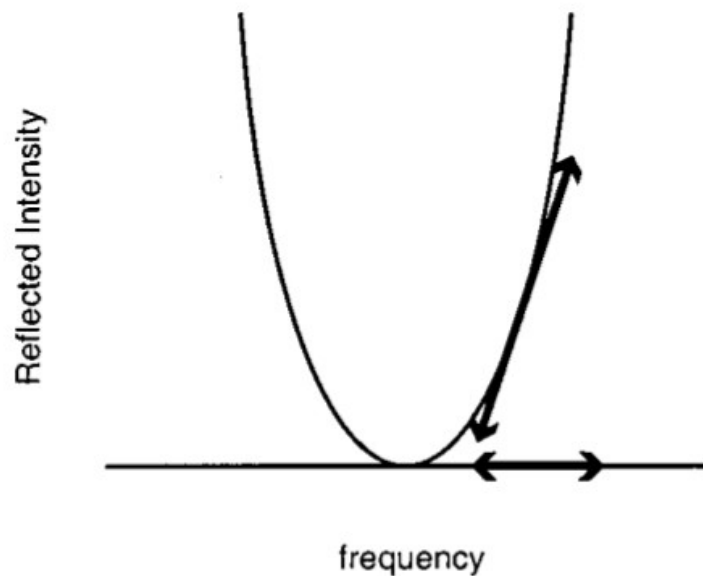


b)

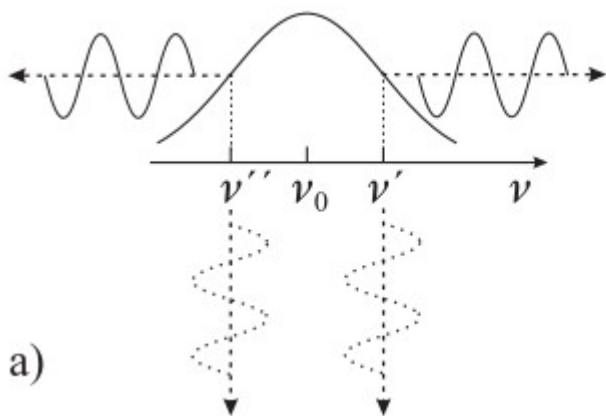


c)

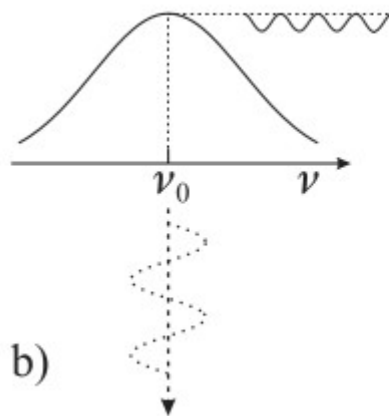
El truco es modular la frecuencia del láser!



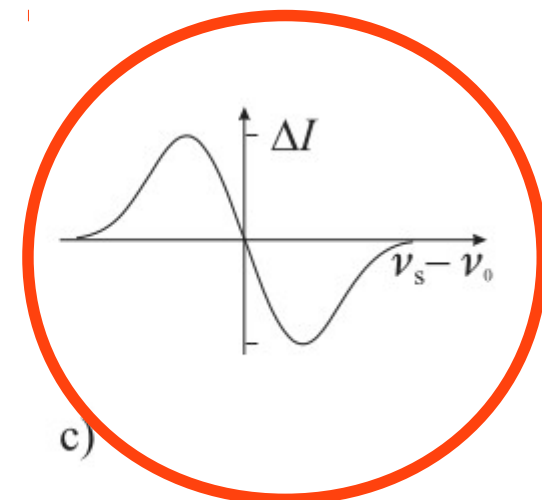
¿Cómo mido esto?



a)

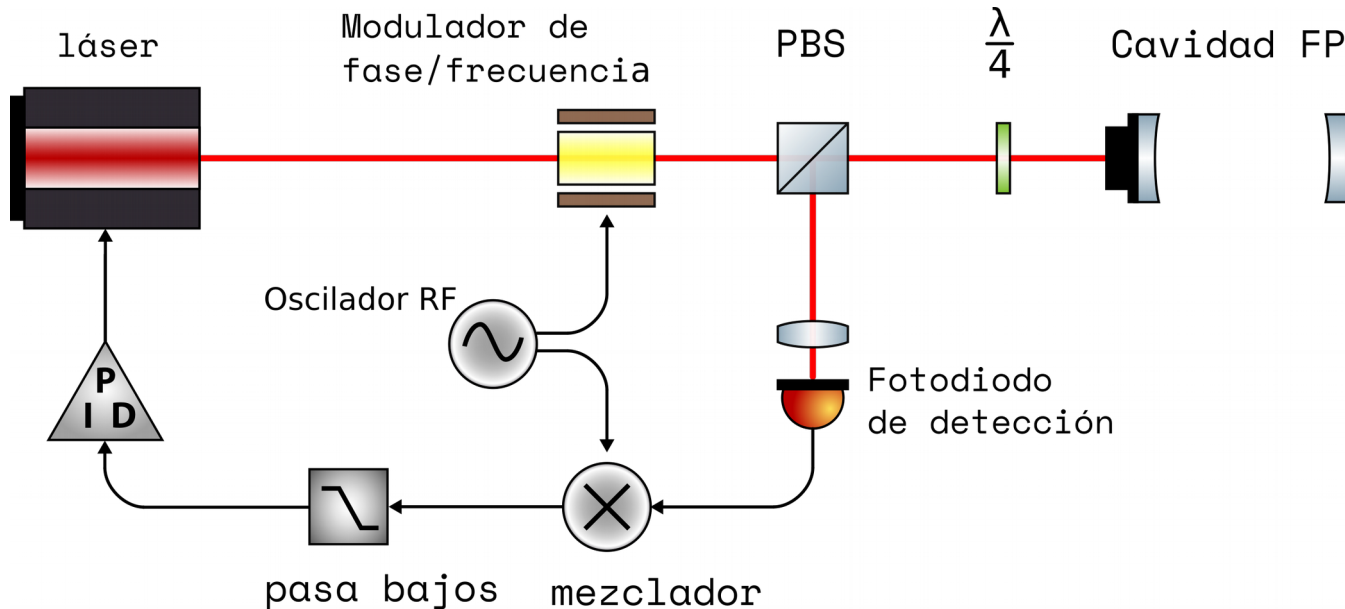


b)



