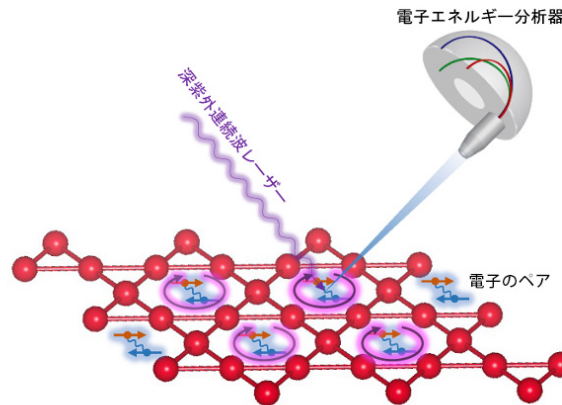


2023年4月25日
東京大学

カゴメ格子を持つ超伝導体の電子を直接観測 ——特異な超伝導状態「カイラル超伝導」実現の可能性——

発表のポイント

- ◆非従来型超伝導体の1つとして注目を集めているカゴメ格子を持つ超伝導体中の電子状態を世界で初めて直接観測することに成功しました。
- ◆超伝導体中の電子は、電子の軌道や運動方向に依らない等方的な超伝導ギャップを持ち、特異な超伝導状態である「カイラル超伝導」が実現している可能性を示しました。
- ◆本研究成果は、カゴメ格子を持つ物質で実現している非従来型超伝導の特徴とそのメカニズムの全容解明に繋がる重要な知見となることが期待されます。



カゴメ格子を持つ超伝導体における電子の直接観測と電子ペアの回転により生じる時間反転対称性の破れ

発表概要

東京大学物性研究所附属極限コヒーレント光科学研究センターのジョン イグウイ 特任研究員と岡崎浩三准教授らによる研究グループは、「非従来型超伝導体」(注1)の1つとして最近注目を集めている「カゴメ格子」を持つ超伝導体において、その超伝導メカニズムを解明するための重要な手掛かりとなる「超伝導ギャップ構造」(注2)を明らかにしました。「カゴメ格子」とは、原子が「籠目」状に配列した状態のことですが、最近カゴメ格子を持つ超伝導体が、これまでに知られているメカニズムとは異なるメカニズムで超伝導が実現している超伝導体である「非従来型超伝導体」であることが明らかになっていました。

しかしながら、多くの非従来型超伝導体と同様に、カゴメ格子を持つ超伝導体の超伝導転移温度が低いため、超伝導状態にある電子の直接観測が難しく、そのメカニズムの実験的な理解については限定的でした。今回、東京大学物性研究所で開発された「極低温超高分解能レーザー角度分解光電子分光装置」(注3)に、「深紫外連続波レーザー」(注4)を新たに導入することで、カゴメ格子を持つ超伝導体における電子の直接観測に世界で初めて成功しました。

本研究成果は、カゴメ格子を持つ超伝導体では「時間反転対称性の破れ」(注5)が生じている極めて特異な超伝導状態である「カイラル超伝導」が実現していることが示唆されるなど、その超伝導メカニズムの全容解明に繋がる重要な知見となることが期待されます。

本成果は4月26日付(現地時間)で英国科学誌 Nature に掲載されます。

発表内容

電気抵抗がゼロとなる超伝導現象はこれまで多くの物質科学研究者の興味を惹きつけてきました。特に非従来型超伝導体は、学術的にもそのメカニズムの解明が求められるだけでなく、将来的にはより高温での超伝導の実現に繋がる可能性があることから、物質科学研究の中心テーマの一つであり続けています。カゴメ格子を持つ超伝導体も非従来型超伝導体の一つで、今回研究対象となった物質である CsV_3Sb_5 は絶対温度約 93 度で、物質中の電子の電荷密度が周期的に変調する「電荷密度波転移」と呼ばれる相転移を示し、約 3 度で超伝導を示します。さらに、電荷密度波転移に伴い時間反転対称性の破れ(注5)が生じている証拠が得られていることから、超伝導状態においても時間反転対称性の破れが生じている可能性があることで注目を集めていました。しかしながら、超伝導を示す温度が低いことから、その超伝導状態の全容を解明することが困難でした。

