

Schedule of The First Half of The Course (Hasegawa)

Lecture Slides (PDF files)

<http://www-surface.phys.s.u-tokyo.ac.jp/KougiOHP/>

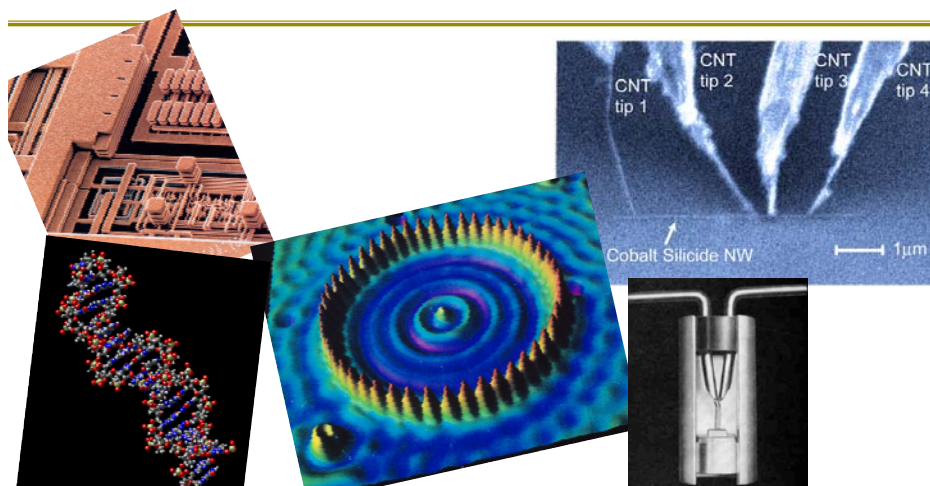
1. Nanoscience and Surface Physics ナノサイエンスと表面物理
Nanoscience in Nobel Prize
2. Atomic Arrangements at Surfaces 表面原子配列構造
Scanning Tunneling Microscopy, Electron Diffraction
走査トンネル顕微鏡、電子回折
3. Surface Electronic States 表面電子状態
Surface states 表面状態、Rashba Effect ラシュバ効果
Topological Surface States トポロジカル表面状態、
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
2D Materials 2次元物質
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, 6th 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ーナノワールドと量子力学ー』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:スピンドットとトポロジカル絶縁体ー量子物性とスピントロニクスーの発展ー(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ー実験から見てー』, 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

Surface Transport Lab, UT Hongo 

General Introduction — Nano Science and Surface Physics —



The Nobel Prize in Physics 1901

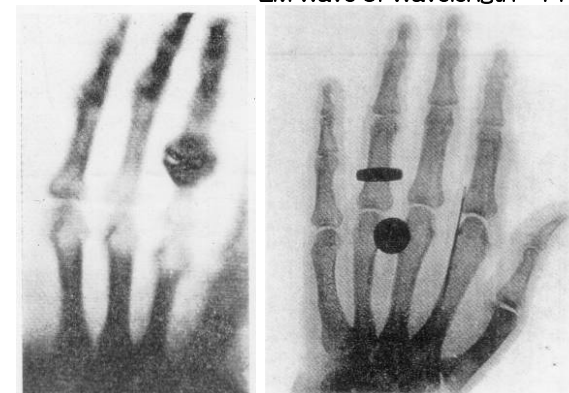
in recognition of the extraordinary services he has rendered by the discovery of the remarkable rays subsequently named after him

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



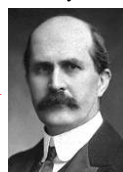
Max von Laue
(1879-1960)

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”



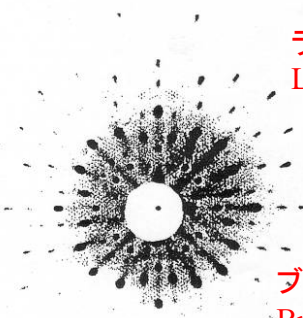
Sir William Henry Bragg
(1862-1942)



