

論文題目：核磁気共鳴法を用いた鉄系超伝導体の電子ネマティックゆらぎとその秩序についての研究

氏名：豊田 真幸

主論文の要約：

鉄系超伝導体は、銅酸化物超伝導体に次ぐ高い超伝導転移温度 T_c を持ち、これまでの超伝導体とは異なる新しい超伝導機構を持つ可能性が指摘され、その超伝導発現機構の解明を目指した様々な研究が行われてきた。多くの鉄系超伝導体は、構造相転移と反強磁性転移を示す母物質に対し、元素置換などによって Fe 面内へキャリアをドーピングすることや圧力を印加することによって、構造相転移や反強磁性磁気転移が抑制され、高い T_c を持つ超伝導相が現れる。母物質が反強磁性転移を示す銅酸化物との比較から、まず、反強磁性的スピンゆらぎによる超伝導発現機構が提案された。しかし、その後、鉄系超伝導体は多軌道系であり、軌道自由度の重要性が指摘され、 $3d$ 軌道の軌道ゆらぎが新たな超伝導発現機構として議論されている。これらの揺らぎは超伝導以外の物性にどのような様に関与しているのかについても興味を持たれ、研究が続いている。その代表的な物性として、典型的な鉄系超伝導体の1つである $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ 系で、構造相転移温度 T_c 以上の正方晶相でも、結晶構造の対称性を破る電子状態が存在することが電気抵抗率などの巨視的物理量の測定から報告された。この特殊な電子状態は、電子ネマティック状態と呼ばれ、4回対称性を持つ正方晶相でも T_c 以下の斜方晶相と同じ2回対称性を示す。この電子ネマティックゆらぎが、ネマティック感受率を与え、この感受率が発散することによってネマティック秩序が生じ、この秩序によって構造相転移が起きると考えられている。しかし、この電子ネマティック状態の起源については、スピンゆらぎと軌道ゆらぎの立場から議論が行われているが、まだ十分には理解されていない。

本研究では、まず、典型的な鉄系超伝導体である $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ の試料を用いて、局所的な電子状態を観測することが可能な核磁気共鳴 (NMR) 実験を行った。母物質である BaFe_2As_2 の単結晶試料を用いた ^{75}As 核の角度分解 NMR 実験から、正方晶相でも ^{75}As 核の電場勾配が2回対称性を持つことを見出した。このことは、 ^{75}As 核周りの電子状態が2回対称性を示すいわゆる Fe 面内異方性を持つことを示している。これは、結晶構造が持つ4回対称性が局所的に破れていることを意味している。その起源として、格子欠陥などの不完全性が、内部応力を引き起こし、ネマティック分極が誘起されるためと考えられる。これは、鉄系超伝導体が、大きな軌道ゆらぎを持つことと整合している。また、Co をドーピングした $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ においても、 ^{75}As 核の角度分解 NMR 実験を行い、正方晶相の広い Co 組成域で電場勾配の面内異方性が存在し、特に、この異方性が大きい Co 組成域では、超伝導転移温度が高くなることを見出した。

次に、他の鉄系超伝導体 NaFeAs と LiFeAs の NMR 実験を行い、両物質においても、正方晶相で4回対称性が破れていることを明らかにした。また、 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ も含めたこれら3つの系で、電場勾配の面内異方性パラメータ η が、キュリーワイス型の温度変化を示すことを見出した。この温度変化は、電子ラマン散乱によって得られているネマティック感受率とスケールしており、電場勾配はネマティック感受率に支配されて

いることを示している。さらに、 η の温度変化に現れるワイス温度が、キャリアドーピング量にスケールして、3つの系で統一的に振る舞うことを見出した。一方、磁気ゆらぎをモニターする核スピン格子緩和率 $1/T_1$ を温度 T で割った $1/T_1 T$ の値は、キュリーワイス型の温度変化を示し、この温度変化の解析から磁気相互作用の強さを評価することができる。この $1/T_1 T$ と η は、3つの系の中でさえ、必ずしもスケールしないことを見出した。このことは、ネマティック揺らぎが、必ずしもスピンゆらぎのみに支配されていないことを示している。

また、**NaFeAs** の単結晶試料を用いて、常磁性斜方晶相で見られるスピンゆらぎの **Fe** 面内異方性の温度依存性と η の関係について調べた。このスピンゆらぎの **Fe** 面内異方性は、斜方晶構造の a 軸と b 軸方向で測定した $1/T_1 T$ の比を介して観測した。 $1/T_1$ の比は、 T_g 以上の温度領域ではほぼ 1 の値を持つが、 T_g から 49K 近傍までの温度領域で温度降下とともに η にスケールして増大することを見出した。この振る舞いは、スピンゆらぎの **Fe** 面内異方性が軌道秩序領域の成長と共に増大していることを意味している。さらに、約 49K から T_N の温度領域では、 $1/T_1 T$ の比は小さくなり、磁気相転移温度 T_N に向かって 1 に近づく、つまり、異方性が無くなることを見出した。この異方性の消失は、反強磁性相で現れるストライプ型の短距離秩序が発達することに対応して、面内の帯磁率が増大することによると考えられる。

以上で述べたように、本研究で得られた結果から、**NMR** による電場勾配の **Fe** 面内異方性の測定は、ネマティックゆらぎやネマティック秩序を調べる上で有効な測定であると言える。