

走査トンネル顕微鏡による遷移金属酸化物薄膜の電子状態イメージング

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構
(AIMR)
岡田佳憲

2015年 7月 29日
15:30-16:10
@ 岐阜

①自己紹介

★(ザックリ)どんなことをしてきたか？

②STMを用いた物性研究の面白さ。何が出来るのか？

★原子を観るだけではない。色々なアプローチ。

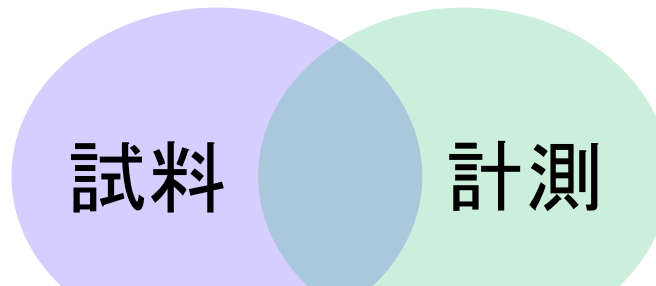
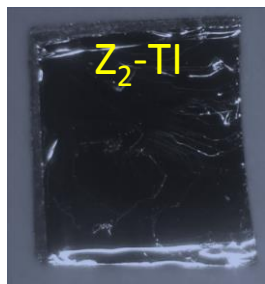
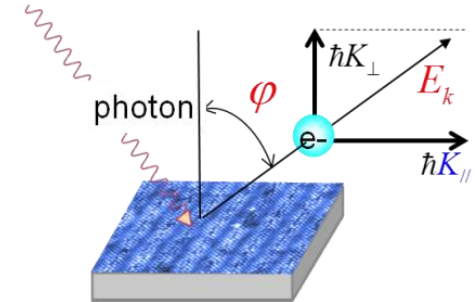
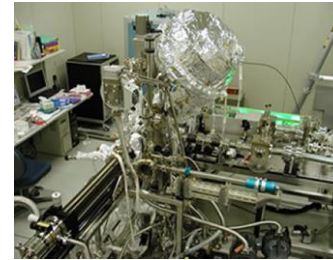
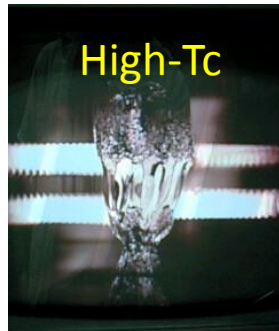
★物性研究の強力なツール。

③最近の試み。in-situ PLD + STM/STS

薄膜表面を原子レベルでデザインし、
電子状態をその場で観る

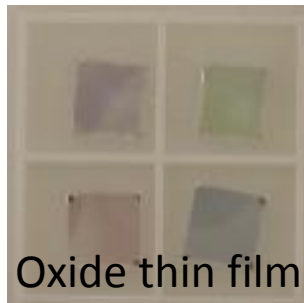
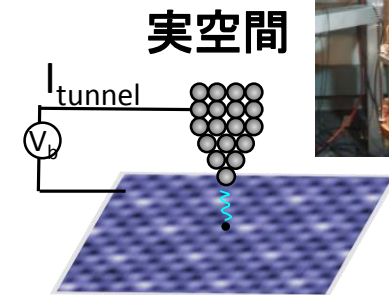
物性研究のアプローチ

ARPES (@ISSP 辛lab.)

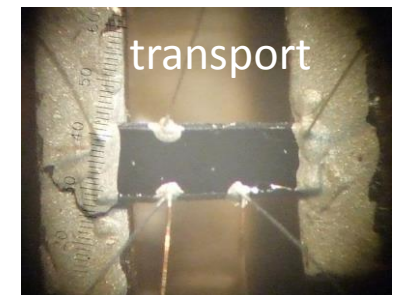


なるべく若いうちに色々な実験を経験しようと心がけてきた。

走査トンネル顕微鏡
STM

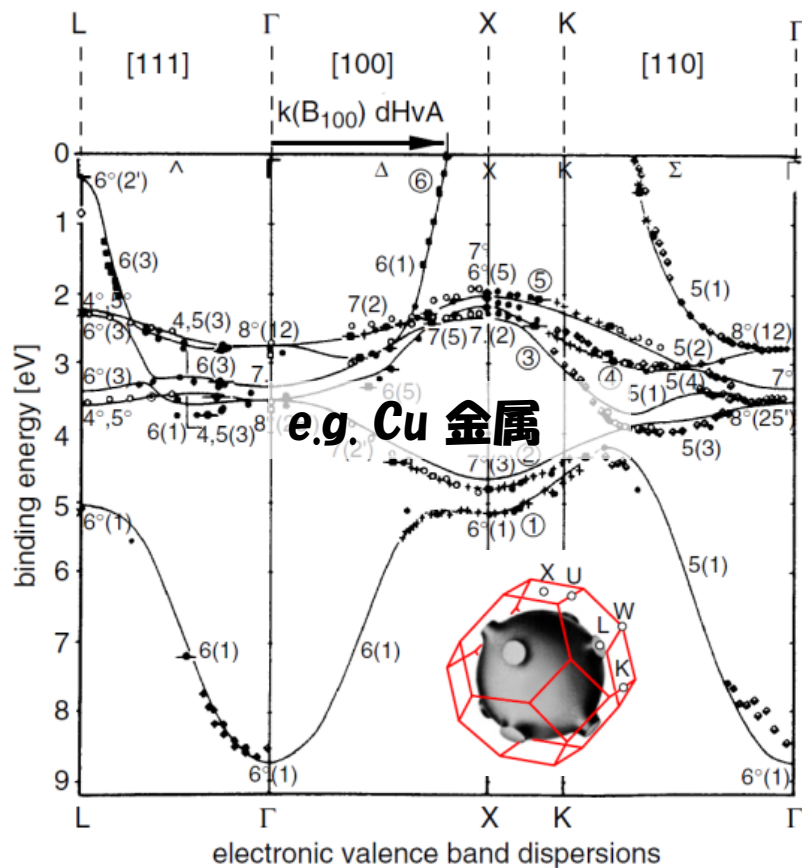


アプローチ:
★自ら試料を作る
★電子状態を直接的に観る(分光)

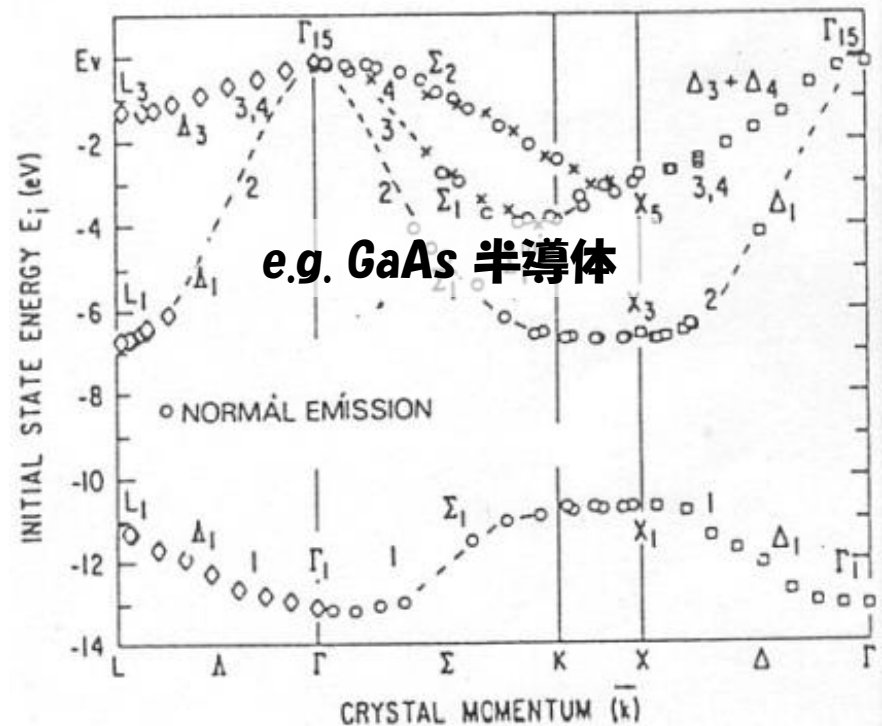


電子状態計測による(金属)物性研究

key information
⇒ **バンド構造・フェルミ面**

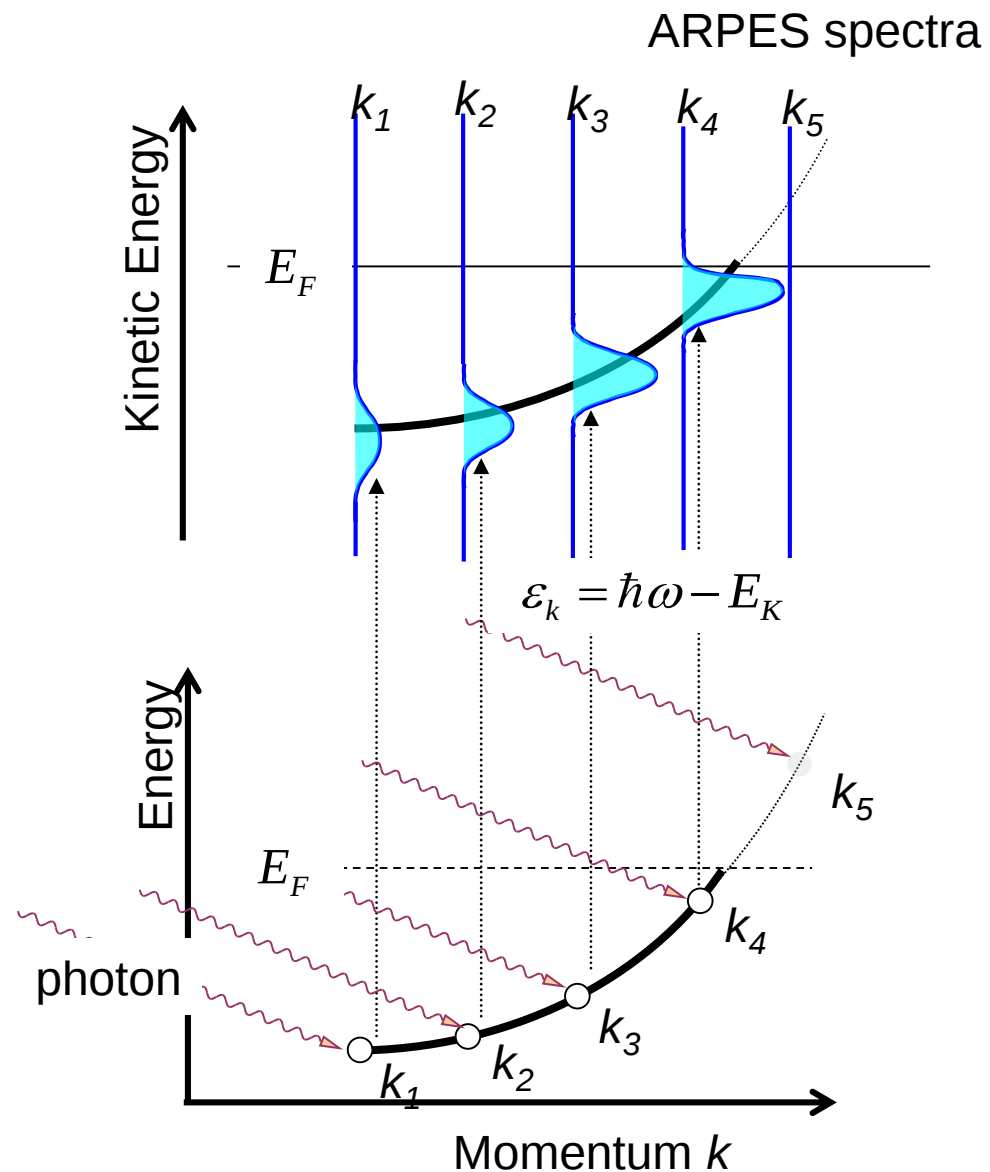
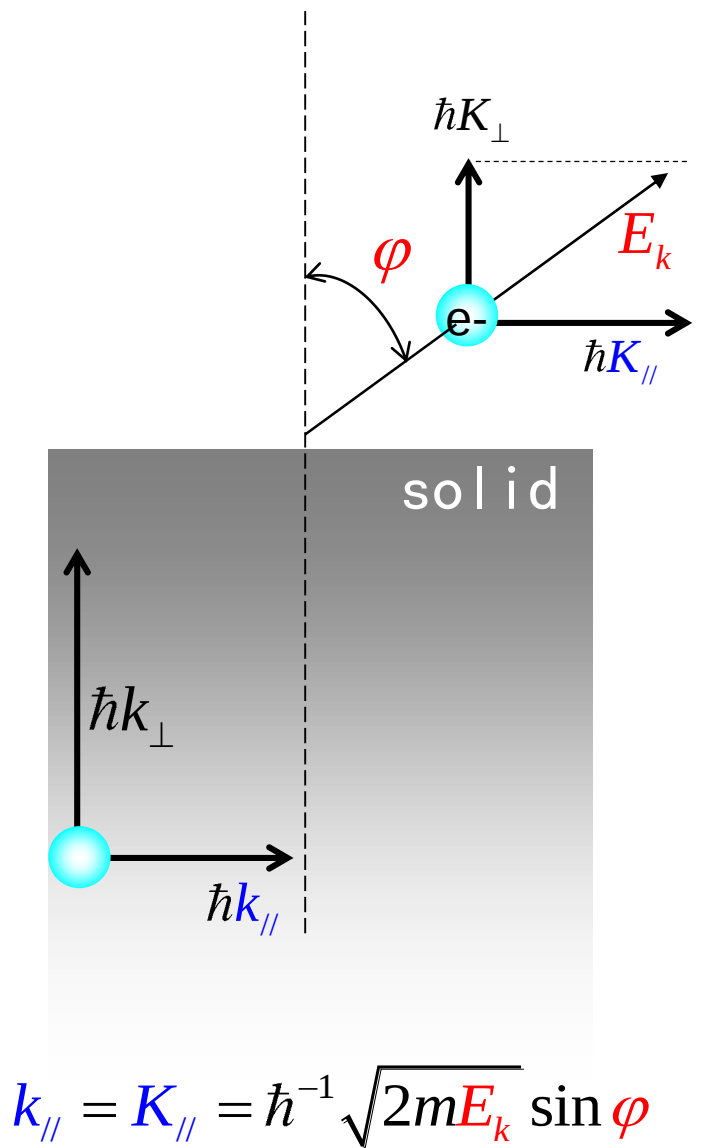


A. B. Pippard (1960)



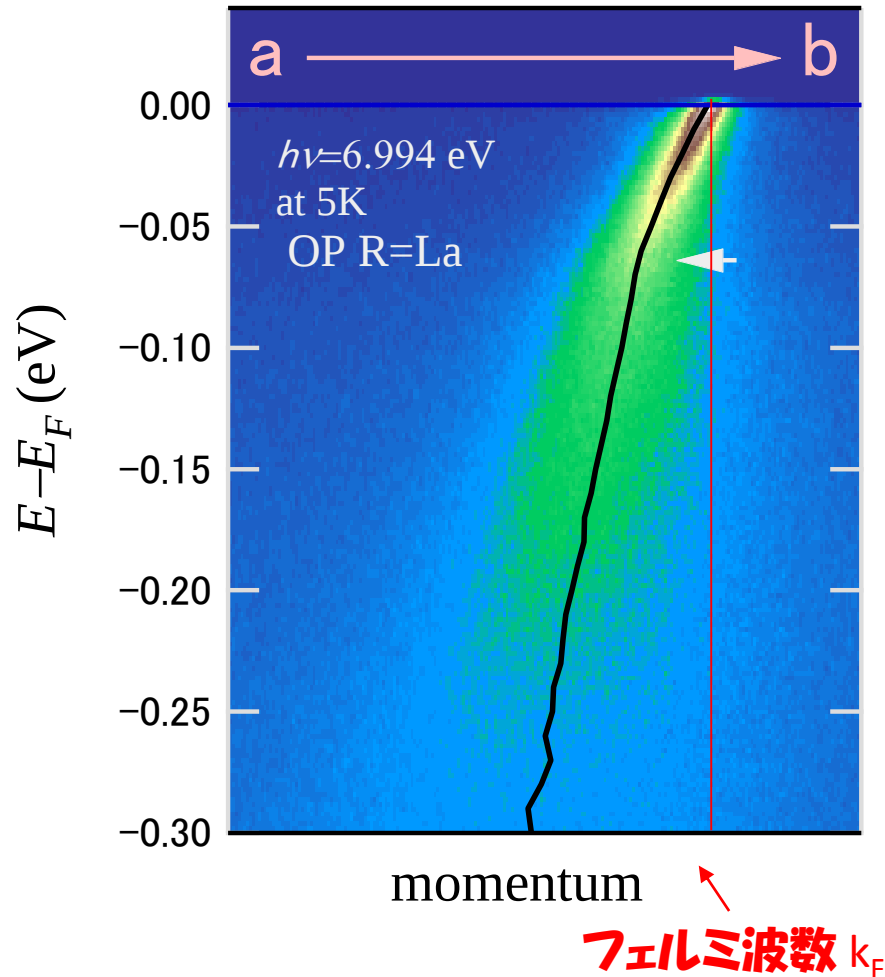
T.-C. Chiang *et al.* PRB (1980)

