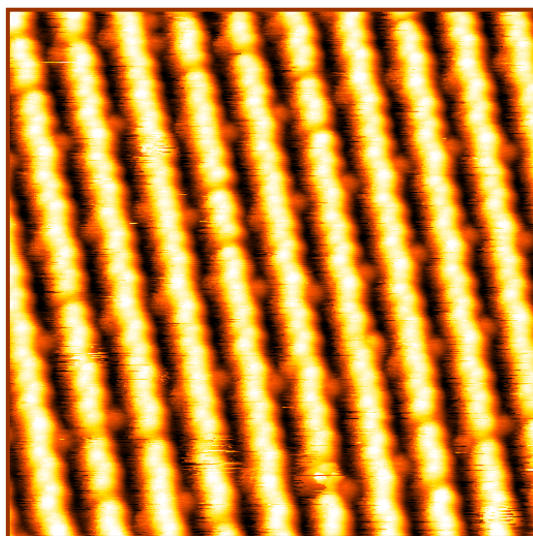


## Au/Ge表面の電子状態

東大物性研 中辻 寛

新倉涼太、柴田祐樹、山田正理、飯盛拓嗣、富松宏太、小森文夫

謝辞 KEK-PF BL18A, 東大物性研 軌道放射物性研究施設の皆様



STM @RT  
15x15 nm<sup>2</sup>

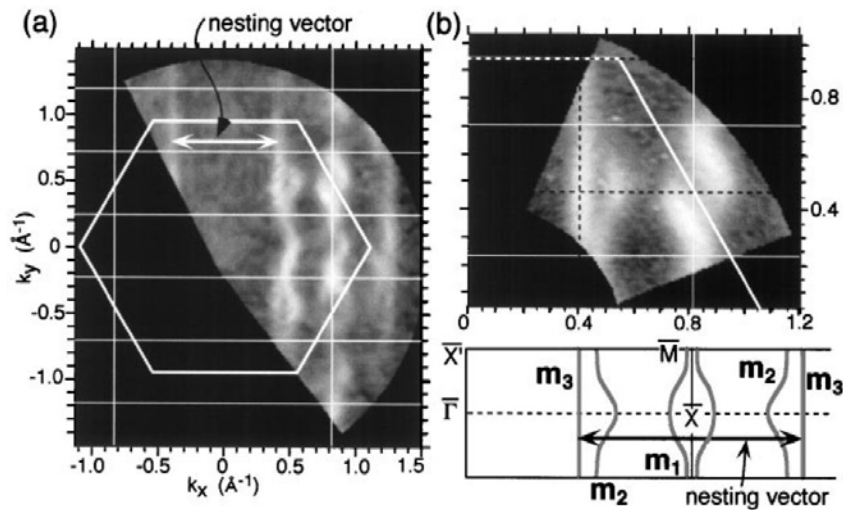
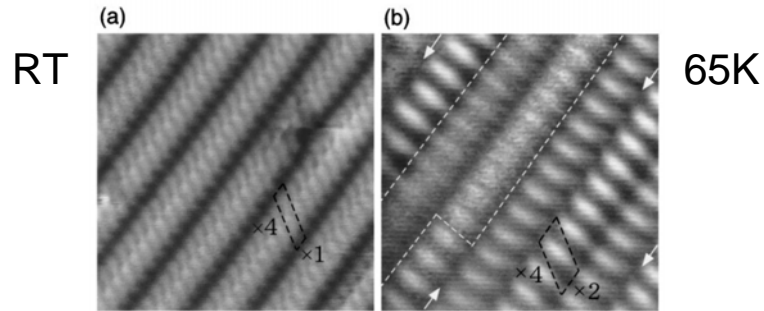
Ge(001)-Au の電子状態 1次元? metallic?

- ・ 原子構造について(STM像)
- ・ ARPES @実験室光源、BL18A
- ・ Au 4f, Ge 3d core levels @BL18A

Ge(111)-Au の電子状態

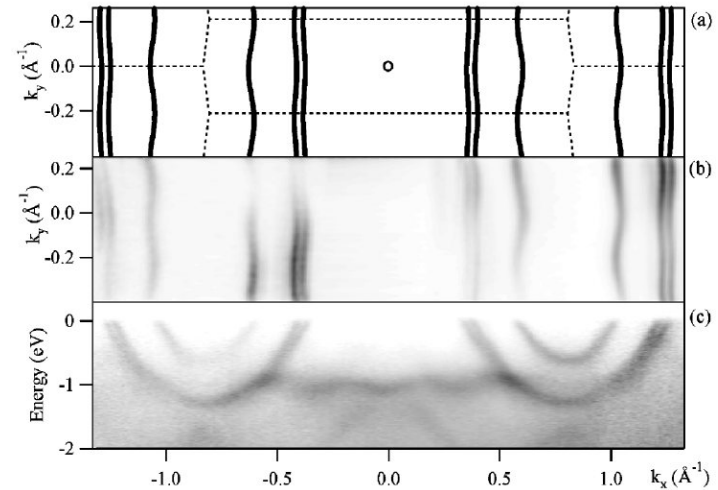
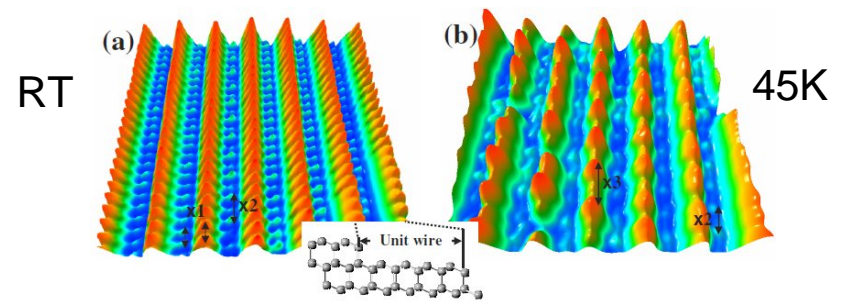
# 金属 / 半導体表面上の1次元金属状態

Si(111) -In



Yeom et al., PRL82 (1999) 4898.

Si(553), Si(557), Si(111) -Au

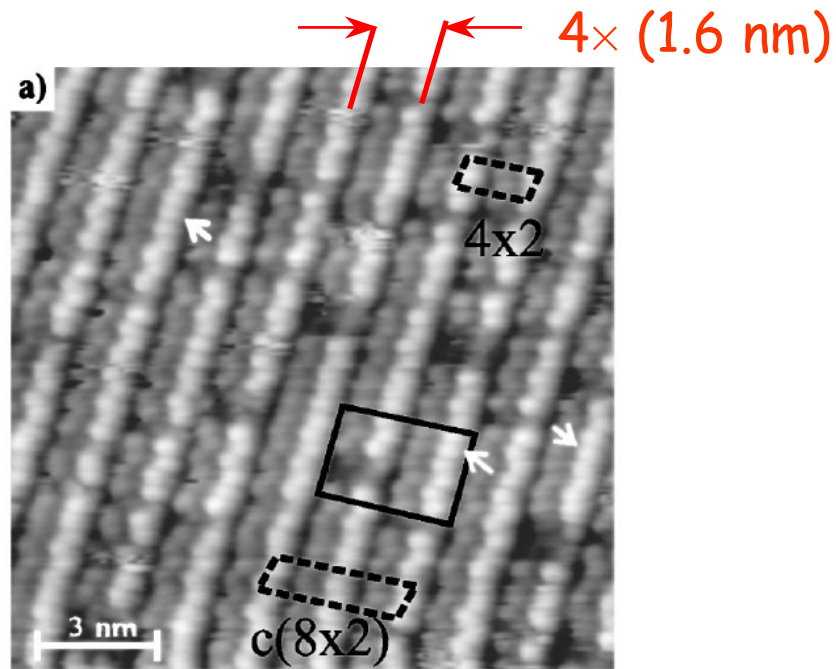


Crain et al., PRL90 (2003) 176805.

Ahn et al., PRL95 (2005) 196402.

