

平成22年 5月20日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）  
研究期間：2008 ～ 2009  
課題番号：20840026  
研究課題名（和文） 幾何学的フラストレーションの強い系におけるスピン液体状態の研究  
研究課題名（英文） Study of spin liquid states under geometrical frustration  
研究代表者  
山下 穰（YAMASHITA MINORU）  
京都大学・理学研究科・助教  
研究者番号：10464207

研究成果の概要（和文）：反強磁性的に相互作用する大きさ  $1/2$  のスピンの二次元三角格子状に配置されたときの基底状態と最低エネルギー励起を調べるためにスピン液体状態を示すことがわかっている有機物質  $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>(CN)<sub>3</sub> と EtMe<sub>3</sub>Sb[Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub> の熱伝導率測定を 100 mK 以下の極低温まで行った。 $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>(CN)<sub>3</sub> についてはスピンギャップのあるスピン液体であることが初めて見出された。一方、EtMe<sub>3</sub>Sb[Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub> においてはギャップのないスピン液体であり、絶縁体であるにもかかわらず金属のような熱伝導性を示すことが分かった。

研究成果の概要（英文）：To explore the nature of spin excitations of spin liquid material, we have measured thermal conductivity of organic compounds  $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>(CN)<sub>3</sub> and EtMe<sub>3</sub>Sb[Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub>, which are known to possess no-long-range ordered state - so called "spin liquid state" - down to the lowest temperature. We found the excitation of  $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>(CN)<sub>3</sub> is gapped, so it is a gapped spin liquid. On the other hand, thermal conductivity of EtMe<sub>3</sub>Sb[Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub> shows a temperature dependence very similar to metal, even though the material is insulator.

交付決定額

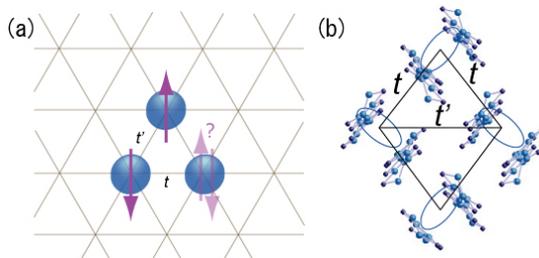
(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
年度	1,320,000	396,000	1,716,000
年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,520,000	756,000	3,276,000

研究分野： 数物系科学  
科研費の分科・細目： 物理学・物性Ⅱ  
キーワード： 磁性 低温物性

## 1. 研究開始当初の背景

反強磁性的相互作用をする大きさ  $1/2$  のスピ  
ンが三角格子状に配置されたときの基底状  
態は、1973年に P.W. Anderson が RVB 状態  
というエネルギーギャップを持たないスピ  
ン液体状態が温度ゼロの極限まで存在し、高  
温超伝導のメカニズムとなっている可能性  
を指摘して以来、その存在の有無が物性研究  
における大きな課題のひとつとなっている。  
現在までに二次元三角格子を取り扱うため  
の様々な理論的モデルが提案され、スピン液  
体状態の実現の可能性とエネルギーギャ  
ップの有無について30年以上にわたる理論  
的論争が続いているがいまだ決着を見ない。



この為、二次元三角格子の系において果たして本当に Anderson が提案するようなエネルギーギャップの無いスピン液体状態が存在するのかどうかを実験的に検証することが長年の課題であった。実際にそうした幾何学的構造を持つ物質は長らく見つからなかったのだが、近年、非常に理想的二次元三角格子に近い幾何学的構造を持つ有機物が見つかり、スピン交換相互作用の一万分の一の温度まで磁気秩序を持たないことが NMR 測定によって発見され大きな注目を集めており、その最低励起を明らかにすることが急務となっていた。

## 2. 研究の目的

エネルギーギャップが存在するかないかは比熱や熱伝導率といった熱力学量を極低温まで測定することで明らかになる。こうした熱力学量はギャップが開けば温度に対して指数関数的に減少し、ギャップが無いのなら温度の冪で減少する。特に熱伝導率測定においてはエントロピーを運ぶ励起だけを測定することができるため、NMR測定における自由電子の影響や比熱測定における核比熱の影響などの不純物の影響を受けない。このため熱伝導率測定が最もよい測定方法となっていると考えられる。このように、本研