角度分解光電子分光(ARPES)によるバンド構造の直接観測



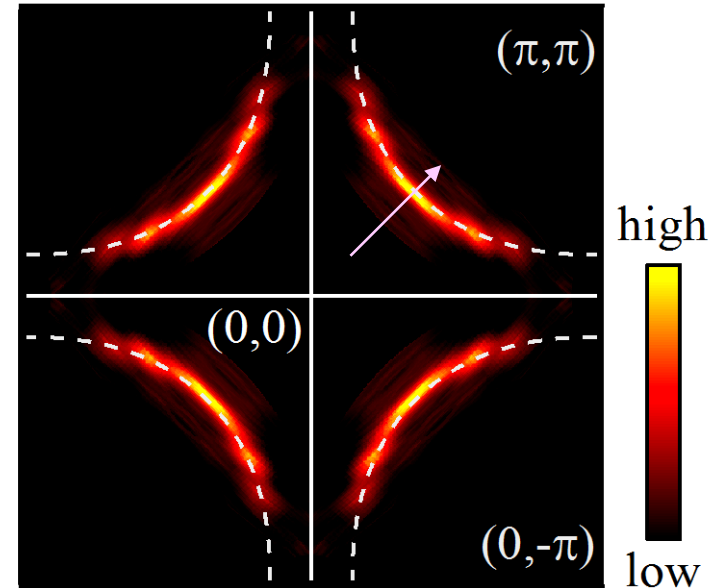
角度分解光電子分光(ARPES)によるバンド構造の直接観測

Bi-based cuprates



Y. Okada et al., PRB (2011)

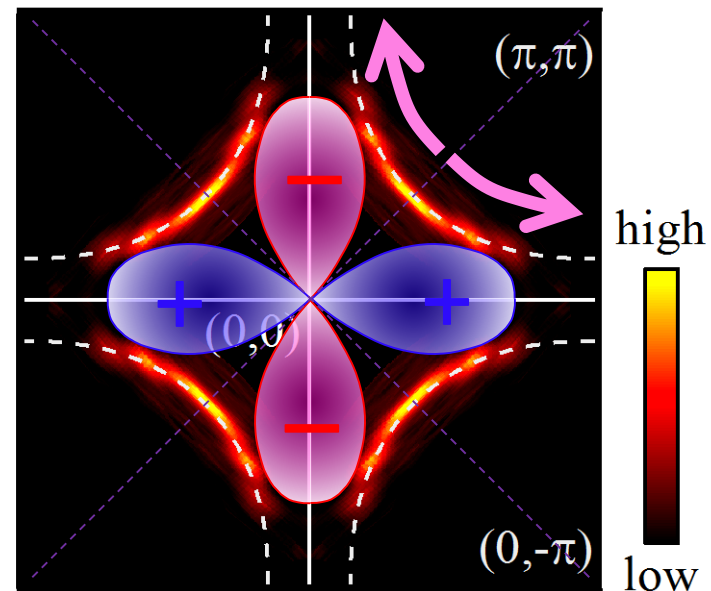
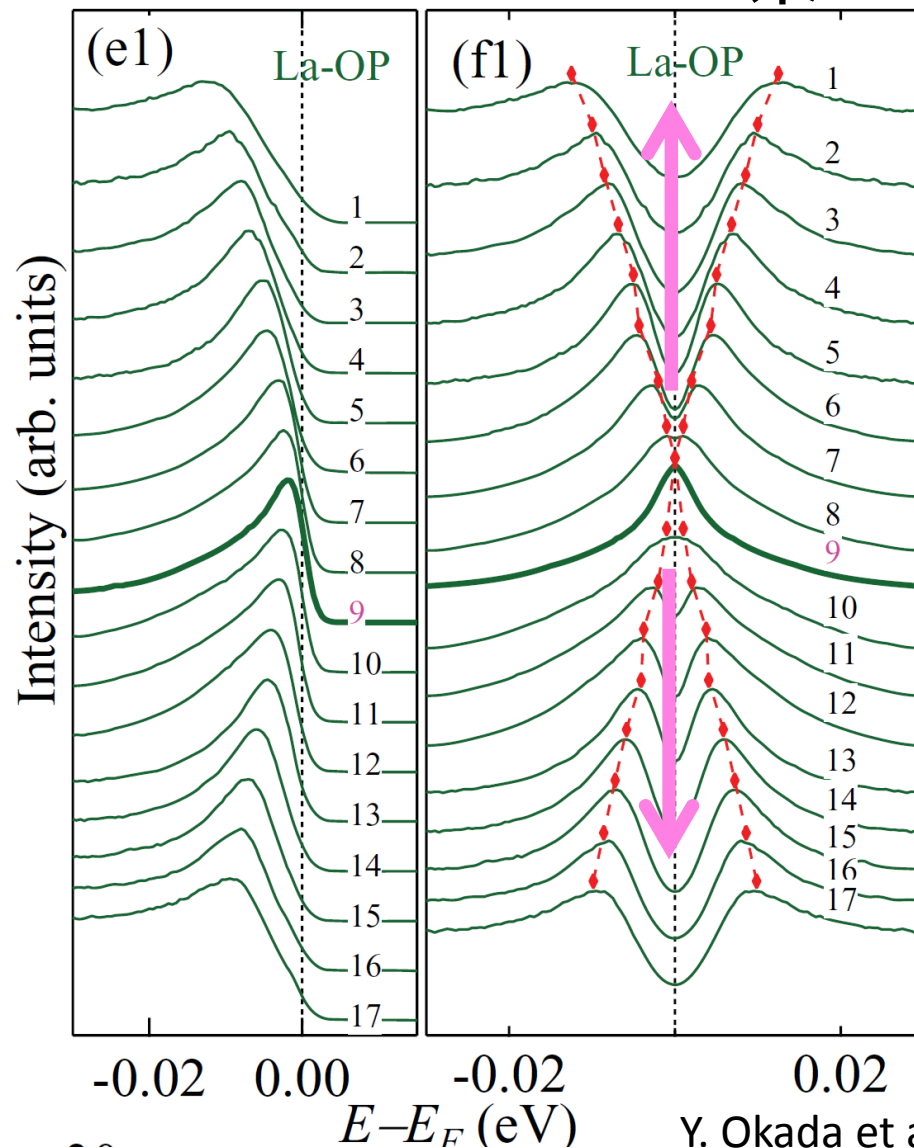
レーザーARPES @ 辛研(ISSP)



運動方向に依存した
電子の振る舞いの違いが明確。

角度分解光電子分光(ARPES)によるバンド構造の直接観測

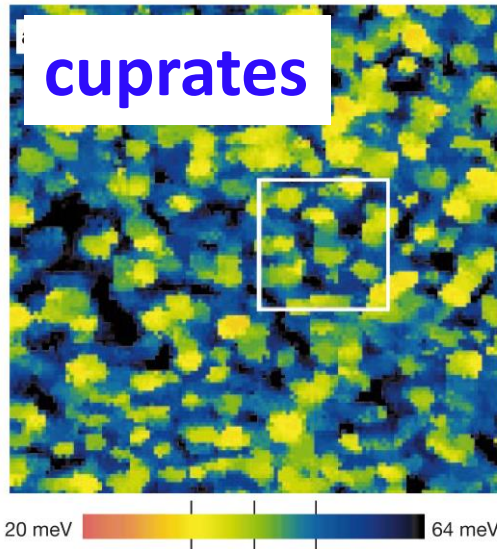
Bi系 cuprates



運動方向に依存した
電子の振る舞いの違いが明確。

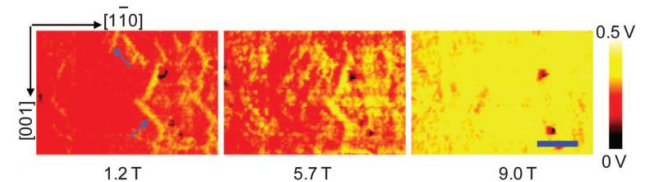
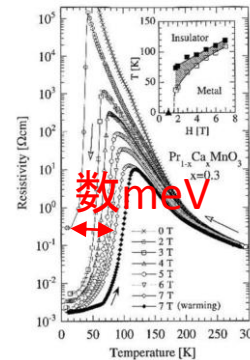
様々な先端材料⇒実空間から観る意義が高まっている

S. H. Pan *et al.* Nature (2002)



巨大応答を示す
量子材料

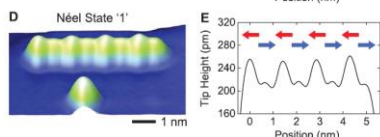
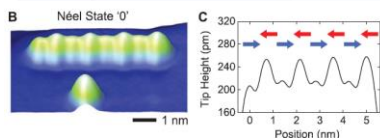
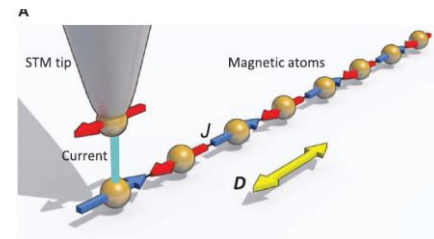
manganite
Keiji Lai *et al.* Science(2010)



小さなinput(数meV)で、
劇的なoutput(~5桁のΔR)

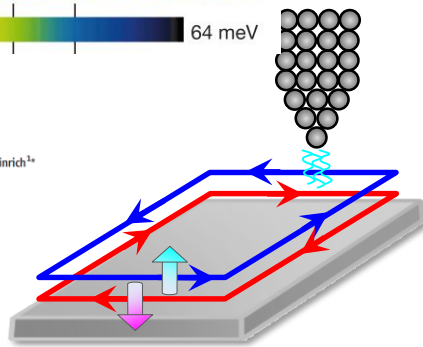
Bistability in Atomic-Scale Antiferromagnets

Sebastian Loth,^{1,2*} Susanne Baumann,^{1,3} Christopher P. Lutz,¹ D. M. Eigler,¹ Andreas J. Heinrich^{1,4}

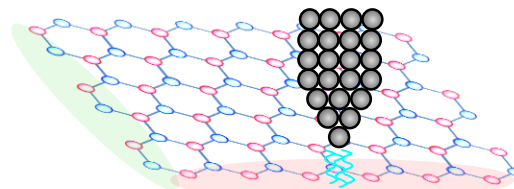


"1"

"0"



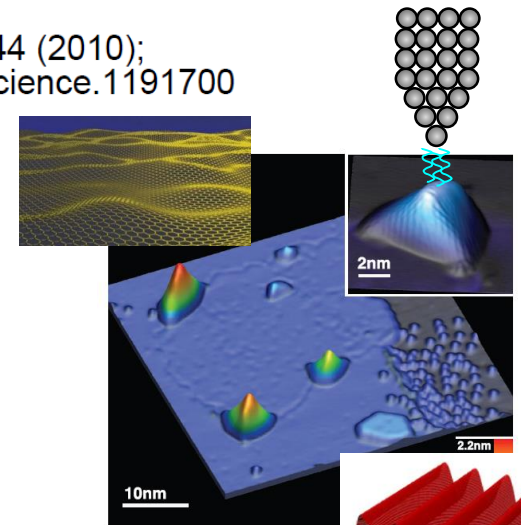
Edges



8原子で1ビット
Science 335 196 (2012)

Strain-Induced Pseudo Magnetic Fields Greater Than 300 Tesla in Graphene Nanobubbles

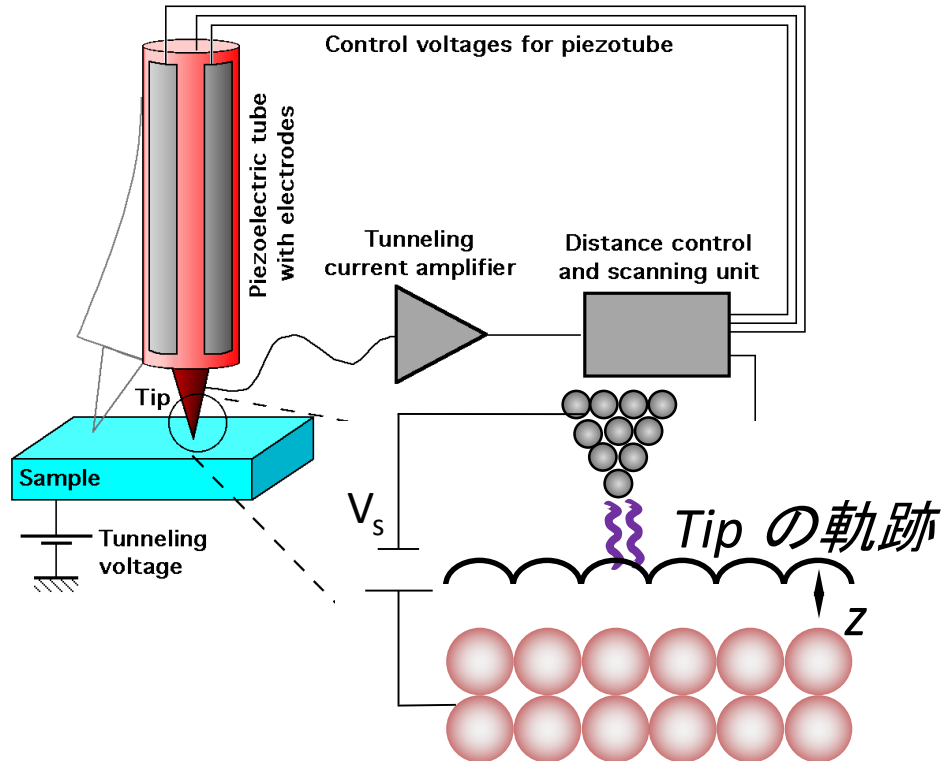
N. Levy, *et al.*
Science **329**, 544 (2010);
DOI: 10.1126/science.1191700



Spectroscopic mapping/imaging STM

$$I(r, z, V) \propto \exp(-z) \int_0^{eV} \rho_{\text{sample}}(r, E) dE$$

トポグラフィ像(凹凸)

