

El

# Gluón

Las grandes preguntas de la Física

Publicación del Instituto de Física, UNAM

Noviembre 2010, No. 14

---

PREMIO NOBEL 2010: EL DESCUBRIMIENTO DEL GRAFENO

---

INVISIBILIDAD Y METAMATERIALES

---

MATERIA OSCURA, ENERGÍA OSCURA

---



## Premio Nobel 2010: el descubrimiento del grafeno

Si alguna lección dejan los premios Nobel de Física del 2009 y 2010, es la de prestar atención a los materiales que nos rodean. ¿Qué material más común y corriente que el vidrio de una ventana o la punta de un lápiz? En el vidrio está la esencia del Premio Nobel 2009, otorgado por hacer posible la transmisión de señales por fibra óptica (ver el Gluón #13). En la escritura con lápiz se halla el principio fundamental para la obtención de un nuevo material con propiedades asombrosas; el grafeno. A seis años de su descubrimiento [1,2], Andre Geim y Konstantin Novoselov obtuvieron el Premio Nobel de Física 2010. Estos dos investigadores nacidos en la Unión Soviética, y que trabajan en la Universidad de Manchester, estaban en la búsqueda de un cristal bidimensional de Carbono. Como se sabe, ya existían varios alótropos con dimensión cero (fullerenos), uno (nanotubos) y tres (grafito y diamante). Esta búsqueda era natural porque el grafito se forma apilando planos de Carbono (ver figura 1). En cada plano, los átomos están unidos mediante enlaces covalentes híbridos  $sp^2$  en una red hexagonal. Cada una de estas capas es justamente un cristal de grafeno. El enlace covalente en el grafeno es muy fuerte, pero en el grafito la interacción entre capas es mucho más débil. Por esa razón se utiliza en las puntas de lápiz o lubricantes; las capas se deslizan fácilmente una sobre otra. Entonces podría pensarse que la obtención de grafeno era relativamente simple. Sin embargo existían dos problemas: aislar y caracterizar una capa de grafeno, y lograr vencer el prejuicio debido a la supuesta imposibilidad teórica de obtener tal material. El teorema de Mermin-Wagner asegura que no pueden existir cristales bidimensionales porque las fluctuaciones térmicas destruyen el orden de largo alcance [3].



Figura 1. Formas alotrópicas del Carbono. Se dividen en dos grandes familias según el tipo de enlace molecular ( $sp^2$  o  $sp^3$ ). En el grafeno, hay tres electrones en orbitales  $\sigma$  y uno en el  $\pi$ . La dimensionalidad aparece indicada para cada columna. La imagen inferior derecha representa una red de grafeno.

El grafeno fue obtenido por Geim y Novoselov de una manera increíblemente sencilla. Para ello se dobló una cinta adhesiva para separar delgadas capas de grafito, las cuales se disolvieron con acetona para depositarse sobre una superficie de óxido de silicio. Finalmente se analizó el producto resultante, usando diversas técnicas, para comprobarse que la capa resultante, en muchos casos, era un plano con el espesor correspondiente a un átomo (figura 2). Para convencerse de lo sencillo y rápido que es este proceso, recomiendo se vea en You Tube: <http://www.youtube.com/watch?v=rphiCdR68TE>.

¿Qué hace tan interesante al grafeno que amerite un Premio Nobel? Hay dos razones: una las aportaciones notables a la ciencia básica y dos, las posibles aplicaciones tecnológicas. Citemos textualmente al comité Nobel:

*“Los experimentos que permite el grafeno suponen un punto de inflexión en los fenómenos de la física cuántica. Asimismo, permite una gran variedad de aplicaciones prácticas, como la creación de nuevos materiales y la fabricación de aparatos electrónicos innovadores. Se prevé que los transistores de grafeno serán aún más rápidos que los actuales transistores de silicio y permitirán ordenadores más eficientes. Dado que es prácticamente transparente y un buen conductor, el grafeno es apropiado para la producción de materiales transparentes, como mamparas, paneles de luz y posiblemente celdas solares. Mezclado con plásticos, el grafeno puede convertirse en un conductor de electricidad más resistente al calor y con una mecánica robusta. Esta resistencia permitirá nuevos materiales muy fuertes que también sean delgados, elásticos y translúcidos.”*

Como dato, digamos que el grafeno tiene una movilidad electrónica diez veces mayor que los mejores conductores conocidos [2]. Otra propiedad notable es la enorme longitud de coherencia cuántica, del orden de micrómetros a temperatura ambiente.

Estas propiedades se deben a que los electrones interactúan débilmente con la red. Por ejemplo, los choques con las vibraciones de la red (fonones) son relativamente raros, de allí la gran longitud de coherencia. Por

si esto fuera poco, los electrones se describen mediante ecuaciones cuánticas relativistas. Concretamente, los electrones y huecos se describen como si fueran cuasipartículas sin masa usando la ecuación de Dirac. Así, muchos efectos cuánticos relativistas pueden estudiarse en un laboratorio de bajo costo. La razón de esta descripción puede entenderse analizando la estructura de bandas electrónicas.

