

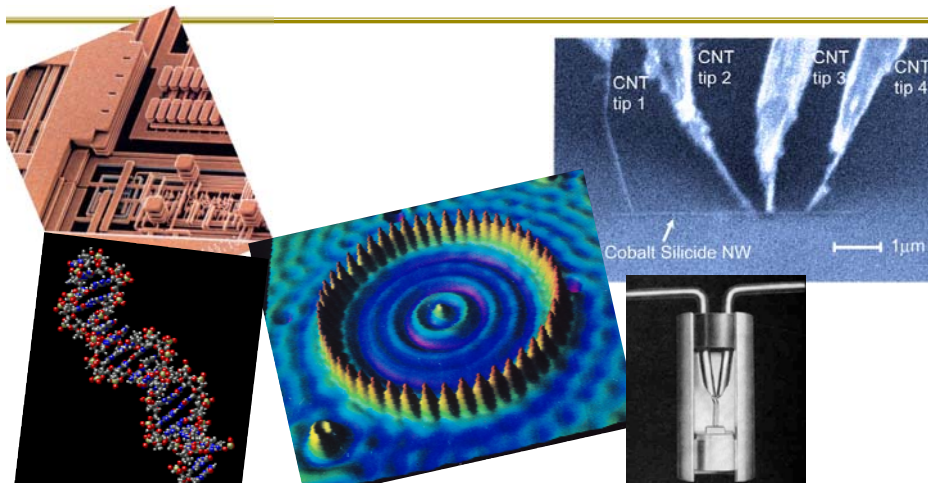


1. Nanoscience and Surface Physics ナノサイエンスと表面物理  
Nanoscience in Nobel Prize
2. Atomic Arrangements at Surfaces 表面原子配列構造  
Scanning Tunneling Microscopy, Electron Diffraction  
走査トンネル顕微鏡、電子回折
3. Surface Electronic States 表面電子状態  
Surface states 表面状態、Rashba Effect ラッシュバ効果  
Topological Surface States トポロジカル表面状態、  
Band Bending バンド湾曲
4. Surface Electronic Transport 表面電気伝導  
Space-Charge-Layer Transport and Surface-State Transport  
空間電荷層伝導と表面状態伝導  
Atomic-Layer Superconductivity 原子層超伝導

## References and Books Reading

1. General Textbooks on Surface Physics (but, a little bit old)
  - Hans Lueth: Solid Surfaces, Interfaces and Thin Films, 6<sup>th</sup> Ed. (Springer, 2014).
  - K. Oura, V. G. Lifshits, A. A. Saranin, A. V. Zotov, M. Katayama: Surface Science; An Introduction, (Springer, 2010).
2. Topical Reviews Related with Surface Physics
  - 勝本信吾、長谷川修司 (分担執筆): 『ナノテクのための物理入門』 (第12章 ナノスケール系の電子状態と電気伝導)、菅原康弘、粉川良平編 (共立、2007)
  - 長谷川修司 (分担執筆): 『表面物性の基礎』 (第3賞 電子的・電気的特性)、(現代表面科学シリーズ) 日本表面科学会編集 (共立、2012)
  - 長谷川修司: 『見えないものをみる - ナノワールドと量子力学 -』 UTフィジックス・シリーズ、(東京大学出版会、2008).
  - S. Hasegawa: Visualizing Invisibles—Nano-World and Quantum Mechanics—
  - S. Hasegawa, X. Tong, S. Takeda, N. Sato, and T. Nagao: 『Structures and electronic transport on silicon surfaces』, Progress in Surface Science 60, 89-257 (1999)
  - 安藤陽一: トポロジカル絶縁体入門 (講談社、2014)
  - 齊藤 英治、村上 修一: スピン流とトポロジカル絶縁体 —量子物性とスピントロニクス の発展— (共立、2014)
3. Brief Reviews on Specific Topics
  - 長谷川修司、平原徹: 『トポロジカル絶縁体は本当か - 実験から見て -』, 表面科学 32(4), 216 (2011)  
S. Hasegawa and T. Hirahara: Are Topological Insulators Experimentally Verified?
  - 長谷川修司: 『表面での電子・スピン輸送研究の最近の展開』, 表面科学 36(3), 112 (2015)  
S. Hasegawa: Recent Advances in Research on Electronic and Spin Transport at Surfaces
  - 藤本聡: 空間反転対称性のない物質における超伝導、物理学会誌 63(1), 18 (2008).  
Satoshi Fujimoto: Superconductivity in Materials without Inversion Symmetry

## General Introduction — Nano Science and Surface Physics —



### The Nobel Prize in Physics 1901

in recognition of the extraordinary services he has rendered by the discovery of the remarkable rays subsequently named after him

“レントゲン(X)線の発見に対して” (波長 $\sim 1$  nm 以下の電磁波)  
EM wave of Wavelength $\sim 1$  nm



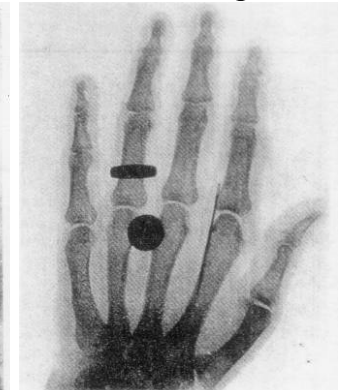
Wilhelm Conrad Röntgen

Germany

Munich University  
Munich, Germany  
b. 1845  
d. 1923



レントゲンが撮った妻の手  
Left hand of Röntgen's wife



現在のレントゲン写真  
Present Röntgen photo

NaClのX線回折 X-Ray Diffraction **Laue Condition = Bragg formula**

→ X線結晶構造解析  
X-Ray Crystal  
Structure Analysis

(~寺田寅彦)  
Torahiko Terada



The Nobel Prize in Physics 1914

“for his discovery of the diffraction of X-rays by crystals”



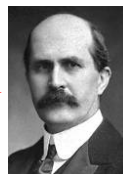
Max von Laue  
(1879-1960)

**ラウエ条件**  
**Laue Condition**



The Nobel Prize in Physics 1915

“for their services in the analysis of crystal structure by means of X-rays”

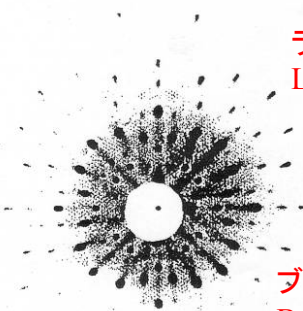


Sir William Henry Bragg  
(1862-1942)



William Lawrence Bragg  
(1890-1971)

**ブラッグ回折**  
**Bragg Diffraction**

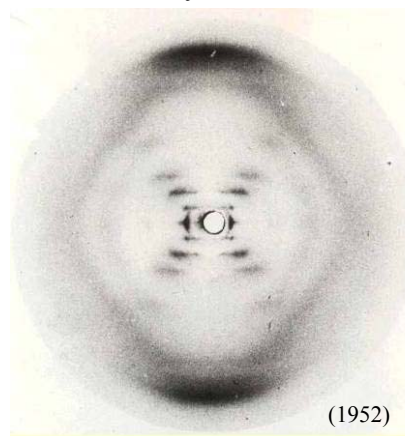
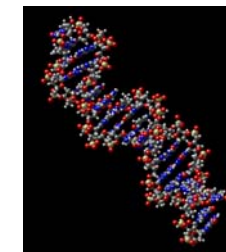


Laue picture of a four-fold symmetric  
Plane of NaCl crystal  
四回対称面のラウエ写真

DNA分子結晶のX線回折  
X-Ray Diffraction of DNA  
Molecular Crystal

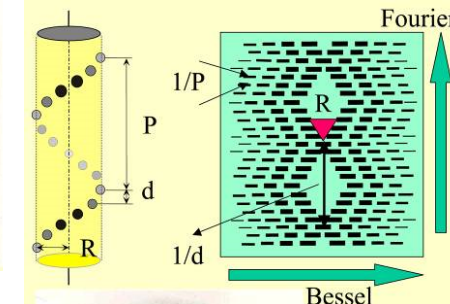


Rosalind Franklin



(1952)

The most beautiful X-ray diffraction  
pattern in the history!



一重らせん構造のX線回折(たんぱく質構造解析)(1952)  
X-Ray Diffraction of Single Helix Structure  
(Protein Structure Analysis)

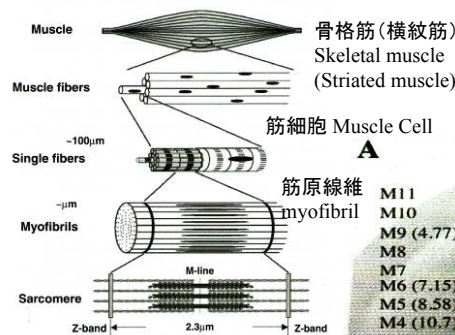
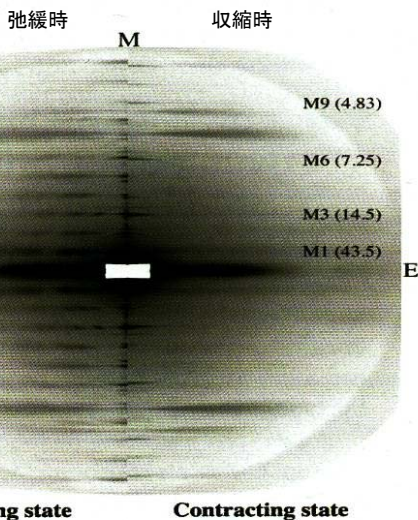


Figure 14  
The hierarchical structure of skeletal muscle.

