

陽電子ビームによる表面物性の研究

—半導体内部から最表面構造の探査へ—

河裾厚男 日本原子力研究所

1. 陽電子スペクトロスコピー
2. 陽電子回折法の開発と応用
3. まとめと今後の展望



陽電子＝電子の反粒子 Diracの相対論的量子力学

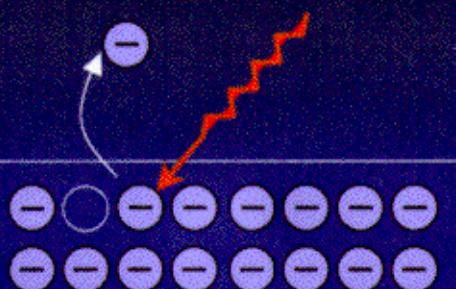
対生成

高エネルギー光子

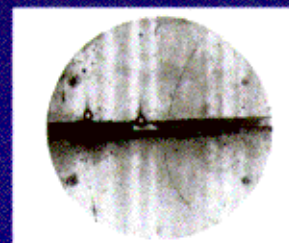
$$E=2mc^2=1.022\text{MeV}$$

真空の抜穴＝陽電子

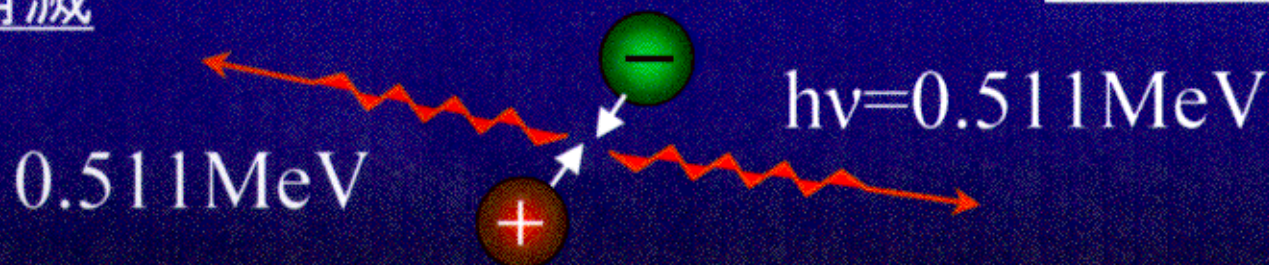
真空



Anderson
1933年



対消滅

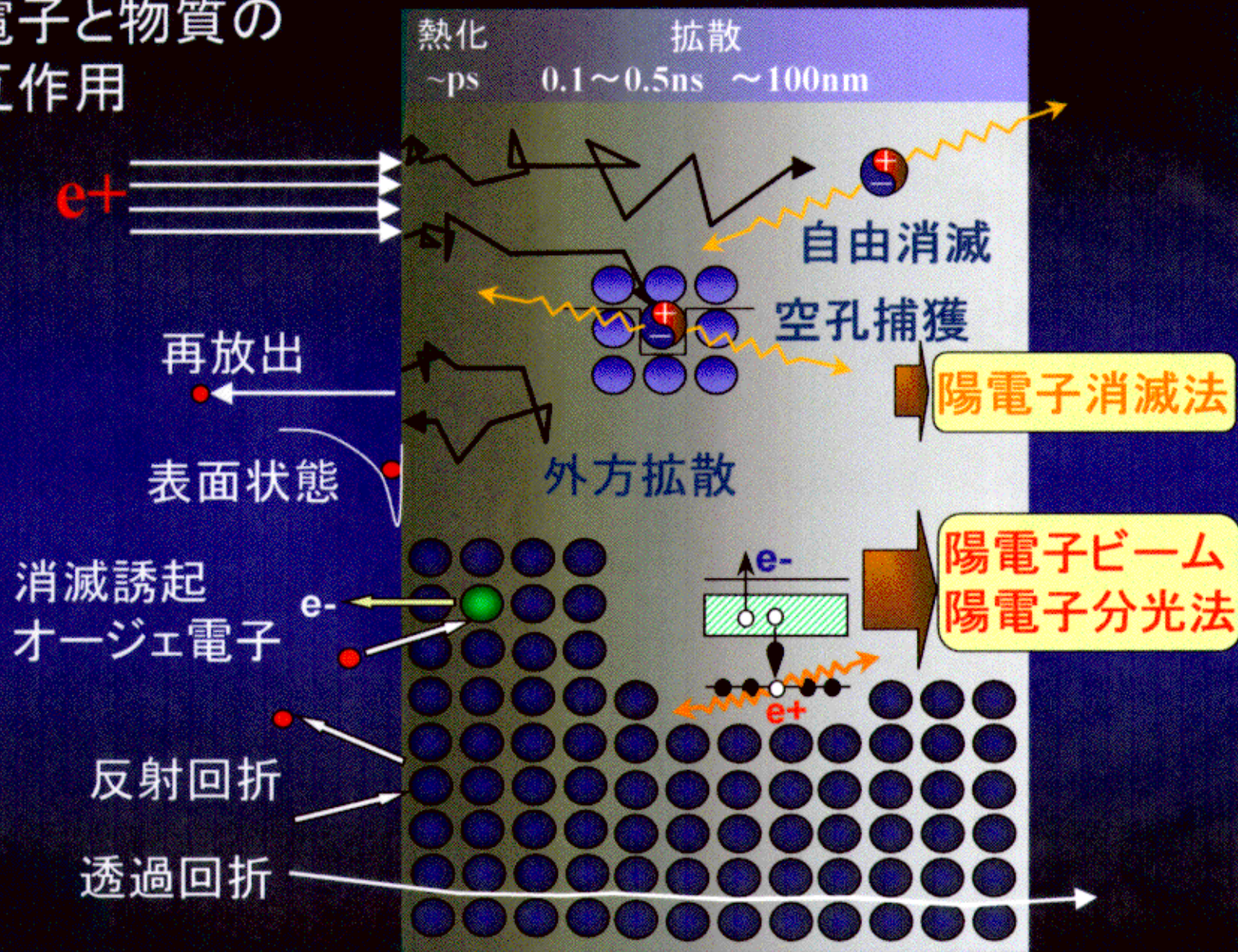


$$h\nu=0.511\text{MeV}$$

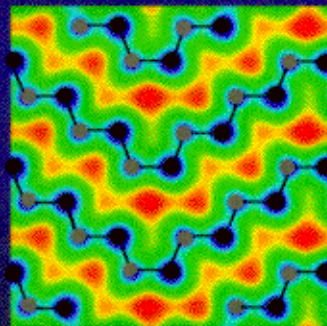