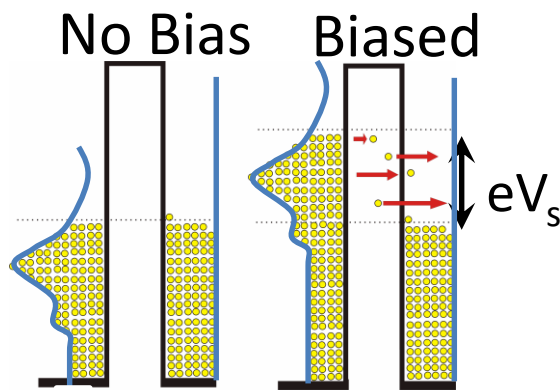


$$I_t(r, z) \propto \exp(-z)$$

z が1 Å変化すると、 I_t が1桁変わる

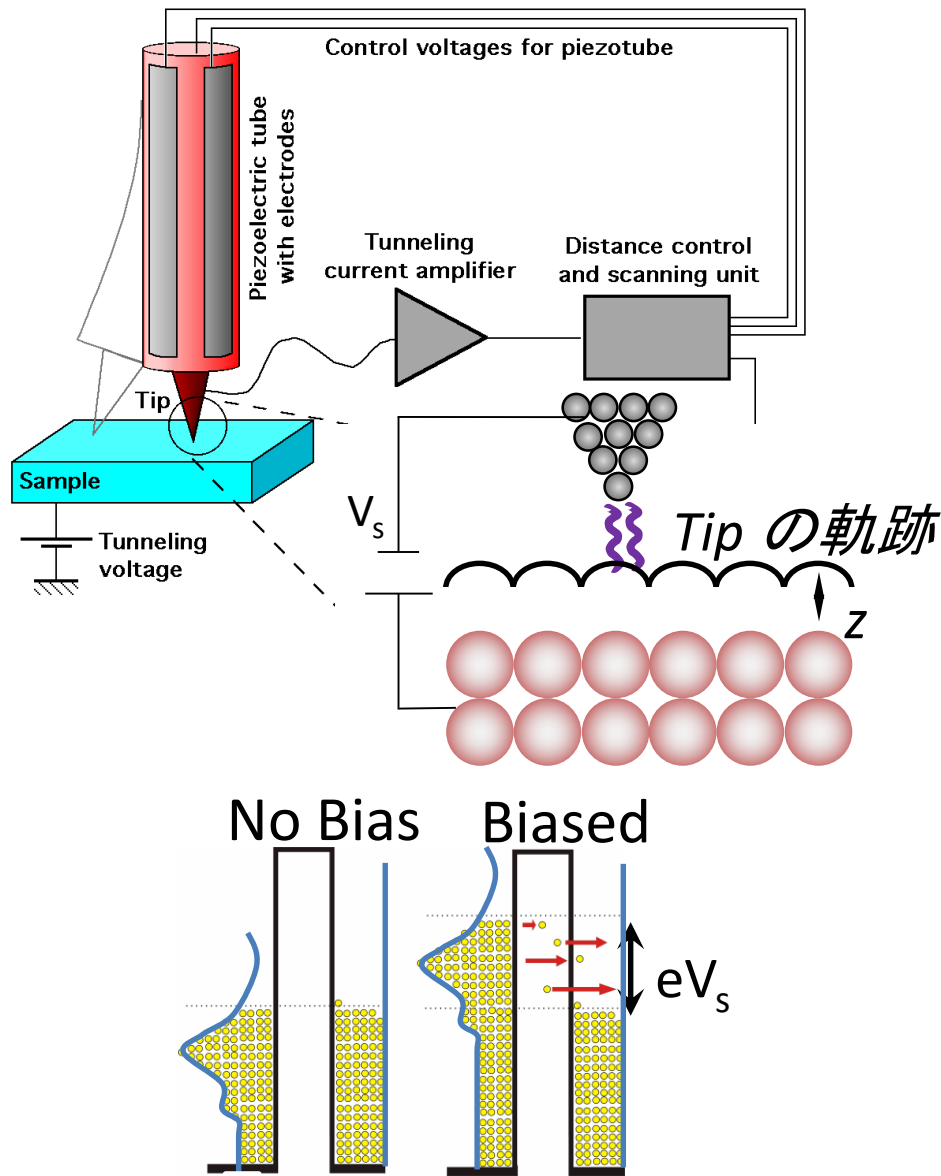
局所状態密度

$$\frac{dI}{dV}(r, V) \propto LDOS_{\text{sample}}(r, V)$$

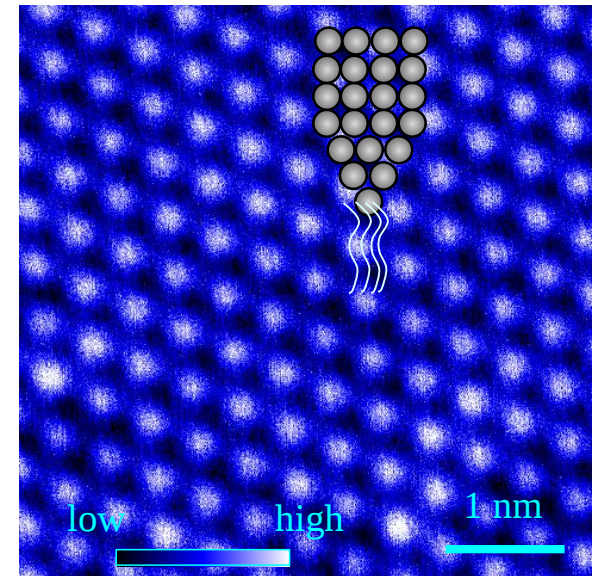


Spectroscopic mapping/imaging STM

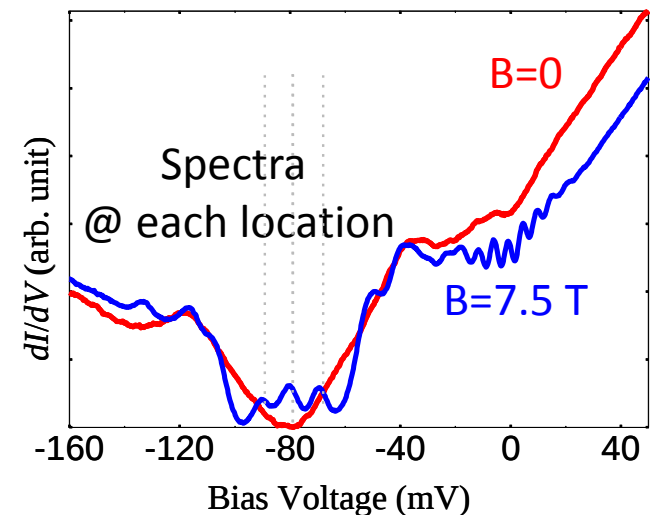
$$I(r, z, V) \propto \exp(-z) \int_0^{eV} \rho_{\text{sample}}(r, E) dE$$



トポグラフィ像(凹凸)



局所状態密度

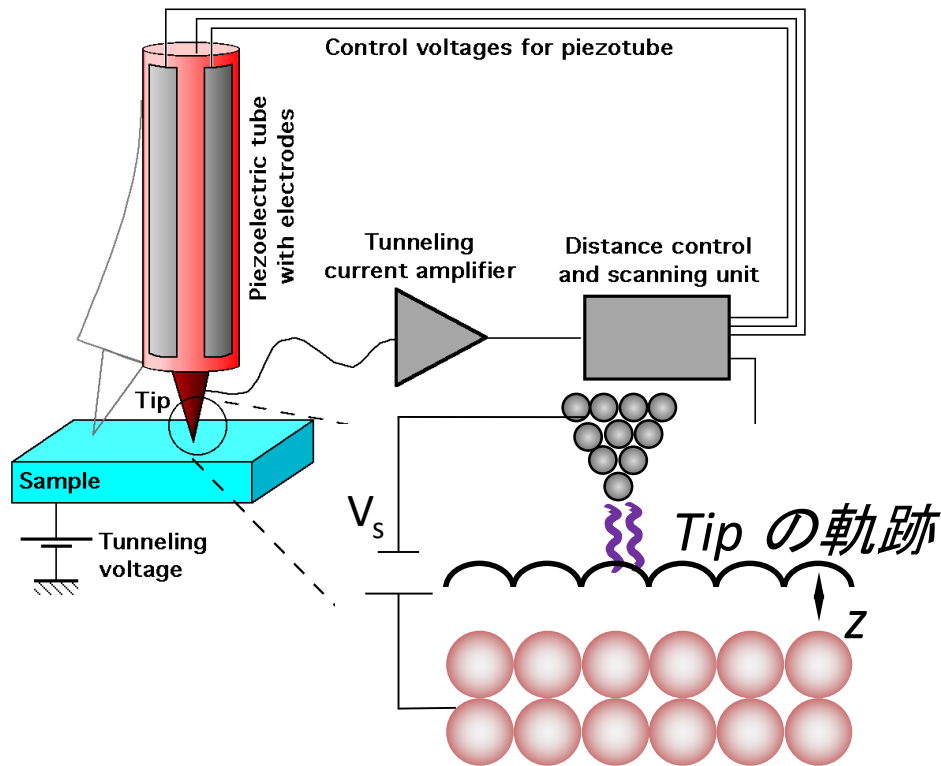


Spectroscopic mapping/imaging STM

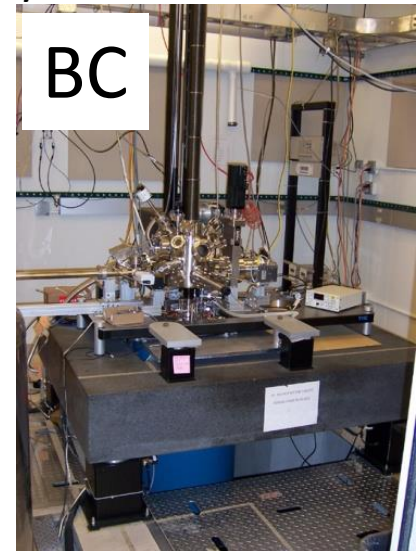
$$I(r, z, V) \propto \exp(-z) \int_0^{eV} \rho_{\text{sample}}(r, E) dE$$

安定性が重要

1 sec. /spec
with 512*512pix.
⇒ ~3 days



卓上STM



AIMR

Spectroscopic
mapping/imaging
STM



Spectroscopic imaging/mapping Scanning Tunneling Microscope (STM/STS)

STMを用いた物性研究

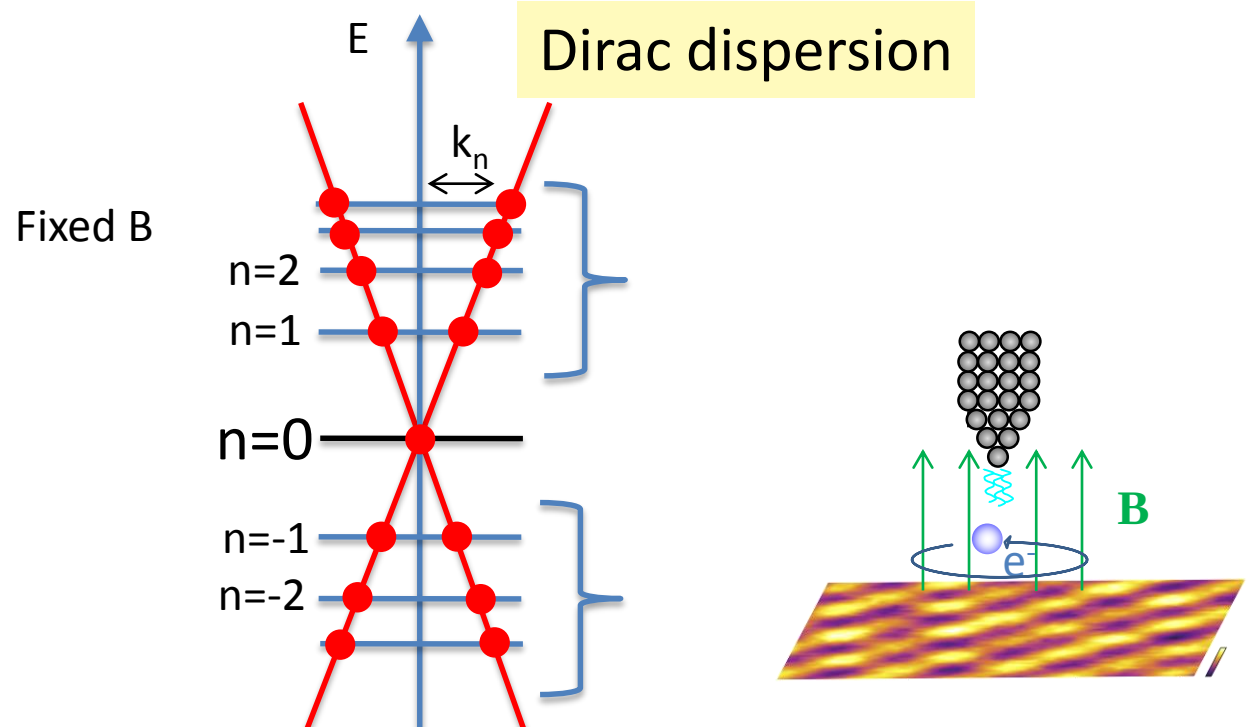
~数 Å
ミクロスコピック
(原子配列、欠陥)

数nm ~ μm
★バンド
★相分離・ドメイン
など

電子物性発現機構を
様々な階層構造で横断的に調べれる

- ① 電子定在波の解析。
- ② ランダウレベルの解析。

Landau level Spectroscopy



$S_n \Rightarrow$ area of constant energy contour (k -space)

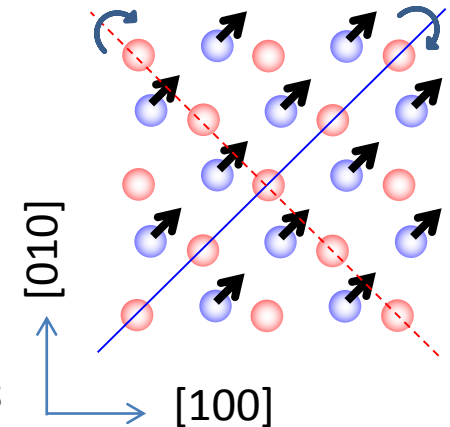
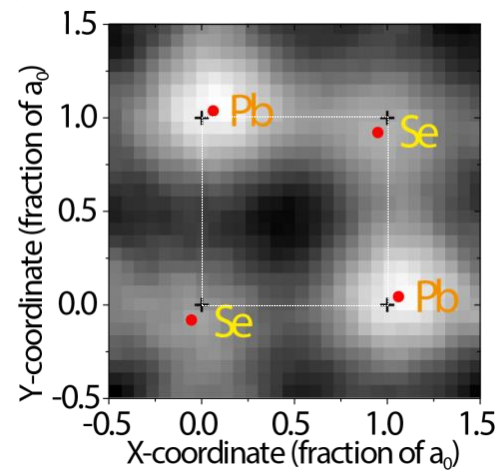
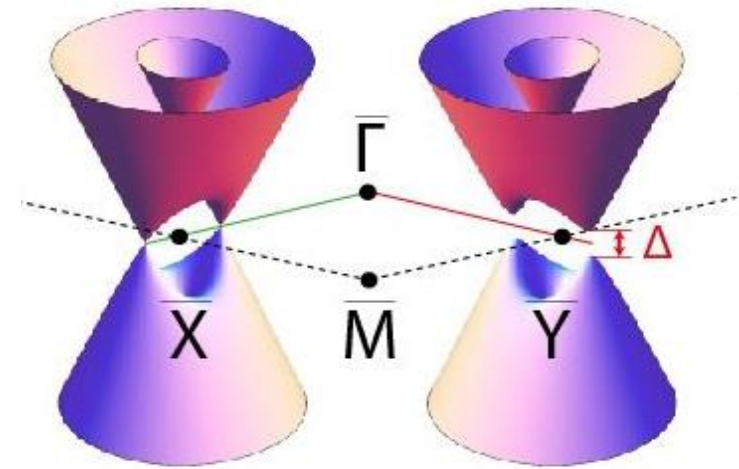
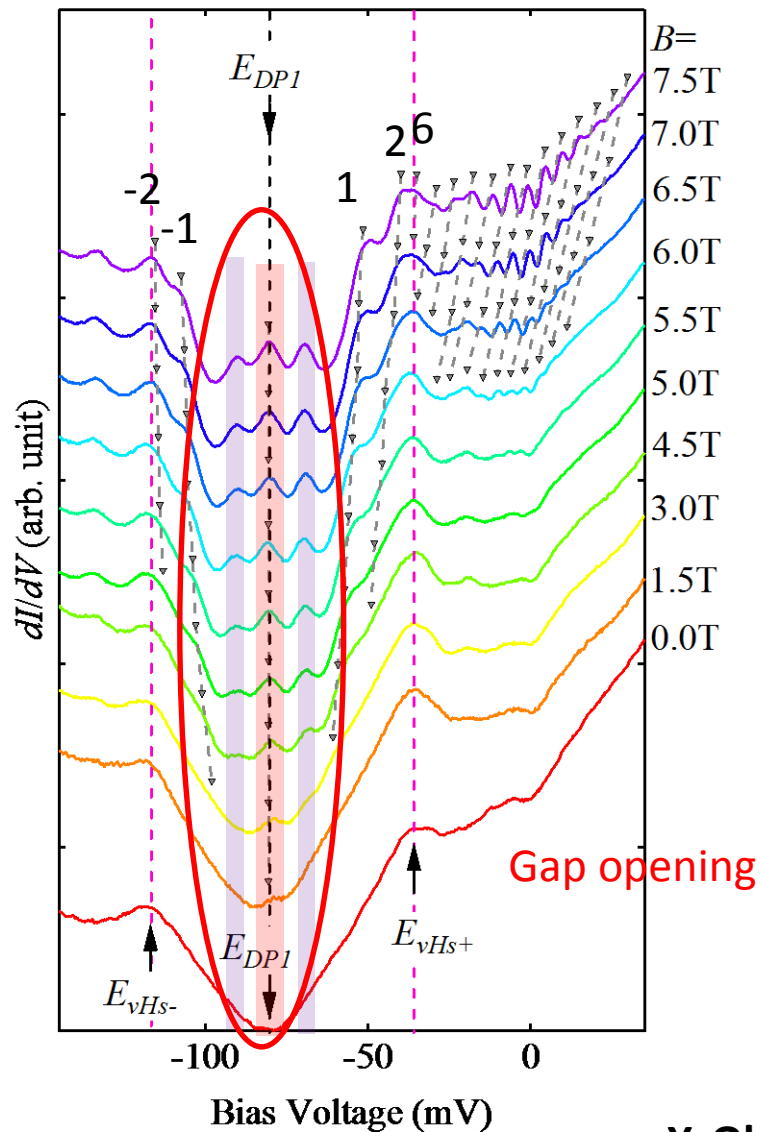
$$k_n^2 \pi = S_n = \frac{2\pi e}{\hbar} nB \quad k_n = \sqrt{\frac{2e}{\hbar}} \cdot \sqrt{nB}$$