- ・ Peierls 不安定性による金属-絶縁体転移 (CDW) / Luttinger 液体 ?
- ・ 1次元構造のテンプレート

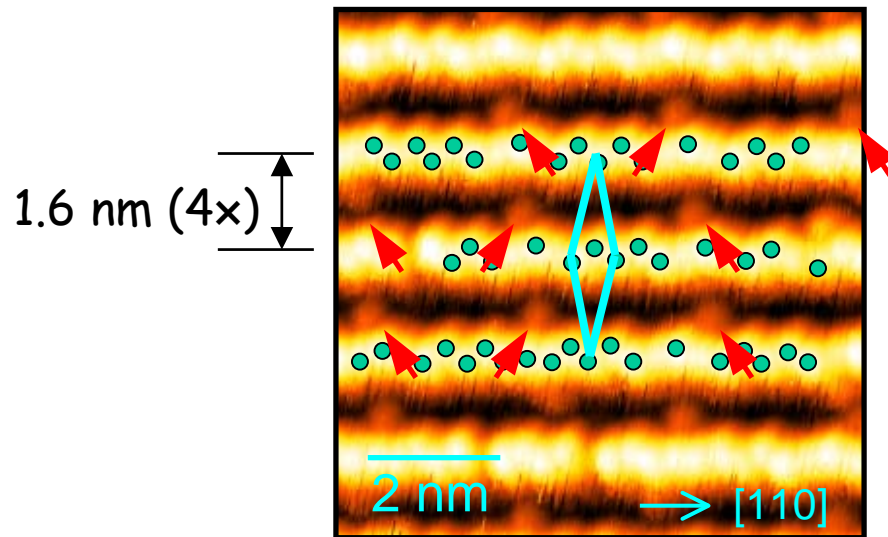
## Ge(001)-Au 表面上のナノワイヤ構造



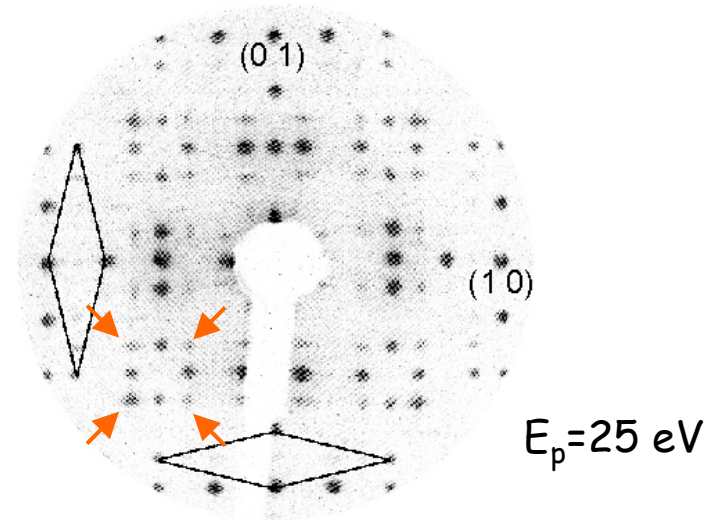
Wang et al., PRB70 (2004) 233312.

- ・ 675 K で Au を蒸着
- ・ 下地dimer列に対して、平行方向にナノワイヤ
- ・ 下地ユニットセルの 4倍周期, i.e., 1.6 nm周期

# ナノワイヤに平行および垂直方向の8倍周期構造



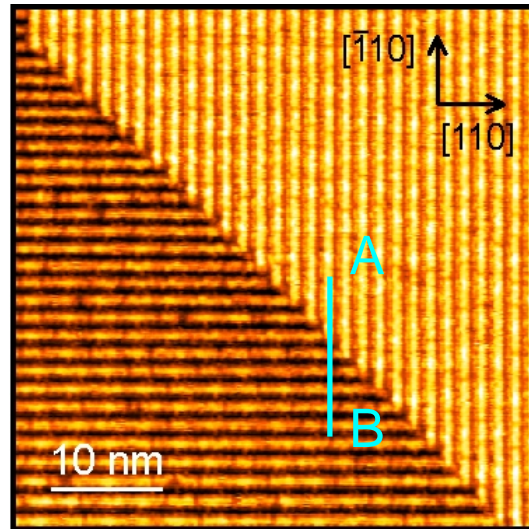
STM @RT  
 $V_B = -0.6 \text{ V}$   
 $I_+ = 1.2 \text{ nA}$



LEED:  
double-domain  
 $c(8 \times 2)$  pattern  
+ extra  $8 \times$  spots

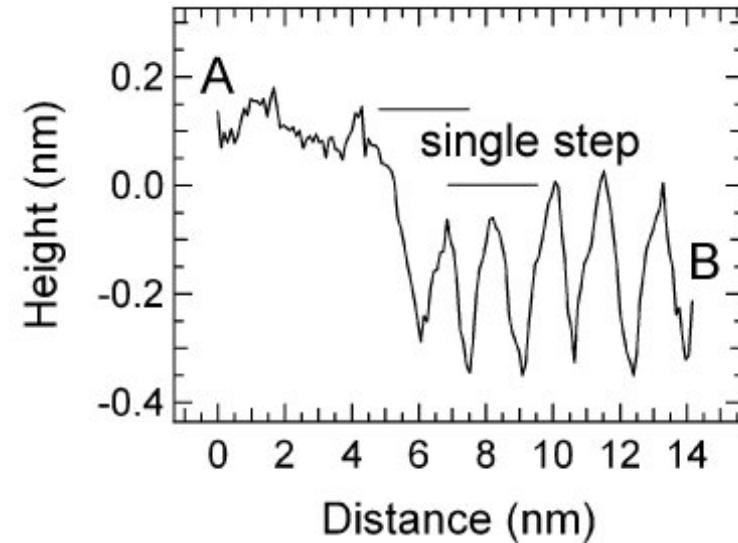
8倍周期: ナノワイヤに平行および垂直方向  
そのどちらかが  $c(8 \times 2)$  LEED スポットに寄与

# STM像: ナノワイヤ間の深い溝



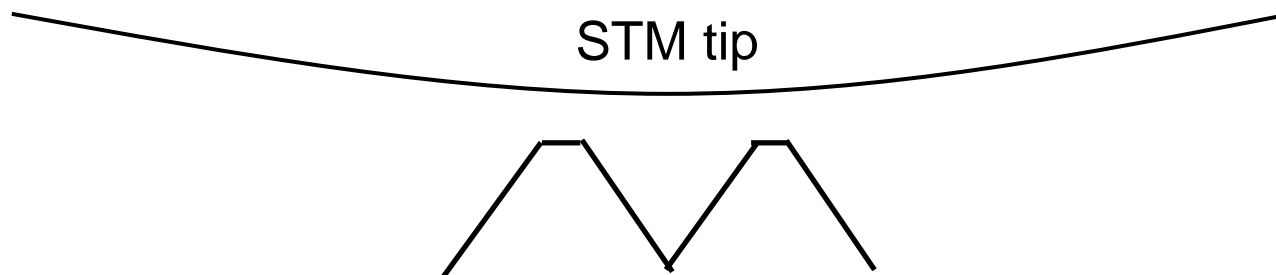
STM @RT

$V_B = -1.2 \text{ V}$   
 $I_{\dagger} = 0.9 \text{ nA}$



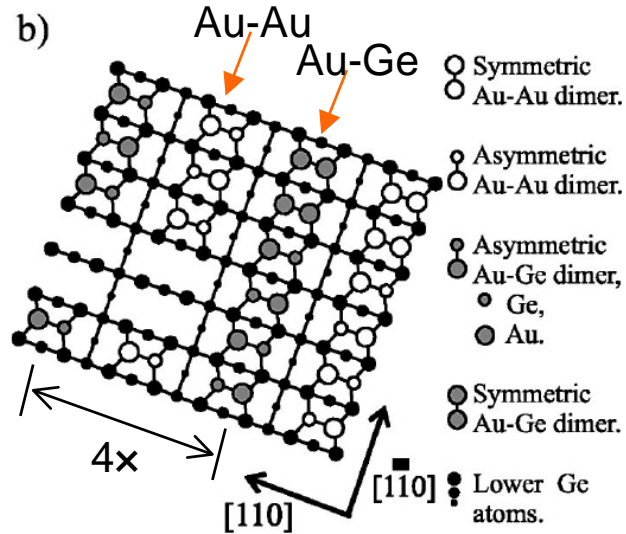
溝の深さ: 0.34 - 0.46 nm (2.5 層分)

c.f.) 6 層分深さ Ref.) A. Van Houselt et al., PRB78 (2008) 233410.



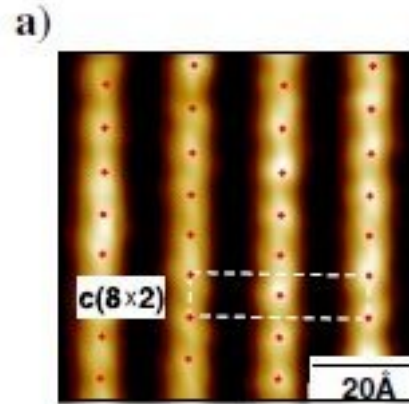


# 表面構造モデルとAu膜厚



Wang et al., PRB70 (2004) 233312.

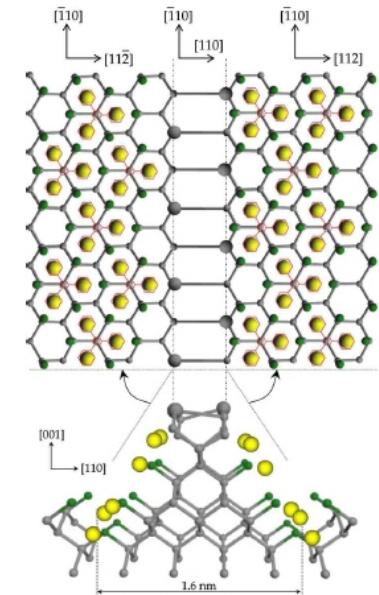
合金ダイマーモデル:  
0.75 ML



Schäfer et al.,  
PRL101 (2008) 236802.

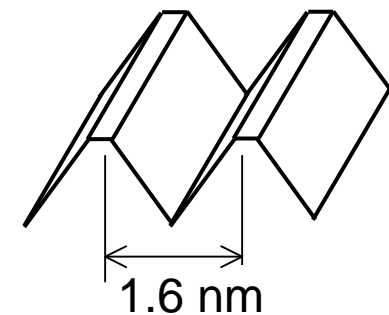
Au原子鎖モデル:  
0.5 ML (?)

