

# Nanotecnología y Metrología: cooperación entre IMDEA Nanociencia y el Centro Español de Metrología

M. Menghini<sup>1</sup>, I. Figueruelo<sup>1</sup>, J. García<sup>1</sup>, M. Acebrón<sup>1</sup>, F. Raso<sup>2</sup>, L. Matías<sup>2</sup>, D. Peral<sup>2</sup>, Y. Alvarez<sup>2</sup>, J. Díaz de Aguilar<sup>2</sup>, E. Cánovas<sup>1</sup>, D. Granados<sup>1</sup>, J. A. Robles<sup>2</sup> y R. Miranda<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IMDEA Nanociencia, C/ Faraday 9 (Campus Universitario de Cantoblanco), 28049 Madrid

<sup>2</sup>Centro Español de Metrología (CEM), C/ Alfar 2, 28760 Tres Cantos

*7º Congreso Español de Metrología  
27 Septiembre 2022, Ávila*

## MISIÓN / OBJETIVOS

- Atraer **TALENTO científico** e integrarlo en el sistema de I+D
- Crear **EQUIPOS** de alto rendimiento para competir con éxito en las más exigentes convocatorias y **atraer financiación**
- Generar **CONOCIMIENTO** disruptivo en Nanociencia y Nanotecnología
- Proporcionar **INFRAESTRUCTURAS**, laboratorios, e instrumentación de frontera
- Enfocar la investigación hacia la resolución de los **GRANDES RETOS** sociales y empresariales



# IMDEA Nanociencia en CIFRAS

www.nanociencia.imdea.org

## EQUIPO



### 250 Investigadores

208 Investigadores IMDEA + 19 Asociados/Visitantes

- 106 Doctores
- 102 estudiantes de doctorado

23 Científicos de instrumentación y tecnólogos

### 17 Gestión y Administración

Edad media: 34,4 años / 47,4% mujeres

16 nacionalidades

## FINANCIACIÓN

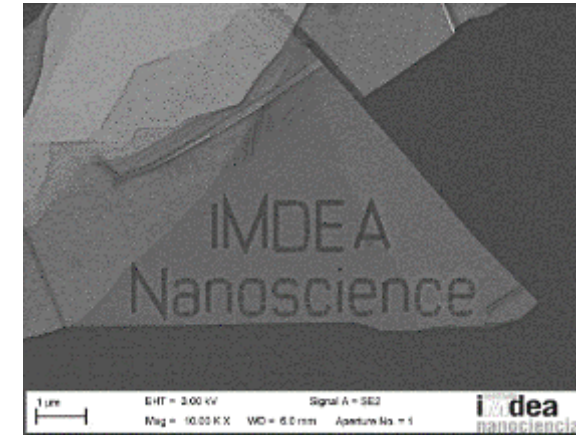


**75% del presupuesto** proviene de financiación externa competitiva (30% en 2009)

**45 proyectos** activos (+140 desde 2008)

**24 proyectos** europeos coordinados (acumulado)

**7 proyectos** del



## PROYECTOS



# Programas de Investigación @ IMDEA

www.nanoscience.imdea.org

**P1**  
programme

**Nanotechnology for Energy Harvesting**

Research lines

**P2**  
programme

**Quantum Materials at the Nanoscale**

Research lines

**P3**  
programme

**Nanotechnology for Health-Care**

Research lines

**P4**  
programme

**Nanomagnetism for Information and Communication Technologies**

Research lines

**P5**  
programme

**Ultrafast phenomena at the Nanoscale**

Research lines

**P6**  
programme

**Nanotechnology for Critical Raw Materials and Sustainability**

Research lines

Horizontal Platform

**Disruptive Innovation and Technology**



# Infraestructura @ IMDEA Nanociencia

nce.imdea.org

Sede de ~ 10.000 m<sup>2</sup>  
> 45 laboratorios



- *Center for Nanofabrication*
- *Nuclear Magnetic Resonance*
- *Helium Liquefier Plant / Recovery System*
- *Vibrating Sample Magnetometry*
- *X-ray Diffractometer*
- *Scanning Transmission Electron Microscopy*
- *5 Scanning Tunneling Microscopes*
- *Non Contact AFM in UHV*
- *Femtosecond lasers*
- *He cryostat for transport / optoelectronics*
- *Molecular Beam Epitaxy*
- *Growth systems by sputtering*
- *Pilot Plant for Nanoimprinting*
- *Cell Culture Labs*
- *Biochemistry Common Labs*
- *Chemical Characterization Lab*
- *Synthesis Labs*
- *Mechanical Workshop*





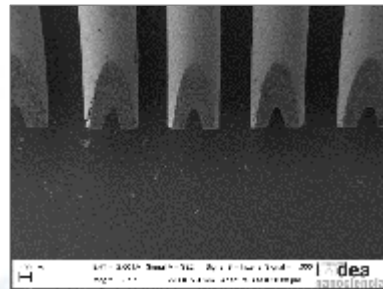
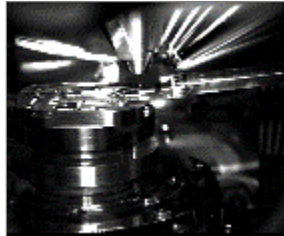
# Infraestructura @ IMDEA Nanociencia

## Centro de Nano-fabricación de IMDEA Nanociencia

www.nanoscience.imdea.org



[daniel.granados@imdea.org](mailto:daniel.granados@imdea.org)



Acreditado por la Oficina Nacional de Seguridad (ONS)

Zona de acceso restringido CLASE II

NATO Secret / EU Secret / ESA Secret



# Colaboración IMDEA - CEM

## Sinergia

- *Multidisciplinar*
- *Innovación disruptiva*
- *Soluciones innovadoras en metrología*

