



# Fenomenología de arreglos lineales de polaritones con acoplamiento optomecánico

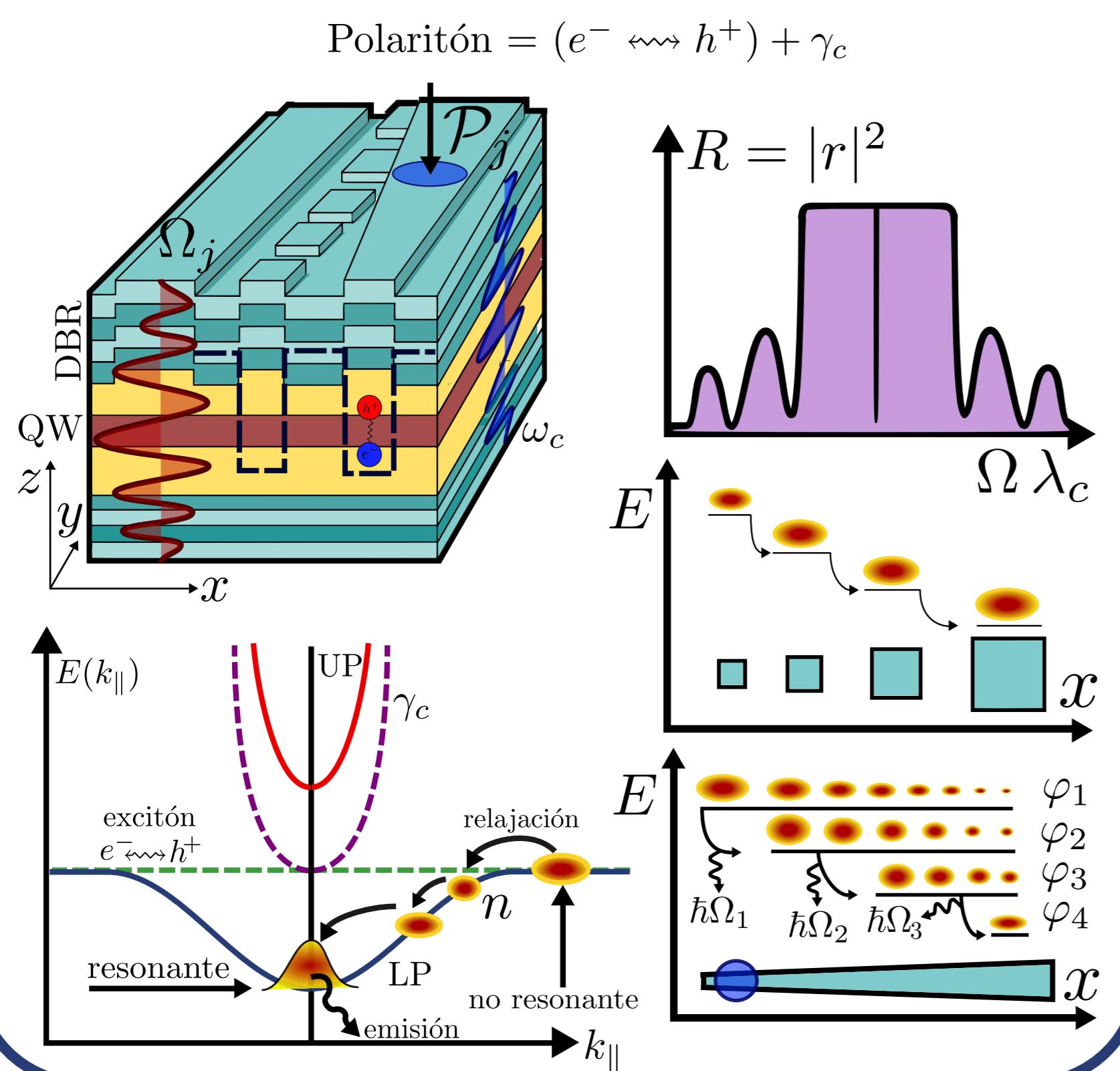
Arturo Ruiz<sup>1</sup>, Gonzalo Usaj<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Balseiro (IB), Centro Atómico Bariloche (C.A.B), Universidad Nacional de Cuyo (UNCuyo), Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) <sup>2</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

