

# O EFEITO HALL QUANTIFICADO FRACCIONÁRIO

## PRÉMIO NOBEL DA FÍSICA 1998

J. M. B. LOPES DOS SANTOS

Centro de Física do Porto e Departamento de Física da Fac. Ciências da Univ. Porto  
Rua do Campo Alegre, 687, 4169-007 Porto

Em 1985 o prémio Nobel da Física foi atribuído a Klaus Von Klitzing, pela descoberta do Efeito Hall Quantificado (EHQ) (ver [1]). Em 1998 o prémio Nobel da Física foi atribuído a dois experimentalistas, Dan Tsui e Häns Störmer [2] e um teórico, Robert Laughlin [3] pela descoberta e explicação do Efeito Hall Quantificado... Fraccionário (EFQF).

Usando a linguagem futebolística, trata-se de uma "dobradinha", não para uma pessoa, como nos casos de Marie Curie (prémio Nobel da Física e da Química) ou John Bardeen (dois prémios Nobel da Física e da Química) ou John Shockley e outro pela teoria da Supercondutividade com Cooper e Schrieffer) mas para o mesmo fenómeno, o que é certamente mais surpreendente.

O prémio Nobel de Von Klitzing não foi uma grande surpresa. Recordemos os aspectos essenciais da sua descoberta. O efeito Hall, descoberto há cerca de um século por Edwin Hall, surge num condutor percorrido por uma corrente eléctrica,  $I$ , na presença de um campo magnético,  $B$ , perpendicular à direcção da corrente e manifesta-se pelo aparecimento de uma diferença de potencial,  $V_H$ , na direcção perpendicular às do campo e da corrente. Sendo  $V_H$  proporcional a  $I$  é possível definir uma resistência de Hall,  $R_H$ ,

$$R_H = \frac{V_H}{I}$$

A teoria clássica do efeito Hall (ver [1]) prevê que  $R_H = B/(-\rho)$  em que  $\rho$  é a densidade de carga eléctrica dos transportadores. Von Klitzing mediu o efeito Hall em amostras em que os portadores de carga, electrões, estavam quanticamente confinados a mover-se a duas dimensões, num plano. Descobriu que, a baixas temperaturas, a variação de  $R_H$  com  $B$  mostrava patamares em que  $R_H$  era constante e dado com enorme precisão pela expressão

$$R_H = \frac{1}{i} \frac{h}{e^2} \quad i, \quad \text{inteiro}$$

em que  $h$  e  $e$  são duas constantes fundamentais, a constante de Planck e a carga do electrão. Dois aspectos tornaram esta descoberta particularmente significativa:

- A precisão da quantificação é tão elevada que o EHQ passou a ser usado como padrão de resistência. A resistência de um condutor é uma grandeza normalmente muito sensível a inúmeros factores — temperatura, pureza, geometria

de contactos, etc. Variações pequenas destes factores podem ocasionar variações de várias ordens de grandeza na resistência. No EFQ, se os valores de temperatura, campo, e pureza da amostra forem suficientes para o efeito se manifestar, os valores de  $R_H$  encontrados nos patamares satisfazem a eq. (2) com desvios muito inferiores a 1 ppm.

- A quantificação é dada em função de constantes fundamentais. É pois independente de todos os detalhes do sistema concreto em estudo.

Na figura 1 mostra-se um exemplo do efeito descoberto por Von Klitzing. O último patamar à direita da figura corresponde ao valor de  $i = 2$ . A figura 2 mostra um exemplo do