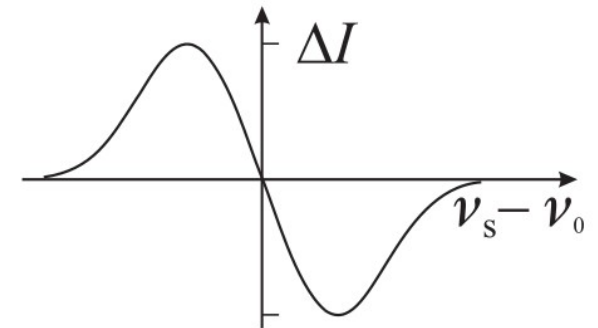
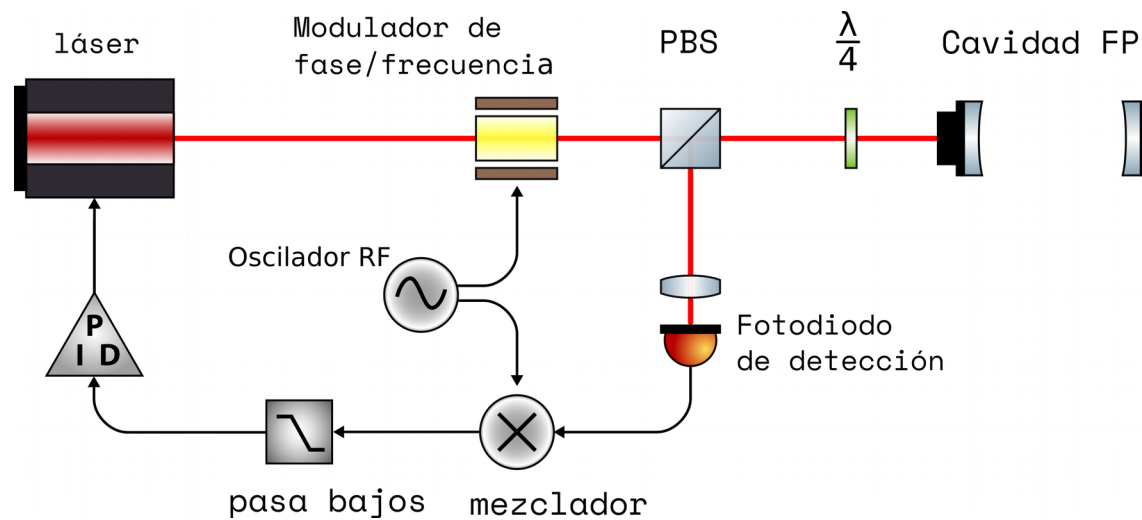
c)

El truco es modular la frecuencia del láser!



$$\cos \omega t \times \cos (\omega t + \varphi) = \frac{1}{2} [\cos \varphi + \cos (2\omega t + \varphi)]$$

**A la salida del pasabajos voy a tener la
señal de control**



Hay varios problemas con estabilizar a un pico:

- ~~¿Cómo saber para que lado me fui?~~
- Tiempo de respuesta dado el ancho de banda de la cavidad
- ~~No distingo ruido en frecuencia de ruido en intensidad~~

Pound-Drever-Hall: hay que modular, y muy rápido

Appl. Phys. B 31, 97–105 (1983)

Applied
Physics B Photo-
physics
and Laser
Chemistry
© Springer-Verlag 1983

Laser Phase and Frequency Stabilization Using an Optical Resonator

R. W. P. Drever

University of Glasgow and California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, USA

J. L. Hall* and F. V. Kowalski**

Joint Institute for Laboratory Astrophysics, National Bureau of Standards and University
of Colorado, Boulder, CO 80309, USA

J. Hough, G. M. Ford, A. J. Munley, and H. Ward

Department of Natural Philosophy, University of Glasgow, Glasgow, Scotland G12800

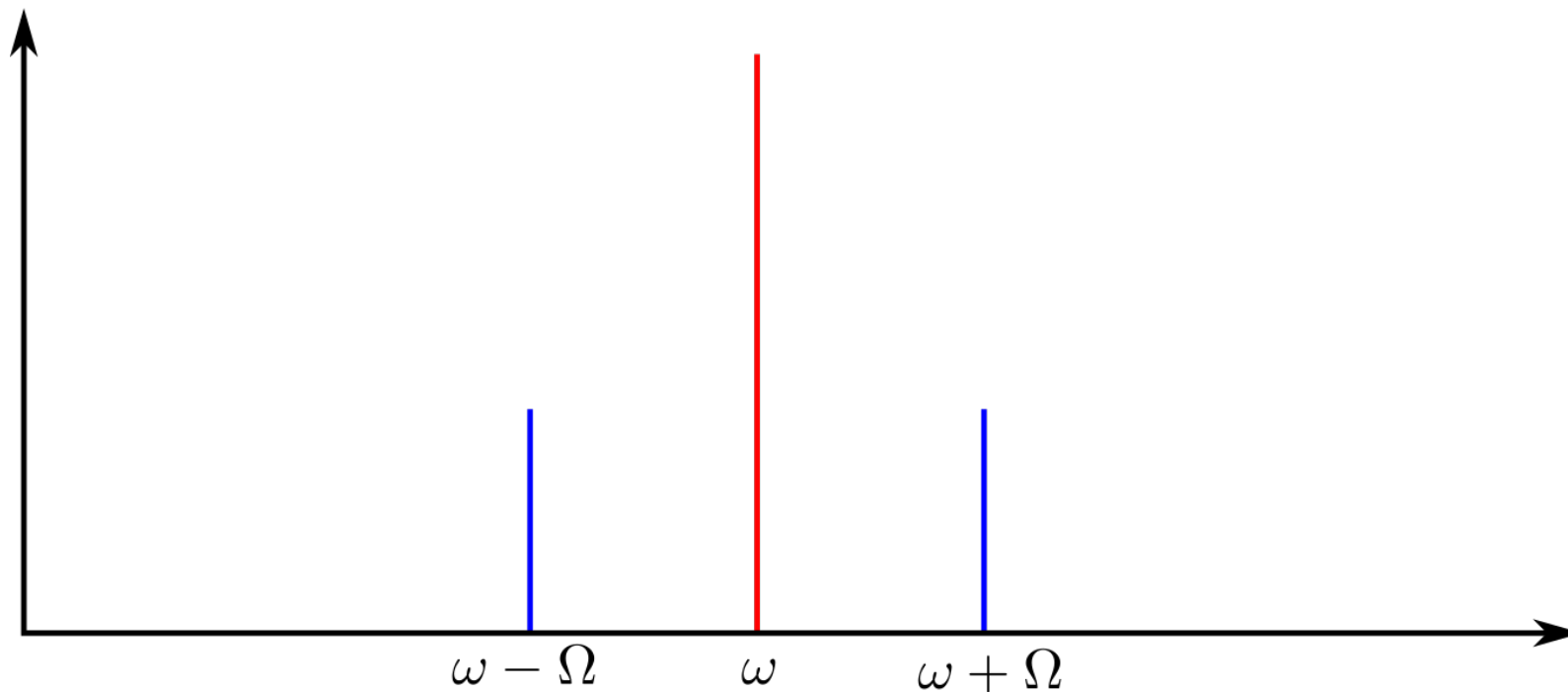
Received 1 February 1983/Accepted 10 February 1983

