

令和元年6月7日現在

機関番号：82121

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14349

研究課題名（和文）中性子散乱によるスピン三重項超伝導体Sr₂RuO₄の強磁性揺らぎの研究研究課題名（英文）Neutron scattering study on magnetic fluctuations in spin-triplet superconductor Sr₂RuO₄

研究代表者

飯田 一樹 (Iida, Kazuki)

一般財団法人総合科学研究機構（総合科学研究センター（総合科学研究室）及び中性子科・中性子科学センター・研究員

研究者番号：00721987

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：chiral p波超伝導の候補物質であるSr₂RuO₄は、その超伝導の起源や超伝導の秩序関数について現在でも盛んに議論が続いている。Sr₂RuO₄に関する残された問題を解決するために非弾性中性子散乱の手法を用いて研究を行ってきた。その結果、バンド毎の磁気揺らぎの観測し、格子非整合磁気揺らぎのスピンギャップの測定に成功した。特に、スピンギャップ近傍のエネルギーの磁気揺らぎのL依存性を精密に測定することで、Sr₂RuO₄の超伝導ギャップ関数が水平ラインノードを持つことを新たに解明した。この結果はSr₂RuO₄において未解明の問題である超伝導秩序関数の決定に重要な知見を与えることが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、非弾性中性子散乱の手法によってSr₂RuO₄の超伝導ギャップ関数が水平ラインノードを持つことを解明した。この結果はSr₂RuO₄の超伝導関数の対称性が、従来報告されていたchiral p波の超伝導ではなくspin singletである事を強く示唆している。Sr₂RuO₄はトポロジカル超伝導体の候補物質として提案されているが、本研究の結果はその提案の再考を促すものであり、それ故に有意義であると考えられる。一方で、spin tripletの起源となりうる強磁性揺らぎも観測されており、Sr₂RuO₄に関して今後のさらなる研究を促す効果も期待できる。

研究成果の概要（英文）：Sr₂RuO₄ is the strong candidate for a chiral p-wave superconducting material, and thus is extensively investigated so far. However, the nature of its superconductivity, especially the superconducting order parameter is still a matter of intense debate. To answer the remaining issue on Sr₂RuO₄, we investigated by means of inelastic neutron scattering spectroscopy. We have succeeded in observing the band-dependent magnetic fluctuations and the spin gap at the incommensurate magnetic fluctuations. Furthermore, we investigated in detail the L dependence of the low energy incommensurate magnetic fluctuations, which reveal that the superconducting gap has a horizontal line node. These results can give the strong constraint to determine the superconducting order parameter in Sr₂RuO₄ leading to fully understand the nature of its superconductivity.

研究分野：中性子散乱

キーワード：非従来型超伝導

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

Sr_2RuO_4 は高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ と同じ層状ペロブスカイト構造を有する初の酸化物超伝導体である。また少量不純物のドーピングにより超伝導が消失することから、乱れに非常に弱い超伝導であることが分かっている。 Sr_2RuO_4 及びドープ系物質に関する種々の測定から、 Sr_2RuO_4 は時間反転対称性の破れた chiral p 波のスピントリプル超伝導であることが有力視されている。そのため Sr_2RuO_4 は超伝導転移温度 T_c が 1.5 K と低いにも関わらず、超伝導の発見から四半世紀が経過した現在でも盛んに研究されている。しかしながら、超伝導ギャップ関数や超伝導の発現機構に対する理解は未だ完全ではない。

Sr_2RuO_4 の超伝導状態及び常伝導状態での磁気応答を理解するために、これまで磁気揺らぎに関する様々な非弾性中性子散乱測定が行われてきた。最も顕著な磁気散乱は逆格子点 G の近傍の波数 $Q = G + (\pm 0.3, \pm 0.3, L)$ に現れる格子非整合な磁気揺らぎである。一方、スピントリプル超伝導で予想される強磁性揺らぎの存在はこれまで NMR で報告されているが、中性子散乱ではその存在が示唆されたに留まっている。さらに超伝導状態で期待される磁気揺らぎのスピニングャップが、格子非整合な磁気揺らぎ・強磁性揺らぎのいずれにおいても観測されていない。これらの実験上の理由として、 Sr_2RuO_4 の磁気散乱強度が弱い事、超伝導転移温度が 1.5 K と低温である事が挙げられる。

