



広島大学

【配付日時】

令和5年12月20日(水)14:00

※解禁日時:

新聞 令和5年12月21日(木)朝刊

テレビ・インターネット 令和5年12月21日(木)1:00

【本件リリース先】

(資料配付)

文部科学記者会、科学記者会、兵庫県政記者クラブ、
中播磨県民センター記者クラブ、西播磨県民局記者ク
ラブ、広島大学関係報道機関

令和5年12月20日

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

国立大学法人広島大学

電子にはたらく特殊な力をマイクロメートルの高解像度で可視化
「量子マテリアル」のデバイス評価に新展開

論文掲載

【発表のポイント】

- ・電子にはたらく特殊な力をマイクロメートルの高解像度で可視化する顕微解析技術を開発
- ・次世代デバイスの有力候補である量子マテリアル「高温超伝導体」へ適用
- ・放射光施設ナノテラスにおける更なる高解像度化で、より高度な分析技術の確立に展開可能

量子科学技術研究開発機構(理事長 小安重夫、以下「QST」)量子技術基盤研究部門関西光量子科学研究所 放射光科学研究センターの岩澤英明上席研究員らは、広島大学(学長 越智光夫)放射光科学研究センター 島田賢也教授らとの共同研究で、量子マテリアル¹⁾の機能発現のカギとなる「電子にはたらく特殊な力(量子多体効果²⁾の強さ)をマイクロメートル(1000分の1ミリメートル)の精度で可視化できる顕微解析技術の開発に成功しました。

超省エネ・高機能な次世代デバイスの有力材料として期待されている量子マテリアルの特性(たとえば、高温超伝導³⁾など)は、量子多体効果によって現れます。量子多体効果を利用・制御した次世代デバイスの開発を推進するためには、微小領域における量子多体効果の強さを詳しく調べる必要があります。しかし、指向性が低く、低輝度な光を利用するこれまでの計測解析技術では、微小領域に十分な強度の光を集めて照射することができず、解像度を高めようとしても観察信号が不足するため、ミリメートル単位の観察しか出来ていませんでした。今回、指向性が高く、高輝度なレーザー光と集光効率が高いレンズを利用することで、解像度を向上させながらも、観察信号を大幅に増強することに成功しました。さらに、開発した顕微解析技術を用いることで、高温超電導体の量子多体効果の強さをマイクロメートルの解像度で可視化して調べることに成功しました。

本技術は、より高輝度で微小な光源を用いるほど、高解像化が可能になります。現在、QSTは官民地域パートナーシップにより産学の幅広い研究者への共用を目的とした世界最高レベルの放射光施設ナノテラス⁴⁾の建設・整備を進めています。今後、本技術と放射光施設ナノテラスで利用可能な高輝度・微小ビームサイズの軟X線放射光⁵⁾を組み合わせることで、フォノンクスやスピントロニクス⁶⁾など次世代デバイスへ向けた量子マテリアルの研究開発が一層進展すると

期待されます。

本研究は、米国物理学会が刊行する国際学術誌 Physical Review Research に 2023 年 12 月 20 日（米国、現地時間）にオンライン掲載される予定です。

【本件に関する問い合わせ先】

(研究内容について)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 量子技術基盤研究部門
関西光量子科学研究所 放射光科学研究センター 先進分光研究グループ
次世代放射光施設整備開発センター 高輝度放射光研究開発部 ビームライングループ
岩澤 英明 TEL:022-785-9444、E-mail:iwasawa.hideaki@qst.go.jp

国立大学法人広島大学放射光科学研究センター
島田 賢也 TEL:082-424-6293(代表)

(報道対応)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
経営企画部 広報課 TEL : 043-206-3026、E-mail:info@qst.go.jp

