

## RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo deste trabalho será disponibilizado somente a partir de 03/08/2019.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

ALICE PRESOTTO

**EFEITOS DE CAMPOS MAGNÉTICOS EXTERNOS E DE CORRENTES DE  
TRANSPORTE NA DINÂMICA DE VÓRTICES EM UMA CONSTRIÇÃO  
MESOSCÓPICA**

Ilha Solteira  
2017

ALICE PRESOTTO

EFEITOS DE CAMPOS MAGNÉTICOS EXTERNOS E DE CORRENTES DE  
TRANSPORTE NA DINÂMICA DE VÓRTICES EM UMA CONSTRIÇÃO  
MESOSCÓPICA

Dissertação apresentada à Faculdade  
de Engenharia – UNESP - Campus de  
Ilha Solteira, como requisito para a  
obtenção do título de Mestre em Ciência  
dos Materiais.

Prof. Dr. RAFAEL ZADOROSNY  
Orientador

Ilha Solteira  
2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- P934e Presotto, Alice .  
Efeitos de campos magnéticos externos e de correntes de transporte na dinâmica de vórtices em uma constrição mesoscópica / Alice Presotto. -- Ilha Solteira: [s.n.], 03/08/2017  
91 f. : il.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia . Área de conhecimento: Física da Matéria Condensada.
- Orientador: Rafael Zadorosny  
Inclui bibliografia
1. Supercondutores mesoscópicos. 2. Vórtices cinemáticos. 3. Gtdgl.  
4. Dinâmica de vórtices.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

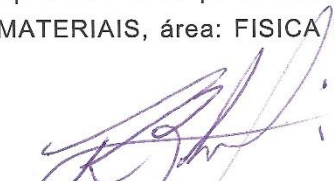
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Efeitos de campos magnéticos externos e de correntes de transporte na dinâmica de vórtices em uma constrição mesoscópica

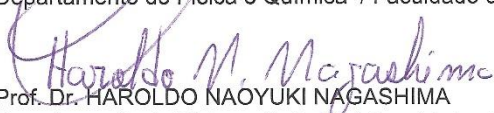
AUTORA: ALICE PRESOTTO

ORIENTADOR: RAFAEL ZADOROSNY

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em CIÊNCIA DOS MATERIAIS, área: FÍSICA DA MATERIA CONDENSADA pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. RAFAEL ZADOROSNY  
Departamento de Física e Química / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. HAROLDO NAOYUKI NAGASHIMA  
Departamento de Física e Química / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. PABLO ANTONIO VENEGAS URENDA  
Departamento de Física / Faculdade de Ciências de Bauru

Ilha Solteira, 03 de agosto de 2017

Ao meu amado Danilo, pelo amor e apoio incondicional em todos os momentos.

Aos meus pais, Mário e Vera, com amor.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por ter-me concedido saúde, força e sabedoria para superar as dificuldades encontradas pelo caminho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pelo apoio financeiro.

Aos meus pais, Vera e Mário, pelo apoio e pelas orações. E por sempre acreditarem na minha capacidade.

A minha irmã, Adriana, por estar ao meu lado em todos os momentos. E me alegrar para que fosse possível continuar a caminhada.

Ao meu amado Danilo, por estar ao meu lado desde o início. Pelo carinho, amor, compreensão e pela grande ajuda desempenhada ao longo deste processo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rafael Zadorosny, por todos os ensinamentos, conselhos, confiança e pela orientação deste trabalho.

Aos meus amigos do Grupo GSMA, Elwis, Danilo e Vinícius, pelas aprendizagens e companheirismo em todos os momentos.

Aos membros da Banca Examinadora pelo desprendimento ao aceitar o convite para avaliar este trabalho e pelas ricas contribuições.

Aos amigos e colegas, pelo incentivo e pelo apoio constante desempenhado ao longo desses anos.