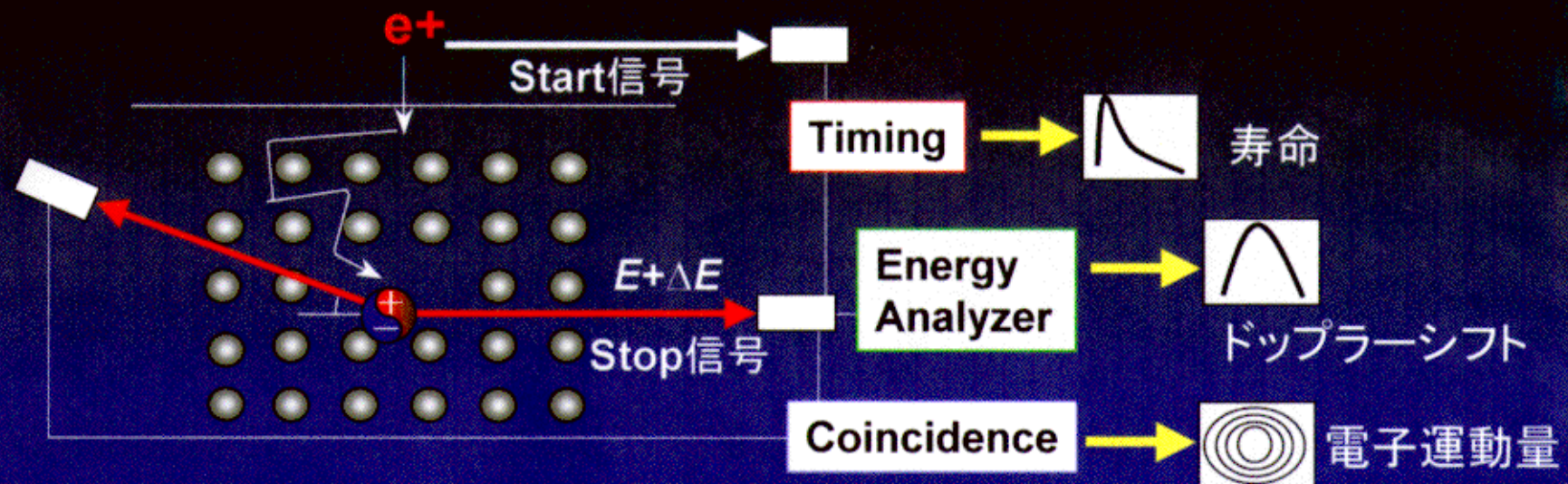
* 放射性同位元素の β^+ 崩壊でも生成
22-Na、64-Cu、58-Co etc



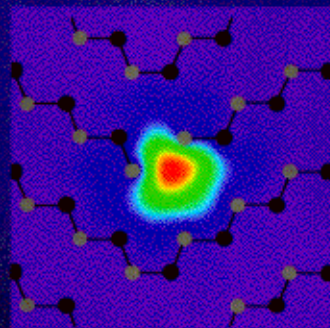
陽電子と物質の相互作用



陽電子消滅法



完全結晶



原子空孔

陽電子寿命

$$1/\tau = \pi r_e^2 c \int |\psi_+(\mathbf{r})|^2 n_-(\mathbf{r}) \gamma d\mathbf{r}$$

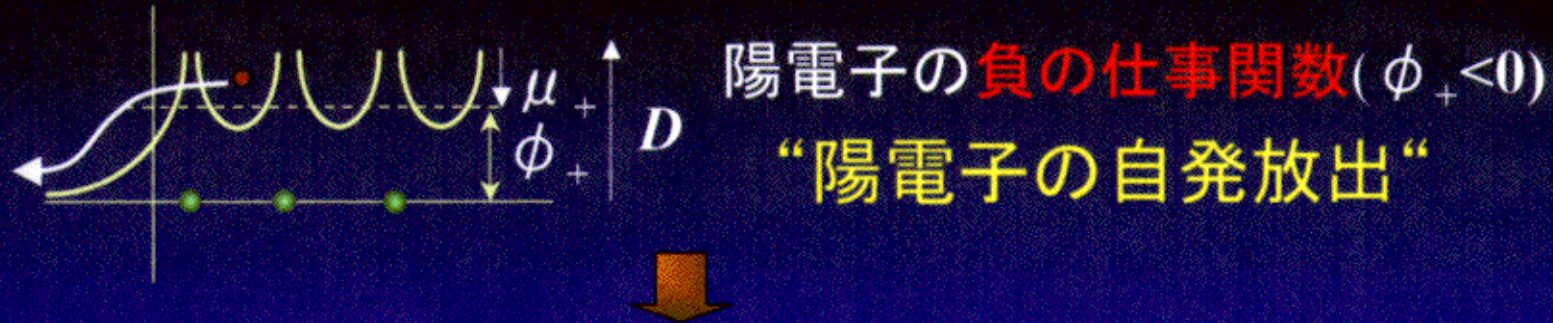
3D電子運動量分布

$$\rho(\mathbf{p}) = \pi r_e^2 c \left| \int \psi_+ \psi_- \exp(-i\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}) d\mathbf{r} \right|^2$$