Sr_2RuO_4 の超伝導の性質を解明するためには上記の実験上の問題を解決する必要があった。そこで我々はまず、 Sr_2RuO_4 の巨大単結晶試料を合成した。さらに J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) に設置されている最新かつ大強度の中性子飛行時間型分光器 4SEASONS 及び AMATERAS を用いて、 Sr_2RuO_4 における強磁性揺らぎ及び格子非整合な磁気揺らぎの測定を T_c 上下で行った。

2. 研究の目的

Sr_2RuO_4 の非弾性中性子散乱に関して未解明な問題が 2 つ存在する。一つ目はスピントリプル超伝導の起源と考えられる強磁性揺らぎの動的構造因子の観測。二つ目は磁気揺らぎのスピニングャップの観測である。

強磁性揺らぎが観測されてその性質が解明されれば、 Sr_2RuO_4 における超伝導発現機構が解明されることが期待される。一方、磁気揺らぎのスピニングャップが観測できれば超伝導ギャップ関数に関する情報を得ることができる。しかしながら、強磁性揺らぎは波数 $q = 0$ に現れるため測定が困難である。一方、 Sr_2RuO_4 の $T_c = 1.5$ K と小さいため、スピニングャップの観測が困難であった。

これらの測定上の困難を解決して、非弾性中性子散乱の手法により Sr_2RuO_4 の超伝導の性質を解明することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

我々はまず、Floating zone 法を用いて Sr_2RuO_4 の巨大単結晶試料の作成を行った。3 本の単結晶試料を合成し、重さは合計 10 g であった。それぞれの T_c は約 1.4 K であり、高品質の単結晶試料であることを確認してある。

本研究の非弾性中性子散乱測定には J-PARC MLF に設置されている大強度中性子飛行時間型分光器 4SEASONS と高分解能中性子飛行時間型分光器 AMATERAS を使用した。中性子飛行時間型分光器では多数の検出器が放射状に配置されており、 $(Q, \hbar\omega)$ 位相空間の動的構造因子を効率的に測定できる。さらに、MLF の中性子飛行時間型分光器では複数の入射エネルギーを持つ中性子からの散乱を同時に測定することができる。これらの特徴のため、4SEASONS 及び AMATERAS は中性子非弾性散乱装置として世界トップクラスの測定効率を持っている。

また、近年 J-PARC MLF では ^3He 冷凍機が使用可能となっており、これまで 4SEASONS や AMATERAS では実施不可能だった Sr_2RuO_4 の T_c 上下での非弾性中性子散乱測定が行えるようになった。