## Resumen

Se propone un modelo fenomenológico para la descripción de un sistema emisor coherente de fonones (SASER). La implementación se basa en trampas de polaritones con acoplamiento optomecánico generado por el confinamiento de modos fonónicos en el material. Se presentan resultados analíticos y numéricos que se contrastan con mediciones experimentales de la División de Óptica y Fotónica del C.A.B. Los resultados buscan identificar parámetros óptimos para la operación eficiente del *Quantum Cascade Phonon Laser* (QCPL), y favorecer la comprensión del sistema en términos de balance energético y fenómenos relevantes como la no reciprocidad entre sus componentes.

## Introducción



## Modelado del sistema

### Ecuaciones (gGPE+TB+SCA)

$$i\dot{\varphi}_j = (\omega_j + U|\varphi_j|^2 - i\frac{\gamma}{2})\varphi_j + g_j x_j \varphi_{j+1} + g_{j-1} x_{j-1} \varphi_{j-1} + \mathcal{P}_j$$

$$\ddot{x}_j = -\Omega_j^2 x_j - \Gamma_j x_j - 4g_j \Omega_j \operatorname{Re}(\varphi_j \varphi_{j+1}^*)$$

$$\dot{n}_j = P_j - n_j (\gamma_R + R|\varphi_j|^2), \text{ no resonante}$$

$$\mathcal{P}_j = \begin{cases} F_j e^{-i\omega_j t}, & \text{resonante} \\ i\frac{R_j n_j}{2} \varphi_j, & \text{no resonante} \end{cases}$$