**ミオシンとアクチンのすべり**  
Sliding of myosin and actin  
in muscle

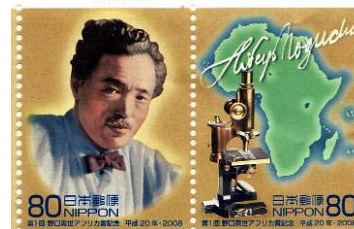
**カエルの筋肉のX線回折**  
**X-Ray Diffraction from Muscle**  
**of a Frog**



Resting state

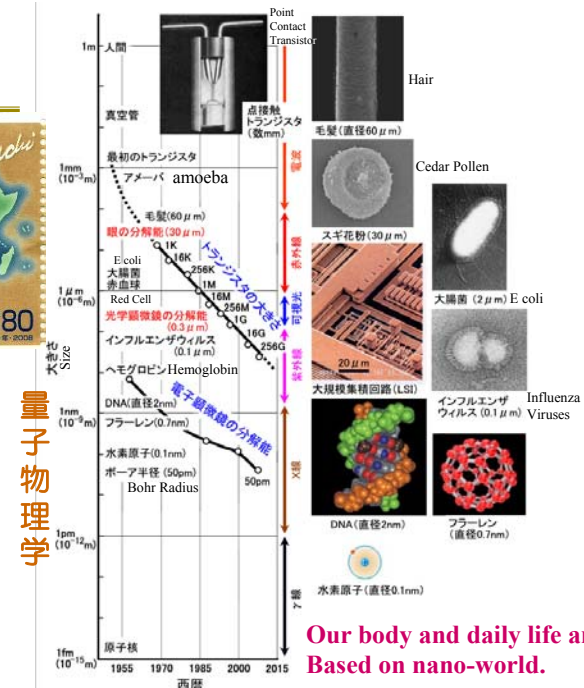
Contracting state

**ものの大きさ**  
**Size of Things**



1 nanometer  
= 10<sup>-9</sup> m  
= 10億分の1  
one-billionth  
meter

長谷川 修司  
「見えないものをみる」  
東京大学出版会 2008年



**Our body and daily life are  
Based on nano-world.**



表 87 ノーベル賞受賞者一覧 (物理学を中心として) (1)

受賞年	氏名	受賞理由	受賞年	氏名	受賞理由
1901	アントワーヌ・ヘンリ W. C. Roentgen	X線の発見	1902	ポール・ペラン P. Curie, M. Curie	放射能の発見による精密測定への貢献
1902	ヘンリクス・ロレンツ H. A. Lorentz	電気の放射線に及ぼす影響	1902	アルベール・アインシュタイン A. Einstein	相対論の発見
1903	マリ・キュリー P. Curie, M. Curie	天然放射線の発見	1902	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1904	ヘンリクス・ロレンツ H. A. Lorentz	電気の放射線に及ぼす影響	1902	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1905	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対論の発見	1903	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1906	ピエール・キュリー P. Curie, M. Curie	放射能の発見	1904	ヘンリクス・ロレンツ H. A. Lorentz	電気の放射線に及ぼす影響
1907	マックス・プランク M. Planck	量子論の発見	1905	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対論の発見
1908	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1906	ピエール・キュリー P. Curie, M. Curie	放射能の発見
1909	マリ・キュリー P. Curie, M. Curie	放射能の発見	1907	マックス・プランク M. Planck	量子論の発見
1910	アンソニー・ヘンリー A. H. Hall	ホール効果の発見	1908	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1911	ラザルス・ソール L. S. Solow	量子論の発見	1909	マリ・キュリー P. Curie, M. Curie	放射能の発見
1912	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1910	アンソニー・ヘンリー A. H. Hall	ホール効果の発見
1913	マリ・キュリー P. Curie, M. Curie	放射能の発見	1911	ラザルス・ソール L. S. Solow	量子論の発見
1914	ヘンリクス・ロレンツ H. A. Lorentz	電気の放射線に及ぼす影響	1912	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1915	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対論の発見	1913	マリ・キュリー P. Curie, M. Curie	放射能の発見
1916	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1914	ヘンリクス・ロレンツ H. A. Lorentz	電気の放射線に及ぼす影響
1917	マリ・キュリー P. Curie, M. Curie	放射能の発見	1915	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対論の発見
1918	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1916	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1919	マリ・キュリー P. Curie, M. Curie	放射能の発見	1917	マリ・キュリー P. Curie, M. Curie	放射能の発見
1920	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対論の発見	1918	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見

もっとも重要なノーベル賞は？  
Which is the most important Nobel Prize?

表 87 ノーベル賞受賞者一覧 (2)

受賞年	氏名	受賞理由	受賞年	氏名	受賞理由
1921	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対論の発見	1922	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1922	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1923	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1923	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1924	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1924	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1925	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1925	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1926	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1926	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1927	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1927	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1928	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1928	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1929	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1929	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1930	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1930	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1931	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1931	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1932	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1932	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1933	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1933	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1934	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1934	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1935	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1935	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1936	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1936	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1937	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1937	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1938	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1938	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1939	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1939	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1940	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1940	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1941	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1941	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1942	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1942	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1943	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1943	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1944	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1944	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1945	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1945	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1946	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1946	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1947	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1947	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1948	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1948	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1949	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見
1949	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見	1950	ニコラ・テスラ N. Tesla	無線電の発見



## The Nobel Prize in Physics 1956

半導体に関する研究とトランジスタ効果の発見に対して  
for their researches on semiconductors and their discovery of the transistor effect



**ショックレー**  
William B. Shockley  
USA  
Semiconductor Laboratory of Beckman Instruments, Inc.  
b. 1910  
d. 1989



**バーディーン**  
John Bardeen  
USA  
University of Illinois  
b. 1908  
d. 1991



**ブラッテン**  
Walter H. Brattain  
USA  
Bell Telephone Laboratories  
b. 1913  
d. 1987

## トランジスタ Transistor

コレクター  
エミッター Emitter Collector  
ベース Base  
Faint Input  
Larger Output  
2つの点接触型トランジスタ  
世界最初のトランジスタ・ラジオ  
World-first transistor radio  
スイッチをいれるとすぐに聞こえるトランジスタラジオは、真空管が温まるのを待つことに慣れた当時の聴衆に感銘を与えた。



## The Nobel Prize in Physics 2000

for basic work on information and communication technology  
“高速・光エレクトロニクスに使われる半導体ヘテロ構造の開発に対して”  
for developing semiconductor heterostructures used in high-speed- and opto-electronics  
“集積回路の発明に対して”  
for his part in the invention of the integrated circuit



**アルフェロフ**  
Zhores I. Alferov  
Russia  
A. F. Ioffe Physico-Technical Institute St. Petersburg  
b. 1930



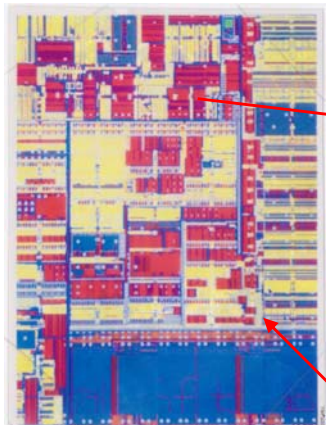
**クレーマー**  
Herbert Kroemer  
Germany  
University of California Santa Barbara, CA  
b. 1928



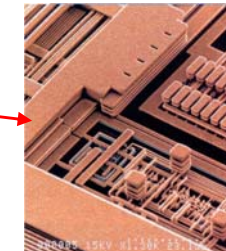
**キルビー**  
Jack S. Kilby  
USA  
Texas Instruments Dallas, TX, USA  
b. 1923




# 大規模集積回路 LSI (Large-Scale Integrated Circuit)



光学顕微鏡写真  
Optical Micrograph



電子顕微鏡写真  
Electron Micrograph



1億個のトランジスタが搭載  
最小線幅  $0.1 \mu\text{m} = 100 \text{ nm}$   
=原子 200 列

100M transistors on a chip  
Minimum Line Width  
 $0.1 \mu\text{m} = 100 \text{ nm} = 200\text{-atom wide}$

## 超格子構造 - 人工結晶

### Superlattice Structures—Man-made Crystal

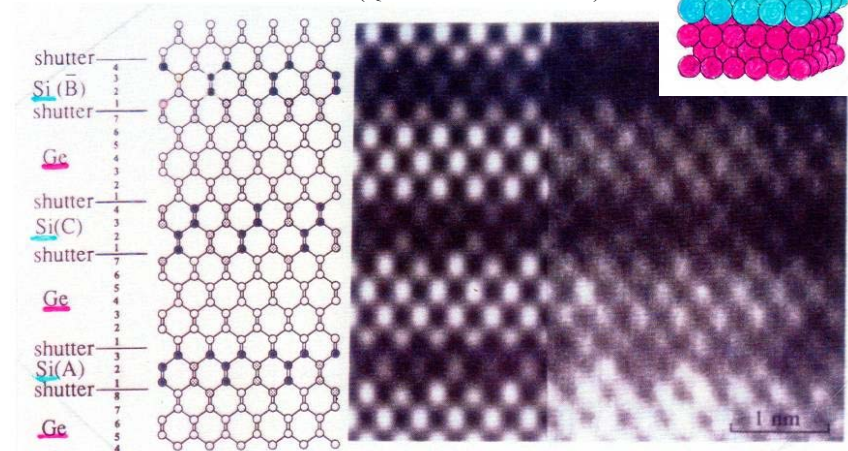
異なる原子を積み重ねる

→ 自然には存在しない人工物質  
(量子井戸)

Stack up different atoms layer-by-layer

⇒ Artificial materials which do not exist in nature.