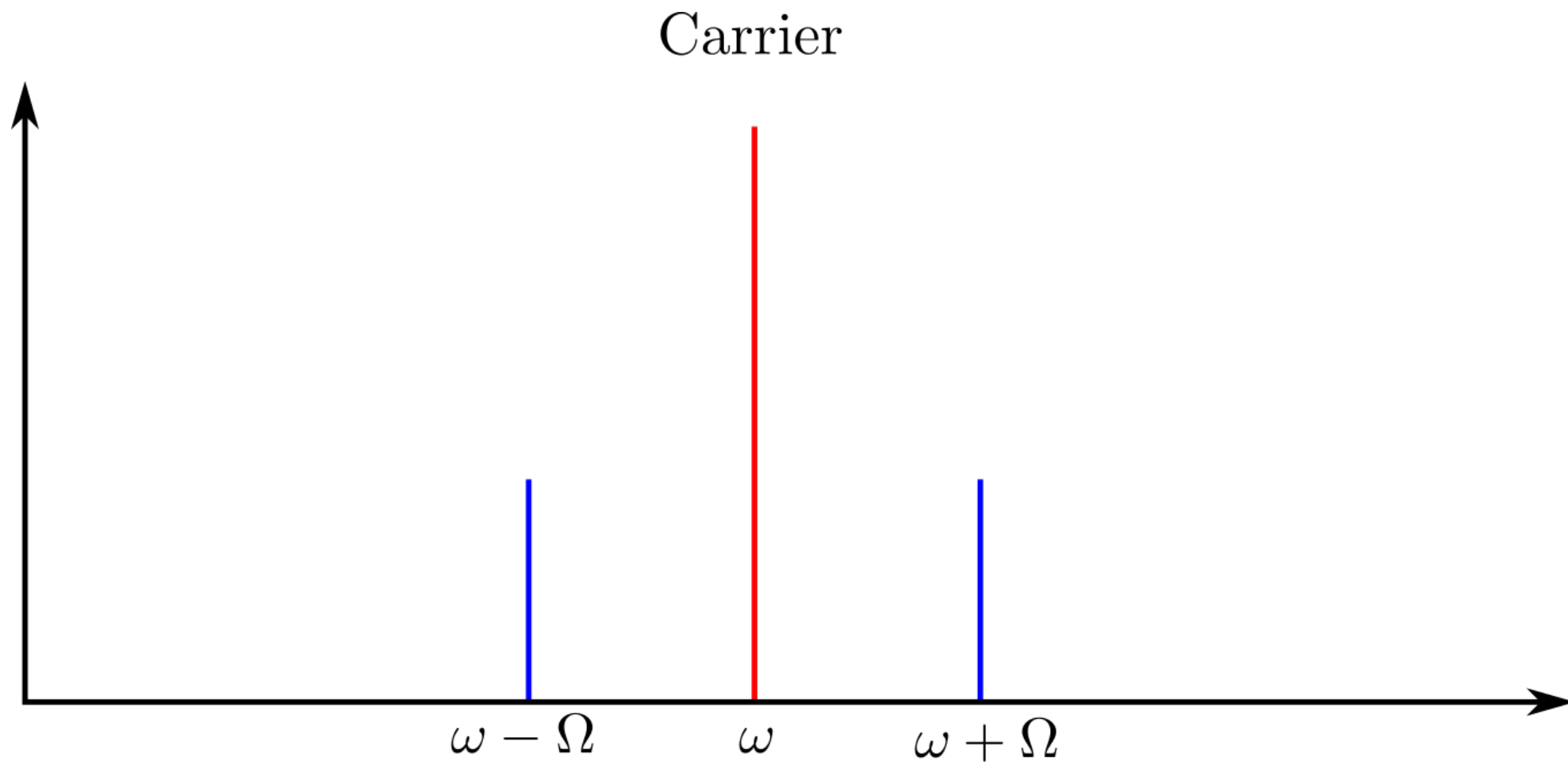
Abstract. We describe a new and highly effective optical frequency discriminator and laser stabilization system based on signals reflected from a stable Fabry-Perot reference interferometer. High sensitivity for detection of resonance information is achieved by

