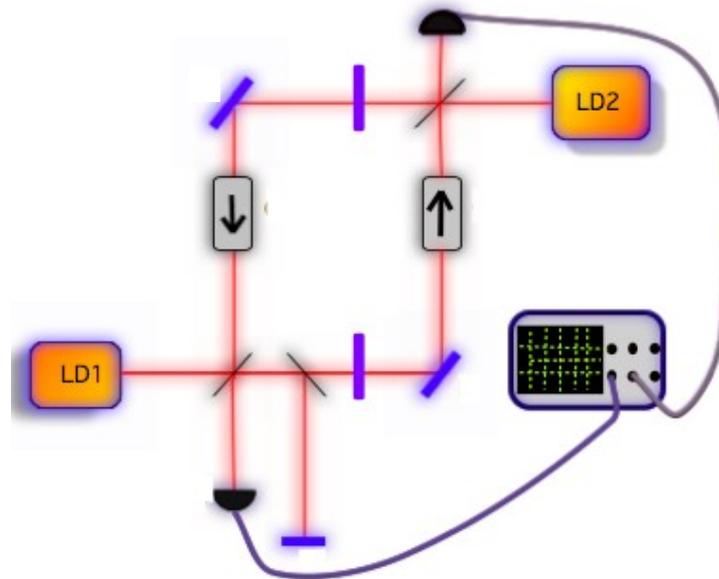


# Control del retraso de la sincronización en los láseres de semiconductor

*C. M. González*

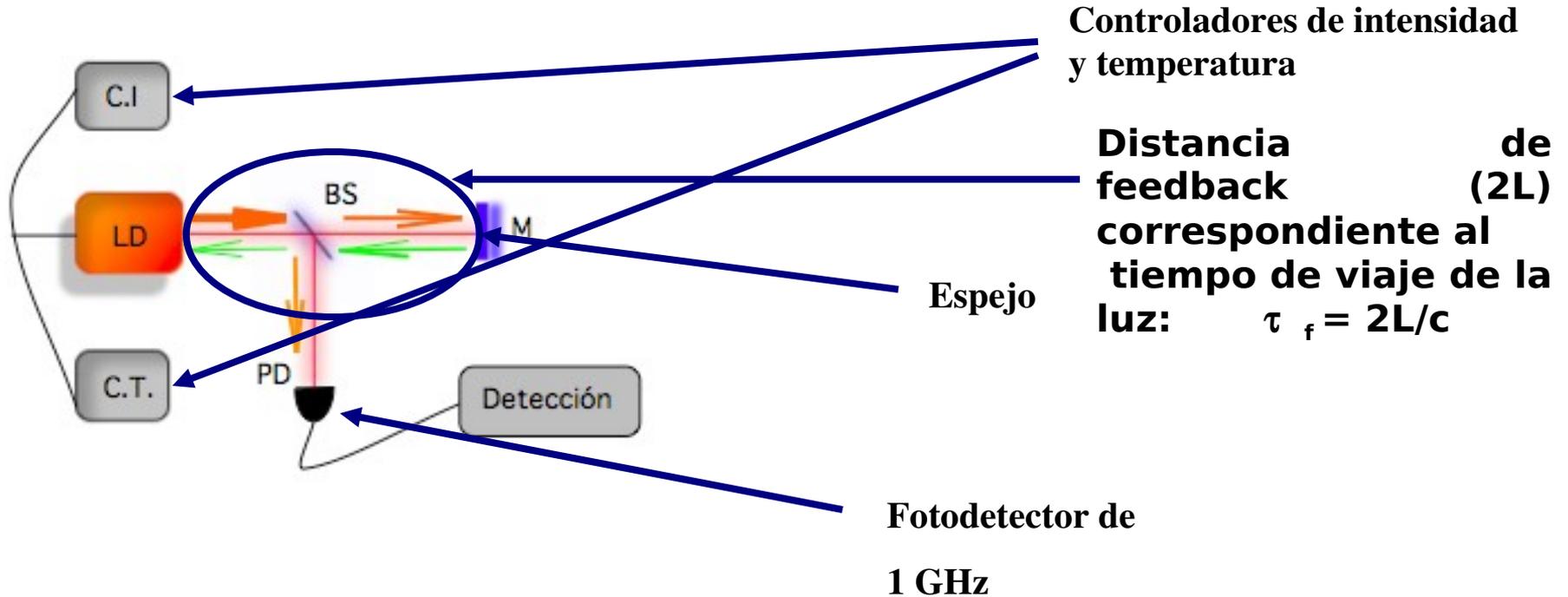
*M. C. Torrent*

*J. García-Ojalvo*

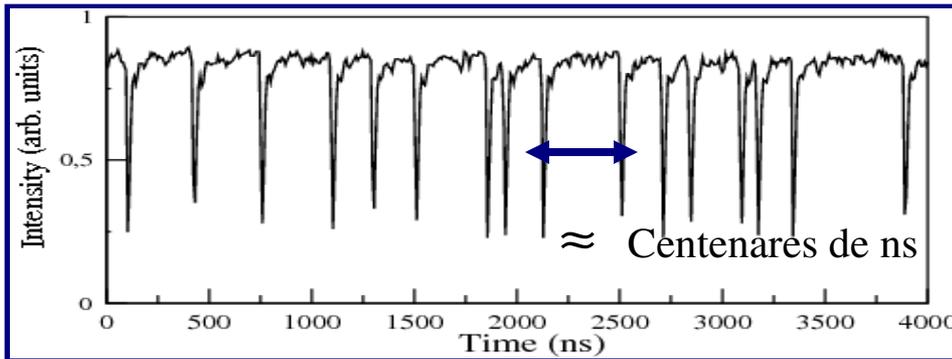


- Introducción:
  - Inducción de caos en láseres de semiconductor: realimentación óptica.
  - Acoplamiento: unidireccional y bidireccional.
  
