

# Transporte Cuántico

## XIX Curso de Iniciación a la investigación en Estructura de la Materia

Rafael A. Molina Fernández

Grupo de Teoría de la Materia Condensada

Departamento de Física y Química Teóricas

Jorge Dukelsky (Profesor de investigación “Ad Honorem”)

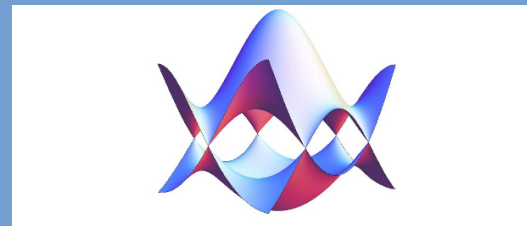
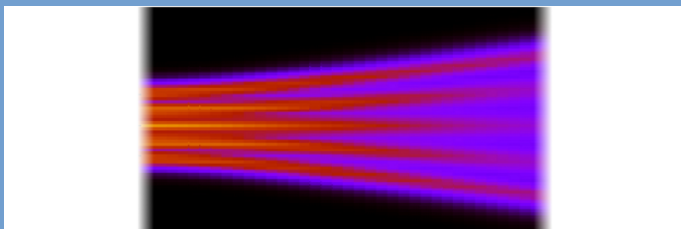
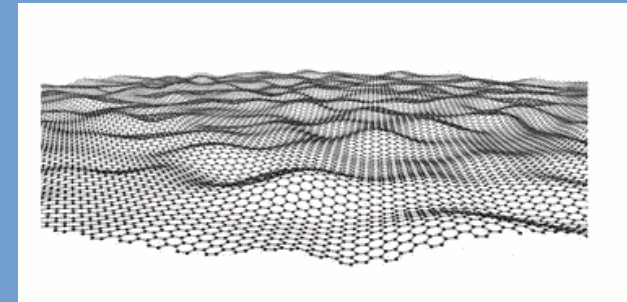
Estudiantes de doctorado

Enrique Benito

Yuriko Baba

Ángel López Corps

Marta Garcia Olmos



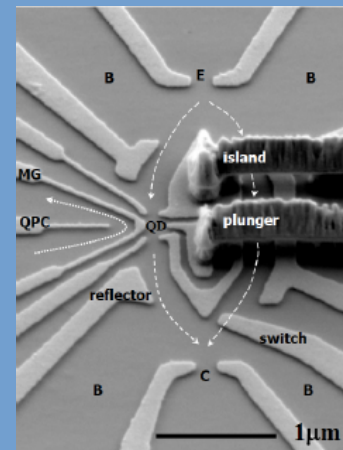
24 de marzo de 2023

# ¿Qué estudia la física mesoscópica?

- **Física Microscópica**: estudia los componentes básicos de la materia: átomos, moléculas, ...
- **Física Macroscópica**: estudia los objetos que podemos “ver”.
- El mundo **mesoscópico** está entre ambos.
- Diferencias entre un sistema mesoscópico y uno macroscópico:
  - Todo sistema macroscópico con la misma composición tiene las mismas propiedades.
  - Sistema mesoscópico con la misma composición presentan **fluctuaciones** con respecto a las propiedades promedio.
  - Una descripción **cuántica** del sistema es necesaria.



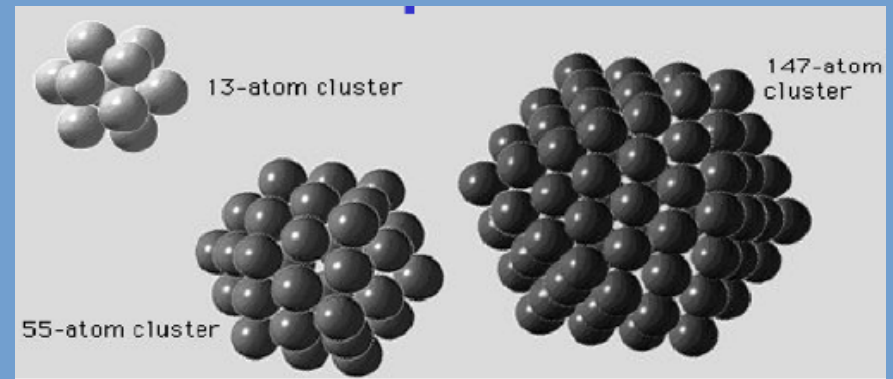
Punto cuántico (Delft, Kouwenhoven)



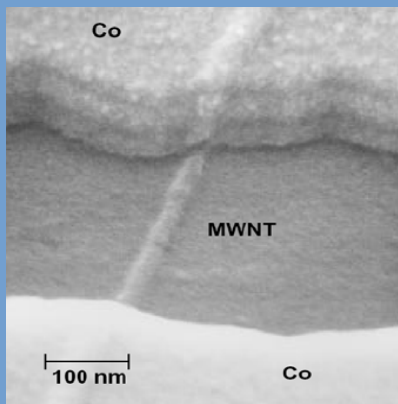
# ¿Por qué estudiamos los sistemas mesoscópicos?

- **Física básica**

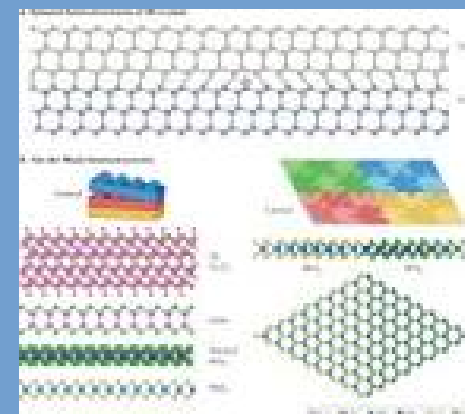
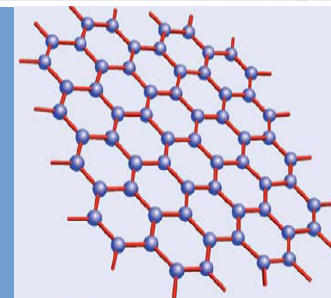
¿Qué fenómenos ocurren en materiales de tamaños intermedios entre un átomo y un sólido macroscópico?



- Importantes **aplicaciones**



- **Nanotecnología**
- **Nuevos Materiales**

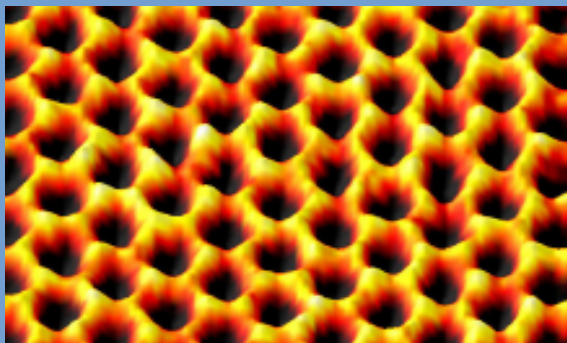


# Ejemplos y aplicaciones

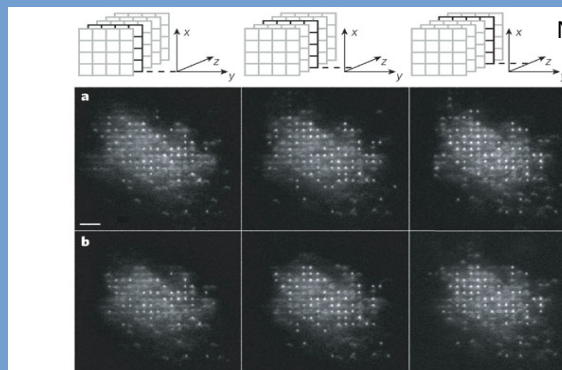
- El desarrollo de la Física Mesoscópica y del transporte cuántico ha estado impulsado por la **miniaturización de la electrónica**.
- Los **efectos cuánticos** comienzan a ser importantes en los dispositivos electrónicos comerciales.

Transistores actuales: 5 nm.