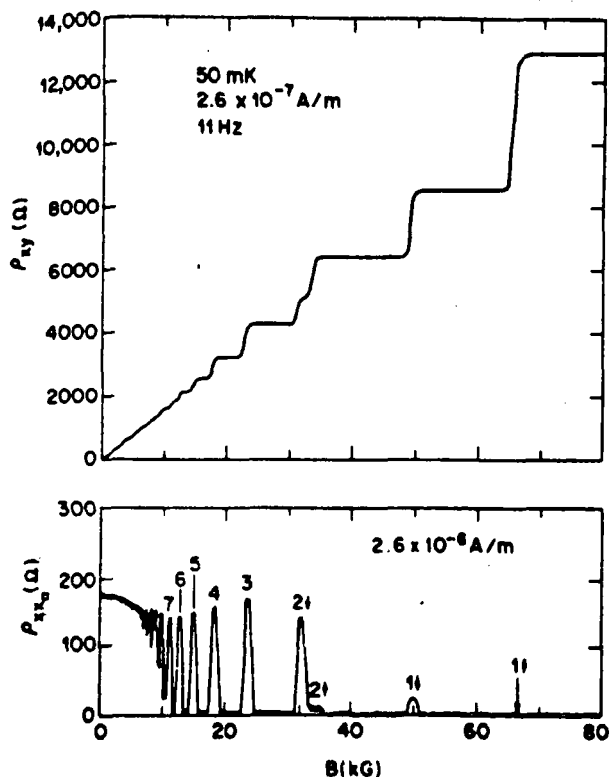


Fig. 1 — A resistência de Hall,  $\rho_{xy}$  e a resistência longitudinal,  $\rho_{xx}$  em função do campo magnético. Nos patamares da resistência de Hall, a resistência longitudinal anula-se, o que significa que a corrente flui perpendicularmente ao campo eléctrico (ausência de dissipação). (De M. A. Paalanen, D. C. Tsui, A. C. Gossard, *Phys. Rev. B* **B25**, 5566, (1982))

efeito descoberto dois anos mais tarde por Dan Tsui, Hans Stormer e Arthur Gossard. O primeiro patamar à esquerda corresponde a  $i = 1$ . Os restantes patamares correspondem a valores  $R_H$ , dados ainda pela eq. (2), mas com  $i$  fraccionário (fracção racional denominador ímpar, indicada no topo da figura). Se repararmos no eixo do campo magnético, vemos que a figura 2 é, praticamente, a continuação da figura 1 para campos magnéticos mais elevados. Qual o experimentalista que valha o seu salário, por pequeno que seja, que conhecendo os resultados de Von Klitzing, não tentaria ver o que se passa para campos magnéticos mais elevados? E recebeu um prémio Nobel por isso?

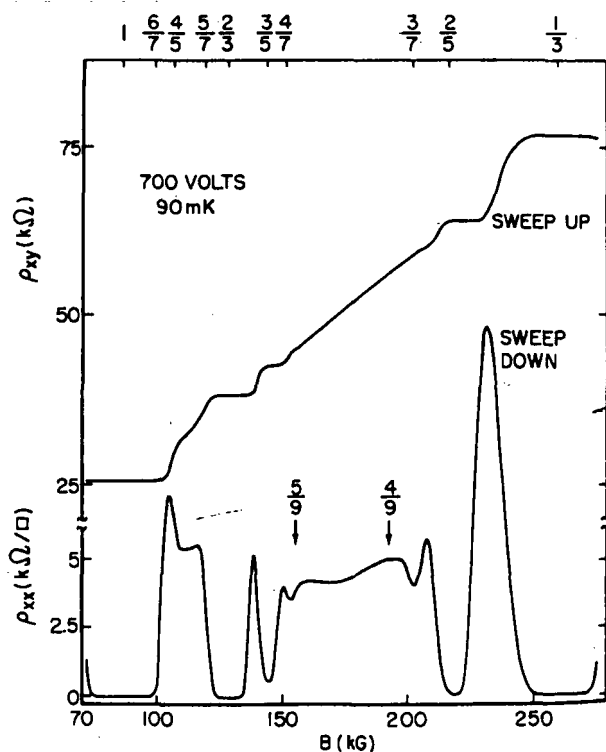


Fig. 2 — O efeito Hall quantificado fraccionário. Note-se que os valores de campo magnético são mais elevados que os da figura 1. (De A. M. Chang, P. Berglund, D. C. Tsui, H. L. Stormer, J. C. M. Hwang, *Phys. Rev. Lett.* **53**, 997 (1984))

Na verdade, a descoberta de Tsui, Stormer e Gossard é bem merecedora de um prémio Nobel, mas sobretudo por razões que têm a ver com as perspectivas teóricas que o EHQF abriu e em relação às quais se destacou Robert Laughlin. Cerca de um ano depois da descoberta do efeito, Laughlin publicou um artigo notável [3], que lançou as principais ideias para a compreensão de um sistema de uma riqueza previamente insuspeitada, o gás electrónico bi-dimensional, num campo magnético e com interacções Coulombianas. No espaço disponível para esta curta notícia, não é possível fazer justiça ao conjunto de ideias que, desde então, surgiram neste campo. Deixo apenas algumas pistas para encorajar o leitor a procurar algumas das referências indicadas no fim.

