

第 8 回日本物理学会若手奨励賞を受賞して

山下 穰

このたび第 8 回(2014 年)の日本物理学会若手奨励賞(領域 7)を受賞する荣誉に恵まれました。本受賞研究は私が助教を務めていた京都大学・理学研究科・固体電子物性講座(松田・芝内研)における研究と、理化学研究所・加藤分子物性研究室における研究がその対象です。ここに全ての共同研究者の皆様に深く感謝申し上げます。

本受賞の対象となった研究は「二次元三角格子反強磁性体における量子スピン液体状態の素励起の研究」です。二次元三角格子のような幾何学的フラストレーションのある系でスピンの絶対零度まで凍結しない量子スピン液体が存在するの、仮に存在した時にはどのような状態が現れるのかという問題は、物性物理における長年の問題の一つです。特に近年、有力な候補物質が複数見つかったことで、実験的にこの問題に取り組もうという研究が盛んに行われるようになりました。ここでいう「候補物質」というのは、スピン間相互作用 J よりずっと低温まで冷やしても磁気秩序などの相転移の兆候が観測されない物質を指します。最も多い候補物質が分子を構成単位とする分子性物質群で見つかっています。二次元三角格子を持つモット絶縁体 κ -(BEDT-TTF) $_2$ Cu $_2$ (CN) $_3$ における磁気秩序が 20 mK ($\sim J/10,000$)まで観測されないことが NMR 測定から報告されたことを皮切りに、EtMe $_3$ Sb[Pd(dmit) $_2$] $_2$ 、 κ -H $_3$ (Cat-EDT-TTF) $_2$ に κ -(BEDT-TTF) $_2$ Ag $_2$ (CN) $_3$ と候補物質の発見が相次いでいます。また、これらの有機モット絶縁体以外にもグラファイト上のヘリウム 3 やカゴメ鉱物のハーバートスミス石(ZnCu $_3$ (OH) $_6$ Cl $_2$)においても今まで実験されている最低温度まで磁気秩序などの兆候が観測されていません。

しかし、何も観測されないでは何もわかりません。量子スピン液体状態がただの常磁性状態とは異なる特徴が存在するはずで、1次元の量子スピン液体ではスピンの大きさが 1/2(半整数)か 1(整数)かでその基底状態が大きく異なり、それぞれギャップレスのスピン励起とハルデンギャップと呼ばれる有限のエネルギーギャップによってその基底状態が特徴づけられることが知られています。二次元の量子スピン液体においてもそれを特徴づける素励起の性質を明らかにすることが最も重要な課題です。磁性体の素励起を明らかにするためには中性子を用いた非弾性散乱実験が有効ですが、大きな単結晶の育成が困難で、スピンの分子軌道に広がっている分子性物質に適用することは不可能です。代わりに、極低温までの比熱や磁化率測定によってその素励起の性質を明らかにする必要がありますが、これらの測定においては低温における不純物のショットキー比熱や不純物スピンの影響によって極低温の測定が困難でした。

そこで、極低温まで不純物の影響を受けない熱伝導率測定によってその素励起を明らかにしようとして行った研究が今回の対象論文の 2 と 3 になります。重い電子系などの新奇超伝導体における研究でも極低温のショットキー比熱等を避ける目的で熱伝導率測定による素励起の観測が広く行われており、それを分子性物質群における量子スピン液体の候補物質に適用した研究でした。分子性物質は非常に脆く、冷却過程において試料が壊れてしまう事も多いので、信頼できる測定結果を得るために非常に多くの試料を測定する必要があって大変でした。しかし、この測定から κ -(BEDT-TTF) $_2$ Cu $_2$ (CN) $_3$ には非常に小さなギャップが存在することが明らかになり、EtMe $_3$ Sb[Pd(dmit) $_2$] $_2$ には平均自由行程が非常に長いギャップレスの励起が存在することが明らかになりました。

また、SQUID を用いた磁化率測定において問題になる不純物スピンの影響を排除するために磁気トルク測定を行ったのが下記の受賞対象論文の 1 です。異方性を測る磁気トルク測定では等方的に現れる不純物スピンの影響は排除できるのですが、様々な要因が異方性の起源となり得るので、測定結果から正しく磁化率の情報が引き出せるのか心配でした。しかし、電荷秩序によって非磁性状態へと転移する Et $_2$ Me $_2$ Sb[Pd(dmit) $_2$] $_2$ において磁気トルクが転移温度で大きく減少する

ことや、ESR によって求めた g 値の異方性と現れる磁気トルクの信号がちゃんと対応していることから量子スピン液体状態の磁化率を正しく見積もれることがわかりました。ここから熱伝導率測定で見出したギャップレス励起は磁気的な励起である事がわかりました。ギャップレスの磁気励起は通常、磁気秩序した物質の特性ですから、これが磁気秩序のないこの物質で見つかったという事で、この量子スピン液体状態はなんらかの量子臨界的な状態にある事がわかりました。

現在、量子スピン液体状態の基底状態の詳細を追求しようとしています。例えば、幾何学的フラストレーションの大きさを強くしたり弱くしたりしたとき変化から、磁気秩序相と量子スピン液体相の相図がどのようになっているかを明らかにしようとしています。また、二次元量子スピン液体の中で有力視されている理論ではゲージ場との結合によってスピノンの熱ホール効果が表れる事が予言されているので、これを実験的に検証しようとしています。さらに、物性研究所には超流動ヘリウムの研究によって培われたサブ mK を実現する超低温装置とその測定技術がありますから、それを生かして未踏の超低温領域までの物性測定から二次元量子スピン液体の理解につながる研究をしていきたいと考えています。

受賞対象論文

1. "Novel Pauli-paramagnetic quantum phase in a Mott insulator", *Nature communications* **3**, 1090 (2012).
2. "Highly Mobile Gapless Excitations in a Two-Dimensional Candidate Quantum Spin Liquid", *Science* **328**, 1246 (2010).
3. "Thermal-transport measurements in a quantum spin-liquid state of the frustrated triangular magnet κ -(BEDT-TTF)₂Cu₂(CN)₃", *Nature Physics* **5**, 44 (2009).

