



トンネル分光概説

原理、応用例、可能性、実験技術

@サイエンス研究会

2021/9/28

林

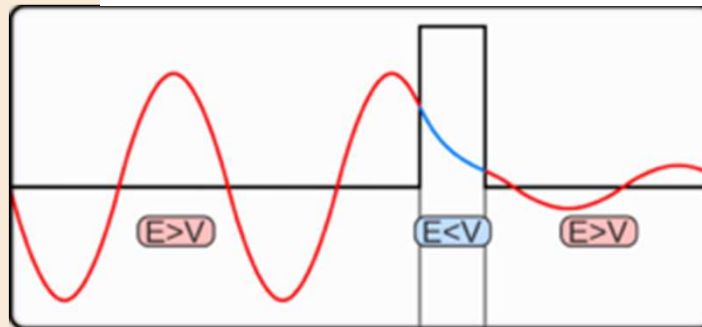
要旨

- **1: 原理、表式**
- **2: 実験技術、微分回路(harmonic detection)**
- **3: 他の物性測定への展開**
- **4: 応用・可能性/Elastic Tunneling**
- **5: 応用・可能性/In-Elastic Tunneling**
- **6: 応用・可能性/ 表面分析**
- **7: References**

透過係数

- 時間非依存一次元シュレディンガー方程式

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \Psi(x) + V(x)\Psi(x) = E\Psi(x)$$



バリア前後で波数(エネルギー)は変わらないが
確率振幅は減少する

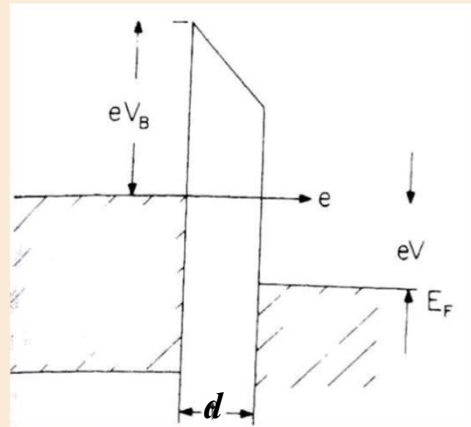
- 透過係数

$$T(E) = e^{-2\sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}(V_0 - E)}(x_2 - x_1)} = \bar{V}_0^{-(x_2 - x_1)}$$

トンネル電流の表現式

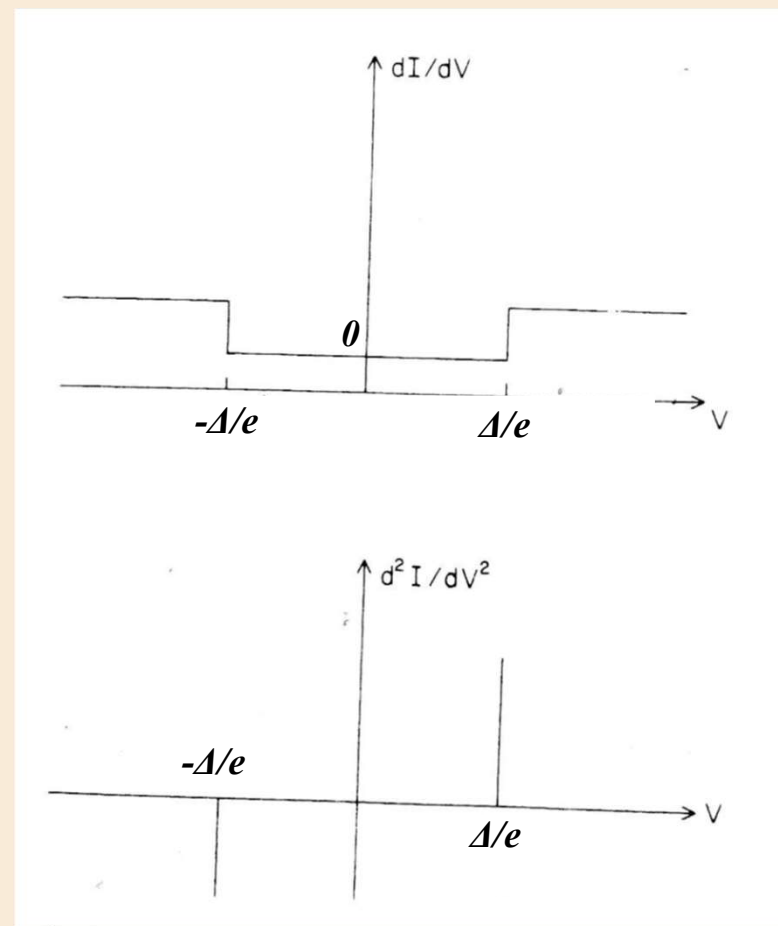
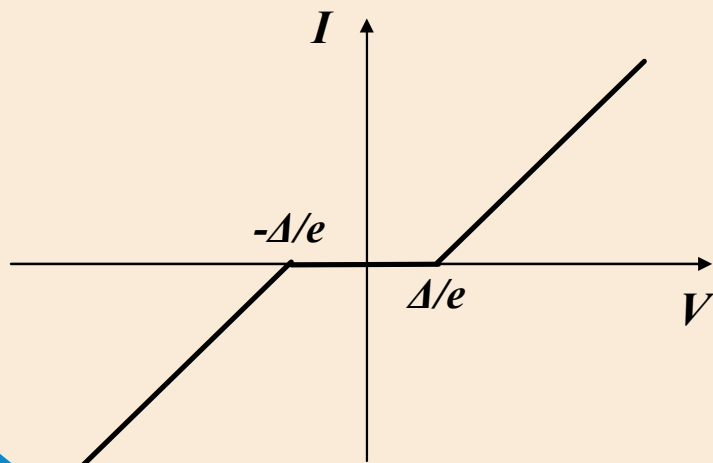
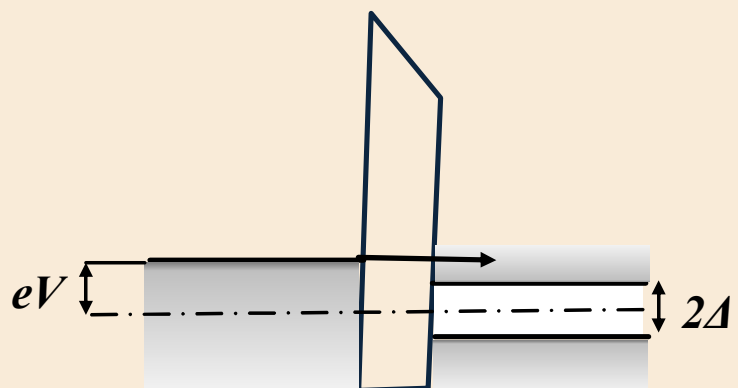
- トンネル電流: I

