

O PRÊMIO NOBEL DE FÍSICA DE 2010⁺

José Maria Filardo Bassalo
Fundação Minerva
Belém – PA

Resumo

Neste artigo, trataremos do Prêmio Nobel de Física de 2010, concedido aos físicos, de origem russa, o inglês Konstantin Sergeevich Novoselov e o holandês Andre Konstantinov Geim, pela descoberta do grafeno.

Palavras-chave: *Prêmio Nobel de Física de 2010. Novoselov e Geim. Grafeno.*

Abstract

In this article we will talk about the Nobel Prize in Physics 2010, granted to the physicists, born in Russia, the english Konstantin Sergeevich Novoselov and the dutch Andre Konstantinov Geim, by the discovery of the graphene.

Keywords: *2010' Physics Nobel Prize. Novoselov and Geim. Graphene.*

O Prêmio Nobel de Física (PNF) de 2010 foi atribuído aos físicos (de origem russa), o inglês Konstantin Sergeevich Novoselov (n.1974) e o holandês Andre Konstantinov Geim (n.1958) pela descoberta do estado livre do **grafeno**, ocor-

⁺ The 2010 Physics Nobel Prize

^{*} *Recebido: fevereiro de 2011.
Aceito: fevereiro de 2011.*

rida em 2004, quando trabalhavam na *Universidade de Manchester*, na Inglaterra. Para escrever este artigo, tomaremos com base o artigo desses dois físicos e intitulado **The Rise of Graphene**¹.

Por ser o **grafeno** um material bidimensional (na forma hexagonal de um “favo de mel”), com a espessura de um átomo (1 angström $\sim 10^{-8}$ cm), composto por uma lâmina de **grafite** [forma cristalina (3D) de carbono (C)], sua Física é bidimensional, a conhecida Física 2D, daí ele ser conhecido como **2D grafite**. Portanto, para entender esse novo material, é necessário ver como se desenvolveu essa Física. Segundo o físico germano-norte-americano Hörst Ludwig Störmer (n.1949; PNF, 1998) [**Nobel Lecture: The Fractional Quantum Hall Effect** (08 de Dezembro de 1998: **Nobel e-Museum**)], em um mundo tridimensional, a criação de um sistema bidimensional normalmente requer uma superfície de um objeto ou uma interface entre duas substâncias e uma força para empurrar coisas nelas. Por exemplo, elétrons podem ser confinados na superfície do hélio líquido ou na superfície de algum isolante, por intermédio de um campo elétrico, o qual os empurra contra uma barreira altamente impenetrável. O método de melhor sucesso para criar o movimento bidimensional de um gás de elétrons é o chamado “two-dimensional electron gás” (2DEG). É interessante destacar que, em 1935², o físico inglês Rudolf Ernest Peierls (1907-1995) e, em 1937³, o físico russo Lev Davidovich Landau (1908-1968; PNF, 1962) mostraram que cristais estritamente bidimensionais (2D) eram termodinamicamente instáveis e que poderiam não existir.

Antes de tratarmos do **grafeno**, vejamos como se desenvolveu o 2DEG. Em 1966⁴, Alan B. Fowler, F. F. Fang, Webster E. Howard e P. J. Stiles, pesquisadores da *International Business Machines* (IBM) estudaram o movimento de um gás de elétrons no transistor Si-MOSFET (“Silício-Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor”). Nesse estudo, eles perceberam que, em baixas temperaturas, esse movimento é limitado a um plano, com os elétrons vagueando livremente, e que essa mobilidade é limitada pela desordem das camadas de dióxido de silício (SiO₂) daquele transistor. Logo em 1967⁵, Frank Stern e Howard investigaram a

¹ **Nature Materials**, v. 6, p. 183, 2007.

² **Annales de l’Institut Henri Poincaré**, v. 5, p. 177, 1935.

³ **Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion**, v. 11, p. 26, 1937.

⁴ **Physical Review Letters**, v. 16, p. 901, 1966.

