

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05544

研究課題名(和文) 高圧下ホール効果と量子振動測定による重い電子系超伝導体の臨界揺らぎの研究

研究課題名(英文) Study on the critical fluctuations by the Hall effect and quantum oscillations measurements on heavy-fermion superconductors

研究代表者

荒木 新吾 (Araki, Shingo)

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：90362615

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：反強磁性CeRh₂Si₂の反強磁性量子臨界点近傍の温度・圧力相図を決定した。反強磁性量子臨界圧力よりも低圧側に局在・遍歴相転移が存在することを明らかにした。それぞれの臨界圧力において量子ゆらぎが発達し、超伝導相はその中間領域で観測される。

反強磁性体CeIn₃の反強磁性相内で、極低温のホール係数が不連続に変化することを観測した。その圧力領域において量子ゆらぎが発達するが、超伝導相は観測されなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究ではCeRh₂Si₂とCeIn₃において、反強磁性が絶対零度に抑制される磁気的量子臨界点だけではなく、反強磁性相内においてf電子の局在・遍歴転移の量子臨界点の存在とその周辺で量子ゆらぎが発達することを明らかにした。今後、他の重い電子系化合物においても同様の量子臨界点の探索と、量子ゆらぎを起因する新奇電子状態の探索が期待される。

研究成果の概要(英文)：We determined the temperature-pressure phase diagram on CeRh₂Si₂ around the antiferromagnetic quantum critical pressure, 1 GPa. We observed two successive phase transitions, from the localized-antiferromagnetic phase to the itinerant-antiferromagnetic one, and from the itinerant-antiferromagnetic phase to the paramagnetic one. The A coefficient of the low-temperature resistivity increased at both phase boundaries, indicating the enhancement of the quantum fluctuations. The pressure-induced superconductivity appears in the itinerant-antiferromagnetic phase.

We observed the discontinuous change in the Hall coefficient on the antiferromagnet CeIn₃, indicating the phase transition between the localized-antiferromagnetic phase and the itinerant-antiferromagnetic one. Although the quantum fluctuations increased around the localize-itinerant transition, the superconductivity was not observed.

研究分野：固体物理学

キーワード：高圧実験 ホール効果 強相関電子系

1. 研究開始当初の背景

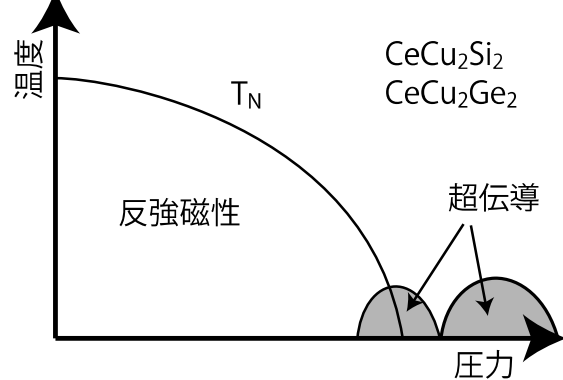
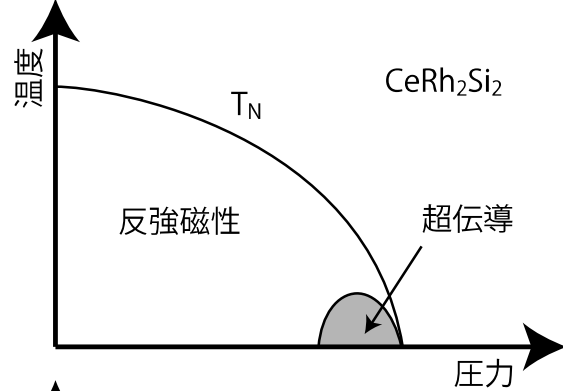
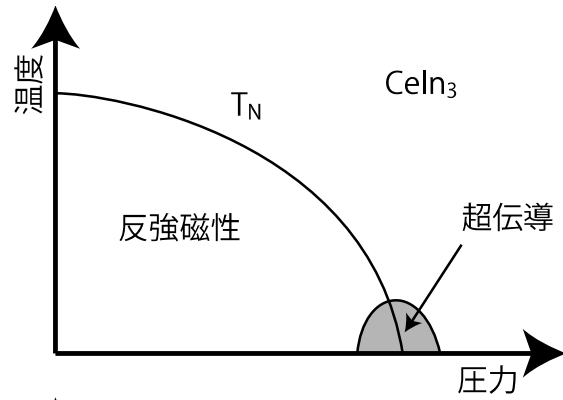
重い電子系と呼ばれる f 電子系では,局在 f 電子の磁気秩序をもたらす RKKY 相互作用と,局在 f 電子を遍歴化する近藤効果が競合している。このため,反強磁性セリウム化合物に圧力を加えると,基底状態は反強磁性から常磁性の重い電子へと変化する。CeIn₃, CePd₂Si₂ などの化合物では,右図(上)のように反強磁性転移温度 T_N を絶対零度に抑制した反強磁性量子臨界点近傍において,超伝導が観測されている。これらの超伝導のクーパ対は,反強磁性磁気揺らぎによって形成されていると理解されている。

