

【本件リリース先】

5月26日(火)15:00

(資料配付)

文部科学記者会、科学記者会、経済産業記者会
兵庫県政記者クラブ、西播磨県民局記者クラブ
中播磨県民局記者クラブ、京都府政記者クラブ
学研都市記者クラブ、大阪科学・大学記者クラブ
茨城県政記者クラブ、宮城県政記者会

平成21年5月26日

独立行政法人日本原子力研究開発機構

国立大学法人 東北大学

国立大学法人 東京大学

学校法人 京都産業大学

「重い電子」が作るフェルミ面の直接観測に世界で初めて成功**— 磁性と共存する不思議な超伝導の機構解明への糸口 —**

独立行政法人日本原子力研究開発機構(理事長 岡崎俊雄、以下「原子力機構」という。)量子ビーム応用研究部門の岡根哲夫研究副主幹、国立大学法人東北大学(総長 井上明久)大学院理学研究科物理学専攻の青木晴善教授、国立大学法人東京大学(総長 濱田純一)大学院理学系研究科物理学専攻の藤森淳教授、学校法人京都産業大学(学長 坂井東洋男)大学院理学研究科物理学専攻の山上浩志教授らの共同研究グループは、異常に大きな見かけ上の質量を持つ「重い電子¹⁾」が作るフェルミ面²⁾を世界で初めて直接観測することに成功しました。これによって、重い電子が担う電気伝導の性質を様々な金属ごとに判別することを可能にしました。

金属中の電子は、動き回って電気伝導を担う「遍歴電子」と、動き回らずに磁性を担う「局在電子」に分けられます。この二種類の電子の間に強い相互作用が働いて混じり合うと、見かけ上通常の電子の10~1000倍にも重くなったように見える重い電子が現れます。この重い電子の性質を明らかにすることは、磁性と共存する超伝導³⁾の機構解明につながると考えられています。一方、金属は固有の形を持つフェルミ面を必ずっており、各金属の電気伝導の性質がその形の違いとして表れるため、フェルミ面は「金属の顔」と呼ばれています。もし、重い電子が作るフェルミ面を観測できれば、重い電子が担う電気伝導の性質について金属ごとの相違点を精密に研究できるようになりますが、重い電子が作るフェルミ面を直接観測した実験はこれまでありませんでした。

今回当研究グループは、大型放射光施設 SPring-8 の原子力機構専用ビームライン BL23SUにおいて、軟X線放射光を用いた「共鳴角度分解光電子分光」⁴⁾実験によって従来の手法ではできなかった特定の電子軌道の選択的観察を行い、重い電子がフェルミ面を実際に作っていることを直接観測することに世界で初めて成功しました。今後、共鳴角度分解光電子分光法を用いて、重い電子がどのようなフェルミ面を作る時に超伝導や磁性が発現するかを系統的に明らかにしていくことで、重い電子を持つ金属で見られる磁性と共存する超伝導の機構解明の進展が期待されます。

本研究成果は、米国物理学会誌 Physical Review Letters に平成21年5月27日(オンライン版)に掲載される予定です。

【本件に関する問合せ先】

独立行政法人 日本原子力研究開発機構

(研究内容)

量子ビーム応用研究部門

上級研究主席 青木 勝敏 TEL:0791-58-2629

放射光先端物質電子構造研究グループ

研究副主幹 岡根 哲夫 TEL:0791-58-2604

(報道対応)

広報部報道課長 西川 信一 TEL:029-282-9421

補足説明

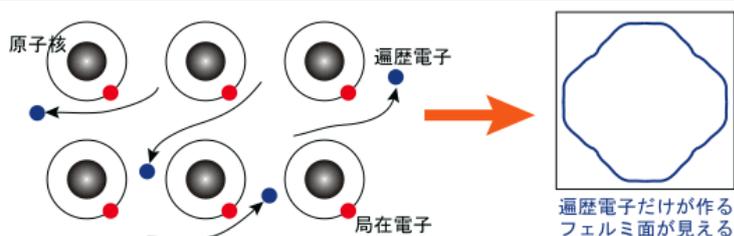
背景:

金属の電気伝導の性質は、金属中を広く動き回って電気伝導を担う遍歴電子が決めています。一方、金属の磁性は、金属中の原子核近傍に局在する局在電子が決めています。今回の研究対象である金属はf電子系化合物⁵⁾と呼ばれる物質です。f電子系化合物では、元々局在電子としての性質を持っていたf電子⁵⁾が、電気伝導を担う遍歴電子と相互作用して混じり合うことにより、磁性だけではなく電気伝導を担う性質も持っていると考えられています。このため、電気伝導性と磁性が密接に関連し、通常の金属電子論からは予想できない複雑かつ多様な物性が発現します。例えばf電子系化合物で見られる重要な性質の一つとして、磁性と共存する超伝導が挙げられます。

f電子が遍歴電子と混じり合うことのもう一つの重要な効果は、電気伝導を担う電子の見かけ上の重さ(有効質量)が通常の金属の10~1000倍にも大きく見える「重い電子」の発現です。これは、元々は局在電子であったf電子が「重い電子」に変容して遍歴するようになり、電気伝導を担う電子に参加するようになったと考えることができます。つまり、重い電子とは元の局在電子の性質を強く残しながら電気伝導を担う電子のことであり、伝導と磁性が絡み合う物性を決めているのは重い電子の性質です。

そこで、f電子系化合物の物性発現機構を理解するためには、f電子が持つ「二面性＝遍歴／局在性」によって生み出された重い電子がどのように動くのかを、電子の運動量とエネルギーとの関係(バンド構造、並びにバンド構造から決定されるフェルミ面)として把握することが基本となります。電気伝導を担う電子によって形成されるフェルミ面の形状は、f電子の性質が局在から遍歴に変わる場合には、電気伝導を担う電子の数が元は局在電子で電気伝導を担っていなかったf電子の個数分だけ増加することに起因して、変化すると考えられます(図1)。ですから、フェルミ面形状の変化を実験的に観測すれば、f電子が遍歴しているか局在しているかを判定できることになります。

動き回る電子(遍歴電子)と動かない電子(局在電子)が別々に存在



遍歴電子と局在電子とが相互作用によって混じり合った場合

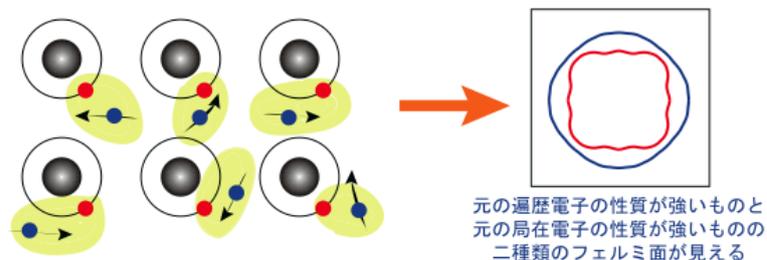


図1: 遍歴電子と局在電子の関係の違いによりフェルミ面形状が変化することのイメージ:
遍歴性の強い電子(青丸)と局在性の強い電子(赤丸)が作るフェルミ面をそれぞれ青と赤の閉曲線で示している。

