



# ナノサイエンスの源流と展望： メゾからナノへ

東京大学物性研究所  
家 泰弘

- 「ナノスケール」とは？
- なぜいまナノサイエンスなのか？
- どんなことができる？

# スケールの大きな話

m     $10^3$  m     $10^6$  m     $10^{12}$  m     $10^{18}$  m     $10^{24}$  m

1 km

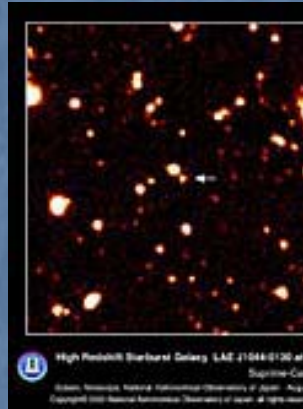
1000 km

↑  
1天文単位

↑  
1光年



12800km



High Redshift Starburst Galaxy, LAE 21548-0120 at  
Supernova-C  
Osaka University, National Astronomical Observatory of Japan, NAOJ  
Copyright (c) National Astronomical Observatory of Japan. All rights reserved.

# スケールの小さな話

$10^{-12}$  m

$10^{-9}$  m

$10^{-6}$  m

$10^{-3}$  m

1 m

1 pm

ピコメートル

1 nm

ナノメートル

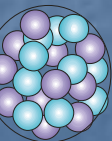
1  $\mu$ m

マイクロメートル  
(ミクロン)

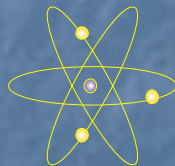
1 mm

ミリメートル

原子核の大きさ



原子の大きさ

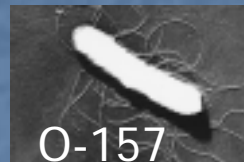


ウイルス



可視光の波長

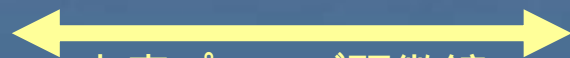
細菌



針の穴 髪の毛

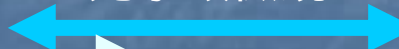


電子顕微鏡



走査プローブ顕微鏡

光学顕微鏡

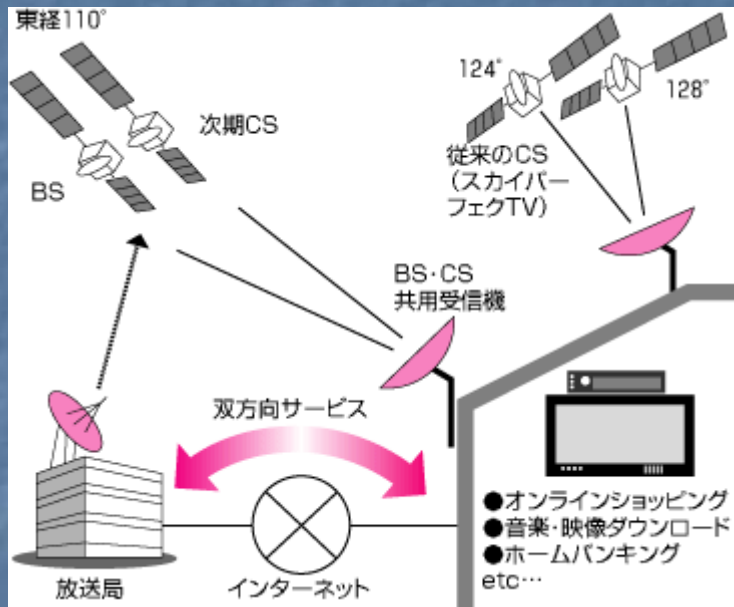
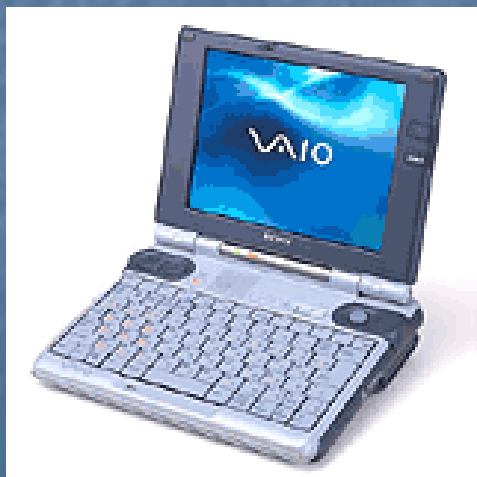


# 現代文明を支える半導体素子



携帯電話

パソコン



衛星通信  
衛星放送

スーパーコンピューター



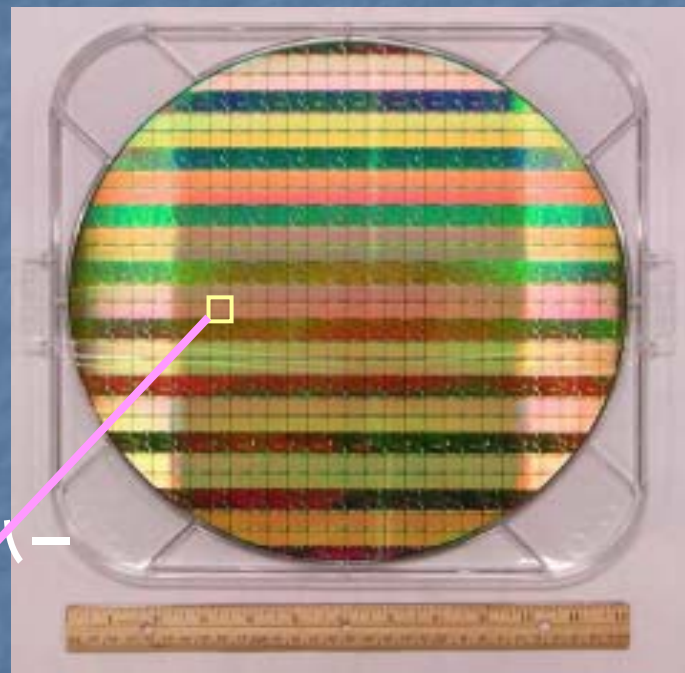
# トランジスタの微細化



最初のトランジスタ  
米国ベル研究所  
(1946年)