国立大学法人広島大学
広報室 TEL:082-424-6762 E-mail:koho@office.hiroshima-u.ac.jp

補足説明資料

【研究開発の背景】

物質中の電子の性質は、周囲の電子や格子振動（フォノン）⁷などの量子から受ける力によって大きく変化します。周囲の電子から強い力（電子相関）を受けると、電子は自由に動きにくくなり、磁石（スピン）の性質が現れたりします。高温超伝導も、電子相関・スピン・フォノンなどの量子多体効果が複雑に絡み合っていると考えられています。これらの特殊な力による効果を、量子多体効果と呼び、量子マテリアルの機能発現のカギとなっています。量子多体効果を解明し、それを利用・制御した次世代デバイス開発を推進するためには、量子多体効果の強さを「測る」、そして、その空間分布を「見る」という二つの計測技術を融合させた「量子多体効果の強さを可視化する新しいイメージング技術」が必要です。量子多体効果が反映される電子状態（電子のバンド構造）を直接調べることができる角度分解光電子分光 (ARPES)⁸⁾はその候補となる計測技術です。実際に、高エネルギー・波数分解能での ARPES 計測（以下、高分解能 ARPES）を用いることで、量子多体効果の強さを「測る」ことができます。また、近年、開発が進む高空間分解能での ARPES 計測（以下、顕微 ARPES）を用いると、低分解能ではあるものの電子状態の実空間分布を「見る」ことが可能となってきています。しかし、従来、ARPES 計測において「高分解能で測る」と「高空間分解能で見る」ことを同時に達成することは非常に困難であったため、「量子多体効果の強さの可視化（イメージング）」は、これまで実現されていませんでした。

【研究の技術と成果】

今回、高輝度・高指向性の光源（ここではレーザーを使用）を活用することで、「測る」と「見る」の両方を追求した高分解能・顕微 ARPES 計測技術を広島大学放射光科学研究センター(HiSOR)において開発し、「ミクロの世界で量子多体効果を測ること」を実現しました。従来技術と比較すると、20 倍以上の高い空間分解能（画素数で 400 倍以上の高解像度）で量子多体効果を「見る」ことを実現しました。また、機械学習（教師なし学習）の一種であるクラスタリングを活用し、類似した傾向を有する顕微データ同士のみを比較することで、本質的な量子多体効果の強さを「測る」ことを可能にしました。これにより、量子マテリアルに内在する空間不均一性を平均化せずに「見る」ことで、量子多体効果を「測る」精度が数倍向上することを見出しました（従来比 2.5-10 倍）。

実際に、本技術を銅酸化物高温超伝導体³⁾に適用したところ、電子とフォノンや電子同士の結合の強さといった量子多体効果の強さの空間分布をマイクロメートルオーダーで可視化（イメージング）することに成功しました（図1）。その結果、銅酸化物の超伝導転移温度に直接関わる酸素量と量子多体効果の強さには相関があり、高温超伝導特性が量子多体効果の強弱に応じて変化することを実証しました。

