



PRESS RELEASE

岡山大学記者クラブ

文部科学記者会

科学記者会

御中

令和 3 年 12 月 20 日

岡 山 大 学

報道解禁：2021年12月23日（木）午前4：00（新聞は23日朝刊より）

最高の臨界温度を有するスピン三重項超伝導の発見

◆発表のポイント

- ・超伝導は、二つの電子が対を作って動き回るエネルギー損失のない量子状態です。既知の超伝導体のほとんどは電子対がスピン（注1）の向きを逆さまにするスピン一重項状態にあります。
- ・今回、 $K_2Cr_3As_3$ で 6.5K という高い臨界温度でスピン三重項超伝導状態の実現を発見しました。この場合、電子対スピンの向きが同じ方向に揃います。このような新奇な状態はトポロジカル的に非自明（注2）で、次世代量子コンピュータへの応用が期待されます。

岡山大学学術研究院自然科学学域（理）の鄭国慶教授は、遷移金属 Cr を含む物質 $K_2Cr_3As_3$ が 6.5K(ケルビン)というかつてない高い臨界温度でスピン三重項超伝導を実現していることを発見しました。さらに、この超伝導状態の波動関数はトポロジカル的に非自明で、トポロジカル量子計算に応用できることを示しました。本研究成果は日本時間 12 月 23 日 4 時に、米国科学誌「*Science Advances*」に掲載されます（オープンアクセス）。

超伝導は、二つの電子が対を作って動き回るエネルギー損失のない状態です。二つの電子がスピンの向きを逆さまにする場合はスピン一重項といい、スピンの向きを揃えた場合はスピン三重項といいます。既知の超伝導体はほとんどスピン一重項状態にあり、スピン三重項超伝導体は数個の候補しかありません。また、スピン三重項状態を同定する手段も限られています。

今回、鄭教授は中国科学院物理研究所の研究者と共同で、核磁気共鳴法（注3）測定により $K_2Cr_3As_3$ がスピン三重項超伝導体であることを発見しました。これは、2016 年に鄭教授らが $Cu_xBi_2Se_3$ （転移温度 3.5K）で発見したスピン三重項超伝導よりも高い臨界温度を持ちます。

◆研究者からのひとこと

スピン三重項超伝導は極めてまれな量子現象で、その物理の解明が基礎科学のみならず、産業への応用の面においても重要です。今回、高い温度（ヘリウムの液化温度より高温）でのスピン三重項超伝導が明らかになったことで、今後の研究に弾みがつくと期待しています。



鄭教授



PRESS RELEASE

■発表内容

<現状>

既知の超伝導体はほとんどスピン三重項状態にあります。これには銅酸化物高温超伝導体や鉄砒素高温超伝導体も含まれます。一方、ノーベル賞が与えられた液体ヘリウム3で起きている超流動は、原子対（クーパ対）を構成する2つのスピンの向きが揃った、スピン三重項状態にあります。

ヘリウム3の固体版であるスピン三重項超伝導体の探索は、電子間のクーロン相互作用が強い強相関電子系において長年行われてきました。しかし、数個の候補が上がったものの、確実なものはありませんでした。また、これらの候補の超伝導転移温度が絶対温度1度（1 K）程度の低いもので、測定を困難にしていました。なお、2016年に弱相関物質 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ で発見されたスピン三重項超伝導はヘリウム3とは別タイプでした。

<研究成果の内容>

岡山大学と中国科学院の国際研究グループは、遷移金属クロム（Cr）を含む化合物 $\text{K}_2\text{Cr}_3\text{As}_3$ に注目しました。クロムはやかんやボウルなどキッチン用品の材料やメッキとして使われる遷移金属で、その3d電子間の相互作用が強いです。研究グループは数年前に、この相互作用が鉄と同じく強磁性的であることを突き止めました。すなわち、3d電子スピンの向きを揃えようとする傾向は、超伝導のバックグラウンドで働いているのです。実は、液体ヘリウム3でも似たような相互作用が働いています。さらに、超伝導が起きると、エネルギーギャップ（注4）が開きますが、 $\text{K}_2\text{Cr}_3\text{As}_3$ におけるギャップもヘリウム3に似ており、ギャップが開かない場所があることを同研究グループが明らかにしました。ギャップが開かない場所は、地球で例えるならば、ちょうど北極点と南極点に相当します。