*“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.*

*Albert Einstein*



## RESUMO

Com o desenvolvimento científico, a fabricação de materiais em escalas nano e submicrométricas tornou-se uma realidade. Nos estudos teóricos e experimentais de materiais supercondutores, tais sistemas são denominados de mesoscópicos, e possuem tamanhos da ordem dos seus comprimentos característicos, i.e.,  $\lambda(T)$  e  $\xi(T)$ . Nessas escalas, a dinâmica de vórtices é fortemente dominada por efeitos de confinamento. Dessa forma, a investigação de suas características tem importância fundamental para o desenvolvimento e aplicação desses materiais de forma eficaz. Assim, neste trabalho foram estudados os efeitos da passagem de uma corrente de transporte por uma constricção de tamanhos mesoscópicos, que foi produzida inserindo dois defeitos (normalizando  $0 < \psi < 1$  dentro do defeito) nas bordas opostas do sistema. Para tal, simulamos amostras supercondutoras mesoscópicas na presença de correntes de transporte e de campos magnéticos solucionando a equação generalizada de Ginzburg-Landau dependente do tempo (GTDGL). Sem campo magnético aplicado, os pares de vórtices cinemáticos são formados nos defeitos e se aniquilam no centro da amostra. Por outro lado, quando um baixo campo magnético é aplicado, produz uma assimetria na distribuição das correntes supercondutoras. Então, apenas o vórtice cinemático é formado em uma borda da amostra e a deixa pela lateral oposta. Contudo, antes de deixar o sistema, o vórtice cinemático experimenta um efeito de barreira superficial, que causa uma diminuição em sua velocidade. Os resultados obtidos se mostraram bastante interessantes e de grande importância para a área científica, visto que não foram verificados anteriormente.

## ABSTRACT

With the scientific development, the fabrication of materials at nano and sub-micrometer scales become a reality. In theoretical and experimental study of superconducting materials, such systems are called mesoscopic and have sizes of the order of their characteristic lengths, i.e.,  $\lambda(T)$  and  $\xi(T)$ . In these scales, the vortex dynamics is strongly dominated by confinement effects. In this way, the investigation of their characteristics have fundamental importance for the development and application of these materials effectively. Then, in this work we studied the effect of a transport current flowing through a mesoscopic constriction, which was produced by inserting two defects (normalizing  $0 < \psi < 1$  inside the defect) on the opposite edges of the system. The mesoscopic superconducting samples were simulated in the presence of transport currents and applied magnetic fields by solving the time-dependent Ginzburg-Landau equation in its generalized form (GTDGL). At zero applied magnetic field, kinematic vortex-antivortex pairs are formed at the defects and annihilate at the center of the sample. On the other hand, small external magnetic fields produce an asymmetry in the distribution of the superconducting currents. Then, only one kinematic vortex is nucleated in one of the borders of the sample and leaves it by the opposite side. However, before leaves the system, the kinematic vortex experiences a surface barrier effect, which causes a decrease in its velocity. The results obtained were very interesting and has great importance for the scientific area, whereas they were not verified previously.

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	16
2.1. Supercondutividade e algumas propriedades .....	16
3. TEORIAS FENOMENOLÓGICAS DA SUPERCONDUTIVIDADE .....	23
3.1. Equações de London .....	23
3.2. Teoria Fenomenológica de Ginzburg-Landau .....	25
3.3. Comprimentos Característicos .....	30
3.3.1. Comprimento de coerência .....	30
3.3.2. A profundidade de penetração magnética .....	33
3.3.3. Parâmetro de Ginzburg-Landau .....	34
3.4. Supercondutores Tipo I e Tipo II .....	34
3.5. Quantização do fluxo .....	37
3.6. Supercondutores Mesoscópicos .....	38
3.7 Efeitos de Barreira Superficial .....	40
4. VÓRTICES CINEMÁTICOS .....	42
5. FORMALISMO TEÓRICO .....	47
5.1. Equações TDGL .....	47
5.2. Equação Generalizada de Ginzburg-Landau Dependente do Tempo (GTDGL) .....	49
5.2.1. Campos Auxiliares .....	50
5.3. Condições de Contorno .....	52
5.4. Resolução da GTDGL por método numérico .....	53
5.4.1. Malha de discretização. ....	54
5.4.2. Discretização da GTDGL .....	57
5.4.3. Discretização da densidade de corrente .....	58
5.4.4. Discretização do potencial escalar .....	59

6. RESULTADOS .....	60
6.1. Curva da voltagem pela corrente .....	60
6.2. Dinâmica para diferentes sistemas .....	63
6.2.1. Campo Nulo .....	63
6.2.2. Baixos Campos .....	66
6.2.3. Campos Moderados .....	73
6.2.4. Altos Campos .....	79
6.3. Diagrama do estado de vórtices .....	81
6.3.1. O efeito de Barreira Superficial nos vórtices cinemáticos .....	85
CONCLUSÕES .....	90
REFERÊNCIAS .....	91