本成果は、ミクロの世界で量子多体効果の強さや指向性（方向依存性）を定量的に評価できる顕微イメージング技術を世界で初めて創成することに成功したものです。

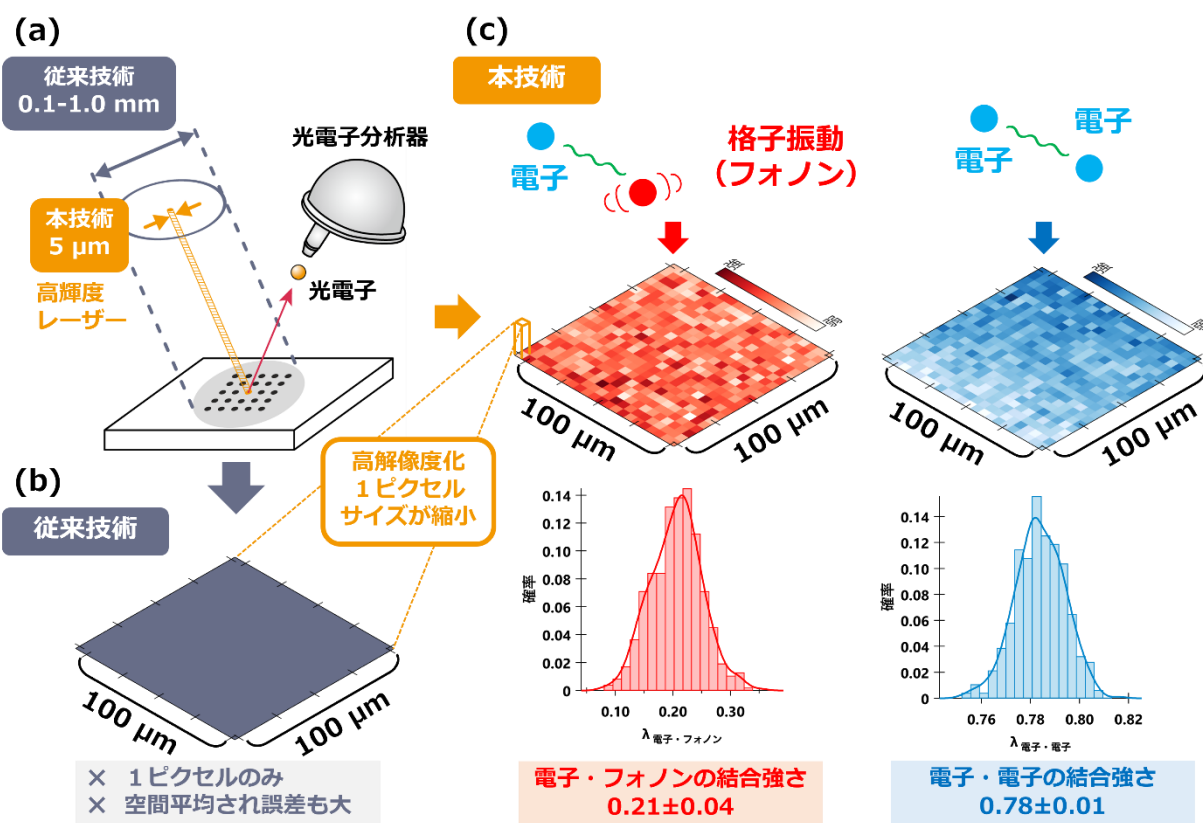


図 1. (a) ARPES の模式図。本技術では、高輝度・高指向性のレーザーを用いることで、集光に伴う強度減少を抑えつつ、入射光のビーム径を従来 (0.1-1.0 mm) から、20 倍以上の縮小化 (5 μm) を達成。(b) 従来技術では、1 ピクセルのみでしか量子多体効果の評価が出来なかった。また、広い空間領域の情報が平均化されているため、その誤差も大きかった。(c) 本技術では、従来技術の 1 ピクセルサイズを 400 分割する高解像度化により、量子多体効果の強さの空間分布の可視化が実現した。空間領域を分解した量子多体効果の情報の取得が可能となり、精度も数倍向上した。

【今後の展開】

本成果により、量子材料の機能性と量子多体効果との相関関係が評価できるようになり、今後、量子材料の機能性の解明に向けた研究開発への貢献が期待できます。また、本技術により、量子材料を活用した実デバイスの機能性を担う量子多体効果の空間イメージングがはじめて可能になりました。例えば、フォノンの長さスケールに対応する種々のマイクロ構造を材料に作り込むフォノンエンジニアリングの研究開発の促進など、量子多体効果を活用したフォノンクスやスピントロニクスなどの次世代デバイス開発への貢献が見込めます。