⁵ **Physical Review**, v. 163, p. 816, 1967.

distribuição de elétrons no Si-MOSFET e na heteroestrutura do tipo gálio/arsênio-alumínio/gálio/arsênio ($\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$). A limitação da mobilidade apontada acima foi contornada pelos físicos norte-americanos Alfred Yi Cho (n.1937) (de origem chinesa) e John Arthur, nos *Bell Laboratories*, ao inventarem, em 1968, a técnica conhecida como MBE (“Molecular Beam Epitaxy”) que é, basicamente, uma técnica de evaporação de alto-vácuo e que permite evaporar finas camadas atômicas de semicondutores e depositá-las em uma superfície. É oportuno salientar que essa técnica é considerada como o início da *nanotecnologia*.

Agora, vejamos como ocorreu a descoberta do estado livre do **grafeno**. Teoricamente, esse novo e revolucionário material (como veremos adiante) foi estudado na segunda metade da década de 1940 e na década de 1950. Com efeito, em 1947⁶, o físico canadense Philip Richard Wallace (1915-2006) estudou a estrutura de banda da grafite. Por sua vez, em 1956⁷, J. W. McClure estudou o diamagnetismo da grafite e, em 1958⁸, J. C. Slonczewski e P. R. Weiss voltaram a estudar a estrutura de banda da grafite. Contudo, foi somente na década de 1980 que começou a ser observado que o **grafeno** poderia ser tratado pela $(2 + 1)$ - QED, isto é, pela Eletrodinâmica Quântica Bidimensional, envolvendo o tempo, conforme foi demonstrado, em 1984⁹, por G. W. Semenoff; em 1986¹⁰, por E. S. Fradkin; e, em 1988¹¹, por F. Duncan M. Haldane. Nesses trabalhos, foi observada uma anomalia em simulações envolvendo estruturas tridimensionais de matéria condensada e de semicondutores.

Por outro lado, em 1985¹², os químicos, o inglês Harold Walter Kroto (n.1939; PNQ, 1996), e os norte-americanos James R. Heath, Sean C. O'Brien, Robert Floyd Curl Junior (n.1933; PNQ, 1996) e Richard Errett Smalley (n.1943; PNQ, 1996) anunciaram a descoberta de novos materiais, os **fulerenos**, formados por moléculas “ocas” de C e que consiste de uma superfície curva semelhante ao

⁶ *Physical Review*, v. 71, p. 622, 1947.

⁷ *Physical Review*, v. 104, p. 666, 1956.

⁸ *Physical Review*, 109, p. 272, 1958.

⁹ *Physical Review Letters*, v. 53, p. 2449, 1984.

¹⁰ *Physical Review*, v. B33, p. 3263, 1986.

¹¹ *Physical Review Letters*, v. 61, p. 2015, 1988.

¹² *Nature*, v. 318, p. 162, 1985.

grafeno, mas que contém anéis pentagonais, além dos hexagonais característicos do **grafeno**. Registre-se que o exemplo mais conhecido desses materiais é o C_{60} que contém 60 átomos de C em um arranjo semelhante a uma bola de futebol [hoje considerada como tendo a dimensão zero (0D) por ser “oca”]. O **fulereno** foi pela primeira vez sintetizado, em 1990¹³, por W. Kratschmer, L. D. Lamb, K. Fostiropoulos e D. R. Huffman. Note que a descoberta desse isótopo do C permitiu a descoberta dos **nanotubos** [hoje considerados como de dimensão um (1D), por ter a forma de um “fio”] que são superfícies de **grafeno** enroladas em forma de tubular com dimensões nanométricas ($1 \text{ nm} = 10^{-12} \text{ m}$), e descoberto pela primeira vez, em 1991¹⁴, pelo físico japonês Sumio Iijima (n.1939) ao observar aspectos tubulares nas imagens da fuligem de **fulereno** em um microscópio eletrônico.

