



SEARA DA CIÊNCIA CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



Efeito Hall: Clássico e Quântico e os Prêmios Nobel de Física de 1985 e 1998.

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 por: $V_H = IR_H$, 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, 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).

Sobre o EHC, é oportuno tecer alguns comentários. O primeiro, refere-se ao fato de que tal efeito corrigiu um equívoco cometido pelo físico e matemático escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) em seu livro intitulado *A Treatise on Electricity and Magnetism*, publicado em 1873, no qual afirmou que a força (\vec{F}) decorrente de \vec{B} só atuava no condutor propriamente dito, e não nas cargas elétricas que compõem a corrente elétrica. Para Maxwell, essa força era dada por (em linguagem atual): $\vec{F} = \vec{C} \times \vec{B}$, com $\vec{C} = \vec{K} + d\vec{D}/dt$. Nesta expressão, \vec{C} significa a *densidade de corrente real*, $d\vec{D}/dt$ representa a *densidade de corrente de deslocamento* e $\vec{K} = c\vec{E}$ é a *densidade de corrente de condução* (sendo c a *condutividade específica* e \vec{E} o *campo elétrico*). O segundo comentário, é o de que a "força" considerada por Maxwell só foi 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 , hoje conhecida como *força de Lorentz* (vide verbete nesta série). Como terceiro comentário, é interessante registrar que o físico e químico alemão Walther Hermann Nernst (1864-1941; PNQ, 1920), com a colaboração de seu aluno, o físico alemão Albert von Ettingshausen (1850-1932), descobriu, em 1886 (*Annalen der Physik* 29, p. 343), que um gradiente de temperatura ao longo de um condutor elétrico colocado perpendicularmente em um campo magnético provoca uma diferença de potencial entre as extremidades opostas desse condutor. Esse efeito, também conhecido como *efeito Ettingshausen-Nernst*, é análogo ao EHC. Por fim, é ainda oportuno comentar que A. B. Basset, em artigos publicados em 1891 (*Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 182, p. 371), 1893 (*Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 8, 68), 1895 (*Nature* 52; 53, pgs. 618; 130) e 1897 (*American Journal of Mathematics* 19, p. 60), fez um estudo conectando o EHC com o *efeito magneto-óptico* ou *Efeito Faraday* (vide verbete nesta série). Para maiores detalhes do EHC, ver: William Francis Magie (Editor), *A Source Book in Physics* (McGraw-Hill Book Company, Inc., 1935); e Sir Edmund Taylor Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity: The Classical Theories* (Thomas Nelson and Sons Ltd., 1951).

Até 1980, a resistência Hall (R_H) era conhecida por intermédio da expressão: $R_H = B/(ne)$, com n representando a densidade eletrônica por cm^3 , e e é 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, que valeram os Prêmios Nobel de Física de 1985, para o físico alemão Klaus von Klitzing (n.1943), pela descoberta do Efeito Hall Quântico Inteiro, e o de 1998, para os físicos norte-americanos Horst Ludwig Störmer (n.1949) (de origem alemã) e Daniel Chee Tsui (n.1939) (de origem chinesa), pela descoberta, e Robert B. Laughlin (n.1950), pela explicação teórica do Efeito Hall Quântico Fracionário, conforme veremos a seguir.

Von Klitzing doutorou-se na *Universidade de Würzburg*, na Alemanha, em 1972, sob a orientação do físico alemão G. Landwehr (n.1929). Entre 1975 e 1976, realizou pesquisas no *Laboratório Clarendon*, em Oxford, na Inglaterra, e, entre 1979 e 1980, no *Laboratório de Alto Campo Magnético*, em Grenoble, na França. Seu interesse 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), começou a realizar 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 ($\text{nm} = 10^{-9} \text{ m}$) 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*) 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* α ($\alpha = \pi \mu_0 c e^2 / h \approx 1/137$) por intermédio da relação: $R_H \alpha = (1/2) \mu_0 c$, onde μ_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*, vista acima. Quanticamente, existe somente um conjunto discreto de órbitas permitidas com energias também discretas, que caracterizam os *níveis de Landau* (NL), 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). Para maiores detalhes dessa descoberta, ver a Nobel Lecture (09 de Dezembro de 1995: Nobel e-Museum) de von Klitzing. Essa descoberta ensejou a descoberta do Efeito Hall Quântico Fracionário (EHQF), conforme veremos a seguir.

