

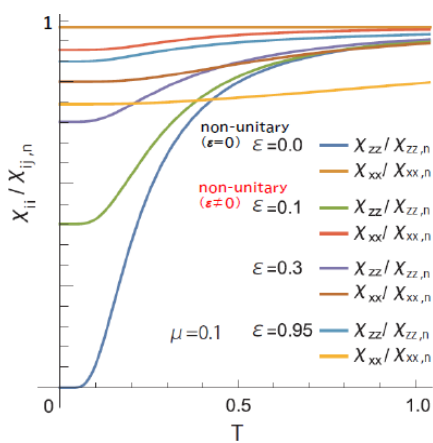
主な論文の要旨

[I] chiral超伝導とその超伝導電流の現象論的研究

1. 「Sr₂RuO₄のEu既約のノンユニタリー状態におけるスピン感受率と磁場誘起chiral安定化」

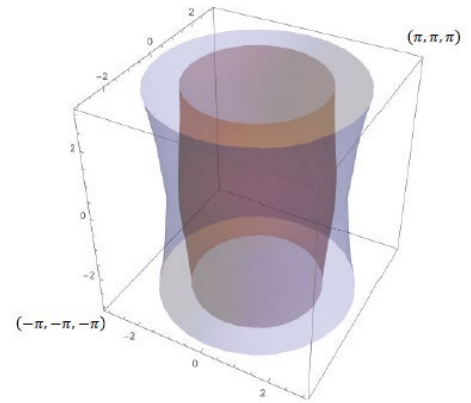
“Spin susceptibility and field-induced chiral stability in non-unitary superconductivity of Eu for Sr₂RuO₄”, Hirono Kaneyasu, Kouki Otsuka (大学院生), Yasumasa Hasegawa, 査読中.

D_{4h} 対称におけるEu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Sr₂RuO₄の比熱の磁場角度依存性とNMR Knight-shiftの温度依存性、及びSr₂RuO₄-Ru共晶のSr₂RuO₄/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、磁化率の温度変化については減少を示すものの、実験で示されている低温での最小値までには下がりません。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。



(左図) 磁化率 χ の温度依存性。Non-unitary 状態 ($\epsilon \neq 0$) では面内磁場(H//z)と垂直磁場(H//x)のどちらも磁化率は減少する。

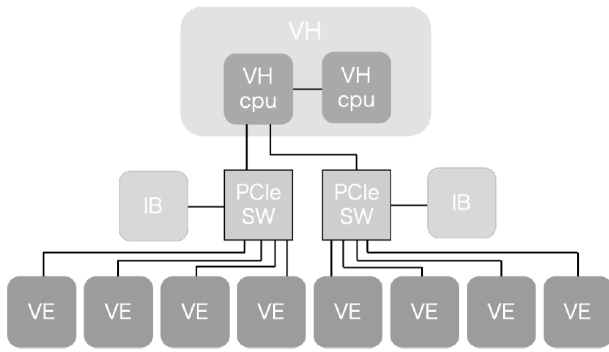
(右図) 波数空間における超伝導ギャップ構造。内側(茶色)は Fermi 面で、2次元電子状態のモデルとして k_z 軸に沿ったシリンダー状の波数依存性を考えた。外側(紫色)の超伝導状態の波数依存性は、 $k_z=0$ において水平線的に極小を示す。



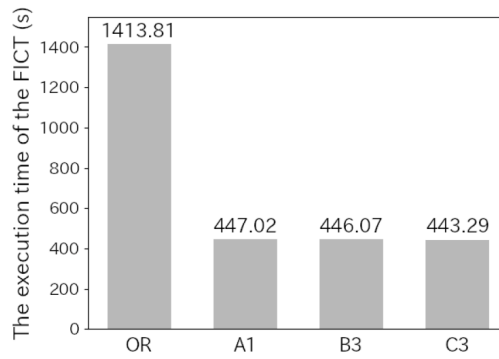
2. 「SX-Aurora TSUBASAを用いた磁場誘起chiral転移シミュレーションの初めての高速化」,

”First Experience of Accelerating a Field-Induced Chiral Transition Simulation Using the SX-Aurora TSUBASA”, S. Yoshida (大学院生), A. Endo, H. Kaneyasu, S. Date, Supercomputing Frontiers and Innovations 8(2) 27-42 (2021). [査読有] <https://doi.org/10.14529/jsfi210203>

超伝導のGinzburg-Landau方程式に基づく磁場誘起chiral転移のシミュレーションは、SX-ACEベクトルプロセッサ1台で一つの温度に対して磁場を変化させた際の計算では約10時間がかかります。現象のメカニズムを理解するためには、温度と磁場のパラメータを変更して何度も計算を行う必要があるため、計算時間の短縮化は研究に有益です。SX-ACEの後継機として登場した「SX-Aurora TSUBASA」では、「SX-ACE」で実行するプログラムの性能を大幅に向上させることが期待されています。しかし、SX-Aurora TSUBASAでは、計算ノードのアーキテクチャが変更され3つの実行モデルが用意されているため、3つの実行モデルをどのように使い分けるべきかという疑問が生じていました。本論文では、SX-Aurora TSUBASAプロセッサを磁場誘起chiral転移の高速化に導入した初の経験を報告します。具体的には、SX-Aurora TSUBASAが提案する3つの実行モデルに対応する実装を開発しました。計算の高速化のために、プログラム実行時のベクトル化率の向上と、ベクトルエンジンであるベクトルプロセッサからベクトルホストである汎用プロセッサへのデータ転送の効率化を検討しました。計算の高速化がどのように実現されているかを説明しました。



SX-Aurora TSUBASA のシステム
VE はベクトルエンジン

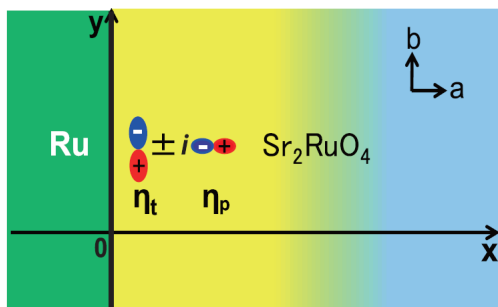


SX-Aurora TSUBASA での高速化による実行時間

3. 「共晶系Sr₂RuO₄-Ruにおける3K相のH-T相図の特徴 — chiral超伝導の証拠として—」

“Properties of H-T-phase diagram of the 3-K phase in eutectic Sr₂RuO₄-Ru - Evidence for chiral superconductivity”, Hirono Kaneyasu, Yuya Enokida (大学院生), Takuji Nomura, Yasumasa Hasegawa, Toru Sakai, and Manfred Sigrist, Physical Review B 100, 214501-1-9 (2019). [査読有] <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.214501>