右図の相図の低圧の極限では f 電子は,セリウム位置に局在しており,高圧の極限では, f 電子は結晶全体を遍歴する。圧力の増加にともない f 電子は局在状態から遍歴状態へとクロスオーバーしていくと考えられている。

反強磁性体 CeRh₂Si₂ の T_N は約 1 GPa の臨界圧力で消失し,その圧力付近で超伝導が発現する。右図(上)の CeIn₃, CePd₂Si₂ などとは違い,われわれの予備実験から,右図(中)のように超伝導相が反強磁性相内部に存在している可能性が示唆されていた。

重い電子系超伝導体 CeCu₂Si₂ では,常圧ですでに反強磁性量子臨界点よりも高圧側に位置しており,圧力下では右図(下)のように常圧の超伝導相よりも高い超伝導転移温度を有する超伝導相が観測されている。高圧下超伝導相は,セリウムの価数揺らぎを媒介とした超伝導である可能性が指摘されている。

このように,一概に反強磁性の量子臨界点近傍に発現する超伝導といえども,その超伝導の引力起源は磁気揺らぎだけで説明することはできず,価数揺らぎなどの f 電子の電荷自由度の揺らぎである可能性が予想される。



2. 研究の目的

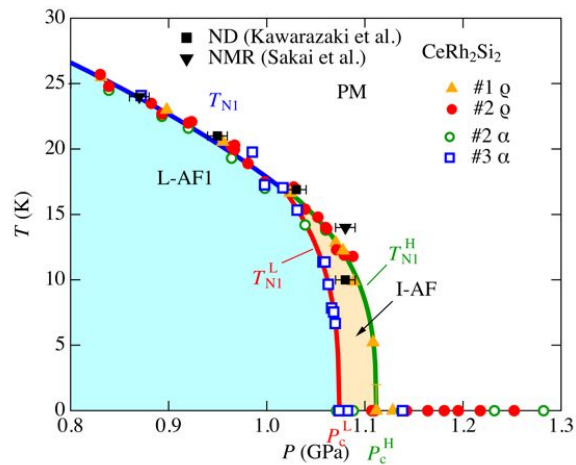
セリウム化合物の f 電子は圧力の増加とともに局在状態から遍歴状態へとクロスオーバーする。右上図(中)(下)は,圧力下で f 電子の局在・遍歴転移,もしくは相転移に近いクロスオーバーが存在し,その近傍で超伝導が発現している可能性が考えられる。しかしながら,これまで,局在・遍歴転移やクロスオーバーは実験的に明らかにされていない。キャリアの伝導特性を反映した物理量であるホール効果は, f 電子の価数異常,価数揺らぎ,磁気揺らぎなどの圧力変化を検出する良い測定プローブである。本研究では,反強磁性セリウム化合物の超伝導発現圧力領域近傍の希釈冷凍機温度における圧力下ホール効果測定を行い,その詳細な温度,磁場,圧力依存性から,局在・遍歴転移やクロスオーバーの存在を実験的に検証すること,また,磁気揺らぎと価数揺らぎの発達の様子と価数異常の可能性を検証し,超伝導発現との関連を明らかにすることが目的である。

