# ナノ光学と近接場光学顕微鏡の基礎

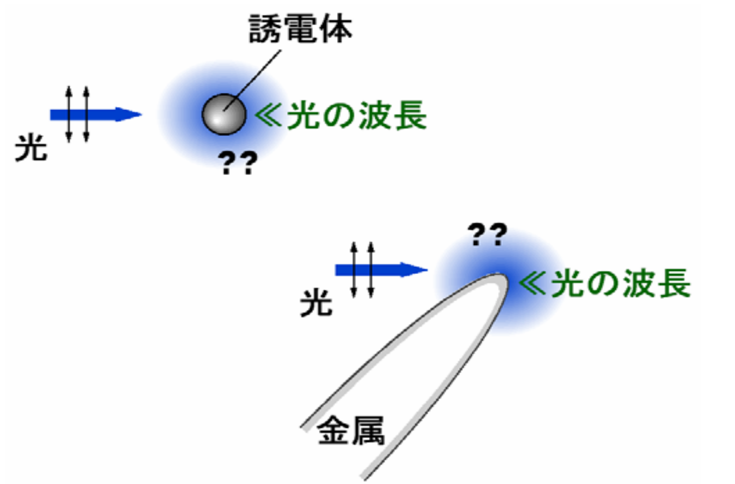
慶應義塾大学 理工学部 電子工学科
神奈川科学技術アカデミー
斎木 敏治

## ナノ光学へのイントロダクション

## アウトライン

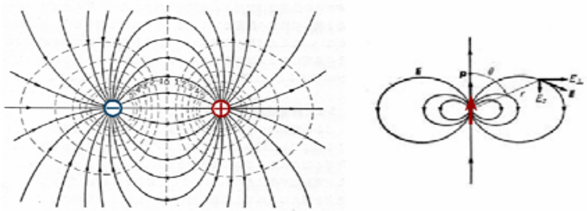
- ●ナノ光学へのイントロダクション
- ●近接場光学顕微鏡の原理・歴史・基本性能
- ●微小開口の光学
- ●量子ドットに閉じ込められた電子の波動関数を見る
  - -ナノスケールに閉じ込められた光と電子の相互作用-

## 近接場光とは・・・



## 近接場光の正体

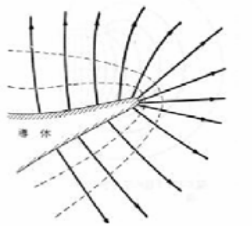
■ 電気双極子



■ 尖った導体

●避雷針

●電界放出顕微鏡



## ナノ光学研究の意義

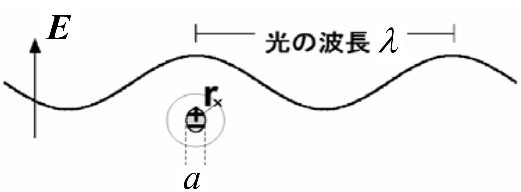
●小さな光

●明るい光

●小さいが故に高感度

●ナノ領域に固有の光と電子の相互作用

## Electrostatic近似



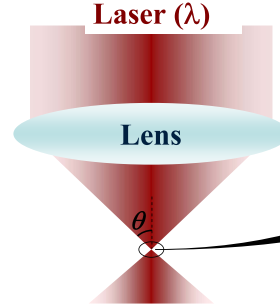

$a, r << \lambda$ ➡ 空間的に一様な場が印加されているとみなしてよい.