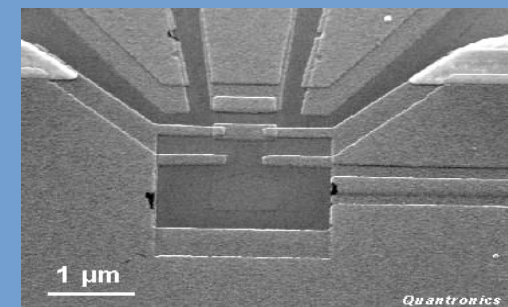
- Nuevos sistemas: Redes ópticas, grafeno y otros materiales 2D, aislantes y semimetales topológicos.
- Nuevas potenciales aplicaciones: Información cuántica, espintrónica, sistemas nanoelectromecánicos.



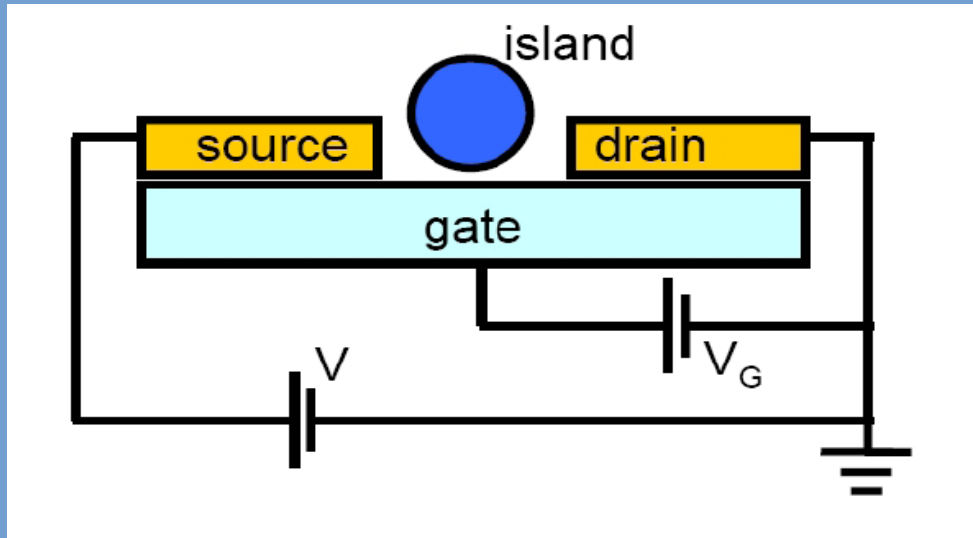
J.C. Meyer et al. Nano Lett. 8, 3582 (2008).



Nelson, K. D., Li, X. & Weiss, D. S. Nature Phys. 3, 556–560 (2007)

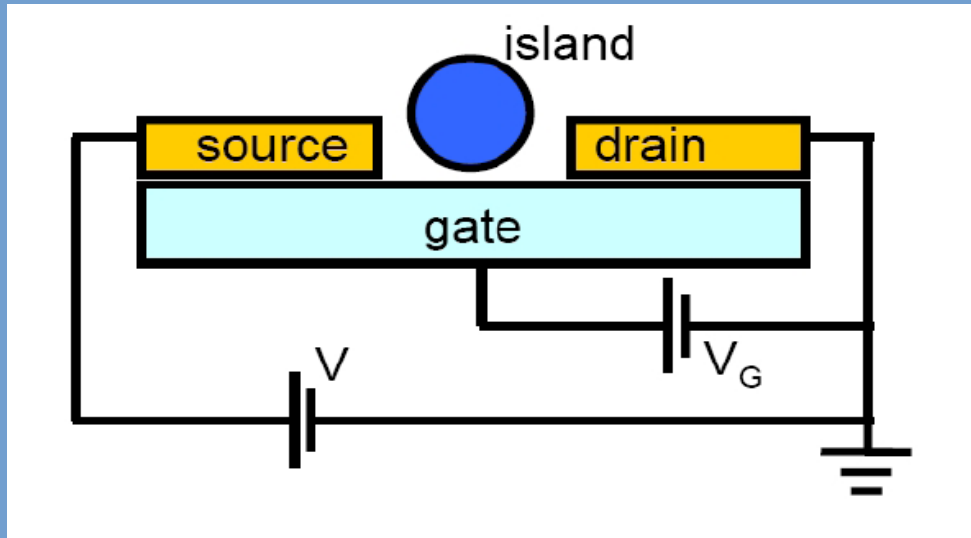


# Experimentos: transporte electrónico



$$R = \frac{V}{I} \quad G = \frac{I}{V}$$

# Experimentos: transporte electrónico



$$R = \frac{V}{I} \quad G = \frac{I}{V}$$

- Si la fase importa: Transporte cuántico
- La interferencia es fundamental.

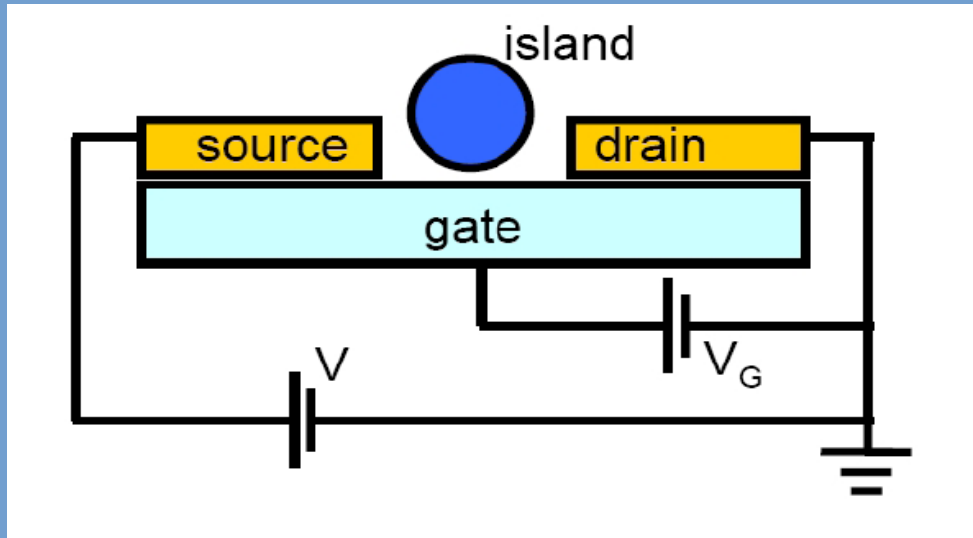
$$G \neq \sigma W/L$$

- Longitud de coherencia de fase

$$L_\phi > L$$

- Procesos que producen decoherencia :  
Fonones, interacciones con otros electrones

# Experimentos: transporte electrónico



$$R = \frac{V}{I} \quad G = \frac{I}{V}$$

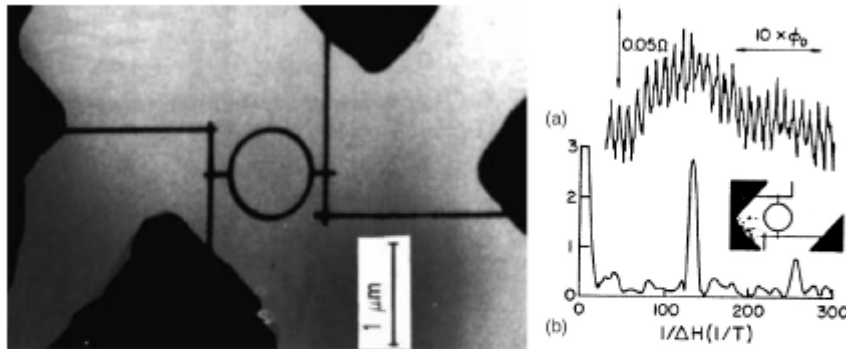
- Si la fase importa: Transporte cuántico
- La interferencia es fundamental.