$$I = \int_0^{eV} T(E) N_1(E) f_1(E) N_2(E) \{1 - f_2(E)\} dE$$

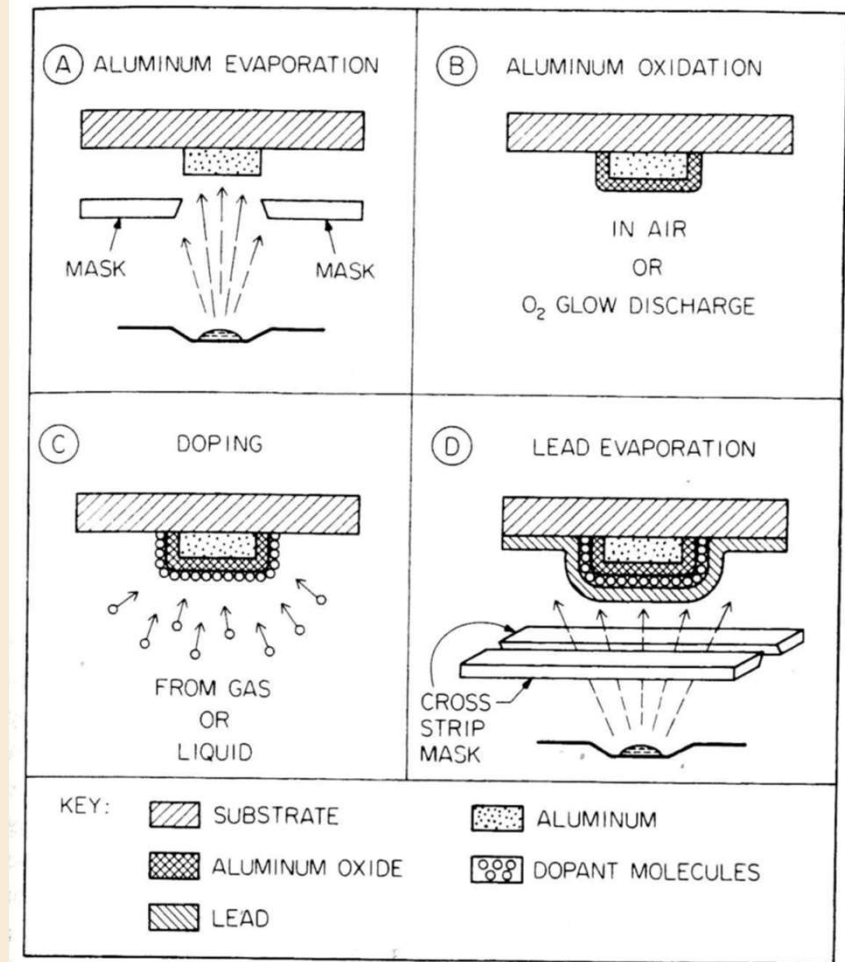
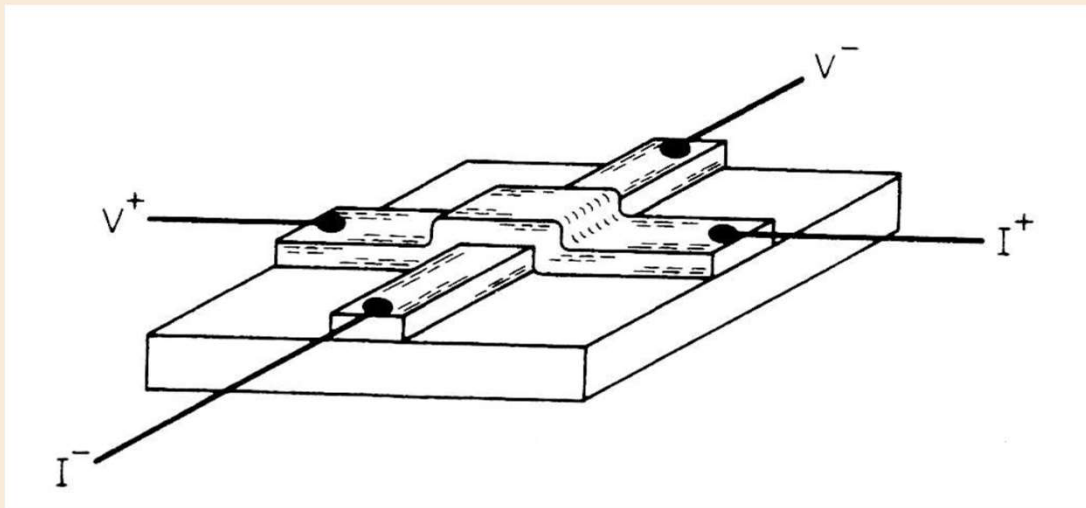


- $I \propto N_1 * N_2$ N_1, N_2 : 電極両サイドの状態密度
- $\propto \exp(-d)$ d : バリア厚み \Rightarrow 走査トンネル顕微鏡の原理

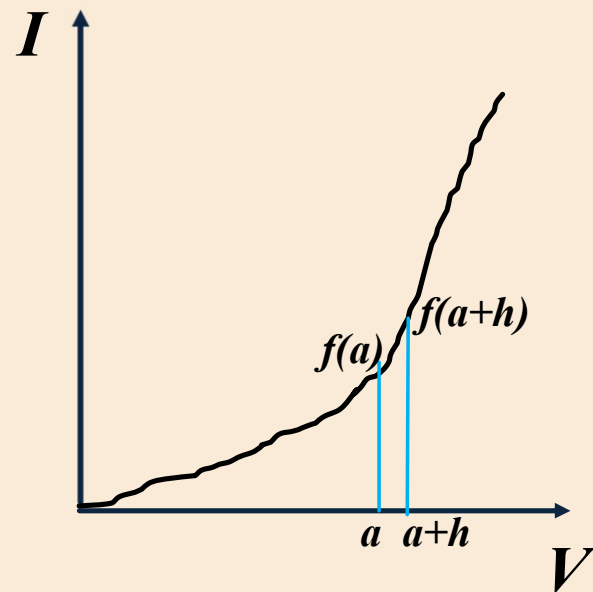
Elastic Tunneling 模式図 & I-V特性



トンネル接合の構造と作製方法



一次微分、二次微分測定 (harmonic detection technique)



$$I = f(V)$$

$$I_{(a+h)} = f(a) + hf'(a) + \frac{1}{2}h^2 f''(a) + \dots$$

$$h = \delta \sin \omega t$$

$$I_{(a+h)} = f(a) + \delta \sin \omega t f'(a) + \frac{1}{2} \delta^2 \sin^2 \omega t f''(a) + \dots$$

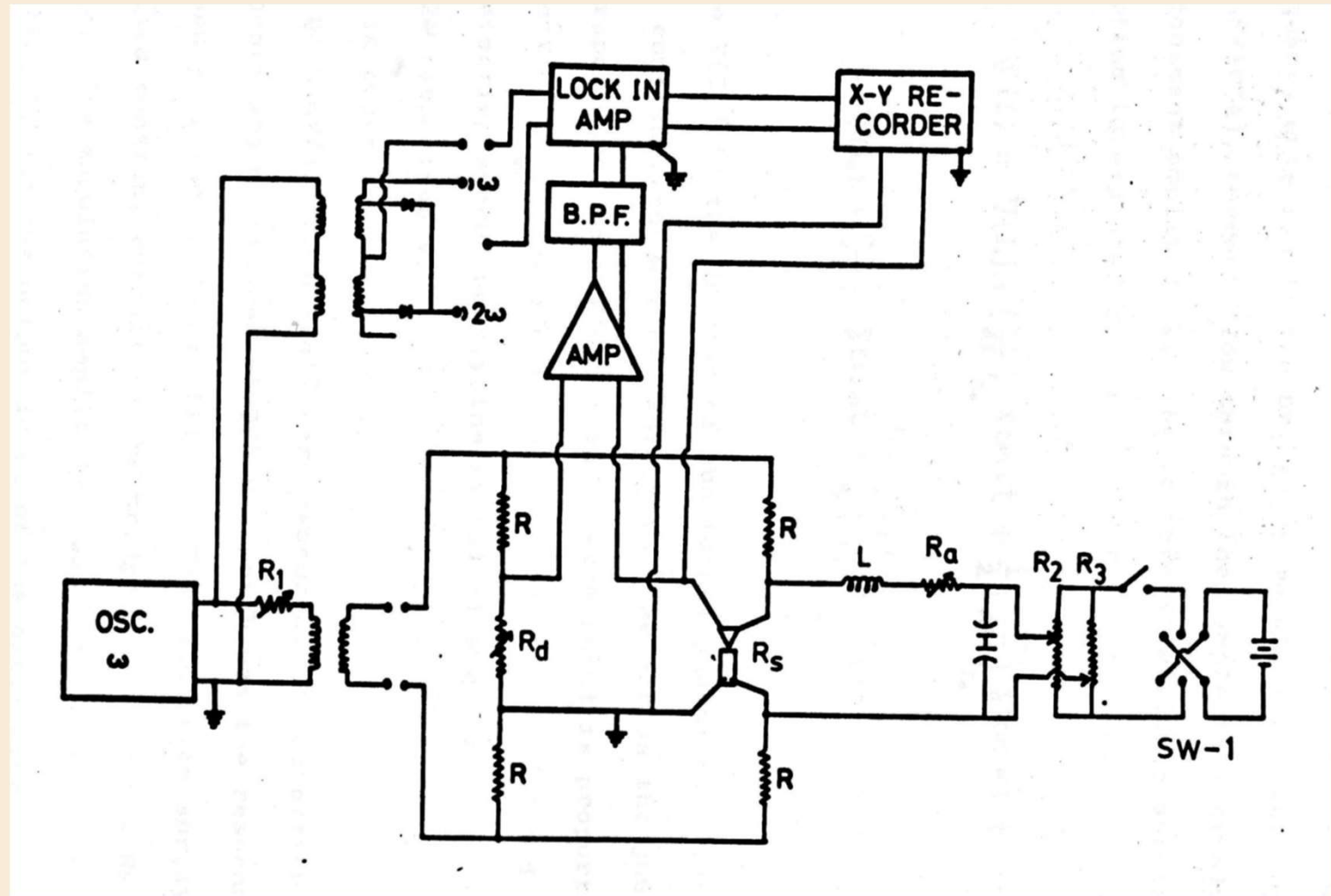
$$I_{(a+h)} = C + \delta \sin \omega t f'(a) - \frac{1}{4} \delta^2 \cos 2\omega t f''(a)$$