本研究グループは、 CsV_3Sb_5 におけるバナジウム (V) を少量ニオブ (Nb) やタンタル (Ta) で置換すると超伝導転移温度が上がることに着目しました(図 1)。さらに、バナジウムの 7% をニオブで置換すると超伝導転移温度が 5 度程度に上がる一方で電荷密度波転移は残るのに対し、バナジウムの 14% をタンタルで置換すると超伝導転移温度は同程度上がる一方で電荷密度波転移が無くなります。したがって、両者の超伝導状態の詳細を調べることで、電荷密度波転移と超伝導の関係について理解できることが期待されます。また、東京大学物性研究所で開発された、世界最高性能を誇る「極低温超高分解能レーザー角度分解光電子分光装置」に、今回株式会社オキサイドが開発した「深紫外連続波レーザー」を導入することにより、これら 2 種類の試料の超伝導状態をより高精細に調べることを可能にしました。

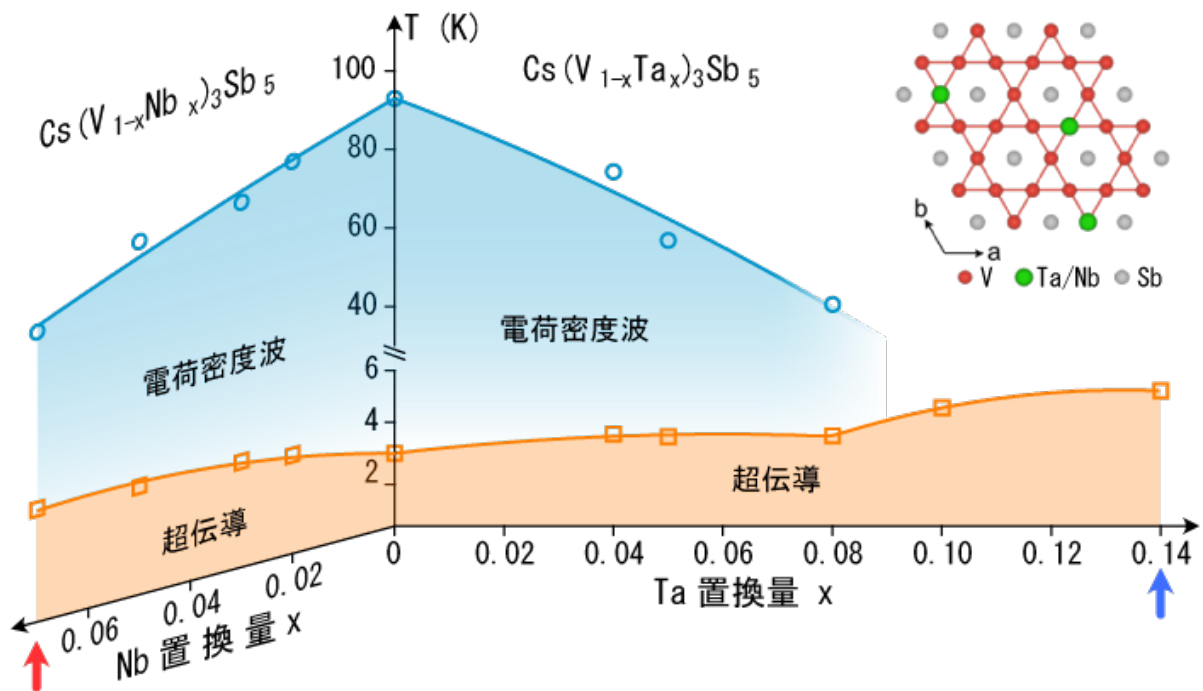


図 1 : $\text{Cs}(\text{V}_{1-x}\text{Nb}_x)_3\text{Sb}_5$ および $\text{Cs}(\text{V}_{1-x}\text{Ta}_x)_3\text{Sb}_5$ の電荷密度波転移温度および超伝導転移温度

バナジウムをニオブで置換すると超伝導転移温度が上がる一方で電荷密度波転移は無くなるのに対し、バナジウムをタンタルで置換すると超伝導転移温度は上がる一方で電荷密度波転移が無くなる。

その結果、世界で初めてカゴメ格子を持つ超伝導体の「超伝導ギャップ構造」を高精細に測定することに成功しました。図 2 がその結果で、両試料ともに超伝導状態における電子対のペ

アリングの強さを示す「超伝導ギャップ」の大きさが、電子の軌道や運動方向に依らないことを明らかにしました。さらに、電荷密度波転移が無くなったTa置換試料において、超伝導状態において時間反転対称性が破れていることを示唆する結果も得ており、電荷密度波転移の有無に関係なく、これらのカゴメ格子を持つ超伝導体においては電子のペアが右回りもしくは左回りに回ることによって時間反転対称性の破れが生じる「カイラル超伝導」という特異な超伝導状態が実現している可能性があることを明らかにしました（図3）。

