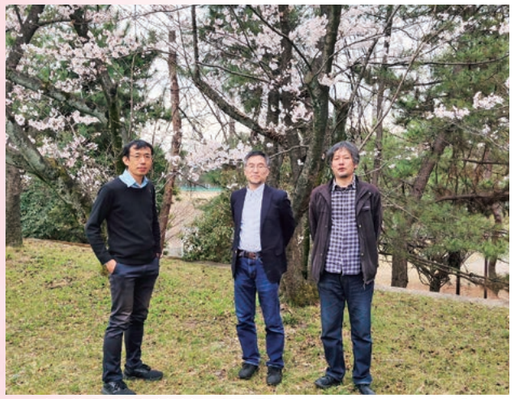
固体磁気共鳴研究室



小林義明准教授（中央），松下 琢講師（右），清水康弘客員教授（左）

*小林義明　准教授　*Yoshiaki Kobayashi, Assoc. Prof. (PI)*
松下　琢　講師　*Taku Matsushita, Lecturer*
清水康弘　客員教授　*Yasuhiro Shimizu, Visiting professor*

固体中の電子が，イオン殻が作るクーロンポテンシャルに加え，電子間のクーロン斥力を受ける時，その固体中で，「遍歴性」と「局在性」を併せ持つ状態「強相関電子系」と呼ばれる電子系が出現します．また，そのような電子系を舞台として，多体効果が前面にあらわれ，量子凝縮系と呼ばれる超伝導，量子液体，金属-絶縁体転移と様々な現象が出現します．それらの現象は多くの研究者を引きつけ，それらの研究を通じて新しい物理概念が構築されてきました．これらの物性を支配するミクロな基本法則を実験的に突き止めるために，私たちは，核磁気共鳴（Nuclear Magnetic Resonance, NMR）法を主たる測定手段として量子物性現象を調べる実験的研究に取り組んでいます．NMRは電子の状態を原子スケールで観測する手段で，電子のわずかな対称性の破れを逃さずに検出し，量子スピン液体や軌道液体などの新しい現象を解明しています．また，超高圧技術と超高速パルスフーリエ変換技術を組み合わせた，難易度の高い遷移金属原子核のNMRにおいて，世界でも最先端の技術を有しています．また，これらの技術は，将来的に新しい高温超伝導体の設計，従来の性能を凌駕する量子コンピュータやMRI（磁気共鳴画像装置）のコア技術へと進展する可能性があります．

現在，最大9台のNMR装置を使って，4年生6名，大学院生12名と共に研究を進めています．最先端の量子物質開発や実験装置開発に興味のある方は，是非一度研究室を訪ねてみてください．

研究室メンバー

http://i-ken.phys.nagoya-u.ac.jp/

*連絡先　i45323a@cc.nagoya-u.ac.jp

准教授：1／講師：1／DC：2／MC：10

研究テーマ（いくつかの例を以下に示す．）

1．新奇な超伝導体の発現機構を探る

1986年の銅酸化物高温超伝導体の発見は，強相関電子系の物性研究に新たな扉を開き，その後，様々な遷移金属化合物に現れるモット絶縁体にキャリアを導入して現れる強相関遍歴電子系の物理として大きく進展しました．2003年にコバルト酸化物で，2008年に鉄系化合物で超伝導が発見され，超伝導の研究は，現在も活発に展開されています．鉄系超伝導体は，図1に示すようなFeAs層からなる層状構造を基本構造として持ち，層間に入る物質やその構造の違いから何種類かの系が見つかっています．私たちは，現在，鉄系超伝導の発現と，銅酸化物のそれとの類似点，相違点を中心に調べています．その中でも多軌道強相関電子系に見られる電子ネマティックと超伝導の関係に注目しています．

2．軌道状態の物理，ディラック／ワイル電子系の研究

これまで隠された自由度と考えられていた軌道の自由度が強相関電子系の物性に重要であると広く認識されるようになってきました．本研究グループでは，異なった電子軌道が周期的に配列した軌道秩序とよばれる現象が生じ，この軌道秩序を，NMRを用いて観測できることを初めて示しました．これには，精密な二軸回転が可能なゴニオメーターを用いて測定します．現在，遍歴電子系における軌道状態や軌道占有率などの情報も得ることができるようになってきており，多軌道電子系の物性研究に役立つことが期待されています．これまでにバナジウムやクロム化合物を研究対象として，電子の持つ軌道やスピン状態の相転移の機構について研究を進めています．