$$\omega \text{ 成分} \propto f'(a) = dI/dV$$

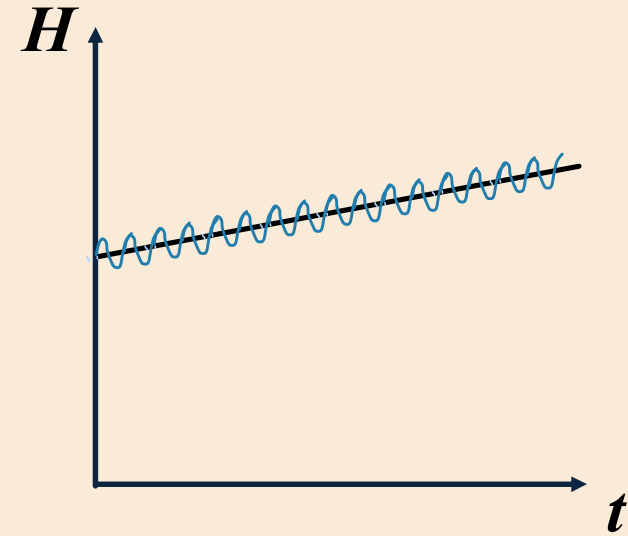
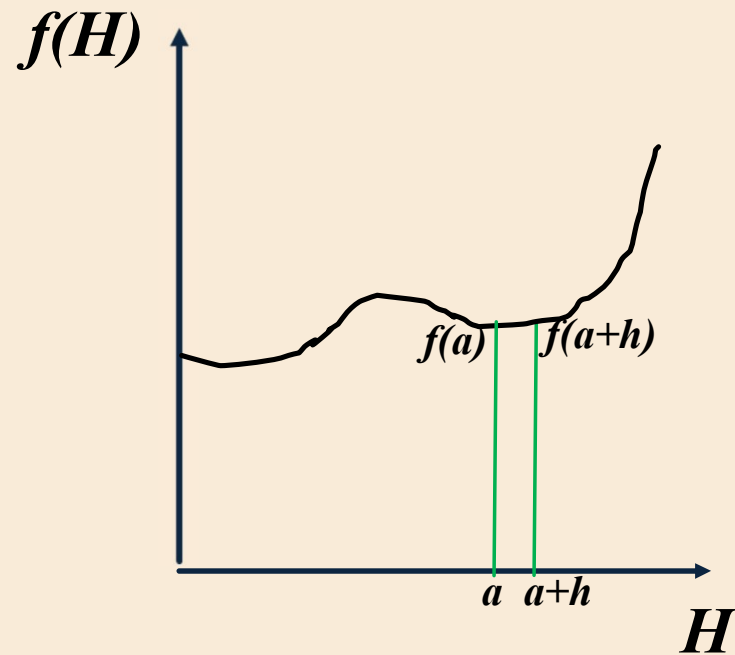
$$2\omega \text{ 成分} \propto f''(a) = d^2I/dV^2$$

Ref.3

一次微分、二次微分測定回路



同一テクニックの適用例 (1)

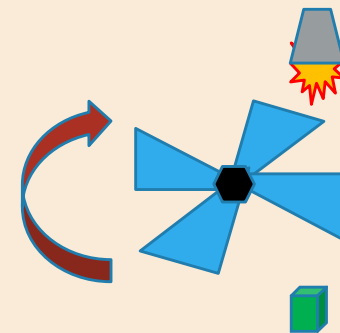
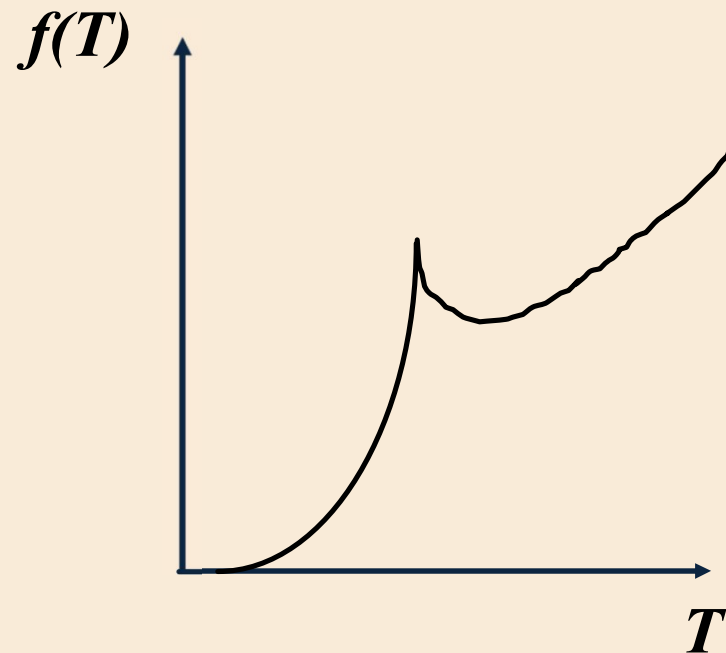


主磁場をスイープしながら周波数 ω の微小振幅交流磁場を重畳する

$$\omega \text{ 成分} \propto df/dH$$
$$2\omega \text{ 成分} \propto d^2f/dH^2$$

同一テクニックの適用例 (2)

ACカロリメトリー



サンプル温度をスイープしながら周波数 ω で微小加熱を行う。

$$\omega \text{成分} \propto df/dT$$

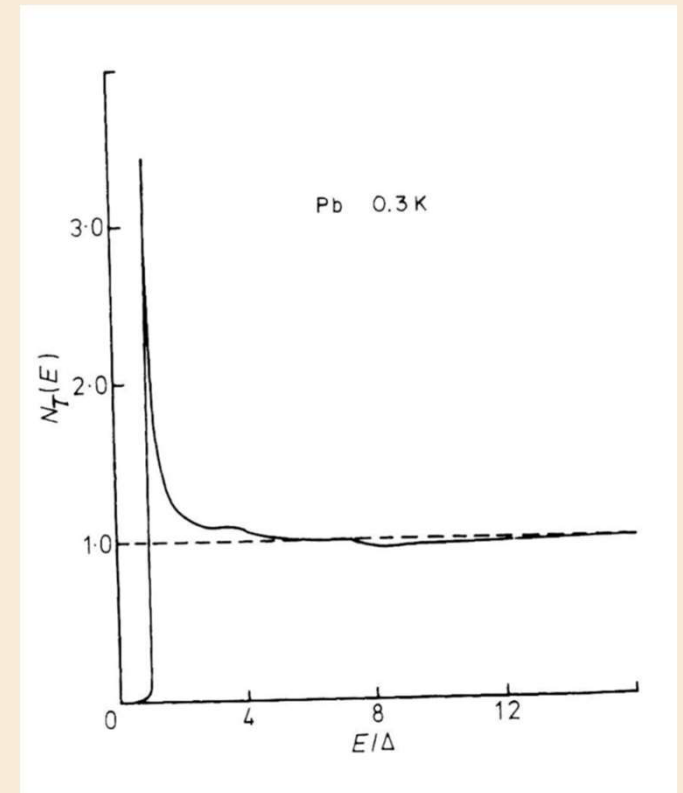
$$2\omega \text{成分} \propto d^2f/dT^2$$

Elastic Electron Tunneling の適用例

準粒子ギャップ、状態密度観測

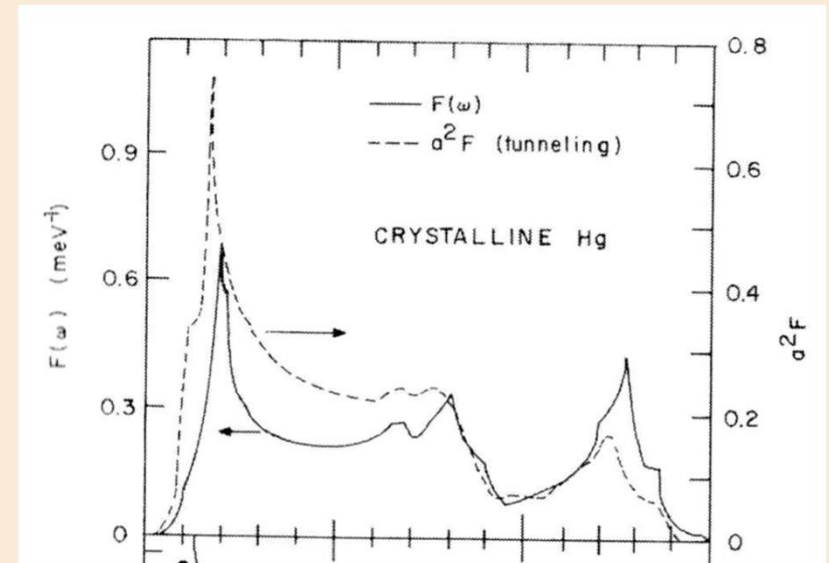
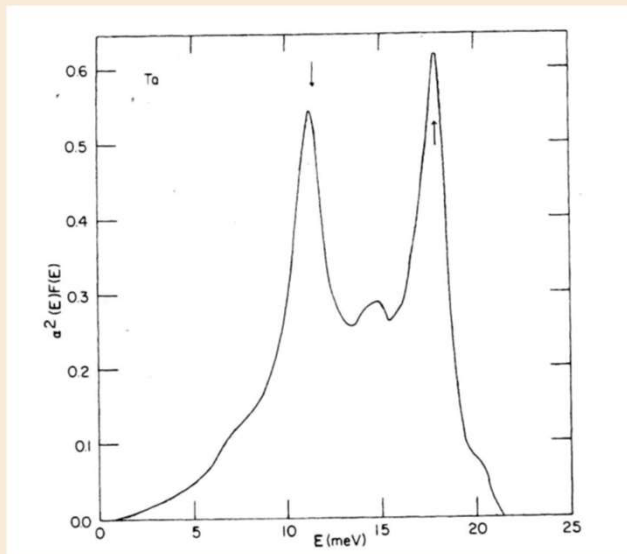
$$N(E) = \text{Re} \left\{ \frac{E}{\sqrt{E^2 - \Delta^2(E)}} \right\}$$

