

ISSP学術奨励賞を受賞して

新物質科学研究部門 松本 洋介

この度、私が進めて参りました「強相関電子系における量子臨界現象、異方的重い電子状態の研究」に対して ISSP 学術奨励賞を賜りました。中辻知准教授を始め、多くの方々のご指導ご鞭撻、お力添えがあつて初めて、ここでの研究成果を挙げる事ができたと思います。ここに深く感謝いたします。授賞式の際は若干学会発表のような話になってしまいましたが、ここでは特に $\beta\text{-YbAlB}_4$ における零磁場量子臨界現象の発見について、その研究の経緯等を紹介させていただきたいと思つています。

さて、今回の受賞の対象となった研究は、私が 2007 年 3 月に助手として採用していただいて以降、中心的な研究課題として進めてきたものです。それ以前は超低温分野という大きく異なる分野で、グラファイト基盤に吸着した 2 次元固体ヘリウム 3 のギャップレススピン液体状態に関連した研究を行っておりました。そこから研究者としての幅を広げたいとの思いで新たな分野に飛び込み、中辻准教授よりご提示いただいて巡り会ったのが重い電子系の新物質 $\beta\text{-YbAlB}_4$ の研究でした。

私が研究に参加した当時、 $\beta\text{-YbAlB}_4$ が Yb 系初の重い電子超伝導体であることやその常伝導状態における非フェルミ液体性は、既にある程度明らかになっていましたが、まだ世間に論文[1, 2]として公表していない状況でした。そこで私はこの物質の超伝導性を比熱や電気伝導度測定によって調べることから始めました。実は私は中辻研に着任する直前まで、同じく物性研の超低温グループ、石本研に 2 年間お世話になっておりました。研究をスタートするにあたって、私自身が使用していた超低温グループの希釈冷凍機や、同じく超低温グループで柄木良友博士(現琉球大教授)が立ち上げ、管理されていた希釈冷凍機(核断熱消磁冷凍機でもある)をごく自然に利用できたのは幸いでした。しかしながら、微小単結晶に対する心構えができておらず、考え方が完全に超低温仕様になっていたため、比熱測定はしばらく試行錯誤が続きました。結局、当時の測定感度では超伝導による比熱の異常を議論することができず、その代わりに磁化測定を組み合わせることで、磁気グリュナイゼン係数を議論することにしました。磁気グリュナイゼン係数は、磁化の温度微分を比熱で割った量(もしくは磁気熱量効果を温度で割った量)として定義され、量子臨界性を特徴づける重要な量であると考えられています[3]。

そこで、非フェルミ液体性が顕著になる極低温、弱磁場下で精密磁化測定を行うため、柄木教授の希釈冷凍機を用いて SQUID 磁化測定を行いました。この測定は、希釈冷凍機の断熱真空中に設置した磁気シールド付き超伝導マグネット内に、サンプルおよびこれを取り囲むピックアップコイルを挿入して行います。SQUID 自体は冷凍機の他の場所に設置されており、ピックアップコイル内の磁束の変化を超伝導ループによってここまで転送することで、DC 磁化を 10^{-8} emu の高精度で測定することが可能です。単結晶試料は、当時大学院生だった久我健太郎さん(現阪大萩原研特任研究員)が育成し評価してくれた、残留抵抗比 RRR が 200 以上の純良なもののみを 30 個程(0.82 mg)集めて用いました。約 50 mT 以下の磁場中、20 mK から数 K に至る温度域で精密測定を行った結果、驚くべきことに磁化の発散的な振舞いが T/B のスケーリング則を満たすことが明らかになったのです[4]。

スケーリング則を見つけた経緯ですが、もともと、 $\text{CeCu}_{5.9}\text{Au}_{0.1}$ において中性子散乱や磁化測定から E/T スケーリングもしくは T/B スケーリングがこの物質の非従来型の量子臨界性を示す重要な実験結果として議論されていました[5]。そのため、 T/B スケーリングを試すというのは最初から私たちの念頭にありました。また、一方で、実験結果を見ると、明らかに冪乗則的な発散が見えるものの、比較的大きなヴァンブレックのバックグラウンドもあるようでした。そこで磁化を温度微分し、両対数でプロットしてみると、きれいな冪乗則が成り立っており、さらに T/B スケーリングも成り立ちそうに見えました。そこで横軸を T/B にして、磁化の温度微分をプロットし、後は適当に縦軸をスケールするために縦軸に磁場をかけてみたところ若干磁場の効果が効きすぎたので今度は磁場の $1/2$ 乗にしてみたところ、綺麗に全データが重なりました。最初はあまりにきれいに重なっていたので、図を見た瞬間何が起きたのか良く理解できませんでしたが、ともあれスケーリングを見出したのでした。



ところで、もともとの目的だった磁気グリュナイゼン係数については、その発散的振舞いが、零磁場量子臨界点とコンシテントであることは確認できましたが、発散の温度依存性が $T^{-2.6}$ と既存の理論のいずれとも合致しそうにない極めて強い温度依存性で、それ以上の議論はできていません[4]。実はこの系の量子臨界性に寄与している f 電子は全体の 1 割程度で、その他の f 電子はバックグラウンド的に振舞っていることが分かっていますので[4, 7, 8]、両者を切り分けて考える必要があるのではないかと思います。今後、極低温、高磁場における比熱測定を拡充することで何かわかるのではないかと期待しています。その他、今後の課題ですが、比熱測定について、今ではかなり測定の感度等も上がりましたので、超伝導検出に再トライしたいと考えています。また、最近、私たちの研究室でも希釈冷凍機温度における SQUID 磁化測定装置を新たに立ち上げました。これをさらに圧力下に拡張し、圧力下で T/B スケーリングがどうなっているかを検証することで非フェルミ液体相の可能性等を探りたいと考えています。

異方性に関する研究[9]についてはここで触れることができませんでしたが、伝導電子と f 電子の異方的な混成が価数揺動系における重い電子の形成や量子臨界現象に重要な役割を果たしている可能性が出てきており[7, 10]、今後のさらなる展開が期待されます。

- [1] S. Nakatsuji *et al.*, Nature Phys. **4**, 603–607 (2008).
- [2] K. Kuga, Y. Karaki, Y. Matsumoto, Y. Machida, and S. Nakatsuji, Phys. Rev. Lett. **101**, 137004 (2008).
- [3] L. Zhu *et al.* Phys. Rev. Lett. **91**, 066404 (2003).
- [4] Y. Matsumoto, S. Nakatsuji, K. Kuga, Y. Karaki, Y. Shimura, T. Sakakibara, A. H. Nevidomskyy, P. Coleman, Science **331**, 316 (2011).
- [5] A. Schröder *et al.*, Nature **407**, 351 (2001).
- [6] M. Okawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, 247201 (2010).
- [7] E. C. T. O’Farrell, Y. Matsumoto, and S. Nakatsuji, Phys. Rev. Lett. **109**, 176405 (2012).
- [8] Y. Matsumoto *et al.*, arXiv:1407.6142.
- [9] Y. Matsumoto, K. Kuga, T. Tomita, Y. Karaki and S. Nakatsuji, Phys. Rev. B **84**, 125126 (2011).
- [10] A. Ramires, P. Coleman, A. Nevidomskyy and A. M. Tsvelik, Phys. Rev. Lett. **109**, 176404 (2012).