Dado que tres de los electrones de Carbono se usan para el amarre covalente en el plano de la red hexagonal (orbitales tipo  $\sigma$ ), se tiene que el responsable de las propiedades electrónicas es el electrón débilmente ligado en el orbital  $\pi$  (figura 1). Mediante un Hamiltoniano de amarre fuerte aplicado al electrón  $\pi$ , se llega a que la relación entre energía (E) y vector momento ( $k=(k_x, k_y)$ ) es (en unidades en las que la constante de la red  $a = 1$ ) [3],

$$E(\mathbf{k}) = \pm \sqrt{4t^2 \cos^2 k_y + 4t^2 \cos k_y \cos k_x + t^2}$$

Al graficar esta relación en el espacio recíproco (figura 3), se observan dos bandas: la inferior es de valencia y la superior de conducción. Ambas se tocan en dos puntos del espacio recíproco conocidos como  $\mathbf{K}$  y  $\mathbf{K}'$ , cuyas energías correspondientes están exactamente a la energía de Fermi [3].

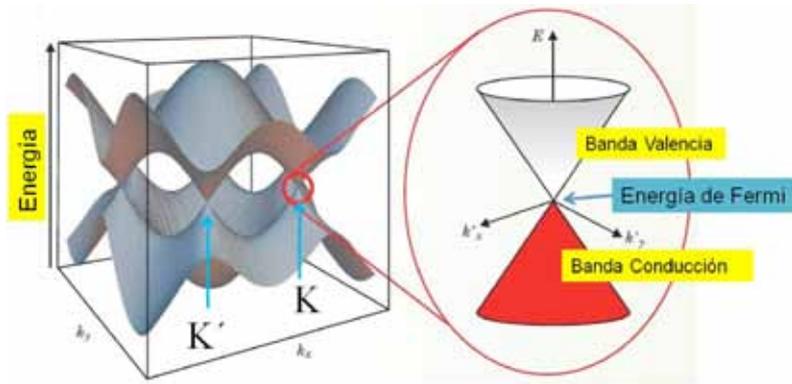


Figura 3. Relación de dispersión  $E(k)$  para un electrón en grafeno. Las bandas de valencia y conducción se tocan en los puntos del espacio recíproco denotados por  $\mathbf{K}$  y  $\mathbf{K}'$ . A la derecha aparece una ampliación de los alrededores de  $\mathbf{K}$ , indicándose la energía de Fermi.

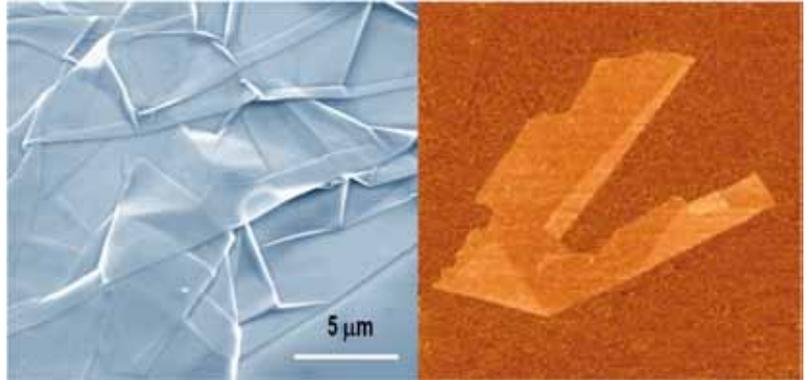


Figura 2. Fotografías de grafeno tomadas con un microscopio óptico a dos escalas. Foto izquierda tomada de Nature Materials, Vol. 6, Página 169 (2007), y foto derecha de Nature Materials, Vol. 6, Página 185 (2007).

Como las propiedades electrónicas dependen de los electrones con energía cercana a la de Fermi, basta estudiar sus entornos. Allí el grafeno depara una sorpresa. La energía como función del vector de momento tiene una forma cónica (llamada conos de Dirac), por lo cual, siendo

$$E(\mathbf{k}) = v|\mathbf{k}|,$$

$v$  la velocidad de los electrones al nivel de Fermi, que es de aproximadamente  $1/300$  de la velocidad de la luz [3]. La diferencia con los semiconductores es grande porque en éstos el comportamiento es de tipo parabólico.

La relación lineal entre energía y momento es justamente la observada en sistemas relativistas. La demostración experimental es la existencia de un efecto Hall anómalo [2], dado que los niveles de energía de Landau en presencia de un campo magnético van como  $n^{1/2}$ , siendo  $n$  un entero, en lugar de proporcionales a  $n$  como en un semiconductor normal [2].

La notable movilidad electrónica presenta un inconveniente práctico dado que es difícil “parar” a los electrones para

hacer transistores. Existe en relatividad cuántica la llamada paradoja de Klein, consistente en que una partícula cargada puede atravesar una barrera de potencial repulsiva con probabilidad uno. La razón es que en relatividad aparecen antipartículas para las cuales la barrera es atractiva. En el IFUNAM hemos trabajado desde el 2006 en este problema proponiendo algunas soluciones. La primera es el dopaje, dado que usando un método de renormalización probamos que aparecen estados localizados al nivel de Fermi y por tanto una transición de metal a aislante [4]. Esta predicción fue confirmada en el 2009 por un grupo de la Universidad de California [5]. Otra solución es la irradiación con ondas electromagnéticas, proceso mediante el cual las partículas adquieren una masa efectiva, habiéndose encontrado una fuerte respuesta no-lineal [6,7].

Aún quedan muchos retos. Algunos son prácticos: como hacer circuitos integrados de grafeno, láminas más grandes, como controlar los defectos de superficie, etc. Los resultados son prometedores, pues por ejemplo, se ha podido usar técnicas litográficas para grabar el grafeno. Teóricamente quedan muchas cuestiones que entender, como la discrepancia entre los valores teóricos y experimentales de la

conductividad eléctrica a temperatura cero, los efectos de interacción electrón-electrón, fronteras de grano, etc.