今回、研究グループは $\text{K}_2\text{Cr}_3\text{As}_3$ の単結晶を作製し、核磁気共鳴法によってスピン磁化率を測定しました。結果、磁場を結晶のc軸に平行に印加したときにのみ超伝導状態でスピン磁化率が減少し、その他の方向では減少しないことを発見しました。これはスピン三重項超伝導の最も直截的な証拠です。また、群論解析（注5）から、超伝導を担う電子対の軌道関数が液体ヘリウム3と同じくp波(p_x+ip_y)であることを明らかにしました。このような状態はトポロジカル的に非自明で、その表面や磁束の中心の電子状態が量子計算など次世代の産業への応用が期待できます。

<社会的な意義>

持続可能な社会を実現するためには、発電所から各家庭へのロスなしの送電や発電した余剰電力の蓄電を可能とする超伝導は欠かせない技術の一つです。スピン三重項超伝導体は上部臨界磁場が高く、大電流を流しても、その電流が発生する磁場によって超伝導状態が壊れません。そのため、スピン三重項超伝導体は送電線に適します。さらに、スピン三重項超伝導は、その波動関数にメービウス帯のような「ひねり」があって、表面や磁束の中心の電子状態（マヨラナ励起という）は散乱に強いです。そのため、次世代のトポロジカル量子コンピュータへの応用が期待されます。



PRESS RELEASE

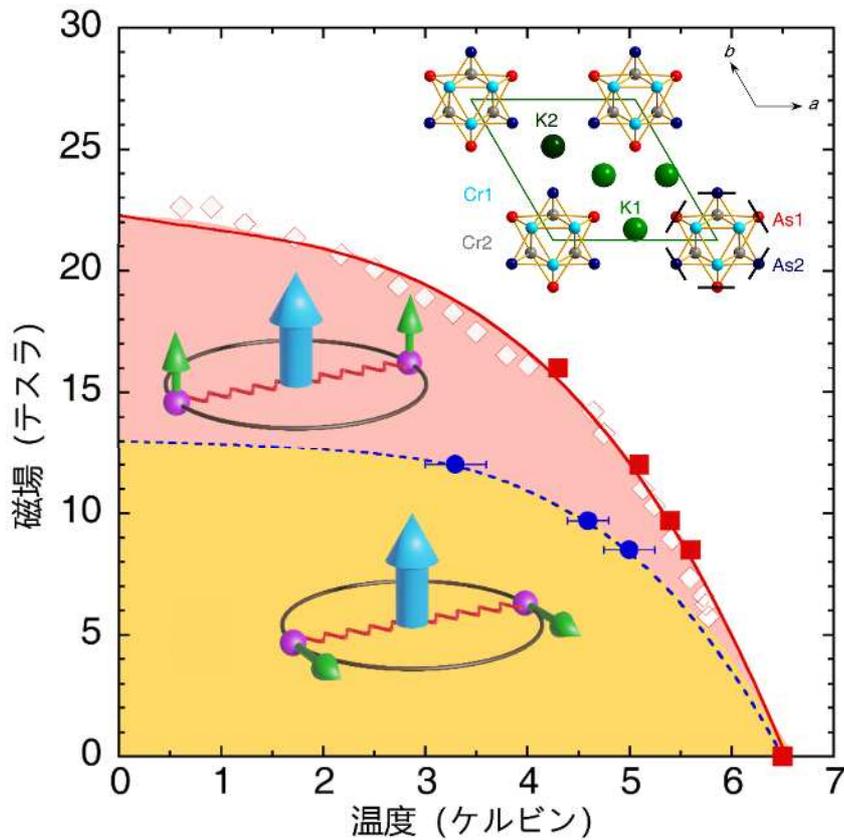
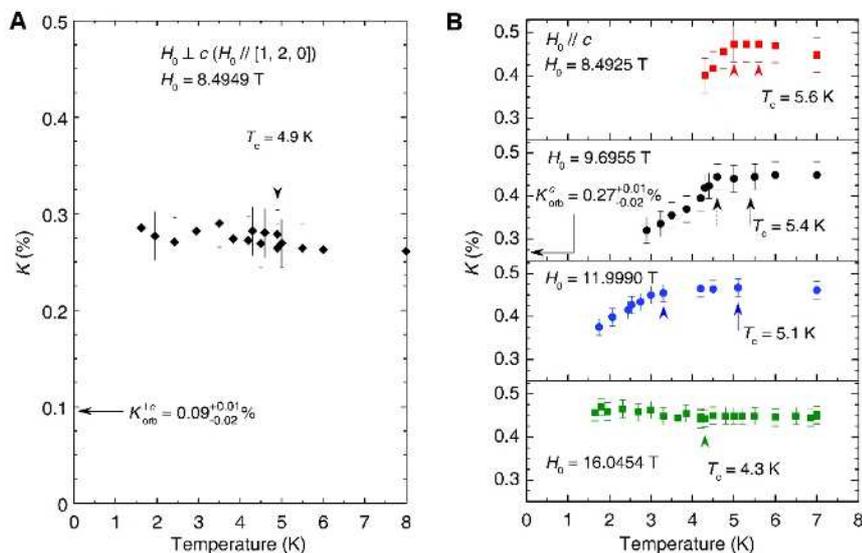


