



独立行政法人 日本原子力研究開発機構
公立大学法人 首都大学東京

ウラン系強磁性超伝導体における新しいタイプの磁性現象の発見(お知らせ)

—磁性が共存する超伝導メカニズムの解明へ—

【発表のポイント】

- ウラン系強磁性超伝導体で新しいタイプの磁性現象を発見。
- 磁性と共存する超伝導メカニズムの解明に向け新たな手がかりを提供。

独立行政法人日本原子力研究開発機構(理事長 松浦祥次郎)先端基礎研究センターの立岩尚之研究主幹、芳賀芳範サブリーダー、山本悦嗣研究副主幹、Zachary Fisk グループリーダー及び首都大学東京(学長 原島文雄)大学院理工学研究科の松田達磨准教授は、磁性(磁石になり易い傾向)と超伝導(電気)が共存する唯一の超伝導体として知られているウラン系強磁性超伝導体¹⁾において、既存の磁性理論では説明できない全く新しいタイプの磁性現象を発見しました。

水が氷になることや、磁石が高温で磁性を失うことなど、物理的・化学的に均一な物質の相(性質)が他の形態の相(性質)へ転移することを相転移²⁾といいます。この相転移に伴う物質の形態の変化は古くから詳しく研究されており、物質の種類や相転移の種類によらず、数学的に表現すると幾つかのタイプに分類できる事が知られています。今回、当研究グループは世界最高レベルの極めて純度の高いウラン化合物の単結晶を作成し、その磁性の変化を、温度・磁場を変えて、特に強磁性が発現する臨界点³⁾付近の挙動(臨界現象⁴⁾)を詳しく測定しました。その結果、その挙動が理論的予想から大きく逸脱しており、従来知られている現象とは異なる新しいタイプの磁性現象が存在することを見出しました。このことは新たな相転移現象の存在を示唆し、磁性が共存する超伝導メカニズムの解明に向けた大きな一歩といえます。

今回の発見は、原子力基礎研究を通して、固体物理学における相転移の研究に新たな展開を提供するとともに、超伝導を含めた新しい機能をもったウラン化合物を作るための原理の解明につながり、将来の原子力科学の発展にも寄与すると期待されます。

本研究成果は、米国物理学会誌「Physical Review B (フィジカルレビューB)」オンライン版に、Editors' Suggestion(注目論文)として掲載されています。

【本件に関する問い合わせ先】

独立行政法人日本原子力研究開発機構
(研究内容について)
先端基礎研究センター アクチノイド物質開発研究グループ 研究主幹 立岩尚之
TEL:029-284-3526, FAX:029-282-5939

(報道担当)

広報部報道課長 中野 裕範 TEL:03-3592-2346, FAX:03-5157-1950

1. 背景

水を大気圧中で摂氏 0 度以下に冷やすと氷になります。また、加熱して摂氏 100 度になると沸騰して水蒸気になります。これは相転移の身近な例と言えます。他には、磁石を高温にすると磁性を失うことも相転移の例として挙げられます。

相転移が生じる温度、圧力などを臨界点と言います。この臨界点近くでは物質の密度や磁化率⁵⁾ (磁石になり易い傾向)、比熱などの性質が急激に変化することが知られています。

自然界には、多くの相転移(例えば、液相/気相転移、磁性/非磁性転移、金属/絶縁体転移)が存在します。例えば水の温度-圧力相図(図 1 左)では、液体と気体の境界線(図中の黒線)に沿って、温度と圧力を上げてゆくと、温度 374 °C、圧力 22.1 MPa で臨界点に到達します。この臨界点の温度または圧力を超えると水は液体と気体の区別が付かなくなる「超臨界水⁶⁾」となります。

一方、強磁性体(磁石)においては、温度-磁化率相図(図 1 右)から分かるように、臨界点を境に高温領域では磁性が急速に消失してきます。しかし、外部磁場を加えると磁性が再び誘起され、高温領域でも「磁石になる傾向」は残ります。この「指標」を磁化率と呼びます。図中赤線で示したのが強磁性体に見られる一般的な磁化率の温度変化です。高温から温度を下げ、臨界点に近づいてゆくと、臨界点近傍で磁化率が急激に増大していきます。