O próprio Laughlin mostrou que a explicação do EHQF envolvia um estado da matéria completamente novo e com

propriedades muito invulgares. A conjugação da bi-dimensionalidade, do campo magnético e das interacções, faz surgir um líquido quântico incompressível, isto é, que só pode existir para valores quantificados de densidade. Este estado tem todas as simetrias do gás, mas os movimentos dos electrões são fortemente correlacionados (líquido). O aparecimento deste estado é um efeito quântico. Se tentarmos adicionar, ou retirar electrões a um destes estados, a carga extra surge-nos na forma de partículas que podem estar localizadas em qualquer ponto da amostra e que têm carga que é *uma fracção da carga do electrão*. Por exemplo no estado de Laughlin correspondente ao valor de  $i = 1/3$  na fórmula da eq. (2), se adicionarmos um electrão surgem-nos três partículas independentes cada uma com carga  $e^* = e/3$ . Estas partículas têm uma estatística quântica intermédia entre bosões e fermiões [4], "anyons", uma possibilidade que só existe a duas dimensões.

O estado de condutor de Hall quântico, partilha com os supercondutores uma propriedade que era exclusiva desses materiais: a possibilidade de conduzir corrente eléctrica em estados de equilíbrio termodinâmico. No caso dos supercondutores a corrente pode surgir em campo eléctrico nulo. Nas figuras 1 e 2 mostra-se, além da resistência de Hall, a resistência na direcção da corrente, que se anula nos patamares da resistência de Hall; a corrente flui na direcção perpendicular ao campo eléctrico. Isto implica a ausência de efeitos dissipativos. Uma das possíveis representações do estado de condutor de Hall quântico, descreve-o como um estado supercondutor [5], mas em que, em vez de pares de Cooper, temos electrões individuais ligados com tubos de fluxo de campo magnético (solenóides infinitamente finos). O movimento destes electrões corresponde a uma corrente eléctrica e o movimento associado dos solenóides dá origem a uma diferença de potencial perpendicular à corrente.

Estas são apenas algumas das ideias e conceitos que surgiram no seguimento da descoberta do EHQF e do trabalho de Laughlin. Não consigo imaginar nenhuma refutação mais convincente da falácia, que consiste em pensar que conhecer as leis fundamentais é conhecer tudo o que há para saber. Aos electrões num plano, num campo magnético e com interacções, aplicam-se as leis da Mecânica Quântica descobertas em 1925 e 1926 por Heisenberg e Schödinger, e *mais nada!* No entanto, em 1980 e 1982, descobertas experimentais conduzem à descoberta de estados físicos, de partículas exóticas e de possibilidades teóricas, completamente ignoradas até à altura. No fundo, mais uma lição de humildade dada pela Natureza.

## Referências

- [1] *O efeito Hall quantificado, prémio Nobel da Física de 1985*, J. M. B. Lopes dos Santos, *Gazeta de Física* **9**, 1 (1986).
- [2] *Two-Dimensional Magnetotransport in the Extreme Quantum Limit*, D. C. Tsui, H. L. Stormer, A. C. Gossard, *Phys. Rev. Lett.* **48**, 1559 (1982).
- [3] *Anomalous Quantum Hall Effect: An Incompressible Quantum Fluid with Fractionally Charged Excitations*, R. B. Laughlin, *Phys. Rev. Lett.* **50**, 1395 (1983).
- [4] *Anyons*, Frank Wilczek, *Scientific American*, May, 1991, p. 24.
- [5] *Electrons in Flatland*, Steven Kivelson, Dung Hai Lee, Sholl Cheng Zhang, *Scientific American*, March, 1996, p. 64.