

強相関電子を2次元空間に閉じ込めることに成功

—新たな高温超伝導物質の実現や、電子素子作りに道を拓く—

東京大学大学院工学系研究科
組頭 広志 准教授*、尾嶋 正治 教授

*現所属: 高エネルギー加速器研究機構(KEK)
物質構造科学研究所・教授

“Metallic Quantum Well States in Artificial Structures of Strongly Correlated Oxide”

(日本語名: 強相関酸化物人工構造の金属量子井戸状態)

吉松公平、堀場弘司、組頭広志、吉田鉄平、藤森淳、尾嶋正治

米国科学雑誌「サイエンス」

解禁時間: 平成23年7月15日(金)午前3時00分
(U.S. Eastern Time): 14日(木)午後2時





高温超伝導体の結晶構造

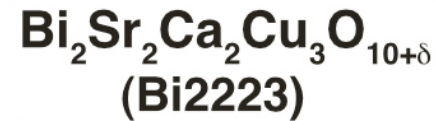
伝導層の数

一枚

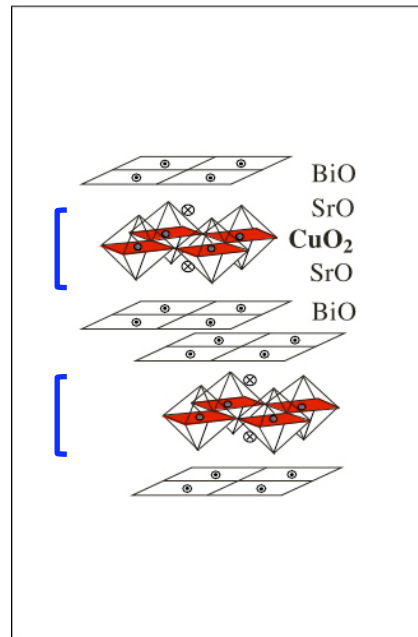
二枚

三枚

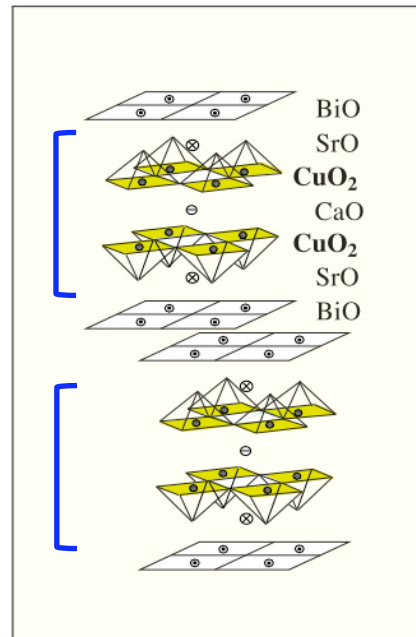
m 枚



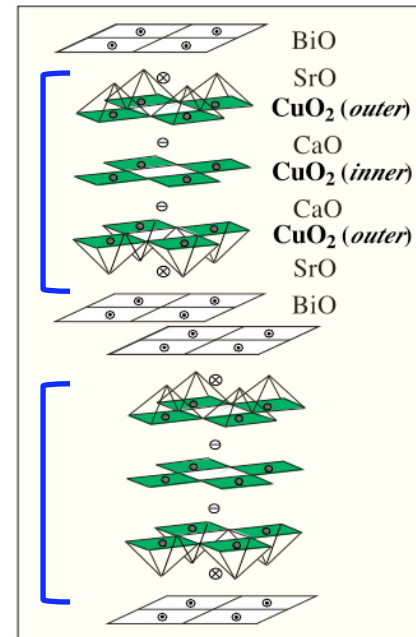
絶縁層
伝導層
絶縁層
伝導層
絶縁層



$T_c^{\text{max}} = -235 \text{ C}^\circ$



$T_c^{\text{max}} = -178 \text{ C}^\circ$



$T_c^{\text{max}} = -163 \text{ C}^\circ$

合成できていない

$T_c^{\text{max}} =$
室温?

伝導層が増えるに伴って超伝導体になる温度も上昇する。

ただ、自然界の結晶では3枚が最大である。

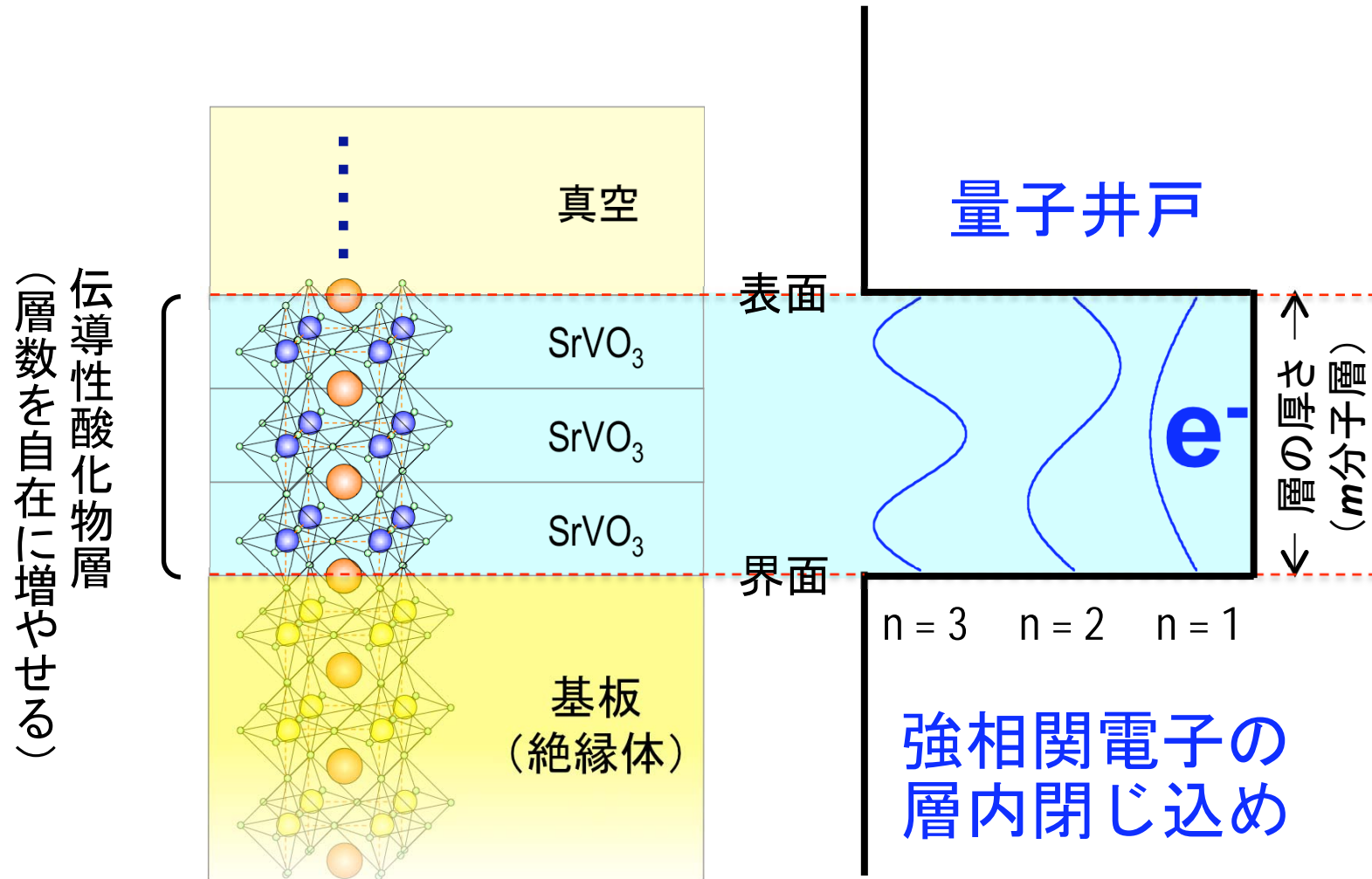


人工構造による制御



作製した量子井戸構造の特長

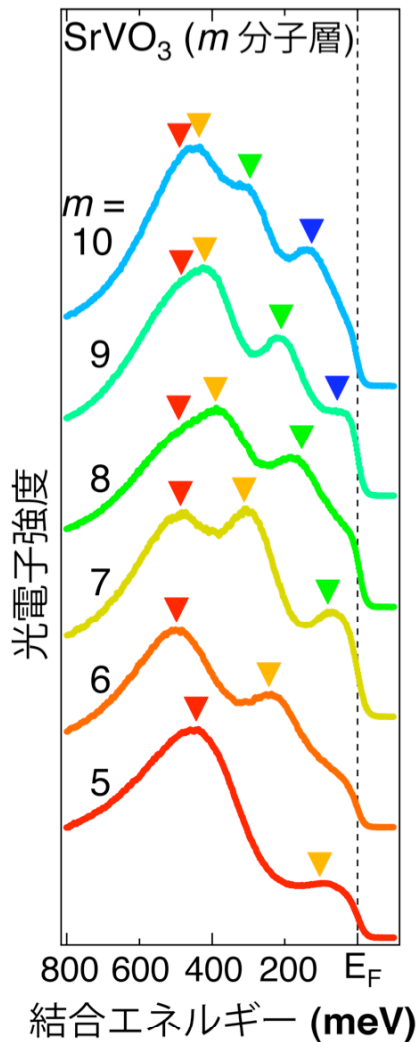
3/23



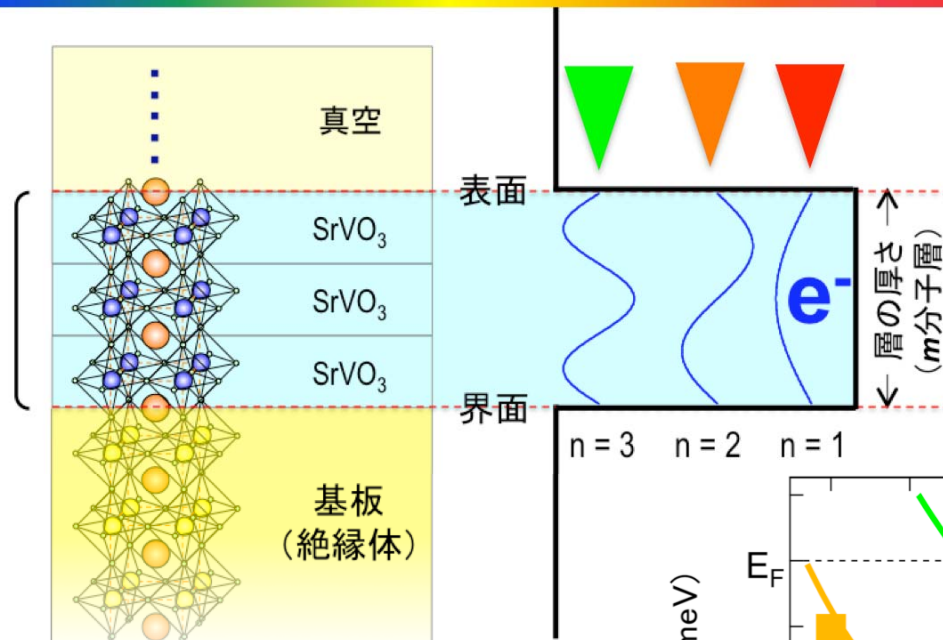
高温超伝導などの源である電子同士が互いに強く影響し合う性質をもった「強相関電子」を2次元空間(層)に人工的に閉じ込める「量子井戸構造」を作製することに世界で初めて成功しました。