上で述べた臨界点付近における物質の挙動は臨界現象と呼ばれます。自然界には 100 を越える元素、さらにそれらを組み合わせた無数の物質が存在し、それぞれが様々な形で相転移を起こしますが臨界現象に注目すると、それらは幾つかのタイプに分類される事が知られています。例えば液体から気体への相転移と、特定の磁石の方向性を持つ強磁性体の相転移とは、同じ理論で記述することが出来ます。

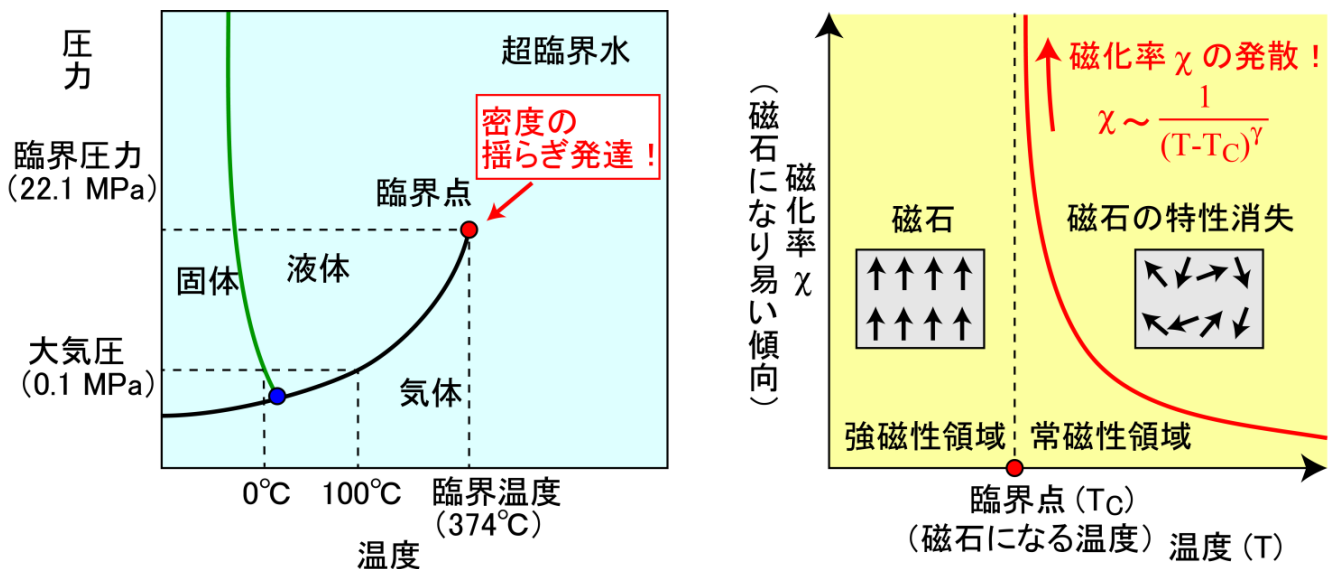


図 1 (左) 水の温度-圧力相図 (右) 強磁性体 (磁石) の温度-磁化率相図

2. 研究の手法と成果

強磁性は超伝導と競合する性質であり、両者は共存しないと長く考えられてきました。しかし、2000 年以降、ウラン化合物 UGe₂, URhGe, UCoGe で強磁性状態と超伝導の共存が発見され、これらはウラン系強磁性超伝導体と呼ばれ多くの興味を集めています。

当研究グループは、このウラン系強磁性超伝導体の強磁性そのものが、鉄等で見られる通常の強磁性と異なる性質を持っているのではないかと考え、強磁性を特徴付ける相転移近傍での臨界現象(詳細な磁性の変化)を調べることで、磁性の特徴を明らかにすることを目的としました。相転移は、試料内部の不純物の影響を強く受け易いため、詳しい相転移現象を調べるには、試料から不純物を可能な限り除去する必要があります。当研究グループは、独自の高純度単結晶⁷⁾作成技術を有しており、世界最高レベルの極めて純度の高い単結晶の作成に成功し、この試料を用いて臨界点に極めて近い領域での温度及び磁場に対する磁化の応答を精密に測定してデータを分析しました。