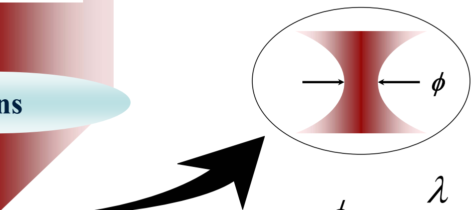
‖

Electrostatic 近似

$$\frac{a}{\lambda}, \frac{r}{\lambda} << 1 \Rightarrow ka, kr << 1$$

## 光の回折限界

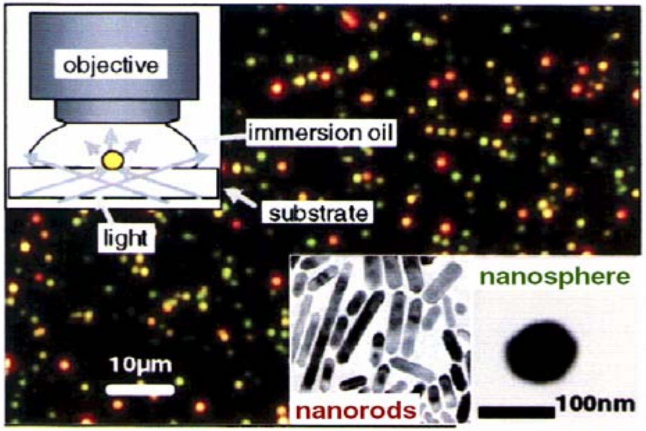



$$\phi = \frac{\lambda}{2\sin\theta} \geq \frac{\lambda}{2}$$

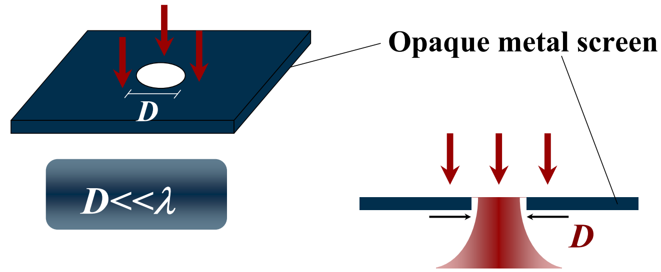
Minimum spot size ~ 0.5 μm

## プラズモン




C. Soennichsen *et al.*, PRL 88, 77402 (2002).

## 金属微小開口



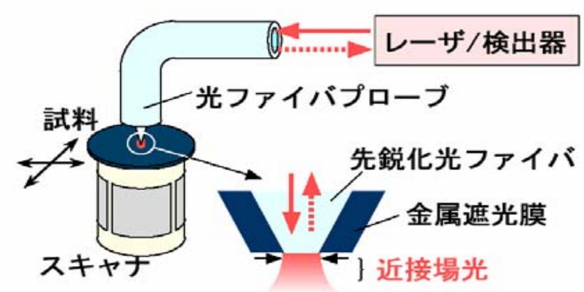

$D \ll \lambda$

Spot size $D$=10~100 nm

## 近接場光学顕微鏡の原理･歴史･基本性能

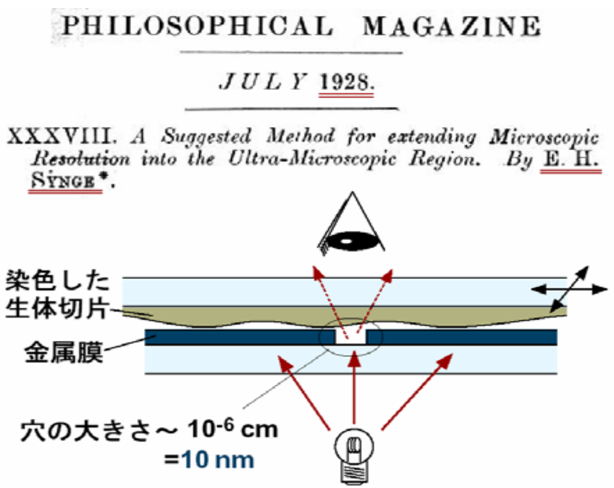
## 近接場光学顕微鏡

Near-field Scanning Optical Microscopy (NSOM)

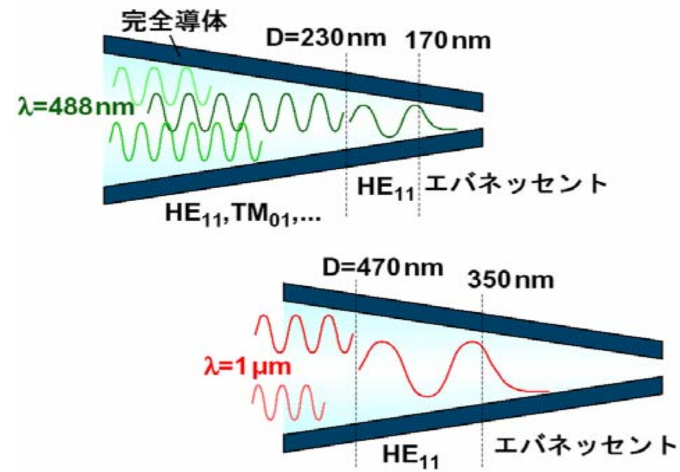



空間分解能～開口径　(≪光の波長)
(通常の顕微鏡の空間分解能～光の波長)