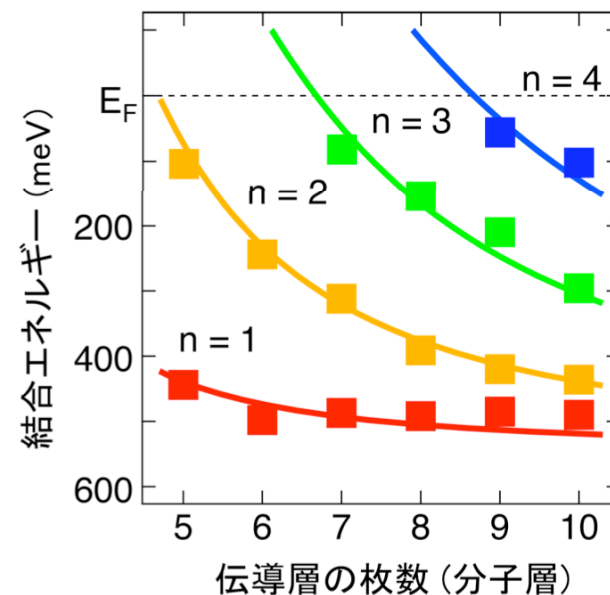
デジタル化した強相間電子の状態^{4/23}



(層数を自在に増やせる)
伝導性酸化物層



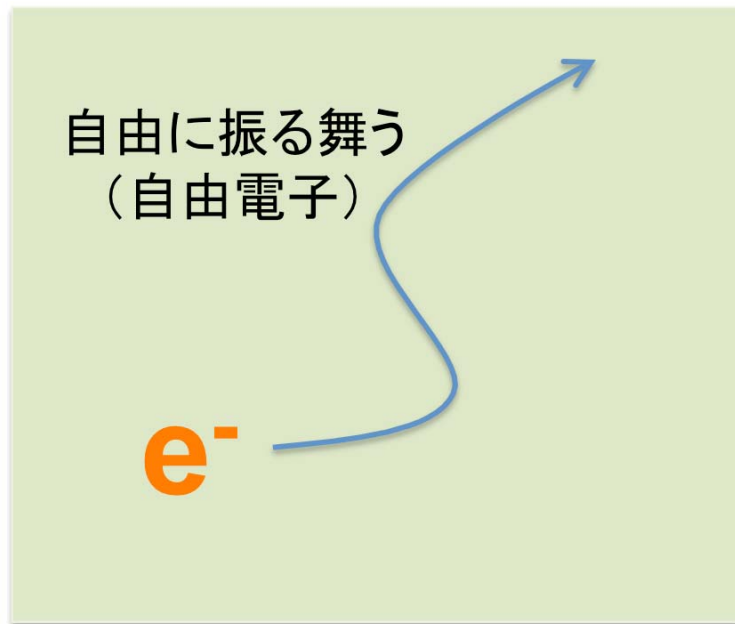
放射光を用いた測定で、閉じ込めの証拠であるデジタル化(量子化)された状態が観測された。



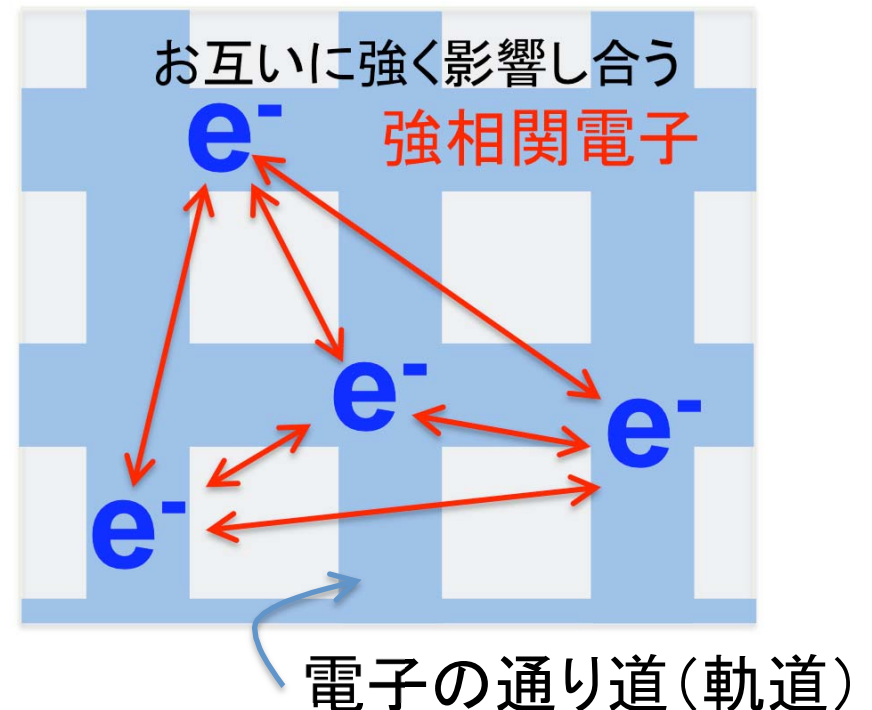
今回の成果によって、強相関電子の振る舞いを人工的にコントロールすることが可能となり、これまでの臨界温度を遥かにしのぐ高温超伝導体の作製はもちろん、人類の夢であった室温超伝導体の実現につながると期待されています。

通常の半導体や金属では、電子はほぼ自由に振る舞う。しかし、電子の密度が十分に高い場合、電子同士がお互いに強く作用し合い、結果として電子が集団としてかろうじて動くような状態が出現する。このような状態にある電子を強相関電子と呼ぶ。銅酸化物をベースとした高温超伝導体は強相関電子をもつ典型的な物質である。

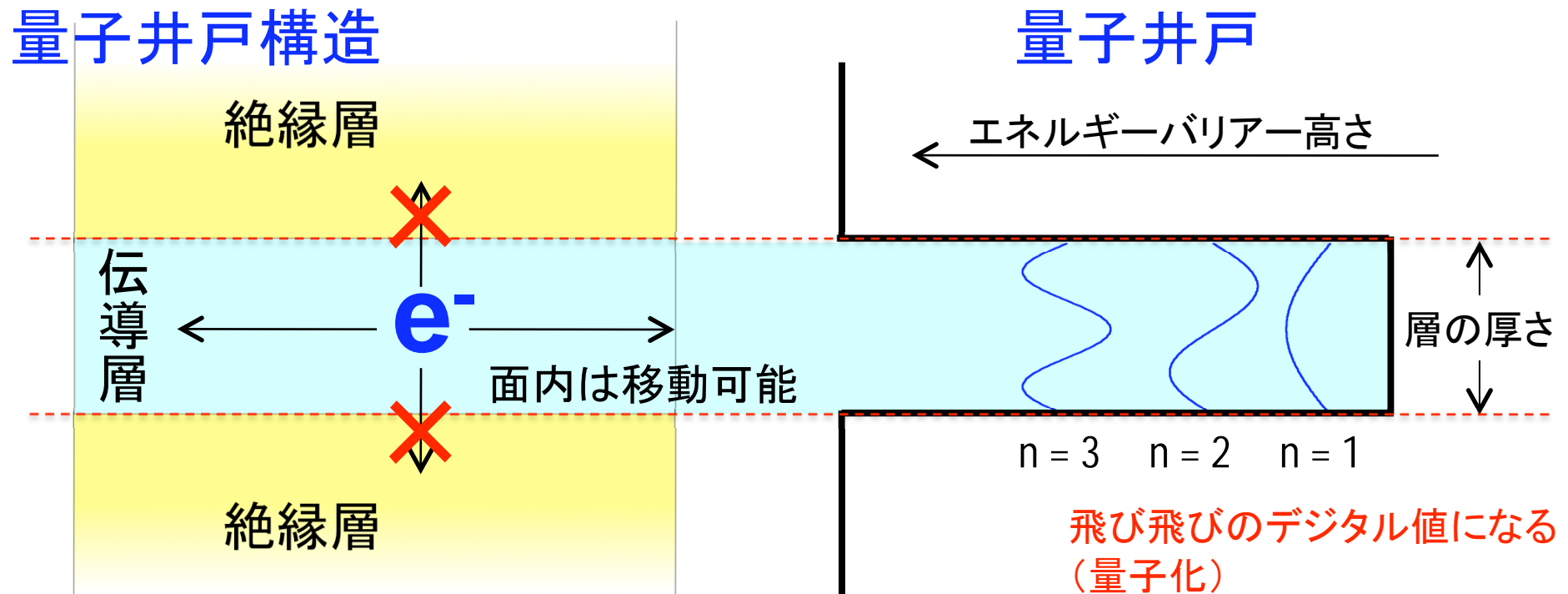
半導体や金属
(シリコンや金、銀など)



強相関物質
(高温超伝導体など)

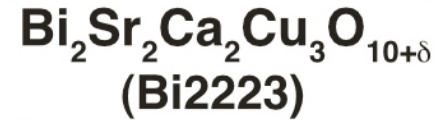
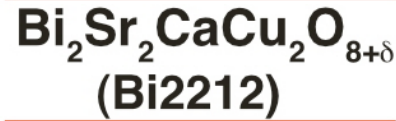


井戸のような形状をしたエネルギーバリアーにより、極めて薄い伝導層(2次元空間)の内部に電子を閉じ込める構造を量子井戸構造という。層に垂直な方向への電子の運動が制限されて飛び飛びの値を持つようになる。半導体デバイスではこの特長を生かすことで、電子を効率よく利用することができ、高性能の半導体レーザーやトランジスタが実現されている。