空孔型欠陥の検出、バンド構造の決定



陽電子ビーム応用



単色陽電子ビーム形成技術の確立

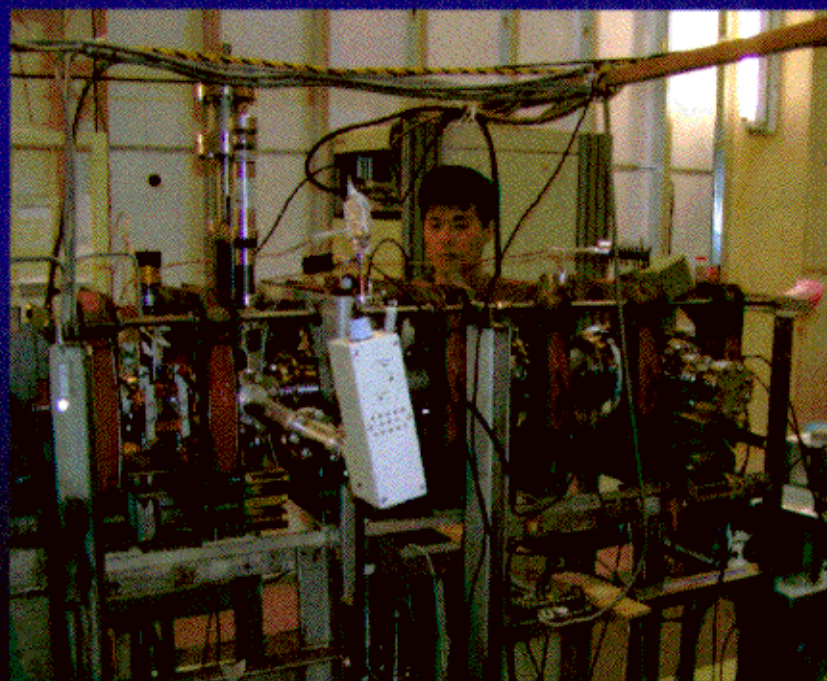
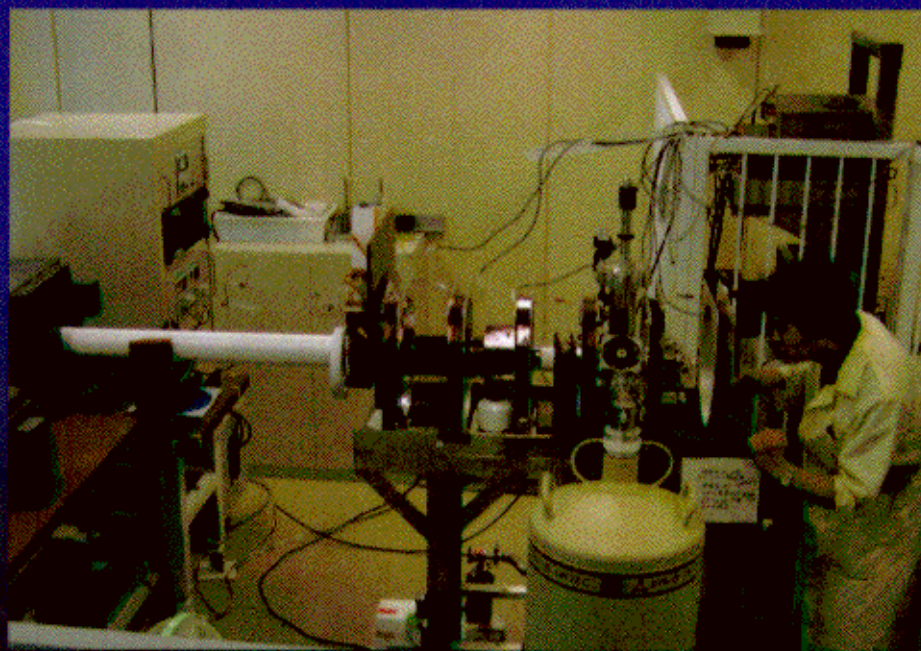
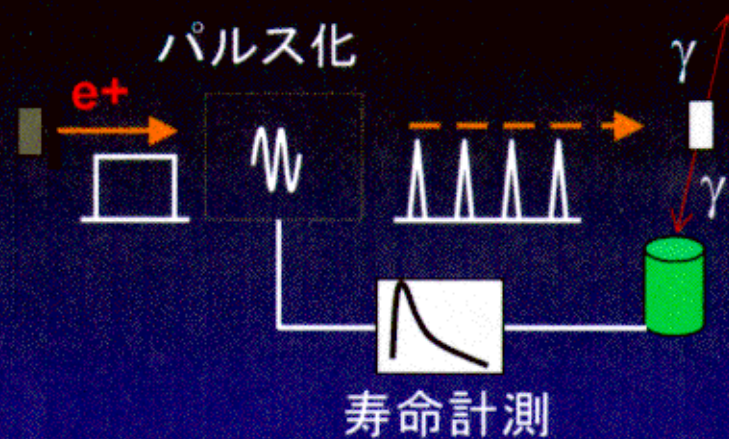
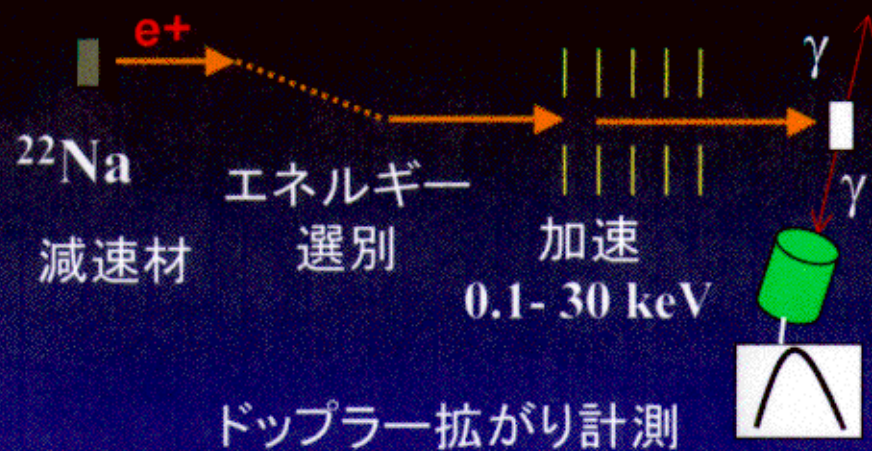
低速陽電子の消滅 → 表面近傍の欠陥構造

陽電子消滅誘起オージェ電子 → 表面元素分析

陽電子の表面全反射 → 最表面構造解析



原研における低速陽電子ビーム



陽電子回折法(RHEPD)の開発と応用

陽電子ビーム

e^+

10~100keV

静電レンズ

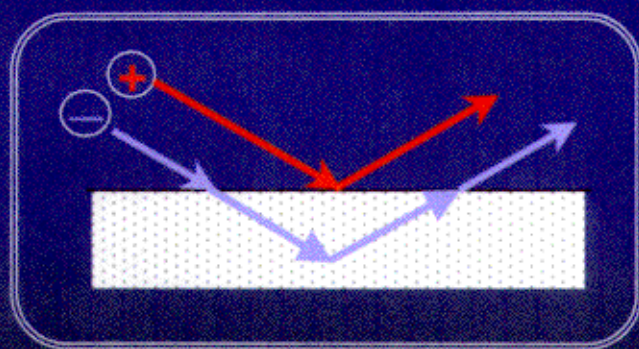
回折パターン

結晶

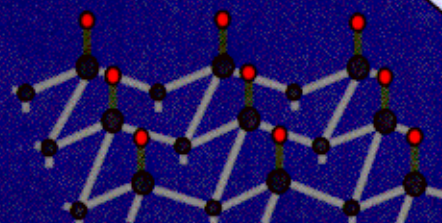
ロッキング曲線

角度

強度



“陽電子の全反射現象”



