

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540398

研究課題名(和文) CeCoIn5におけるFFLO超伝導と特異な磁気秩序に関する研究

研究課題名(英文) Study of the FFLO State and the Anomalous Magnetic Order in CeCoIn5

研究代表者

熊谷 健一 (KUMAGAI, KEN-ICHI)

北海道大学・・・名誉教授

研究者番号：70029560

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、重い電子系超伝導体CeCoIn5において強磁場下での局所スピン帯磁率の知見から、高磁場低温領域で現れる新奇超伝導状態はノード構造を伴うFFLO相であること、試料ab面内からの印可磁場の角度依存性の知見を得て、a) $\theta = 0^\circ$ での試料空間で一様な磁気秩序が、有限角度 θ ではノード領域のみで磁気秩序が現れ超伝導ギャップ Δ の領域では消失する空間的に不均一な磁気構造となること、また、b)より高磁場領域では磁気秩序を伴わないFFLO相が現れることを明らかにした。

これにより、強いPauli常磁性効果のもとでのFFLO相と特異な磁気秩序の共存に関する理解を格段に進めることが出来た。

研究成果の概要(英文)：To improve our understanding of how the exotic superconductivity and magnetism can interact in CeCoIn5, we measured ^{115}In NMR and demonstrate the emergence of a spatially distributed normal quasiparticle region in the HL-phase in parallel field. The field evolution of the paramagnetic magnetization and low energy quasiparticle DOS can be described well by the order parameter associated with the nodal plane formation via the FFLO second order phase transition. The evolution of NMR spectra with respect to angle between external field and a-axis reveals that the magnetic structure changes from the spatially-uniform to the spatially-modulated one. The exotic FFLO phase is suppressed with increasing the angle, and disappears for beyond 20 degree.

Our results provide strong evidence for the formation of the FFLO state via the second order phase transition and coexistence of the static magnetic order and FFLO state.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性

キーワード：強相関系 超伝導 磁気秩序 NMR

1. 研究開始当初の背景

重い電子系超伝導体 CeCoIn_5 は、Ce 化合物では最も高い超伝導転移温度 ($T_c=2.3\text{K}$) をもち、 H_{c2} で一次相転移が初めて観測された注目すべき物質である。さらに、Pauli limit を越える高磁場・極低温領域で新奇な超伝導相が出現し、1964 年に提唱された Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov (FFLO) 状態の可能性が活発に議論されている。我々は、 CeCoIn_5 の核磁気共鳴 (NMR) スペクトルの特徴的变化の知見を得ることにより、超伝導秩序関数が空間変調した 2 次元ノード構造を持つ全く新しいタイプの超伝導秩序状態を微視的な観点から立証できることに着目した。これまで、ノード面の出現による normal 状態に対応する NMR 信号を検出して、結晶 ab 面に平行磁場および面に垂直な磁場下で FFLO 状態の出現することを示し、超伝導電子相図を明らかにしてきた。これらの成果に対し以下の興味ある問題点が指摘され、その実験的解明が要請されている。

(1) CeCoIn_5 は磁場誘起量子臨界点近傍に位置するため、磁気秩序の有無と磁気揺らぎと FFLO 相との相関が重要である。実際、新奇超伝導相内のみで磁気秩序が出現することが報告され、これまでの磁氣的性質についての相違点を明らかにすること。

(2) 強い Pauli 常磁性効果による超伝導相での局所帯磁率の微視的理解が重要であること。すなわち、強磁場下で現われる H_{c2} での一次相転移での変化を含め、超伝導状態および渦糸コア内での局所ナイトシフトの磁場依存性を実験的、理論的に明らかにすること。

(3) FFLO 相における 2 次元ノード面と磁束渦糸に閉じ込められた準粒子状態は大きく異なりその特異性が指摘されている。空間分解 NMR 測定により、試料面と外部磁場のなす角度を変化させ、フェルミ面のネステング効果等に依存する特異な準粒子状態を解明すること。