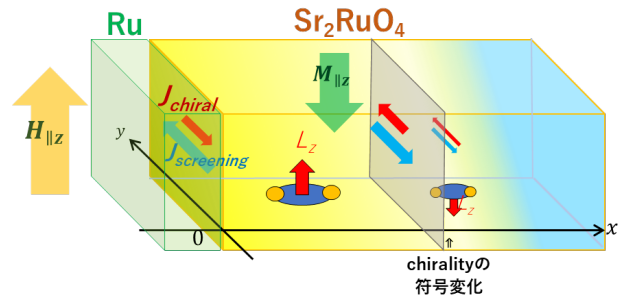
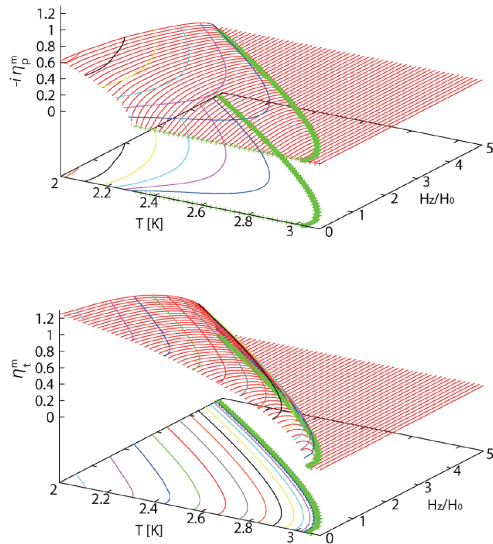
共晶系Sr₂RuO₄-Ru (SRO-Ru) のRu金属結晶片近くのSROで生じる不均一超伝導を対象に、磁場誘起chiral転移と常磁性電流が生じることを、スピン三重項E_g既約のchiral p波に対するGinzburg-Landau (GL) 方程式の計算から示しました。これらの磁場誘起chiral現象は、不均一超伝導の軌道磁化と外部磁場の常磁性結合による自由エネルギー利得から導かれます。この機構を秩序変数に2成分を持つGL自由エネルギー微分項の解析から説明しました。Ru/SRO境界からの距離においてnodalなchirality反転を示し、これが自由エネルギー利得を全距離で保つためにおこることを秩序変数と自由エネルギーの距離依存性の解析から明らかにしました。また、これらの磁場誘起現象が軌道磁化軸と平行な磁場で起こり、垂直な磁場では起こらないことを説明しました。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方向依存性と良く整合することから、SROのバルク超伝導がchiral状態である可能性を述べました。上記のE_g既約についての議論は、軌道部分に同じk_x+ik_yを含むE_g既約のchiral状態でも同様に導かれます。このため理論結果からはSROバルク状態としてE_v, E_g既約のchiral状態が候補として挙げられますが、実験のNMR Knight-shift温度依存性の減少からはスピン三重項E_gの可能性は小さく、スピン一重項E_gのchiral状態の可能性が残ります。



Sr₂RuO₄の超伝導転移温度は T_c=1.5K より高い3KからRu金属片近くのSr₂RuO₄に超伝導が局所的に現れ始める。この不均一超伝導は温度が下がり T_c近くになると系全体に広がるバルク状態に転移する。

$$\begin{aligned}
 \mathbf{H}/z & f_K = [K_1(\partial_x \tilde{\eta}_p)^2 + K_2(\partial_x \tilde{\eta}_t)^2] + (\gamma \tilde{A}_y)^2 (K_1 \tilde{\eta}_t^2 + K_2 \tilde{\eta}_p^2) \\
 & + 2(\gamma \tilde{A}_y) K_{3,4} \{ (\partial_x \tilde{\eta}_t) \tilde{\eta}_p - (\partial_x \tilde{\eta}_p) \tilde{\eta}_t \} \leftarrow < 0 \text{ chiral状態の安定化} \\
 & \quad \quad \quad \mathbf{f}_{K_{3,4,M}} \text{ Chiral 界面超伝導 (空間変化且つ垂直・接線成分の異なり)} \\
 j_{y, total} & = -(\partial_x^2 \tilde{A}_y) = 8\pi (-\gamma^2 \tilde{A}_y (K_1 \tilde{\eta}_t^2 + K_2 \tilde{\eta}_p^2) + \gamma K_{3,4} (\tilde{\eta}_t (\partial_x \tilde{\eta}_p) - \tilde{\eta}_p (\partial_x \tilde{\eta}_t))) \\
 & \quad \quad \quad \mathbf{j}_{K_{12,M}} \text{ 反磁性電流} \quad \quad \quad \mathbf{j}_{K_{34,M}} \text{ 常磁性chiral電流}
 \end{aligned}$$

不均一超伝導において、chiral軌道磁化と外部磁場との常磁性結合は、chiral安定化を導くエネルギー利得を与える。このエネルギー利得は、自由エネルギー微分項のf_{K3,4}項が、chiralな2成分超伝導秩序変数が距離依存性を持つ場合に負になることに対応する。



磁場中の常磁性電流とスクリーニング電流、及び Chirality 反転の様子。

(右図)GL方程式から計算された超伝導秩序変数のRu/Sr₂RuO₄界面に対する法線成分 η_p と接線成分 η_t の磁場-温度依存性。高温側の超伝導onset温度で接線成分のみが現れはじめ、外部磁場を印加すると法線成分が誘起されてchiral転移する。

4. 「Sr₂RuO₄ の 3K 相における外部磁場との常磁性結合による chirality の特徴」

Hirono Kaneyasu, Yuya Enokida(大学院生), Takuji Nomura, Yasumasa Hasegawa, Toru Sakai, and Manfred Sigrist, “Features of chirality generated by paramagnetic coupling to magnetic fields in the 3K-phase of Sr₂RuO₄”, JPS Conference Proceedings 30, 011039-1-6 (2020). [査読有]
<https://doi.org/10.7566/JPSCP.30.011039>

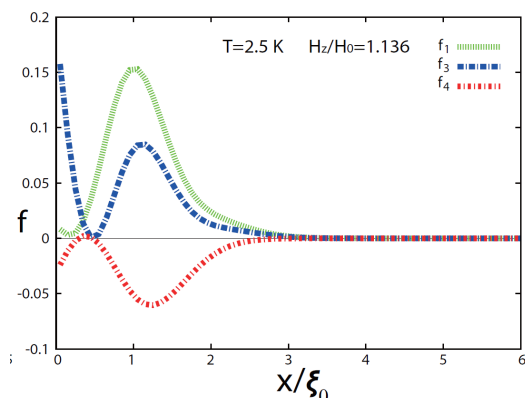
共晶系Sr₂RuO₄-RuのRu金属-Sr₂RuO₄超伝導接合の近くの不均一超伝導を対象に、接合境界からの距離上のone-nodalなchirality反転をGinzburg-Landau理論の解析から示しました。このchirality反転は、chiral状態を安定化させる外部磁場との常磁性結合による自由エネルギー利得を全距離で保つように生じており、このことをGinzburg-Landau方程式の解析による秩序変数と自由エネルギーの距離依存性から示しました。更に、このchiralityの反転が、超伝導の不均一性でのchiral状態で、ゼロ磁場におけるchiralな自発磁化、および自発磁化と外部磁場との常磁性結合から必然的にもたらされることを、chirality反転に対応した超伝導秩序変数の距離上の符号変化が、ベクトルポテンシャルに対する一次近似として導出した秩序変数の η_t の式の1項目と2項目のexp関数の距離xについての収束性の違いから導かれることを説明しました。この第2項目は常磁性結合によるエネルギー項から導かれます。

$$\eta_p(x) = \eta_p^{(0)} \exp(-\sqrt{\alpha/K_1} x) - \alpha^{-1}(K_1/K_2 - 1)^{-1} K_{3,4} \gamma A_y \sqrt{\alpha/K_2} \eta_t^{(0)} \exp(-\sqrt{\alpha/K_2} x)$$

$$\eta_t(x) = \eta_t^{(0)} \exp(-\sqrt{\alpha/K_2} x) - \alpha^{-1}(1 - K_2/K_1)^{-1} K_{3,4} \gamma A_y \sqrt{\alpha/K_1} \eta_p^{(0)} \exp(-\sqrt{\alpha/K_1} x)$$

$K_2 = K_1/3 \quad K_{3,4} = K_3 = K_4$ Inversion of chirality due to sign change of η_t

距離におけるone-nodalなchirality変化は、秩序変数の接合面に対する接線成分 η_t と垂直成分 η_p の1項目と2項目の指数関数の収束性の違いからもたらされる。2項目は軌道磁化の常磁性結合によるエネルギー利得を与える項から導かれる。

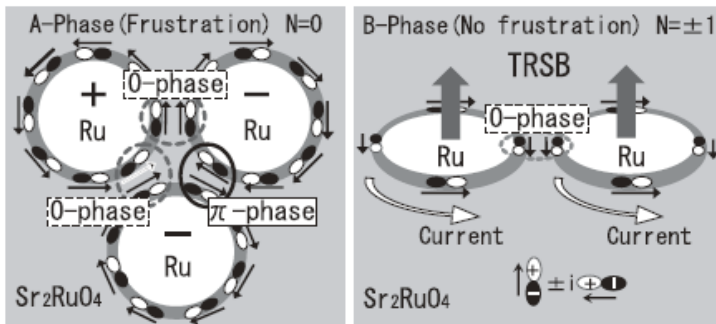


Chiral 反転は常磁性結合による全距離でエネルギー利得を保つようにもたらされている。このエネルギー利得は chiral な2成分秩序変数が距離依存性を持つ場合に磁場により f_4 項 (赤色点線) が全距離で負となることに対応している。