*Convenio bilateral (BOE-A-2020-4190)*



# Colaboración IMDEA - CEM

- ✓ Desarrollo de métodos y procedimientos de medida y trazabilidad metrológica
- ✓ Proyectos de I+D+i
- ✓ Formación, divulgación y asesoramiento científico y tecnológico en el campo de la Metrología.
- ✓ Líneas principales de investigación:
  - ❖ **Nano-patrones dimensionales**
  - ❖ **Grafeno para uso en metrología**
  - ❖ **Métodos de caracterización de nanopartículas**





# Colaboración IMDEA - CEM

El CEM y el IMDEA Nanociencia colaboran en el proyecto (coordinado por el CEM) EMPIR-EURAMET COMET: *Two dimensional lattices of covalent- and metal-organic frameworks for the Quantum Hall resistance standard*

Además IMDEA participa en otros dos proyectos EMPIR:

- ISO-G-SCoPe: *Standardisation of structural and chemical properties of Graphene* (Coordinador NPL)
- MEMQuD: *Memristive devices as quantum standard for nanometrology* (Coordinador INRIM)





# Colaboración IMDEA - CEM

- ✓ Desarrollo de métodos y procedimientos de medida y trazabilidad metrológica
- ✓ Proyectos de I+D+i
- ✓ Formación, divulgación y asesoramiento científico y tecnológico en el campo de la Metrología.
- ✓ Líneas principales de investigación:
  - ❖ Nano-patrones dimensionales
  - ❖ **Grafeno para uso en metrología**
  - ❖ Métodos de caracterización de nanopartículas



# Grafeno en metrología

*El efecto Hall cuántico (EHC) es usado en metrología como patrón de resistencia eléctrica desde 1980*

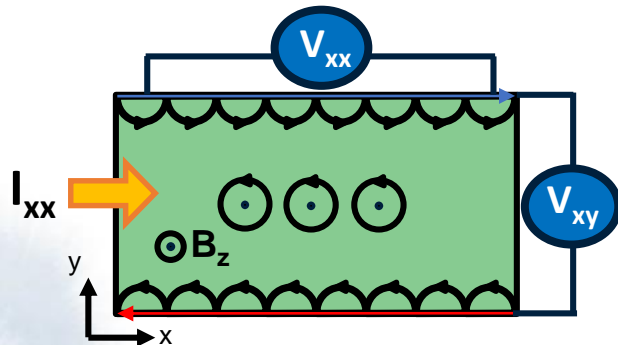
Sistema de electrones 2D



Niveles de energía  
cuantizados



Cuantización de  
la resistencia Hall



$$\rho_{xx} = \frac{W V_{xx}}{L I_{xx}} \quad \rho_{xy} = \frac{V_{xy}}{I_{xx}} = \frac{h}{ve^2}$$