No podríamos terminar este artículo sin dejar atar el cabo suelto de porque el grafeno existe desafiando un prestigioso teorema de la Física Estadística. La respuesta es simple; el material está arrugado y en realidad es casi bidimensional (figura 2).

Así que el grafeno no sólo es un material interesante. Es una buena lección de cuantas cosas interesantes hay a nuestro alrededor para el que sabe verlas. También es una prueba de lo lejos que estamos de la teoría del todo (TOE, por sus siglas en inglés) y del supuesto fin de la física. Y todo en una punta de lápiz ...

#### Referencias

- [1] K.S. Novoselov, A.K. Geim, et. al., *Science* 306, 666 (2004).
- [2] A.K. Geim, K.S. Novoselov, *Nature Materials* 6, 183 (2007).
- [3] A.H. Castro-Neto, F. Guinea, N.M.R. Peres, K.S. Novoselov, A.K. Geim, *Rev. Mod. Phys.* 81, 109 (2009).
- [4] G. G. Naumis, *Phys. Rev. B* 76, 153403 (2007).
- [5] A. Bostwick, J.L. McChesney, K. Emtsev, T. Seyller, K. Horn, S.D. Kevan, E. Rotenberg, *Phys. Rev. Lett.* 103, 056404 (2009).
- [6] F.J. López-Rodríguez, G.G. Naumis, *Phys. Rev. B* 78, (Rapid Communications), 201406 (2008).
- [7] F. López-Rodríguez, G.G. Naumis, *Phil. Mag.* 90-21, 2977-2988 (2010).

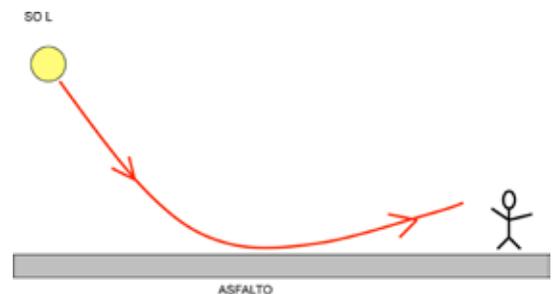
## Invisibilidad y Metamateriales

Es curioso que hay temas que aparecen reiteradamente en el cine, como es el caso de los vampiros, las guerras espaciales, el hombre lobo y el hombre invisible, entre otros, temas, que por alguna razón, han resultado muy atractivos para el público cinéfilo de las últimas décadas. En especial, el tema de la invisibilidad es algo sumamente llamativo... el poder estar ahí, sin que nadie nos vea. Es interesante que este tema, ubicado siempre en el rubro de la ciencia-ficción, aparezca ahora en las marquesinas de revistas especializadas de investigación en física y de circulación internacional.

Hurgando un poco en la literatura científica, encontramos que ya en 1975 aparece un artículo sobre el tema. Es un artículo de Milton Kerker en el Journal of the Optical Society of America intitulado "Invisible bodies" [1]. En este trabajo Kerker nos muestra que para un sistema compuesto por un par de elipsoides co-focales de tamaño mucho menor a la longitud de onda de la radiación incidente  $\lambda_0$ , con funciones dieléctricas  $\epsilon_1$  y  $\epsilon_2$ , e inmersos en un medio con función dieléctrica  $\epsilon_3$  la sección transversal de esparcimiento  $\sigma_s$  se anula para una combinación adecuada de los parámetros geométricos y ópticos del sistema. Este hecho se puede interpretar diciendo, que para estos valores de los parámetros, el sistema resulta ser "invisible". La física que hay detrás la podemos entender, cuando nos damos cuenta que bajo esas condiciones, las oscilaciones de las cargas de polarización en la interfaz del elipsoide interior y en la interfaz del elipsoide exterior, corresponden a las oscilaciones de dos dipolos muy cercanos, de exactamente la misma magnitud, pero radiando fuera de fase. En consecuencia, los campos radiados sufren una interferencia destructiva, dando por resultado la ausencia completa del campo esparcido... la onda incidente pasará de largo sin percibir la presencia de los elipsoides... los elipsoides son invisibles. En este caso las condiciones para la invisibilidad exigen la ausencia misma del campo esparcido, por lo cual resulta muy difícil imaginar como se podría extender esta idea a sistemas más complejos. Por ejemplo, si simplemente movemos al elipsoide interior de su posición cofocal o escalamos el sistema a tamaños comparables a  $\lambda_0$ , entonces ya no es posible encontrar valores de los parámetros del sistema que hagan que  $\sigma_s$  se anule por completo [2], haciéndolos de nuevo... visibles.

Es por esto, que las ideas actuales sobre como lograr la invisibilidad no se basan en la desaparición por interferencia del campo esparcido, sino más bien, en la posibilidad de cubrir al objeto con un material que obligue a la luz a "darle la vuelta" y seguir "como si nada" para que de esta manera el observador no pueda percatarse de su presencia. Pero

la pregunta es ahora: ¿cómo hacemos que la luz le pueda dar la vuelta a un objeto? Un ejemplo, de que esto puede ser posible, lo encontramos en el conocido efecto "mirage", que aparece cuando manejamos un auto por una carretera en un día muy caluroso y vemos, sobre el asfalto, charcos de agua que en realidad no existen (espejismos). En este caso el calor hace que la carretera se caliente y que el aire "suba", disminuyendo así su densidad y por ende su índice de refracción, y esto sucede de manera gradual conforme nos alejamos de la carretera hacia arriba. Pero la trayectoria de los rayos de luz es tal, que su camino óptico debe ser un mínimo (Principio de Fermat) y por tanto los rayos de luz se doblan hacia abajo cuando el índice de refracción disminuye gradualmente hasta que su trayectoria es paralela a la superficie del asfalto, y después se doblan hacia arriba cuando el índice de refracción aumenta gradualmente (Figura 1).