Pound-Drever-Hall: hay que modular,
y muy rápido

$$E_{inc} = E_0 e^{i(\omega t + \beta \sin \Omega t)} \approx E_0 \left[e^{i\omega t} + \frac{\beta}{2} e^{i(\Omega + \omega)t} - \frac{\beta}{2} e^{i(\omega - \Omega)t} \right]$$

Carrier

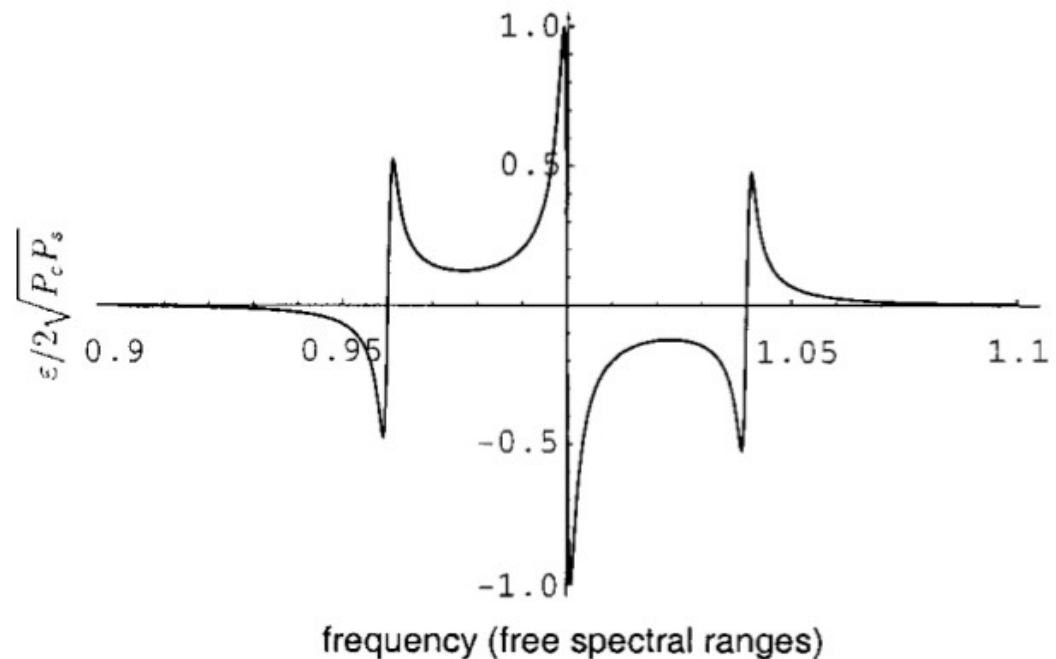


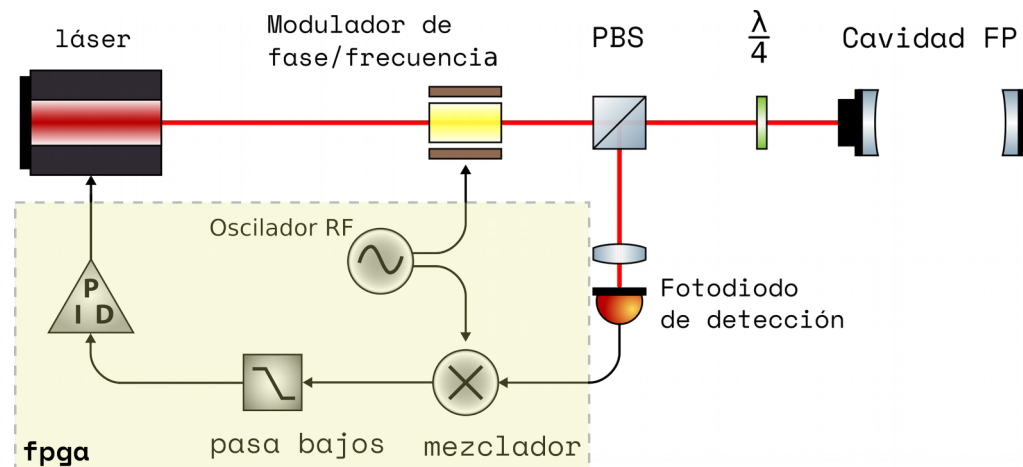
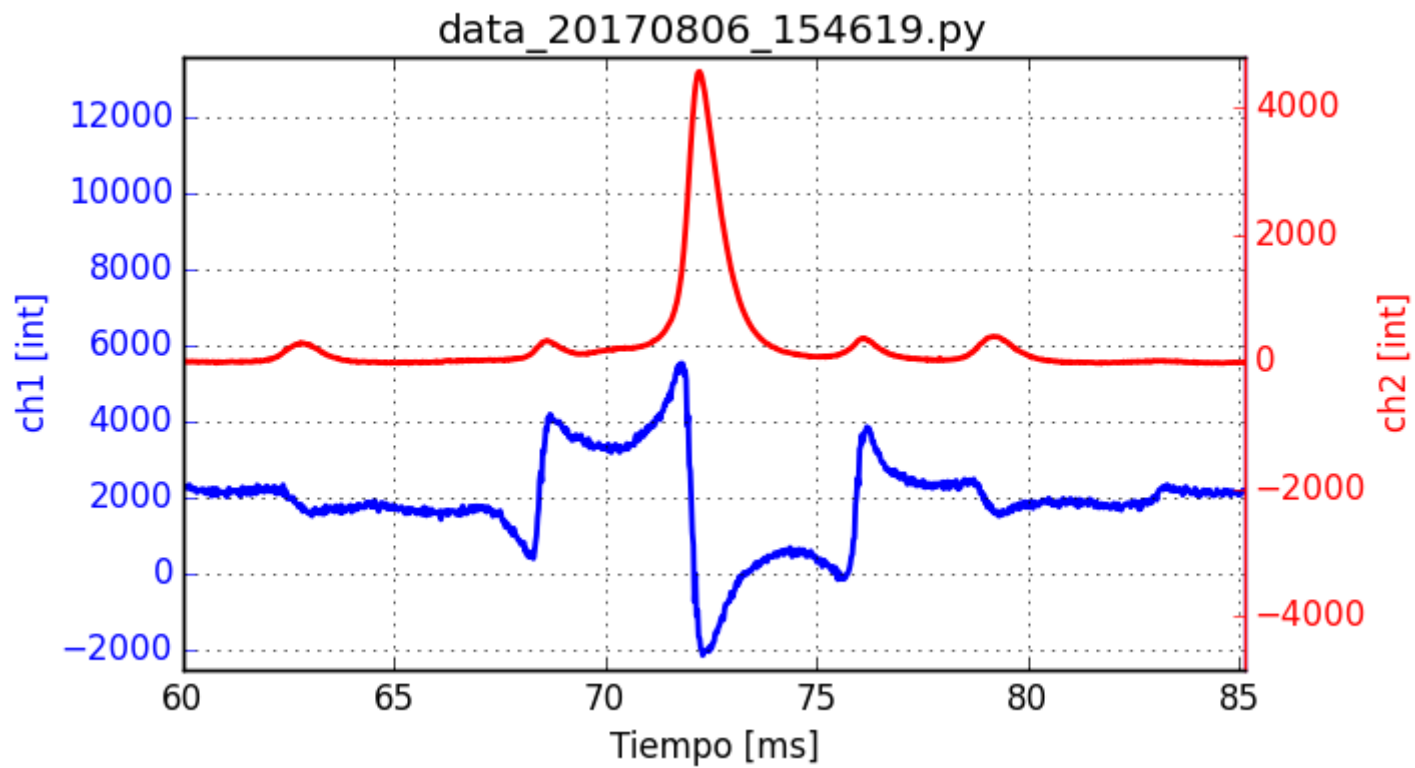