## 1. INTRODUÇÃO

No ano de 1908 Heike Kamerlingh Onnes, conseguiu o feito de liquefazer o hélio. Tal descoberta permitiu que três anos mais tarde, em 1911, o próprio Onnes e seus colaboradores descobrissem o fenômeno da supercondutividade. Na ocasião, eles estavam estudando no laboratório de Leiden, na Holanda, a resistividade elétrica do mercúrio em baixas temperaturas e observaram que o material perdia de forma completa e abrupta a sua resistividade, ao ser resfriado a uma temperatura de aproximadamente 4,2 K [1]. Este efeito de resistividade nula foi denominado de supercondutividade e a temperatura a partir da qual esta se manifesta foi chamada de Temperatura Crítica ( $T_c$ ). Assim,  $T_c$  é a temperatura de transição de fase do estado normal para o estado supercondutor. A descoberta de Onnes foi reconhecida pela comunidade científica e, em 1913, ele foi laureado com o Prêmio Nobel de Física.

Uma característica também fascinante dos supercondutores (SCs) viria a ser descoberta em 1933, pelos físicos alemães W. Meissner e R. Ochsenfeld. Eles descobriram que o supercondutor (SC) além de ser um condutor perfeito, também são diamagnetos perfeitos, expulsando de seu interior todo o fluxo de campo magnético [2]. Este efeito foi denominado de efeito Meissner.

Com tais descobertas, iniciou-se a busca por uma teoria que explicasse o fenômeno da supercondutividade. Foi então que, em 1934, os irmãos London propuseram uma teoria sobre as propriedades eletrodinâmicas dos supercondutores. A teoria é fenomenológica e descreve o funcionamento dos materiais SCs por meio das Equações de Maxwell [3]. Tais conceitos são capazes de explicar o efeito Meissner com sucesso. Eles ainda evidenciam a existência de um comprimento fundamental  $\lambda_L$ , que indica a profundidade de penetração do campo magnético no interior do material a partir de sua interface com o meio externo.

No ano de 1950, Vitaly Ginzburg e Lev Landau desenvolveram uma importante descrição macroscópica para os SCs. Tal descrição é chamada de teoria de Ginzburg-Landau (GL) e foi derivada das ideias de Landau para transições de fase de segunda ordem [4, 5]. As propriedades termodinâmicas da

transição do estado normal para o supercondutor são explicadas por meio de uma variável termodinâmica, intitulada parâmetro de ordem. Tal parâmetro possui valor máximo para baixas temperaturas e tende a zero à medida que a temperatura aumenta e se aproxima da temperatura crítica. Essa teoria ainda prevê a existência de dois tipos de supercondutores, chamados de tipo I e tipo II. A diferença entre eles é que na presença de um campo magnético aplicado, os SCs do tipo I apresentam uma transição direta do estado supercondutor para o estado normal. Já quando os SCs do tipo II estão imersos em campo magnético, eles apresentam entre o estado supercondutor e o normal, o estado misto, no qual o sistema é supercondutor, mas possui em seu interior fluxo magnético, ou seja, regiões normais.

A existência de supercondutores do tipo II foi prevista pelo físico russo Alexei A. Abrikosov no ano de 1956 [6]. Segundo ele, havia a possibilidade de existir SCs que aceitariam em seu interior a penetração de fluxo magnético, de forma quantizada, e se organizariam de forma a diminuir a energia do sistema. Este estado ficou conhecido como estado misto, pois há a coexistência de supercondutividade e regiões normais.

Tanto a teoria de London, quanto a GL, descrevem o comportamento do SC em nível macroscópico, sendo assim, não dão conta de explicar como o material se torna supercondutor. Foi então que, em 1957, John Bardeen, Leon Cooper e John Robert Schrieffer apresentaram uma teoria microscópica, que ficou conhecida como BCS, devido aos seus descobridores [7]. Esta teoria explica os mecanismos quânticos responsáveis pela supercondutividade, ou seja, explica como o material se torna supercondutor. No ano anterior, foi introduzido por Cooper o conceito de pares de Cooper, que são os entes responsáveis pela supercondutividade [8].

No ano de 1959, Lev Gorkov [9] mostrou que a teoria de Ginzburg-Landau pode ser obtida como um caso particular da teoria BCS. Dessa forma o carácter fenomenológico deixou de ser uma objeção para a aceitação da primeira teoria.

