



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo
www.bassalo.com.br

Efeito Kondo.

De um modo geral, a resistividade elétrica (ρ) de muitos metais, na temperatura ambiente (300K), é dominada pela colisão de elétrons de condução com os fônons (vibrações térmicas) de uma rede; em temperaturas baixas (p. e., à do hélio líquido, em torno de $\approx 4\text{K}$), ela é dominada por colisões com átomos de impureza e imperfeições mecânicas na rede. Desse modo, a resistividade de um metal contendo átomos de impureza pode ser dada por:

$$\rho = \rho_T + \rho_E ,$$

onde ρ_T é a **resistividade elétrica** causada pelo movimento térmico da rede cristalina, e ρ_E é a resistividade causada pelo espalhamento de elétrons pelos átomos de impureza que distorcem a periodicidade da rede. Se a concentração da impureza de átomos é pequena, ρ_E é independente da temperatura. Por sua vez, $\rho_T \rightarrow 0$ quando $T \rightarrow 0$ [Charles Kittel,

Introduction to Solid State Physics (John Wiley and Sons, Incorporation, 1971)].

Em 1950 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A202**, p. 103), D. K. C. MacDonald e Karl Alfred Georg Mendelssohn (1906-1980) observaram um valor mínimo para a **resistividade elétrica** (ρ) de vários elementos químicos, como do magnésio (Mg) e do sódio (Na), nas temperaturas em torno de 5K e 20K, respectivamente. Mais tarde, em 1962 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A266**, p. 161), MacDonald, W. B. Pearson e I. M. Templeton observaram o aumento de ρ em baixas temperaturas de ligas diluídas de um íon magnético (impureza) em ouro (Au) e em ferro (Fe). Em 1964 (*Progress in Theoretical Physics* **32**, p. 37), o físico japonês Jun Kondo (n.1930) publicou um artigo no qual apresentou a explicação teórica desses resultados experimentais como sendo consequência da interação entre o elétron de condução e o íon magnético. Assim, de acordo com Kondo, o íon de impureza não atua simplesmente como um centro constante de espalhamento, mas, em vez disso, há um acoplamento antiferromagnético heisenbergiano (vide verbete nesta série) dos momentos locais (J) da impureza com os spins dos elétrons de condução. Desse modo, ele mostrou que, quando a temperatura diminui, esse acoplamento cresce logaritmicamente e, portanto, impede o fluxo da corrente elétrica. Registre-se que essa divergência logarítmica foi o primeiro e, talvez, o mais simples exemplo em Física da “liberdade assintótica”, o mesmo princípio que decorre da famosa **Teoria de Yang-Mills**, de 1954 (vide verbete nesta série). Tal divergência ocorre na chamada **temperatura Kondo** [$T_K \approx (E_F/k_B) \exp(-E_F/|J|)$], onde E_F é a **energia de Fermi** (vide verbete nesta série) e k_B é a **constante de Boltzmann**. Essa explicação ficou conhecida como **efeito Kondo** [D. L. Cox and M. B. Maple, *Physics Today* (February), p. 32 (1995); B. G. Levi, *Physics Today* (January), p. 17 (1998)].

É oportuno registrar que, em 1988, Tai-Kai Ng e Patrick A. Lee (*Physical Review Letters* **61**, p. 1768) e, independentemente, Leonid I. Glazman e Mikhail E. Raikh (*JETP Letters* **47**, p. 452) previram a existência do **efeito Kondo** em pontos quânticos (“quantum dots”), nos quais os elétrons são confinados em nano-estruturas semicondutoras

(vide verbete nesta série); como os estados eletrônicos desses “pontos” parecem átomos naturais, eles são algumas vezes chamados de “átomos artificiais”. No começo da década de 1990, novos trabalhos teóricos foram realizados sobre essa previsão, com uma das primeiras observações experimentais registrada por Daniel C. Ralph e Robert A. Buhrman, em 1994 (*Physical Review Letters* **72**, p. 301). Em 2000, W. G. van der Wiel, S. De Franceschi, T. Fujisawa, J. M. Elzerman, S. Tarucha e L. P. Kouwenhoven (*Science* **289**, p. 2105), e Elzerman, De Franceschi, D. Goldhaber-Gordon, van der Wiel e Kouwenhoven (*Journal of Low Temperature Physics* **118**, p. 375) observaram o **efeito Kondo** em pontos quânticos semicondutores.

Ainda em 2000 (*Nature* **405**, p. 764), Satoshi Sasaki, De Franceschi, Elzerman, van der Wiel, M. Eto, Tarucha e Kouwenhoven observaram uma anomalia no **efeito Kondo**, pois, até então, tal efeito era previsto ocorrer apenas em pontos quânticos com um número ímpar de elétrons (spin total = $\frac{1}{2}$). Nesse trabalho, eles observaram que esse efeito ocorria nesses pontos com um número par de elétrons (spin total = 0). Novos trabalhos experimentais sobre o **efeito Kondo** em pontos quânticos têm sido realizados por esses pesquisadores [Sasaki, N. Amaha, N. Assakawa, Eto and Tarucha (*Physical Review Letters* **93**, p. 017205, 2004); van der Wiel, M. Stopa, De Franceschi, Kouwenhoven and Tarucha (*Physica* **E22**, p. 538, 2004)].



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)