

jh200032-NAH

自発磁化軸に垂直な磁場下における自発磁化スピン三重項超伝導と電流

兼安 洋乃（兵庫県立大学）

概要

Sr_2RuO_4 の超伝導について、一軸圧力下 μSR 測定では自発磁化発現温度と超伝導転移温度との分離が報告されている。この実験事実を説明に向けて、 Sr_2RuO_4 結晶格子に対応した D_{4h} 点群での E_g 既約な non-unitary 自発磁化状態を仮定し、 Sr_2RuO_4 のバルク状態の候補と成り得るかを、磁場中における超伝導の解析結果から考察した。不均一超伝導では磁場に誘起された自発磁化現象が顕著に現れやすいため、このような系として Sr_2RuO_4 -Ru 共晶系を対象に、磁場中の chiral 安定化と常磁性電流、及びスクリーニング電流の様子を Ginzburg-Landau 方程式の数値計算で調べた。又、超伝導ギャップ構造における水平ライン極小構造と、磁化率の温度依存性における減少を計算で示した。これらの理論結果と実験事実を比較すると、non-unitary E_g の自発磁化超伝導はトンネル微分コンダクタンスに見られるゼロバイアス異常の磁場依存性と整合しており、比熱の磁場角度依存性とも矛盾しない。一方で、理論の磁化率は RuO_2 面内磁場において減少を示すものの、実験の NMR Knight-shift の下がり幅には足りず、定量的には整合しない。この点で、non-unitary E_g 既約の自発磁化状態が Sr_2RuO_4 のバルク状態の候補となることは難しいと考える。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

東北大学 大阪大学

(2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

(3) 参加研究者の役割分担

兼安洋乃（兵庫県立大学）：

Ginzburg-Landau 方程式の数値解析、超伝導ギャップと磁化率の計算、論文執筆、成果発表、Eliashberg 方程式の数値解析。

長谷川泰正（兵庫県立大学）：

スピン三重項超伝導の ^3He 超流動理論との類似性からの考察。

伊達進（共同研究拠点；大阪大学サイバーメディアセンター）：

コード計算性能分析, コードチューニング。

Manfred Sigrist（スイス連邦工科大学）：

超伝導の群論分類からの考察。

野村拓司（量子科学技術研究開発機構）：

Eliashberg 方程式の数値解析。

大塚剛生（兵庫県立大学大学院生）：

Ginzburg-Landau 方程式の数値解析、超伝導ギャップと磁化率の計算、成果発表。

吉田薪史（大阪大学大学院生）：

コード計算性能分析, コードチューニング。

春名信吾（兵庫県立大学学部生）：

超伝導ギャップと磁化率の計算。

※学生については課題非参加者であるが、卒業研究等を通して本研究に協力。

2. 研究の目的と意義

研究の意義；

超伝導は電子がペアとなる状態です。そのスピンと軌道の組み合わせから、様々な状態をとります。スピンが反平行の状態をスピン一重項、平行の状態をスピン三重項と呼びます。超伝導物質の大半は一重項状態ですが、稀に三重項状態が見つかります。なぜ限られた超伝導体のみ、スピン三重項状態が発現するのかは、まだ十分に理解されていません。一方、電子ペアのもつ軌道の性質にも種類があります。電子ペアの軌道により、小さな磁石とみなせる性質が現

ることがあります。この自発磁化をもつ状態は、chiral 状態と言います[図 1]。自発磁化を持つ超伝導体も多くはなく、どうして一部の超伝導体で自発磁化が発現するのも理由は明らかではありません。



[図 1] chiral 状態における超伝導電子ペアの自発磁化状態。

スピン三重項や軌道角運動量による自発磁化状態では、電子ペア自身がスピンと軌道から磁化を生じており、本来、磁場（磁化）と折り合いが悪いはずの超伝導が、どうして自ら磁化を発するのは説明が付きません。この機構を明らかにすることは、超伝導の本質をミクロな電子状態から理解することといえます。このような電子ペアのスピンと軌道による磁化は、ミクロな磁石とも言え、外部磁場と結合することで、本質的な現象を現します。そのため、磁場中の超伝導の状態を解明することは、スピン三重項超伝導や自発磁化超伝導の本質に迫るのに有効な研究です。[図 2]