William Lawrence Bragg
(1890-1971)

ブラッグ回折
Bragg Diffraction

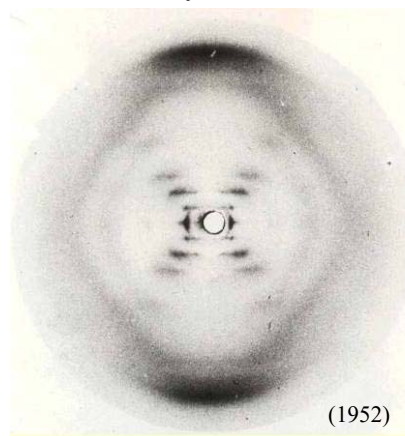
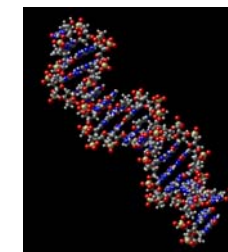
Laue picture of a four-fold symmetric
Plane of NaCl crystal
四回対称面のラウエ写真



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

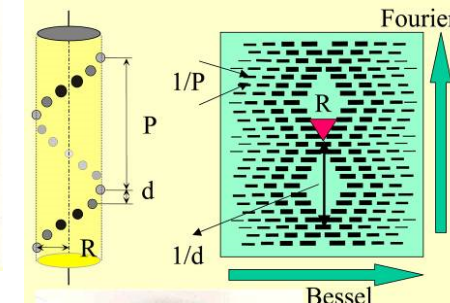


Rosalind Franklin



(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)

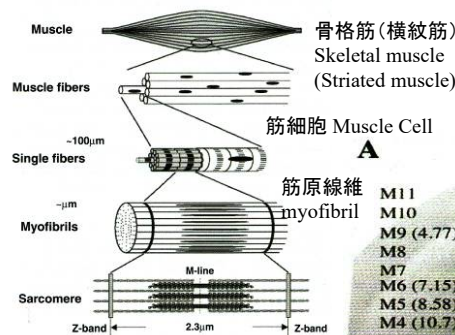
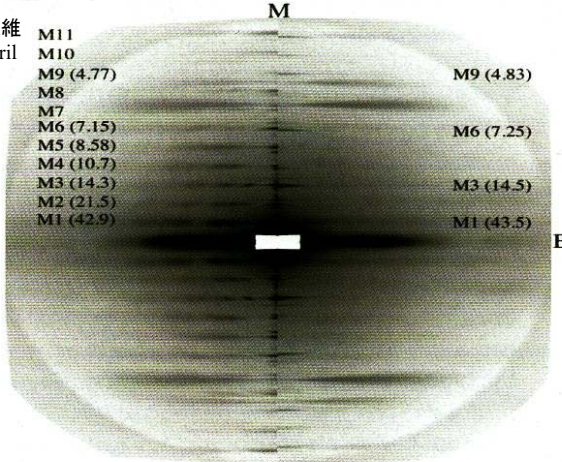


Figure 14
The hierarchical structure of skeletal muscle.