5. 「共晶系Sr₂RuO₄-Ruにおける3-Kelvin相の転移」

“Phase Transition in the 3-Kelvin Phase of Eutectic Sr₂RuO₄-Ru”, Hirono Kaneyasu, Nobuhiko Hayashi, Bruno Gut, Kenji Makoshi, and Manfred Sigrist, Journal of the Physical Society of Japan 79, 104705-1-6 (2010). [査読有] <https://doi.org/10.1143/JPSJ.79.104705>

共晶系Sr₂RuO₄-Ru (SRO-Ru) において円形Ru金属片周りのSROに生じた界面超伝導 (3-Kelvin相) の、超伝導対の軌道部分成分の巻状態生成と、巻状態消失に伴うchiral転移を、Ginzburg-Landau (GL) 方程式の計算で示しました。低温でのSROバルク超伝導をE_g既約のchiral p波を仮定し、円形Ru金属片周りで局所的に高い超伝導転移温度を考えた系のRu金属片周りの界面超伝導では、バルク転移温度より高温でnon-chiralな巻状態が生じ、温度が下がりバルク転移温度に近づくと巻状態の消失と共にchiral転移します。この転移を、Ru/SRO円形接合の境界エネルギーを考慮したGL方程式の計算による自由エネルギーの解析で示しました。巻状態は左右巻きで縮退し、複数Ru結晶片では縮退が解けてRu結晶片間で位相フラストレートしてジョセフソンネットワークを形成します。一方、低温で巻状態が消失したchiral状態では、自発的chiral電流が複数Ru結晶片周りを同方向に流れて共晶系全体に磁化を生じ、これをSQUIDモデルとした磁化計算で説明しました。これらの巻状態の消失前後の電流機構の違いは、SRO-Ruの実験でのある温度以下で現れる正負臨界電流の違いを説明し、SROバルク超伝導がchiral状態である可能性を示します。(上記のスピ三重項E_g既約についての議論は、軌道部分に同じk_x+ik_yを含むスピ二重項E_g既約のchiral状態でも同様に導かれます。)

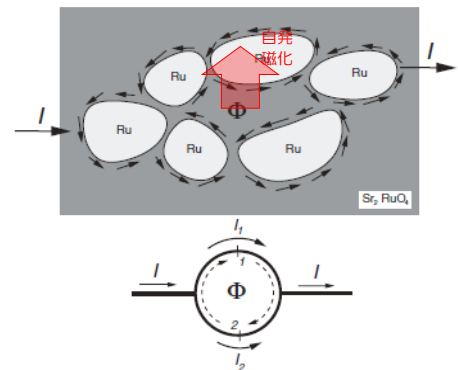


non-chiral 相 (巻状態)
位相フラストレーション
ジョセフソンネットワーク

chiral 相

巻状態消失に伴う Chiral 電流の発現を表す式

$$j_{\theta}(r) = \frac{2}{r} [(N+1)\eta_+^2(r) + (N-1)\eta_-^2(r) - N\eta_+(r)\eta_-(r)] - \eta_-(r) \frac{\partial \eta_+(r)}{\partial r} + \eta_+(r) \frac{\partial \eta_-(r)}{\partial r} \quad (1)$$



chiral 相では、自発的な chiral 電流が多くの Ru 結晶片を繋いで流れるため全体で磁化を生じる。これを SQUID モデルとして表し、磁化により正負臨界電流の違いが生じることを説明した。

$$I = I_1 + I_2 = I_{c1} \sin \phi + I_{c2} \sin(\phi + \alpha),$$

$$\alpha = \frac{2\pi}{\Phi_0} [\Phi + L(I_1 - I_2)].$$

上記の正負臨界電流の違いは、実験での温度 T* 以下で正負臨界電流が異なることに整合する。このことから、T* は巻状態の消失に伴う chiral 転移の温度と考察した。

6. 「共晶系ルテニウム酸化物Sr₂RuO₄-Ruにおける磁束状態の生成」

“Nucleation of Vortex State in Ru-Inclusion in Eutectic Ruthenium Oxide Sr₂RuO₄- Ru”

Hirono Kaneyasu, and Manfred Sigrist, Journal of the Physical Society of Japan 79. 053706-1-3 (2010). [査読有] <https://doi.org/10.1143/JPSJ.79.053706>

スピン三重項E_g既約のchiral p波とs波超伝導が円形接合した系では、異種超伝導の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軌道部分の対称性から説明しました。この近接効果による磁束磁化の接合境界からの自発移動の様子を、の計算から示しました。近接効果が弱いと最初に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、そこから温度が低くなって近接効果が強くなることで正磁束の境界面を覆う割合が負磁束よりも増えていきます。更に低温になり近接効果がより強くなると、正磁束のみ境界面を覆い負磁束はRu結晶片中央に移動します。この磁束の自発的な移り変わりの機構を、円形接合近接における位相との関係から説明しました。このゼロ磁場における異種超伝導近接効果による自発的磁束移動は、トポロジカル接合においてchiral超伝導の特性から現れる現象であるため、この磁束磁化の自発移動の実験での検出はchiral状態の特定に繋がると考えます。

(上記のスピン三重項E_g既約についての議論は、軌道部分に同じk_x+ik_yを含むスピン一重項E_g既約のchiral状態でも同様に導かれます。)

s波: ΨのGinzburg-Landau自由エネルギー

$$F = \int_{Ru} dr d\theta r \left[a|\psi|^2 + b|\psi|^4 + K|D\psi|^2 + \frac{B^2}{8\pi} \right] + \int_{int} d\theta R \tilde{K} \{ \hat{z} \cdot (\mathbf{n} \times \boldsymbol{\eta})^* \psi + c.c. \}$$

chiral p波: η と s波: Ψの近接項

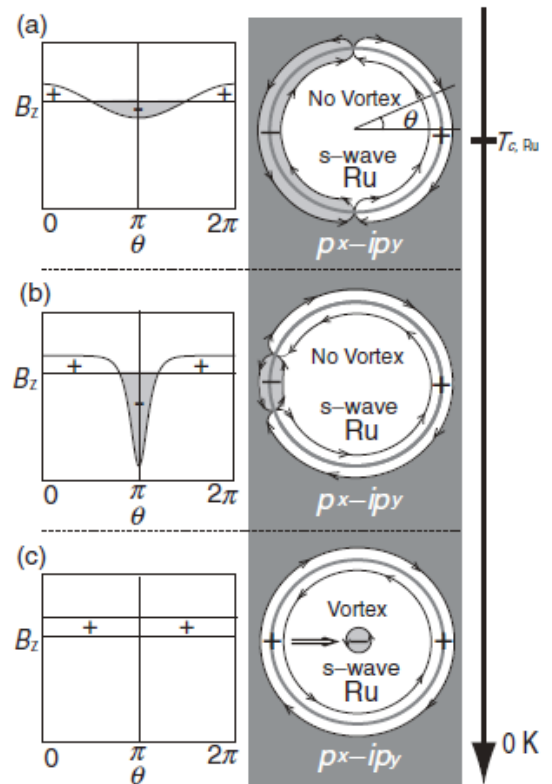
円形接合面におけるs波秩序変数: Ψのchiral p波位相θとの関係

$$\hat{z} \cdot (\mathbf{n} \times \boldsymbol{\eta}) = -i\eta_p e^{i\theta} = |\eta_p| e^{i(\theta-\alpha)}$$

chiral p波の秩序変数: η_pと位相θ

$$\psi(r = R, \theta) = |\psi(R)| e^{i\phi(\theta)}$$

近接効果による自発的な磁束移動



異種超伝導の位相の近接効果を考えた sine-Gordon 方程式と磁束磁化の式

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} = \Lambda^2 \sin[\phi(\theta) - \theta], \quad B(\theta) = \sqrt{f_0} \frac{\partial \phi(\theta)}{\partial \theta}$$

