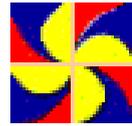




# CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

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



---

## O Prêmio Nobel de Física de 2016: Parte 2 – Haldane.

Haldane nasceu em 14 de setembro de 1951, em Londres e realizou seu Ensino Médio na *Saint Paul's School*, em Londres. Começou sua Graduação em *Natural Sciences* ("Ciências Naturais"), em 1970, no *Christ's College* [um dos *Colleges* da *University of Cambridge/Cambridge University* (UC/CU)], no qual recebeu o grau de *Bacharel em Artes*, em 1973. Sob a orientação do físico norte-americano Philip Warren Anderson (n.1923; PNF, 1977), Haldane defendeu a Tese de Doutorado de nome: **An Extension of the Anderson Model as a Model for Mixed Valence Rare Earth Materials**, em 1978, na UC/CU. Enquanto aguardava a defesa de sua Tese de Doutorado, em 1977, Haldane foi realizar estudos de pós-doutoramento no *Institut Laue-Langevin* (ILL), que é um *Centro de Pesquisa Internacional*, localizado em Grenoble, França, ficando lá até 1981, quando então foi indicado para ser *Professor Assistente*, na *University of Southern California* (USC), em Los Angeles, cargo que exerceu até 1985. Entre 1985 e 1987, foi *Membro do Technical Staff*, do *AT & T Bell Laboratories*, em Murray Hill, New Jersey. De 1987 até 1990, foi *Professor de Física*, da *University of California*, em San Diego. Por fim, em 1990 foi escolhido *Eugene Higgins Professor of Physics*, da *Princeton University*, em Princeton, cargo que exerce até o presente momento ([en.wikipedia.org/Haldane](http://en.wikipedia.org/Haldane), acesso fevereiro de 2017).

Além do PNF/2016 [**Topological Quantum Matter**, *Nobel Lecture* (08/12/2016)], Haldane recebeu outras honrarias (*fellows, members, medals, prizes, chair* e *doctor honoris causae*), com destaque para: 1) **Alfred P. Sloan Foundation Research Fellow**, em 1984 (até 1988); 2) **Member of the Advisory Board - Aspen Center for Physics**, em 1990 (até 1999); 3) **Fellow of the American of Arts and Sciences**, em 1992; 4) **Oliver E. Buckley Condensed Matter Prize** (*American Physical Society*, em 1993); 5) **Fellow of the Royal Society** (FRS) (*Royal Society of London*, em 1996); 6) **Lorentz Chair** (*Lorentz University/Instituut-Lorentz*, em 2008); 7) **Dirac Medal** [*Institute of Physics (IOP)* (Inglaterra e Irlanda), em 2012]; e 8) **Doctor Honoris Causae** (*Université de Cergy-Pontoise*, em 2015). Observe-se que Haldane também é **Distinguished Visiting Research Chair**, no *Perimeter Institute for Theoretical Physics*, que é um *Centro Internacional de Pesquisa em Física Teórica*, fundado em Waterloo/Ontario, no Canadá, em 1999, pelo investidor e homem de negócios, o grego-canadense Mihal ("Mike") Lazaridis (n.1961).

Vejamos agora algumas contribuições de Haldane que o credenciaram ao nobelato e, principalmente, na *Física da Matéria Condensada* [p.ex.: teoria de líquidos quânticos; ondas de spin (cadeias de spin quântico); antiferromagnetismo; EHQF; FTHNN; EHQA; etc.]. Com efeito, quando ele estava na UC/CU realizando o seu Doutorado com Anderson, eles publicaram, em 1976 (*Physical Review* **B13**, p. 2553), o artigo: **Simple Model of Multiple Charge States of Transition-Metal Impurities in Semiconductors**, em que usaram o **Modelo de Anderson** (MA) [*Physical Review* **124**, p. 41, (1961)] sobre as impurezas magnéticas dos metais, e o estenderam