Na década de 70, foram iniciados os estudos dos estados resistivos que surgem nas amostras supercondutoras quando submetidas à uma corrente de transporte. Para explicar este comportamento, foi introduzido o conceito de PSC (Phase-Slip Centers), que são locais onde  $\psi$  se anula devido à corrente

aplicada ultrapassar a corrente de *depairing* e destruir os pares de Cooper [10]. Anos mais tarde, em 1993, outro conceito relacionado ao estado resistivo na amostra supercondutora foi definido, os vórtices cinemáticos. Tais vórtices se diferem dos vórtices de Abrikosov, e aparecem devido à assimetria das correntes no supercondutor [11].

O fenômeno da Phase-Slip line (PSL) é comumente confundido com o dos vórtices cinemáticos, no entanto são efeitos diferentes. A PSL é formada por uma linha central na amostra com  $\psi$  nulo que perpassa por toda a lateral do sistema. Tais pontos são anulados devido ao fato da corrente aplicada ultrapassar a corrente de ligação dos pares de Cooper. Já os vórtices cinemáticos, surgem devido à assimetria das correntes no sistema, onde o  $\psi$  em um ponto é nulo e possui alta velocidade. Os vórtices cinemáticos surgem no sistema em pares, sendo o vórtice e o anti-vórtice cinemático. A PSL e os pares cinemáticos se confundem, pois os vórtices cinemáticos ao se deslocarem pelo sistema, causam uma degradação do  $\psi$ , formando assim uma linha na região central da amostra com a supercondutividade degradada [11].

A descoberta da supercondutividade e de suas propriedades, impulsionou novos estudos e formas de aplicações dos materiais supercondutores. A resistividade nula, por exemplo, pode ser empregada em transmissões de energia sem perdas pelo Efeito Joule. Os famosos trens Maglev se basearam na levitação magnética para a sua construção, sendo que em alguns projetos são empregados SCs para a levitação do veículo. Na medicina também podemos citar aplicações importantes, como a ressonância nuclear magnética (RNM) e a construção dos dispositivos SQUID (Dispositivo Supercondutor de Interferência Quântica). Esse último dispositivo é utilizado na detecção de campos magnéticos extremamente fracos e, dessa forma, é empregado em magnetoencefalografia. Sendo, então, sensível aos campos gerados pelas correntes elétricas produzidas pelas sinapses cerebrais, é possível produzir imagens dos campos produzidos. Recentemente, Halbertal e colaboradores aplicaram nanoSQUIDs para fazer imagens térmicas de amostras nanoscópicas [12].

Dentro desse contexto histórico da supercondutividade e de alguns avanços citados ocorridos em tal área, nossa proposta de trabalho foi estudar a dinâmica de vórtices cinemáticos em uma constrição com tamanhos

nanométricos. Uma das motivações desse trabalho foi a interpretação de resultados experimentais obtidos pelo Prof. Dr. Alejandro V. Silhanek da Universidade de Liege, na Bélgica (em comunicação particular conosco). Dessa forma, os parâmetros das amostras simuladas basearam-se nos parâmetros das amostras experimentais. Outra motivação foca-se no fato de que diversos dispositivos usando supercondutores nanométricos tem sido aplicados, tais como os *single photon detectors*. Como o princípio de funcionamento desses se baseiam no surgimento de um estado resistivo, esse estudo pode auxiliar na compreensão da origem de tais estados e, com isso, melhorar a sensibilidade desses dispositivos.

Com isso, esse trabalho está dividido da seguinte forma. Na seção 2 são brevemente descritas as principais características dos supercondutores; na seção 3 apresentaremos algumas teorias fenomenológicas com foco na teoria de Ginzburg-Landau; no item 4 é feita uma breve revisão bibliográfica sobre vórtices cinemáticos; na seção 5 é discutido o formalismo teórico que gerou os resultados apresentados na seção 6. A dissertação é finalizada com as conclusões do trabalho e as referências usadas.