$$E_n \text{ vs. } \sqrt{\frac{2e}{\hbar}} \cdot \sqrt{nB}$$

がバンド分散を与えてくれる

LL spectroscopy in novel topological insulator (Pb,Sn)Se

Raw data



STMならではの
原子分解能を活かしたストーリー展開

Y. Okada *et al.*, Science (2013)

I. Zeljkovic and Y. Okada *et al.*, Nature Materials (2015)

Spectroscopic imaging/mapping Scanning Tunneling Microscope (STM/STS)

STMを用いた物性研究

~数 Å
ミクロスコピック
(原子配列、欠陥)

数nm ~ μm
★バンド
★相分離・ドメイン
など

電子物性発現機構を
様々な階層構造で横断的に調べれる

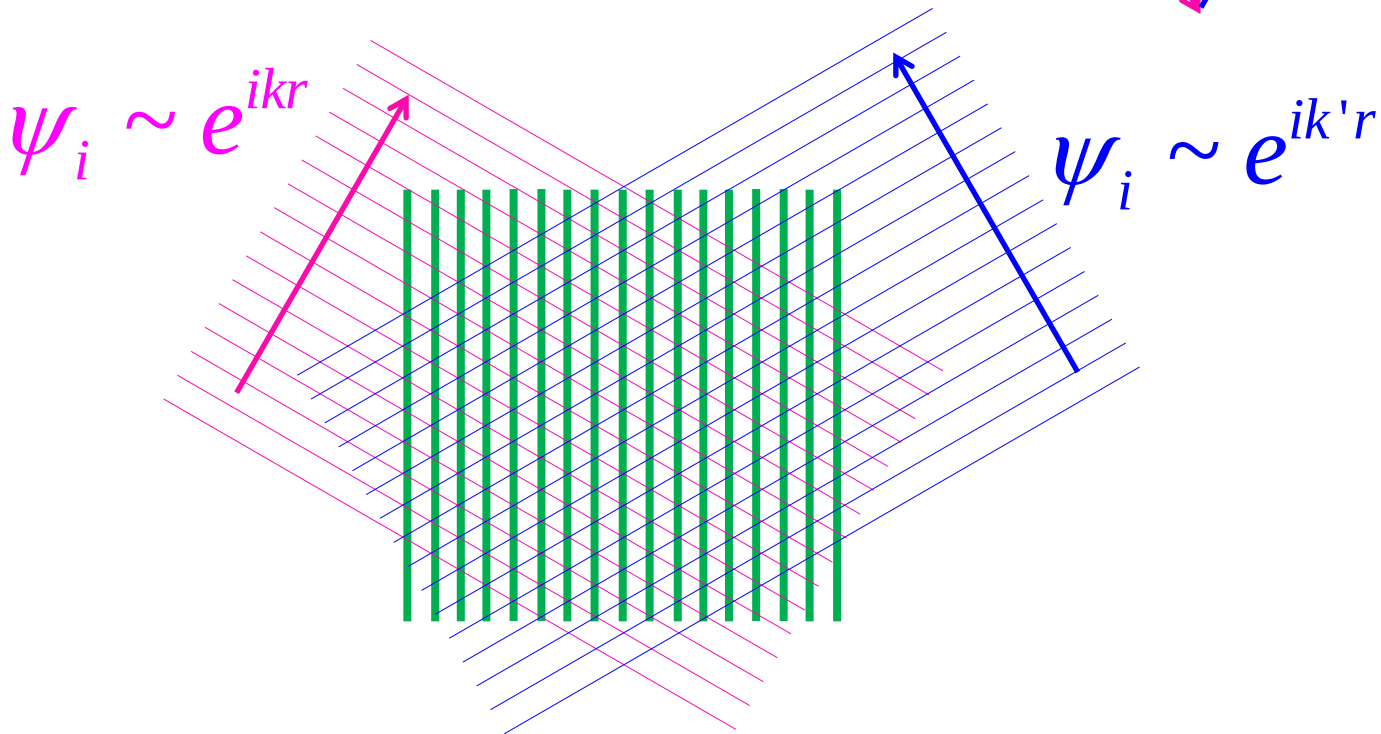
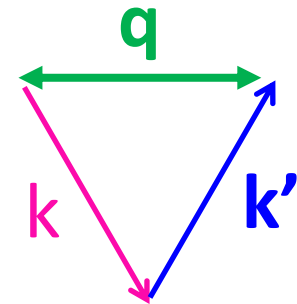
- ① 電子定在波の解析。
- ② ランダウレベルの解析。

Electronic interference (standing wave)

Scattering from k to k'

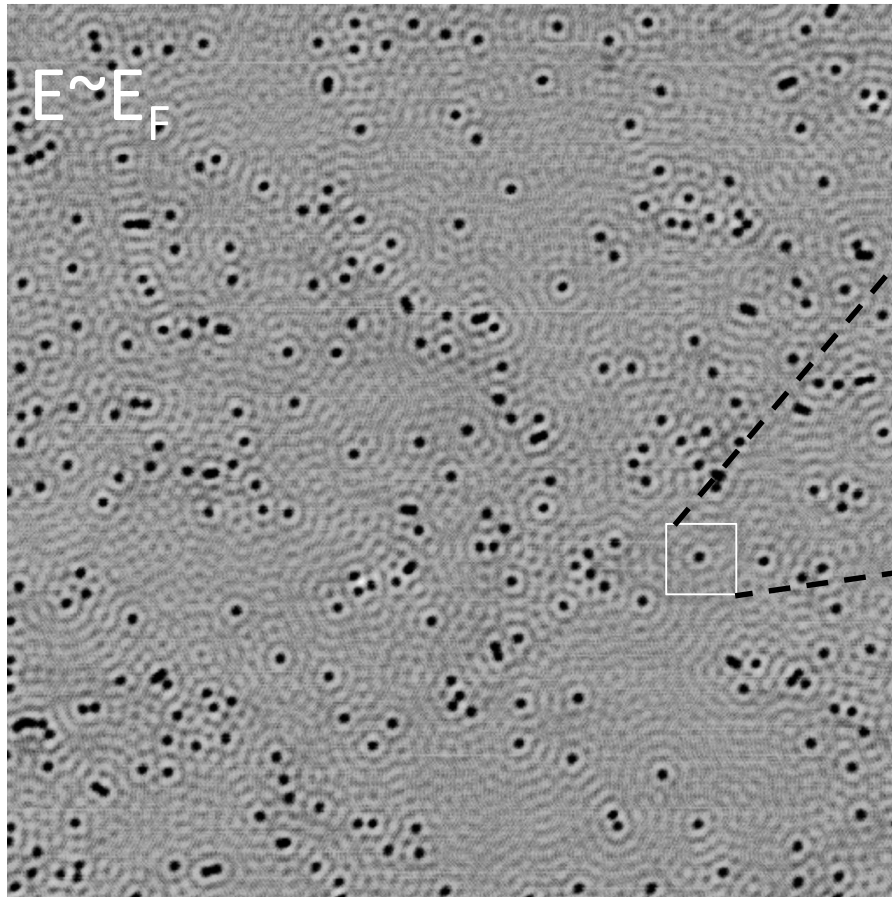
$$\vec{q} = \vec{k}' - \vec{k}$$

creates standing waves ($\lambda = 2\pi/q$)



Analysis: Fourier Transformation

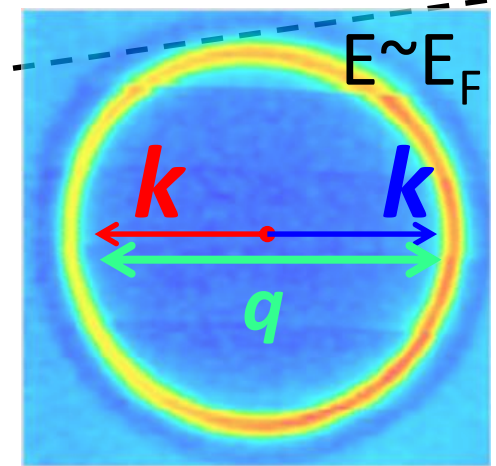
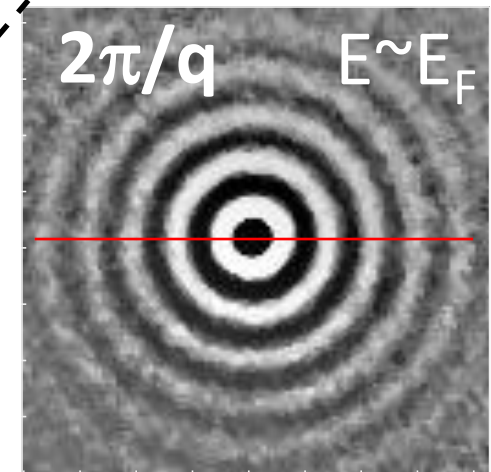
dl/dV image (r-space)



low  high

20 nm

band (k-space)

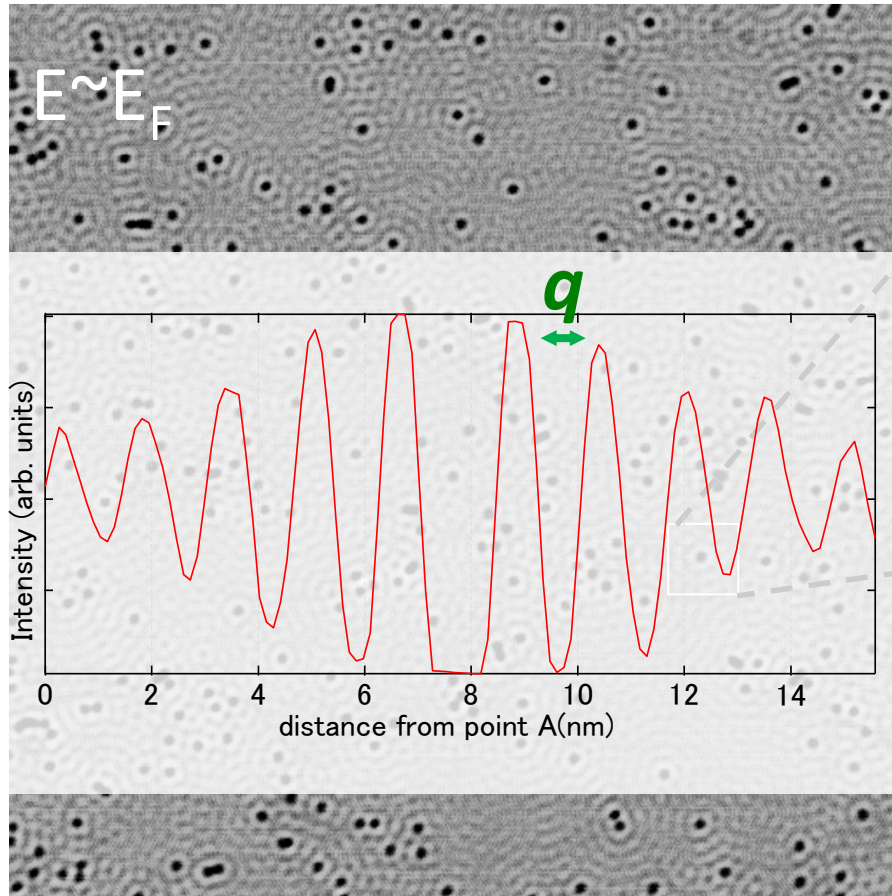


Huffner et al.

$$k(E) = q(E)/2$$

Analysis: Fourier Transformation

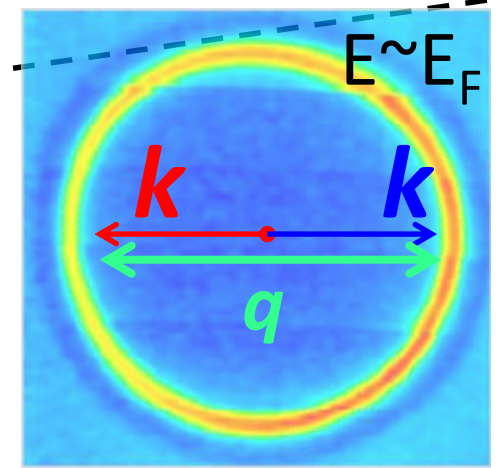
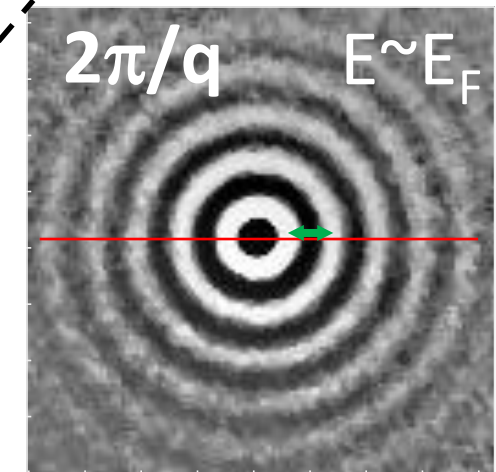
dl/dV image (r-space)



low  high

20 nm

band (k-space)

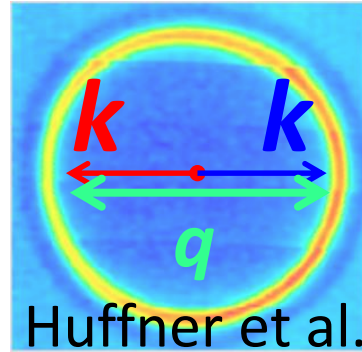


Huffner et al.