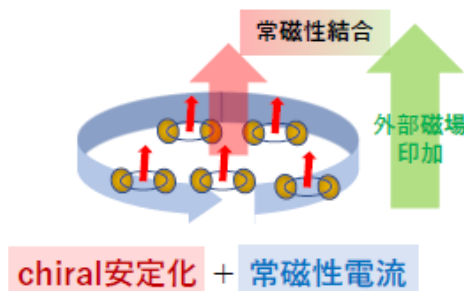


[図 2] chiral 状態における超伝導電子ペアの軌道による自発磁化。

研究の目的:

この問いに答えるためには、Ginzburg-

Landau 理論に基づいて磁場中の自由エネルギーとの関係から超伝導秩序変数、超伝導電流を解析することが理解に向けて効果的です。先に述べたように、通常、超伝導では外部磁場とは逆向きの磁化を生じるスクリーニング電流が流れます。一方、軌道磁化をもつ状態では、もう一つ電流が加わります。その電流は、軌道磁化がミクロな磁石のように外部磁場に揃う性質から生じる常磁性電流です。[図 3]



[図 3] 軌道磁化と外部磁場の常磁性結合による chiral 安定化と常磁性電流。

電子ペアの軌道磁化は、ミクロ磁石のように外部磁場方向と揃う方がエネルギー的に得であり、この外部磁場との常磁性結合が自発磁化状態の安定化と常磁性電流をもたらします。この磁場による chiral 安定化と常磁性電流は、磁場中で超伝導が空間的に変化した状態で現れやすく、このような系で non-chiral な状態に外部磁場を印加すると磁場誘起 chiral 転移という顕著な相転移現象を導くことがあります。この様な、超伝導が空間的に不均一であり軌道磁化と外部磁場との結合による chiral 安定化が顕著に表れる候補物質として、 Sr_2RuO_4 の共晶系である Sr_2RuO_4 -Ru が挙げられます。この共晶系では、高温側の 3K 付近から金属 Ru と超伝導 Sr_2RuO_4 超伝導との境界から超伝導状態が生じ、不均一な超伝導状態が生じていることが実験から示唆されています。この不均一な超伝導相から温度が下がり、単体 Sr_2RuO_4 の超伝導転移温度 1.5K 近くになると転移して系全体に広がったバルク超伝導相に転移します。この共晶系の不均一超伝導相で磁場においてバルク

相が自発磁化状態にあることを示すことは、単体 Sr_2RuO_4 超伝導が chiral 状態にあることを示すことと言えます。

本研究では、この共晶系の Sr_2RuO_4 のバルク状態を、スピン三重項超伝導の E_u 既約の non-unitary な自発磁化状態と仮定して、磁場誘起 chiral 転移と、それに伴う常磁性電流、そしてスクリーニング電流の詳細を Ginzburg-Landau 方程式の数値解析で示調べて、その磁場依存性の機構を外部磁場と軌道磁化との常磁性結合による磁場エネルギー利得との関係から明らかにします。加えて、バルクでの non-unitary な自発磁化状態の磁化率の温度依存性と、超伝導ギャップの波数構造を示します。

これらの理論結果を、トンネル微分コンダクタンス、NMR Knight-shift の温度依存性、そして比熱の磁場角度依存性の実験事実と比較することで、この non-unitary E_u の自発磁化状態が Sr_2RuO_4 のバルク状態の候補と成り得るかどうかを考察します。

また、 D_{2h} 対称の UTe_2 において候補と成る磁場中超伝導状態について、Ginzburg-Landau 自由エネルギー微分項を導出し、 Sr_2RuO_4 の D_{2h} 対称の場合と微分項の数値構造を比較することで、超伝導の磁場依存性と超伝導電流の違いを調べます。

3. 当拠点公募型研究として実施した意義 公募研究によるベクトル並列計算機の必要性；

数値計算は大阪大学と東北大学のスーパーコンピューター SX-ACE 及び SX-Aurora TSUBASA を用いて実行しました。これらの計算機はベクトル並列化機能を備えたスーパーコンピューターです。このベクトル化による高速計算は、共晶系において超伝導秩序変数の Ru 金属境界からの距離依存性を解析する上で効果的です。計算では Ru 金属境界から超伝導状態にある距離を十分長くとり、境界付近での秩序変数及びベクトルポテンシャルの距離における急激な変化を細かい刻みの微分評価として扱うこと

が必要となります。このため、距離についてのメッシュ数が増えるため、解を得るまでの収束時間は長時間となります。この計算を高速化するために、距離のメッシュ数ごとの計算をベクトル化処理して、SX 系の Vector Engine を活用した計算を行います。高速化に適したチューニングを、共同研究拠点である大阪大学サイバーメディアセンターの情報工学分野の研究者に連携研究として行ってもらい、ベクトル化効率を上げることでチューニング前と比較して約 65% の計算時間短縮に成功しました。この高速化により磁場依存性と温度依存性、及び既約要素の結合比を変えて超伝導秩序変数と超伝導電流の距離依存性の変化を詳細に調べることが可能となりました。

