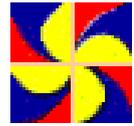




# CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

[www.bassalo.com.br](http://www.bassalo.com.br)



---

## Efeito Hall Quântico de Vale no Grafeno e a Contribuição de Físicos Brasileiros, com Destaque para a Física da UFPA.

Neste verbete, trataremos da proposta teórica realizada por um grupo de físicos [com a participação de físicos brasileiros, inclusive ligados à *Universidade Federal do Pará* (UFPA)], em 2015, sobre a existência do **Efeito Hall Quântico de Vale** (EHQV) no **grafeno**. Para entender a proposta, faremos um pequeno resumo sobre o **Efeito Hall** (clássico e quântico: sendo este em três modalidades) e do **grafeno**, usando para isso alguns verbetes desta série. Em outubro de 1879, o físico norte-americano Edwin Herbert Hall (1855-1938) realizou, na *Universidade Johns Hopkins*, nos Estados Unidos da América do Norte, uma experiência na qual observou que quando uma longa lâmina de ouro (Au), percorrida longitudinalmente por uma corrente elétrica  $I$ , é colocada normalmente às linhas de força de um campo de indução magnética  $\vec{B}$  constante, surge, entre as laterais dessa mesma lâmina, uma diferença de potencial  $V_H$ , dada pela expressão:  $V_H = I R_H$ , onde  $R_H$  ficou conhecida como **resistência Hall**, que é diretamente proporcional a  $B$  (módulo de  $\vec{B}$ ). Imediatamente, o físico, também norte-americano, Henry Augustus Rowland (1848-1901), professor de Hall, interpretou essa diferença de potencial como sendo devida ao acúmulo de cargas elétricas de sinais contrários, cargas essas cujo deslocamento para as laterais da lâmina ocorre em virtude da ação da “força eletromagnética” que atua nos “fluidos elétricos” individuais que compõem a corrente elétrica (transversal), segundo o modelo do “fluido elétrico” vigente nessa época (sobre fluidos elétricos, ver verbete nesta série). Essa observação de Hall, publicada em 1879 (*American Journal of Mathematics* **2**, p. 287) e em 1880 (*Philosophical Magazine* **9**, p. 225), é hoje conhecida como o **Efeito Hall Clássico** (EHC).

Até 1980, a  $R_H$  era conhecida por intermédio da expressão:  $R_H = B/(n e)$ , com  $n$  representando a densidade eletrônica por  $\text{cm}^3$ , sendo  $e$  a

carga elétrica do elétron. Contudo, a partir dessa data, foi descoberto que  $R_H$  variava discretamente, conforme foi mostrado em várias experiências e devidas explicações teóricas. Com efeito, entre 1975 e 1976, o físico alemão Klaus von Klitzing (n.1943; PNF, 1985) realizou pesquisas no *Laboratório Clarendon*, em Oxford, na Inglaterra, e, entre 1979 e 1980, no *Laboratório de Alto Campo Magnético*, em Grenoble, na França. O interesse de von Klitzing pelo EHC começou em 1980 quando [com a colaboração dos físicos, o alemão Gerhard Dorda (n.1932) e o inglês Sir Michael Pepper (n.1942)], realizou medidas precisas da  $R_H$  trabalhando com gás eletrônico bidimensional. Para isso, usou um tipo especial de transistor de silício (Si), o MOSFET (“Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor”), no qual os elétrons podem ser conduzidos em uma camada entre dois semicondutores (vide verbete nesta série). Quando essa camada é bastante estreita, da ordem de um nanômetro ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ) e a temperatura é bastante baixa, em torno de 1,5 K, um campo magnético muito intenso obriga os elétrons a ocupar bandas de energia [as conhecidas **bandas de Landau**, decorrentes do trabalho do físico russo Lev Davidovich Landau (1908-1968; PNF, 1962), realizado em em 1930 (*Zeitschrift für Physik* **60**, p. 320)] separadas por intervalos finitos e que contêm apenas alguns níveis de energia isolados. Desse modo, os elétrons são então forçados a se deslocar em um plano paralelo à superfície do semicondutor. O estudo desses elétrons bidimensionais é conhecido como **Física 2D** (vide verbete nesta série).

Assim, sob as condições experimentais descritas acima, von Klitzing, Dorda e Pepper fizeram, naquele ano de 1980 (*Physical Review Letters* **45**, p. 494), uma descoberta sensacional, qual seja, eles observaram que  $R_H$  não variava linearmente com a intensidade do campo magnético  $H$  (lembrar que  $B = \mu H$ ), como no caso clássico. Os gráficos dessa variação lembravam uma escada, com cada degrau separado pelo valor  $h/(e^2 i)$ , onde  $h$  é a **constante de Planck**, e  $i = 1, 2, 3 \dots$ , é um **número quântico** inteiro apropriado, do qual falaremos mais adiante. Além do mais, eles encontraram que essa **resistência Hall quantizada** se relacionava com a **constante de estrutura fina**  $\alpha$  ( $= \pi \mu_0 c e^2 / h \approx 1/137$ ) por intermédio da relação:  $R_H \alpha = (1/2) \mu_0 c$ , onde  $\mu_0$  é a **permeabilidade magnética** do vácuo, e  $c$  a velocidade da luz, também no vácuo. Eles ainda notaram que nos degraus essa resistência ia a zero, comportamento típico de um supercondutor (sobre os supercondutores, vide verbete nesta série).

Agora, vejamos o significado físico do **número quântico**  $i$ . Classicamente, elétrons sob a ação de um campo magnético intenso

descrevem órbitas circulares (“órbitas de ciclotron”) em consequência da **força de Lorentz** [conceituada pelo físico holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928; PNF, 1902), em 1892, por intermédio de sua célebre expressão (na linguagem atual):  $\vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B}$ , onde  $\vec{v}$  é a velocidade da carga elétrica  $q$ ]. Quanticamente existe somente um conjunto discreto de órbitas permitidas com energias também discretas, que caracterizam os **níveis de Landau** (NL) (Landau, op. cit.) cuja energia vale:  $E_L = \hbar e B / (2 \pi m)$ , onde  $m$  representa a massa do elétron. Ora, como sabemos que os elétrons com energia no interior de uma banda de energia participam da corrente de condução, a conhecida **banda de condução**, então, nos intervalos (“gaps”) entre as bandas, os elétrons só podem ocupar os poucos níveis isolados, que são estados localizados que não participam da corrente de condução. Portanto, a ocupação desses níveis isolados não altera a resistência, resultando nos degraus observados. Desse modo, o **número quântico**  $i$  indica as **bandas de Landau** totalmente preenchidas até um dado degrau. Como o  $i$  é um número inteiro, essa descoberta de von Klitzing, Dorda e Pepper recebeu o nome de **Efeito Hall Quântico Inteiro** (EHQI).

