

Intertype superconductivity: On the completeness of the classification of a superconductor material

Superconductividad intertipo: Sobre la completitud de la clasificación de un material superconductor

J A Aguiar¹

¹ Departamento de Física, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brazil

E-mail: albino@df.ufpe.br

Abstract. Based in the Ginzburg-Landau (GL) theory superconductors are classified as Type-I, ideal diamagnetic materials, or Type-II, materials for which the magnetic field penetrates the sample as single-quantum vortices (Abrikosov vortices) forming a regular lattice (Abrikosov lattice). This classification depends on the GL parameter $\kappa_0 = \lambda/\xi$, where λ is the penetration depth and ξ is the coherence length. At $T=T_c$, the superconducting critical temperature, this two types interchange at $\kappa_0 = (1/2)^{1/2}$. For $\kappa < \kappa_0$, the material is said Type-I, whereas $\kappa > \kappa_0$, it is classified as Type-II. At temperatures below T_c the GL classification does not hold anymore. Indeed, it has been demonstrated by several authors, both experimentally [2,3] and theoretically [4] that for $T < T_c$, there exists in the $(\kappa; T)$ plane, a temperature-dependent κ interval that forms an intertype (IT) domain between the Type-I and Type-II where inside it the magnetic response of a superconducting material presents quite peculiar behavior. For example, the magnetic field dependence of the magnetization shows a first order transition as one goes from the Meissner to the mixed state, which is manifested experimentally as a steep change in the magnetization, as observed in metallic Nb, Ta, V, Pb, and in LaAl_2 [2,3].

The physics of the IT domain results from the infinite degeneracy of the mixed state at the Bogomolnyi point $(\kappa_0; T_c)$ [5], which is closely related to the Bogomolnyi self-duality [6]. This degeneracy implies that the mixed state has an infinite number of possible configurations for the magnetic flux. By lifting this degeneracy, for example by doping or by decreasing the temperature, one is able to reveal new flux configurations, with properties that cannot be reduced to those in Type-I or Type-II superconductors [7]. The IT domain is small in single-band materials but tends to increase in multi-band ones. Recently we have shown [8] that, within the IT regime, a thin single-band superconductor made of a Type-I material, can present unusual flux configurations such as lattices of superconducting islands separated by vortex chains; stripes and labyrinths of vortices; and mixtures of giant vortices and vortex clusters. We also showed [9] that a two-band superconductor can present a giant paramagnetic Meissner effect which is connected to the IT domain, and that, contrary to common expectations, the many-body interaction plays a crucial role in the formation of the IT vortex matter [10-11]. These results indicate that an IT superconductor develops a peculiar unconventional type of the vortex matter governed by the many-body interactions of vortices. To finalize we conclude that our findings shed new light on the completeness of the superconductivity types.

Resumen. Basados en la teoría de Ginzburg-Landau (GL), los superconductores se clasifican como Tipo-I, materiales diamagnéticos ideales, o Tipo-II, materiales para los cuales el campo magnético penetra en la muestra como vórtices cuánticos (vórtices de Abrikosov) que forman una red regular (Enrejado de Abrikosov). Esta clasificación depende del parámetro GL $\kappa_0 = \lambda/\xi$, donde λ es la profundidad de penetración y ξ es la longitud de coherencia. En $T = T_c$, la temperatura crítica superconductora, estos dos tipos se intercambian en $\kappa_0 = (1/2)^{1/2}$. Para $\kappa < \kappa_0$, el material es dicho Tipo I, mientras que para $\kappa > \kappa_0$, se clasifica como Tipo II. A temperaturas inferiores a T_c , la clasificación GL ya no se cumple. De hecho, varios autores, tanto experimental [2,3] como teóricamente [4], han demostrado que para $T < T_c$, existe en el plano

(κ ; T), un intervalo κ dependiente de la temperatura que forma un tipo de intertipo (IT) dominio entre el Tipo I y el Tipo II, donde dentro de él la respuesta magnética de un material superconductor presenta un comportamiento bastante peculiar. Por ejemplo, la dependencia del campo magnético de la magnetización muestra una transición de primer orden a medida que se pasa del estado de Meissner al estado mixto, que se manifiesta experimentalmente como un cambio abrupto en la magnetización, como se observa en el Nb metálico, Ta, V, Pb. y en LaAl₂ [2,3].