Potencia reflejada en el caso de alta frecuencia de modulación:

$$P_{ref} = |E_{carrier} + E_{sidebands}|^2 \approx C + B \sin \Omega t + C \cos 2\Omega t$$

$$B = -\frac{4\sqrt{P_c P_s}}{\pi \delta \nu} \delta \omega$$



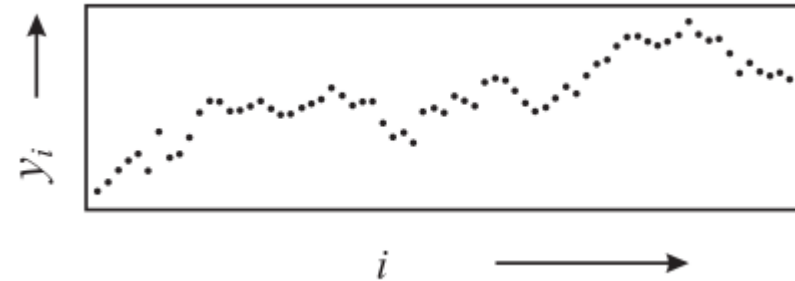
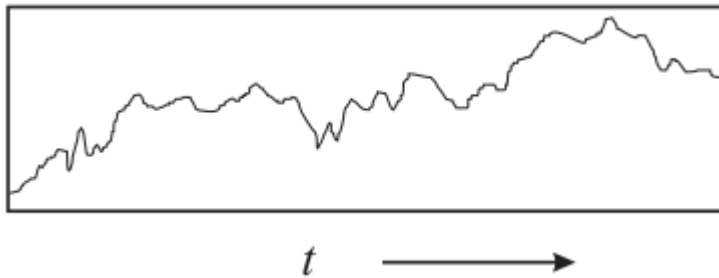




Esta señal error es insensible a los siguientes ruidos:

- Intensidad del láser
 - Tiempo de respuesta de los fotodiodos
 - La intensidad y frecuencia de la modulación
-
- Sí es sensible a ruido en el largo de la cavidad.
-
- **El límite último de sensibilidad viene dado por el ruido de disparo del fotodiodo utilizado.**

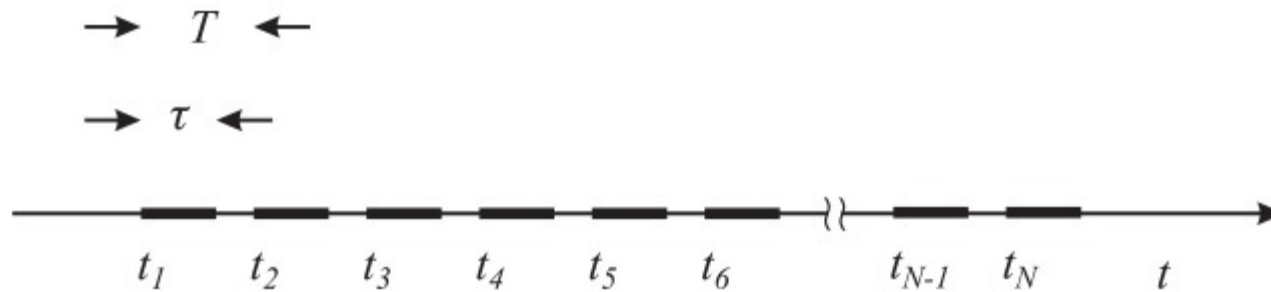
- ¿Cómo cuantifico la estabilidad?



$$s_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 = \frac{1}{N-1} \left[\sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N y_i \right)^2 \right]$$