Outra descoberta sobre o EHQ decorreu dos trabalhos dos físicos norte-americanos Horst Ludwig Störmer (n.1949; PNF, 1998) (de origem alemã), Daniel Chee Tsui (n.1939; PNF, 1998) (de origem chinesa) e Robert B. Laughlin (n.1950; PNF, 1998). Vejamos como isso aconteceu. Em 1979 (*Solid State Communications* **29**, p. 705), Störmer, Raymond Dingle, Arthur Charles Gossard (n.1935), William Wiegmann e Michael Dudley Sturge (1931-2003) descreveram a técnica do MD (“Moduling-Doping”), que haviam inventado em 1978, no *Laboratório* FBML (“Francis Bitter High Magnetic Field Laboratory”) do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), em Cambridge, Massachusetts. Com essa nova técnica, eles construíram uma hetero-estrutura (ver verbete nesta série), envolvendo semicondutores, do tipo gálio/arsênio-alumínio/gálio/arsênio (GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As). De posse de uma amostra dessa hetero-estrutura, Tsui, Störmer e Gossard, iniciaram no *Bell*, em outubro de 1981, uma investigação experimental sobre o EHQI, que acabara de ser descoberto, em 1980, conforme registramos acima. Essa hetero-estrutura, com uma mobilidade eletrônica de 90.000 cm<sup>2</sup>/(volt.s), era uma ordem de grandeza melhor que a conseguida com o transistor Si-MOSFET, usado na descoberta do EHQI. Desse modo, trabalhando com essa amostra nas temperaturas 1.5 K e 4.2 K, Tsui, Störmer e Gossard reproduziram o EHQI quando  $B$  atingia 5 Teslas (T). Contudo, quando aumentaram esse valor para 15 T, eles encontraram, na temperatura de 0.48 K, um resultado surpreendente, ou seja, a

**resistência Hall** havia atingido o valor dado pela expressão:  $R_H = \phi_0 [(1/3) i e]$ . O resultado dessa descoberta de Tsui, Störmer e Gossard, conhecida posteriormente como **Efeito Hall Quântico Fracionário** (EHQF), foi publicado em 1982 (*Physical Review Letters* **48**, p. 1559).

É claro que esses dois tipos de EHQ(I/F) precisavam de uma explicação teórica e ela foi formulada por Laughlin, quando trabalhava na *Bell Telephone Laboratories*, em Murray Hill. Vejamos como ocorreu essa formulação. Certo dia de 1980, na sala de chá da *Bell*, Tsui conversava com um pequeno grupo de teóricos desse Laboratório, no qual se encontravam os físicos norte-americanos Philip Warren Anderson (n.1923; PNF, 1977) e Laughlin, e, com o trabalho de von Klitzing, Dorda e Pepper (publicado naquele ano) na mão, perguntou como aquele efeito poderia ser explicado. Sua dúvida decorria do fato de que os trabalhos teóricos até então realizados sobre a **localização** [estado isolante quando um metal não-interagente é submetido a um grande potencial randômico, formulado por Anderson, em 1958 (*Physical Review* **112**, p. 1900)] não o conseguiam explicar. Depois de ouvir Tsui, Anderson sugeriu que, para explicar o EHQI, era necessário considerar a transformação de calibre (“gauge”) do potencial vetor  $\vec{A}$  (vide verbete nesta série), como ocorre na explicação do **Efeito Josephson** (EJ), descoberto pelo físico inglês Brian David Josephson (n.1940; PNF, 1973), em 1962 (*Physics Letters* **1**, p. 251), e ele ocorre quando uma fina película isolante é colocada entre dois supercondutores.

A sugestão de Anderson foi desenvolvida por Laughlin, em 1981 (*Physical Review* **B23**, 5632), para uma primeira explicação teórica do EHQI. Com efeito, em sua explicação, Laughlin considerou a seguinte transformação de calibre (“gauge”):  $\vec{A}' = \vec{A} + \vec{A}_0$ , com  $\vec{A}_0$  considerado como um vetor constante e sem significado físico. Para dar um significado físico a esse vetor, Laughlin imaginou uma “experiência de pensamento”, na qual a fita metálica característica do EHC é enrolada em forma de anel (“loop”). Com isso, demonstrou que o módulo de  $\vec{A}_0$  relaciona-se com o **fluxo magnético quântico** ( $\phi_0 = h/e$ ) que passa pelo anel. Desse modo, considerando que esse fluxo, que é adiabaticamente forçado através do anel, é o que leva o elétron do **Nível de Fermi** (NF) (ver verbete nesta série) de uma extremidade para a outra da fita, Laughlin encontrou o valor de  $R_H$  do EHQI obtido por von Klitzing, Dorda e Pepper, dividindo esse fluxo pelo produto da carga elétrica do elétron ( $e$ ) pelo número de ocupação ( $i$ ) da EF.