$W$ : ancho de la muestra

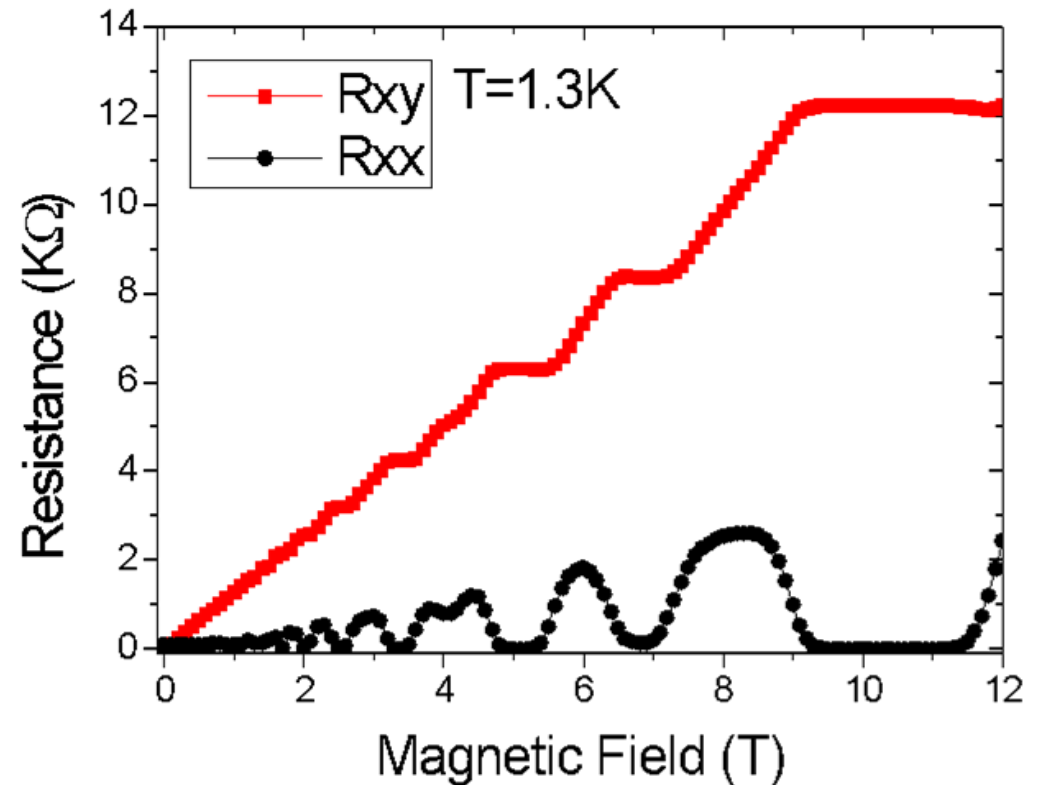
$L$ : separación entre electrodos

$h$ : constante de Planck

$e$ : carga del electron

$v$ : número entero

- ✓ **baja temperatura**
- ✓ **alto campo magnético**



EHC en heteroestructuras de **AlGaAs/GaAs** medido en el CEM



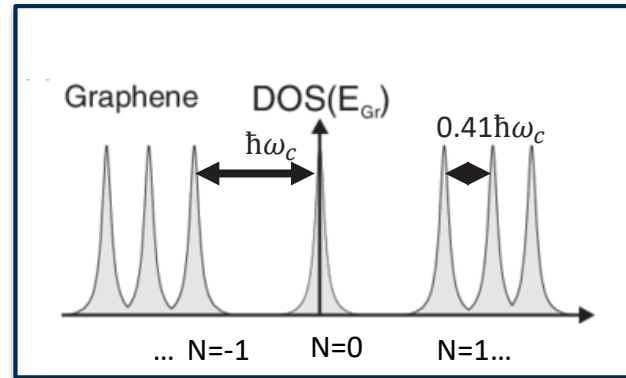
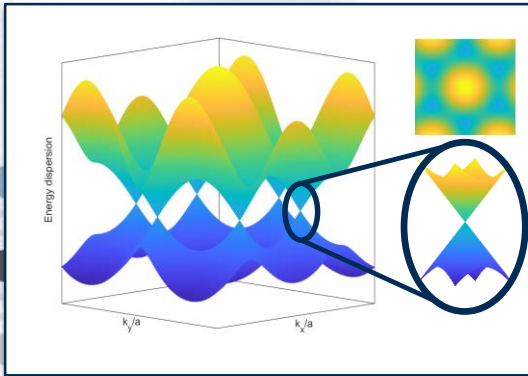
# Grafeno en metrología

Limitaciones del EHC en  
GaAs/AlGaAs

- Muy baja temperatura ( $T \sim 1.3$  K)
- Alto campo magnético ( $H \sim 10$  T)
- Corriente del orden de decenas de  $\mu\text{A}$

***El grafeno es una alternativa prometedora gracias a sus peculiares propiedades electrónicas***

Estructura de bandas tipo conos de Dirac  
Espaciado entre niveles de energía  $\propto \sqrt{\epsilon}$



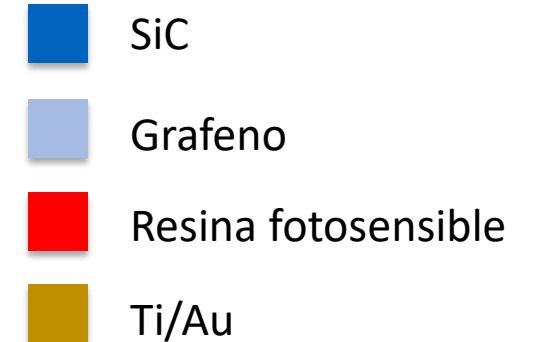
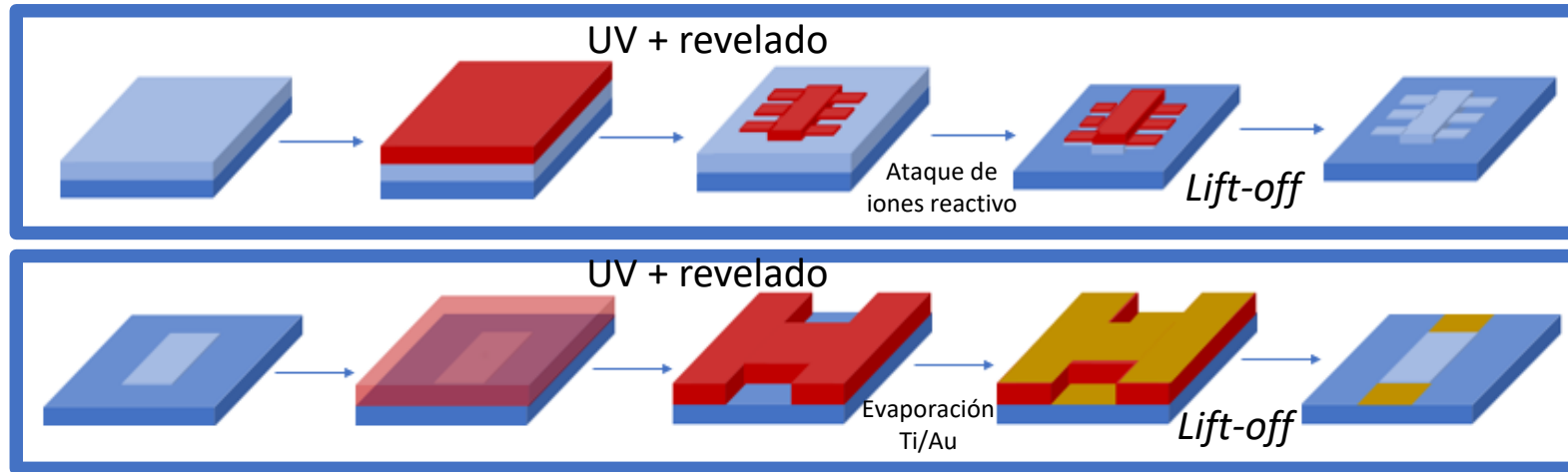
**a**

