

学術論文の概要

Hirono Kaneyasu

1. non-unitaryな自発磁化超伝導の磁化率と磁場依存性

論文投稿中(2020年11月投稿、査読中).

Sr_2RuO_4 (SRO)を対象に、 D_{4h} 対称における E_u 既約のnon-unitaryなchiral状態について、超伝導ギャップの水平ライン極小と磁化率温度変化における減少を計算で示しました。又、不均一超伝導での磁場誘起chiral転移とそれに伴う常磁性電流、スクリーニング電流をGinzburg-Landau方程式から解析しました。これらの理論結果を Sr_2RuO_4 の比熱の磁場角度依存性とNMR Knight-shiftの温度依存性、及び Sr_2RuO_4 -Ru共晶の $\text{Sr}_2\text{RuO}_4/\text{Ru}$ のトンネル微分コンダクタンスに現れるゼロバイアス異常の磁場依存性と比較しました。考察として、non-unitaryなchiral状態は比熱の磁場角度依存性と矛盾せず、ゼロバイアス異常の磁場依存性を説明出来ます。一方、磁化率の温度変化は減少を示すものの、実験で示されている低温での最小の値には下がり方が足りません。

これに対して E_g のchiral状態では磁化率は充分減少し、超伝導ギャップの水平ラインノードは比熱の磁場角度依存性と矛盾せず、磁場誘起chiral転移も起こるためゼロバイアス異常の磁場依存性とも整合します。しかし、このchiral E_g の超伝導状態についてHubbard模型を用いたEliashberg方程式の解析を行うと、 RuO_4 面間結合が弱い電子状態のため安定にならないという結果を得ました。

2. Ru金属-Sr₂RuO₄超伝導接合における磁場誘起chiral転移・常磁性電流・chirality符号の距離変化

Physical Review B, Vol. 100 (2019) 214501-1-9.

JPS Conference Proceedings, 30, 011039-1-6 (2020).

共晶系 Sr_2RuO_4 -Ru(SRO-Ru)の、Ru金属結晶片近くのSROで生じる界面超伝導(3-Kelvin相)において、磁場誘起chiral転移が生じることをGinzburg-Landau理論で示しました。距離変化をもつ界面chiral超伝導の磁場自由エネルギー利得から、磁場誘起chiral転移が起こり常磁性電流を伴うことと、距離上にone-nodalなchirality符号反転が生じることを、自由エネルギー微分項・電流・秩序変数の距離依存性の磁場変化から示しました。これらchiral転移、常磁性電流、chirality符号変化は、自発磁化軸に平行な外部磁場との常磁性結合により起こり、垂直磁場では起こらないことを、自由エネルギー微分項の磁場方向の違いから説明しました。この磁場方向によるchiral安定性の違いは、実験でのトンネル微分コンダクタンスにおけるゼロバイアス異常の磁場依存性と定性的に整合するため、SROバルク状態が自発磁化超伝導(chiral超伝導)である可能性を強めます。また、自由エネルギーが全距離で最もエネルギーを低くする秩序変数の距離変化として、距離におけるnodalなchiralityの符号変化が起こることを数値計算で示し、このchirality符号反転に対応する距離での秩序変数符号反転が自由エネルギー磁場利得項からもたらされることを秩序変数の近似式において示しました。これらchiral p波を対象として見つけた現象は、 $k_x + ik_y$ を含む $E_u \cdot E_g$ 既約(odd・even parity: スピン三重項・一重項)の自発磁化状態において、定性的に同じ議論が導かれます。そのため、この研究で示した磁場誘起chiral転移と常磁性電流の現象は、スピン三重項と一重項超伝導に共通な自発磁化超伝導の本質的性質といえます。同様の説明から、 E_u のchiral pに対して導かれた下記の研究結果3-5も、 E_u, E_g 既約の自発磁化超伝導状態に共通な機構です。

3. 界面周りの巻き状態と電流ネットワーク

Journal of Physical Society of Japan, 79 (2010), 104705.

バルク超伝導がchiral状態であり、円形金属の周りで局所的に転移温度が高い場合には、超伝導対波動関数の軌道運動量部分は高温側でnon-chiralな巻き状態となり、そこから温度が下がると巻き状態が消失したchiral状態に転移することを、Ginzburg-Landau理論から示しました。この左・右巻き状態はRu結晶片が一つでは縮退しており、多数のRu結晶片では縮退が解けて、Ru結晶片間の位相フラストレートによりジョセフソンネットワークを形成します。一方、低温側の巻き状態消失のchiral状態では、chiral電流が多数のRu結晶片周りを同方向に流れて自発磁化を生じることを、SQUIDモデルの電流・磁化計算で示しました。この巻き状態の消失前後の電流機構の違いが、共晶系 Sr_2RuO_4 -Ruで実験測定されたある温度以下で現れる正・負臨界電流の違いを説明することから、 Sr_2RuO_4 のバルク状態がchiral超伝導である可能性を示しました。これらの状態が、低温になり実空間で円形界面からバルクの性質が強まることで、運動量空間における超伝導の軌道トポロジーが変化することで起こることを数学的表現で示し、これに伴い自発磁化の発生と、位相差電流から自発磁化電流へと電流機構が変化することを、位相幾何の関係から説明しました。

