

Nanofibras ópticas

Instituto de Física
Universidad Autónoma de San Luis Potosí
15 de Febrero del 2023
jqj.umd.edu



Estudiante de postgrado: [Yuan Joy](#).

Estudiante de pregrado: [Jeff Wack](#)

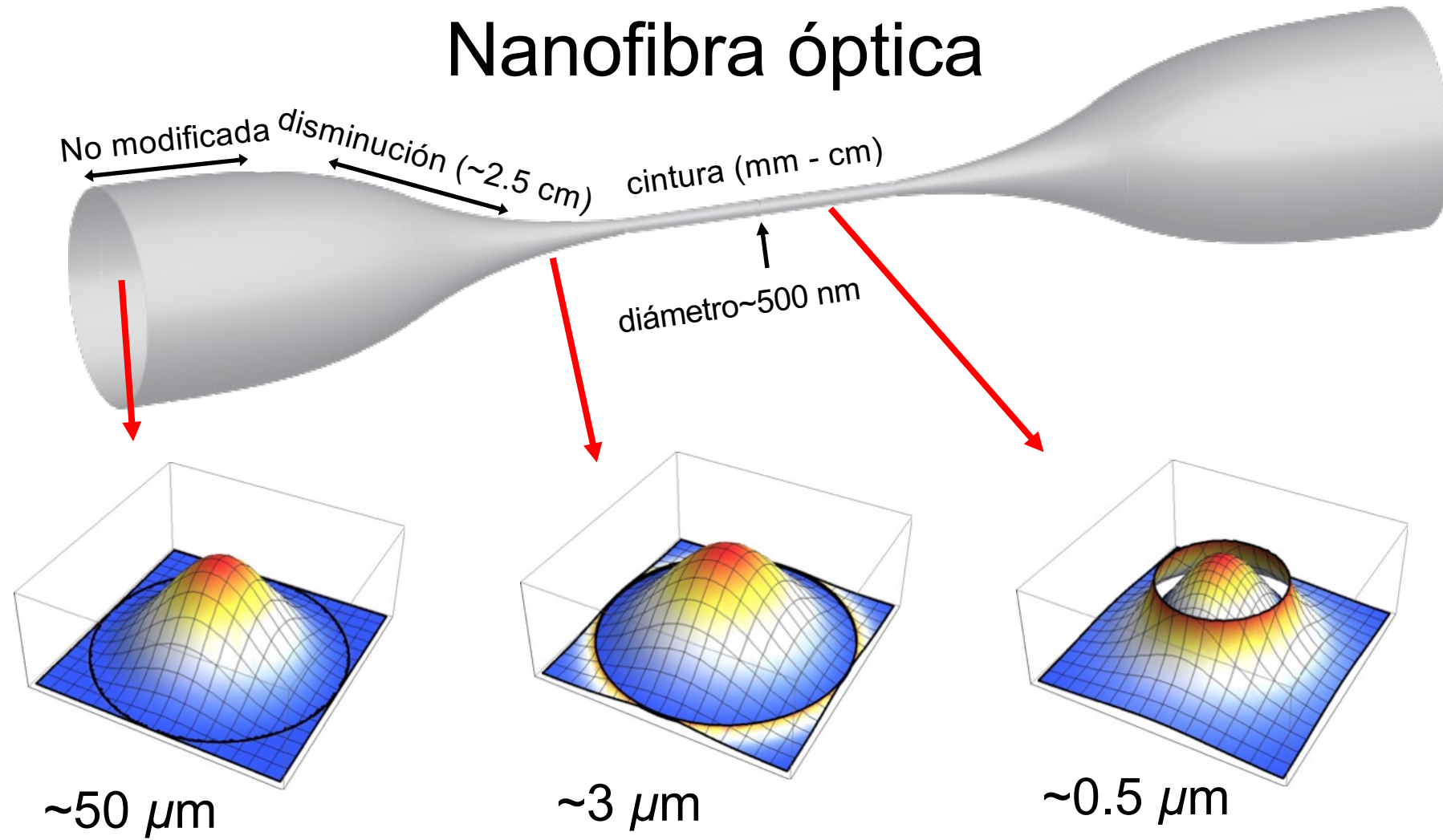
Profesores e investigadores: [Dianqiang Su](#), [Pablo Solano](#), [Luis A. Orozco](#), [Yanting Zhao](#), [John Lawall](#)

Universidad de Concepción Chile,
University of Maryland at College Park, Estados Unidos
Shanxi University, Taiyuan, China.
National Institute of Standards and Technology,
Gaithersburgh Maryland, Estados Unidos

Trabajo apoyado en parte por:
The Joint Quantum Institute,
The University of Shanxi, China,
CoNICYT Chile, y U. de Concepción
National Institute of Standards and
Technology

Estructura de la nanofibra óptica

Nanofibra óptica



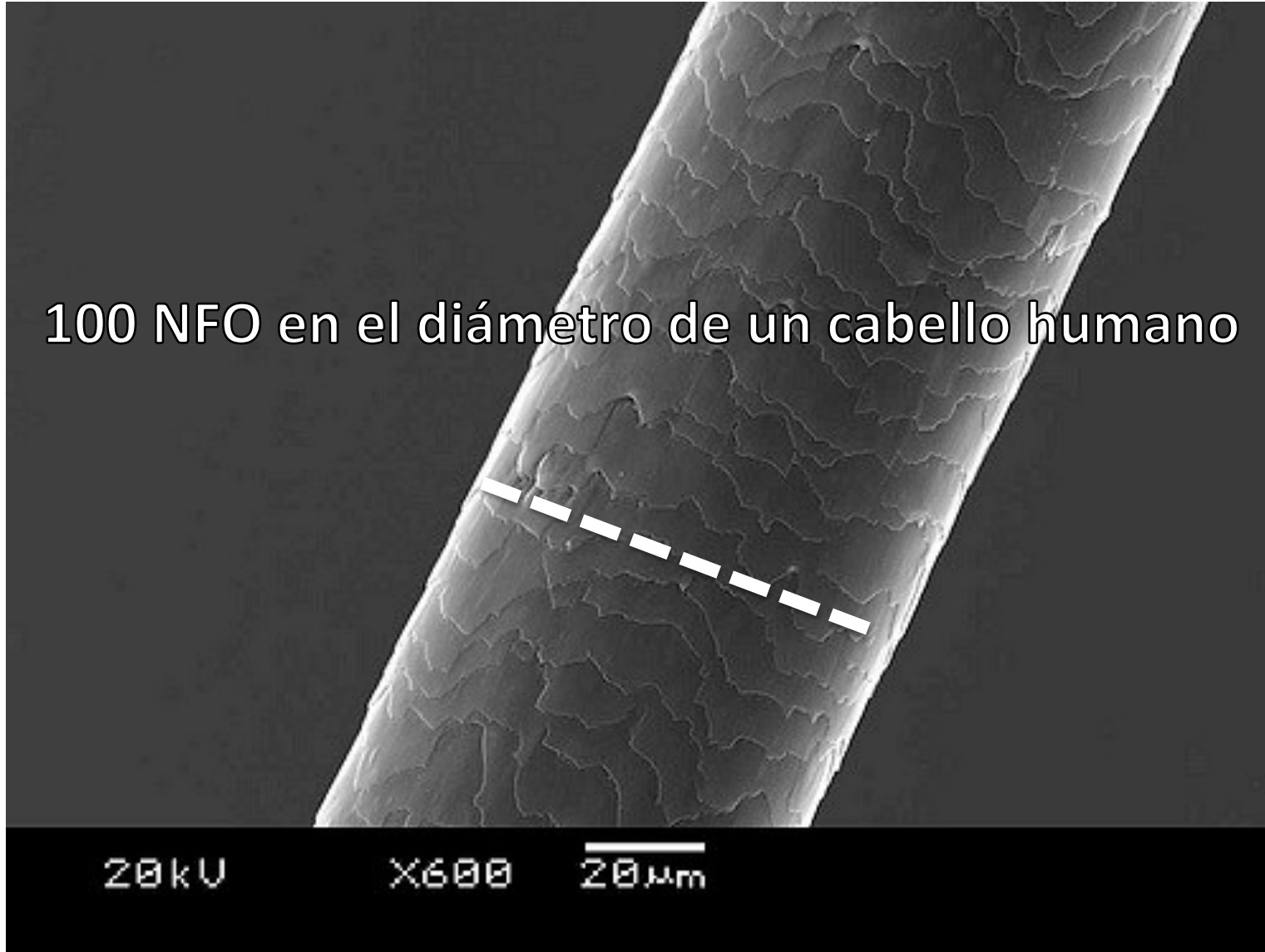
La escala

100 NFO en el diámetro de un cabello humano

20kV

X600

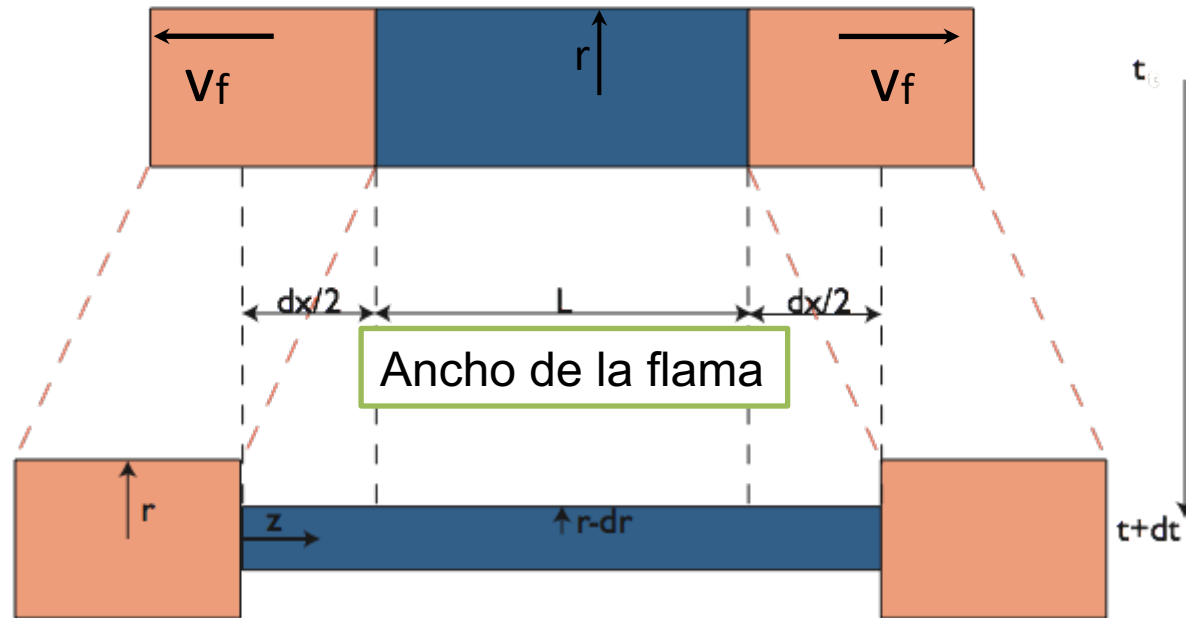
20µm



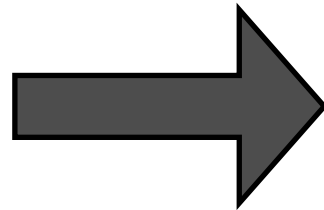
Fabricación de nanofibras

- Conservación de volumen
- Ambiente ultralimpio
- Control nanométrico
- Diagnóstico *in situ*