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

弛緩時 M 収縮時

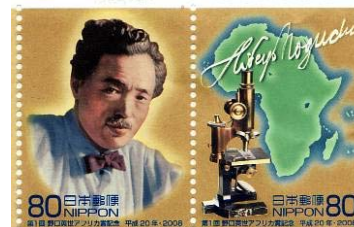


Resting state

Contracting state

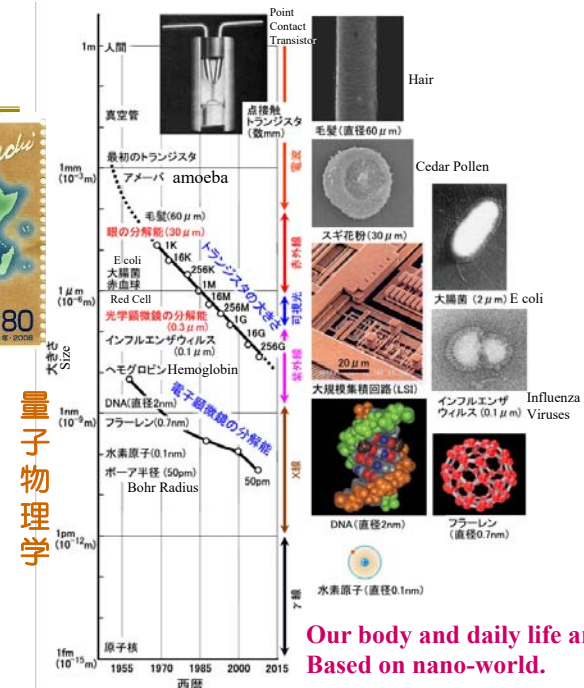
Relaxation (弛緩時)	Contraction (収縮時)
M11	M9 (4.83)
M10	M8
M9 (4.77)	M6 (7.25)
M8	M5 (8.58)
M7	M4 (10.7)
M6 (7.15)	M3 (14.5)
M5 (8.58)	M2 (21.5)
M4 (10.7)	M1 (43.5)
M3 (14.5)	
M2 (21.5)	
M1 (43.5)	

ものの大きさ
Size of Things



1 nanometer
= 10⁻⁹ 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・アンリ・ベクレル W. C. Roentgen	X線の発見 (比) 物理学の発展および 放射線の発見	1902	ポール・ペラン P. Curie, M. Curie	放射能の発見 (比) 物理学の発展
1902	ヘンリクス・ロレンツ H. A. Lorentz	電磁放射線と光の性質 に関する研究	1903	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展
1903	マリ・キュリー P. Curie, M. Curie	放射能の発見 (比) 物理学の発展	1904	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展
1904	ヘンリクス・ロレンツ H. A. Lorentz	電磁放射線と光の性質 に関する研究	1905	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展
1905	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展	1906	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展
1906	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展	1907	ヘンリクス・ロレンツ H. A. Lorentz	電磁放射線と光の性質 に関する研究
1907	ヘンリクス・ロレンツ H. A. Lorentz	電磁放射線と光の性質 に関する研究	1908	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展
1908	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展	1909	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展
1909	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展	1910	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展
1910	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展	1911	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展
1911	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展	1912	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展
1912	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展	1913	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展
1913	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展	1914	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展
1914	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展	1915	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展
1915	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展	1916	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展
1916	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展	1917	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展
1917	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展	1918	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展
1918	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展	1919	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展
1919	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展	1920	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展

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
1920	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展	1921	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展
1921	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展	1922	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展
1922	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展	1923	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展
1923	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展	1924	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展
1924	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展	1925	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展
1925	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展	1926	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展
1926	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展	1927	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展
1927	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展	1928	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展
1928	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展	1929	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展
1929	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展	1930	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展
1930	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展	1931	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展
1931	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展	1932	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展
1932	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展	1933	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展
1933	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展	1934	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展
1934	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展	1935	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展
1935	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展	1936	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展
1936	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展	1937	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展
1937	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展	1938	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展
1938	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展	1939	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展
1939	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展	1940	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展
1940	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展	1941	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展
1941	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展	1942	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展
1942	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展	1943	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展
1943	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展	1944	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展
1944	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展	1945	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展
1945	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展	1946	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展
1946	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展	1947	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展
1947	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展	1948	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展
1948	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展	1949	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展
1949	アルベルト・アインシュタイン A. Einstein	相対性理論の発見 (比) 物理学の発展	1950	ニコラ・テスラ N. Tesla	交流電気の理論 (比) 物理学の発展



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. 1931
d. 1987

トランジスタ Transistor

コレクター
エミッター Emitter Collector
Faint Input
ベース
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