O **grafeno**, ao ser previsto teoricamente (1947/1956/1958) e ajudado na formação do **fulereno** (1985) e do **nanotubo** (1991), deu ensejo a “corrida de ouro” em busca de seu isolamento. Uma primeira tentativa foi realizada, em 2002¹⁵, pelo casal de físicos norte-americanos Gene e Mildred Spievak Dresselhaus (n.1930) [que haviam escrito livros sobre **fulerenos** e **nanotubos**, em 1996 (com Peter Clay Eklund), pela Academic Press; em 1998 (com Riichiro Saito), pelo Imperial College Press; e em 1990 (com Phaedon Avouris), pela Spring-Verlag] ao usar a técnica da esfoliação química. Para isso, um pedaço de grafite (3D) foi primeiro intercalado de modo que planos de **grafeno** eram separados por camadas de átomos e moléculas. Contudo, essa técnica resultou apenas em formar um novo material tridimensional (3D), o mesmo acontecendo com outras técnicas que formavam apenas uma espécie de “lodo” grafitico (Geim e Novoselov, op. cit.). Finalmente, em 2004, o **grafeno** foi então isolado por Geim, Novoselov e colaboradores, conforme veremos a seguir.

Geim, depois de concluir a escola secundária (*high school*), tentou entrar no *Moscow Engineering Physics Institute*. Contudo, por haver sido reprovado por duas vezes, ele então tentou e passou no exame para o *Moscow Institute of Physics and Technology* (MIPT). No *Institute of Solid State Physics* (ISSP) da *Russian Academy of Sciences* (RAS), em Chernogolovka, Geim obteve seu Mestrado, em 1982, e seu Doutorado, em 1987, trabalhando em Física de Metais. Depois de obter seu Doutorado, sua ideia era trabalhar em Astrofísica, envolvendo Física de

¹³ *Nature*, v. 347, p. 354, 1990.

¹⁴ *Nature*, v. 354, p. 56, 1991.

¹⁵ *Advanced Physics*, v. 51, p. 1, 2002.

Partículas Elementares, mas acabou finalmente em Física de Estado Sólido (hoje, Física da Matéria Condensada), depois de realizar pós-doutoramento no *Institute for Microelectronics Technology* do RAS, e nas *Universidades* de *Nottingham*, *Bath* e *Copenhagen*. Em 1994, Geim foi indicado para ser Professor Associado da *Radboud University Nijmegen* (RUN), na Holanda, tornando-se, mais tarde, cidadão holandês. Foi nessa Universidade, quando trabalhava em Supercondutividade Mesoscópica, que recebeu Novoselov como estudante de doutoramento. Em 2001, Geim foi indicado Professor de Física da *Manchester University* (MU), na qual, em 2002, tornou-se Diretor do *Manchester Centre for Mesoscience and Nanotechnology*, e *Landworthy Professor* (Professor Titular), em 2007. É interessante destacar que, quando estava na RUN, Geim e o físico inglês Michael Victor Berry (n.1941) realizaram, em 1997¹⁶, uma experiência envolvendo levitação magnética e com a qual levitaram pedaços de queijo e de pizza, bem como criaturas vivas como rãs e ratos. Por essa experiência, Geim e Berry ganharam o *Ig Nobel de Física* de 2000. Novoselov, por sua vez, depois de se graduar no MIPT, foi para a RUN, em 2001 e obteve seu doutoramento com Geim, em 2004¹⁷.

Agora, vejamos como aconteceu a descoberta do **grafeno**. Como a técnica de esfoliação química falhou em conseguir uma superfície bidimensional da grafite, conforme vimos acima, Geim, Novoselov e colaboradores começaram a desenvolver uma nova técnica, relativamente simples, constituída de fitas adesivas, do tipo “lagartixa” (*gecko tape*). Há muitos séculos, filósofos e cientistas tentaram entender o mecanismo de adesão, nas paredes, dos pés das lagartixas formados de pelos ceratinados. Embora um desses pelos exerça apenas uma diminuta força em torno de 10^{-7} N (newtons), em consequência da força de van der Waals, porém, milhões desses pelos produzem uma adesão da ordem 10 N/cm², suficiente para as lagartixas manterem-se e mesmo escalam grandes edifícios. Tendo em vista esse fato, em 2003¹⁸, Geim e sua esposa Irina V. Grigorieva, Novoselov, S. V. Dubonos, A. A. Zhukov e S. Yu. Shapoval fabricaram microfibras biomiméticas (densos arranjos de pilares flexíveis de plástico) que faziam o papel dos pés das lagartixas. Talvez por ser fã do **Homem-Aranha** (*Spider-Man*), Geim (ou todos dessa equipe!?) tentaram, com essa pesquisa, realizar o sonho do Homem de escalar paredes.