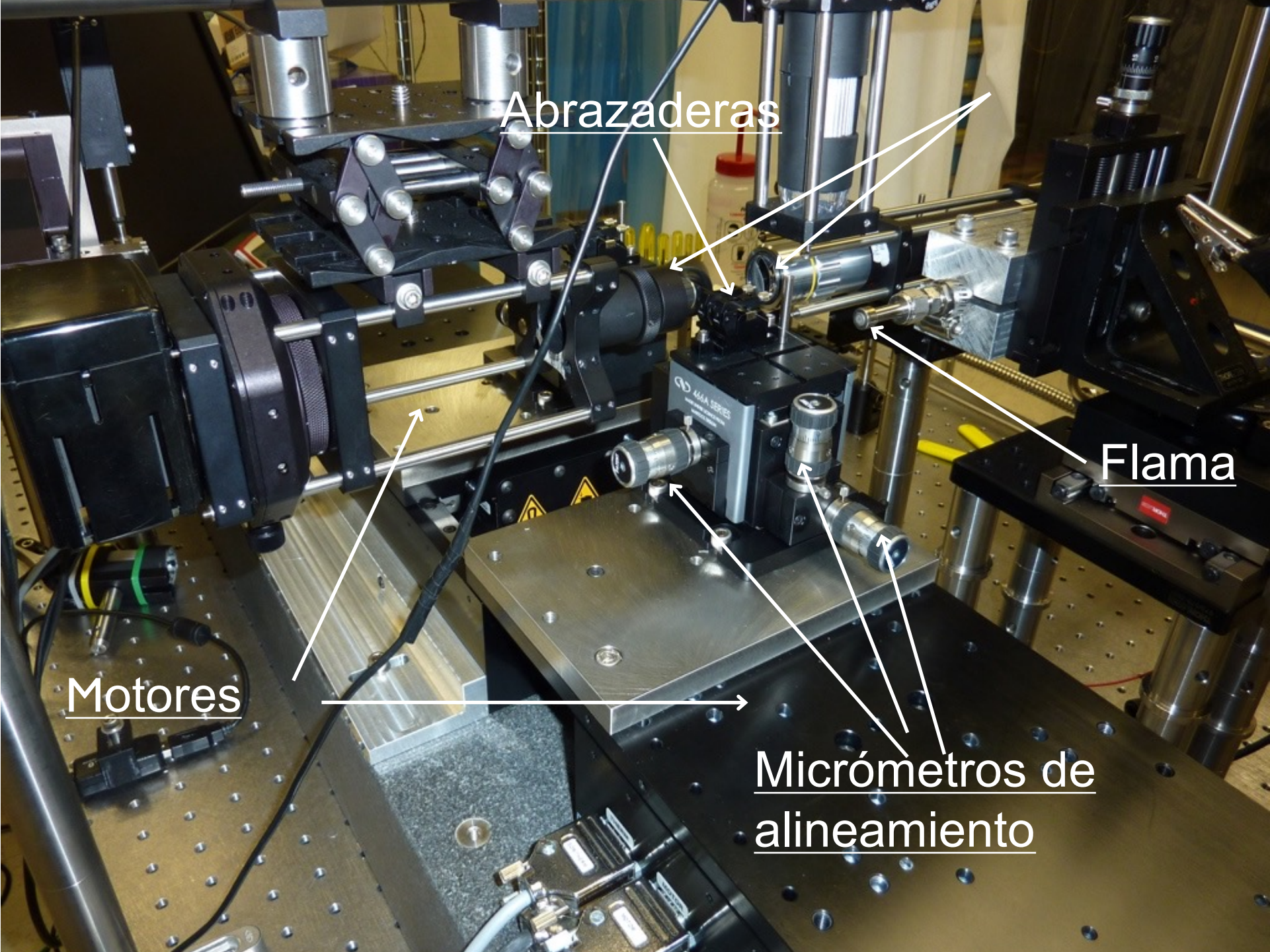
Conservación de Volumen



$$\frac{dr}{dx} = -\frac{r}{2L}$$



$$r(t) = r_0 \exp\left(-\frac{v_f t}{2L_0}\right)$$



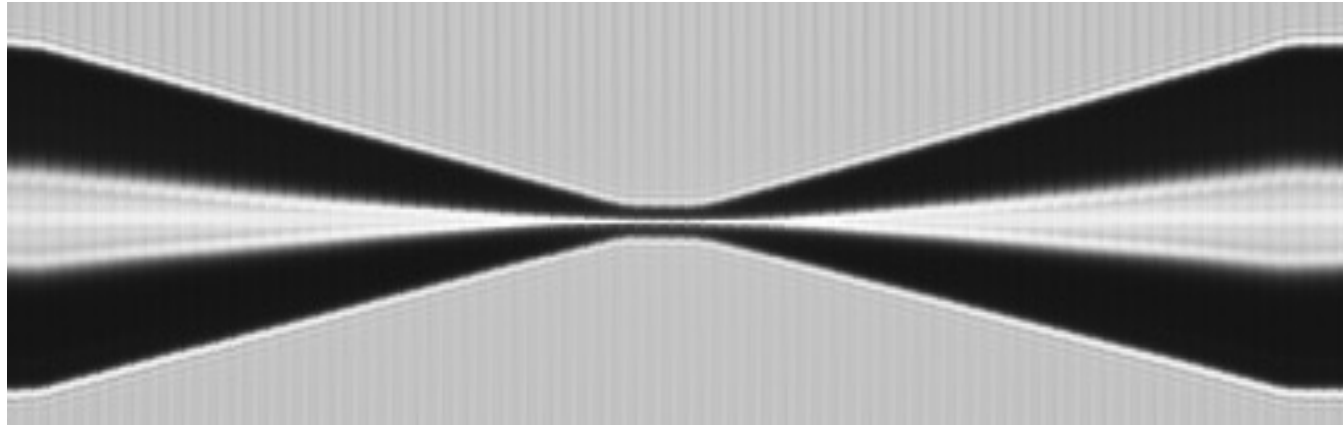
Abrazaderas

Flama

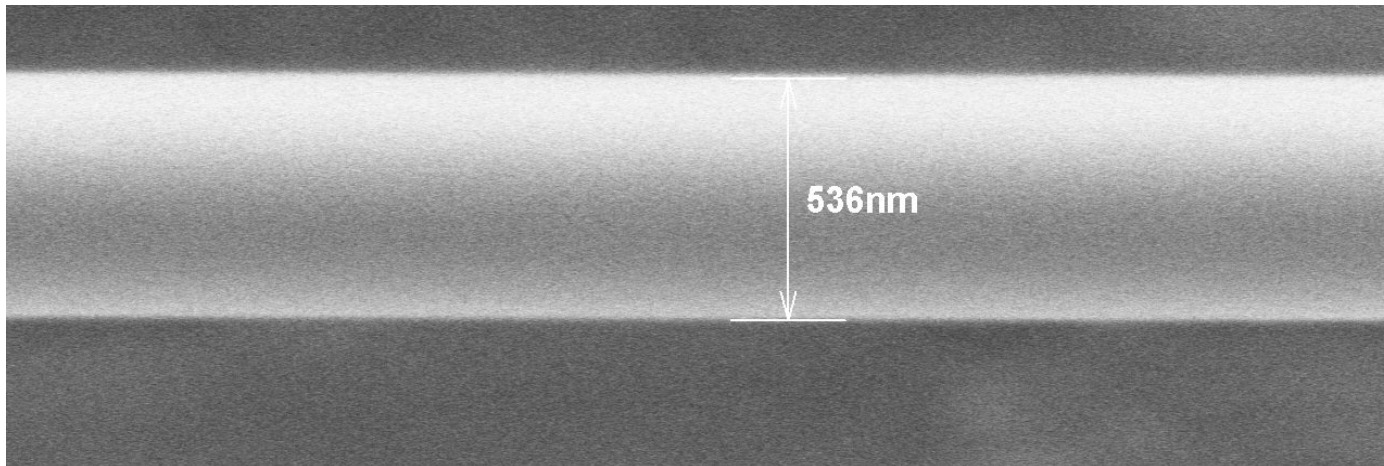
Motores

Micrómetros de
alineamiento

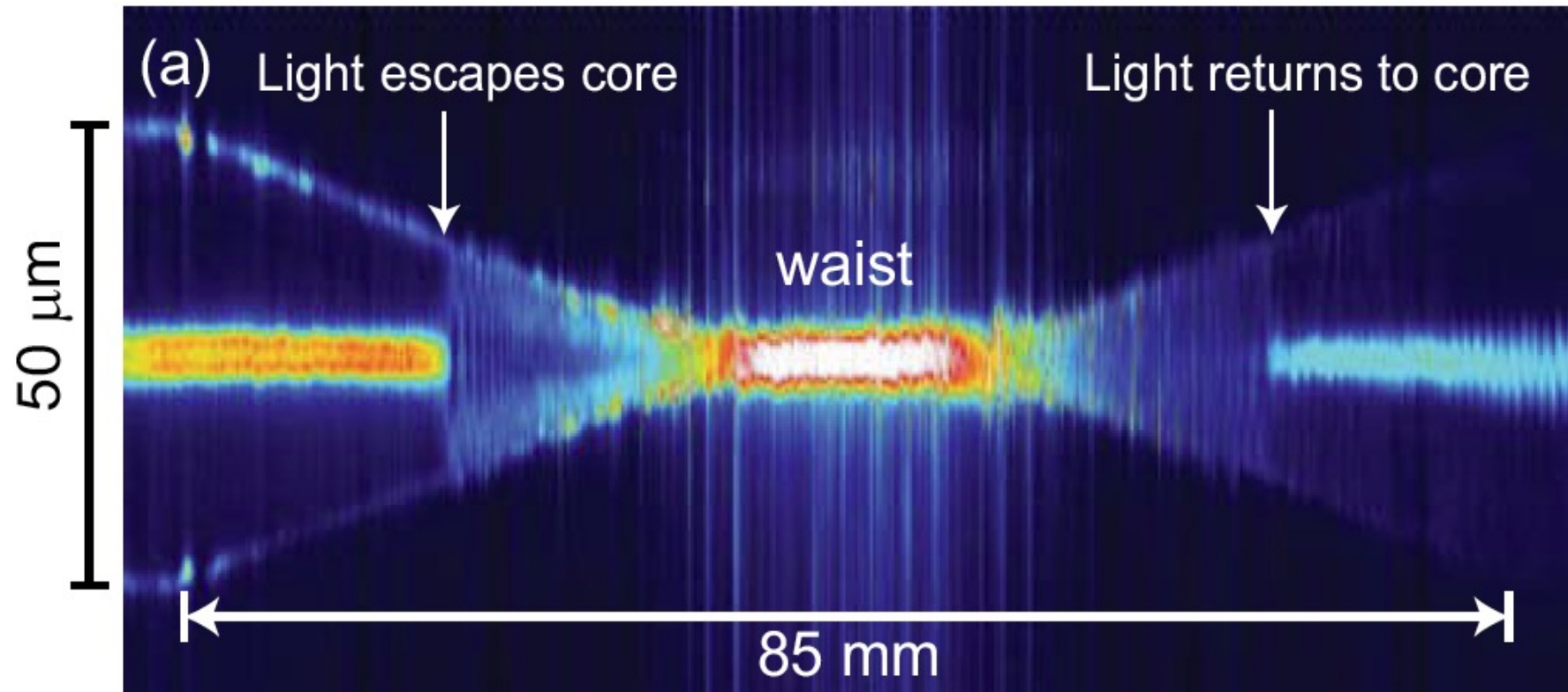
Microscopio óptico



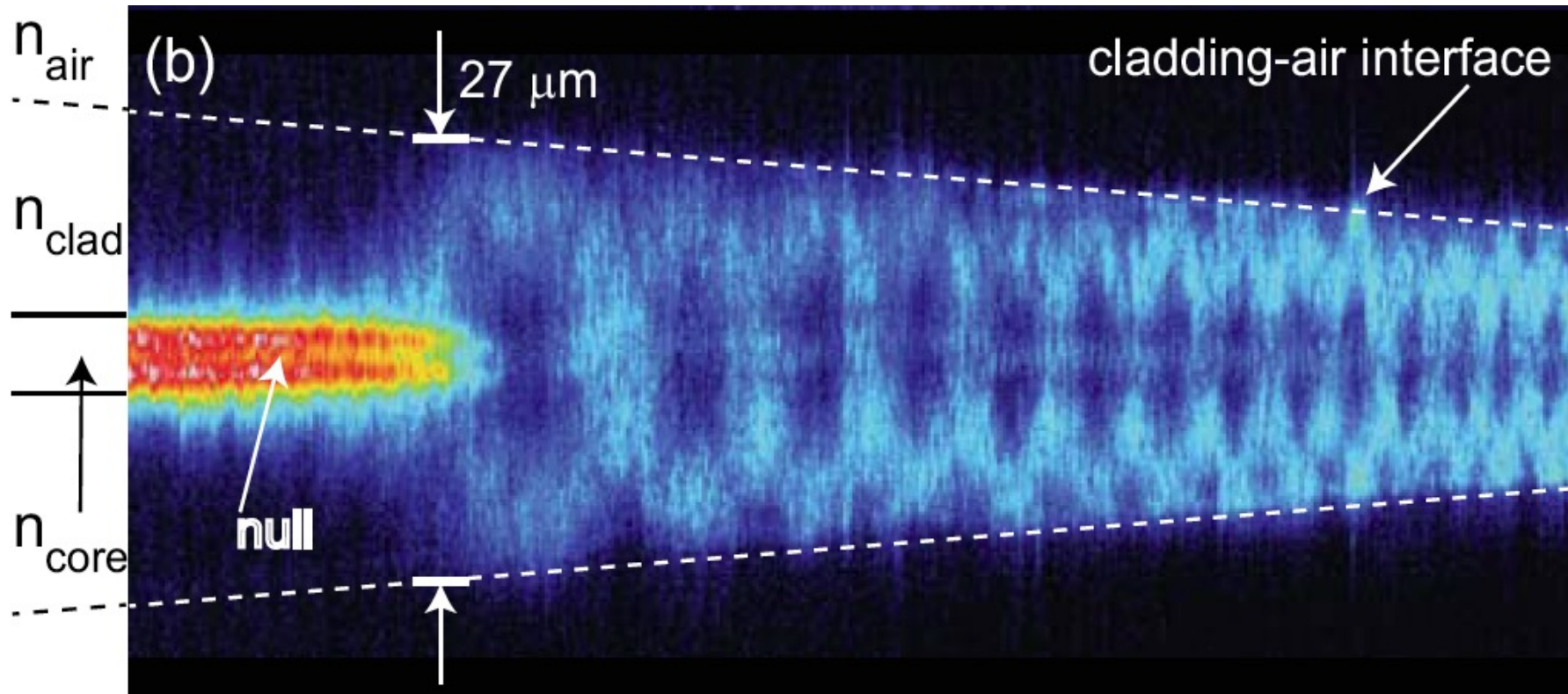
Microscopio electrónico



Dispersión de Rayleigh

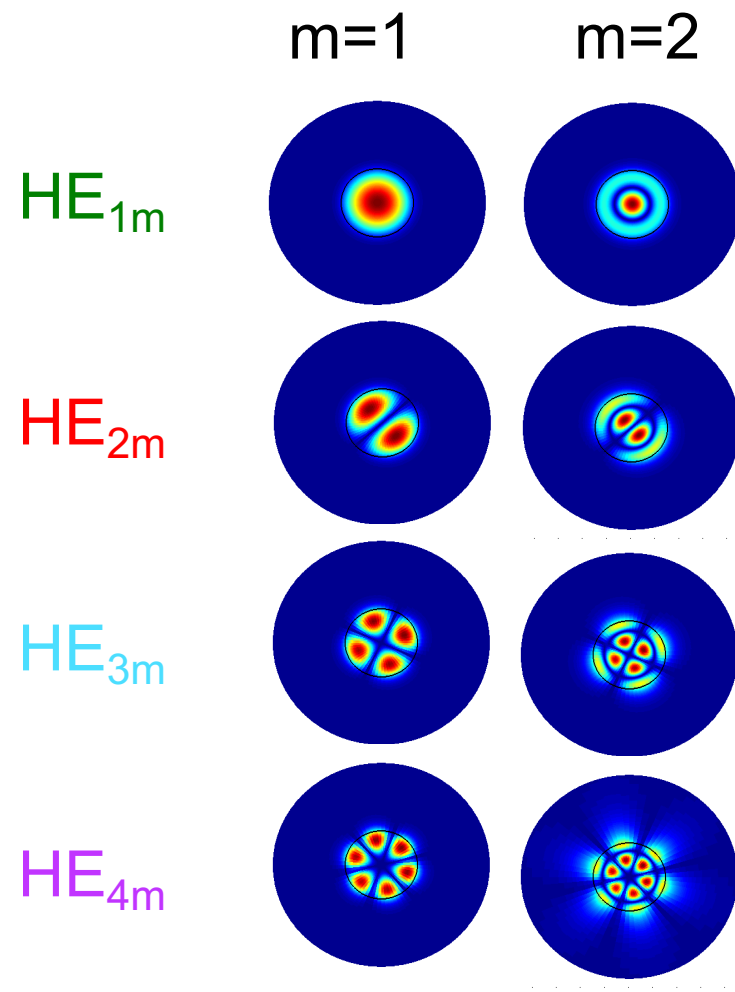


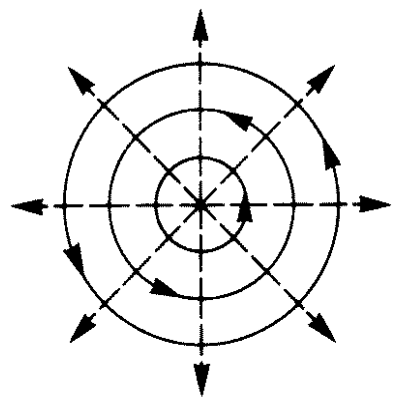
Transición del centro al recubrimiento



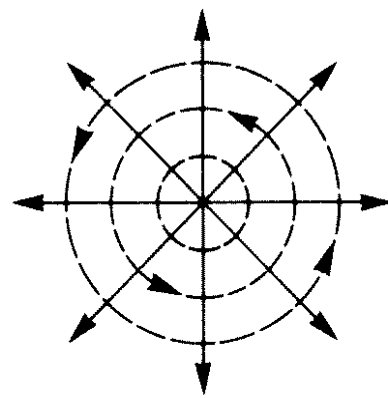
Excitación de muchos modos; óptica de rayos