Depois de obter o seu Doutorado, em 1967, na *Universidade de Chicago*, Tsui foi trabalhar, na primavera de 1968, no *Bell Laboratory*, em Murray Hill, New Jersey, nos Estados Unidos da América. Störmer, por sua vez, doutorou-se na *Universidade de Stuttgart*, na Alemanha, em 1977, sob a orientação do físico alemão Hans-Joachim Queisser (n.1931). Em junho de 1977, Störmer foi para o *Bell*. 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, envolvendo semicondutores, do tipo gálio/arsênio-alumínio/gálio/arsênio ($\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$). 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 $90.000 \text{ cm}^2 / (\text{V s})$, 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. Contudo, quando aumentaram esse valor para 15 T, encontraram, na temperatura de 0.48 K, um resultado surpreendente, ou seja, a resistência Hall havia atingido o valor: $R_H = \frac{\phi_0}{(1/3) i e}$. 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 Efeito Hall Quântico precisavam de uma explicação teórica. Ela foi formulada por Laughlin. Vejamos como.

Em sua adolescência, Laughlin aprendeu com seu irmão John a maneira de entender as coisas a partir dos primeiros princípios, como desmontando eletrodomésticos para aprender seu funcionamento, sem conhecimento prévio sobre eles. Essa característica de trabalhar em um problema a partir do começo, sem nenhum conhecimento teórico anterior, acompanhou toda a vida de cientista de Laughlin, conforme ele próprio descreveu em sua Autobiografia (Nobel e-Museum).

Motivado por seu pai para o estudo da Matemática e considerando seu hábito de “engenheirar” que praticava desde criança, Laughlin matriculou-se, em 1968, na *Berkeley University*, no Curso de Engenharia Elétrica. Contudo, no meio do segundo ano (“sophomore year”), decidiu transferir-se para o Curso de Física dessa Universidade. Neste, teve oportunidade de estudar com físicos famosos, dentre os quais se destacam os norte-americanos Charles Hard Townes (n.1915; PNF, 1964); Owen Chamberlain (1920-2006; PNF, 1959), Emilio Gino Segrè (1905-1989; PNF, 1959) (de origem italiana), John David Jackson (n.1925), Geoffrey Foucar Chew (n.1924), Ray Sachs e Charles Kittel (n.1916).

No final do período em que Laughlin estudou em Berkeley (1968-1972), ocorreu a parte mais violenta da *Guerra do Vietnã* (1955-1975) e, portanto, teve de realizar o Serviço Militar. Inicialmente, foi servir no *Fort Sill*, em Oklahoma, onde aprendeu como disparar os famosos *mísseis Pershing*, e completou esse Serviço na Alemanha Meridional, em Schwaebisch Gmuend, próximo de Stuttgart. Durante o tempo em que esteve nessa região da Alemanha, procurou conciliar o aprendizado da língua alemã com a Física, lendo os livros dessa Ciência que encontrava nas bibliotecas das Universidades dessa região.

De volta aos Estados Unidos, Laughlin matriculou-se no MIT, em 1974, para realizar o Doutorado em Física. Assim, juntou-se ao grupo de pesquisas de John Joannopoulos, que trabalhava em Física do Estado Sólido, particularmente em Teoria Quântica de Vidros. Nesse grupo, Laughlin aprendeu muitas técnicas experimentais, tais como: difração de raios-X, espalhamento de nêutrons, espalhamento Raman, espectroscopia de absorção de raios infravermelhos, capacidade calorífica, transporte temporal, ressonância magnética, difração de elétrons, espectroscopia de perda de energia de elétrons. Tais técnicas, segundo Laughlin, constituíam os “olhos” e os “ouvidos” da Física do Estado Sólido, hoje conhecida como Física da Matéria Condensada. Depois de trabalhar por um longo período com Joannopoulos, o que resultou em uma série de artigos, Laughlin obteve (tendo Joannopoulos como orientador) seu Doutorado, no MIT, em 1979.

Depois de seu Doutorado; Laughlin foi trabalhar no *Bell*, em Murray Hill, por ocasião em que von Klitzing, Dorda e Pepper descobriram o EHQI, em 1980, e já referido. Em um certo dia desse ano de 1980 e 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 daqueles físicos 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 na referida *Física 2D* não o conseguiam explicar. Registre-se que o conceito de localização (estado isolante quando um metal não-interagente é submetido a um grande potencial randômico) havia sido formulado por Anderson, em 1958 (*Physical Review* 112, p. 1900). 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).