aos semicondutores. É oportuno destacar que o MA, é um modelo quântico definido pelo **Hamiltoniano de Anderson** (HA) e usado para descrever sistemas de férmions pesados, e que contém uma ressonância estreita entre um estado de impureza magnética e um estado de condutividade elétrica. Além disso, na HA existe um potencial de troca  $U$  com o átomo de impureza caracterizado por um orbital  $\phi_d$ . Há ainda nesse Hamiltoniano um termo  $V_{dk}$ , que representa o tunelamento através da barreira centrífuga da ressonância e que converte aquele orbital em um estado ressonante de energia  $E_d$ . No ILL, Haldane realizou trabalhos seminais sobre líquidos quânticos e cadeias de spin quântico, usando argumentos topológicos. Por exemplo, em 1981 (ILL: preprint **SP81-95**), Haldane apresentou as primeiras ideias de que o **antiferromagnetismo de Heisenberg**, inicialmente com spin inteiro, poderia ser estendido a spin fracionário (ver sua *Nobel Lecture*). Ainda em 1981 (*Journal of Physics C: Solid State Physics* **14**, p. 2585), Haldane publicou o artigo intitulado: **‘Luttinger Liquid Theory’ of One-Dimensional Quantum Fluids**. É oportuno registrar que, em 1963 (*Journal of Mathematical Physics* **4**, p. 1154), o físico norte-americano Joaquin (“Quin”) Mazdak Luttinger (1923-1997) desenvolveu uma teoria envolvendo as interações de elétrons em metais unidimensionais, sendo que esses elétrons são ditos como estarem no **Estado Luttinger-Líquido**, que é um estado conhecido como **líquido quântico**. Registre-se ainda que a primeira ideia sobre esse tipo de “líquido” foi apresentada, em 1950 (*Progress in Theoretical Physics* **5**, p. 544), pelo físico japonês Sin-Itiro Tomonaga (1906-1979; PNF, 1965), daí esse efeito ser também conhecido como **Líquido Tomonaga-Luttinger**.

Quando Haldane estava na USC deu continuidade aos seus estudos em *Física da Matéria Condensada*. Assim, em 1983, publicou três trabalhos: 1) **Phase Diagram of Surface Structures from Bethe Ansatz Solutions of the Quantum Sine-Gordon Model** (*Physical Review* **B28**, p. 2743), com os físicos dinamarqueses Tomas Bohr [filho do físico dinamarquês Aage Niels Bohr (1922-2009; PNF, 1975)] e Per Bak (1948-2002); 2) **Continuum Dynamics of the 1-D Heisenberg Antiferromagnet: Identification with the O(3) Nonlinear Sigma Model** (*Physics Letters* **A93**, p. 464); e 3) **Nonlinear Field Theory of Large-Spin Heisenberg Antiferromagnets: Semiclassical Quantized Solitons of the One-Dimensional Easy-Axis Néel State** (*Physical Review Letters* **50**, p. 1153). É interessante destacar que o **antiferromagnetismo** foi proposto pelo físico francês Louis Eugène Félix Néel (1904-2000; PNF, 1970), em 1932 (*Annales de Physique* **17**, p. 64), ao formular um modelo de uma estrutura magnética para a qual os spins nas redes são arranjados, de um modo paralelo e antiparalelo, alternadamente, de maneira que o campo magnético resultante é nulo. Por sua vez, em 1972 (*Nuovo Cimento* **11B**, p. 125), os físicos, o alemão Werner Karl Heisenberg (1901-1976; PNF, 1932) e o japonês K. Yamazaki usaram os **magnons** [**ondas de spin**, descobertas pelo físico suíço Felix Bloch (1905-1983; PNF, 1952), em 1930 (*Leipziger Vorträge: Elektronen-Interferenzen*, p. 67), que são estados de energia correspondente à precessão dos spins inteiros alinhados no estado fundamental] para estudar o **antiferromagnetismo**. [Bassalo & Caruso, **Heisenberg** (Livraria da Física, 2014)]. Ainda na USC, Haldane trabalhou no EHQF. Com efeito, segundo vimos nos trabalhos nobelísticos de Thouless discutidos acima, Laughlin explicou o EHQF por intermédio da ideia de **quase-partícula**, usando um tipo de Hamiltoniano (HL) aplicado a sua **função de onda de Laughlin**:  $\psi_m$ , ideia essa que foi por ele proposta, em 1983 (op. cit.). Ainda em 1983 (**Fractional Quantization of the Hall Effect: A Hierarchy of Incompressible**

**Quantum Fluid States**, *Physical Review Letters* **51**, p. 605) Haldane mostrou que  $\psi_m$  representava o estado fundamental exato de uma classe de Hamiltonianos com **potenciais não-locais** e, com isso, encontrou um estado de **fluido quântico incompressível** de um gás de elétrons bidimensionais.