7. 「Pb-Ru-Sr₂RuO₄のジョセフソン接合における不均一な3-Kelvin相の発達」

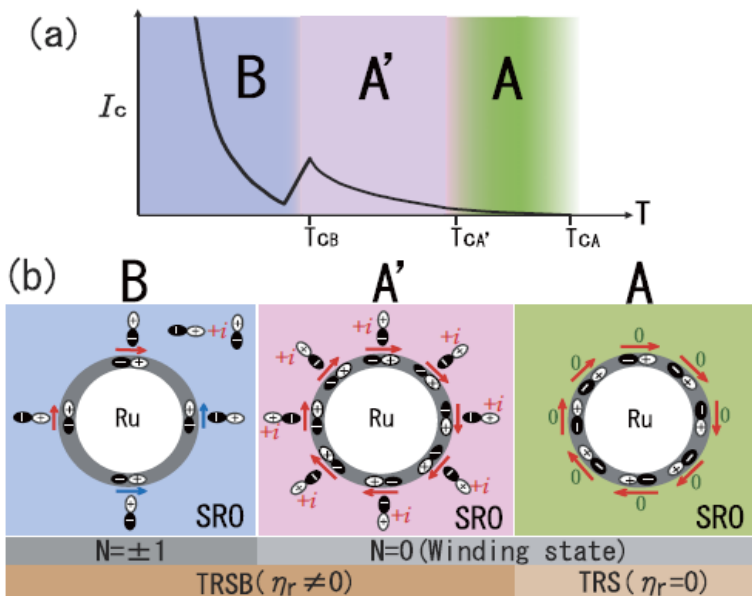
“Evolution of the filamentary 3-Kelvin phase in Pb-Ru-Sr₂RuO₄ Josephson junctions”

Hirono Kaneyasu, Sarah B. Etter (大学院生), Toru Sakai, and Manfred Sigrist, Physical Review B 92, 134515-1-5 (2015). [査読有] <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.92.134515>

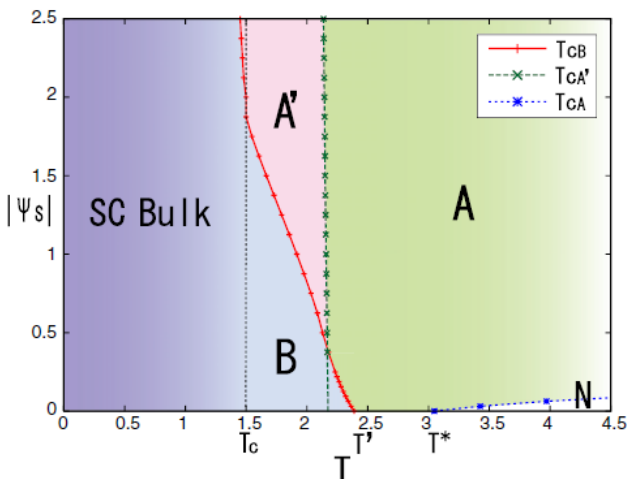
s波超伝導との近接効果が、p波軌道の巻き状態の温度領域をchiral転移して拡大することを、円形接合面での近接位相の一致・不一致の違いからGinzburg-Landau方程式の解析で説明しました。円形接合の全角度で、巻き状態は位相が一定のためs波超伝導と位相一致して安定化するため、その温度域を低温まで拡大します。一方、低温側の巻き状態消失するとそのchiral状態の位相は角度依存性をもつためs波超伝導の一定位相とは不一致となり、chiral転移温度は低温側へと抑えられます。この位相一致・不一致によるエネルギー差を考慮した計算から、巻き状態の温度域拡大を位相差と温度を軸として相図に示しました。

この論文と対となる下記の論文8のPhys. Rev. B 90, 024515 (2014)で示したように、chiral状態での巻き状態が消失する温度では、接合面での磁束のdepinning-pinning転移により臨界電流に著しい抑制が生じます。この論文では、このような臨界電流抑制が巻き状態消失温度で起こることを示しており、円形のトポロジカル接合による異種超伝導近接効果から説明しています。この理論結果と対になる臨界電流抑制の論文とを合わせて、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ます。

このchiral pで見つけた現象は、chiral dにおいても定性的に同様であることから、2成分秩序変数で表される既約Eu, Egのchiral状態に共通する特徴です。



近接効果による超伝導秩序変数のトポロジー変化と臨界電流抑制の異常との関係



$$\mathcal{F} = \int_{r>R} d^2r \left[a(r)|\eta|^2 + \frac{1}{4}b\{|\eta|^4 + 2|\eta_+|^2|\eta_-|^2\} + \frac{1}{2}K \left\{ |D\eta_+|^2 + |D\eta_-|^2 + \frac{1}{2}[(D_+\eta_-)^*(D_-\eta_+) + \text{c.c.}] \right\} + \frac{(\nabla \times A)^2}{8\pi} \right] + R \int_{\text{int}} d\theta \{ K_r |n \cdot \eta|^2 + K_\theta [\hat{z} \cdot (n \times \eta) - \psi_s]^2 \}, \quad (1)$$

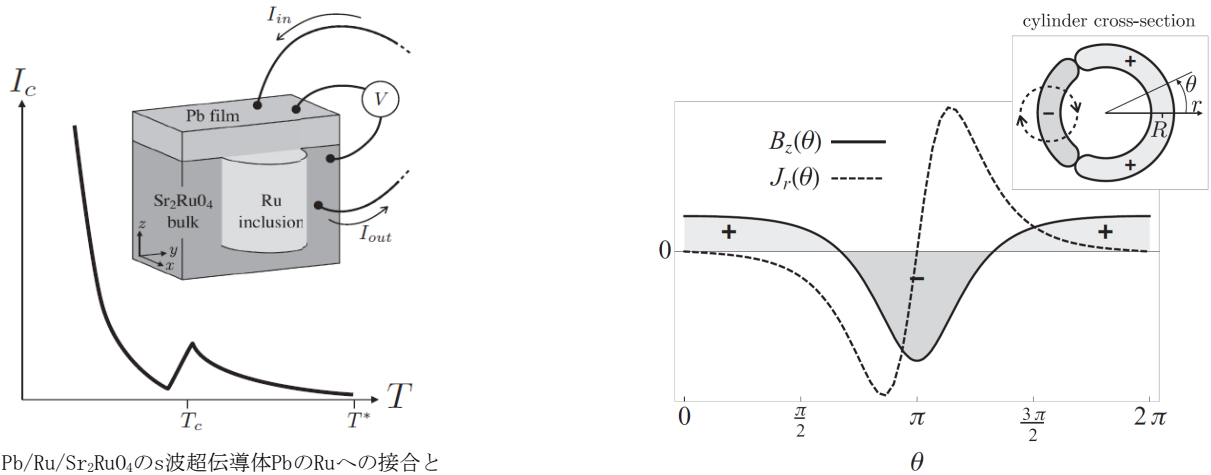
chiral p波: η と s波: Ψ の近接位相

8. 「トポロジカルにフラストレートしたジョセフソン接合における臨界電流の制限機構」

“Limiting mechanism for critical current in topologically frustrated Josephson junctions”, Sarah B. Etter (大学院生), Hirono Kaneyasu, Matthias Ossadnik (大学院生), and Manfred Sigrist, Physical Review B 90, 024515-1-12 (2014). (Editors’ suggestion). [査読有] <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.90.024515>

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方程式により示しました。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ており、その臨界電流抑制が、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、巻き状態が消失するバルク転移温度付近であることを示しました。

(上記のスピントリプル項E_g既約についての議論は、軌道部分に同じk_x+ik_yを含むスピントリプル項E_g既約のchiral状態でも同様に導かれます。)



Pb/Ru/Sr₂RuO₄のs波超伝導体PbのRuへの接合と電流抑制異常 (スケッチ)

