



# CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

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



## Supercondutividade de Alta Temperatura e o Prêmio Nobel de Física (PNF) de 1987.

O PNF de 1987 foi concedido aos físicos, o suíço Karl Alexander Müller (n.1927) e o alemão Johannes Georg Bednorz (n.1950), pela descoberta das **cerâmicas supercondutoras**. Em verbetes desta série, vimos que o fenômeno da **supercondutividade** foi descoberto em 1911, pelo físico holandês Heike Kamerlingh-Onnes (1853-1926; PNF, 1913), com a colaboração de seu mestre artífice, o holandês Gerrit Jan Flim (1875-1970) e de seu aluno, o físico holandês Gilles Holst (1886-1968), ao observarem que na temperatura crítica ( $T_C$ ) de  $\sim 4.2$  K, a resistência elétrica do mercúrio (Hg) caía bruscamente para  $10^{-5}$  ohms. Em 1913, Onnes observou que a corrente elétrica desfazia o estado supercondutor do Hg. Mais tarde, em 1916, o físico norte-americano Francis Briggs Silsbee (1889-1967) confirmou essa observação de Onnes, porém afirmou que a quebra do estado supercondutor devia-se ao campo magnético associado à corrente elétrica e não à corrente em si.

Durante muitos anos depois dessa descoberta de Onnes, acreditou-se que, exceto pelo fato de apresentarem resistência quase nula, esses novos materiais, denominados posteriormente de **supercondutores**, possuíam as mesmas propriedades que os condutores normais. Somente em 1933, os físicos alemães Fritz Walther Meissner (1882-1974) e Robert Ochsenfeld (1901-1993) descobriram que o estado supercondutor é diamagnético, descoberta essa mais tarde conhecida como **efeito Meissner-Ochsenfeld** (vide verbete nesta série). A partir daí, começaram a surgir teorias fenomenológicas para explicar esse fenômeno físico.

Com efeito, ainda na década de 1930, duas teorias fenomenológicas foram desenvolvidas para explicar a **supercondutividade**: a termodinâmica, desenvolvida pelos físicos holandeses Cornelis Jacobus Gorter (1907-1980) e Hendrik Brugt Gerhard Casimir (1909-2000), em 1934; e a eletrodinâmica, elaborada pelos físicos alemães, os irmãos London, Fritz Wolfgang (1900-1954) e Heinz (1907-1970), em 1935, teorias essas que receberam, em 1950, um tratamento quanto-mecânico por parte dos físicos russos Vitaly Lazarevich Ginzburg (n.1916; PNF, 2003) e Lev Davidovich Landau (1908-1968; PNF, 1962), tratamento esse que ficou conhecido como Teoria de Landau-Ginzburg, na qual os efeitos cooperativos dos elétrons são descritos por um campo escalar complexo. Também em 1950, o físico alemão Herbert Fröhlich (1905-1992) e, independentemente, o físico norte-americano John Bardeen (1908-1991; PNF, 1956; 1972), propuseram que o **estado supercondutor** era devido à interação entre os elétrons e a vibração (**fônon**) dos átomos no cristal, interação essa mais tarde conhecida como **interação elétron-fônon**. Logo depois, em 1952, Fröhlich apresentou a ideia de que essa interação produzia uma atração entre elétrons, e que em muitos metais essa atração era ligeiramente superior à repulsão coulombiana eletrônica. Em 1956, o físico norte-americano Leon Neil Cooper (n.1930; PNF, 1972) mostrou que, se um elétron passar nas proximidades de um íon positivo de um cristal supercondutor interage com o mesmo, provoca a vibração da rede cristalina e a consequente emissão de um **fônon**. Contudo, se um segundo elétron passar, subsequentemente, pelo mesmo íon, ele absorverá esse **fônon**, trocando momentos lineares, e os dois elétrons caminharão juntos no menor estado de energia possível, constituindo o que ficou conhecido desde então como o **par de Cooper** (vide verbete nesta série).