Na *Bell Laboratories* (1985-1987), Haldane deu continuidade aos trabalhos que realizara no ILL (1977-1981) e na USC (1981-1985), dentre os quais se destacam dois artigos, publicados em 1985: 1) **Finite-Size Studies of the Incompressible State of the Fractionally Quantized Hall Effect and its Excitations**, *Physical Review Letters* **54**, p. 237), com a colaboração de E. H. Rezayi e no qual diagonalizaram o HL para tratar os estados incompressíveis e suas excitações do EFHQF; 2) **Quantum Dynamics and Statistics of Vortices in Two-Dimensional Superfluids**, *Physical Review Letters* **55**, p. 2887), com a participação de Yong-Shi Wu em que a dinâmica quântica bidimensional foi utilizada para investigar os vórtices de superfluidos e sua estatística.

Quando esteve na *University of California*, em San Diego, entre 1987 e 1990, Haldane teve oportunidade de trabalhar com Ian Affleck sobre a criticalidade das cadeias de spin quântico, resultando no artigo, publicado em 1987 (**Critical Theory of Quantum Spin Chains**, *Physical Review* **B36**, p. 5291). Em 1988 (**Model for a Quantum Hall Effect without Landau Levels: Condensed-Matter Realization of the “Parity Anomaly”**, *Physical Review Letters* **61**, p. 2015), Haldane desenvolveu um modelo para tratar cristais bidimensionais de matéria-condensada usando a TQC (2 + 1). Neste artigo, ele obteve resultados inéditos, tais como: 1)  $C_H \neq 0$ , na ausência de campo magnético externo; 2) *Férmions sem massa* e que exibem uma “paridade anômala”, daí este resultado ser conhecido como **Efeito Hall Quântico Anômalo** (EHQA).

Na PU, a partir de 1990, Haldane teve oportunidade de voltar a trabalhar com o HL e o EHQ, com seu colaborador Rezayi, resultando no texto publicado em 1994 (**Laughlin State on Stretched and Squeezed Cylinders and Edge Excitations in the Quantum Hall Effect**, *Physical Review* **B50**, p. 17199), em que eles estudaram a  $\psi_m$  em uma superfície cilíndrica e, ao usarem a forma polinomial dessa função para investigar as excitações limites de um **fluido incompressível quântico Hall**, obtiveram resultados teóricos que eram idênticos com valores numéricos conhecidos.

Concluindo esse breve relato sobre o nobelista Haldane, faremos alguns comentários sobre o EHQA que ele previu, em 1988. O mesmo foi detectado em duas ocasiões, por físicos chineses e colaboradores trabalhando em instituições norte-americanas. Com efeito: 1) 2013 (*Science* **340**, p. 6129), por Cui-Zu Chang; Jinsong Zhang; Xiao Feng; Jie Shen; Zuocheng Zhang; Minghua Guo; Kang Li; Yunbo Ou; e Pang Wei usando um isolante topológico magnético ([en.wikipedia.org/Topological\\_Insulator](http://en.wikipedia.org/Topological_Insulator)); e 2) 2014 (*Physical Review Letters* **112**, p. 116404), por Zhenhua Qiao; Wei Ren; Hua Chen; Laurent Bellaïche; Zhenyu Zhang; o norte-americano Allan H. MacDonald (n.1951) e Qian Niu, usando grafeno acoplado a um isolante antiferromagnético. Para maiores detalhes ainda sobre o EHQA, ver: Chao-Xing Liu, Shou-Cheng Zhang e Xiao-Liang Qi, **The Quantum Anomalous Hall Effect: Theory and Experiment** [*Annual Review of Condensed Matter Physics* **7**, p. 1 (2016)].



**ANTERIOR**

**SEGUINTE**