$$s_{\bar{y}} = \frac{s_y}{\sqrt{N}}$$

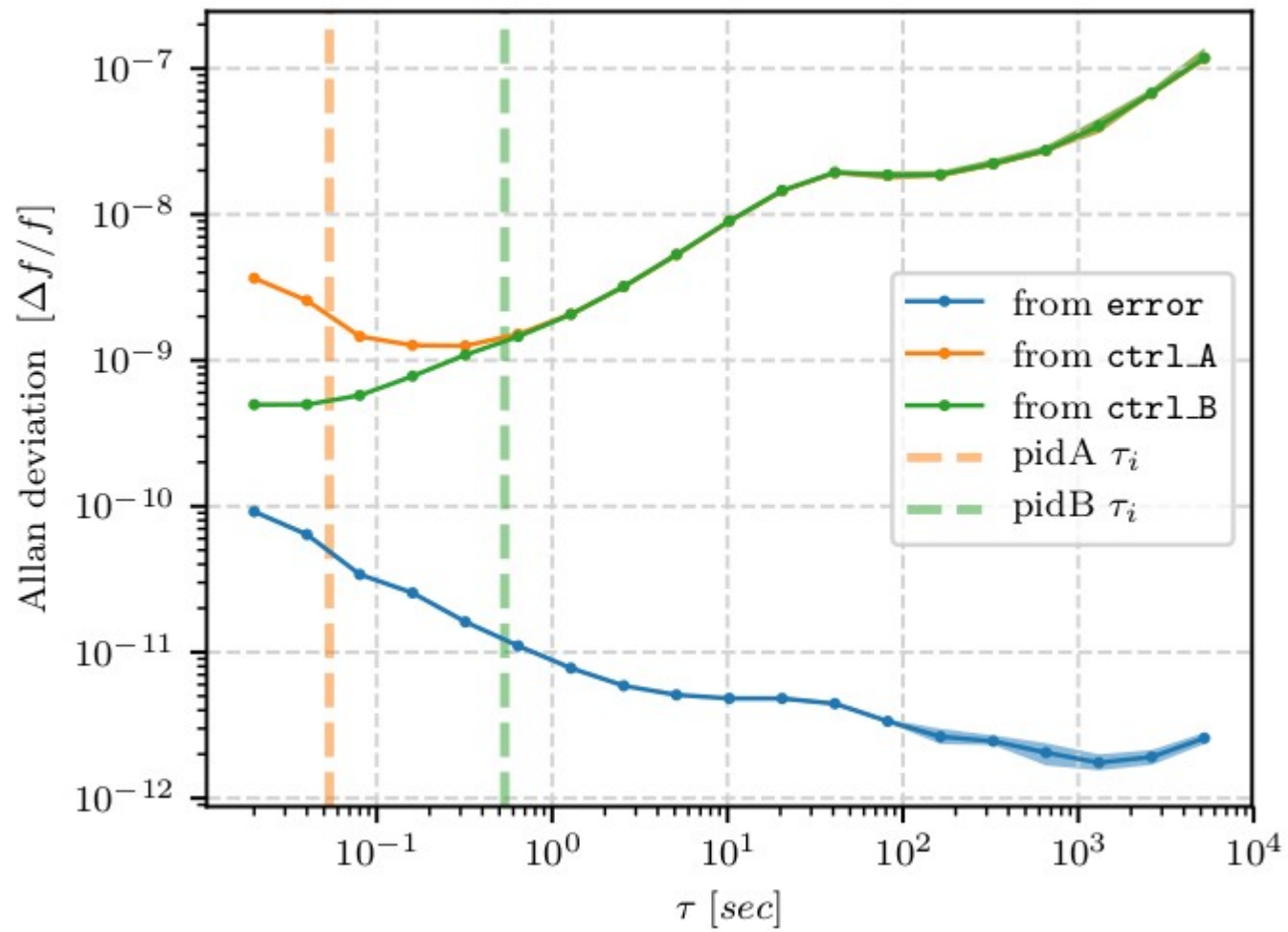
Varianza de Allan



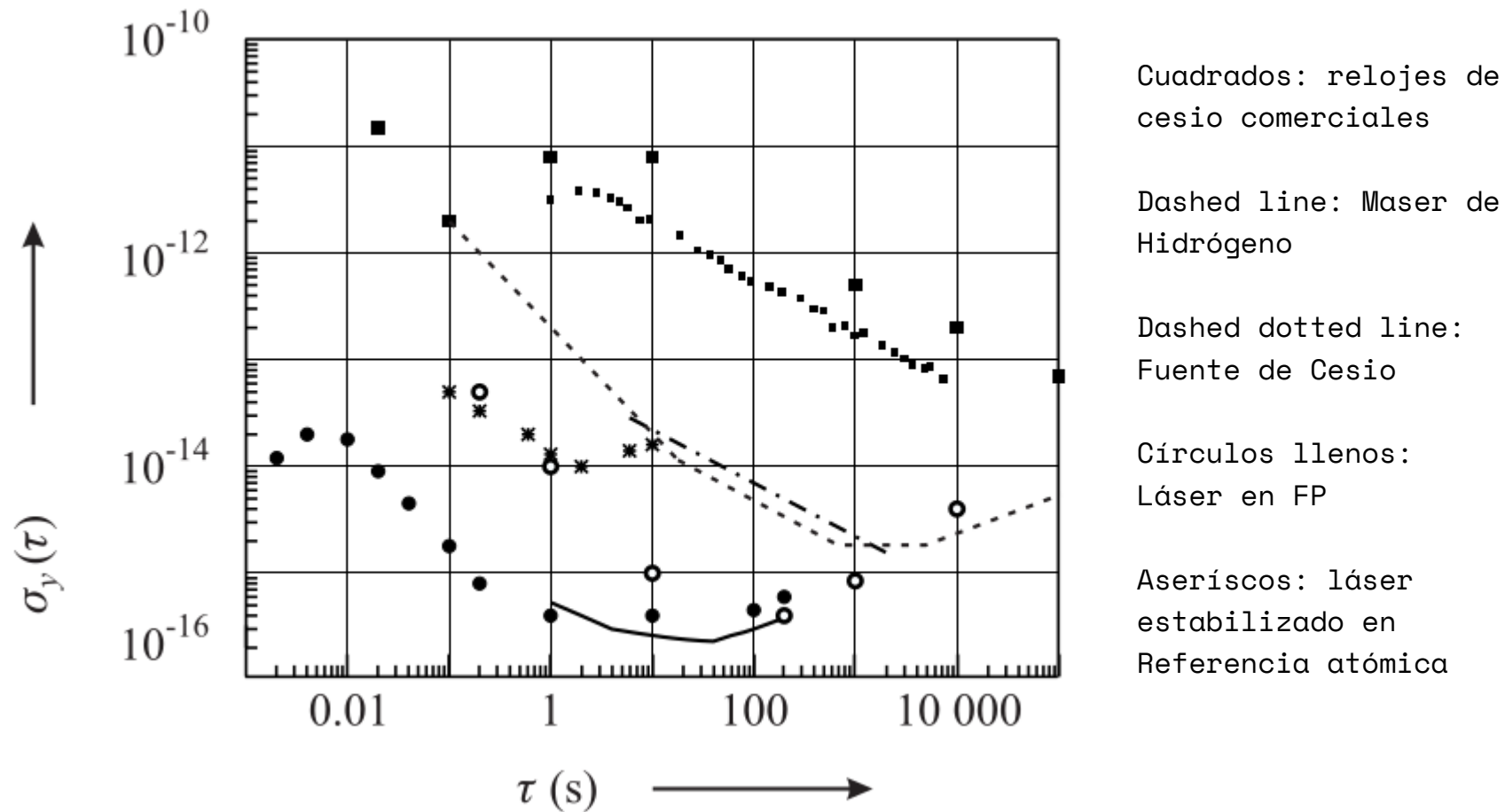
$$\sigma^2(N, T, \tau) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\bar{y}_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{y}_j \right)^2$$

