

Válasz Tüttö István opponensi véleményére

Köszönöm Tüttö Istvánnak a téma áttekintését, a dolgozat alapos elemzését és konstruktív észrevételeit. Elfogadom, hogy lehetett volna a dolgozatot másképpen struktúrálni, egy-két témát alaposabban kifejteni, a többi rövidebben összefoglalni. Bár erre már nem lesz lehetőségem, ha a dolgozatban szereplő témák valamelyikéből áttekintő cikket írok, megfogadom a tanácsát.

A bíráló kérdése a vékony dielektrikummal elválasztott grafén síkokban külső mágneses térben jósolt töltéssűrűség-hullám állapot és a magashőmérsékletű szupravezetőkben kialakuló stripe állapot közötti kapcsolatra vonatkozik. Előrebocsátom, nem vagyok a magashőmérsékletű szupravezetés szakértője, értesüléseimet áttekintő cikkekből [1, 2] kiindulva szereztem.

A magashőmérsékletű szupravezetők egy részében, legegyszerűbben $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ -ban $x = 1/8$ környékén röntgen- [3–5] és neutronszerelési [4, 6, 7] kísérletekben megfigyelt csíkozottságot általában a kuprátrétegen belüli korrelációs jelenségként (töltéssűrűség-, spinsűrűség-, ill. szupravezető rendparaméter-hullámként) próbálják magyarázni, amit $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ esetében alacsony hőmérsékleti tetragonális torzulás (LTT) katalizál (a vele kémiaiag ekvivalens $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ esetében nem, itt a stripe állapot léte bizonytalanabb). A leírás vagy a $t - J$ modell keretein belül történik [8–10], vagy fenomenologikusan (pl. Landau-Ginzburg-elmélet) [11], vagy numerikusan számolható kétdimenziós modellrendszerekkel elemzésével [1]. A szórási kísérletek tanúsága szerint [2] az egymást feletti kuprát síkokon a csíkok egymáshoz képest 90 fokkal el vannak fordítva, ami összhangban van azzal, hogy az LTT szerkezetben az az irány, amelyben a Cu-O kötések egyenesek maradnak, szintén 90 fokot fordul, ha egy réteget feljebb lépünk a kuprát síkokra merőlegesen. Fontos, hogy a hullámok kommenzurábilisak a ráccsal – a töltéssűrűség periodusa $4a$, a spinsűrűsége $8a$ –, és hogy a kristályszerkezet jelöli ki az irányukat.

Az általam a [12] cikkben (a disszertáció 2.4. fejezetében) vizsgált rendszerben más a helyzet. Itt a csíkok párhuzamosan állnak a két rétegben. Ismert, hogy csíkok egy rétegben is kialakulnak, mind grafénben [13–15], mind a kétdimenziós elektrongázban [16–19], ha a betöltési szám egész értéktől 0.4-0.6 értékkel tér el, de a Fermi-energia nem az $n = 0, 1$ Landau-szintekbe esik. Ennek elsődleges oka az egyrészes Landau-pályák szerkezetében rejlik; bár ez a szerkezet függ a választott mértéktől, minden esetben hullámszerű lecsengést mutat, ami azt sugallja, ezek a pályák összeilleszthetők oly módon, hogy a kölcsönhatási energia minimumot mutasson. A vizsgált két grafén réteget tartalmazó rendszerben az egyes rétegeken kialakuló töltéssűrűség-hullámokat összefűzi a rétegek közötti kölcsönhatás. Hatása azonban nem csak ennyi, hanem mivel különböző szerkezetű töltéssűrűség-hullámok esetében különböző a rétegek összerendezéséből adódó energia-nyereség, a rétegek közötti kölcsönhatás az egyes sűrűség-hullám-típusok közötti versengésbe is beleszól; ennek eredménye a 2.14., 2.17., 2.18. és 2.19. ábrákon mutatott meglehetősen komplex fázisdiagram. (Persze meg kell említeni, hogy Hartree-Fock számolásról van szó, a valóságban a fluktuációk sokat egyszerűsíthetnek a fázisdiagramon.) Az elemzett probléma inkább a két párhuzamos kétdimenziós elektrongázban keresett Wigner kristály problémájához hasonlít [20–25]. Fontos különbség, hogy a szupravezetőkkel ellentétben a mágneses térben félegész betöltöttségek környékén kialakuló sűrűség-hullámok periódusa sokkal hosszabb, mint a rácsállandó, a ciklotron-sugár néhányszorosa. Stripe állapot esetén a preferált irányt nem a kristálytani tengelyek jelölik ki, hanem spontán szimmetriasértés; bár vannak olyan transzportmérések GaAs-ban, amelyek kapcsolatot mutatnak ki a kristálytengelyek és a vezetőképesség anizotrópiája között (ez utóbbi a csíkos állapot melletti érv).