$$G \neq \sigma W/L$$

- Longitud de coherencia de fase

$$L_\phi > L$$

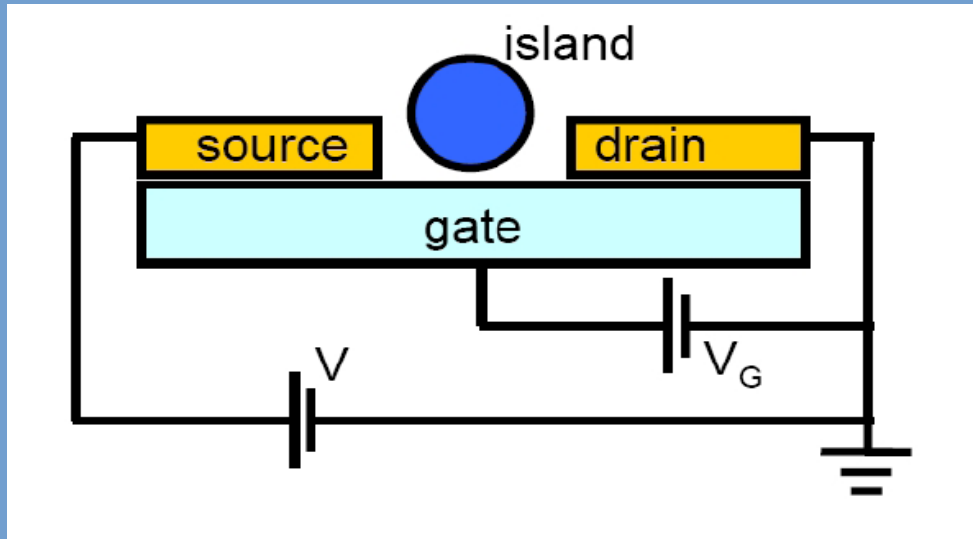
- Procesos que producen decoherencia :  
Fonones, interacciones con otros electrones



R.A. Webb *et al.* Phys. Rev. Lett. 54, 2696 (1985).



# Experimentos: transporte electrónico



$$R = \frac{V}{I} \quad G = \frac{I}{V}$$

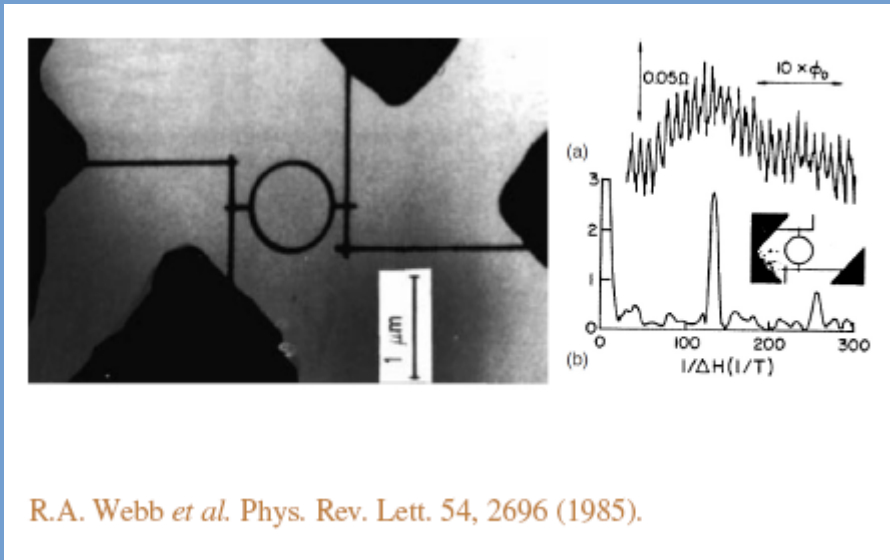
- Si la fase importa: Transporte cuántico
- La interferencia es fundamental.

$$G \neq \sigma W/L$$

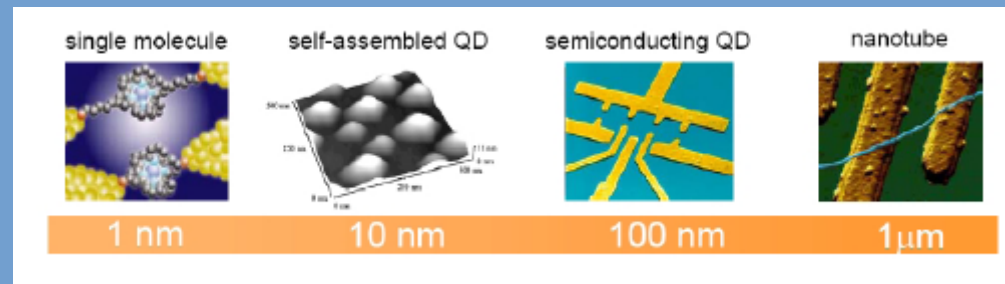
- Longitud de coherencia de fase

$$L_\phi > L$$

- Procesos que producen decoherencia :  
Fonones, interacciones con otros electrones



R.A. Webb *et al.* Phys. Rev. Lett. 54, 2696 (1985).



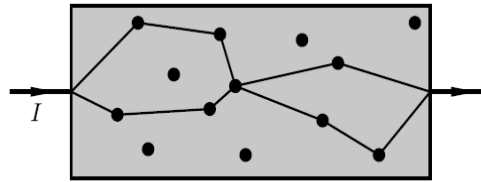


# Desorden y caos cuántico

## Escalas importantes

Ejemplo de las escalas relevantes para un cable metálico desordenado de longitud  $L$

- $l_e$  Recorrido libre medio para el *scattering* elástico.
- $\lambda_F$  Longitud de onda de Fermi.
- Grado de desorden  $1/k_F l_e$ .

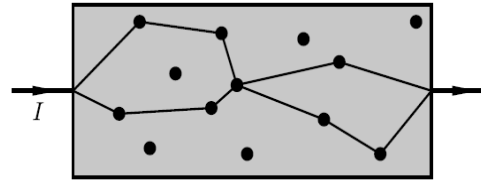


# Desorden y caos cuántico

## Escalas importantes

Ejemplo de las escalas relevantes para un cable metálico desordenado de longitud  $L$

- $l_e$  Recorrido libre medio para el *scattering* elástico.
- $\lambda_F$  Longitud de onda de Fermi.
- Grado de desorden  $1/k_F l_e$ .



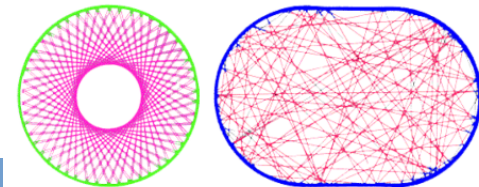
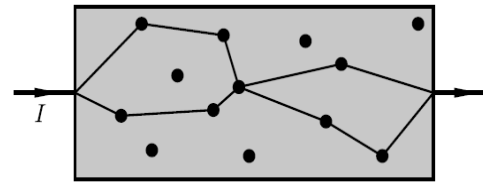
- ▶  $\lambda_F \ll L \ll l_e \rightarrow$  **régimen balístico**: Condiciones de frontera importantes: sistemas caóticos o regulares.
- ▶  $\lambda_F \ll l_e \ll L \rightarrow$  **régimen difusivo**: RMT aplicable. Conductor. Fluctuaciones como un sistema caótico.
- ▶  $l_e \ll \lambda_F \ll L \rightarrow$  **régimen localizado**. Funciones de onda localizadas. Aislante. Fluctuaciones como un sistema regular.
- ▶  $\lambda_F \ll l_e \ll L_\phi \ll L \rightarrow$  **régimen macroscópico**.

# Desorden y caos cuántico

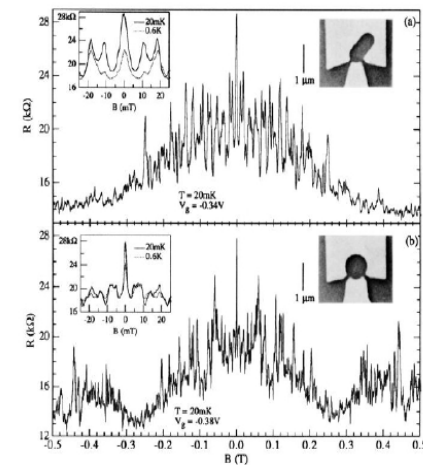
## Escalas importantes

Ejemplo de las escalas relevantes para un cable metálico desordenado de longitud  $L$

- $l_e$  Recorrido libre medio para el *scattering* elástico.
- $\lambda_F$  Longitud de onda de Fermi.
- Grado de desorden  $1/k_F l_e$ .