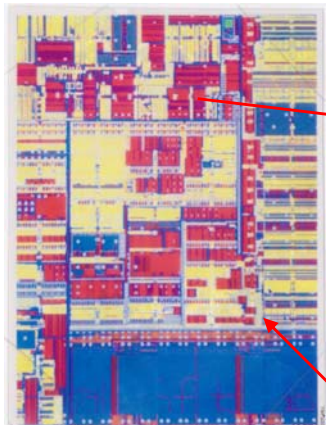


クレーマー
Herbert Kroemer
Germany
University of California
Santa Barbara, CA
b. 1928



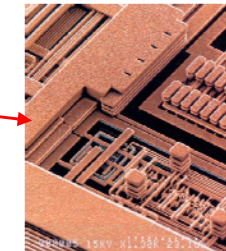
キルビー
Jack S. Kilby
USA
Texas Instruments
Dallas, TX, USA
b. 1923

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




光学顕微鏡写真
Optical Micrograph

1億個のトランジスタが搭載
最小線幅 0.1 μm = 100 nm
=原子 200 列



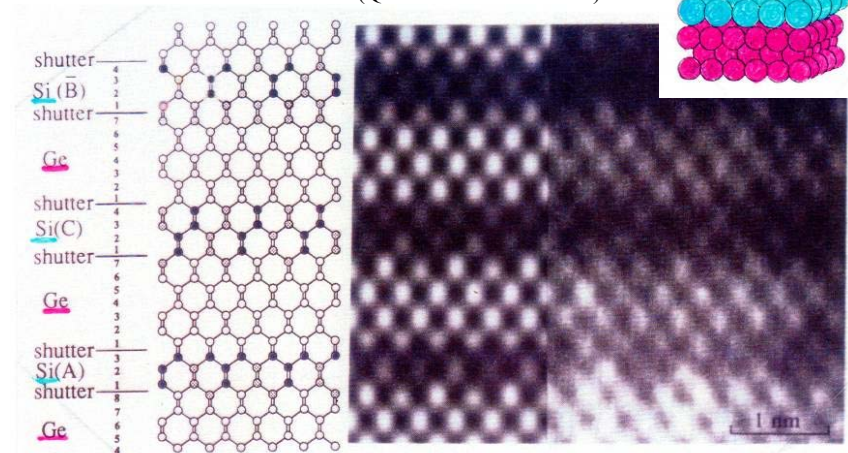
電子顕微鏡写真
Electron Micrograph



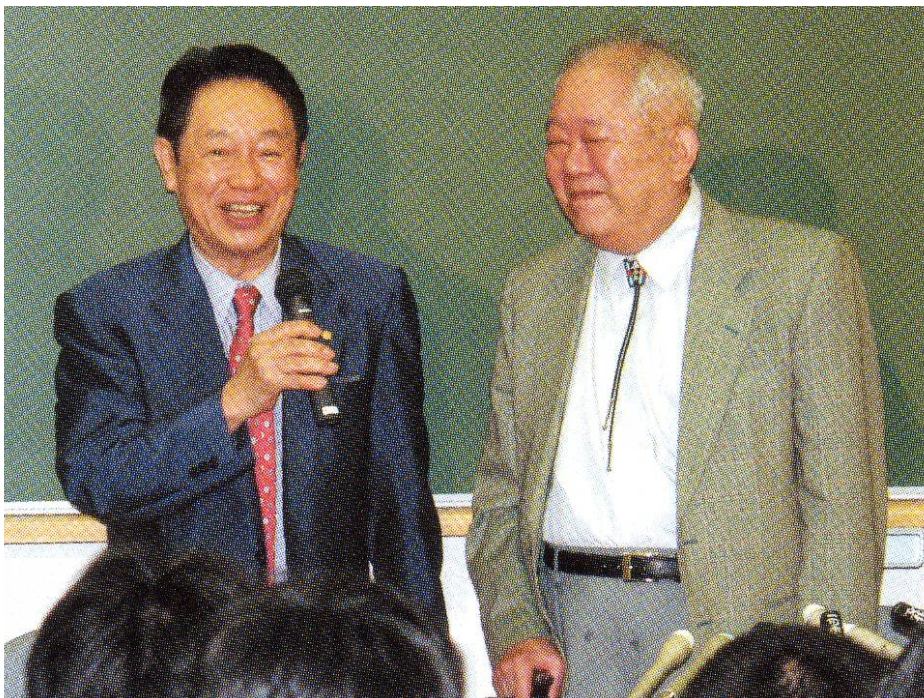
100M transistors on a chip
Minimum Line Width
0.1 μm = 100 nm =200-atom wide