Ref.4, 5



Elastic Electron Tunneling の適用例

クーパーペア結合因子の導出



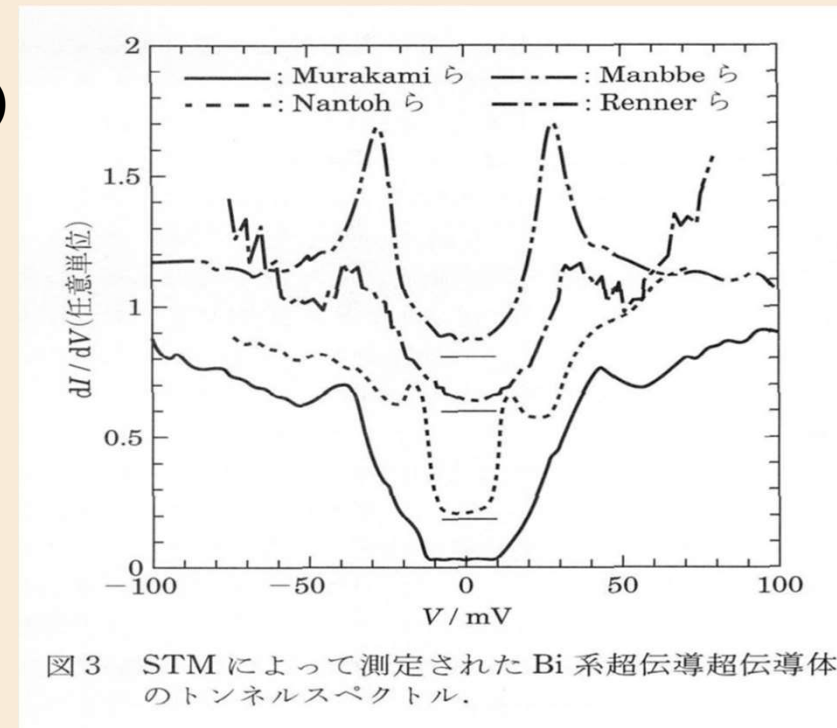
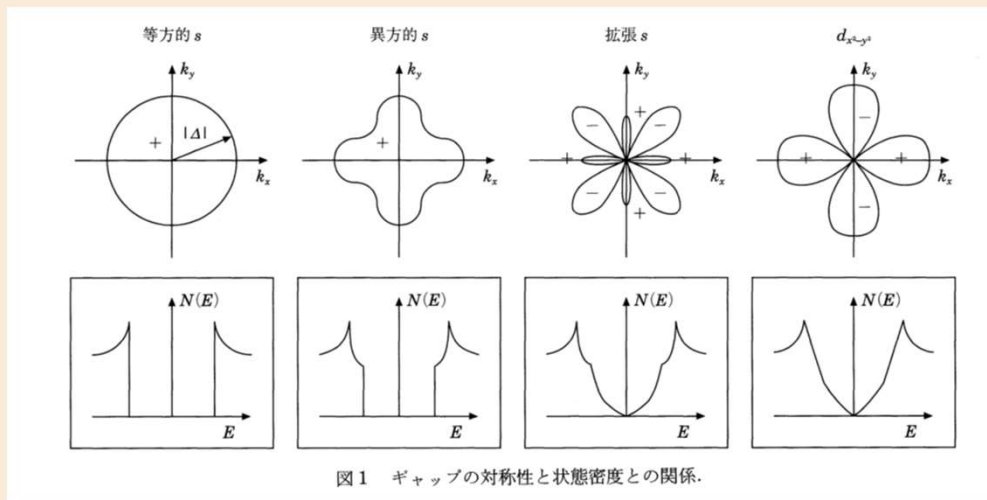
- 前ページのgap観測とこのデータをもってBCS理論が実証された。
- すなわち、二つの電子がクーパーペアを形成していること。電子間の相互作用媒介因子は音響フォノンであること。

Ref.4,5

HTSのメカニズム、結合因子？

未だ確定的な証拠無し

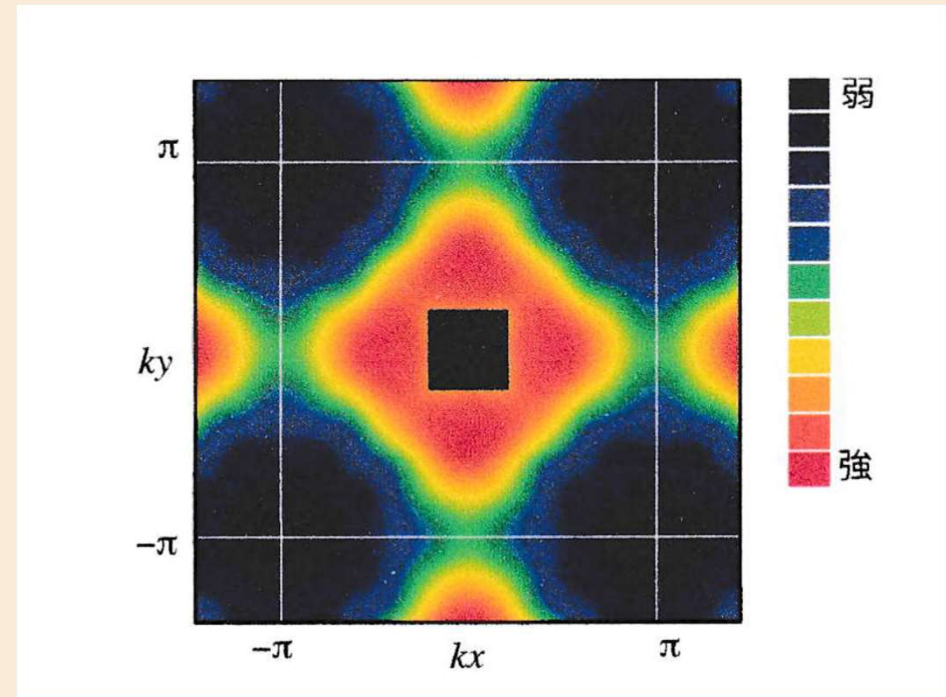
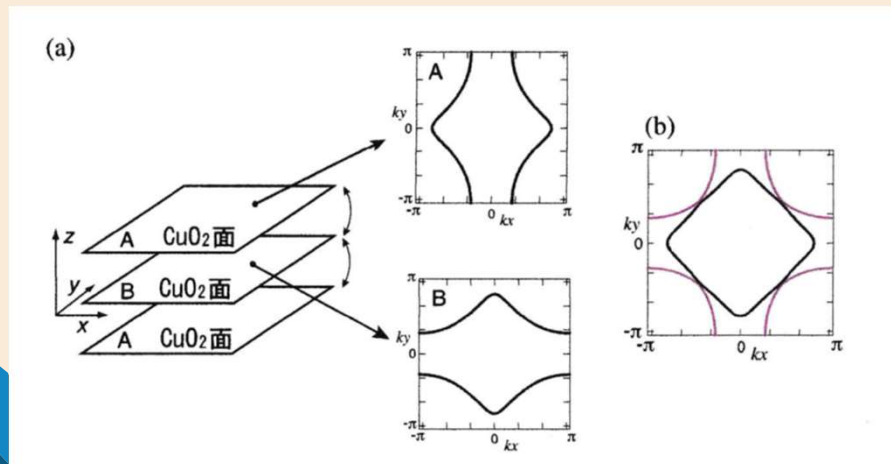
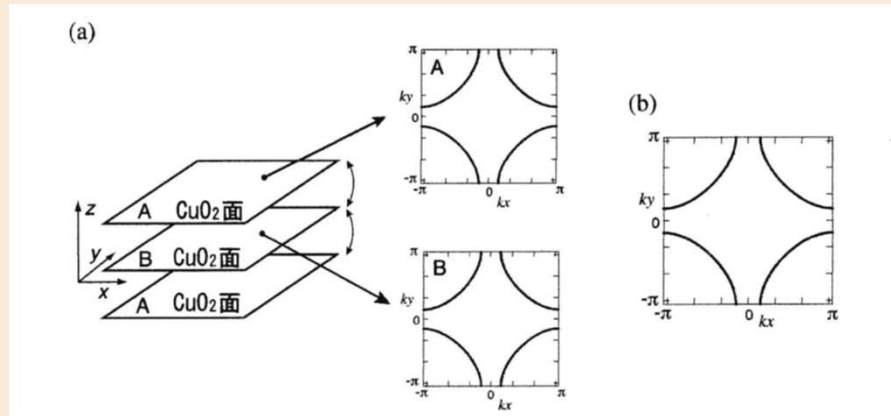
- 測定者によって異なるデータ
- 二次元結晶、結晶面・方位を特定した測定が困難。
- 従来超電導：等方的(S波) ⇔ HTS：異方的(d波)