50年



シリコンウェハー

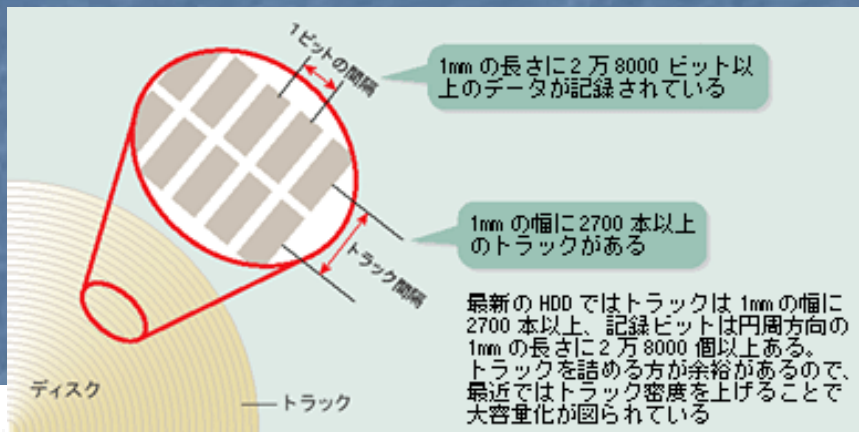


12インチ (30 cm)



# 磁気記録媒体

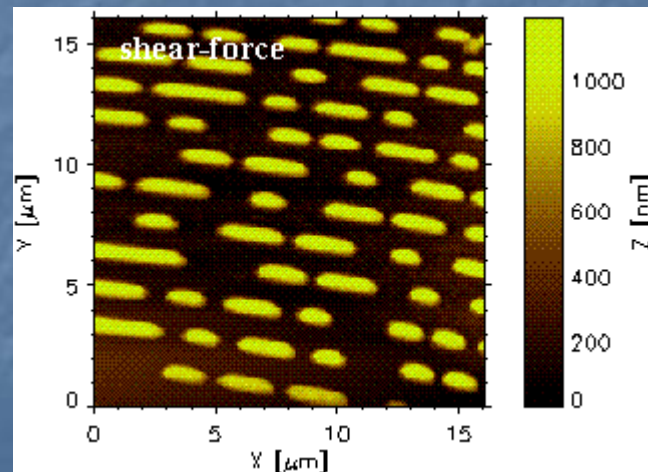
ハードディスク



微小な磁性体の磁化の向きによって情報を記録  
大容量HDでは記録単位(ビット)の大きさが  
 $0.1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$



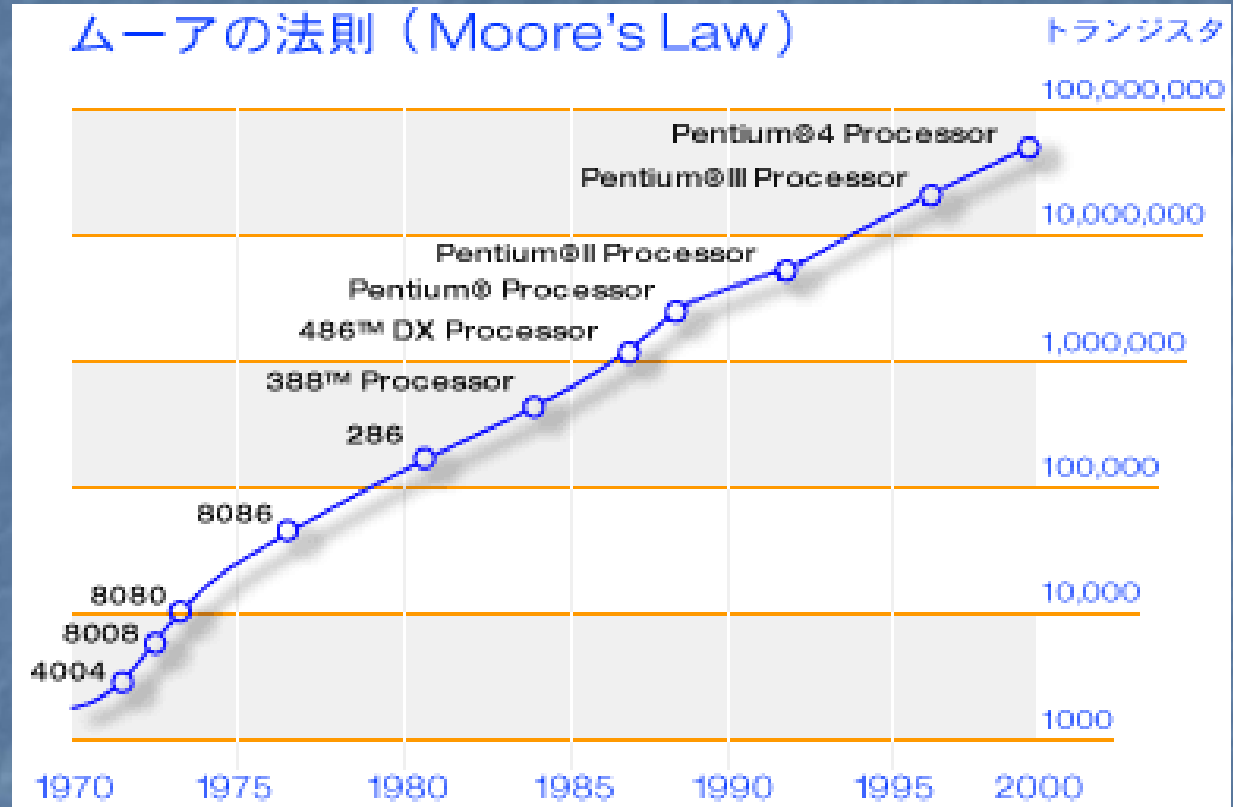
MOディスク



# 半導体超大規模集積回路(ULSI)

## ムーアの法則

半導体チップの中に作り込むことのできるトランジスタの数(集積度)がおよそ1年半ごとに倍増するという予測



しかし、最近では半導体素子のスケールはサブミクロン(1 $\mu\text{m}$ 以下)に達しており、微細加工技術の延長では限界があるのは明らか

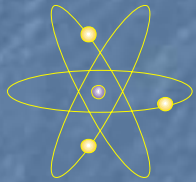
# なぜいま ナノサイエンス・ナノテクノロジー なのか？

- テクノロジーの要請
  - 微細加工の方向はいずれ限界に達する
  - 原子レベルで思いのままの物質を作りたい
- 基礎科学としての興味
  - 多様な物理・化学現象を原子レベルで解明したい(生命現象も)
  - 微小世界で現れる新しい物理現象を見つけたい