【II】 微視的な超伝導方程式に基づいた非従来型超伝導の研究

超伝導引力を導く有効相互作用を、Hubbard模型のオンサイト斥力 U に対する摂動項の解析に基づいて調べました。3次までの摂動項各項について、ファインマン・ダイアグラムで表した電子散乱過程が、偶・奇パリティ超伝導の安定性をどのように導くかを、超伝導固有値方程式の解析から相図に示し、その超伝導対称性ごとに状態密度・スピン揺らぎ・フェルミ面波数トポロジーの摂動項への寄与の解析から超伝導発現機構を説明しました。

摂動項各項を分類すると、特性の波数で増強したスピン揺らぎは主に2次摂動項を通して超伝導引力を導き、一方で3次摂動項はフェルミ面の波数空間でのトポロジーに対応したincommensurate波数依存性から超伝導安定性を導きます。さらにエネルギーバンドのvan Hove特異点付近の状態密度増大による電子相関効果の増強が、超伝導安定性を強くします。このようなフェルミ面波数依存性・エネルギーバンド構造と超伝導対称性の結びつきが、超伝導を安定性を導く機構が、超伝導対称性とフェルミ面波数トポロジーの結びつきからもたらされることが、摂動項の数理構造と波数依存性に基づいて説明しました。

1. 「二次元ハバード模型における超伝導対称性の三次摂動論による解析」

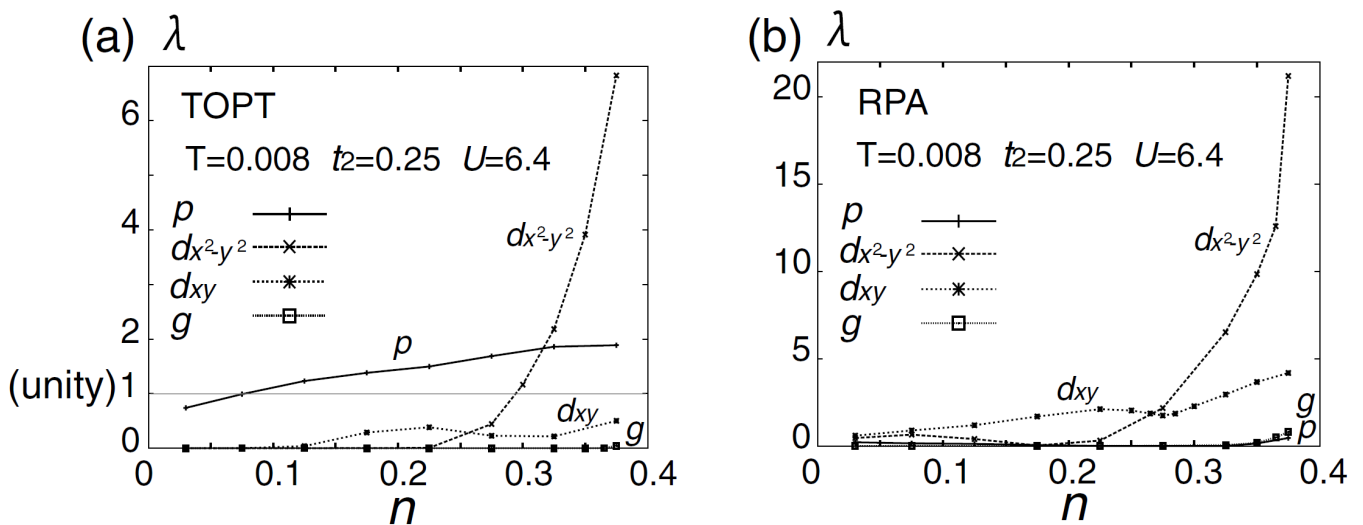
“Third Order Perturbation Analysis of Pairing Symmetry in Two-Dimensional Hubbard Model”

Hirono Fukazawa(Kaneyasu), and Kosaku Yamada,

Journal of the Physical Society of Japan 71, 1541- 1547 (2002). [査読有] [https://doi.org/10.1016/S0022-3697\(02\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0022-3697(02)00066-5)

電子の波数依存性と電子密度の変化による超伝導対称性 (p, d, g 波) ごとの安定性変化を、正方格子のtight-binding近似でFermi面を表して、Hubbard模型のオンサイト斥力 U に対する三次摂動論で超伝導有効相互作用を評価し、Eliashberg方程式の数値解析で調べました。安定化する対称性について、電子数と次近接飛び移り積分を軸とした超伝導対称性の相図として示しました。

超伝導有効相互作用におけるon-site電子間斥力の三次摂動の電子散乱過程をFeynman diagramで示し、Eliashberg固有値方程式の固有値から超伝導対称性ごとの安定性を解析しました。二次摂動項はRPA近似と同様に主にスピン揺らぎから超伝導を安定化し、三次摂動項は特定波数のスピン揺らぎに限らずにフェルミ面トポロジーを反映した波数依存性から超伝導を安定化します。この電子相関が介する微視的な超伝導発現機構を、フェルミ面、スピン感受率の波数依存性、状態密度、超伝導対称性ごとの超伝導有効相互作用の各摂動項の波数依存性の解析から説明しました。更に、三次摂動項の効果で安定化する p 波と、反強磁性スピン揺らぎで安定化する d 波超伝導について、飛び移り積分の大きさを変えて超伝導転移温度の電子数依存性を計算し、その振舞いを発現機構とフェルミ面波数との関係から説明しました。



電子数に対する超伝導対称性ごとのEliashberg方程式の固有値。

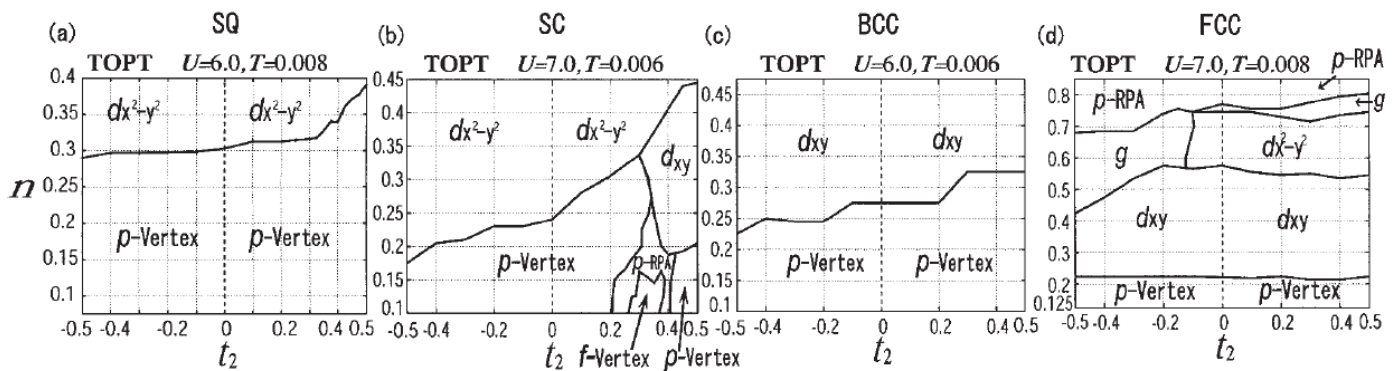
2. 「3次元格子におけるオンサイトクーロン斥力によって誘起される超伝導の解析」

“Analysis of Superconductivity Induced by On-site Coulomb Repulsion on Three-dimensional Cubic Lattice - Based on Third Order Perturbation Theory”, Hirono Fukazawa (Kaneyasu), Hiroaki Ikeda and Kosaku Yamada, Journal of the Physical Society of Japan 72, 884-894(2003). [査読有] <https://doi.org/10.1143/JPSJ.72.884>