(Quantum well structures)



GeSi超格子の電子顕微鏡写真 TEM image of GeSi superlattice



## The Nobel Prize in Physics 1973

### トンネル効果の発見 Discovery of Tunneling Effect

for their experimental discoveries regarding tunneling phenomena in semiconductors and superconductors, respectively

半導体内で

超伝導体内で

for his theoretical predictions of the properties of a supercurrent through a tunnel barrier, in particular those phenomena which are generally known as the Josephson effects

ジョセフソン効果の理論的予測



江崎玲於奈  
Leo Esaki  
Japan  
IBM  
b. 1925



ギエーバー  
Ivar Giaever  
USA  
General Electric Company  
b. 1929



ジョセフソン  
Brian D. Josephson  
United Kingdom  
University of Cambridge  
b. 1940



## The Nobel Prize in Physics 2007



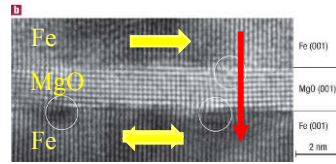
巨大磁気抵抗効果の発見  
for the discovery of Giant Magnetoresistance"  
→ 磁気ヘッド (ハードディスクの小型化・高密度化)  
Magnetic head (down sizing and high-density magnetic hard disk)



**Albert Fert**  
France  
南パリ大学  
b. 1938

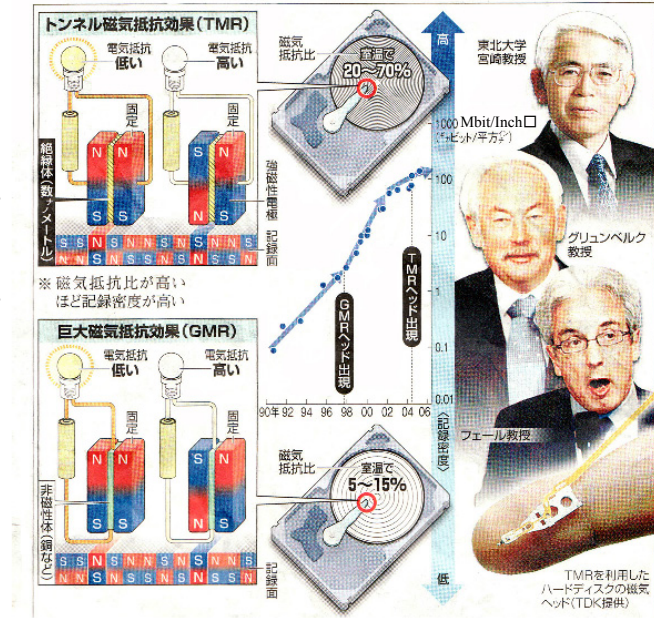


**Peter Grünberg**  
Germany  
Julich研究所  
b. 1939



S. Yuasa, et al., Nature Materials 3, 868 (2004).

トンネル磁気抵抗効果(TMR)  
Tunnel magnetoresistance  
Parallel M ⇒ Low resistance  
Anti-parallel M ⇒ High resistance



Newspaper at Oct 2007 reporting The Nobel Prize in Physics this year

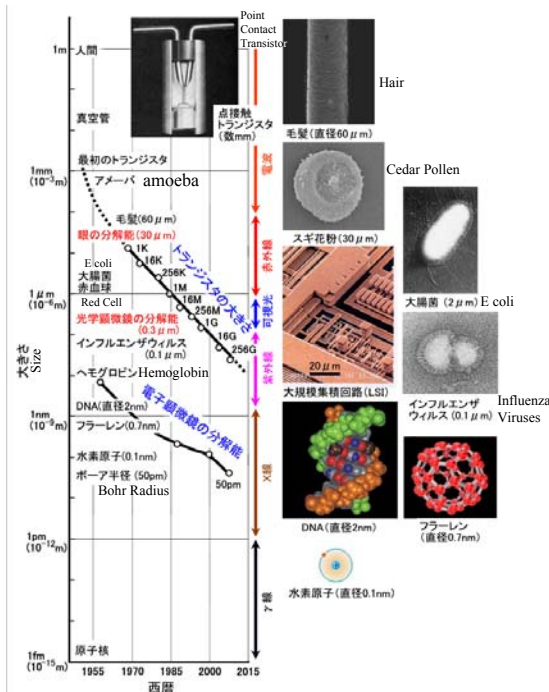
## ものの大きさ Size of Things

1 nanometer  
= 10<sup>-9</sup> m  
= 10億分の1  
one-billionth  
meter

Our body and daily life are  
Based on nano-world.

↓  
Microscopes to see  
the nano-world

長谷川 修司  
「見えないものをみる」  
東京大学出版会 2008年



## The Nobel Prize in Physics 1986

for his fundamental work in electron optics, and for the design of the first electron microscope

電子光学の基礎研究と  
最初の電子顕微鏡の設計



**ルスカ**  
Ernst Ruska  
Fritz-Haber-Institut, G  
b. 1906  
d. 1988

for their design of the scanning tunneling microscope  
走査トンネル顕微鏡 (STM) の設計  
Scanning Tunneling Microscope



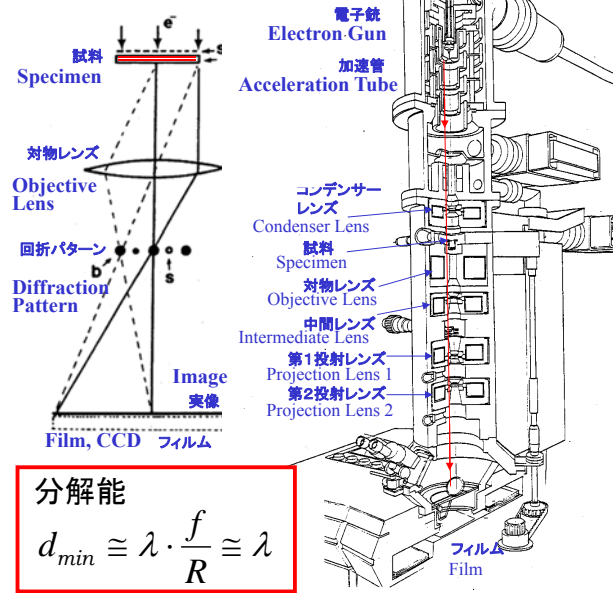
**ビニツヒ**  
Gerd Binnig  
IBM, Zurich, G  
b. 1947



**ローラー**  
Heinrich Rohrer  
IBM, Zurich, Swiss  
b. 1933  
D 2013

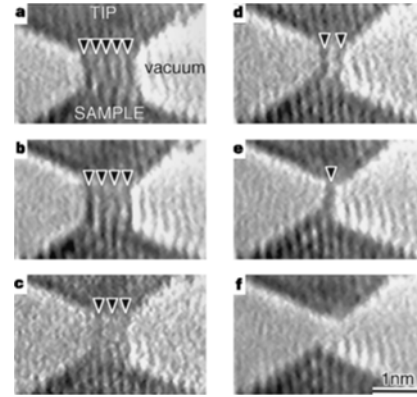
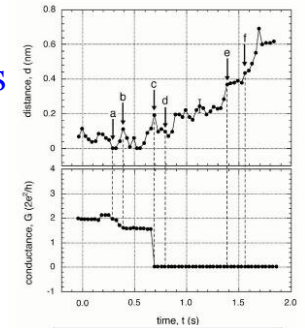
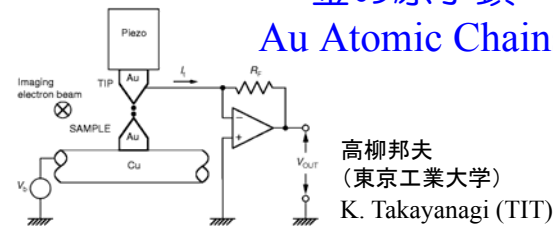


# 電子顕微鏡 (Transmission) Electron Microscope



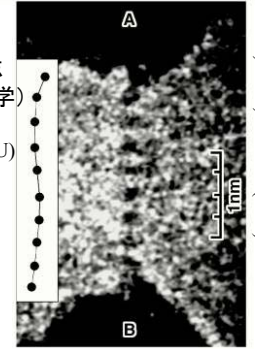
日立 外村彰氏提供  
Hitachi A. Tonomura

# 金の原子鎖 Au Atomic Chains



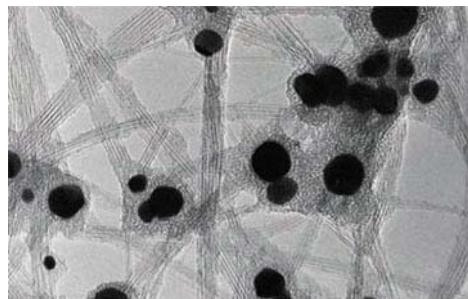
H. Ohnishi, Y. Kondo & K. Takayanagi  
NATURE VOL 395, 780 (1998)

木塚徳志 (筑波大学)  
T. Kizuka (Tsukuba U)