Ainda em 1981, Laughlin foi trabalhar no *Lawrence Livermore National Laboratory*, em Livermore, na Califórnia. Nesse Laboratório, ele

vinculou-se ao grupo de plasma que tinha como principais teóricos os físicos norte-americanos Hugh Edgar DeWitt (1930-2014) e Forest Rogers. Enquanto realizava seu trabalho de pesquisa no anexo daquele Laboratório conhecido como “The Cooler”, sobre o modelamento da matéria em energias da ordem de 10 eV, Laughlin recebeu o “preprint” do artigo de Tsui, Störmer e Gossard sobre a descoberta do EHQF. Essa descoberta apresentava um resultado surpreendente, isto é, a  $R_H$  por eles observada significava três vezes a mesma resistência do EHQI. Depois de ler o artigo, Laughlin telefonou a Störmer e, ao perguntar-lhe como explicar esse surpreendente resultado, recebeu então a informação de que Tsui, inicialmente, pensara tratar-se de **quarks** (partículas com carga elétrica fracionária e já tratadas em verbete desta série), pois o valor de  $R_H$  encontrado correspondia a uma partícula com a carga elétrica de  $e/3$ . Contudo, Störmer disse-lhe em seguida, que o próprio Tsui logo viu a impossibilidade dessa hipótese, uma vez que a experiência que realizaram tratavam com energia da ordem de mili-elétronvolt ( $1 \text{ meV} = 10^{-3} \text{ eV}$ ), insuficiente para produzir **quarks**, que é da ordem de mega-volts ( $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ).

Conhecedor dessa informação, Laughlin procurou outra explicação para o EHQF. Conversando com seu estudante Eugene L. Mele sobre o conceito de **quase-partícula** [proposto pelo físico russo Lev Davidovich Landau (1908-1968; PNF, 1962), em 1941 (*Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* **11**, p. 592; *Journal of Physics URSS* **5**, p. 71; *Physical Review* **60**, p. 356), ao formular sua Teoria Quântica Hidrodinâmica do He II, e considerada, em 1976 (*Physical Review* **D13**, 3398), pelos físicos norte-americanos Roman Wladimir Jackiw (n.1939) (nascido na Polônia) e C. Rebbi, para responder por parte de um número quântico elementar], Laughlin pensou em explicar aquele efeito como sendo devido a um condensado de muitos-corpos com excitações correspondentes a uma **quase-partícula** de carga  $e/3$ . Usando essa ideia, preparou um artigo e o enviou para a *Physical Review Letters* (PRL) e, no qual, mostrou que a **quase-partícula** observada no EHQF decorria de uma quebra de simetria discreta. No entanto, um dos “referees” (Steve Kivelson, conforme Laughlin veio, a saber, ao ser anunciado que havia compartilhado o PNF de 1998) da PRL rejeitou-o, afirmando que a quebra de simetria considerada por Laughlin não era discreta e sim contínua e, portanto, sua ligação com impurezas poderia tornar isolante o material utilizado por Tsui, Störmer e Gossard. Apesar de já saber que isso era verdade enquanto preparava o artigo, Laughlin decidiu, assim mesmo, enviá-lo para a PRL, pois achava ser irrelevante esse fato. Essa rejeição foi

providencial, pois lhe ajudou a encontrar a explicação correta para o EQHF, conforme veremos mais adiante.

Em 1983 (*Physical Review Letters* **50**, 1395), Laughlin explicou o EQHF ainda usando a ideia de **quase-partícula**, porém, com outra interpretação. Vejamos qual. Inicialmente, Laughlin mostrou que um gás de elétrons, sob um campo magnético intenso ( $\sim 15$  T) e temperatura baixa ( $\sim 0.48$  K) (dados da experiência de Tsui, Störmer e Gossard), pode se condensar para formar um **fluido quântico** similar ao que ocorre com o hélio líquido e os supercondutores (ver verbetes nesta série). No entanto, para explicar as cargas fracionárias características do EQHF, Laughlin imaginou uma “experiência de pensamento”, análoga à que considerou na explicação do EQI, envolvendo o  $\phi_0$ . Como os elétrons sofrem repulsão Coulombiana, considerou que o condensado envolvia estruturas compostas de elétrons e de pequenos **vórtices**, um para cada fluxo quântico magnético. Desse modo, concluiu que o **fluido quântico** proposto comportava-se como um “superfluido” e que, quando excitado, por intermédio de mais elétrons e **vórtices** (“quantizados”), reage formando novos estados coletivos (**quase-partículas** ou excitações), com carga elétrica efetiva “fracionária”. Ora, como para criar esses estados é necessário um consumo de energia, o “superfluido” resiste à compressão e, portanto, torna-se “incompressível”. Assim, segundo Laughlin, o comportamento quântico dessas **quase-partículas** é descrito pela seguinte função de onda:

$$\Psi_m(z_1, z_2, \dots, z_N) = \prod_{j < k}^N (z_j - z_k)^m \exp \left\{ \left[ -1/(4 \ell^2) \right] \sum_j^N |z_j|^2 \right\},$$

onde  $m$  é um inteiro ímpar (igual a 3, no caso da experiência inicial de Tsui, Störmer e Gossard) e significa o número de **vórtices** (“quantizados”) do fluxo  $\phi_0$ ,  $z_j = x_j + i y_j$  representa a posição do  $j$ -ésimo elétron, e  $\ell \sqrt{m}$  denomina-se **comprimento magnético**. É interessante notar que a ideia de essa função de onda representar um **fluido quântico**, em vez de um estado cristalino, foi desenvolvida por Laughlin depois de consultar livros de Mecânica Estatística e de discutir com DeWitt e Rogers, em Livermore.

Ainda em 1983 (*Physical Review Letters* **51**, 605), o físico inglês F. Duncan M. Haldane (n.1951) mostrou que a função de onda proposta por Laughlin representava o estado fundamental exato de uma classe de Hamiltonianas ( $H$ ) [soma da energia cinética ( $T$ ) com a energia potencial ( $V$ ):  $H = T + V$ ] com potenciais não-locais (sobre **não-localidade**, ver verbete nesta série). É também em 1983 (*Physical Review* **B27**, 3383), que

o próprio Laughlin previu que  $m$  poderia ter o valor 5, previsão essa que foi logo confirmada experimentalmente, em 1984 (*Physical Review Letters* **53**, 997), por A. M. Chang, P. Berglund, Tsui, Störmer e J. C. M. Hwang. Destaque-se que, em 1997, as **quase-partículas Laughlian**as foram comprovadas por dois grupos de pesquisadores (um israelense e outro francês) realizando experiências nas quais observaram o tunelamento de partículas, com a carga de  $e/3$ , através de uma região estreita (“narrow neck”) de um sistema que exibia o EHQF. O grupo israelense, formado por Rafael de-Picciotto, Michael Reznikov, Mordehai Heiblum, Vladimir Umansky, Gregori Bunin e Diana Mahalu, apresentou seu resultado na *Nature* **389**, p. 162 e, o grupo francês, constituído por Laurent Saminadayar, D. Christian Glattli, Yong Jin e Bernard Etienne, na *Physical Review Letters* **79**, 2526.

