

**極低温・超高分解能レーザー光電子分光の開発と低温超伝導体の超伝導機構の解明**

Development of ultralow temperature and ultrahigh-resolution laser-based photoemission spectroscopy and investigation of the mechanism of exotic superconductors

課題番号：25220707

辛 埴 (SHIN SHIK)

東京大学・物性研究所・教授



**研究の概要**

これまで培ってきた高調波レーザー、極低温クライオスタット、高分解能光電子の技術を大幅に発展させて、超低温高分解能角度分解光電子分光装置を開発し、これまで測定が不可能であった低い  $T_c$  を持つエキゾチック超伝導体の電子状態、特に超伝導ギャップの異方性を直接観測し、超伝導の機構解明を行う。

研究分野：物性 I

キーワード：光物性、光電子分光、超伝導

**1. 研究開始当初の背景**

近年我々は、光電子分光器、ヘリウム4クライオスタット、そして世界初の高分解能用準 CW-7eV レーザーを独自に開発し、ARPESにおいて、エネルギー分解能  $70\mu\text{eV}$ 、及び最低到達温度  $1.0\text{K}$  を達成した。これにより、鉄系超伝導体  $\text{KFe}_2\text{As}_2$  ( $T_c=3.4\text{K}$ ) の超伝導ギャップにノード構造を見出した (Okazaki et al. Science 2012)。ヘリウム3クライオスタットを搭載する次世代レーザーARPESの開発と、その先にあるエキゾチック低温超伝導研究の可能性が開けてきた。

**2. 研究の目的**

角度分解光電子分光法 (ARPES) は物質の電子構造を直接観測する強力なツールであり、これまで、高温超伝導体を持つ超伝導ギャップの対称性など、様々な微細電子構造を解明してきた。一方、 $T_c$  の低い非従来型超伝導体も多く、多くの研究者の興味を引いてきたが、機構解明に重要となる超伝導ギャップ対称性を ARPES で直接観測することは不可能であった。これは、ARPES の分解能と最低到達温度が不十分であるために他ならない。超伝導の多様性を解明し、室温超伝導への可能性も含めて新規超伝導体の設計・発見への指針を得る上で、ARPES による低温非従来型超伝導体の研究を表現させることが必須となる。

**3. 研究の方法**

これまで培ってきた高調波レーザー、極低温クライオスタット、高分解能光電子分光の技術を大幅に発展させて、未踏性能を持つ高

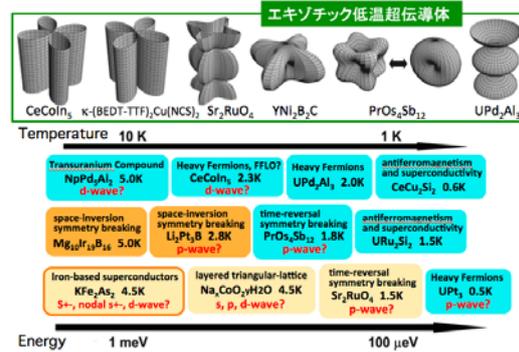


図1 種々なエキゾチック低温超伝導体性 Matsuda et al, (2006).

分解能 ARPES 装置を開発する。ヘリウム3クライオスタットを新たに開発し、高調波レーザーの高繰り返し化・準 CW 化を行うことにより、最高分解能  $50\mu\text{eV}$ 、最低温  $500\text{mK}$  を目指す。本プロジェクトにより達成される極限的 ARPES 装置により、図1に示すエキゾチック超伝導体の機構について、重要な知見を得る。また、トポロジカル超伝導体で発現が予想されるマヨラナフェルミオンなど、新奇なトポロジカル量子相の実現可能性も検証する。多様な超伝導対形成機構の理解を進めることで、新規超伝導体の設計・発見にも大きく貢献できると考えている。

**4. これまでの成果**

①**装置開発**：図2が本プロジェクトで開発されるレーザー、光電子分光装置、極低温クライオスタットである。ヘリウム3クライオスタットでは、ヘリウム3ガスが通過するキャピラリーの最適化を繰り返すことで、設計

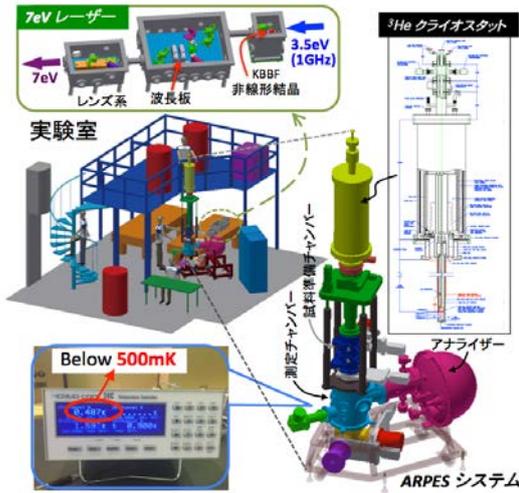


図 2 : 極低温・超高分解能レーザー光電子分光

にはほぼ近い 500mK の冷却能力を達成できている。光電子アナライザーに関しては、半球型アナライザー内に設置されたスリットへのコーティング技術を改善することで、角度分解光電子分光イメージングに更なる信頼性をもたらした。また、高分解能を達成するために、高分解能検知器を新しく開発した。

② 超伝導温度以上の高温で発達する電子対ギャップの発見: 発表論文の番号 5

(Kondo et al., Nat. Commun. 6, 7699 (2015).)