Ref.6

HTSのメカニズム、結合因子？

- 今年4月の発表⇒ 1次元の重ね合わせ、2重のフェルミ面

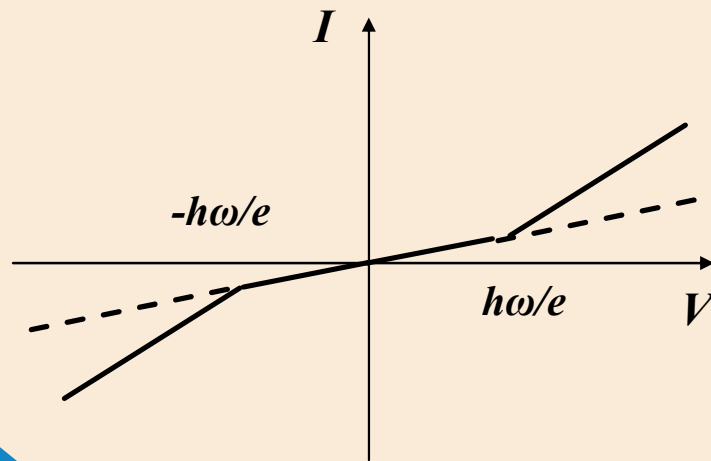
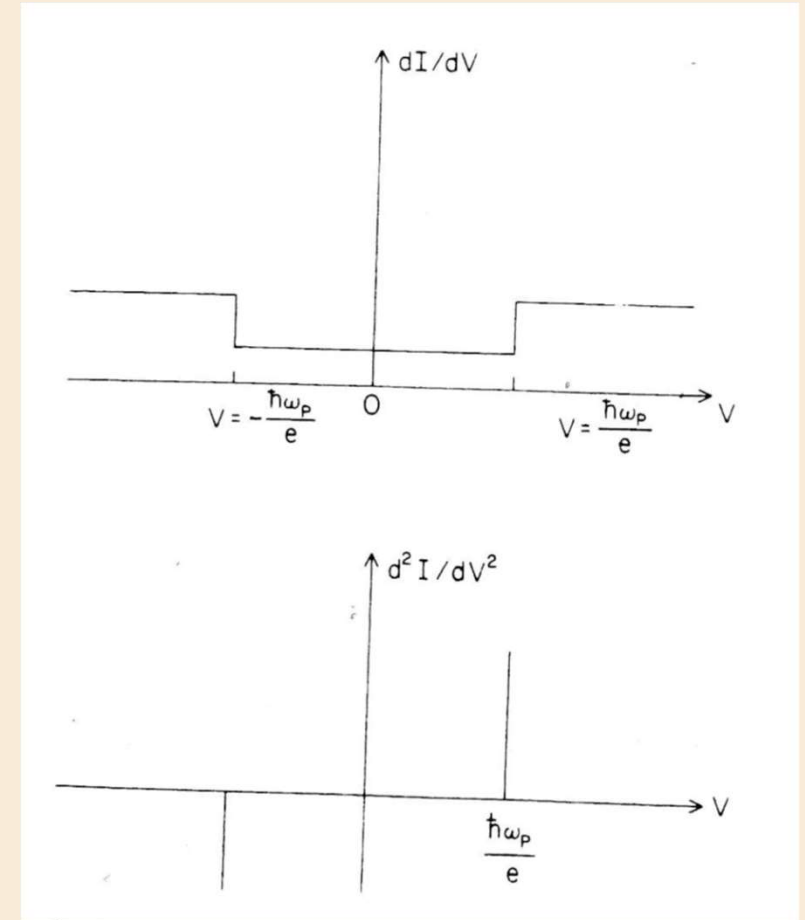
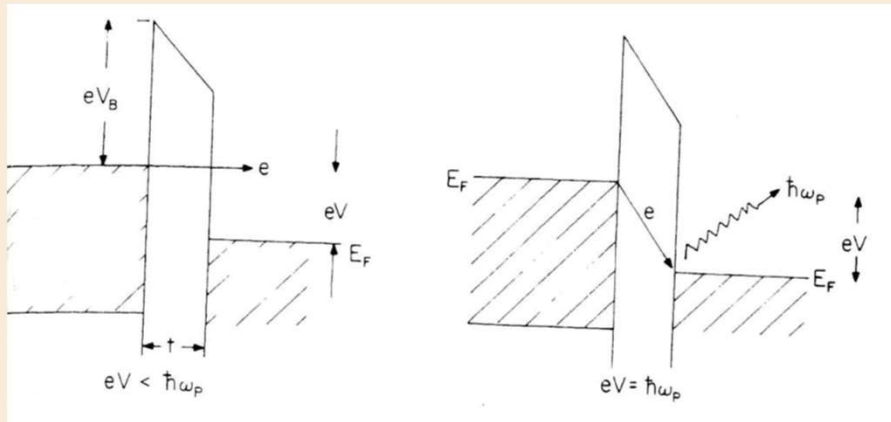