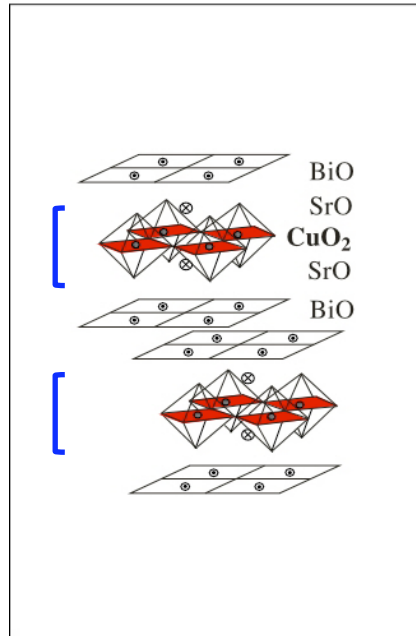


電子は層内に2次元的に閉じ込められる。

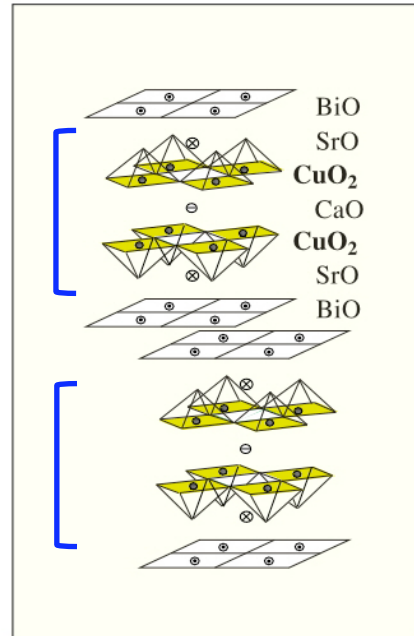
伝導層の数 一枚 二枚 三枚 m 枚



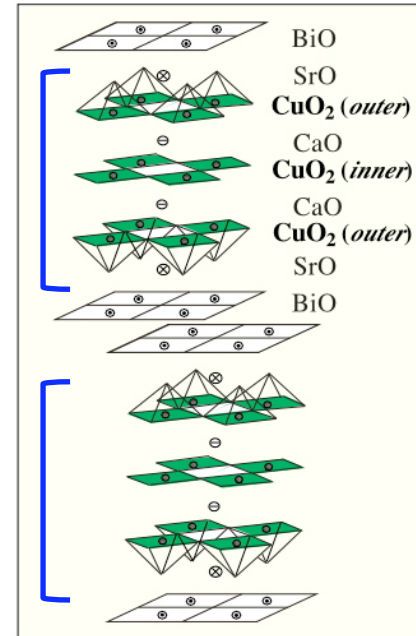
絶縁層
伝導層
絶縁層
伝導層
絶縁層



$T_c^{\max} = -235 \text{ C}^\circ$



$T_c^{\max} = -178 \text{ C}^\circ$

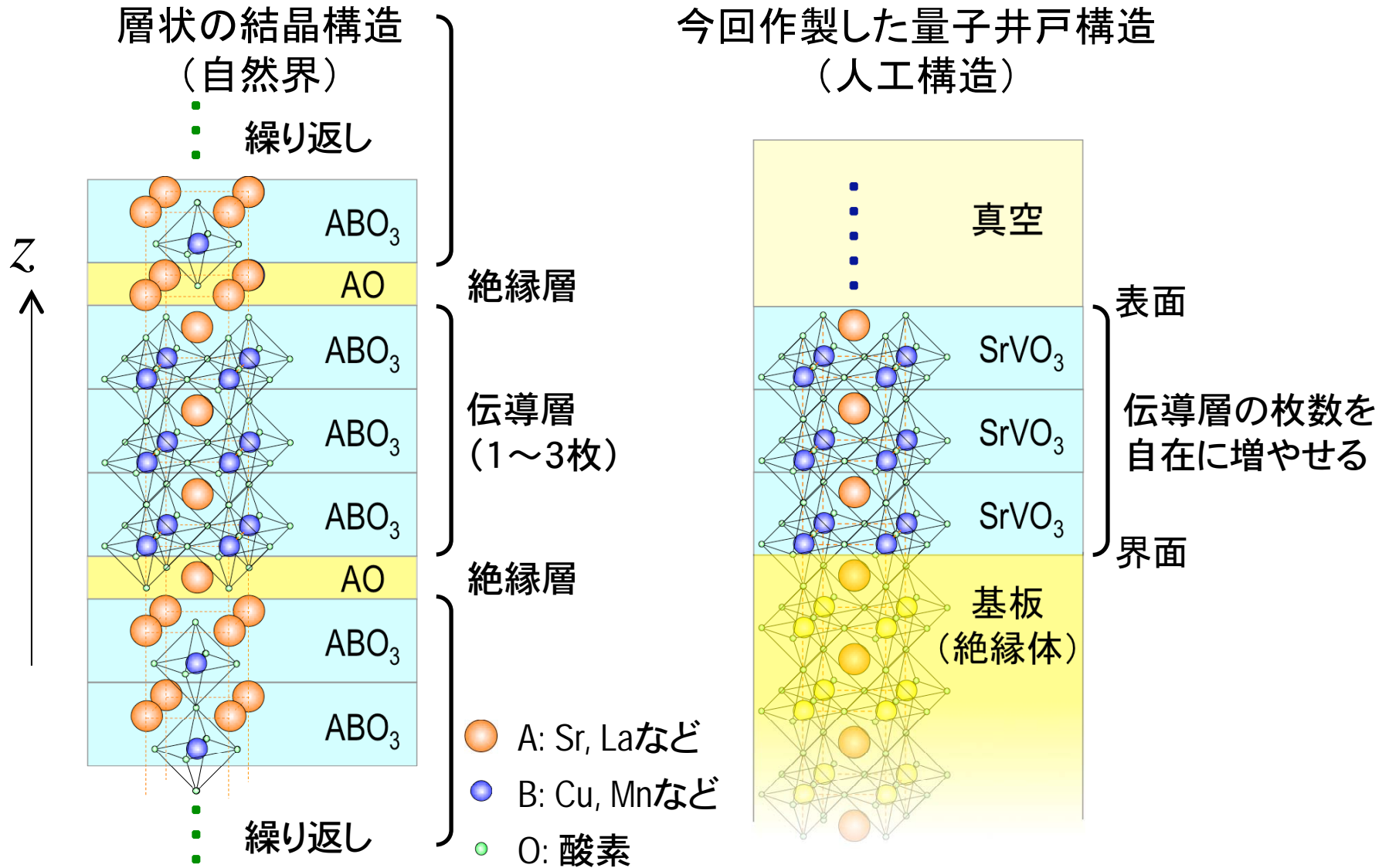


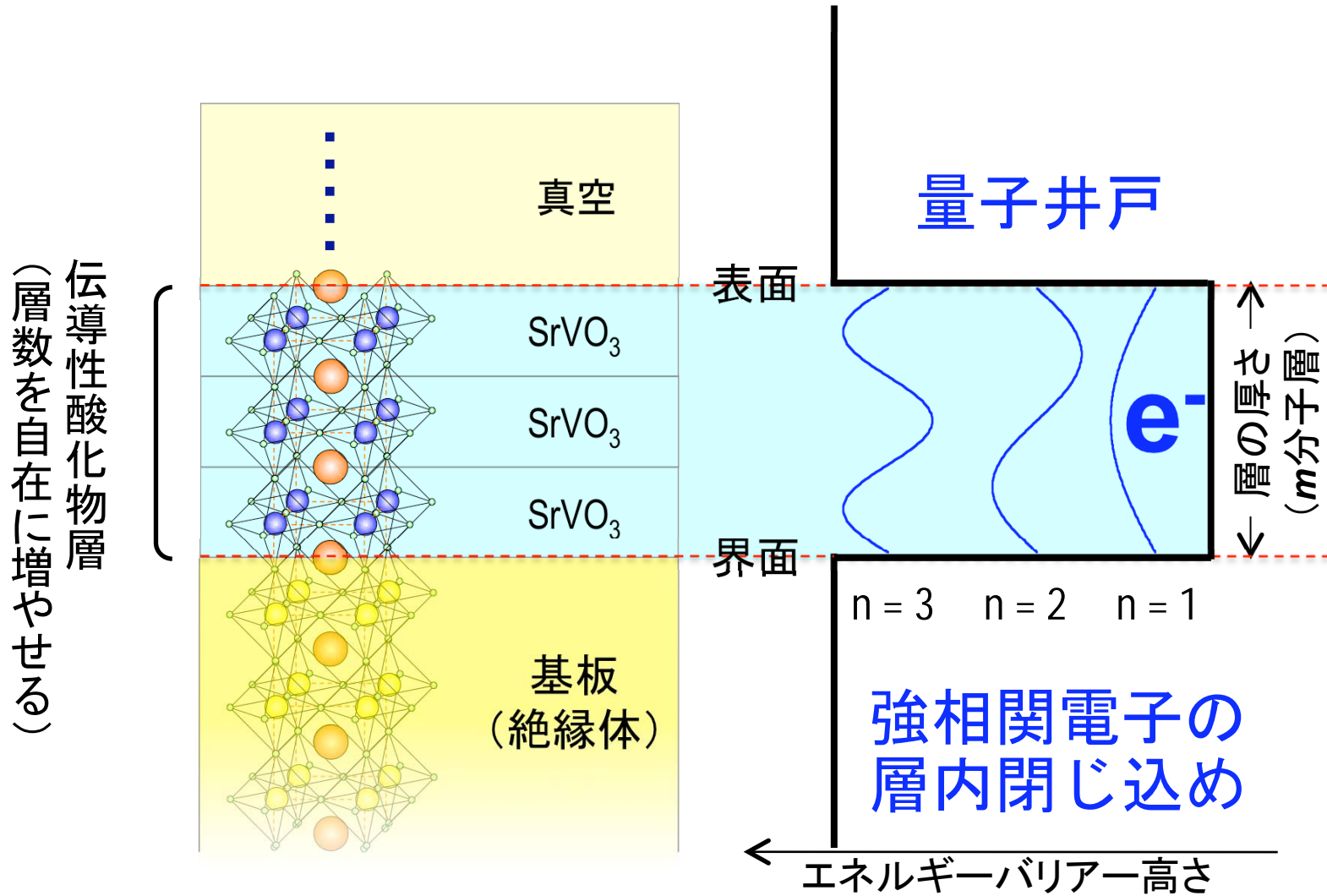
$T_c^{\max} = -163 \text{ C}^\circ$

合成できていない

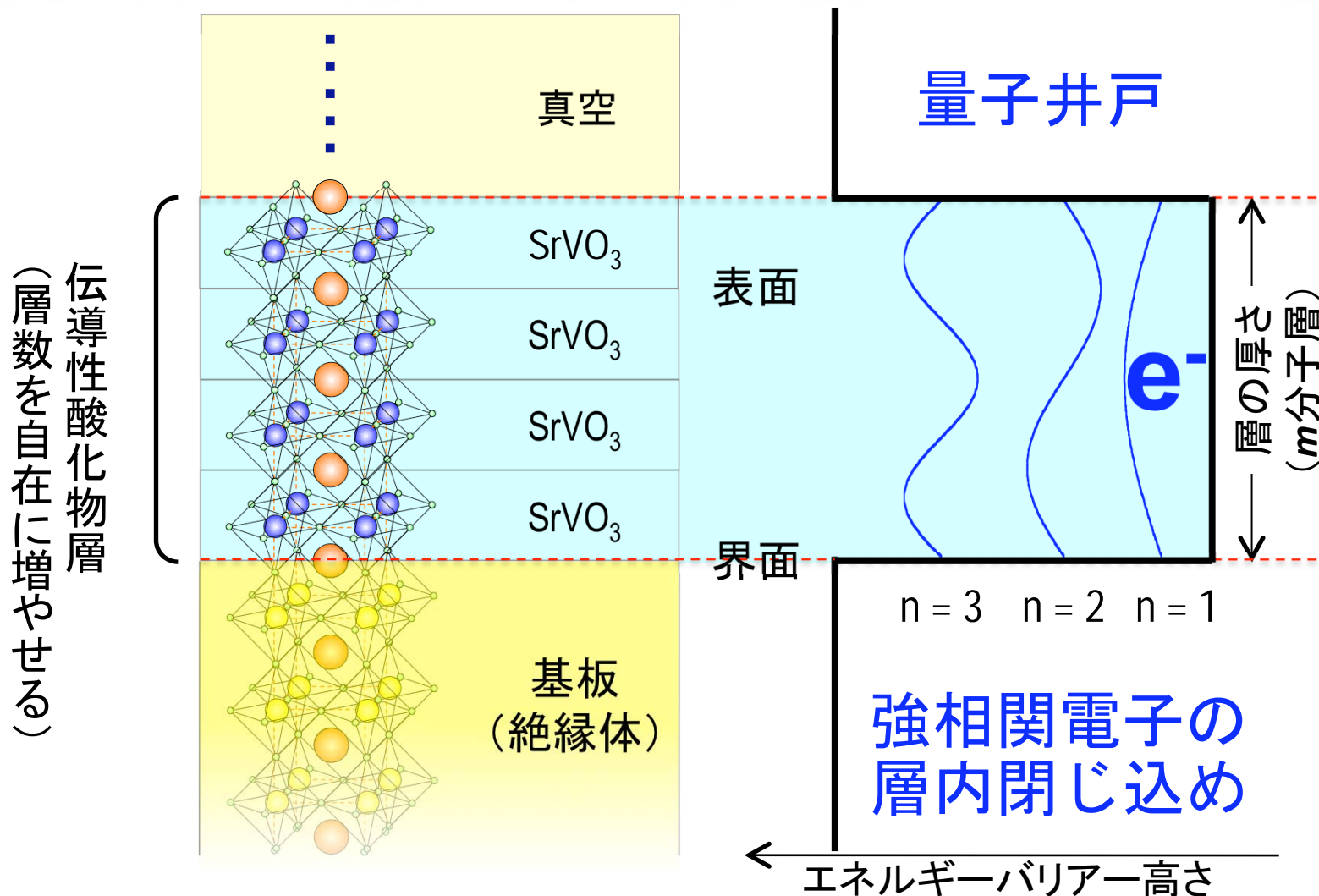
$T_c^{\max} =$
室温?