2. 研究の目的

(1) 超伝導秩序波動関数の空間変調を伴う FFLO 状態における反強磁性秩序の構造およびその磁気秩序の起源について相反する実験的結論や理論的考察が報告されているので、これを明らかにすること。

(2) 印可磁場を ab 面から傾けていったとき、FFLO 相と密接に関係する磁気秩序は抑制されることが明らかにされているが、有限角度では、 $=0$ のときの磁気構造とは異なり変化している。 ab 面からの渦糸の傾斜する効果との指摘もあるが、フェルミ面のネステング効果を含めて、磁気構造の変化と特異な磁性と FFLO 状態との共存状態を明らかにすること。

(3) 空間分解核磁気共鳴法 (spatially-resolved NMR) により、FFLO 相における 2 次元ノード面と磁束渦糸 (1 次元) に閉じ込められた超伝導領域とノード領域での準粒子状態を分離して得ることにより、FFLO 超伝導

状態における 2 次元ノード面内と「渦糸コア」の特異な準粒子の構造とそれに依拠して現れる新奇な磁気揺らぎを解明すること。

3. 研究の方法

(1) CeCoIn_5 の FFLO 状態あるいは渦糸コア内で反強磁性秩序が現れた場合、各原子核サイトは超微細相互作用を通して大きな内部磁場をうける。この局所的内部磁場による NMR スペクトルの特徴的变化の観測により磁気秩序の同定が可能になるので、50mK にいたる極低温領域で、広い周波数領域での精密な NMR スペクトルを測定し、各サイトの局所磁場分布を実験的に明らかにし、磁気秩序状態における磁気構造を微視的な観点から明らかにする。

(2) CeCoIn_5 は 2 次元性の強い物質であり、面内方向にフェルミ面のネステングは FFLO に有利に働く。 a 軸と c 軸とでは $H_{c2}(0)$ は 2 倍の違いがあるが、Pauli 常磁性は c 軸方向が大きい。このため、FFLO 状態の形成に対する Pauli 常磁性効果とフェルミ面のもたらす影響を調べるためには、試料軸と磁場のなす角度依存性の知見は重要である。精密な角度依存性の高磁場・極低温下での測定環境を整備し、詳細な NMR スペクトルの角度依存性を測定する。

(3) 第 2 種超伝導体の磁束状態では、超伝導反磁性による磁場分布による NMR 線幅のいわゆる Redfield Pattern と、渦糸コア内外の大きなナイトシフトの空間分布による効果が NMR スペクトルを決める。後者の変化はこれまで全く議論されてこなかった。Pauli 常磁性効果の大きな重い電子系 CeCoIn_5 の空間分解 NMR 測定を行い、超伝導領域、渦糸コア内、FFLO 相のノード面内の信号を分離測定し、局所磁化率の温度・磁場依存性を求める。この知見を得て、最近の Pauli 常磁性効果を取り入れた局所スピン密度の理論計算と比較検討することにより、磁束コアでのいわゆる normal 状態とは異なるスピン密度を定量的に求める。

(4) 得られた成果を内外の国際会議・研究会で発表するとともに、理論的考察に関する研究討議を通して FFLO 状態と反強磁性磁気秩序との共存に関して理解を深める。

4. 研究成果

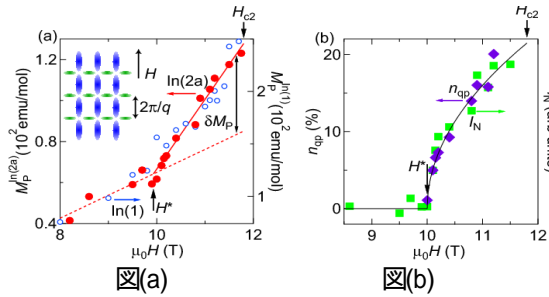
本研究では、 CeCoIn_5 の低温・強磁場領域での新たな超伝導相において ab 面内および a 軸から磁場を傾けて、主に $\text{In}(2)$ サイトでの NMR スペクトルの角度依存性および磁場・温度依存性を詳細に測定した。本研究で明らかにしたことは、