このように JHPCN 公募型研究を通しての物性物理と情報工学という異分野連携により、大幅に計算高速化を行うことが出来たことで研究が進展したことは、意義深いと言えます。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要
該当無し。
5. 今年度の研究成果の詳細

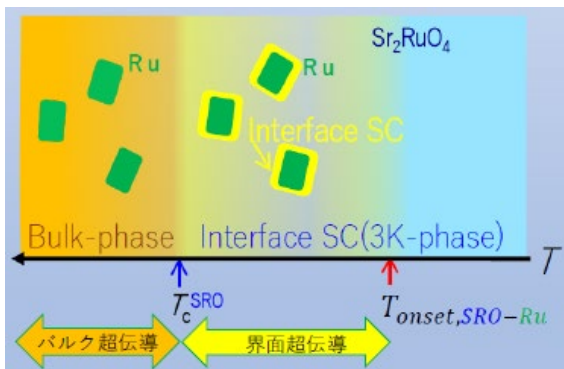
Sr_2RuO_4 超伝導では Kerr 効果と μSR 測定から自発磁化が報告されており、一軸圧力下の μSR 測定で超伝導転移温度と自発磁化発現温度が異なるため、2 成分秩序変数で表された自発磁化超伝導の可能性が議論されています。又、共晶系 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4\text{-Ru}$ の不均一超伝導では (図 4)、tunneling spectroscopy の微分コンダクタンスでのゼロバイアス異常の磁場依存性から、Ru/ Sr_2RuO_4 面に垂直な秩序変数の磁場誘起による 2 成分秩序変数状態への転移が議論されています。ごく最近では、 RuO_2 面内磁場下で温度低下による NMR Knight-shift 減少が報告されています。

これら実験事実に対して、 Sr_2RuO_4 の超伝導状態の候補の一つとして、スピン三重項超伝導を仮定し、点群 D_{4h} 対称性の既約 E_u における non-

unitary 状態 ($k_x z + \varepsilon k_z x$, $k_y z + \varepsilon k_z y$) の自発磁化 (chiral) 状態を考へて、磁化率と超伝導ギャップを数値計算で示しました。次にこの状態をバルク状態と仮定した共晶系 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4\text{-Ru}$ の不均一超伝導 (3-K 相) において、自発磁化軸に平行 (RuO_2 に垂直) な磁場による自発磁化安定化と伴う常磁性電流、及びスクリーニング電流を Ginzburg-Landau 方程式の解析から明らかにしました。

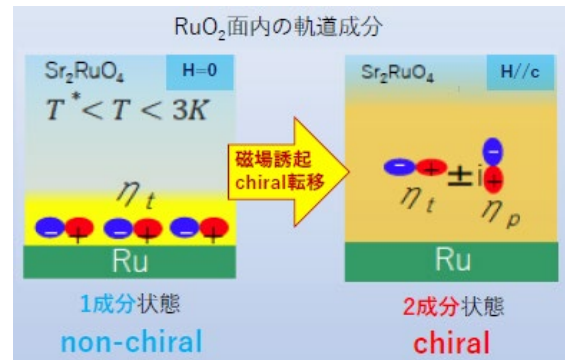
これら理論結果と実験事実を比較すると、共晶系 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4\text{-Ru}$ での Tunneling spectroscopy の微分コンダクタンスにみられるゼロバイアス異常の磁場方向依存性と整合し、比熱の磁場角度依存性についても矛盾しませんでした。一方、NMR Knight-shift の温度依存性における減少については理論からも磁化率の減少は示せたものの、定量的には実験の下がり幅には足りません。この点で、スピン三重項超伝導の non-unitary E_u の自発磁化状態が、 Sr_2RuO_4 のバルク状態の候補となることは難しいと考えます

次に、 UTe_2 を対象とした点群 D_{2h} において、磁場中で候補と成るスピン三重項超伝導の既約要素について Ginzburg-Landau 自由エネルギーを導出し、その微分項の数理構造に基づいて磁場依存性と超伝導電流の様子を調べました。現在、この結果を Sr_2RuO_4 の D_{2h} 対称と比較して、超伝導の磁場依存性と超伝導電流の違いを調べています。自由エネルギー微分項の、 D_{4h} と D_{2h} 対称の既約要素に見られるスピンと軌道成分の違いに着目して考察しているところです。



