



平成 25 年 5 月 27 日

国立大学法人東北大学  
国立大学法人茨城大学

## 磁場誘起量子相の磁気構造を直接決定

- 強相関物質の代表物質 URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> における 30 年の謎に解答 -

### ❖ 概要

東北大学と茨城大学は、フランス国立強磁場研究所、フランス原子力庁、ラウエランジュバン研究所と共同で、物質中の電子が強い相互作用により特異な性質を示す強相関物質の代表例である化合物 URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> において 30 年以上前に見いだされた磁場誘起量子相の磁気構造を直接決定する事に成功し、長年の謎に解答をもたらしました。この実験には、東北大学が世界に先駆けて開発した独自のパルス強磁場中性子回折装置が用いられました。この装置は、従来の超伝導を用いる磁石による最高磁場の約 2 倍の超強磁場を発生出来る強力な装置で、現在、東北大学金属材料研究所磁気物理学部門が米、英、仏、日の世界 4 拠点で運用を行っています。第一号機の運用開始から、既に 6 年を経過しても、他の研究機関では同様の装置は実現しておらず、その独創性と性能が世界中から高く評価されています。今回、この最先端の計測技術が、物質の性質を探求する物性物理学の中心的課題である強相関物質の長年の宿題の一つに解答をもたらすことになりました。

物質を形作る原子は、電子と呼ばれる電気と磁気をもつ粒子を抱えており、この電子が動くことで金属に電気が流れ、電子の磁気が揃う事で磁石が生まれます。これらの電子が互いに強く関わりをもたない物質は単純な性質を示しますが、互いに強く相互作用する物質では、1つ1つの電子の性質からは予想も出来ない性質を示すことが知られており、強相関現象と呼ばれ、現代物理学の興味のある中心の一つとなっています。URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> は、このような物質の代表例として知られており、磁場や温度の変化により超伝導や磁気秩序などの多彩な性質を示す事から、これまで 800 編を超える論文が出版されており、世界中で研究競争が行われています。中でも、約 30 年前に見いだされた地磁気の 50 万倍の 35 テスラという超強磁場中で起こる量子相転移という特異な現象は、未解決の謎の一つとされてきました。その理由は、このような強磁場中の状態を観測する手段が限られていたためですが、今回、東北大学が開発したパルス強磁場中性子回折装置を用いて、超強磁場中での原子の磁石の空間的配列をナノスケールで決定する実験が行われました。その結果、強磁場中で出現する 3 つの磁気相のうち 1 つの構造を直接的に決定する事に成功し、30 年間の謎に解答が初めて得られました。この結果は、物質の中で電子の相互作用により多様な電氣的、磁氣的状態が出現する強相関現象を理解する上で重要な契機となる画期的な成果です。

本成果は、2013 年 5 月 23 日（米国東部時間）、米国物理系雑誌 Physical Review Letters にオンライン掲載されました。

## Press Release

### ❖ 研究の背景

物質の中では原子が配列しており、それぞれの原子は重くて動かない原子核とその周りを動き回る電子から構成され、この電子のもつ電気の粒と小さな磁石から物質の電気と磁気生まれます。実際に、この電子が動くことで金属に電気が流れ、電子の磁気が揃う事で磁石となります。これらの電子が互いに強く関わりをもたない物質は、独立した電子の振る舞いの単純な足し合わせの様に振る舞い、単純な性質を示します。しかし、電子が互いに強く相互作用する物質では、1つ1つの電子の性質からは予想も出来ない性質を示すことが知られており、電子間の相互作用（相関）により超伝導現象や様々な磁気配列が出現することから、強相関現象と呼ばれ、物理学の興味を中心の一つとなってきました（図1）。なかでも、 $\text{URu}_2\text{Si}_2$  は、このような物質の代表例として知られています。その理由は、この物質では、低温で電子の有効的な質量が大きな状態が形成されること、1つの物質でありながら磁場や温度の変化により様々なタイプの秩序状態が出現すること、など多彩な性質を示すためです。その研究の焦点は、約30年前に地磁気の50万倍の35テスラという超強磁場中で見いだされた量子相転移という電子の揺らぎによって物質がカメレオンのように状態を変える現象ですが、これらの強磁場中の状態がどのようなものかは、未解決の謎とされてきました。その解明のためには、これらの状態における電子磁石の空間的な配列を直接決定出来る中性子回折という実験手段を、これまでの常識を打ち破る超強磁場において実現する必要があるとされてきました。