最表面原子配列
吸着原子層構造
表面デバイ温度
金属表面ダイポール障壁



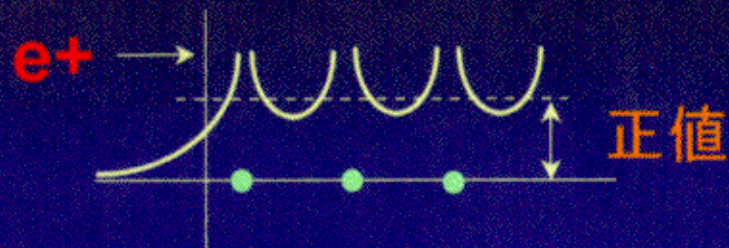
陽電子の全反射が起こる理由

ブラッグの式

$$E \sin^2 \theta = 37.5 n^2 / d^2 + eV_0$$

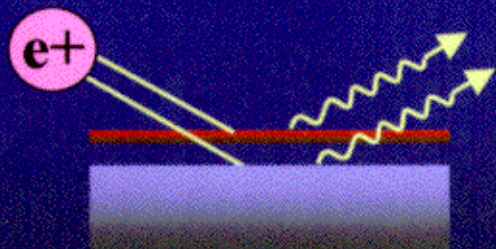
原子層間隔

結晶ポテンシャル



$E \sin^2 \theta > 0$ 一次ブラッグ反射

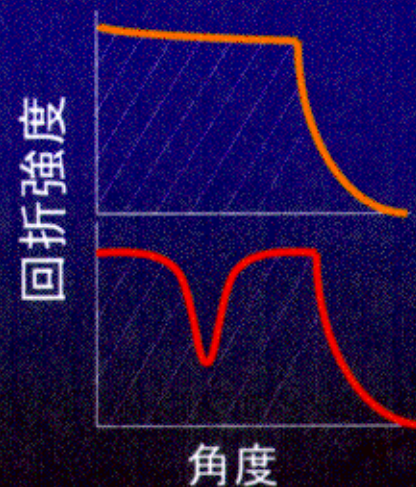
$E_{\perp}(E \sin^2 \theta) < eV_0$ 全反射



トンネル効果 +
量子干渉効果

理想平坦面 →

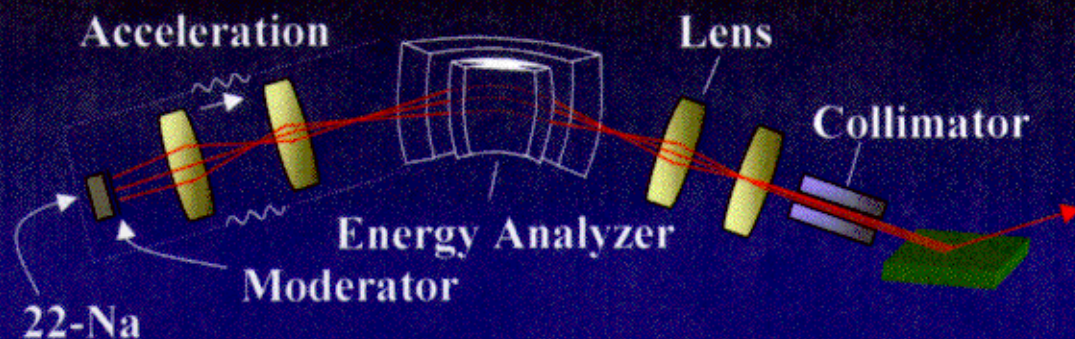
吸着層表面 →



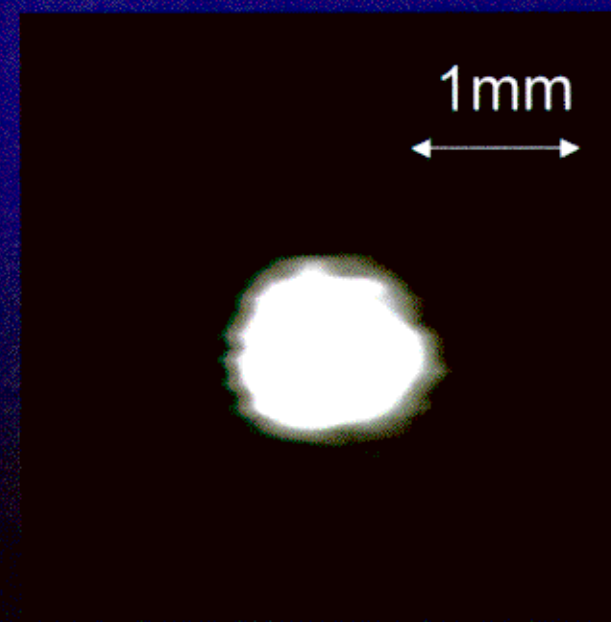
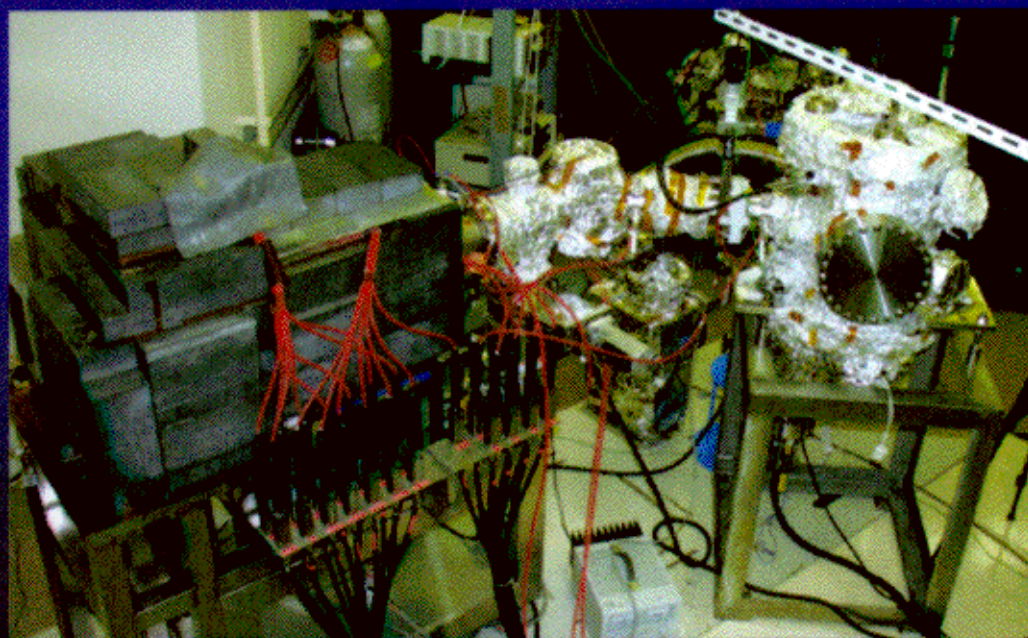
A. Ichimiya, Sol. Stat. Phen. 28&29 (1992/93)143.



第一世代のRHEPD装置開発 (1998~2002)