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

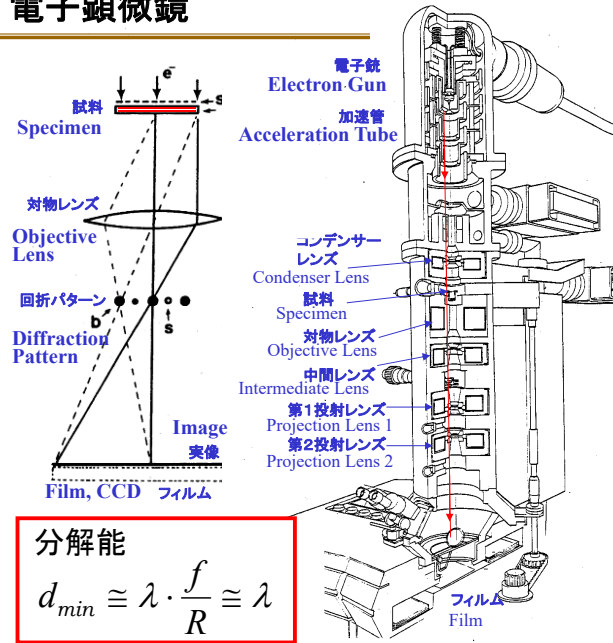


🏆 ギエーバー
Ivar Giaever
USA
General Electric Company
b. 1929



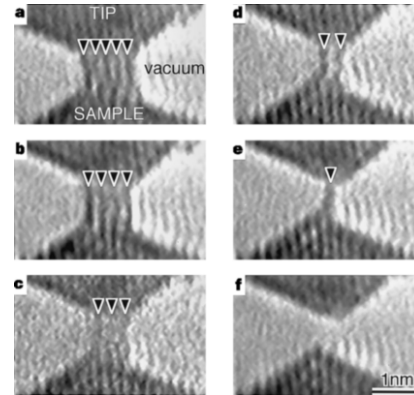
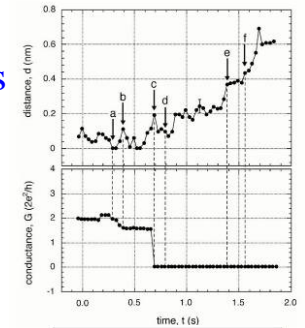
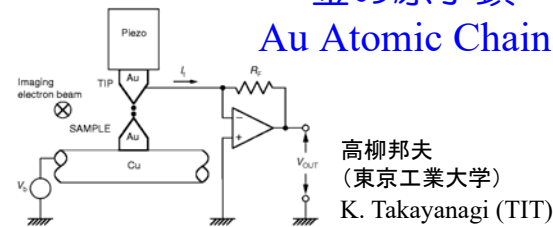
🏆 ジョセフソン
Brian D. Josephson
United Kingdom
University of Cambridge
b. 1940