3. 研究の方法

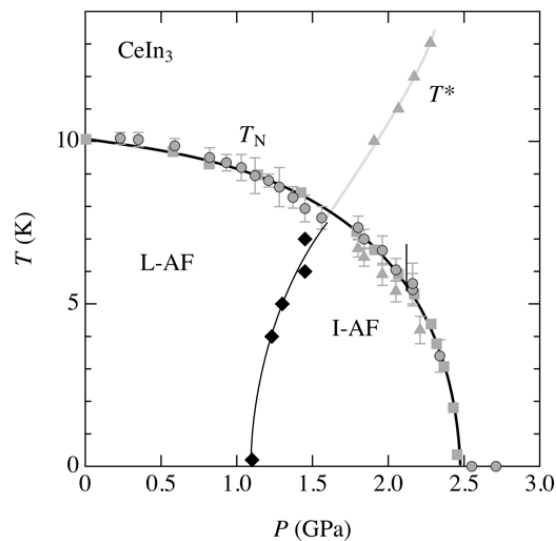
インデンター型圧力セルを約 100 mK まで冷却可能な核断熱消磁冷凍機 (ADR) を製作し,希釈冷凍機と併用しながら極低温における圧力下ホール係数の測定を行った。また,並行して圧力下の電気抵抗 (約 100 mK まで),熱膨張係数 (4 K まで) の測定を行った。それらの実験結果から反強磁性体 CeRh₂Si₂ と CeIn₃ の f 電子の電子状態の圧力依存性を議論した。

4. 研究成果

(1) 圧力下の電気抵抗，熱膨張係数の異常をプロットした， CeRh_2Si_2 の反強磁性量子臨界点近傍の温度・圧力相図を右図に示す。約 1 GPa の反強磁性量子臨界点近傍において，新たな秩序相 (I-AF) が存在することが明らかになった。低压側の相境界 (T_{Ni}^{L}) では，熱膨張係数，ホール係数に異常が観測され，ドハース・ファンアルフェン振動数が不連続に変化する。これらの結果は， T_{Ni}^{L} において，f 電子が局在状態から遍歴状態へと変化することを示している。一方，高压側の相境界 (T_{Ni}^{H}) では電気抵抗の正方晶の c 面内異方性が出現する。これは，反強磁性ドメインの試料内分布による 4 回対称性の破れに対応しており， T_{Ni}^{H} は常磁性相と反強磁性秩序相の相境界であることを示している。このため， CeRh_2Si_2 の基底状態は，圧力増加にともない，局在反強磁性状態から臨界圧力 P_c^{L} 以上の圧力で遍歴反強磁性状態へ，また臨界圧力 P_c^{H} 以上の圧力で常磁性状態 (遍歴非磁性状態) へと変化することがわかった。圧力誘起超伝導は P_c^{L} と P_c^{H} の間の圧力領域を中心に発現する。低温の電気抵抗は過去の報告とは異なり，非フェルミ液体的挙動を示す。 P_c^{L} と P_c^{H} においてフェルミ液体からの逸脱が最も大きく， P_c^{L} と P_c^{H} の両方において量子ゆらぎが発達していることが示唆される。超伝導相は，それらの量子ゆらぎを起源としていることが考えられる。



(2) 圧力下の電気抵抗とホール効果の測定から決定した，反強磁性 CeIn_3 の温度・圧力相図を右図に示す。反強磁性秩序相の内部に示す位置において，電気抵抗やホール係数に特徴的な異常を観測した。これは常磁性相で過去の報告で観測されている T^* (NMR の T_1 やホール係数の極大温度で，局在遍歴クロスオーバーに対応すると考えられている) の異常と連続的に結びついている。最低温度のホール係数はで不連続に変化しており，低压側の局在反強磁性相と高压側の遍歴反強磁性相の相境界に対応していると考えられる。この相境界近傍では，低温の電気抵抗は非フェルミ液体的挙動を示し，遍歴局在転移に関連した量子ゆらぎが発達している。しかし，その近傍では圧力誘起超伝導は観測されなかった。



(3) 反強磁性セリウム化合物の CeRh_2Si_2 と CeIn_3 において，従来確認されていなかった局在・遍歴転移が反強磁性相内に存在することが明らかになった。また，その相境界近傍では量子ゆらぎが発達している。多くの重い電子系化合物において，圧力実験は磁気転移温度，磁気的量子臨界点近傍に着目して行われてきた。 CeRh_2Si_2 と CeIn_3 において局在・遍歴転移が検出されたことを機に，他の化合物においても局在・遍歴転移に関連する量子ゆらぎに起因した新奇な電子状態の探索が今後期待される。