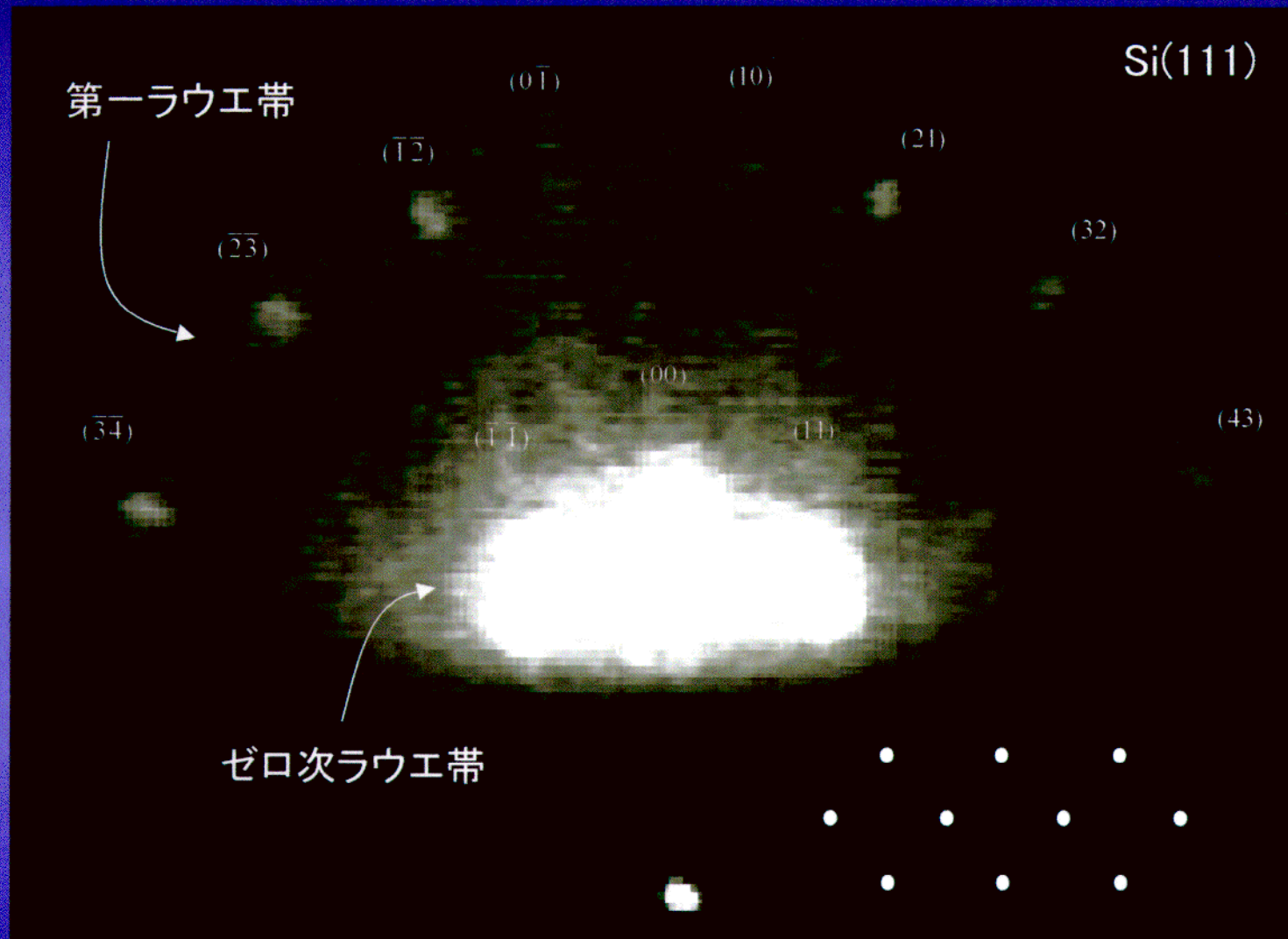
Source strength	370MBq
Energy, E	20keV
ΔE	< 0.1%
$\Delta\theta$	< 0.1°
Diameter	1mm
Intensity	2000e+/sec