Modos y polarización

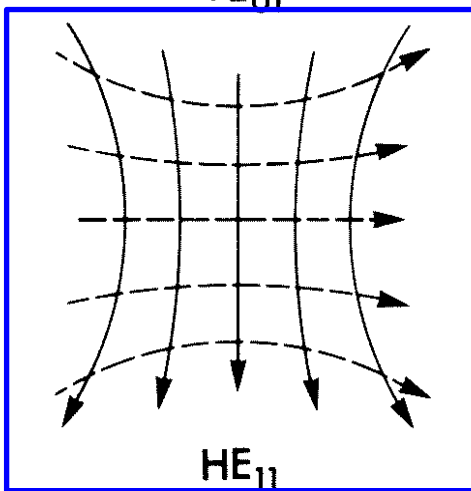




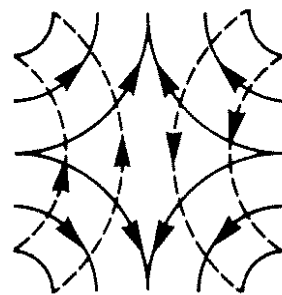
TE₀₁



TM₀₁



HE₁₁



HE₂₁

Modos mecánicos

- Vibración (no tratados aquí)
- Torsión
- Compresión (no tratados aquí)

Modos Torsionales

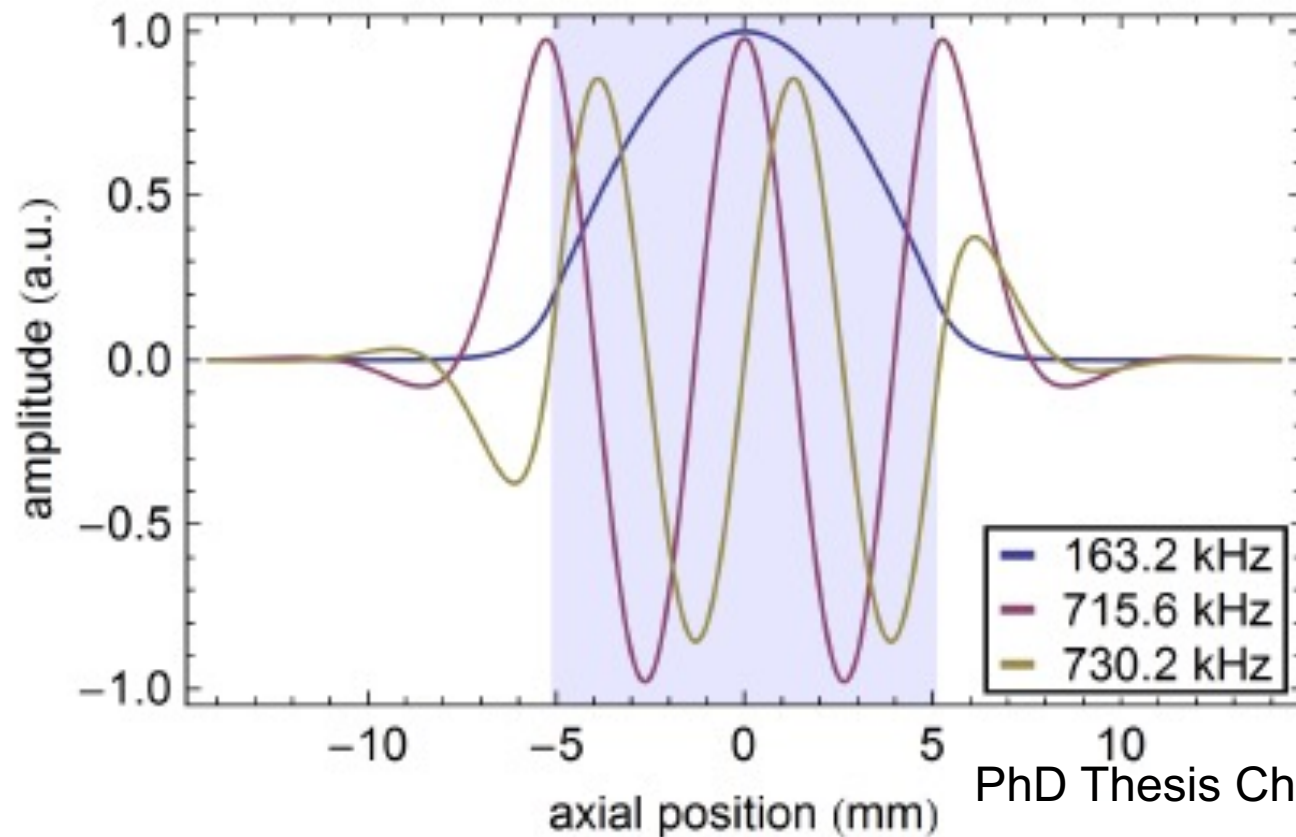
Angulo de torsión ϕ en un cilindro

$$c_t^{-2} \partial_t^2 \phi(t, z) - \partial_z^2 \phi(t, z) = 0$$

$$\phi(t, z) = \phi(z) \cos(\omega t)$$

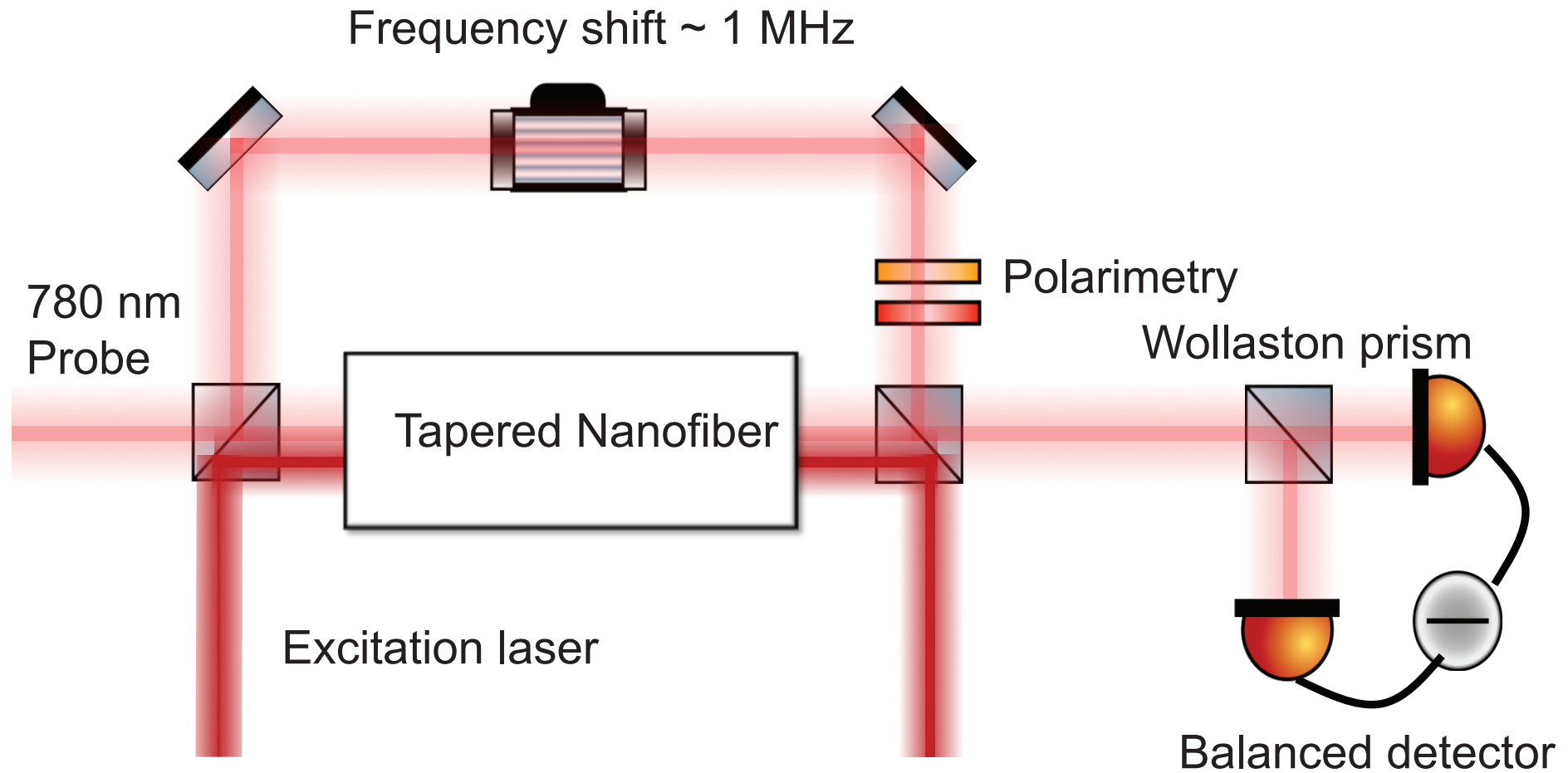
$$\partial_z^2 \phi(t, z) + k_0^2 \phi(t, z) = 0$$

Amplitud de modos de la nanofibra considerando el cono



Transferir el momento angular intrínseco (polarización circular) de la luz a modos torsionales de la NFO.

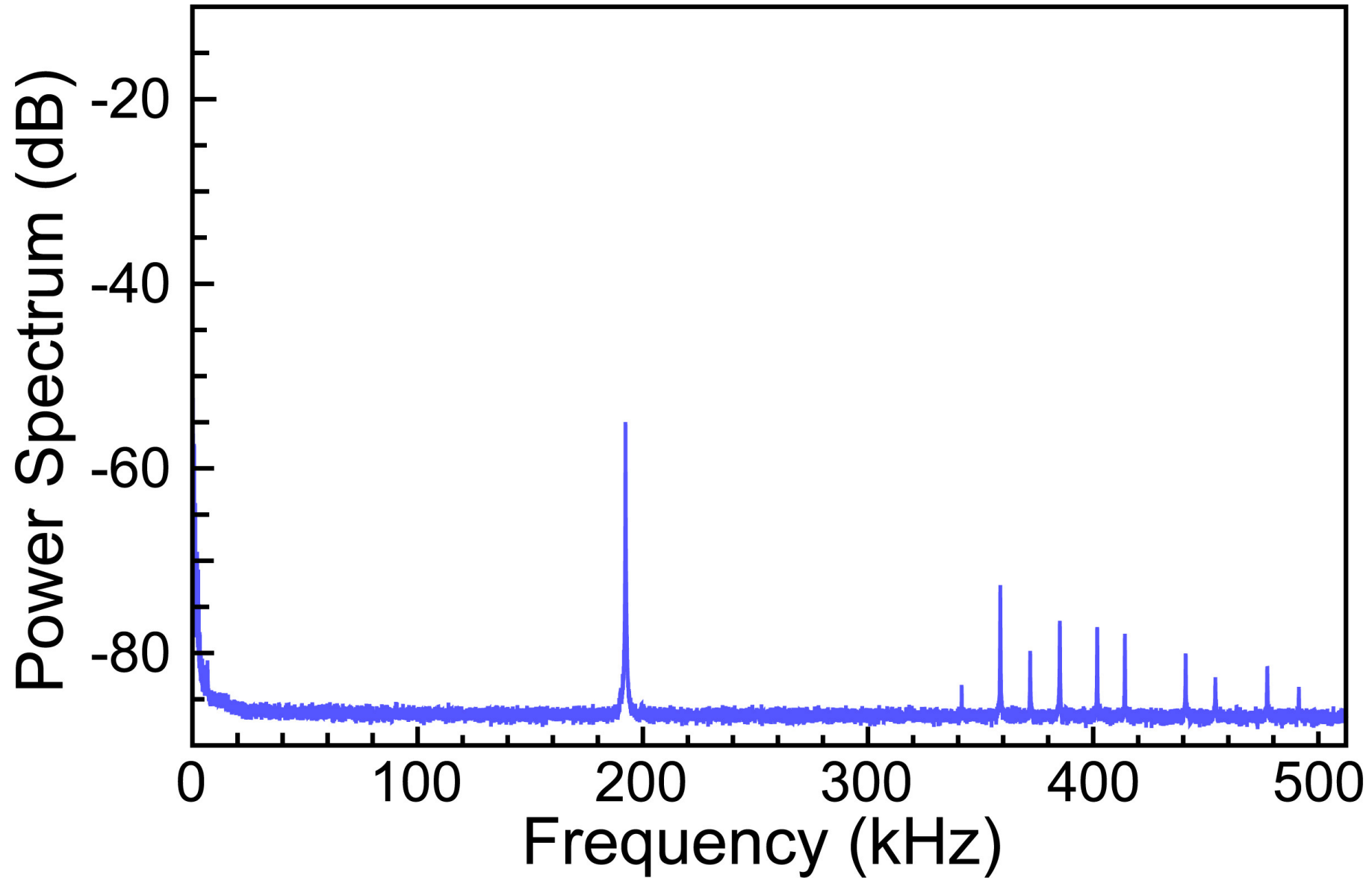
- El estrés producido por la torsión en la nanofibra afecta su índice de refracción, creando un medio birrefringente.