(1) Pauli limit を越える強磁場で下での超伝導状態での局所スピン帯磁率温度依存・磁場依存性を詳しく求め、一次相転移での局所スピン帯磁率の不連続変化をナイトシフトの変化として観測した。 H_{c2} での一次相転移による準粒子スピン帯磁率の不連続な変化が観測された最初の実験例であり、その磁場依存の

特異性を明らかにした。

(2) $H//a$ -軸に比べて $H//c$ -軸の場合には、FFLO 相は $H-T$ 図で極めて狭い領域にのみ現れ、BCS 相との境界線の磁場依存性はほとんど無い。

(3) In(2a)サイトのNMR スペクトルは $H > H^*$ 以上で normal 状態に相当するシフト位置で edge 構造を示す。左図(a)はスペクトルの1次モーメントから求めた系の常磁性磁化の磁場依存性であり、準粒子状態密度による常磁性スピン磁化率の増加率の変化を示している。 $H > H^*$ で M_p ($H-H^*$)の磁場に対して直線的な変化する。また、右図(b)に示すように、edge 構造に寄与する面積は磁場と共に増加し、準粒子数は $n_{qp} \propto (H-H^*)^{1/2}$ 依存性を示す。この結果は、新しい超伝導相が二次元 nodal 面の波数 q を秩序パラメータとする2次の相転移であることを支持し、新規な超伝導FFLO相の存在を微視的観点から示していると考えられる。



(4) $H//a$ -軸の磁場印加で In(2b)サイトにおいて内部磁場を受けた特徴ある NMR スペクトルが観測され、非整合磁気秩序の出現が NMR 実験により明らかになった。(図2) Ce 磁気モーメントによる反強磁性磁気秩序は超伝導領域と超伝導ギャップが消失する nodal 面で一様に現れる。この反強磁性磁気秩序は新奇な超伝導相のみで現れ、BCS 状態および正常状態では消失することが明らかになり、提唱されている理論的モデルの評価に関連する重要な知見となった。

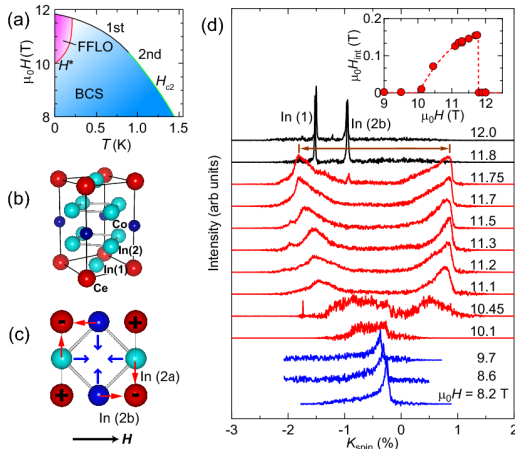


図2. (a):高磁場低温での相図、(b):結晶構造、(c):Ce モーメントによる超微細磁場の関係を示す。(d): In(2b)サイトのNMR スペクトル。

(5) ab 面内からの印可磁場の角度依存性から、 $\theta = 0^\circ$ での一様な磁気秩序が、 $\theta = 7 \sim 17^\circ$ ではノード領域のみで磁気秩序が現れ超伝導ギャップ $\Delta = 0$ の領域では消失する空間的に不均一な磁気構造となる。磁場方向の変化に対して磁気構造の変化が伴うことを明らかにした。

(6) 有限な角度 ($7 \sim 17^\circ$) では、より高磁場領域では磁気秩序が消失し pure な FFLO 相が現れることを見だし、理論的モデルによる考察をおこなった。さらには、CeCoIn₅ の高磁場低温領域での物理変数 $\{H, T, \theta\}$ に対する電子相図の詳細を明らかにした。

