近藤絶縁体における複合フェルミオンの観測

物性研究所·附属国際超強磁場科学研究施設·小濱 芳允、Zhuo Yang (杨 卓)

昨年、グラファイトにおける比熱のダブルピーク構造に ついて物性研だよりに寄稿した[1,2]。グラファイトはラ ンダウ量子化現象により電子状態密度に急峻な微細構造を 有し、これが比熱の磁場依存性にダブルピーク構造を引き 起こす(図 1a)。この比熱のダブルピーク構造は電子状態 密度がフェルミ統計に従う自由電子(フェルミオン)で構成 されていることを起源とし、電子状態密度に急峻な微細構 造を持つ CeRu₂Si₂ や UCoGe などの金属化合物でも観測 される[2]。本研究ではこのような金属ではなく、低温で 絶縁体の性質を示すYbB12において比熱のダブルピーク構 造を発見した(図 1b[3])。YbB12 は近藤絶縁体と呼ばれる 物質であり、自由電子を有さない本物質においてフェル ミオンに関連する物性が発現するとは思えない。しかし負 の電荷を持つ電子(フェルミオン)がホールの電荷成分(ボ ソン)と結合し、「電荷中性のエキシトン」という熱は運ぶ が電荷を運ばないフェルミオンになるという理論が存在す る[4]。この電荷中性の粒子は絶縁体でも存在し、自由電 子のようにフェルミ統計に従う物性量を示す。このような 複数の粒子が結合した複合準粒子は原子核物理学や量子ホ ール効果などでは基本的な概念であり、近年の物性物理分 野ではキメラ準粒子というキーワードにより統一的な理解 が進んでいる。本研究はこのような未観測粒子を強磁場熱 測定で検出した例と考えられ、本稿ではこの詳細を紹介さ せていただく。



図1:(a)グラファイトおよび(b)YbB12における比熱の磁場依存性

7 物性研だより第 65 巻第 1 号

近藤効果と呼ばれる遍歴電子と局在電子の混成により、 低温領域で YbB12 は電子バンド構造にギャップを有する 絶縁体となる。この温度降下により誘起される YbB12の 電子状態は、近年でも特殊な表面状態の観測など様々な 研究が進んできた[5,6]。一方で近藤効果を磁場で抑制す ることで、YbB12 は大きくその性質が変化する(図 2)。

フェルミ状態密度に異常[3]				自由電子を含む金属[3,9]	
電荷を運ばないフェルミオン[8]				 量子振動[7] 重い電子[10] ←>←	
0 T	10 T	20 T	30 T	40 T	50 T

図2:低温におけるYbB12の電子状態の磁場変化

この磁場下挙動が特に注目され始めたのは、絶縁体と思わ れていた 35T 以上の磁場領域で自由電子の特徴である量 子振動が観測されたことがきっかけであろう[7]。その後 の熱伝導と電気抵抗測定の対比実験により、12T 以下の低 磁場領域で熱は運ぶが電荷を運ばないフェルミオンの存在 が示唆され[8]、この特殊なフェルミオンが量子振動の起 源と考えられた。しかし近年になり 30T 付近でホール効 果に異常が観測され(図 3a)[3,9]、さらに 45T 以上の強磁 場領域では重い電子状態となることも判っている[10]。こ のように YbB12の電子構造は大きく磁場変化する。特にホ ール効果に異常が現れる 30T はリフシッツ転移に対応し、 より強磁場では自由電子が存在していると解釈された[9]。 この自由電子の存在により、低磁場領域の熱は運ぶが電荷 を運ばない特殊なフェルミオンが強磁場領域における量子 振動現象の起源と断定できない状況となっていた。