É importante registrar a descoberta de uma nova modalidade do EHQ: o **Efeito Hall Quântico de Spin** (EHQS), previsto em 1971 (*Physics Letters* **35A**, p. 459) pelos físicos russos Michael I. Dyakonov e Vladimir I. Perel do *A. F. Ioffe Physico-Technical Institute*, em Leningrado. Esse efeito ocorre quando elétrons fluem através de um semicondutor, com seus spins orientados aleatoriamente. No entanto, campos elétricos perto de átomos dentro do semicondutor defletem os elétrons acumulando-os em suas extremidades: os de spin para baixo, de um lado, e os de spin para cima, do lado oposto, gerando, desse modo, uma **polarização de spin transversa**. Diferentemente do EHC e EHQ(I/F), esse efeito é não-magnético, e sim elétrico. Essa proposta foi esquecida por quase trinta anos, até que, em 1999 (*Physical Review Letters* **83**, 1834), J. E. Hirsch retomou-a, sugerindo um tipo de experiência com um metal paramagnético, capaz de exibir esse efeito. A partir daí, houve um intenso debate teórico sobre esse efeito. Uma primeira observação desse efeito foi anunciada, em 2004 (*Science* **306**, p. 1910), por Yuichiro K. Kato, Robert C. Myers, Gossard e David D. Awschalom ao perceberem a **polarização transversa** nas bordas de uma camada de arseneto de gálio (GaAs) na temperatura de 30 K. Logo depois, em 2005 (*Physical Review Letters* **94**, 047204), Jörg Wunderlich, B. Kaestner, Jairo Sinova e T. Jungwirth também observaram essa **polarização**, desta vez usando um LED (“Light-Emitting Diode”) (ver verbete nesta série). Ainda em 2005 (*Physical Review Letters* **95**, 146802; 226801), C. L. Kane e Mele previram que o EHQS pode ocorrer na presença de um forte acoplamento spin-órbita em um sistema que preserva a TRS (*Time-Reversal Symmetry*). No ano seguinte, em 2006 (*Applied Physics Letters* **89**, 242116), S. Ghosh, N. P. Stern, B. Maertz, Awschalom, G. Xiang, M. Zhu e N. Samarth demonstraram o EHQS em

temperatura ambiente no semiconductor seleneto de zinco (ZnSe). Ainda em 2006, Awschalom, em duas experiências distintas [com a participação de V. Sih, W. H. Lau, Myers e V. R. Horowitz (*Physical Review Letters* **97**, 096605), e com a participação de Stern, Ghosh, Xiang, Zhu e Samarth (*Physical Review Letters* **97**, 126603)], mostraram que os spins não somente se acumulariam, mas eles poderiam ser enviados por um condutor e formar uma **corrente spintrônica**, análoga à **corrente elétrica normal** (ver site da [physicsact](#)). Outros detalhes da **corrente spintrônica** e do EHQS, ver: David D. Awschalom, Ryan Epstein, Ronald Hanson e Yuichiro K. Kato, *Scientific American Brasil* **66**, p. 58 (Novembro de 2007).

Depois dessa breve revisão histórica sobre o EHC e EHQ (I, F, S) tratemos da descoberta do estado livre do **grafeno**. Para tal, usaremos, basicamente, os textos: Andrea Latgé, **O Admirável Mundo Novo do Carbono**, *Ciência Hoje* **47**, p. 14 (2010); e Andre Konstantinov Geim e Konstantin Sergeevich Novoselov, **The Rise of Graphene**, *Nature Materials* **6**, p. 183 (2007)]. O **grafeno** é um material bidimensional (na forma hexagonal de um “favo de mel”), com a espessura de um átomo [1 angström (Å)  $\sim 10^{-10}$  cm], composto por uma lâmina de **grafite** [forma cristalina (3D) de carbono (C), constituída por milhares de folhas (camadas) de **grafeno**]. Teoricamente, esse novo e revolucionário material foi estudado na segunda metade da década de 1940 e na década de 1950. Com efeito, em 1947 (*Physical Review* **71**, p. 622), o físico canadense Philip Richard Wallace (1915-2006) estudou a estrutura de banda (vide verbete nesta série) da **grafite**. Por sua vez, em 1956 (*Physical Review* **104**, p. 666), J. W. McClure estudou o diamagnetismo da **grafite** e, em 1958 (*Physical Review* **109**, p. 272), 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 1984 (*Physical Review Letters* **53**, 2449), por G. W. Semenoff; em 1986 (*Physical Review* **B33**, 3263), por E. S. Fradkin; e, em 1988 (*Physical Review Letters* **61**, 2015), por Haldane [neste trabalho, ele mostrou que o EHQI decorre apenas da quebra da simetria da inversão temporal (TRS – *Time-Reversal Symmetry*) e não precisa de campo magnético]. Nesses trabalhos, foi constatada uma anomalia em simulações envolvendo estruturas tridimensionais de matéria condensada e de semicondutores.

Por outro lado, em 1985 (*Nature* **318**, p. 162), 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 **grafeno**, mas que contém anéis pentagonais, além dos hexagonais característicos do **grafeno**. Registre-se que o exemplo mais conhecido desses materiais é o C<sub>60</sub> 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 1990 (*Nature* **347**, p. 354), 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 nm = 10<sup>-12</sup> m), e descoberto pela primeira vez, em 1991 (*Nature* **354**, p. 56), pelo físico japonês Sumio Iijima (n.1939) ao observar aspectos tubulares nas imagens da fuligem de **fulereno** em um microscópio eletrônico (sobre esse tipo de microscópio, ver verbete nesta série).