コンプトン散乱実験で観測された
電子の運動量分布

Ref.7

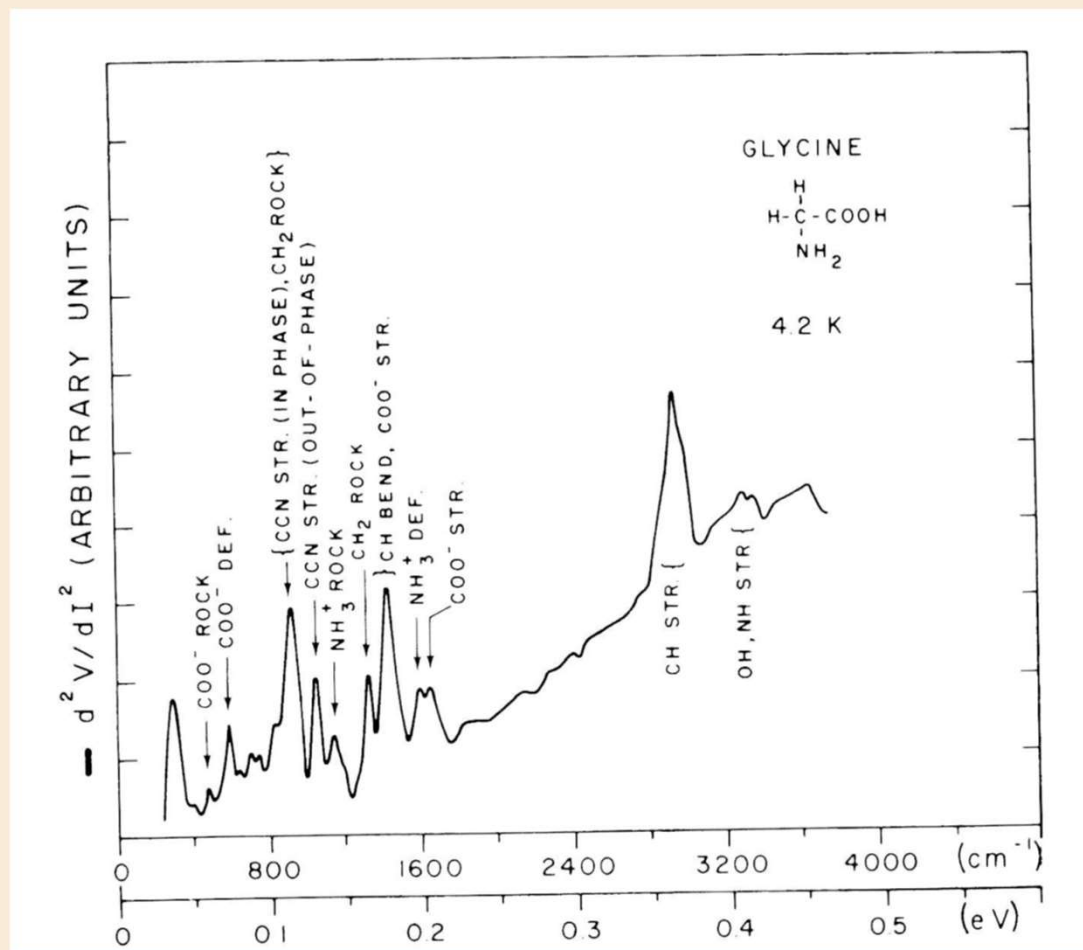
In-Elastic Electron Tunneling

模式図 & I-V特性



In-Elastic Electron Tunneling の適用例

界面有機物の検出



結合モードの特定

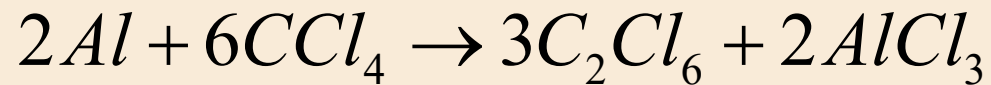


含有分子の推定

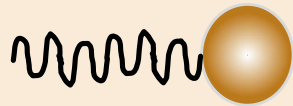
In-Elastic Electron Tunneling の適用例

界面腐食の調査

有るだけ \Leftrightarrow 反応・結合 の区別

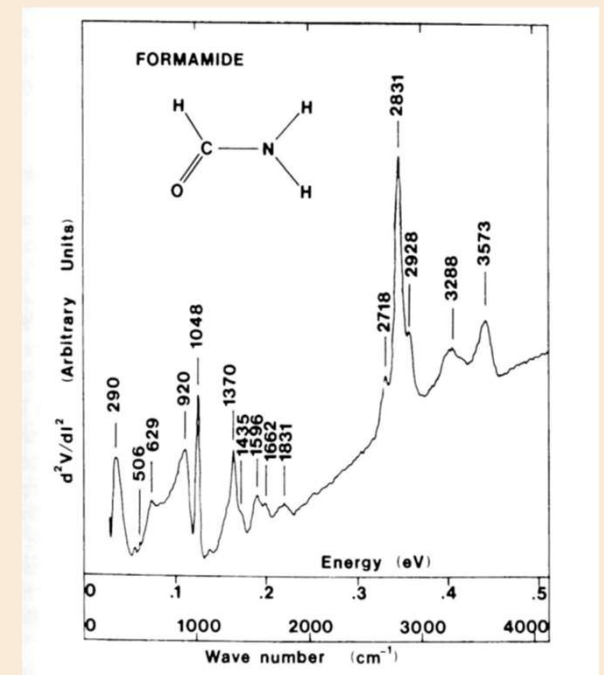
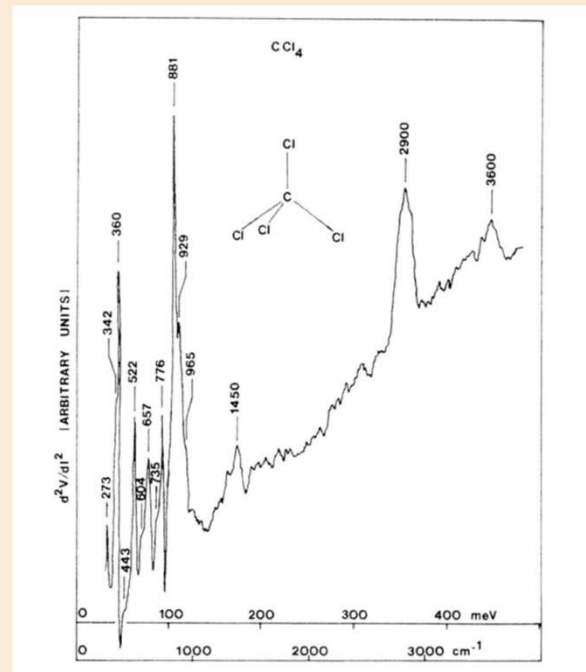
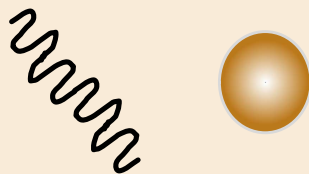


結合

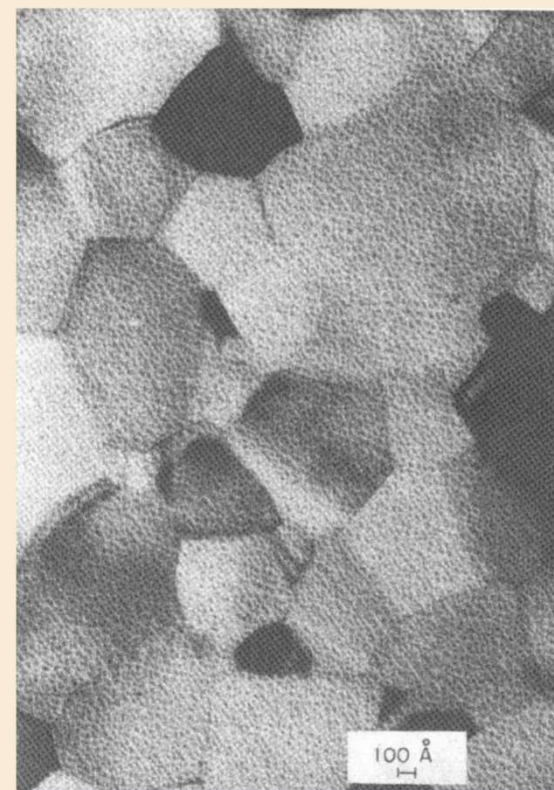
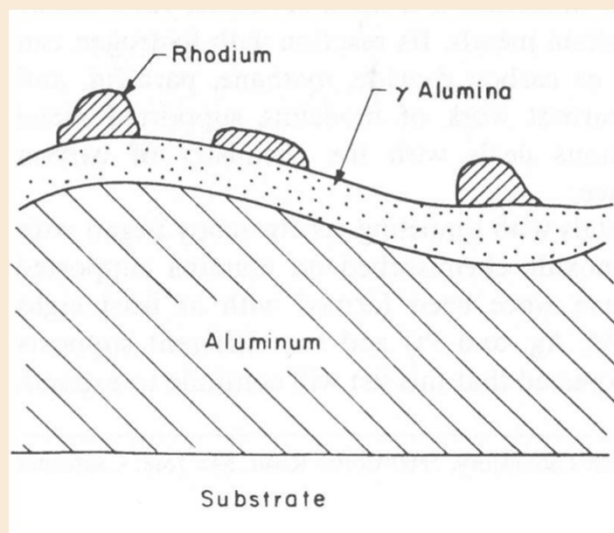


$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

非結合



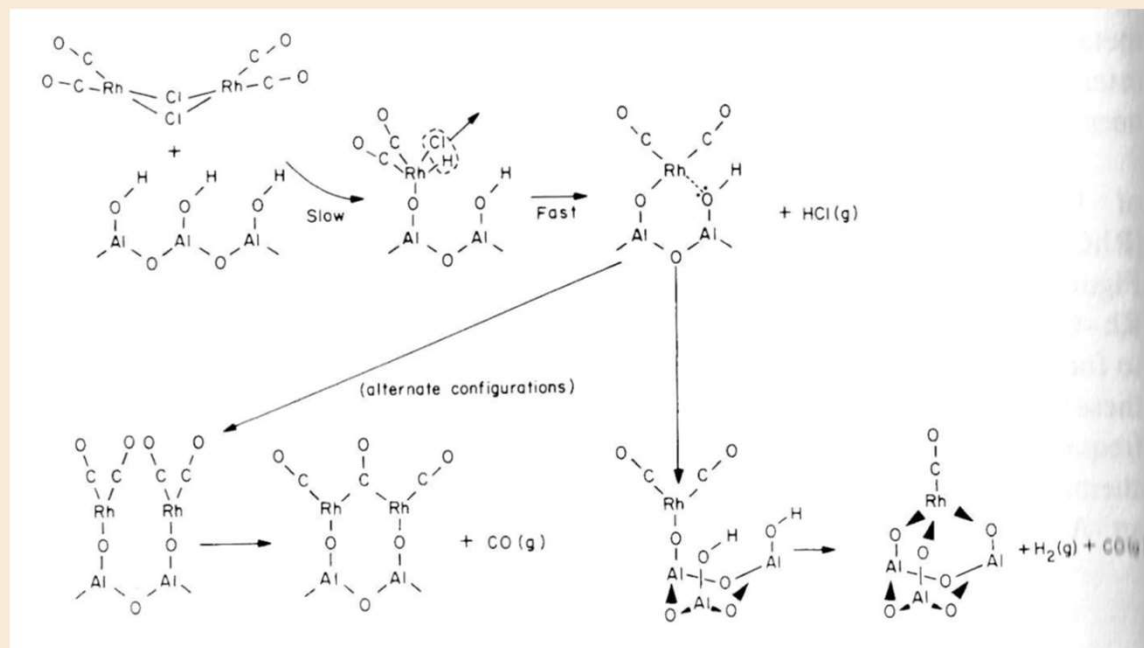
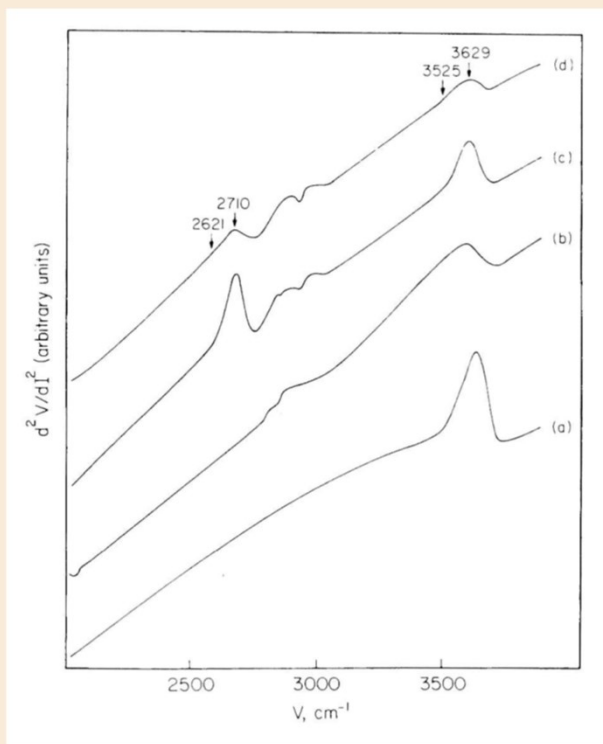
In-Elastic Electron Tunneling の適用例 触媒の調査



