





Absorción perfecta de sonido baja frecuencia por paneles acústicos ultrafinos basados en metamateriales

Noé Jiménez[1,*], W. Huang[1], V. Pagneaux[1], V. Romero-García[1], J-P. Groby[1]

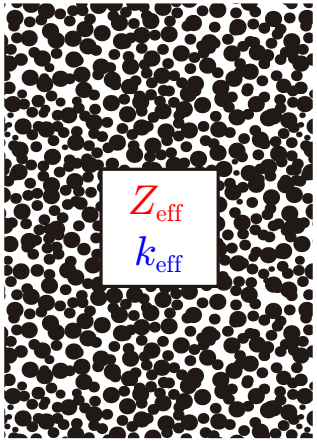
[1] Laboratoire d'Acoustique de la Université du Maine, UMR CNRS-6613 (France)
[*] *Now at*: Instituto de Instrumentación para Imagen Molecular (i3M), CSIC - UPV (Spain)

Tecniacústica 2017, October 5, 2017, La Coruña (SPAIN)

Introducción

Absorción perfecta

- Material acústico con:
  Impedancia característica Z_{eff} y número de onda k_{eff}

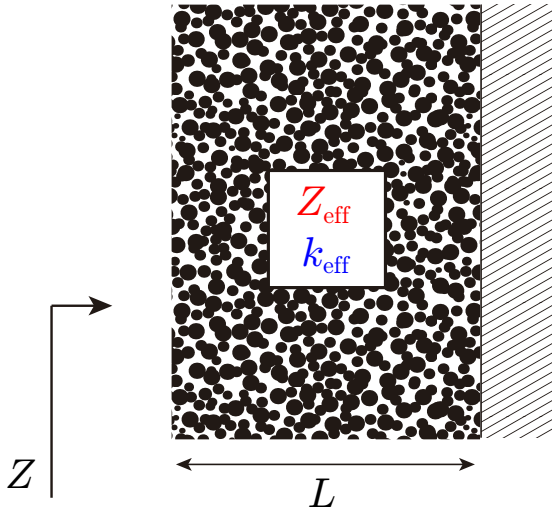


Introducción

Absorción perfecta

- Material acústico con:
  Impedancia característica Z_{eff} y número de onda k_{eff}
- Imedancia acústica de la lámina *(rigid-backed)*:

$$Z(\omega) = -iZ_{\text{eff}} \cot k_{\text{eff}} L$$



Introducción

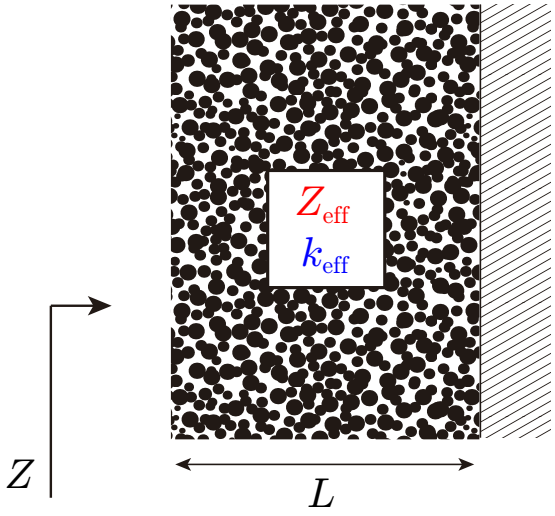
Absorción perfecta

- Material acústico con:
  Impedancia característica Z_{eff} y número de onda k_{eff}
- Imedancia acústica de la lámina *(rigid-backed)*:

$$Z(\omega) = -iZ_{\text{eff}} \cot k_{\text{eff}} L$$

- Reflexión:

$$R = \frac{Z(\omega)/Z_0 - 1}{Z(\omega)/Z_0 + 1}, \quad \alpha = 1 - |R^2|$$



- Absorción perfecta:

$$\alpha = 1 \quad \rightarrow \quad \begin{cases} \text{Re}(Z) = Z_0 \\ \text{Im}(Z) = 0 \end{cases}$$

  - Problema CC rígida: **Condiciones de adaptación de impedancia**

Introducción

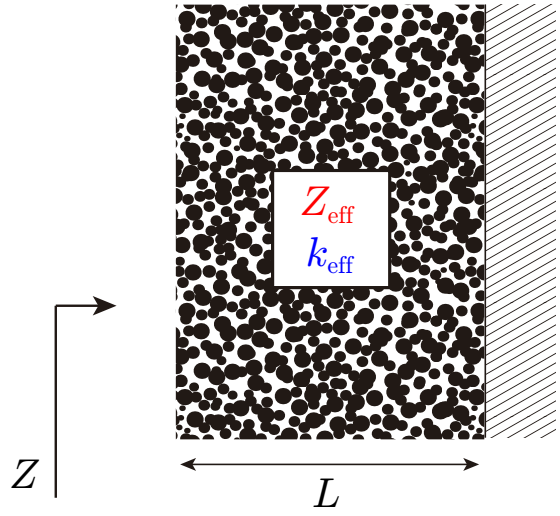
Absorción perfecta

- Material acústico con:
  Impedancia característica Z_{eff} y número de onda k_{eff}
- Imedancia acústica de la lámina *(rigid-backed)*:

$$Z(\omega) = -iZ_{\text{eff}} \cot k_{\text{eff}} L$$

- Reflexión:

$$R = \frac{Z(\omega)/Z_0 - 1}{Z(\omega)/Z_0 + 1}, \quad \alpha = 1 - |R^2|$$



- Absorción perfecta:

$$\alpha = 1 \quad \rightarrow \quad \begin{cases} \text{Re}(Z) = Z_0 \\ \text{Im}(Z) = 0 \end{cases}$$

  - Problema CC rígida: **Condiciones de adaptación de impedancia**

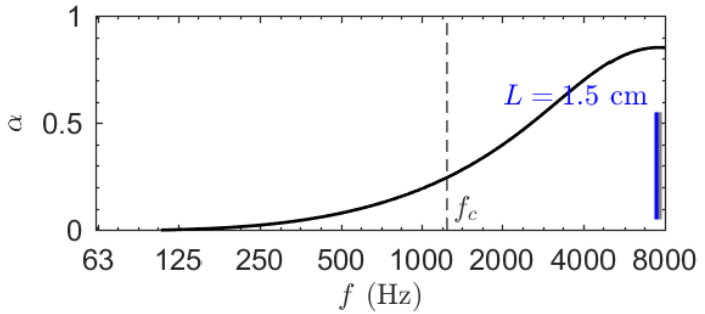
- **¿Cual es el absorbente perfecto más fino que podemos construir?**
  - $\text{Re}\, Z(\omega)$ en general es diferente de Z_{air}
  - $Z(\omega)$ en general es compleja ▶ $\text{Im}(Z) = 0$ en la resonancia $L = \lambda_{\text{eff}}/4$

Introducción

Ejemplo: **Absorción perfecta** en una lámina de poroso

Para bajar la frecuencia de resonancia ($\lambda/4$):

1. **Cambiar el grosor**
   - ¿Es perfecta la absorción?

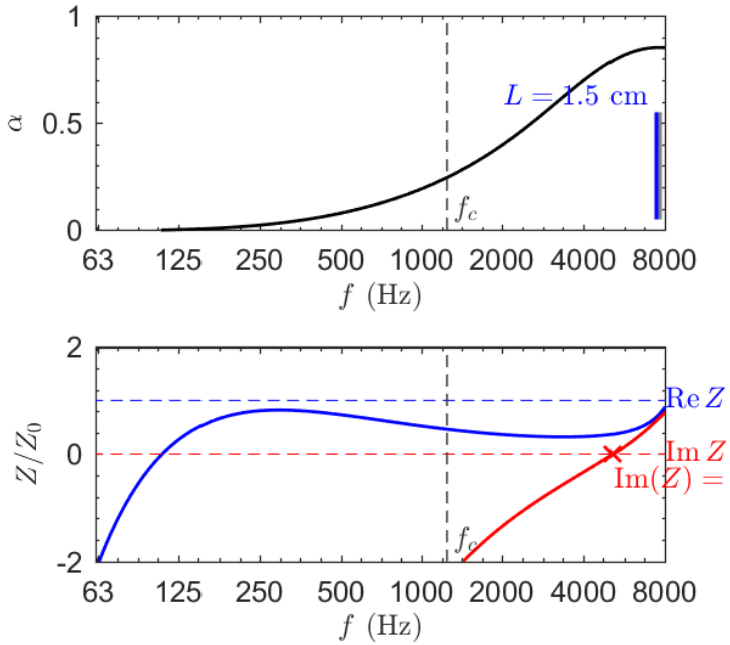


Introducción

Ejemplo: **Absorción perfecta** en una lámina de poroso

Para bajar la frecuencia de resonancia ($\lambda/4$):

1. **Cambiar el grosor**
   - ¿Es perfecta la absorción?
2. **Mirar las condiciones de adaptación de impedancia**
   - Adaptación de impedancia : freq. Biot,
   - Paneles gruesos : régimen viscoso



Introducción

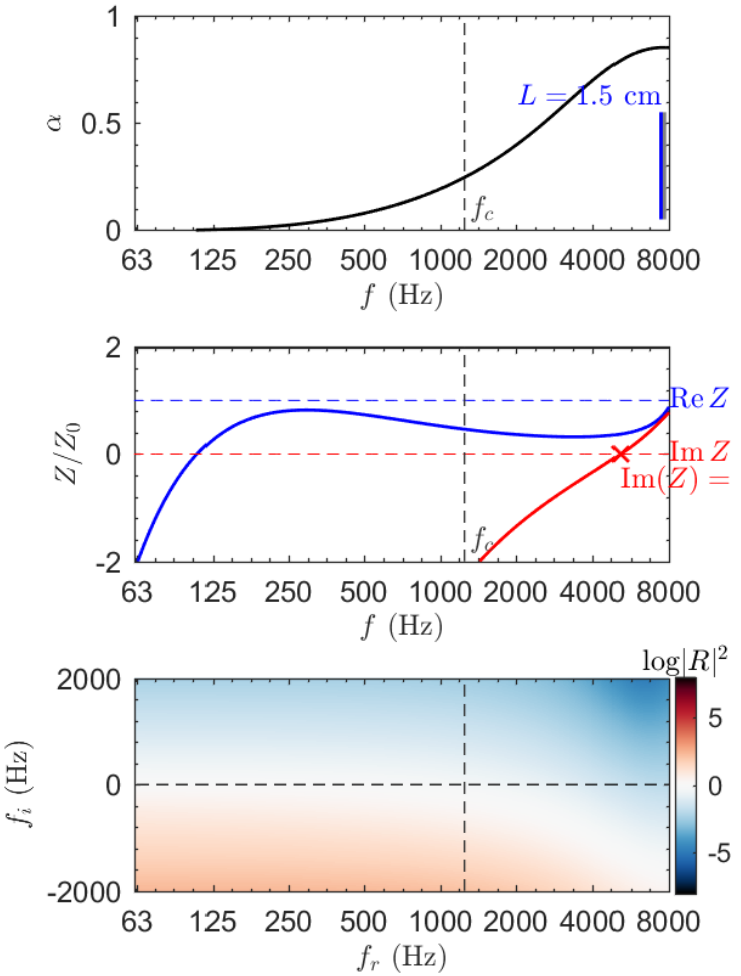
Ejemplo: **Absorción perfecta** en una lámina de poroso

Para bajar la frecuencia de resonancia ($\lambda/4$):

1. **Cambiar el grosor**
   - ¿Es perfecta la absorción?
2. **Mirar las condiciones de adaptación de impedancia**
   - Adaptación de impedancia : freq. Biot,
   - Paneles gruesos : régimen viscoso
3. **Matriz de scattering:**

$$\boldsymbol{S} = \begin{bmatrix} T & R^{+} \\ R^{-} & T \end{bmatrix} \rightarrow \lambda_{1,2} = |R|$$

   - No hay scattering cuando $\lambda_{1,2} = 0$
   - Condición de acoplo crítico
   - Valores propios en el plano complejo...