電子顕微鏡 (Transmission) Electron Microscope



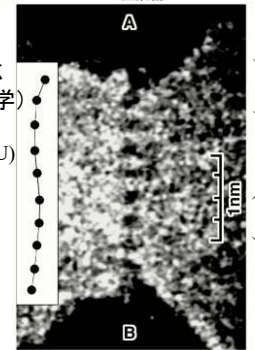
日立 外村彰氏提供
Hitachi A. Tonomura

金の原子鎖 Au Atomic Chains



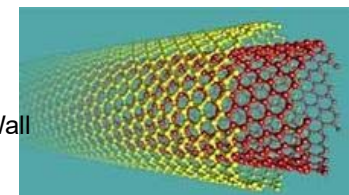
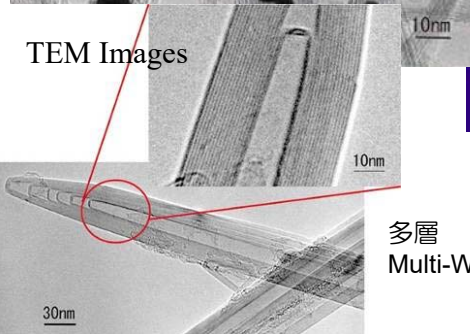
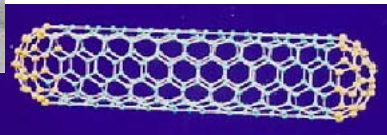
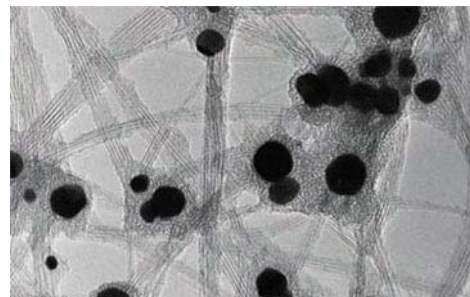
H. Ohnishi, Y. Kondo & K. Takayanagi
NATURE VOL 395, 780 (1998)

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)



Scanning Tunneling Microscope (STM) by Binnig and Rohrer

走査トンネル顕微鏡

トンネル電流
Tunnel Current
 $I_t \propto \rho \cdot \exp(-d/d_0)$
(トンネル電流) \propto (電子密度) $\cdot e^{-\alpha \cdot (\text{間隔})}$

プローブ (探針, カンチレバー)
試料表面
物理的相互作用

STM image of Si(111)-7x7 surface in 1983
Individual atoms as bright spots

STM針の走査 STM Tip Scanning

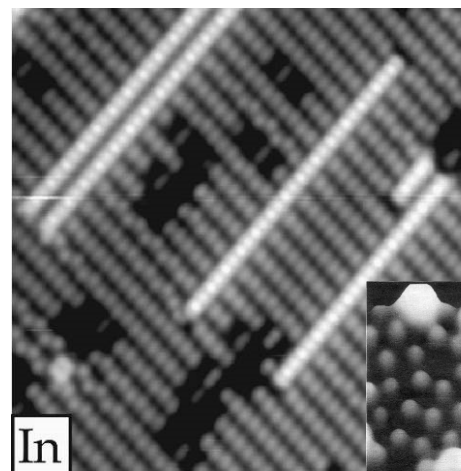


SEM像
(走査電子顕微鏡)
Scanning electron
Microscope movie

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/>

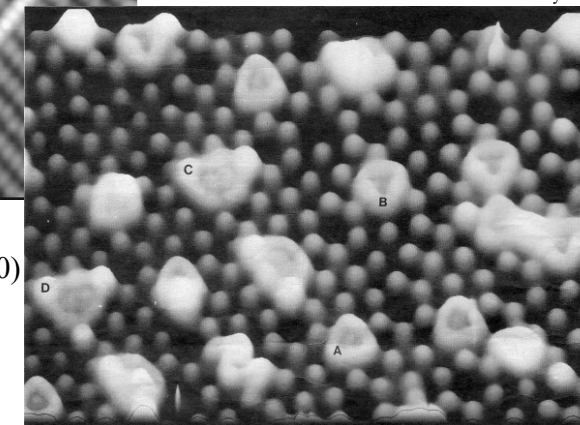


J. Nogami, et al.

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



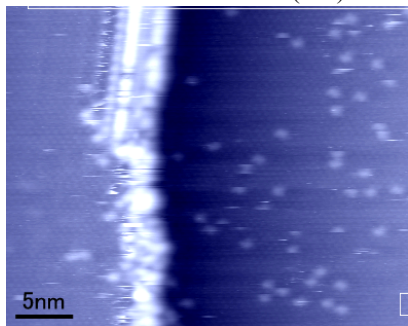
2次元 気体-液体 相転移

Two-Dimensional Gas-Liquid Phase Transition

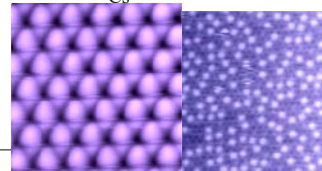
Cs atoms adsorbed on Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface at RT \Rightarrow STM at 65 K