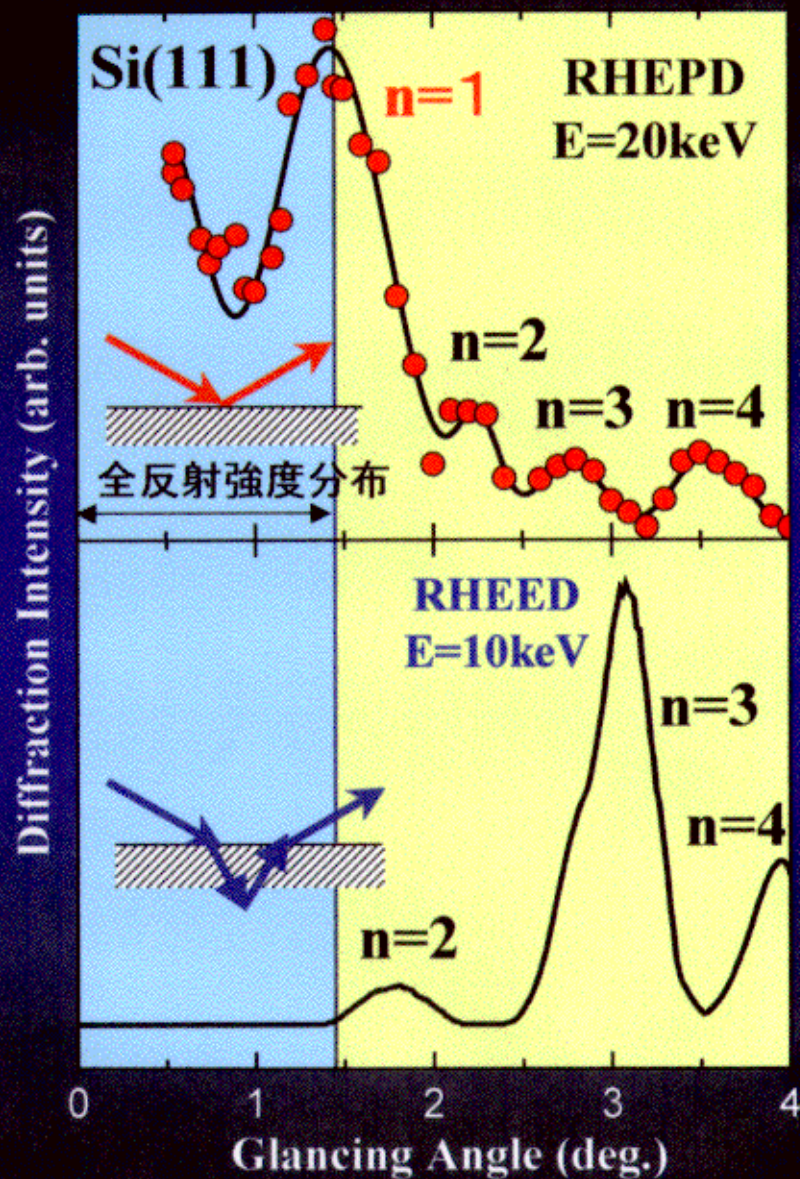


3時間→30秒に短縮



JAERI Takasaki Positron Research Laboratory

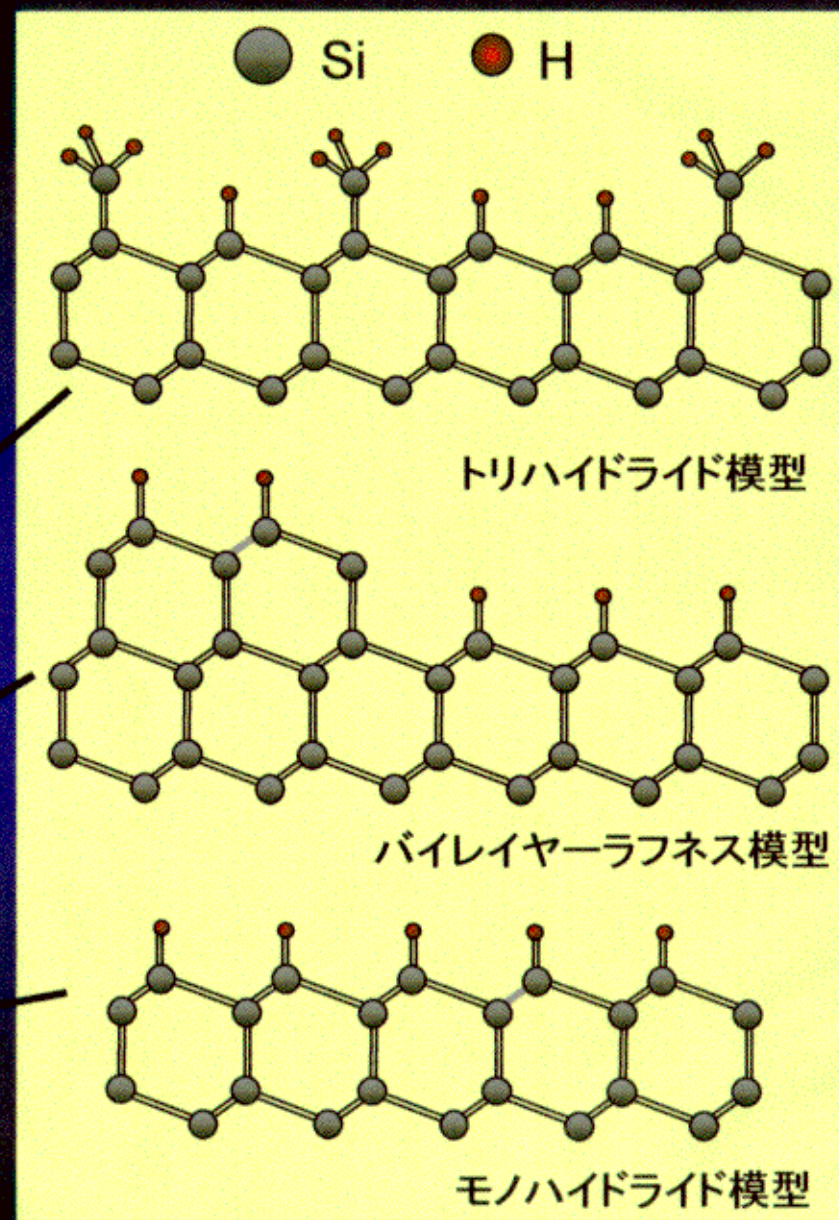
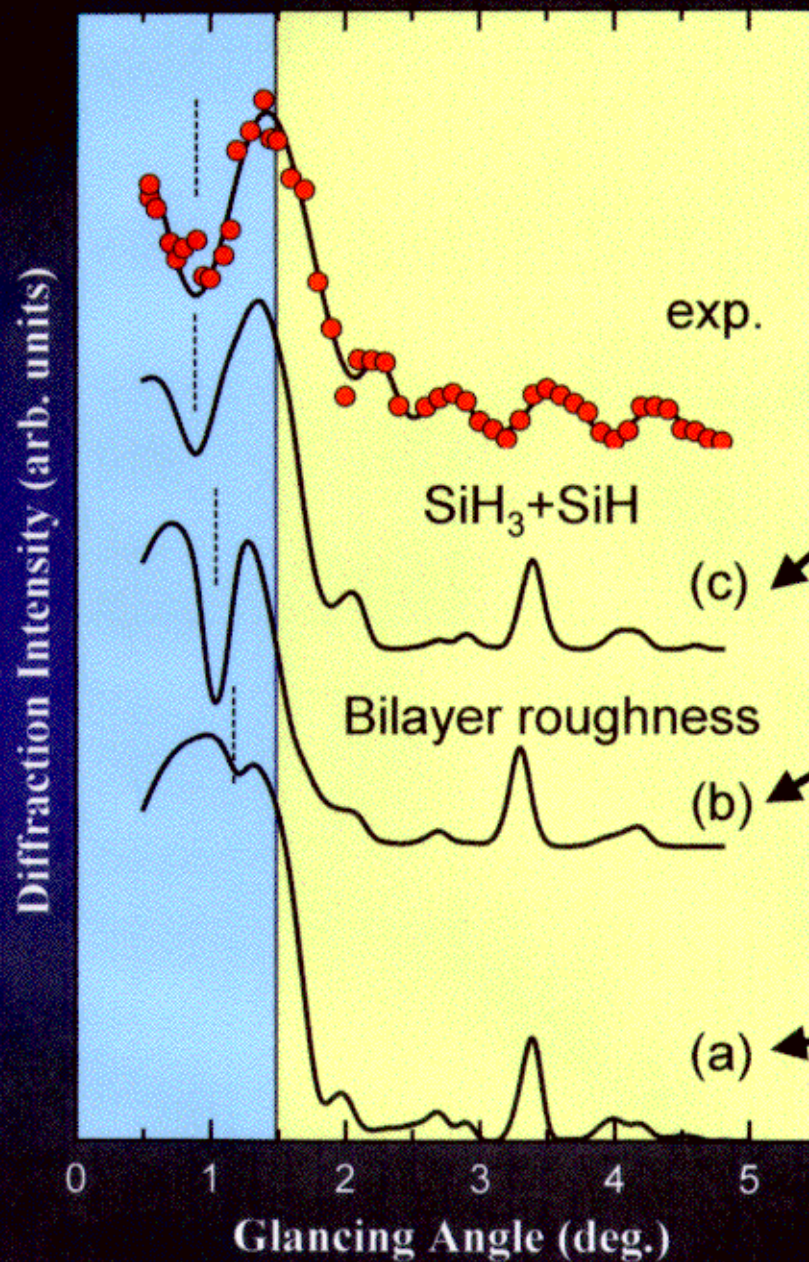




