超伝導の未解決問題に挑む

前野悦輝*

Resolving Outstanding Puzzle in Superconductivity

Yoshiteru MAENO*

We will introduce our research results focusing on the layered ruthenium oxide Sr_2RuO_4 , which is a typical quantum material with the complexities treatable in modern *condensed matter* physics, such as electron correlation, spin-orbit coupling, and multiband. The electronic excitation mode named "Pines' demon", which was predicted almost 70 years ago but had never been actually observed, was reported in the normal state of Sr_2RuO_4 . In order to elucidate the unconventional superconducting state of Sr_2RuO_4 , a few challenging paradoxes are present among the results obtained by different experimental techniques. We will explain how available theoretical models can explain different experimental results and discuss the ongoing research to resolve them. Other results including superconductivity in topological materials, as well as future prospects are also discussed.

電子相関,スピン軌道相互作用,マルチバンドなど,現代の物性物理学で扱われる複雑性を兼ね備え た典型的な量子物質といえる,層状ルテニウム酸化物 Sr₂RuO₄を中心とした研究成果を紹介する.70年 近く前に予言されたものの実証報告の無かった「パインズの悪魔」と名付けられた電子励起モードを Sr₂RuO₄の常伝導状態で観測した.その非従来型超伝導状態の解明に関しては,異なる実験手法での結 果の間でいくつかのパラドックスが鮮明になった.本稿ではそれらを解説するとともに,解明に向けて 現在進行中の研究についても触れる.また,トポロジカル物質の超伝導を含む,その他の研究成果と今 後の研究展望についても述べる.

1. はじめに

京都大学高等研究院との連携研究拠点(豊田理研・京大 連携拠点, Toyota Riken – Kyoto Univ. Research Center: TRiKUC)の研究施設で特定助教の若手研究者2名とと もに研究を進めた¹⁾.本稿では現在進めている研究の狙 いと、国際共同研究を含む活動成果について報告する. 本研究の中心課題である,層状ルテニウム酸化物Sr₂RuO₄ の超伝導研究の現状は以下3節で解説する.これに関し て、日本物理学会刊行の論文雑誌J. Phys. Soc. Jpn. から 依頼された招待レヴュー論文²¹と, Nature Physics誌から のInvited Perspective 記事³⁾を投稿した.

2. 量子物質 Sr_2RuO_4 とパインズの悪魔

「量子物質」という言葉は,近年,先端機能性材料を になう物質群としてよく用いられる.これは量子力学特 有の効果が顕在化した物質群をさし,超伝導体,強相関 電子系,スピン・軌道相互作用の顕著な系,トポロジカ

2024年2月19日 受理 *豊田理化学研究所フェロー

豊田理研--京大連携拠点連携拠点教授 専門分野:低温物理学,量子物質 ル物質など広範にわたる. Sr₂RuO₄は典型的な現代的量 子物質である;電子同志のクーロン斥力の効果が顕著な 強相関電子系特有の「非従来型」の超伝導を示し⁴⁾,ス ピン・軌道相互作用の効果も大きい複数のバンドからな る電子構造を持つ(図1左上).

Sr₂RuO₄を用いたイリノイ大学のAbbamonte教授ら との共同研究から、1956年にパインズがDistinct Electron Motion (DEM)をになう量子 "DEM-on" (デーモ ン,悪魔)と名付けた電子励起モード「パインズの悪魔」 を初めて観測した⁵⁾.金属中の電子励起モードとしてよ く知られたプラズモンは、静電エネルギーを復元力とす る電子密度の振動であり、その励起には1 eV 程度のエ ネルギーが必要である(図1左下と中).これに対して パインズの悪魔モードは、多バンドの金属中で異なるバ ンドの電子密度が逆位相で変動するもので、空間的には 電子密度は変化せず、励起エネルギーも長波長極限でゼ ロになる音響プラズモンモードである(図1左下と右).

京都大学で育成したSr₂RuO₄高純度単結晶を用いて, 測定はイリノイ大学の運動量分解電子エネルギー損失分 光(M-EELS)装置を用いて行い,観測した新たな励起 モードのエネルギー依存性や強度の運動量依存性・臨界

京都大学名誉教授, Ph.D.



図1 パインズの悪魔モードの概念図.