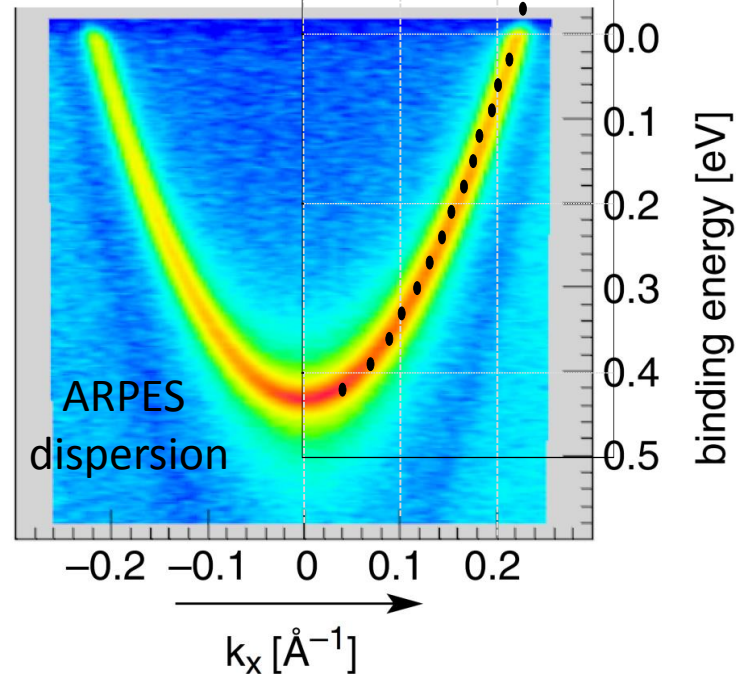
$$k(E) = q(E)/2$$

Analysis: Fourier Transformation

band (k-space)

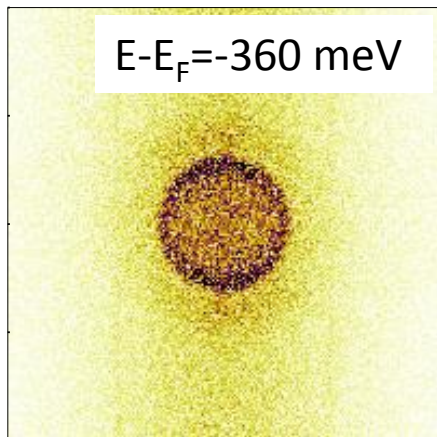
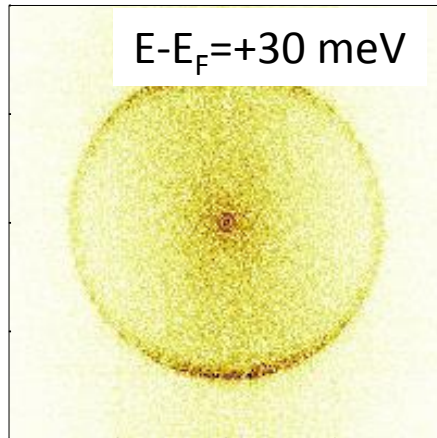
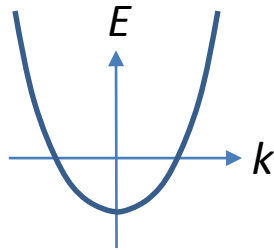


Band from STM
 $k(E) = q(E)/2$

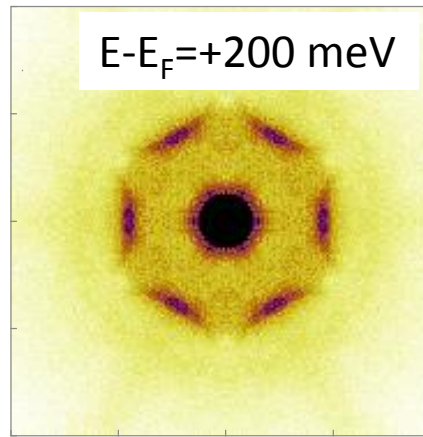
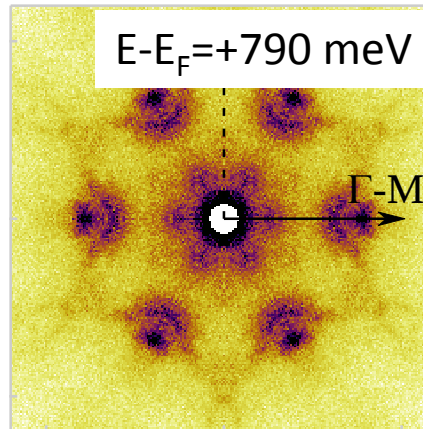
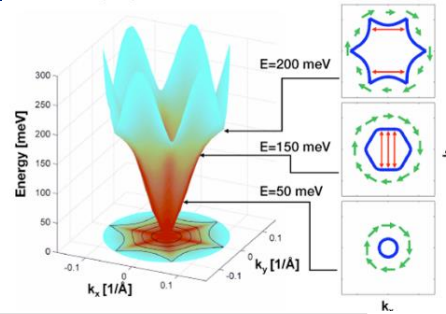


interference pattern on various 2D state

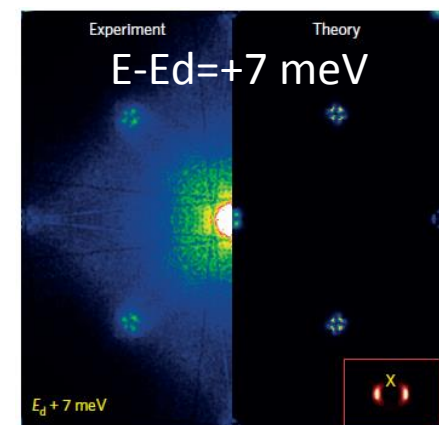
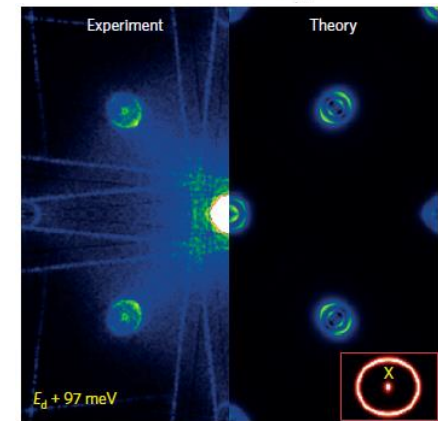
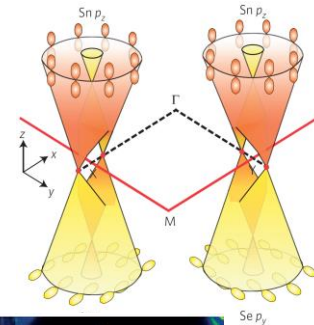
Cu(111)



TI
 Bi_2Te_3

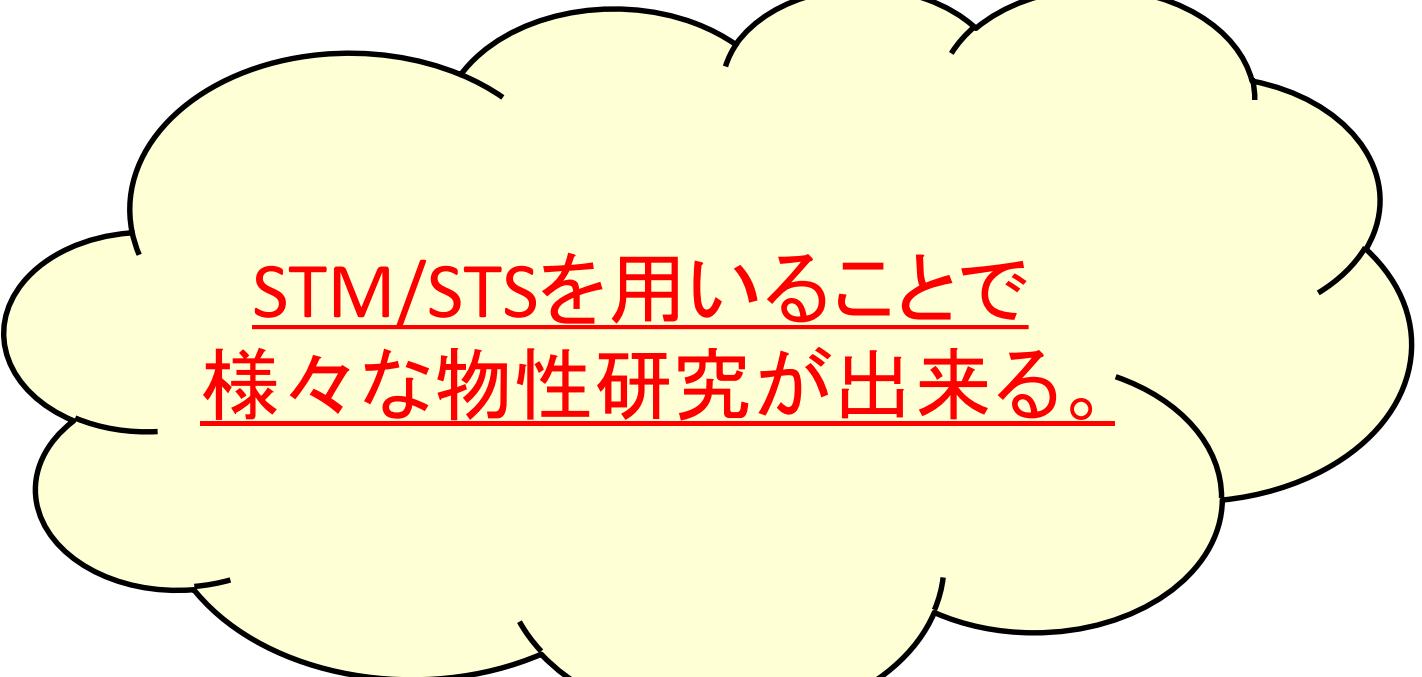


New TI
(Pb,Sn)Se



Y. Okada PRL (2011)
Y. Okada Nat. Commn. (2012)

I. Zeljkovic, Y. Okada et al.
Nature Physics (2014)



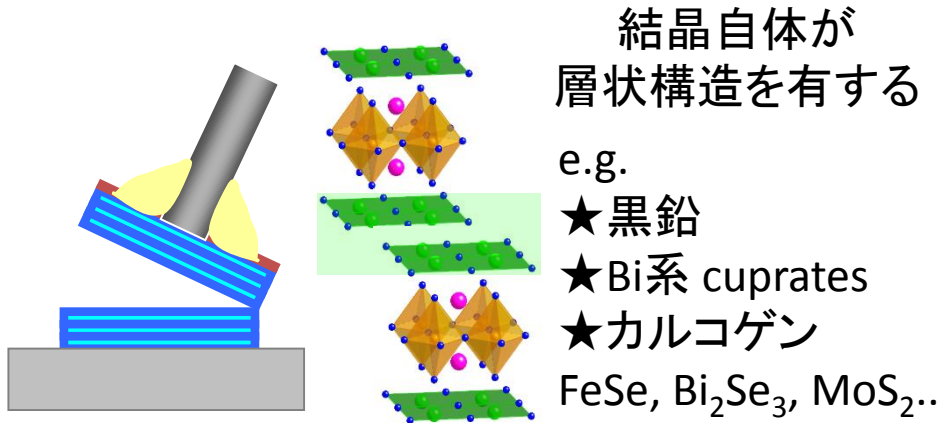
STM/STSを用いることで
様々な物性研究が出来る。



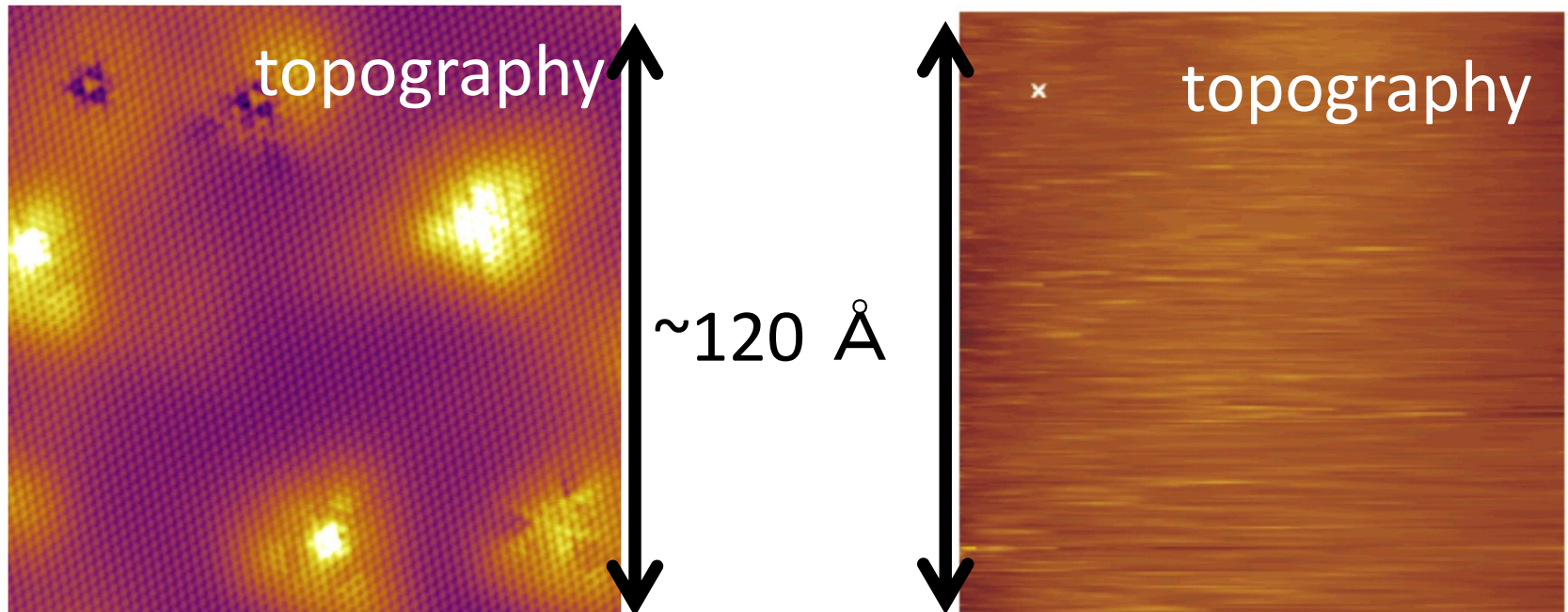
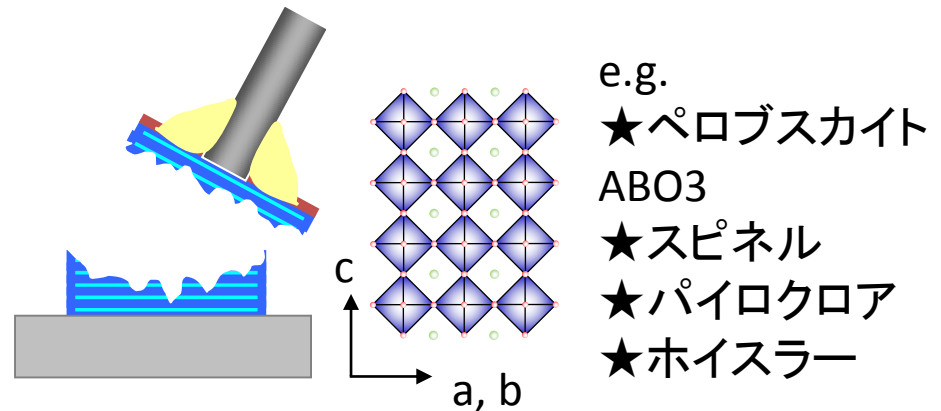
しかし、
測定対象に出来る
sampleはごくわずか。

Limitation!!!