*Fig.1 Esquema del efecto "mirage" en donde los rayos provenientes del sol se doblan gradualmente debido al cambio gradual de índice de refracción, dando lugar a un espejismo consistente en ver como si la luz se reflejara en un charco de agua sobre el asfalto.*

Podríamos entonces pensar que si cubrimos a un objeto con un material que cambie adecuadamente su índice de refracción, disminuyendo su valor gradualmente en una cierta región y

aumentándolo gradualmente en otra región, se podría entonces diseñar su variación espacial, de tal manera que los rayos de luz le den la vuelta al objeto, logrando así su invisibilidad.

Existe sin embargo otro problema: debemos evitar también la reflexión de la luz en las interfaces, dado que ésta puede revelar la presencia del objeto, y esto no es un problema trivial. Sin embargo es posible mostrar que en un material ópticamente anisotrópico la reflexión de la luz desaparece por completo, para todos los ángulos de incidencia, cuando los valores de todas las componentes del tensor de permitividad eléctrica  $\tilde{\epsilon} / \epsilon_0$  son iguales a las del tensor de permeabilidad magnética  $\tilde{\mu} / \mu_0$  y existe, además, una cierta relación entre ellas. A esto se le llama: igualar las impedancias, y este ejemplo nos muestra simplemente que, en principio, la eliminación de la reflexión sería también posible. Aunque hay que recordar que para frecuencias ópticas no existen materiales con respuesta magnética, es decir, en los textos de óptica siempre se toma  $\tilde{\mu} / \mu_0 \approx 1$ , y en su libro, Landau nos brinda una explicación muy convincente del porque esto tienen que ser así [3].

Por otro lado, existen dificultades adicionales, algunas de ellas muy difíciles de superar, como lo es: la absorción de los materiales. Es claro, que si los materiales de la capa de invisibilidad absorben energía electromagnética, entonces llegaría menos luz de una determinada zona del espacio y el contraste con los alrededores nos revelaría la presencia de la capa. Sin embargo sabemos que todos, todos los materiales absorben energía electromagnética, por lo que la absorción siempre está ahí, siempre, lo único que sucede es que no es igual para todas las frecuencias. Por consiguiente, estamos también restringidos a trabajar en una ventana de frecuencias en donde la absorción de los materiales sea despreciable. Por si esto fuera poco, no sería suficiente realizar un diseño para una sola frecuencia, para una sola dirección de iluminación y para un determinado ángulo de observación. Una verdadera capa de invisibilidad debería contemplar la permanencia de sus propiedades, no sólo para todas frecuencias en el óptico, sino también para todas las posibles direcciones de iluminación y de observación. Por lo tanto, aún en el remoto caso de tener un diseño que indicara con precisión las dimensiones geométricas y la dependencia espacial y la orientación en cada punto, de los tensores  $\tilde{\epsilon} / \epsilon_0$  y  $\tilde{\mu} / \mu_0$  de la capa de invisibilidad, lo más seguro es que no pudieran encontrar materiales que cumplieran con las exigencias del diseño... y no se encontrarían porque simplemente no existen.

Sin embargo la comunidad de físicos e ingenieros interesados en el electromagnetismo está viviendo una experiencia interesante que ha inyectado entusiasmo para proseguir con el diseño de capas de invisibilidad, aún a sabiendas que los materiales que pueda exigir este diseño no existan. Esta experiencia nos ha enseñado, que es posible sacar un viejo trabajo abandonado en el arcón de los trabajos

“académicos” y convertirlo en un tema de vibrante actualidad con un amplio abanico de posibles aplicaciones. Los inicios de esta experiencia se remontan a 1968 cuando en la revista rusa *Uspekhi* aparece el artículo del profesor Victor Veselago [4] intitulado “The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ”, en donde el Profesor Veselago se pregunta cómo se comportaría la luz, o en general una onda electromagnética de una determinada frecuencia, cuando ésta entrara a un material homogéneo e isotrópico en donde, para esa frecuencia, tanto la permitividad eléctrica  $\epsilon / \epsilon_0$  como la permeabilidad magnética  $\mu / \mu_0$  fueran negativas. En su artículo el Profesor Veselago concluye que en este caso, el índice de refracción dado por la ecuación  $n = \sqrt{\epsilon\mu / \epsilon_0\mu_0}$  debería ser también negativo, aunque el producto  $\epsilon\mu$  sea positivo. Esto implicaría que el ángulo de refracción sería también negativo con respecto a la normal a la interfaz, y por consiguiente la luz al refractarse se “doblaría” en la dirección opuesta a la dirección de refracción común y corriente. A este extraño fenómeno el Profesor Veselago lo denominó refracción negativa y a los materiales con estas características ( $\epsilon / \epsilon_0 < 0$  y  $\mu / \mu_0 < 0$ ) los llamó materiales “zurdos”. Este trabajo, sobre las propiedades ópticas de materiales hipotéticos, resultaba ciertamente muy “académico”, pues como ya habíamos mencionado, en los materiales comunes y corrientes, para frecuencias en el óptico, no existe una respuesta magnética, es decir,  $\mu / \mu_0 \approx 1$ , por lo que analizar las propiedades de un material con  $\mu / \mu_0 < 0$ , era algo cercano a una fantasía. En consecuencia, este trabajo encontró abrigo en el arcón de los trabajos “académicos” como una curiosidad simpática para aquellos estudiosos de la teoría electromagnética.