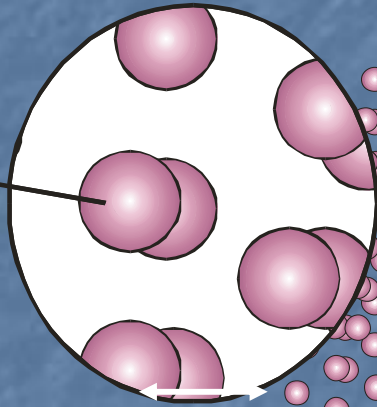


# ミクロとマクロ

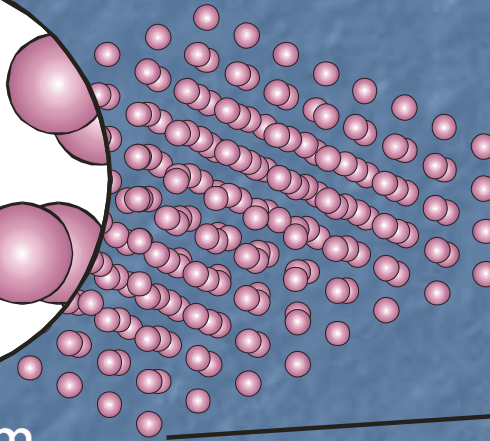
原子配列



原子  
(原子核と電子)

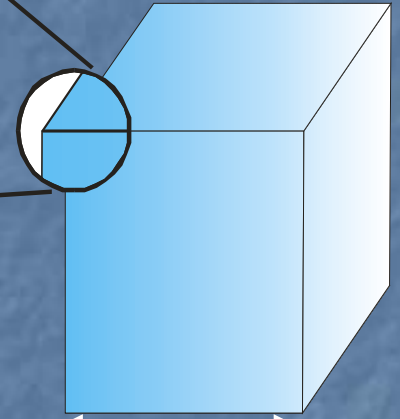


0.3 nm



固体結晶

$10^{20}$ 個の原子



1 mm

微視的スケール  
(ミクロスコピック)

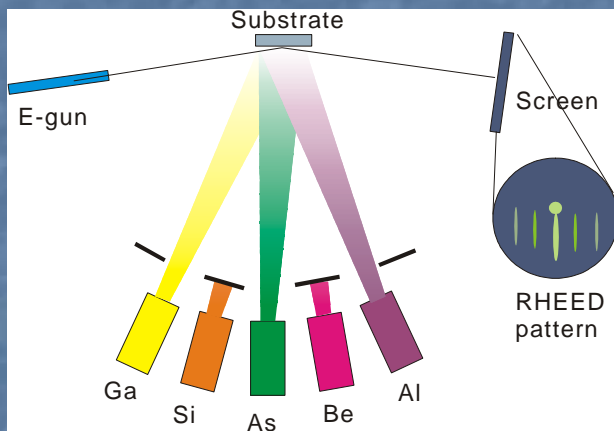
巨視的スケール  
(マクロスコピック)