伝導層が増えるに伴って超伝導体になる温度も上昇する。
ただ、自然界の結晶では3枚が最大である。

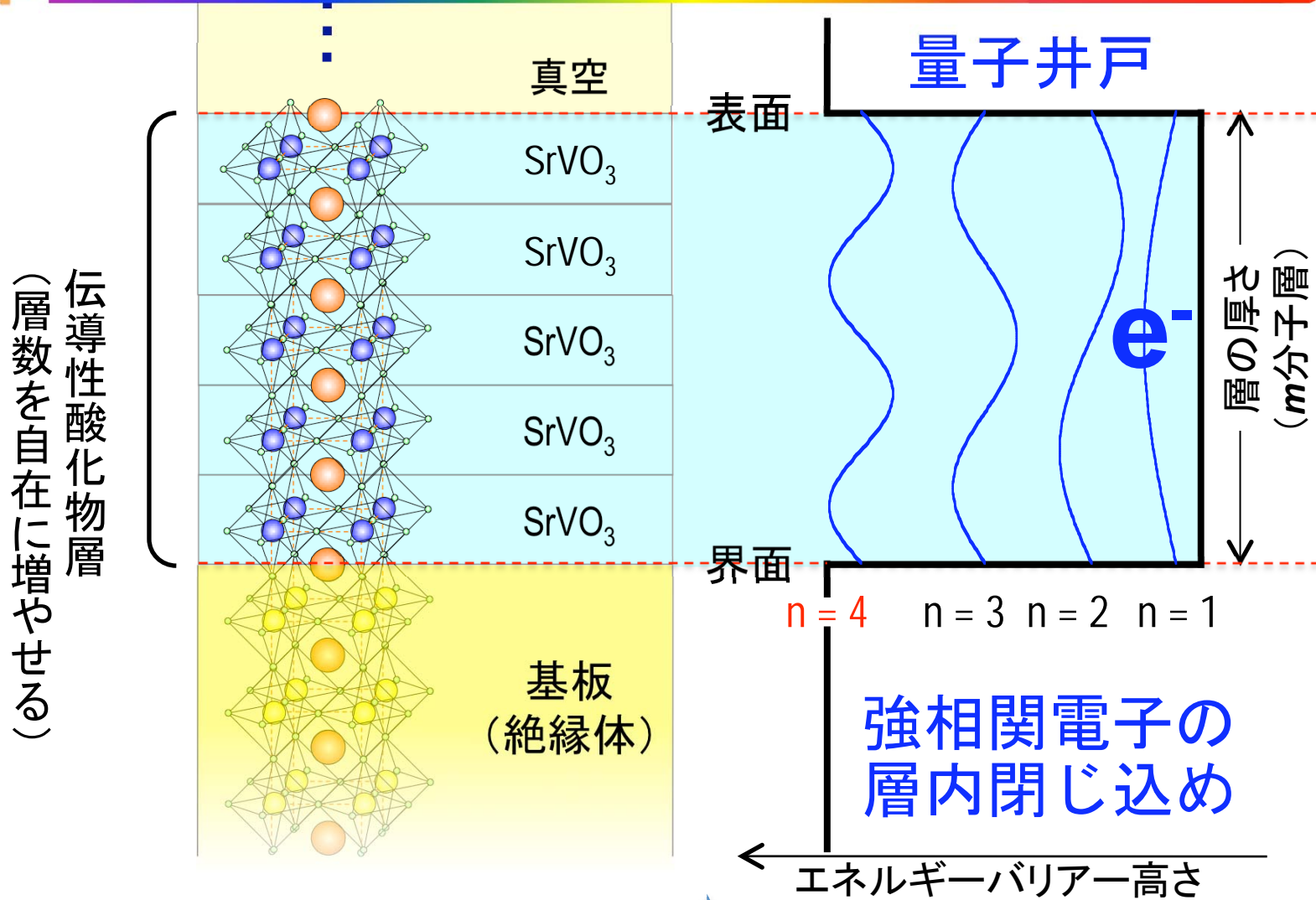




伝導層の厚さ(量子井戸の幅)を自在にコントロール可能



伝導層の厚さ(量子井戸の幅)を自在にコントロール可能



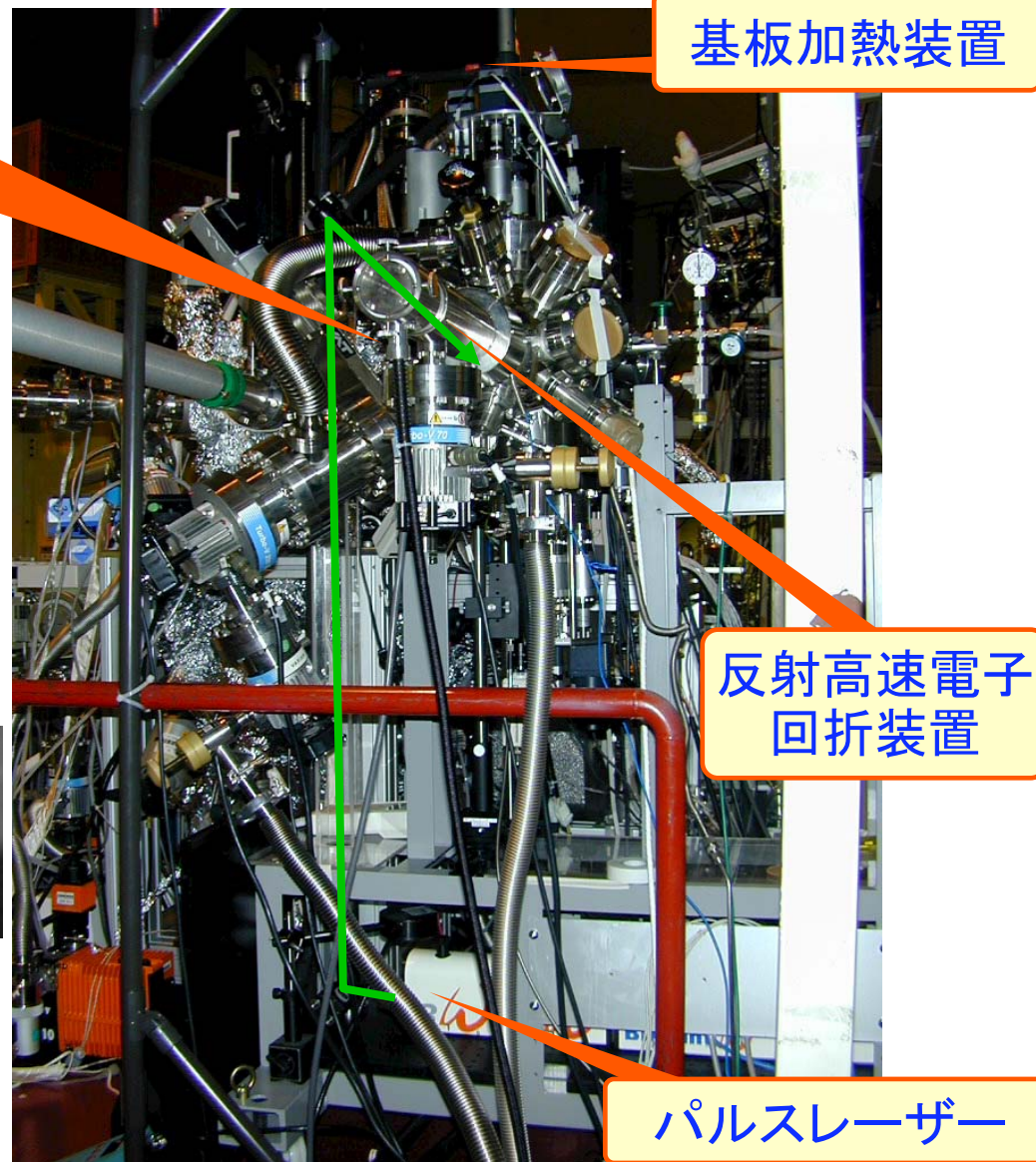
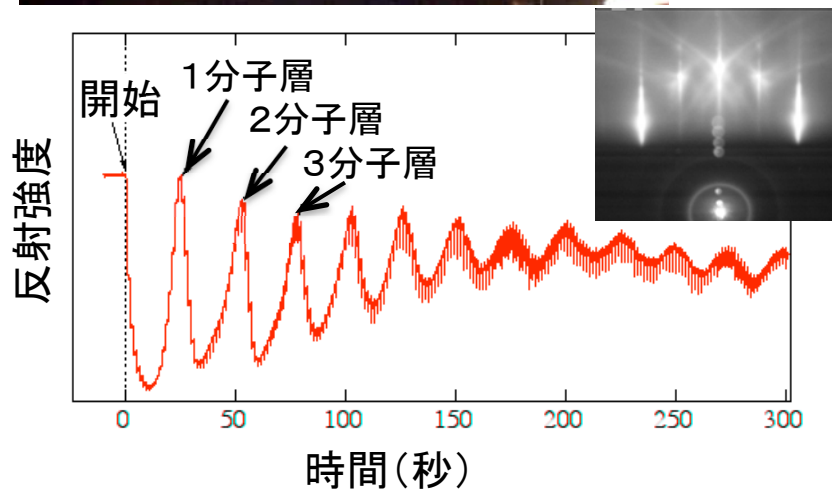
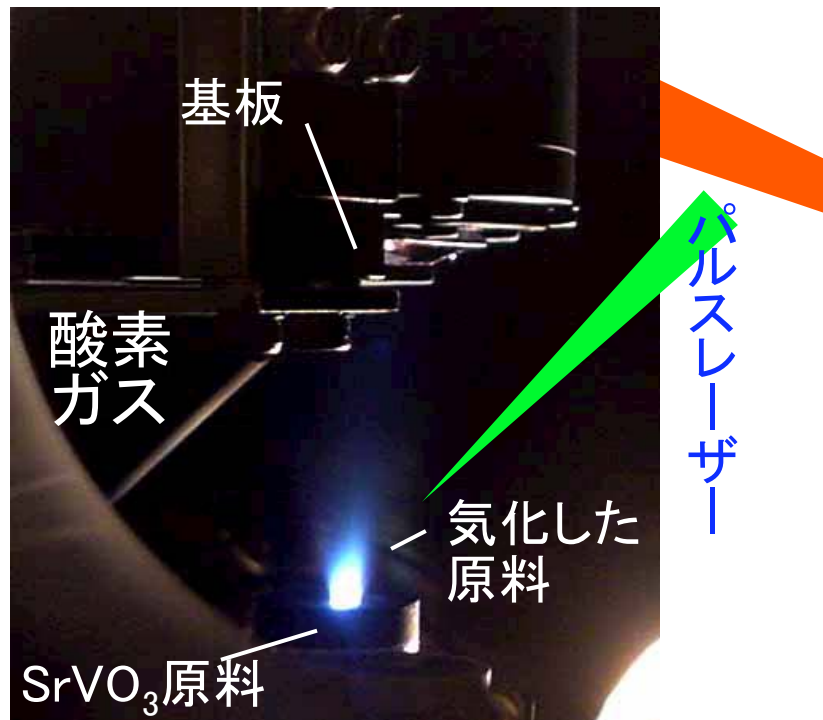
伝導層の厚さ(量子井戸の幅)を自在にコントロール可能