ヘキ開でアクセスできる表面

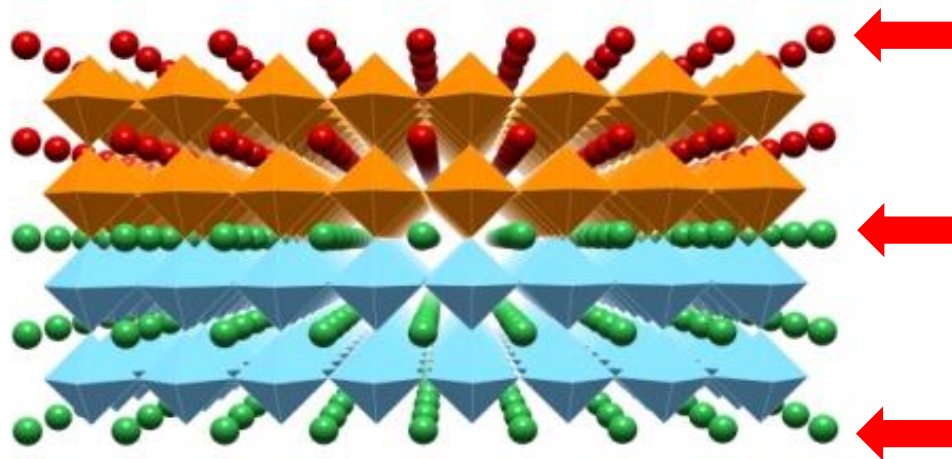


ヘキ開でアクセスできない表面



エピタキシャル薄膜技術を駆使した ペロブスカイト酸化物ベースの2次元電子系

人工格子、
膜厚制御、
配向制御



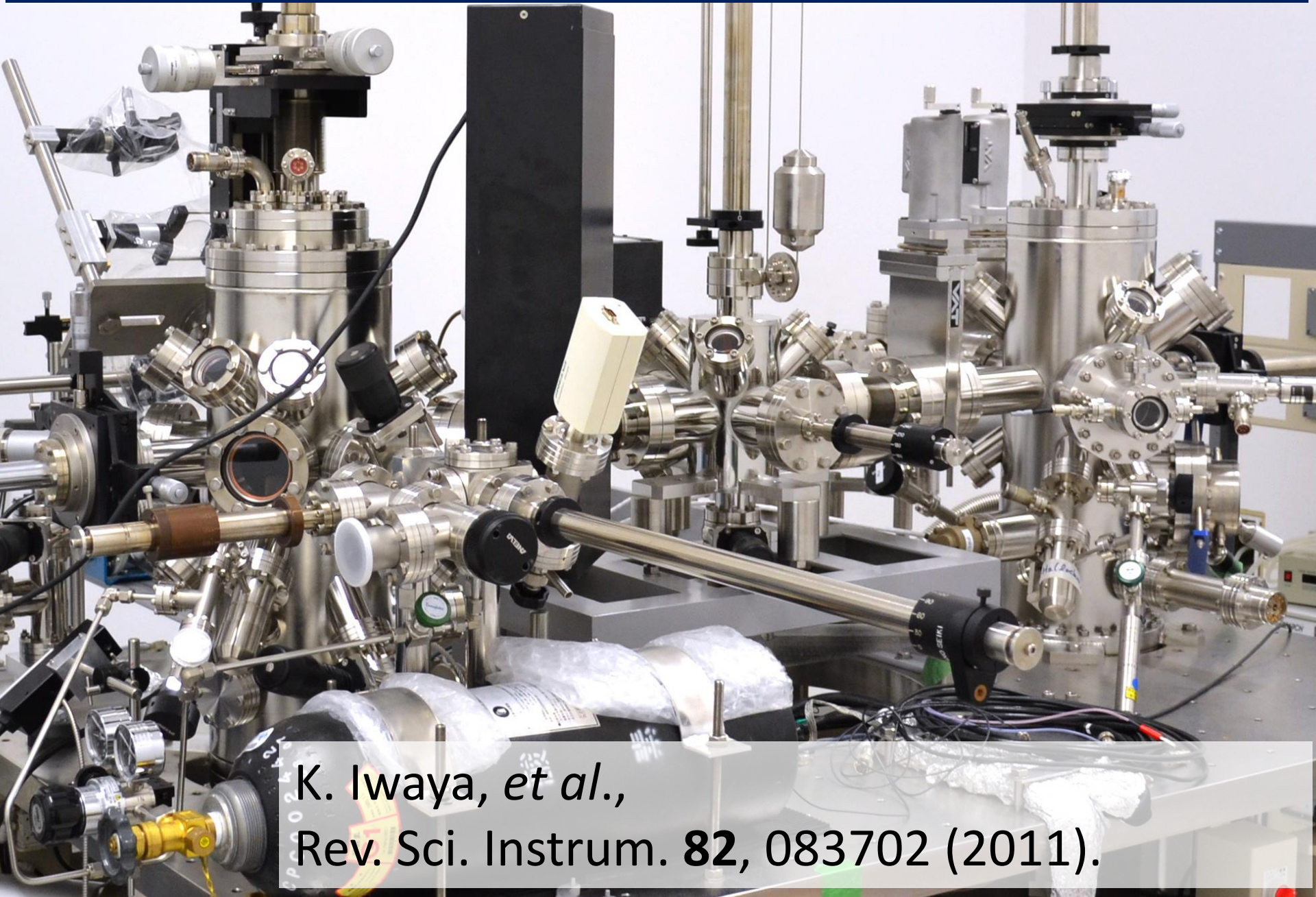
予期せぬ現象に出くわす

- ★高温超伝導
- ★強磁性超伝導
- ★高移動度
- ★磁気抵抗
- ★高ゼーベック効果

独自の薄膜表面を原子レベルでデザイン(へき開では
得られない物質人工電子系)
⇒STM/STSで、電子状態をその場で観る。

酸化物薄膜技術とSTM/STS技術の融合

PLD connected with low-T STM

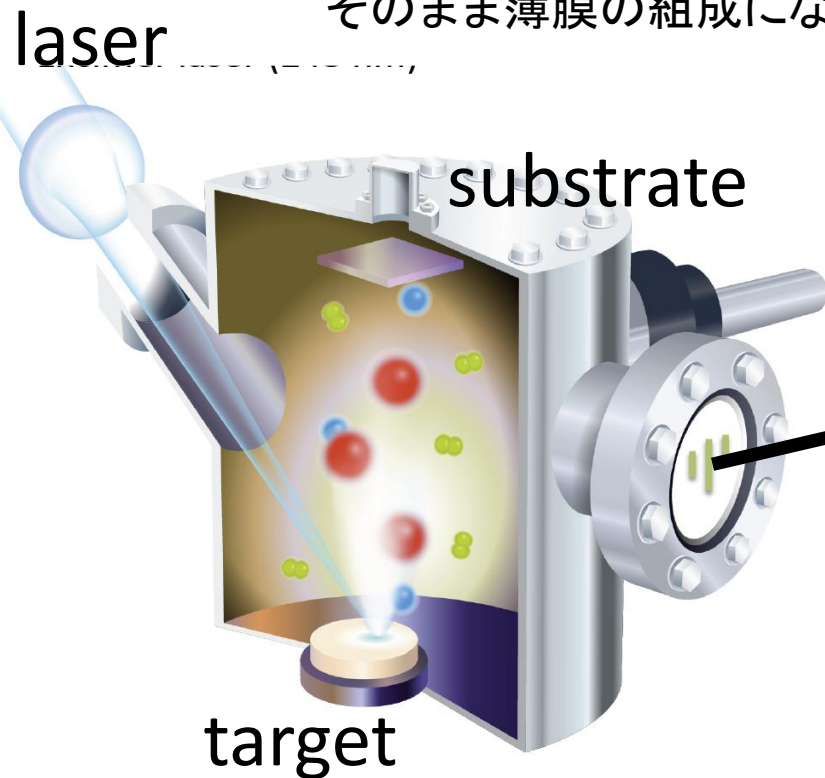


K. Iwaya, *et al.*,

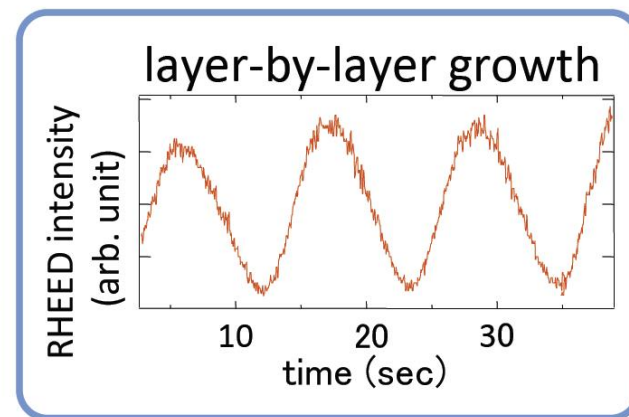
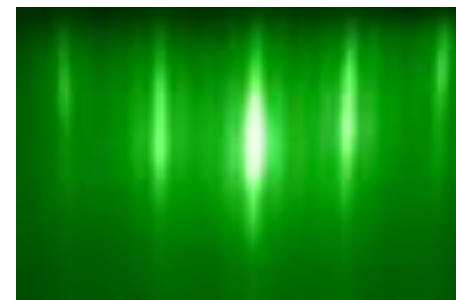
Rev. Sci. Instrum. **82**, 083702 (2011).

Pulsed Laser Deposition (PLD)

ターゲット表面の温度が上昇
⇒プラズマ上になり、基板上に到達
(基本的に)ターゲットの組成が
そのまま薄膜の組成になる

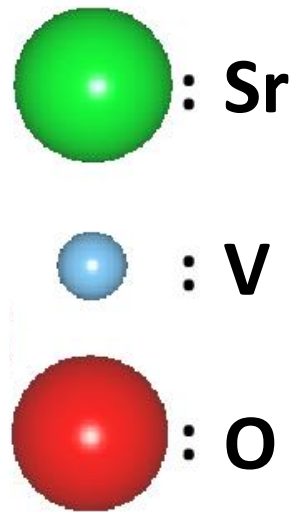
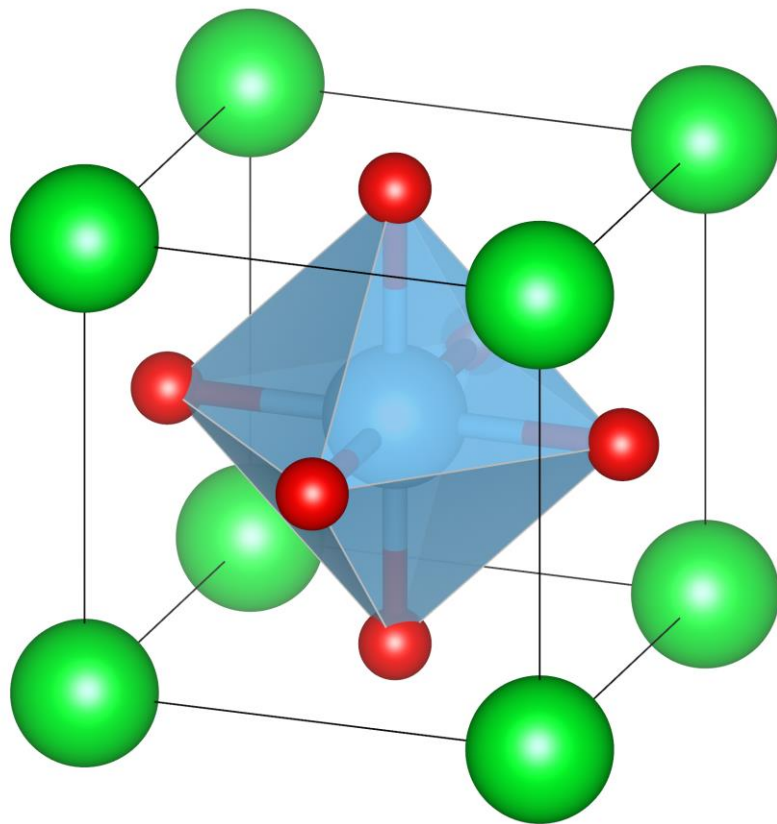


反射高速電子線(RHEED)

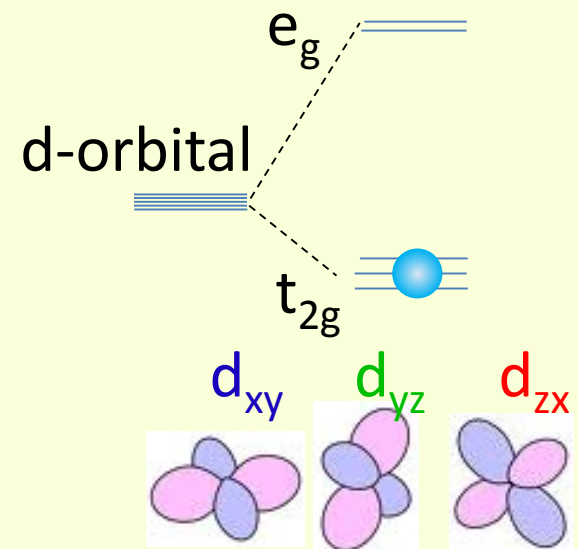


2D electronic state on SrVO₃(001) surface

How can cubic perovskite (ABO₃) realize
2D state on surface/interface?



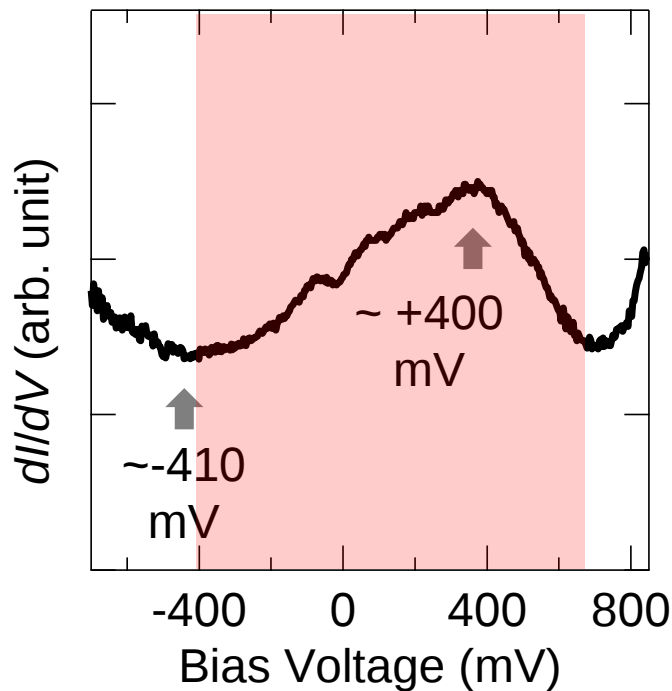
Bulk
cubic 3d¹ system



2D electronic state on $\text{SrVO}_3(001)$ surface

How can cubic perovskite (ABO_3) realize
2D state on surface/interface?