### ❖ 成果の内容

研究グループでは、6年前から、30テスラを超える非常に強い磁界を発生させて、中性子回折という物質中のナノスケールの磁石の配列を決定する方法を開発し、世界に先駆けて実現してきました（図2）。この方法は、他のグループが全く実現出来ない独創性があることから、米オークリッジ国立研究所、英ラザフォードアプルトン研究所、仏ラウエランジュバン研究所および日本のJ-PARC物質生命科学研究施設の4カ所で、東北大学金属材料研究所磁気物理学部門により運用されています。今回、この装置を $\text{URu}_2\text{Si}_2$ に対して用いることにより、強磁場中で出現する複数の磁気状態のうちでII相と呼ばれる相が、U原子上の磁石が結晶の1つの軸に沿って上上下下のように三倍周期で繰り返すフェリ磁性と呼ばれる状態になっていることを初めて直接的に決定しました（図3）。また、この実験においては、Ruの一部をRhという元素で置き換えることで、II相を安定化する工夫も行われました。今回の結果は、様々な周辺情報から間接的に類推したこれまでの情報とは異なり、磁気相の配列を初めて直接的に決定したものであるため、今後の研究の展開に大きなインパクトを与えるものです。この結果により $\text{URu}_2\text{Si}_2$ における量子相転移と多彩な磁場中磁気状態の出現機構の理解が可能になり、30年間にわたる謎の解明に繋がるものとして期待されています。研究グループでは、今後、他の相の状態も同様に決定する事を予定しており、今後の進展に世界的に注目が寄せられています。

### ❖ 本研究成果が社会に与える影響（本研究成果の意義）

今回の研究によって、電子の揺らぎと強相関により物質の状態がカメレオンのように変わる量子相転移という現象に関する理解が格段に進展しました。その結果、電子と電子の強い相互作用が、物質の伝導や磁性等の特性にどのような影響を与えるのかという根源的な問いに対する基礎的な研究が進展するとともに、物質の特性を外部の環境によって制御する機能性材料の基礎が強固になることが期待されています。また、今回利用された強磁場中性子回折技術は、将来、生体物質等のソフトマターの構造解析への応用も期待されており、日本の先端的計測技術の世界的な存在感を高める意義があります。

## Press Release

### ❖ 特記事項

今回の研究成果は、東北大学の野尻浩之教授、吉居俊輔助教、青木大教授、茨城大学の桑原慶太郎准教授らの共同研究による成果で、日本学術振興会の科学研究費補助金の中で、最も重要な小規模研究に与えられる基盤研究(S)制度および若手研究者に与えられる若手研究(A)制度により支援されています。

### ❖ 用語の説明

#### ※1 強相関物質

物質の電気と磁気を担う電子の間に強い相互作用が働くことにより、電気抵抗がゼロになる超伝導現象、電子の物質の中での重さである有効質量が異常に大きくなる重い電子、ナノスケールの世界に固有な量子揺らぎによってカメレオンのように状態が変わる量子相転移などの多彩な現象が生じる物質群をさします。高温超伝導や重い電子系はその代表例です。

#### ※2 量子相転移

相転移とは、水と氷のように1つの物質が異なった状態を取る現象です。水の相転移のような通常の相転移は温度変化で状態が変わりますが、温度を絶対零度に近づけた時に、ナノスケールで電子が量子的に揺らぐ事で、異なった相(状態)が現れることがあり、これを通常の相転移と区別して量子相転移と呼んでいます。量子揺らぎは磁場を加えると制御出来るため、強磁場は量子相転移研究の重要な手段となっています。

#### ※3 中性子回折

中性子は、電荷をもたず小さな磁石であるスピンをもっているために、中性子を物質に照射すると、特定の波長において物質内の原子(電子)の磁石の規則的な配列によって干渉が起こります。この現象は、原子の構造を決めるX線回折の磁石版であり、磁性体の構造を決める決定的な手段として広く用いられています。

#### ※4 パルス超強磁場

物質の中には地磁気の数万倍から百万倍の強い磁場が働いており、その磁場によって、原子(電子)の磁石が揃えられて磁石となっています。永久磁石では、地磁気の1万倍程度の磁場しか実現出来ないため、非常に強度の強い合金で出来たコイルに数万アンペアの大電流を瞬間的に流して、地磁気の数十万倍の超強磁場を発生させて、研究に用いています。瞬間的にパルスの磁場が発生することから、この方法はパルス超強磁場と呼ばれており、日本は、このパルス超強磁場技術で世界的なリーダーになっています。

### ❖ 論文掲載情報

Magnetic Structure of Phase II in  $U(Ru_{0.96}Rh_{0.04})_2Si_2$  Determined by Neutron Diffraction under Pulsed High Magnetic Fields

パルス超強磁場中性子回折により決定した $U(Ru_{0.96}Rh_{0.04})_2Si_2$ のII相の磁気構造

K. Kuwahara, S. Yoshii, H. Nojiri, D. Aoki, W. Knafo, F. Duc, X. Fabrèges, G.W. Scheerer, P. Frings, G. L. J. A. Rikken, F. Bourdarot, L. P. Regnault, and J. Flouquet  
*Physical Review Letters*, Vol.110 No.216406 (2013).