T. Kizuka, S. Unehara, S. Fujiwara,  
Japanese Journal of Applied Physics,  
40, Part 2, No. 1A/B (2001) L71

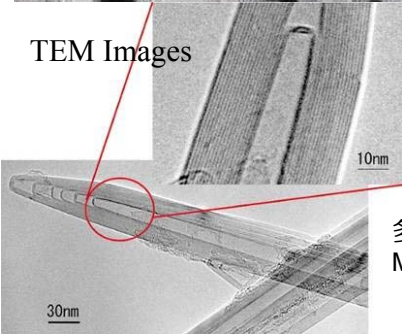
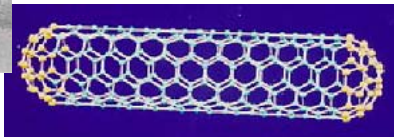
# カーボンナノチューブ Carbon NanoTube (CNT)



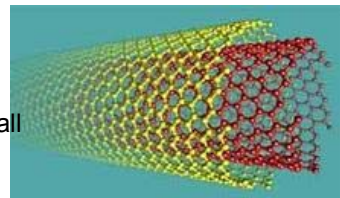
飯島澄男  
Sumio Iijima



単層  
Single-Wall

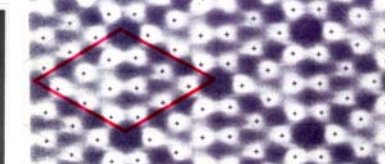
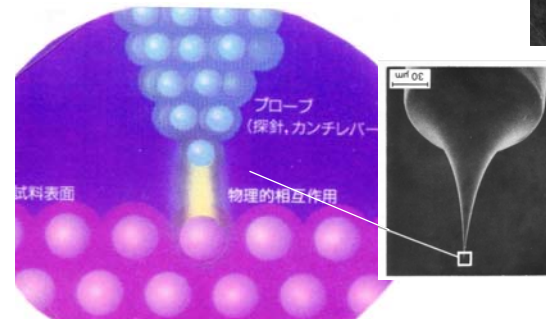
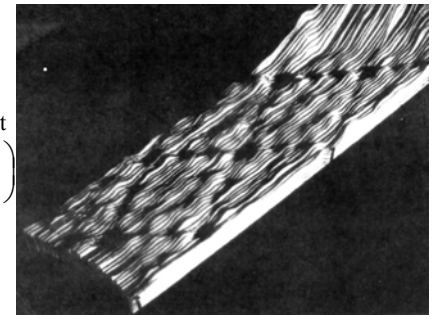
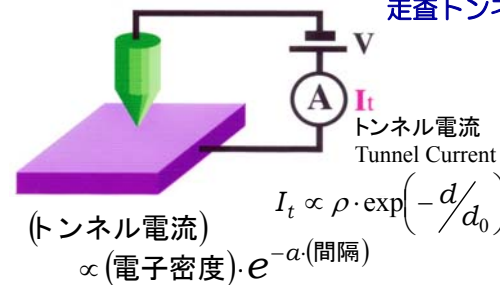


多層  
Multi-Wall



# Scanning Tunneling Microscope (STM) by Binnig and Rohrer

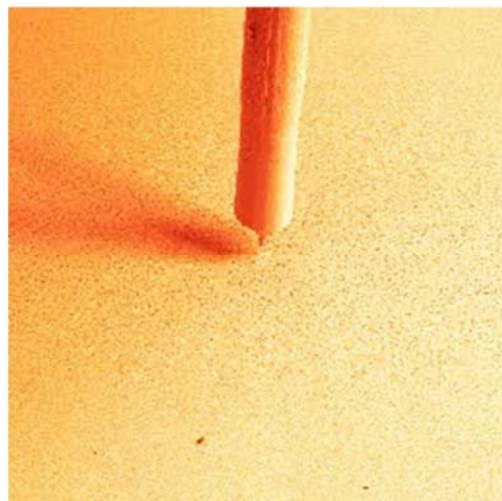
## 走査トンネル顕微鏡



Si(111)-7x7 清浄表面のSTM像。  
原子一個一個が輝点として分解されている。  
STM image of Si(111)-7x7 surface in 1983  
Individual atoms as bright spots



# STM針の走査 STM Tip Scanning

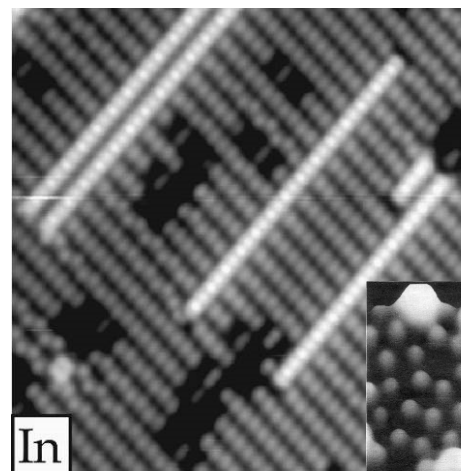


SEM像  
(走査電子顕微鏡)  
Scanning electron  
Microscope movie

トンネル電流が一定になるように針を上げ下げしている。針は試料に接触していない。  
The tip is made up and down to keep the tunnel current constant with avoiding direct contact to the sample.

Bert Voigtländer (Juelich Forschungszentrum, Germany)

<http://www.fz-juelich.de/video/voigtlaender/>

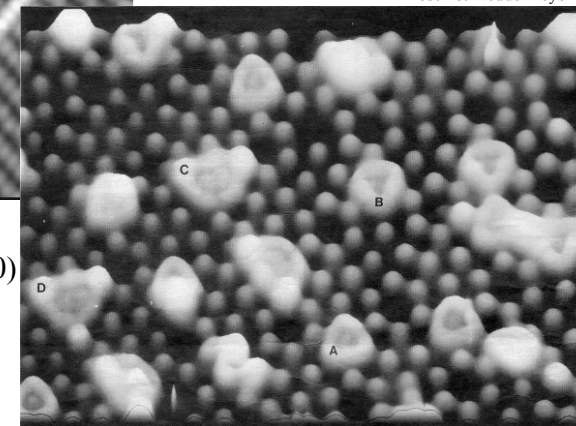


J. Nogami, et al.

In atomic chains on Si(100)

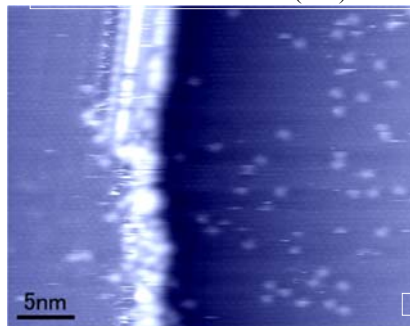
STM像いろいろ  
STM Images  
Ag Clusters on Si(111)  
crystal surface  
電子雲がみえる  
Electron cloud is observed.

Tosch & Neddermeyer



## 2次元 気体-液体 相転移 Two-Dimensional Gas-Liquid Phase Transition

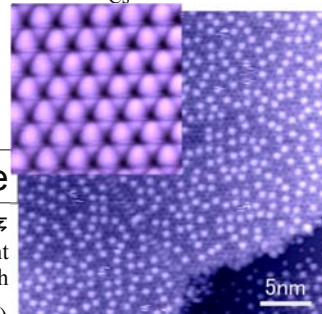
Cs atoms adsorbed on Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface at RT  $\Rightarrow$  STM at 65 K



### 2次元気体相 2D Gas Phase

無秩序な原子配列 Random arrangement  
激しく動き回っている Moving around rapidly  
Cs 原子の吸着量=0.01 原子層  
Amount of adsorbed Cs atoms  $\Theta_{Cs} = 0.01$  mono-atomic layer

$\Theta_{Cs} = 0.08$  ML

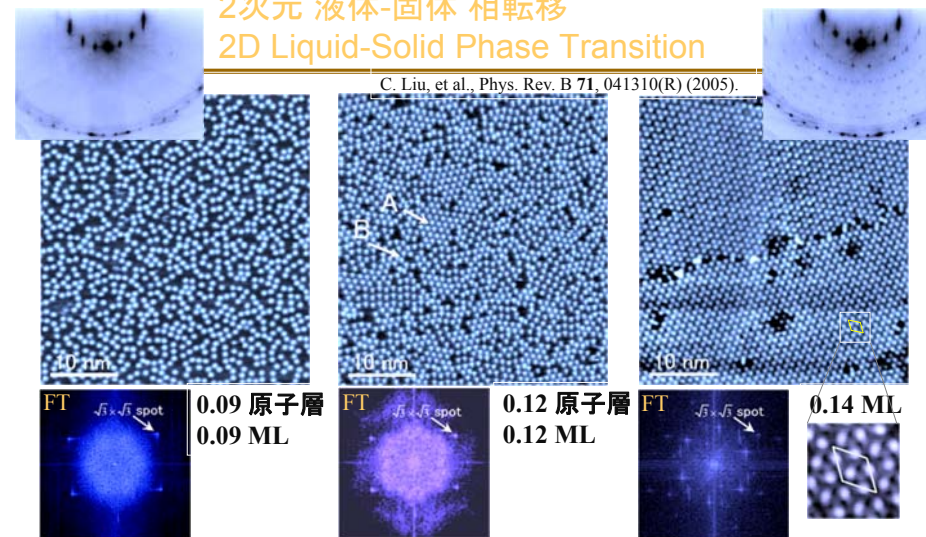


### 2次元液体相 2D Liquid Phase

原子配列に短距離秩序  
short-range order in atom arrangement  
あまり動き回らない Do not move around so much  
C. Liu, et al., Phys. Rev. B 71, 041310(R) (2005).