(左上) Sr₂RuO₄のバンド構造. 性質の異なる3つのバンドからなる. (左下) プラズ モンとパインズの悪魔のエネルギー・運動量分散関係. (中) プラズモン励起と電子 密度の振動の概念図. (右) パインズの悪魔モード. γバンドとβバンドの電子数が逆 位相で振動する. 上図では線の太さで電子の数を表現している.

運動量などからパインズの悪魔と解釈できた(図2). 理論的に予想されるデーモンは, βバンドとγバンドの 電子占拠数の位相のずれた動きからなる電気的に中性の 励起モードである.

Sr₂RuO₄の電子状態は一軸圧印加によって, γバンド が円筒状から面状に劇的に変化し,それに伴い超伝導転 移温度が倍増することがわかっている⁶⁾.この変化に伴 うパインズの悪魔モードの振る舞いの変化を観測するた めの準備を進めている.M-EELS実験では試料付近に電 場をかけられないので,ピエゾ素子ではなく2種の金属 の熱収縮率の違いを利用した一軸ひずみセルの製作と予 備実験を京都大学で進めている.

我々の研究成果は70年近く前の予言を実現したもの で、パインズの悪魔は他のマルチバンド金属でも広く存 在するものと期待される.例えば、金属ナノ粒子の光学 特性、金属水素化物における高温超伝導などで重要な役 割をになうと考えられており、様々な物質での存在発見 と研究展開も今後の課題である.

3. 超伝導状態のパラドックス

超伝導発見⁴⁾当初からこの30年間, Sr₂RuO₄の研究は しばしば既存の実験手法にとってチャレンジであった. 角度分解光電子分光(ARPES)は電子構造を観測する 手法として欠かせないが,当初,世界をリードする複数 のグループから報告された結果は,いずれも表面での原 子構造の再構築による電子状態を観測したもので,超伝 導をになう実際の電子状態とは異なることが分かった. この経験はその後,物質内部(バルク)の電子構造を ARPESで精確に観測する技術の確立に発展した⁷⁾.ま た,超伝導電子対のスピン状態の観測手法として欠かせ



図2 M-EELSで観測された低エネルギー励起 モード⁵⁾.

エネルギー 67 meVの信号は音響フォノン モード.通常のプラズモンは1.2 eVに観測 される.

ない核磁気共鳴(NMR)によるナイトシフトの観測も, 2019年になって以前のデータが過熱による常伝導状態 を反映したデータと判明し,関係者に激震が走った^{8.9)}. Sr₂RuO₄の導電性が極めて高いために,NMRのパルス 印加で発生するジュール熱が大きく,約10 msの間,試 料温度が超伝導転移温度以上になっていたのである.現 在では,これまで考えられてきたスピン三重項の電子対 ではなく,スピン一重項的な電子対による超伝導の振る 舞いが明らかになった.なお後述するように,異なる軌 道の電子対によるスピン三重項超伝導のモデルも,実験 との整合性の良いモデルとして新たに提案されている.

これら最近の発展を踏まえてもSr₂RuO₄の非従来型超 伝導の全容が解明できていないのが現状で,むしろ異な る手法の実験結果の間の矛盾点が鮮明になってきた.図 3に,現在有力と考えられている超伝導状態のいくつか のモデルの特徴とエネルギーギャップ,および主な実験 結果との対応をまとめた.実験結果の間には主に二つの 問題点が浮き彫りになっている.その一つは,超伝導状 態で自発的に内部磁場が発生する「時間反転対称性を破 る超伝導状態」なのか否かをめぐるパラドックス,もう 一つは面間方向の運動量をの特定の値で超伝導エネル ギーギャップがゼロになる「水平ラインノード」がある のか否か,という点である.以下ではこれらを中心に解 説する.

3.1. 時間反転対称性(TRS)は破れているのか?