## NSOM原理の提案



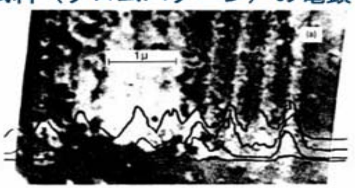

## プローブ内の導波モード



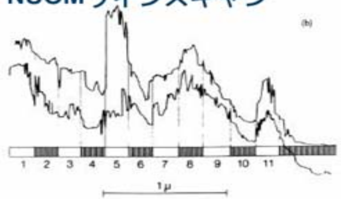

## Optical Stethoscopy

D. W. Pohl APL **44**, 651 (1984)

● 試料（クロムパターン）の電顕写真



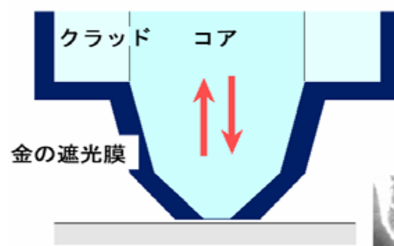
● NSOMラインスキャン

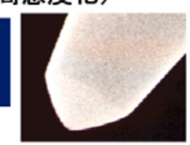


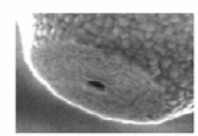
## ファイバプローブ

■ テーパー構造の最適化（化学エッチング）

➡ 光の伝搬効率の向上（高感度化）





■ 良質な開口（押付け法）

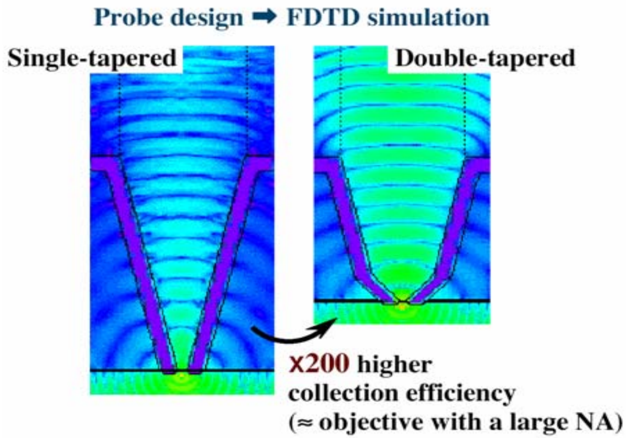
- 平坦，試料面に平行

➡ 試料との効率的な相互作用

- 小さい，真円状

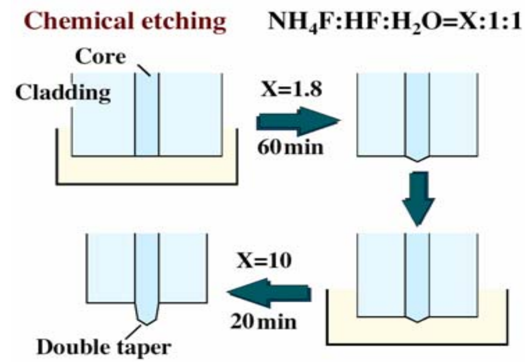
➡ 高分解能，良好な偏光特性

## 二段テーパープローブ




H. Nakamura, J. Microscopy 202, 50 (2001).

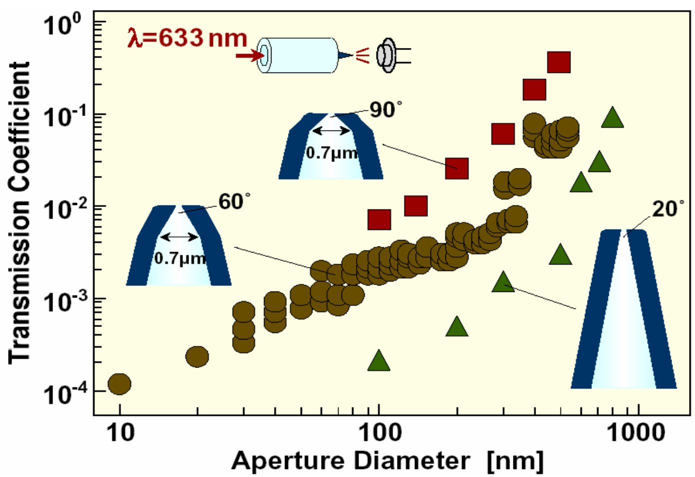
## 二段テーパープローブの作製 -1-



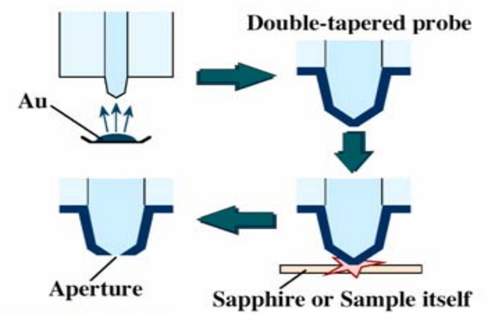

- Highly reproducible
- Finely controllable

T. Saiki, APL 68, 2612 (1996).