Introducción

Absorbentes perfectos más pequeños que la longitud de onda

1. **Absorción perfecta**:
   - El sistema debe ser acoplado críticamente con en medio exterior
   - Caso general: $\lambda_{1,2} = 0$
   - Las perdidas intrínsecas compensan la radiación de energía a la resonancia
   - Necesitamos libertad para ajustar el sistema

Introducción

Absorbentes perfectos más pequeños que la longitud de onda

1. **Absorción perfecta**:
   - El sistema debe ser acoplado críticamente con en medio exterior
   - Caso general: $\lambda_{1,2} = 0$
   - Las perdidas intrínsecas compensan la radiación de energía a la resonancia
   - Necesitamos libertad para ajustar el sistema

2. **Resonancia sub-longitud de onda**:
   - Empleo de resonadores Helmholtz, resonadores $\lambda/4$ enroscados, membranas y placas, burbujas ...
   - Diseño de resonadores más pequeños que la longitud de onda empleando metamateriales y propagación lenta

Índice

1 Métodos

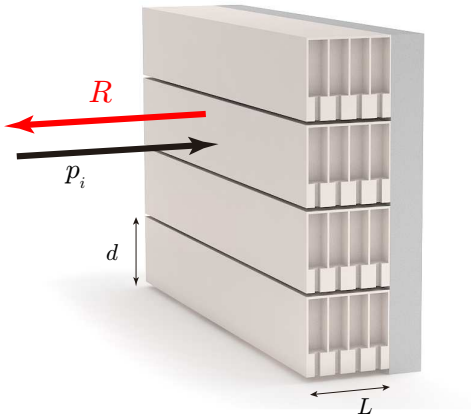
2 Problema en reflexión

3 Problema en transmisión

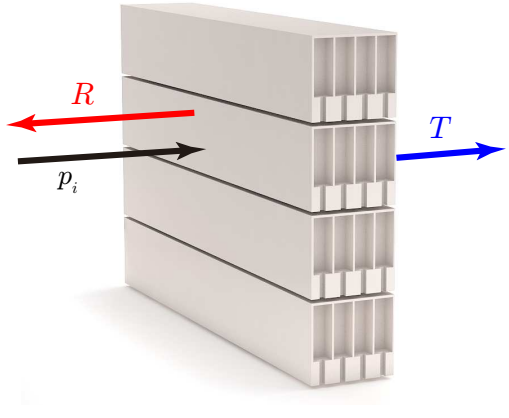
Geomería del metamaterial

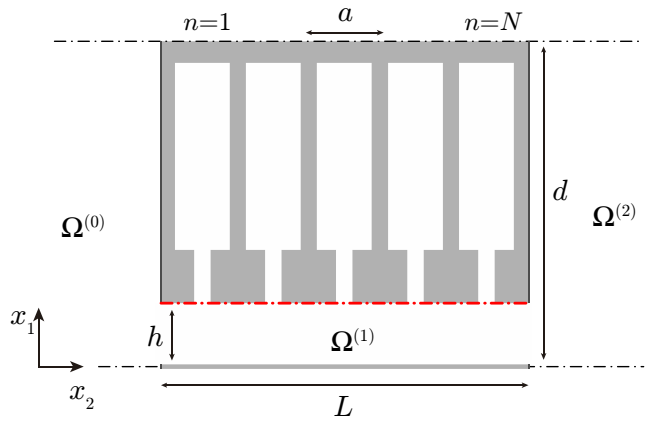
- Panel rígido ranurado
- Cargamos resonadores de Helmholtz sobre cada ranura [1]
- Las perdidas termoviscosas se pueden ajustar jugando con la geometría [2]

Problema en reflexión



Problema en transmisión





- **Propagación lenta** ▶ cada ranura resonador sub-longitud de onda
- **Critical coupling** ▶ absorción perfecta

[1] N. Jiménez *et. al.* App Phys Lett 109(**12**) 121902 (2016)
[2] MR. Stinson, J Acoust Soc Am 89(**2**) 550 (1991)

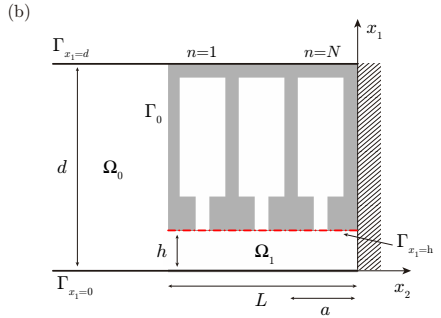
Métodos

1. Expansión modal (**MEM**):

Ondas de Bloch, $k_{1q}^a = k_1^i + 2q\pi/d$ + expansión modal en la ranuras

$$p^{[0]} = \sum_{q\in\mathbb{Z}} \cos\frac{q\pi}{d}x_1 \left[A_q^i \delta_q^0 e^{-ik_{2q}^{[0]}(x_2-L)} + R_q e^{ik_{2q}^{[0]}(x_2-L)}\right],$$

$$p^{[1]} = \sum_{q\in\mathbb{Z}} A_q \cos\left(k_{2q}^{[1]}x_2\right)\cos\left(k_{1q}^{[1]}x_1\right),$$



- **Parámetros efectivos**:

dónde $\phi_t = h/d$ y $\phi_n = w_n^2/a^2$

$$\rho_{eff} = \frac{\rho_s}{\phi_t}, \quad \kappa_{eff} = \frac{\kappa_s}{\phi_t}\left[1 + \frac{\kappa_s\phi_n\left(v_c\kappa_n + v_n\kappa_c\right)}{\kappa_n h\left(S_n\kappa_c - v_c\rho_n l_n\omega^2\right)}\right]^{-1},$$

2. Transfer matrix method (**TMM**):

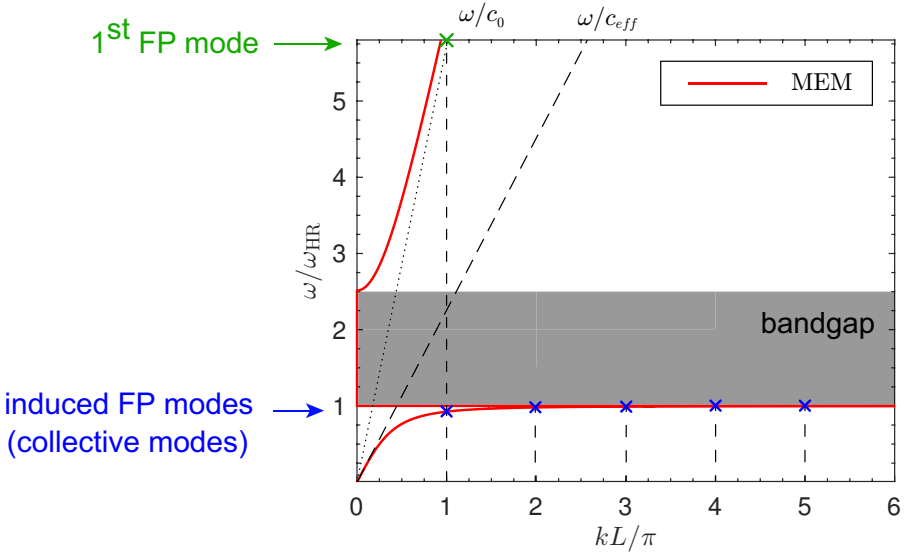
Tenemos en cuanta las correcciones por radiación ("correcciones de "cuello")

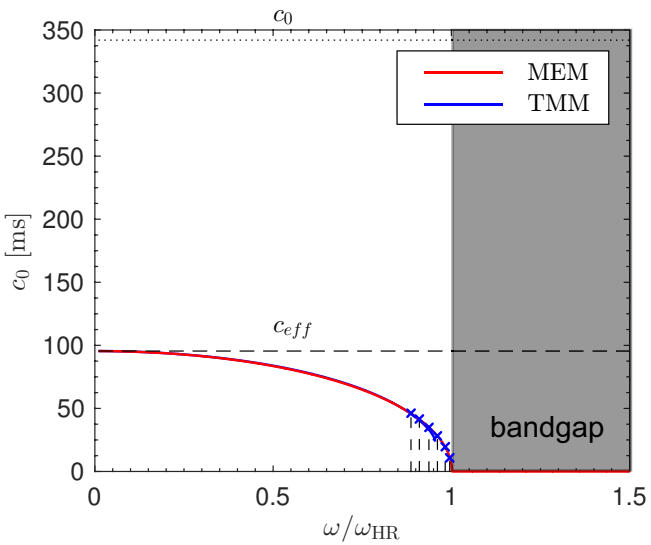
$$\boldsymbol{T} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} = M_{\Delta l}\left(M_s M_{\mathrm{HR}} M_s\right)^N, \text{ with } M_{\mathrm{HR}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_{\mathrm{HR}} & 1 \end{pmatrix},$$

3. Finite-Element method (**FEM**) Comsol Multiphysics®
4. Validación experimental **Experimental** en tubo de impedancia

Dispersión en las ranuras

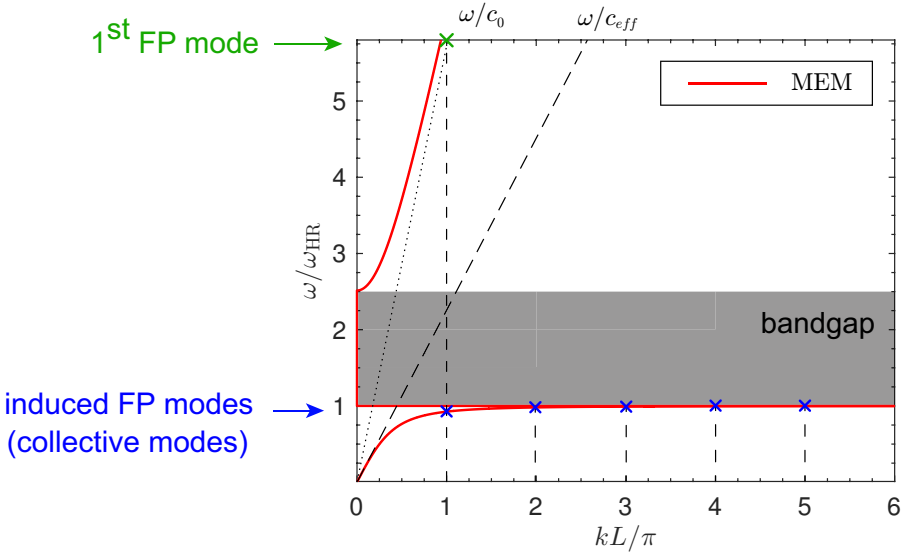
- Creamos una banda de propagación prohibida
- Propagación fuertemente dispersiva en el resto