理想的な  
1次元金属状態!



A. Van Houselt et al.,  
PRB78 (2008) 233410.

ナノファセットモデル:  
1.5 ML



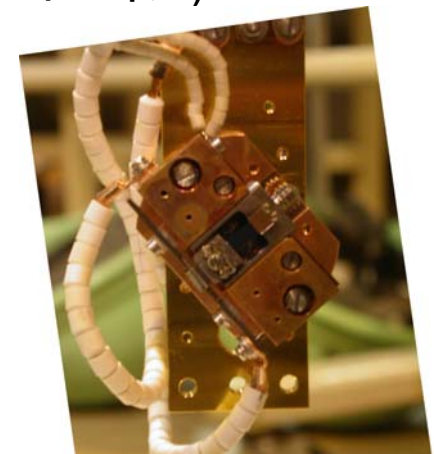
我々の見積 (XPS): ~ 1.1 ML

Au膜厚はどのモデルとも一致しない

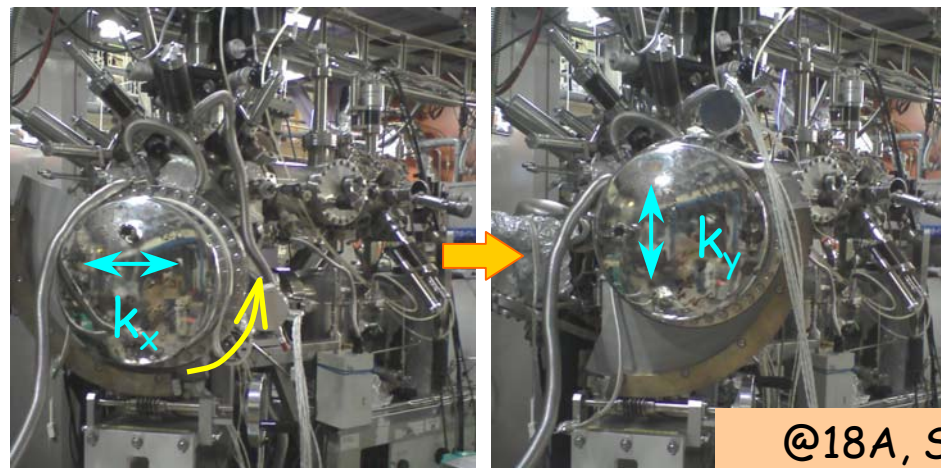
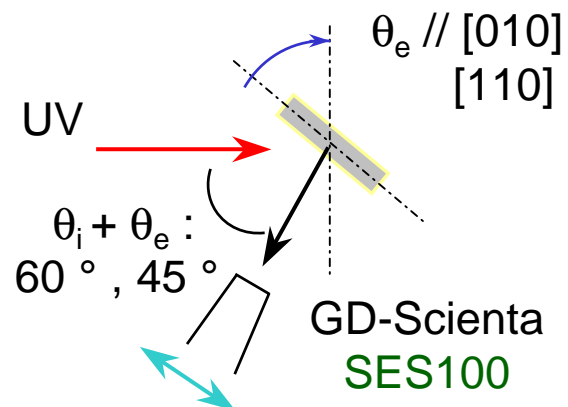
## 実験手順

1. Ge(001) n-type: Sb doped, 0.2-0.4 $\Omega$ cm  
Ar<sup>+</sup> スパッタリング @1 keV + アニール @990K  
⇒ 2×1 + c(4×2) streaks LEED パターン (2ドメイン) @RT
2. 670 Kにて、Au蒸着 (Wバスケットから) ⇒ c(8×2) LEED パターン (2ドメイン)
3. 実験室: He I (21.22eV, 無偏光, s, p-pol. (偏光子)) @RT & 130 K  
KEK-PF BL18A: (直線偏光) @RT & 80 K
  - ARPES: 17 – 60 eV
  - core levels: Au 4f (115 eV), Ge 3d (90 eV)

試料準備槽

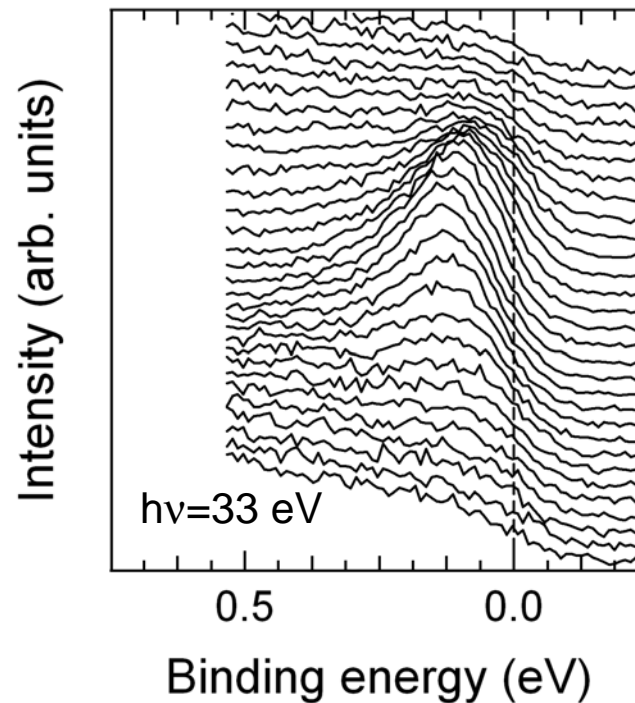
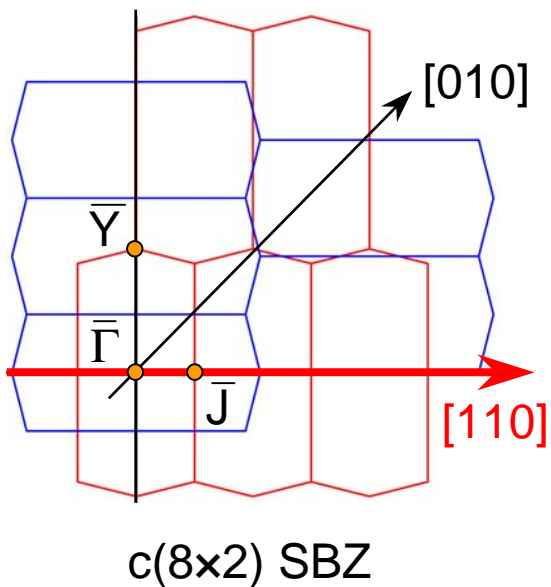
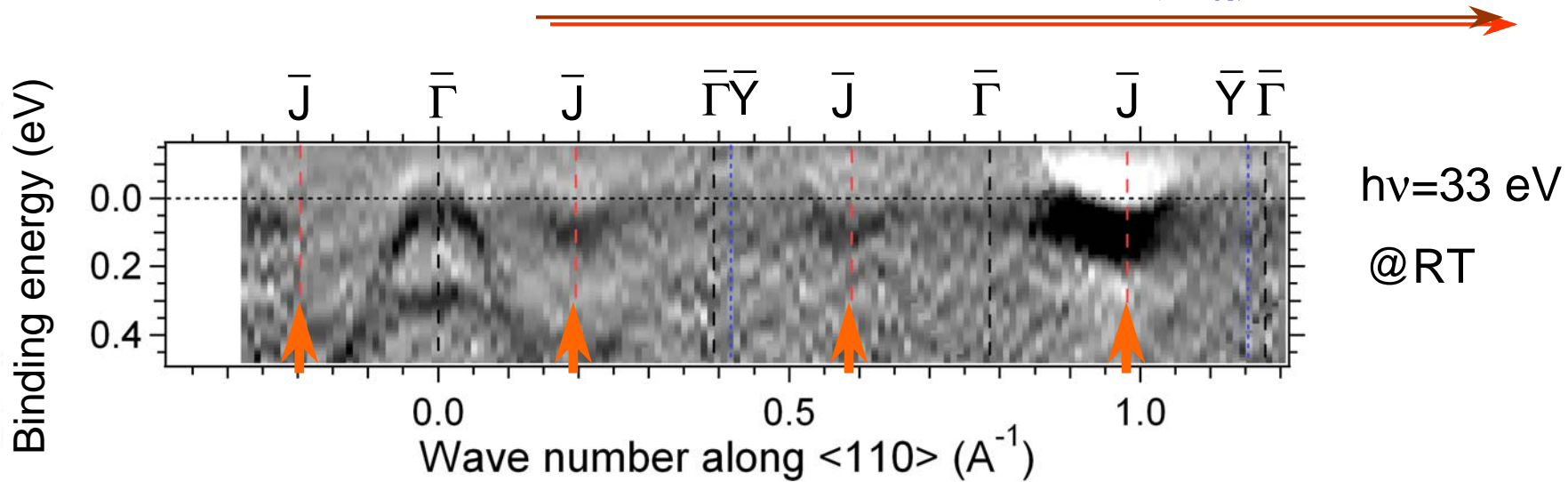