東北大学



茨城大学  
Ibaraki University

## Press Release

❖ 本件に関する問い合わせ先

東北大学金属材料研究所 教授 野尻浩之

TEL 022-215-2017 E-mail:nojiri@imr.tohoku.ac.jp

茨城大学大学院理工学研究科 准教授 桑原慶太郎

TEL 029-228-8361 E-mail:kuwa@mx.ibaraki.ac.jp

図1

(a)  $\text{URu}_2\text{Si}_2$ の強磁場中の量子相転移近傍の状態の模式的な相図。今回、Rhを少量Ruと置換し、II相を安定化させてその構造を決定した。

(b) Rhを4%置換した $\text{URu}_2\text{Si}_2$ の磁化の磁場依存性。30テスラ付近でII相が表れる

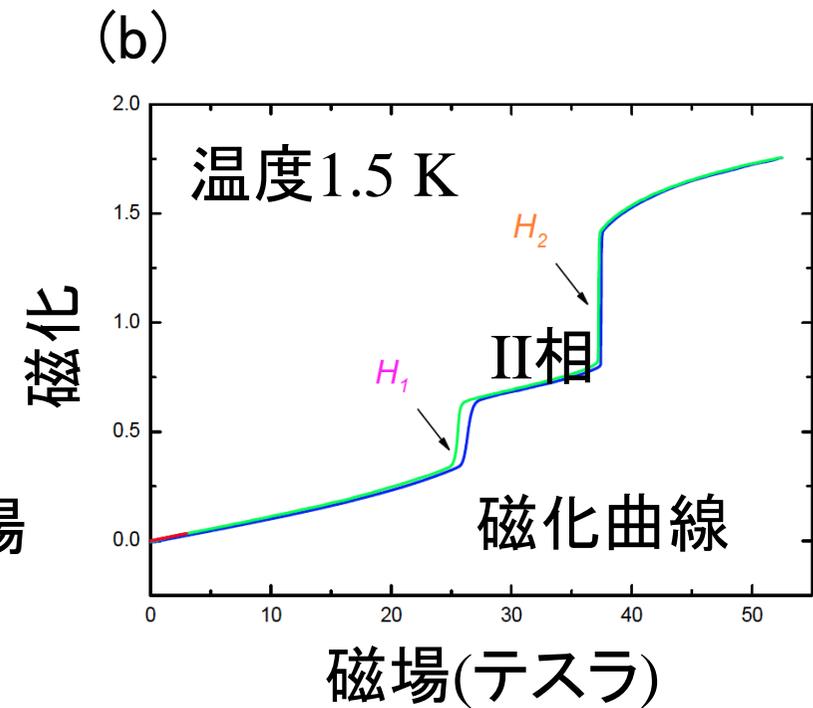
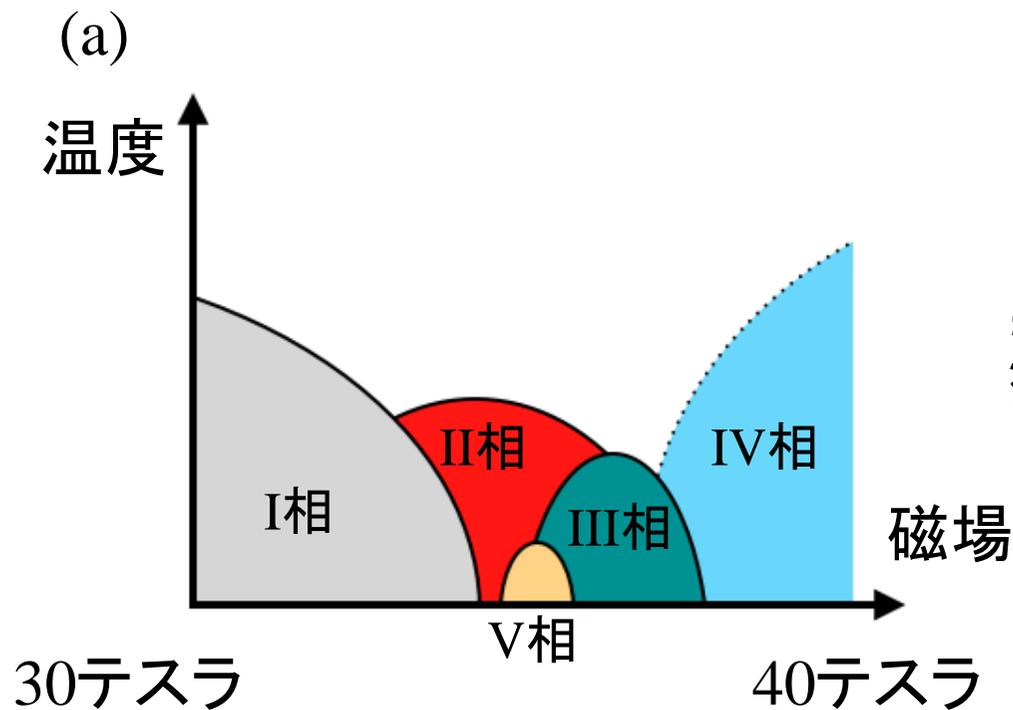