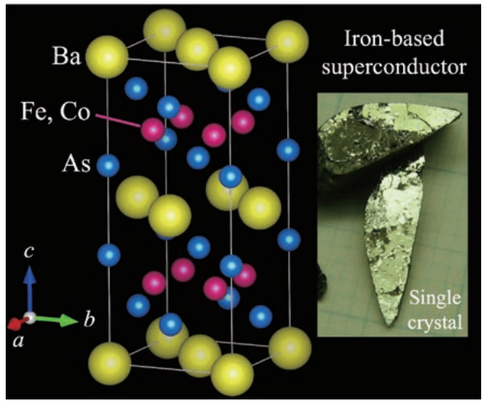


図1．鉄系超伝導体$Ba(Fe_{1-x}Co_x)_2As_2$の結晶構造

3．量子スピン液体候補物質の基底状態，励起状態の研究

三角格子やパイロクロア格子は，幾何学的フラストレーションと呼ばれる構造を持っています．この三角形の頂点上のスピンを互いに反対向きにそろえようとする反強磁性相互作用があると，図2に示すようにスピンの向きが一意的に決まらず，状態に縮退が残ります．スピン液体とよばれる特異な基底状態はその一つと考えられています．私たちは，このフラストレーションの効果が生み出す新奇物性を研究しています．遍歴電子系では，LiV_2O_4がその代表例であり，重い電子系的振る舞いを示す初めての3d電子系ですまた，三次元ネットワークをもつAlV_2O_4における七量体，層状バナジウム酸化物における三量体による非磁性スピン・シングレット状態の形成は，系が構造相転移を起こしてフラストレーションを解消することで生じた新奇な基底状態の一つです．最近では，マヨナラ励起が期待されるキタエフ量子スピン液体の候補物質α-$RuCl_3$の低温励起状態の研究を精力的に進めています．

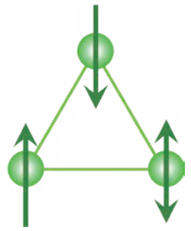


図2．三角格子における磁気フラストレーション

4．高圧NMR実験

圧力は，物性発現機構を解明する上で重要な外部パラメーターの一つです．ピストンリシンダー型，ブリッジマンアンビル型，対向アンビル型セルを用いて，高圧（10GPa）までのNMR実験を行うことができます．これまでに，上記のLiV_2O_4，鉄系超伝導体，励起子絶縁体など遷移金属化合物の様々な圧力下で現れる新奇電子状態を調べています．電子状態を明らかにしました．最近では，鉄系超伝導体や励起子絶縁体への圧力効果も調べています．

最近の学位論文

博士論文（2023年度）

「NMRに基づく鉄系超伝導体$Ba_{0.66}K_{0.34}Fe_2As_2$およびFeSeのスピンダイナミクスの研究」
「NMRによる圧力下における励起子絶縁体候補物質Ta_2NiSe_5の局所磁性、電荷状態の研究」

修士論文（2022年度）

「核四重極共鳴によるキタエフ型スピン液体物質探索」
「核磁気共鳴を用いた鉄系超伝導体LiFeAsの電子ネマティック秩序の研究」
「層状ニッケル酸化物$La_4Ni_3O_{10-y}$の磁性」
「高い2次元性を持つ鉄系超伝導体$KCa_2Fe_4As_4F_2$のNMRによる研究」
「キタエフスピン液体候補物質α-$RuCl_3$における磁気励起の異方性」

修士論文（2023年度）

「1次元^{3}Heのスピンダイナミックス」
「空間反転または回転対称性の破れた超伝導体の微視的解明」
「高い熱電性能を持つ新規半金属Ta_2PdSe_6の^{77}Se-NMRによる研究」

教育研究の方針

上記の研究テーマの多くは，大学院生の研究テーマとして実施してきたものです．修士課程に入学後，一人一人が強相関電子系の物理に関する研究テーマに取り組みながら，NMRの測定方法や解析方法などを習得しつつ問題解決できる能力を身につけられるように配慮した研究指導を行っています．

多様なNMR測定ができるようにNMR装置の整備にも力をいれています．固体物性研究で用いるNMR装置は研究に応じて技術開発を行う必要があります．強相関電子系の特異な物性は極端条件下であらわになることが多いため，高圧力，高温などの極端条件下でNMR実験を行えるようにする努力を行っています．このような装置開発にも，大学院生は参加します．さらに，NMR測定のために必要な物質の作成も行います．

研究の醍醐味を味わいながら新しい物理概念を構築することを目指して，大学院生と教官が一丸となって研究に邁進できる環境をつくりたいと思っています．