@18A, 面内回転



@18A, SES100

# <110> 方向のバンド分散



3.14 eV

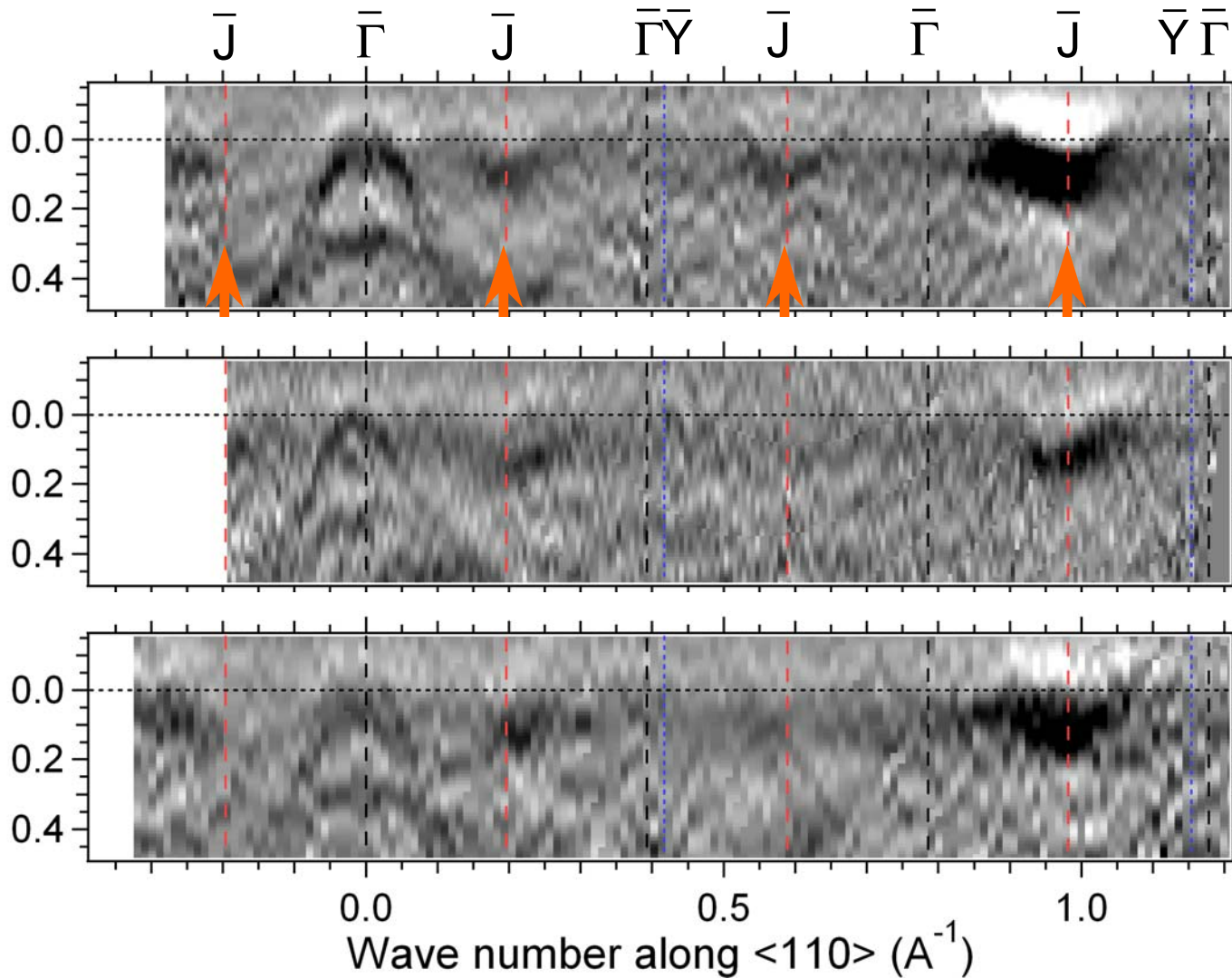
↓  
**金属バンドが  
 8倍周期で観測される**



# <110> 方向のバンド分散



Binding energy (eV)



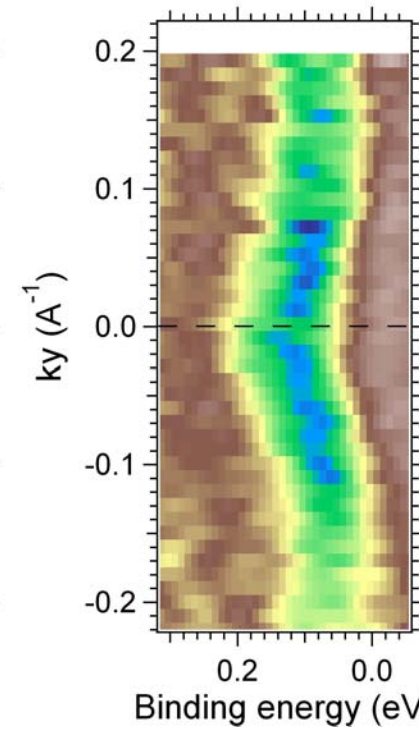
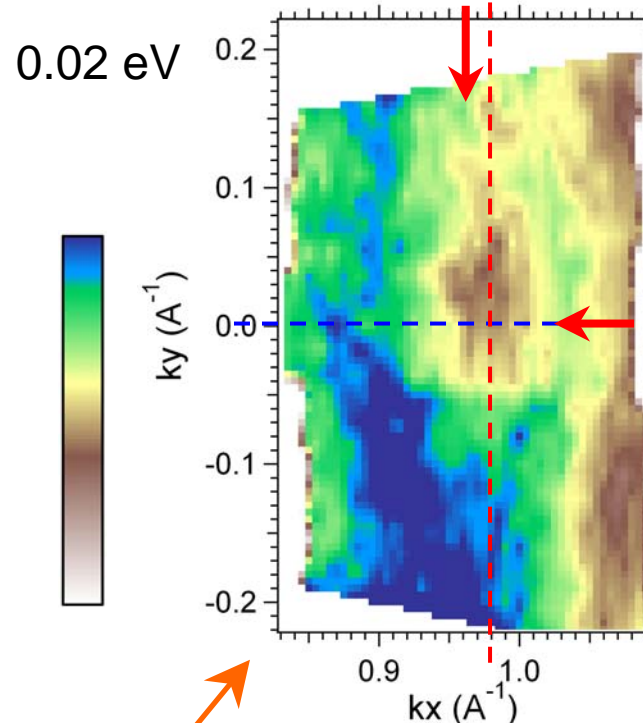
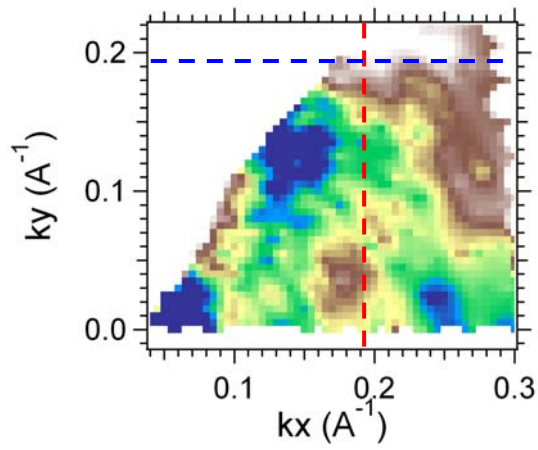
hν=33 eV  
@RT

hν=17 eV

hν=40 eV

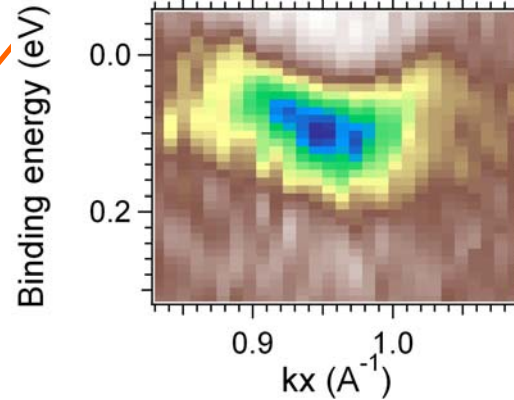
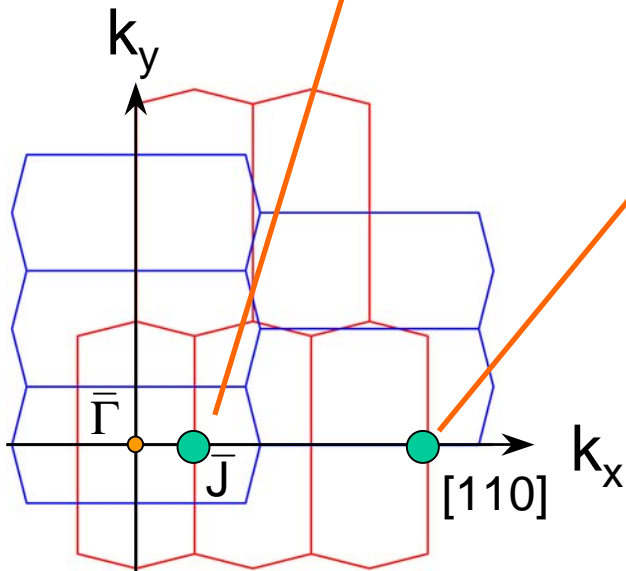
⇒ hv依存性がみられない