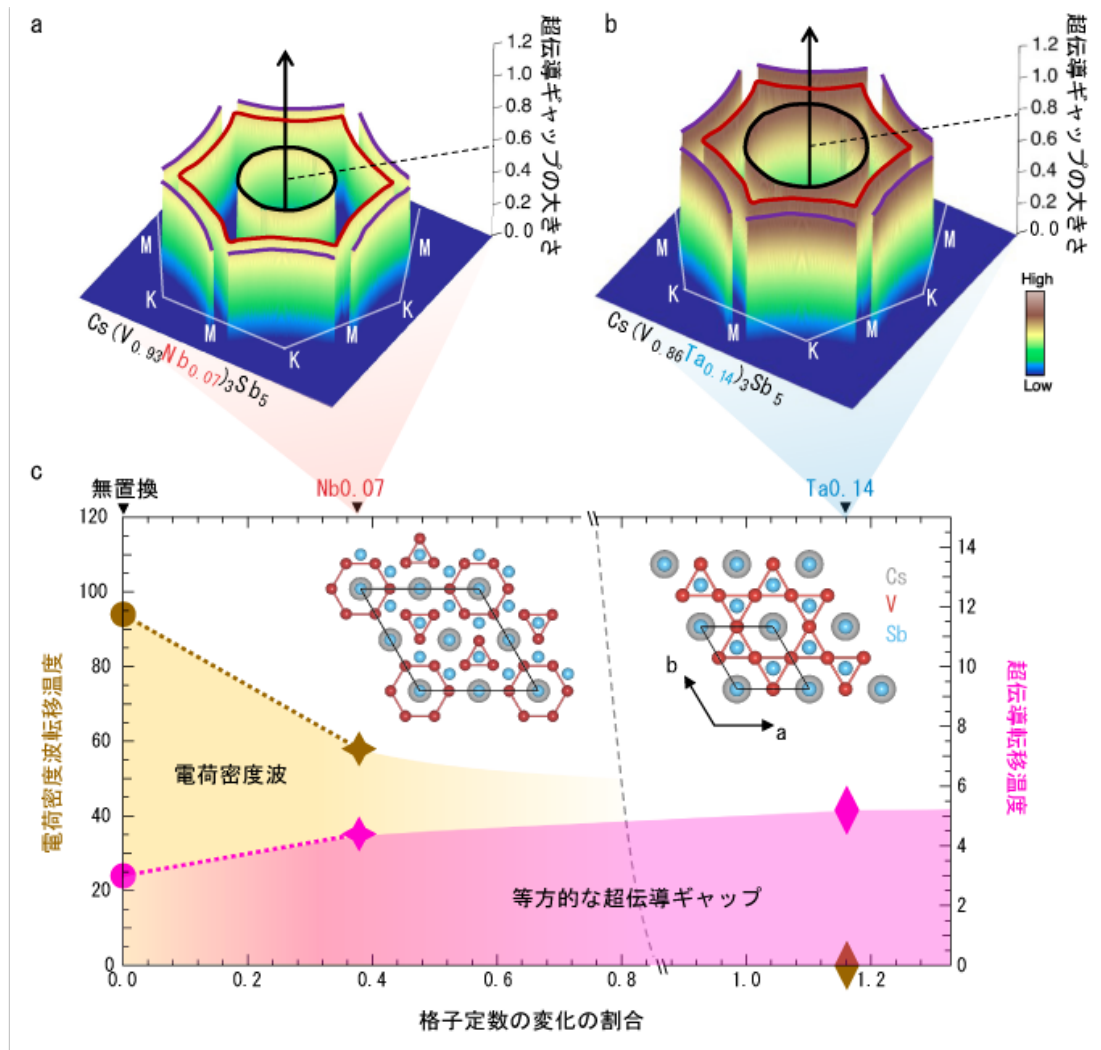


図2：本研究により明らかになった電荷密度波転移と超伝導ギャップ(電子のペアリングの強さ)の関係。電荷密度波転移の有無に関わらず、電子の軌道や運動方向に依らない等方的な超伝導ギャップとなることがわかった。