Note-se que o EJ foi 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. Tal efeito se apresenta em duas formas. A primeira – conhecida como efeito Josephson DC – ocorre quando uma corrente elétrica contínua (DC – “Direct Current”) atravessa a junção entre os dois supercondutores, na ausência de voltagem entre os mesmos. A segunda – chamada de efeito Josephson AC – acontece quando uma voltagem AC (“Alternating Current”) é aplicada através da junção, com o conseqüente aparecimento de correntes elétricas oscilatórias de radiofrequência.

A sugestão de Anderson foi desenvolvida por Laughlin, em 1981 (*Physical Review* B23, p. 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 da *energia (nível) de Fermi* (EF) 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 (*Physical Review B* 24, p. 2274), G. A. Baraff e Tsui apresentaram uma outra explicação para o EHQI sem incluir os estados localizados nas extremidades da EF.

Registre-se que a *energia de Fermi* é dada por: $\epsilon_F = -\alpha k T$, onde α é um parâmetro que depende da temperatura absoluta T , do número de moléculas e da distribuição dos possíveis níveis de energia, e k é a *constante de Boltzmann*. Essa EF significa a energia mais alta em que, no zero absoluto ($T = 0$), o elétron pode ocupar em sua distribuição energética. A superfície para a qual ϵ_F é constante, chama-se *superfície de Fermi*. É oportuno ainda registrar que EF nos condutores situa-se na *banda de condução*; nos isolantes, na *banda de valência*; e nos semicondutores, no intervalo entre essas duas bandas. [Sobre essas bandas, ver verbete nesta série e em Charles Kittel, *Introduction to Solid State Physics* (John Wiley and Sons, 1971); John Michael Ziman, *Principles of the Theory of Solids* (Cambridge University Press, 1972); e Rogério César de Cerqueira Leite e Antônio Rubens Britto de Castro, *Física do Estado Sólido* (Editora Edgard Blücher Ltda., 1978) .]

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 DeWitt 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* (ver verbete nesta 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, 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 uma outra explicação para o EHQF. Conversando com seu estudante Eugene L. Mele sobre o conceito de *quasepartícula*, usado em Física de Partículas Elementares e em Física do Estado Sólido, Laughlin pensou em explicar aquele efeito como sendo devido a um condensado de muitos-corpos com excitações correspondentes a uma *quasepartícula* de carga $e/3$. Com essa idéia, preparou um artigo e o enviou para a *Physical Review Letters* (PRL). Nesse artigo, ele mostrou que a *quasepartícula* 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 EHQF, conforme veremos mais adiante. Antes, façamos alguns comentários sobre o conceito de *quasepartícula* e sua aplicação.

Em 1976 (*Physical Review D* 13, p. 3398), Roman Jackiw e C. Rebbi apresentaram a idéia de que existem partículas que podem carregar parte de um número quântico elementar. Essa *quasepartícula* é também conhecida como *sóliton topológico* ou *partícula kink*. Em 1979 (*Physical Review Letters* 42, p. 1698), Wu-Pei Su, John Robert Schrieffer (n.1931; PNF, 1972) e Alan J. Heeger usaram esse conceito de *quasepartícula* para estudarem a condutividade elétrica nos polímeros supercondutores; essa condutividade é gerada por defeitos solitônicos em cadeias poliacetilenas dopadas.

Voltemos ao trabalho teórico de Laughlin sobre o EHQF. Em 1983 (*Physical Review Letters* 50, p. 1395), ele explicou esse efeito ainda usando a idéia de *quasepartícula*, porém, com uma outra interpretação. Vejamos qual. Inicialmente, Laughlin mostrou que um gás de elétrons, sob um campo magnético intenso ($\sim 15 \text{ T}$) e temperatura baixa ($\sim 0.48 \text{ K}$) (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. No entanto, para explicar as cargas fracionárias características do EHQF, Laughlin imaginou uma experiência de pensamento, análoga à que considerou na explicação do EHQI, envolvendo o fluxo quântico magnético ($\Phi_0 = h/e$). 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 (*quasepartículas* 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 *quasepartículas* é descrito pela seguinte função de onda:

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

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 Φ_0 , $\mathbf{z}_j = x_j + i y_j$ representa a posição do j -ésimo elétron, e $\ell = \sqrt{m} \lambda$ denomina-se *comprimento magnético*. É interessante notar que a idéia 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, p. 605), F. Duncan M. Haldane mostrou que a função de onda proposta por Laughlin representava o estado fundamental exato de uma classe de Hamiltonianas com potenciais não-locais (sobre não-localidade, ver verbete nesta série). É também em 1983 (*Physical Review* B27, p. 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, p. 997), por A. M. Chang, P. Berglund, Tsui, Störmer e J. C. M. Hwang. Destaque-se que, em 1997, as *quasepartículas Laughlinianas* 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. O grupo francês, constituído por Laurent Saminadayar, D. Christian Glattli, Yong Jin e Bernard Etienne, na *Physical Review Letters* 79, p. 2526.