- ▶  $\lambda_F \ll L \ll l_e \rightarrow$  **régimen balístico**: Condiciones de frontera importantes: sistemas caóticos o regulares.
- ▶  $\lambda_F \ll l_e \ll L \rightarrow$  **régimen difusivo**: RMT aplicable. Conductor. Fluctuaciones como un sistema caótico.
- ▶  $l_e \ll \lambda_F \ll L \rightarrow$  **régimen localizado**. Funciones de onda localizadas. Aislante. Fluctuaciones como un sistema regular.
- ▶  $\lambda_F \ll l_e \ll L_\phi \ll L \rightarrow$  **régimen macroscópico**.



R.A. Jalabert et al. Phys. Rev. Lett. 65, 2442 (1990).

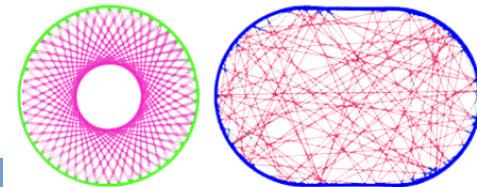
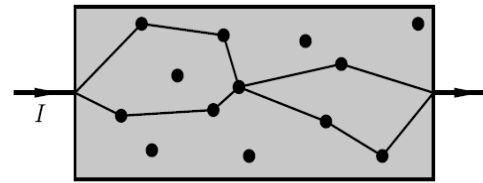
C.M. Marcus et al. Phys. Rev. Lett. 69, 506 (1992).

# Desorden y caos cuántico

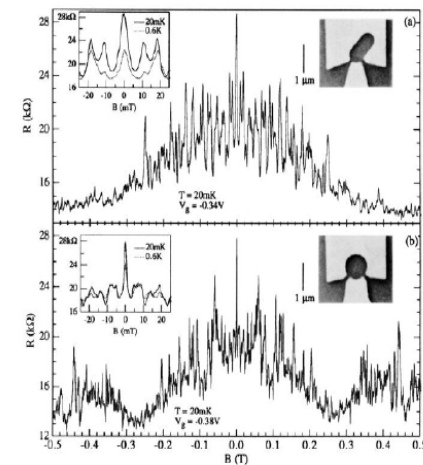
## Escalas importantes

Ejemplo de las escalas relevantes para un cable metálico desordenado de longitud  $L$

- $l_e$  Recorrido libre medio para el *scattering* elástico.
- $\lambda_F$  Longitud de onda de Fermi.
- Grado de desorden  $1/k_F l_e$ .

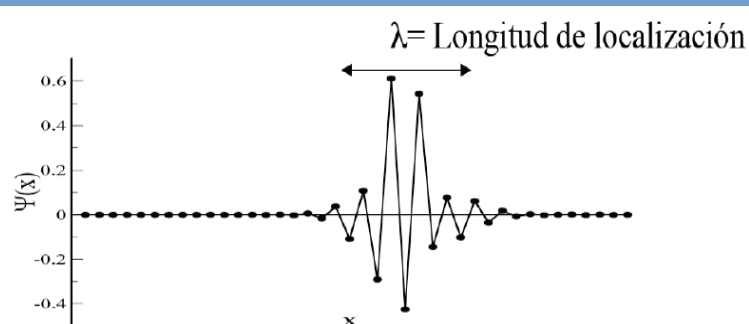


- ▶  $\lambda_F \ll L \ll l_e \rightarrow$  **régimen balístico**: Condiciones de frontera importantes: sistemas caóticos o regulares.
- ▶  $\lambda_F \ll l_e \ll L \rightarrow$  **régimen difusivo**: RMT aplicable. Conductor. Fluctuaciones como un sistema caótico.
- ▶  $l_e \ll \lambda_F \ll L \rightarrow$  **régimen localizado**. Funciones de onda localizadas. Aislante. Fluctuaciones como un sistema regular.
- ▶  $\lambda_F \ll l_e \ll L_\phi \ll L \rightarrow$  **régimen macroscópico**.



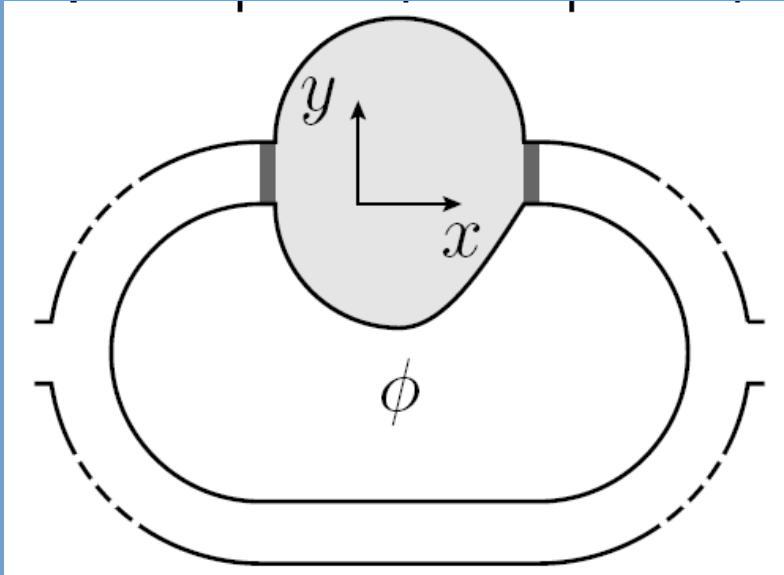
R.A. Jalabert et al. Phys. Rev. Lett. 65, 2442 (1990).

C.M. Marcus et al. Phys. Rev. Lett. 69, 506 (1992).



# Midiendo la fase

Experimento de doble rendija para electrones

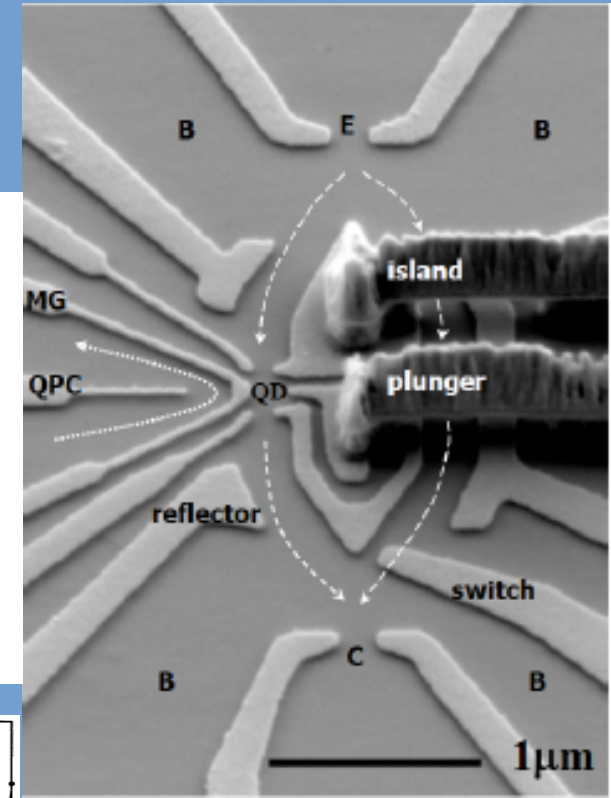
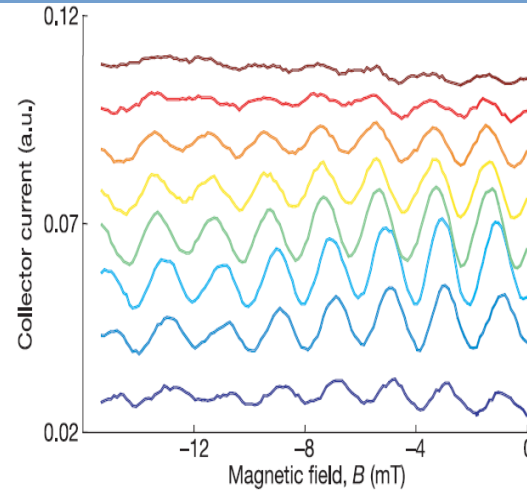
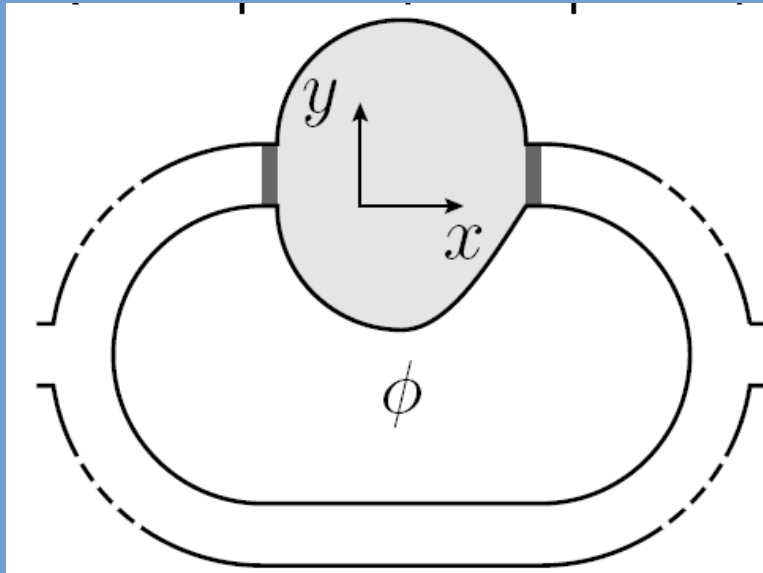


