

Grafeno, el Nobel de Física 2010 y su paso por la Reunión del Grupo de Estado Sólido de la RSEF

Francisco Guinea y Fernando Bartolomé

El pasado mes de febrero se celebró en el Paraninfo de la Universidad de Zaragoza la Reunión de 2010 del Grupo Especializado de Física de Estado Sólido de la RSEF. El comité científico fue, como es habitual, la junta de gobierno del grupo, y el comité organizador lo integraban profesores e investigadores del Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (CSIC-UZ). La reunión atrajo la participación de 180 físicos de todo el país, siguiendo la estela de las celebradas en Madrid, Calella, San Sebastián, Alicante, y Santiago, e igual que en aquéllas, durante 3 días se presentaron y discutieron las últimas tendencias en Física del Estado Sólido, con invitados del más alto nivel internacional.

La intención de la Junta de Gobierno del Grupo ha sido, desde hace al menos una década que las Reuniones del GEFES motivasen a los jóvenes investigadores y por ello, tanto los invitados extranjeros como los españoles a quienes se propone presentar una comunicación oral son científicos en su inmensa mayoría jóvenes, con status cercano al de postdoc o al de investigador recientemente estabilizado. La reunión de Zaragoza no fue una excepción: entre otros invitados, contamos para dar las Conferencias Plenarias con (relativamente) jóvenes y brillantes científicos: Hans Hilgenkamp, de la Universidad de Twente en Holanda (miembro de la *Joven Academia Europea*), Wolfgang Wernsdorfer, del CNRS en Grenoble (medalla Internacional *Olivier Kahn*), Sergio Valenzuela (premio Young Scientist Award 2009 de la sección de magnetismo de la IUPAP) y Pietro Gambardella (autor entre otros muchos resultados de un *top-ten* de *Science*), ambos del CIN2, en Barcelona, y Konstantin Novoselov de la Universidad de Manchester, a quien se propuso inaugurar la Reunión.

Cuando invitamos a *Kostya* Novoselov ya había recibido el premio al Joven Científico de la IUPAP en Física de Bajas Temperaturas de 2008, el *Nicholas Kurti Prize* de Bajas Temperaturas de 2007, y junto a A. Geim, el premio de la División de Materia Condensada de la European Physical Society de 2008. Evidentemente, invitar a Novoselov no era ningún “riesgo”: tanto por la repercusión de sus trabajos en grafeno [1,2] (¡estos dos artículos suman casi 6000 citas en seis años!) como por los galardones acumulados, *Kostya* era ya hace unos años un valor seguro de la física de la materia condensada. Para nuestra satisfacción, *Kostya* aceptó nuestra invitación tan pronto como sus obligaciones familiares se lo permitieron (sus hijas Victoria y Sofia nacieron poco después de invitarle). Como nos comunicó, pesó en su decisión el hecho de que mantiene una asidua colaboración con varios científicos españoles. Para completar con el mayor éxito este palmarés, la Real Academia de Ciencias de Suecia otorgó el pasado 6 de

octubre el Premio Nobel de Física 2010 a K. Novoselov y a su mentor y ahora colaborador, Andre Geim, también de la Universidad de Manchester “*por sus innovadores experimentos en el material bidimensional grafeno*”.

Kostya Novoselov es un científico tímido que sin embargo, sorprende al interlocutor por su soltura y claridad cuando habla de física. Científicamente, Geim y él tienen las ideas muy claras: en ciencia merece la pena intentar líneas de trabajo arriesgadas. El resultado no va a ser *más de lo mismo*. Anteriores resultados de Geim, como la levitación de materiales diamagnéticos en altos campos magnéticos lo corroboran. En particular, la levitación de ranas vivas le valió el premio Ignobel de Física, que conceden los estudiantes de Harvard y la revista “*Annals of Improbable Research*” a temas que “*primero hacen reír, y luego pensar*”. Andre Geim es la primera persona en obtener este premio y también el premio Nobel. Igualmente, el grupo fabricó una cinta adhesiva extraordinariamente fuerte basada en el mecanismo que usan las salamanquesas para fijarse a paredes verticales.