局在・遍歴転移の相境界はホール効果，電気抵抗などの伝導特性の細かな圧力制御下での測定により検出することが可能になった。そのような実験の実施は，従来，多大な時間を必要としていたが，本研究で開発した圧力セルを冷却可能な核断熱消磁冷凍機 (ADR) により，極低温における圧力下ホール係数と電気抵抗の測定が短時間で可能になった。この実験環境を活用することで，今後研究が効率的に進展することが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Araki Shingo, Hoang Nam Nguyen, Shimodo Kota, Nakano Takehito, Nozue Yasuo	4. 巻 99
2. 論文標題 Ferromagnetism of potassium metal under pressure loading into zeolite low-silica X	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 94403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.094403	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tokunaga Y., Aoki D., Mayaffre H., Kramer S., Julien M.-H., Berthier C., Horvatic M., Sakai H., Hattori T., Kambe S., Araki S.	4. 巻 536
2. 論文標題 Field-induced reentrant superconductivity driven by quantum tricritical fluctuations in URhGe	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physica B: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 122 ~ 124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physb.2017.09.022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kitagawa Shunsaku, Sekiya Taishi, Fujiyoshi Yo, Araki Shingo, Kobayashi Tatsuo C., Nishimoto Naoki, Mizukami Tasuku, Ioka Satoshi, Fujimura Kazunori, Kudo Kazutaka, Nohara Minoru	4. 巻 86
2. 論文標題 Pressure-Induced Superconductivity from Doping-Induced Antiferromagnetic Phase of 112-type Ca _{1-x} LaxFeAs ₂	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 113705 ~ 113705
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.86.113705	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sato Takaaki, Akiba Kazuto, Araki Shingo, Kobayashi Tatsuo C.	4. 巻 30
2. 論文標題 Pressure-Temperature Phase Diagram of alpha-Mn	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 11030
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJP.30.011030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tokunaga Yo, Aoki Dai, Mayaffre Hadrien, Kramer Steffen, Julien Marc-Henri, Berthier Claude, Horvatic Mladen, Sakai Hironori, Kambe Shinsaku, Hattori Taisuke, Araki Shingo	4. 巻 30
2. 論文標題 Field-angular Dependence of Pairing Interaction in URhGe: Comparison with UCoGe	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 11037
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.30.011037	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kotegawa Hisashi, Matsuda Masaaki, Ye Feng, Tani Yuki, Uda Kohei, Kuwata Yoshiki, Tou Hideki, Matsuoka Eiichi, Sugawara Hitoshi, Sakurai Takahiro, Ohta Hitoshi, Harima Hisatomo, Takeda Keiki, Hayashi Junichi, Araki Shingo, Kobayashi Tatsuo C.	4. 巻 124
2. 論文標題 Helimagnetic Structure and Heavy-Fermion-Like Behavior in the Vicinity of the Quantum Critical Point in Mn ₃ P	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 87202
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevlett.124.087202	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Shingo Araki
2. 発表標題 Antiferromagnetic quantum criticality and anomalous transversal resistivity in CeRh ₂ Si ₂
3. 学会等名 J-Physics 2018: International Workshop on New Materials and Crystal Growth (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 荒木新吾, 三井理功, 小林達生, 今井渉, 宮崎美里, 摂待力生, Daniel Braithwaite, 青木大, 酒井宏典
2. 発表標題 CeRh ₂ Si ₂ の圧力下ホール効果
3. 学会等名 日本物理学会「秋季大会(2018年)」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 荒木新吾, 西森弘顕, 三井理功, 小林達生, 今井渉, 宮崎美里, 摂待力生, Daniel Braithwaite, 青木大, 酒井宏典
2. 発表標題 CeRh ₂ Si ₂ の反強磁性量子臨界点
3. 学会等名 日本物理学会「第74回年次大会(2019年)」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shingo ARAKI
2. 発表標題 Antiferromagnetic quantum criticality in CeRh ₂ Si ₂
3. 学会等名 SCES 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒木新吾, 恩地太紀, 小林達生
2. 発表標題 CeIn ₃ のホール係数の圧力依存性
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----