図2に URhGe について得られたデータの例を示します。URhGe の臨界点は、温度が 9.45 K(ケルビン)であり、その周辺で臨界現象が現れるため、温度及び磁場を精密に制御しながら磁化の応答のデータを取得しました(図2左)。そして、得られたデータを解析し、磁化率の変化を数学的に表現した臨界指数⁸⁾を決定した結果、これまでにない値を示しました(図2右)。臨界指数の一つ γ は、理論的には 1.238 となるべきですが、URhGe の実験からは 1.0 が得られています。別のウラン系強磁性超伝導体 UGe₂ でもほぼ同じ値が得られています。

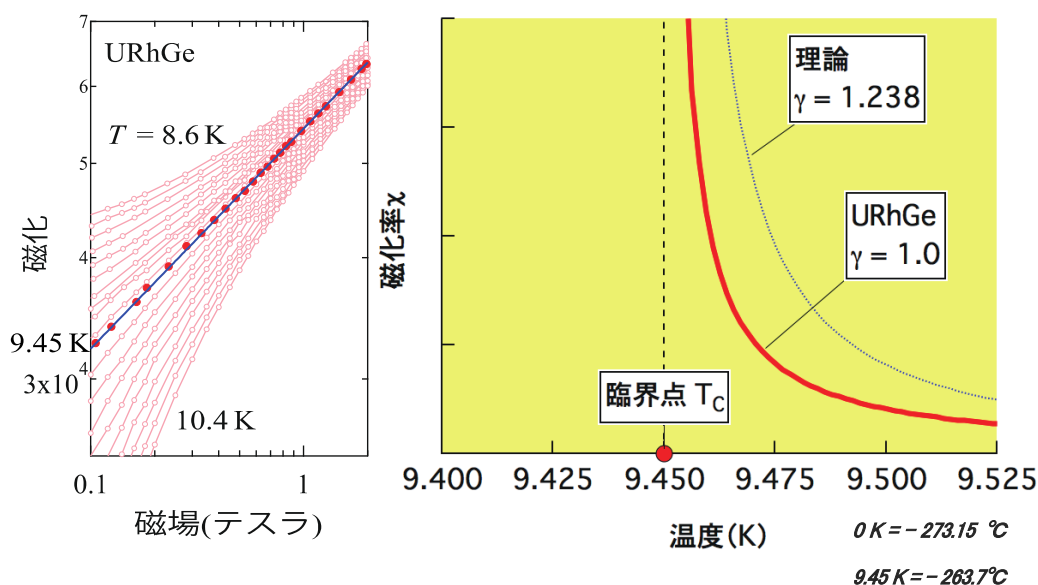


図 2 実験データ (左) の解析から得られた URhGe の磁化率 (右図実線)。理論の予測 (点線) と大きく異なる。

強磁性体の臨界指数は古くから理論的に研究されており、様々な種類の強磁性体の臨界指数が示されています。今回調べたウラン系強磁性体は、いずれも磁石が特定の方向に向きやすい性質を持っています。しかし、本研究の結果で示された臨界指数は、これまでの性質を持つ強磁性体を記述する理論と一致しないばかりか、一般の磁性体を記述する理論でも説明できません。

これは固体物理における新たな相転移現象の存在を示唆するものと期待されます。また、これまでの磁石にない特殊な磁性を持っている可能性があり、磁性が共存する超伝導メカニズムの解明に向けた大きな一歩ともいえます。

3. 本研究の波及効果と今後の期待

これまでの研究では、ウラン系強磁性超伝導体は、特定の方向性を持った磁石の性質を有するとの認識がありましたが、本研究で明らかにした磁化率の変化は、ウラン系強磁性超伝導体が全く新しいタイプの磁石の性質を有することを示しています。このことは、ウラン原子が有する電子の特性に強く影響を受けていると考えられます。

今回、明らかとなった新しいタイプの磁石の性質の起源解明には今後の研究が必要となりますが、磁石の源である、ウランのもつ電子の固体中の振舞には、まだ知られていない部分が多くあり、それが超伝導になる磁石を生み出していると考えられます。

