

## ミュオンによる強相関物質の物性研究

高エネ機構・物構研／総研大

門野 良典

20年前の銅酸化物高温超伝導の発見以来、新奇な物性を発現させる舞台として強い電子相関を示す導電性物質＝強相関物質が重要な研究対象となっている。高温超伝導が擬二次元モット絶縁体近傍に現れるように、このような強い電子相関は伝導電子密度が低く、電子間に働くクーロン相互作用の遮蔽が不完全でかつ異方的であるような系、言い換えれば「悪い金属」であるような物質に典型的な特徴であり、そこでは従来のフェルミ液体論に基づく一体近似的な金属の描像が破綻しかかっていると言える。また、このような電子相関の問題は、液体ヘリウム表面に保持された希薄電子の振る舞い（ウィグナー結晶等）とも共通点を持つ等、関係する対象も幅広い。

「悪い金属」とは、その電子状態が必ずしも「エネルギー-運動量空間でよい量子状態（＝明確なフェルミ面）」として記述されるようなものではない金属、すなわち電子が局在しかかかっていて実空間で記述されるほうがむしろ実態に適っているような物質-このシンポジウムのテーマである「局所電子構造」が理解の鍵を握る物質-である。X線、中性子など回折現象に基づいた研究手段はエネルギー-運動量空間での電子状態の解明に威力を発揮する一方、このような「局所性」を捉える事は不得意であり、実空間での情報をもたらす相補的な実験手段との組み合わせることによって、初めて対象物質の全体的な理解を得る事ができると予想される。ミュオンスピン回転・緩和法（ $\mu$ SR）はこのような電子状態の局所性に伴う異常、特に**磁氣的な異常**を、原子スケールで明らかにすることができる局所磁気プローブであり、「局所電子構造の理解」に欠かせないプローブの一つとしてその役割を果たす事が出来ると考えられる。

この講演では新プロ（茅幸二代表）で得られた $\mu$ SRによる研究成果の中からいくつかの典型例を取り上げて紹介し、 $\mu$ SRによって何が明らかにされたかを分かりやすい形で示す事によって、本シンポジウムの参加者に対する $\mu$ SRのイントロダクションとなることを意図している。典型例としては、1) 有機キラル磁性体の局所磁気構造、2)  $\text{LiV}_2\text{O}_4$ の電子基底状態、3) 銅酸塩化物超伝導体 $(\text{Ca, Na})_2\text{CuO}_2\text{Cl}_2$ の電子状態、4)  $\beta$ -パイロクロア酸化物 $\text{AOs}_2\text{O}_6$  ( $\text{A}=\text{K, Rb, Cs}$ )の超伝導、の4つを手短に取り上げる予定である。以下にその内容を簡単に紹介しておく。

### 1) 有機キラル磁性体の局所磁気構造

有機キラル磁性体とは結晶構造が反転対称性を持たないような有機磁性体であるが、そのような磁性体では磁気構造もキラル（＝反転対称性を持たない）である可能

性があり、特異な光磁気効果（磁気キラル円二色性）の発現の場としても注目されている。 $\mu$ SR で直接磁気構造を決める事は容易ではないが、2つの光学異性体間で磁気構造もキラルな関係になっているかどうかを簡単に比較できることを紹介する。

## 2) $\text{LiV}_2\text{O}_4$ の電子基底状態

$\text{LiV}_2\text{O}_4$  は低温でも構造相転移を示さず金属的に振る舞う数少ないスピネル酸化物の一つであるが、そこで電子の有効質量が異常に大きくなる「重い電子」状態が出現しているのではないかと興味を持たれている。ところが  $\mu$ SR という局所電子プローブで眺めると、そのような常識的な「金属」とはまるで異なる基底状態が見えていることを紹介し、「相補的な測定手段で全体を見る」事の重要性を示す。

## 3) 銅酸塩化物超伝導体 $(\text{Ca}, \text{Na})_2\text{CuO}_2\text{Cl}_2[\text{Na-CCOC}]$ の電子状態

局所プローブの一つである STM/STS では良好な表面を得る必要があり、主に壁開が容易で良好な表面を得られるビスマス系銅酸化物を対象にした研究が行われて来た。一方、冒頭にも触れたように、銅酸化物を理解する鍵はいわゆる「過少ドープ領域」における異常金属相にあるが、ビスマス系銅酸化物では過少ドープ領域の試料を準備する事が困難であったため、STM/STS で最も知りたい部分に手が届かない状況であった。ここで取り上げる Na-CCOC は代表的な銅酸化物である  $(\text{La}, \text{Sr})_2\text{CuO}_4$  (LSCO) と同じ基本構造を持ち、伝導を担っている  $\text{CuO}_2$  面の頂点酸素を塩素に置き換えたことで極めて平坦な  $\text{CuO}_2$  面を持つことから壁開が容易で、過少ドープ領域で初めて STM/STS や角度分解光電子分光による詳細な研究が可能になった系である。一方、試料が高压合成で少量しか得られないため、中性子散乱等による磁性研究が難しい。このような場合に、磁気相図の決定などで  $\mu$ SR が威力を発揮する事を紹介する。

## 4) $\beta$ -パイロクロア酸化物 $\text{AOs}_2\text{O}_6$ の超伝導 ( $\text{A}=\text{K}, \text{Rb}, \text{Cs}$ )

ミュオンはスピン  $1/2$  の純粋な磁気プローブであり、結晶内の電場勾配との相互作用がない。そのため第二種超伝導体の磁束格子状態にミュオンを注入して  $\mu$ SR 測定を行うと、試料内で出現している磁場の不均一な空間分布  $B(\mathbf{r})$  をランダムにサンプリングすることで磁場の密度分布  $n(B)$  を知ることが出来る。この密度分布  $n(B)$  は磁場侵入長やコヒーレンス長といった超伝導の基本的な長さスケールで決まっており、 $n(B)$  からこれらの情報を微視的かつ直接的に引き出す事ができる。このような測定手法は他にあまりなく、 $\mu$ SR がユニークな役割を担っていると言える。ここでは最近の例として  $\beta$ -パイロクロア酸化物  $\text{AOs}_2\text{O}_6$  の超伝導状態を  $\mu$ SR で観測した結果を紹介し、磁場侵入長の温度、磁場に対する変化と超伝導ギャップの構造に密接な関係があることを示す。