Hivatkozások

- [1] E. Berg, E. Fradkin, S. A. Kivelson, and J. Tranquada, ArXiv e-prints (2009), 0901.4826.
- [2] J. M. Tranquada, in *American Institute of Physics Conference Series*, edited by A. Avella and F. Mancini (2013), vol. 1550 of *American Institute of Physics Conference Series*, pp. 114–187, 1305.4118.
- [3] M. Fujita, H. Goka, K. Yamada, J. M. Tranquada, and L. P. Regnault, Phys. Rev. B **70**, 104517 (2004).
- [4] J. M. Tranquada, G. D. Gu, M. Hücker, Q. Jie, H.-J. Kang, R. Klingeler, Q. Li, N. Tristan, J. S. Wen, G. Y. Xu, et al., Phys. Rev. B **78**, 174529 (2008).
- [5] S. R. Dunsiger, Y. Zhao, Z. Yamani, W. J. L. Buyers, H. A. Dabkowska, and B. D. Gaulin, Phys. Rev. B **77**, 224410 (2008).
- [6] Y.-J. Kim, G. D. Gu, T. Gog, and D. Casa, Phys. Rev. B **77**, 064520 (2008).
- [7] P. Abbamonte, A. Rusydi, S. Smadici, G. D. Gu, G. A. Sawatzky, and D. L. Feng, Nat. Phys. **1**, 155 (2005).
- [8] C. S. Hellberg and E. Manousakis, Phys. Rev. Lett. **83**, 132 (1999).
- [9] E. Arrigoni, A. P. Harju, W. Hanke, B. Brendel, and S. A. Kivelson, Phys. Rev. B **65**, 134503 (2002).
- [10] P. Corboz, S. R. White, G. Vidal, and M. Troyer, Phys. Rev. B **84**, 041108 (2011).
- [11] E. Berg, E. Fradkin, and S. A. Kivelson, Phys. Rev. B **79**, 064515 (2009).
- [12] C. Tóke and V. I. Fal’ko, Phys. Rev. B **90**, 035404 (2014).
- [13] C.-H. Zhang and Y. N. Joglekar, Phys. Rev. B **75**, 245414 (2007).
- [14] H. Wang, D. N. Sheng, L. Sheng, and F. D. M. Haldane, Phys. Rev. Lett. **100**, 116802 (2008).
- [15] O. Poplavskyy, M. O. Goerbig, and C. Morais Smith, Phys. Rev. B **80**, 195414 (2009).
- [16] H. Fukuyama, P. M. Platzman, and P. W. Anderson, Phys. Rev. B **19**, 5211 (1979).
- [17] M. M. Fogler, A. A. Koulakov, and B. I. Shklovskii, Phys. Rev. B **54**, 1853 (1996).
- [18] A. A. Koulakov, M. M. Fogler, and B. I. Shklovskii, Phys. Rev. Lett. **76**, 499 (1996).
- [19] R. Moessner and J. T. Chalker, Phys. Rev. B **54**, 5006 (1996).
- [20] V. I. Fal’ko, Phys. Rev. B **49**, 7774 (1994).
- [21] S. Narasimhan and T.-L. Ho, Phys. Rev. B **52**, 12291 (1995).

- [22] K. Esfarjani and Y. Kawazoe, Journal of Physics: Condensed Matter **7**, 7217 (1995).
- [23] L. Zheng and H. A. Fertig, Phys. Rev. B **52**, 12282 (1995).
- [24] G. Goldoni and F. M. Peeters, Phys. Rev. B **53**, 4591 (1996).
- [25] I. V. Schweigert, V. A. Schweigert, and F. M. Peeters, Phys. Rev. B **60**, 14665 (1999).