El grupo de Andre Geim, que incluía a *Kostya* Novoselov, se propuso buscar materiales lo más bidimensionales posibles, a partir de compuestos que se pudieran exfoliar fácilmente.

Uno de ellos es el grafito, que está compuesto por láminas débilmente enlazadas entre sí, de átomos de carbono fuertemente enlazados. Al arrastrar el grafito sobre otro material, se desprenden bloques de láminas, lo que permite por ejemplo escribir con un lápiz. Es de destacar que otros compuestos de carbono, con muchas similitudes al grafeno, ya habían atraído la atención de los científicos. Así, el descubrimiento en el espacio exterior de los fullerenos, o balones de carbono, llevó al premio Nobel de Química en el año 1994, y los llamados polímeros orgánicos metálicos, como el poliacetileno, dieron lugar al premio Nobel



VI reunión del Grupo Especializado de Física de Estado Sólido de la Real Sociedad Española de Física, Zaragoza, febrero 2010. De izquierda a derecha, F. Bartolomé y K. Novoselov.

de Química en el año 2000. Se conocía también la formación de capas de átomos de carbono sobre superficies muy perfectas de ciertos metales desde los años 70, pero estas láminas, que ahora sabemos que eran de grafeno, estaban consideradas como contaminación a eliminar.

Los investigadores de Manchester perfeccionaron la exfoliación del grafito que realizamos al escribir con un lápiz, utilizando cinta adhesiva que después frotaban contra un material transparente, el óxido de silicio, SiO_2 . Al observar con un microscopio óptico los restos depositados sobre SiO_2 , los investigadores observaron trozos de distintos espesores [1,2]. Al medir su grosor, observaron trozos de tamaños cercanos a una micra que debían estar formadas por una capa de un solo átomo de espesor. Gracias a su experiencia en medidas de muestras de pequeñas dimensiones, lograron colocar sobre ellos contactos metálicos y, además, fabricar condensadores con otros componentes también metálicos, o “puertas”. Ello permitió cambiar el número de portadores de carga en su interior a voluntad, de la misma forma en que se hace en los componentes de un circuito integrado en dispositivos electrónicos.

Estos avances no tuvieron una repercusión inmediata. Fueron presentados en el año 2005 en una reunión muy concurrida de la Sociedad Americana de Física, pero ante una audiencia de unas veinte o treinta personas (tal como relató inmediatamente después a uno de los autores uno de los asistentes, Antonio Castro Neto). El año siguiente, el grupo de Manchester, y otro grupo de la Universidad de Columbia en Nueva York, que habían sido los investigadores más próximos al descubrimiento del grafeno además de Andre Geim y Kostya Novoselov publicaron simultáneamente la observación del Efecto Hall Cuántico en el grafeno [3,4]. Ello demostraba que las muestras de grafeno se podían considerar un metal bidimensional de excelente calidad, y además presentaban propiedades anómalas, consistentes con portadores de carga, electrones y huecos,

sin masa, similares en varios aspectos a los electrones ultrarrelativistas de alta energía en el vacío. Estas propiedades eran consistentes con modelos teóricos que uno de los autores, junto al ya mencionado Antonio Castro Neto, y Nuno M.R. Peres de la Universidade do Minho de Portugal, estaban desarrollando simultáneamente [5]. Ahora sí, los resultados mencionados indujeron un interés excepcional en el grafeno. La explosión de trabajos de investigación sólo es similar a la que ocurrió tras el descubrimiento de superconductividad a alta temperatura en los óxidos de cobre. Parte de la rapidez de la incorporación de nuevos grupos a la investigación se debió a que el grupo de Manchester se ofreció muy generosamente a enseñar el procedimiento de fabricación y regalar muestras a todo aquel que les visitara.