Desse modo, a previsão teórica do **grafeno** deu ensejo à “corrida de ouro” em busca de seu isolamento. Uma primeira tentativa foi realizada, em 2002 (*Advanced Physics* **51**, p. 1), pela física norte-americana Mildred (“Millie”) Spievak Dresselhaus (n.1930) (nascida na Polônia) [auxiliada por seu marido, o físico norte-americano Gene F. Dresselhaus (n.1929) (nascido no Panamá)] 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” grafítico. Finalmente, em 2004, o **grafeno** foi então isolado pelos físicos, o russo-inglês Konstantin Sergeevich Novoselov (n.1974; PNF, 2010) e o holandês-inglês Andre Konstantinov Geim (n.1958; PNF, 2010) (de origem russa) e colaboradores, conforme veremos a seguir. Observe-se que Geim é um ardoroso fã da série cinematográfica **Homem-Aranha** (*Spider-Man*).

Como a técnica de esfoliação química falhou em conseguir uma superfície bidimensional da **grafite**, conforme vimos acima, Geim, Novosolev e colaboradores começaram a desenvolver uma nova técnica, relativamente simples, constituída de fitas adesivas, do tipo “lagartixa” (*gecko tape*). Note-se que, 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 (ver verbete nesta série), porém, milhões desses pelos produzem uma adesão da ordem  $10$  N/cm<sup>2</sup>, suficiente para as lagartixas manterem-se e mesmo escalarem grandes edifícios. Tendo em vista esse fato, em 2003 (*Nature Materials* **2**, p. 461), Geim (certamente pensando no *Spider-Man*), sua esposa Irina V. Grigorieva, Novoselov, e mais S. V. Dubonos, A. A. Zhukov e S. Yu. Shapoval fabricaram microfita biomiméticas (densos arranjos de pilares flexíveis de plástico) que faziam o papel dos pés das lagartixas.

A fabricação dessas fitas adesivas levou Geim e seu grupo de pesquisa a, finalmente, isolar o **grafeno**. Com efeito, em 2004 (*Science* **306**, p. 666), 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 (*wafer*) de silício (Si), cuidadosamente escolhida com determinada espessura (315 nm) de óxido de silício (SiO<sub>2</sub>). Ao examinarem alguns desses flocos com um microscópio óptico (sobre esse tipo de microscópio, ver verbete nesta série), observaram que os mesmos eram identificados como planos isolados de carbono e que se comportavam como um material em duas dimensões (2-D). Estava, finalmente, isolado o **grafeno**. O isolamento de cristais atômicos bidimensionais foi confirmado, em 2005 (*Proceedings of the National Academy of Sciences USA* **102**, 10451), por Novoselov, Jiang, F. Schedin, T. J. Booth, V. V. Khotkevich, Morozov e Geim. É interessante destacar que o **grafeno** foi também 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 Geim (*Physical Review Letters* **97**, 187401) e A.

Gupta, G. Chen, P. Joshi, S. Tadigadapa e Eklund (*Nano Letters* **6**, 2667), usando a **microscopia Raman** (ver verbete nesta série).

Isolado o **grafeno**, começou o estudo de suas propriedades físicas. Assim, ainda em 2005 (*Nature* **438**, p. 197), Novoselov, Geim, Morozov, D. Jiang, M. I. Katsnelson, Grigorieva, Dubonos e Firsov demonstraram que os seus **portadores de carga** [conhecidos como **p-elétrons (p-e)**] podem se comportar continuamente entre elétrons e “buracos” (ausência de elétrons em semicondutores, como já vimos em verbete nesta série) em concentrações ( $n$ ) muito altas do tipo  $10^{13}/\text{cm}^2$ , e com uma mobilidade ( $\mu$ ) que pode exceder a  $15.000 \text{ cm}^2/(\text{volt.s})$ , mesmo em temperatura ambiente ( $\approx 300 \text{ K}$ ). No entanto, como essa mobilidade depende fracamente da temperatura e é limitada por impurezas,  $\mu$  pode ser melhorada para atingir  $\approx 100.000 \text{ cm}^2/(\text{volt.s})$ , superando alguns semicondutores (p.e. InSb) para os quais  $\mu \approx 77.000 \text{ cm}^2/(\text{volt.s})$ , também em temperatura ambiente. Ainda nesse trabalho, eles observaram que como os **p-e** podem atingir velocidades altas [em analogia com o estudo de condutores e de semicondutores, chamadas de **Velocidade de Fermi** ( $v_F$ ), dadas por  $v_F \approx 10^6 \text{ m/s} = c/300$ ] e considerando haver pouco espalhamento – o que caracteriza um **transporte balístico** –, o seu tratamento não poderia mais ser realizado pela **Equação de Schrödinger** (vide verbete nesta série), como acontece no tratamento dos condensados 2-D, e sim, pela **Equação de Dirac** [ $(i \hbar \gamma^\mu \partial_\mu - m c) \Phi = 0$  -, onde  $\gamma^\mu$  é a **matriz de Dirac** (matriz  $4 \times 4$ ),  $\partial_\mu = \partial/\partial x^\mu$  ( $\mu = 1, 2, 3, 4$ ),  $\Phi$  é o **spinor de Dirac** (matriz coluna),  $\hbar = h/2\pi$ ,  $m$  é a massa do elétron, e  $c$  é a velocidade da luz no vácuo] no espaço (2+1)-dimensional, a chamada QED (2 + 1). Desse modo, eles observaram que esses **p-e** (“quasepartículas”) se comportavam como férmions diracianos sem massa, que podem ser elétrons que perdem sua massa de repouso ( $m_0$ ) ou como neutrinos eletrônicos ( $v_e$ ) que adquirem carga elétrica ( $e$ ). Ainda nesse trabalho, eles demonstraram o EHQI ao considerarem os NF ocupados por elétrons que não interagem com o fóton (elétrons não-interagentes, isto é, não sofrem interação eletromagnética). É interessante destacar que, ainda em 2005 (*Nature* **438**, p. 201), Zhang, J. W. Tan, Störmer e P. Kim observaram experimentalmente, em temperatura ambiente ( $\approx 300 \text{ K}$ ), 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 **p-e** nesse novo material bidimensional são férmions diracianos sem massa, segundo destacamos antes, então, para estudar suas propriedades eletrônicas deve ser usado a QED-2, já que o **grafeno** se comporta como um semiconductor de intervalo nulo (*O-gap*) em baixas **energias fermianas** ( $E_F = \hbar v_F k$ ). 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 “quasepartícula” ( $-\vec{k}$ , da “anti-quasepartícula”),  $\vec{\sigma}$  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 já destacamos antes. 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 [os vales (*valleys*) (K e K')] próximo da energia nula. Portanto, como esse comportamento é equivalente ao **spin**, pois este 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** (vide verbete nesta série) é dada pela expressão  $\vec{\sigma} \cdot \vec{k}$ , para a correspondente “quasepartícula” [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: Katsnelson (*European Physics Journal* **B51**, p. 157); Katsnelson, Novoselov e Geim (*Nature Physics* **2**, p. 620); e J. Tworzydło, B. Trauzettel, M. Titov, A. Rycerz e C. W. J. Beenakker (*Physical Review Letters* **96**, 246802). É oportuno ainda registrar que, no mesmo ano de 2006 (*Nature Physics* **2**, p. 595), 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 Kim (*Physical Review Letters* **96**, 136806), que examinaram a separação (*splitting*) do **Nível (Banda) de Fermi** (NF) em grandes campos magnéticos. Por sua vez, Morozov, Novoselov, Katsnelson, Schedin, L. A. Ponomarenko, D. Jiang e Geim (*Physical Review Letters* **97**, 016801) e E. McCann, K. Kechedzhi, Vladimir I. Fal'ko, H. Suzuura, T. Ando e B. L. Allshuler (*Physical Review Letters* **97**, 146805), observaram efeitos não convencionais da magnetoresistência (M-R) (vide verbete nesta série). Com efeito, em baixas temperaturas, todos os sistemas metálicos com alta resistividade exibem alta M-R 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 2006 (*Nature Physics* **2**, p. 177), por Novoselov, McCann, Morozov, Fal'ko, Katsnelson, Zeitler, D. Jiang, Schedin e Geim; e em 2007 (*Science* **315**, p. 1379), por Novoselov, Z. Jiang, Zhang, Morozov, Störmer, Zeitler, J. C. Maan, G. S. Boebinger, Kim e Geim. Registre-se que a **fase de Berry** foi primeiramente descoberta pelo físico indiano Shivaramakrishnan Pancharatnam (1934-1969), em 1956 (*Proceedings of the Indian Academy of Sciences* **A44**, p. 247) e redescoberta pelo físico inglês Sir Michael Victor Berry (n.1941) (ganhador do *Prêmio Ignóbil de Física*, de 2000, junto com Geim), em 1984 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A392**, p. 45). 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 no Hamiltoniano daquele sistema.