$$g = \frac{I}{V} = \frac{2e^2}{h} |t|^2$$

$$t = e^{i\alpha} |t|$$

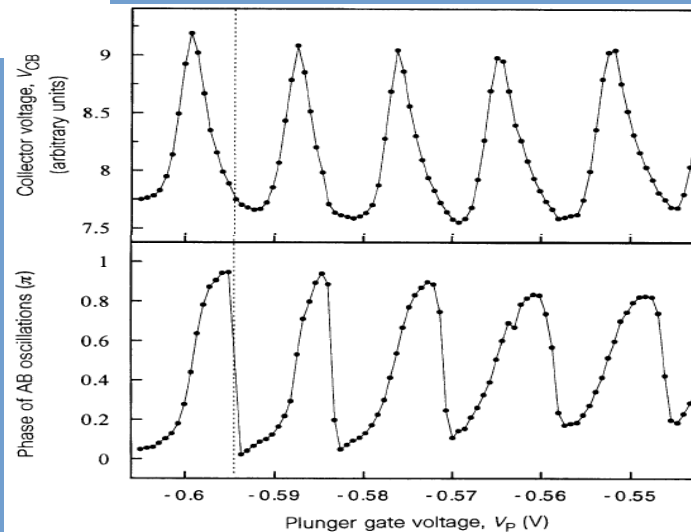
# Midiendo la fase

## Experimento de doble rendija para electrones

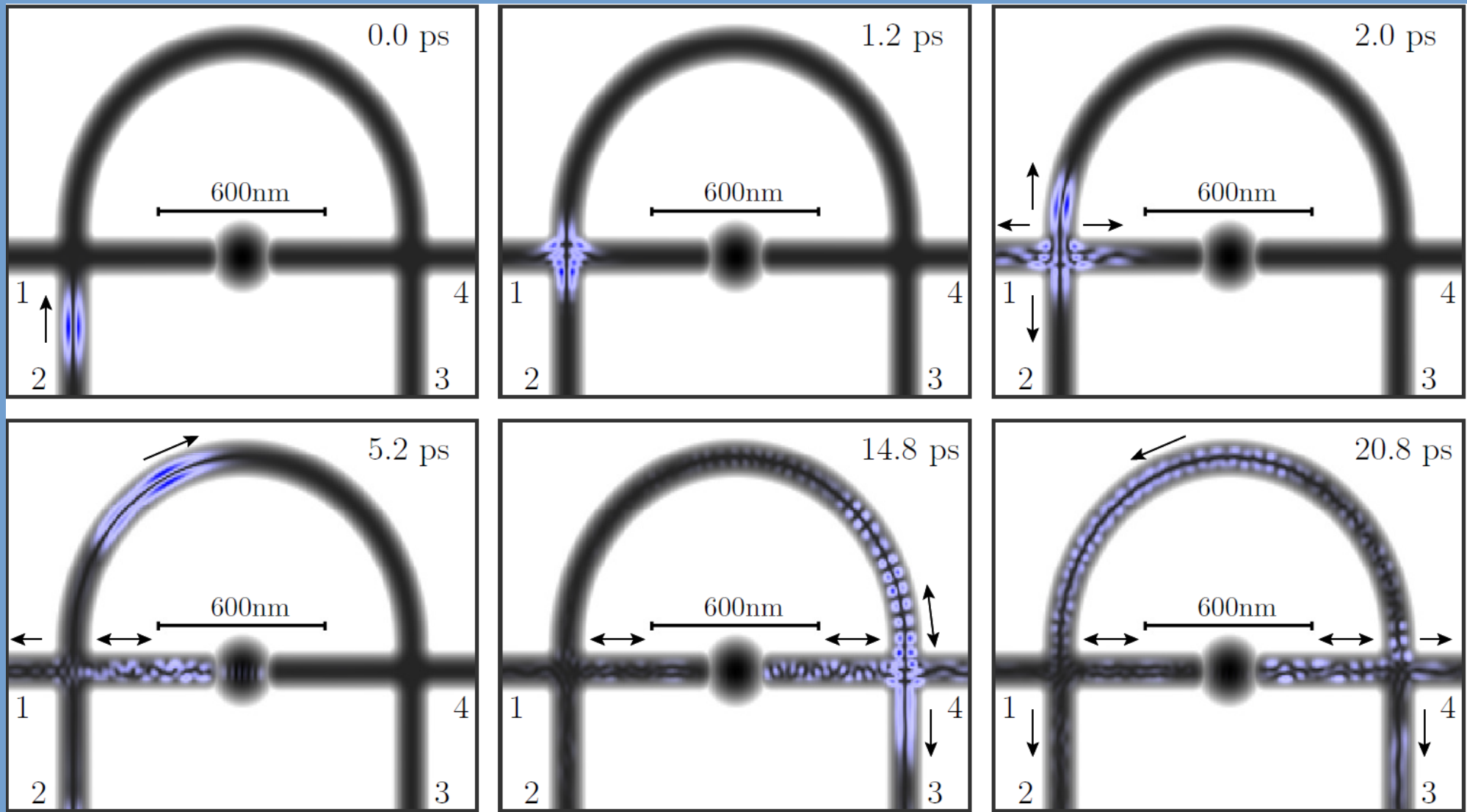


$$g = \frac{I}{V} = \frac{2e^2}{h} |t|^2$$

$$t = e^{i\alpha} |t|$$



M. Avinun-Kalish, M. Heiblum, O. Zarchin, D. Mahalu, V. Umansky, *Nature* 436, 529 (2005).  
R.A. Molina, R.A. Jalabert, D. Weinmann, Ph. Jacquod, *Phys. Rev. Lett.* 108, 076803 (2012).