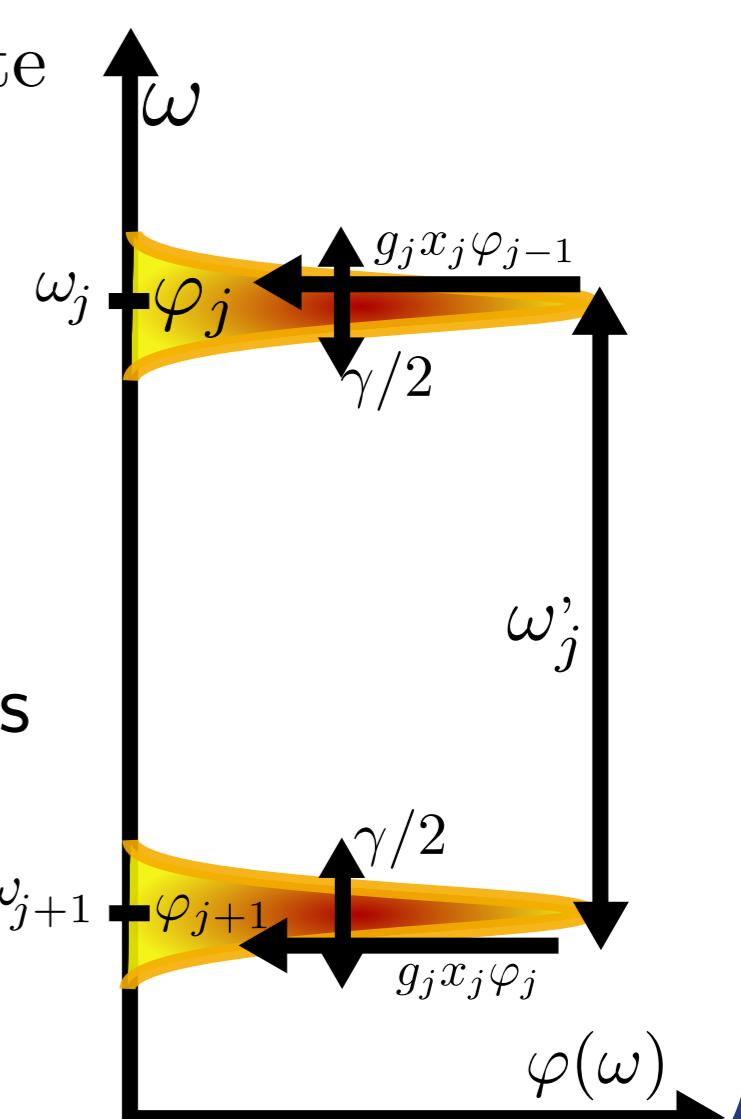
### Régimen de trabajo

$$\Gamma_j \ll \delta_j, \frac{\gamma}{2} \ll \Omega_j, \delta_j = \omega_j - \omega_{j+1} - \Omega_j$$

### Propuesta de solución y aproximaciones

$$\varphi_j(t) = \varphi_j^0 e^{i(-\omega_j + \theta_j)t}, x_j(t) = A_j e^{-i\omega_j t} + A_j^* e^{i\omega_j t}$$

$$\text{RWA} + \chi_{st} \approx \langle \chi \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T dt' \chi(t')$$



## Solución (parámetros homogéneos)

### Balance de potencias

$$\underbrace{\frac{|\varphi_{j-1}|^2}{1 + \lambda_{j-1}^2} + \mathcal{F}_j}_{\text{ganancia}} = 1 + \underbrace{\frac{|\varphi_{j+1}|^2}{1 + \lambda_j^2}}_{\text{pérdida}}$$

$$\lambda_j = \frac{\dot{\theta}_{j+1} - \dot{\theta}_j + \delta_j}{\Gamma/2}$$

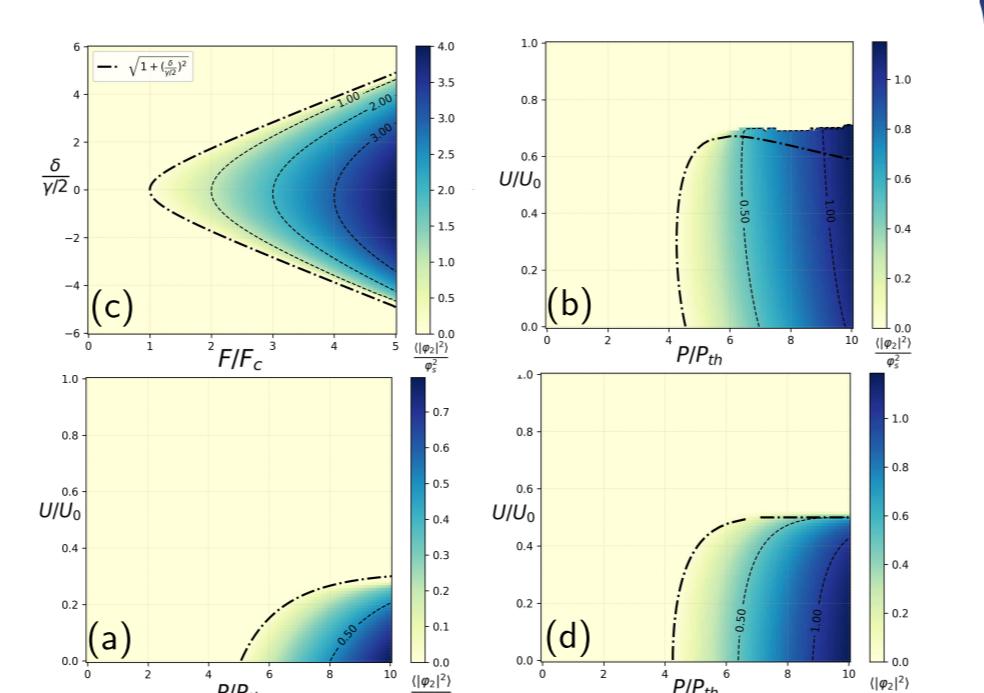
$$|A_j|^2 = \frac{|\varphi_j|^2 |\varphi_{j+1}|^2}{1 + \lambda_{j+1}^2}$$