## 2次元 液体-固体 相転移 2D Liquid-Solid Phase Transition

C. Liu, et al., Phys. Rev. B 71, 041310(R) (2005).



液体相 Liquid Phase

中間相 (2相混合状態)  
Intermediate Phase (2-Phase Mixed)

固体相  
Solid Phase

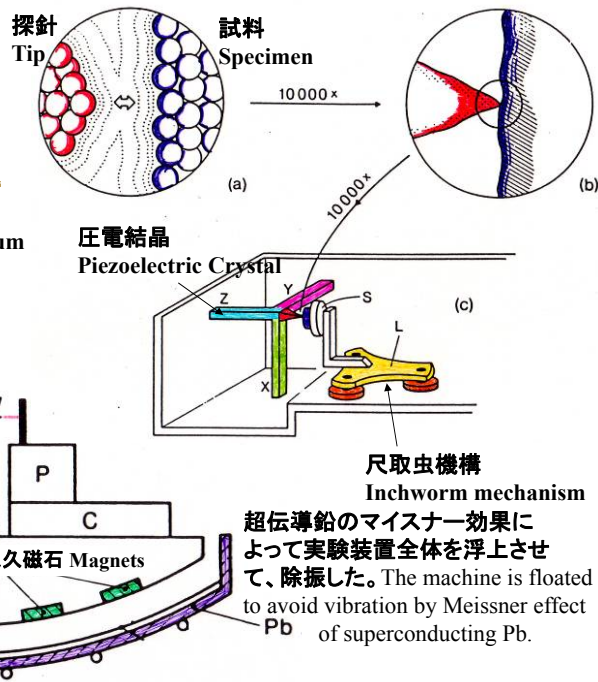
結晶化 Crystallization (核形成 Nucleation)

融解 Melting (...)



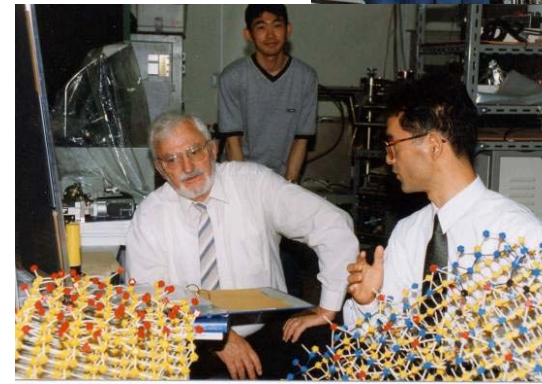
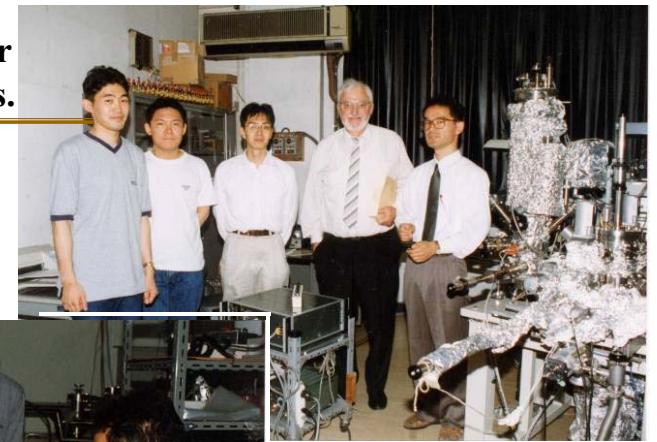
# BinnigとRohrer の最初のSTM装置 First STM Apparatus by Binnig and Rohrer

大英博物館に展示  
Exhibited at The British Museum



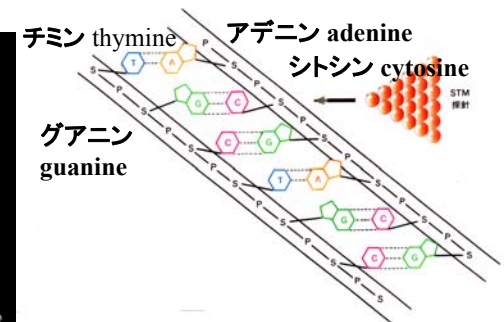
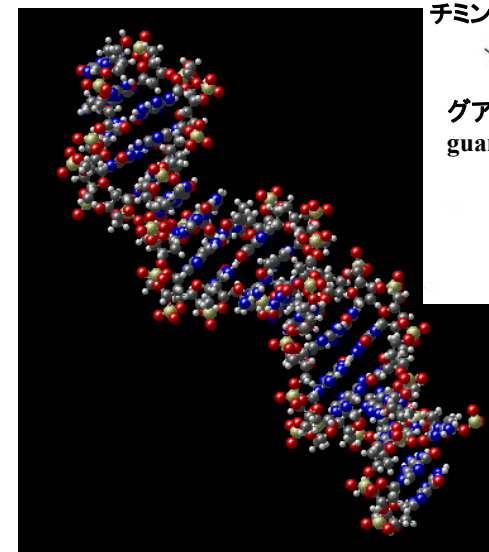
# Heinrich Rohrer visited us.

1994



2002

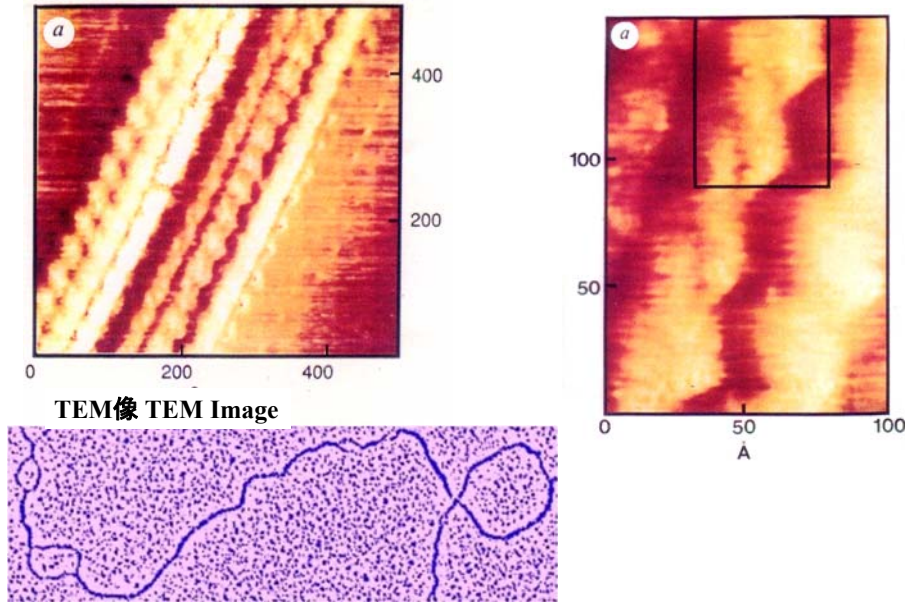
# DNA





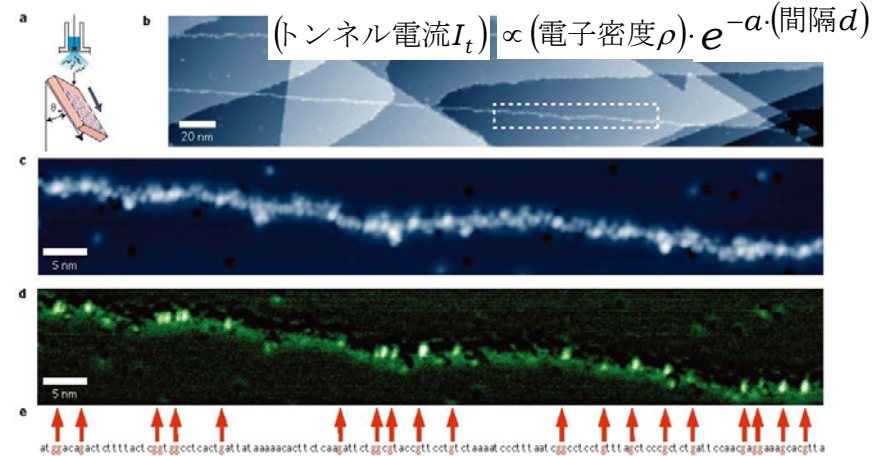
## STMによるDNAの直接観察 Direct Observation of DNA by STM

P. G. Arscott, et al.,  
Nature 339 (1989) 484



## 1本鎖DNAのSTM観察 —塩基配列の直接観察— STM Observation of Single-Strand DNA —Observation of Base Sequence—

田中裕行、川合知二H. Tanaka, T. Kawai, Nature Nanotechnology 4, 518 (2009).