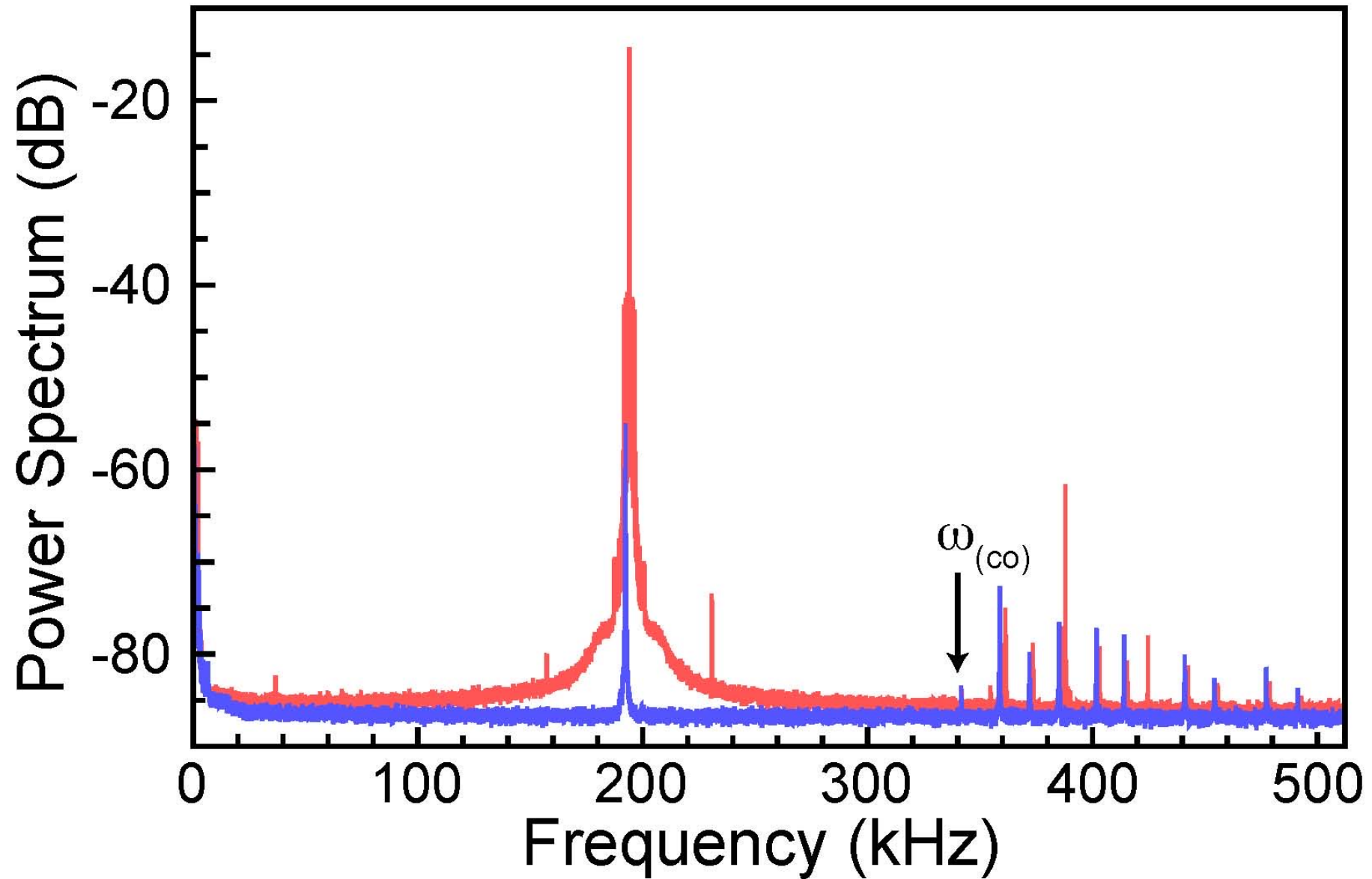
Modulador de amplitud a la frecuencia del modo

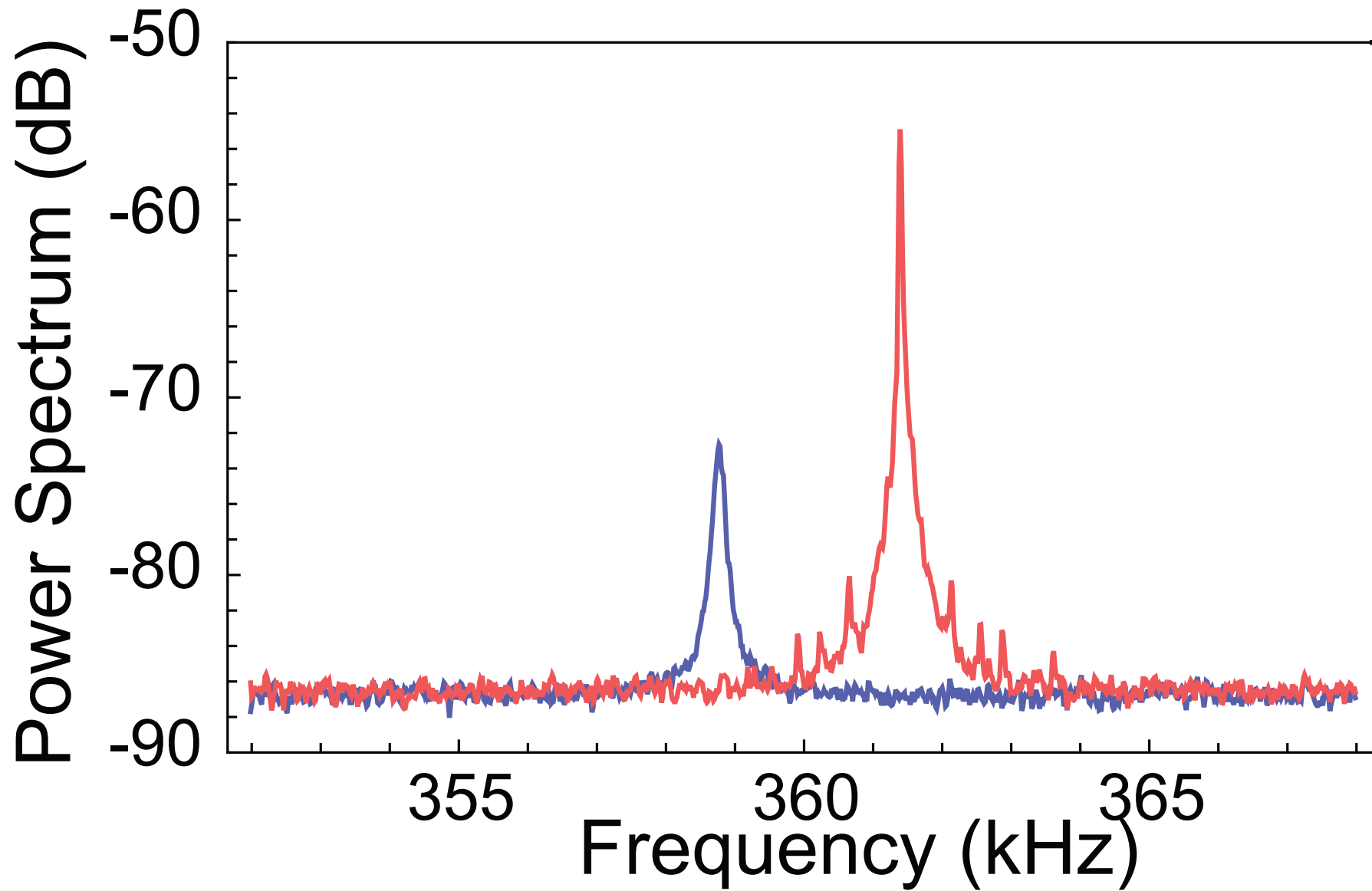
Excitación a 1060 nm: luz polarizada circularmente (modulada a la frecuencia del modo). Excitación con polarización lineal o circular.

Espectro con excitación térmica



Espectros con excitación térmica [azul] y tras forzar la fibra con polarización [rojo] (circular).



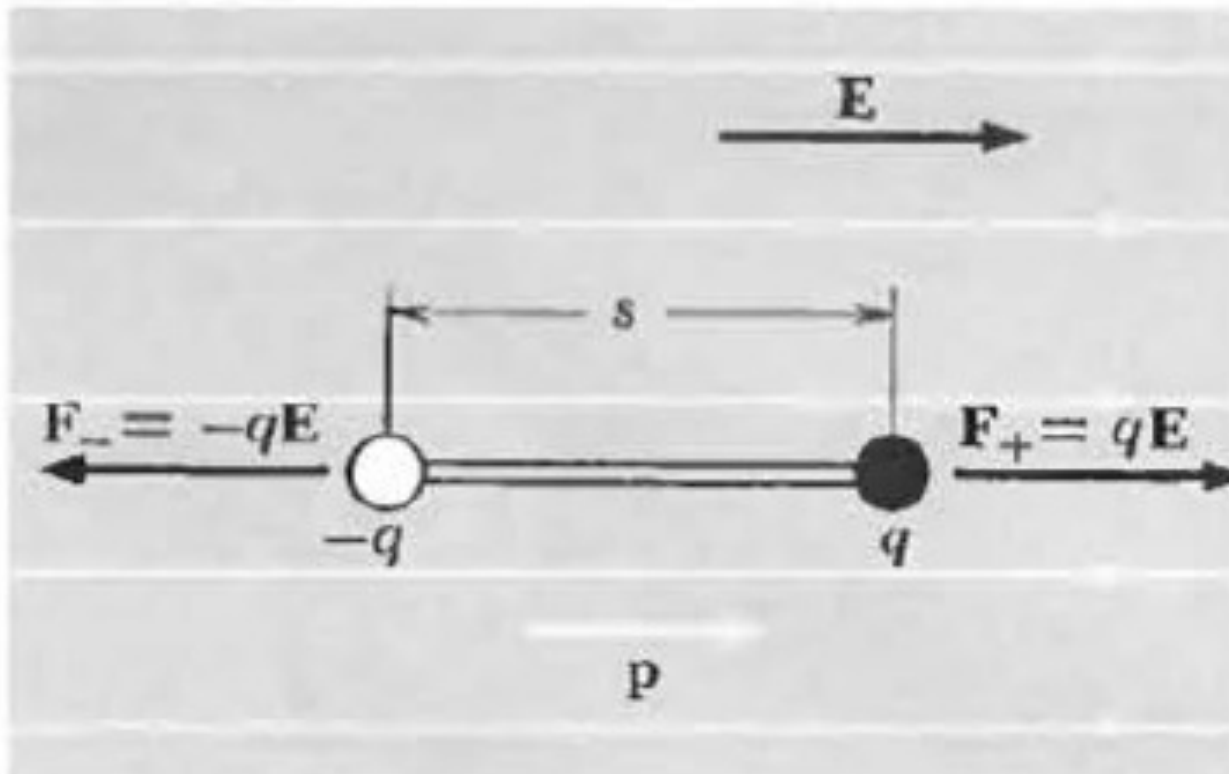


El cambio de temperatura causa un cambio del módulo de Young y de Poisson incrementando la velocidad de la onda

Fuerzas y torques en dipolos

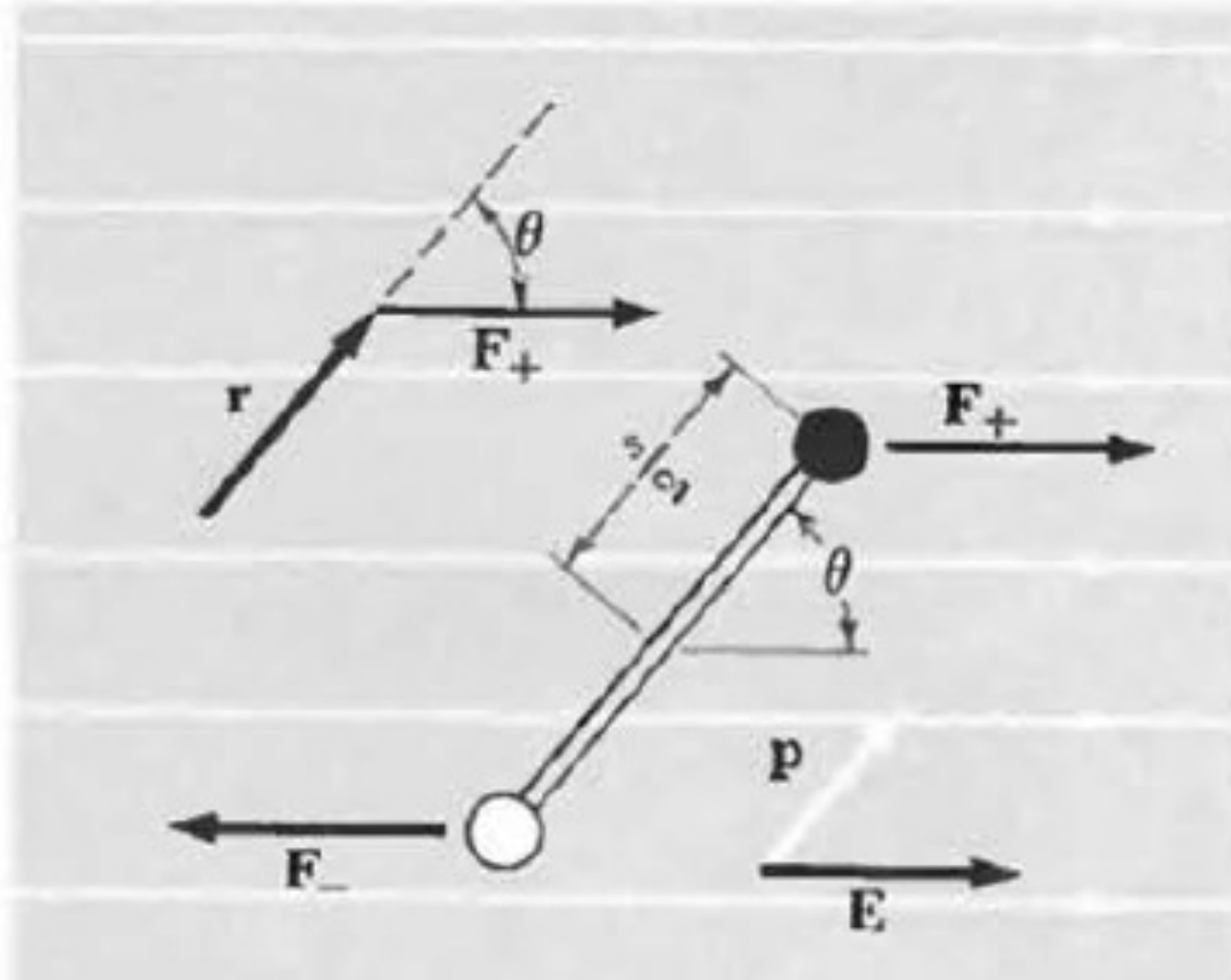
Temperatura

Fuerza y Energía en un dipolo eléctrico



$$U = -\vec{p} \cdot \vec{E}$$

Torque en un dipolo eléctrico



$$\vec{N} = \vec{p} \times \vec{E}$$

Si hay birrefringencia (dipolos) en la nanofibra, habrá un par, un torque.

Puede cambiar de signo dependiendo del ángulo entre la polarización de la luz y el eje de birrefringencia.

Temperatura:

Promedio de la energía cinética:

$$kT = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle$$

el promedio de la velocidad puede ser cero $\langle v \rangle = 0$,
pero no su varianza : $\langle v^2 \rangle - \langle v \rangle^2$.

Hablaremos de temperatura torsional y mediremos
la serie temporal de las fluctuaciones.