Pero en 1999, treinta y un años después de la publicación del artículo de Veselago, John Pendry, investigador del Imperial College en Londres en

colaboración con investigadores de la compañía GEC\_Marconi Materials Technology Ltd. propusieron y “fabricaron” [5] un nuevo material, que debía comportarse como un material “zurdo” para frecuencias en la región de microondas. A estos materiales artificiales se les denominó: metamateriales, y el primer diseño exitoso consistió en pequeños anillos abiertos y pequeñas varillas aisladas, ambos metálicos y de dimensiones sub-milimétricas, inmersos en placas de resina y dispuestos periódicamente a lo largo de las tres dimensiones espaciales (Figura 2). Los anillos abiertos proporcionaban localmente una resonancia análoga a la de un circuito RLC, en donde el anillo jugaba el papel de la inductancia, y las corrientes inducidas daban lugar a dipolos magnéticos, cuyo efecto, al ser promediado en el seno del metamaterial, daba como resultado una resonancia en la permeabilidad magnética “efectiva”  $\mu_{efec}$ ; es decir, la permeabilidad asociada al metamaterial considerado como un todo. Por otro lado, el efecto de las varillas aisladas daba lugar a una resonancia en la permitividad eléctrica “efectiva”  $\epsilon_{efec}$  debida a un efecto de “campo local” semejante al que aparece en la relación de Clausius-Mossotti. Seleccionando adecuadamente la geometría y el tamaño de los elementos en la celda unitaria de este sistema periódico, era posible encontrar un intervalo de frecuencias, alrededor de las frecuencias de resonancia, en donde ambos  $\epsilon_{efec}$  y  $\mu_{efec}$  resultaran negativos. Cuando se concretiza la posibilidad de realizar experimentos con los, hasta entonces hipotéticos, materiales “zurdos”, se abre inesperadamente un campo de investigación que ha resultado ser extremadamente fértil. Se propuso, por ejemplo, que una placa de caras paralelas de un material “zurdo” podría servir no sólo como una lente, sino como una lente “perfecta” [6]. Con esto se quiere decir que con esta lente la imagen sería “perfecta”, ya que se formaría no sólo con la información contenida en las ondas propagantes sino también con la contenida en las ondas evanescentes; esto debido a que las ondas evanescentes en el seno del material “zurdo” no decaerían exponencialmente, sino que por el contrario crecerían exponencialmente. Como era de esperarse, esta propuesta dio lugar a acaloradas discusiones.

Lo que es indudable es que el estudio de los metamateriales ha atraído la atención y el entusiasmo de un gran número de investigadores, y ha dado lugar, en sólo diez años, a miles de artículos de investigación, en donde se abordan tanto las aplicaciones en la región de microondas, como problemas de carácter conceptual y también la búsqueda incesante de un metamaterial que pueda funcionar como material “zurdo” para frecuencias en el óptico. Nótese que el paso en frecuencia de microondas al óptico corresponde a un factor de mil en las longitudes de onda correspondientes, por lo tanto, si se quisiera fabricar un metamaterial bajo el mismo diseño de anillos abiertos pero para frecuencias en el óptico, estos anillos tendrían que ser mil veces más pequeños, por lo que estaríamos ya hablando de dimensiones nanométricas en donde las posibilidades de fabricación bajo diseño son aún muy difíciles.

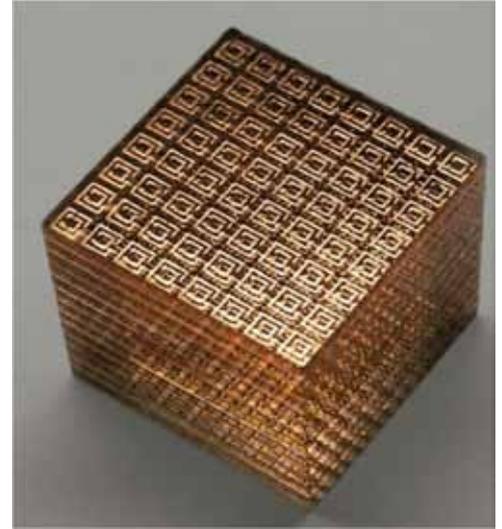


Fig. 2. Un metamaterial construido como una estructura periódica de anillos abiertos y alambres aislados.

Pero volviendo al problema de las capas de invisibilidad, podríamos pensar que estamos en una situación semejante a la de los materiales “zurdos” en 1968 y que la elaboración de una teoría para el diseño de capas de invisibilidad no es del todo quimérica y hasta tal vez sería posible fabricar, en un futuro no muy lejano, metamateriales *ad hoc*. Esta es precisamente la actitud que se ha tomado en el desarrollo de las llamadas: teorías de transformación, concebidas para el diseño de capas de invisibilidad.