¹⁶ **European Journal Physics**, v. 18, p. 307, 1997.

¹⁷ LATGÉ, A. O Admirável Mundo Novo do Carbono. **Ciência Hoje**, v. 47, p. 14, 2010. En.wikipedia.org/wiki/André_Geim/Konstantin_Novoselov; lqes.iqm.unicamp.br.

¹⁸ **Nature Materials**, v. 2, p. 461, 2003.

É oportuno registrar que, até este momento (fevereiro de 2011), esse sonho ainda permanece sonho, porque problemas relacionados com a sua durabilidade ainda não foram resolvidos. Registre-se que o sonho de Homem voar já foi realizado por intermédio dos aviões.

A fabricação dessas fitas adesivas levou Geim e seu grupo de pesquisa a, finalmente, isolar o **grafeno**. Com efeito, em 2004¹⁹, Novoselov, Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Yuanbo Zhang, Dubonos, Grigorieva e A. A. Firsov realizaram uma experiência na qual esfoliaram a grafite com um tipo de fita adesiva (*durex?*) e conseguiram formar flocos formados de algumas camadas de grafite, que então foram depositados sobre uma bolacha (*wafér*) de silício (Si), cuidadosamente escolhida com determinada espessura (315 nm) de óxido de silício (SiO₂). Ao examinarem alguns desses flocos com um microscópio óptico, observaram que os mesmos eram identificados como planos isolados de carbono e que se comportavam como um material 2-D. Estava, assim, finalmente isolado o **grafeno** (Latgé, op. cit.; Geim e Novoselov, op. cit.). O isolamento de cristais atômicos bidimensionais foi confirmado, em 2005²⁰, por Novoselov, D. Jiang, F. Schedin, T. J. Booth, V. V. Khotkevich, Morozov e Geim. É interessante destacar que o **grafeno** foi isolado, em 2006, por A. C. Ferrari, J. C. Meyer, V. Scardaci, C. Casiraghi, M. Lazzeri, F. Mauri, S. Piscanec, D. Jiang, Novoselov, S. Roth e Geim²¹ e A. Gupta, G. Chen, P. Joshi, S. Tadigadapa e Eklund²², usando a microscopia Raman.

Isolado o **grafeno**, começou o estudo de suas propriedades físicas. Assim, ainda em 2005²³, Novoselov, Geim, Morozov, D. Jiang, M. I. Katsnelson e Grigorieva demonstraram que os seus *portadores de carga* podem se comportar continuamente entre elétrons e buracos em concentrações (n) muito altas do tipo 10¹³/cm², e com uma mobilidade (μ) que pode exceder a 15.000 cm²/volt.s, mesmo em temperatura ambiente (≈ 300 K). No entanto, como essa mobilidade depende fracamente da temperatura e é limitada por impurezas, μ pode ser melhorada para atingir ≈ 100.000 cm²/volt.s, superando alguns semicondutores (p.e. InSb) para os quais μ ≈ 77.000 cm²/volt.s, também em temperatura ambiente. Ainda nesse traba-

¹⁹ **Science**, v. 306, p. 666, 2004.

²⁰ **Proceedings of the National Academy of Sciences USA**, v. 102, p. 10451, 2005.

²¹ **Physical Review Letters**, v. 97, p. 187401, 2006.

²² **Nano Letters**, v. 6, p. 2667, 2006.

²³ **Nature**, v. 438, p. 197, 2005.

lho, eles observaram que como os *portadores de carga* podem atingir velocidades altas [em analogia com o estudo de condutores e de semicondutores, chamadas de *velocidade de Fermi* (v_F), dadas por $v_F \approx 10^6$ m/s = $c/300$] e considerando haver pouco espalhamento – o que caracteriza um *transporte balístico* –, o seu tratamento não poderia mais ser realizado pela *equação de Schrödinger*, como acontece no tratamento dos condensados 2-D, e sim, por intermédio da *equação de Dirac* no espaço (2+1)-dimensional. Desse modo, eles observaram que esses *portadores de carga* (quasipartículas) se comportavam como férmions diracianos sem massa, que podem ser elétrons que perdem sua massa de repouso (m_0) ou como neutrinos eletrônicos (ν_e) que adquirem carga elétrica (e). É interessante destacar que, ainda em 2005²⁴, Zhang, J. W. Tan, Störmer e P. Kim observaram experimentalmente, em temperatura ambiente, o *efeito Hall quântico* (EHQ) no **grafeno** (Geim e Novoselov, op. cit.).