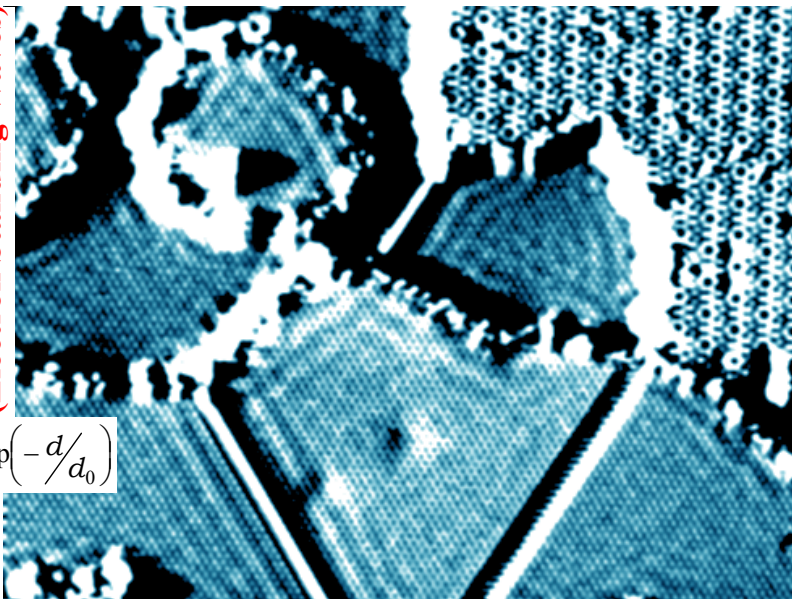
電圧を調節すると、グアニン分子だけが光って見える (電子密度の違い)  
Guanine molecules only are observed brighter with a certain bias voltage (due to the electron density at the particular energy)

## 電子の海のさざ波 Ripples in electronic sea (Electron Standing Waves)

$$I_t \propto \rho \cdot \exp\left(-\frac{d}{d_0}\right)$$

$$\rho = |\Psi|^2$$

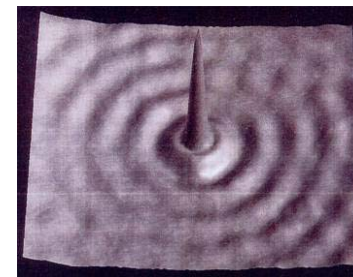
電子の波動関数 (の絶対値の2乗) が直接見える!!!  
Electron wavefunction (its square of the absolute value) is directly observed!!!



## Cu 結晶表面上の電子定在波 Electron Standing Waves on Cu Crystal Surface

Crommie, Lutz, Eigler, Nature 363, 524 (1993).

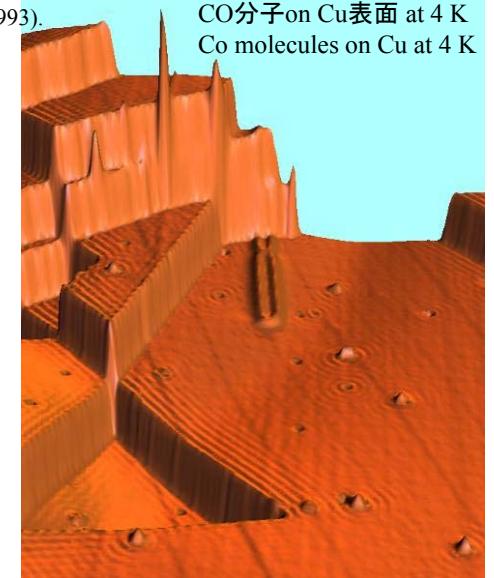
CO分子 on Cu表面 at 4 K  
Co molecules on Cu at 4 K



Fe atoms on Cu crystal

s-wave s波

→ 同心円状のさざなみ  
Concentric Ripples





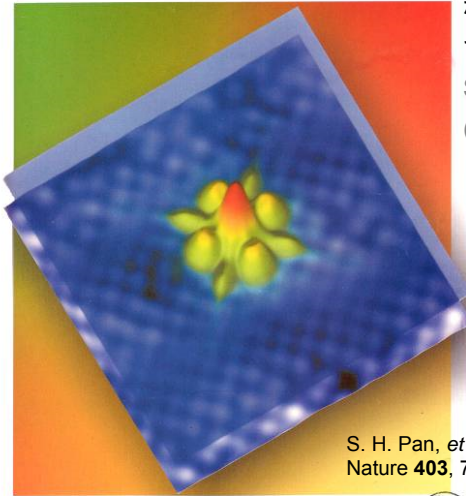
高温超伝導体 High  $T_c$  SC

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  (BSCCO) の結晶の

なかの不純物原子(Zn)1個 のまわりに  
できた "定在波" → *d-wave* 超伝導

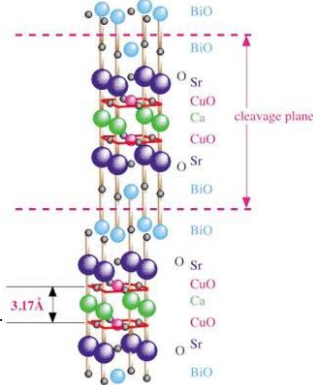
Standing wave around an impurity

(Zn) atom ⇒ *d-wave* SC

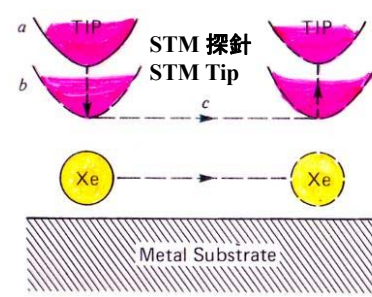


S. H. Pan, et al.,  
Nature 403, 746 (2000).

THE SHAPE OF SUPERCONDUCTIVITY



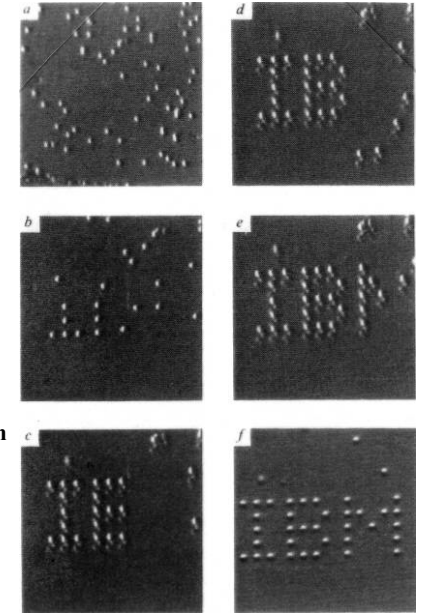
原子操作 Atom Manipulation



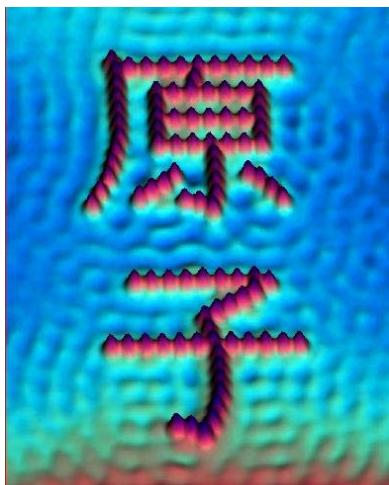
Eigler & Schweizer, Nature 344 (1990) 524

Ni 結晶表面に吸着させたXe 原子1個1個を  
STM 探針で自由に動かす  
Drag individual Xe atoms to a aimed position  
On Ni crystal by a STM tip

Atom ピンセット  
Atom Tweezer



原子文字いろいろ  
Atom Letters



IBM  
Atom Drag

固体表面の原子を  
観て操る

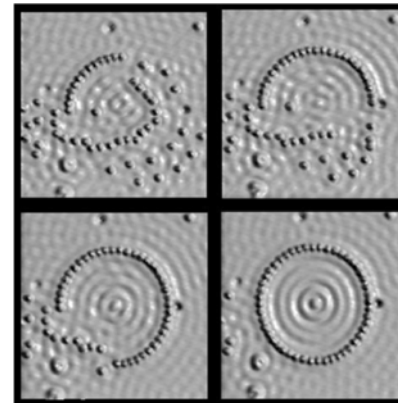
電子の雲が  
原子をはぎとる

定在トンネル  
顕微鏡  
の仕組み

IBM 日立 Hitachi  
Atom Extraction,  $\text{MoS}_2$

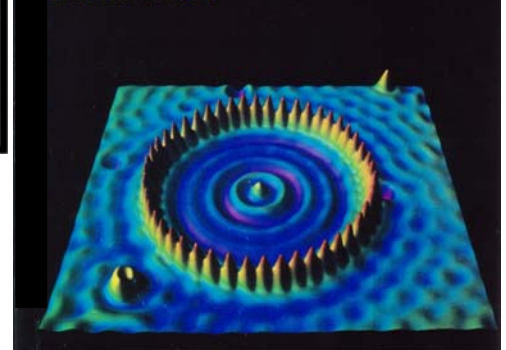
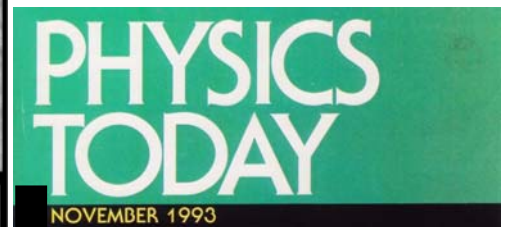
原子で描いた円 Quantum Corral (量子囲い柵)