Enfriamiento:

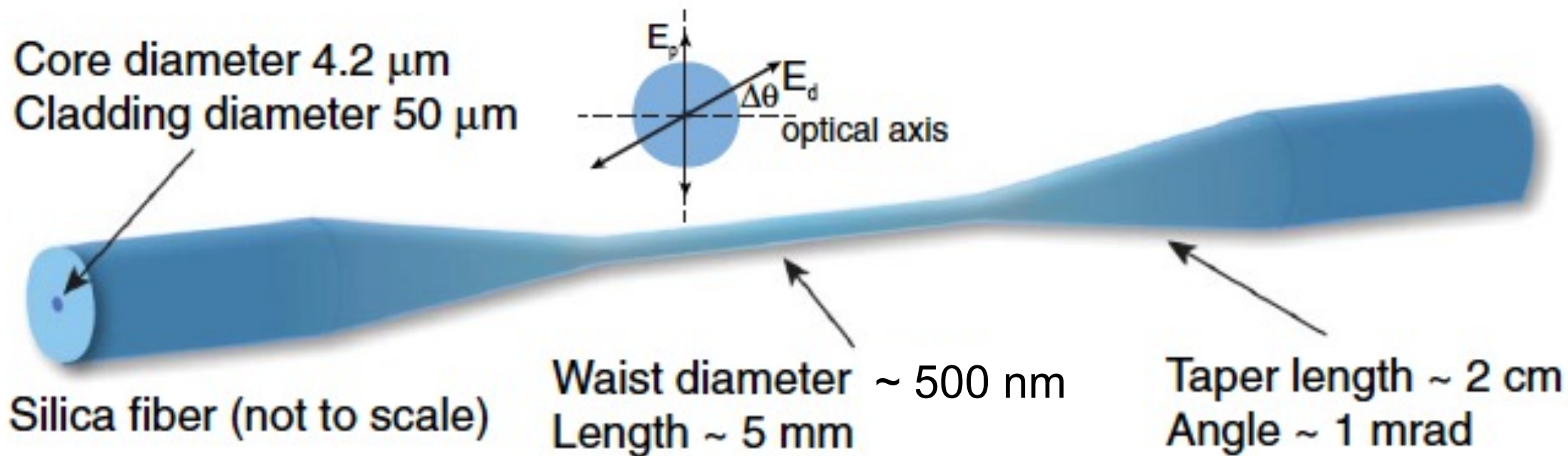
Reducción de la energía cinética de las fluctuaciones aleatorias.

Medir las fluctuaciones ver si el histograma cambia.

La densidad espectral de potencia, (transformada de Fourier de la autocorrelación de las fluctuaciones). La amplitud debe disminuir y el ancho aumentar, mientras que la integral disminuye. La integral es la potencia total en las fluctuaciones.

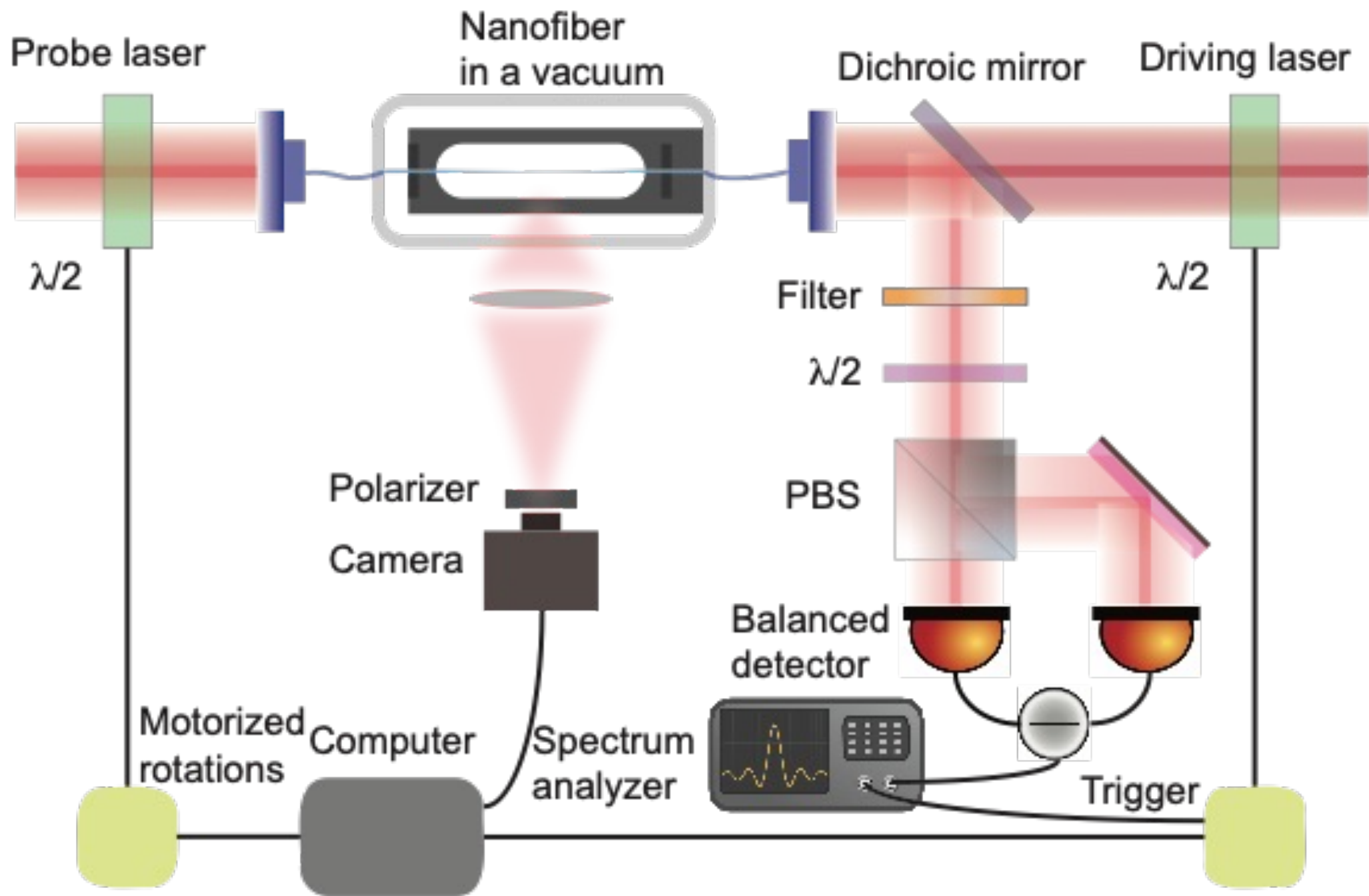
Requiere tener un retraso; una dependencia de la velocidad.

Una sorpresa

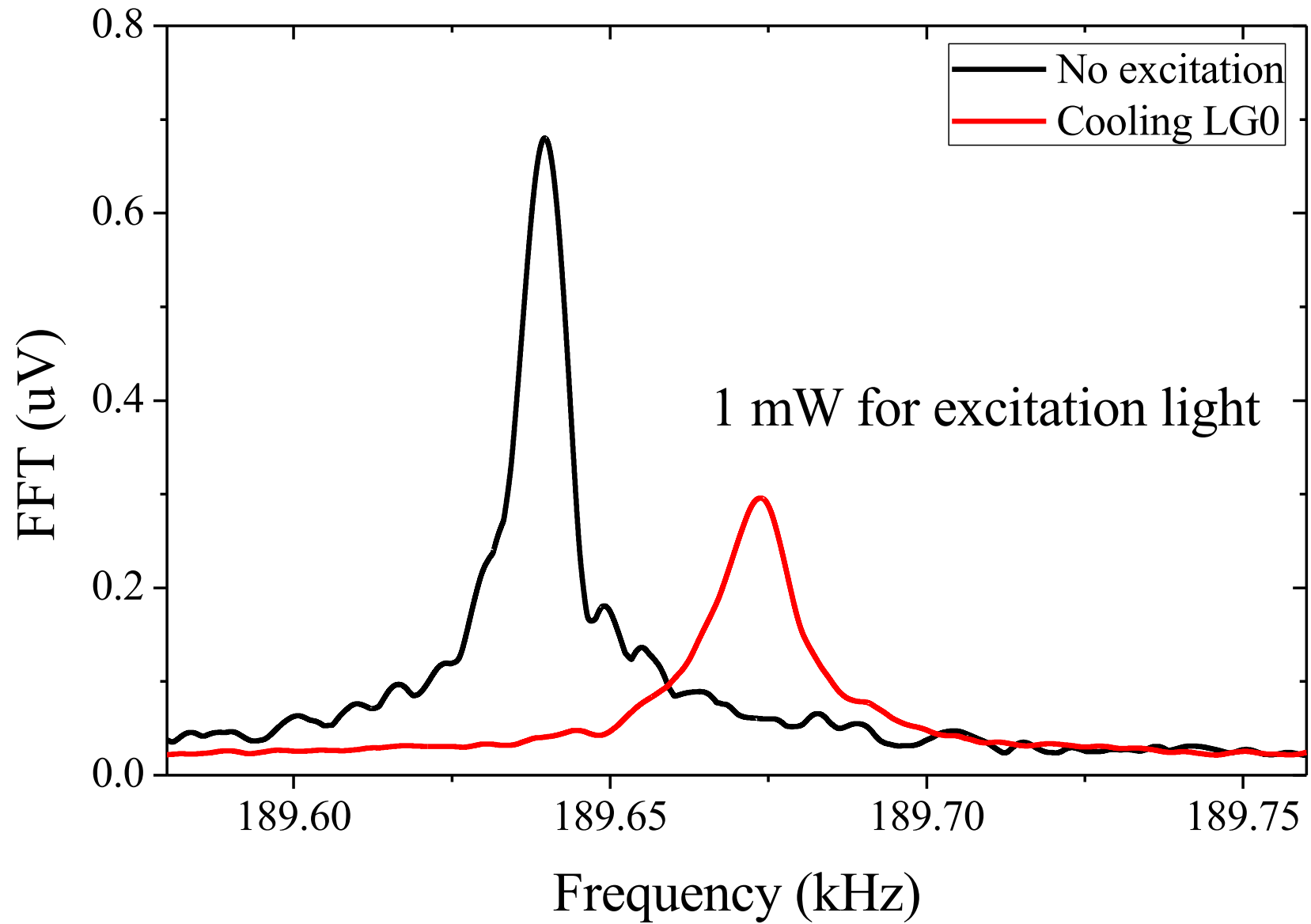


Relative Amplitude of First Torsional Mode

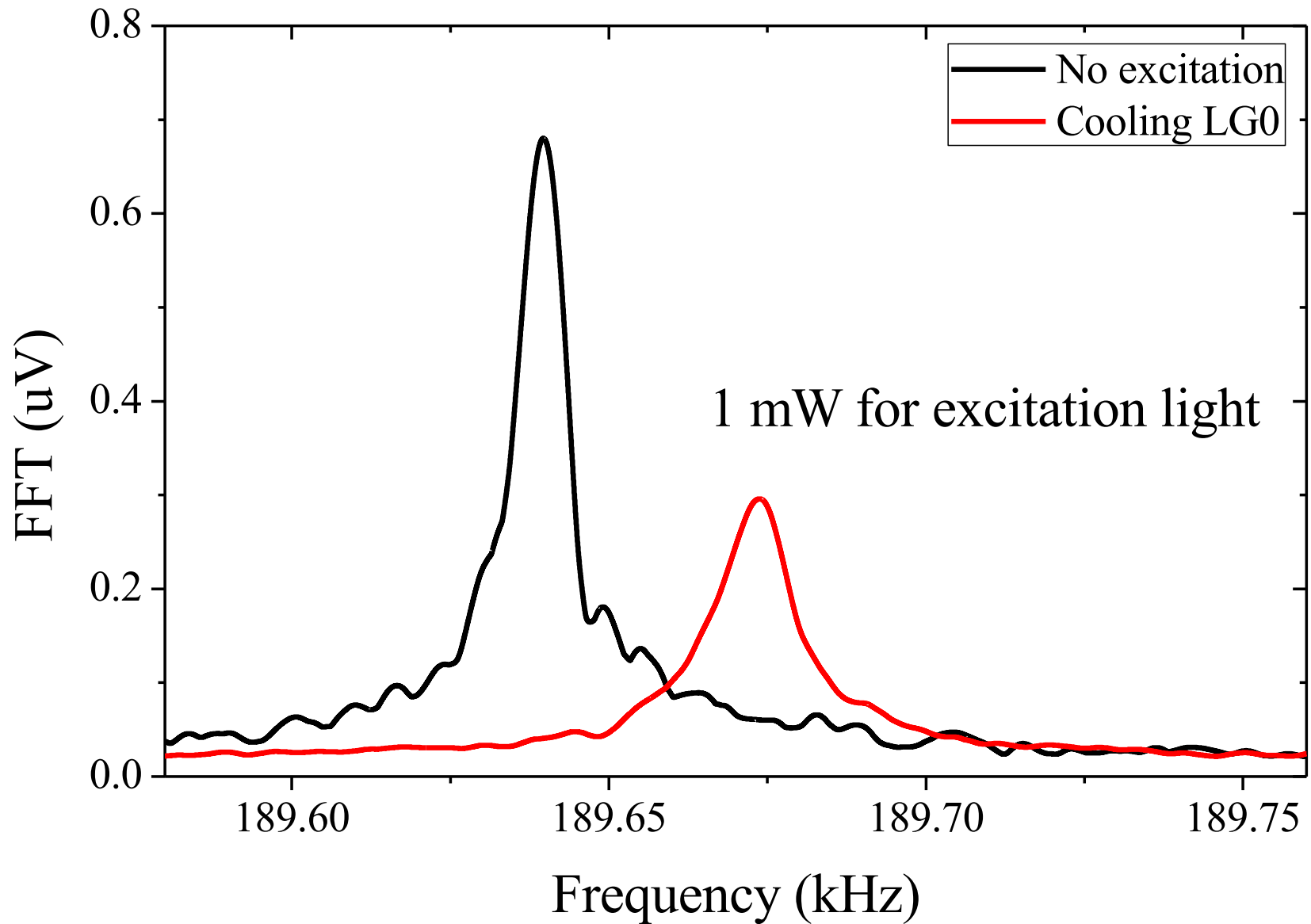




La sorpresa



La sorpresa



Amplitud
decrece

ancho de
banda
crece

¿Qué sucede en un material birrefringente cuando pasa un haz de luz?