デジタル化(量子化)した強相関電子状態の制御が可能

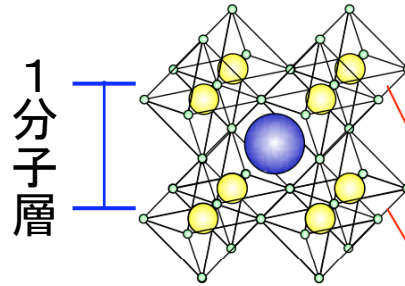


作る技術：レーザー分子線エピタキシー装置 ^{12/23}

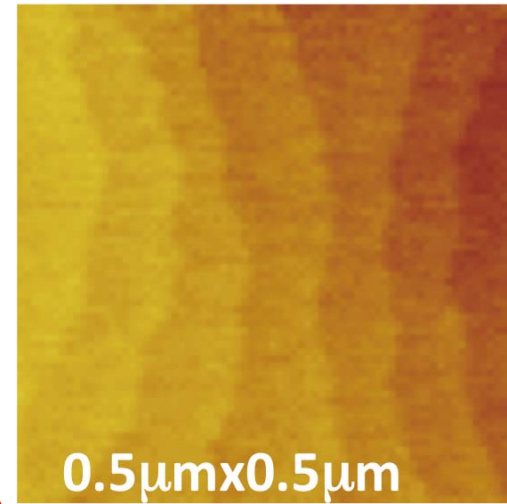


量子井戸への閉じ込めに必要な条件

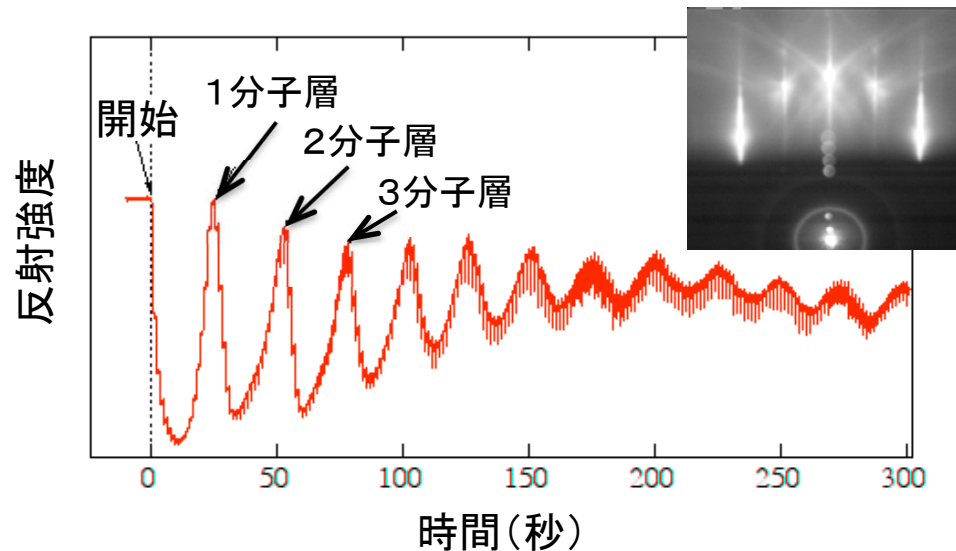
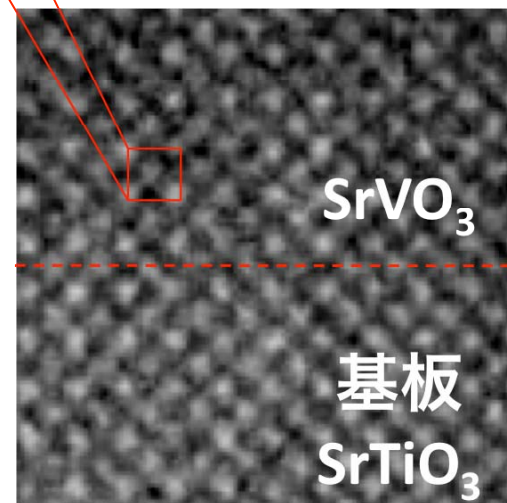
- ✓ 原子レベルで平坦な表面
(原子間力顕微鏡)
- ✓ 化学的に急峻な界面
(電子顕微鏡)
- ✓ 正確な厚さコントロール
(反射高速電子線回折)