### Interacciones efectivas

$$-\dot{\theta}_j = U|\varphi_j|^2 + \underbrace{\frac{\lambda_j}{1 + \lambda_j^2} |\varphi_{j+1}|^2}_{U_{j \leftrightarrow j+1}} + \underbrace{\frac{\lambda_{j-1}}{1 + \lambda_{j-1}^2} |\varphi_{j-1}|^2}_{U_{j \leftrightarrow j-1}} + \mathcal{D}_j$$

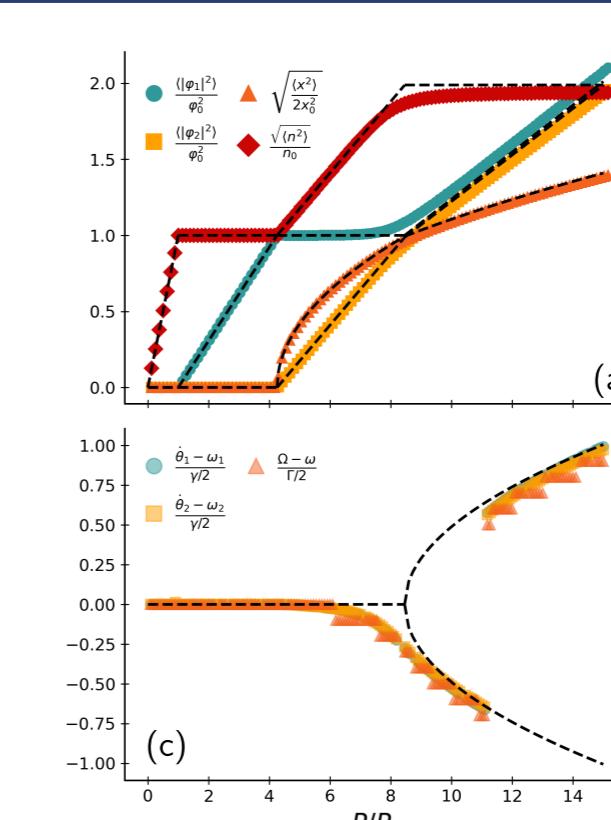
$$\mathcal{D}_j = \begin{cases} \operatorname{Re}\left(\frac{F_j}{\varphi_j^0}\right), & \text{resonante } (\dot{\theta}_j = 0), \mathcal{F}_j = \begin{cases} -\operatorname{Im}\left(\frac{F_j}{\varphi_j^0}\right), & \text{resonante,} \\ 0, & \text{no resonante} \end{cases} \\ 0, & \text{no resonante} \end{cases}$$

## Parámetros óptimos



Amplitud de  $\varphi$  en un sistema de dos sitios resonante (a), y no resonante (b,c,d). Se puede concluir que el scattering estimulado a sitios vecinos sucede a un detuning igual a la frecuencia del fonón. Por otro lado se observa que en dicho sistema, si las interacciones efectivas son muy grandes  $\varphi_1$  sufre un blueshift tan intenso que no llega a alimentar a  $\varphi_2$ . Este efecto puede suprimirse reduciendo la brecha energética inicial entre sitios.

## Dinámica de fase y phase locking



En algunas configuraciones, se pueden encontrar potencias en las cuales el sistema desarrolla una dinámica de fase dependiente en potencia distinta debido a las interacciones efectivas. En general,  $\dot{\theta}_j - \dot{\theta}_{j+1} = \omega = \Omega_j + \mathcal{O}(\Gamma)$  debido a la atenuación en las amplitudes del factor  $\frac{1}{1+\lambda_j^2}$ . Por tanto, las fases  $\theta_j$  y  $\theta_{j+1}$  están sincronizadas. Figura (b) obtenida de [1].