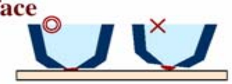
## プローブの光透過効率




## 二段テーパープローブの作製 -2-

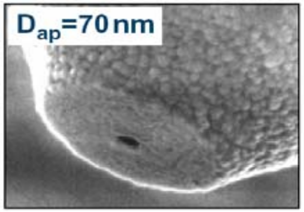



- Flat end-face
- Parallel to sample surface
- Round aperture
- Sharp edge

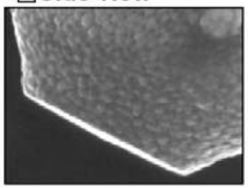



T. Saiki, APL 74, 2773 (1999).

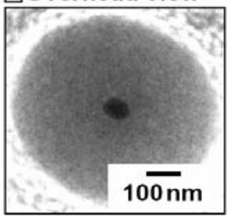
## 押し付け法によって作製した微小開口




Side view

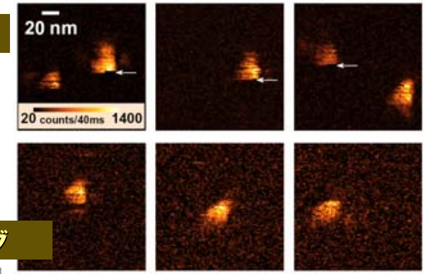


Overhead view



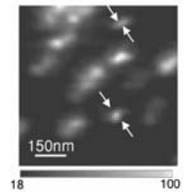

## 30nm 空間分解能

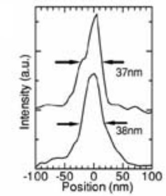
単一分子イメージング




*JSAP Int.* 5, 22 (2002)

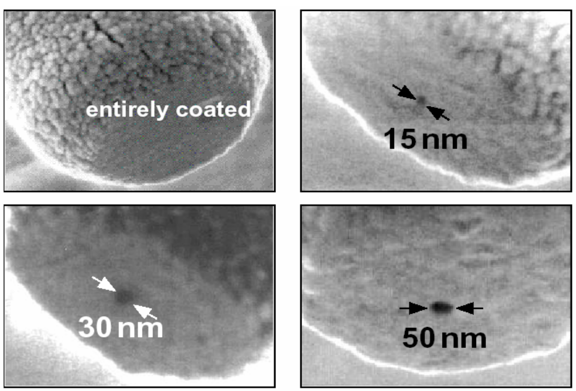
単一量子ドットイメージング



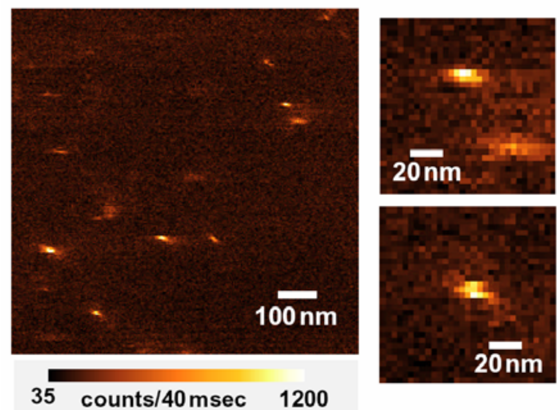

*APL* 81, 2291 (2002)

## さまざまなサイズの微小開口



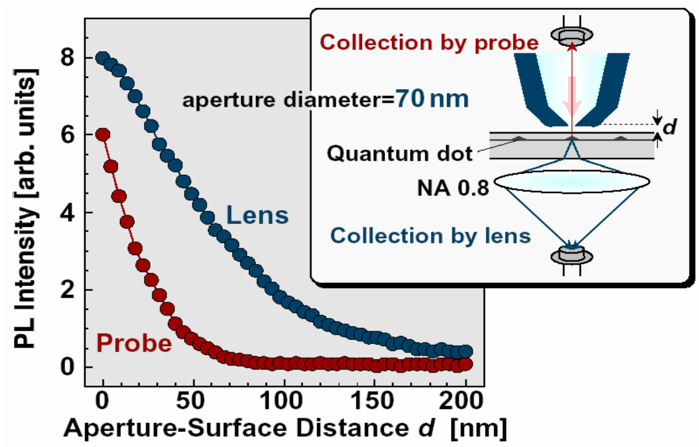

The scanning electron micrographs were taken after conducting NSOM imaging measurements.