4. s波超伝導とchiral超伝導の位相近接による自発磁束移動

Journal of Physical Society of Japan, 79 (2010) 053706.

s波超伝導と chiral 状態が円形接合している場合、近接効果によりゼロ磁場で特異な自発磁束移動が起こることを、異種超伝導間の位相と磁束の対称性から提案し、この現象による磁束磁化の移動の様子を sine-Gordon 方程式に基づいて示しました。Ru 結晶片が s 波超伝導となる温度では表面で半々に正負磁束が生じ、そこから温度が低下して近接効果が強くなると、正磁束が界面全体を覆い、負磁束は Ru 結晶片中央に転移することを、位相近接における空間と軌道対称性との関係から理論的に示しました。又、このゼロ磁場での自発的磁束転移が、chiral 超伝導の有効な検証方法になることを、実験側に提案しました。

5. s波超伝導との近接効果による巻状態の温度域拡大と電流抑制

Phys. Rev. B 92, 134515 (2015) ,

Phys. Rev. B 90, 024515 (2014) ; Physical Review B Editors' suggestion (2014)

s波超伝導との近接効果が、上記1の研究で示した巻き状態の温度領域を拡大することを、円形接合面での近接位相の一致・不一致の違いから説明しました。円形接合の全角度で、巻き状態は位相が一定のためs波超伝導と位相一致して安定化するため、その温度域を低温まで拡大します。一方、低温側の巻き状態消失するとそのchiral状態の位相は角度依存性をもつためs波超伝導の一定位相とは不一致となり、chiral転移温度は低温側へと抑えられます。この位相一致・不一致によるエネルギー差を考慮した計算から、巻き状態の温度域拡大を位相差と温度を軸とした相図に示しました。更に、chiral状態での巻き状態が消失する温度では、接合面における磁束のdepinning-pinning転移により臨界電流に著しい抑制が生じることを、Sine-Gordon方程式の解析から示しました。この電流抑制の機構は、実験で測定されたPb/Ru/Sr₂RuO₄での臨界電流の温度依存異常を良く説明し、その臨界電流抑制は、先に述べた近接効果による巻き状態の温度域拡大との関係から、巻き状態消失温度で起こることを示しました。

6. 様々な格子における電子相関に基いた超伝導発現機構と電子状態の運動量依存性との関係

Journal of Physical Society of Japan, 71 (2002), 1541.

Journal of Physical Society of Japan, 72 (2003) 884.

次元性、格子構造、電子密度の変化による超伝導の軌道対称性 (*p, d, f, g*波) の安定性変化を、正方、単純、体心、面心立方格子のtight-binding近似のFermi面と、Hubbard模型での摂動評価の超伝導有効相互作用を含むEliashberg方程式から解析し、電子密度と次近接飛び移り積分を軸とした超伝導対称性の相図に示しました。超伝導有効相互作用をon-site電子間斥力の3次までの摂動項で評価して、そのFeynman diagramで示される電子散乱過程が超伝導発現機構に関わる様子を超伝導対称性ごとに解析しました。摂動の2次項は主にスピン揺らぎから超伝導を安定化し、3次項は主に特定波数のスピン揺らぎに限らず、フェルミ面トポロジーを反映した波数依存性により超伝導を安定化することを、フェルミ波数依存性、スピン感受率、電子状態密度と、超伝導対称性ごとの超伝導有効相互作用の摂動項の各項の波数依存性を解析して説明しました。

7. CeIn₃の反強磁性スピン揺らぎによるd波超伝導

Journal of Physical Society of Japan, 72 (2003) 2449.

CeIn₃の超伝導の発現機構を、Ce4f 電子が主に構成する3次元フェルミ面の運動量依存性とハバード模型のオンサイト電子間斥力についての3次摂動による超伝導有効相互作用を含むEliashberg方程式により、微視的理論で調べました。3次元反強磁性揺らぎが起源となってd波超伝導が有利となることを示しました。結果より、二次元系のCeRhIn₅と比べて三次元系のCeIn₃では超伝導転移温度の方が一桁程度低くなることを、3次元性が強まると反強磁性揺らぎが弱まることによる転移温度変化から説明しました。

8. 強磁性とスピン三重項超伝導の共存機構

Journal of Physical Society of Japan, 74 (2005), 527.