$1 \times 10^{-9}$  accuracy of  $R_H$

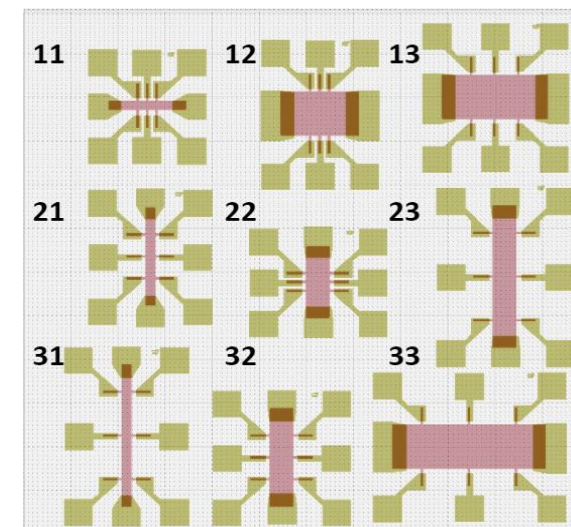
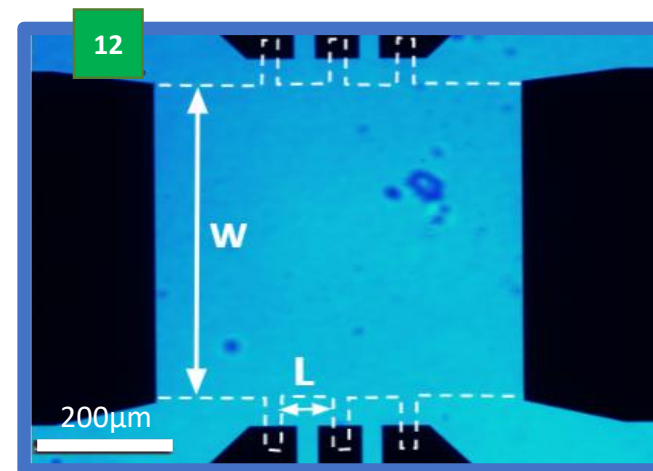
	Usual GaAs/ AlGaAs (ref. 13)	Graphene previous work (ref. 28)	Graphene this work
$B$	10 T	11.5 T (1.3 K, 60 $\mu\text{A}$ )	3.5 T (b) (1.3 K, 10 $\mu\text{A}$ )
$T$	1.3 K	7.5 K (14 T, 60 $\mu\text{A}$ )	10 K (c) (8.5 T, 20 $\mu\text{A}$ )
$I$	50 $\mu\text{A}$	400 $\mu\text{A}$ (14 T, 0.3 K)	500 $\mu\text{A}$ (d) (8 T, 1.3 K)

# Efecto Hall cuántico en grafeno

*Fabricación de dispositivos Hall (sala limpia @ IMDEA Nanociencia)*



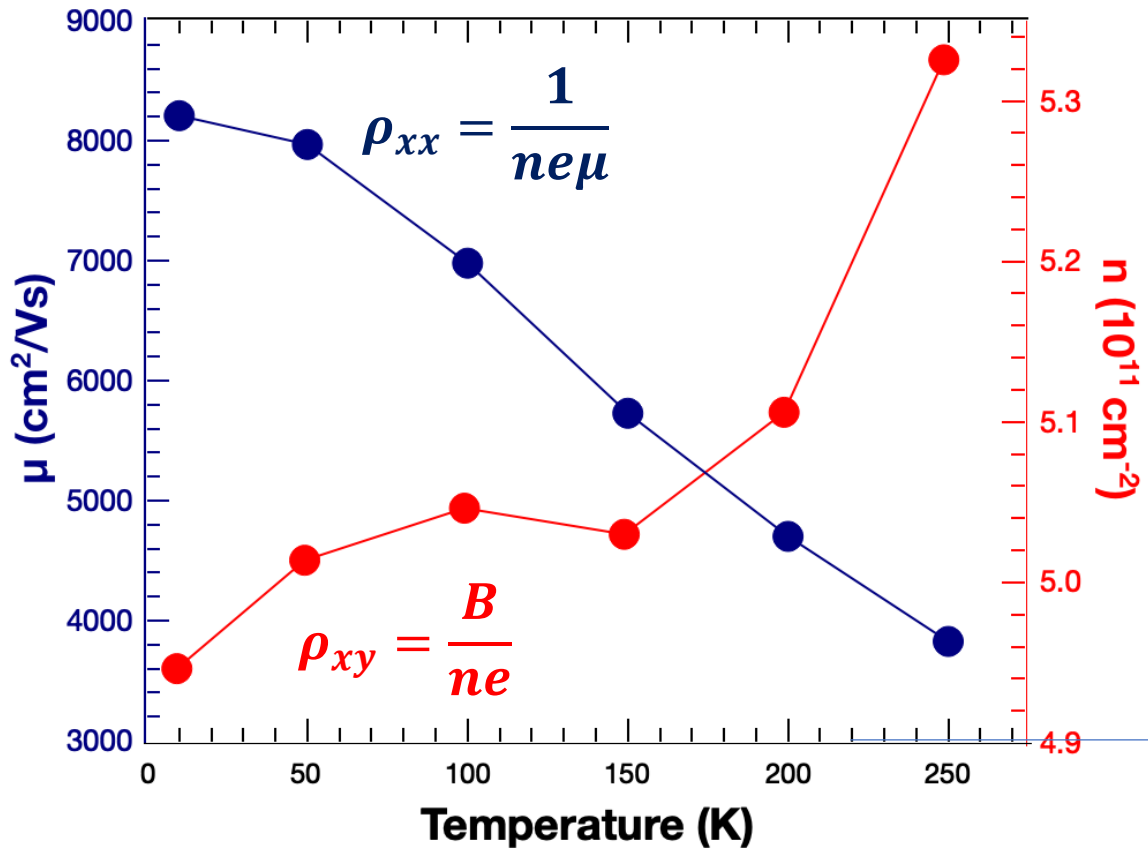
- Grafeno epitaxial sobre SiC (Graphensic)
- Fabricación: 2 pasos de litografía óptica
- Evaporación de electrodos metálicos (Ti/Au (10/90 nm))