## 10nm 空間分解能

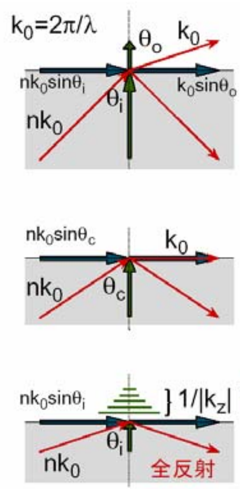



J. Microscopy 202, 362 (2000).

## プローブの集光効率




## 全反射とエバネッセント光




$nk_0\sin\theta_i=k_0\sin\theta_o$

$\sin\theta_o/\sin\theta_i=n$ (スネルの法則)

$k_z{}^2=k_0{}^2-(k_0\sin\theta_o)^2$

$k_0{}^2-(nk_0\sin\theta_i)^2$

$k_z=k_0[1-(n\sin\theta_i)^2]^{1/2}$

$nk_0\sin\theta_c=k_0$

$\sin\theta_c=1/n$ (臨界角)

$k_z=0$

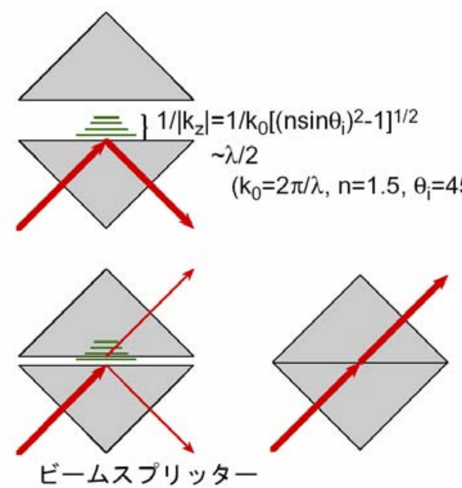
エバネッセント光

$k_z{}^2=k_0{}^2-(nk_0\sin\theta_i)^2<0$

$k_z=ik_0[(n\sin\theta_i)^2-1]^{1/2}$

## 微小開口の光学

## 光トンネリング

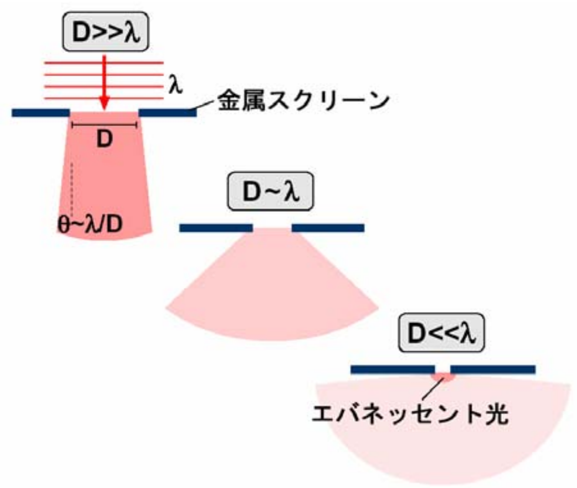



$\} 1/|k_z|=1/k_0[(n\sin\theta_i)^2-1]^{1/2}$

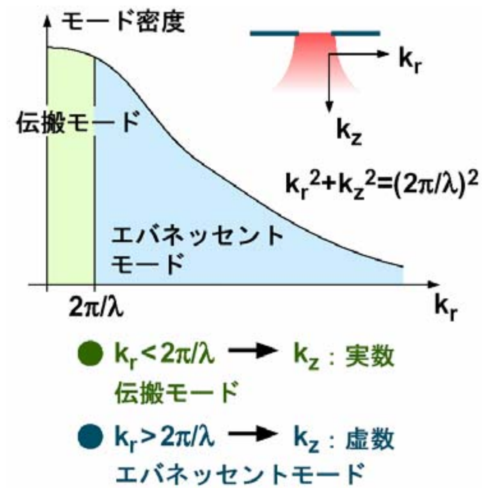
$\sim\lambda/2$

$(k_0=2\pi/\lambda,\ n=1.5,\ \theta_i=45°)$

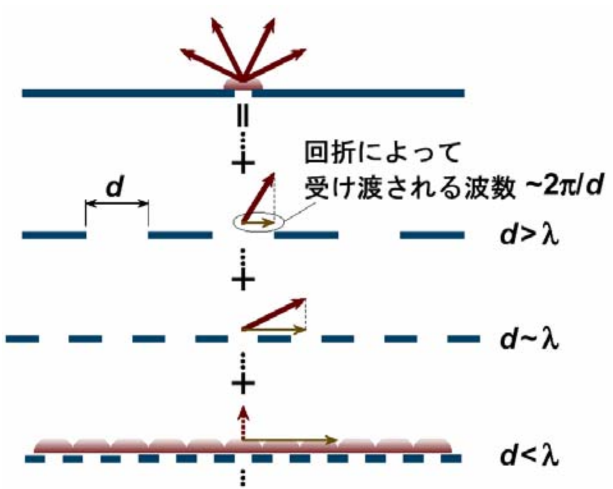