図 1. $K_2Cr_3As_3$ の結晶構造、磁場・温度相図、および超伝導電子対のスピンの配置。色塗されている領域は超伝導状態。電子はピンクの球で、二つの電子のスピンの向きを揃えている（スピン三重項状態）様子は緑の三角錐で表されています。大きい青三角錐は電子対の軌道角運動量を、波線は電子間の引力を表しています。上部臨界磁場は非常に高く、低温では 20 テスラを超えています。1 テスラは 1 万ガウス。なお、地磁気は約 1 ガウスです。





PRESS RELEASE

図2. $K_2Cr_3As_3$ におけるスピン磁化率の方向依存性。図1を導く実験データです。磁場を c 軸に垂直に印加すると、超伝導状態に突入してもスピン磁化率が変わりません。それに対して、磁場を c 軸に平行に印加すると、超伝導転移温度以下ではスピン磁化率が減少します。これは、電子対の二つのスピンの揃い、低磁場では c 軸に垂直 (ab 面内) に向いていることを意味します。

■論文情報

論文名: Spin-Triplet Superconductivity in $K_2Cr_3As_3$

掲載紙: Science Advances

著者: Jie Yang, Jun Luo, Changjiang Yi, Youguo Shi, Yi Zhou, & Guo-qing Zheng (鄭国慶)

URL: <https://www.science.org/journal/sciadv>

■研究資金

本研究は、科研費の支援を受けて実施しました (No. JP19H00657)

■補足・用語説明

- 注1 スピン: 電子は負の電荷をもつ以外に、自転によって磁石の性質を備える素性を持ちます。この特質をスピンと言います。スピンの外部磁場に向く度合いをスピン磁化率と言います。
- 注2 トポロジカル: トポロジー (位相幾何学) は数学の分野の一つであり、形が連続するか否かを議論します。電子を波動関数で記述しますが、その波動関数にメービウス帯のような「ひねり」がある場合や紐の結び目がある場合をトポロジカル的に非自明と言います。
- 注3 核磁気共鳴法: 原子核スピンを通して物質の電子状態を調べる実験手法。医療用 MRI はその原理を応用した機器。
- 注4 エネルギーギャップ: 物質はさまざまな状態を取り得ますが、状態のエネルギーが低いほど安定です。超伝導転移が起こるのは、超伝導状態の方がエネルギーは低いからです。異なる状態 (例えば超伝導状態と常伝導状態) 間のエネルギー差をエネルギーギャップと言います。
- 注5 群論: 対称性を分類する数学の分野の一つ。

<お問い合わせ>

岡山大学学術研究院自然科学学域 (理)

教授 鄭 国慶

(電話番号) 086-251-7813

(FAX番号) 086-251-7830 [事務室]

(電子メール) zheng@psun.phys.okayama-u.ac.jp

PRESS RELEASE



岡山大学
OKAYAMA UNIVERSITY



岡山大学は持続可能な開発目標（SDGs）を支援しています。