

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 CeRu_2Si_2 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 YbB_{12} において比熱のダブルピーク構造を発見した(図 1b[3])。 YbB_{12} 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。

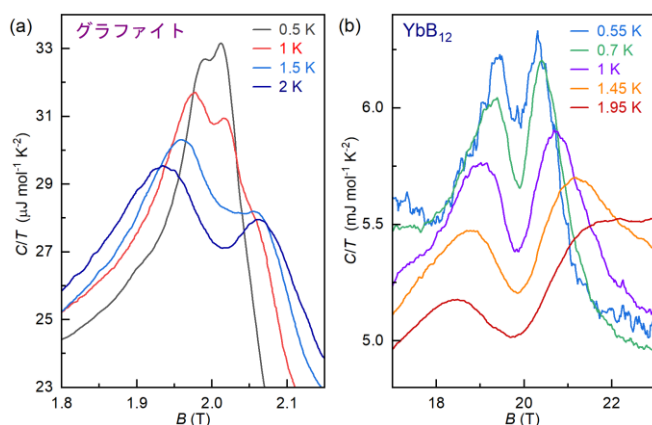


図 1:(a)グラファイトおよび(b) YbB_{12} における比熱の磁場依存性

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 YbB_{12} 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 YbB_{12} 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、 YbB_{12} は大きくその性質が変化する(図 2)。

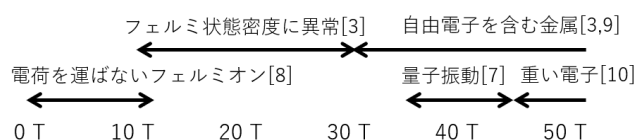


図 2：低温における YbB_{12} の電子状態の磁場変化

この磁場下挙動が特に注目され始めたのは、絶縁体とされていた 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 YbB_{12} 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。

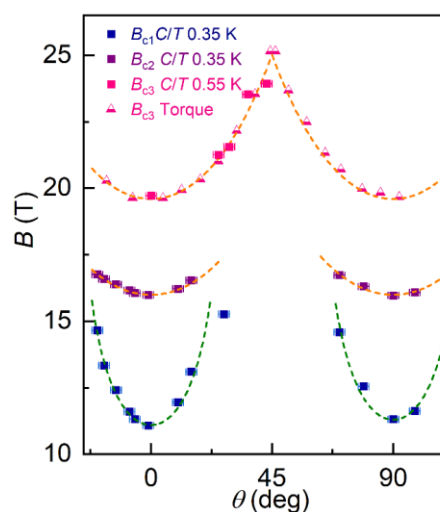
我々は YbB_{12} の強磁場下における電子状態を包括的に調査すべく、CEA-Grenoble の Christophe Marcenat 博士(2024 年 3 月から外国人客員所員として小濱研に 2 か月滞在)、Thierry Klein 教授らと共に超高精度の AC 比熱測定(図 3c)、パルス磁場下の磁気熱量効果(図 3b)、そしてホール効果(図 3a)を測定した。図 1b と図 3c に示すように、比熱測定では複数のダブルピーク構造が $B_{c1} = 11$ 、 $B_{c2} = 16$ 、 $B_{c3} = 19.8$ 、 $B_{c4} = 30$ T で観測された。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

Figure 1 consists of three vertically stacked panels (a, b, c) sharing a common x-axis representing the magnetic field B in Tesla (T), ranging from 0 to 35 T. The y-axis for all panels is $B \parallel [0\ 0\ 1]$.

- Panel (a):** Shows the Hall resistivity ρ_{xy} in $\text{m}\Omega\cdot\text{cm}$ versus B at 0.65 K . The data points (brown circles) show a decreasing trend with increasing B . Vertical lines of different colors (red, purple, orange, green) are drawn at $B \approx 10, 15, 20, 30\text{ T}$ respectively, corresponding to $B_{c1}, B_{c2}, B_{c3}, B_{c4}$.
- Panel (b):** Shows the inverse temperature $1/T$ in K^{-1} versus B at 0.7 K . The red curve shows a series of peaks and dips. The vertical lines from panel (a) are aligned with features in this curve.
- Panel (c):** Shows the specific heat C/T in $\text{mJ mol}^{-1}\text{ K}^{-2}$ versus B at 0.7 K . The blue curve shows several peaks. Arrows of different colors (red, purple, orange, green) point to the peaks at $B \approx 10, 15, 20, 30\text{ T}$, labeled $B_{c1}, B_{c2}, B_{c3}, B_{c4}$ respectively.

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

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 YbB_{12} で観測できるのは誠に驚きであった。



Age Group	Percentage
18-24	15%
25-34	12%
35-44	10%
45-54	8%
55-64	6%
65-74	4%
75-84	2%
85+	1%