Simulaciones utilizando algoritmos paralelos con GPUs

C. Kreisbeck, T. Kramer, R.A. Molina, *J. Phys. Conden. Mat.* (2017)

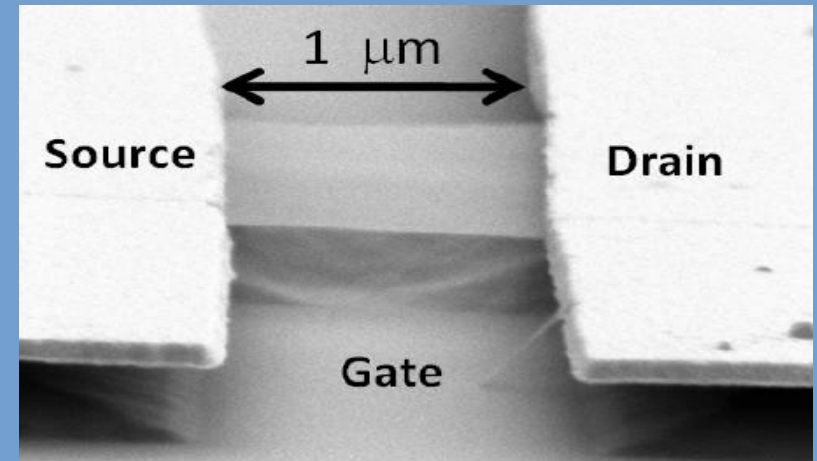
<https://jphysplus.iop.org/2017/03/08/how-a-wave-packet-travels-through-a-quantum-electronic-interferometer/>



# Nuevos Materiales:

## Grafeno

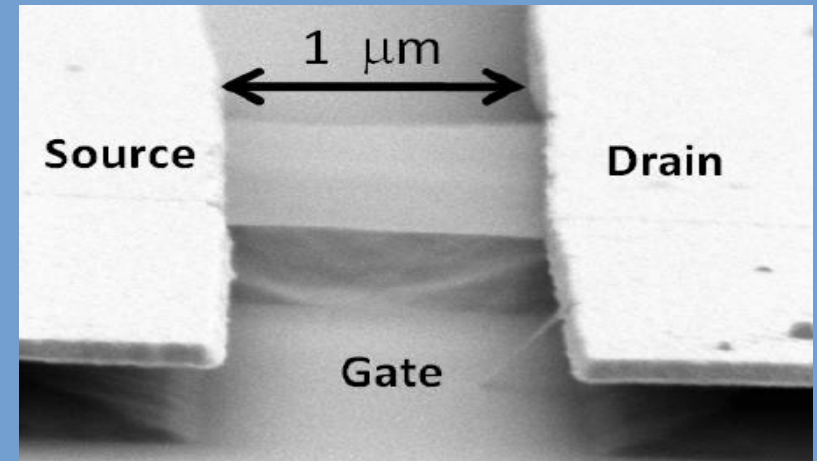
- Gran velocidad de los portadores de carga.
- Gran resistencia a la ruptura.
- Alto grado de transparencia.
- Gran flexibilidad.



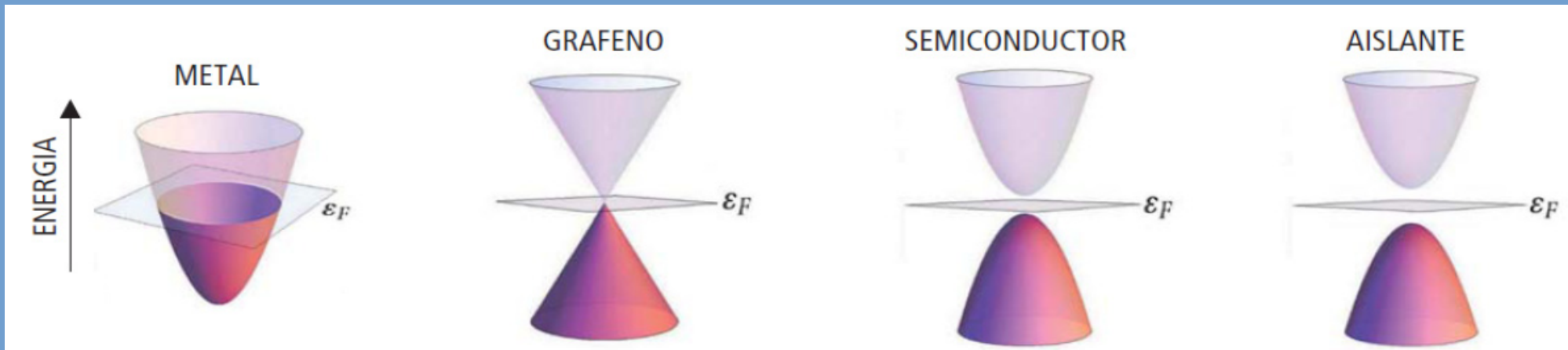
( Champagne research group )

# Nuevos Materiales: Grafeno

- Gran velocidad de los portadores de carga.
- Gran resistencia a la ruptura.
- Alto grado de transparencia.
- Gran flexibilidad.



( Champagne research group )