超伝導電子対があたかも強磁性体のスピンのようにふ るまう,時間反転対称性(time-reversal symmetry, TRS) を破る画期的な超伝導がSr₂RuO₄で起こっていることが ミュオンスピン回転の実験から明らかになって以来¹⁰⁾, いくつもの研究グループがその結果を再現してきた¹¹⁻¹⁴⁾

		ALTING I PERMIT		and a second second			
超伝導秩序変数の候補	d _{xz} +id _{yz}	[5,3]+ <i>i</i> [6,3]	d _{xz} or dy _z	[5,3] or [6,3]	d _{x2-y2} + ig _{xy(x2-y2)}	d _{x2-y2}	
超伝導電子対のスピンと 軌道の状態	spin-singlet, chial d-wave	spin-triplet, orb-antisym, <mark>chial</mark> d-wave	spin-singlet, nematic d- wave	spin-triplet, orb-antisym, nematic d-wave	spin-singlet, AD*, d+ig-wave	spin-singlet, d-wave	*AD: accidentally degenerate
成分の数と既約表現の 次元	2-2D	2-2D	1-2D	1-2D	2-1D	1-1D	
既約表現	Eg	Eg	Eg	Eg	B1g + A2g	B1g	
超伝導 エネルギー ギャップ							Illustrations by S. Yonezawa (top: symmetry) and A. Ramires (bottom: based on realistic FS)
TRSの破れ	O	Ô	×	×	Ô	×	
Experiments							
µSR TRSB	Ô	O	×	×	0	×	
µSR: split Tc under uniaxial strain	O	O	×	×	0	×	ミュオン
Jump in shear ultrasound velocity	O	O	Ø	Ø	Ø	×	超音波
specific heat and elastocaloric: unsplit Tc under uniax. strain	×	×	O	O	Δ	O	比熱や 超伝導 接合実験
SIS' junction: synmmetric under I-H inversion	×	×	0	O	×	O	
dynamical behavior of junctions (sc domains)	O	O	0	0	0	×	

©: very positive, O: positive, ▲: marginal, ×: negative

図3 Sr₂RuO₄の超伝導状態のいくつかの候補とその超伝導ギャップ,および主な実験結果との整合性. [5,3], [6,3] は軌道間電子対状態を示す.

(図3の「ミュオン」の行).特にRuO₂面内の一方向にひ ずみを加えると超伝導転移温度が1.5 Kから3.5 Kにま で上昇するのに伴い,超伝導転移温度とTRSを破る超伝 導への転移温度とが分裂することが明らかになった¹³⁾. また静水圧や不純物添加など,正方晶の結晶対称性を保っ た実験では,超伝導転移温度の変化に伴い,TRSの破れ も超伝導と同時に発生することも明らかになった¹⁴⁾.こ れらは超伝導状態が2成分の秩序変数からなることを意 味する重要な結果である.

さらに図3の「超音波」の行にあるよう,縦波の超音 波音速だけでなく,横波の音速も超伝導転移温度で飛び を生じる特異な振る舞いが二つの研究グループから報告 された^{15.16)}.この結果はミュオン実験と同様,超伝導状 態の秩序変数が2成分を持つことを示し,その対称性点 群の既約表現もある程度絞り込まれた.

ところが、図3の「比熱や超伝導接合実験」の行にあ るように、一軸ひずみ印加の元での比熱¹⁷⁾と弾性熱量効 果¹⁸⁾の実験からは、ミュオンで観測された超伝導転移温 度の分裂に伴う信号は全く観測されなかった.これは明 らかなパラドックスで、正しい実験結果の解釈の違いの 問題なのか、矛盾する実験結果なのかを早急に解明する 必要がある.

ミュオンのスピン歳差運動の周波数によって内部磁場 の変化をきわめて精度よく敏感に検出できる。超伝導電 子対のスピンの状態を決定する有力な手法としてNMR 以外にも偏極中性子によるナイトシフトの観測¹⁹⁾がある が、Sr₂RuO₄での研究を通じて、それぞれの問題点も明 らかになった. 第三の実験手法として, スイスのパウ ル・シェラー研究所 (PSI) で、最近ナイトシフトの測定 に適したミュオン実験装置の運用を開始した. そこで 2023年12月に京都大学で育成したSr₂RuO₄の高純度単 結晶試料を持ち込んで実験を行った(図4).その結果, 内部磁場の値に対して僅か3 ppmの高精度で、Sr₂RuO₄ の常伝導状態のナイトシフト(外部印加磁場とミュオン のスピンが感じる磁場との差)の値が初めて明らかにな り、超伝導状態でスピン一重項を示すナイトシフトの減 少の観測にも成功した.同時に予想外の振る舞いも観測 したため、その解釈をめぐって現在、理論家との共同研 究を進めている.

3.2. 水平ラインノードはあるのか?