- Transición experimental de unidireccional a bidireccional.
  
- Introducción de mensaje en los dos tipos de acoplamiento.
  
- Conclusiones.

## Realimentación óptica



Cuando el láser con feedback óptico se bombea cerca del umbral del láser solitario, muestra caídas de intensidad a tiempos irregulares.



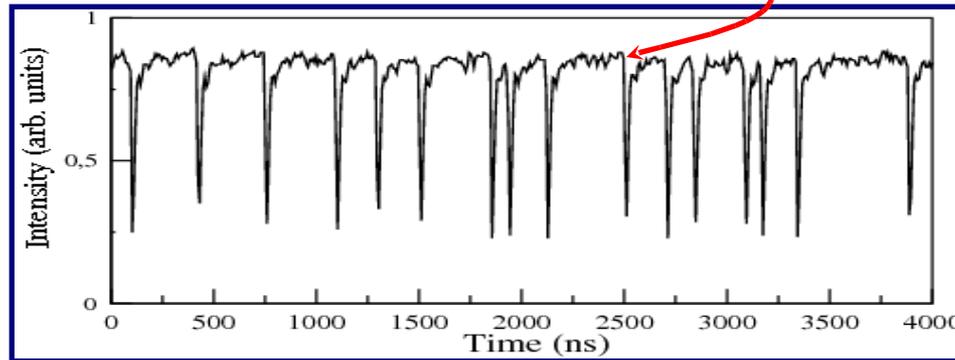
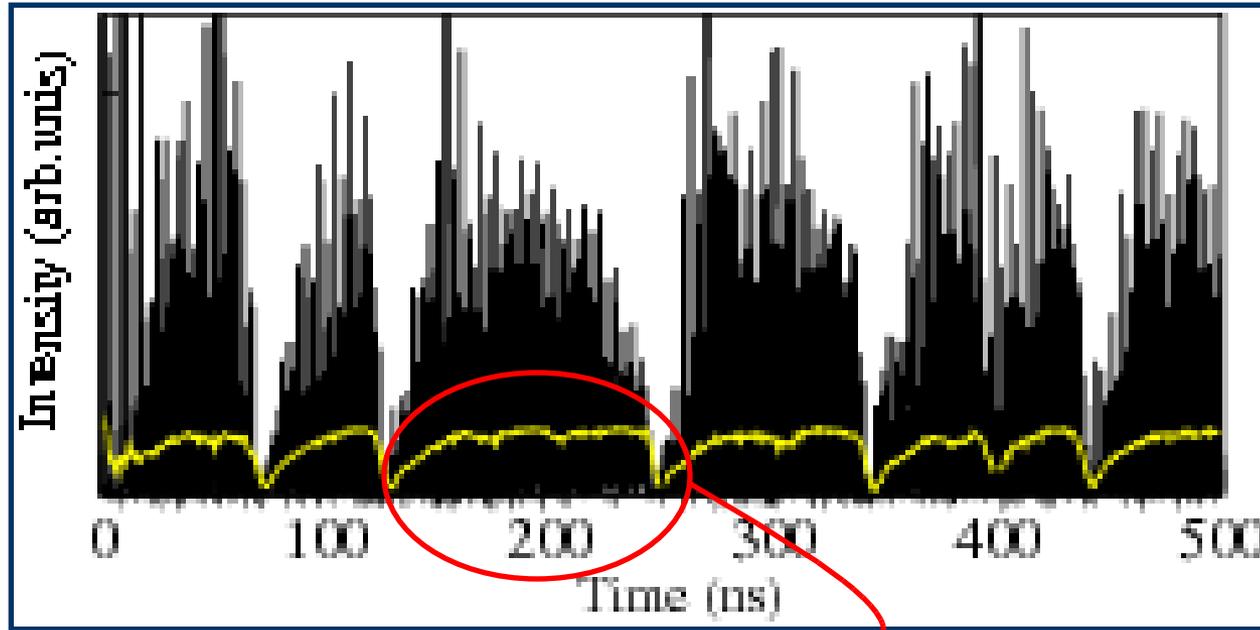
$\tau_f$  mayores que los tiempos característicos del sistema (oscilaciones de relajación) y niveles moderados de feedback.

Separación entre caídas mucho más larga que el período de las oscilaciones de relajación del láser y que el tiempo de feedback ( $\tau_f$ ).