さらに、本技術は、放射光施設ナノテラスの高輝度・微小集光の軟 X 線放射光と組み合わせることで、解像度を向上させ、より高度な分析技術の確立へと展開できる見込みです。また、放射光の波長可変性を活用した量子多体効果の三次元的観察や元素選択的観察が可能となるため、より広範な材料・デバイスでの応用展開が期待できます。例えば、トポロジカル材料や二次元材料をはじめとした様々な量子材料の機能性の向上や機能発現メカニズムの解明といった材料開発への貢献が期待できます。

【謝辞】

本研究は、日本学術振興会の科学研究費助成事業（JP19K03749, JP19H05823）ならびに二国間交流事業（JPJSBP120209941, JPJSBP120239943）の助成を一部受けています。

【用語解説】

1) 量子マテリアル

電子やスピンなどの量子を制御することで、従来の半導体やエレクトロニクスよりも高性能（省エネルギー・高速動作など）な量子機能を発現する物質・材料である。

2) 量子多体効果

アボガドロ定数 (6×10^{23}) ほどの多くの量子間の相互作用の効果を指し、超伝導や金属絶縁体転移などの興味深い現象が発現するための本質的な要因と考えられている。一般に、原子より大きい世界では、例えば、水（物質）と波（状態）が明確に区別できる。一方、原子より小さい世界では、このような区別が困難で、粒子性（物質の性質）と波動性（状態の性質）を併せ持つ特殊な存在を「量子」と呼ぶ。量子の代表格が電子であり、量子多体効果は電子の運動に大きく影響を与える。

3) 高温超伝導、銅酸化物高温超伝導体

超伝導とは非常に低い温度で電気抵抗がゼロになる現象で、リニアモーターカーやMRI（磁気共鳴断層撮影）装置などが実用化されている。しかし、単体金属や合金などでは、超伝導は非常に極低温（-240度程度以下）でのみ現れる。これに対して、高温超伝導は、液体窒素温度（-196度）以上で超伝導が表れるため、産業応用に大きな期待が寄せられている。銅酸化物高温超伝導体は、高温超伝導が初めて発見された物質であり、その後も37年以上にわたり世界的に競って研究が行われている。しかし、高温超伝導が発現する具体的なメカニズムは未解明のままである。

4) 放射光施設ナノテラス

正式名称は、3GeV 高輝度放射光施設。NanoTerasu は愛称である（[施設等の詳細：2023年7月24日プレスリリース](#)）。

5) 軟X線放射光

放射光とは電子を光とほぼ同じ速度まで加速し、電磁石によって進行方向を曲げたときに発生する、指向性が高く強力な電磁波のことである。軟X線放射光は、波長が約0.1 nm から数10 nm の波長帯域の放射光のこと。軟X線放射光は物質との相互作用が強いため、物質の化学状態や電子状態などの詳細な観測に適している。

6) フォノクニス、スピントロニクス

従来の半導体や電子部品といったエレクトロニクスでは、電子の持つ電荷のみが利用されている。これに対して、フォノンを使用するフォノニクスや電子のスピンを利用するスピントロニクスでは、エネルギー効率の向上や情報伝達の高性能化などが見込めるため、次世代エレクトロニクスとして期待されている。

7) 格子振動（フォノン）

フォノンは、結晶内で格子を形成する原子の微小振動（格子振動）を量子化した準粒子である。準粒子は量子の一種であり、相互作用をもつ多粒子の集団による運動の中で、振動や波動が量子化されたもので、粒子のように取り扱える。

8) 角度分解光電子分光（ARPES）

物質に光を入射して、光電効果により物質外部に放出される電子の「エネルギー」と「角度」を計測することで、物質内の電子の運動の様子を調べる実験技術のこと。ARPES は Angle-resolved photoemission spectroscopy の略。

【掲載論文】

Phys. Rev. Research 5, 043266(2023) - Published 20 December 2023

“Quantitative measure of correlation strength among intertwined many-body interactions”

Hideaki Iwasawa, Tetsuro Ueno, Yoshiyuki Yoshida, Hiroshi Eisaki, Yoshihiro Aiura, Kenya Shimada

DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.5.043266>