As **Teorias Fenomenológicas da Supercondutividade** tratadas acima, indicavam que havia necessidade do desenvolvimento de uma **Teoria Microscópica da Supercondutividade**, uma vez que naquelas teorias ficava evidente que o fenômeno da **supercondutividade** se devia, de algum modo, à

**interação elétron-fônon.** Desse modo, em 1957, Bardeen, Cooper e o físico norte-americano John Robert Schrieffer (n.1931; PNF, 1972) desenvolveram a hoje célebre **Teoria BCS** (vide verbete nesta série), segundo a qual o **estado supercondutor** deve-se, essencialmente, a uma condensação de elétrons em **pares de Cooper** de momento linear comum e sendo representada por uma função de onda coerente única. Em 1958, o físico russo Nikolai Nikolaevich Bogoliubov (1900-1992) e, independentemente, o físico norte-americano Philip Warren Anderson (n.1923; PNF, 1977), apresentaram também uma **Teoria Microscópica da Supercondutividade**. No entanto, enquanto Bogoliubov usou o conceito de **quase-partícula**, pois, para ele, a **supercondutividade** é descrita por uma mistura coerente de elétrons e dessas “partículas” (sobre essas “partículas” ou “buracos”, ver verbete nesta série), Anderson usou o conceito de **localização**: estado isolado quando um metal não-interagente é submetido a um grande potencial randômico.

Desde a descoberta da **supercondutividade**, a temperatura em que ocorre o **estado supercondutor** tem sido uma das grandes dificuldades para a operacionalidade dos **supercondutores**. Durante algumas décadas, a maior temperatura em que se conseguia o **estado supercondutor** era de ~ 4.2 K (~ - 269<sup>0</sup> C), conseguida por Onnes, em 1911, conforme vimos acima. Contudo, em 1953 (*Physical Review* **92**, p. 874), o físico germano norte-americano Bernd Teo Matthias (1918-1980) observou que alguns compostos (ligas) do nióbio (Nb) [com carbono (C), nitrogênio (N), estanho (Sn) e alumínio (Al)] se tornavam **supercondutores** em temperaturas maiores do que 4.2 K. Por exemplo: < 15 K (< ~ - 258<sup>0</sup> C) para os compostos NbC e NbN; e ~ 17 K (~ - 246<sup>0</sup> C) para os compostos Nb<sub>3</sub>Sn e Nb<sub>3</sub>Al. Em 1964 (*Physical Review Letters* **12**, p. 474), J. F. Scholey, W. R. Hosler e Marvin L. Cohen mostraram a **supercondutividade** do óxido metálico titanato de estrôncio (SrTiO<sub>3</sub>) na temperatura de 0,3 K (< - 273<sup>0</sup> C). Quase uma década depois, em 1973 (*Applied Physics Letters* **23**, p. 480), John R. Gavaler observou que ligas de nióbio e germânio (Nb<sub>3</sub>Ge) se tornavam **supercondutoras** na temperatura crítica de 23,2 K (~ - 250<sup>0</sup> C). Em 1979, férmions pesados, com um composto de urânio e platina (UPt<sub>3</sub>), também se tornavam **supercondutores** na temperatura de ~ 1 K (~ - 272<sup>0</sup> C) [Graham P. Collins, *Scientific American Brasil* **88**, p. 48 (Setembro de 2009)]. Nessa época, parecia ser essa a máxima temperatura (T<sub>C</sub>) necessária para conseguir-se um estado **supercondutor**, até as descobertas de Müller e Bednorz.

Müller defendeu, em 1958, sua Tese de Doutorado no *Swiss Federal Institute of Technology* [“Instituto Federal de Tecnologia Suíça” (IFTS)], em Zurique, na Suíça, trabalhando com G. Busch, especialista em Ressonância Paramagnética Eletrônica [“Electronic Paramagnetic Resonance” (EPR)]. Depois de trabalhar alguns anos no *Instituto Battelle*, em Genebra, também na Suíça, liderando um grupo de pesquisas em EPR, Müller aceitou, em 1963, o convite para reunir-se ao grupo de pesquisas do físico suíço Ambros P. Speiser (1922-2003), então Diretor do recente Laboratório de Pesquisas, fundado pela *International Business Machines* (IBM), em Rüschlikon, ainda na Suíça. Lá, em companhia de Walter Berlinger, trabalhou com o novo duplo-óxido de estrôncio titânio (SrTiO<sub>3</sub>) e com cerâmica envolvendo o **óxido de cobre** (CuO<sub>2</sub>) (**perovskite** ou **cupreto/cuprato**) e o lantânio (La): La<sub>2</sub>CuO<sub>3</sub>. Em 1982, tornou-se *Fellow* da IBM e, nesse mesmo ano, convidou Bednorz (que acabara de doutorar-se no IFTS) para participar de seu grupo de pesquisas que liderava naquele Laboratório. Registre que Bednorz, ainda como aluno de graduação na *Universidade de Münster* (UM), na Alemanha, havia feito um estágio no referido Laboratório da IBM, entre 1972 e 1974, objetivando desenvolver pesquisas para obter seu Diploma de Graduação na UM, o que aconteceu em 1976. No ano seguinte, ele foi para o IFTS, segundo registramos. É interessante destacar que o **perovskite** recebeu esse nome em virtude dos trabalhos realizados pelo mineralogista russo, o Conde Lev Aleksevich von Perovski (1792-1856), com minerais naturais, com uma particular estrutura atômica, principalmente, o titanato de cálcio (CaTiO<sub>3</sub>). [Per Fridtjof Dahal, **Superconductivity: Its Historical Roots and Development from Mercury to The Ceramics Oxides** (American Institute of Physics, 1992)].