**Low Frequency Fluctuations (LFF)**

# Introducción



Envolvente de la  
señal real (del  
orden de ps)

Modelo de Lang y Kobayashi bajo condiciones de feedback débil:

$$\frac{dE(t)}{dt} = \frac{1}{2} (1 + i\alpha) \Gamma(\tau) - \gamma E(\tau) + \sqrt{2\beta N} \xi(\tau) + \underline{\kappa_{\phi} \varepsilon^{i\omega_0 \tau_{\phi}} E(\tau - \tau_{\phi})}$$

$$\frac{\delta N(\tau)}{\delta \tau} = \frac{I}{\varepsilon} - \gamma_{\varepsilon} N - \Gamma(\tau) |E(\tau)|^2$$

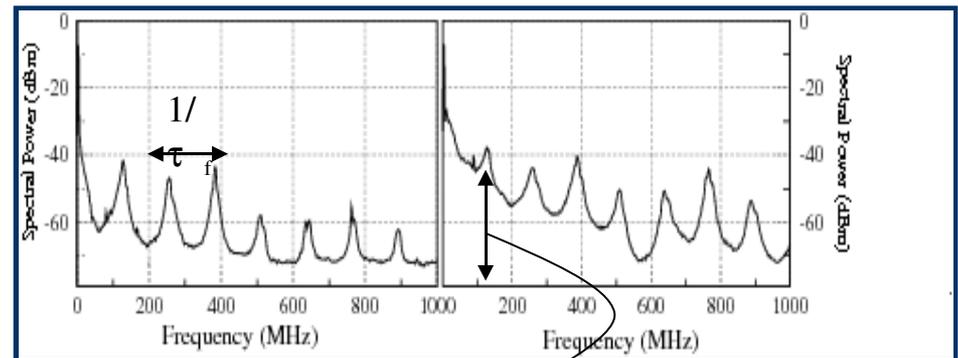
$$\Gamma(\tau) = \frac{\gamma(N - N_{\tau})}{1 + \sigma |E|^2}$$

R. Lang and K. Kobayashi, IEEE JQE **16**, 347 (1980)

## Soluciones:

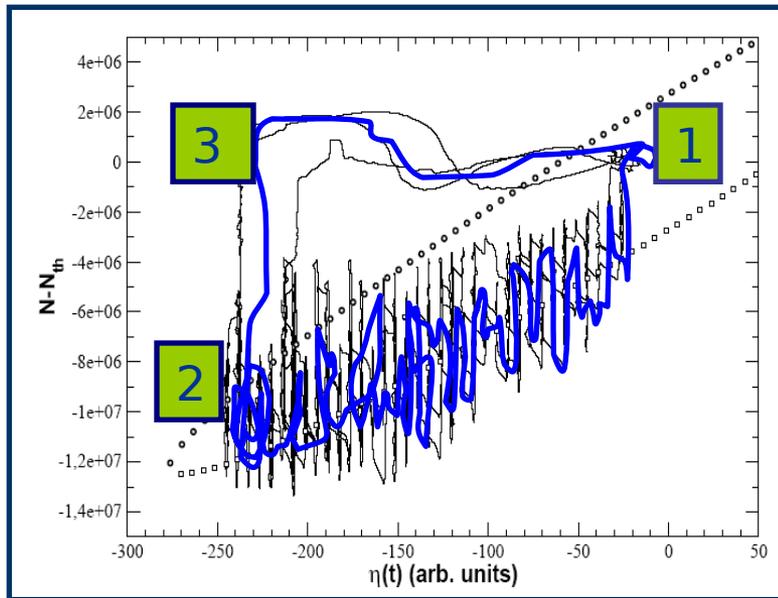
modos de la cavidad externa (picos separados  $1/\tau_f$ ).

G.H.M van Tartwijk et al., IEEE JSTQE **1**, 446 (1995)



Estado LFF, el espectro sube para bajas frecuencias

Cada caída se inicia con la colisión de la trayectoria del láser en el espacio de fases con un antimodo (crisis). [T. Sano, Phys. Rev. A 50, 2719 (1994)]



La inyección causa la disminución de la inversión de población.



El láser se sitúa en el modo de máxima ganancia (2).



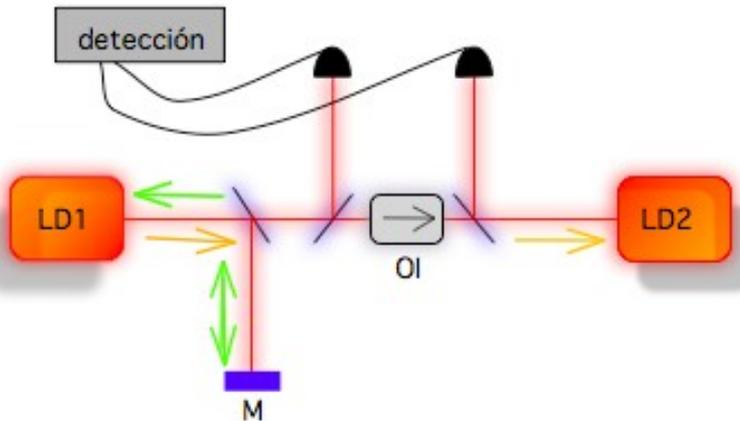
La proximidad entre modos y antimodos aumenta y se produce la colisión.



El láser se apaga y la inversión de población crece hasta el umbral del láser solitario (3 a 1) .