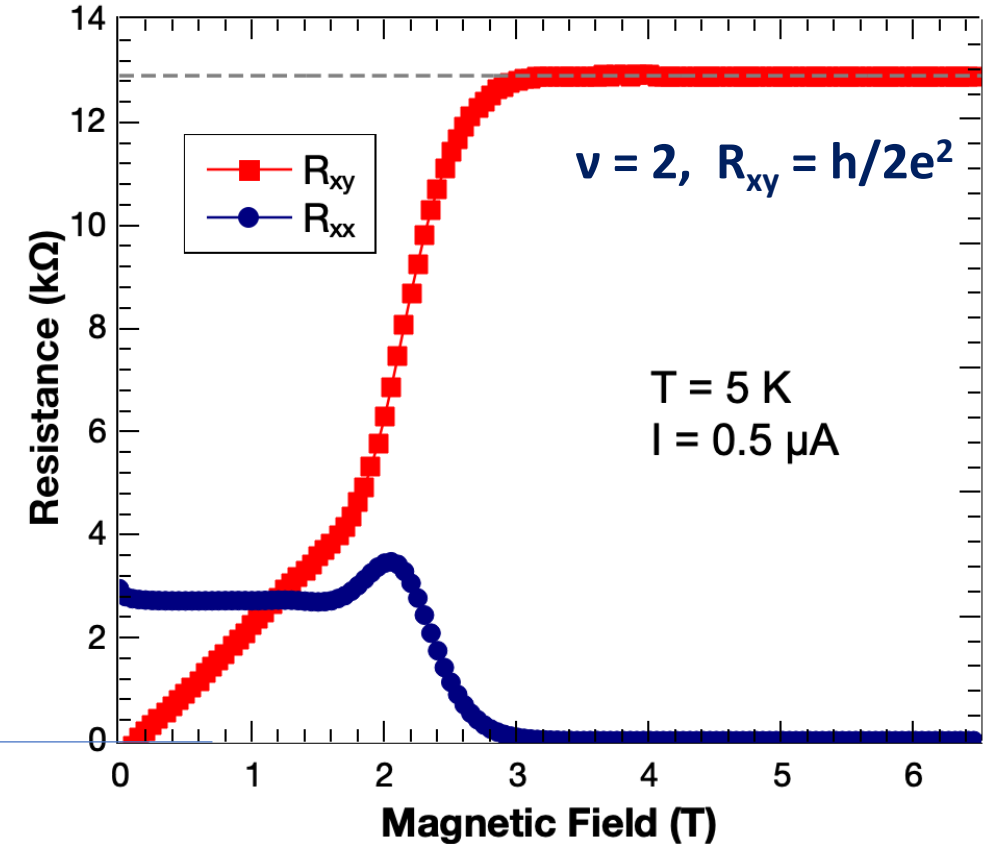


# Efecto Hall cuántico en grafeno

Movilidad y densidad de portadores vs temperatura



Resistencia vs temperatura



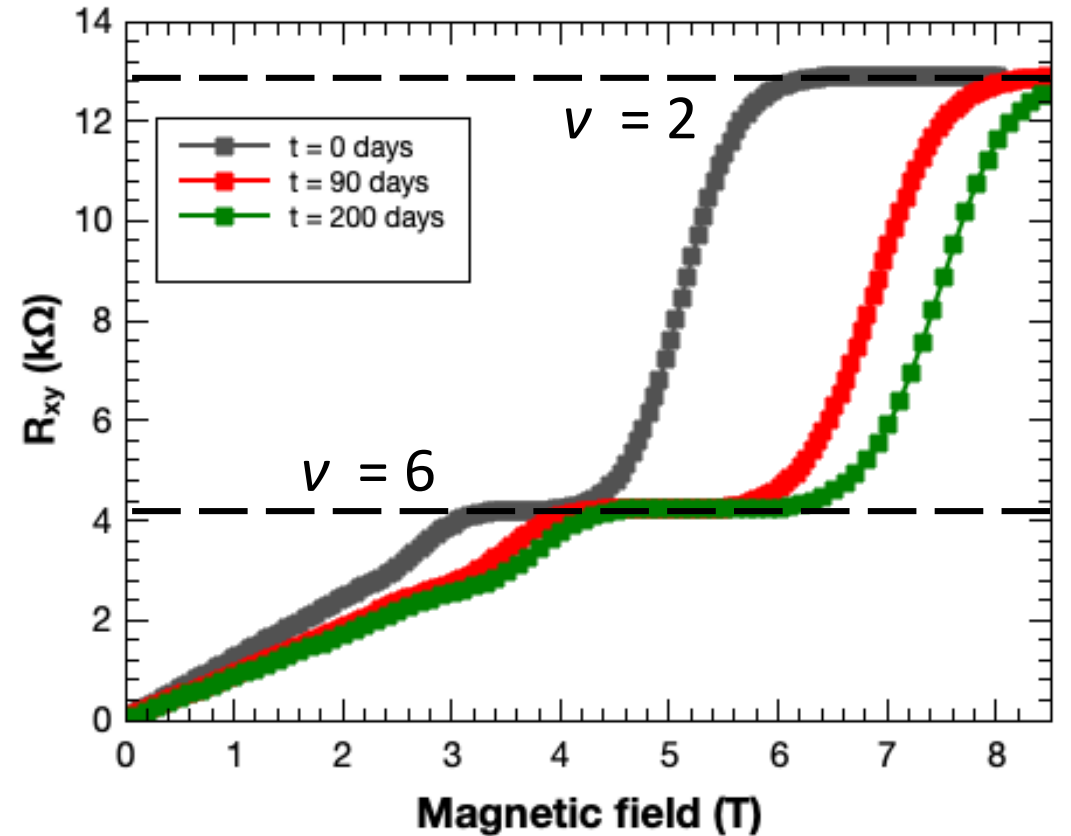
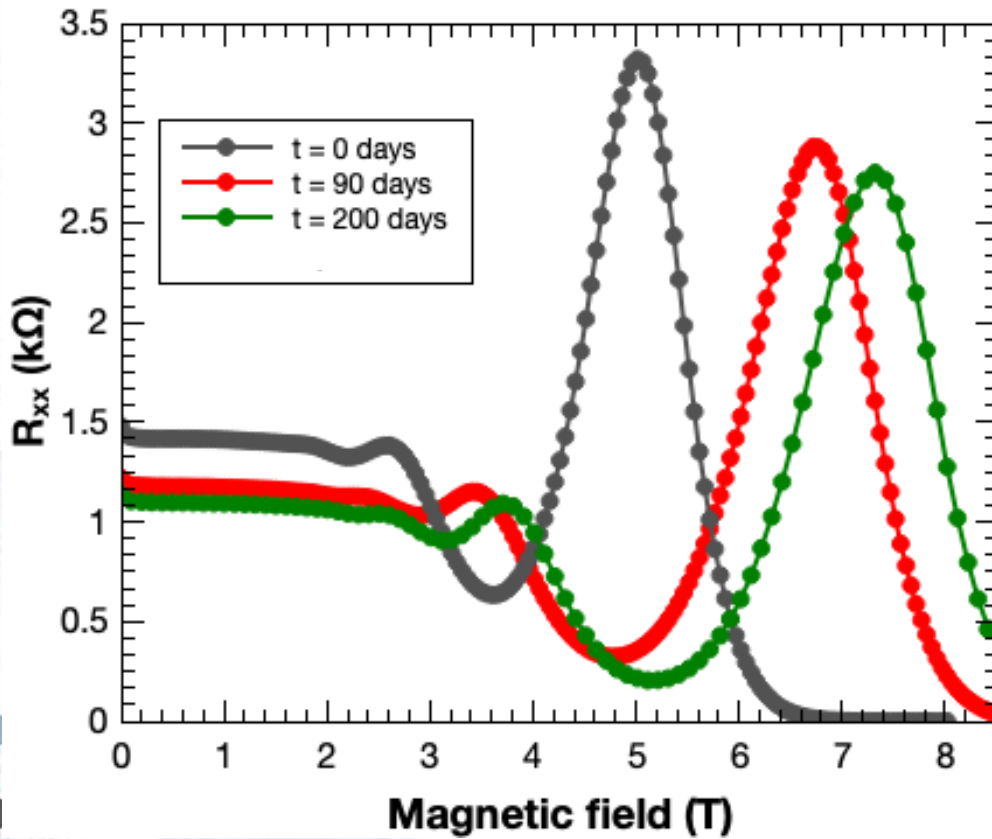
- Portadores tipo n (electrones)
- Movilidad  $\sim 8000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  @ 5 K
- Plateau  $\nu = 2$  @ 3T y 5 K