Desde un punto de vista fundamental, el grafeno presenta muchas propiedades especiales, diferentes de las de cualquier otro material (ver, por ejemplo [6-9]). Además de la ya mencionada masa cero de los portadores de carga, la interacción entre electrones genera efectos similares a los observados en física de altas energías. El grafeno es el material más duro que se conoce, pero es también flexible. Es prácticamente transparente, y su pequeña opacidad es proporcional a la constante de estructura fina que determina las interacciones electromagnéticas, $\alpha \approx 1/137$. De hecho, es llamativo que una monocapa absorba una cantidad de luz fácilmente detectable. Químicamente es muy inerte, lo cual facilita sus aplicaciones en todo tipo de entornos. La red admite grandes deformaciones, que además, actúan sobre los electrones como campos magnéticos ficticios. Se han observado efectos compatibles con campos de hasta 300 Tesla, cuando en laboratorios dedicados a altos campos magnéticos no se llega a exceder los 80-90 Tesla. El interés de los laboratorios de investigación por el grafeno ha sido tal que, aunque la fabricación de muestras es relativamente sencilla, existen compañías que las producen comercialmente. Extrapolando los precios de las muestras de unas pocas micras cuadradas, que son unos 500-1.000 €, el grafeno valdría aproximadamente 10^{14} € por gramo.

El grafeno abre muchas perspectivas en ciencia aplicada. Se producen ya muestras de grandes dimensiones, del orden de metros. El hecho de que sea un material laminar, metálico, transparente y flexible a la vez va a permitir que el grafeno se convierta en el material por excelencia para pantallas táctiles en teléfonos móviles y otros dispositivos. También se espera utilizar en focos de iluminación y células solares. En electrónica se están desarrollando dispositivos que funcionan a altas frecuencias, para la transmisión muy rápida de datos (las aplicaciones a baja frecuencia del grafeno están limitadas por la llamada “paradoja de Klein”, un efecto similar a propiedades de electrones relativistas por los que electrones se convierten en agujeros y viceversa). Las propiedades del grafeno se pueden modificar dentro de ciertos rangos, lo que permitirá aplicaciones como detector y como catalizador de reacciones químicas, y también como intermediario entre circuitos electrónicos y la radiación electromagnética (fotónica). Las aplicaciones del grafeno descritas arriba tienen como objeto el utilizar el grafeno para usos ya realizables con otros materiales. Las propiedades únicas del grafeno hacen previsible que en un



Nobel Symposium, Estocolmo, Mayo 2010
(foto cortesía de M.A. H. Vozmediano).

De izquierda a derecha A. K. Geim y Francisco Guinea.

futuro se puedan desarrollar dispositivos sólo imaginables gracias al grafeno. En España se investiga teóricamente en el grafeno incluso desde antes de su síntesis, ya que una lámina de átomos de carbono es un buen modelo de partida para estudiar el grafito y los fullerenos [9]. La realización experimental del grafeno aceleró enormemente estos trabajos. Las propiedades especiales del grafeno hacen que modificaciones directas de modelos ampliamente utilizados en Física de la Materia Condensada lleven a resultados sorprendentes, que a su vez son confirmados experimentalmente en poco tiempo. Se han realizado trabajos experimentales importantes en el CIN2, Barcelona, y en la Universidad Autónoma de Madrid, y existen muchos grupos con los medios y experiencia necesarios para hacer contribuciones destacables al campo. En el plano internacional, la investigación en grafeno es uno de los objetivos prioritarios en muchos países. La Unión Europea desarrolló un programa específico para impulsar el tema en Europa, Eurographene, en el que España declinó participar. Existen, además, programas específicos para investigar en grafeno al menos en Francia, Alemania, Reino Unido, Suiza, Holanda, Japón, Singapur, y Estados Unidos. La investigación en grafeno es un campo muy competitivo que avanza rápidamente, y muy satisfactorio a la vez. Existe un gran nivel de colaboración e intercambio de información entre los grupos más activos, situación no muy frecuente en otros campos. Cabe esperar que el grafeno siga ofreciendo sorpresas interesantes durante mucho tiempo.