El esquema se repite cada dropout

## Acoplamiento unidireccional.



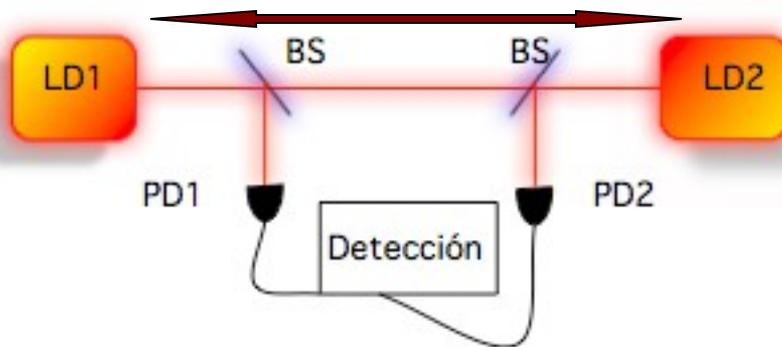
Caos inducido por el feedback en el LD1 y transmitido hacia LD2. LD2 sincroniza su intensidad de salida a LD1 después de un tiempo  $\tau_c$  (lag synchronization).

Dos tiempos característicos el tiempo de feedback:  $\tau_f$  y el tiempo de acoplamiento  $\tau_c$ .

C. Masoller, PRL **86**, 2782 (2001)

A. Locquet et. al, PRE **65**, 056205 (2002)

## Acoplamiento bidireccional.

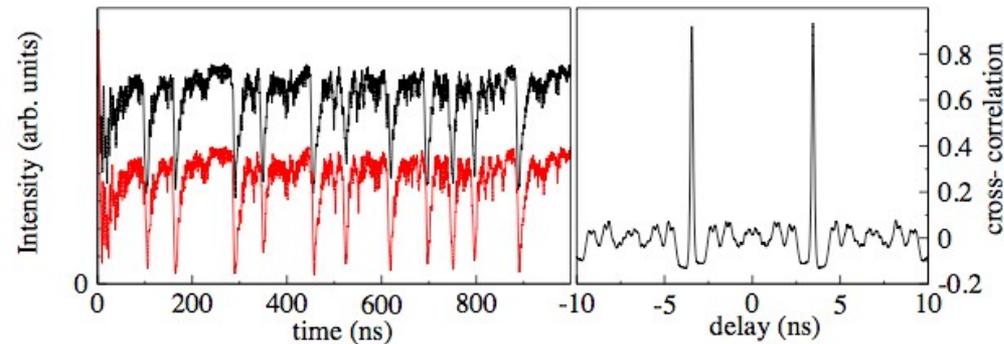
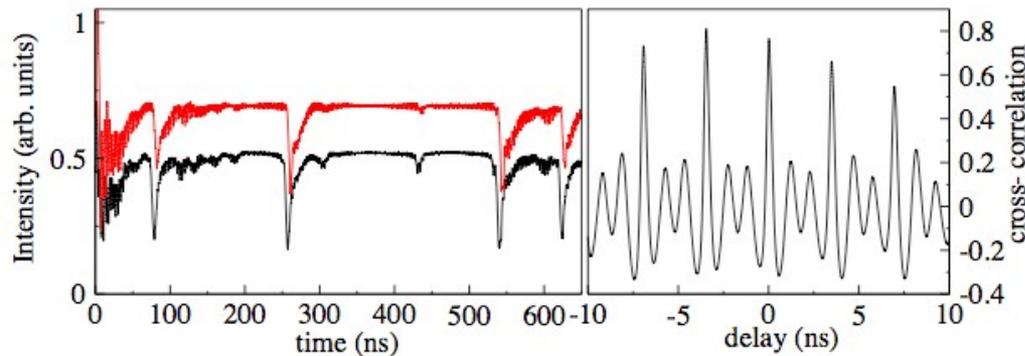


Generalización del láser con feedback, reemplazando el espejo por otro láser. Tiempo de retraso entre señales sincronizadas:  $\tau_c$ .

T. Heil et al., PRL **86**, 795 (2001)

J. Mulet et al., Proc. SPIE **4283**, 293 (2001)

## Correlación cruzada



$$C(\Delta\tau) = \frac{\langle (\Pi_1(\tau) - \langle \Pi_1 \rangle) (\Pi_2(\tau + \Delta\tau) - \langle \Pi_2 \rangle) \rangle}{\sqrt{\langle (\Pi_1(\tau) - \langle \Pi_1 \rangle)^2 \rangle \langle (\Pi_2(\tau) - \langle \Pi_2 \rangle)^2 \rangle}}$$

**Unidireccional:** sincronización con retraso igual al tiempo de acoplamiento. Existe un líder y un rezagado en la dinámica del sistema.

**Bidireccional:** sincronización con alternancia entre los láseres en el liderazgo de la dinámica. Si añadimos desintonía entre los láseres determinamos un líder en la dinámica .