## CONCLUSÕES

Neste trabalho analisamos, de forma geral, a dinâmica de formação dos v-av cinemáticos em sistemas supercondutores mesoscópicos. As amostras foram simuladas de forma a apresentar uma constrição gerada pela presença de dois defeitos os quais consistiram de regiões onde  $\psi$  está degradado. Diferentemente das dinâmicas descritas na Ref. [36], no nosso caso os pares v-av sempre se formam nas bordas dos sistemas e se aniquilam na região central (na ausência de campo magnético externo). Na presença de campos externos, a aniquilação ocorre deslocada do centro em direção à borda da amostra onde as correntes são menos intensas (geradas pela soma vetorial das correntes supercondutoras de blindagem e corrente aplicada). Verificou-se também que, à medida que a corrente aplicada aumenta, a formação do antivórtice é inibida e, dependendo da intensidade do campo externo, não há a presença do antivórtice em todo o estado resistivo da amostra. Nessas condições, verificou-se, ainda, que o vórtice cinemático se forma na borda da amostra onde as correntes são mais intensas e a deixa pela borda oposta. Imediatamente antes de sair do sistema, o vórtice experimenta um efeito de barreira superficial o qual provoca uma diminuição de sua velocidade em um curto intervalo de tempo. Todas as dinâmicas descritas foram consideradas em um diagrama  $J(H)$ .

Verificamos também que, quanto maior a intensidade do campo aplicado, menor é a velocidade dos vórtices cinemáticos, e isso ocorre devido ao aumento da não uniformidade das correntes da amostra e também ao efeito de barreira superficial.

O efeito de barreira superficial ainda se mostrou menos efetiva com o aumento da corrente aplicada, pois ocorre um aumento da força de Lorentz que age sobre o vórtice cinemático de acordo com o incremento da corrente.

Os estudos aqui apresentados serão divulgados na forma de artigos e também já foi parcialmente apresentado no Encontro de Física 2016 e o será de forma mais completa no XL Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada. Nossos resultados contribuem para uma ampliação do conhecimento sobre a dinâmica dos vórtices cinemáticos o qual poderá ser usado em possíveis aplicações de dispositivos supercondutores nanoscópicos.

## REFERÊNCIAS

- [1] Dirk van Delft, "Freezing physics: Heike Kamerling Onnes and the quest for cold," Editaknaw, Amsterdam, the Netherlands (2007).
- [2] W. Meissner and R. Ochsenfeld, *Naturwissenschaften*, 21, 787 (1933).
- [3] F. London and H. London, "The electromagnetic equations of the superconductor. Proceedings of the Royal Society of London,," *Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 149(866):71, (1935).
- [4] V. L. Ginzburg and L. D. Landau, *Zh. Eksperim. i Teor. Fiz.* 20, 1064 (1950).
- [5] M. Tinkham, "Introduction to Superconductivity," *Dover Publications, Inc.*, New York, USA, ed.2 (2004).
- [6] A. A. Abrikosov, *Sov. Phys. JETP* 5, 1174 (1957).
- [7] J. Bardeen, L. N. Cooper and J. R. Schrieffer, *Phys. Rev.*, 108, 1175 (1957).
- [8] Leon N. Cooper, *Phys. Rev.* 104, 1189, (1956).
- [9] L. P. Gorkov, "Microscopic derivation of the Ginzburg-Landau equations in the of superconductivity.," *Soviet Physics JETP-USSR*, , 9:1364, (1959).
- [10] W. J. Skocpol, M. R. Beasley and M. Tinkham, *Journal of L. Temp. Phys*, vol 16, (1974).
- [11] A. Andronov et. al, *Physica C*, 213, 193-199 (1993).
- [12] Halbertal D., Cuppens J., Shalom M. Ben, Embon L., Shadmi N., Anahory Y., Naren H. R., Sarkar J., Uri A., Ronen Y., Myasoedov Y., Levitov L. S., Joselevich E., Geim A. K. and Zeldov E., *Nature* 539, 470 (2016).
- [13] C. P. Poole Jr, H. A. Farach and R. J. Creswick, " Superconductivity," *Academic Press*, San Diego, USA (1995).
- [14] L. D. Landau, E. M. Lifshitz, *Statistical Physics*, Parte 1, 3ª edição, Pergamon Press (1980); Parte 2, Pergamon Press (1980).
- [15] M. Motta, "Inomogeneidades estruturais em amostras nanoscópicas de supercondutores de alta temperatura crítica," *Dissertação Mestrado*, UNESP Bauru, (2009).