Em 1983, Müller e Bednorz iniciaram suas pesquisas testando sistematicamente a **supercondutividade** em novas cerâmicas. Finalmente, em janeiro de 1986, depois de haver testado

quase 10 mil amostras de cerâmicas, encontraram uma cerâmica do tipo **cuprato** com La e bário (Ba):  $Ba_xLa_{2-x}CuO_{4-\delta}$ , que se tornava **supercondutora** na temperatura crítica ( $T_C$ ) em torno de 30 K ( $\sim -243^0$  C). Note que  $T_C$  depende de x e, portanto, ela atinge o valor máximo  $\sim 35$  K ( $\sim -238^0$  C) para  $x = 0.15$ . Essa descoberta de Müller e Bednorz foi anunciada em abril de 1986, em artigo publicado na *Zeitschrift für Physik* **B64**, p. 189, e no ano seguinte foram agraciados com o PNF. É interessante registrar que Müller teve a ideia de testar a **supercondutividade** no tipo de cerâmica que utilizou, quando estava sentado nos jardins do Monastério Medieval em Erice, na Itália, no verão de 1983. Mais tarde leu o trabalho dos químicos franceses Claude Michel e Bernard Raveau, escrito em 1982 (*Journal of Solid State Chemistry* **43**, p. 73), no qual indicava que, em um composto cerâmico daquela classe, havia sinais de condutância elétrica. Aliás, esses sinais já haviam sido observados por Michel, Raveau, L. Er-Rakho e J. Provost, em 1981 (*Journal of Solid State Chemistry* **37**, p. 151). [Karl Alexander Müller and Johannes Georg Bednorz, **Nobel Lectures** (08 de Dezembro de 1987)].

Logo em 1987, dois grupos de pesquisadores, formados por Paul (Ching-Wu) Chu (n.1941) (aluno de Matthias), P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Hang e Y. Q. Wang (*Physical Review Letters* **58**, p. 405) da *Universidade de Houston*, e por R. J. Cava, R. B. van Dover, B. Batlogg e E. A. Rietman (*Physical Review Letters* **58**, p. 408), dos *Bell Laboratories*, anunciaram que haviam conseguido **cerâmicas supercondutoras** envolvendo **cupratos** formadas, respectivamente, dos compostos  $LaBaCuO$  [ $\sim 40$  K ( $\sim -233^0$  C)] e  $LaSrCuO$  [ $\sim 36$  K ( $\sim -237^0$  C)]. Ainda por essa mesma época, Maw-Kuen Wu (aluno de Chu) e seu grupo, da *Universidade do Alabama*, juntaram-se ao grupo de Chu e, ao substituírem o La pelo yttrio (Y), e em um trabalho conjunto (Wu, Jim R. Ashburn, Chuan-Jue Torng, Hor, Meng, Gao, Huang, Wang e Chu) anunciaram no começo de 1987 (*Physical Review Letters* **58**, p. 908), que haviam obtido uma nova **cerâmica supercondutora** com a composição  $YBaCuO$ , cuja temperatura era  $\sim 93$  K ( $\sim -180^0$  C). Essa descoberta foi confirmada por Hor, Gao, Meng, Huang, Wang, K. Forster, J. Vassiliou e Chu, ainda em 1987 (*Physical Review Letters* **58**, p. 911). É oportuno destacar que a descoberta do composto  $YBaCuO$ , com nitrogênio (N), foi também anunciada independentemente pela equipe do físico chinês Zhong-Xian Zhao (n.1941) do *Instituto de Física da Academia Chinesa de Ciências*, cujo estudo ele havia iniciado no final de 1986. É interessante registrar que essas novas descobertas sobre **cerâmicas supercondutoras** na base de **cupratos** foram anunciadas no Simpósio da *Sociedade Americana de Física*, realizado em março de 1987, no Hotel Hilton de Nova York, com a participação de 2000 físicos, e que ficou conhecido como o “*Woodstock da Física*” (Dahal, op. cit.).