J. Mulet et al., PRA **65**, 063815 (2002)

A.Hohl et al., PRL **78**, 4745 (1997)

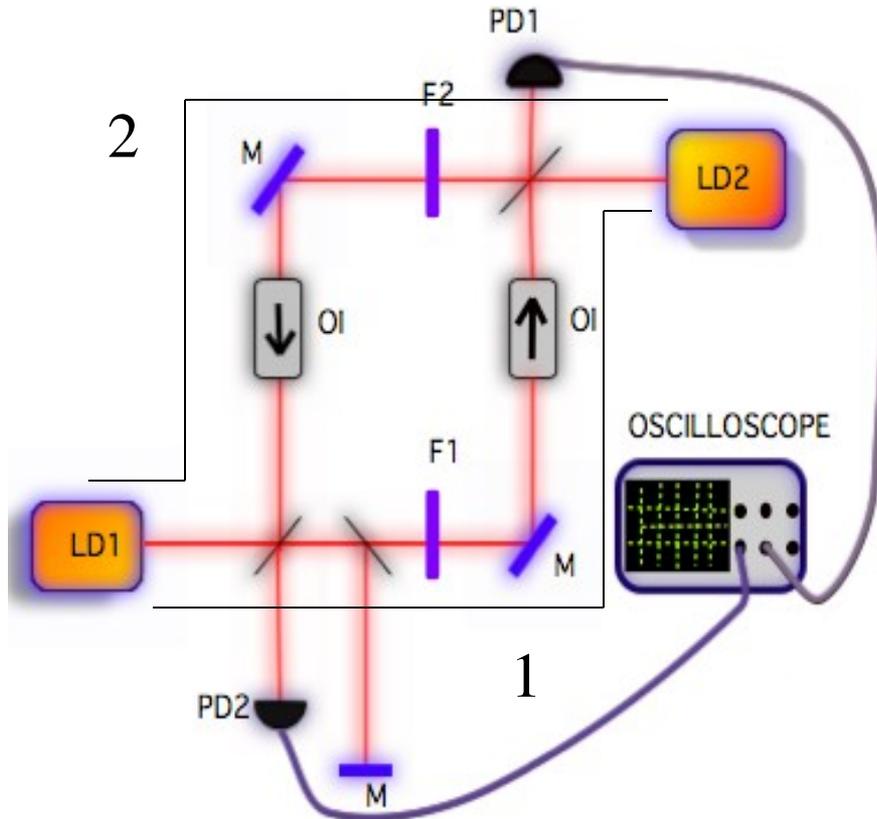
T. Heil et al. PRL **86**, 795 (2001)

Modelo basado en las ecuaciones de Lang y Kobayashi,

$$\frac{dE_j(t)}{dt} = \frac{1}{2} (1 + i\alpha_\varphi) \Gamma_\varphi(\tau) - \gamma_\varphi E_\varphi(\tau) + \sqrt{2\beta N_\varphi} \xi_\varphi(\tau) \\ + \kappa_{3-\varphi} \varepsilon^{i(\Delta\omega\tau - \omega_{3-\varphi}\tau_{\chi^{3-\varphi}})} E_{3-\varphi}(\tau - \tau_{\chi^{3-\varphi}}) + \delta_{\phi_1} \kappa_{\phi_1} \varepsilon^{-i\omega_1\tau_{\phi_1}} E_1(\tau - \tau_{\phi_1})$$

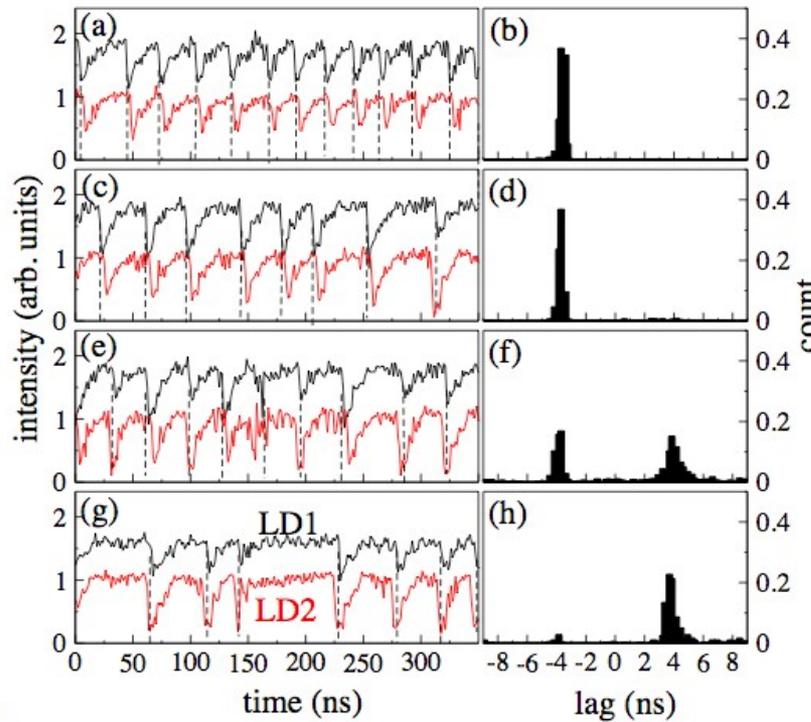
$$\frac{\delta N_\varphi(\tau)}{\delta\tau} = \frac{I_\varphi}{\varepsilon} - \gamma_{\varepsilon\varphi} N_\varphi - \Gamma_\varphi(\tau) |E_\varphi(\tau)|^2$$

$$\Gamma_\varphi(\tau) = \frac{\gamma_\varphi (N_\varphi - N_{\tau\varphi})}{1 + \sigma_\varphi |E_\varphi|^2}$$



Los láseres mutuamente acoplados, uno con feedback.