原子間力顕微鏡像



電子顕微鏡像



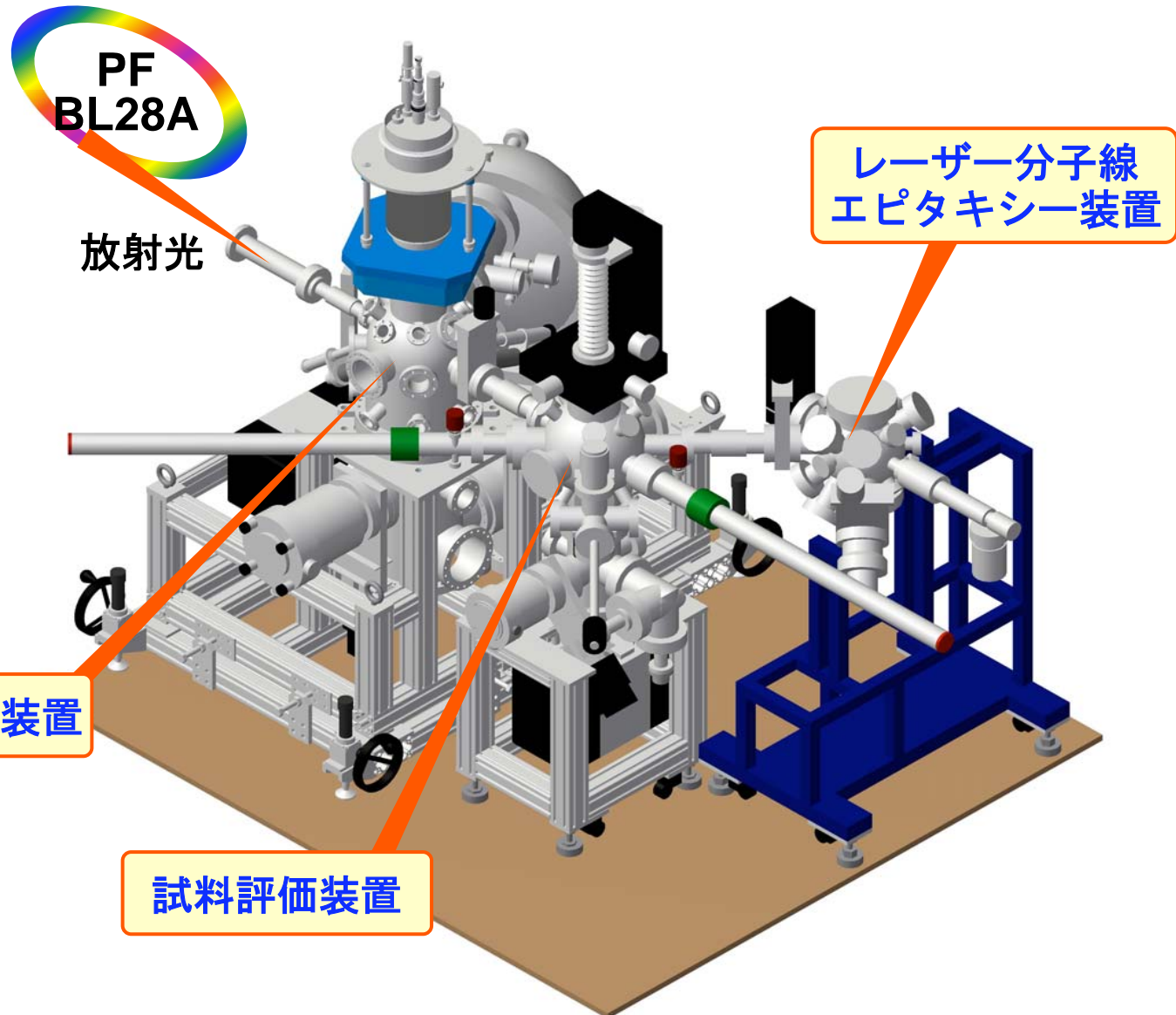


見る技術：レーザー分子線エピタキシー& 光電子分光複合装置

放射光施設



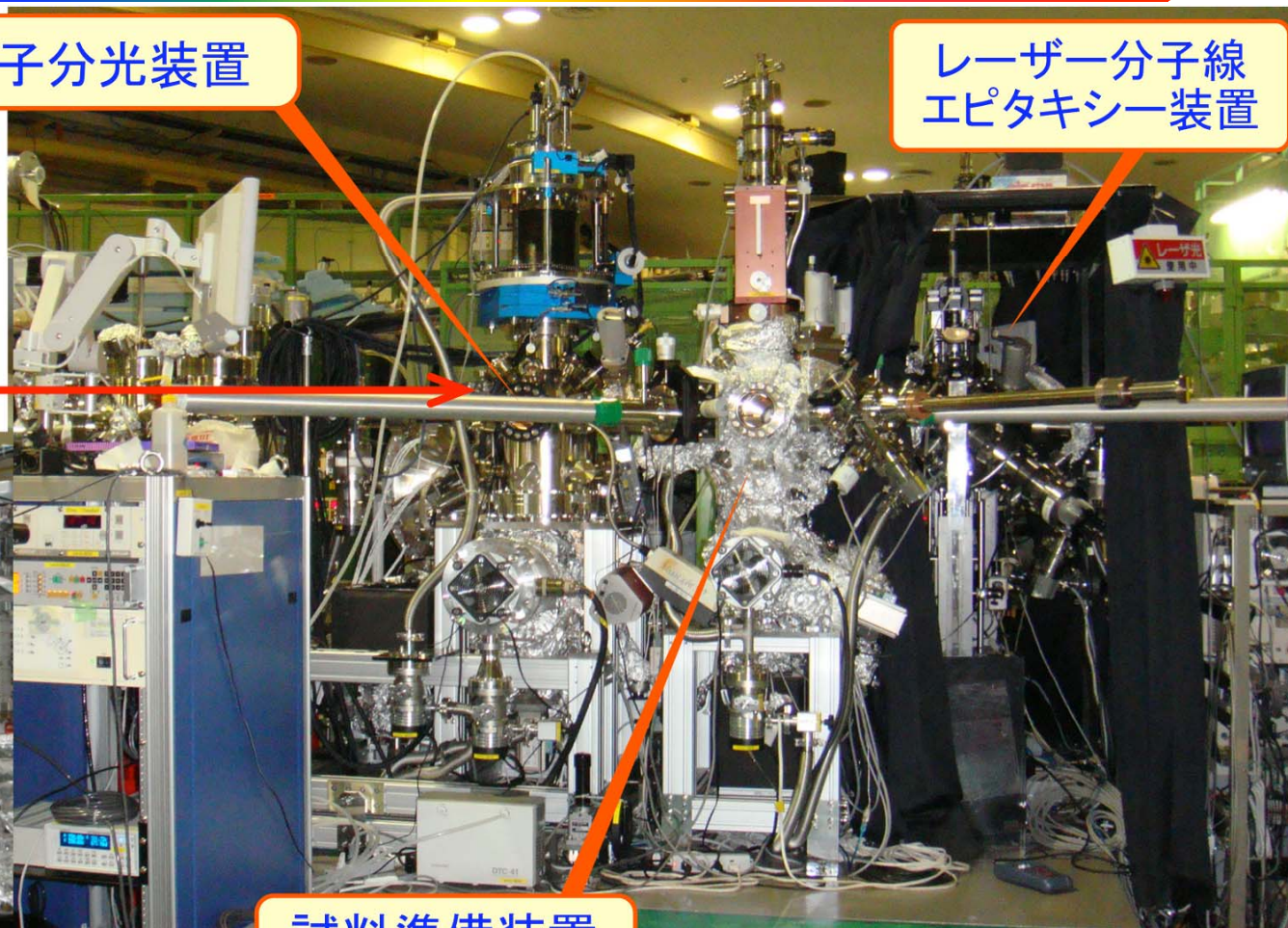
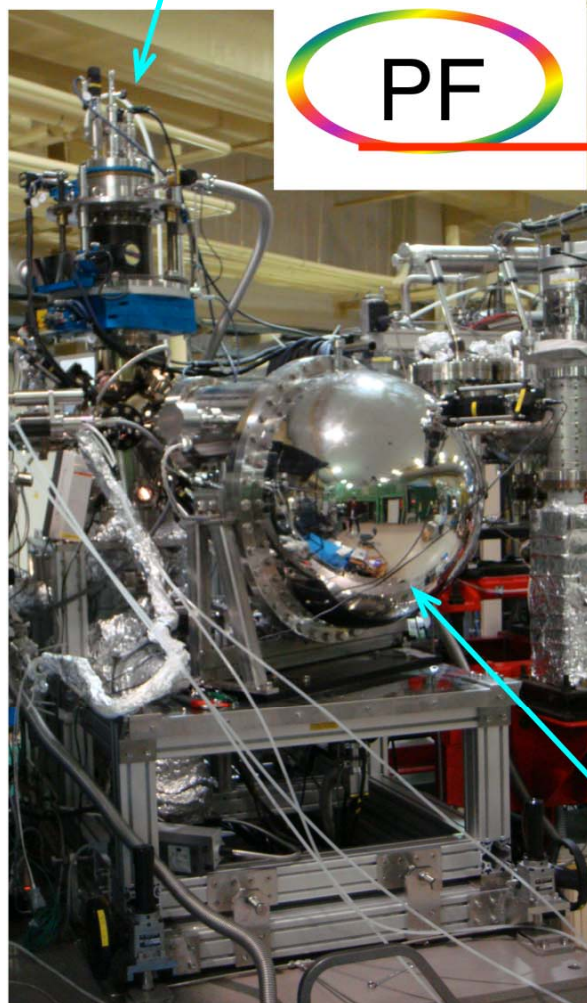
Photon Factory, KEK
つくば大穂1-1



光電子分光装置

レーザー分子線
エピタキシー装置

試料ステージ

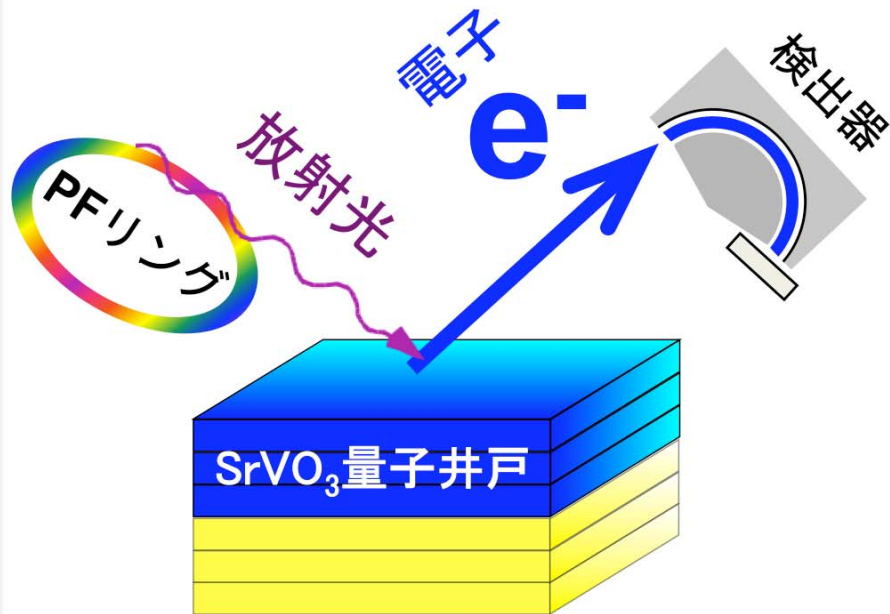


試料準備装置

光電子アナライザー

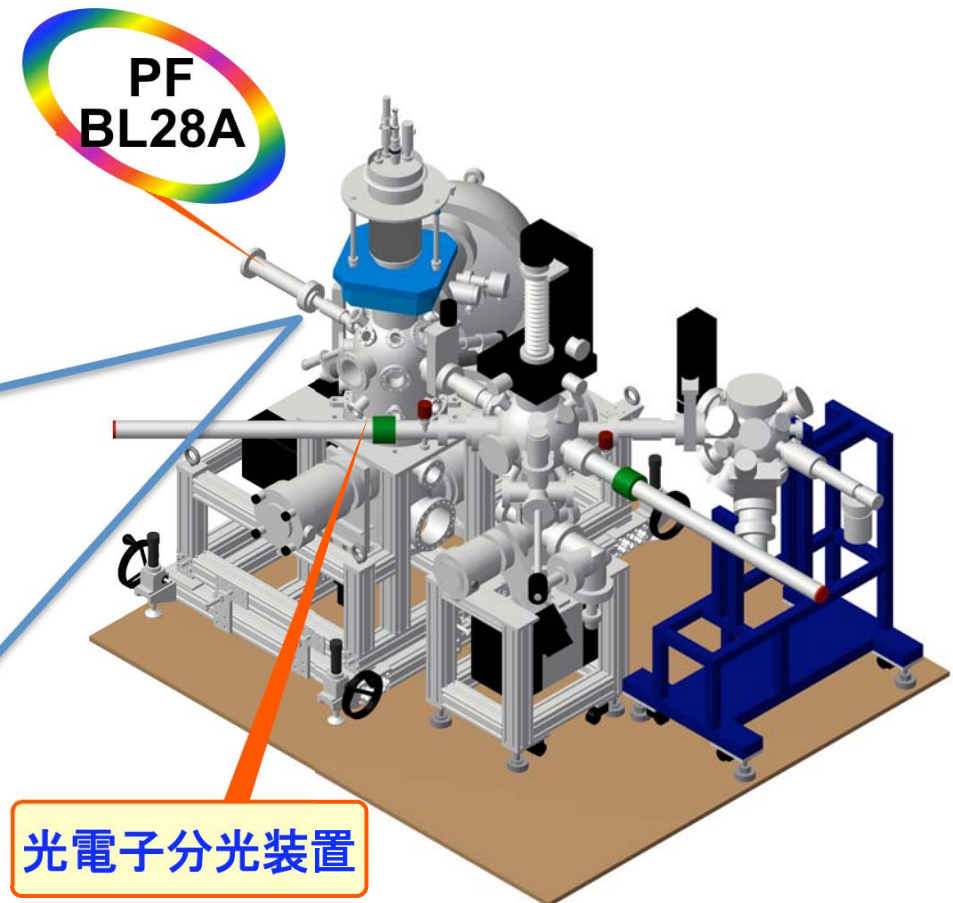
@Photon Factory, KEK

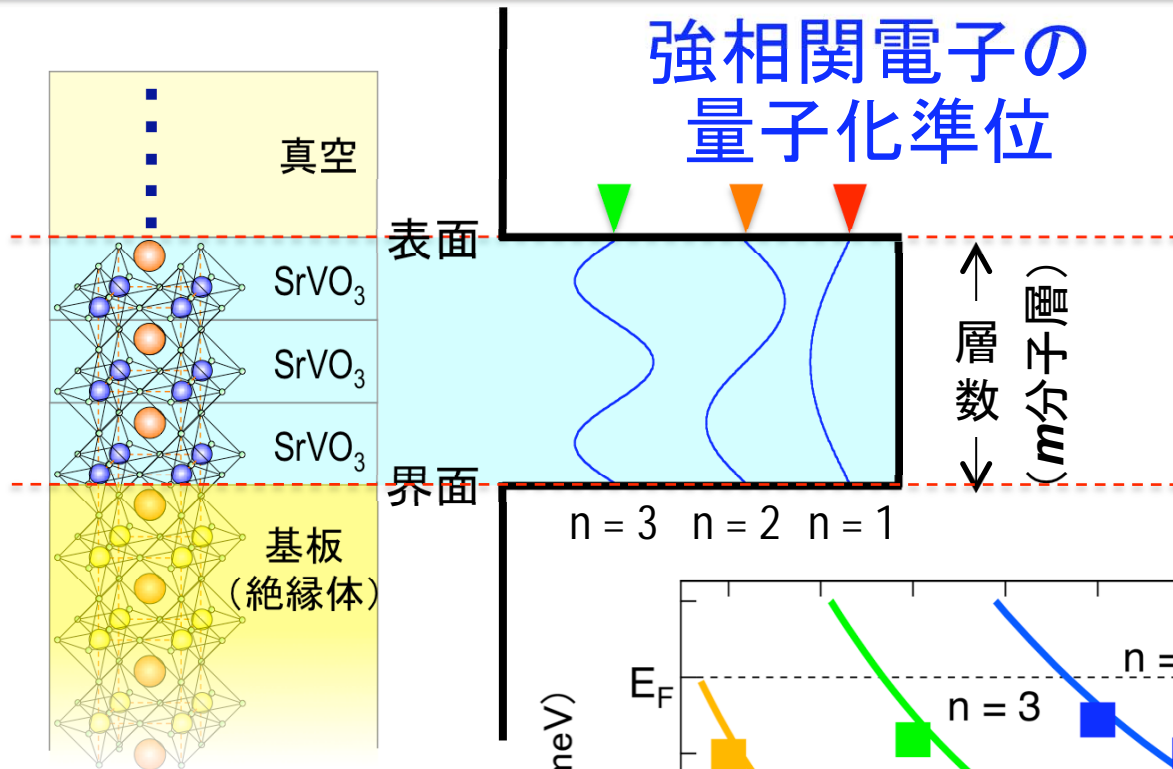
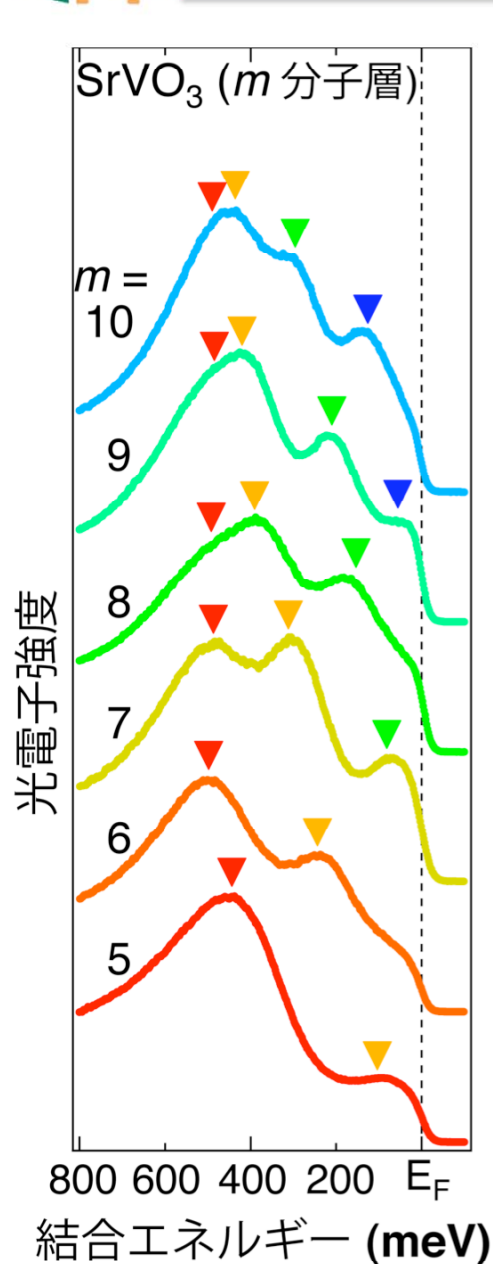
光電子分光による
量子井戸状態の観測