***Cl*とは結合したままなのか？ *Al*とは？**

In-Elastic Electron Tunneling の適用例

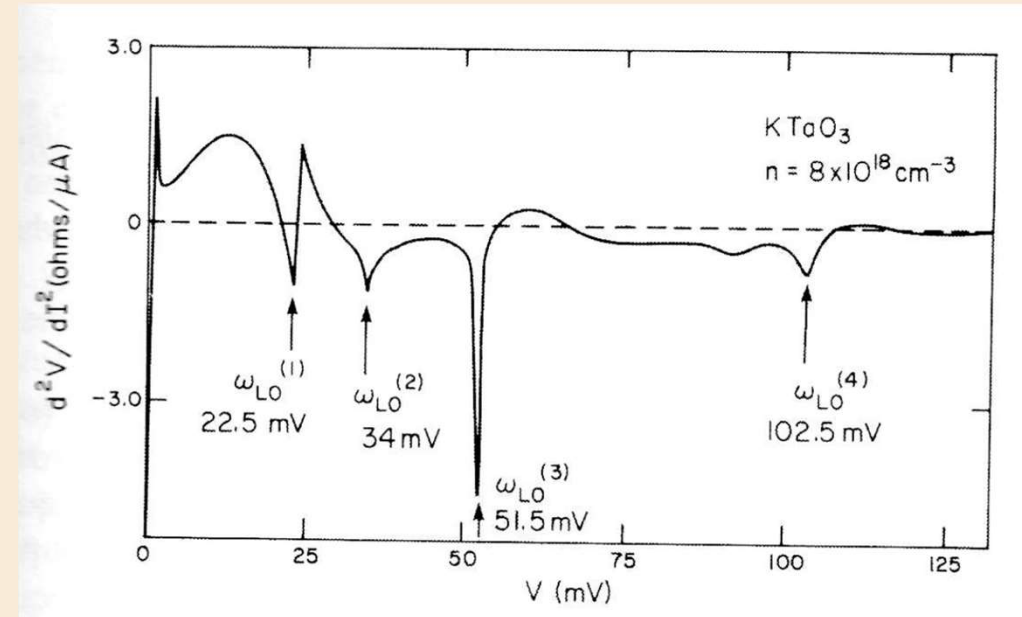
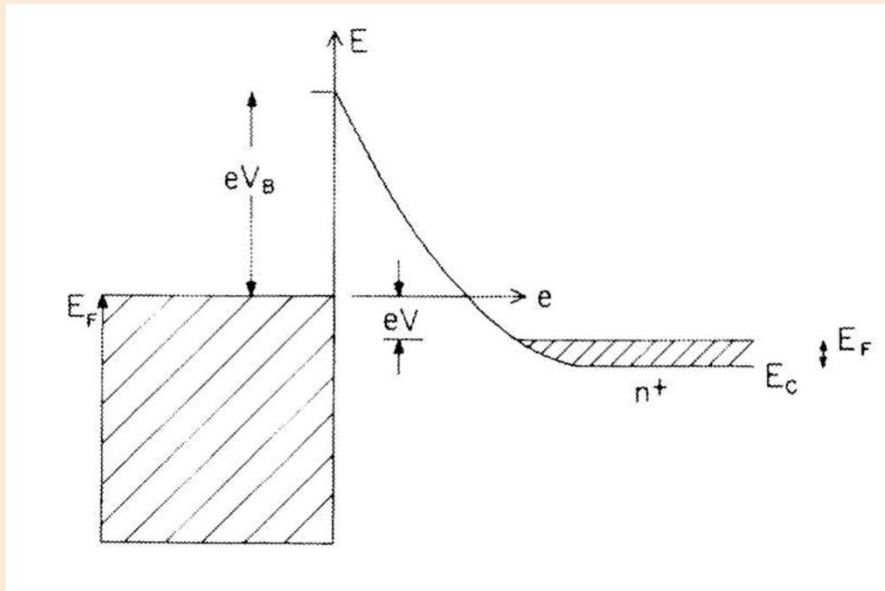
触媒の調査



Cl とは解離 Al とは O を介して結合

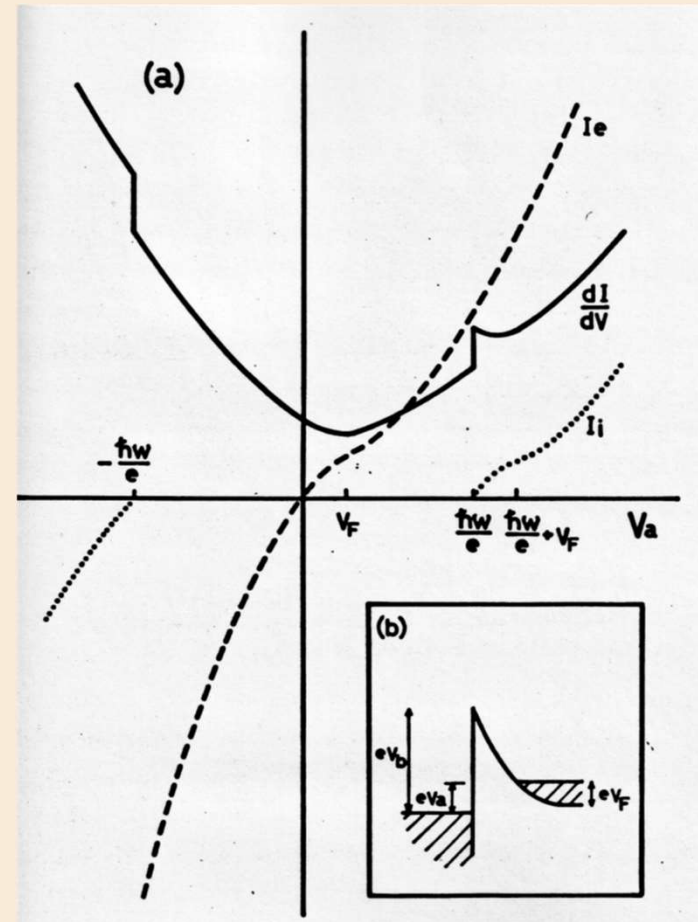
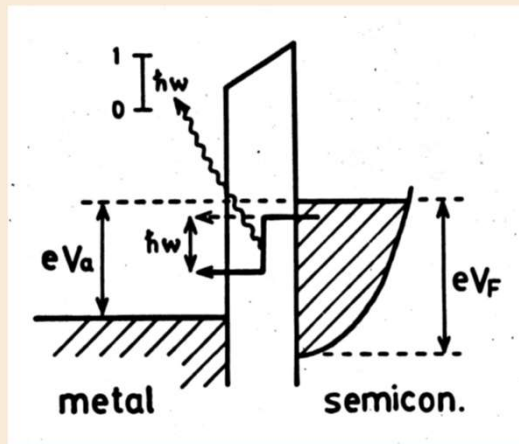
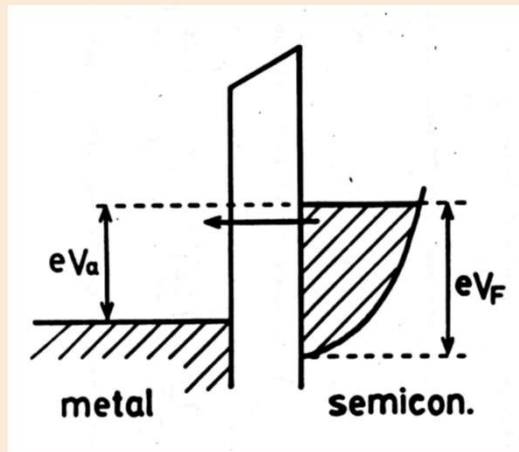
In-Elastic Electron Tunneling の適用例