Fence to confine electrons



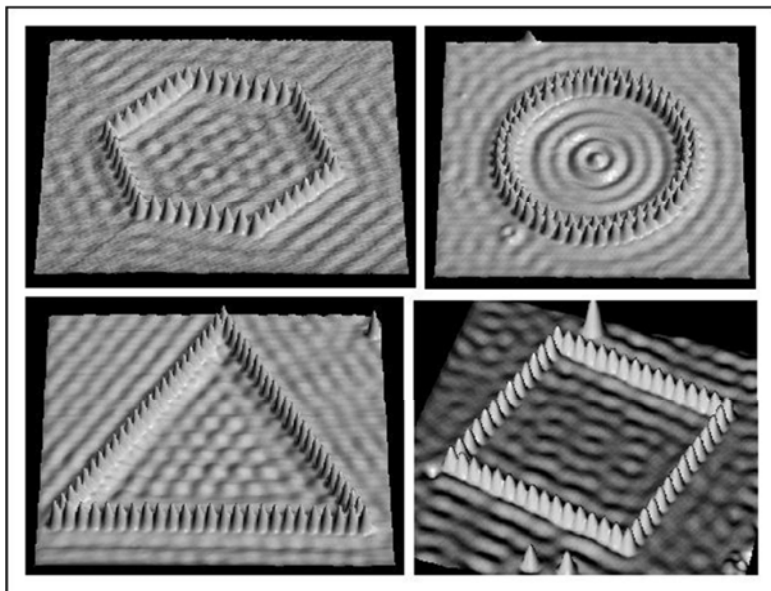
Eigler, et al, Nature 363 (1993) 524  
Science 262 (1993) 218

Cu結晶表面上に48個のFe原子  
48 Fe atoms in a circle on Cu crystal  
円の直径 Diameter=14nm  
4.2K  $V=0.01V$ ,  $I=1.0 \text{ nA}$

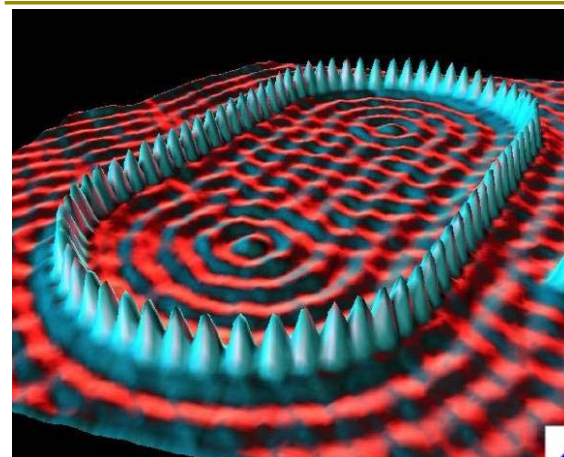




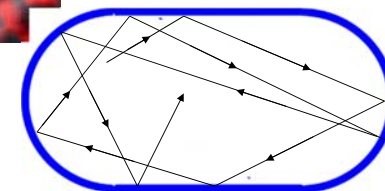
## Various Quantum Corral



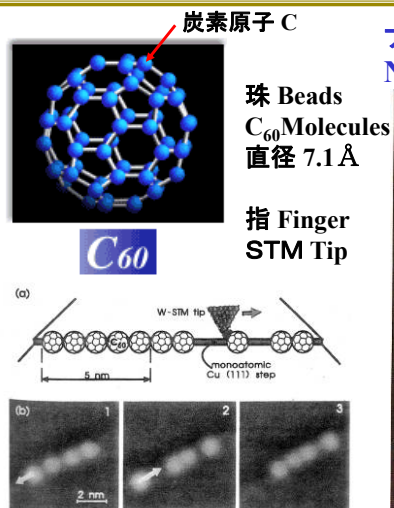
## Quatum Studium 量子スタジアム



ビリヤード問題  
Billiard Problem  
↓ 粒子 Particle  
↓ 波 Wave  
量子カオス  
Quantum Chaos

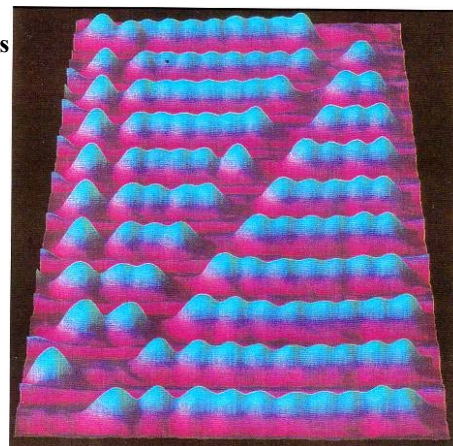


## 分子操作 Molecule Manipulation フラーレン C<sub>60</sub> 分子 Fullene Molecule

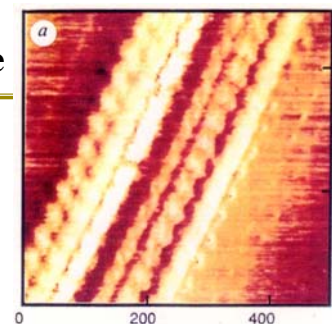
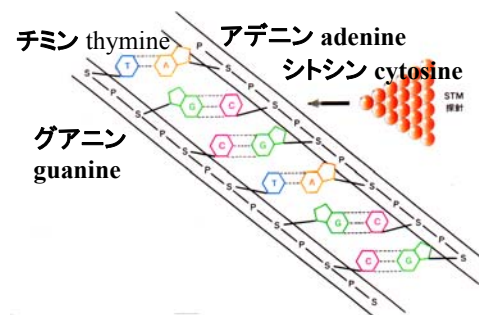


ナノそろばん  
Nano Abacus

©IBM Zurich Lab.  
Surface Science 386(1997) 101

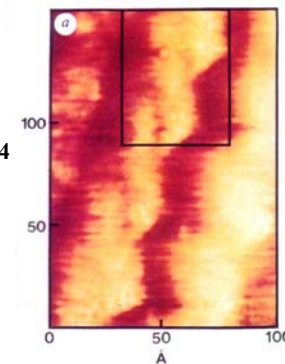
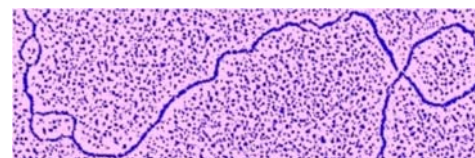


## Direct Observation of DNA Molecule



P. G. Arscott, et al.,  
Nature 339 (1989) 484

TEM像





# 分子操作 Molecule Manipulation

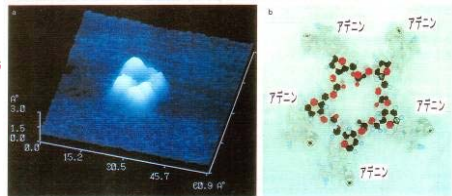
## DNA塩基分子 DNA Bases

川合知ら T. Kwai (大阪大学 Osaka U.)

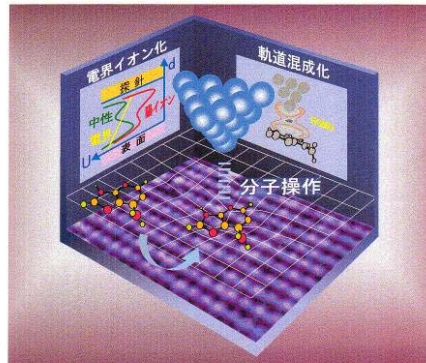
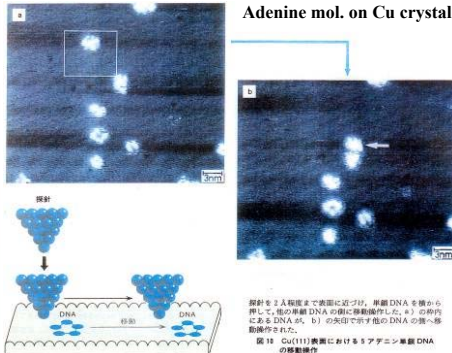
### 日本物理学会誌

- バリトン非保存発見への道
- 走査トンネル顕微鏡探針を用いたDNA分子の識別と操作
- KEK-神岡ニュートリノ振動実験
- 進化分子工学のすすめ
- 軟X線エリプソメトリー
- 宝石一考

**BUTSURI**  
1997 Vol. 52 No. 9

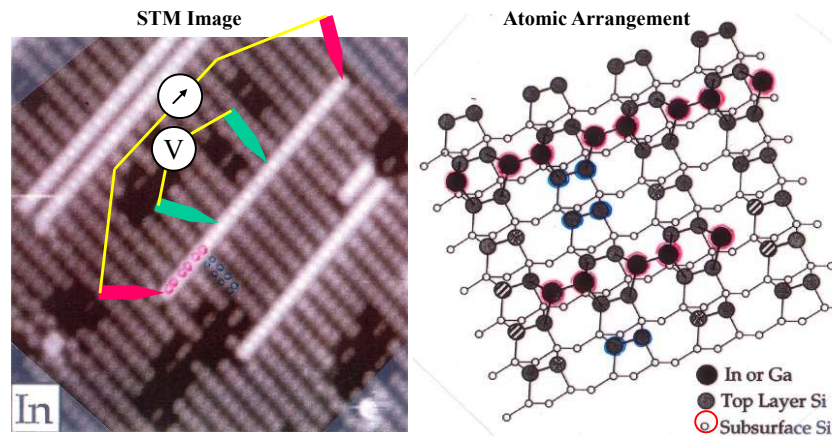


銅結晶表面上に吸着させたアデニン分子  
Adenine mol. on Cu crystal



# シリコン表面上の原子鎖 Atomic Wires on Silicon Surface

In/Si(001) Evans and Nogami, Physical Review B59 (1999) 7644



1次元金属? 絶縁体(ヤーン・テラー or パイエルス)?  
One-dim. Metal? Insulator (Jahn-Teller or Peierls insulator)?  
朝永・ラティンジャー液体? Yomonaga-Luttinger Liquid?