A través de aislantes ópticos separamos los dos caminos de acoplamiento para poder controlar por separado las cantidades de luz inyectadas con ayuda de filtros.

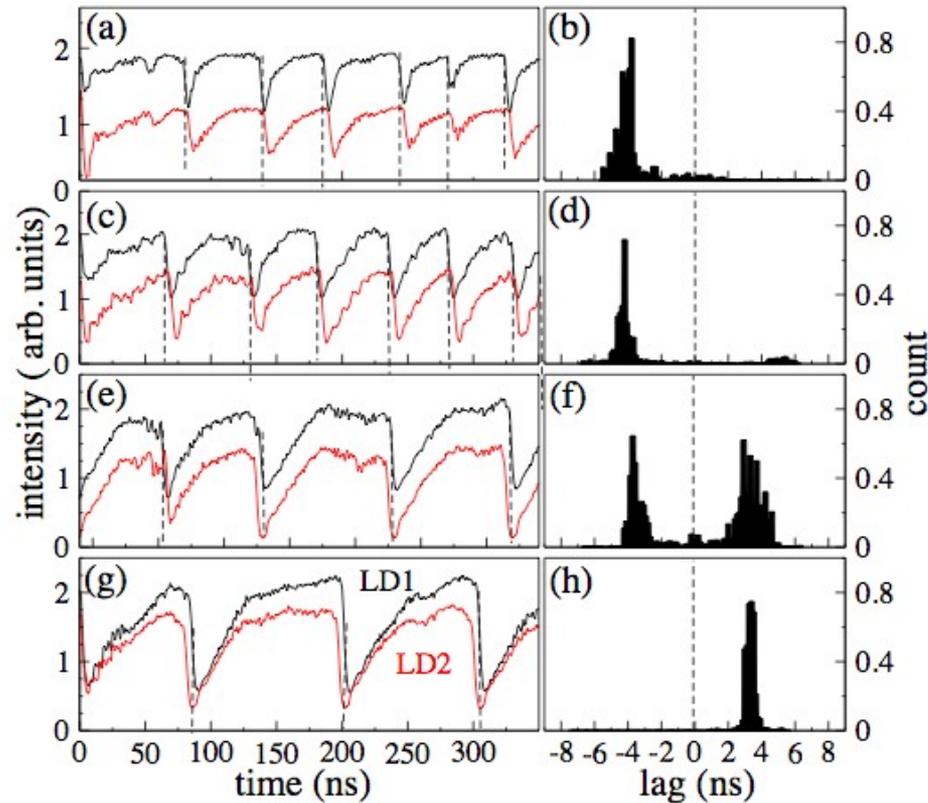


**Aumenta  $\kappa_c$**

Transición de acoplamiento unidireccional a bidireccional pasando por el estado de alternancia.