Na década de 1990, novos **supercondutores** foram descobertos. Por exemplo, logo em 1991, foi observado que cristais feitos de *buckminsterfullereno* ou **fulereno** ( $C_{60}$ ) [que é uma estrutura formada de 60 átomos de carbono (C) organizados nos vértices de um icosaedro truncado, tendo a forma de uma bola de futebol (com 12 pentágonos e 20 exágonos), e descoberta em 1985 (*Nature* **318**, p. 162), por H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O’Brien, R. F. Curl e R. E. Smalley] dopados com metais alcalinos como potássio (K), rubídio (Rb) e céσιο (Cs), se tornam **supercondutores** no seguinte intervalo de  $T_C$ : 18 - 33 K ( $\sim -255 - 240^0$  C). Mais tarde, em 1995, um **cuprato** com mercúrio (Hg), cálcio (Ca) e Ba ( $HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$ ) e dopado com tálio (Tl), tornou-se **supercondutor** na temperatura crítica ( $T_C$ ) de 138 K ( $\sim -135^0$  C), na pressão atmosférica, e atingiu a temperatura  $T_C$  de 164 K ( $\sim -109^0$  C), em altas pressões. Veja uma relação de outros **cupratos**, com a respectiva  $T_C$ , em: Paulo S. Branício, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **23**, p. 381, 2001.

Por fim, na atual década de 2000, novas surpresas aconteceram com compostos que se tornam **supercondutores** e que são diferentes dos **cupratos**. Logo em 2001 (*Nature* **410**, p. 63), os físicos japoneses J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani e Jun Akimitsu anunciaram que o diboreto de magnésio ( $MgB_2$ ) (conhecido desde 1950) se torna **supercondutor** na temperatura crítica ( $T_C$ ) de 39,2 K ( $\sim -233^0$  C). Essa descoberta foi confirmada, em 2002 (*Physics World* **15**, p. 29), por Paul C. Canfield e Sergey L. Bud’ko. Esse **supercondutor**, diferentemente dos **cupratos**, é explicado pela **Teoria BCS**. [Paul C. Canfield e Sergey L. Bud’ko, *Scientific American Brasil* **81**, p. 76 (Maio de 2005)]. Uma nova surpresa sobre os compostos químicos que exibem **supercondutividade** foi decorrente da

descoberta realizada pela equipe de pesquisa do físico japonês Hideo Hosono no *Instituto de Tecnologia de Tóquio*, em 2006, segundo a qual os **pnictogenetos de ferro**, formados com base no arsenieto de ferro (FeAs), se tornavam **supercondutores** no seguinte intervalo de temperatura crítica  $T_C$ : 4 - 56 K ( $\sim$  - 269 - 217<sup>0</sup> C). Em 2007 (*Nature* **447**, p. 569), Kenjiro K. Gomes, Abhay N. Pasupathy, Aakash Pushp, Shimpei Ono, Yoichi Ando e Ali Yazdani, da *Universidade de Princeton* trabalharam com um outro **cupreto**, envolvendo bismuto (Bi), Ca e Sr, o composto:  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  cuja temperatura crítica é de  $\sim$  90 K ( $\sim$  - 183<sup>0</sup> C). Um ano depois, em 2008 (*Journal of the American Chemical Society* **130**, p. 3296), Hosono e seu grupo (Yoichi Kamihara, Takumi Watanabe e Masahiro Hirano) anunciaram que o composto do tipo  $\text{La}(\text{O}_{1-x}\text{F}_x)\text{FeAs}$ , com  $x = 0,05-0,12$ , tornava-se supercondutor em 26 K ( $\sim$  - 247<sup>0</sup> C). Também em 2008 (*Superconductor Science and Technology* **21**, 082001), os físicos chineses Jie Yang, Zheng-Cai Li, Wei Lu, Wei Yi, Xiao-Li Shen, Zhi-An Ren, Guang-Can Che, Xiao-Li Dong, Li-Ling Sun, Fang Zhou e Zhao anunciaram a descoberta de uma nova família de **pnictogenetos de ferro** com gadolínio (Gd), o composto  $\text{GdFeAsO}_{1-\delta}$ , que atingiu  $T_C = 53,5$  K ( $\sim$  - 220<sup>0</sup> C). Até o presente momento, ainda se discute sobre a aplicabilidade da **Teoria BCS** nos **cupratos** e nos **pnictogenetos de ferro**, como se pode ver em: Jan Zaanen, *Nature* **457**, p. 546 (Janeiro de 2009); D. G. Hinks, *Nature Physics* **5**, p. 386 (junho de 2009); Graham P. Collins, *Scientific American Brasil* **88**, p. 48 (Setembro de 2009); e Antonio R. de C. Romaguera, Cristiane Moraes Smith e Mauro M. Doria, *Ciência Hoje* **44**, p. 42 (Setembro de 2009).

---



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)