Novos resultados intrigantes do **grafeno** foram sucessivamente obtidos. Por exemplo, em 2008 (*Science* **320**, p. 1308), R. R. Nair, P. Blake, A. N. Grigorenko, Novoselov, Booth, T. Stauber, N. M. R. Peres e Geim mostraram existir uma **condutividade óptica** ( $\sigma$ ) mínima, mesmo na ausência de qualquer dissipação e com uma densidade de estados nula,

condutividade essa que foi medida, ainda em 2008 (*Nature Nanotechnology* **3**, p. 491), por X. Du, I. Skachko, A. Barber e E. Y. Andrei. Essa medida mostra que, no caso limite [ $T \rightarrow 0$ ;  $\sigma_0 = \pi e^2/(2 h)$ ], ela concorda com resultados teóricos [obtidos, em 1994 (*Physical Review* **B50**, 7526), por A. W. W. Ludwig, M. P. A. Fischer, R. Shankar e G. Grinstein, e confirmados, em 2007, por K. Ziegler (*Physical Review* **B75**, 233407) e por L. A. Falkovsky e S. S. Pershoguba (*Physical Review* **B76**, 153410) e, em 2008 (*Physical Review* **B78**, 085432), por Stauber, Peres e Geim] que usaram a aproximação de elétrons não-interagentes, o que significa dizer que é desprezada a interação eletromagnética entre elétrons e fótons. Aliás, em 2005, Novoselov, Geim, Morozov, D. Jiang, Katsnelson, Grigorieva, Dubonos e Firsov (op. cit.) haviam mostrado que o EHQI pode ser explicado sem considerar aquela interação. Note-se que essa mesma explicação foi conseguida, desta vez no semicondutor (GaAs), em 2009 (*Review of Modern Physics* **81**, p. 109), por A. H. Castro Neto, F. Guinea, Peres, Novoselov e Geim; e, em 2011 (*Review of Modern Physics* **83**, p. 1193), por M. O. Goerbig.

Conforme destacamos acima, a descoberta e o estudo do **grafeno** foram realizados usando a QED (2 + 1), com a hipótese de que os elétrons não interagem com fótons, ou seja, não era necessário considerar a **interação eletromagnética** envolvendo o **p-e**. Contudo, a necessidade de considerar essa interação já havia aparecido em trabalhos (teóricos e experimentais) sobre a renormalização da  $v_F$  como destacam os artigos escritos, em 2010 (*Physical Review* **B82**, 125409), por F. de Juan, A. G. Grushin e M. A. H. Vozmediano; em 2011 (*Nature Physics* **7**, p. 701), por D. C. Elias, R. V. Gorbachev, A. S. Mayorov, Morozov, Zhukov, P. Blaque, Ponomarenko, Grigorieva, Novoselov e Geim; e, em 2012 (*Physica Scripta* **T146**, 014015), por Vozmediano e Guinea. Por sua vez, a medida direta de  $\sigma$ , em 2008 (Du, Skachko, Barber e Andrei, op. cit.) apresenta um valor que está em desacordo com os valores teóricos calculados sem considerar aquela interação. Por fim, evidências (decorrentes de pesquisas com o EHQF) a mais em favor de considerar tal interação, pelo menos em certa escala de energia térmica, foram apresentadas, em 2009, por Du, Skachko, F. Duerr, A. Luican e Andrei (*Nature* **462**, p. 192) e K. I. Bolotin, F. Ghahari, M. D. Shulman, Störmer e Kim (*Nature* **462**, p. 196); e, em 2011, por

Ghahari, Y. Zhao, P. Cadden-Zimansky, Bolotin e Kim (*Physical Review Letters* **106**, 046801) e. C. R. Dean, A. F. Young, Cadden-Zimansky, L. Wang, H. Ren, K. Watanabe, T. Taniguchi, Kim, J. Hone e K. L. Shepard (*Nature Physics* **7**, p. 693).