- [16] Rafael Zadorosny, “Interação da matéria de vórtices com estruturas de defeitos: Detecção das primeiras penetrações,” tese de doutorado São Carlos (2009).
- [17] H. F. Hess, R. B. Robinson, R. C. Dynes, J. M. Valles, J. V. Waszczak, *Phys. Rev. Lett.* 62, 214 (1989).
- [18] Pal Erik Goa, et al., *Supercond. Sci. Technol*, 14, 729-731 (2001).
- [19] R. Zadorosny, E. Sardella, A. L. Malvezzi, P. N. Lisboa Filho, and W. A. Ortiz, “*Physica C* (2012), doi: 10.1016/j.physc.2011.12.040; idem, submetido à *Phys. Rev. B*”.
- [20] B. J. Baelus and F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* 65, 104515, (2002).
- [21] K. Vervaeke, K. De Keyser, M. Menghini, C. Carballeira, G. Borghs, and V. V. Moshchalkov, *Phys. Rev. B* 76, 184506, (2007).
- [22] J. B. Ketterson. and S. N. Song, “Superconductivity,” *Cambridge, University Press*, (1999).
- [23] A. A. M. Oliveira, N. Hur, S. W. Cheong and W. A. Ortiz, *Phys. Rev. B*, 82, 104506 (2010).
- [24] E. Sardella, et al., *Phys. Rev. B* 74, 014512 (2006).
- [25] Ben Xu, et al, *Phys. Rev. Lett.* 107, 057002 (2011).
- [26] V. A. Schweigert, et al., *Phys. Rev. Lett.* 81, 2783 (1998).
- [27] A. Kanda, et al., *Phys. Rev. Lett.* 93, 257002 (2004).
- [28] Zadorosny, R.; Sardella, E; Malvezzi, A.L.; Lisboa-Filho, P.N.; Ortiz, W. A, *Phys.Rev.B, New York*, v. 85, n. 21, p. 214511, (2012).
- [29] J. K. Gregory, M. S. James, et al., *Phys. Rev. B* 64, 134517 (2001).
- [30] G. R. Berdiyrov, M. V. Milosevic, F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* 81, 144511, (2010).
- [31] G. R. Berdiyrov, A. K. Elmurodov, F. M. Peeters and D. Y. Vodolazov, *Phys. Rev. B* 79, 174506 (2009).
- [32] C. P. Bean, J. D. Livingston, *Phys. Rev. Lett.* 12, 14, (1964).

- [33] X. H. Chao, B. Y. Zhu, A. V. Silhanek, V. V. Moshchalkov, *Phys. Rev. B* **80**, 054506 (2009).
- [34] G. R. Berdiyrov, et al., *Eur. Phys. J. B* **85**, 130, (2012).
- [35] A. Presotto, E. Sardella, R. Zadorosny, *Phys. C* **492**, 75-79, (2013).
- [36] G. R. Berdiyrov, M. V. Milosevic, F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* **79**, 184506 (2009).
- [37] A. Belkin, M. Belkin, et al., *Phys. Rev. X* **5**, 021023 (2015).
- [38] Yu Chen, Yen-Hsiang Lin, et al. , *Nature Physics* **10**, 567-571 (2014).
- [39] B. I. Ivlev and N. B. Kopnin, *Usp. Fiz. Nauk* **142**, 435 (1984), *Sov. Phys. Usp.* **27**, 206 (1984).
- [40] G. R. Berdiyrov, M. V. Milosevic, F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* **80**, 214509 (2009).
- [41] G. R. Berdiyrov, M. V. Milosevic and F. M. Peeters, *Appl. Phys. Lett* **100**, 262603, (2012).
- [42] M. Rostiche, et al. , *Appl. Phys. Lett* **97**, 183106 (2010).
- [43] X. Zhang, et al. , *Phys. Rev. B* **94**, 174509 (2016).
- [44] S. N. Dorenbos et al, *Appl Phys. Lett* **93**, 131101 (2008).
- [45] A. Schmid, *Phys. Kondens. Mater.* **5**, 302 (1966).
- [46] L. Kramer e R. J. Watts-Tobin, *Phys. Rev. Lett.* **40**, 1041 (1978).
- [47] R. J. Watts-Tobin, Y. Kr"ahenb"uhl, e L. Kramer, *J. Low Temp. Phys.* **42**, 459 (1981).
- [48] I. Petkovic, A. Lollo, L. I. Glazman and J. G. E. Harris, *Nat. Commun* **7**, 13551 (2016).