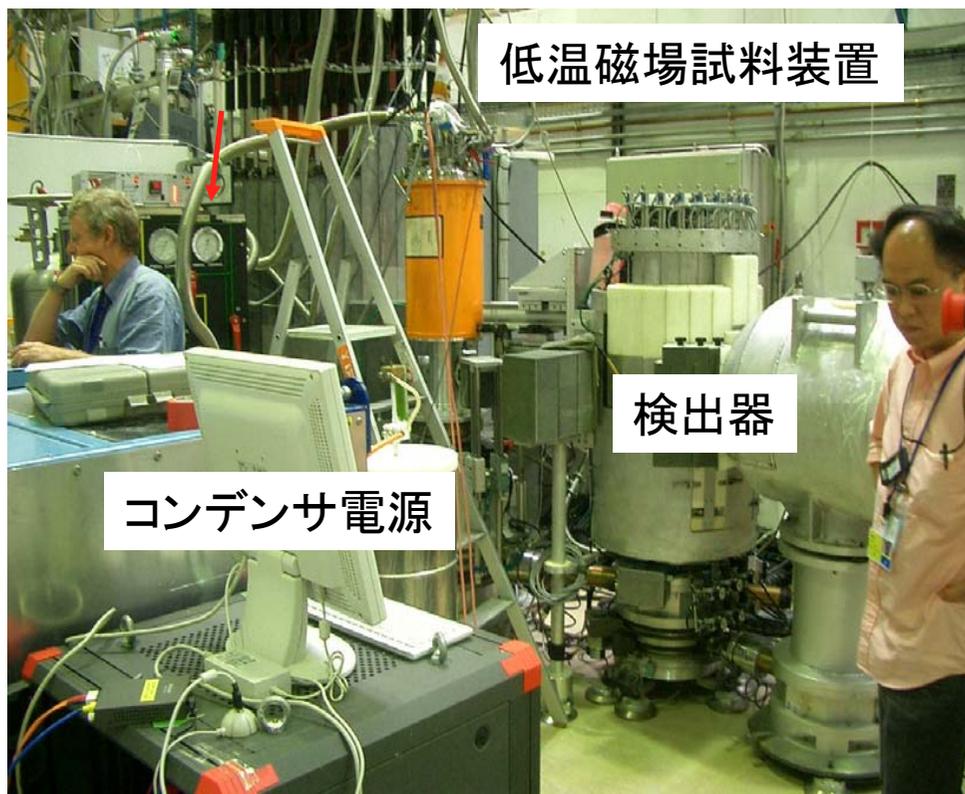
図2

(a)実験風景の写真、中央の低温磁場試料装置中に設置されたパルス磁石にコンデンサ電源から大電流を流して、中性子を照射して回折実験を行う。

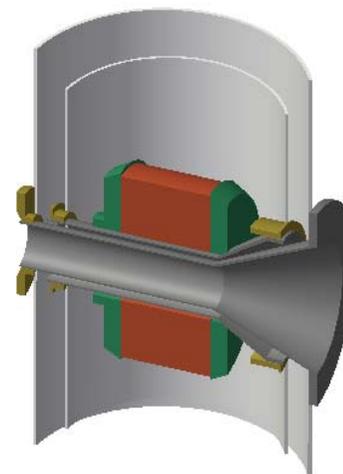
(b)強磁場発生装置の断面図、

(c)磁場発生コイルの写真

(a)



(b)



(c)



図3

(a)今回決められたII相の磁気構造の模式図。矢印は1つの原子の磁石を示す。3倍周期で上上下下というフェリ磁性構造を取る。

(b)フェリ磁性に関する指数(2/3 0 0)反射と呼ばれる中性子信号の磁場依存性。27 テスラ以上でフェリ磁性状態の出現に伴い強度が増大する。