# フェルミレベル付近の等エネルギー面



$h\nu =$   
33 eV  
@RT

Au: 1.1 ML



- 😊 楕円形のフェルミ面
- 😊  $k_x$ 、 $k_y$  両方向に  
金属的なバンド分散

異方的な2次元金属状態

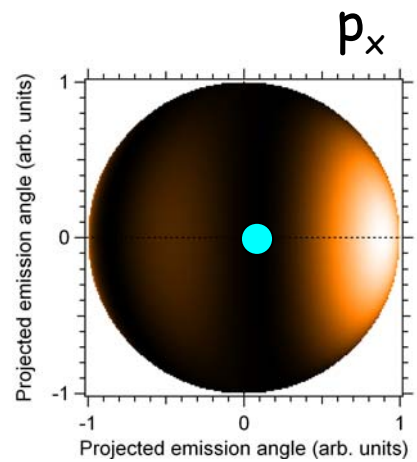
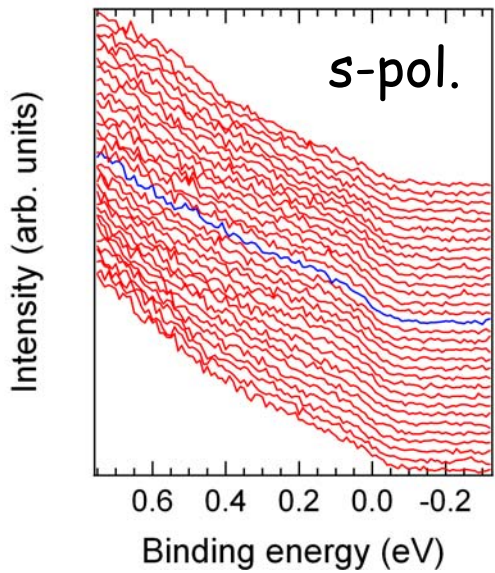
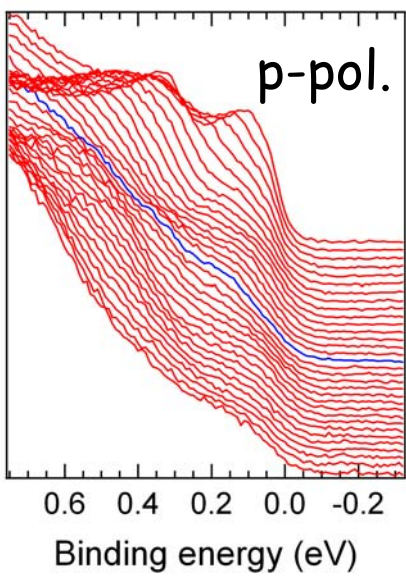
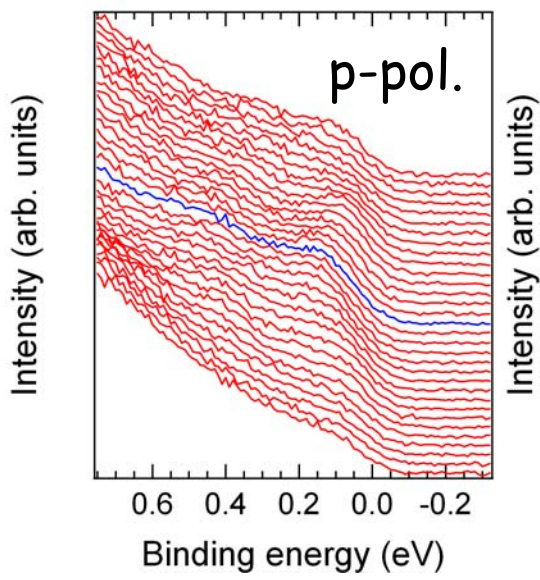
hν: 21.22 eV

# 偏光依存性



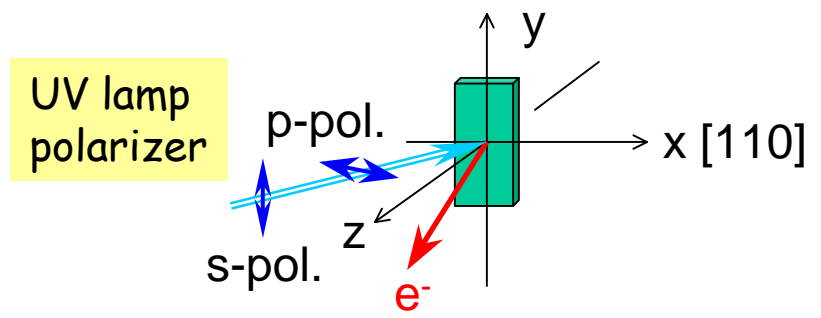
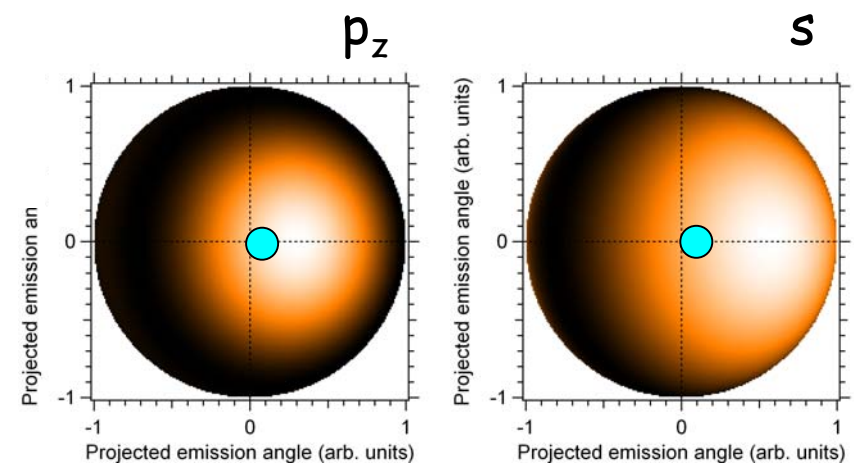
28° 出射

5° 出射



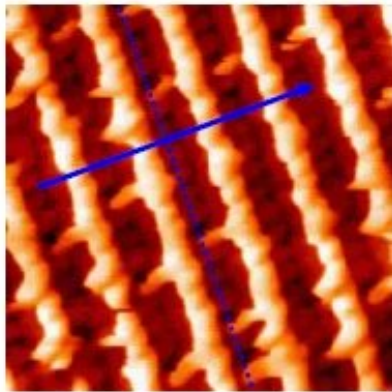
28° 出射: p偏光のみで観測  
→ [110]について偶対称

5° 出射: p偏光で観測  
→ p<sub>z</sub> 又はs 軌道から成る

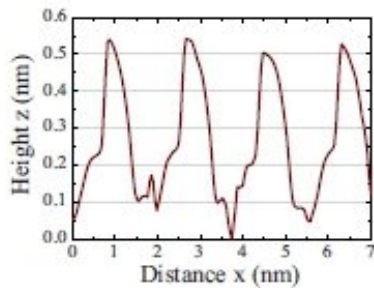




# ナノファセット (マイクロファセット) モデル

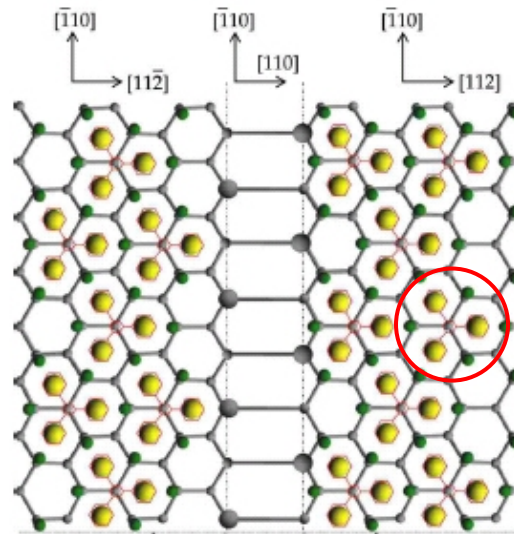


(a)

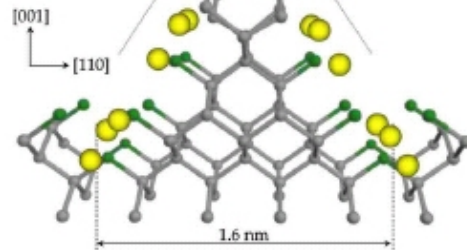


(c)