Como a previsão do EHQV (ver mais adiante) é uma decorrência do envolvimento do ***p-e*** com o fóton (***interação eletromagnética***), antes de tratar dessa importante conexão entre a Física da Matéria Condensada e a Teoria Quântica de Campos, vamos analisar alguns estudos relacionados com a condutividade óptica ( $\sigma$ ) (portanto, a presença de elétrons) e a ***Fórmula de Kubo*** [equação que expressa a resposta linear de uma quantidade física observável (p.e.:  $\sigma$  e, portanto, ***corrente elétrica***) devido a uma perturbação dependente do tempo, caracterizada pela frequência ( $\omega$ ) e foi deduzida pelo físico japonês Ryogo Kubo (1920-1995), em 1957 (*Journal of the Physical Society of Japan* **12**, p. 570)]. Em tais estudos, a interação eletrônica é analisada por meio de um potencial de Coulomb estático e considerando  $\omega \neq 0$ . No entanto, eles consideram o limite ( $\omega \rightarrow 0$ ) desde o começo quando tratam do ***tensor corrente de Kubo*** e não no final [Gerald D. Mahan, ***Many-Particles Physics*** (Plenum Press, N.Y., 1993)]. O limite considerado nesses trabalhos [publicados, em 2008: I. F. Herbut, V. Juricic e O. Vafek (*Physical Review Letters* **100**, 046403) e E. G. Mishchenko (*European Physics Letters* **83**, 17005); em 2009: D. E. Sheehy e J. Schamalian (*Physical Review* **B80**, 193411); em 2010: Juricic, Vafek e Herbut (*Physical Review* **B82**, 235402); em 2012: I. Sodemann e M. M. Fogler (*Physical Review* **B86**, 115408); em 2013: Herbut e V. Mastropietro (*Physical Review* **B87**, 205445); e, em 2014: D. N. Basov, Fogler, Lanzara, Feng Wang e Zhang (*Review of Modern Physics* **86**, p. 959)], foi a responsável por não aparecer correções na interação eletrônicas, segundo afirmam os físicos brasileiros Eduardo Cantera Marino (n.1954), Leandro Oliveira do Nascimento (n.1988), Van Sérgio da Silva Alves (n.1961) e Cristiane de Moraes Smith (n.1964) (aos quais agradeço nesta oportunidade a leitura crítica deste artigo), no artigo intitulado ***Interaction Induced Quantum Valley Hall Effect in Graphene*** e publicado no dia 31 de março de 2015 (*Physical Review X* **5**, 011040), trabalho no qual há a previsão do EHQV. Vejamos como esta ocorreu.

A **interação eletromagnética** é descrita pelo Eletromagnetismo Maxwelliano (QED-3D) e que tem como base a simetria (grupo) de *gauge* [U(1); U significa Transformação Unitária] [José Maria Filardo Bassalo e Mauro Sérgio Dorsa Cattani, **Teoria de Grupos** (Livraria da Física, 2008)]. Desse modo, como o **p-e** está limitado a um plano (2D) ele não poderia ser descrito pela QED-3D. Para contornar essa dificuldade, em 1990 (*Physical Review* **B42**, 4748), A. Kovner e B. Rosenstein e, posteriormente, em 1992 (*Nuclear Physics* **B386**, p. 614), N. Dorey e N. E. Mavromatos acoplaram o U(1) à **Física 2D** permitindo que o **p-e** tivesse um espaço tridimensional para circular. Como esse acoplamento tinha sido realizado no limite estático, sua dinâmica foi conseguida em trabalhos realizados por Marino, isoladamente, em 1991 (*Physics Letters* **B263**, p. 63) e 1993 (*Nuclear Physics* **B408**, p. 551) e, em parceria com o físico brasileiro Roberto Luis Pinto Gurgel do Amaral (n.1962), em 1992 (*Journal of Physics A: Mathematical, Nuclear and General* **25**, 5183). Desse modo, nasceu a hoje conhecida a **Pseudo Eletrodinâmica Quântica** (PQED) (“Pseudo Quantum Electrodynamics”), pois ela envolve operadores pseudo-diferenciais. É interessante ressaltar que, em 2008 [*arXiv:1408.1637v1[hep-th]*; *Physical Review* **D90**, 105003 (2014)], Marino, Nascimento, Alves e Smith investigaram a unitariedade em teorias com potências fracionárias do **operador d’Alembertiano** ( $\square$ ), definido pela seguinte expressão:  $\square = (1/c^2)\partial^2/\partial t^2 - \partial^2/\partial x^2 - \partial^2/\partial x^2 - \partial^2/\partial y^2 - \partial^2/\partial z^2$ .

Agora, tratemos da participação da *Faculdade de Física da Universidade Federal do Pará* (FF/UFPA) na proposta inédita do EHQV. Pesquisador do *Programa de Pós-Graduação em Física* da FF/UFPA, o Professor Van Sérgio, entre os anos de 2012 e 2013, formou seu grupo de pesquisa para estudar o **grafeno** utilizando a PQED. Assim, em 2013 (*Physical Review* **D87**, p. 125002), Van Sérgio, Juricic, F. Peña, e seus dois mestrandos: Nascimento e Wallace de Souza Elias (n.1986), usando a Lagrangeana (L) (ver definição adiante), estudaram o intervalo (*gap*) de interação dinâmica e a quebra de simetria quiral (paridade) no **grafeno**. A L usada foi:  $L = (1/4) F_{\mu\nu} [2/(\square)^{1/2}] F^{\mu\nu} + \phi^*_{\alpha} [i(\partial/2\pi) + \gamma^{\mu} A_{\mu}] \phi_{\alpha}$ , onde  $\phi$  é o componente bi-dimensional de  $\Phi$  (**spinor de Dirac**),  $\phi^*$  é seu adjunto ( $\phi^* = \phi^{\dagger} \gamma^0$ , com  $\dagger$  indicando trocar linha por coluna da matriz e tomar seu complexo conjugado),  $F_{\mu\nu}$  é o tensor de intensidade de campo