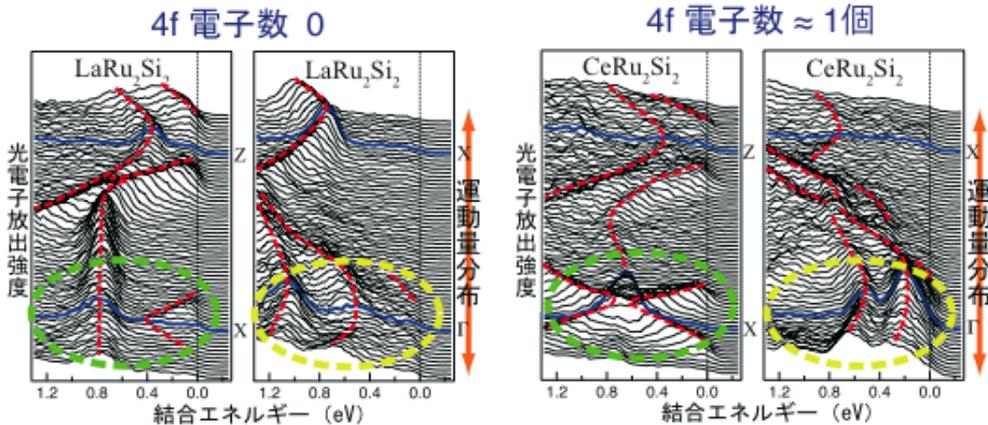
実験:

共鳴角度分解光電子分光

角度分解光電子分光は、電気伝導を担う電子のバンド構造を直接的に観測することができる唯一の実験手法ですが、近年はフェルミ面を直接観測する実験手法としての重要性が広く認められてきています。特に放射光 X 線を励起光として利用した角度分解光電子分光は、そのエネルギー可変性を利用して三次元的なフェルミ面形状を調べることができるなど、通常の実験室で使われている X 線源を使った実験では知り得ない詳細な情報が得られる非常に強力な実験手法です。また、軟 X 線領域のエネルギーを用いた光電子分光実験は、物質表面から出てくるシグナルの影響を抑えて、固体内部から出てきた電子を主として観測することで、得られた電子構造を物性と直接比較して議論できる利点があります。

今回の研究は、大型放射光施設 SPring-8 の原子力機構専用ビームライン BL23SU において、見かけ上の質量が通常の 100 倍以上の重い電子を持つと考えられている CeRu_2Si_2 (セリウム・ルテニウム 2・シリコン 2) 化合物とその関連物質に対して軟 X 線領域での共鳴角度分解光電子分光実験を行って、Ce (セリウム) の 4f 電子の遍歴性の証拠となるバンド構造 (図2) とフェルミ面の直接観測を試みたものです。今回行った共鳴角度分解光電子分光とは、放射光のエネルギー可変性を積極的に活用したもので、光のエネルギーをセリウムの 3d 内殻吸収が生じる値に合わせて角度分解光電子分光測定を行うことにより、4f 電子からのシグナルを共鳴的に強めて、4f 電子が強く関与したバンド構造やフェルミ面を選択的に観測したものです。

角度分解光電子分光で観測されるバンド構造のエネルギー分散



4f 電子が遍歴電子と混じり合うことでエネルギー分散の様子が変わる

図2: LaRu_2Si_2 と CeRu_2Si_2 に対する角度分解光電子スペクトル:
赤い破線はバンド構造のエネルギー分散の様子を示す。
各バンド構造が結合エネルギー 0 の線 (フェルミ準位) をよぎる場所を運動量空間で描画したものがフェルミ面である。

共鳴を使って重い電子が作るフェルミ面を直接観測する

共鳴によりセリウム 4f 電子からのシグナルを選択的に強めることで、共鳴を使わない従来の角度分解光電子分光でははっきり見えなかった重い電子が作るフェルミ面を直接観測することに初めて成功しました (図3)。このことにより、共鳴領域の放射光励起光と非共鳴領域

の放射光励起光の両方を使い、得られたスペクトルを比較することで、フェルミ面における4f電子の寄与を調べることができました。このように光のエネルギーを様々な振った詳細なフェルミ面測定は、ビームライン BL23SU に設置された新型挿入光源によって光の強度が二倍になったことを活用した成果です。