図3の理論モデルのうち,既約表現がEgの秩序変数は 2成分で,TRSの破れや横波超音波のとびをはじめとす る実験結果の多くを説明できる.しかしながら,超伝導 エネルギーギャップには対称性から要請される水平ライ



図4(左)ミュオンスピン回転の実験に用いた Sr₂RuO₄の単結晶試料.(右)磁場中でのミュオンスピン歳差運動のスペクトル.超伝導転移温度以下でスピン磁化率が減少する方向への共鳴線のシフトが観測された.

ンノードがある.これは、RuO₂面内を走る電子同志が 超伝導電子対を組めないということを意味し、Sr₂RuO₄ が円筒状のフェルミ面を持つ擬2次元性の強い物質であ ることと一見矛盾する.このパラドックスを説明できる 理論モデルとして、異なる軌道(dxyと{dxz, dyz})の 電子の間で対形成が起こる可能性が実際の多バンドの電 子構造に基づく計算から提案されている²⁰⁾.一方, k_z = 0での水平ラインノードを持たない既約表現の秩序変数 にも有力な候補があるが、それらでは説明できない実験 結果も多い(図3).

いずれにせよ、これまでの多くの実験から、超伝導 ギャップに線状のノードもしくはギャップがきわめて小 さくなる構造があることはほぼ確実である.水平ライン ノードの存在は、RuO₂に平行な面で磁場方向を精密制 御した比熱の結果を説明するために必要である^{21,22)}.最 近ではミュオンスピン回転²³⁾,走査型の磁気プローブ及 びトンネル効果²⁴⁾,交流磁化率測定による下部臨界磁場 *H*_{c1}²⁵⁾の測定から、磁場侵入深さの精密測定が行われ、 ラインノードがあることは確定的といえる.しかし垂直 方向のラインノードだけなのか、それに加えて水平ライ ンノードもあるのかの判定には至っていない.

3.3. 謎の解明に向けて

ー軸性ひずみのもとでの超伝導転移が,TRSを破らな い高温相と破る低温相に分裂するのかどうかの実験の矛 盾点を解決することは喫緊の課題である.ミュオンスピ ン回転の実験結果は多くの再現が行われており,それを 覆すには現在行われている実験手法の妥当性そのものを 問うことになる.一方,比熱の実験で2段目の転移を示 唆するエントロピー変化が観測されないことも同時に説 明するには,既存の2成分秩序変数のモデルではなかな か困難である.

水平ラインノードの存在が確立した場合,軌道間電 子対形成(スピン三重項,軌道間反対称,偶パリティ) というこれまでに実証された例のない新奇な超伝導状 態が実現しているのかどうかは,実験的に検証する必 要がある. どのような現象にこのような新奇な超伝導 状態ならではの特徴が現れるのかの理論的提案も必要 である.

これらと並行して、ひずみ印加による超伝導転移温度 の変化の定量的・統一的理解は、異なる手法での実験結 果の間をつなぐ重要な役割をになうだろう.我々も実験 を進めているピエゾ素子を用いた一軸圧印加装置による 転移温度変化に加えて、静水圧による超伝導転移温度の 抑制、そして超音波音速のとびとEhrenfestの熱力学関 係式から導かれる転移温度の変化の間で満たすべき関係 の値にもかなり大きな違いが見られる³⁾.TRiKUCで は、これらの食い違いの原因を明らかにするための実験 も進めている.

4. トポロジカル物質の超伝導など

我々が超伝導を発見したCaSb₂は、「ディラック線 ノード金属」というトポロジカル状態にある²³⁾.静水圧 の増加で超伝導転移温度が上昇したのち減少するという 異常なふるまいを示すが、その原因は未解明である²⁴⁾. 圧力下での核磁気共鳴実験から、この転移温度上昇に 伴って電子の状態密度は変化しておらず、電子対の引力 相互作用に変化がみられることが分かった²⁵⁾.また、バ ンド計算の結果から、CaをSr, Mg, Euなどで元素置換 すると線ノード状態のエネルギーをフェルミレベルまで 移動できることが予想される.実際にこれらの元素置換 実験を行ったところ、Mgの部分置換で超伝導転移温度 が1.7 Kから1.9 Kまで上昇することが分かったので、 それらの結果を論文投稿した²⁶⁾(図5).