En estas teorías se parte de la forma que adquieren las ecuaciones de Maxwell en un espacio curvo caracterizado por un tensor métrico fundamental  $g^{ij}$ . Por ejemplo, las dos ecuaciones de Maxwell inhomogéneas, es decir, en donde aparece la densidad de carga  $\rho$  y la densidad de corriente  $j$ , se pueden escribir en un espacio curvo como

$$\begin{aligned} (\sqrt{g} g^{ij} E_j)_{;i} &= \sqrt{g} \rho / \epsilon_0 \text{ y } [ijk] B_{k,j} = \\ & (1/c^2) \partial(\pm \sqrt{g} g^{ij} E_j) / \partial t + \mu_0 \sqrt{g} j^i \end{aligned}$$

en donde  $g$  es el determinante de  $g^{ij}$ ,  $[ijk]$  es el tensor de permutación y la coma

denota derivada covariante [7]. En esta situación las trayectorias de los rayos de luz son a lo largo de las geodésicas del espacio curvo. Si comparamos ahora estas ecuaciones con las ecuaciones de Maxwell en un espacio plano, pero en presencia de materiales caracterizados, como siempre, por los tensores  $\epsilon^{ij}$  y  $\mu^{ij}$ , se concluye que ambas formulaciones son equivalentes siempre y cuando se haga la siguiente identificación:  $\epsilon^{ij} = \mu^{ij} = \pm\sqrt{g}g^{ij}$ . Esto quiere decir que las trayectorias de los rayos de luz en un espacio curvo caracterizado por el tensor métrico  $g^{ij}$ , son idénticas a las trayectorias en un espacio plano pero en presencia de materiales con  $\epsilon^{ij} = \mu^{ij} = \pm\sqrt{g}g^{ij}$ . Por consiguiente, si se quiere que la luz viaje alrededor de un objeto dado, hay que encontrar una transformación caracterizada por  $g^{ij}$ , que imponga a una zona del espacio alrededor de él, una curvatura tal que las geodésicas en esta zona le den la vuelta al objeto. Habiendo encontrado esa transformación, el problema está esencialmente resuelto, porque las propiedades eléctricas y magnéticas de la capa de invisibilidad en el espacio plano en que nos encontramos, estarán dadas por  $\epsilon^{ij} = \mu^{ij} = \pm\sqrt{g}g^{ij}$ . Obviamente se está suponiendo que no existe absorción, es decir,  $\epsilon^{ij}$  y  $\mu^{ij}$  son cantidades reales. Hasta ahora se han trabajado diversos ejemplos para cubrir objetos con geometrías simples y se han diseñado diversos algoritmos y procesos de cálculo para generalizar estos resultados a geometrías cada vez más complicadas.

Se ha contemplado también la posibilidad de diseñar metamateriales que puedan cumplir con las exigencias de los distintos diseños. Por ejemplo, se ha construido una capa de invisibilidad en la región de microondas con un ancho de banda muy angosto y con un calidad que todavía deja mucho que desear [8]. Esta capa se construyó para ocultar

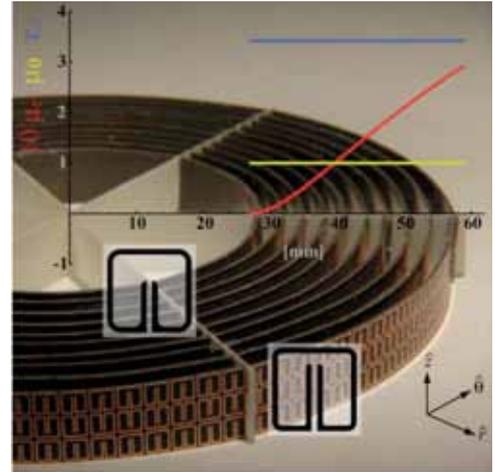


Fig. 3. Primera capa de invisibilidad para frecuencias en la región de microondas. Como se puede apreciar está construida con metamateriales.

un cilindro de cobre usando un cierto tipo de metamateriales, como se puede ver claramente en la figura 3.

Tal vez en un futuro, quien sabe qué tan lejano, podamos encontrar en las tiendas o supermercados capas de invisibilidad al estilo Harry Potter... sin embargo, en la actualidad, estas capas permanecen y permanecerán todavía por algún tiempo en la frontera de la ciencia-ficción.

#### Referencias

- [1] M. Kerker, "Invisible bodies", *J. Opt. Soc. of America* 65 (1975) 376-379.
- [2] J. C. Auger, R. G. Barrera, B. Stout, "Optical properties of an eccentrically located pigment within an air bubble", *Prog. Org. Coatings* 49 (2004) 74-83.
- [3] L. D. Landau, E. M. Lifshitz, *Electrodynamics of Continuous Media* (Pergamon Press, Oxford, 1960) Parágrafo 60.
- [4] V. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ", *Sov. Phys. Uspekhi* 10 (1968) 509-514.
- [5] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Roberts, W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 47 (1999) 2075-2084.
- [6] J. Pendry, "Negative refraction makes a perfect lens", *Phys. Rev. Lett.* 85 (2000)3966-3999.
- [7] U. Leonhardt, T. G. Philbin, "Transformation optics and the geometry of light", *Prog. Opt.* 53 (2009) 69-152; "General relativity in Electrical Engineering," *New J. Phys.* 8 (2006) 247.
- [8] D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, D. R. Smith, "Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies", *Science* 314 (2006) 977-980.