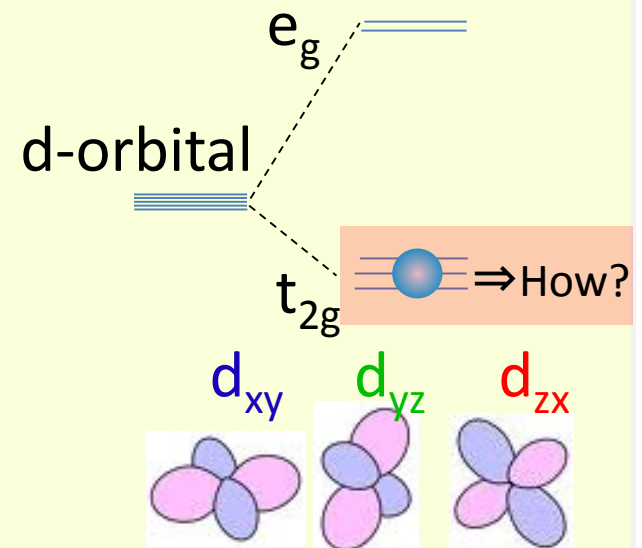
実験結果
 $\text{SrVO}_3(001)$ 表面のDOS



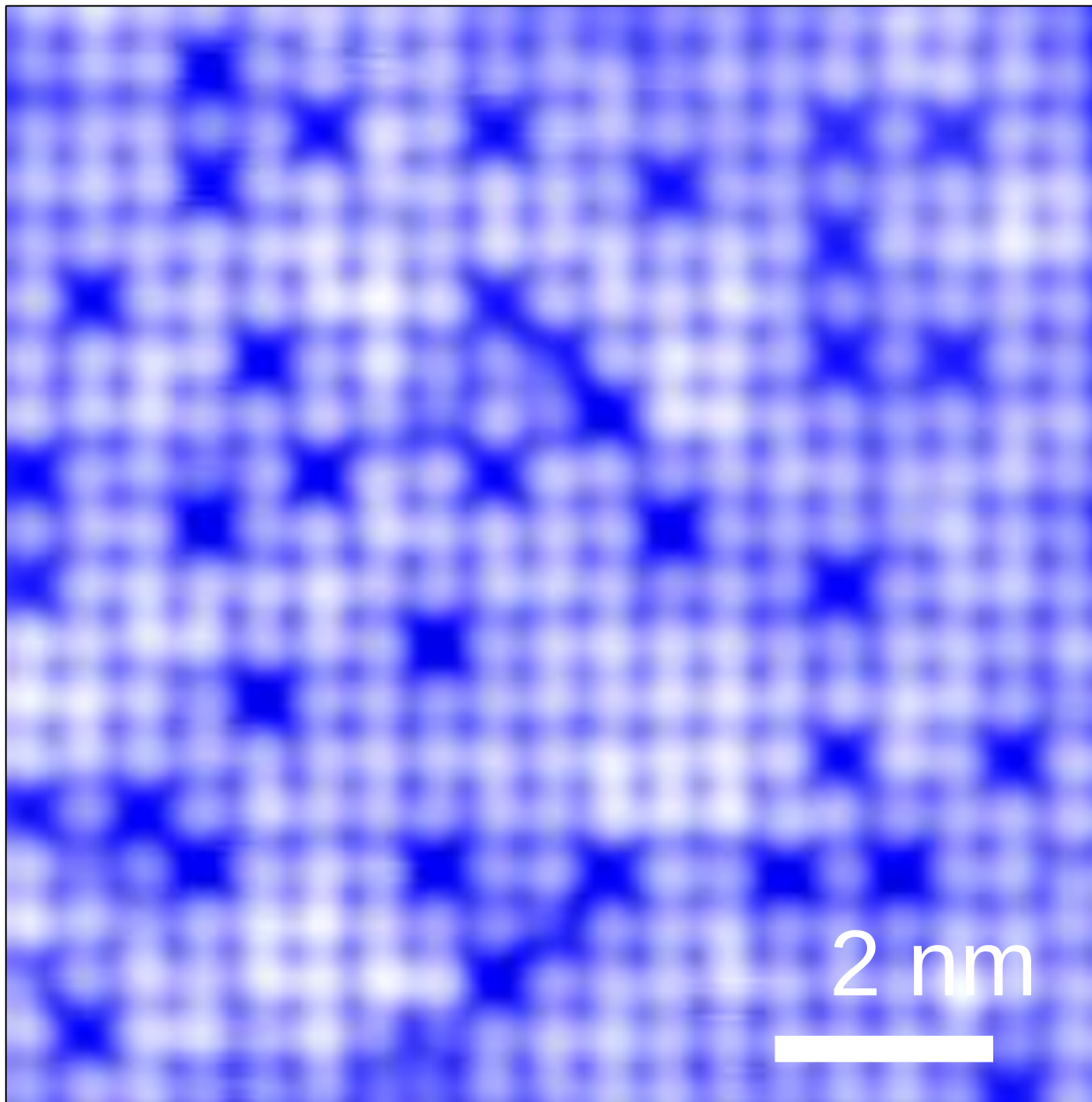
Key point:

どのように縮退が解け、
どのような電子状態が表面で実現するか？

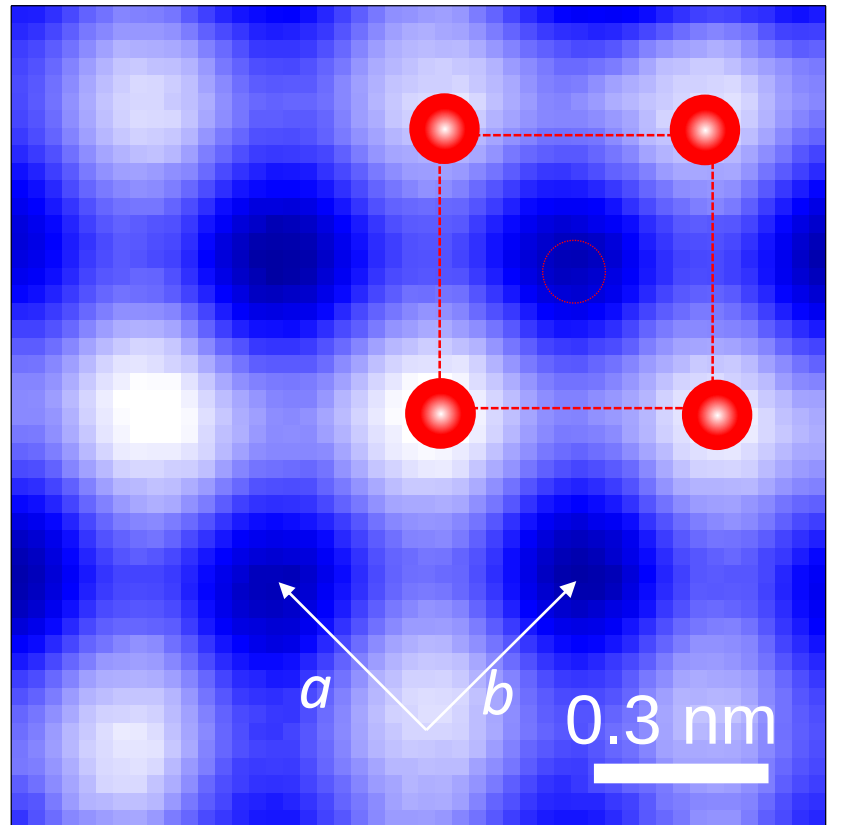
Bulk
cubic $3d^1$ system



Typical topographic image $\text{SrVO}_3(001)$



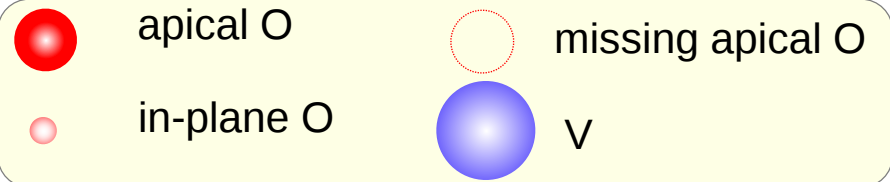
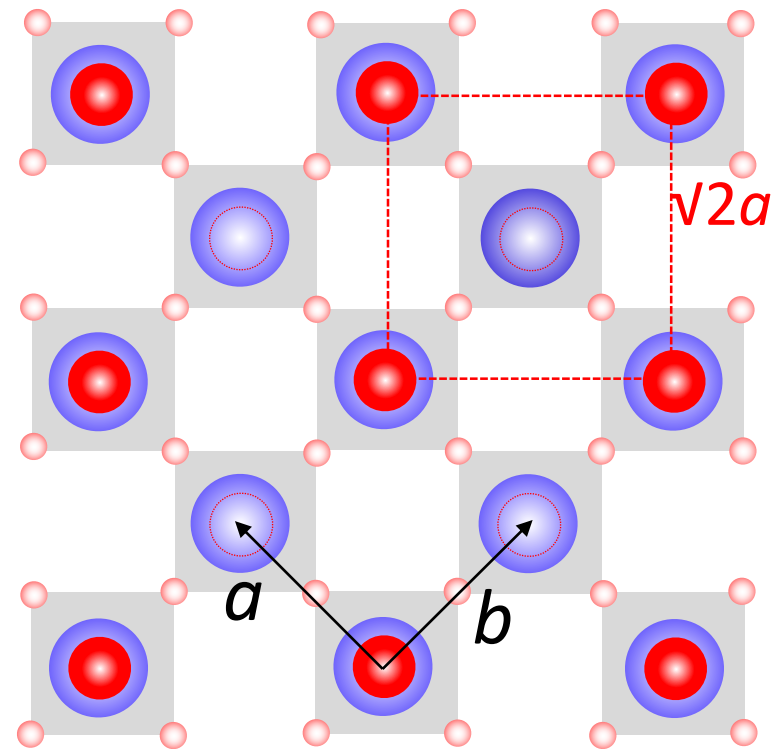
Apical oxygen reconstruction