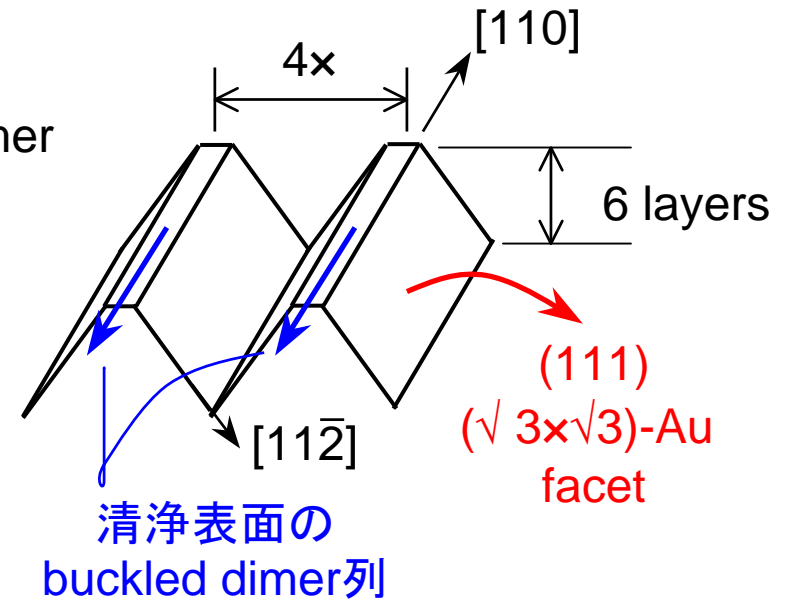
~0.6 nm  
深い溝



Au  
trimer



Au: 1.5 ML



ナノファセットモデル

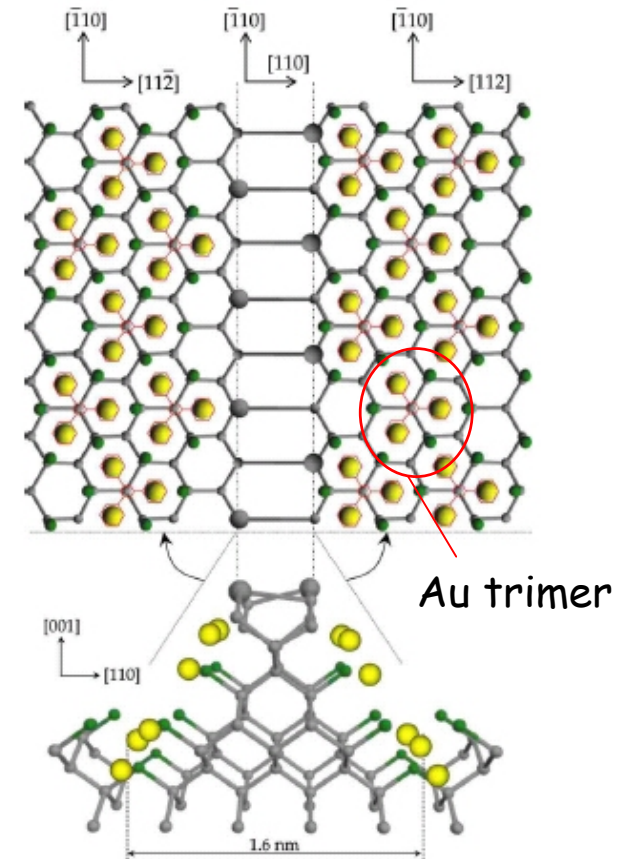
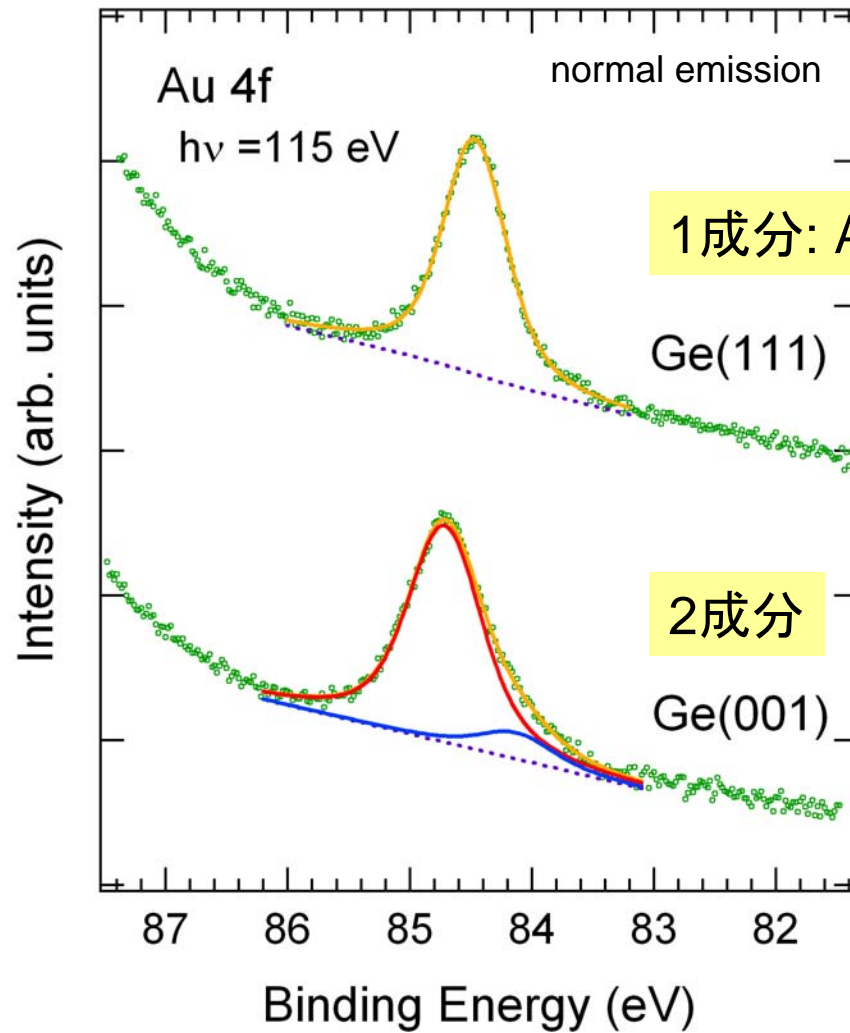
我々の見積 (XPS): ~ 1.1 ML

ファセットが存在しても、  
Auの量は異なる

A. Van Houselt et al., PRB78 (2008) 233410.



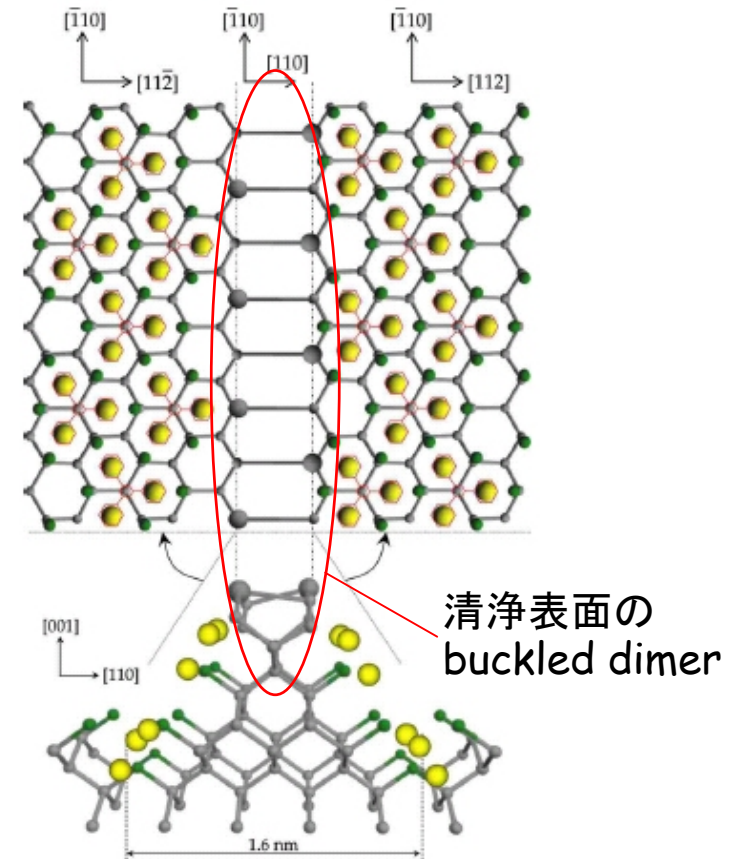
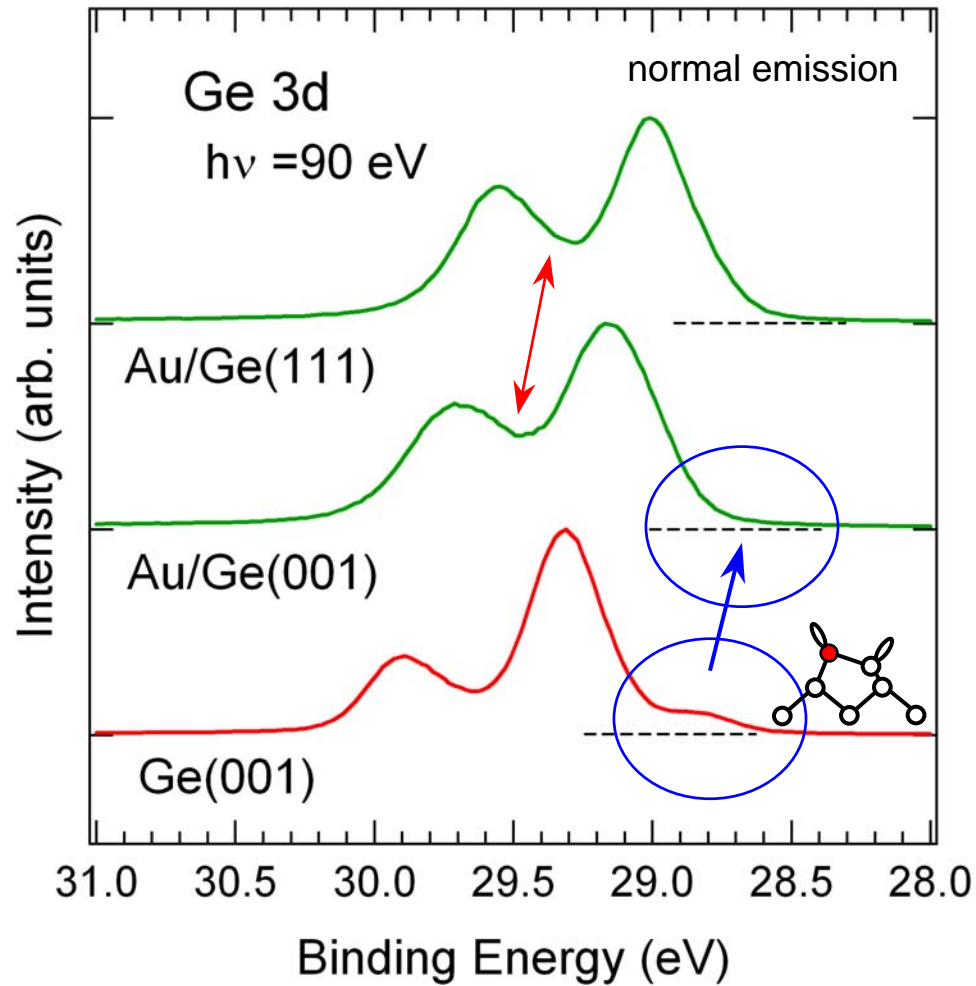
# Au 4f コアレベル