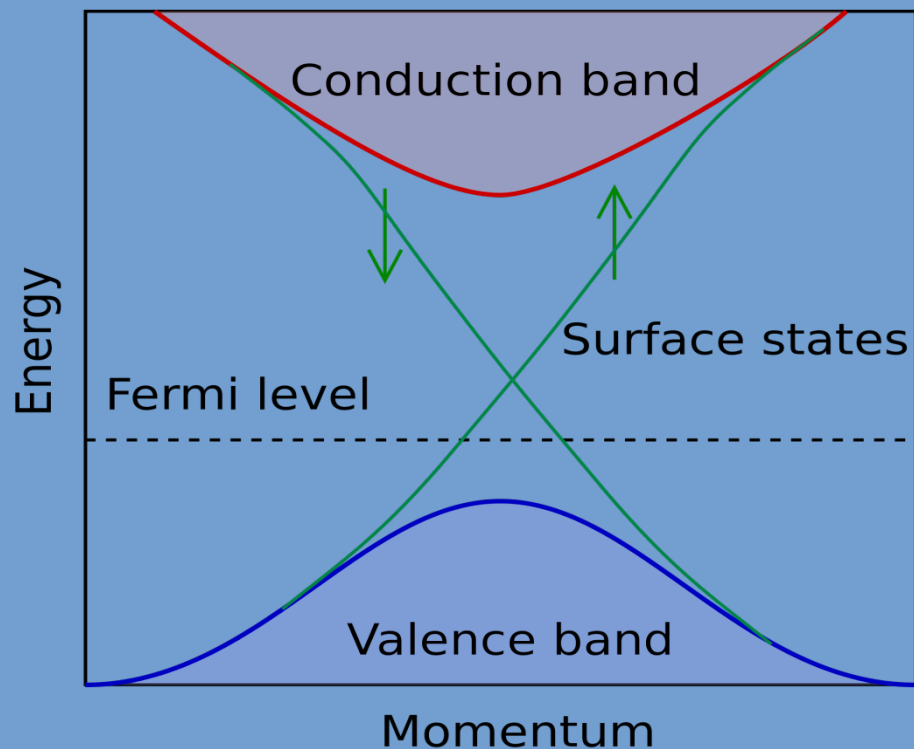


J. González, M.A. Hernández, F. Guinea, Investigación y Ciencia (septiembre 2010)

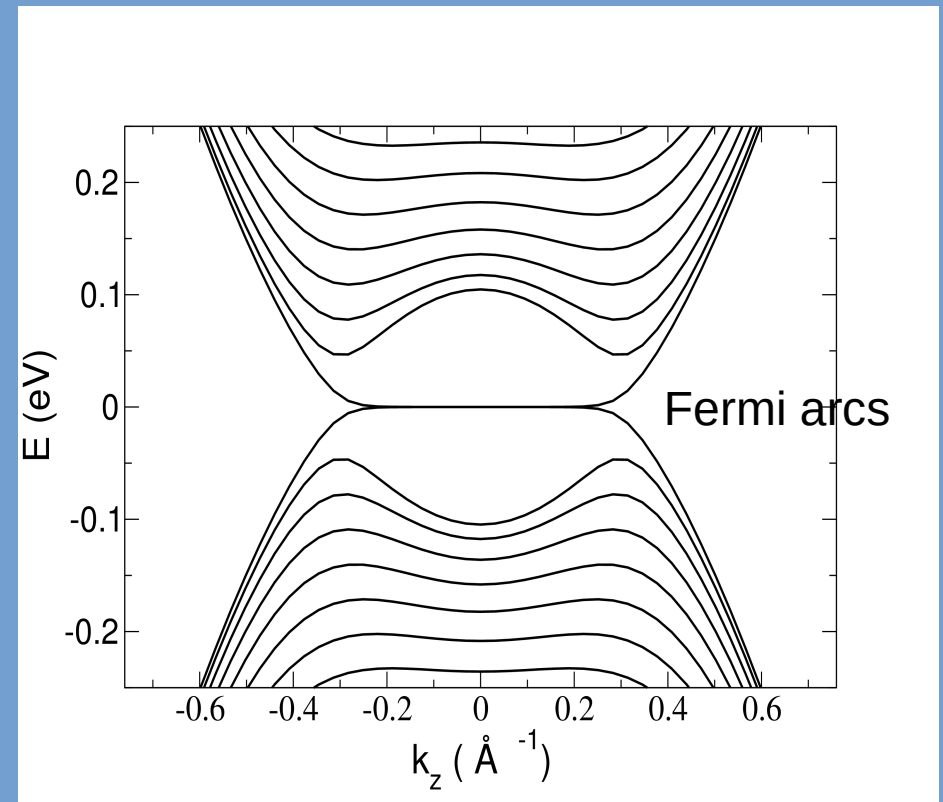
# Materia cuántica topológica

(Premio nobel 2016: Thouless, Haldane, Kosterlitz)

Aislantes topológicos

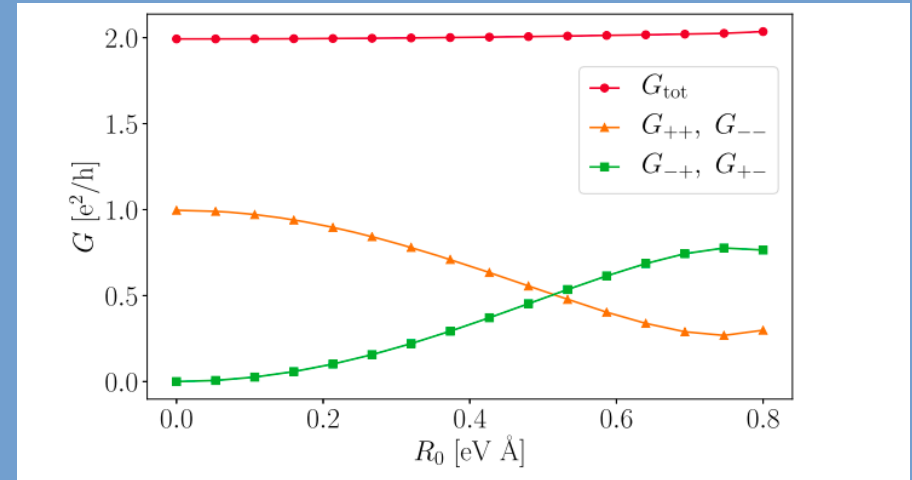
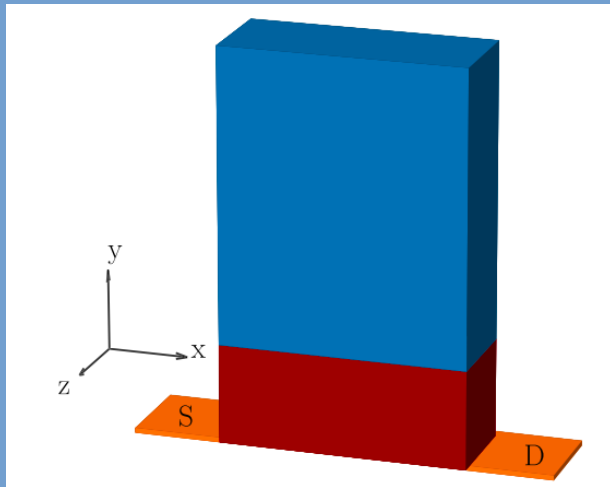


Semimetales de Weyl

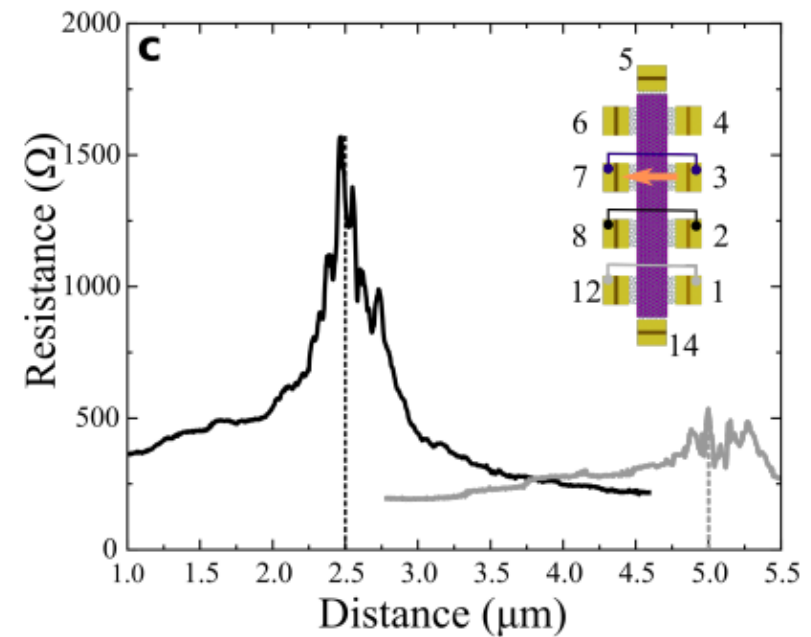
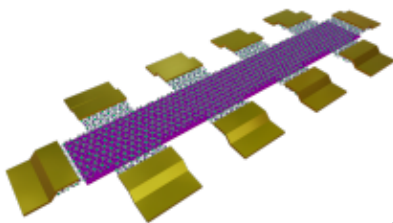
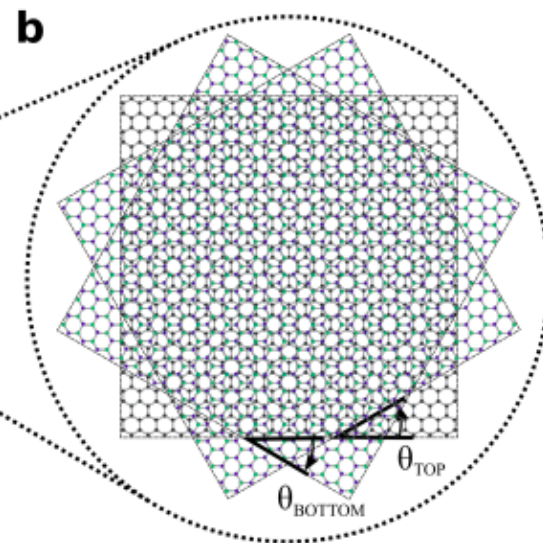
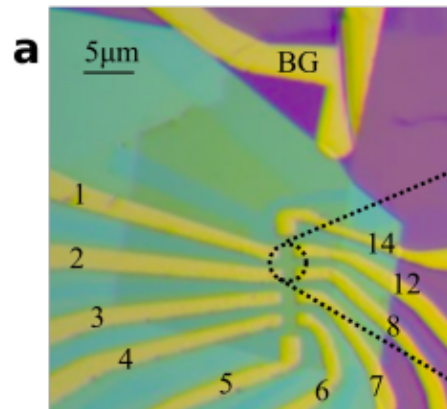