[図4] 共晶系 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4\text{-Ru}$ の界面超伝導状態。3-K 相の不均一超伝導相においては、Ru 金属界面の近くから超伝導状

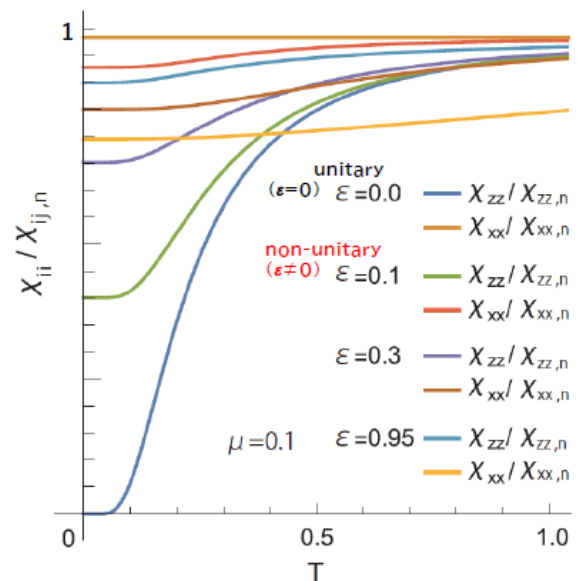
態が生じ、1.5K 近くのバルク超伝導転移温度近くでは全系が超伝導状態となる。



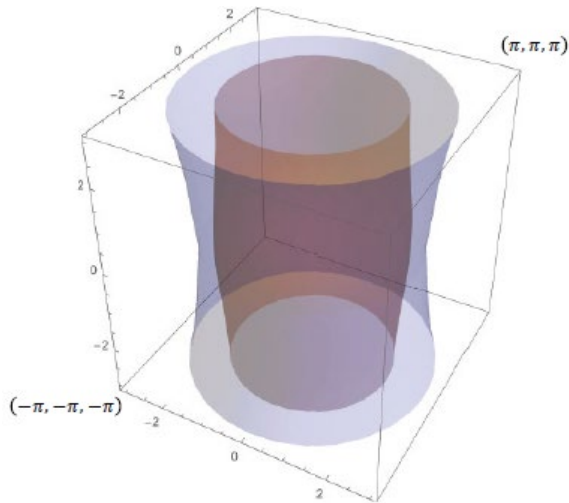
[図5] 不均一な界面超伝導での、磁場誘起 chiral 転移に伴う超伝導秩序変数の変化を RuO_2 面上の軌道成分で表示したものの。既約 E_u における non-unitary 状態の要素: ($k_x z + \varepsilon k_z x$, $k_y z + \varepsilon k_z y$) に対する秩序変数を其々 η_t と η_p としている。 η_t と η_p は Ru 金属境界に対する平行成分と垂直成分であり、chiral 状態では η_t と $i\eta_p$ は実数と純虚数である。不均一超伝導の onset 温度 (3K) 付近のゼロ磁場では Ru 金属境界に平行な η_t が生じており 1 成分状態 (non-chiral 状態) となっている。この non-chiral 状態に RuO_2 面に水平な外部磁場を印加すると、境界面に垂直な η_p が誘起されて 2 成分状態 (chiral 状態) の自発磁化状態となる。

計算結果の詳細:

[1] Sr_2RuO_4 の超伝導状態を E_u の non-unitary な自発磁化状態と仮定し、磁場下の温度低下での磁化率減少 [図6] と、no-nodal な水平ライン最小値をもつ超伝導ギャップ [図7] を示しました。



[図 6] 磁化率 χ の温度依存性。Non-unitary 状態 ($\varepsilon \neq 0$) 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。