Referencias

- [1] NOVOSELOV, K.S., GEIM, A.K., MOROZOV, S.V., JIANG, D., ZHANG, Y., DUBONOS, S.V., GRIGORIEVA, I.V., FIRSOV, A.A., *Electric field effect in atomically thin carbon films*, Science **306**, 666 (2004).
- [2] NOVOSELOV, K.S., GEIM, A.K., MOROZOV, S., JIANG, D., KATSNELSON, M.I., GRIGORIEVA, I.V., DUBONOS, S.V. AND FIRSOV, A.A., *Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene*, Nature **438**, 197 (2005).
- [3] NOVOSELOV, K.S., ET AL., *Two-Dimensional Gas of Massless Dirac Fermions in Graphene*, Nature **438**, 197 (2005).
- [4] ZHANG, Y.S. ET AL., *Experimental Observation of Quantum Hall Effect and Berry's Phase in Graphene*, Nature **438**, 201 (2005).
- [5] PERES, N.M.R., GUINEA, F., AND CASTRO NETO, A.H., *Electronic properties of disordered two-dimensional carbon*, Phys. Rev. B **73**, 125411 (2006).
- [6] CASTRO NETO, A.H., GUINEA, F., AND PERES, N.M.R., *Drawing Conclusions from Graphene*, Physics World **19**,33 (2006).
- [7] GEIM, A.K., KIM, P., *Grafeno*, Investigación y Ciencia **381**, Junio (2008).
- [8] CASTRO NETO, A.H., GUINEA, F., PERES, N.M.R., NOVOSELOV, K.S., GEIM, A.K., *The electronic properties of graphene*, Rev. Mod. Phys. **81**, 109 (2009).
- [9] GONZÁLEZ, J., VOZMEDIANO, M.A.H., GUINEA, F., *Propiedades del grafeno*, Investigación y Ciencia **408**, Septiembre (2010).

Francisco Guinea

Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, CSIC

Fernando Bartolomé

Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón y Departamento de Física de la Materia Condensada, CSIC – Universidad de Zaragoza

LIBROS Y PUBLICACIONES RECIBIDOS

- **Métode**. Revista de difusión de la Investigación. Universitat de València. Otoño 2010.
- **Nuclear España**. Revista de la Sociedad Nuclear Española. Nº 310. Septiembre 2010.
- **Journal of the Korean Physical Society**. Vol. 57, n° 1, 2 y (ptII), n° 3 y n° 3, (pt. I).
- **Progress of Theoretical Physics**. Vol.124, n° 1, 2. 2010. Supplement, n° 184, 2010.
- **Brazilian Journal of Physics**. Vol.40 n° 3. September 2010.
- **Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society**. Vol. 149, Part. 3. November 2010.
- **2009 Annual Report**. Geoscience for a sustainable Earth. Brgm.
- **Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**. Serie A. Matemáticas. Vol. 104 (2), 2010.
- **Nuclear España**. Nº 311. Octubre 2010.

CONGRESOS

- **Physics of Systems Out of Equilibrium Symposium**. In Honour of Hector Mancini 65th birthday, del 17 al 19 de febrero de 2011. Universidad de Navarra, Pamplona (España). Para más información: <http://www.unav.es/centro/ifisica/symposium-h-mancini>
- **XII Simposio y X Congreso de la Sociedad Cubana de Física**. La Habana, 7-11 de Marzo de 2011. Para más información consultar la página web: <http://www.fisica.uh.cu/scf/convocatoria.htm>
- **FisEs11. XVII Congreso de Física Estadística**. Barcelona 2-4 junio 2011. <http://www.fises.es>
- **10º Congreso Interamericana de Computación Aplicada a la Industria de Procesos. CAIP'2011**. 30 de mayo al 3 de junio de 2011. Girona-España. Para más información consultar la página web: <http://www.udg.edu/caip2011>
- **4th International Symposium: "Bifurcations and Instabilities in Fluid Dynamics"**. Barcelona, 18-21 Julio, 2011. <http://congress.cimne.com/bifd2011>
- **Congreso General de la Comisión Internacional de Óptica**. México, del 15 al 19 de agosto de 2011. Para más información consultar la página web: www.ciu.mx
- **XXII Congress and General Assembly**. International Union of Crystallography. Madrid, España, del 22 al 30 de agosto de 2011. Para mas información. <http://www.iucr2011madrid.es/>
- **"5th International Scientific Conference on Physics and Control (Physcon 2011)"**. León, del 5 al 8 de septiembre de 2011. Para más detalles ver <http://physcon.unileon.es/>
- **XXXIII Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física y 20º Encuentro Ibérico de Enseñanza de la Física**. Santander, del 19 al 23 de septiembre de 2011.