# DNA分子の電気伝導 Electrical Conduction through DNA

NATURE | VOL 398 | 1 APRIL 1999 |

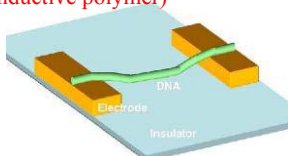
Physica E 33 (2006) 1-12

## Electrical conduction through DNA molecules

Hans-Werner Fink & Christian Schönberger

Institute of Physics, University of Basel, Klingelbergstrasse 82, CH-4056 Basel, Switzerland

良導体(導電性ポリマー)  
Good conductor (conductive polymer)



超伝導体 Superconductor

## Proximity-Induced Superconductivity in DNA

A. Yu. Kasumov,<sup>1,2\*</sup> M. Kociak,<sup>1</sup> S. Guéron,<sup>1</sup> B. Reulet,<sup>1</sup> V. T. Volkov,<sup>2</sup> D. V. Klinov,<sup>3</sup> H. Bouchiat<sup>1</sup>

12 JANUARY 2001 VOL 291 SCIENCE

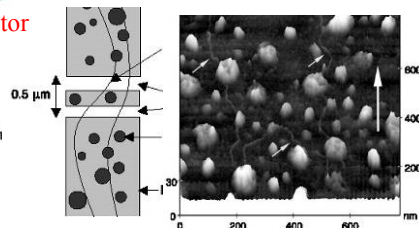
Masateru Taniguchi, Tomoji Kawai\*

Review

## DNA electronics

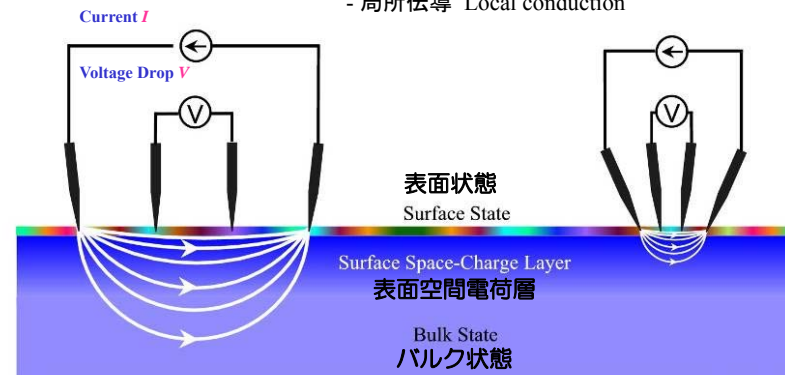
Semiconductor

poly (dG)-poly(dC); p型半導体  
poly (dA)-poly(dT); n型半導体



# 4端子プローブ法による電気伝導の測定 Electrical Conduction measurements by Four-Point Probe Method

- Resistance  $R = \frac{V}{I} \cdot C$  C: Correction Factor
- 接触抵抗の除外 Avoiding contact resistance
  - 3つの伝導チャンネル Three channels for conduction
  - 表面感度 Surface sensitivity
  - 局所伝導 Local conduction

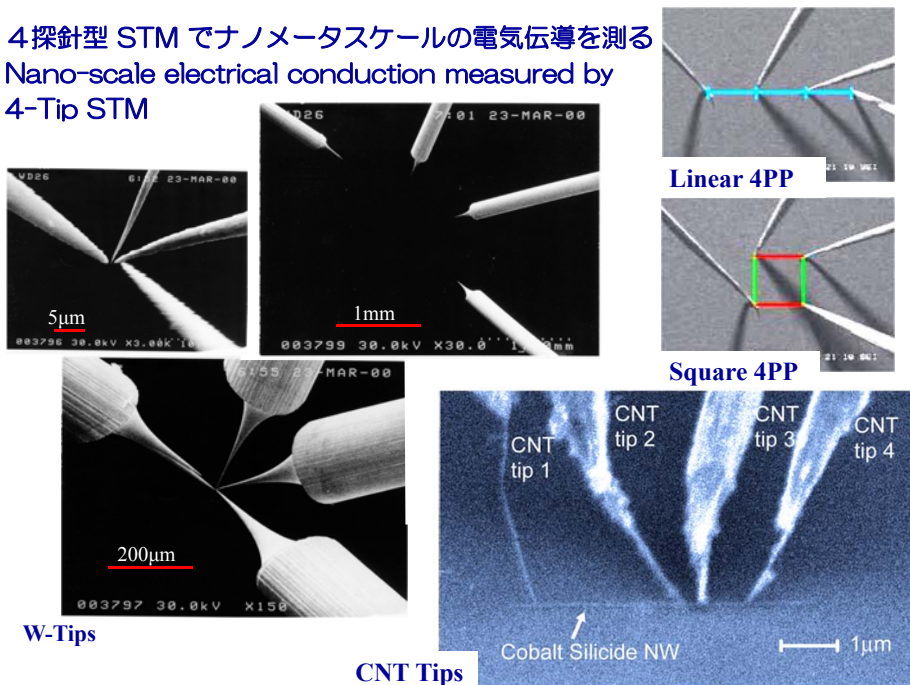


Macro-4-Point Probe  
バルク敏感 Bulk sensitive  
(表面鈍感 Insensitive to surface)

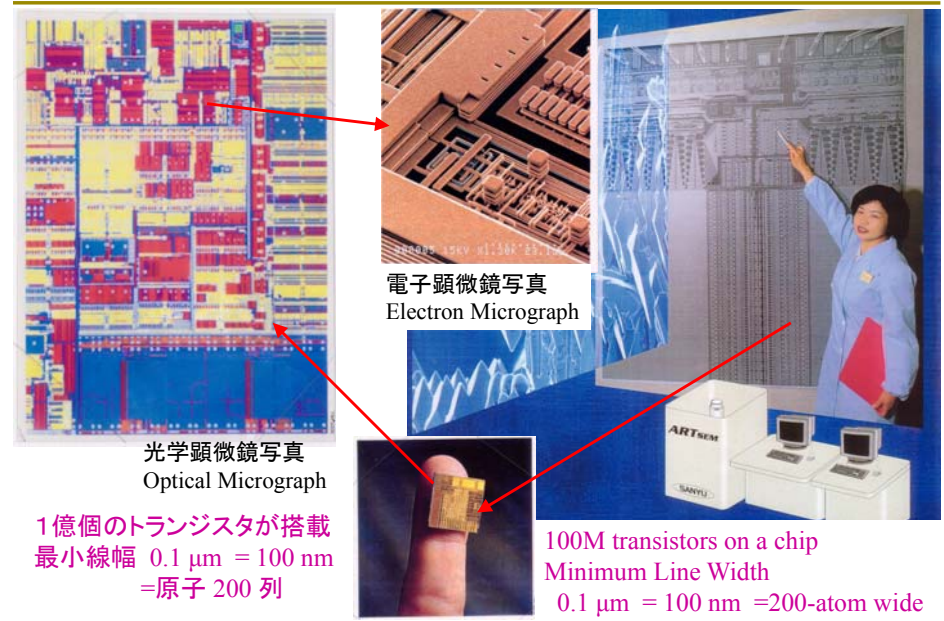
Micro-4-Point Probe  
表面敏感 Surface sensitive



### 4探針型 STM でナノメータスケールの電気伝導を測る Nano-scale electrical conduction measured by 4-Tip STM



### 大規模集積回路 LSI (Large-Scale Integrated Circuit)



### グリーン関数 STM (多探針 STS) Green's Function STM (Multi-Tip STM)

Q. Niu, M.C. Chang, C.K. Shih,  
Phys. Rev. B 51 (1995) 5502.

**Double-Tip STS (Transconductance)** → **Green Function**

$$\sigma_{21} = \frac{\partial I_2}{\partial V_1} \propto |G(r_1, r_2; \epsilon = eV)|^2$$

波動関数の伝播  
Propagation of wavefunction

実空間でのグリーン関数マッピング  
Mapping of Green's Function in real space

**Single-Tip STS (Differential Conductance)** → **局所状態密度**  
Local density of states

$$\sigma_1 = \frac{\partial I_1}{\partial V_1} \propto |\Psi(r_1)|^2 \propto \rho(r)$$

→ **実空間での波動関数マッピング**  
Mapping of Wavefunction in real space

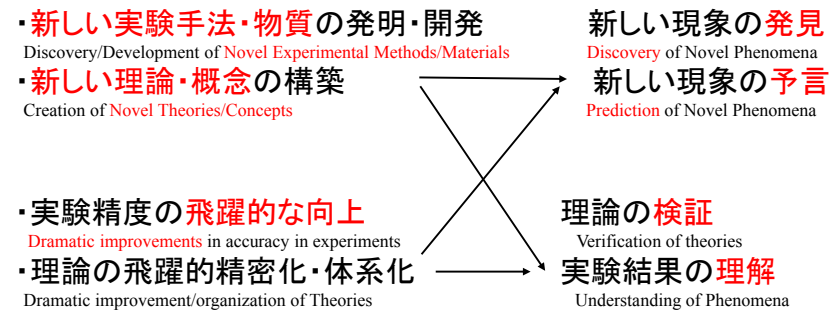
Bloch Wave:  $e^{ik \cdot r} u_{nk}(r)$

$$G(r_1, r_2; \epsilon) \propto u_{nk}(r_1) u_{nk}^*(r_2) \left\{ 2\pi \frac{\partial \epsilon_{n-}}{\partial k_{\parallel}} \frac{\partial \epsilon_{n-}}{\partial k_{\perp}} \right\}^{-1/2}$$

Bloch Function → Band Structure

Electron standing wave near atomic steps on surface

### ノーベル賞は遠くない The Nobel Prize is not far away!



→ 世の中を変える Change our world  
考え方を変える Change our concepts/understandings