

強結合の極限にある超伝導

μ SR で見た新鉄ヒ素系超伝導体 $(\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x)\text{Fe}_2\text{As}_2$

昨年2月、東工大細野教授の研究グループによって鉄を含む物質 $\text{LaFeAs}(\text{O}_{1-x}\text{F}_x)$ が絶対温度 26 K で超伝導を示すことが発見され、さらにその後の研究で La (ランタン) 元素を他の希土類元素に変えることで 50 K を超す超伝導転移温度 (T_c) が実現されたことから、世界中で銅酸化物超伝導体の発見以来という集中的な研究が行なわれている。これらの物質は Fe と As でできた 2 次元的な Fe_2As_2 層から構成されており、それら Fe_2As_2 層に挟まっている La_2O_2 層の酸素 (O^{2-}) の一部を価数の違うフッ素 (F) に置き換える等の操作により Fe_2As_2 層にキャリア (この場合電子) が供給されて超伝導が発現すると考えられている。従来型の超伝導の標準的な理論である BCS 理論では、一般に鉄のように磁性を持つ原子は超伝導を担うクーパー対を破壊することが知られており、その鉄を含む層で、しかも「BCS の壁」といわれる 40 K 付近を超えた高い転移温度を持って超伝導が引き起こされる、という点が研究者の興味を大いにかき立てている。

その後もう一つの系統として $(\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x)\text{Fe}_2\text{As}_2$ という物質 (122 系、 $T_c \sim 40$ K) が昨年ドイツのグループにより発見された。こちらも骨格として Fe_2As_2 層が超伝導を担う点は $\text{LaFeAs}(\text{O}_{1-x}\text{F}_x)$ と同じだが、電荷の担い手はホール (正孔) になっている。さらに、この物質は Fe を Co で置換して電子をドーピングした $\text{Ba}(\text{Fe}_{2-x}\text{Co}_x)\text{As}_2$ でも (22 K とやや転移温度は下がるものの) やはり超伝導が発現することが分かり、電子とホールで超伝導の性質や起源が同じなのかも大きな興味の一つとなっている (Co 置換系については本会誌 64 巻 No.1 (2009) 47 ページの記事を参照)。

今回、高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所/総合研究大学院大学のミュオン物性研究グループは、青山学院大の秋光純氏、岡部博孝氏らと共同で、ミュオン・スピン回転法 (μ SR) と呼ばれる、物質内部のミクロな電子状態を観測する研究手法を用い、ホールドーピング系 Ba-122 系物質である $(\text{Ba}_{0.9}\text{K}_{0.1})\text{Fe}_2\text{As}_2$ ($T_c < 2$ K)、および $(\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4})\text{Fe}_2\text{As}_2$ ($T_c = 38$ K) の磁気的な性質、超伝導の性質を調べた。その結果、超伝導状態で異常に強い対形成相互作用が働いていることが明らかになった。この研究は、日本物理学会発行の学術誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2009 年 2 月号に掲載される。

ミュオン・スピン回転法は、物質を構成する原子の隙間に注入したミュオンを超高感度の磁気プローブとして用いることで局所的な電子状態を観測できる実験手法であり、特に超伝導体においては磁束格子状態で渦糸を周回する超伝導電流の強さをミクロなスケールで直接測定できる点にその大きな特徴がある。本研究では、(1) 低ホール濃度物質、 $(\text{Ba}_{0.9}\text{K}_{0.1})\text{Fe}_2\text{As}_2$ が 140 K 付近で反強磁性を示すこと、(2) 超伝導転移温度が最高になるホール濃度の $(\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4})\text{Fe}_2\text{As}_2$ が示す超伝導は従来型の BCS 超伝導状態によく理解できるが、その一方で超伝導を担うキャリアの対形成エネルギー (= 超伝導ギャップ) が転移温度から予想されるより遥かに大きい (= 強結合の極限にある) ということが明らかになった (図 1)。特に、他の実験から示唆されている

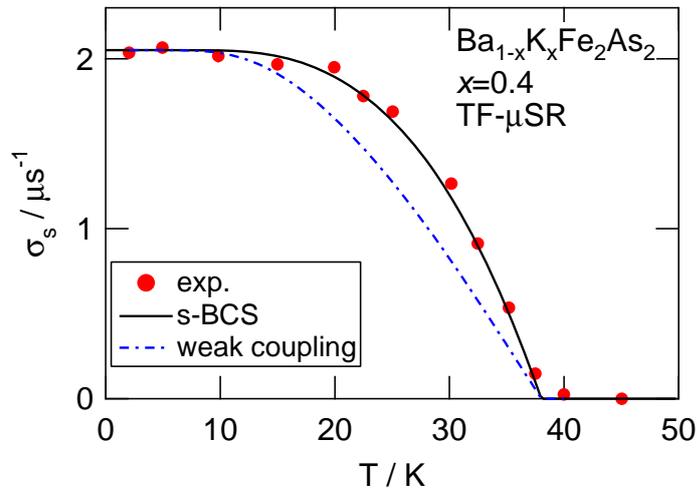


図1. $(\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4})\text{Fe}_2\text{As}_2$ における超伝導電流の強さを表すミュオン・スピン緩和率 σ_s 。実線は1種類の電子対形成を仮定し、データを再現するよう対形成エネルギー(=超伝導ギャップ)を変化させた場合(カーブフィットの結果)。鎖線は超伝導ギャップを表すパラメーターをBCS理論の予想値と同じとした場合の振る舞いで、実線はこれより1.5倍ほど大きな超伝導ギャップ(=強結合)に対応する。2種類の超伝導ギャップがある場合にも、超伝導ギャップが2つとも強結合の場合には実線とほぼ同じ温度依存性になる(区別がつかない)ことから、 $(\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4})\text{Fe}_2\text{As}_2$ の超伝導も実際にそのような状況にあると考えられる。

2種類の超伝導ギャップの存在を仮定してもミュオン実験結果をよく再現するが、その大きな方のギャップエネルギーも標準的な場合の2倍という大きな値になることがわかった。

本研究で見出された、「従来型BCS超伝導に近いが、強結合の極限にある」という性質は最初に見つかった $\text{LaFeAs}(\text{O}_{1-x}\text{F}_x)$ 系の超伝導が示す性質とは必ずしも一致せず、荷電担体が電子かホールかによる違いだとすると、この物質を支配している鉄の3d電子が持つ多面的な性質の一端を捉えた結果と考えられる。さらに、定性的な類似性がよく指摘される銅酸化物の超伝導とは明らかに様子が異なることが本研究から明確になったと考えられ、今後の研究の方向性を考える上で重要な示唆を含む研究成果として多くの研究者の注目を集めている。

論文掲載誌: J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) No. 2, p. 023710

電子版: <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/78/023710> (2月10日公開)

<情報提供: 門野 良典 (高エネルギー加速器研究機構/総研大)>