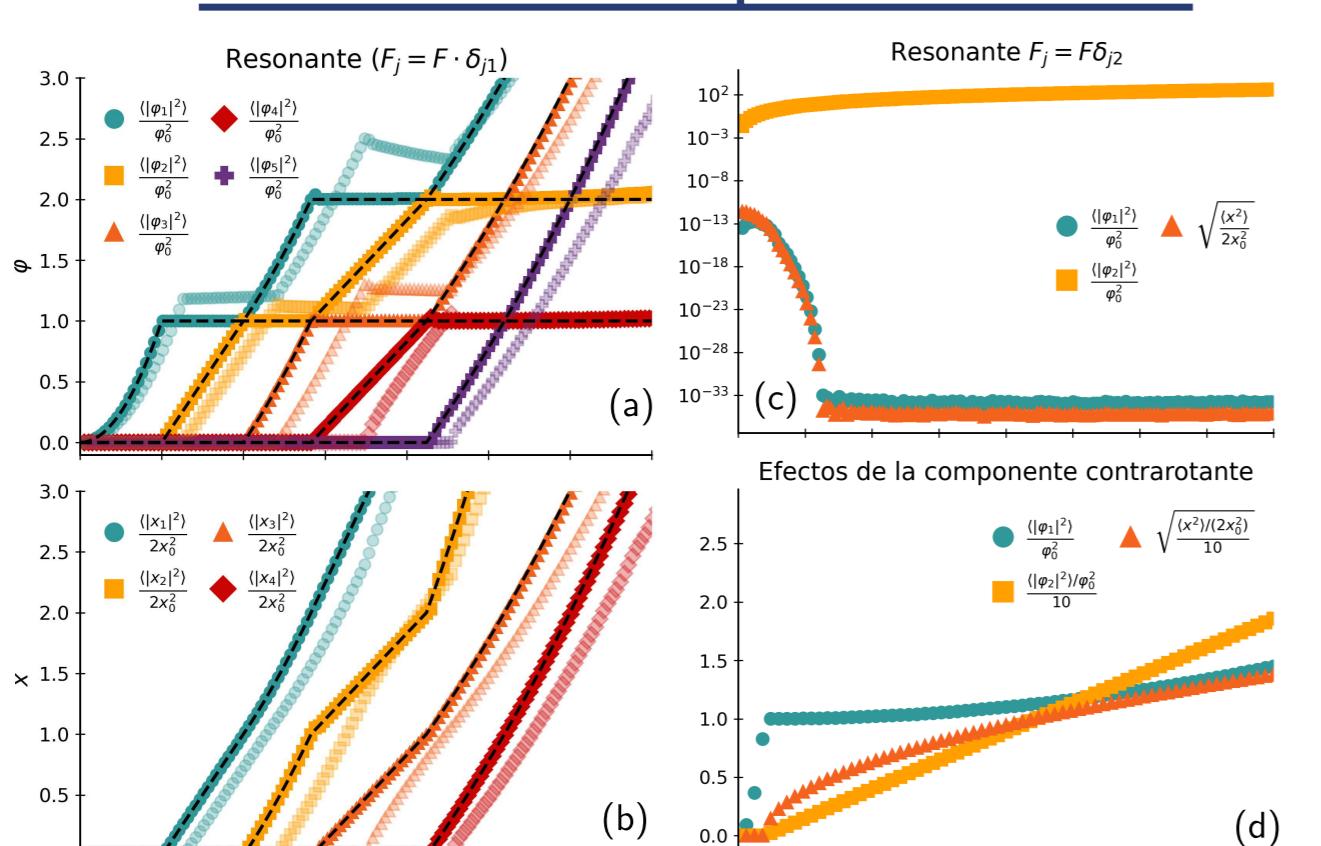
[1] J. Papuccio-Fernández, A. A. Reynoso, A. E. Bruchhausen, A. S. Kuznetsov, K. Biermann, P. V. Santos, G. Usaj, and A. Fainstein. Polariton cascade phonon laser, 2025. URL <https://arxiv.org/abs/2505.17336>.