超伝導体Sr₂RuO₄のSrを同じ原子価数のCaで置換したCa₂RuO₄は,強い電子相関のためにモット絶縁体になる²⁷⁾. その絶縁ギャップは小さく,電流の下で電気抵抗が非線形に減少して新たな非平衡定常状態を生む可能性が盛んに研究されてきた.そのような効果は電流によって物質の性質を制御できる可能性を秘めている.しかしながら,電流と高抵抗のもたらすジュール加熱の



図5 ディラック線ノード金属CaSb₂の元素置換系Ca_{1.3}Mg₂Sb₂の 交流磁化率. Mgによる部分置換で超伝導転移温度が上昇す る²⁶⁾.

ために,特に低温では非平衡定常効果を明らかにするの は容易ではない.我々は電気抵抗と磁化の同時測定を 行って,その効果の特定を試みて試料内に生じる温度 勾配の効果も取り入れた解析を行った.しかし実験精度 の範囲で電流による電子状態の変化は観測できていな い²⁸⁾.

5. その他の活動成果

J.G. Bednorz博士と共に銅酸化物の高温超伝導を発見 し²⁹⁾, 1987年のノーベル物理学賞も受賞したK. Alex Müller教授が2023年1月に95歳で亡くなった. 筆者は チューリッヒのIBM研究所でBednorz・Müller両博士 のもとで1年間研究した関係から, Müller教授を偲んで 2023年7月にイタリア、シシリー島で開催された国際会 議に出席し、追悼特集号に「Copper Mountain Report」の 題で寄稿した³⁰⁾. 高温超伝導発見を初めて伝えた論文²⁹⁾ は "At the extreme forefront of research in superconductivity is the empirical search for new materials" (「超伝導 研究の最前線にあるのは、経験則に基づく新物質の探索 である」)という引用文から始まる.その引用元は1983 年に米国のCopper Mountainで開催された,超伝導の将 来を議論する研究会の報告書であった. 銅酸化物での発 見の3年前に「銅の山」で会議が開催された偶然は興味 深い. 私の論文ではMüller教授とこの報告書の執筆関 係者との交流にまつわるエピソードを述べた.

1908年に小川正孝(のちの東北帝国大学総長)が発表した新元素「nipponium」は再現できずに幻の発見に終わった.吉原賢二博士(元東北大学教授)は1990年 代後半からその論文の内容を吟味考察して,nipponium が実は1925年になって発見されたレニウム(Re)で あったことを明らかにした.筆者らは,吉原博士の業績 を正確に国際コミュニティーに伝えるべく,米国化学会 の論文誌に同博士の追悼記事を発表した³¹⁾. 2020年初頭からのCOVID-19パンデミックに伴い, 国際会議の開催も困難を極めたが,第29回低温物理学 国際会議(LT29)を2年間の延期ののち,2022年8月に 札幌で開催した.その共同委員長を務めたので,大型ハ イブリッド国際会議の開催のノウハウをまとめた記事を 日本物理学会誌の2023年6月号に掲載した³²⁾.観光庁 からの「ハイブリッド国際会議実証事業」の補助も受け て,感染対策を含めた様々な試みに挑戦できた.この時 期は、まだ査証取得に国内での身元引受人が必要など厳 しい制限があったが、7日間の会期で海外からの参加 147名を含む778名の現地参加があり、会議登録者合計 は34の国・地域から1,143名,講演数は1,003件に上っ た.また国際紛争の影響も少なからず受けたが、ウクラ イナからもリモートで5名の参加があった.

6. まとめと展望

量子物質としての現代的要素を兼ね備えた典型物質で あるSr₂RuO₄の非従来型超伝導状態の徹底解明に向け て,避けて通れないパラドックスが鮮明になり,それら の解決に向けて焦点を絞った研究を進めている.

ルテニウム酸化物に関する2022年以降の新しい研究 展開として、従来知られていた強磁性体と反強磁性体の 利点を併せ持つ,「第三の磁性体」Altermagnet (アル ター磁性)の研究が挙げられる³³⁾.これは従来,反強磁 性体に分類されていた中で、結晶の対称性によってパリ ティーとTRSが破れている物質である.アルター磁性 体では, 交換分裂が d 波超伝導体のような波数依存性で 生じるとともに、異常ホール効果やスピン流生成の機能 が注目されている. その中で交換分裂エネルギーが最大 の物質としてRuO₂が中心的に研究されている。筆者は 上述のルテニウム酸化物の超伝導体発見を目指した研究 をしていた時期に副産物としてRuO2の単結晶も得てお り, 最近試したところ比較的簡単に単結晶が得られた. 薄膜での一軸性ひずみ印加によってRuO2の超伝導が誘 起されることも報告されており³⁴⁾, 今後の関連研究課題 として注目している.