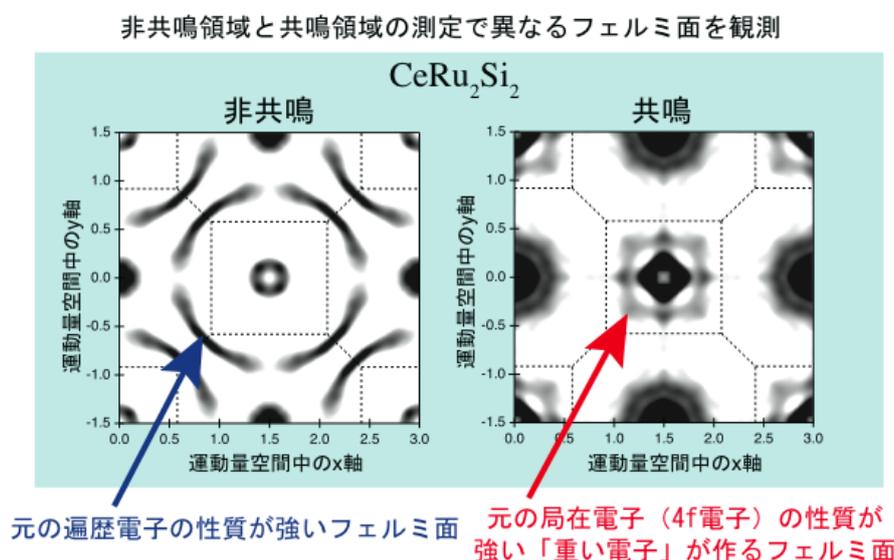


図3: CeRu₂Si₂に対する非共鳴領域と共鳴領域とで測定した角度分解光電子スペクトルから得られたフェルミ面:

非共鳴では図1中の青い閉曲線に対応するフェルミ面が観測され、共鳴では図1中の赤い閉曲線に対応するフェルミ面が観測されている。

今回の研究で電気伝導の性質を特徴づけるフェルミ面を重い電子について観測できたことで、重い電子が示す電気伝導の金属ごとの性質の違いをフェルミ面の変化により追跡することができるようになりました。また、化合物の構成元素の一部を別の元素で置換することによって結晶格子の大きさを変え(「化学的に圧力をかけた」と考えることができる)、これに伴う電子状態の変化に応じてフェルミ面がどのように変化するかを共鳴角度分解光電子分光を使って調べることに成功しました。

研究の波及効果:

本研究は、元々は局在電子としての性質を持っていたセリウム4f電子が化合物中で遍歴的性質を獲得し、重い電子として電気伝導を担っていることを実験から直接的に観測できた例であり、今後、様々なf電子系化合物においてf電子が遍歴的か局在的であるかを判定する手法として共鳴角度分解光電子分光実験を使うことが一般的になっていくと考えられます。また、重い電子が作るフェルミ面を観測できるようになったことから、今後は、様々なf電子系化合物に共鳴角度分解光電子分光実験を適用することで、超伝導や磁性を持つ状態がどのようなフェルミ面を示すかを系統的に明らかにしていくことが可能です。これにより磁性と共存する超伝導の発現機構の解明が大きく進展すると期待されます。

今後の課題:

f電子系化合物の超伝導は、磁性が発現する領域の境界付近で数多く見られています。そこで、まず重要となる課題は、系の磁氣的性質が変わった時に重い電子が作るフェルミ面形状がどう変化するかを明らかにすることです。これは、共鳴角度分解光電子分光の温度依存性や元素置換依存性を詳細に調べることで達成できます。さらにその延長として、磁性発現境界付近でどのようなフェルミ面が見られる時に超伝導が発現するのかを系統的に明らかにしていきたいと考えています。

研究の役割分担、実験施設利用、資金援助について:

今回の研究では、国立大学法人東北大学が単結晶試料作成を行い、独立行政法人日本原子力研究開発機構(以下「原子力機構」という。)量子ビーム応用研究部門、国立大学法人東京大学及び学校法人京都産業大学が共同で放射光実験とその実験データの解析を行いました。