## 円孔による光の回折



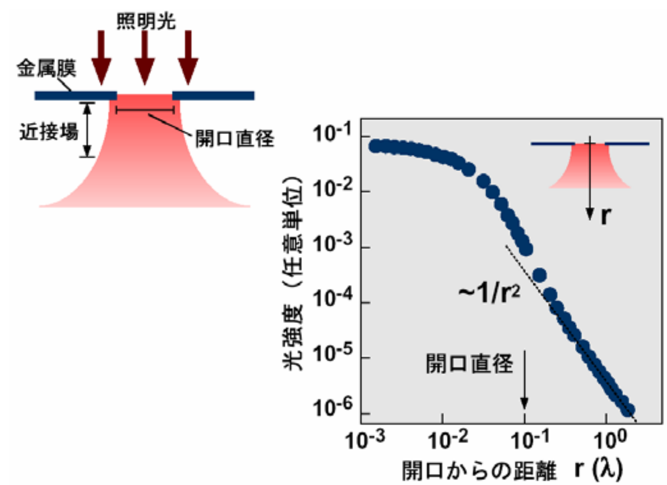

## 開口近傍における回折光のモード分布



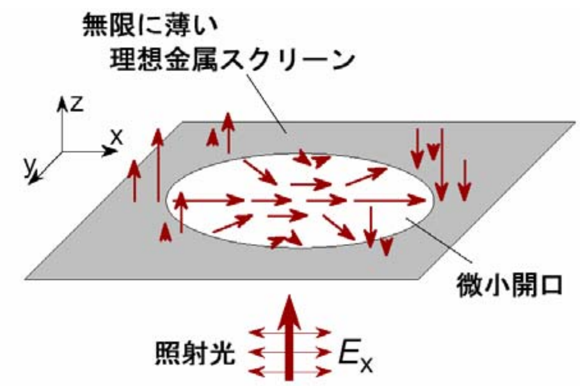

## スリットによる光の回折




## 光強度の開口面からの距離依存性

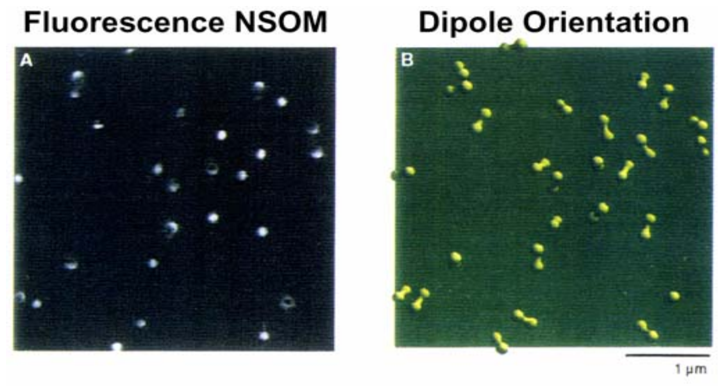


## 開口面内の電場ベクトル分布



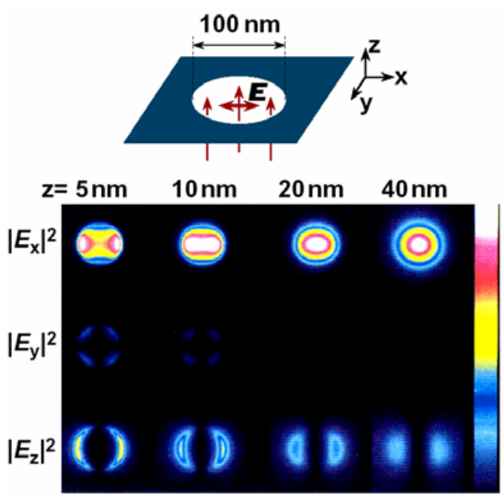

照明光の偏光に依存して，
開口エッジ近傍に強い電場が発生

## 近接場蛍光イメージングによる分子の向きの決定



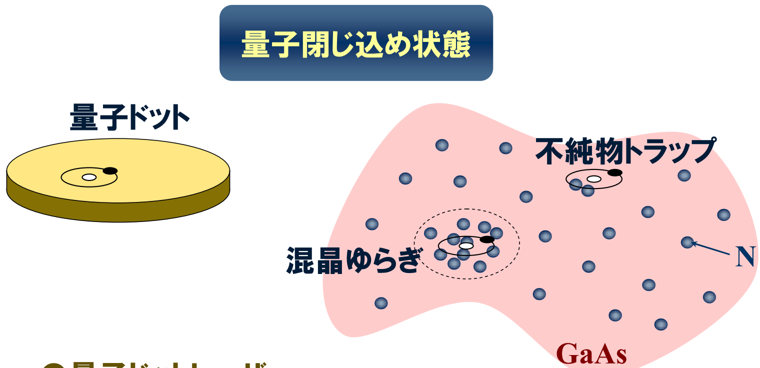

E. Betzig et al., Science 262, 1422 (1993).

## 開口近傍の電場強度分布




## 量子ドットに閉じ込められた電子の波動関数を見る

## 局在電子系

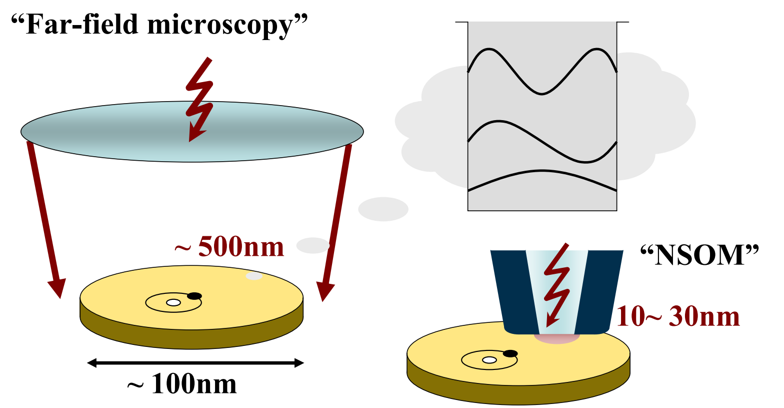



●量子ドットレーザ

●量子情報処理

●量子暗号

## Optical mapping of electron wavefunction




●波動関数のマッピング

●選択則の破れ

## 半導体量子ドット

電子がもつ波動の性質が顕著になり，完全に離散的なエネルギー準位構造を形成する．

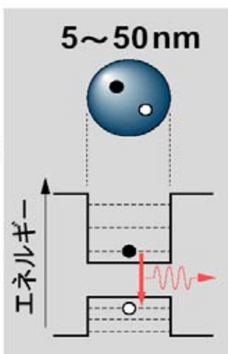
人工的な原子のように振る舞う

その結果・・・

●電子のエネルギー分布の集中

●光学スペクトルの先鋭化

