

平成 31 年 2 月 14 日

報道機関 各位

東北大学金属材料研究所

## 超高圧実験で明らかにした ウラン系エキゾチック超伝導と異常金属状態 30 年間の謎であった超伝導の対称性を解明

東北大学金属材料研究所の清水悠晴助教、青木大教授は、CEA-Grenoble(フランス原子力庁)の研究者ダニエル・ブレイスウェイト(Daniel Braithwaite)氏、ジャンパスカル・ブリゾン(Jean-Pascal Brison)氏らとともに、以下のことを明らかにしました。

【発表のポイント】

- ウラン系重い電子系<sup>\*1</sup> 化合物  $UBe_{13}$  の風変わりな超伝導 (エキゾチック超伝導体<sup>\*2</sup>) の磁場中・超高圧特性を世界で初めて明らかにした。
- $UBe_{13}$  は常伝導相の異常金属状態<sup>\*3</sup> から突如として超伝導に転移する極めて異常な物質で、その特性の詳細は 30 年もの間、未解明であった。
- 今回の発見は、固体物理学の超伝導基礎研究において重要な成果である。

本研究成果は、2019 年 2 月 12 日付で Physical Review Letters に掲載されました。

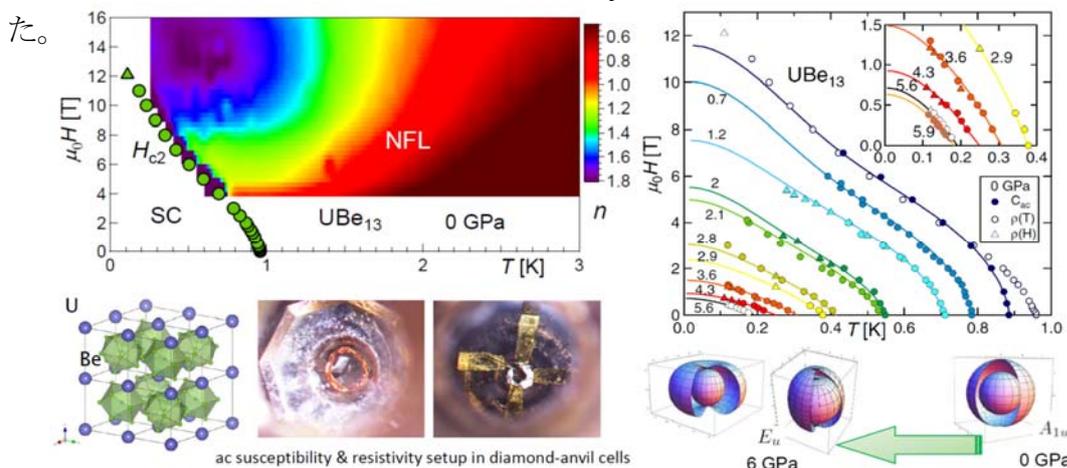


図. (左上)重い電子系超伝導体  $UBe_{13}$  の上部臨界磁場及び電気抵抗のべきに見られる異常金属状態。(左下) $UBe_{13}$  の結晶構造と、交流帯磁率及び電気抵抗のダイヤモンドアンビルセルを用いたセットアップ。(右)常圧から超高圧下約 6 GPa までの上部臨界磁場の圧力依存性。常圧では等方的なスピン三重項フルギャップ  $A_{1u}$  状態が実現し、6GPa に近づくとつれ、対称性の低い  $E_u$  スピン三重項状態の量子的な重なりが大きくなる。

本件の内容に関するお問い合わせ先

◆研究内容に関して  
 東北大学金属材料研究所  
 附属量子エネルギー材料科学国際研究センター  
 助教 清水 悠晴(しみず ゆうせい)  
 教授 青木 大(あおき だい)  
 Tel 029-267-3181 Fax 029-267-4947  
 E-mail: [yuseishimizu@imr.tohoku.ac.jp](mailto:yuseishimizu@imr.tohoku.ac.jp)

◆報道に関して  
 情報企画室広報班  
 富松美沙  
 TEL : 022-215-2144 FAX: 022-215-2482  
 Email : [pro-adm@imr.tohoku.ac.jp](mailto:pro-adm@imr.tohoku.ac.jp)