Houselt et al., ナノファセットモデル

Au trimerが存在したとしても、  
異なる状態のAuが10%程度存在する

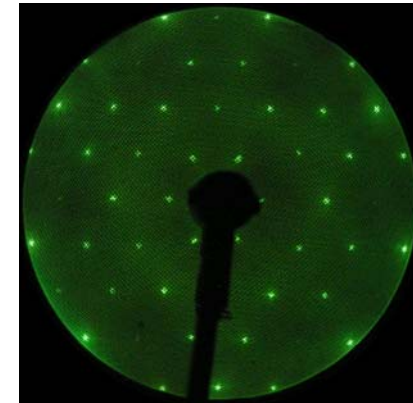
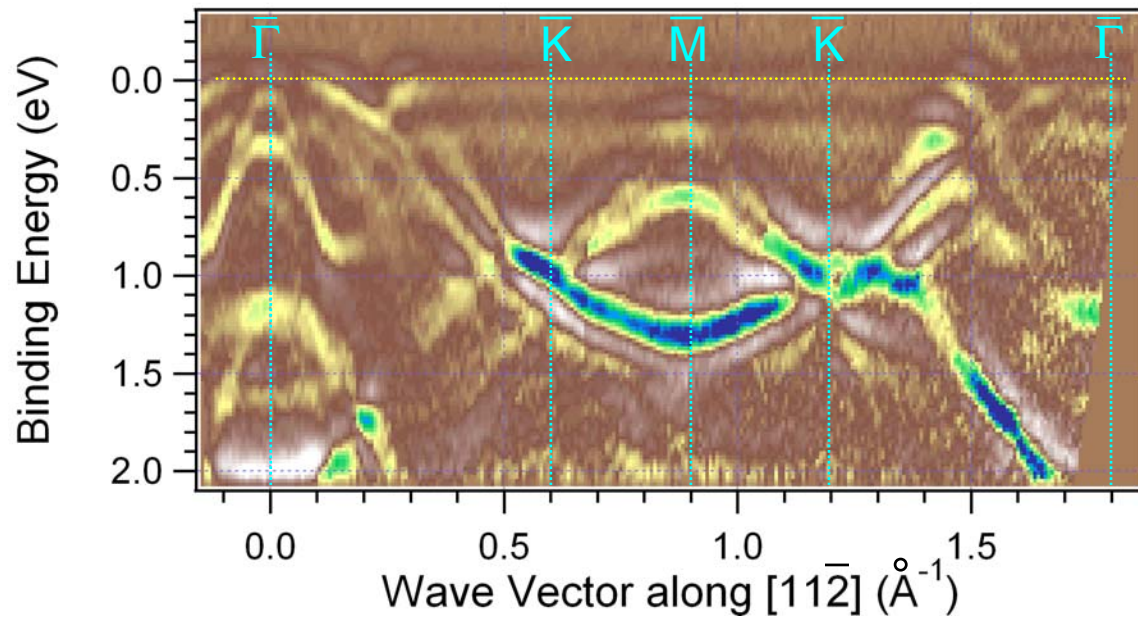
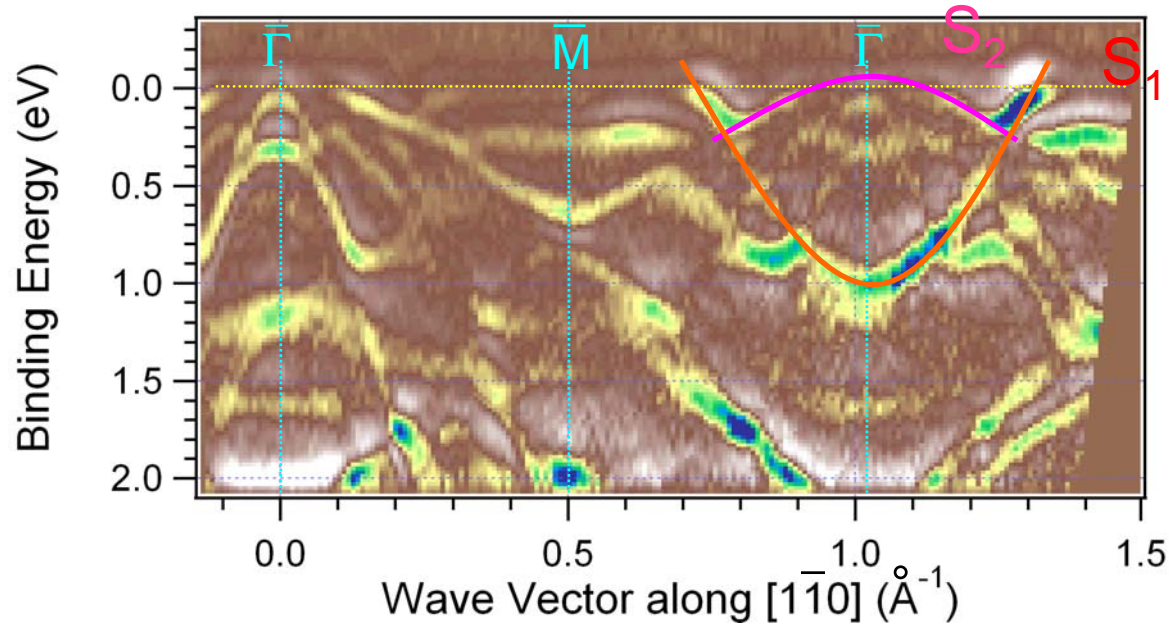
## Ge 3d コアレベル