メゾスコピックスケール

# 半導体人工超格子の作製

## 半導体人工超格子 (GaAs/AlGaAs)

超高真空の清浄環境で  
原子を一層ずつ積み上げる



異種の原子層を積み重ねることも可能

## 分子線エピタキシ装置



# 極微細加工による量子構造の作製

物性研究所勝本研究室

電子線描画による微細加工で  
作成した量子ドット構造

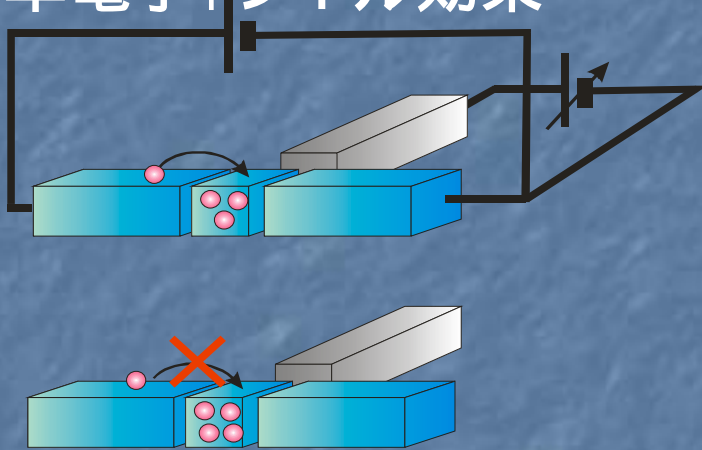
電子線描画装置



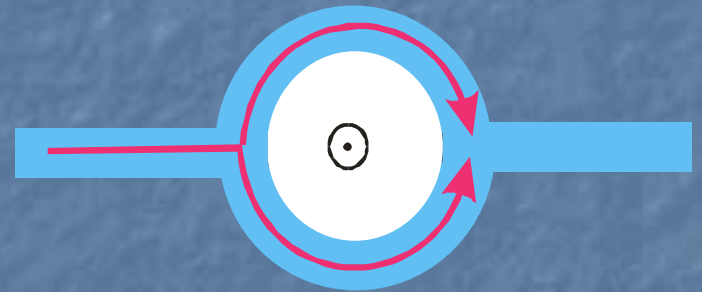
# メゾスコピック系の量子物理

物性研究所勝本研究室

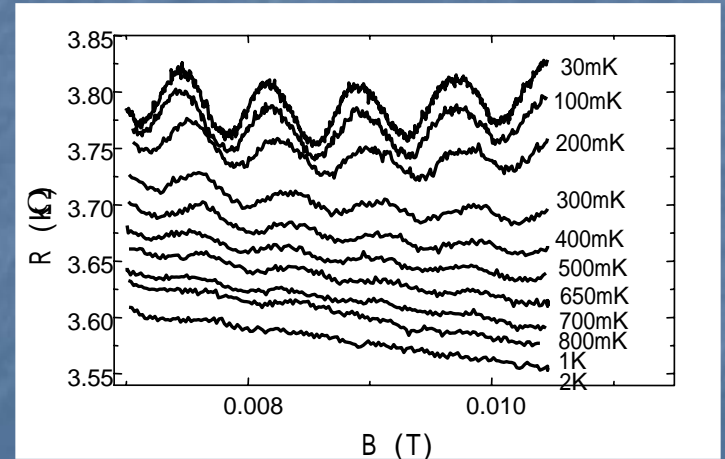
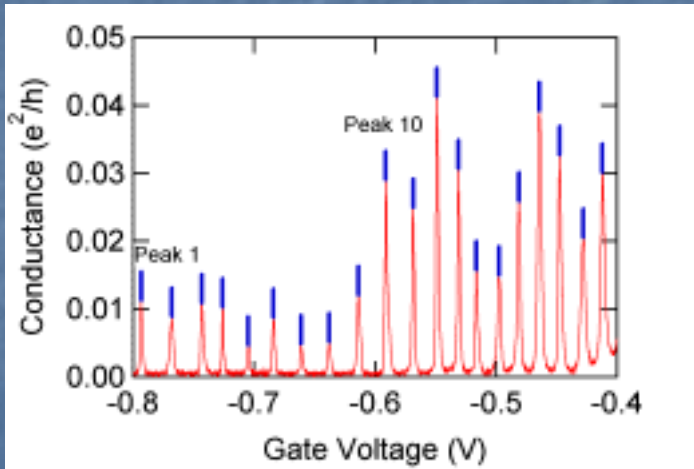
単電子トンネル効果



量子干渉効果



電子の量子力学的ふるまい



粒子性



波動性

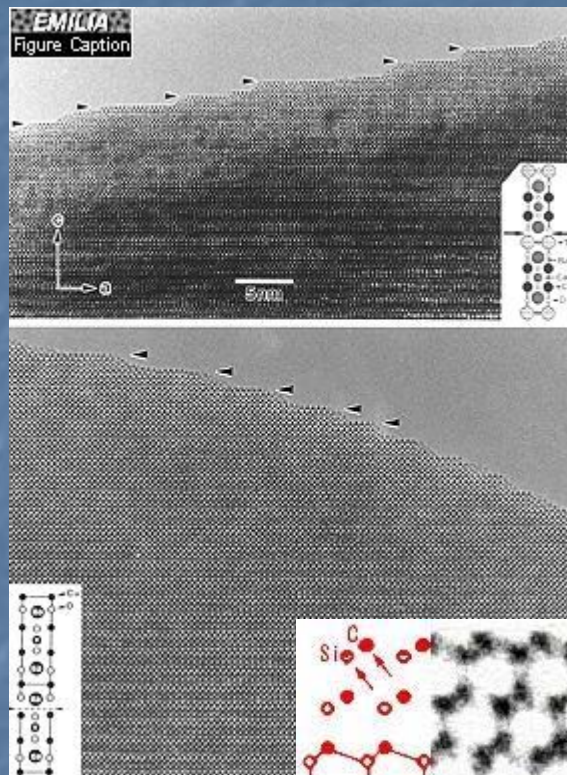
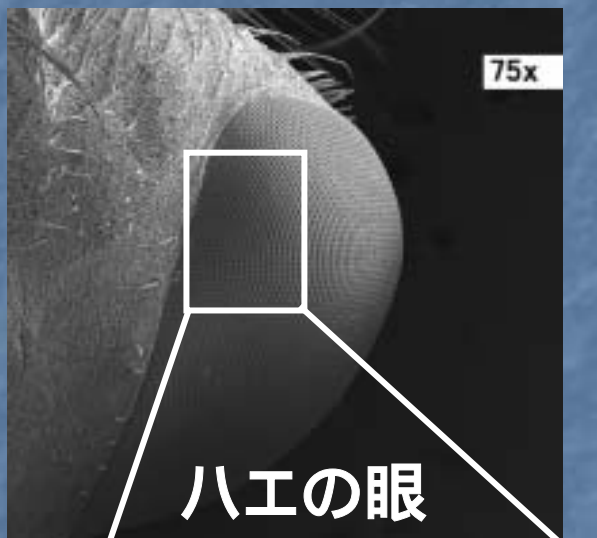
# 究極の微細構造

- マクロの試料に対して微細加工を施して微細構造を作る……「トップダウン」の手法
- 原子1個1個を積み上げることによって微細構造を作る……「ボトムアップ」の手法

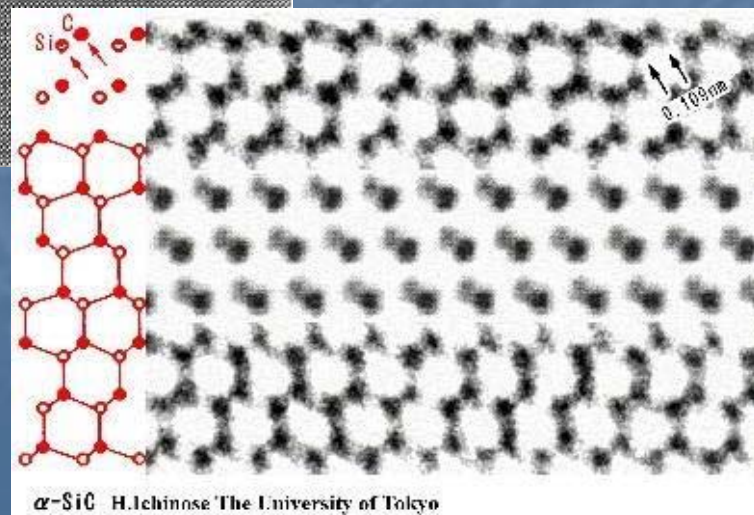
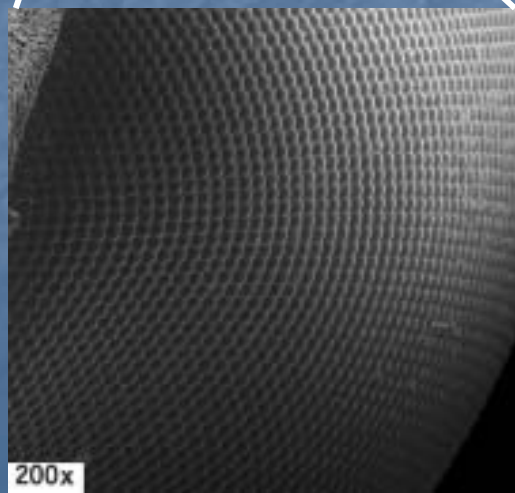
## ナノテクノロジー

- 原子を見る
- 原子を操る

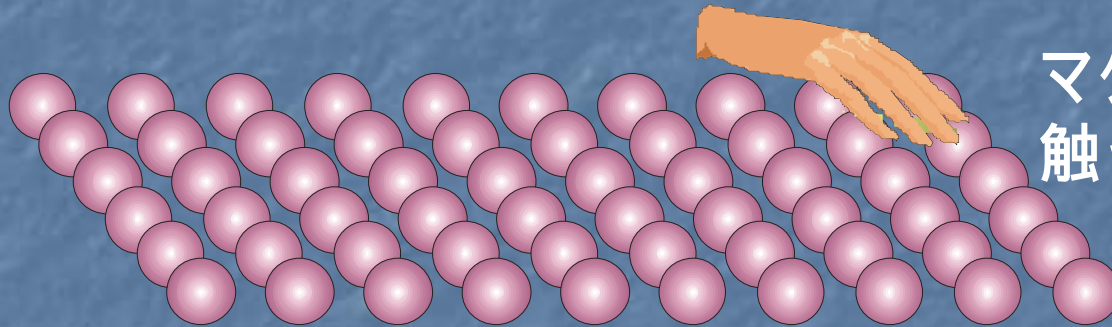
# 小さなものを見る 顕微鏡



高分解能電子  
顕微鏡で原子  
の配列を見る



# 固体表面の原子の並びを見る



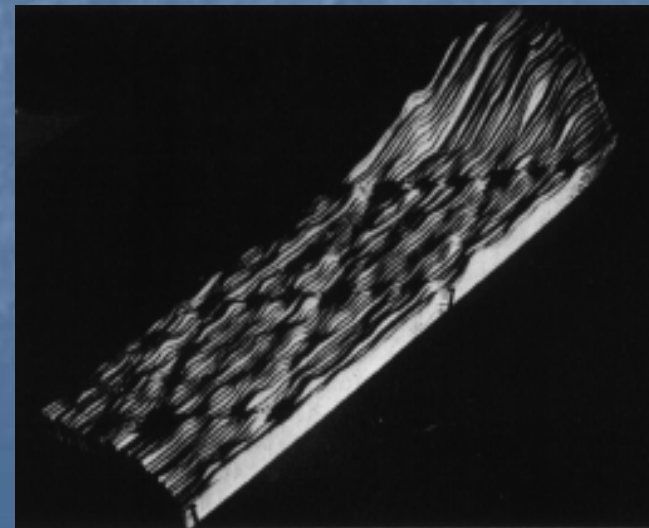
マクロなものなら  
触って凹凸を見ればよい

これと同じようなことが原子スケールで可能だろうか？

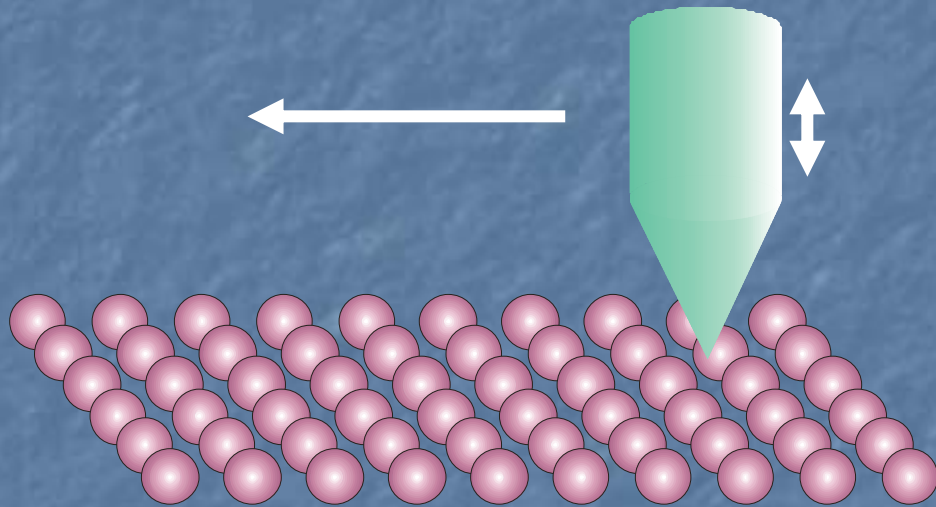
「不可能」と考えるのが常識



シリコン結晶の  
表面の原子の  
並びを初めて  
とらえた像

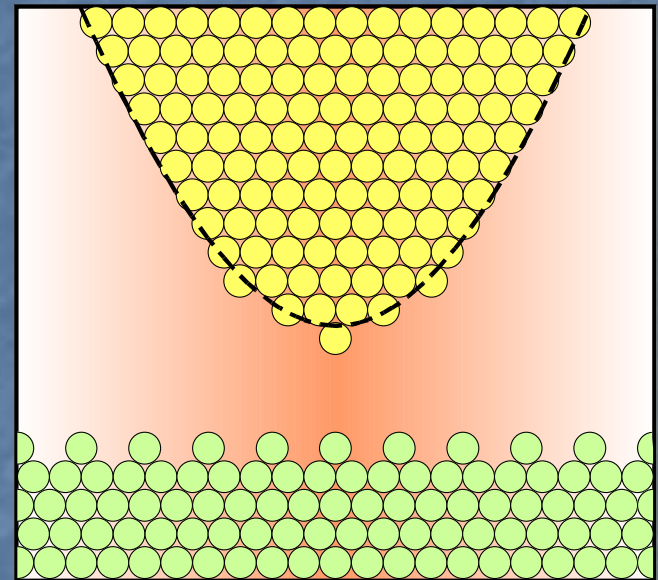


# 走査トンネル顕微鏡 (STM)



針先の原子と表面の原子を1nm程度に近づけるとトンネル電流が流れる。そのトンネル電流が一定になるように針を上下しながら横方向に動かせば原子スケールの凹凸を観察することができる