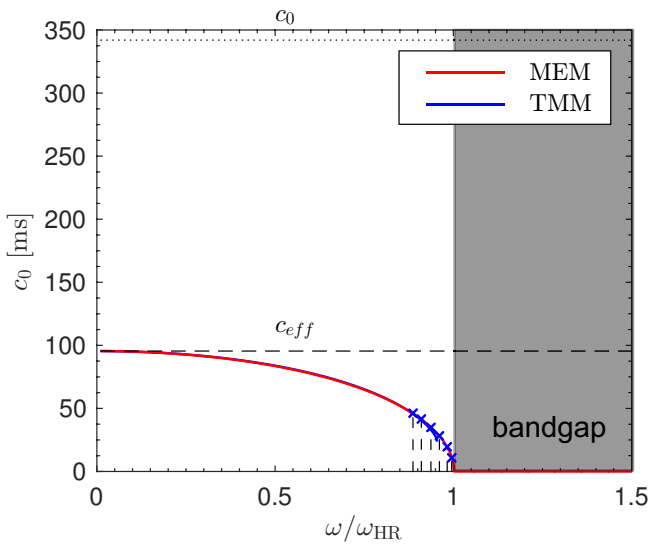


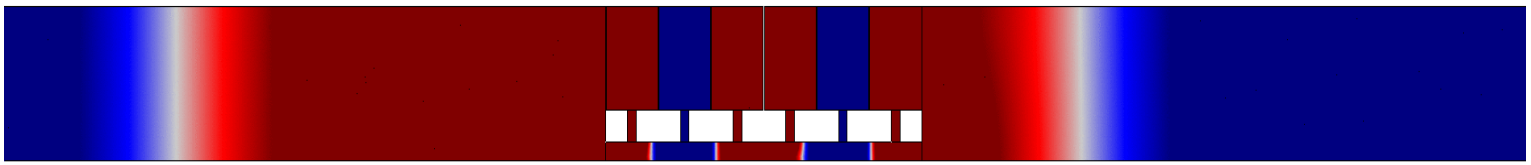


Dispersión en las ranuras

- Creamos una banda de propagación prohibida
- Propagación fuertemente dispersiva en el resto

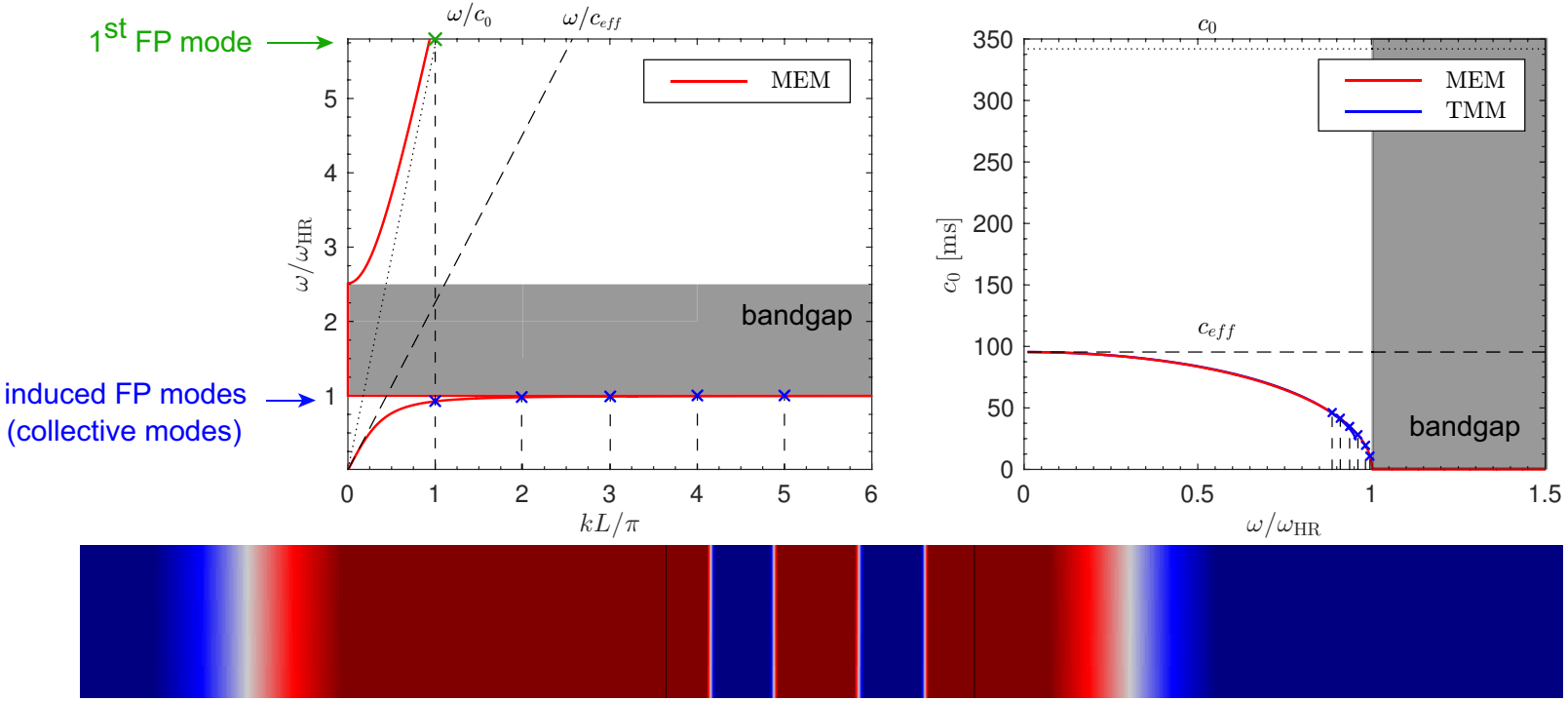






Dispersión en las ranuras

- Creamos una banda de propagación prohibida
- Propagación fuertemente dispersiva en el resto



- Los modos de cavidad (colectivos) aparecen a bajas frecuencias
- **Cada ranura se comporta como un resonador mucho más pequeño que la longitud de onda**

Índice

1 Métodos

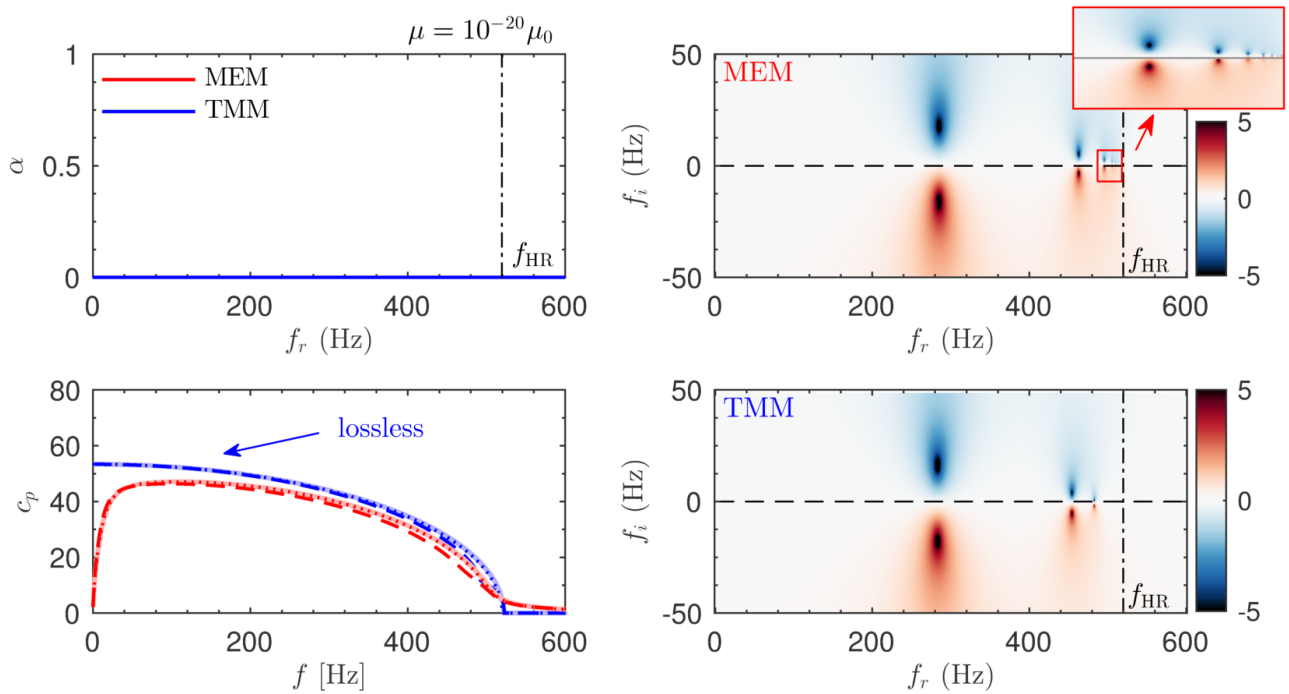
2 Problema en reflexión

3 Problema en transmisión

Acoplo crítico

Representación del coeficiente de reflexión en el plano complejo: $(N = 3)$

- **TMM**: N resonancias ▶ n picos de absorción
- **MEM**: ∞ resonancias ▶ se sobrestima la absorción cerca del bandgap

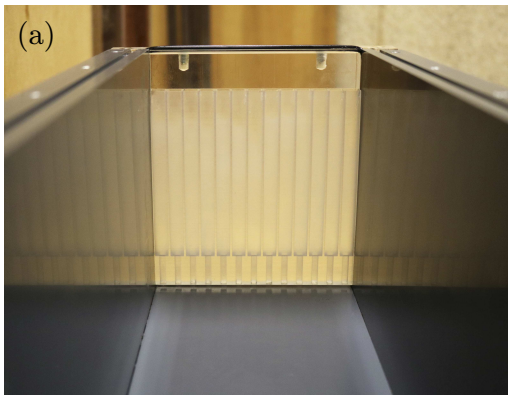


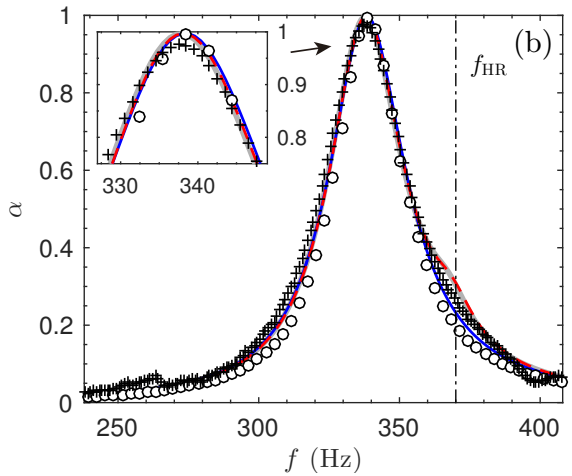
- ¿Cual es el **absorbente perfecto más fino** que podemos construir?