(a) 0% transmission, (c) 40%, (d) 63% y (g) 100%

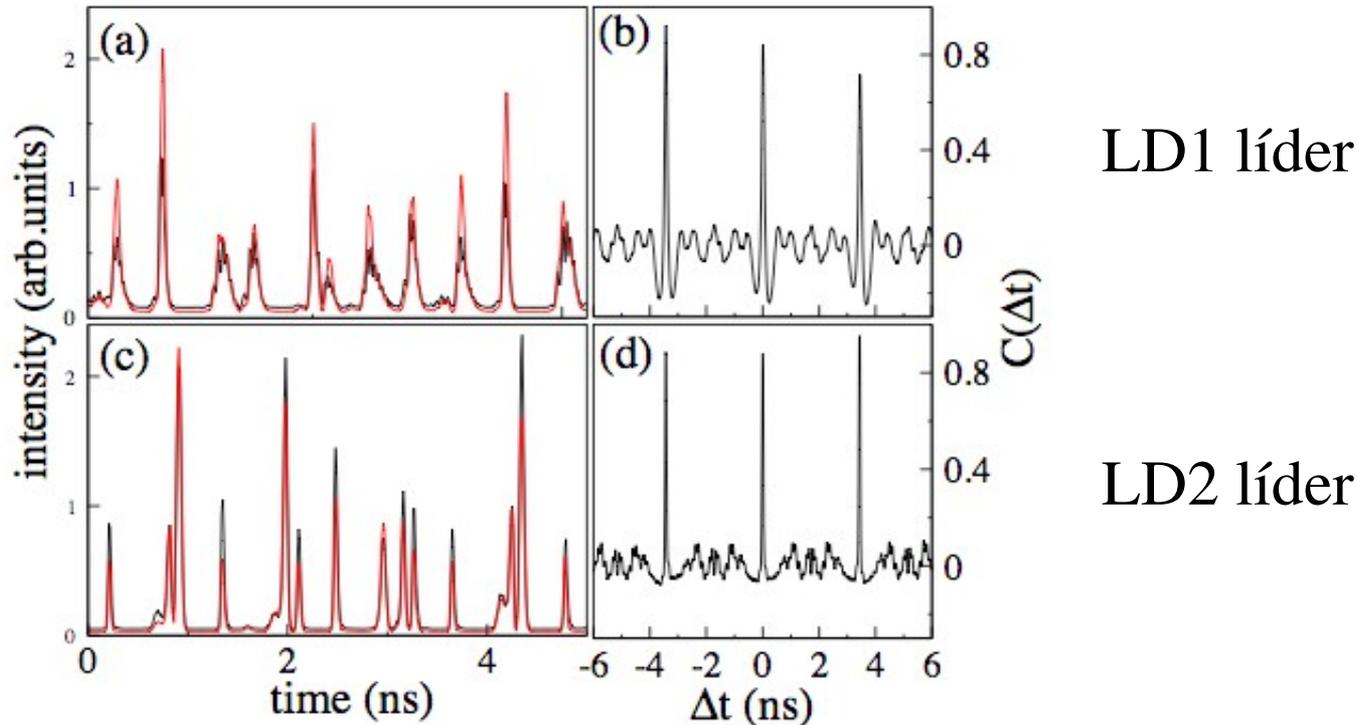
# Resultados numéricos



El liderazgo de la dinámica cambia cuando la diferencia entre acoplamientos cambia de signo.

Para  $k_1 = 80 \text{ ns}^{-1}$  y  $k_f = 30 \text{ ns}^{-1}$ : (a)  $k_2 = 0$ , (c)  $k_2 = 50 \text{ ns}^{-1}$ , (e)  $k_2 = 70 \text{ ns}^{-1}$ , (g)  $k_2 = 90 \text{ ns}^{-1}$ .

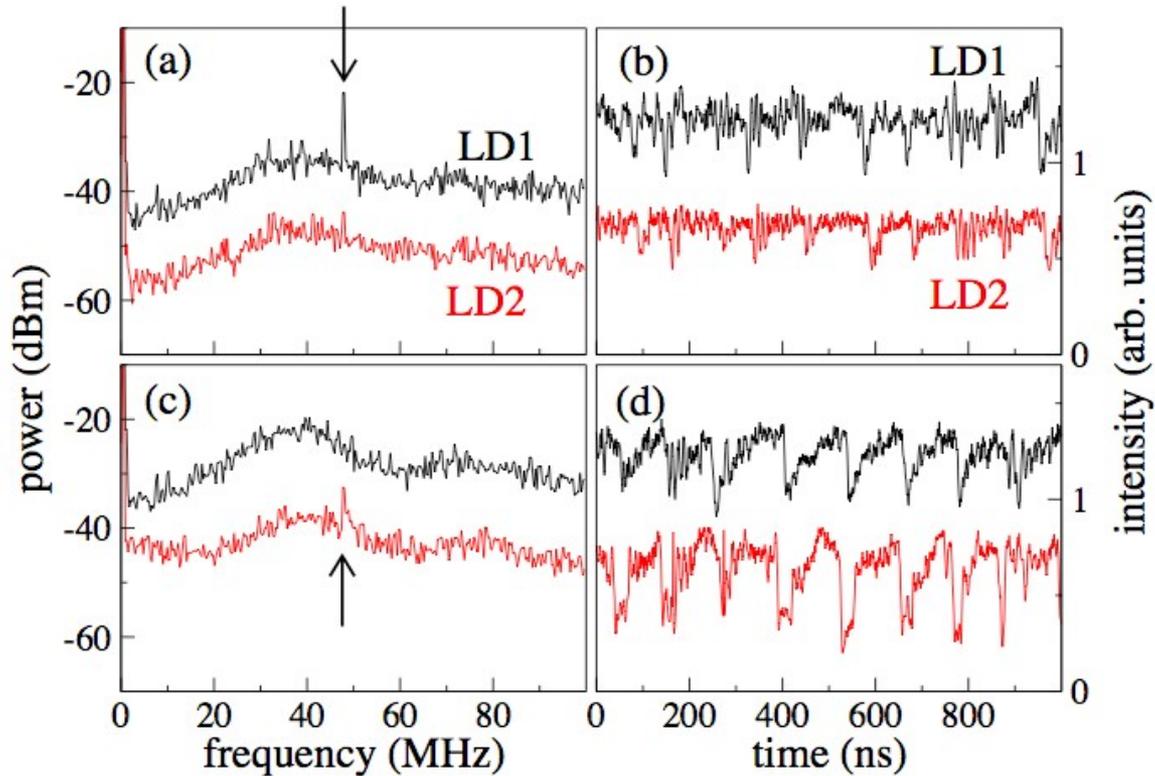
Correlaciones de la dinámica rápida.



Para  $k_1 = 80 \text{ ns}^{-1}$  y  $k_f = 30 \text{ ns}^{-1}$  (a)  $k_2 = 0$ , (c)  $k_2 = 90 \text{ ns}^{-1}$ .