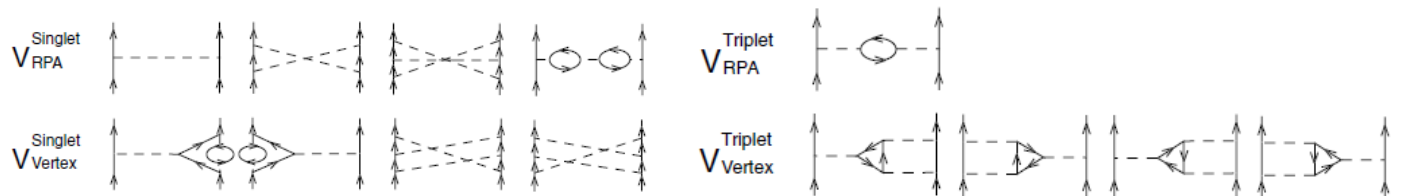
次元性、格子構造、フェルミ面と電子密度を変えた場合に、超伝導対の軌道運動量対称性がどのように変わるかを、運動量依存性と電子相関の結びつきからもたらされる超伝導有効相互を摂動論での波数散乱過程の評価から調べて、微視的描像によるEliashberg超伝導固有値方程式の解析から、結晶格子点群に基づいた超伝導対称性の安定性とその機構を説明しました。

正方、単純、体心、面心立方格子でのフェルミ面をtight-bindingモデルで表し、電子密度と次近接飛び移り積分を軸とした相図に、超伝導対称性の安定性を固有値方程式の解析から示しました。スピン一重項と三重項超伝導の軌道対称性： p, d, f, g 波について、超伝導の発現機構の違いを、格子対称性や電子密度に基づくフェルミ面の波数依存性、その波数トポロジーによるスピン揺らぎの違いや、電子エネルギーバンドのvan Hove特異点付近での電子状態密度増大に基づいて説明しました。超伝導方程式において、超伝導状態を導く有効相互作用を、オンサイト電子間斥力の3次までの摂動項で評価し、そのファインマン・ダイアグラムで表された電子散乱過程のうち、どの寄与が発現機構に関わっているかを超伝導対称性ごとに解析して、その超伝導機構を説明しました。

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ではなく、フェルミ面トポロジーを反映した波数依存性で超伝導を安定化する機構を、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有効相互作用の摂動項の各項の関係を解析することで説明しました。



格子構造（正方格子 SQ、単純立方 SC、体心立方 BCC、面心立方 FCC）について、電子のフェルミ面の波数依存性（運動量依存性）を変える次近接飛び移り積分 t_2 （横軸）と電子密度 n （縦軸）の値に対して、超伝導対の軌道対称性(p,d,f,g)の安定性を示した相図



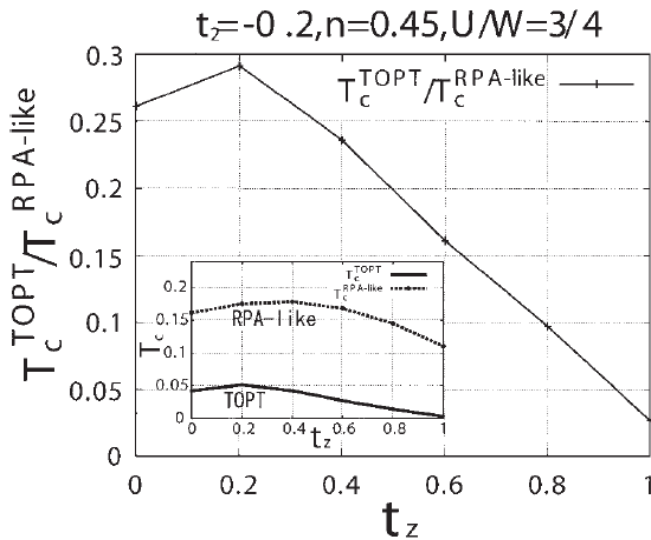
スピン 1 重項（左）と 3 重項（右）超伝導対のための有効相互作用を、3次までの摂動項で評価したファインマン・ダイアグラム。V_{RPA}は特定波数のスピン揺らぎから、一方、V_{Vertex}はスピン揺らぎではなくフェルミ面トポロジーによる波数依存性から超伝導安定性（超伝導方程式の固有値を大きくする寄与）を与える。

3. 「CeIn₃の反強磁性スピン揺らぎによるd波超伝導」

“Theory of Superconductivity of CeIn₃ in Heavy Fermion System”, Hirono Fukazawa (Kaneyasu), and Kosaku Yamada, Journal of the Physical Society of Japan 72, 2449–2452(2003). (Letter). [査読有] <https://doi.org/10.1143/JPSJ.72.2449>

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。



電子運動量依存性 (Fermi 面波数依存) の3次元性 (横軸: k_z 方向の飛び移り積分 t_z) を強くすると、反強磁性揺らぎが弱くなり超伝導転移温度 T_c (縦軸) が下がる。

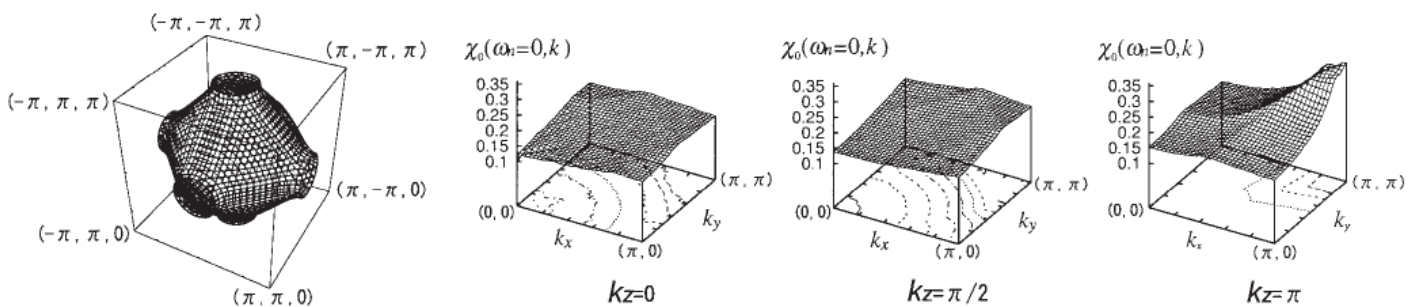
$$\lambda \Sigma_a^\dagger(k) = - \sum_{k'} V(k, k') |G(k')|^2 \Sigma_a^\dagger(k').$$

$$V_{\text{RPA}}(k, k') = U + U^2 \chi_0(k - k) + 2U^3 \chi_0^2(k - k'),$$

$$V_{\text{Vertex}}(k, k') = 2U^3 \text{Re} \sum_{k''} G_0(k + k'' - k') (\chi_0(k + k'') - \phi_0(k + k'')) G_0(k'').$$

Green関数を用いた超伝導固有値方程式と、オンサイト斥力Uに対する3摂動でのスピン1重項超伝導対の有効相互作用 (右)。超伝導対の軌道が $d_{x^2-y^2}$ 対称性を持つ場合は、主に V_{RPA} の内二次摂動項により固有値が大きくなる。

これは感受率 χ_0 の波数依存性に表れる反強磁性スピン揺らぎが寄与して超伝導を安定化させていることに対応する。



Ce4f 電子の寄与するフェルミ面波数依存性と、感受率に見える波数空間での (π, π) 近傍のスピン揺らぎ。

フェルミ面の波数依存性 (左端図) に見える (π, π, π) ベクトル付近のネスト的特徴が、感受率の波数依存性 (右端図) において (π, π, π) 近傍のスピン揺らぎを導く ($k_z = \pi$ 面での $(k_x, k_y) = (\pi, \pi)$ 近傍のスピン揺らぎ) に対応。