放射光実験は、大型放射光施設 SPring-8 の原子力機構専用ビームライン BL23SU の申請番号 No. 2008A3822 の研究課題として行いました。

本研究は文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序化」(No. 20102003)による援助を受けて行われました。

用語解説

1) 重い電子

ある種の金属化合物では、原子核近傍だけに存在して動き回らない性質の局在電子が、金属中を動き回って電気伝導を担う遍歴電子と相互作用して混じり合うことで、電気伝導を担うようになることがあります。これは、電気伝導を担う電子の中に動きにくい性質のものが現れることを意味し、その動きにくさにより電子の見かけ上の質量(有効質量)が通常の 10～1000 倍に重くなったように観測されます。これを重い電子状態と呼びます。

2) フェルミ面

固体中の電子が取り得るエネルギーと運動量の間固有の関係を表した曲線をバンド構造と呼びます。バンドの途中までしか電子に占有されない物質は金属となりますが、このとき、占有された部分と占有されない部分の境界(フェルミ準位)に存在する電子の運動量を運動量空間中に示すと3次元的な形状となります。これがフェルミ面です。フェルミ面は電気伝導の性質を特徴づけますが、金属ごとにその形状が異なるため、フェルミ面のことを「金属の顔」と呼ぶことができます。

3) 磁性と共存する超伝導

超伝導とは、物質の電気抵抗がその物質固有の温度以下でゼロになる現象です。超伝導の発現は、格子振動による電子対形成を基本メカニズムと考える BCS 理論で説明できるというのが定説ですが、1986 年の高温超伝導の発見以来、BCS 理論では説明できない超伝導物質の探索が盛んに行われてきています。このような新しい超伝導体は、しばしば磁性が発現する領域の境界付近で見つかっていて、磁性と共存している可能性があります。超伝導のメカニズムの基礎である電子対形成は電子間に働く引力に由来し、磁性は逆に電子間に働く斥力に由来しますから、「磁性と共存する超伝導」というのはとても不思議な現象であり、伝導と磁性の絡み合う物理現象の最先端領域として注目を集めています。

4) 共鳴角度分解光電子分光

物質に高いエネルギーを持つ光を照射すると、物質内部の電子が外部に飛び出てきます。放出される電子(光電子)の個数とエネルギーの関係を調べることで物質内の電子状態を調べる実験手法が光電子分光です。さらに光電子の放出角度に対する分布も計測することにより、電子の運動量とエネルギーの関係(バンド構造)を観測する手法を角度分解光電子分光と呼びます。得られたバンド構造がフェルミ準位をよぎる点を運動量空間で描画すればフェルミ面が得られます。一方、光のエネルギーを特定の内殻準位への吸収が起こる値に合わせると、内殻吸収の遷移先として選択される一部の軌道からの光電子放出強度だけが選択的に増強されます。この特定のエネルギーの光を使って角度分解光電子分光を測定する手法が共鳴角度分解光電子分光であり、ある電子軌道だけが強く関与するバンド構造やフェルミ面を選択的に観測することができます。

5)f 電子系化合物・f 電子

f 電子系化合物とは、外殻に f 電子をもつ元素を含む化合物です。f 電子とは、La を除くランタノイド類(周期律表において、57 番目の La から 71 番目の Lu までの元素)が持つ4f 電子と、Th を除くアクチノイド類(90 番目の Th から 103 番目の Lr までの元素)が持つ5f 電子を合わせた総称です。f 電子は本来局在電子的ですが、化合物を形成した際には遍歴性と局在性の中間的な性質を示すようになり、それが複雑で多様な物性を引き起こします。