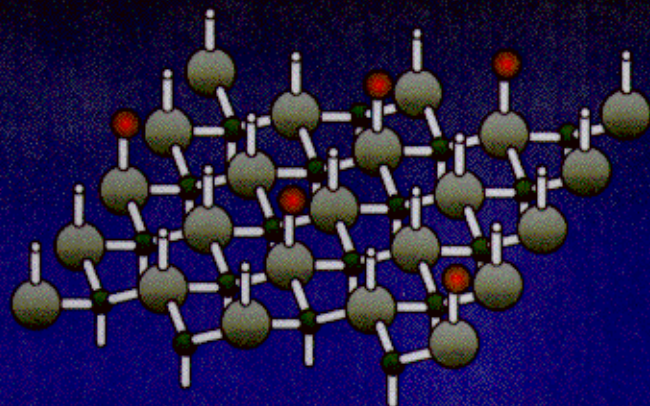
陽電子回折 vs 電子回折

全反射	○	×
n=1 反射	○	×
高次反射	○	○
表面周期性	○	○
表面敏感性	○	△
解析難易度	○	×
実験難易度	×	○





干渉効果の発現



動力学回折理論の計算

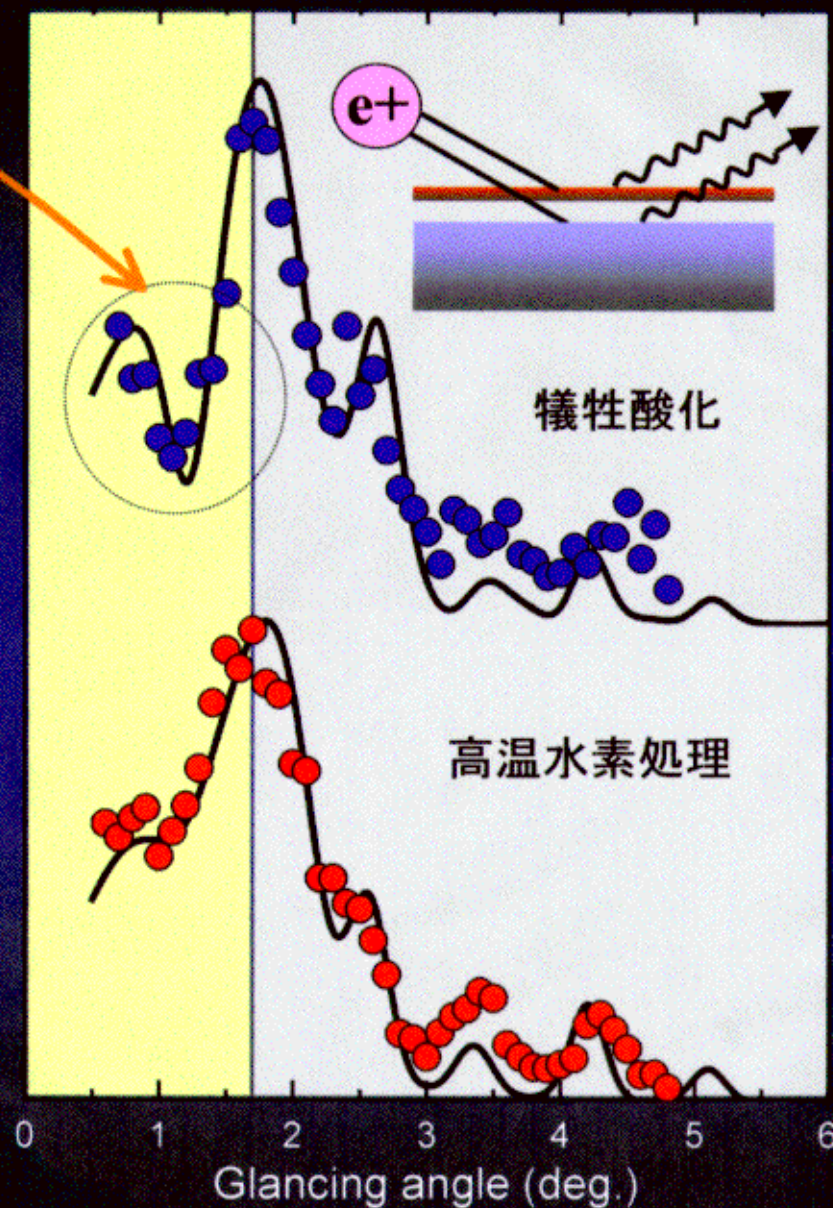
Si-O 結合長 $\sim 1.89\text{\AA}$
(LEED研究 $1.67\text{\AA}$)

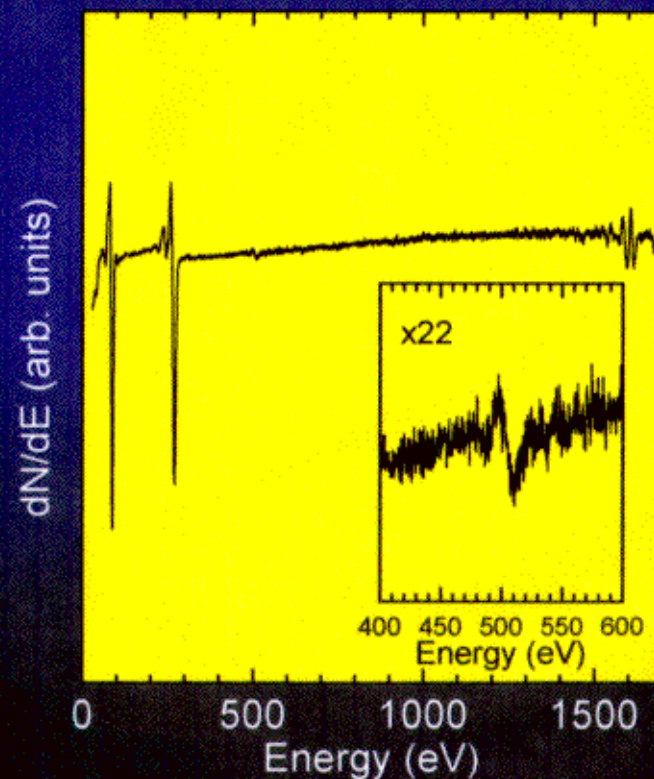
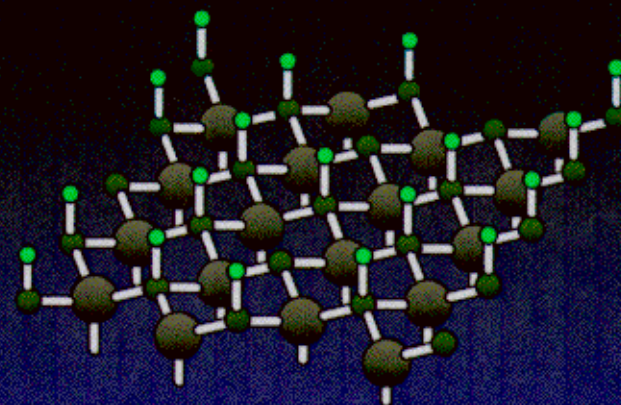
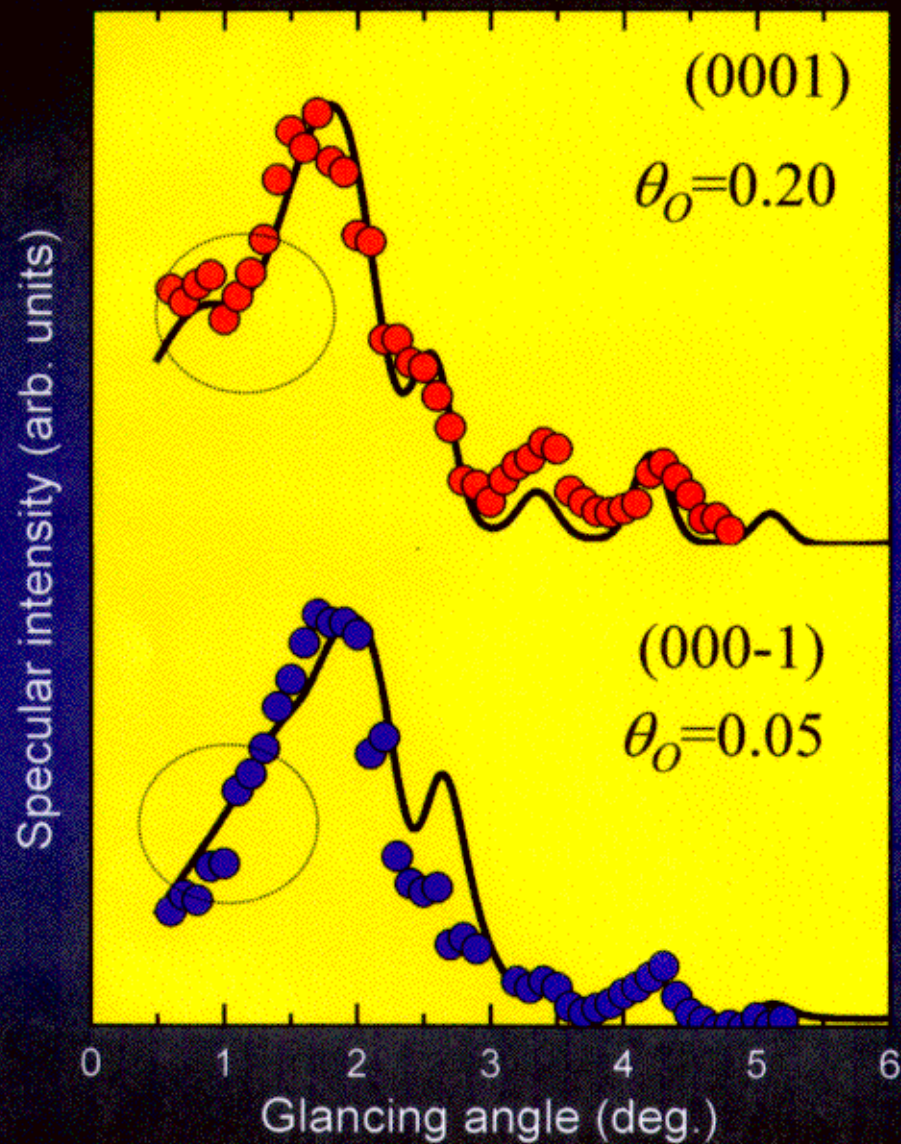
酸素被覆率 ...