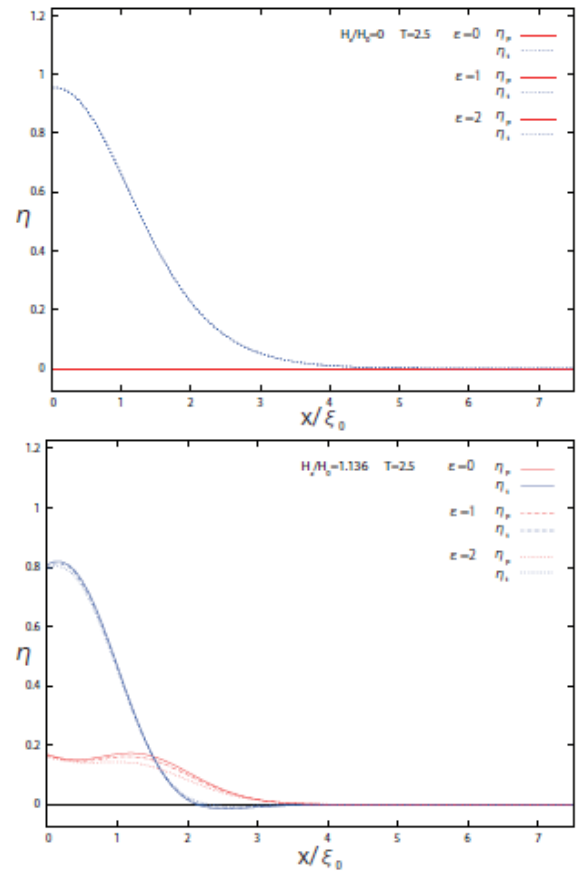
[図 7] 波数空間における超伝導ギャップ構造。内側(茶色)は Fermi 面で、2 次元電子状態のモデルとして k_z 軸に沿ったシリンダー状の波数依存性を考えた。外側(紫色)の超伝導状態の波数依存性は、 $k_z=0$ において水平ライン的に極小を示す。

[2] 次に、この状態をバルクと仮定した Ginzburg-Landau 方程式から自発磁化状態の安定化を解析しました。共晶系 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4\text{-Ru}$ での $\text{Ru}/\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ 境界からの秩序変数の距離変化を考えた 1 次元の 3-K 相モデルに対して、Ginzburg-Landau 方程式の解析からゼロ磁場での chiral 状態、自発的 chiral 電流とスクリーニング電流を計算で示しました。又、磁場中での磁場誘起 chiral 安定化とそれに伴う常磁性電流、スクリーニング電流の距離依存性を求めました。これらの特性を unitary E_U でも計算し、non-unitary E_U との違いを比較しました(図 8-11)。

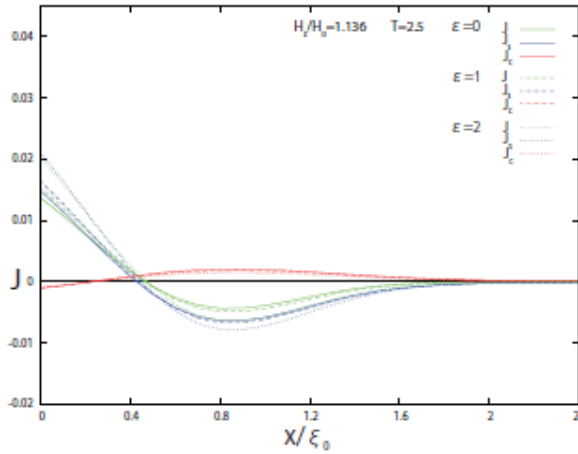
結果として、 RuO_2 面に垂直な磁場印加による自発磁化安定化は、unitary と non-unitary の両方で得られました(図 8, 10)。この安定化を阻害しない程度に、unitary に比べて non-unitary では、常磁性電流の大きさは少し抑えられました(図 9, 11)。スクリーニング電流は、unitary と non-unitary での大小関係が磁場の大きさと境界からの距離により変わりますが、

絶対値の変化は小さいことが分かりました。

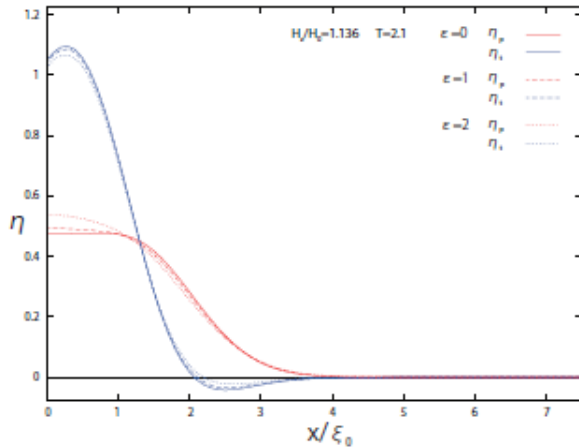
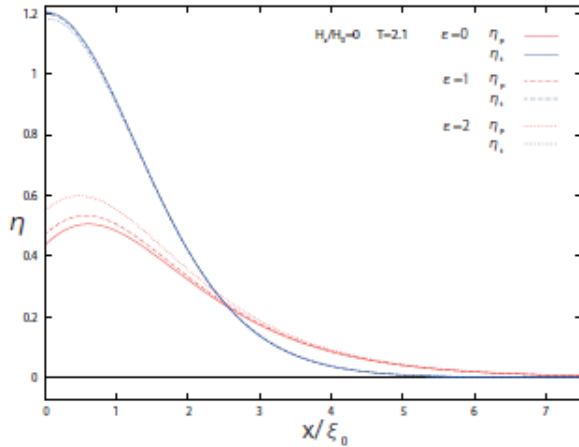
ゼロ磁場では、自発的 chiral 電流とスクリーニング電流の両方が、unitary よりも non-unitary において絶対値の大きさを少し小さくしますが、chiral 安定性は保たれます。自発磁化に垂直な磁場では、Ginzburg-Landau 自由エネルギーの微分項の数理構造から、磁場誘起 chiral 安定化と常磁性電流は導かれず、自発磁化状態の安定性と chiral 電流はゼロ磁場の特性と定性的に同じとなることが分かりました。