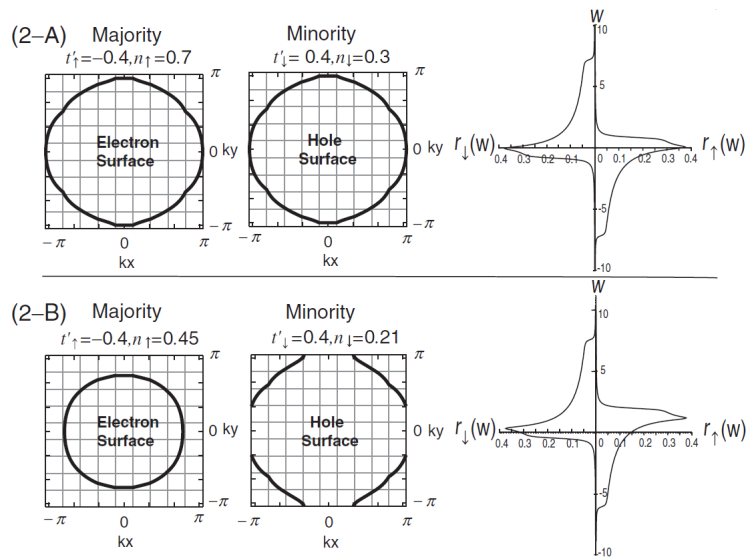
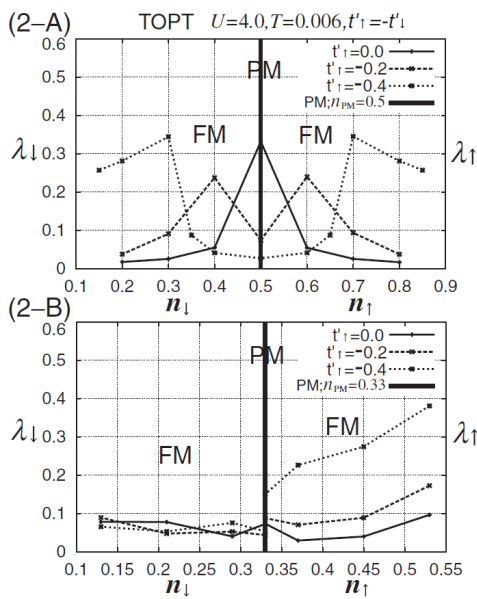
4. 「超伝導と強磁性の共存機構についての理論的研究」

“Theoretical Study on Coexistence of Superconductivity and Ferromagnetism”, Hirono Kaneyasu, and Kosaku Yamada, Journal of the Physical Society of Japan 74, 527-530 (2005). (Letter). [査読有]

<https://doi.org/10.1143/JPSJ.74.527>

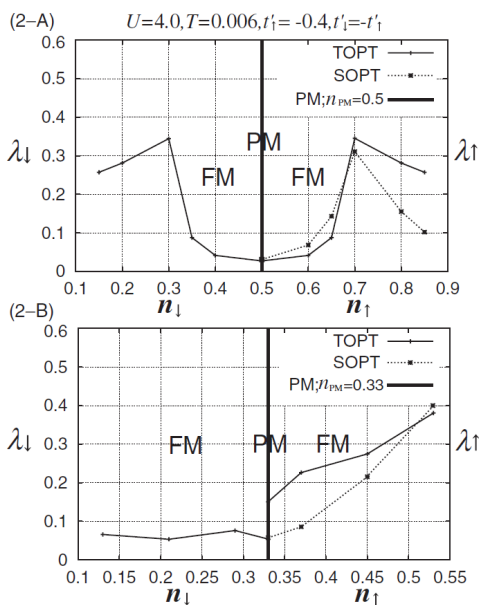
強磁性超伝導を対象に、強磁性がスピン三重項超伝導を誘起する機構を調べた。強磁性下電子状態に特徴的な up スピンと down スピンバンドを 2 バンドモデルとして表し、擬二次元強磁性 Hubbard 模型で電子間斥力 U に起因した超伝導対引力を導く有効相互作用を摂動論で求めて、Eliashberg 超伝導方程式の数値解析から超伝導固有値の強磁性磁化依存性を調べました。

up スピンと 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、up スピンだけではなく、両スピンの相互作用が寄与して強磁性下でスピン三重項超伝導が安定化する機構を、超伝導方程式の固有値の解析から示しました。



Eliashberg 方程式の固有値の up と down スピン電子数に対する変化。(強磁性磁化の強さに対する変化。)

強磁性下超伝導を導く up と down スピン電子のフェルミ面と状態密度



Tight-binding 模型による up と down スピンの 2 バンドについて、Hubbard 模型のオンサイト斥力 U に対する摂動論で三次まで求めた超伝導有効相互作用において、二次摂動項 SOPT と三次摂動項 TOPT の固有値に対する寄与。

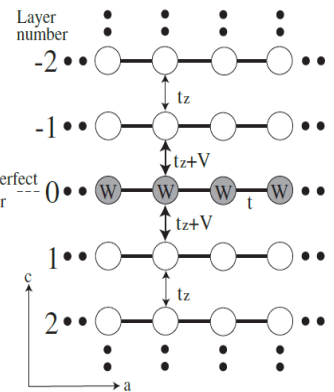
5. 「強相関電子系における欠陥格子相近く d波の超伝導転移温度の上昇」

“Increase in d-wave Superconducting Transition Temperature near Imperfect Layer in Correlated Electron System”, Tetsu Nobukuni(大学院生), Hirono Kaneyasu, Nobuyuki Shima, and Kenji Makoshi, Journal of the Physical Society of Japan 78, 113703-1-4(2009). (Letter). [査読有] <https://doi.org/10.1143/JPSJ.78.113703>

CeIrIn₅は電気抵抗による超伝導転移温度は1.2Kでありバルク超伝導転移温度0.4Kよりも高い。これについて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て、更に超伝導方程式の固有値の大きさに対応した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分かりました。この界面での強いスピン揺らぎにより、d波超伝導に対する超伝導方程式の層ごとの固有値は、表面層において局所的に大きくなります。これは界面において超伝導転移温度の上昇することを示しています。

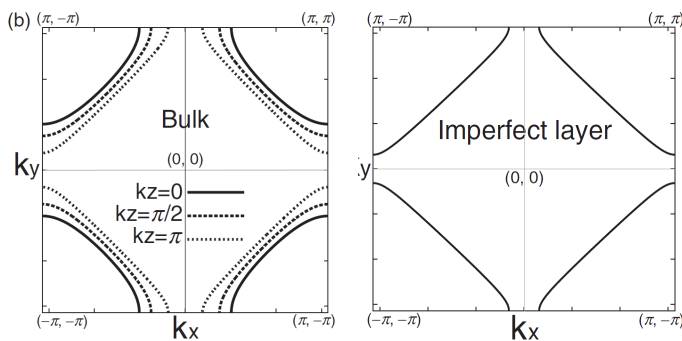
このような表面でのスピン揺らぎ増強の機構は、Dyson-Gor'kov方程式から導かれる界面ポテンシャルに起因した表面電子状態から理解出来ます。反強磁性スピン揺らぎはフェルミ面波数依存性のネスト的な特徴から導かれます。このようなバルクの表面では、表面層の原子ポテンシャルがバルク層と異なることで電子が表面に局在して電子数が増えることで、フェルミ面波数依存性は変化してネストの特徴が強まります。このようにネストの特徴が強くなると反強磁性スピン揺らぎが増強して、d波超伝導の高い超伝導転移温度を導く機構を、Dyson-Gor'kov方程式による表面状態とスピン感受率の波数構造との関係を解析して説明しました。



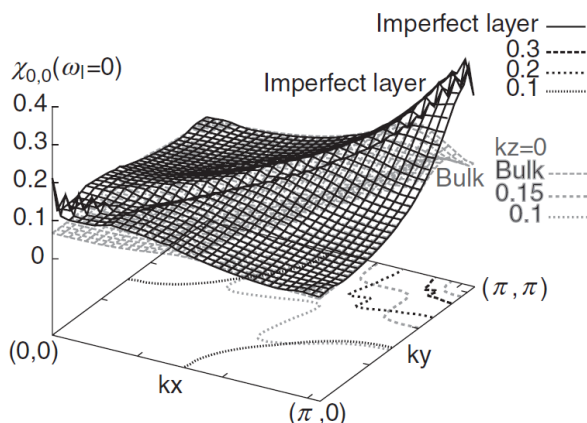
$$\begin{aligned}
 G_{m,n}^I(k_{\parallel}, \omega_l) = & G_{m-n}^B(k_{\parallel}, \omega_l) \\
 & + [G_m^B(k_{\parallel}, \omega_l)W + G_{m-1}^B(k_{\parallel}, \omega_l)V \\
 & + G_{m+1}^B(k_{\parallel}, \omega_l)V]G_{0,n}^I(k_{\parallel}, \omega_l) \\
 & + G_m^B(k_{\parallel}, \omega_l)VG_{1,n}^I(k_{\parallel}, \omega_l) \\
 & + G_m^B(k_{\parallel}, \omega_l)VG_{-1,n}^I(k_{\parallel}, \omega_l),
 \end{aligned}$$