実際の先端部分は

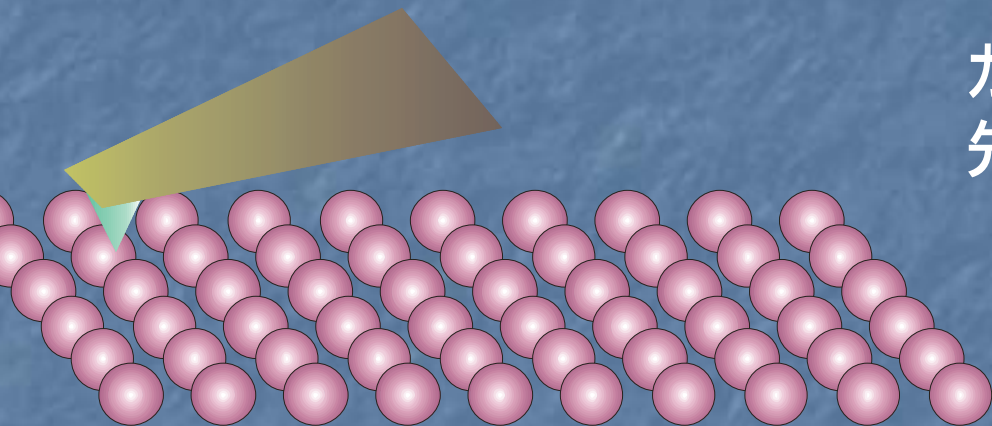


安定性の問題  
機械的振動  
電氣的雜音

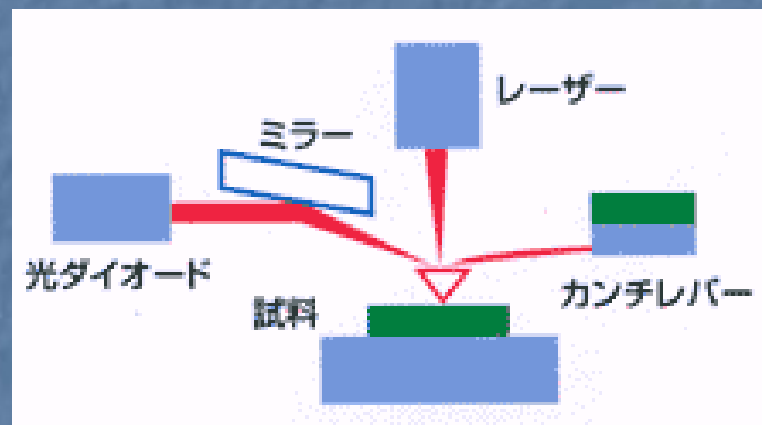
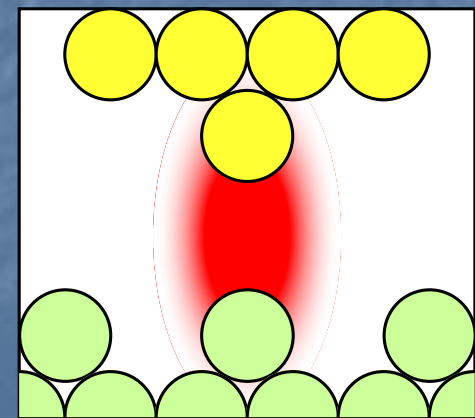