# Resultados experimentales

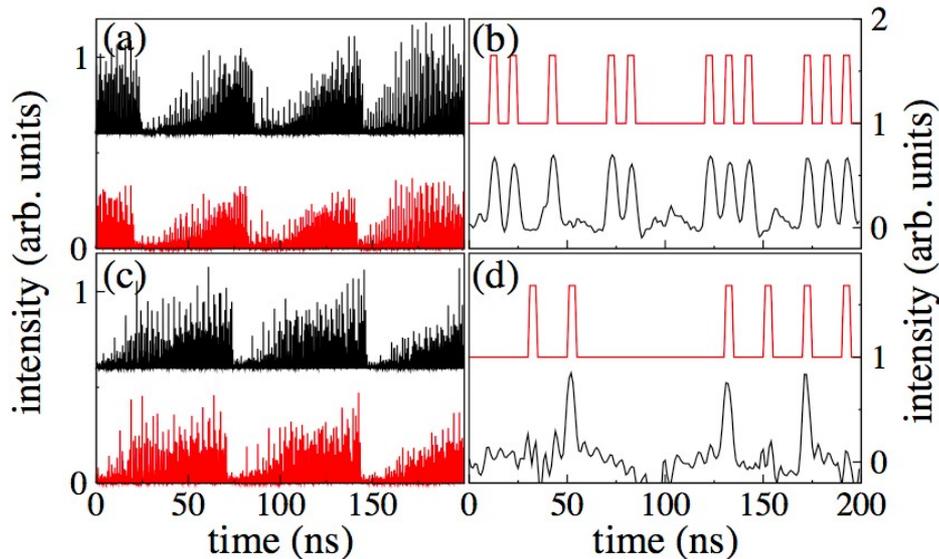
Introducción de mensaje: filtrado debido a la sincronización de la parte caótica de las señales [T. Heil et. Al. PRA **58**, R2672 (1998), I. Fischer et al., PRA **62**, 011801 (R)(2000)]



frecuencia= 46 MHz

Transmitivad  
F2= 63%

Introducimos un mensaje tipo bit en la corriente de bombeo del láser que es líder en cada caso y lo recuperamos en el receptor.



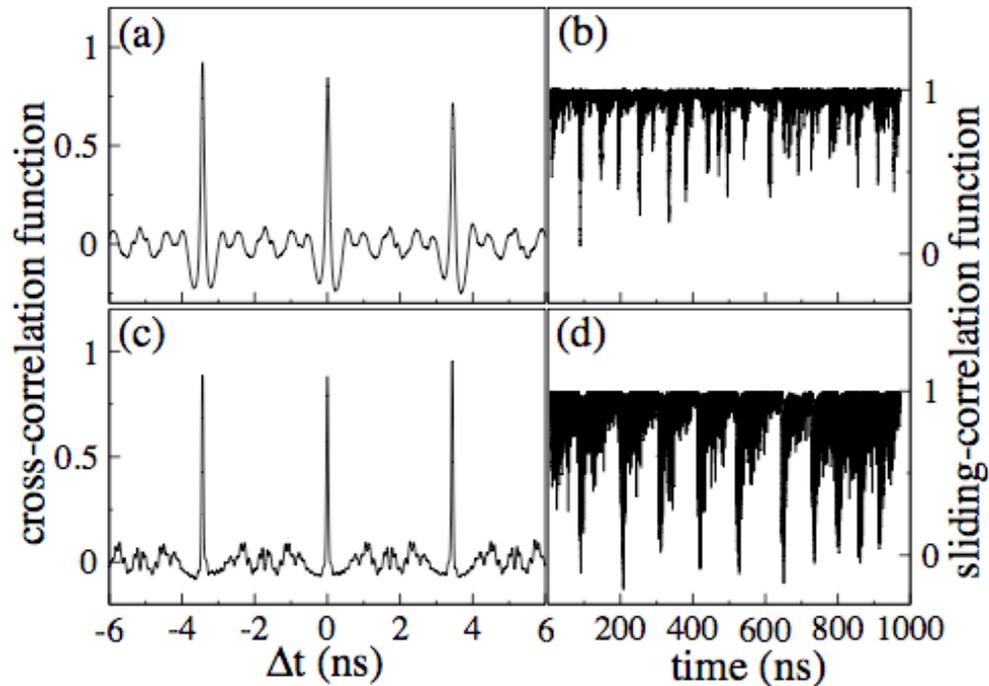
Líder LD1: recuperación correcta

Líder LD2: pérdida de información.

Intensidades de salida sin filtrar para ambos láseres y mensaje introducido y recuperado para  $k_1=80\text{ns}^{-1}$  y  $k_f=30\text{ns}^{-1}$  y (a)(b) LD1 líder,  $k_2=0$  y (c)(d) LD2 líder,  $k_2=90\text{ns}^{-1}$ .

# Resultados numéricos

**Slide correlation:** máximo de la correlación calculada para las series desplazadas  $\tau_c$ , trasladando una ventana temporal determinada [ J. M. Buldú et al. , PRL 96, 024102 (2006)]



Correlación cruzada y slide correlation para el caso (a)(b) LD1 líder, (c)(d) LD2 líder

- Cuando uno de los láseres tiene dinámica caótica autónoma, y esta dinámica se inyecta en otro láser solitario (estable en ausencia de inyección), el láser inyectado sigue la dinámica.
- La transferencia de ese comportamiento se puede conseguir cambiando el acoplamiento de unidireccional a bidireccional.
- La transición ocurre vía un régimen en el que los dos láseres alternan de manera aleatoria el liderazgo de la dinámica.
- El potencial de uso de este sistema para comunicaciones bidireccionales caóticas no es efectivo ya que se pierde sincronización durante la caída para el caso bidireccional.