

# 強磁場研究会優秀口頭発表賞を受賞して

国際超強磁場科学研究施設 徳永研究室 特任研究員 栗原 綾佑

この度、2019年12月に大阪大学で開催された強磁場科学研究会宛会において、「CeRhIn<sub>5</sub>の磁場誘起電子ネマティック相と四極子効果」という発表を行い、若手向けの優秀口頭発表賞を受賞いたしました。この研究会では、強磁場に関連した研究を遂行する研究者を中心とし、26件の口頭発表と57件のポスター発表によって最新の物性研究が報告・議論されました。以下に私の発表内容をご紹介します。

今回の研究対象物質であるCeRhIn<sub>5</sub>は、重い電子系の物理の舞台として注目を集めてきました。結晶構造はHoCoGa<sub>5</sub>型の正方晶であり、空間群はD<sub>4h</sub><sup>1</sup>(P4/mmm)です<sup>[1]</sup>。局在した4f電子の結晶場基底状態と第一励起状態、および第二励起状態はそれぞれクラーメース2重項であり<sup>[2]</sup>、T<sub>N</sub> = 3.8 Kで反強磁性秩序を示します<sup>[1]</sup>。これまでは、静水圧力の印加による反強磁性の抑制と遍歴化、重い電子状態の形成、超伝導の発現が議論されました<sup>[1,3]</sup>。

他方最近になり、2.5 K以下かつB\* ~ 30 T以上(B//[001])の強磁場領域で、電子ネマティック相という電子状態があると提案されました。CeRhIn<sub>5</sub>は正方晶でありz軸周りの4回回転対称操作C<sub>4</sub><sup>z</sup>があるため、通常は[100]方向と[010]方向の電気抵抗や、[110]方向と[1-10]方向の電気抵抗はそれぞれ等価です。しかし、強磁場領域ではそれぞれ非等価になり、あたかも電子系の対称性が正方晶から顕著に低対称化するようになっています<sup>[4,5]</sup>。磁化は50 Tまで単調な変化を示すため<sup>[2]</sup>、B\*は非磁性自由度由来と考えられます。それゆえB\*以上の磁場領域では、最近様々な物質で盛り上がりを見せるような、電子ネマティック相が議論されています。他方、その発現機構や相を特徴づける秩序変数は未解決です。

このような、CeRhIn<sub>5</sub>で議論されている電子ネマティック相の電子状態の解明や秩序変数の決定のためには、超音波測定が有効だと考えました。超音波は、速度vで結晶中を伝搬するとき格子の歪みεを誘起します。この歪みに対する結晶の固さは弾性定数C = ρv<sup>2</sup>(ρは結晶密度)として理解でき、音波屋が扱う物理量です。超音波は、その伝搬方向をうまく選ぶことで群の既約表現Γに従う既約な歪みεを誘起できます。また、αは電子-格子相互作用を介

して同じ対称性に属する電子系自由度の電気多極子O<sub>T</sub>と結合するため、多極子の応答が弾性定数C<sub>T</sub>に現れます。それゆえ、正方晶CeRhIn<sub>5</sub>で測定可能な弾性定数C<sub>11</sub>, C<sub>33</sub>, C<sub>44</sub>, C<sub>66</sub>, および(C<sub>11</sub>-C<sub>12</sub>)/2を網羅的に調べB\*で異常が現れる弾性定数の既約表現が分かれば、電子系の低対称化を特徴づける秩序変数として多極子O<sub>T</sub>が決定できます。

以下では、非破壊パルスマグネットを用いたCeRhIn<sub>5</sub>の強磁場超音波測定の重要な実験結果を述べます。図1は、CeRhIn<sub>5</sub>の横波弾性定数(C<sub>11</sub>-C<sub>12</sub>)/2とその超音波吸収係数α<sub>T</sub>の磁場依存性です。磁場は、[001]方向からxy面内に6度程度傾けた方向に印加しています。また内挿図は、この超音波が誘起している結晶の歪みε<sub>x<sup>2</sup>-y<sup>2</sup></sub>であり、正方晶底面の正方形を長方形に変形するものです。測定の結果、2.1 K以下のB\* ~ 30 T付近で(C<sub>11</sub>-C<sub>12</sub>)/2に異常を観測しました。2.5 K以上では、B\*での弾性異常は見られません。また、超音波吸収係数α<sub>T</sub>にもB\*での異常を観測しました。20 T付近の弾性異常はメタ磁性に対応します。(C<sub>11</sub>-C<sub>12</sub>)/2はD<sub>4h</sub>群の既約表現B<sub>1g</sub>に属します。それゆえ実験結果は、B\*での対称性の低下がB<sub>1g</sub>で特徴づけられることを示唆します。一方で、C<sub>11</sub>, C<sub>33</sub>, C<sub>44</sub>, C<sub>66</sub>はB\*での異常を示しませんでした。