Richard Beth, basado en una sugerencia de Poynting, hizo la "Detección mecánica y medición del momento angular de la luz". Usando un péndulo torsional montando un disco birrefringente, midió la rotación debido al cambio en la polarización de linear a circular

El Torque ($\mathbf{E} \times \mathbf{P}$)

$$\tau(t) = \frac{c\epsilon}{2\omega_1} |E|^2 \pi r_0^2 \sin \Gamma \sin (2\Delta\theta(t)) \quad \Gamma = kd(n_o - n_e)$$

Torsión de un disco (modelo del 1er modo)

torque térmico o forzado

$$I\ddot{\theta}_F(t) + \gamma\dot{\theta}_F(t) + \kappa\theta_F(t) - \tau_0 \sin (2\Delta\theta(t)) = \tau_{th}$$

Oscillador armónico

potencial modificado

$$\tau_0 = \frac{c\epsilon}{2\omega_1} |E|^2 \pi r_0^2 \sin \Gamma$$

$$\Delta\theta = \theta_F - \theta_L$$

Cálculo de la densidad spectral de la rotación

Perturbación alrededor del estado estable

$$I\delta\ddot{\theta}_F(t) + \gamma\delta\dot{\theta}_F(t) + \delta\theta_F(t) (\kappa - \kappa_L) = \tau_{th}$$

$$\kappa_L = 2\tau_0 \cos(2\Delta\theta^{(ss)})$$

Densidad espectral

$$S_{\delta\theta_F}(\omega) = \frac{4k_B T \gamma}{((\kappa - \kappa_L) - I\omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}$$

$$\langle \delta\theta_F^2 \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\delta\theta_F}(\omega) d\omega$$

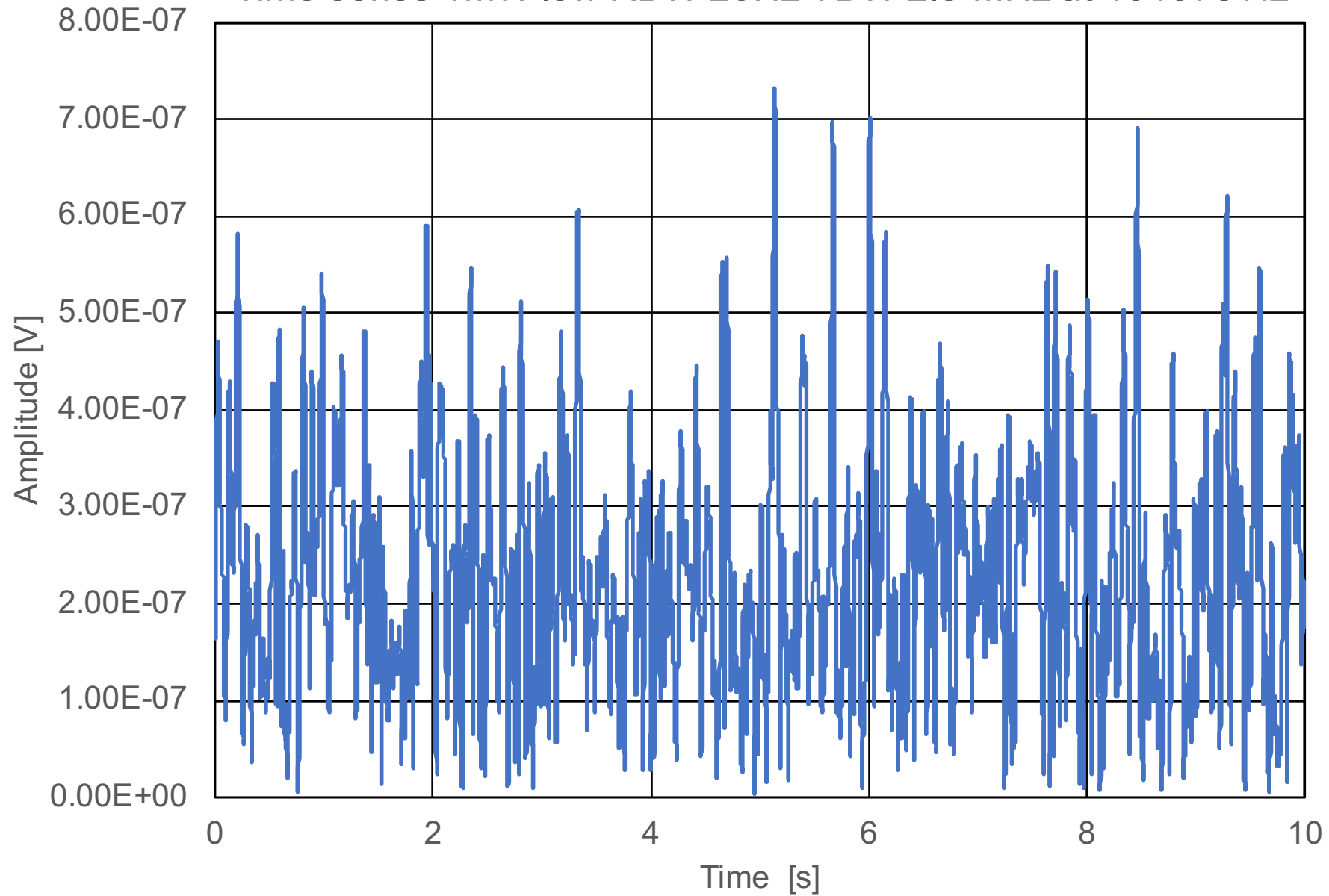
$$\langle \delta\theta_F^2 \rangle = \frac{k_B T}{\kappa - \kappa_L}$$

$$= \frac{k_B T}{I\omega_m^2}$$

$$\frac{1}{2} I \omega_m^2 \langle \delta\theta_F^2 \rangle = \frac{1}{2} k_B T$$

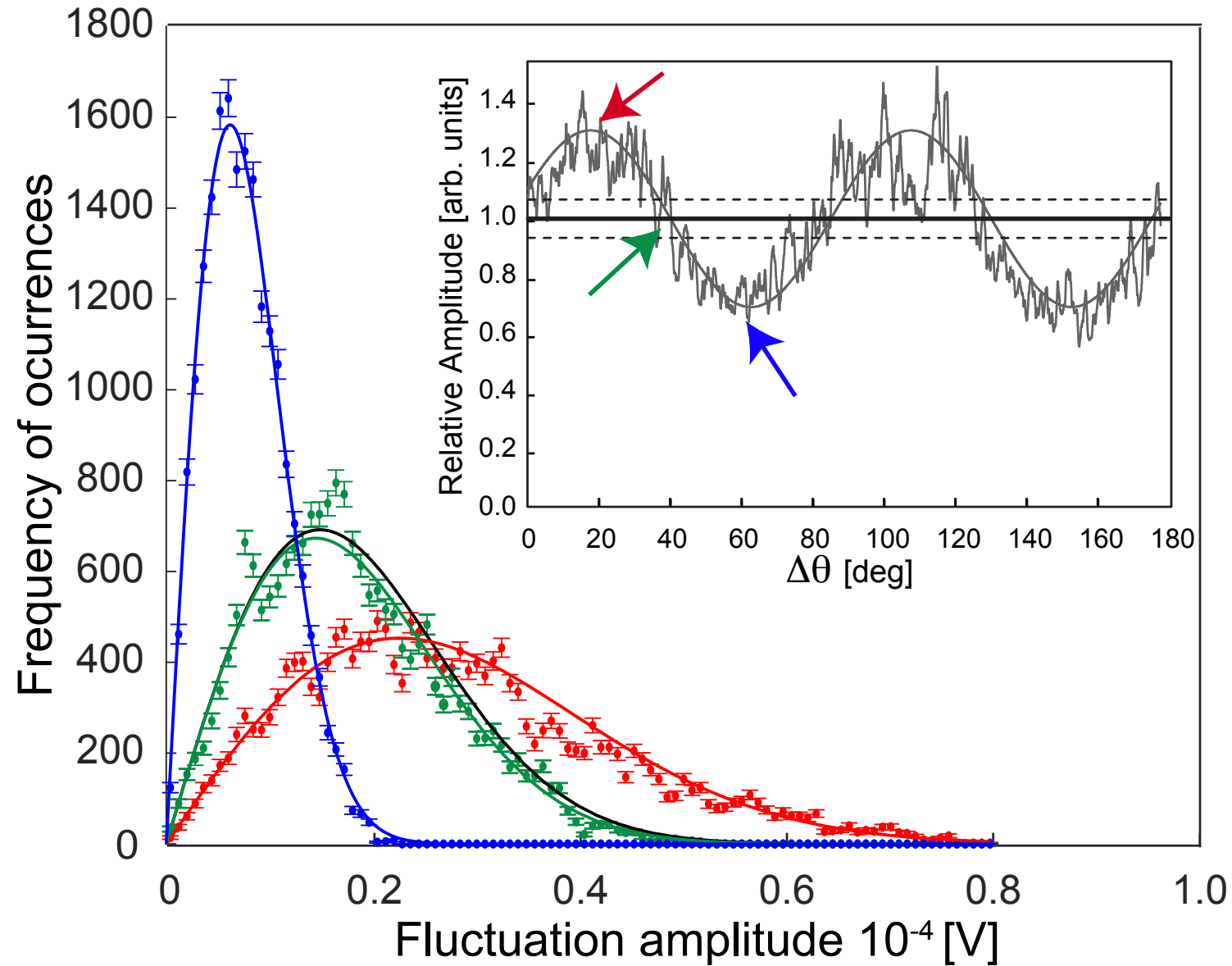
La varianza es proporcional a la temperatura.

Time series 1mW low RBW 20Hz VBW 2.8 MHz at 191975 Hz

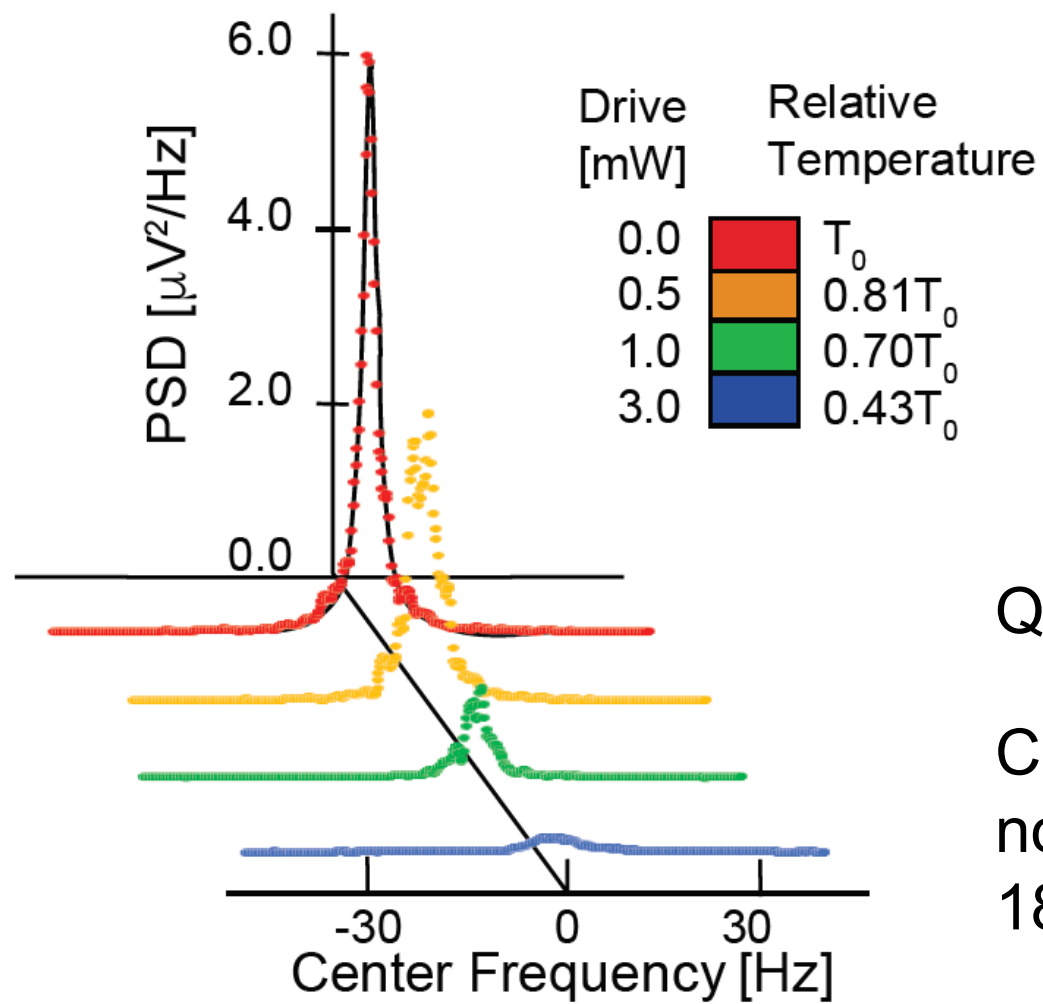


500 μs por punto

Distribución de Maxwell Boltzmann con 0.5 mW de forzamiento

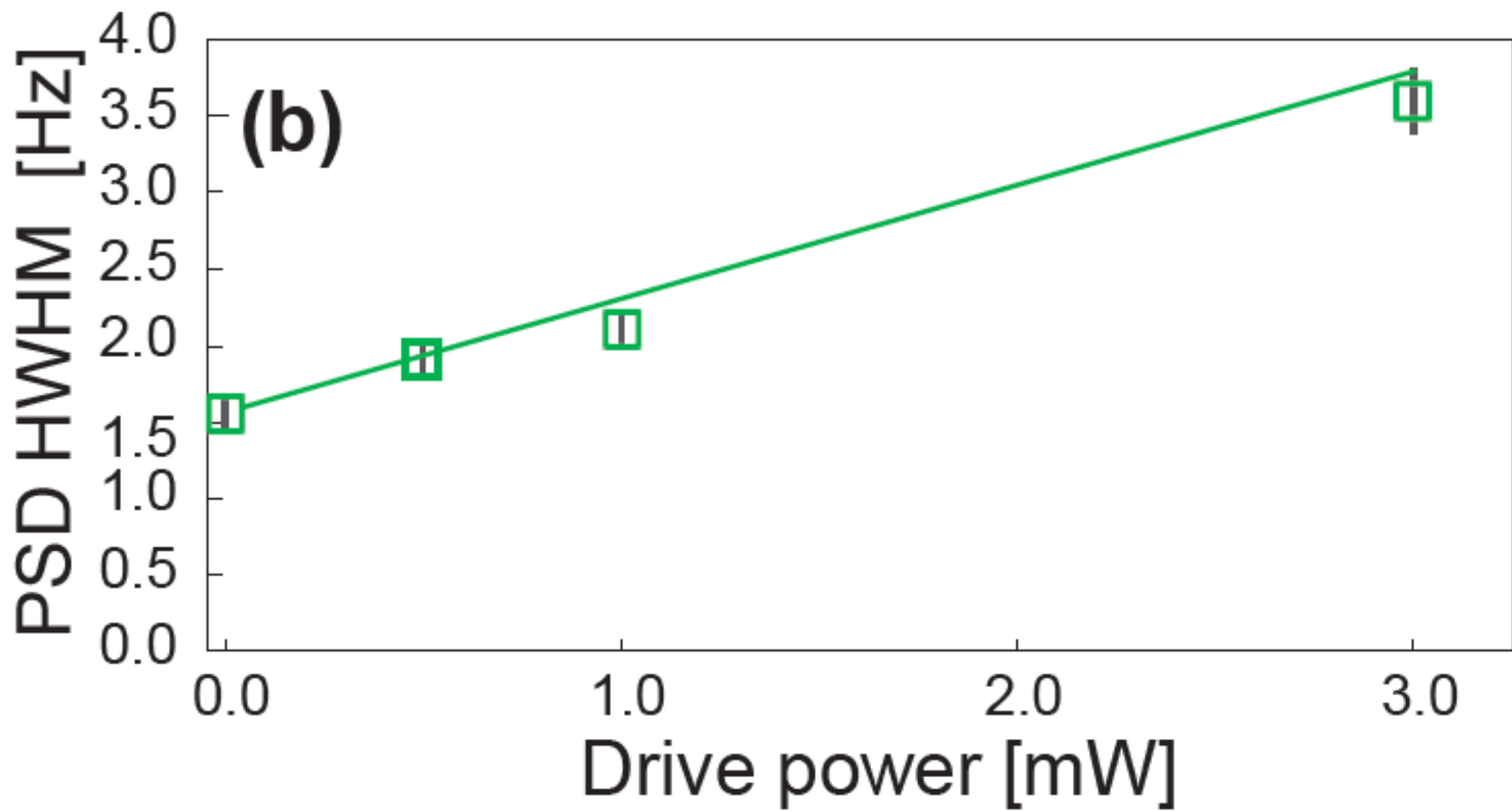


Angle	T_{eff}/T_0	Uncertainty
min. (blue)	0.168	± 0.004
med. (green)	0.910	± 0.004
max. (red)	2.320	± 0.014
no drive (black)	1.000	