我々はYbB₁₂の強磁場下における電子状態を包括的に調 査すべく、CEA-Grenoble の Christophe Marcenat 博士 (2024年3月から外国人客員所員として小濱研に2か月滞 在)、Thierry Klein 教授らと共に超高精度のAC比熱測定 (図 3c)、パルス磁場下の磁気熱量効果(図 3b)、そしてホ ール効果(図 3a)を測定した。図1bと図3cに示すように、 比熱測定では複数のダブルピーク構造が $B_{c1} = 11, B_{c2} =$ 16、 $B_{c3} = 19.8, B_{c4} = 30$ Tで観測された。これらの臨界 磁場は磁場印可角度により変化し、図4に示されるように 4 回対称性が観測される。この角度依存性は、この観測さ れたピークが表面状態起源でないことを強く示している。 観測された比熱はダブルピーク構造であるが、図 3b に示 すように磁気熱量効果はシングルピーク構造である。この 比熱と磁気熱量効果のダブルピーク構造およびシングルピ ーク構造はフェルミ状態密度に急峻な微細構造を有するこ とを示しており、グラファイトでもランダウ量子化により 同様の振る舞いが引き起こされている[2]。このため比熱 と磁気熱量効果は、グラファイトと同じくYbB₁₂のフェル ミ状態密度に急峻な微細構造を持つことを強く示唆する。

一方で電荷の磁気輸送特性であるホール効果は、30Tまで 大きな異常を示さない。ホール効果はYbB12の表面伝導や 熱励起された微小なキャリアの情報も含むが、少なくとも 30T以下の磁場領域まではゼロ磁場と連続的に繋がってい る。このゼロ磁場と繋がる自由電子が乏しい領域で、フェ ルミ状態密度に急峻な微細構造を有することを本研究は示 している。グラファイトでは自由電子がランダウ量子化す ることで急峻な微細構造が誘起されたが、YbB12において この起源は自明ではない。



図 3:YbB₁₂の(a)ホール抵抗、(b)磁気熱量効果、(c)比熱の磁場依存性[3]

フェルミ状態密度における急峻な微細構造の物理的起源 として、先に紹介した電荷中性のエキシトン(複合フェル ミオン)の量子振動が挙げられる[4]。実際に、図3cにある ように比熱異常が磁場印可で大きくなる振る舞いや、60T を量子極限と考えた時の臨界磁場(60/n:n=2-5)が観測さ れた Bc とほぼ一致するのは、量子振動描像の妥当性を示 す。電荷中性エキシトンによる量子振動描像を提案してい たコーネル大の Debanjan 教授らに計算していただいたと ころ、よく似た比熱異常が電荷中性のエキシトンの量子振 動として導出された。この計算結果について興味がある方 は、本論文の Fig.S13 等を参照していただきたい[3]。エ キシトンの量子振動描像は実験結果と定性的に一致したと 思えるが、定量的に再現しなかった部分が存在することに も触れるべきである。例えば図4に示す Bc1の角度変化は Bc2 および Bc3 と異なっており、これは少なくとも1 種類 のフェルミ面による単純な量子振動描像では説明できない (より複雑な量子振動描像では説明可能)。フェルミ状態密 度以外の解釈として結晶場や中性子非弾性散乱で観測され たスピン励起のクロスオーバー描像も考慮したが、観測さ れた比熱のダブルピーク構造はボソン描像では説明困難で あった。YbB12 は本研究以外にも様々な実験結果があり [11,12]、例えば A. Azarevich らにより提案された 1 次元 導電状態は、量子振動により誘起される急峻な微細構造を 持つ状態密度を誘起するため興味深い。しかしながら1次 元伝導現象のみで過去の熱伝導、磁気抵抗、ホール抵抗や Bcの4回対象性を説明するのはかなり厳しいと思われる。 R. Kurihara らの超音波測定も興味深いが、45T以下の低 磁場では明瞭な異常は観測されていないようだ。このよう な全ての実験データを包括的に理解できる理論の発展、そ して更なる強磁場領域での実験結果が待たれる。

本研究では、強磁場熱測定により特殊なフェルミオン で構成された状態密度の観測に成功した。教科書的な量 子振動現象を示すグラファイトと類似する振る舞いが、 近藤絶縁体の YbB₁₂ で観測できるのは誠に驚きであった。