[図 8] 不均一超伝導相のオンセット温度 3K 付近の $T=2.5\text{K}$ における、超伝導秩序変数 η の距離依存性。(上図) Ru 金属境界近くに平行に生じた 1 成分 η_t (青色) で表される non-chiral 状態。(下図) 上図の non-chiral 状態に磁場印加を印加すると境界に垂直な成分 η_p (赤色) が誘起され、2 成分状態の自発磁化状態となり、磁場誘起 chiral 転移が起こる。 ε は既約 E_U における non-unitary 状態の要素: $(k_z z + \varepsilon k_x x, k_z z + \varepsilon k_y y)$ の結合の係数であり、 $\varepsilon \neq 0$ は non-unitary 状態、 $\varepsilon = 0$ は unitary 状態に対応している。



[図 9] 図 8 の下図の磁場中 chiral 状態に対応した超伝導電流 J の距離依存性。磁場中 chiral 安定化に伴い生じた常磁性電流 (赤線) と、外部磁場に対して反磁性的な磁化を生じるスクリーニング電流 (青線)。全電流は常磁性電流とスクリーニング電流の和 (緑線)。

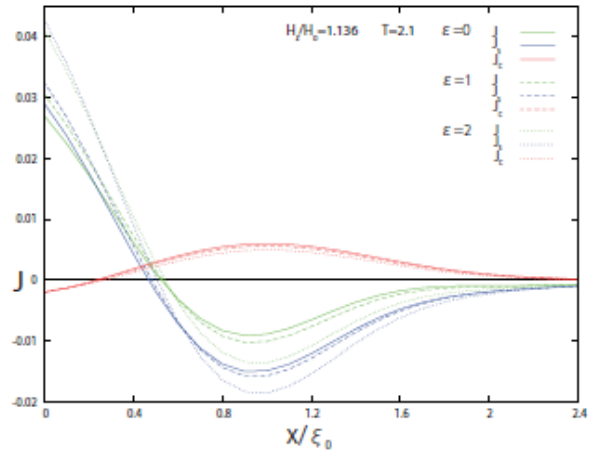
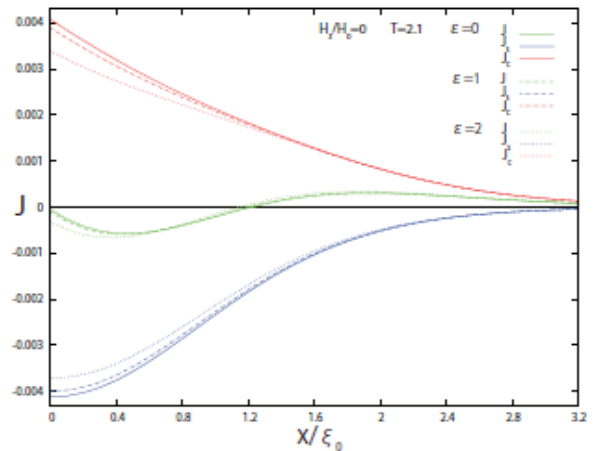


[図 10] 低温側 $T=2.1\text{K}$ における秩序変数 η の距離依存性。

(上図) ゼロ磁場で既に chiral 状態にあり、(下図) そこに磁場を印加した場合の chiral 安定化とその超伝導秩序変数の様子。chiral 状態は Ru 金属境界に対する平行成分 η_t (青色) と垂直成分 η_p (赤色) の 2 成分状態で表される。 ε は既約 E_ν における non-unitary 状態の要素;