$$Q_{0,0} = 6 \times 10^4$$

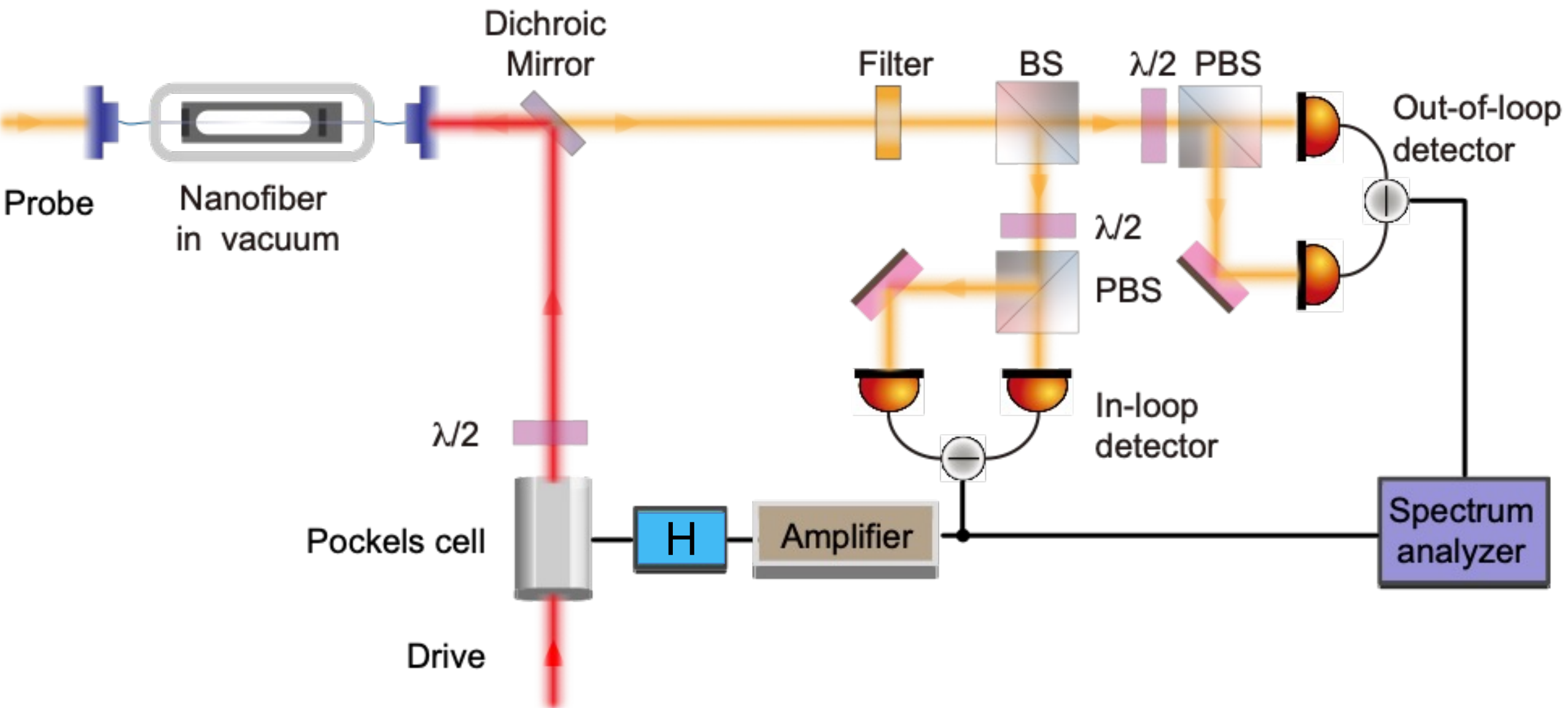
Center frequency
no drive
189,950 Hz



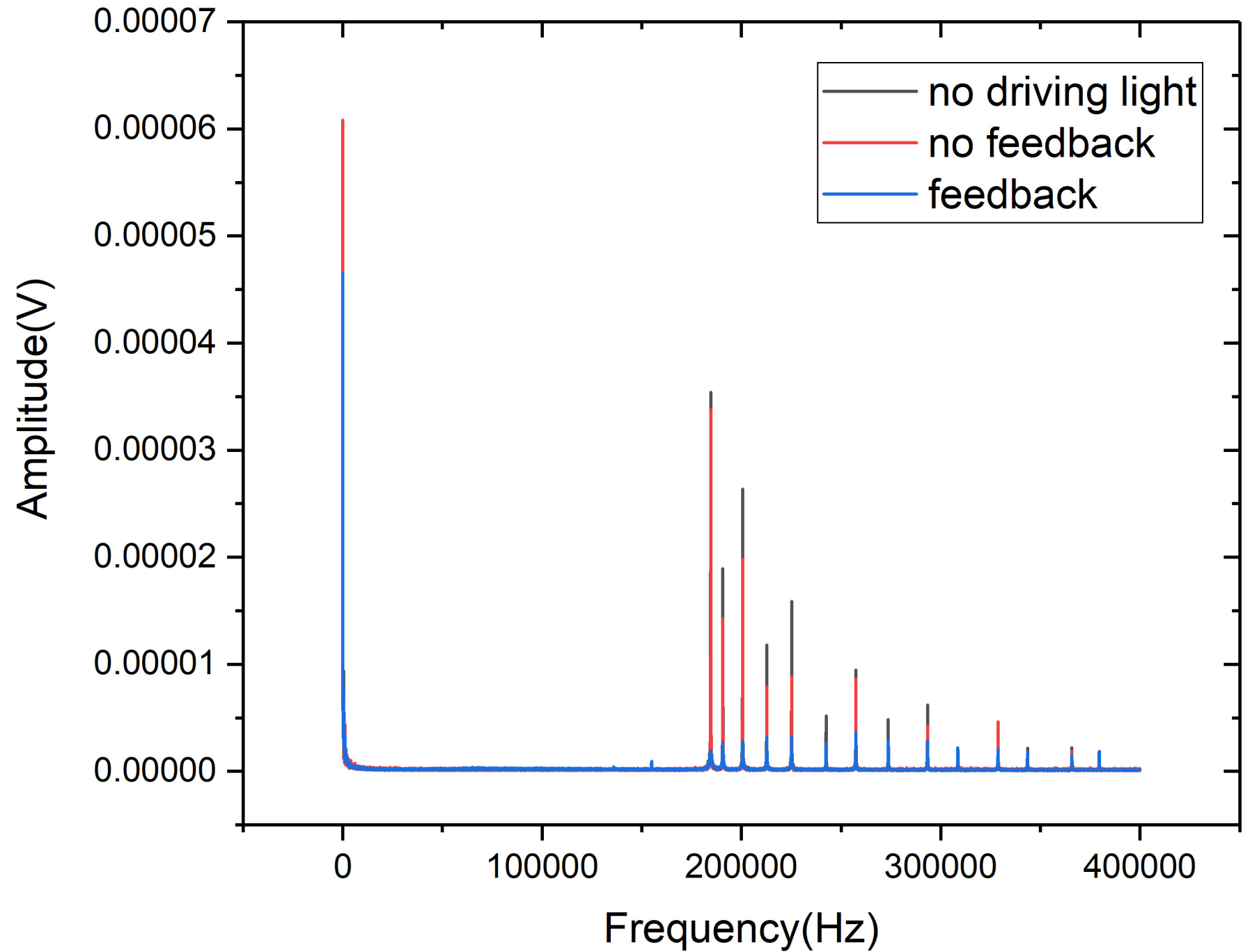
Retroalimentación

Aplicando retroalimentación

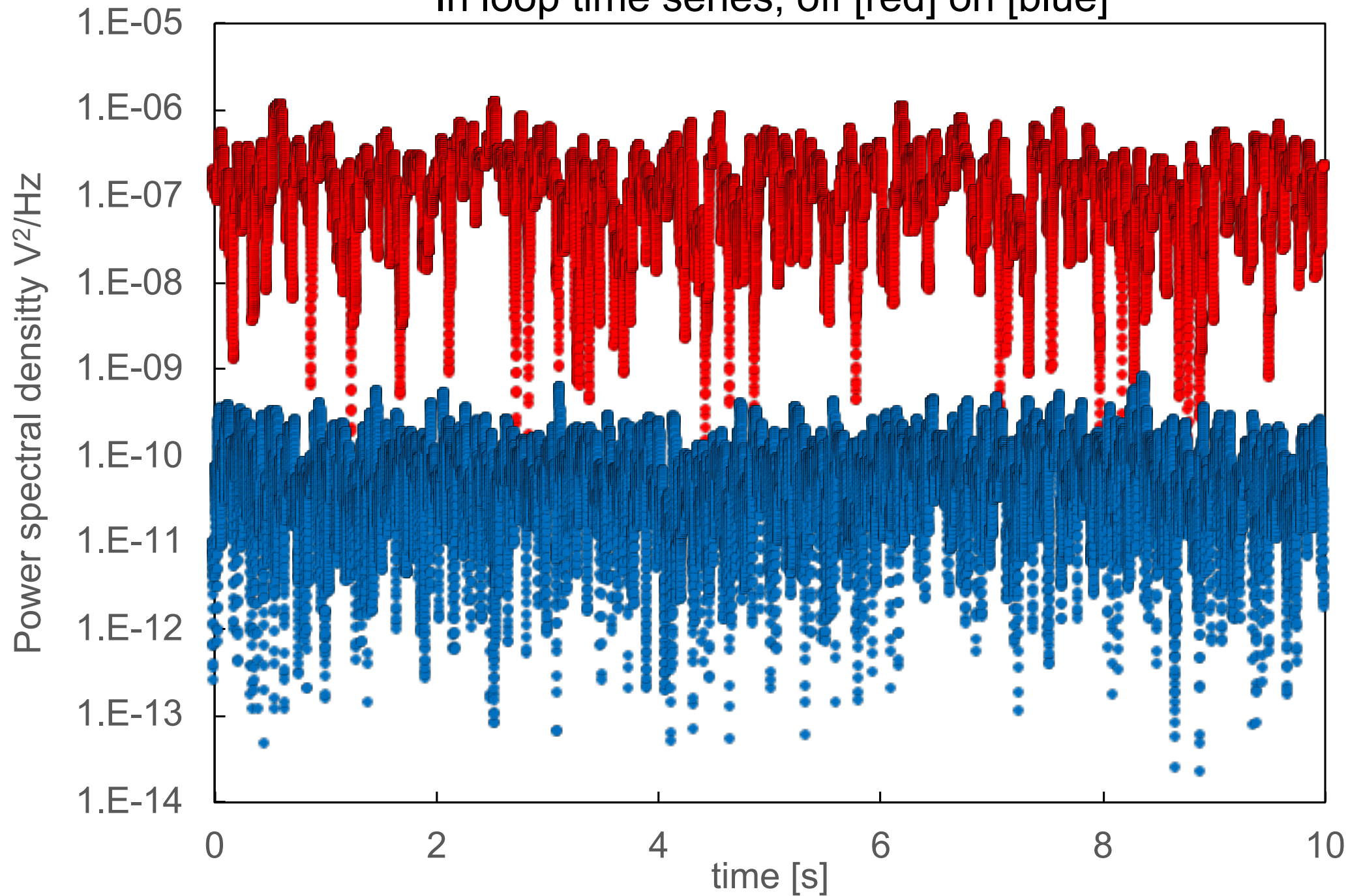
$$I\ddot{\theta}_F(t) + \tilde{\gamma}\dot{\theta}_F(t) + \theta_F(t) (\kappa - \kappa_L) = \tau_{th} + \tau_{fb}$$



Optimización de la retroalimentación



In loop time series, off [red] on [blue]