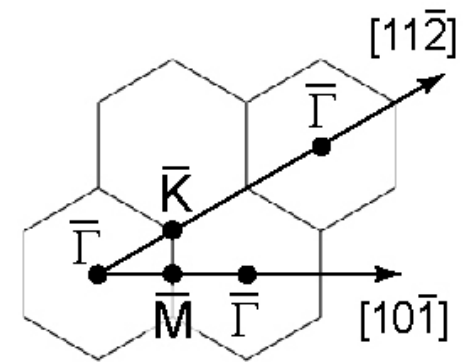
Houselt et al., ナノファセットモデル

ナノファセットモデルが正しいとしても、  
 dangling bondをもつbuckled dimer atomは存在しない

# Ge(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Au の電子構造



Au  $\sim 1$  ML :  $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$

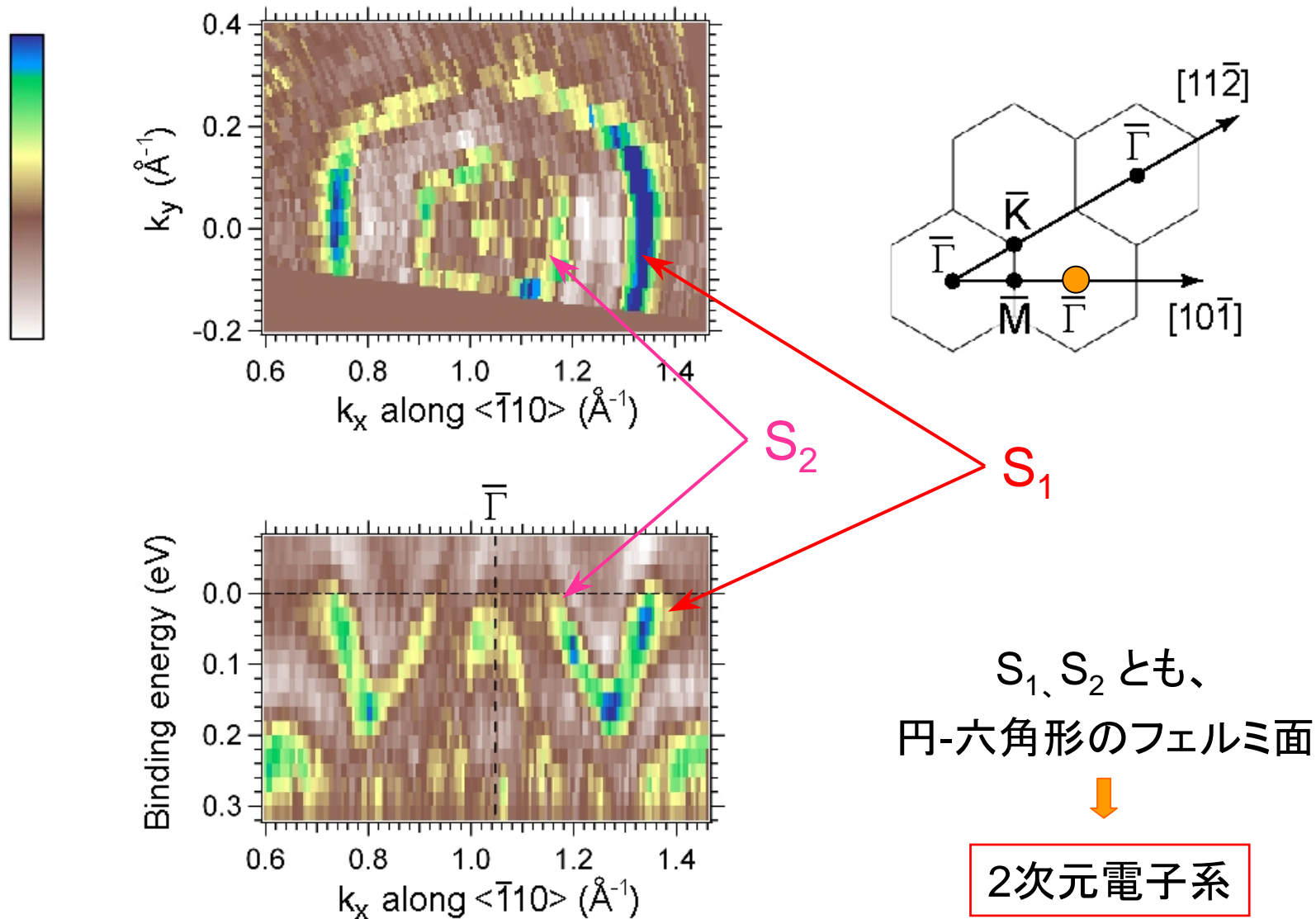


$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$  SBZ

\*  $S_1$  と  $S_2$  は  
対称性の異なるバンド



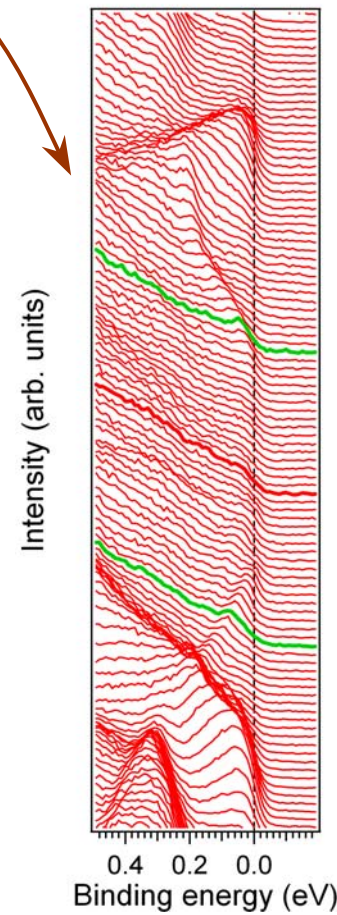
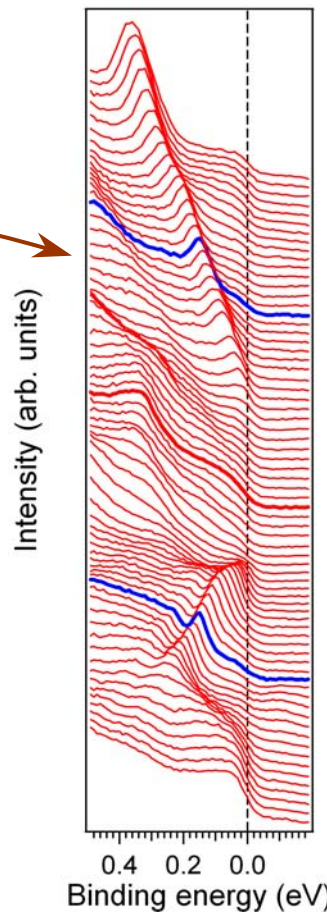
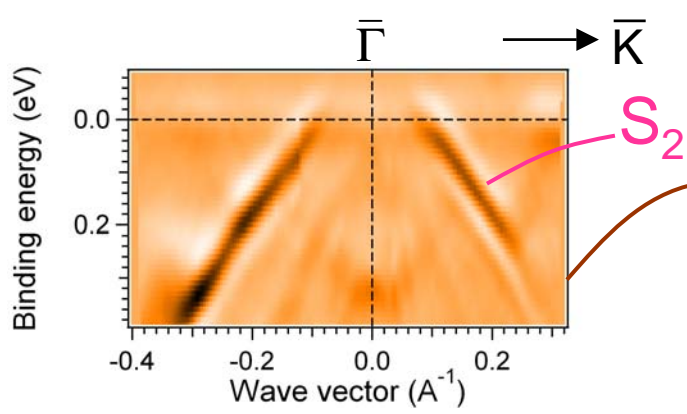
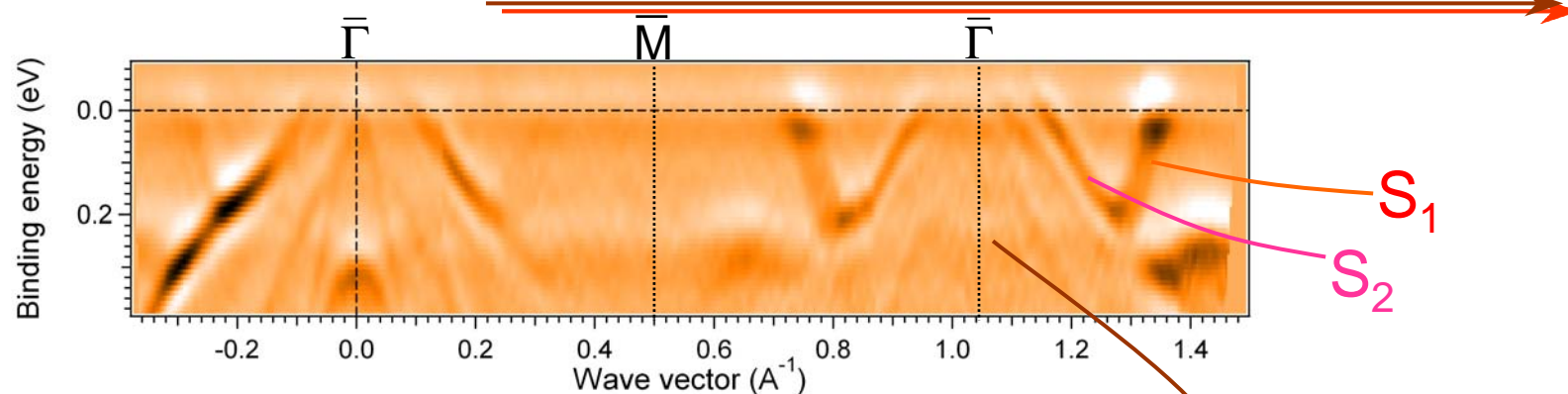
# Ge(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Au のフェルミ面



Au  $\sim 1$  ML :  $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$



# Ge(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Au Rashba効果??



$S_2$ バンドはスプリットしている  
(E方向に70 meV程度)

↑  
Rashba効果??

## Ge(001)-Au ナノワイヤ構造の電子状態

### 1. 1次元 or 2次元電子状態？

- ・  $c(8 \times 2)$  SBZの 8倍周期方向に 金属的表面状態
- ・ フェルミ面形状は楕円形 → 異方的2次元金属状態
- ・ 入射偏光依存性 →  $p_z$  又はs 軌道から成る

### 2. ナノファセットモデルと比較して...

- ・ Au trimer以外のAu原子が存在
- ・ Ge dimerのdangling bondは存在しない

## Ge(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Au 構造の電子状態

- ・ 2次元金属状態、2枚のフェルミ面
- ・  $S_2$  バンドの分裂 ← Rashba効果？

今後の課題: (001): STM, 回折法による構造観察

(111): バンド計算との比較、スピン分解光電子分光、低温測定

Ref.) K. Nakatsuji *et al.*, Phys. Rev. B **80** (2009) 081406(R).

エネルギー領域: 18Aでの下限: 10 eVから、  
19Aの上限: 250 eV (300 eV)

>> 同一試料の valence と core 測定

偏光: できれば縦偏光も (s偏光の実験)

マニピュレータのアップグレード:

- ・ 低温領域の拡充
- ・ 6軸 (x, y, z,  $\theta$ ,  $\phi$ , tilt)
- ・ 自動測定