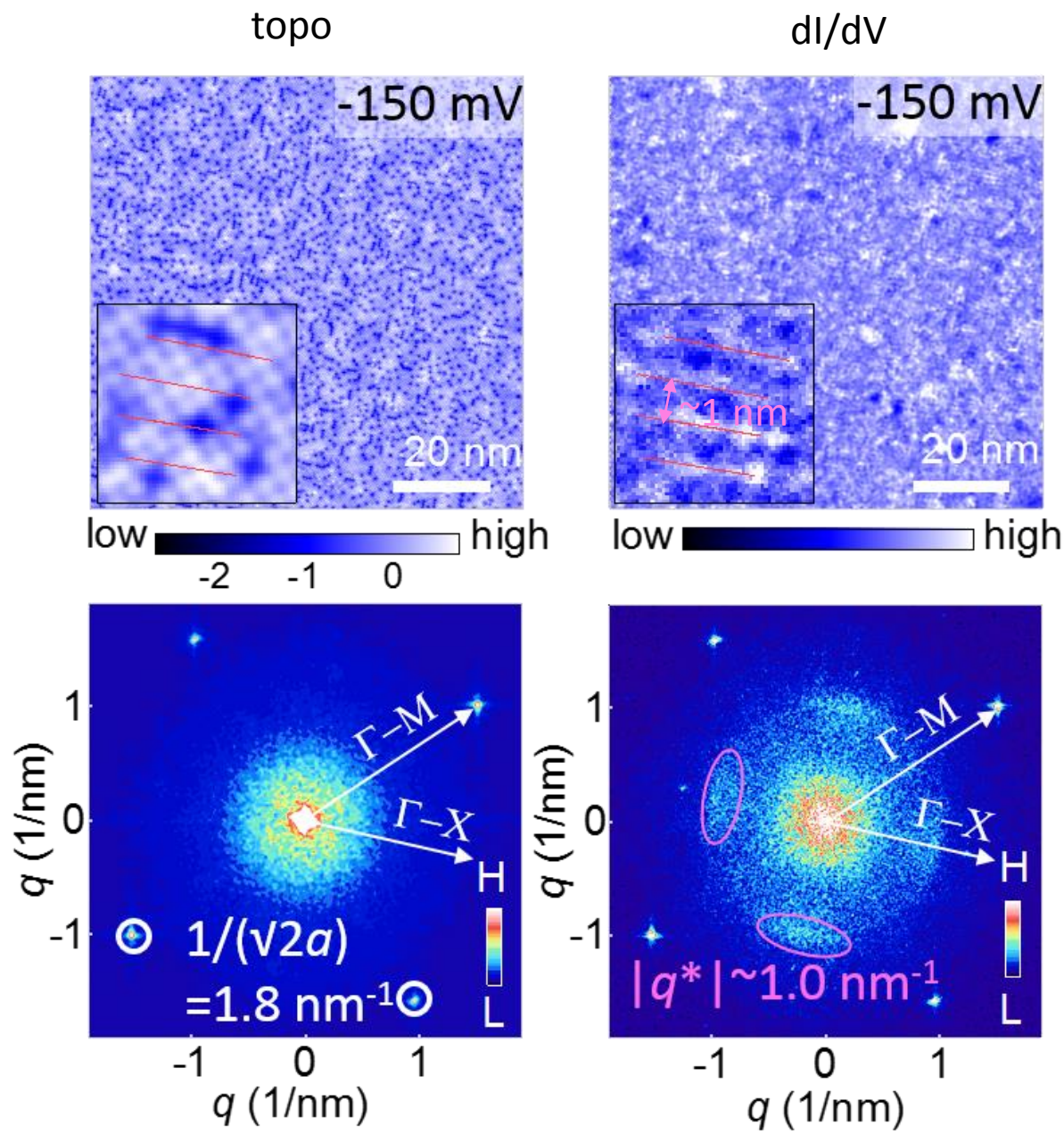
low



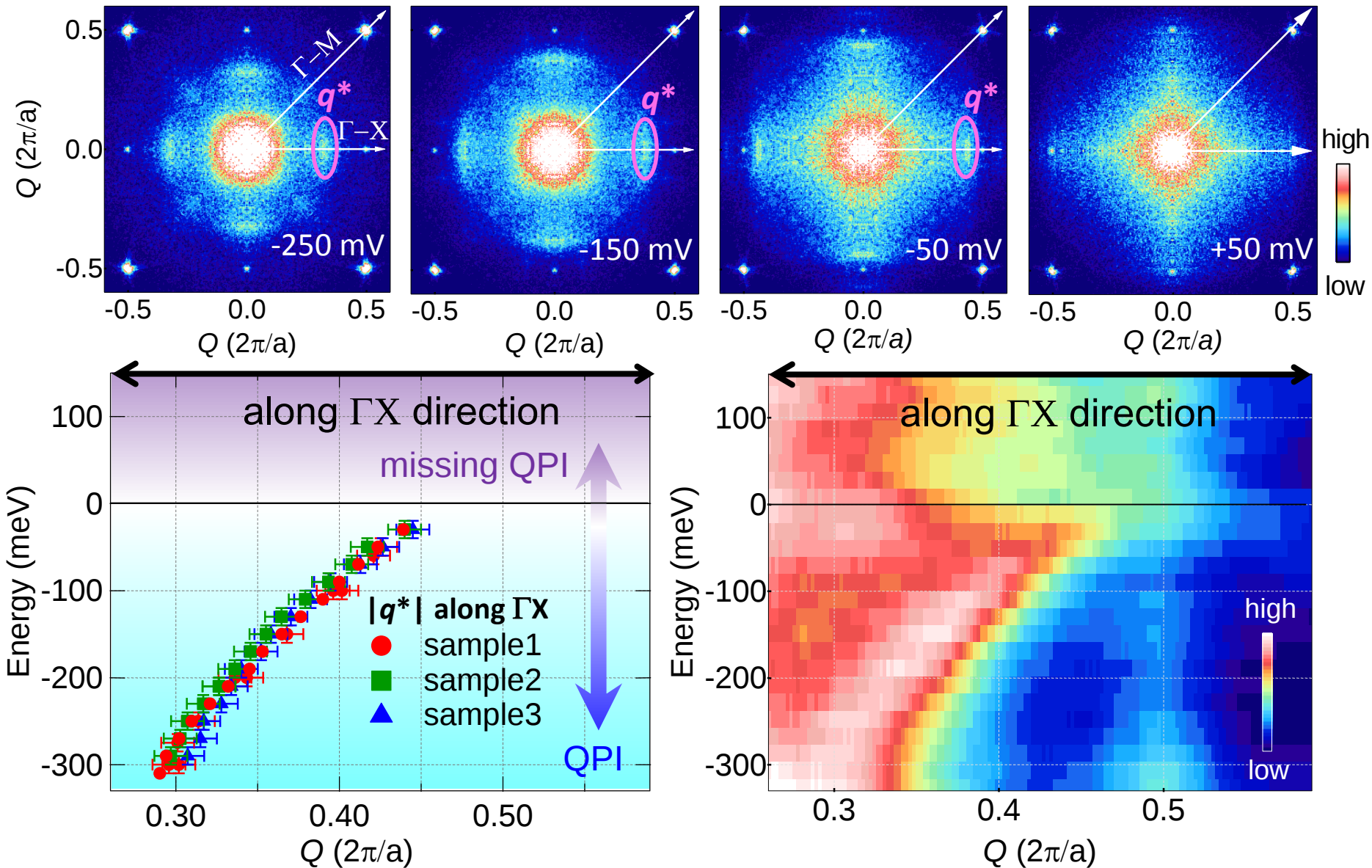
high



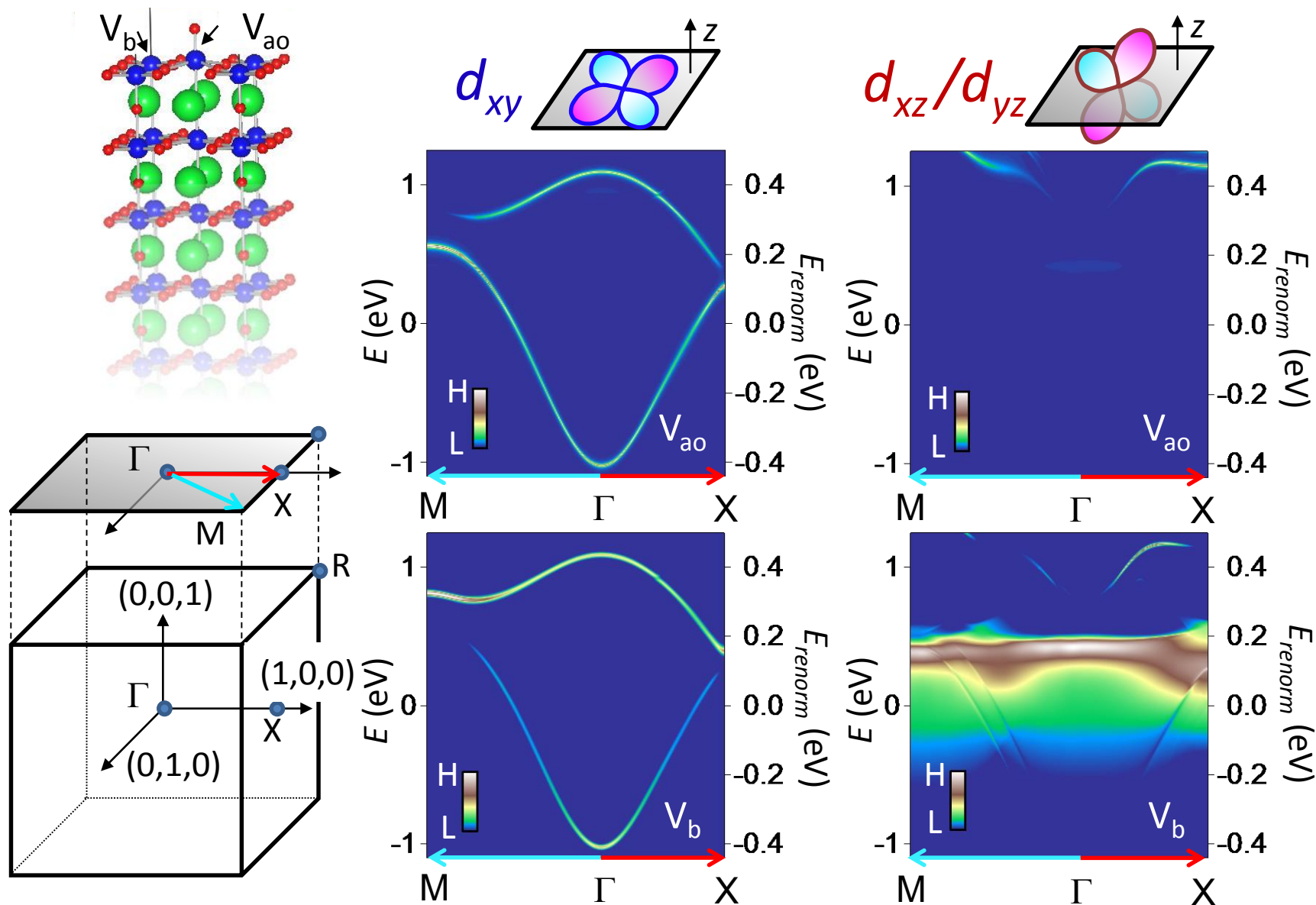
2D electronic state on $\text{SrVO}_3(001)$ surface



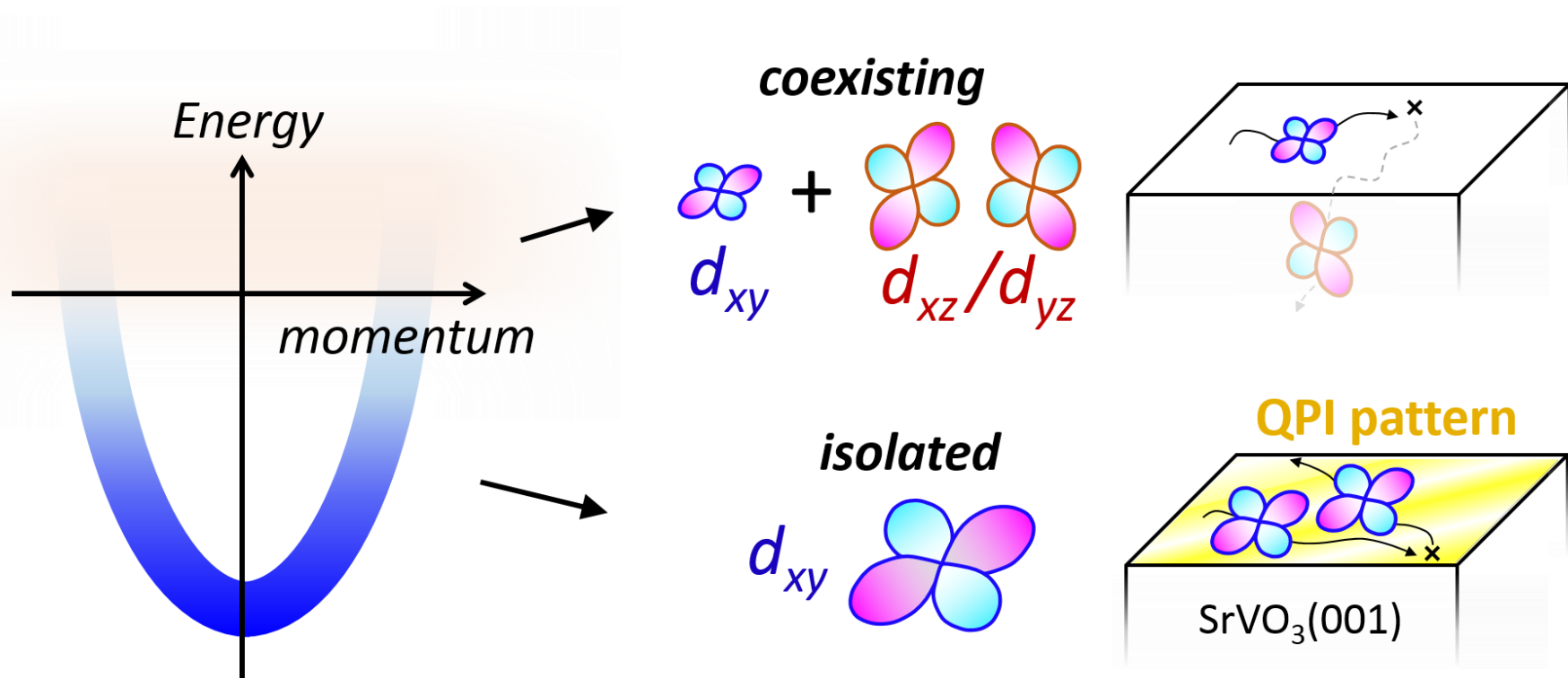
2D electronic state on $\text{SrVO}_3(001)$ surface



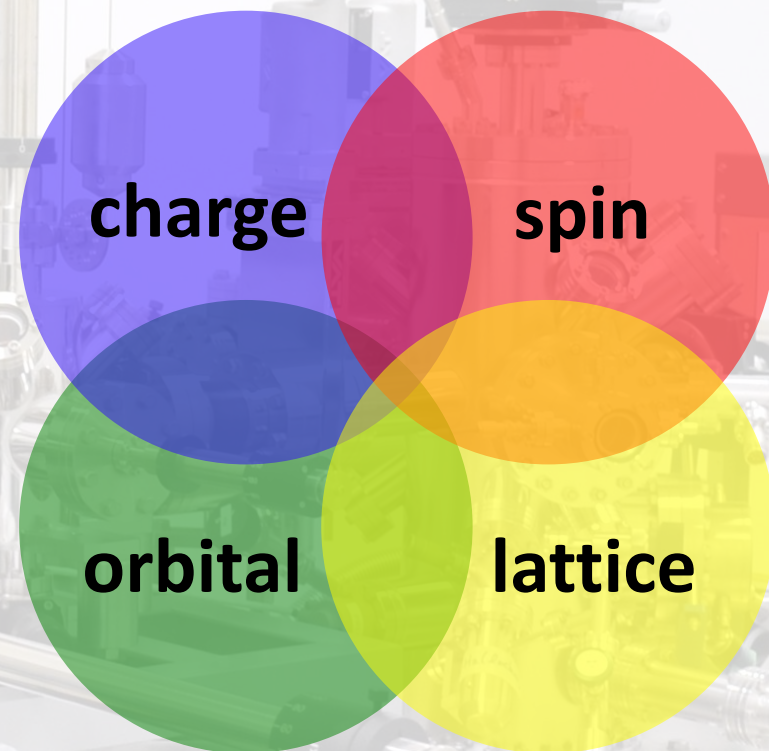
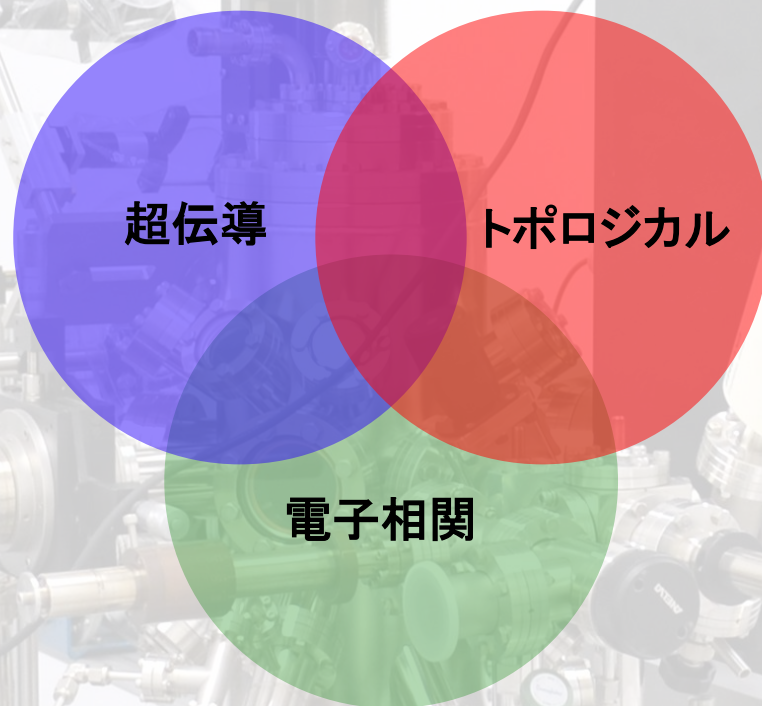
Mechanism for the emergence of QPI



Mechanism for the emergence of QPI



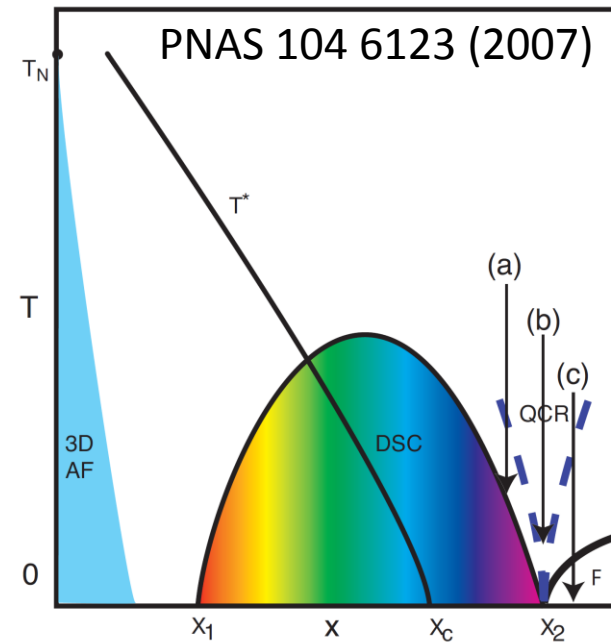
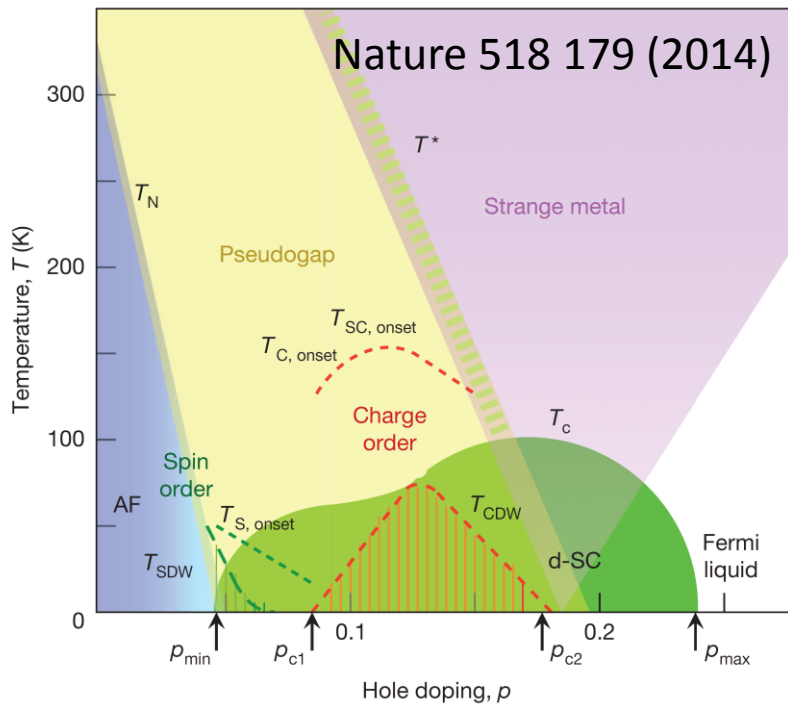
まとめと展望



特に、酸化物薄膜＋STM/STSは
未開拓の研究領域

例えば、(古くても)まだまだ面白い銅酸化物

薄膜 + STM/STSでアプローチする



e.g.

p-type : $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$

n-type: Nd_2CuO_4 ,

STMを用いた超伝導の研究

“Scanning tunneling spectroscopy of high-temperature superconductors”

Øystein Fischer, et al., *Rev. Mod. Phys.* **79**, 353 (2007)

SPMを用いた物性研究(全般)

D. A. Bonnell, et al. *Rev. Mod. Phys.* **84**, 1343 (2012)

M.L. Cummings, *et al.*, *Ultramicroscopy* **112**, 22 (2012)

酸化物薄膜関連 全般

Emergent phenomena at oxide interfaces

H. Y. Hwang, *et al.*, *Nature Materials* **11**, 103 (2012)

高温超伝導体 (最近のreview)

From quantum matter to high-temperature superconductivity in copper oxides

B. Keimer, et al., *Nature* **518** 179 (2014)

トポロジカル絶縁体

“The birth of topological insulators”

Joel E. Moore, *Nature* **464** 194 (2010)

Z. Hasan, C. L. Kane, *Rev. of Modern physics.*, **82** 3045 (2010)

Yoichi Ando, Liang Fu, *Annual Review of Condensed Matter Physics* **6** 361 (2015)