表面層からの層ごとの電子状態を導くDyson-Gor'kov方程式。

表面とバルクの1電子Green関数: G^I, G^B と、表面とバルクの原子ポテンシャル: V, W 。 m, n は層番号。



不完全相とバルクにおけるフェルミ面と感受率。不完全相の原子ポテンシャルの効果は不完全相に局所的に電子数を増やして、フェルミ面におけるフィリングを増してネストの特徴を強める。(左図: フェルミ面)



この(π, π)のネストの特徴の強まりは、不完全相で反強磁性揺らぎを強くして(左下図: 感受率)、d波超伝導が安定化される。

このため不完全相の超伝導転移温度はバルク層よりも高くなる。

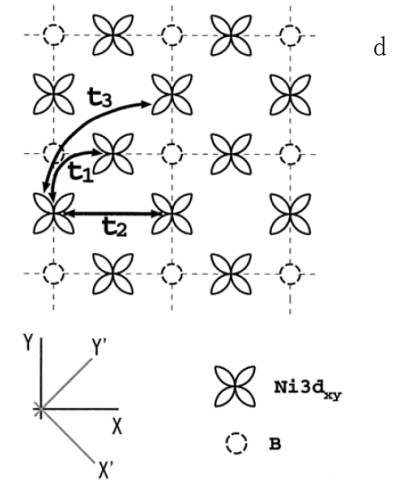
6. 「摂動論に基づいた硼素炭化物における超伝導の研究」

“Study of Superconductivity in Borocarbides on the Basis of Perturbation Theory”, Hirono Fukazawa (Kaneyasu), Takuji Nomura, Hiroaki Ikeda, and Kosaku Yamada, Journal of the Physical Society of Japan 70, 3011-3017 (2001). [査読有] <https://doi.org/10.1143/JPSJ.70.3011>

硼素炭化物 YNi_2B_2C 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 YNi_2B_2C の転移温度程度にまで上がり d 波超伝導の可能性はあるが、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。



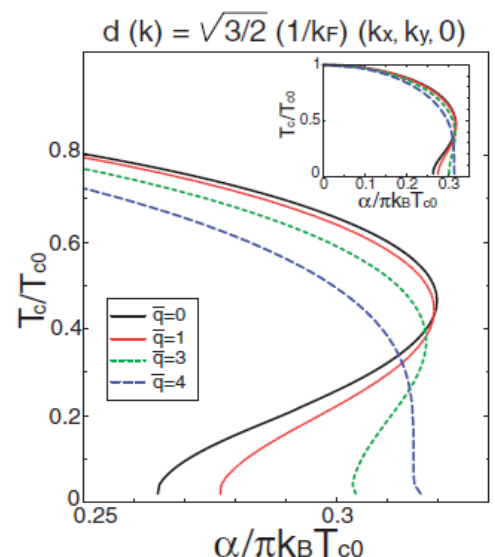
【Ⅲ】空間反転対称性のない系・表面系の超伝導

1. 「空間反転対称性の破れた超伝導体CePt3Siにおける反対称なスピン軌道相互作用による不均一なスピン三重項超伝導」

“Nonuniform Spin Triplet Superconductivity due to Antisymmetric Spin-Orbit Coupling in Noncentrosymmetric Superconductor CePt₃Si”, Hiroko Tanaka (大学院生), Hirono Kaneyasu, and Yasumasa Hasegawa, Journal of the Physical Society of Japan 76, 024715-1-7 (2007). [査読有] <https://doi.org/10.1016/j.physc.2007.03.034>

スピン一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。

一方で、CePt₃Siのような空間反転対称性の破れた系でのラッシュュバ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 のラッシュュバ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。



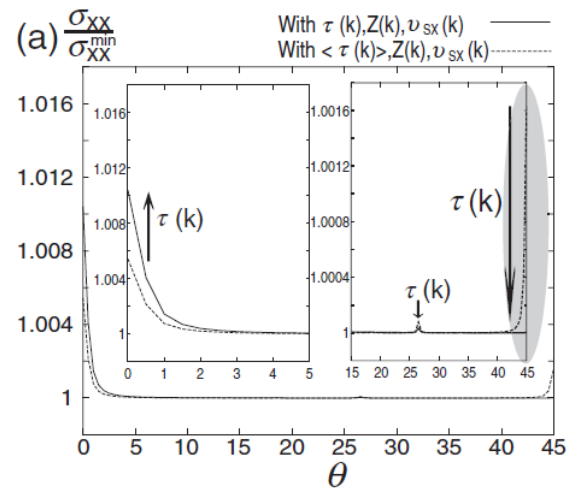
FFLO 状態で現れる超伝導転移温度 T_c のラッシュュバスピン軌道相互作用の強さ α に対する依存性

2, 磁場中の電子状態における電子相関効果: 角度依存磁気伝導率におけるスピン密度波の効果

“Effect of Electron Correlation near Spin-Density-Wave on Angle Dependence of Magnetoconductivity”, Hirano Kaneyasu, Keita Kishigi and Yasumasa Hasegawa, *Journal of the Physical Society of Japan* 75, 023709-1-4(2006). (Letter). [査読有] <https://doi.org/10.1143/JPSJ.75.023709>

疑1次元有機導体について、オンサイト斥力がスピン密度波 (SDW) を介してフェルミ波数を変化させる効果を調べて、このフェルミ面の変化が磁気伝導率の磁場角度依存性にどのように現れるかを調べました。Tight-binding模型と、Hubbard模型のon-site電子間斥力Uについての乱雑位相近似により、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の解析から調べました。この変形したフェルミ面波数での電子の運動方程式を数値的に解いて、さらに角度磁気伝導率を計算し、スピン密度波による電子相関効果が磁場角度依存性に現れる様子を示しました。

結果として、右図のように磁気伝導率 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があることを示しました。



磁気伝導率 σ_{xx} の角度依存性における、スピン密度波による強度変化

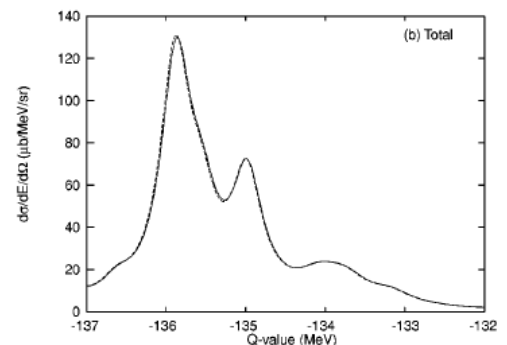
[IV] 原子核理論における研究

1, 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, 058202-1-058202-4 (1999). “Residual interaction effects on deeply bound pionic states”, Satoru Hirenzaki, Hirano Kaneyasu, Kenji Kume, Hiroshi Toki, Yukiko Umemoto [査読有] <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.60.058202>

(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え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ました。相対論的なKlein-Gordon方程式の解析を行い、エネルギーシフトと微分断面積を計算して求めました。

解析から核子空孔- 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微分断面積の理論値を大きく変えるほどの影響は与えないことがわかりました。これまでの残留相互作用の効果を考慮しない理論予測値からの実験値への考察には重大な変化は与えないといえますが、将来さらに高い精度の測定が行われる際には残留相互作用を考慮した微分散乱断面積との比較が必要となります。



核子空孔- π 中間子粒子残留相互作用を考慮しても微分断面積への影響は小さい。