これらの実験的成果により、FFLO 相内でのみ現れる特異な磁気秩序との共存に関する理解が格段に進んだ。新奇超伝導相内でのみ出現する特異な磁気状態の起源に関しては解明すべき重要な課題として残っている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

- K. Kumagai, H. Shishido, T. Shibauchim Y. Matsuda, Evolution of Paramagnetic Quasiparticle Excitations Emerged in the High-Field Superconducting Phase of CeCoIn₅, Phys. Rev. Lett. 106, 137004 (4) (2011). (査読有)

[学会発表](計12件)

- K. Kumagai, H. Shishido, T. Shibauchi and Y. Matsuda, NMR Study of the Interplay Between the Superconducting FFLO State and the Magnetic Order in CeCoIn₅ International Conference of Magnetism and Superconductivity (ICSM2014), Antalya, Turkey, April 27-May 2, (2014). 招待講演
- K. Kumagai, H. Shishido, T. Shibauchi and Y. Matsuda, NMR Study of the Magnetic Order in the FFLO State of CeCoIn₅, International Conference on "Quantum in Complex Matter(Superstripes 2013), Ischia, Italy, May 27- June 1, (2013). 招待講演
- K. Kumagai, H. Shishido, T. Shibauchi and Y. Matsuda, NMR Study of Magnetic Order and Spatially-Modulated Superconducting Gap in CeCoIn₅, International Conference of Magnetism and Superconductivity (ICSM 2012), Istanbul, Turkey, April 27- May 4, (2012). 招待講演

4. K. Kumagai,
 “NMR Study of Magnetic Order and the FFLO State in CeCoIn₅”,
 新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序化」ワークショップ, 2011年11月11日～12日, 新潟大学 (招待講演)
5. K. Kumagai, H. Shishido, T. Shibauchi and Y. Matsuda,
 “NMR Study of Magnetic Order and Spatially-Modulated Superconducting Gap in CeCoIn₅”,
 A special session on the application of μ SR, NMR and LTXRD etc in condensed matter, Fall Meeting of Chinese Physical Society (CPS), Hangzhou, China, September 16 - 18, (2011), (招待講演)
6. K. Kumagai, H. Shishido, T. Shibauchi and Y. Matsuda,
 Field Evolution of the FFLO State and Magnetism in CeCoIn₅,
 International Conference on Ultra Low Temperature Physics (ULT 2011), August, 19-22, (2011), KAIST, Daejeon, Republic of Korea, (招待講演)
7. K. Kumagai, H. Shishido, T. Shibauchi and Y. Matsuda,
²⁷Al- and ⁹⁵Mo-NMR Study on Non-centrosymmetric Superconductor Mo₃A₂C,
 The 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), August 10-17, (2011), Beijing, China (ポスター)
8. K. Kumagai, H. Shishido, T. Shibauchi and Y. Matsuda,
 NMR Study of the FFLO State and Magnetism in CeCoIn₅,
 The 26th International Conference on Low Temperature Physics, (LT26), August 10-17, (2011), Beijing, China (ポスター)
9. K. Kumagai, H. Shishido, T. Shibauchi and Y. Matsuda,
 NMR Study of Magnetic Order and Spatially-Modulated Superconducting Gap in CeCoIn₅,
 International Conference of Strongly Correlated Electron Systems (SCES), August 29 – September 3, (2011), Cambridge, UK. (ポスター)

[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:
 出願年月日:
 国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
 発明者:
 権利者:
 種類:
 番号:
 取得年月日:
 国内外の別:

[その他]
 ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者
 熊谷 健一 (KUMAGAI Ken-ichi)
 北海道大学 名誉教授
 研究者番号: 70029560

(2) 研究分担者 (0)
 研究者番号:

(3) 連携研究者 (0)
 研究者番号: