

YbCu₂/Cu(111) 単原子層合金における重い電子状態 Heavy-Fermion in a Mono-Atomic Layer YbCu₂/Cu(111)

杉原弘基¹, 中村拓人¹, 陳奕同¹, 湯川龍¹, 大坪嘉之²,
田中清尚³, 北村未歩⁴, 組頭広志⁵, 木村真一^{1,3}

¹大阪大学, 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-3

²量子科学技術研究開発機構 次世代放射光施設整備開発センター
〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11-901

³分子科学研究所 〒444-8585 愛知県岡崎市明大寺町字西郷中 38

⁴物質構造科学研究所, 放射光科学研究施設 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

⁵東北大学多元物質科学研究所 〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1

Hiroki SUGIHARA^{1,*}, Takuto NAKAMURA^{1,†}, Yitong CHEN¹, Ryu YUKAWA¹,
Yoshiyuki OHTUBO², Kiyohisa TANAKA³, Miho KITAMURA⁴, Hiroshi KUMIGASHIRA⁵,
Shin-ichi KIMURA^{1,3}

¹Osaka University, 1-3, Yamadaoka, Suita, 565-0871, Japan

²Institute for Advances Synchrotron Light Source, National Institutes for Quantum Science and
Technology, Sendai 980-8579, Japan

³Institute for Molecular Science, 38 Nishigo-Naka, Myodaiji, Okazaki, 444-8585, Japan

⁴Photon Factory, Institute of Materials Structure Science, 1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801, Japan

⁵IMRAM, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan

1 はじめに

希土類金属間化合物において、近藤効果により伝導電子(c)と希土類元素由来の局在f電子間の混成(c-f混成)は、有効質量が電子の静止質量の10⁴倍にも達する重い準粒子状態を生じさせる[1,2]。この系では、c-f混成の強度に応じて、RKKY相互作用に由来する長距離磁気秩序から、近藤効果に由来するフェルミ液体まで基底状態が変化する。特にT=0Kで磁気秩序からフェルミ液体に相転移を起こす量子臨界点近傍では、非従来型超伝導などの発現が期待される。

近年、分子線エピタキシー法を用いることで二次元的な重い電子系物質が実現され、次元性の低下に伴い電子の有効質量が増大することが報告された[3,4]。これは、物質の次元性がc-f混成強度を強く変調させることを示唆する。また、三次元系と比べて二次元系では量子臨界点付近の物性がより強く磁場などの影響を受けるため、より簡単に物性を変えることができる[5]。その一方で、最も単純な二次元系である単原子層物質において、重い電子系を示す物質はいまだ報告されていなかった。

我々は、希土類元素(R)が吸着した貴金属(M)の(111)上に形成される、希土類貴金属単原子層合金RM₂に着目し研究を進めている[6]。この物質では、4f電子と伝導電子との混成によって、単原子層物質で重い電子状態が実現できると期待される。

我々はRM₂の一つであるYbCu₂/Cu(111)合金において、これまでに試料作製と角度分解光電子分光法

(ARPES)を用いた表面電子状態の観測により、c-f混成バンドを観測し、さらに重い電子系に特有の振る舞いである、低温における近藤共鳴ピークの発達を確認した[7]。そこで本実験では、放射光を用いた励起光エネルギー依存測定によりc-f混成バンドの次元性を調べた。また、内殻光電子分光からYbイオンの平均価数を実験的に求めた。

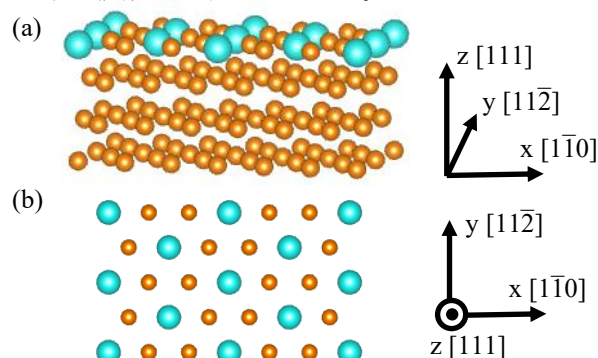


Fig1 : (a) YbCu₂/Cu(111)の結晶構造。
(b) YbCu₂/Cu(111)をz方向から見たもの。

2 実験

試料のYbCu₂/Cu(111)合金はAr⁺スパッタリング(加速電圧: 0.5 keV)と800 Kの加熱処理を繰り返して作成したCu(111)清浄面にMBE法によりYb原子を吸着させ、同時に加熱を行うことで作成した。測定は真空紫外光を用いた光電子分光によるバンド分散と軟X線を用いた内殻スペクトルを測定した。