## Conclusiones y próximos pasos

Se propuso un modelo para un conjunto de modos polaritonicos con acoplamiento optomecánico de primer orden. Se encontró una solución en RWA de la dinámica estacionaria de dicho sistema. Dicha solución codifica un equilibrio debido a un balance de ganancias y pérdidas en un modo polaritonico e interacciones efectivas entre dos distintos. Se realizaron simulaciones numéricas del modelo que verifican la solución encontrada, permiten encontrar parámetros óptimos y que además se condicen con datos experimentales. Se dejan las siguientes incógnitas

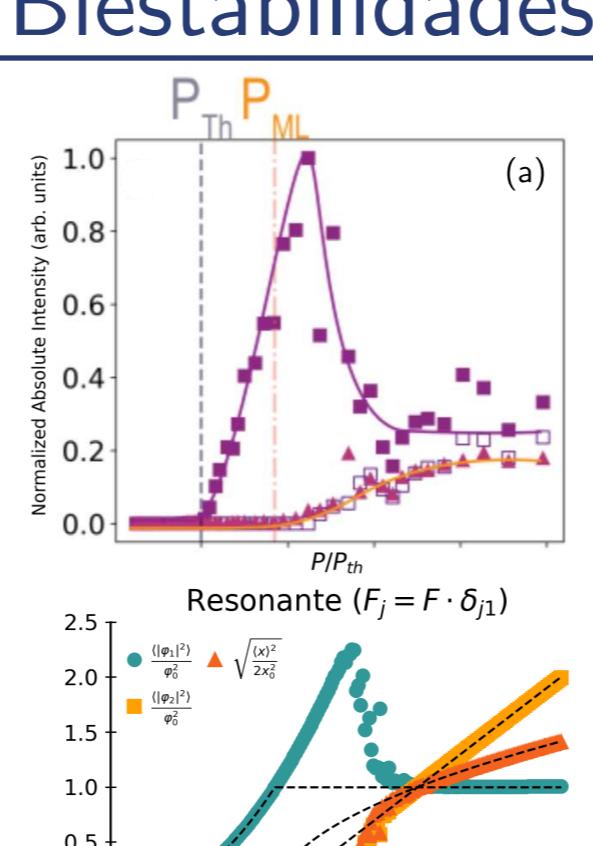
- Análisis de estabilidad
- Componentes contrarotantes
- Generalizaciones del modelo ( $J_{ij} \neq 0$ , acoplamientos múltiples)
- Aplicación a drivings más complejos

## Dinámica de poblaciones



- Estructura de cascada ( $\varphi_0^0 = 0 \implies \varphi_k^0 = 0, k > j$ )
- Driving crítico ( $\varphi_0^0 \neq 0 \implies |F| > F_c^j$ )
- Unicidad del régimen estable
- Flujo de potencia unidireccional
- Componentes contrarotantes  $\implies \varphi_j(t) = e^{-i\theta_j t} (\varphi_0^0 + \varphi_j^1 e^{\pm 2\omega_j t})$

## Biestabilidades



- $|F| > F_c^{j-1} \implies \vec{\varphi} = \vec{\varphi}(j)$  es solución
  - $\vec{\varphi}(k < j)$  siguen siendo soluciones válidas
  - Overshoot
- Figura (a) extraída de [1]

## Agradecimientos

Agradecemos a Alejandro Fainstein por acercarnos más hacia los experimentos y brindar explicaciones valiosas. Se agradecen los recursos computacionales que fueron proveidos por el cluster HPC del departamento de física del Centro Atómico Bariloche (CNEA).