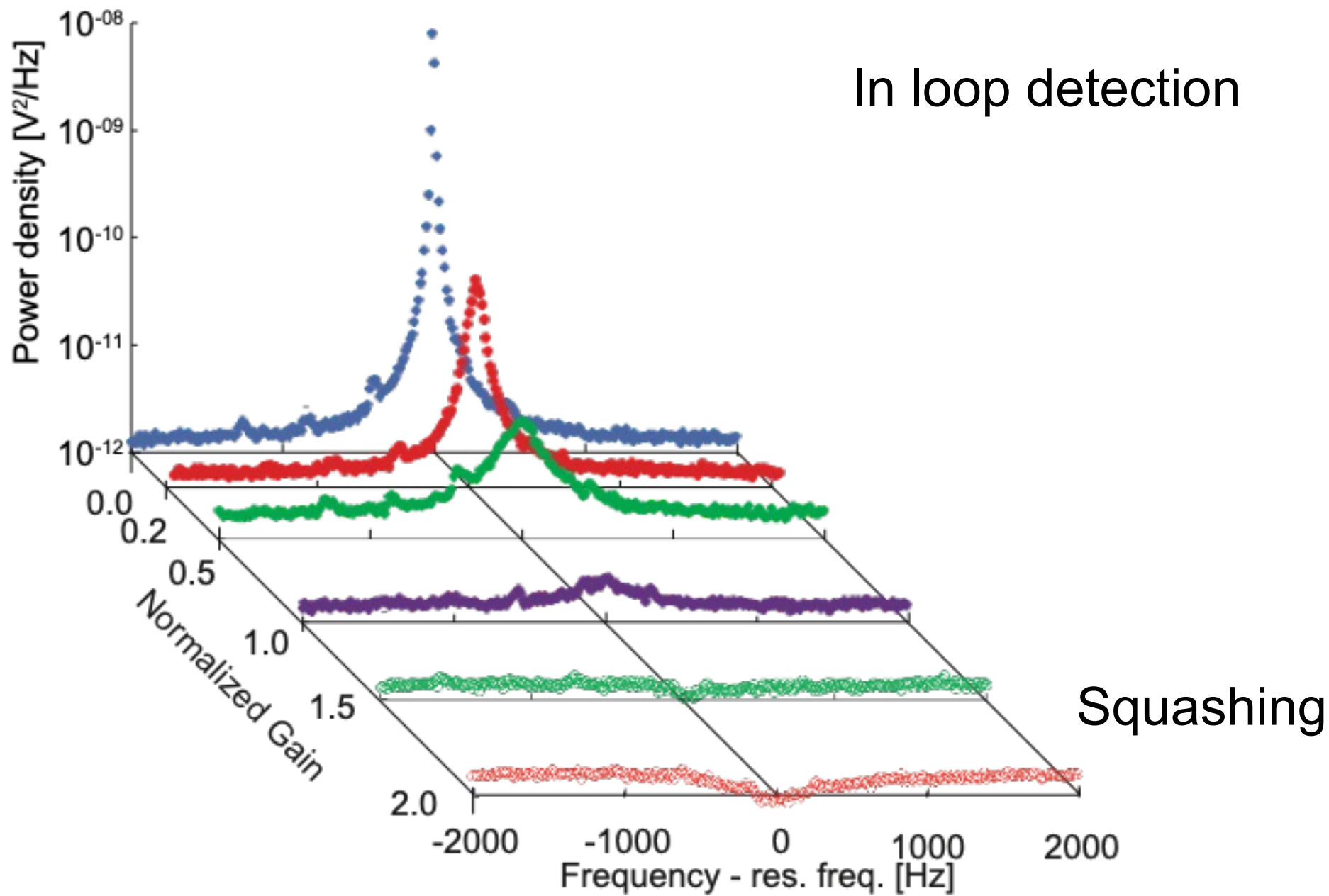


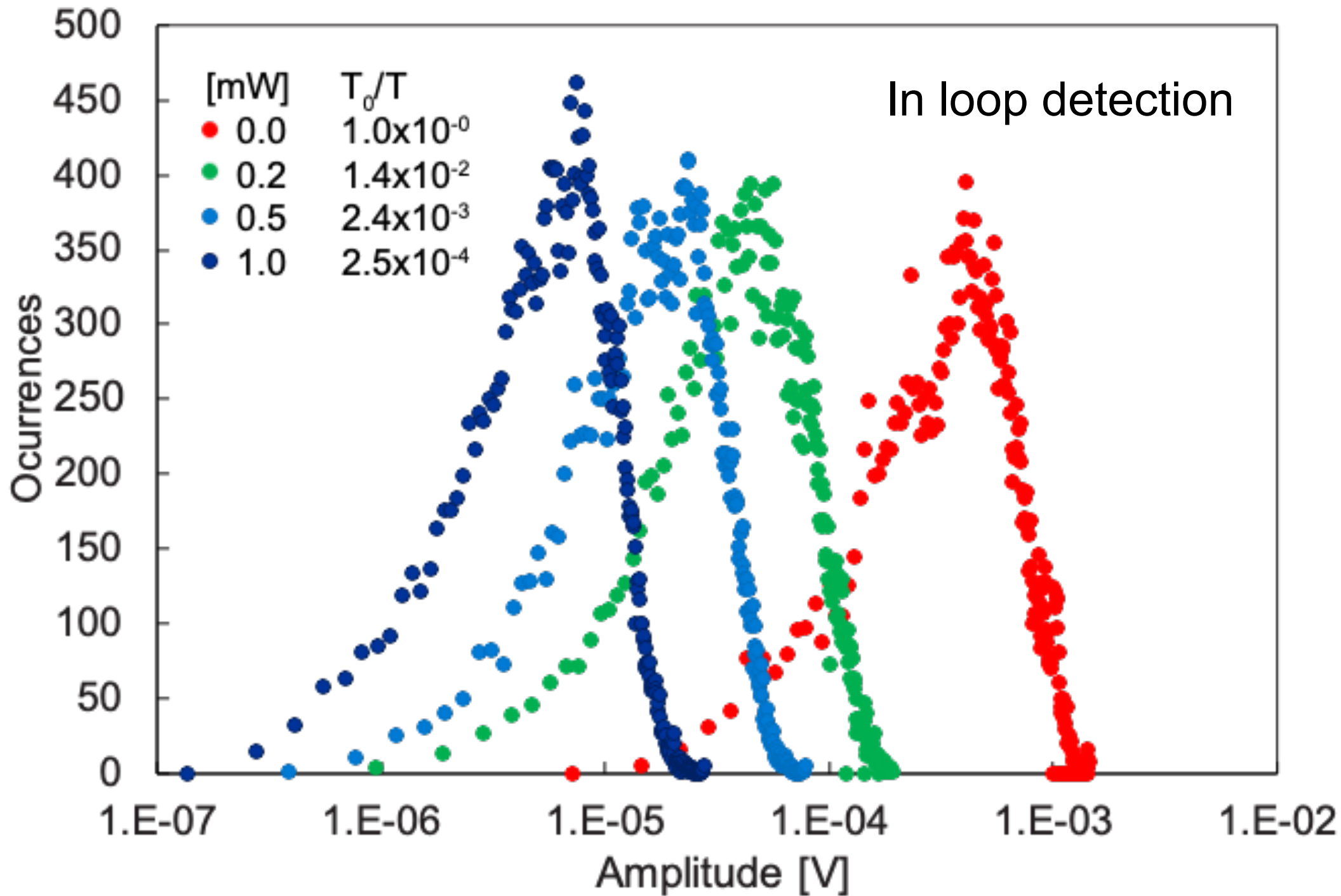
¿cuan frío se puede llegar? (depende del ruido S_n y la señal S_s).

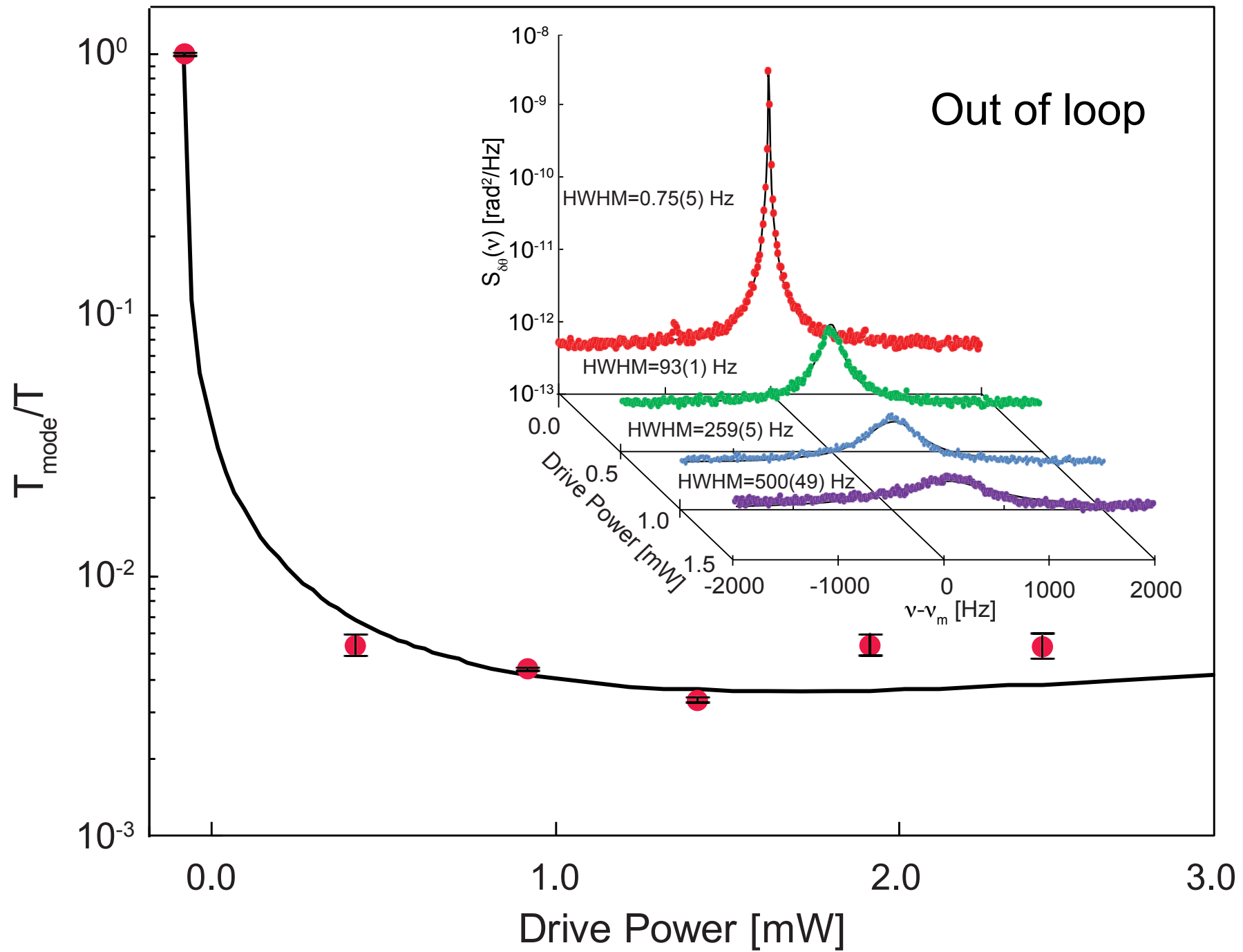
$$\begin{aligned}\frac{T_{mode}}{T} &= \left(\frac{1}{1+g} \right) + \left(\frac{g^2}{1+g} \right) \left(\frac{S_n}{2k_b T / \kappa \Gamma} \right), \\ &= \left(\frac{1}{1+g} \right) + \left(\frac{g^2}{1+g} \right) \left(\frac{S_n}{S_s} \right),\end{aligned}$$

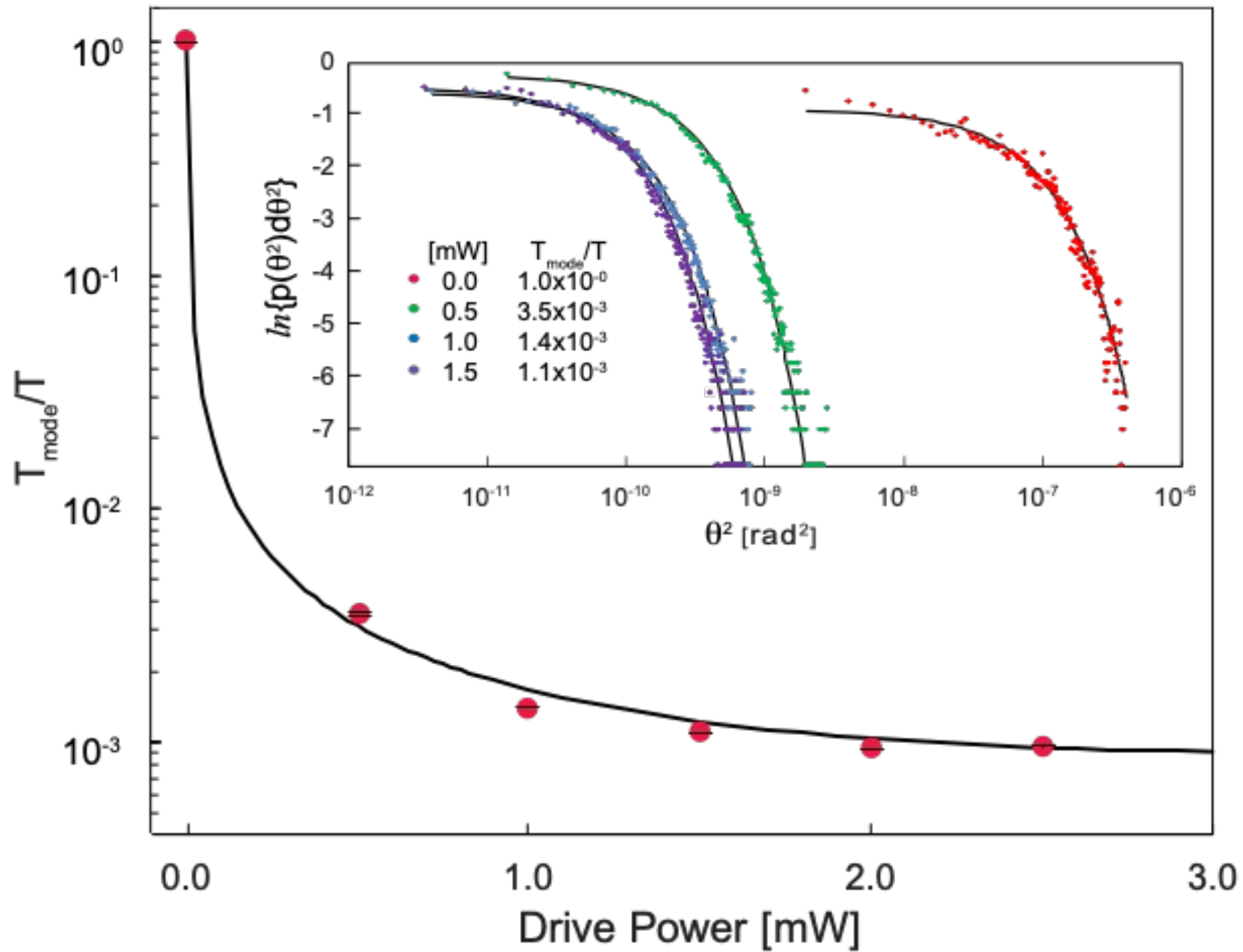
g es la ganancia adimensional que depende de la retroalimentación PID, del retraso y la potencia

máxima reducción $\frac{T_{mode}}{T} \rightarrow \frac{2}{\sqrt{S_s/S_{\theta_n}}}$









¿Se puede soñar en alcanzar el régimen cuántico?

$$T < Q \frac{h\nu}{k_B}$$

Para los parámetros existentes $Q=10^5$, $\nu=200,000$ Hz, T es alcanzable 1 K

En un momento aparece “Squashing” reducción del ruido, lo cual complica el enfriamiento

Resumen

- Hemos observado un decrecimiento de las fluctuaciones térmicas. Tiene las características de un enfriamiento optomecánico y afecta a todos los modos torsionales. No tenemos una cavidad óptica.
- Con retroalimentación el área disminuye en un factor de mil, lo mismo que la distribución MB.

Bibliografía mínima, verlas en mi página: Quantum Optics and Francium:

Dianqiang Su, Pablo Solano, Jeffrey D. Wack, Luis A. Orozco, and Yanting Zhao, "Torsional optomechanical cooling of a nanofiber," *Photonics Research Journal* **10** 601, (2022). <https://doi.org/10.1364/PRJ.440991>

P. Solano, J. A. Grover, J. E. Hoffman, S. Ravets, F. K. Fatemi, L. A. Orozco, and S. L. Rolston "Optical Nanofibers: A New Platform for Quantum Optics," *Advances in Atomic Molecular and Optical Physics*, Vol. 46, 355-403, Edited by E. Arimondo, C. C. Lin, and S. F. Yelin, Academic Press, Burlington 2017.

Dianqiang Su, Yuan Jiang, Pablo Solano, Luis A. Orozco, John Lawall, Yanting Zhao, "Optomechanical feedback cooling of a 5 mm-long torsional mode," <https://arxiv.org/abs/2301.10554>

¡Gracias!