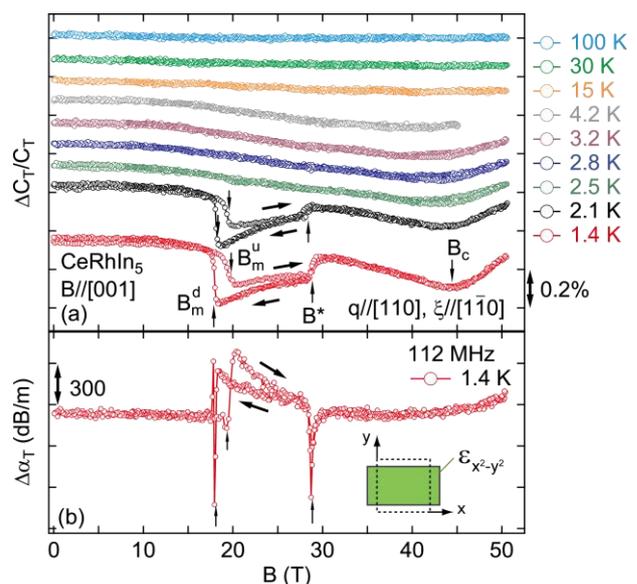


図1 CeRhIn<sub>5</sub>の(a) 弾性定数(C<sub>11</sub>-C<sub>12</sub>)/2 と(b) 超音波吸収係数α<sub>T</sub>の磁場依存性。

以上の弾性定数測定から、 $B_{1g}$  対称性が重要であることわかりました。それゆえ対称性の観点から、電子ネマティック相の秩序変数が  $B_{1g}$  に属する電気四極子  $O_{x^2-y^2}$  ( $\propto x^2-y^2$ ) として理解できると結論づけました。また、電気四極子  $O_{x^2-y^2}$  と結晶の歪み  $\epsilon_{x^2-y^2}$  との結合により、 $B^*$  では電子系のみならず結晶対称性も  $D_{4h}^1$  のサブグループである  $D_{2h}^1$  以下に低下すると予想されます。四極子秩序が実現するためには、系の量子状態が四極子自由度をもつ必要があります。詳細については述べませんが、Zeeman 相互作用による結晶場基底状態と第一励起状態の混成、および Ce-4f 電子と In-5p 電子の  $p$ - $f$  混成効果に由来する四極子自由度の獲得があるのではないかと考えています。

以上が今回の講演の概要になります。強磁場研究会は 3 日にわたって開催されましたが、受賞者の発表と授賞式は最終日に行われたようです。と言いますのも、家庭の都合で 2 日目に千葉へ戻ったため、残念ながら私は授賞式に参加できませんでした(授賞式の最中、同僚からは cool なコメントとともに、表彰状を代理で受け取る徳永先生の写真がきた)。

最後に、本講演を行うにあたりたくさんの方々にお世話になりました。特に、共著であり私が所属する研究室の徳永准教授と三宅助教、および純良単結晶試料提供をいただいた新潟大学の撰待教授と広瀬助教にはこの場を借りて感謝申し上げます。余談ですが、私は新潟大学の後藤・根本研究室出身で、居室や実験室が隣接していたこともあり、撰待先生や広瀬さんには「色々なこと」で当時からお世話になっていました。また撰待先生は、後藤輝孝先生(退官して DIY を楽しんでいるらしい)を師とする私の兄弟子でもあるため、共同研究できたことはとてもうれしく思います。

[1] H. Hegger, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **84**, 4986 (2000).  
[2] T. Takeuchi, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **70**, 877 (2001).  
[3] H. Shishido, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 1103 (2005).  
[4] P. J. W. Moll, *et al.*, Nat. Commun. **6**, 6663 (2014).  
[5] F. Ronning, *et al.*, Nature **548**, 313 (2017).