O *transporte balístico* dos férmions diracianos sem massa no **grafeno** continuou a ser estudado, principalmente suas propriedades eletrônicas, não só por Geim, Novoselov e colaboradores, assim como por outros pesquisadores. Como os *portadores de carga* nesse novo material bidimensional são férmions diracianos sem massa, segundo destacamos antes, então, para estudar suas propriedades eletrônicas deve ser usado a QED-2D, já que o **grafeno** se comporta como um semicondutor de intervalo nulo (*O-gap*) em baixas energias fermianas ($E = \hbar v_F k$). Assim, para estudar aquelas propriedades, é necessário considerar o operador hamiltoniano diraciano (\hat{H}) definido por: $\hat{H} = \hbar v_F \vec{\sigma} \cdot \vec{k}$, onde \vec{k} é o *momento linear* da quasipartícula ($-\vec{k}$, da anti-quasipartícula), $\vec{\sigma}$ é a *matriz bidimensional de Pauli*, e v_F , independente de k , representa o papel da velocidade da luz, por apresentar o valor constante $v_F \approx c/300$, como vimos anteriormente. Portanto, em analogia com a QED, foi possível introduzir dois novos conceitos nesse estudo: *pseudospin* e *quirilidade*. Vejamos o primeiro conceito. A *equação de Dirac* para elétrons envolve spins, representado por spinores [matriz coluna com duas linhas: up (\uparrow) e down (\downarrow)]; por sua vez, a rede “favo de mel” do **grafeno** é equivalente a duas sub-redes (A e B) do carbono que apresentam um espectro de energia ($|E| < 1$ eV) na forma de uma folha de cone próximo da energia nula. Portanto, como esse comportamento é equivalente ao spin, pois apresenta dois índices (A e B), ele é conceituado como um *pseudospin*. Em vista disso, a matriz $\vec{\sigma}$ envolve *pseudospins*. O segundo conceito, a *quirilidade* é dada pela expressão $\vec{\sigma} \cdot \vec{k}$, para a qua-

²⁴ Nature, v. 438, p. 201, 2005.

separtícula [e $\vec{\sigma} \cdot (-\vec{k})$], para a anti-quasepartícula]. Registre-se que esses dois conceitos, que decorrem do efeito de campo elétrico ambipolar em uma camada simples de **grafeno**, foram introduzidos nos seguintes artigos escritos em 2006: Katsnelson²⁵; Katsnelson, Novoselov e Geim²⁶; e J. Tworzydło, B. Trauzettel, M. Titov, A. Rycerz e C. W. J. Beenakker²⁷. É oportuno ainda registrar que, no mesmo ano de 2006²⁸, S. Y. Zhou, G. H. Gweon, J. Graf, A. V. Fedorov, C. D. Spataru, R. D. Diehl, Y. Kopelevich, D. H. Lee, Steven G. Louie e A. Lanzara fizeram a primeira observação experimental de férmions diracianos na grafite.

Por outro lado, também em 2006, propriedades magnéticas no **grafeno** foram estudadas por Zhang, Z. Jiang, J. P. Small, M. S. Purewal, Y. W. Tan, M. Faziollahi, J. D. Chudow, J. A. Jaszczak, Störmer e Kim²⁹, que examinaram a separação (*splitting*) do nível de Fermi em grandes campos magnéticos. Por sua vez, Morozov, Novoselov, Katsnelson, Schedin, L. A. Ponomarenko, D. Jiang e Geim³⁰ e E. McCann, K. Kechedzhi, Vladimir I. Fal'ko, H. Suzuura, T. Ando e B. L. Altshuler³¹, observaram efeitos não convencionais da magneto-resistência. Com efeito, em baixas temperaturas, todos os sistemas metálicos com alta resistividade exibem alta magneto-resistência quanto-interferente (localização), o que, contudo, não acontece com o **grafeno**. Observe-se que, outras anomalias magnéticas também foram observadas em uma bicamada de **grafeno** como as relacionadas com o EHQ e com a *fase de Berry*, em 2006³², por Novoselov, McCann, Morozov, Fal'ko, Katsnelson, Zeitler, D. Jiang, Schedin e Geim; e em 2007³³, por Novoselov, Z. Jiang, Zhang, Morozov, Störmer, Zeitler, J. C. Maan, G. S. Boebinger, Kim e

²⁵ **European Physics Journal**, v. B51, p. 157, 2006.