バリア内フォンの検出



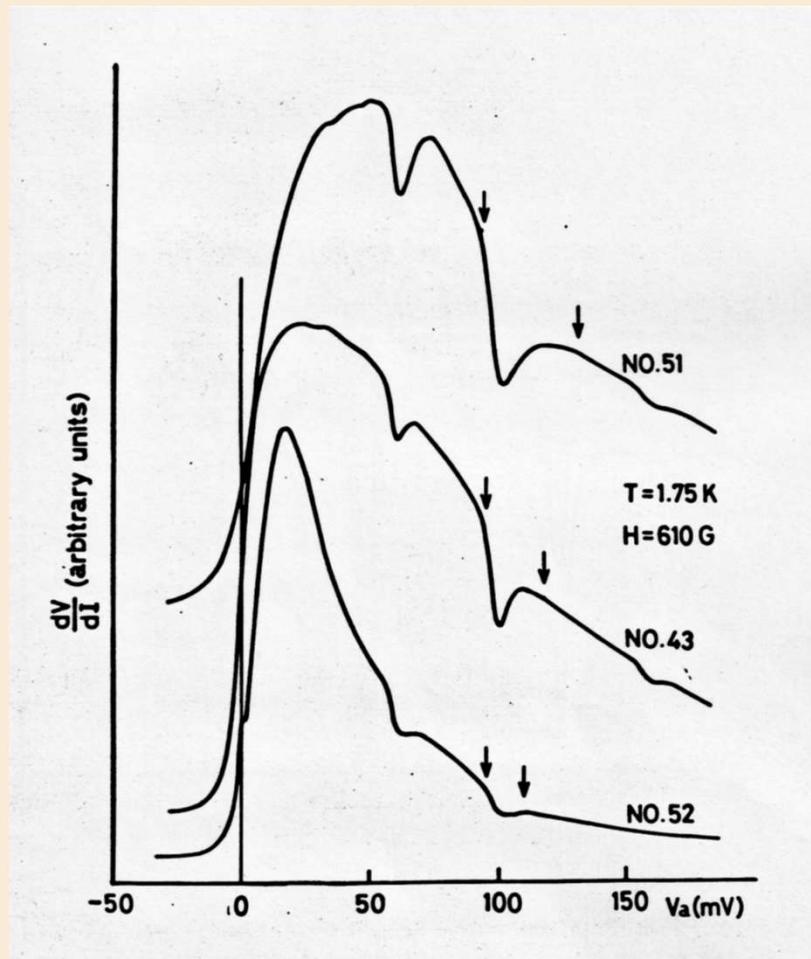
In-Elastic Electron Tunneling の適用例

LO/TOフォノン媒介による電子状態測定の高精度化



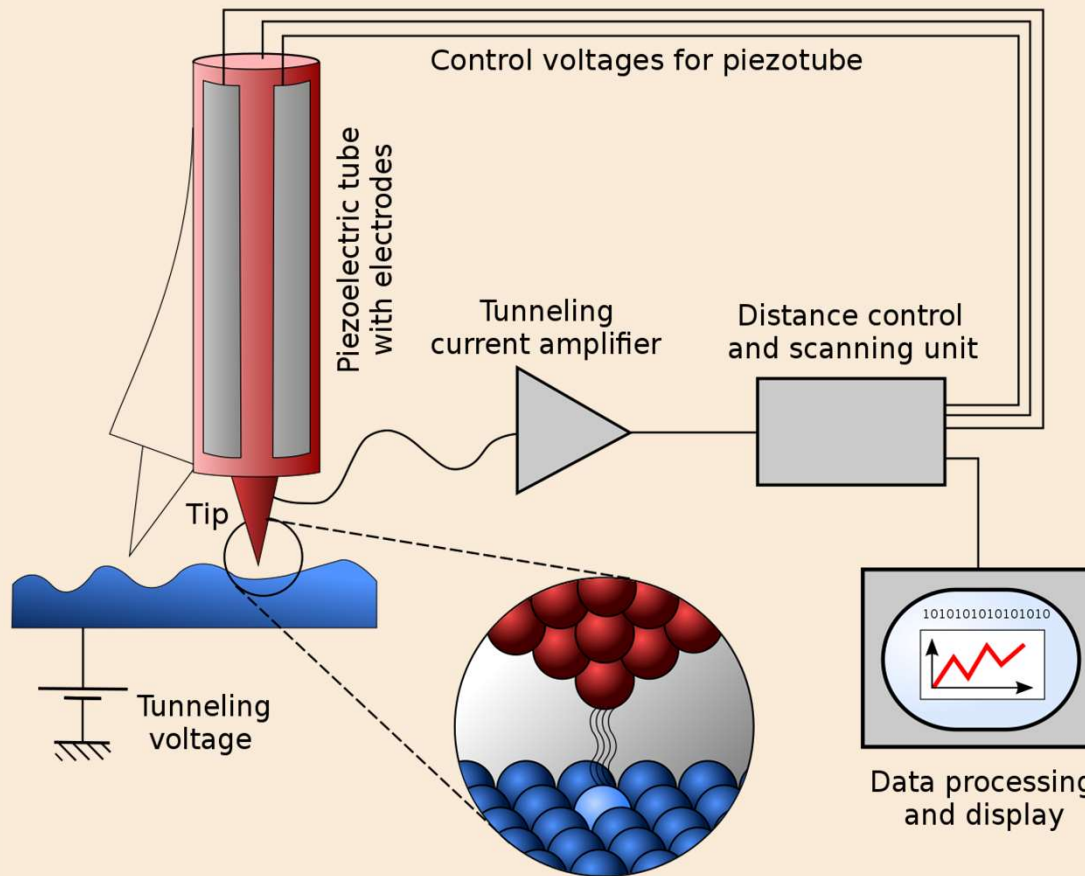
In-Elastic Electron Tunneling の適用例

LO/TOフォノン媒介による電子状態測定の高精度化



sample	n (cm^{-3})	V_F (計算値)	凹み幅 (実測)
NO. 51	3.0×10^{20}	44 mV	40 mV
NO. 43	3.6×10^{19}	23 mV	24 mV
NO. 52	2.1×10^{19}	16 mV	16 mV

走査型トンネル分光・顕微鏡

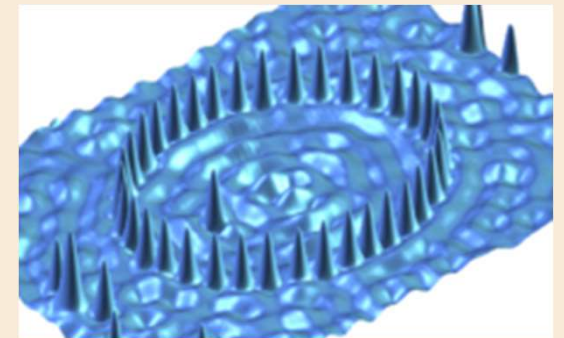


試料と探針の間のトンネル電流が一定になるようにピエゾ素子を使って探針を収縮させる

⇒

凹凸データとして画像化

K.Binnig and Roller
1986年ノーベル賞



Ref.9

ついでに

IBM Research Lab. Zurich (1956設立)

Rohrer グループ

Rohrer

- ・ 表面科学、ナノサイエンスの大御所

Binnig

- ・ 若い頃は**SrTiO₃**の超電導をトンネル効果を用いて研究⇒ **Ref.8 (1974)**
- ・ **STM**の発見・発明⇒ **Ref.9 (1982)**
Binnig & Rohrer⇒ノーベル賞(1986)

Muller グループ

Muller

- ・ 強誘電体の大御所
- ・ ペロブスカイト酸化物の超電導に興味

Bednorz

- ・ 元々は鉱物学を専攻
- ・ **SrTiO₃**等の単結晶作製、提供
- ・ **La(Ba,Sr)CuO**での超電導発見
⇒**Ref.10(1986)**
Bednorz & Muller⇒ノーベル賞(1987)

利点 / 欠点

- ・高感度、バンド構造・状態密度検出可
- ・波動関数の染み出しの可視化
- ・結合の有無、結合状態の推定可
- ・対象が導電性物質に限定される
- ・トンネルバリア作製困難(Al_2O_3 , MgO 等に限定)
- ・印加電圧に限界⇒調査可のエネルギーレンジ < 1eV
- ・電子状態の精密測定には極低温測定が必須。

STMは除震に要配慮

References

- 1) **P. K. Hansma: Tunneling Spectroscopy, (Plenum Press, New York, 2013)**
- 2) **T. Wolfram: In Elastic Electron Tunneling Spectroscopy, (Springer, New York, 1978)**
- 3) **D. E. Thomas and J. M. Klein: Rev. Sci. Instrum. 34(1963)920-924.**
- 4) **W. L. McMillan and J.M. Rowell: Phys. Rev. Lett. 14(1965)108-112.**
- 5) **J. M. Rowell and L. Kopf: Phys. Rev. 137(1965)A907.**
- 6) **T. Hasegawa: までりあ, 34(1995)1350-1353.**
- 7) **H. Yamase, Y. Sakurai, M. Fujita, S. Wakimoto and K. Yamada: Nature Communications, April 13th (2021).**
- 8) **G. Binnig and H.E. Hoenig: Solid State Commun. 14(1974)597.**
- 9) **G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber and E. Weibel: Phys. Rev. Lett. 49(1982)57.**
- 10) **J. G. Bednorz and K. A. Muller: Zeitschrift fur Physik(1986).**