

## 鉄系高温超伝導体で発見された非整合スピン密度波

2008年に発見された鉄ヒ素系化合物における高温超伝導は、物性物理学の重要課題として現在なお世界中で活発な研究が続いている。鉄系化合物の多くは、隣り合う鉄原子の磁気モーメントが逆向きに整列した反強磁性秩序（図1左）を示す。その中のある種の化合物に圧力をかけたり元素置換を施したりすると、反強磁性が消失し超伝導が現れる。このことから鉄系化合物においては、超伝導の発現機構と反強磁性が密接に関連していると考えられている。

一方、金属の一般的な反強磁性秩序状態としては、図1左に示したような、各原子の磁気モーメントの大きさが同じで向きだけが異なる「整合反強磁性」以外にも、図1右に示したように、磁気モーメントの大きさが波打つように見える（空間的な変調を受ける）「スピン密度波」という状態も存在する。金属クロムが後者の良く知られた例である。スピン密度波は自然に長周期の構造を引き起こすという点で、相転移として異色の存在であると言える。ただし、これまで見つかった鉄系化合物の超伝導状態は、殆どが整合反強磁性状態と接している。非整合スピン密度波が報告された例はあるが、結晶の規則性が甚だしく悪いなど、もともと存在する不均一性との区別が難しい場合に限られていた。

最近、東京大学物性研究所の研究者を中心とする研究グループは、NaFeAs という化合物の単結晶を作成し、核磁気共鳴（NMR）の詳細な実験を行った。NaFeAs は常圧では絶対温度 45 度以下で磁気秩序を示すが、圧力下では超伝導を示す物質である。図2に示したように、常圧下におけるナトリウム原子核の NMR スペクトルは、磁気転移温度の直下では非対称に分布した非整合スピン密度波に特有なパターンを示す。しかし温度を下げていくと、スペクトルが次第にシャープになり、整合反強磁性状態に近づいていく様子が観測された。この研究では、規則的な組成を持つ化合物に対して、不純物や結晶欠陥の少ない単結晶試料を用いることにより、鉄系超伝導体において初めて非整合スピン密度波から整合反強磁性状態へのクロスオーバー（移り変わり）を観測した。この成果は日本物理学会の英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan* の 2011 年 3 月号に掲載された。

この結果は、鉄系化合物において反強磁性と超伝導が共存する状態について新たな知見を与える。実際に高压下の SrFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> において、このような共存状態が同じ研究グループによって以前報告されている。非整合スピン密度波状態では、磁気モーメントの大きな領域（磁性の強い領域）と小さな領域（磁性の弱い領域）が存在する。磁性の弱い領域では超伝導が発現しやすいと考えられるので、非整合スピン密度波状態においては磁気秩序が完全に消滅しなくても、超伝導が発現する可能性が考えられる。実際にある種の希土類化合物においては、非整合スピン密度波と超伝導状態の共存が観測されており、ここで述べた機構が研究されている。遷移金属化合物では、これまで明確な例がしめさ

れたことはなかった。単純な結晶構造を舞台にして起こる電子系の自発的な相分離は、強く相互作用する電子系の物性の複雑性と多様性を体現したものといえるが、まさにそのようなテーマに新たな指針を与える成果であると考えられ、多くの研究者の注目を集めている。今後、強相関電子系の超伝導研究において新たな展開が期待される。



図1：整合反強磁性とスピン密度波の模式図  
矢印の大きさが磁性元素上における磁気モーメントの強さを表している

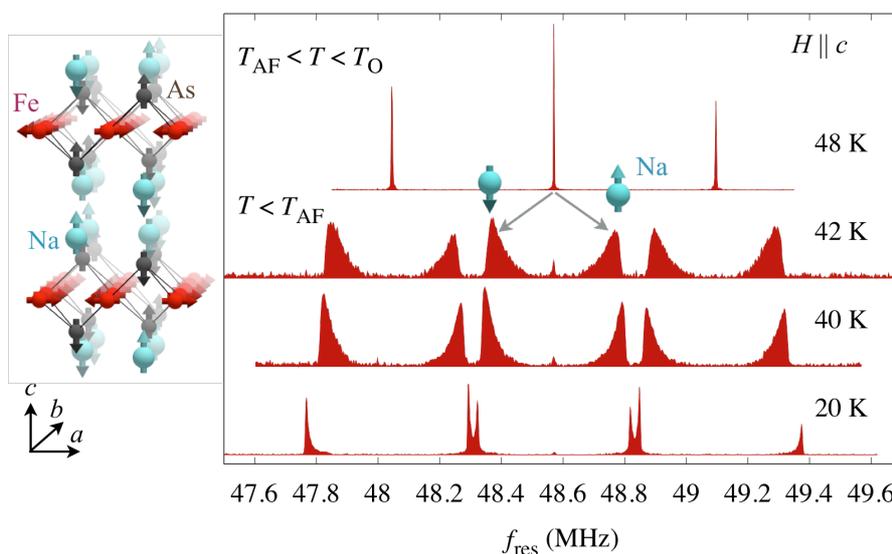


図2：NaFeAsの単結晶NMRスペクトル  
(左図) NaFeAsの結晶構造。Feの磁気モーメントが矢印の方向を向く。  
(右図) 各温度における $^{23}\text{Na}$ -NMRスペクトル。45 Kの反強磁性転移温度 $T_{\text{AF}}$ を境に分裂する。42 Kでは磁気モーメントの強さの分布を反映して裾を伴った分裂を示す一方、より低温の20 Kではほとんど分布していない。

論文掲載誌： J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) No.3, p. 033705.

電子版： <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/80/033705> (2月25日公開済)

<情報提供：北川健太郎（東京大学物性研究所）、瀧川仁（東京大学物性研究所）>