Ainda na década de 1980, as *quasepartículas Laughlinianas* e o EHQF tiveram outras interpretações, dentre as quais destacam-se as apresentadas por Bertrand I. Halperin, em 1984 (*Physical Review Letters* 52, p. 1583), por intermédio do conceito das partículas anyons, que não são nem bósons e nem férmions, e por Jainendra K. Jain, em 1989 (*Physical Review Letters* 63, p. 199), que usou o conceito de partícula composta (CP), que pode ser um férmion (de spin fracionário): elétron com um número para de fluxos quânticos, ou um bóson (de spin inteiro): elétron com um número ímpar desses mesmos fluxos. Destaque-se que esses dois tipos de partículas (anyons e CP) apóiam-se na Estatística Fracionária, cuja primeira idéia foi apresentada por J. M. Leinaas e J. Myrheim, em 1977 (*Nuovo Cimento* B37, p. 1), para tratar de partículas que não são nem bósons e nem férmions; e, posteriormente, desenvolvida pelo físico norte-americano Frank Anthony Wilczek (n.1951; PNF, 2004), em 1982 (*Physical Review Letters* 48, p. 957). É interessante ainda destacar que Laughlin, na *Stanford University*, para onde se transferiu, em 1984, tentou, sem sucesso, encontrar uma relação entre suas “quasepartículas” e os *quarks*, uma vez que ambas têm cargas elétricas fracionárias e ligam-se por forças de calibre (“gauge”). Para maiores detalhes sobre o EHQF, ver: Robert B. Laughlin, Nobel Lecture (08 de Dezembro de 1998: Nobel e-Museum); Horst L. Störmer, Nobel Lecture (08 de Dezembro de 1998: Nobel e-Museum); e Daniel C. Tsui, Nobel Lecture (08 de Dezembro de 1998: Nobel e-Museum).

Ao concluirmos este verbete, é importante registrar a recente descoberta de um novo aspecto do Efeito Hall Quântico: o Efeito Hall de Spin (EHS), 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, esse efeito é não-magnético, e sim elétrico. Essa proposta foi esquecida por quase trinta anos, até que, em 1999 (*Physical Review Letters* 83, p. 1834), J. E. Hirsch voltou a apresentá-la, ocasião em que denominou de Efeito Hall de Spin. Nessa sua proposta, ele sugere um tipo de experiência com um metal paramagnético, capaz de exibir esse efeito. A partir daí, houve um intenso debate sobre 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, no. 047204), Jörg Wunderlich, B. Kaestner, Jairo Sinova e T. Jungwirth também observaram essa polarização, desta vez usando um LED (“Light-Emitting Diode”) (nesse artigo, encontram-se as referências sobre o debate teórico referido acima). Em 2006 (*Applied Physics Letters* 89, no.

242116), S. Ghosh, N. P. Stern, B. Maertz, Awschalom, G. Xiang, M. Zhu e N. Samarth demonstraram o EHS 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, no. 096605), e com a participação de Stern, Ghosh, Xiang, Zhu e Samarth (*Physical Review Letters* 97, no. 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 eletrônica normal (ver [site da physicsact](#)). Outros detalhes da spintrônica e do EHQ, ver: David D. Awschalom, Ryan Epstein, Ronald Hanson e Yuichiro K. Kato, *Scientific American Brasil* 66, p. 58 (Novembro de 2007).

No fechamento deste artigo, é oportuno registrar que, em abril de 2008 (*Nature* 452, p. 970), os físicos D. Hsieh, D. Qian, L. Wray, Y. Xia, Y. S. Hor, R. J. Cava e M. Z. Hasan da *Princeton University* criaram o EH ao passarem elétrons com velocidades próximas da luz em um cristal de bismuto-antimônio ($\text{Bi}_{1-x}\text{Sbx}$) (“isolante topológico de Dirac”). Nessa velocidade, os elétrons criam um campo magnético que os faz se desviarem para as extremidades e, conseqüentemente, gerando a famosa diferença de potencial Hall (V_H). [*Scientific American Brasil* 75, p. 11 (Agosto de 2008).]



ANTERIOR

SEGUINTE