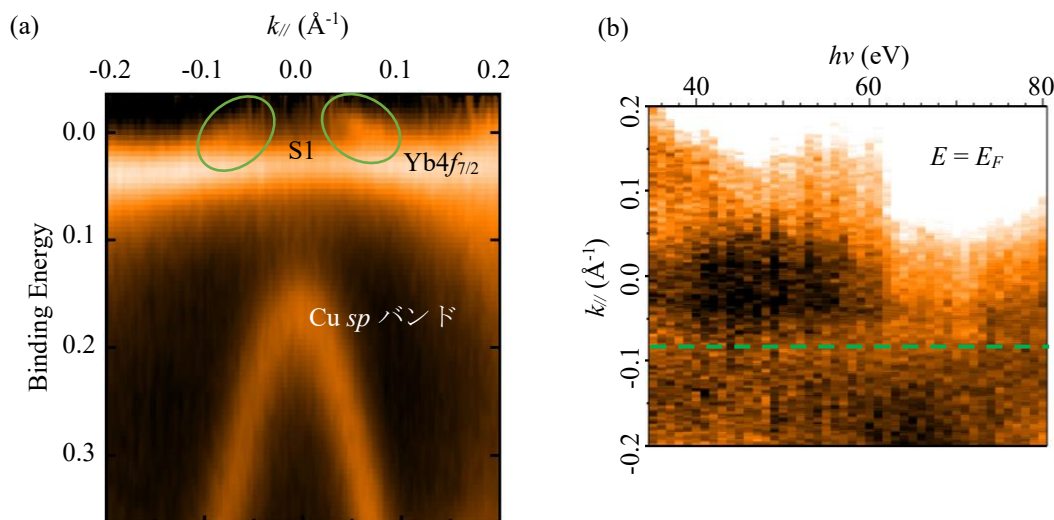


Fig. 2 : (a) $h\nu = 35$ eV, $T = 15$ K にて測定された $\text{YbCu}_2/\text{Cu}(111)$ の ARPES スペクトル
 フェルミ・ディラック分布関数で規格化を行いフェルミ準位よりも可視化した
 緑の円で囲われたバンドが c-f 混成バンドである
 (b) $h\nu = 35\sim 80$ eV, $T = 15$ K にて測定された $E = E_F$ の励起光依存測定。緑の破線は
 S1 バンドの k_z 依存性。

3 結果および考察

Fig. 1(a)は $\text{YbCu}_2/\text{Cu}(111)$ の ARPES スペクトルである。フェルミ準位近傍で伝導バンドと $\text{Yb}4f_{7/2}$ 由来したフラットバンドが混成している様子(緑の円内)が確認できる。このバンドの表面垂直方向の波数依存性を調べるために、励起光エネルギー依存測定を行った。Fig. 1(b)は $E = E_F$ における励起光エネルギー依存測定の結果である。緑の点線で示すように S1 のバンドは励起光を変えても面内波数 k_{\parallel} が変化せず、表面面直方向に分散をもたない二次元的なバンドであることが分かった。

Fig. 2 は $\text{Yb}3d$ 内殻光電子分光の結果である。緑のマークが光電子スペクトル、黒の実線がそのフィッティングである。 Yb^{2+} と Yb^{3+} に対応するピークが観測された。シャリー法によりバックグラウンドを除去後、フォークト関数でフィッティングを行った。 Yb^{2+} と Yb^{3+} のピークの面積比から Yb イオンの平均価数は、約 2.4 と求められ、混合原子価状態にあることが分かった。

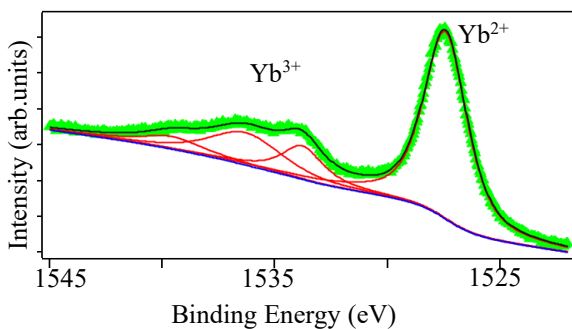


Fig3 : $\text{YbCu}_2/\text{Cu}(111)$ 合金の $\text{Yb}3d$ 内殻光電子スペクトルとフィッティング結果。

4 まとめ

本研究では、単原子層 $\text{YbCu}_2/\text{Cu}(111)$ 表面合金の電子状態を、放射光を用いた光電子分光で調査した。内殻光電子分光と角度分解光電子分光の結果、同物質が混合原子価物質であることと c-f 混成バンドが二次元であることが示された。

この結果は、単原子層物質において初めて二次元の重い電子状態を観測したことを示している。

5. 参考文献

- [1] A. C. Hewson, *The Kondo Problem to Heavy Fermions* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1993).
- [2] P. Coleman, et al., *JPCM* **13** (2001) R723.
- [3] H. Shishido, et al., *Science* **327**, 980 (2010).
- [4] Y. Mizukami et al., *Nat. Phys.* **7**, 849 (2011)
- [5] P. Gegenwart, Q. Si, F. Steglich, *Nat. Phys.* **4**, 186 (2008).
- [6] L. Fernandez et al., *Nanoscale* **12**, 22258 (2020).
- [7] T. Nakamura et al., arXiv:2306.06984

*sugihara@fbs.osaka-u.ac.jp

†nakamura.takuto.fbs@osaka-u.ac.jp