La varianza de Allan se define como $\sigma_y^2(\tau) = \sigma^2(2, \tau, \tau)$

Varianza de Allan

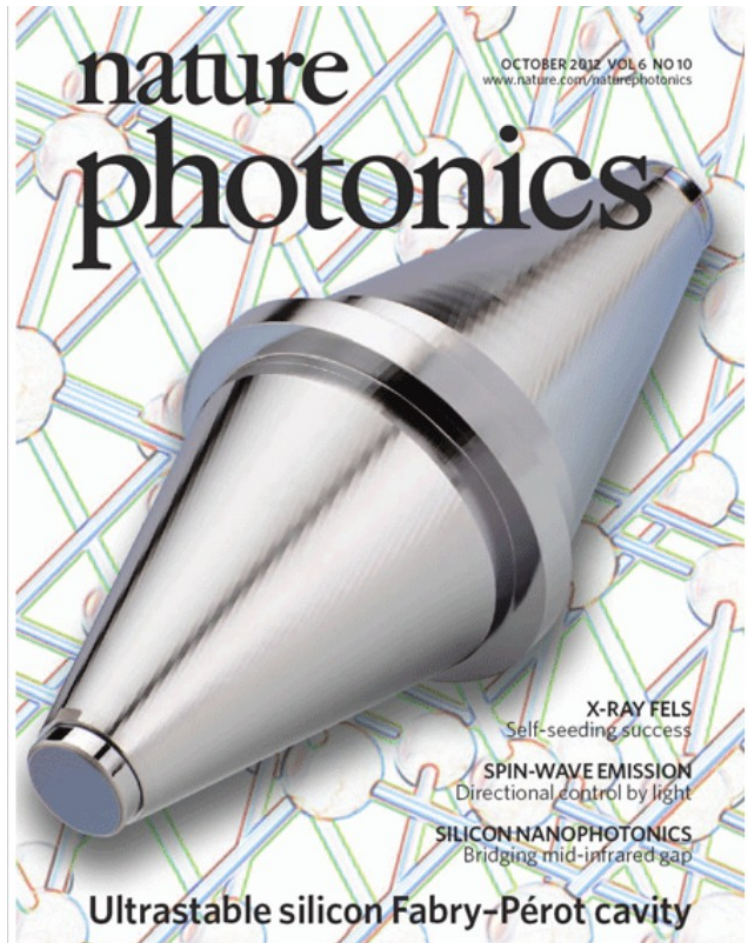


Varianza de Allan

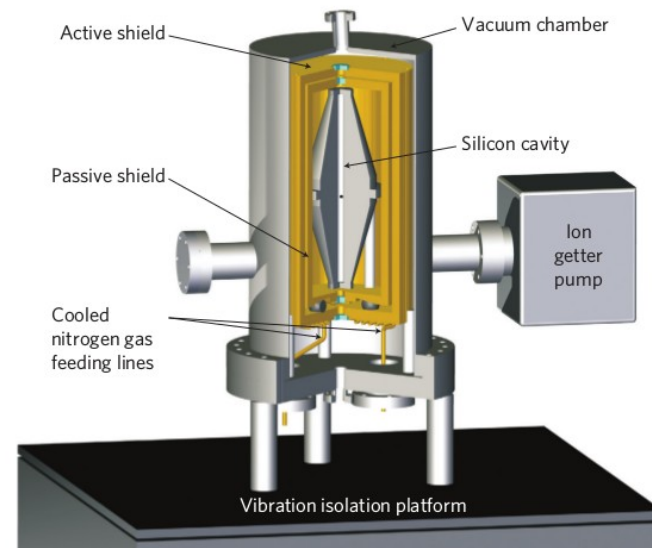
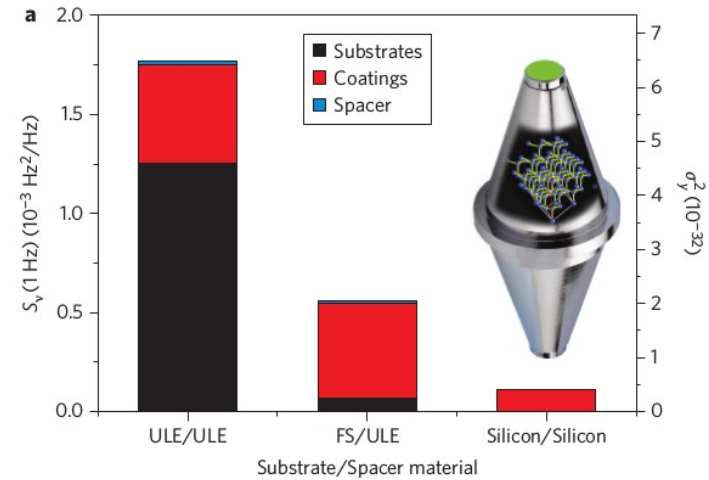


Riehle, F. (2006). Frequency standards: basics and applications. John Wiley & Sons.