ノード近傍を支配する電子対ギャップは、従来型超伝導体と同じく、BCS 関数に従い  $T=T_c$  で閉じると信じられて来た。その中で、我々は、放射光データの不十分な分解能による ARPES スペクトルの幅が、ギャップが閉じる温度を過小評価させる可能性に着眼した。超高分解能を持つ 7eV レーザー ARPES

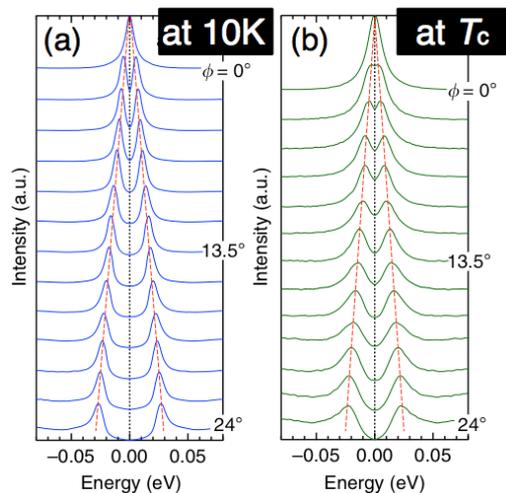


図 3 :  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$  の  $d$  波的ギャップ

の特徴を最大限に活かす前例にない精密測定から(図 3)、着眼通り、ノード近傍の電子対ギャップは  $T_c$  ではなく、 $T_c$  より約 1.5 倍も高い温度 ( $T_{\text{pair}}$ ) から開くことを見出した。アンチノードで発達する擬ギャップが電子対の形成を阻害する結果として、 $T_c$  と  $T_{\text{pair}}$  に極端な不一致が生じることが示唆され、このことは、従来型超伝導では想定されない銅酸化物の特性だと言える。

5. 今後の計画

装置開発については、それぞれの要素技術において、所定の性能を達成することが出来ている。今後は、システムティックに組み合わせた状態で、総合的に最高の性能を発揮させる作業が残っている。特に、アナライザー冷却を含めたチャンバー内のサーマルシールドが予定通り機能し、極限的試料到達温度を達成する事が重要である (H28 年度)。

また、H29 年度は、新設装置を用いて、エキゾチック低温超伝導体のギャップ方位依存性を同定し、超伝導機構を解明することにより、より高い  $T_c$  を持つ超伝導体の物質設計と新物質発見に貢献する予定である。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

1. Quadratic Fermi node in a 3D strongly correlated semimetal, T. Kondo, Y. Ishida, S. Nakatsuji, L. Balents, S. Shin, 他 16 名 21 番目, Nature Commun. **6**, 10042 (2015).
2. Temperature-dependence of magnetically-active charge excitations in agnetite across the Verwey transition, M. Taguchi, A. Chainani, Y. Ishida, S. Shin, 他 16 名 19 番目, Phys. Rev. Lett. **115**, 256405(1-5) (2015).
3. Spin polarization and texture of the Fermi arcs in the Weyl Fermion semimetal TaAs, S-Y. Xu, K. Yaji, T. Kondo, S. Shin, M. Z. Hasan, 他 24 名 25 番目, Phys. Rev. Lett. **116**, 09680 (2016).
4. Gigantic surface lifetime of an intrinsic topological insulator, M. Neupane, Y. Ishida, S. Shin, M. Z. Hasan, 他 12 名 11 番目, Phys. Rev. Lett. **115**, 116801(1-5) (2015).
5. Point nodes persisting far beyond  $T_c$  in  $\text{Bi}_2\text{2212}$ , T. Kondo, Y. Ishida, S. Shin, 他 5 名 8 番目, Nature Commun. **6**, 7699 (2015).
6. Surface electronic structure of the topological Kondo-insulator candidate correlated electron system  $\text{SmB}_6$ , M. Neupane, T. Kondo, Y. Ishida, S. Shin, M. Z. Hasan, 他 14 名 16 番目, Nature commun. **4**, 2991(1-7) (2013).

ホームページ等

<http://shin.issp.u-tokyo.ac.jp/>