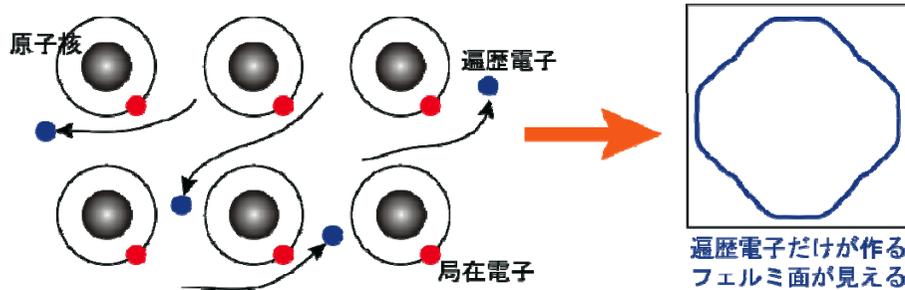
「重い電子」が作るフェルミ面の直接観測に世界で初めて成功
 — 磁性と共存する不思議な超伝導の機構解明への糸口 —



日本原子力研究開発機構
放射光先端物質電子構造研究Gr
岡根哲夫 研究副主幹

放射光を使って、電気伝導についての金属固有の特徴を表すフェルミ面を見かけ上通常の電子の100倍以上重い電子が形成していることを直接観測

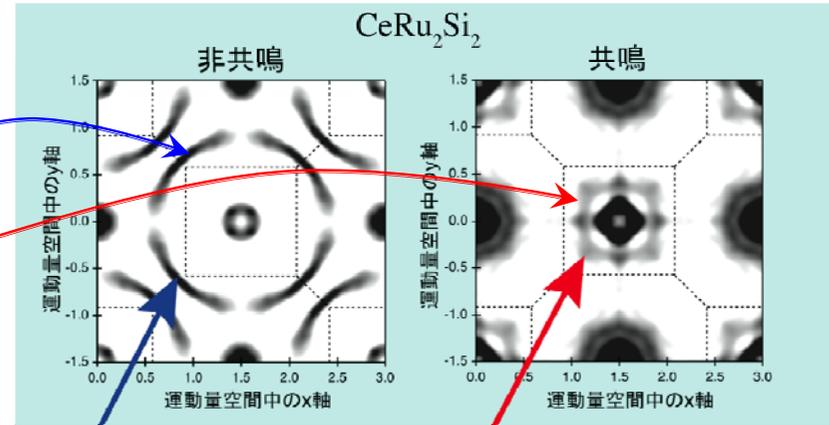
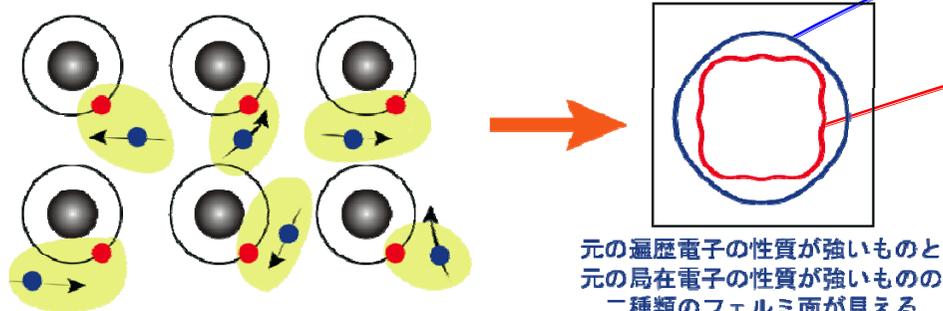
動き回る電子（遍歴電子）と動かない電子（局在電子）が別々に存在



元は局在していた電子が「重い電子」として動き出し、電気伝導を担うようになる
 ↓
 新たなフェルミ面を作る

非共鳴領域と共鳴領域の測定で異なるフェルミ面を観測

遍歴電子と局在電子とが相互作用によって混じり合った場合



元の遍歴電子の性質が強いフェルミ面
 元の局在電子（4f電子）の性質が強い「重い電子」が作るフェルミ面

質量の重い電子が作るフェルミ面を観測することは難しい

共鳴角度分解光電子分光
 特定の電子軌道からの信号の選択的抽出でフェルミ面を観測

重い電子が担う電気伝導の金属ごとの特徴の違いを判別することが可能に