Panel “ultra-fino”

- Empleamos optimización para diseñar el absorbente perfecto sub-longitud de onda $f = 350$ Hz
- Validación experimental en una muestra impresa en 3D
- Grosor $L = \lambda/86$, ($L = 1$ cm) (sobre $\lambda/100$ con las paredes más finas)







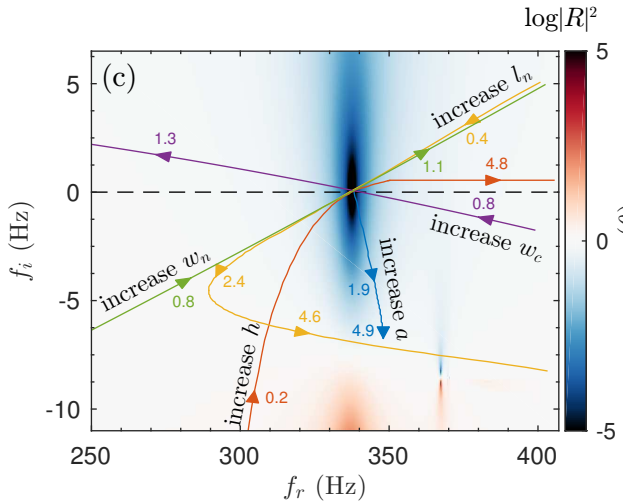
- Es la absorción realmente **perfecta**?

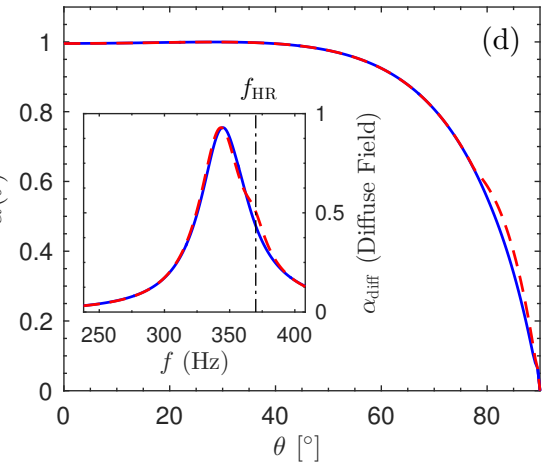
Absorción perfecta y quasi-omnidireccional

- *¿Está la estructura acoplada críticamente?*
  Comprobar la trayectoria de los zeros al variar la geometría

- *Material localmente reactante:*
  Absorción perfecta solo a un ángulo, pero comportamiento quasi-omnidireccional







Índice

1 Métodos

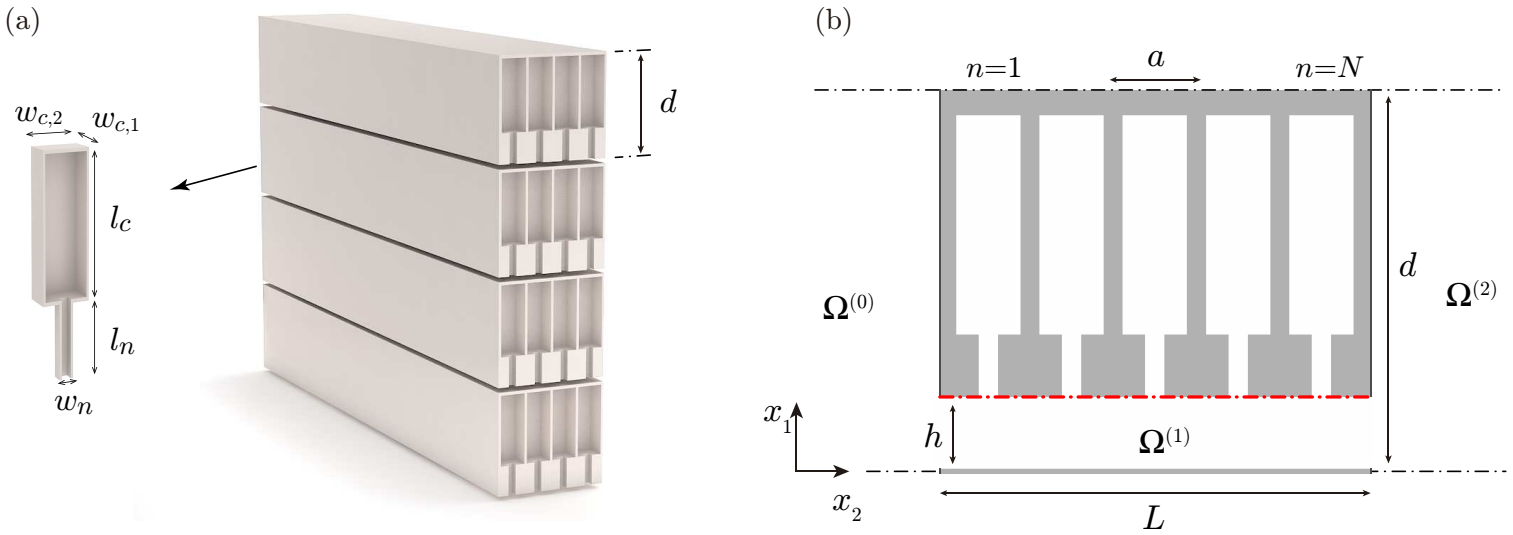
2 Problema en reflexión

3 Problema en transmisión

Configuración

Problema en transmisión:

- Resonadores iguales : no se puede obtener absorción perfecta! [1]



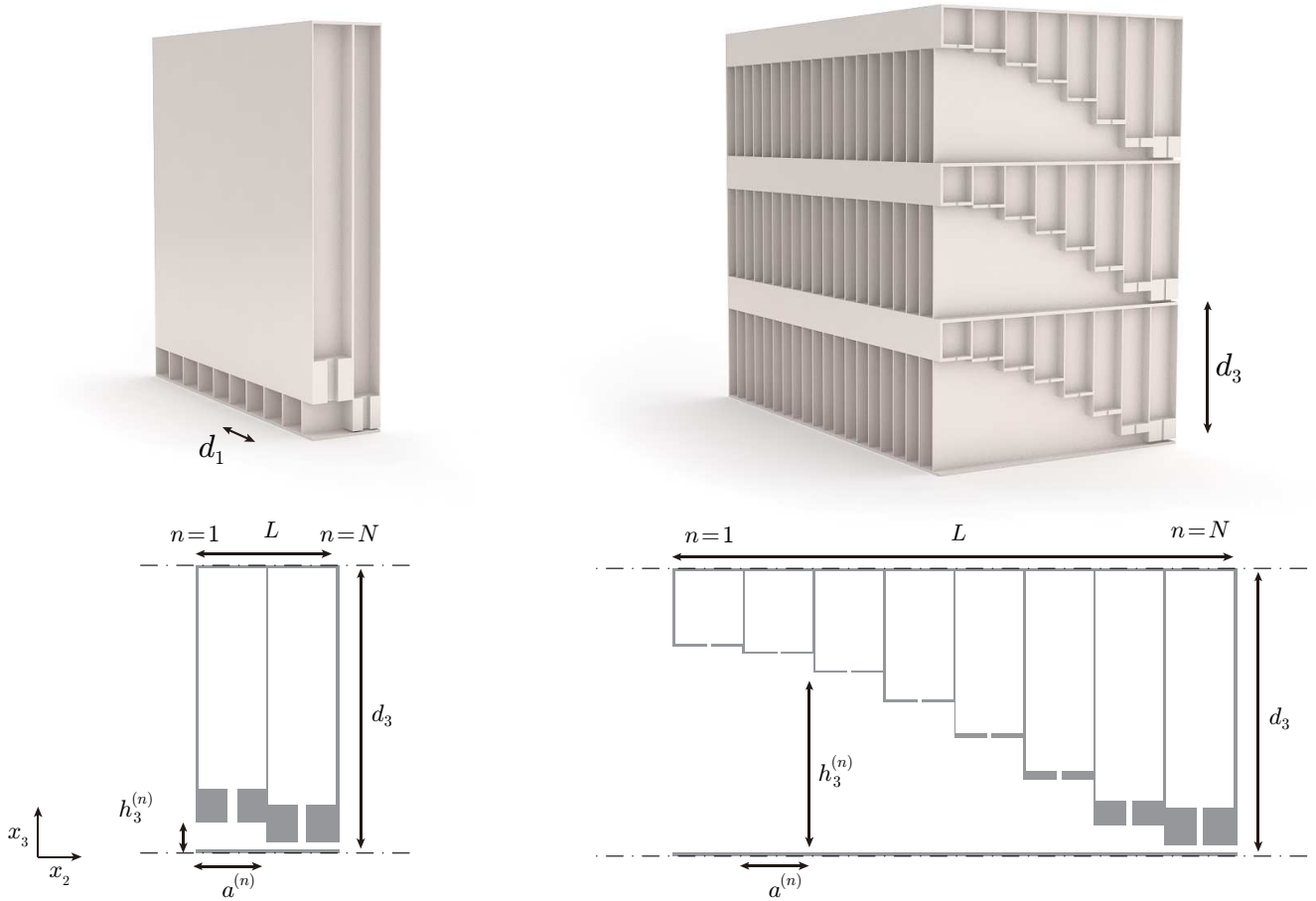
- Es necesario romper la simetría de los modos de cavidad

[1] Jiménez *et al.*, Physical Review B 95, 014205 (2017)

Rainbow-trapping absorbers

Absorbentes perfectos de banda ancha para problemas en transmisión [1]

- Subwavelength Asymmetric Panel
- Rainbow Trapping Absorber



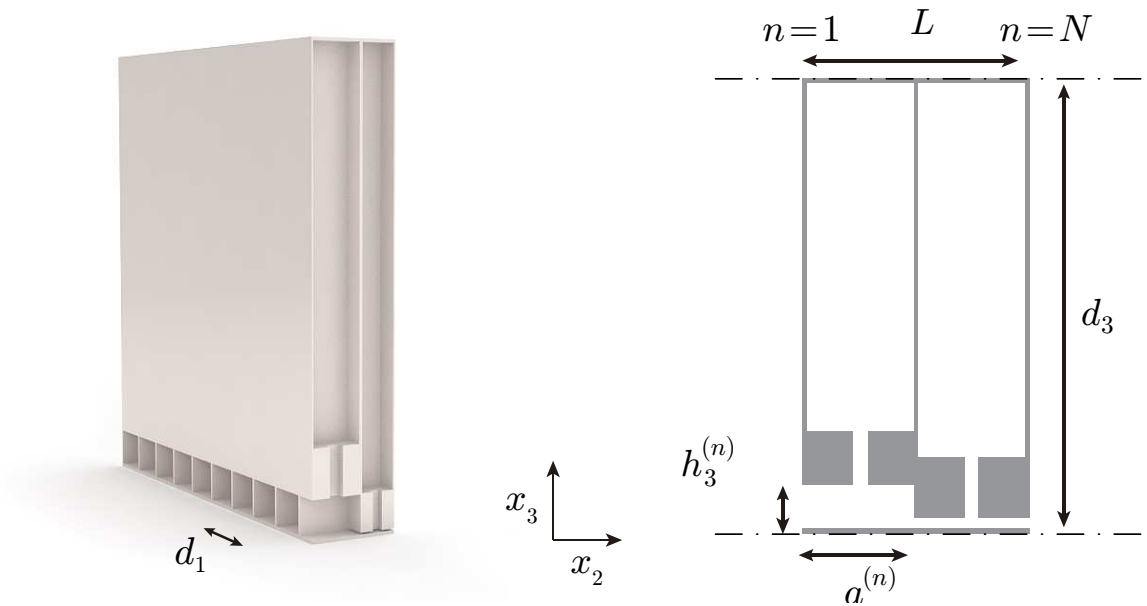
[1] Jiménez et. al. Accepted in Scientific Reports (02 Oct 2017)