# 原子間力顕微鏡 (AFM)

カンチレバー (片持ち梁) の  
先に探針がついたもの



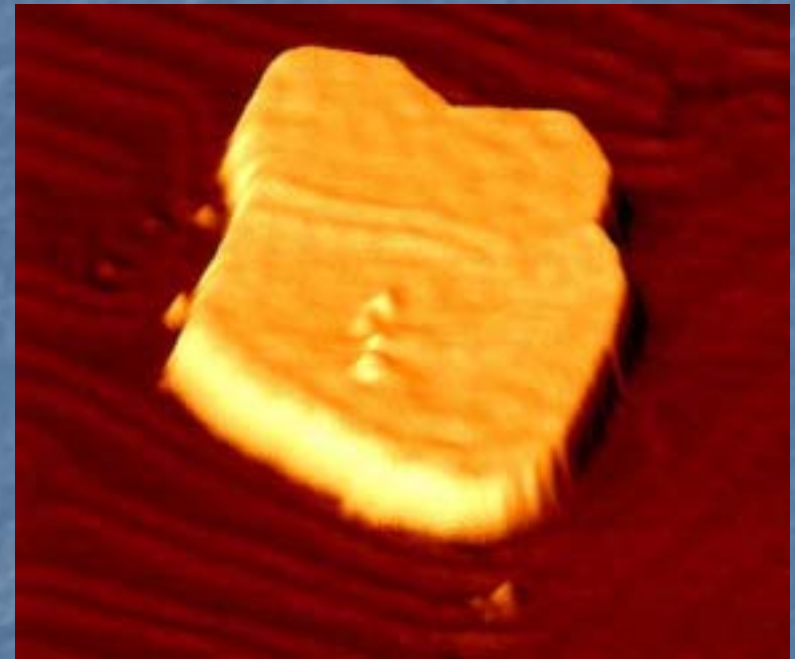
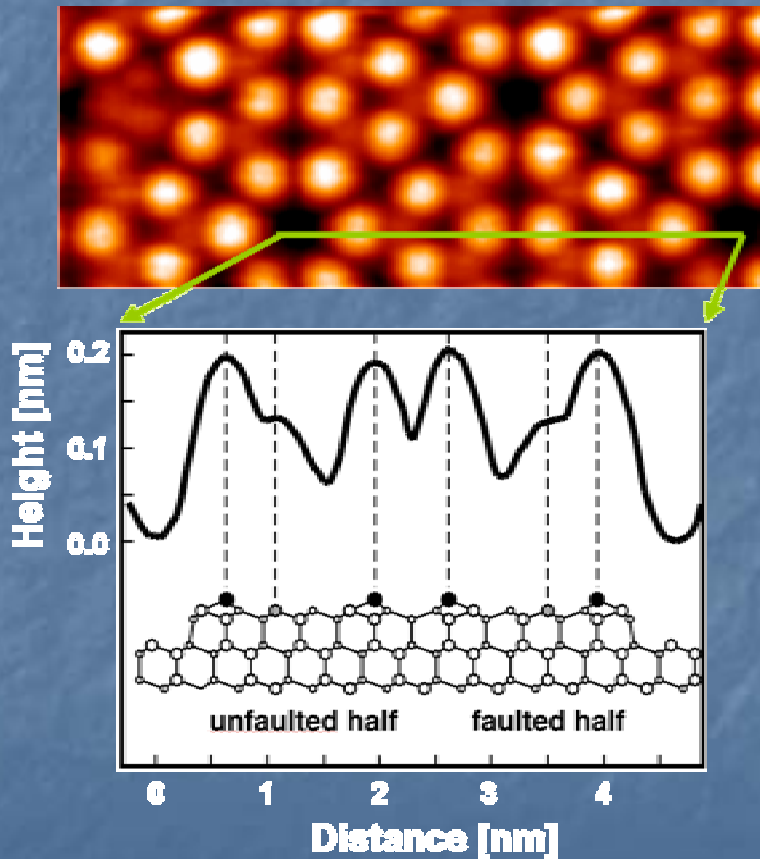
探針先端の原子と表面の原子が近づいたときに働く力を検出する。



カンチレバーの曲がり具合を  
レーザー光を使って検出する

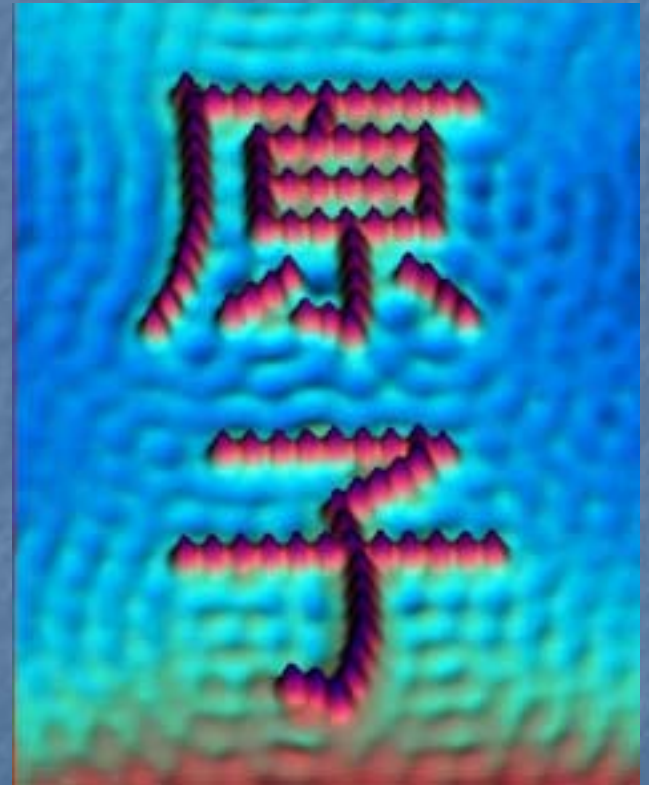
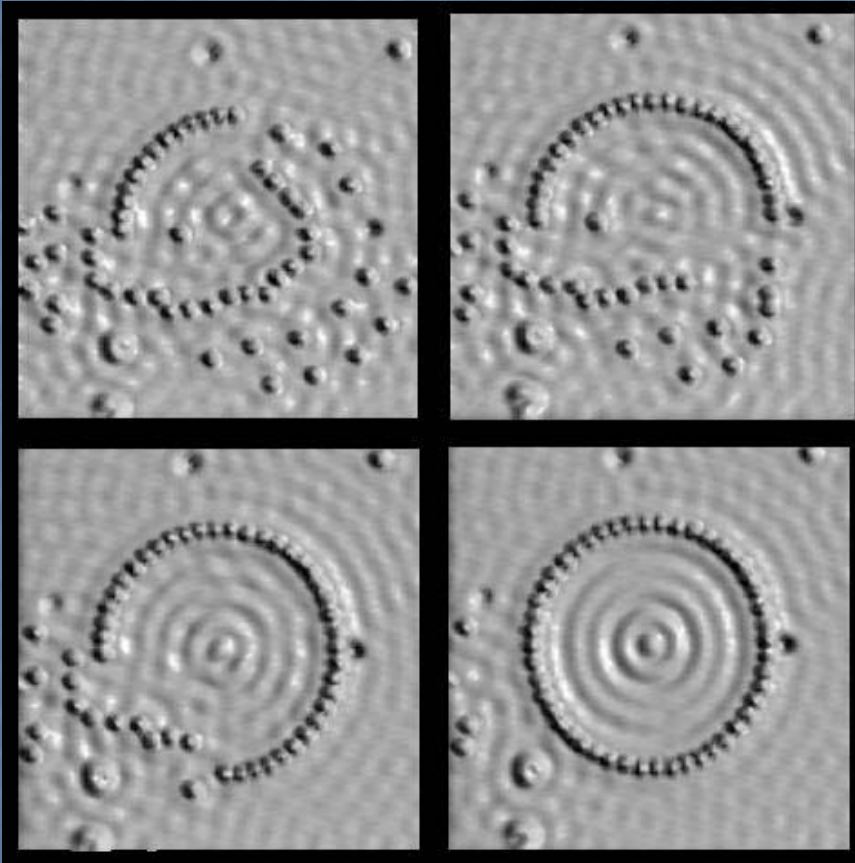
# 走査プローブ顕微鏡による表面の研究