強磁性超伝導を対象に、強磁性がスピン三重項超伝導を誘起する機構を調べました。強磁性下電子状態に特徴的なupスピンとdownスピンバンドを2バンドモデルとして表し、疑二次元強磁性Hubbard模型で電子間斥力Uに起因した超伝導対引力を導く有効相互作用を摂動論で求めて、Eliashberg超伝導方程式の数値解析から超伝導固有値の強磁性磁化依存性を調べました。upとdownスピンのフェルミ面が電子面とホール面で構成される場合には、一方のスピン成分間だけではなく、両スピン間の有効相互作用が寄与することで強磁性下でのスピン三重項超伝導がより安定となる機構を固有値のスピン成分の電子数依存性から示しました。

9. 界面層の反強磁性揺らぎの増強とd波超伝導の安定性

Journal of Physical Society of Japan, 78 (2009) 113703-1-4

Ce4f 電子間電子相関に起因したd_{x²-y²}波超伝導に対して、不純物電子や格子欠陥等に起因した界面層状ドメインの

電子状態への効果をDyson-Gor'kov方程式の解析から調べました。超伝導方程式の固有値から、層ごとの超伝導安定性を調べました。界面電子状態の電子密度、スピン相関揺らぎの波数依存性から表面ドメイン近くではフェルミ準位付近の電子状態密度が界面層で局所的に高くなり、反強磁性スピン揺らぎが強くなることが分かりました。この界面でのスピン揺らぎ増強により、d波超伝導に対する超伝導方程式の層ごとの固有値は表面層で局所的に大きくなり、界面で超伝導転移温度を上昇させる機構を界面ポテンシャルによる表面電子状態から説明しました。表面層原子ポテンシャルにより電子が表面に局在して電子数が増えることでフェルミ面波数のネスト的特徴が強くなり、反強磁性スピン揺らぎが増強することでd波超伝導の高い超伝導転移温度を導く機構を、Dyson-Gor'kov方程式による表面状態とスピン感受率波数の解析から示しました。

10. 硼素炭化物における超伝導

Journal of Physical Society of Japan, 70 (2001), 3011.

硼素炭化物 $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ 超伝導体において、電子相関とフェルミ面波数に起因したd波超伝導の可能性を、摂動論を用いた転移温度の計算から調べました。転移温度は dx^2-y^2 よりも d_{xy} 対称性が低くなることを転移温度の計算から示しました。フェルミ面においてネスティング的な特徴が弱い反強磁性スピン揺らぎは強くなり、 d_{xy} 波超伝導の転移温度は銅酸化物超伝導体ほど高くはならないことを示しました。電子間斥力が強い領域では $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ の転移温度程度にまで上がりd波超伝導の可能性があるが、この系では電子相関効果がさほど強くない系のため、相当するUの領域ではd波の転移温度は実際の転移温度ほどには転移温度は高くなりませんでした。そのため、電子相関起因ではない電子格子相互作用によるs波超伝導の可能性が高いと考えられます。

11. 空間反転対称性の破れた超伝導におけるFFLO的状态

Journal of Physical Society of Japan, 76 (2007), 024715.

スピン三重項超伝導対では磁場の効果により超伝導対の重心運動量がゼロでないFulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov(FFLO)状態をとることが可能となります。これと異なり、 CePt_3Si のような空間反転対称性の破れた系でのラッシュバースピン軌道相互作用を考えると、スピン軌道相互作用によりスピン三重項超伝導対においても重心運動量がゼロでないFFLO的な超伝導状態が生じることを理論的に示しました。このような状態では、右図のような、超伝導転移温度 T_c のラッシュバースピン軌道相互作用の強さ α への依存性が現れることを、超伝導方程式の解析から示しました。

12. 角度依存磁気伝導率におけるスピン密度波の効果

Journal of Physical Society of Japan, 75 (2006) 023706.

疑1次元有機導体を対象に、スピン密度波によるフェルミ波数変化が、磁気伝導率の磁場角度依存性に現れる様子を調べました。Tight-binding模型と、Hubbard模型のon-site電子間斥力に対する乱雑位相近似から、スピン密度波がフェルミ面にもたらす波数変化を自己エネルギーで評価し、フェルミ面に対する電子の運動方程式を数値的に解いて、更に角度磁気伝導率を計算することで、磁気伝導率 σ_{xx} の磁場角度依存性において、スピン密度波の影響により強度が変わる角度を示しました。

13. π 中間子原子における π 中間子粒子-核子空孔相互作用

Physical Review C 60, (1999) 058202.

(d,3He)-reactionによって生成された π 中間子原子 ${}^{\pi}\text{Pb}_{207}$ は鉛Pbの回りに束縛されており、原子核の状態としては1空孔状態と成っています。この1粒子(π 中間子)-1空孔(中性子)状態の間の相互作用を考慮して束縛エネルギー等に対する効果を摂動論を用いて評価し、相対論的なKlein-Gordon方程式の数値解析により、エネルギーシフトの計算を行いました。核子空孔- π 中間子粒子相互作用に対する摂動は、エネルギー順位をほとんど変えず、エネルギーシフトは小さいことを数値計算から分かりました。この計算結果から、核子空孔- π 中間子粒子相互作用は、これまでにそれを一旦無視してなされた理論計算による束縛エネルギーと散乱断面積の理論値を大きく変えるほどの重大な変化を与えないことを説明しました。