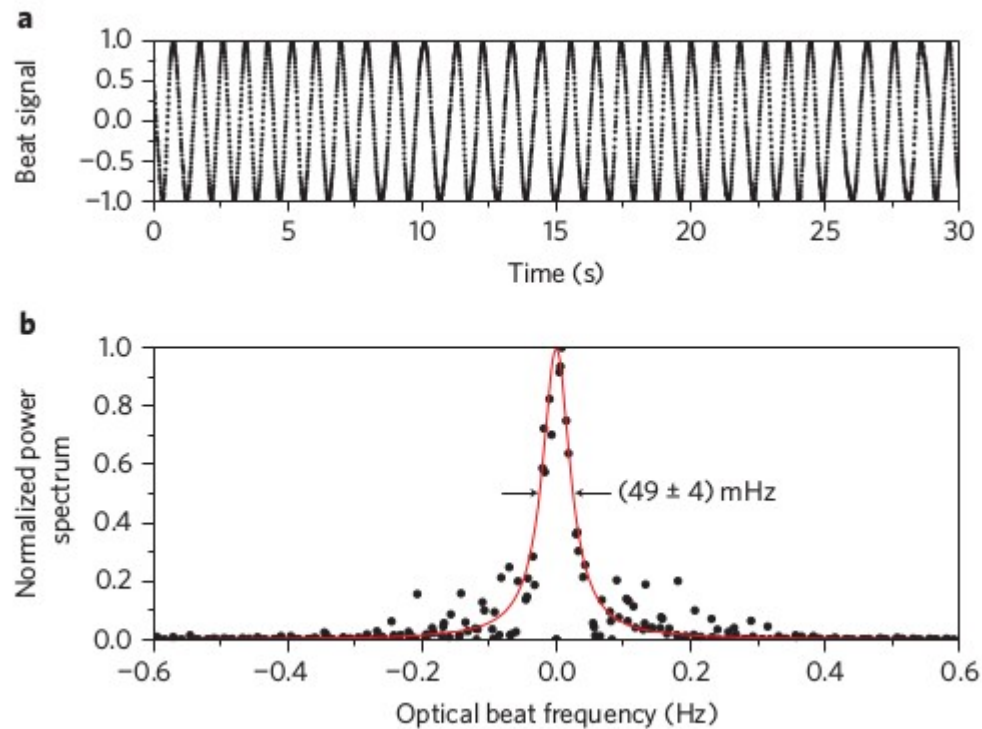
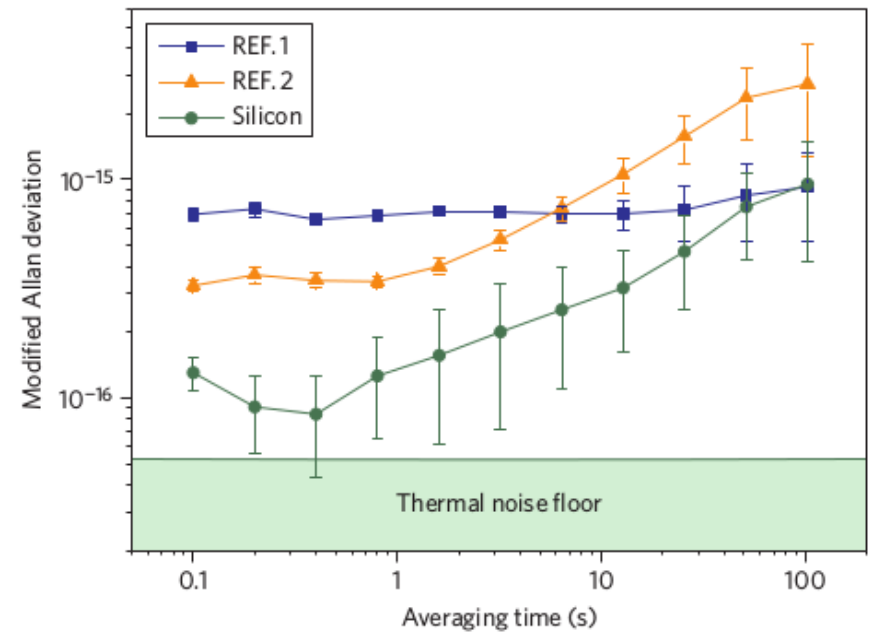
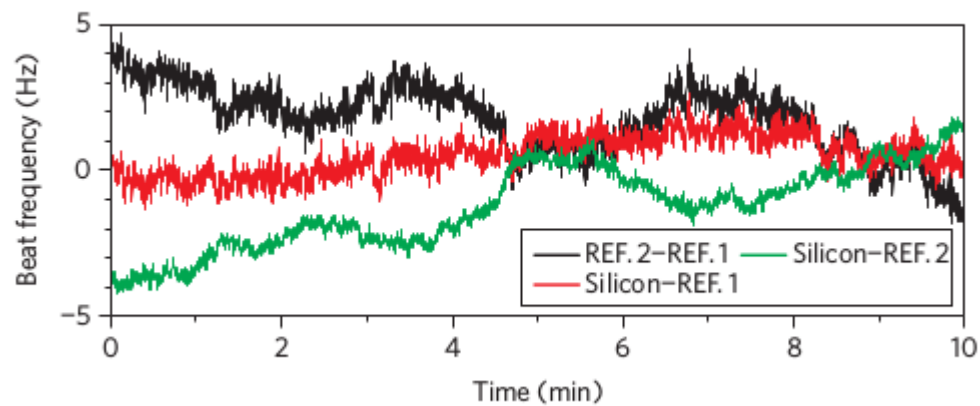
Estado del arte



Kessler, T., Hagemann, C., Grebing, C., Legero, T., Sterr, U., Riehle, F., ... & Ye, J. (2012). A sub-40-mHz-linewidth laser based on a silicon single-crystal optical cavity. *Nature Photonics*, 6(10), 687.



Estado del arte





Gracias