0.5-0.7 (犠牲酸化)

0.2-0.3 (高温水素処理)

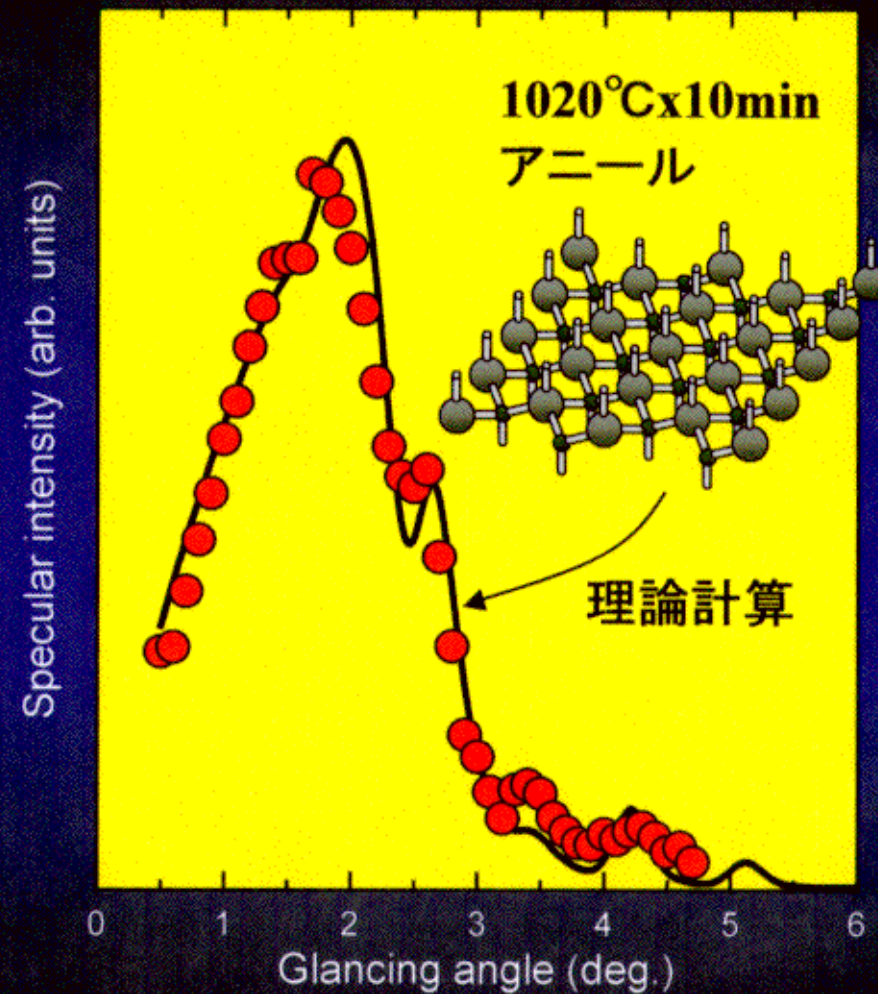
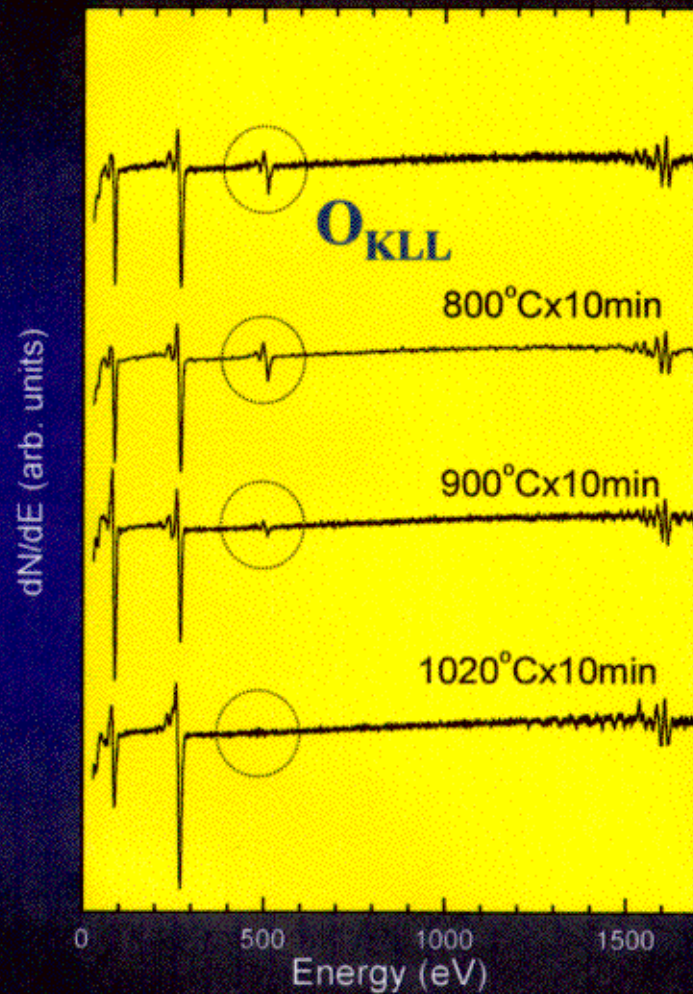
Diffraction intensity (arb. units)





JAERI Takasaki Positron Research Laboratory

熱処理による酸素原子の除去効果

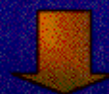


陽電子ビーム技術 ⇒ 内部から最表面の物性研究
局所領域の構造



陽電子顕微技術
マイクロプローブ

陽電子消滅 陽電子回折 消滅誘起組成分析



材料・デバイスの劣化過程や
最表面原子構造を
選択的かつミクロに解明



共同研究者：前川雅樹、石本貴幸、伊藤久義、吉川正人
陳志権、岡田漱平（以上原研）
一宮彪彦（名古屋大）