## 【詳細な説明】

### 背景

ウラン系重い電子系化合物、銅酸化物、有機導体、鉄砒素系超伝導などの「強相関物質<sup>\*4</sup>」には、格子振動<sup>\*5</sup>を媒介とした従来型超伝導は起こりにくいとされ、これまではない新しい枠組みの超伝導発現機構が存在すると考えられています。特にウラン系化合物は、5f 電子<sup>\*6</sup>による特異な量子状態を反映して、風変わりな超伝導メカニズムが存在するとされています。そのためウラン系化合物は、この特殊な非従来型超伝導、すなわち「エキゾチック超伝導」を探索する格好の対象となっています。1980年代に発見されたもっとも古いウラン系重い電子超伝導  $\text{UBe}_{13}$  は、常伝導相の異常金属状態から突如として超伝導に転移する極めて異常な物質です。この超伝導特性を理解するために、これまで多くの精力的な実験・理論的研究が行われてきました。

本研究では、上部臨界磁場<sup>\*7</sup>をこれまで未踏領域であった超伝導状態が消失する超高压下 6 GPa まで観測し、どのような超伝導特性が現れるかを調べました。

### 研究成果

1. 実験でははじめに、エキゾチック超伝導状態にある  $\text{UBe}_{13}$  の電気抵抗、交流比熱、交流磁化率を測定しました。測定条件は、圧力を常気圧から超高压下 (10 GPa) まで、温度を 0.1 K (極低温領域) までとしました。

2. 1の測定後さらに、上部臨界磁場  $H_{c2}$  の圧力効果を明らかにしました。測定する圧力条件は常圧下から 6 GPa (超伝導状態が消失する圧力) までとしました。

以上の実験から、エキゾチック超伝導状態がスピン三重項超伝導の対称性<sup>\*8</sup>をもつことを世界で初めて明らかにしました。特に、2 の実験から、常圧下ではフルギャップ的<sup>\*9</sup>な  $A_{1u}$  対称性<sup>\*9</sup>、一方で高压下 6 GPa では  $E_u$  対称性<sup>\*10</sup>をもつスピン三重項混合状態で説明できることがわかりました。

これらの研究成果は、発見から 30 年もの間も未解明だったこの系の異常な超伝導の対称性を明らかにしたことを意味し、固体物理学の超伝導基礎研究における重要な進展となります。さらに、 $\text{UBe}_{13}$  における超伝導状態は極低温下において現れる異常金属状態と密接な関連があることが、1 の実験から明らかとなりました。以上の結果は、ウラン 5f 電子系化合物におけるエキゾチック超伝導の発現機構を明らかにする上で重要な手がかりとなります。

### 将来の展望及び意義

ウラン元素を含む強い相関を持つ化合物には、磁場・圧力効果はこれまでに発見されている超伝導の中でも特に異常な性質を持つものが多く、未解明のままである系がいくつか存在しますが、本研究の対象である  $\text{UBe}_{13}$  もその一つであり、この系における超伝導対称性の解明と異常金属状態の観測は、超伝導研究分野における重要な成果です。

また、フルギャップスピン三重項超伝導<sup>\*11</sup>は、強いトポロジカル超伝導と呼ばれ、

通常の超伝導準粒子励起とは異なる準粒子励起を持つことが予想されています。本結果は、今後その機構を検証する上で非常に重要な成果となります。

### 共同研究機関及び助成

本研究は、東北大学金属材料研究所及び、CEA-Grenoble(フランス原子力庁)研究所の共同研究として行われました。ERC grant New Heavy Fermion (ERC-323 2010-SGr-20091028), ANR project PRINCESS (ANR-11-324 BS04-0002), 科研費 (Grant No. 17K14328, 15H05884, 15H05882, 15K21732, 16H04006, 15H05745)の研究助成を受けて行われました。

### 発表論文

雑誌名: Physical Review Letters

英文タイトル: Spin-Triplet p-wave Superconductivity Revealed under High Pressure in  $UBe_{13}$

全著者: Yusei Shimizu, Daniel Braithwaite, Dai Aoki, Bernard Salce, and Jean-Pascal Brison.

DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.067001>

### 用語解説

※1 重い電子系: 希土類元素やウランなどのアクチナイド元素を含む金属化合物中に存在する電子は、局所的な f 電子が低温で量子効果によって固体結晶中を動き回ります。f 電子間には非常に強い斥力がはたらくため、結晶中では通常の金属よりも 100 倍から 1000 倍も遅い速度で(言い換えると、100 倍から 1000 倍も大きな有効質量を持ちながら)ゆっくり動き回っています。超伝導は何らかの引力によって電子が対を成すことによって生じますが、電子が強い斥力を受けているにもかかわらず、なぜ超伝導引力が生じるのかを解明するため、これまでに多くの実験的・理論的研究が行われています。

※2 エキゾチック超伝導体: 従来型の超伝導体のことを 1957 年に提唱された Bardeen-Cooper-Schrieffer の理論にちなんで BCS 超伝導と呼びますが、この理論では説明できない異常な超伝導をエキゾチック超伝導と呼び、その超伝導特性を理解するための研究が精力的に行われています。

※3 異常金属状態: 通常の金属ではランダウのフェルミ液体理論で説明がつかますが、フェルミ液体理論では説明がつかない異常な金属状態(非フェルミ液体状態)が重い電子系化合物には多く見られ、これは熱揺らぎが抑えられる低温領域において古典物理学では説明できない量子的な揺らぎが発達しているためと考えられています。

エキゾチック超伝導はそのような異常金属状態(非フェルミ液体状態)が発端となって起こると考えられ、その異常性の起源を明らかにすることがエキゾチック超伝導のメカニズムを解明する重要な手がかりになります。

※4 強相関物質: 重い電子系超伝導や銅酸化物高温超伝導体を始めとする金属化合物では結晶中を動き回る電子はクーロン斥力などの強い斥力を受けています。このような電子間に強い相関がはたらく物質群は強相関電子系と呼ばれ、その量子状態を明らかにするために近年盛んに研究が行われています。

※5 格子振動: 固体中では原子が格子を組んでおり、熱振動によって格子が振動します。格子振動は絶対零度でも存在しますが、従来型超伝導が生じるのはこの格子振動によると考えられています。

※6 5f 電子: ウラン(U)元素やネプツニウム(Np)元素には原子核の 5f 軌道に電子が占有されており、5f 電子と呼びます。特に、結晶中の 5f 電子は局在性(原子にとどまっている性質)・遍歴性(結晶中内を動き回る性質)の二重性の性格を持つため、固体の物性に非常に大きな影響を及ぼし、エキゾチック超伝導を始めとする非常に多彩な量子力学的効果が現れます。

※7 上部臨界磁場: 超伝導は磁場で壊れる性質を持ちますが、超伝導状態が完全に消える磁場のことを上部臨界磁場と呼びます。重い電子系には上部臨界磁場の性質が従来型超伝導の理論では説明できないものが多く存在します。

※8 スピン三重項超伝導の対称性: 超伝導は二つの電子が対をなすことによって起こります。電子はスピンをもちますが、従来型の超伝導体では二つの電子が反平行の場合スピン一重項超伝導(従来型超伝導はスピン一重項)、平行の場合にはスピン三重項超伝導の対称性を持つと言われます。 $A_{1u}$  対称性と  $E_u$  対称性はスピン三重項超伝導の対称性に属します。

※9 フルギャップ的な  $A_{1u}$  対称性: 超伝導体では、金属を特徴づけるフェルミ面の上に超伝導ギャップと呼ばれるエネルギーギャップが存在しますが、その大きさによって超伝導になる電子対の結合の強さが特徴づけられます。従来型(スピン一重項)超伝導では超伝導ギャップは、どの方向でも同じ(等方的)でフルギャップ的であると言われます。一方、スピン三重項にも等方的なフルギャップ的な超伝導ギャップをもつ対称性があり、 $A_{1u}$  対称性とよばれます(図)。

※10  $E_u$  対称性: 固体中ではその結晶の対称性を反映して、可能な超伝導対称性が存在しますが、 $E_u$  対称性も立方晶ウラン化合物  $UBe_{13}$  において起こりうる超伝導対称

性のひとつです。等方的な  $A_{1u}$  対称性よりも対称性が低く、楕円のような形や超伝導ギャップが上下で消失した形をしています(図)。

※11 フルギャップスピン三重項超伝導: スピン三重項には超伝導ギャップがフェルミ面上で絶対零度においてもゼロとなっている超伝導状態が多く存在しますが、一方で超伝導ギャップをどの方向を向いても存在している対称性があり、そのなかでも  $A_{1u}$  対称性は最も代表的なもので(図)、ヘリウム 3 における超流動状態においても実現していることがわかっています。