Condiciones experimentales más convenientes que en GaAs/AlGaAs

# Efecto Hall cuántico en grafeno

*Envejecimiento del dispositivo con el tiempo*

www.nanoscience.imdea.org



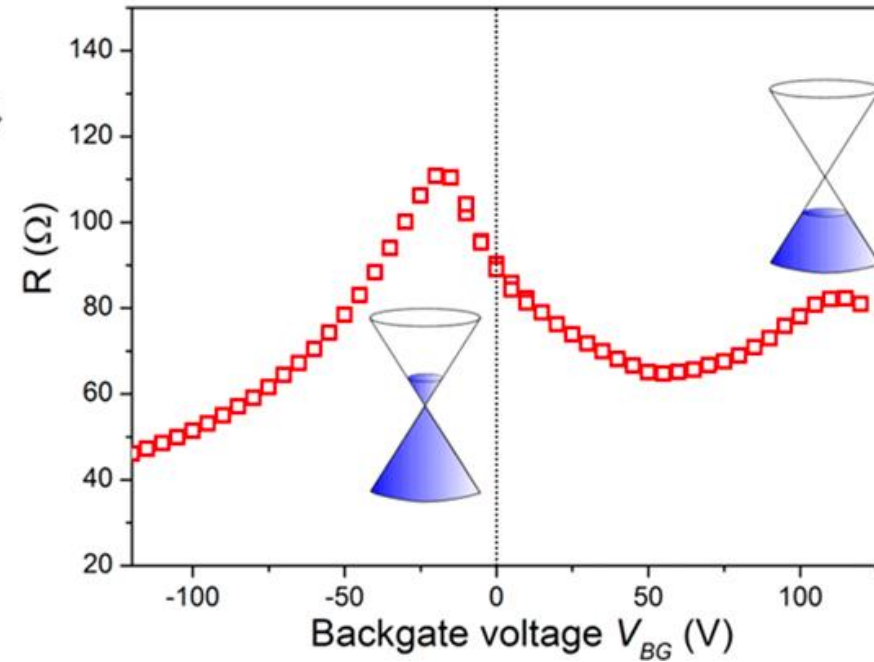
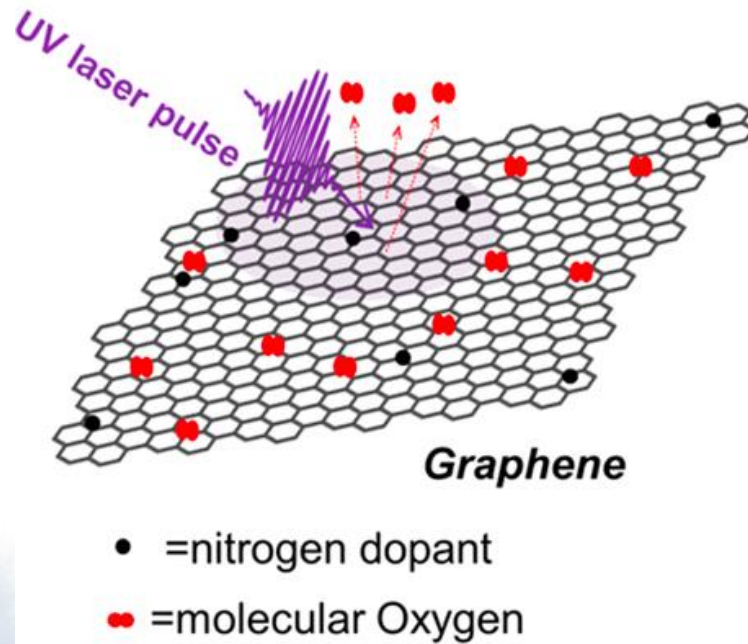
*Aumento de la densidad de portadores*



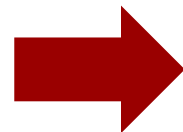
*Plateau  $\nu = 2$  se mueve a campos más altos  
Plateau  $\nu = 6$  se hace más extenso en campo*