$(k_x z + \varepsilon k_z x, k_y z + \varepsilon k_z y)$ の結合の係数であり、 $\varepsilon \neq 0$ は non-unitary 状態、 $\varepsilon = 0$ は unitary 状態に対応している。

これら [1] [2] の結果において、[1] の磁化率減少は面内磁場下の Knight-shift 減少を定性的には説明しますが、定量的には実験の減少率には下がりが見られません。一方、自発磁化状態安定化の磁場方向による違いは tunneling spectroscopy のゼロバイアス異常と整合し、non-unitary 状態においても説明出来ることが分かりました。



[図 11] 図 10 に対応した超伝導電流 J の距離依存性。

磁場中 chiral 安定化に伴い生じた常磁性電流 (赤線) と、外部磁場に対して反磁性的な磁化を生じるスクリーニング電流 (青線)。全電流は常磁性電流とスクリーニング電流の和 (緑線)。

[3] [1] の non-unitary chiral E_ν の Ginzburg-Landau 理論と、定性的には同様の結果を導く E_g の chiral d -wave について、ゼロ磁場バルクでの安定性を微視的理論で調べるた

めに、Hubbard 模型 on-site 斥力 U に対する三次摂動を用いた線形化 Eliashberg 超伝導方程式で T_c 近くでの固有値の解析を行いました。この E_g 状態は超伝導ギャップに水平ラインノードを持つため、 Sr_2RuO_4 の疑二次元的 Fermi 面 (γ 面) に対して超伝導は安定化されないことを計算で確認しました。

一方、non-unitary chiral E_u はノードを持たず水平ライン最小構造 (図 7) を持ちますが、その安定性の確認が課題として残されます。この確認のためには、多軌道・多スピン成分を扱う Eliashberg 方程式の固有値の解析となります。今後の実験等の状況から、この non-unitary E_u 状態のモデルで解析を進める必要がある場合には検討することになります。但し、[1] の理論結果より、non-unitary E_u 状態での磁化率の下がり幅 (図 6) は、NMR Knight-shift の温度変化における減少幅には足りないことから、スピン-重項の状態も含めて他の自発磁化状態も検討していく必要があると考えます。

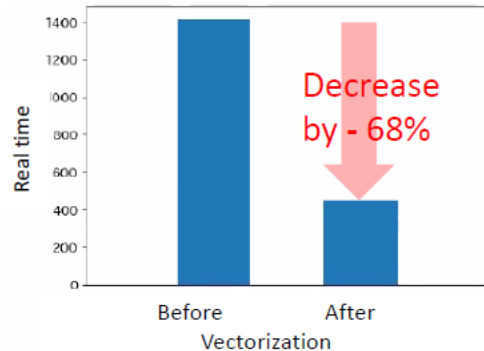
計算コード開発に関する成果;

本研究で開発した数値計算コードは、quasi-Newton 法で、境界条件付きの連立微分方程式の Ginzburg-Landau 方程式を数値的に解いて、超伝導秩序変数、ベクトルポテンシャル、超伝導電流の距離データの磁場-温度依存性を求めるものです。このコードによる数値計算を大阪大学と東北大学のスーパーコンピューター SX-ACE 及び SX-Aurora TSUBASA を用いて実行しました。配分ノード時間は、ほぼ全て使いました。

異分野 (情報工学研究者) との研究連携;

SX-Aurora に適したチューニングは JHPCN 課題 (2020 年度) の連携として、大阪大学サイバーメディアセンターの伊達進氏とその指導学生の吉田薪史氏により行われ、プログラム性能のテストが行われました。チューニングにより 99% 以上を超えるベクトル化率を達成し、計算時間は 68% 程度短縮されて計算高速化に成功

しました。この高速化により、温度、磁場パラメーターを変化させた際の、超伝導秩序変数の距離依存性の変化を詳細に解析することが可能となりました。



[図 12] SX-Aurora TSUBASA のベクトル化による計算高速化。チューニングにより 99% を超えるベクトル化率を達成し、計算時間は 68% 短縮された。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

申請計画書の主要な部分である Sr_2RuO_4 における超伝導の non-unitary 自発磁化状態の磁場依存性の研究は計画通りに進行し、成果公開のために 11 月に論文を投稿して、現在、査読レポートへの回答を作成しているところです。