ウラン化合物は、様々な条件下で磁性と超伝導の性質が表れる興味深い物質群であるため、大きな関心を集めています。それは、このような性質が他の物質にはなく、電子の性質や相転移現象を調べる格好の物質だからです。そのなかでもウラン系強磁性超伝導体は、強磁性と超伝導が共存する唯一の物質であり、その物性の解明が広く物質科学の多くの謎の解明につながるため、現在、精力的な研究が行われています。

今回の発見は、原子力基礎研究を通して、固体物理学における相転移の研究に新たな展開を提供するとともに、超伝導を含めた新しい機能をもったウラン化合物を作るための原理の解明につながり、将来の原子力科学の発展にも寄与すると期待されます。

本研究成果は、米国物理学会誌「Physical Review B (フィジカルレビューB)」オンライン版に、Editors' Suggestion(注目論文)として掲載されています。

URL: <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.89.064420>

参考文献

[1] N. Tateiwa, Y. Haga, T. D. Matsuda, E. Yamamoto, and Zachary Fisk, Phys. Rev. B **89**, 064420 (2014).

4. 用語解説

1) ウラン系強磁性超伝導体

UGe₂, URhGe, UCoGe では、強磁性状態で超伝導が出現し、両方の秩序状態が共存する。一般に強磁性は超伝導を破壊し、共存は難しいと考えられてきたことから、ウラン系強磁性超伝導体の発見は多くの興味を集め、現在でも盛んに研究が行われている。

2) 相転移

水が氷点下0°C以下で氷になるなど、物理的、化学的に均一な物質の相 (Phase) が他の形態の相へ移り変わること。

3) 臨界点

相転移が起きる温度または圧力。磁石の場合、磁石になる温度。

4) 臨界現象

臨界点近傍で見られる、物理量(密度、磁化、比熱など)の挙動に異常性が現れる現象。例えば磁石は、磁化率(磁石になり易さの指標)が発散する。

5) 磁化率

外部から加える磁場に応答する磁化の比率。「磁石になりやすさ」の目安。相転移温度では磁化率が発散し、磁石が誕生する。

6) 超臨界水

水は、臨界点の温度(374 °C)及び圧力(22.1 MPa)を超えると液体と気体の区別が付かなくなる「超臨界水」となる。超臨界水は、高い拡散性(空間中への拡がる能力)と高い溶解性(物を溶かす能力)を持つ。火力発電ではタービンを回す蒸気として利用されている。

7) 単結晶

原子の規則的な配列が巨視的な大きさまで保たれている物質。水晶など、天然に産出する鉱物が代表例である。日常目にする物質の多くは、小さな単結晶がばらばらな向きに集まったものであり、方向性は失われている。強磁性がどの方向に向きやすいのかを調べるためには、単結晶を作成して磁化の大きさを測定する必要がある。

8) 臨界指数

臨界現象⁴⁾を数学的に示したもの。例えば、磁石のなり易さ(磁化率 χ)は、臨界指数 γ を用いて、「 $\chi \sim (T - T_c)^{-\gamma}$ 」と表すことができる。ここで、 T 及び T_c は、それぞれ温度及び臨界点である。磁化の温度及び磁場に対する応答からは β , δ と呼ばれる臨界指数が得られる。一つの臨界現象に、一つの臨界指数の組み合わせ(β , δ , γ)が対応する。これまでに、磁性を始めとする様々な相転移について理論的研究が行われ、それぞれについて臨界指数の組合せが得られている。

(補足説明)「磁石のタイプ」について

人工的に作成したものも含めて、世の中には沢山の磁石があり、様々なタイプが存在します。個々の原子磁石が特定の方向にしか向かないもの(一軸的)や、どの方向にも向く事が出来るもの(等方的)、さらにはある平面内にしか向かないもの(平面的)があります。さらに、原子磁石の相互作用の違いに応じていくつか分類されています。

臨界指数はこれらの「磁石のタイプ」に応じて固有な値を示します。金属の磁石でも絶縁体の磁石でも「磁石のタイプ」が同じなら臨界指数の値(β , γ , δ)は同じとなります。言い換えれば、臨界現象を調べることで「磁石のタイプ」がわかります。