物性研究所 長谷川研究室



# 原子を操る

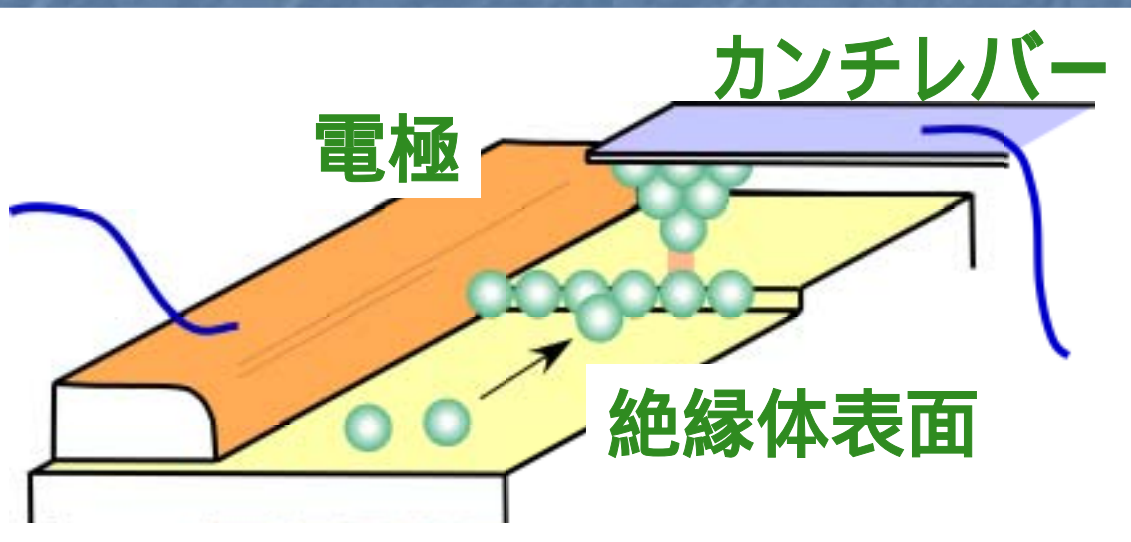
IBM Almaden研究所  
Eiglerグループ



銅の表面に鉄原子を並べる。  
さざ波のように見えるのは表面電子の波の干渉による。

# AFMを用いた微細構造作製

物性研究所 長谷川研究室



AFMで原子を並べる



AFMの先端から電流を流して陽極酸化によって表面を加工したもの

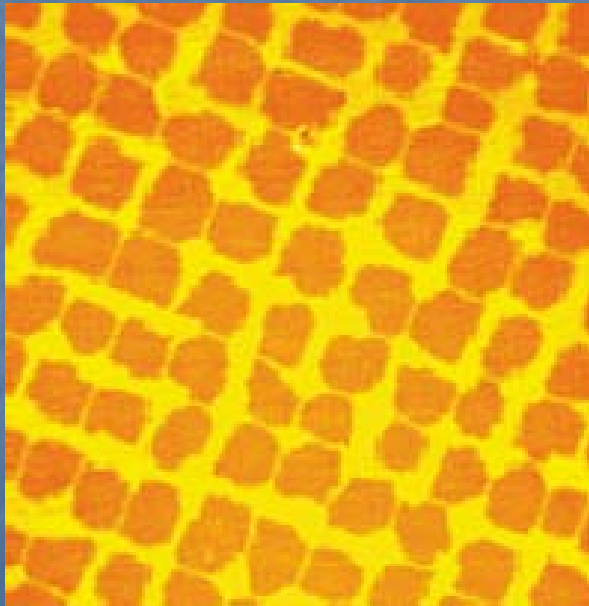
# 自己形成ナノ構造

物性研究所・小森研究室

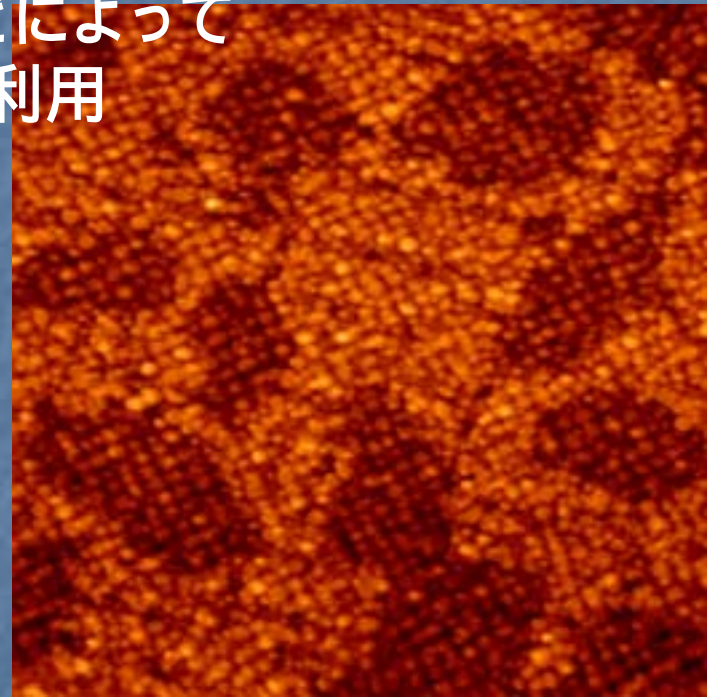
微細加工では作れないナノスケール構造を作る

結晶の原子ステップや格子歪などによって  
自己形成されるナノパターンを利用

窒素吸着銅表面のナノパターン



7nm



強磁性体ナノドットの規則配列  
超高密度磁気記録媒体への応用

# まとめに代えて

- ナノテクノロジーの要請
  - トップダウンアプローチの限界      ボトムアップ  
アプローチの探求
- 何ができるか
  - 原子を見る, 原子を操る
  - ナノの世界ならではの新しい量子物理効果と  
その応用

There's plenty of room at the bottom  
(ファインマンの言葉)