# Efecto Hall cuántico en grafeno

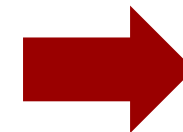
## Efecto de dopaje foto-químico



*Irradiación con luz UV*



*Desorción de oxígeno molecular*



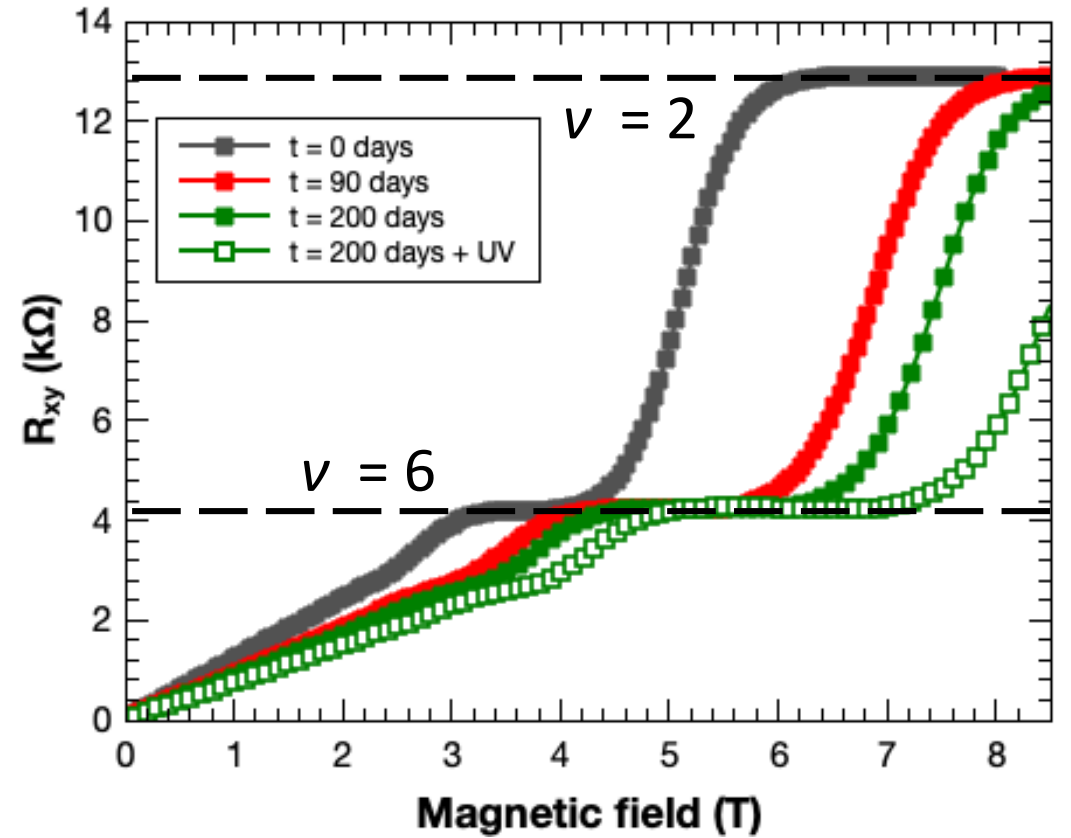
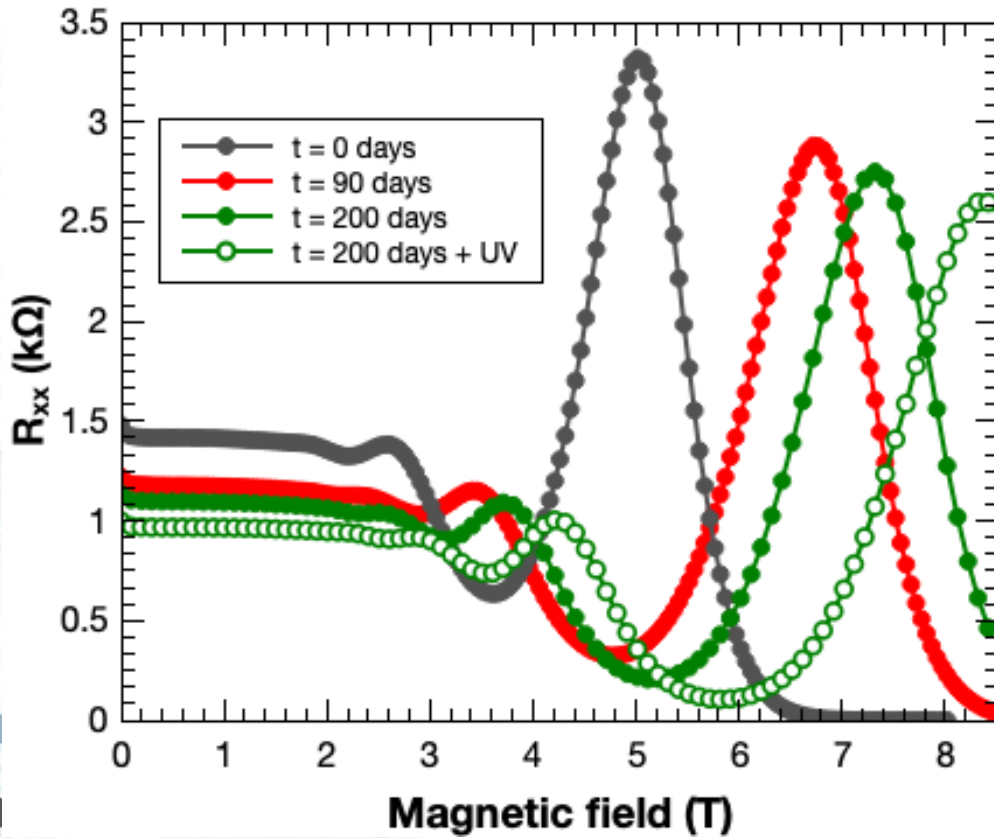
*Reducción de dopantes tipo p*