計画書後半に書いた Sr_2RuO_4 の D_{4h} 対称と UTe_2 の D_{2h} 対称における超伝導の磁場依存性の比較については、 UTe_2 において候補と成る状態の Ginzburg-Landau 自由エネルギーの導出を済ませて、現在、その微分項の数理構造に基づいて秩序変数の磁場依存性と超伝導電流の解析を行っているところです。しかし、 UTe_2 の Ginzburg-Landau 方程式の数値計算については年度内には進んでおらず、次年度に取り組むことを予定しています。

今後は、この研究手法をさらに進展させて、 Sr_2RuO_4 や UTe_2 に加え UBe_{13} 等の自発磁化超伝導の候補物質なども対象にして、不均一状態や磁場中のバルク状態の超伝導の磁場依存性の研究に発展させていくことを検討しています。

7. 研究業績一覧 (発表予定も含む。投稿中・投稿予定は含まない)

- (1) 学術論文 (査読あり)
- (2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)
- 1, H. Kaneyasu, Y. Enokida, T. Nomura, Y. Hasegawa, T. Sakai, and M. Sigrist(+), “[Features of chirality generated by paramagnetic coupling to magnetic fields in the 3K-phase of Sr₂RuO₄](#)”, JPS Conference Proceedings, JPS Conf. Proc. 30, 011039 (2020), 6 pages.
- (3) 国際会議発表 (査読なし)
- 1, H. Kaneyasu, S. Yoshida, and S. Date, “[Computational simulation of chiral transition and paramagnetic current induced by paramagnetic coupling in chiral superconductor](#)”, Workshop on Sustained Simulation Performance (WSSP 31), 17 Mar. 2021, HLRS, University of Stuttgart, Germany, ONLINE [招待講演, 口頭].
- 2, H. Kaneyasu, K. Otsuka, S. Date, and Y. Hasegawa, “Spin susceptibility and field-induced chiral stability in non-unitary chiral superconductivity”, American Physical Society (APS) March Meeting 2021, 2021 年 3 月 19 日, ONLINE [ポスター].
- (4) 国内会議発表 (査読なし)
- 1, 兼安洋乃, 「[自発磁化軸に垂直な磁場下における自発磁化スピン三重項超伝導と電流](#)», JHPCN: 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 第 12 回 シンポジウム 2020 年 7 月 9 日, ONLINE [招待講演, ポスター].
- 2, 兼安洋乃, 大塚剛生, 長谷川泰正, 「non-unitary な自発磁化超伝導と電流」, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月 8 日, ONLINE [ポスター].
- 3, 大塚剛生, 長谷川泰正, 伊達進, 兼安洋乃, 「Non-unitary な自発磁化超伝導における磁化率と電流」, 基研研究会「高温超伝導・非従来型超伝導研究の最前線: 多様性と普遍性」, 2020 年 9 月 27 日, ONLINE [ポスター].
- 4, 大塚剛生, 長谷川泰正, 兼安洋乃 「Non-unitary 超伝導における磁化率と磁場誘起 chiral 安定化」, 日本物理学会 第 76 回年次大会, 2021 年 3 月 12 日, ONLINE [ポスター].
- (5) 公開したライブラリなど
- (6) その他(特許, プレスリリース, 著書等)
- 1, 兼安洋乃, 「[超伝導の磁場誘起 chiral 転移と常磁性電流 ~軌道変化と磁場との結合が織りなす現象~](#)」, 大阪大学サイバーメディアセンター HPSC(High-Performance-Scientific-Computing)-News, vol.10, 2021 年 5 月 10 日に大阪大学サイバーメディアセンターweb 上にて動画公開 [研究紹介動画, 依頼]. URL: <http://www.hpc.cmc.osaka-u.ac.jp/hpsc-news/vol10/> <http://www.hpc.cmc.osaka-u.ac.jp/hpsc-news/>
- 2, 大塚剛生, 「ノンユニタリーな自発磁化超伝導におけるギャップ構造と磁化率、及び常磁性結合によるカイラル安定化」, 兵庫県立大学理学部卒業論文, 2021 年 3 月.
- 3, 吉田薪史, 「磁場誘起 chiral 転移シミュレーションの SX-Aurora TSUBASA を用いた高速化」, 大阪大学工学部卒業論文, 2021 年 2 月.
- 4, 春名信吾, 「Sr₂RuO₄ の磁化率」, 3 年生研究室体験発表会, 兵庫県立大学理学部, 2001 年 1 月 8 日 [口頭].
- 5, 長澤武範, 「自発磁化を持つノンユニタリーなスピン三重項超伝導のギャップ構造」, 3 年生研究室体験発表会, 兵庫県立大学理学部, 2001 年 1 月 8 日 [口頭].