Panel asimétrico sub-longitud de onda

Panel con $N = 2$ resonadores

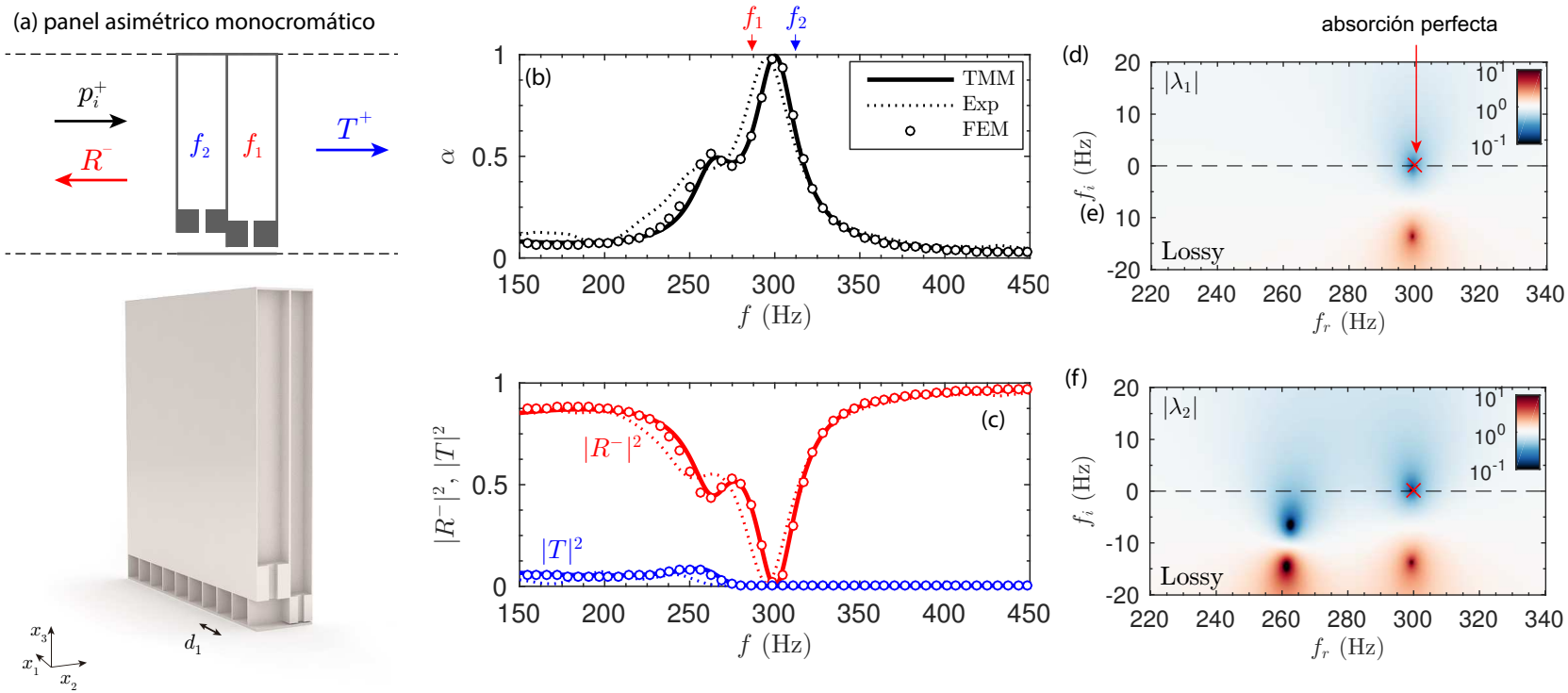
1. Resonador **interno**:
   - Frecuencia de resonancia más baja
   - Induce un band-gap alrededor de su resonancia
   - La transmisión se reduce drásticmante: actúa como una pared rígida

2. Resonador **externo**:
   - Frecuencia de resonancia ligeramente superior
   - Acopla crríticamente el problema en reflexión



Panel asimétrico sub-longitud de onda

- Propagación asimétrica



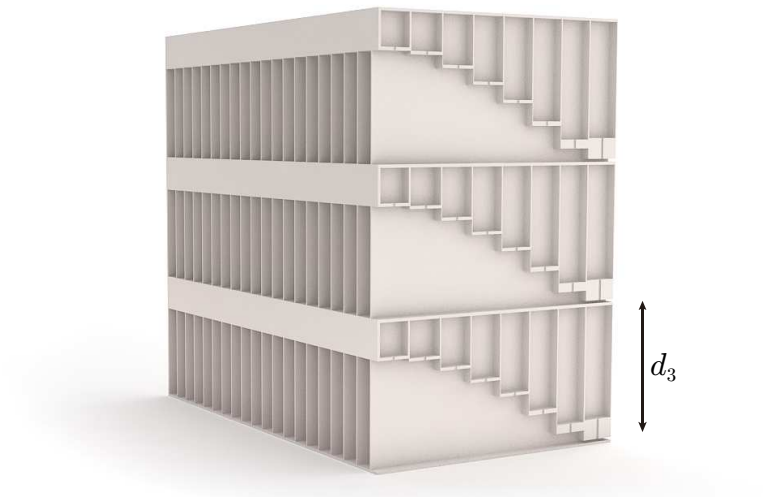
- Absorción unidireccional
- Absorción perfecta para un grosor de $L = \lambda/40$ ($L = 2.5$ cm)

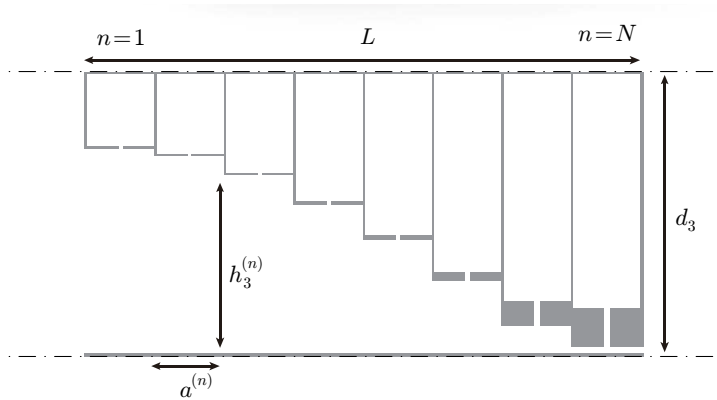
Rainbow trapping absorber

La misma idea, pero en cascada:

1. Resonador n:
   - Frecuencia resonancia más baja: $\omega_n < \omega_{n-1}$
   - Crea un band-gap por encima de su resonancia
   - la transmisión se reduce

2. Resonador $n-1$:
   - Frecuencia de resonancia ligeramente superior: : $\omega_n < \omega_{n-1}$
   - Acopla críticamente la estructura a a la frecuencia ω_{n-1}
   - Produce un nuevo bandgap ω_n

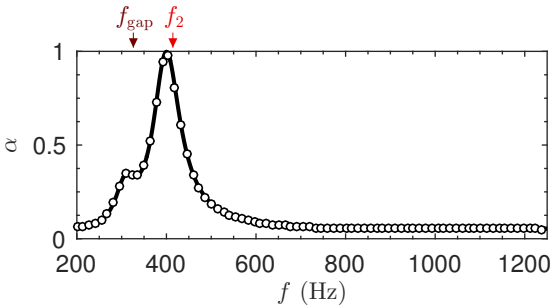


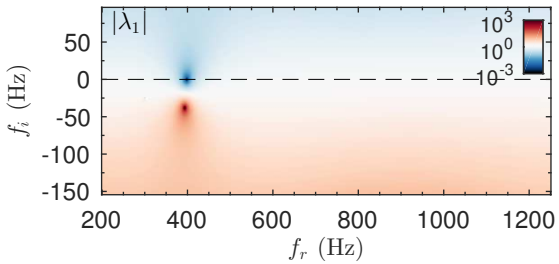


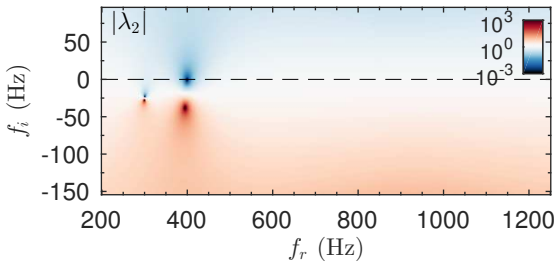
Rainbow trapping absorber

Absorción perfecta asimétrica de Banda ancha:

- Solape de $N - 1 = 8$ picos de absorción perfecta
- Grosor del panel $L = \lambda/12$ ($L = 10$ cm)



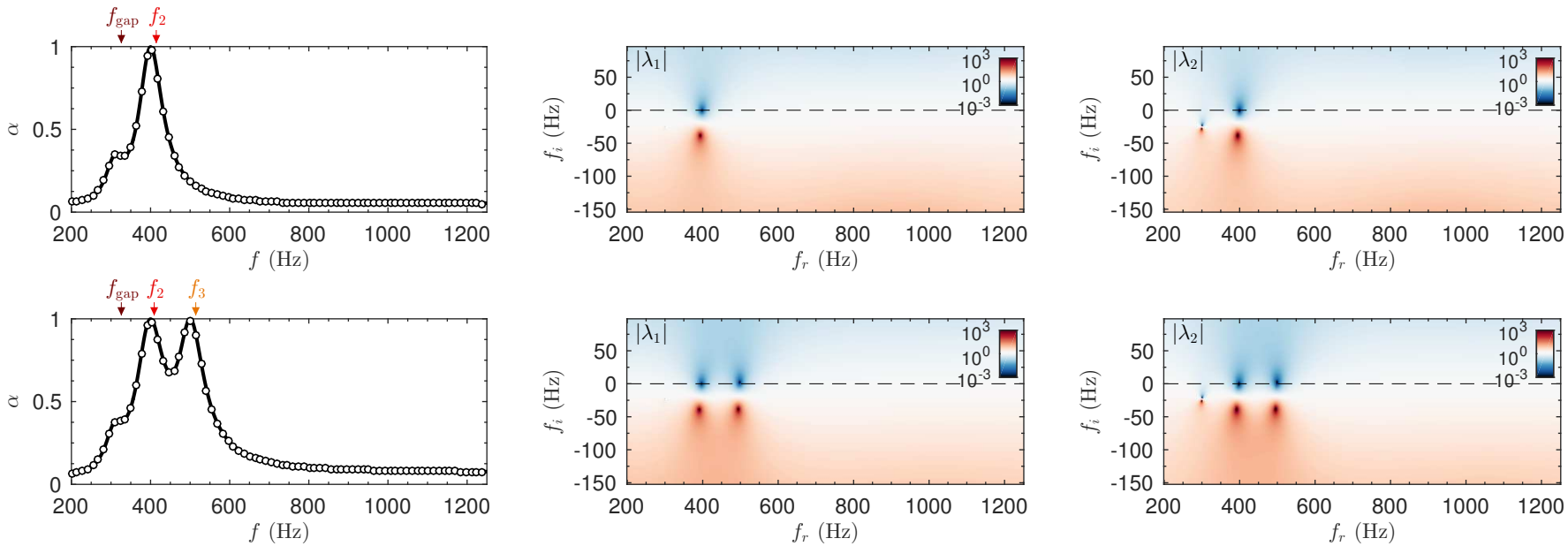




Rainbow trapping absorber

Absorción perfecta asimétrica de Banda ancha:

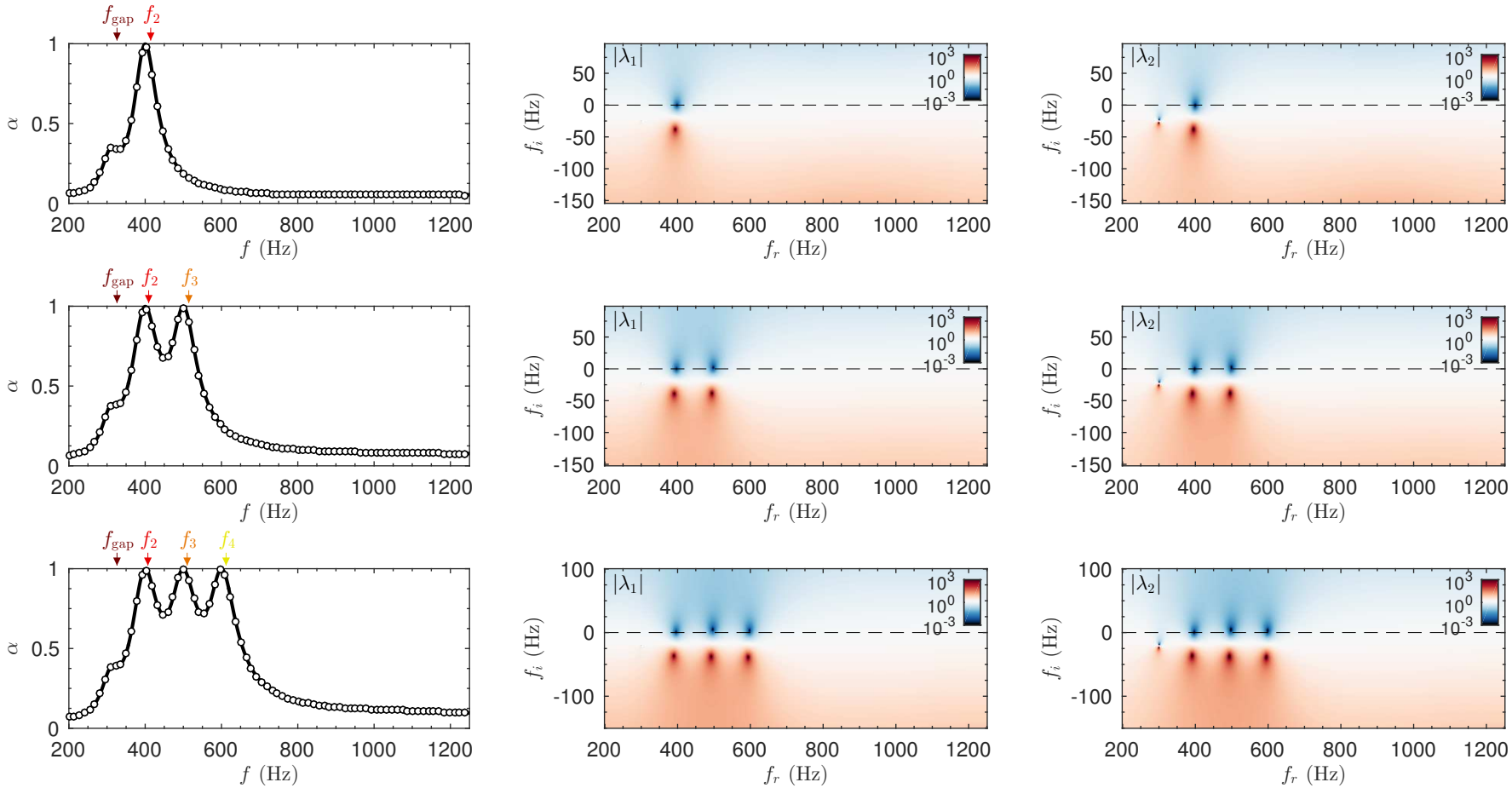
- Solape de $N - 1 = 8$ picos de absorción perfecta
- Grosor del panel $L = \lambda/12$ ($L = 10$ cm)
- Limitación experimental : precisión de la impresora 0.1 mm



Rainbow trapping absorber

Absorción perfecta asimétrica de Banda ancha:

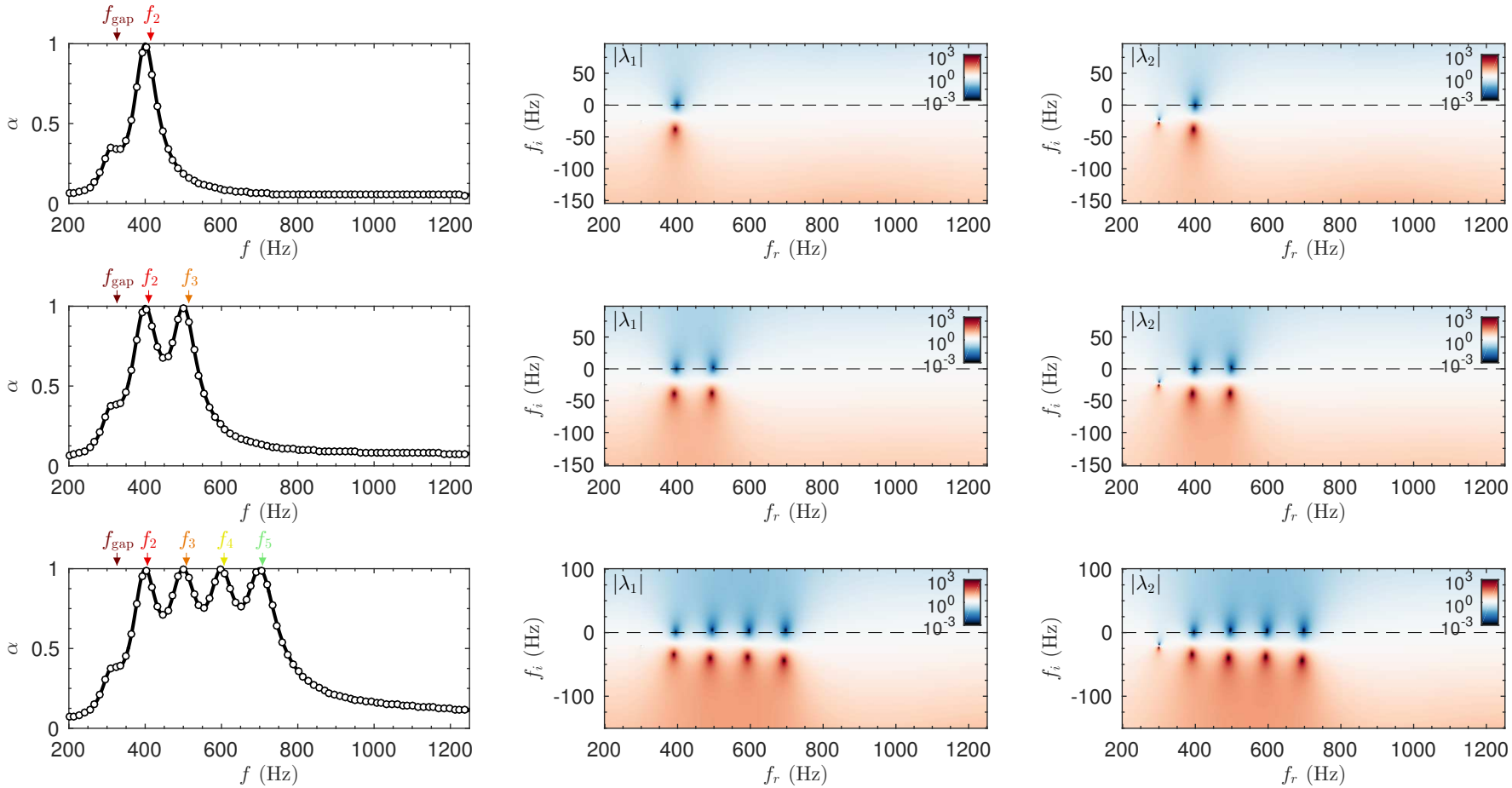
- Solape de $N - 1 = 8$ picos de absorción perfecta
- Grosor del panel $L = \lambda/12$ ($L = 10$ cm)



Rainbow trapping absorber

Absorción perfecta asimétrica de Banda ancha:

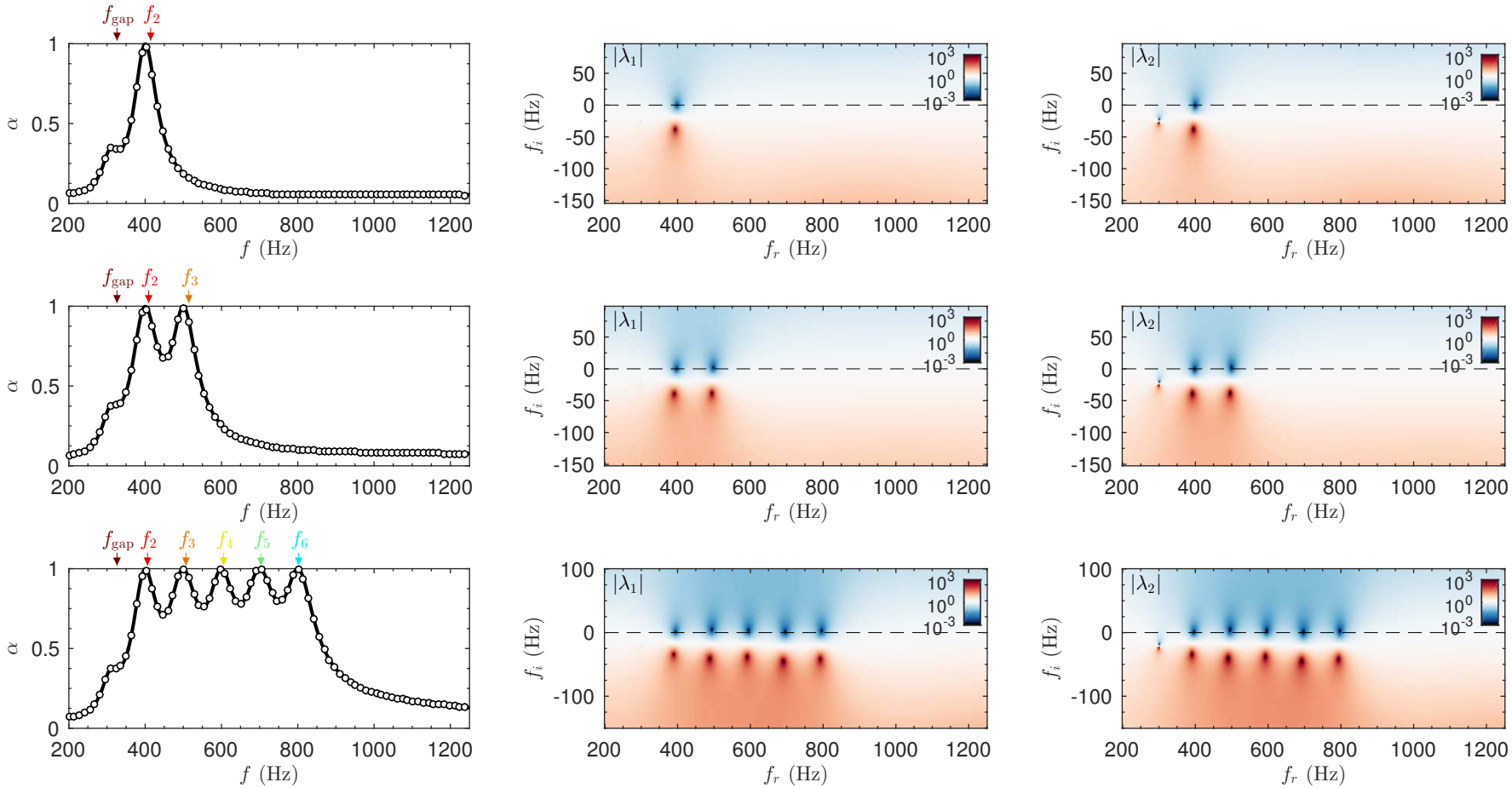
- Solape de $N - 1 = 8$ picos de absorción perfecta
- Grosor del panel $L = \lambda/12$ ($L = 10$ cm)