La física del dominio de TI se debe a la degeneración infinita del estado mixto en el punto Bogomolnyi (κ_0 ; T_c) [5], que está estrechamente relacionado con la autodualidad de Bogomolnyi [6]. Esta degeneración implica que el estado mixto tiene un número infinito de configuraciones posibles para el flujo magnético. Al elevar esta degeneración, por ejemplo, al dopaje o al disminuir la temperatura, se pueden revelar nuevas configuraciones de flujo, con propiedades que no se pueden reducir a las de los superconductores Tipo I o Tipo II [7]. El dominio de TI es pequeño en materiales de banda única, pero tiende a aumentar en los de banda múltiple. Recientemente, hemos demostrado [8] que, dentro del régimen de TI, un superconductor delgado de banda única hecho de un material de Tipo I, puede presentar configuraciones de flujo inusuales como retículas de islas superconductoras separadas por cadenas de vórtice; rayas y laberintos de vórtices; y mezclas de vórtices gigantes y grupos de vórtices. También mostramos [9] que un superconductor de dos bandas puede presentar un efecto Meissner paramagnético gigante que está conectado al dominio de TI, y que, contrariamente a las expectativas comunes, la interacción de muchos cuerpos juega un papel crucial en la formación de la TI materia de vórtice [10-11]. Estos resultados indican que un superconductor de TI desarrolla un tipo peculiar poco convencional de la materia de vórtice gobernada por las interacciones de vórtices de muchos cuerpos. Para finalizar, concluimos que nuestros hallazgos arrojan nueva luz sobre la integridad de los tipos de superconductividad.

This work was supported by the Brazilian agencies CAPES (Grants No. 223038.003145/2011-00 and 400510/2014-6), CNPq (Grants No. 400510/2014-6 and 309374/2016-2), and FACEPE (APQ-0936-1.05/15).

* In Collaboration with W. Y. Córdoba-Camacho, R.M. da Silva, A. Vagov, and A. A. Shanenko.

References

- [1] A. A. Abrikosov 1957 *Sov. Phys. JEPT.* **5** 1175
- [2] J. Auer and H. Ullmaier 1973 *Phys. Rev. B* **7** 136
- [3] H. W. Weber, E. Seidl, M. Botlo, C.Laa, E. Mayerhofer, F.M. Sauerzopf, R. M. Schalk, and H. P. Wiesingerh 1989 *Physica C* **161** 272
- [4] A. E. Jacobs 1971 *Phys. Rev. Lett.* **26** 629; A. E. Jacobs 1971 *Phys. Rev. B* **4** 3016
- [5] E. B. Bogomolnyi 1976 *Sov. J. Nucl. Phys.* **24** 449
- [6] E. B. Bogomolnyi and A. I. Vainstein 1976 *Sov. J. Nucl. Phys.* **23** 588
- [7] A. Vagov, A. A. Shanenko, M. V. Milosevic, V. M. Axt, V. M. Vinokur, J. Albino Aguiar, and F. M. Peeters 2016 *Phys. Rev. B* **93** 174503
- [8] W. Y. Córdoba-Camacho, R.M. da Silva, A. Vagov, A. A. Shanenko, and J. Albino Aguiar 2016 *Phys. Rev. B* **94** 054511
- [9] R. M. da Silva, M. V. Milosevic, A. A. Shanenko, F.M. Peeters, and J. Albino Aguiar 2015 *Sci. Rep.* **5** 16515
- [10] S. Wolf, A. Vagov, A. A. Shanenko, V. M. Axt, and J. Albino Aguiar 2017 *Phys. Rev. B* **96** 144515
- [11] W. Y. Córdoba-Camacho, R. M. da Silva, A. Vagov, A. A. Shanenko, and J. Albino Aguiar 2018 *Phys. Rev. B* **98** 174511