²⁶ **Nature Physics**, v. 2, p. 620, 2006.

²⁷ **Physical Review Letters**, v. 96, p. 246802, 2006.

²⁸ **Nature Physics**, v. 2, p. 595, 2006.

²⁹ **Physical Review Letters**, v. 96, p. 136806, 2006.

³⁰ **Physical Review Letters**, v. 97, p. 016801, 2006.

³¹ **Physical Review Letters**, v. 97, p. 146805, 2006.

³² **Nature Physics**, v. 2, p. 177, 2006.

³³ **Science**, v. 315, p. 1379, 2007.

Geim. Registre-se que a *fase de Berry* foi primeiramente descoberta pelo físico indiano Shivaramakrishnan Pancharatnam (1934-1969), em 1956³⁴ e redescoberta por Berry, em 1984³⁵. Ela representa a fase adquirida por um sistema sujeito a processos adiabáticos cíclicos, depois de um ciclo. Tal fase é resultante de propriedades geométricas do parâmetro espaço na hamiltoniana daquele sistema. Em Novosolev e Geim (op. cit.), o leitor encontrará detalhes dessas anomalias, bem como de outras previsões teóricas sobre o **grafeno**, como, por exemplo, de ele substituir o silício (Si) como base tecnológica da Engenharia Eletrônica, devido a sua alta mobilidade (μ), mesmo em concentrações de campos elétricos induzidos e apresentar escalas submícrons em temperaturas ambientes. Com isso, ele será o tão procurado *santo graal* daquela Engenharia - transistores em temperatura ambiente.

Na conclusão deste artigo, é oportuno destacar três grandes descobertas ocorridas recentemente. No dia 10 de outubro de 2010³⁶, M. Sprinkle, M. Ruan, Y. Hu, J. Hankinson, M. Rubio-Roy, B. Zhang, X. Wu e W. A. de Heer, pesquisadores do *Instituto de Tecnologia da Geórgia*, nos Estados Unidos, anunciaram que haviam desenvolvido uma nova técnica de construir dispositivos eletrônicos (p.e.: transistores) inteiramente de **grafeno**. Por seu lado, em 07 de janeiro de 2011 (*Advanced Materials* – *online*), Samuel Lara-Avila, Kasper Moth-Poulsen, Rositza Yakimova, Thomas Bjornholm, Fal'ko, Alexander Tzalenchuk e Sergey Kubatkin, pesquisadores do *Laboratório Nacional de Física da Inglaterra*, descobriram que as propriedades eletrônicas do **grafeno** são controladas com luz. Por fim, em 30 de janeiro de 2011 (*Nature Nanotechnology* - *online*), B. Radisavijavic, A. Radenovic, J. Brivio, V. Giacometti e Andras Kis, pesquisadores da *Escola Politécnica de Lausanne*, na Suíça, anunciaram que haviam descoberto que a *molibdenita*, o dissulfeto de molibdênio (MoS_2), permite a obtenção de monocamadas atômicas usando a mesma técnica da descoberta do **grafeno**, ou seja, fixando pedaços de fita adesiva no cristal de MoS_2 . É interessante destacar que esse novo material bidimensional permitirá substituir o Si e o **grafeno** em dispositivos eletrônicos futuros. Por exemplo, a *molibdenita* consome 100.000 vezes menos energia do que os atuais transistores de Si. O leitor poderá encontrar mais detalhes sobre os assuntos tratados neste artigo visitando o site: www.inovacaotecnologica.com.br.

³⁴ *Proceedings of the Indian Academy of Sciences*, v. A44, p. 247, 1956.

³⁵ *Proceedings of the Royal Society of London*, v. A392, p. 45, 1984.

³⁶ *Nature Nanotechnology*, v. 5, p. 727, 2010.