●電子間の相互作用の増強




## Optical mapping of wavefunction

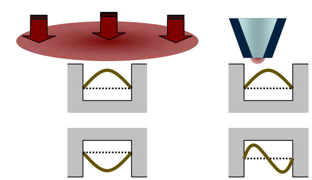
Wavefunctions: $|\Psi^e(r)\rangle = \phi^e(r)|e\rangle, \quad |\Psi^h(r)\rangle = \phi^h(r)|h\rangle$

Dipole interaction Hamiltonian: $H' = \mathbf{p}\cdot\mathbf{A} = (c/i\omega)\mathbf{p}\cdot\mathbf{E}$

Dipole matrix element: $\langle \Psi^e(r)|H'|\Psi^h(r)\rangle \propto \langle e|\mathbf{p}|h\rangle \cdot \int \phi^e(r)\mathbf{E}\phi^h(r)dV$

● **Far-field excitation: E~const. (λ>>size of quantum dot)**

$\int \phi^e(r)\mathbf{E}\phi^h(r)dV \Rightarrow \mathbf{E}\int \phi^e(r)\phi^h(r)dV$ **Selection rule**

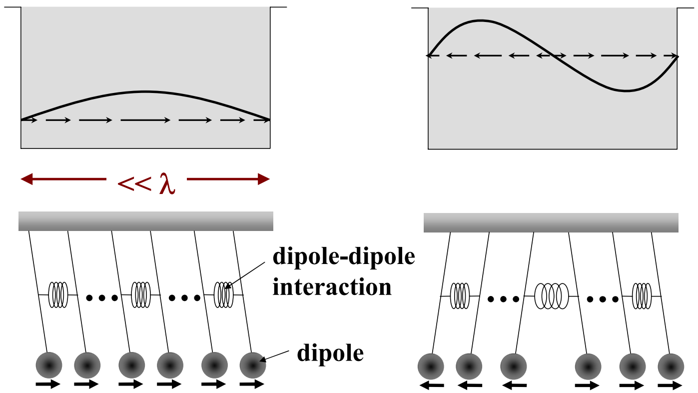


● **NSOM excitation: $\mathbf{E} \sim \mathbf{E}_0\delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}_0)$**