究では熱伝導率の測定を希釈冷凍機を用いて 10 mK の極低温まで行い、その温度依存性から最低エネルギー励起のギャップの有無を明らかにすることが目的であった。

## 3. 研究の方法

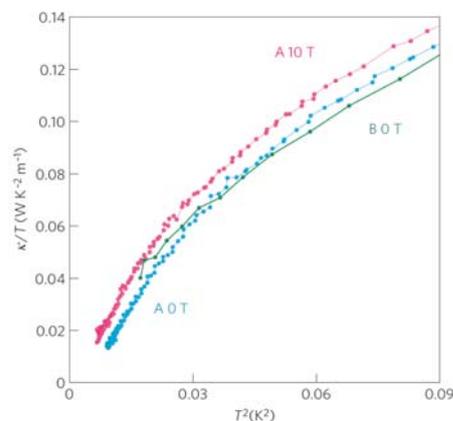
希釈冷凍機温度の極低温まで磁気秩序を示さないことが分かっている

$\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>(CN)<sub>3</sub>

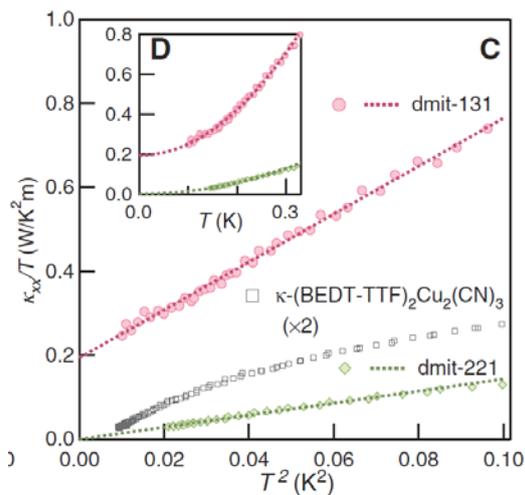
EtMe<sub>3</sub>Sb[Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub> に熱流を流し、それによる温度差を測定することで熱伝導率を測定した。希釈冷凍機と超伝導マグネットを組み合わせることで 100 mK、10 T という極限環境下でも測定することが可能となった。

## 4. 研究成果

極低温における熱伝導率の温度依存性から  $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>(CN)<sub>3</sub> については熱伝導率の温度依存性からスピンギャップのあるスピン液体であることが初めて見出された。



一方、EtMe<sub>3</sub>Sb[Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub> においてはギャップのないスピン液体であり、絶縁体であるにもかかわらず金属のような熱伝導性を示すことが分かった。このようなスピン液体の示す熱伝導性は全く新しい研究成果であり、スピン液体という未知の物質の性質を明らかにする上で非常に重要な成果であると考えられている。



5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3件)

- ① Minoru Yamashita, et al.,  
Highly Mobile Gapless Excitations in a Two-Dimensional Candidate Quantum Spin Liquid  
Science、査読あり、(2010) 掲載予定
- ② Minoru Yamashita, et al.,  
Thermal conductivity measurements of the energy-gap anisotropy of superconducting LaFePO at low temperatures  
Physical Review B、査読あり、Vol. 80 (2009) p 220509-220511
- ③ Minoru Yamashita, et al.,  
Thermal-transport measurements in a quantum spin-liquid state of the frustrated triangular magnet  $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>(CN)<sub>3</sub>  
Nature Physics、査読あり、Vol. 5 (2009) p 44-47

[学会発表] (計 5件)

- ① 山下 穰,  
Thermal-transport measurement in a gapless spin-liquid state of EtMe<sub>3</sub>Sb[Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub>,  
APS March Meeting 2010  
2010年3月17日

Portland, Oregon, USA

- ② 山下 穰,  
Thermal-transport Measurements in Spin-1/2 Triangular Antiferromagnets  $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>(CN)<sub>3</sub> and EtMe<sub>3</sub>Sb[Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub>,  
The 8th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Ferromagnets  
2009年9月14日  
ヒルトンニセコビレッジ、北海道

- ③ 山下 穰,  
二次元三角格子反強磁性体 EtMe<sub>3</sub>Sb[Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub> のスピン液体状態における熱輸送測定、  
日本物理学会 第64回年次大会  
2009年3月27日  
立教大学、池袋

- ④ 山下 穰,  
Gapped quantum spin-liquid state in a frustrated triangular magnet  $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>(CN)<sub>3</sub>,  
APS March Meeting 2009  
2009年3月16日  
Pittsburgh, PA, USA

- ⑤ 山下 穰,  
Thermal-transport measurements of spin-liquid states of  $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>(CN)<sub>3</sub>,  
25th International Conference on Low Temperature Physics  
2009年8月9日  
Amsterdam, Netherlands

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山下 穰 (YAMASHITA MINORU )  
京都大学・理学研究科・助教  
研究者番号：10464207