# Efecto Hall cuántico en grafeno

*Efecto de dopaje foto-químico*

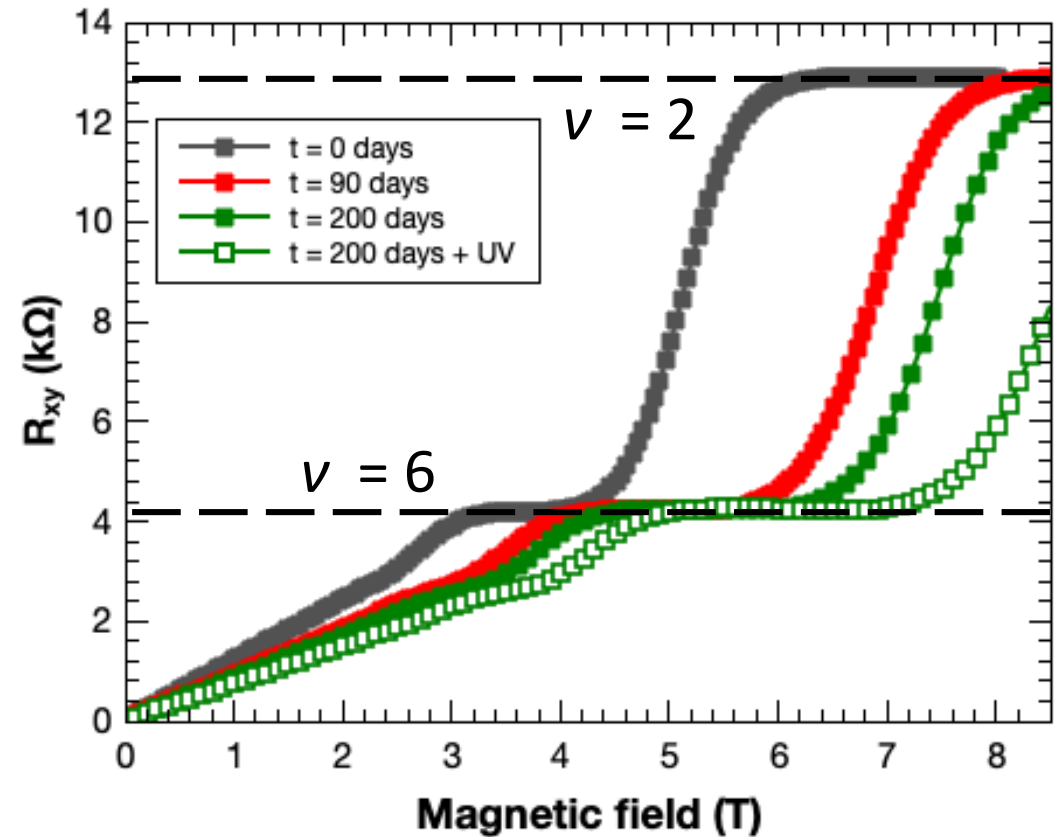
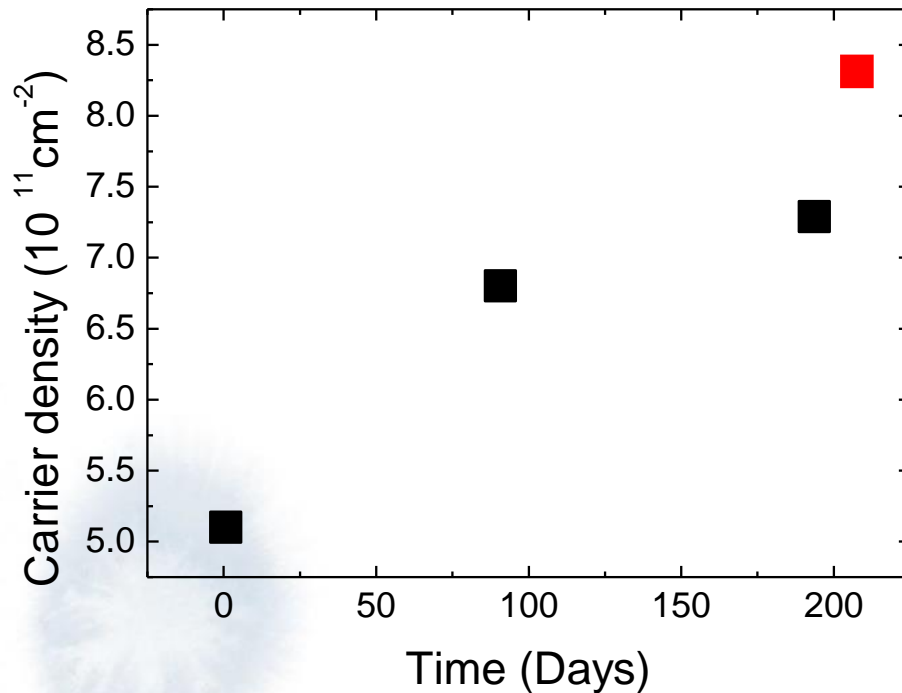
www.nanoscience.imdea.org



# Efecto Hall cuántico en grafeno

## *Efecto de dopaje foto-químico*

www.nanoscience.imdea.org



*Efecto similar al paso del tiempo debido al aumento efectivo de portadores tipo n*

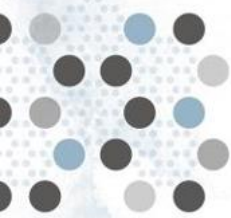


# Conclusiones

- ✓ Colaboración entre IMDEA y CEM ha dado lugar al desarrollo de dispositivos basados en grafeno con posible uso en metrología
- ✓ IMDEA y CEM (coordinador) participan en el proyecto europeo EMPIR-COMET
- ✓ Hemos fabricado y caracterizado dispositivos Hall de grafeno
- ✓ Hemos estudiado el envejecimiento y dopaje foto-químico de los dispositivos

## Próximos pasos:

- ✓ Definir procesos para extender la vida útil de dispositivos de grafeno
- ✓ Caracterización de los dispositivos con precisión metrológica
- ✓ Continuar reforzando la colaboración entre IMDEA-CEM



## ***Agradecimientos***

- Programa para centros de investigación de excelencia "*Severo Ochoa*" (MINCINN, SEV-2016-0686 y CEX2020-001039-S)
- PGC2018-098613-B-C21: *SporQuMat*
- EMPIR 20FUN03 COMET

# Gracias por vuestra atención!