## Materia Oscura, Energía Oscura

### *Centro de Radioastronomía y Astrofísica, Campus Morelia de la UNAM*

#### Introducción

La luz y las otras radiaciones electromagnéticas (por ejemplo, las ondas de radio) que nos llegan de los cuerpos celestes son mayoritariamente producidas por materia “normal”, esto es, la formada por protones, neutrones y electrones (o si se prefiere, por dos quarks y el electrón). Los astrónomos sabemos desde hace mucho que hay objetos formados de materia normal, o sea materia bariónica, que por sus características físicas no son directamente detectables como emisores de luz. Hay cuerpos muy fríos, como las nubes moleculares, que con temperaturas del orden de 10 grados Kelvin solo se pueden estudiar en la región de radio del espectro electromagnético. De igual manera, hay objetos muy calientes, como el gas interno a un cúmulo de galaxias, que puede alcanzar temperaturas hasta de 100 millones de grados Kelvin y que sólo puede detectarse gracias a su copiosa emisión de rayos X.

Con el enorme desarrollo de la astronomía multifrecuencia, que permite detectar radiación electromagnética desde las ondas de radio hasta los rayos gama, existía mucha confianza entre los astrónomos de que finalmente teníamos un recuento razonable de la composición del Universo. Así, hasta hace tan sólo unas décadas la mayoría de los astrónomos pensábamos que el Universo estaba formado básicamente de materia bariónica.

#### Materia Oscura

Pero existía evidencia, desde la década de 1930, de que había algo más en el Universo. Hay regiones en el espacio donde hay muchas galaxias relativamente cercanas formando lo que se conoce como un cúmulo de galaxias. Estudiando estos cúmulos de galaxias fue como el astrónomo Fritz Zwicky argumentó por vez primera que había materia oscura (él acuñó el término) en el Universo. Básicamente, Zwicky estimó la masa del cúmulo contando las galaxias y sabiendo aproximadamente cuantas estrellas había en cada galaxia. Pero cuando estimó la masa independientemente, a partir de las velocidades de las galaxias usando el teorema virial (que relaciona la masa de un conjunto de cuerpos atados gravitacionalmente con sus velocidades típicas), encontró que este segundo estimado daba masas mucho mayores. En otras palabras, las velocidades en el espacio de estas galaxias eran mucho más grandes de lo esperado sólo en base a la masa bariónica e indicaban la presencia de algo que producía gravedad adicional e impedía la expansión del cúmulo. Zwicky era un personaje excéntrico con muchos enemigos

y este descubrimiento pasó relativamente desapercibido. No fue sino hasta la década de 1960 cuando los estudios de la astrónoma Vera Rubin encontraron un efecto similar en la rotación de las partes externas de las galaxias espirales (rotaban demasiado rápido para la masa bariónica interior a ellas) que la comunidad empezó a tomar en serio la posibilidad de la existencia de la materia oscura.

En la actualidad, existe ya un cuerpo muy vasto de resultados que apuntan a la existencia de la materia oscura. Uno podría argumentar que, después de todo, esta materia oscura podría también ser bariónica y no detectarse por alguna condición especial. Pero varios resultados adicionales nos indican que se tiene que tratar de materia distinta, de materia no-bariónica. Si atribuyéramos toda la fuerza de gravedad existente en el espacio a materia bariónica, encontraríamos que la nucleosíntesis que ocurrió en los primeros minutos del Universo hubiera producido proporciones distintas de los elementos químicos ligeros a las que se observan. Adicionalmente, los mejores modelos que describen la formación de estructura (estrellas y galaxias) en el Universo (que originalmente era muy homogéneo) funcionan mucho mejor si además de materia bariónica se toma en cuenta el efecto de la materia no-bariónica.

La posibilidad preferida de los físicos para la materia oscura es algún tipo de “WIMP” o sea una de las “partículas masivas que interactúan débilmente”, relacionadas al neutrino. Mientras la materia bariónica

interacciona fuertemente consigo mismo y esto permite la formación de cuerpos compactos como estrellas, planetas, y seres humanos, la materia oscura es débilmente interactuante y no disipa energía cinética de modo que pueda contraerse gravitacionalmente hasta pequeñas escalas. Entonces, la materia no-bariónica está distribuida en el espacio más difusamente que la materia bariónica. Es por esto que no podemos decir mucho de la materia no-bariónica si estudiamos por ejemplo el movimiento de los planetas de nuestro Sistema Solar; hay muy poca materia oscura dentro de él. La materia no-bariónica dentro de la órbita de Neptuno es solo como 10-12 de la masa del Sol. Hay que estudiar regiones muy grandes del espacio (del tamaño de las galaxias o más) para que se haga evidente la fuerza de gravedad de la materia no-bariónica.

Se realizan muchos experimentos en los que se trata de detectar al necesario WIMP, hasta ahora sin éxito claro. Por sus características (interactúan muy débilmente entre sí y con la materia normal), los WIMPs son extremadamente difíciles de detectar. Ante los resultados negativos, una minoría de astrónomos ha llegado a proponer que lo que hay que modificar es la ecuación Newtoniana que usamos para describir a la gravedad a grandes distancias.

También es posible buscar evidencia directa de la materia oscura con métodos astronómicos. Grupos de astrónomos han reportado recientemente lo que podría ser evidencia directa de la existencia de materia oscura. Han observado, en distintas regiones del cielo, el colosal choque de dos cúmulos de galaxias. Mientras la parte de materia bariónica que hay en cada uno de los cúmulos chocó entre sí y quedó detenida en la región central del choque, la materia oscura atravesó el choque como si nada y continuó moviéndose por el espacio. En este choque, a la materia bariónica la vemos gracias a que emite radiación electromagnética (en este caso rayos X), mientras que deducimos la presencia de la materia oscura mediante su fuerza de atracción gravitacional que desvía la luz de las galaxias que están detrás de ella (ver Figura1).