J. González, R.A. Molina, Phys. Rev. Lett. (2016)

# Resultados recientes: Corrientes de espín y de valle

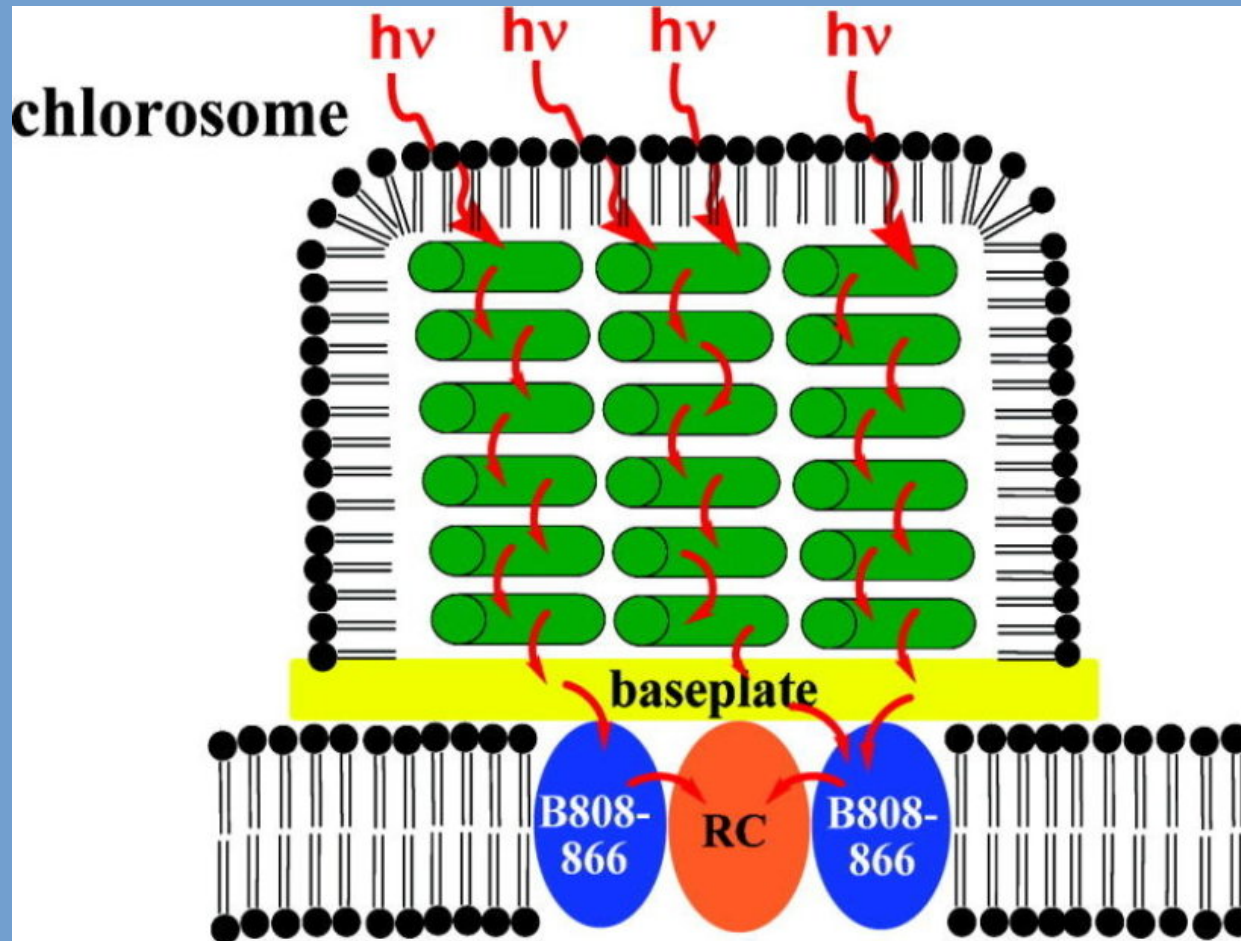


Y. Baba et al. New J. Phys. 2022



Salvador-Sánchez et al. ArXiv:2206.04565

# Transporte cuántico en biomoléculas: fotosíntesis



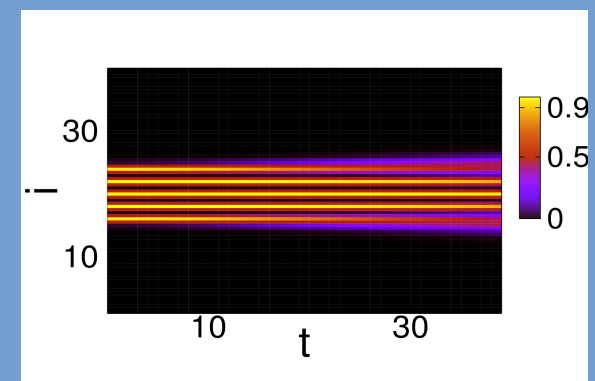
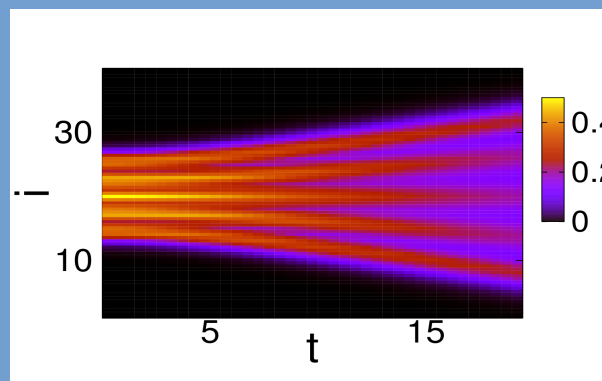
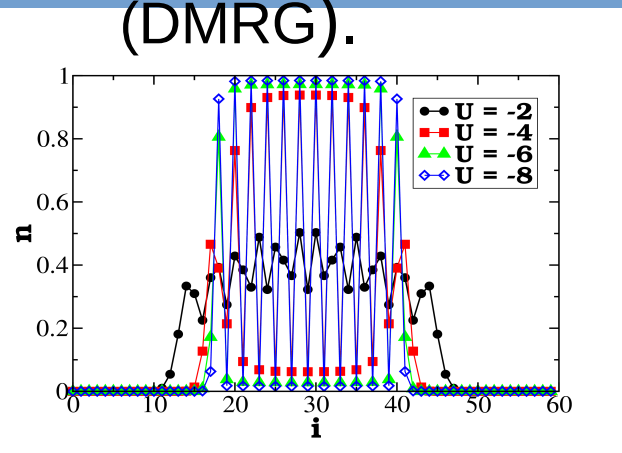
# Efectos de la interacción

- En metales macroscópicos (alta densidad de electrones) la interacción electrónica está apantallada. Campo medio nos da una buena descripción (líquido de Fermi).
- En sistemas mesoscópicos de baja dimensionalidad (0D, 1D, 2D,...) hay una baja densidad de electrones, el apantallamiento no es efectivo.
- La interacción produce nuevas fases de la materia (Ej: líquido de Luttinger en 1D, cristalización de fermiones en redes ópticas, líquidos de espín).
- La interacción es muy difícil de tratar tanto conceptualmente como numéricamente. En nuestro grupo usamos tanto modelos exactamente solubles como **algoritmos numéricos avanzados** (DMRG).




# Efectos de la interacción

- En metales macroscópicos (alta densidad de electrones) la interacción electrónica está apantallada. Campo medio nos da una buena descripción (líquido de Fermi).
- En sistemas mesoscópicos de baja dimensionalidad (0D, 1D, 2D,...) hay una baja densidad de electrones, el apantallamiento no es efectivo.
- La interacción produce nuevas fases de la materia (Ej: líquido de Luttinger en 1D, cristalización de fermiones en redes ópticas, líquidos de espín).
- La interacción es muy difícil de tratar tanto conceptualmente como numéricamente. En nuestro grupo usamos tanto modelos exactamente solubles como **algoritmos numéricos avanzados** (DMRG).



R.A. Molina, J. Dukelsky, P. Schmitteckert, Phys. Rev. A 80, 013616 (2009).



The image features a complex, repeating pattern of interconnected white lines forming a lattice of irregular polygons, primarily hexagons and pentagons. Each vertex of this lattice is marked with a small, solid-colored circle. The colors of these circles are diverse, including shades of blue, green, yellow, orange, red, purple, and pink, creating a vibrant, multi-colored effect against the dark background. Centered over this pattern is the Spanish phrase "¡Gracias por vuestra atención!" in a clean, white, sans-serif font. The text is arranged in two lines: "¡Gracias por vuestra" on the top line and "atención!" on the bottom line. The overall composition is balanced and visually engaging due to the contrast between the bright colors and the dark background.

¡Gracias por vuestra  
atención!