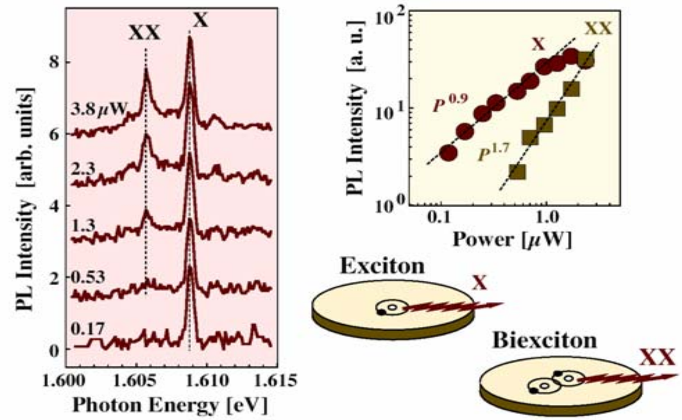
$\int \phi^e(r)\mathbf{E}\phi^h(r)dV \Rightarrow \mathbf{E}_0\phi^e(r_0)\phi^h(r_0)$ **Wavefunction mapping**

## Coupled Oscillator Model

molecular crystal
collective excitation = "exciton"

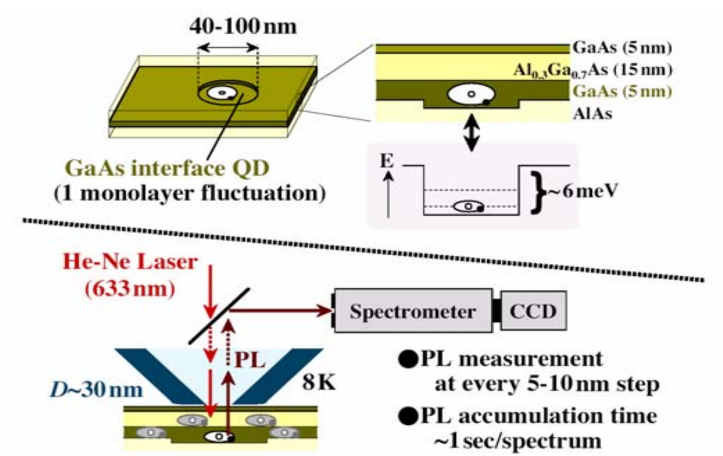



## PL spectra from single quantum island

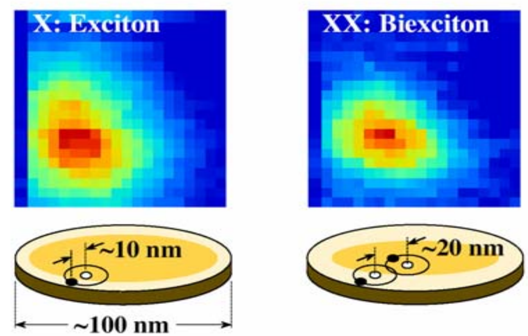



*Power: the laser intensity coupled to the near-field fiber probe

## Imaging spectroscopy of quantum island




## Exciton & biexciton Wavefunctions



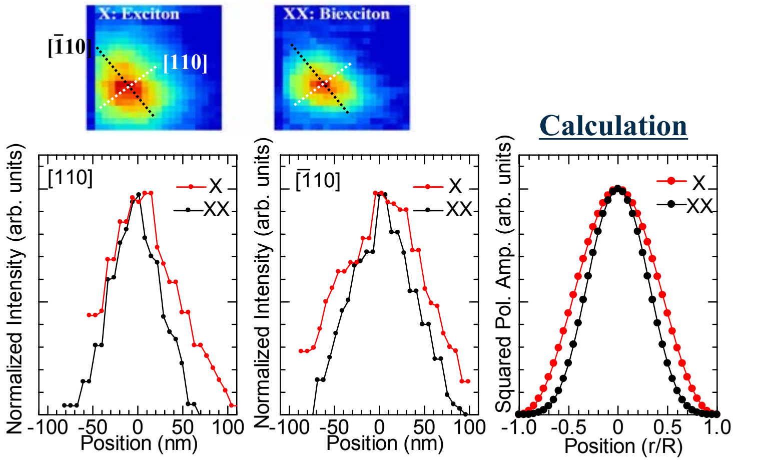

$\langle 0|\mathbf{p}|X\rangle \propto \varphi(\mathbf{r})$ $\quad\quad \langle X|\mathbf{p}|XX\rangle \propto \int d\mathbf{r}'\,\varphi(\mathbf{r}')\Phi(\mathbf{r};\mathbf{r}')$

**φ(r): exciton (X) envelope function**

**Φ(r;r'): biexciton (XX) envelpe function**

*PRL* 91, 177401 (2003)

## Numerical calculation of polarization field




*PRL* 91, 177401 (2003)

## Wavefunction of excited state