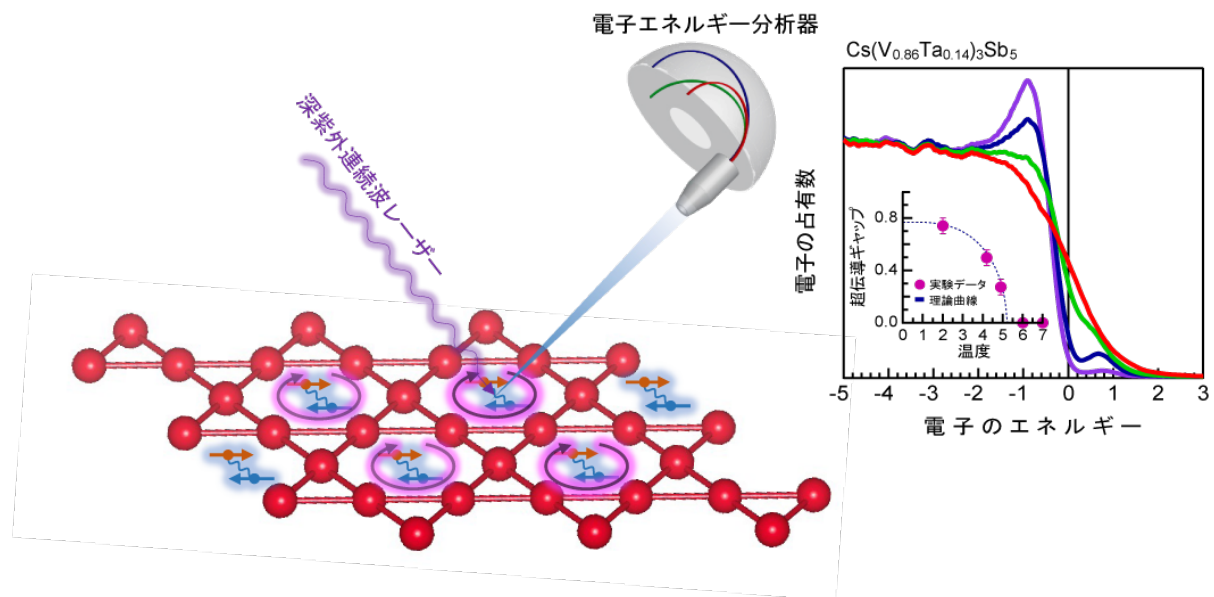


図3：カゴメ格子を持つ超伝導体における電子の直接観測のイメージ図と代表的な測定結果

超伝導状態における電子のペアが右回りもしくは左回りに回ることによって時間反転対称性の破れが生じる「カイラル超伝導」という特異な超伝導状態であることが示唆されました。

今回導入された「深紫外連続波レーザー」により、今後もさまざまな超伝導体における超伝導状態の詳細が明らかにされるとともに、これまでに無い超伝導のメカニズムが発見されることが期待されます。中にはより高い温度での超伝導の実現、室温超伝導を実現し得る新たなメカニズムの発見に繋がることも期待できます。

〈関連のプレスリリース〉

「ボース・アインシュタイン凝縮による超伝導を初めて確認」(2020/11/7)

<https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/news2.html?pid=11590>

「カゴメ格子物質で実現する不純物に強い非従来型超伝導」(2023/2/14)

<https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/news2.html?pid=17689>

発表者

東京大学物性研究所

岡崎 浩三 (准教授)

デオン イーグウイ ZHONG YIGUI (特任研究員)

論文情報

〈雑誌〉 Nature

〈題名〉 Nodeless electron pairing in CsV₃Sb₅-derived kagome superconductors

〈著者〉 Yigui Zhong, Jinjin Liu, Xianxin Wu, Zurab Guguchia, J.-X. Yin, Akifumi Mine, Yongkai Li, Sahand Najafzadeh, Debarchan Das, Charles Mielke III, Rustem Khasanov, Hubertus Luetkens, Takeshi Suzuki, Kecheng Liu, Xinlong

Han, Takeshi Kondo, Jiangping Hu, Shik Shin, Zhiwei Wang*, Xun Shi*, Yugui Yao, Kozo Okazaki*

〈DOI〉 10.1038/s41586-023-05907-x

〈URL〉 <https://www.nature.com/articles/s41586-023-05907-x>

研究助成

本研究は、科学研究費補助金（課題番号：JP18K13498、JP19H01818、JP19H00651、JP21H04439）、新学術領域研究「量子液晶の物性科学」（課題番号：JP19H05826）、文部科学省「光・量子飛躍フラッグシッププログラム」（課題番号：JPMXS0118068681）の支援により実施されました。