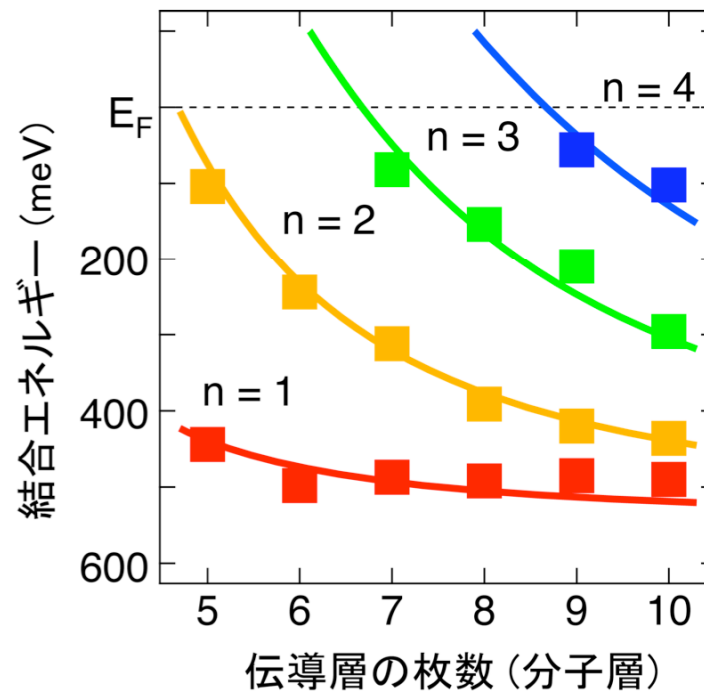
SrVO₃量子井戸に放射光を当てて、飛び出した電子を観測する。

レーザー分子線エピタキシー&
光電子分光複合装置

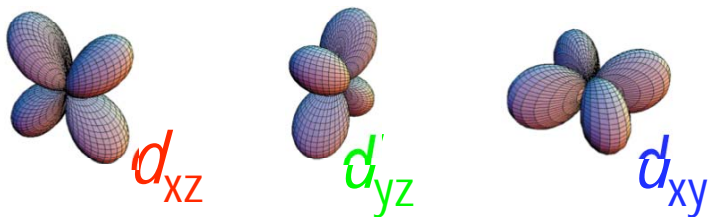
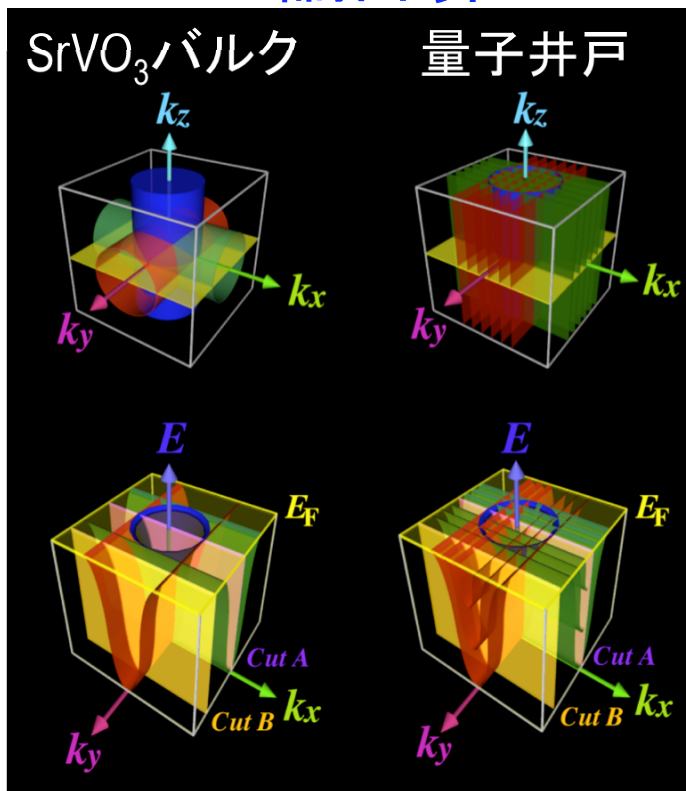