謝 辞

本稿の内容は多くの方々との共同研究の成果である. なかでも,池田敦俊, Giordano Mattoni,米澤進吾,石田憲 二,北川俊作, Jake Bobowski, Chanchal Sow, Shubhankar Paul, Clifford Hicks, Vadim Grinenko, Andy Mackenzie の各氏に感謝したい.また,TRiKUCの運営を強力にご 支援いただいている玉尾皓平所長をはじめとする豊田理 化学研究所の関係各位,北川進副院長をはじめとする京 都大学高等研究院の関係各位,TRiKUCの児玉知子,土 橋明美の各氏に御礼申し上げたい.

献

文

- Y. Maeno, S. Yonezawa and A. Ramires, submitted to J. Phys. Soc. Japan (2023), arXiv: 2402.12117 (2024).
- 3) Y. Maeno, A. Ikeda and G. Mattoni, *submitted to Nature Physics* (invited Perspective).
- Y. Maeno, H. Hashimoto, K. Yoshida, S. Nishizaki, T. Fujita, J. G. Bednorz and F. Lichtenberg, *Nature*, **372** (1994) 532. DOI: 10.1038/372532a0.
- 5) A. A. Husain, E. W. Huang, M. Mitrano, M. S. Rak, S. I. Rubeck, X. Guo, H. Yang, C. Sow, Y. Maeno, B. Uchoa, T. C. Chiang, P. E. Batson, P. W. Phillips and P. Abbamonte, *Nature*, **621** (2023) 66.
- V. Sunko, E. A. Morales, I. Marković, M. E. Barber, D. Milosavljević, F. Mazzola, D. A. Sokolov, N. Kikugawa, C. Cacho, P. Dudin, H. Rosner, C. W. Hicks, P. D. C. King and A. P. Mackenzie, *npj Quantum Mater.*, 4 (2019) 46.
- C. N. Veenstra, Z.-H. Zhu, B. Ludbrook, M. Capsoni, G. Levy, A. Nicolaou, J. A. Rosen, R. Comin, S. Kittaka, Y. Maeno, I. S. Elfimov and A. Damascelli, *Phys. Rev. Lett.*, **110** (2013) 097004.
- A. Pustogow, Y. Luo, A. Chronister, Y.-S. Su, D. A. Sokolov, F. Jerzembeck, A. P. Mackenzie, C. W. Hicks, N. Kikugawa, S. Raghu, E. D. Bauer and S. E. Brown, *Nature*, 574 (2019) 72.
- K. Ishida, M. Manago, K. Kinjo and Y. Maeno, J. Phys. Soc. Jpn., 89 (2020) 034712.
- G. Luke, Y. Fudamoto, K. Kojima, M. Larkin, B. Nachumi, Y. Uemura, J. Sonier, Y. Maeno, Z. Mao, Y. Mori and D. Agterberg, *Physica B*, **289-290** (2000) 373.
- W. Higemoto, A. Koda, R. Kadono, Y. Yoshida and Y. Onuki, In *Proceedings of the international symposium on* science explored by ultra slow muon (USM2013), 010202 (2014). DOI: 10.7566/JPSCP.2.010202.
- T. Shiroka, et al., Phys. Rev. B, 85 (2012) 134527. DOI: 10.1103/PhysRevB.85.134527.
- 13) V. Grinenko, S. Ghosh, R. Sarkar, J.-C. Orain, A. Nikitin, M. Elender, D. Das, Z. Guguchia, F. Bruckner, M. E. Barber, J. Park, N. Kikugawa, D. A. Sokolov, J. S. Bobowski, T. Miyoshi, Y. Maeno, A. P. Mackenzie, H. Luetkens, C. W. Hicks and H.-H. Klauss, *Nature Phys.*, 17 (2021) 748.
- 14) V. Grinenko, D. Das, R. Gupta, B. Zinkl, N. Kikugawa, Y. Maeno, C. W. Hicks, H.-H. Klauss, M. Sigrist and R. Khasanov, *Nature Commun.*, **12** (2021) 3920.
- 15) S. Benhabib, C. Lupien, I. Paul, L. Berges, M. Dion, M. Nardone, A. Zitouni, Z. Q. Mao, Y. Maeno, A. Georges, L. Taillefer and C. Proust, *Nature Phys.*, **17** (2021) 194.