用語解説

（注1）非従来型超伝導体

金属をある温度まで冷やすと電気抵抗がゼロになる超伝導状態になるものがあります。これは、電子がペア（クーパー対）を作り電気抵抗ゼロの電流を担うようになることで生じます。クーパー対がどのように作られるかが超伝導メカニズムですが、バーディーン、クーパー、シュリーファーによって提案されたメカニズム(BCS理論)が一般的で、そのような超伝導体を従来型超伝導体、それ以外のメカニズムによる超伝導体を非従来型超伝導体と呼びます。

（注2）超伝導ギャップ構造

超伝導は、電子が単独で運動するよりもクーパー対を作って運動する方がエネルギーを得ることで実現します。その際のエネルギーの利得、電子のペアリングによるエネルギーの低下を超伝導ギャップと言います。言い換えると、超伝導ギャップの大きさは電子のペアリングの強さに対応します。従来型超伝導体の多くでは超伝導ギャップが電子の運動方向に依りませんが、非従来型超伝導体では超伝導ギャップが電子の運動方向に依るものがあることが知られています。超伝導ギャップの電子の運動方向による違いを超伝導ギャップ構造と言います。超伝導ギャップ構造を詳細に調べることで、超伝導メカニズムの全容解明につながる重要な知見が得られます。

（注3）極低温超高分解能レーザー角度分解光電子分光装置

紫外線やX線を物質に照射すると、光電効果により電子が放出されます。単一のエネルギーを持つ紫外線レーザーを照射して、放出される光電子の放出方向と運動エネルギーを測定することで、物質中の電子の運動量とエネルギーの関係、分散関係が導出できる実験が「レーザー角度分解光電子分光」という実験手法です。本研究グループは東京大学物性研究所において、より多くの物質が超伝導状態になる極低温まで温度を下げることを可能にし、さらに電子の運動エネルギーをより精密に測定できるようにすることで超伝導ギャップをより高精細に測定することも可能にした「極低温超高分解能レーザー角度分解光電子分光装置」を開発しました。

（注4）深紫外連続波レーザー

「レーザー角度分解光電子分光」実験において、電子の運動エネルギーをより精密に測定するには、用いる紫外線レーザーも重要になります。紫外線領域のレーザー光を得るには、非線形光学結晶と呼ばれる特殊な結晶に可視光領域のレーザーを照射することで波長が半分のレーザー光を発生させる波長変換という技術が用いられます。この波長変換には瞬間的にレーザーパルスが発生するパルスレーザーを用いた方が高強度のレーザー光が得られるのですが、「レ

「レーザー角度分解光電子分光」実験では、強度が時間的に変化しない連続波レーザーを用いた方がより高精細な測定が可能になります。連続波レーザーによる波長変換は技術的には難しいのですが、今回本研究グループは株式会社オキサイドが新たに開発した深紫外と呼ばれる波長域である波長 213nm(光のエネルギー5.8 電子ボルト)の連続波レーザーを導入しました。

(注5) 時間反転対称性の破れ

物理学において、時間の流れを逆向きにする操作を時間反転操作と呼びます。例えば、コイルに電流を流す電磁石では、時間反転操作を行うと電流が流れる向きが逆になることで例えば右回りが左回りになり、電磁石のN極とS極も逆になります。このように、時間反転操作に対して対称ではなくなることを時間反転対称性の破れと言います。磁石のような強磁性体では時間反転対称性の破れが生じているのに対し、従来型超伝導体や多くの非従来型超伝導体では時間反転対称性が破れている証拠は見つかっていません。一方で、超伝導体においても電子のペアが右回りもしくは左回りに回転していることで時間反転対称性が破れた「カイラル超伝導」と呼ばれる特異な超伝導も理論的には提案されています。そのような超伝導体が実際に存在するのかが非常に興味を持たれていますが、そのような超伝導の候補物質は限られています。

問合せ先

〈研究に関する問合せ〉

東京大学物性研究所

准教授 岡崎 浩三 (おかざき こうぞう)

Tel : 04-7136-3355 E-mail : okazaki@issp.u-tokyo.ac.jp

〈報道に関する問合せ〉

東京大学物性研究所 広報室

Tel : 04-7136-3207 E-mail : press@issp.u-tokyo.ac.jp