以上のように、巨大単結晶試料、中性子飛行時間型分光器、 ^3He 冷凍機を組み合わせることにより、 Sr_2RuO_4 の超伝導の性質の解明を試みた。

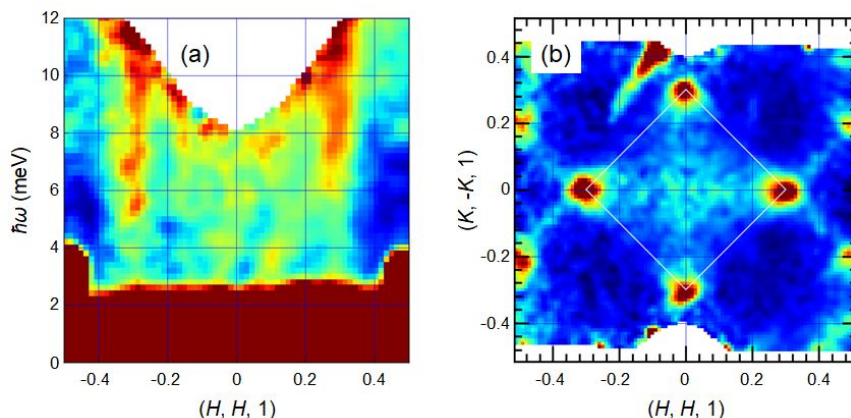


図 1. (a) Sr_2RuO_4 における非弾性中性子散乱強度の $(H, H, 1)$ 及びエネルギーの依存性。(b) 5.5 meV での $(H, K, 1)$ の非弾性中性子散乱強度マップ。

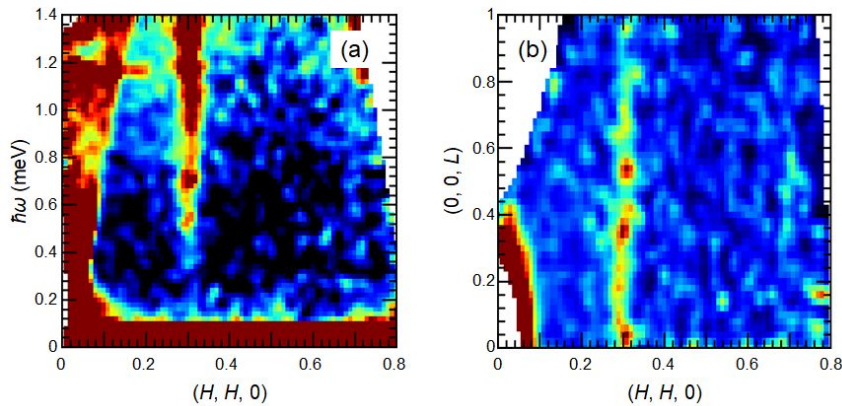


図 2。(a) Sr₂RuO₄における非弾性中性子散乱強度の $(H, H, 0)$ 及びエネルギーの依存性。(b) 0.5 meVでの (H, H, L) の非弾性中性子散乱強度マップ。

4. 研究成果

一般的に、強磁性揺らぎは $q=0$ に現れるため測定することが困難である。そこで我々は $Q=(0, 0, 1)$ 近傍で強磁性揺らぎの観測を試みた。図 1(a)に非弾性中性子散乱強度の $Q=(H, H, 1)$ 方向及びエネルギーの依存性を示す。 $q=(\pm 0.3, \pm 0.3)$ の格子非整合な磁気揺らぎに加えて、 $q=(0, 0)$ の強磁性揺らぎが観測された。さらに、5.5 meVでの $(H, K, 1)$ の非弾性中性子散乱強度マップを図 1(b)に示す。格子非整合な磁気揺らぎに比べて強度が弱いがブロードなピークが観測された。今回の結果により Sr₂RuO₄に確かに強磁性揺らぎが存在することが判明し、その $(Q, \hbar\omega)$ 位相空間の動的構造因子を精密に測定することに成功した。

さらに格子非整合な磁気揺らぎの超伝導ギャップの観測を試みた。図 2(a)に非弾性中性子散乱強度の $Q=(H, H)$ 方向及びエネルギーの依存性を示す。 $q=(0.3, 0.3)$ の格子非整合な磁気揺らぎに約 0.2 meVのスピングャップを観測した。一方、 (H, H, L) の非弾性中性子散乱強度マップを図 2(b)に示す。 $Q=(0.3, 0.3, 0.5)$ に強度のピークが観測された。この結果は超伝導ギャップが水平ラインノードを持つことを示唆している。

我々の研究により得られた成果をまとめると、(1)強磁性揺らぎの $(Q, \hbar\omega)$ 位相空間の動的構造因子を精密に測定した。(2)超伝導ギャップが水平ラインノードを持つ。(2)の結果と理論計算を併せて現在、論文として投稿中である。一方、(1)の結果と理論計算を併せて論文として投稿する準備を行っている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年:

国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。