eletromagnético maxwelliano,  $A_\mu$  é o campo de *gauge* U(1) (quadri-potencial vetor),  $\gamma^\mu$  é a matriz bi-dimensional de Dirac, e  $\alpha = 1, 2, \dots N_f$  é o índice de sabor (*flavor*), que especifica o componente do *spin* e o *vale* (*valley*) no qual o *p-e* pertence. Por sua vez, a constante de acoplamento e tem o seguinte valor:  $e^2 = 4 \pi \alpha$ , sendo  $\alpha$  a **constante de estrutura fina**, já citada. É interessante destacar que, como vimos antes, o *p-e* do **grafeno** (rede hexagonal na forma de um “favo de mel”) é descrito por quadri-férmions diracianos sem massa, sendo que cada componente corresponde as sub-redes (A e B) e aos dois vales (K e K’) diferentes. Vale ressaltar que a soma em  $\alpha$  considerando o  $N_f$  indica que, *ab initio*, a TRS não foi quebrada.

No mesmo ano (2013), o Professor Van Sérgio foi convidado por Marino para realizar um pós-doutoramento no *Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro* (IFUFRJ) sob sua orientação. Nesta época já se encontrava no IFUFRJ o seu ex-aluno de mestrado, Leandro Nascimento, que estava iniciando seu doutoramento, também sob a orientação de Marino. Em seguida, juntou-se ao grupo a Cristiane Smith (então Professora Titular da Universidade de Utrecht – Holanda), reconhecida mundialmente por seus importantes trabalhos na Física da Matéria Condensada. Este grupo de pesquisadores realizou então esse notável trabalho, cujo resultado inédito é a proposta do EHQV. Antes de apresentar os principais resultados dessa pesquisa que coloca a FF/UFGA na fronteira da Física, continuemos com a pesquisa com o **grafeno** e o EHQV. Registre-se que este efeito havia sido previsto ocorrer em um sistema **grafênico** sujeito a um potencial de sub-rede “cambaleado” (*staggered*) com quebra de simetria pontual (inversão em torno de um ponto ou *inversion symmetry*), em 2007 (*Physical Review Letters* **99**, 236809), Di Xiao, Wang Yao e Qian Niu e, confirmado, em 2009 (*Physical Review Letters* **102**, 096801), por Yao, Shengyuan A. Yang e Niu. Um ano depois, em 2010 (*Science* **329**, p. 544), S. A. Burke, K. L. Meaker, M. Panlasiqui, A. Zettl, Guinea, Castro Neto e M. F. Crommie observaram o EHQV no **grafeno** estirado e seus *vales* submetidos a campos pseudomagnéticos opostos, no valor de 300 T. Ainda em 2010 (*Physical Review* **B82**, 115124), R. Nandkishore e L. Levitov propuseram a quebra da simetria TRS em uma bicamada de **grafeno** na presença de uma interação

Coulombiana estática, com flutuações. Registre-se que, em 2012 (*Physical Review Letters* **108**, 266801), P. Ghaemi, J. Cayssol, D. N. Sheng e A. Vishwanath previram um EHQV fracionário que surge em sistemas **grafênicos** artificiais gerados por interações de curto alcance, ajustadas (*fine-tuning*) para concordar com observações experimentais.

Para concluir este verbete, vejamos os principais resultados conseguidos nessa pesquisa [Marino, Nascimento, Alves e Smith, op. cit.; Danilo T. Alves, *e-mail* (11/03/2015); Van Sérgio da Silva Alves, *O Liberal*, 12 de abril de 2015]. Assim, usando a PQED, esses físicos calcularam a condutividade óptica ( $\sigma$ ) mínima e suas correções quânticas que representam a melhor previsão teórica até o momento, comparada com dados experimentais. Para o cálculo de  $\sigma$  foi considerada a interação do ***p-e*** com o **tensor polarização do vácuo** ( $\Pi^{\mu\nu}$ ). Este tensor descreve um processo no qual um campo eletromagnético de fundo produz um par elétron-pósitron virtual que muda a distribuição de cargas e correntes geradas pelo campo eletromagnético original. Esse par foi inicialmente proposto pelo físico norte-americano Julian Seymour Schwinger (1918-1994; PNF, 1965), em 1951 (*Physical Review* **82**, p. 664), usando um campo elétrico [Julian Seymour Schwinger (Editor), **Selected Papers on Quantum Electrodynamics** (Dover Publications, Inc., 1958)].

Na continuação de sua pesquisa, os físicos brasileiros usaram o limite de  $\omega \rightarrow 0$  na **Fórmula de Kubo** e obtiveram a **condutividade longitudinal do grafeno** no limite do zero absoluto ( $T \rightarrow 0$ ), em acordo com resultados experimentais. Além disso, mostraram que existe uma **condutividade transversa** (característica do **Efeito Hall**) devido aos vales  $K$  e  $K'$ , e abaixo de uma temperatura crítica ( $T^* \approx 0,1$  K) e, portanto, gerando o EHQV, proposta inédita no cenário da Física mundial. Além do mais, considerando ainda os efeitos da PQED e partindo da auto-energia do elétron [obtida pelo físico anglo-norte-americano Freeman John Dyson (n.1923), em 1949 (*Physical Review* **75**, p. 1736) e confirmada por Schwinger, em 1951 (*Proceedings of the National Academy of Sciences* **37**, p. 452; 455)], eles mostraram que o ***p-e*** adquire um intervalo (*gap*) energético cujos estados de energia são dinamicamente gerados em associação ao EHQV. Em vista disso, esses autores fizeram a previsão de

que esse efeito pode ser medido experimentalmente em uma temperatura  $\approx 2$  K. É oportuno salientar que, em 2010 (*Nature* **6**, p. 30), Guinea, Katsnelson e Geim mediram o intervalo energético do **grafeno**, apenas no nível zero e, por realizarem essa experiência em temperatura acima de 2 K, não conseguiram medir o EHQV. Sorte da **Física Brasileira**, com uma grande contribuição da **Física Paraense**!

---



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)