## Energía oscura

Si bien la materia oscura es intrigante, hay al menos buenas ideas físicas de que la constituye e inclusive el problema podría resolverse en los años próximos con la detección de la partícula responsable. Hasta este punto, las cosas estaban aún razonables. Toda la materia, bariónica o no-bariónica, tiene en común que presenta la fuerza de atracción gravitacional y si no podemos “ver” a la no-bariónica en el sentido clásico, si podemos saber que está ahí y como está distribuida gracias a que afecta el movimiento de la materia normal y de la radiación electromagnética. Pero la Naturaleza tenía una sorpresa mayor guardada.

El Universo se formó hace unos 13,700 millones de años y a partir de esta llamada Gran Explosión, el Universo se ha estado expandiendo. Esta expansión del Universo se ha ido estudiando cada vez en más detalle. Es posible medir, gracias a la explosión de un cierto tipo de supernova, la velocidad a la que las galaxias se alejan de nosotros y determinar su distancia y así reconstruir la historia de cómo se ha ido expandiendo el Universo en el pasado.

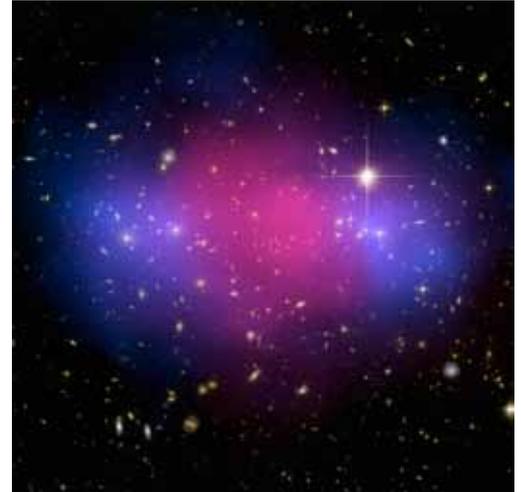
Los astrónomos esperábamos que la expansión fuese cada vez más lenta, o sea que el Universo se estuviera desacelerando. Esta suposición es de lo más razonable porque la gravedad es siempre atractiva, y poco a poco iría desacelerando a la expansión. En 1998 y 1999 dos grupos de astrónomos pudieron reconstruir de manera independiente la historia de la expansión del Universo y obtuvieron un resultado sorprendente. Cuando el Universo era joven, las cosas ocurrieron como predecía la presencia de una fuerza atractiva: el Universo cada vez se expandía más lentamente. Pero en los últimos cinco mil millones de años (más o menos la última tercera parte de la vida del Universo) la expansión del Universo ha comenzado a acelerarse, a aumentar su velocidad. Obviamente, esto es algo que no se puede explicar si sólo tomamos en cuenta a la gravedad. Es como si una piedra que tiramos para arriba en lugar de ir cada vez más lento, comenzará a acelerarse más y más.

Es pues necesario introducir la idea de que el Universo está lleno de algo que contrarresta a la fuerza atractiva de la gravedad y produce el efecto de una fuerza repulsiva que expande aceleradamente al espacio. A falta de un mejor término, se le conoce como la energía oscura.

Podemos decir ahora de qué está compuesto el Universo, tomando en

cuenta materia y energía. Solo el 4 por ciento de él está en la forma de la familiar materia bariónica. Como el 23 por ciento del Universo es la materia no-bariónica. Finalmente, el restante 73 por ciento lo contribuye la energía oscura, de la que francamente tenemos poca idea de lo que es, aunque no faltan teorías especulativas de muchos tipos. La mayor parte del Universo está entonces en materia oscura que no encontramos y en energía oscura que no entendemos. La buena noticia es que hay mucho trabajo por hacer.

*El sistema conocido como MACSJ0025 se formó de la colisión de dos cúmulos de galaxias. La materia bariónica, en la forma de gas caliente, se detecta gracias a su emisión de rayos X (en rosa). La distribución de la materia no-bariónica se determina mediante la distorsión de la luz de las galaxias que se encuentran más lejanas y se muestra en azul. Imagen cortesía de la NASA, ESA, y CXC.*



## Directorio



Dr. José Narro Robles  
Rector

Dr. Sergio M. Alcocer Martínez de Castro  
Secretario General

Lic. Enrique del Val Blanco  
Secretario Administrativo

Dr. Carlos Arámburo de la Hoz  
Coordinador de la Investigación Científica

Guillermo Monsivais Galindo  
Director

### Comité Editorial

Raúl Esquivel Sirvent  
Guillermo Ramírez Santiago  
Mercedes Rodríguez Villafuerte  
Víctor Romero Rochín  
Manuel Torres Labansat

### Apoyo técnico

Dulce María Aguilar Téllez  
Diseño Gráfico y Formación

Gustavo Gómez Macías  
Desarrollo Web

*El Gluón, las grandes preguntas de la física, es una publicación del Instituto de Física. Prohibida la reproducción parcial o total del contenido, por cualquier medio impreso o electrónico sin la previa autorización.*



Instituto de Física, UNAM  
Ciudad Universitaria, Noviembre de 2010, No. 14  
[www.fisica.unam.mx/elgluon](http://www.fisica.unam.mx/elgluon)