Rainbow trapping absorber

Absorción perfecta asimétrica de Banda ancha:

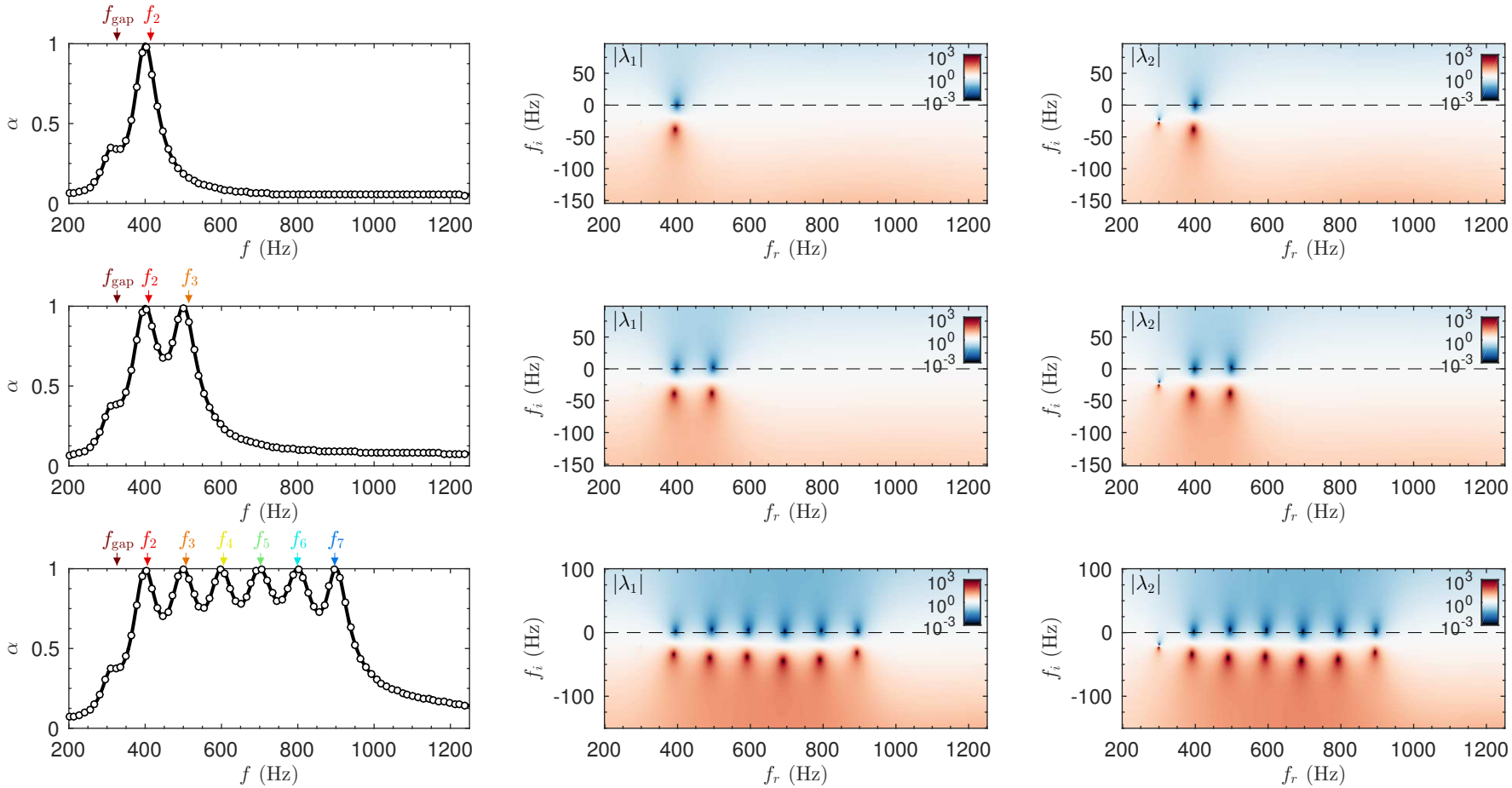
- Solape de $N - 1 = 8$ picos de absorción perfecta
- Grosor del panel $L = \lambda/12$ ($L = 10$ cm)



Rainbow trapping absorber

Absorción perfecta asimétrica de Banda ancha:

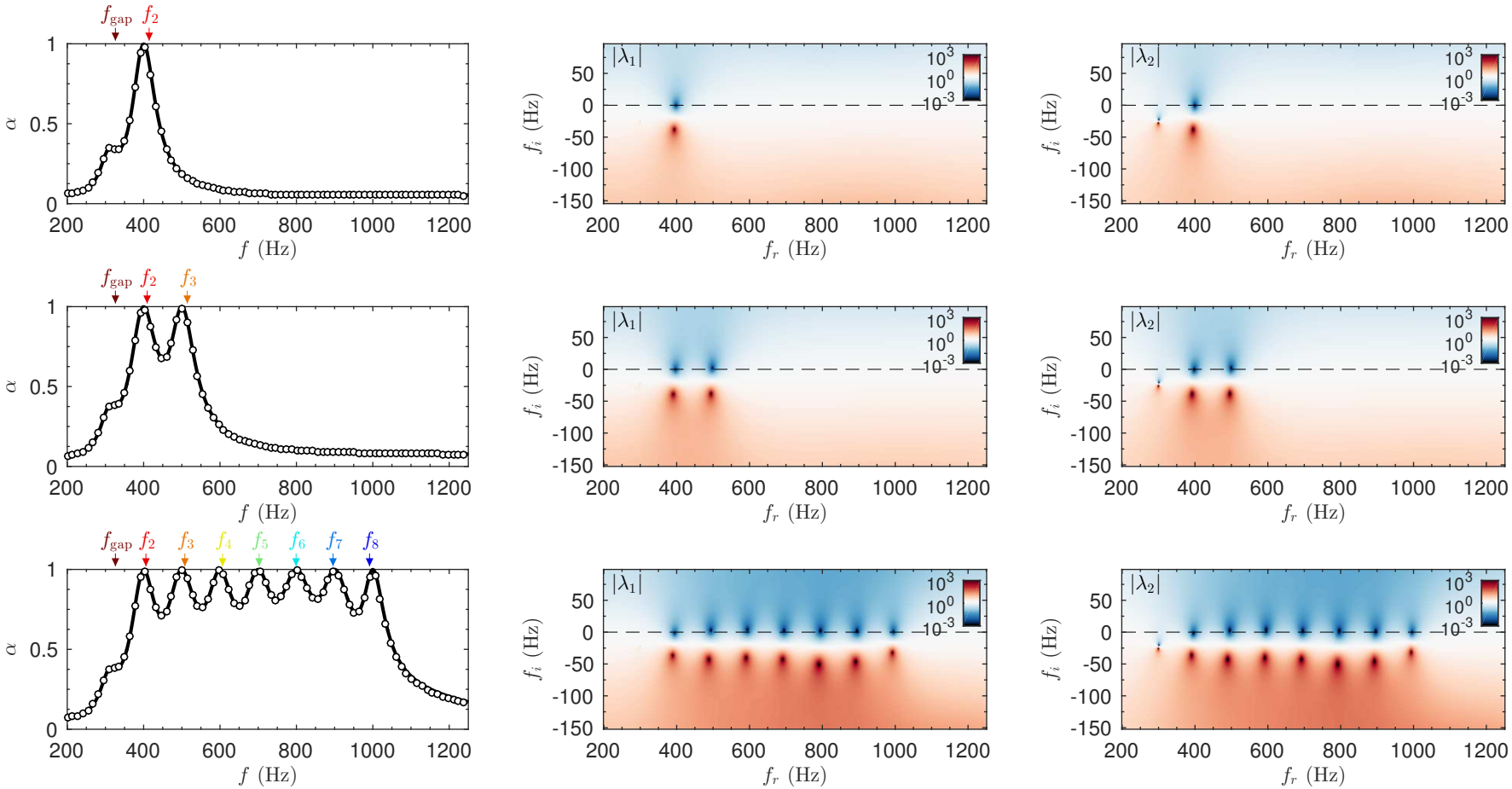
- Solape de $N - 1 = 8$ picos de absorción perfecta
- Grosor del panel $L = \lambda/12$ ($L = 10$ cm)



Rainbow trapping absorber

Absorción perfecta asimétrica de Banda ancha:

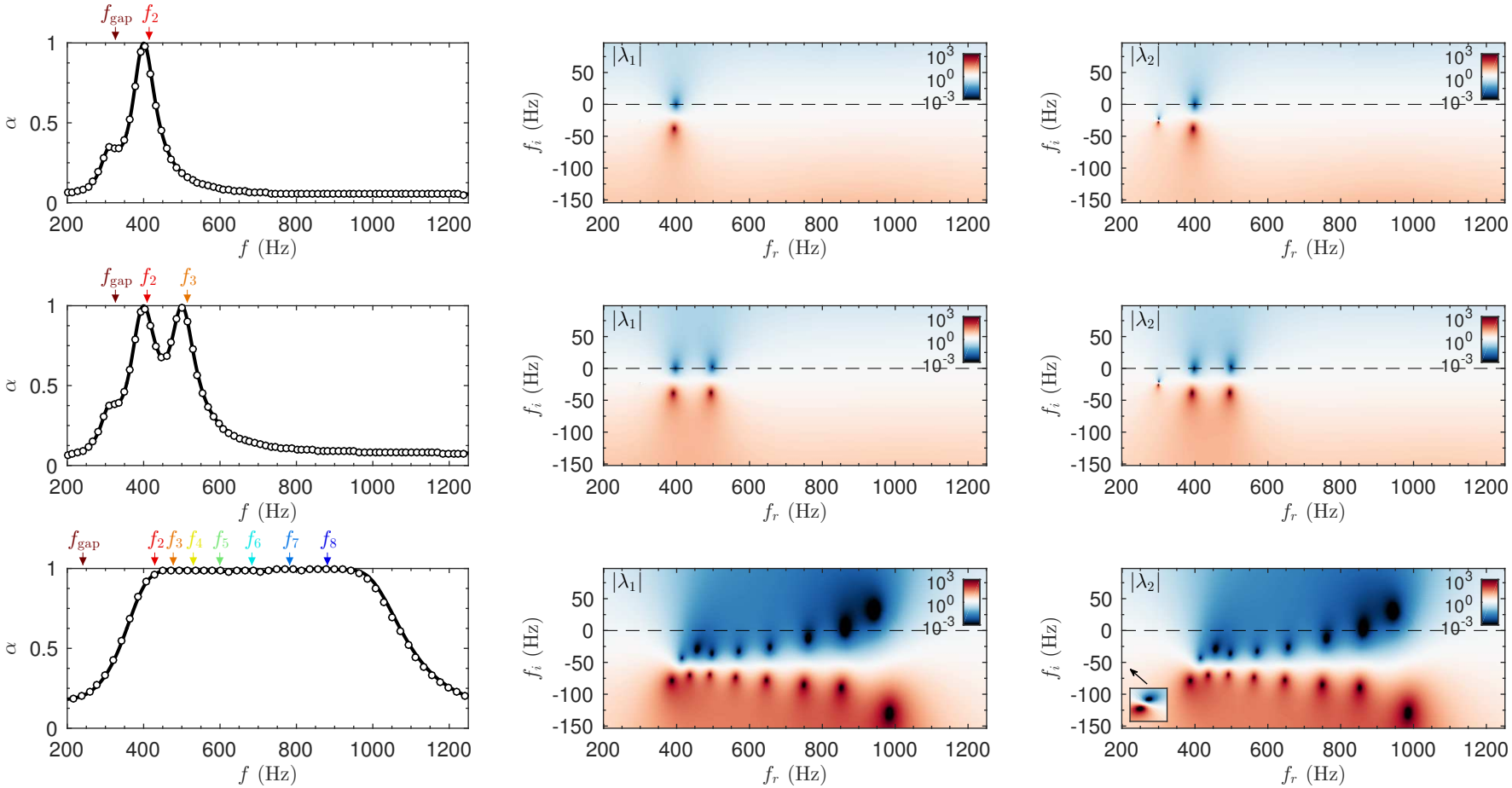
- Solape de $N - 1 = 8$ picos de absorción perfecta
- Grosor del panel $L = \lambda/12$ ($L = 10$ cm)



Rainbow trapping absorber

Absorción perfecta asimétrica de Banda ancha:

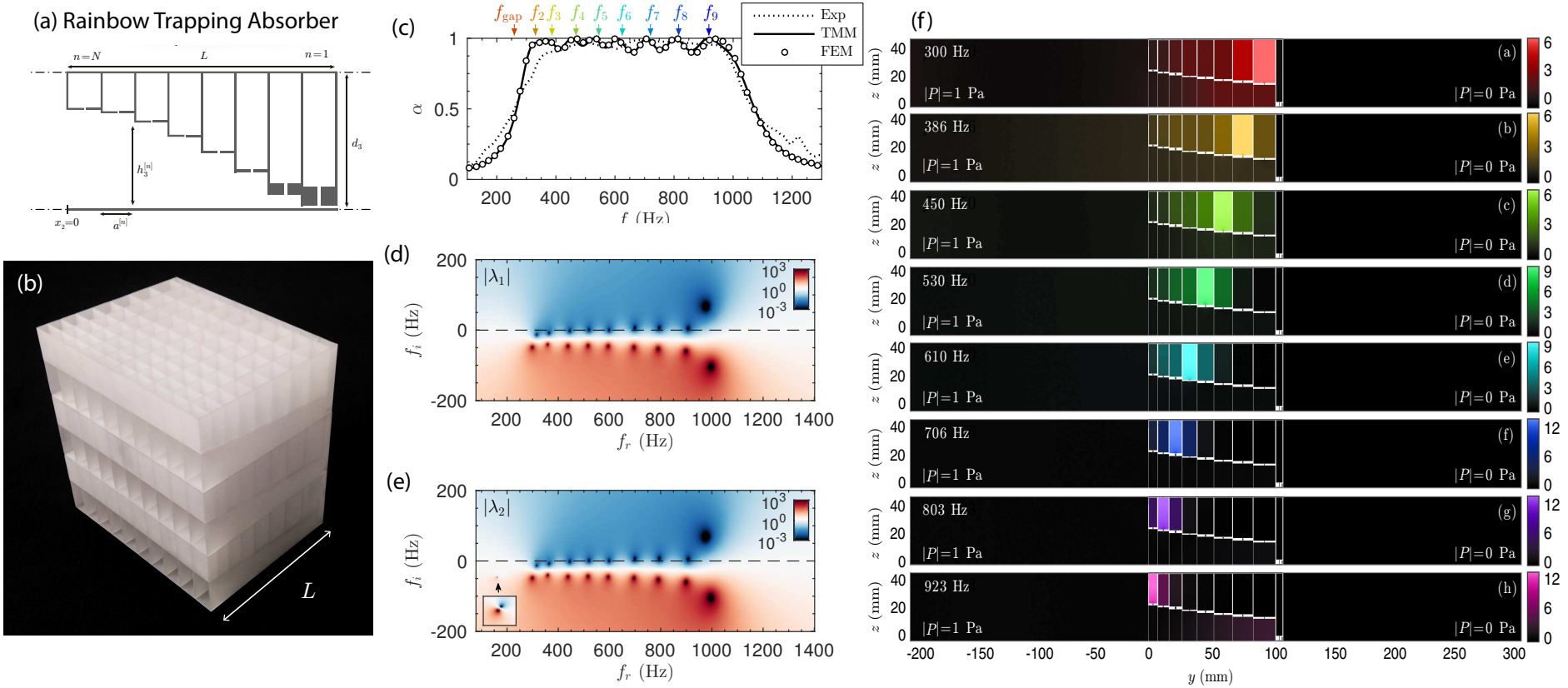
- Solape de $N - 1 = 8$ picos de absorción perfecta
- Grosor del panel $L = \lambda/12$ ($L = 10$ cm)



Rainbow trapping absorber

Absorción perfecta asimétrica de Banda ancha:

- Solape de $N - 1 = 8$ picos de absorción perfecta
- Grosor del panel $L = \lambda/12$ ($L = 10$ cm)



Conclusiones

1. **Absorbentes perfectos** mucho más pequeos que la longitud de onda
   - Reflexión: Panel ultra-fino ▶ $L = \lambda/86$
   - Transmisión: Panel asimétrico ▶ $L = \lambda/40$
   - Banda ancha: Rainbow trapping absorber ▶ $L = \lambda/12$

Conclusiones

1. **Absorbentes perfectos** mucho más pequeos que la longitud de onda
   - Reflexión: Panel ultra-fino ▶ $L = \lambda/86$
   - Transmisión: Panel asimétrico ▶ $L = \lambda/40$
   - Banda ancha: Rainbow trapping absorber ▶ $L = \lambda/12$

2. **Metamateriales**: resonadores de Helmholtz y propagación lenta
   - Versátiles: amplio abanico de problemas
   - Basados en HR: duración ante el envejecimiento / condiciones extremas
   - Vacíos y abiertos: poco peso, transparentes a la luz y al flujo de aire
   - Gran libertad de diseño: optimización multi-funcional, estructural, estética
   - Construcción: estructuras complejas en 3D ...

Project funded by the Metaudible ANR project ANR-13-BS09-0003



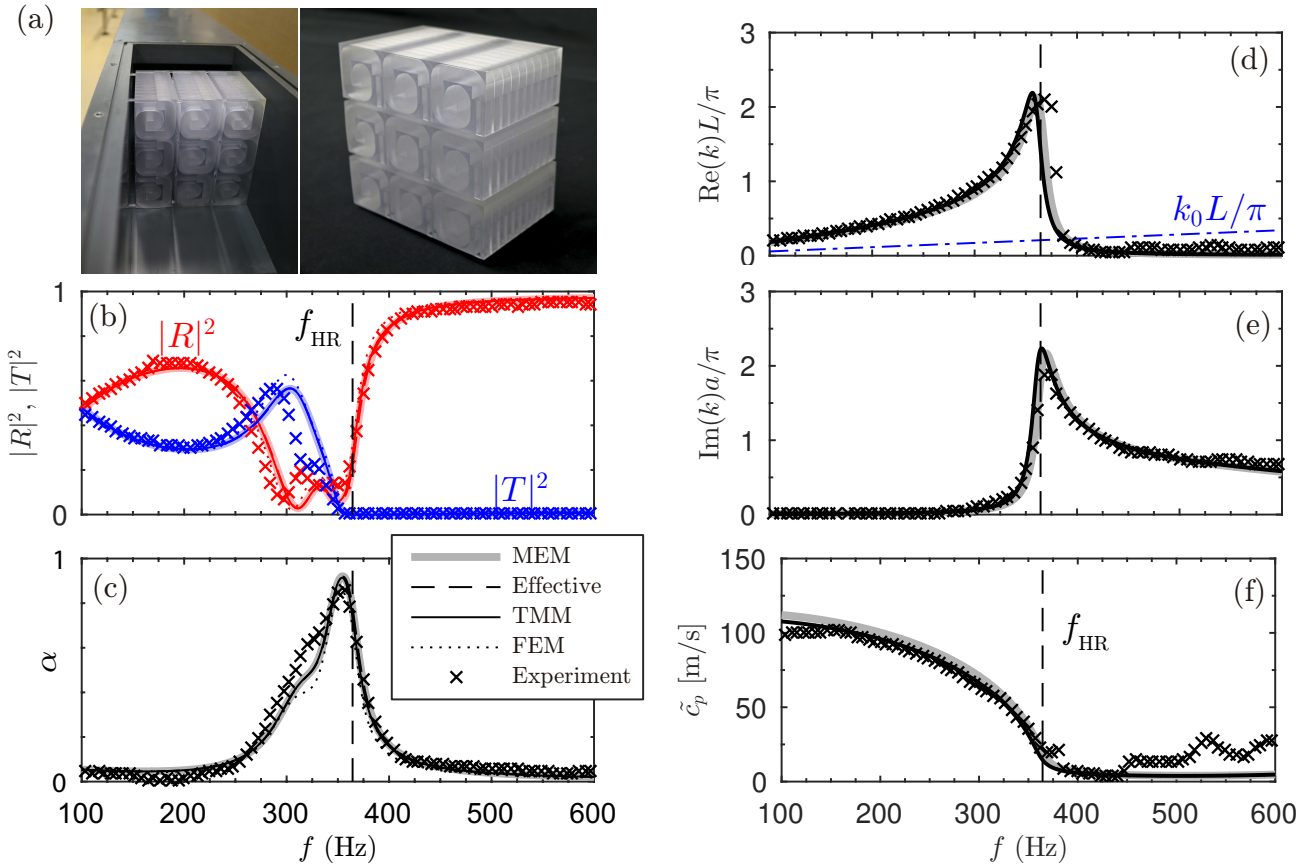
Thanks for your attention!

Noé Jiménez[1,*], W. Huang[1], V. Pagneaux[1], V. Romero-García[1], J-P. Groby[1]

[1] Laboratoire d'Acoustique de la Université du Maine, UMR CNRS-6613 (France)
[*] *Now at*: Instituto de Instrumentación para Imagen Molecular (i3M), CSIC - UPV (Spain)

Resonadores idénticos

- Resonadores iguales: no se puede obtener absorción perfecta! [1]
- La acumulación de resonancias induce absorción quasi-perfecta [1]



[1] Jiménez *et al.*, Physical Review B 95, 014205 (2017)