閉じ込めの証拠であるデジタル化(量子化)状態が観測された。

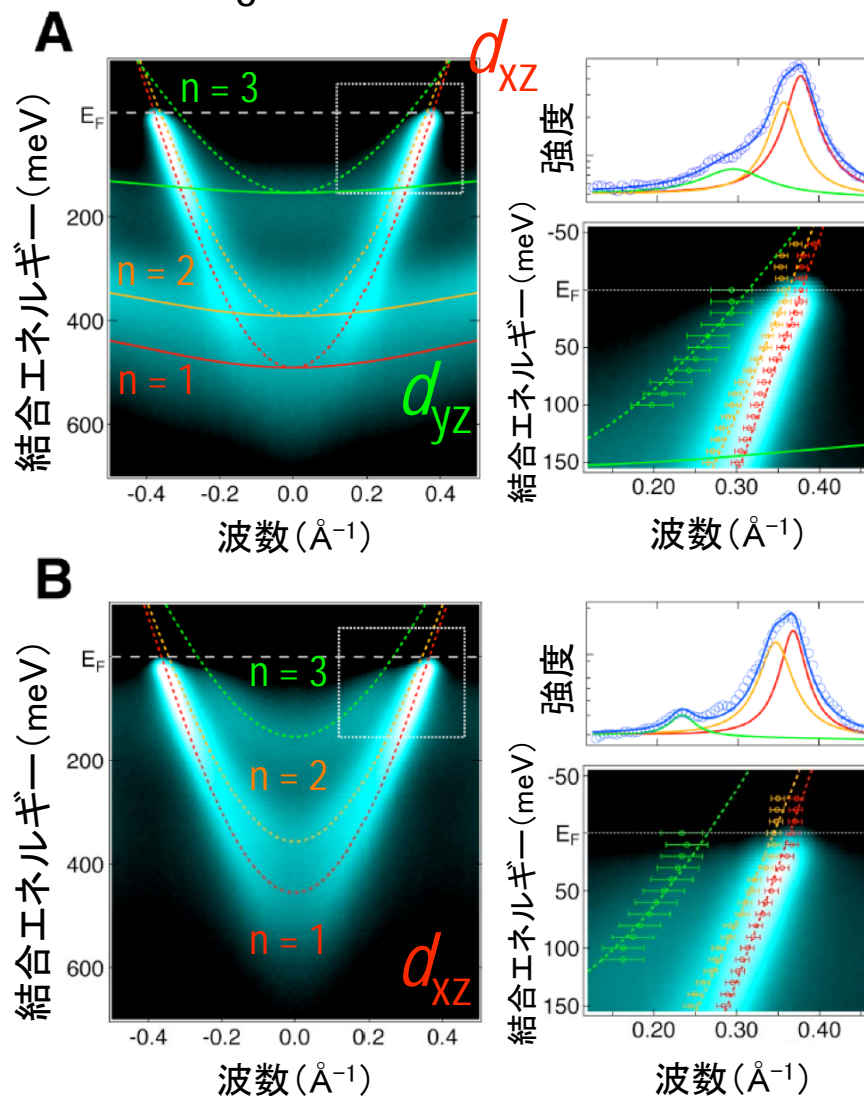


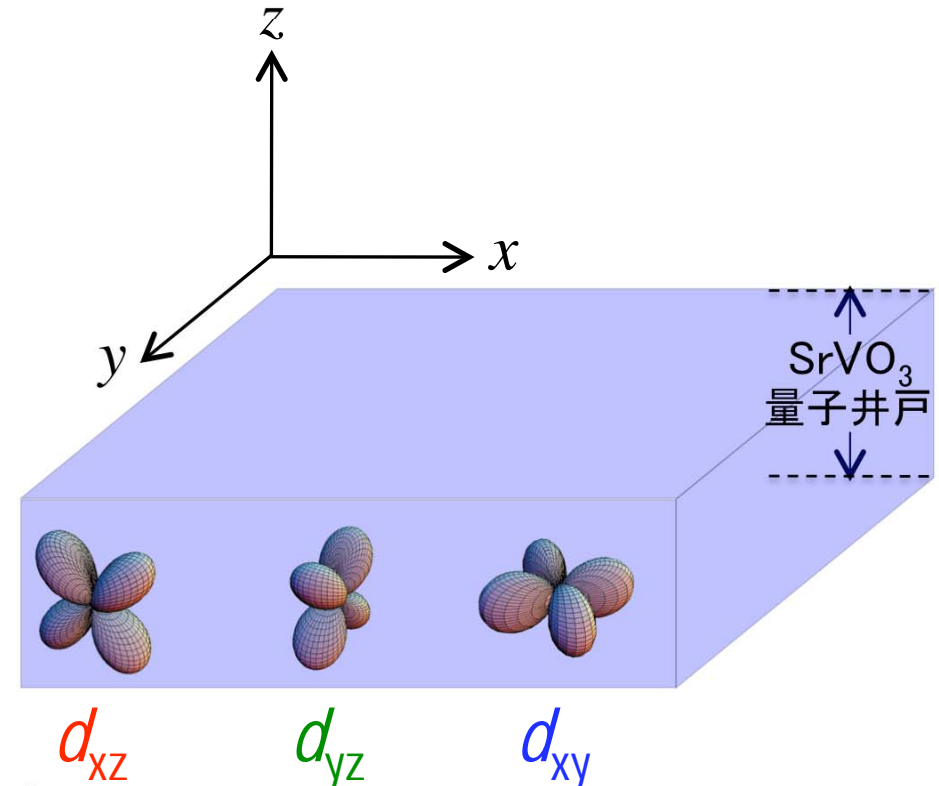
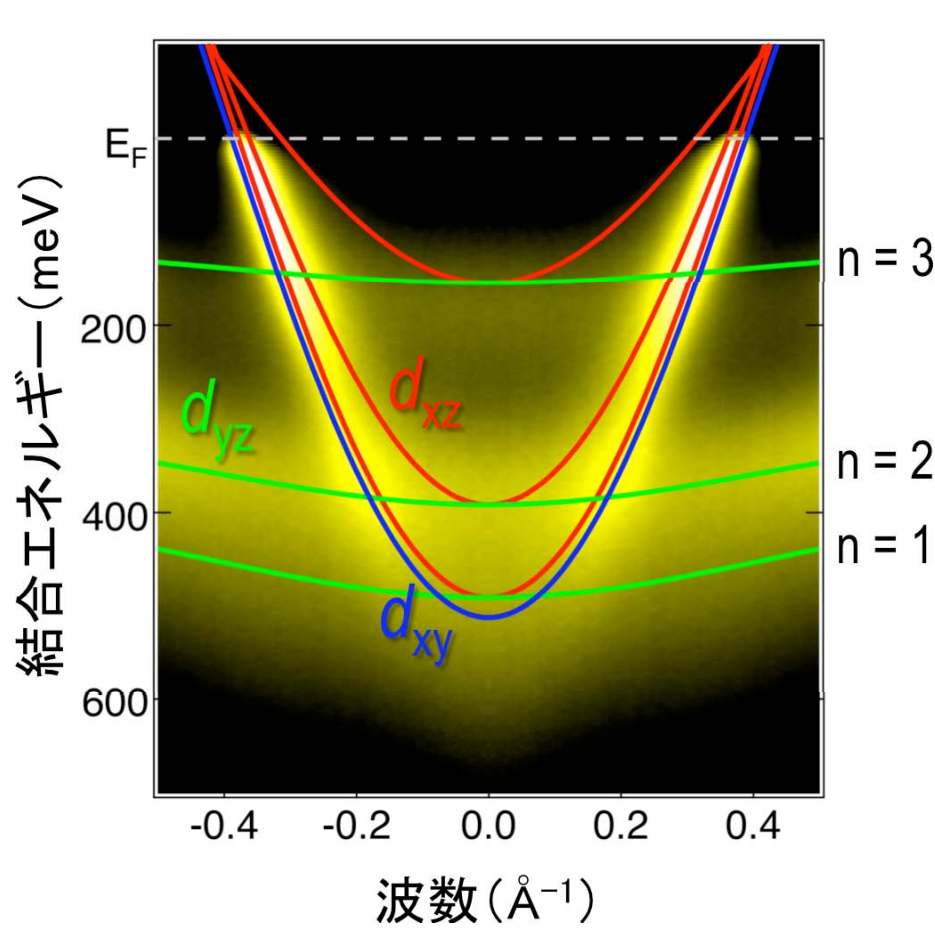
理論計算



軌道選択的量子化準位
異常な質量増強効果

SrVO₃量子井戸状態(実験)

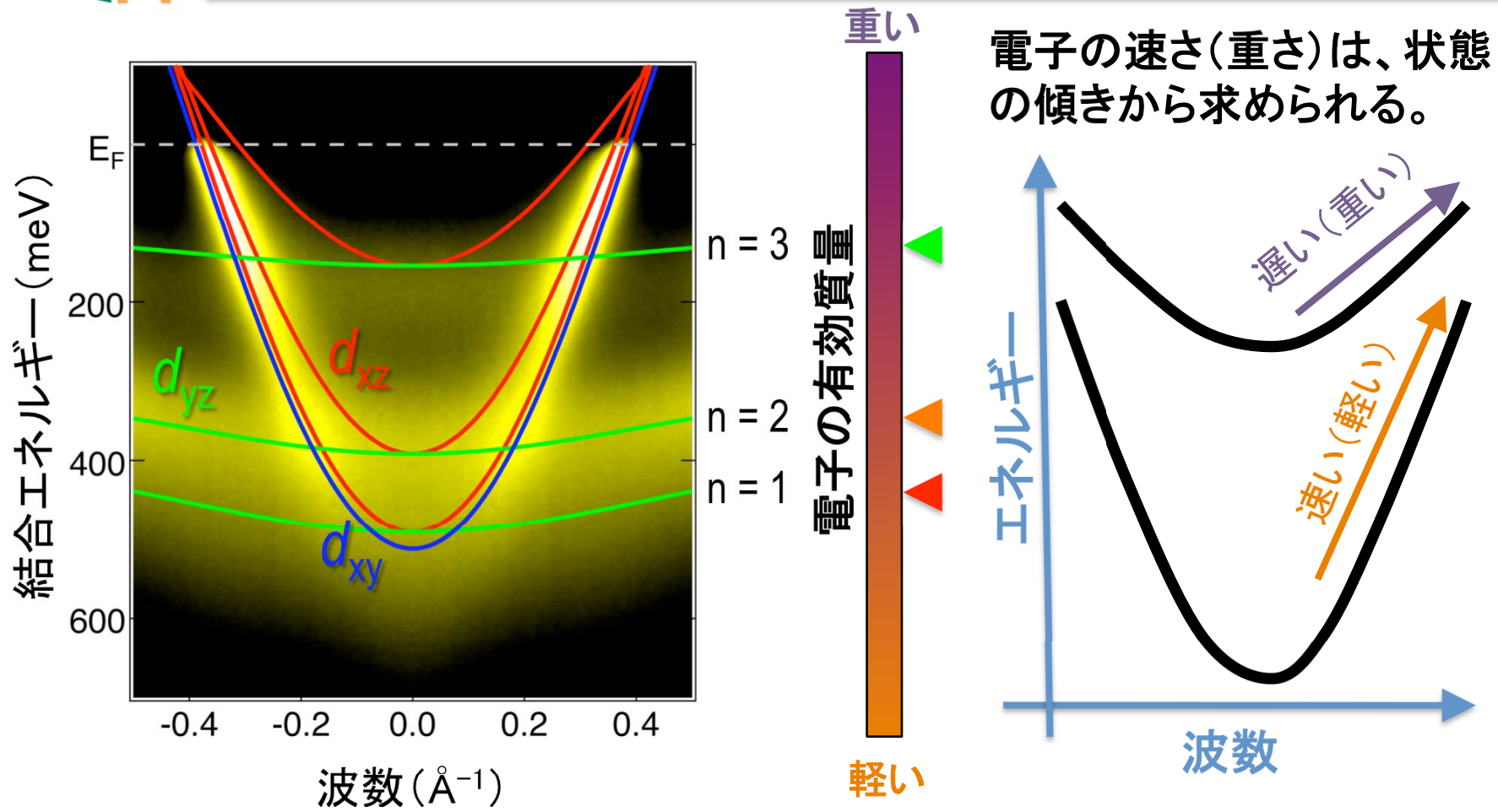




量子化される
(デジタル化した $n=1, 2, 3\cdots$ の状態を持つ)

量子化されない
(デジタル化した状態を持たない)

z 方向に広がった軌道(d_{xz} & d_{yz})が選択的に量子化する。



電子の速さ(重さ)は、状態の傾きから求められる。

電子の有効質量が量子化した状態のエネルギーに依存している。

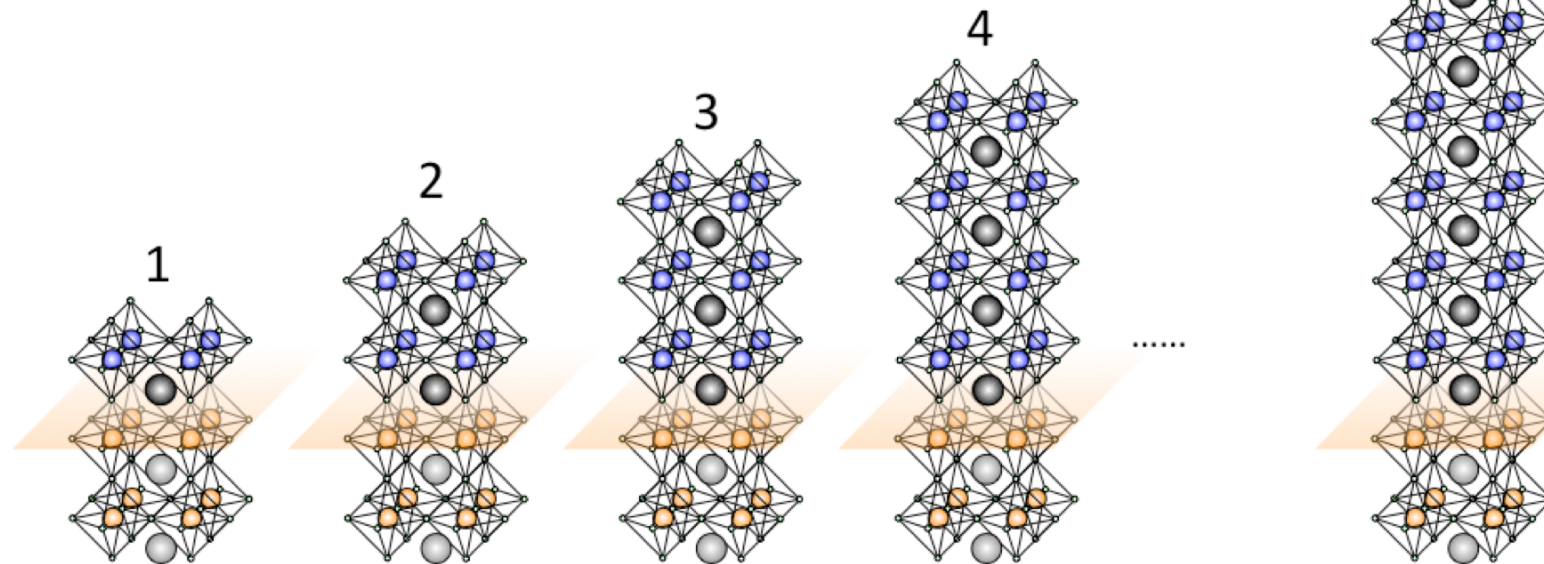


半導体や金属では見られない強相関電子ならではの振る舞い

m 枚

∞

強相関電子の振る舞いを人工的にコントロール



酸化物量子井戸構造

$T_c^{\max} =$
室温？

人工的に伝導層を制御可能になった。そのため、今後は超伝導体の枚数制御を行い、高い転移温度の物質を設計する。

<謝辞>

本研究は、文部科学省科学研究費補助金 (A19684010、S22224005) および、科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業 個人型研究(さきがけ型) およびチーム型研究(CREST)の一環として、KEK 物質構造科学研究所特別課題(08S2-003、09S2-005)のもとで実施しました。

本研究は、東京大学大学院工学系研究科の吉松公平 日本学術振興会特別研究員、堀場弘司 助教、および吉田鉄平 助教、藤森淳 教授(同理学系研究科)らとの共同研究です。

<研究内容に関するお問い合わせ>^{23/23}

組頭 広志(クミガシラ ヒロシ)

東京大学 大学院工学系研究科 応用化学専攻

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

Tel:03-5841-7192

Fax:03-5841-8744

携帯番号:090-4311-6718

E-mail: kumigashira@sr.t.u-tokyo.ac.jp

7月13日、14日は22:00くらいまで東京大学の方で待機しておりますので、内容について問い合わせただけだと存じます。