図4:YbB12における比熱のダブルピーク構造の磁場角度変化

物性研だより第 65 巻第1号 8

YbB₁₂の物理の全貌解明とはならなかったが、本研究は YbB₁₂の複雑な磁場応答を観測した論文として、特殊な複 合準粒子の理解に貢献していくと考えられる。

謝辞

この成果はグルノーブルの定常強磁場グループ、コーネル 大の理論グループ、そして強磁場コラボラトリを通じて東 北大・金属材料研究所の定常強磁場グループの助けを借り ている。この機会に感謝を申し上げたい。

参考文献

- [1] 小濱芳允 and Zhuo Yang, 物性研だより第64巻第1
 号 2024 年度
- [2] Z. Yang, B. Fauqué, T. Nomura, T. Shitaokoshi, S. Kim, D. Chowdhury, Z. Pribulová, J. Kačmarčík, A. Pourret, G. Knebel, D. Aoki, T. Klein, D. K. Maude, C. Marcenat, and Y. Kohama, *Nat. Commun.* 14, 7006 (2023). Editor's Highlighted
- [3] Z. Yang, C. Marcenat, S. Kim, S. Imajo, M. Kimata, T. Nomura, A. Muer, D. K. Maude, F. Iga, T. Klein, D. Chowdhury, and Y. Kohama. *Nat. Commun.* 15, 7801 (2024).
- [4] D. Chowdhury, I. Sodemann, and T. Senthil, Nat. Commun. 9, 1766 (2018).
- [5] M. Okawa, Y. Ishida, M. Takahashi, T. Shimada, F. Iga, T. Takabatake, T. Saitoh, and S. Shin, *Phys. Rev. B* **92**, 161108(R) (2015).
- [6] K. Hagiwara, Y. Ohtsubo, M. Matsunami, S. Ideta, K. Tanaka, H. Miyazaki, J. E. Rault, P. Le Fèvre, F. Bertran, A. Taleb-Ibrahimi, R. Yukawa, M. Kobayashi, K. Horiba, H. Kumigashira, K. Sumida, T. Okuda, F. Iga, and S. Kimura. *Nat. Commun.* 7, 12690 (2016).
- [7] Z. Xiang, Y. Kasahara, T. Asaba, B. Lawson, C. Tinsman, Lu Chen, K. Sugimoto, S. Kawaguchi, Y. Sato, G. Li, S. Yao, Y. L., F. Iga, John Singleton, Y. Matsuda, and Lu Li, *Science* **362**, 65–69 (2018).
- [8] Y. Sato, Z. Xiang, Y. Kasahara, T. Taniguchi, S. Kasahara, L. Chen, T. Asaba, C. Tinsman, H. Murayama, O. Tanaka, Y. Mizukami, T. Shibauchi, F. Iga, J. Singleton, Lu Li, and Y. Matsuda. *Nat. Phys.* 15, 954–959 (2019).

.....

- [9] Ziji Xiang, Kuan-Wen Chen, Lu Chen, Tomoya Asaba, Yuki Sato, Nan Zhang, Dechen Zhang, Yuichi Kasahara, Fumitoshi Iga, William A. Coniglio, Yuji Matsuda, John Singleton, and Lu Li, *Phys. Rev. X* 12, 021050 (2022).
- [10] T. T. Terashima, Y. H. Matsuda, Y. Kohama, A. Ikeda, A. Kondo, K. Kindo and F. Iga, *Phys, Rev. Lett.* **120**, 257206 (2018).
- [11] A. Azarevich, N. Bolotina, O. Khrykina, A. Bogach, E. Zhukova, B. Gorshunov, A. Melentev, Z. Bedran, A. Alyabyeva, and M. Belyanchikov, *Chin. Phys. Lett.* 39, 127302 (2022).
- [12] R. Kurihara, A. Miyake, M. Tokunaga, A. Ikeda, Y. H. Matsuda, A. Miyata, D. I. Gorbunov, T. Nomura, S. Zherlitsyn, J. Wosnitza, and F. Iga, *Phys. Rev. B* 103, 115103 (2021).

9 物性研だより第65巻第1号