- 16) S. Ghosh, A. Shekhter, F. Jerzembeck, N. Kikugawa, D. A. Sokolov, M. Brando, A. P. Mackenzie, C. W. Hicks and B. J. Ramshaw, *Nature Phys.*, **17** (2021) 199.
- 17) Y.-S. Li, N. Kikugawa, D. A. Sokolov, F. Jerzembeck, A. S. Gibbs, Y. Maeno, C. W. Hicks, J. Schmalian, M. Nicklas and A. P. Mackenzie, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **118** (2021) 226504.
- 18) Y.-S. Li, M. Garst, J. Schmalian, S. Ghosh, N. Kikugawa, D. A. Sokolov, C. W. Hicks, F. Jerzembeck, M. S. Ikeda, Z. Hu, B. J. Ramshaw, A. W. Rost, M. Nicklas and A. P. Mackenzie, *Nature*, **607** (2022) 276.
- A. N. Petsch, M. Zhu, M. Enderle, Z. Q. Mao, Y. Maeno, I. I. Mazin and S. M. Hayden, *Phys. Rev. Lett.*, **125** (2020) 217004.
- 20) H. G. Suh, H. Menke, P. M. R. Brydon, C. Timm, A. Ramires and D. F. Agterberg, *Phys. Rev. Res.*, 2 (2020) 032023.
- K. Deguchi, Z. Q. Mao, H. Yaguchi and Y. Maeno, *Phys. Rev. Lett.*, **92** (2004) 047002.
- S. Kittaka, A. Kasahara, T. Sakakibara, D. Shibata, S. Yonezawa, Y. Maeno, K. Tenya and K. Machida, *Phys. Rev. B*, **90** (2014) 220502(R).
- 23) A. Ikeda, M. Kawaguchi, S. Koibuchi, T. Hashimoto, T. Kawakami, S. Yonezawa, M. Sato, Y. Maeno, *Phys. Rev. Mater.*, 4 (2020) 041801(R). DOI: 10.1103/PhysRev Materials.4.041801.
- 24) S. Kitagawa, K. Ishida, A. Ikeda, M. Kawaguchi, S. Yonezawa and Y. Maeno, *Phys. Rev. B*, **104** (2021) L060504.
- 25) H. Takahashi, S. Kitagawa, K. Ishida, A. Ikeda, S. R. Saha, S. Yonezawa, J. Paglione and Y. Maeno, to appear in *Phys. Rev. B* (2024).
- A. Ikeda, S. Yonezawa and Y. Maeno, *submitted to J. Phys.* Soc. Jpn. (2023).
- S. Nakatsuji, S. Ikeda and Y. Maeno, J. Phys. Soc. Jpn., 66 (1997) 1868-1871. DOI: 10.1143/JPSJ.66.1868.
- 28) G. Mattoni, K. Fukushima, S. Yonezawa, F. Nakamura and Y. Maeno, to be submitted to Phys. Rev. Matter. (2024).
- 29) J. G. Bednorz, K. A. Müller, Z. Phys. B Condensed Matter, 64 (1986) 189-193. DOI: 10.1007/BF01303701.
- 30) Y. Maeno, *Physica C, Supercond. Appl.*, **613** (2023) 1354341-1-4. DOI: 10.1016/j.physc.2023.1354341.
- Y. Maeno, Y. Hisamatsu and K. Egashira, *Bull. Hist. Chem.*, 48 (2023) 236-241.
- 32) 前野悦輝, 永長直人, 日本物理学会誌, 78 (2023) 332-334.
- 33) L. Šmejkal, J. Sinova and T. Jungwirth, *Phys. Rev. X*, **12** (2022) 040501.
- 34) M. Uchida, T. Nomoto, M. Musashi, R. Arita and M. Kawasaki, *Phys. Rev. Lett.*, **125** (2020) 147001.

¹⁾ http://trikuc.jp/