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

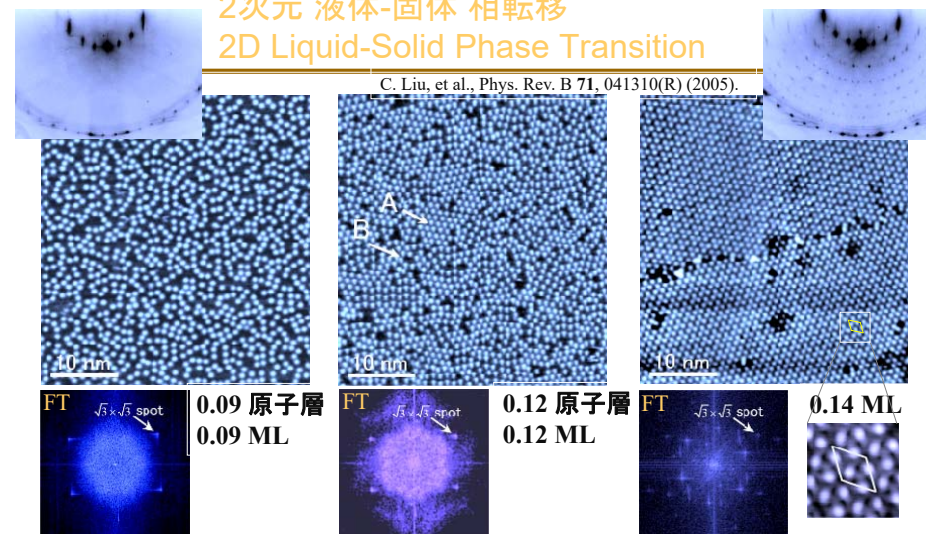
原子配列に短距離秩序
short-range order in atom arrangement
あまり動き回らない Do not move around so much

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)

固体相

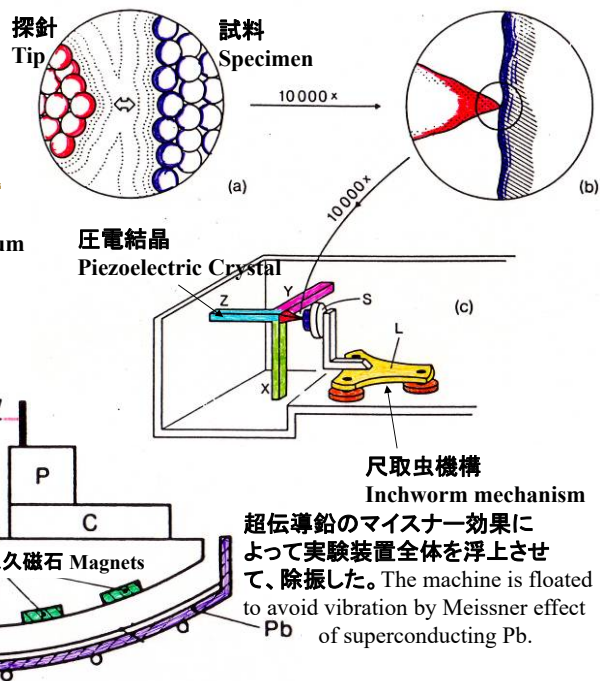
Intermediate Phase (2-Phase Mixed) Solid Phase

結晶化 Crystallization (核形成 Nucleation)

融解 Melting (...)

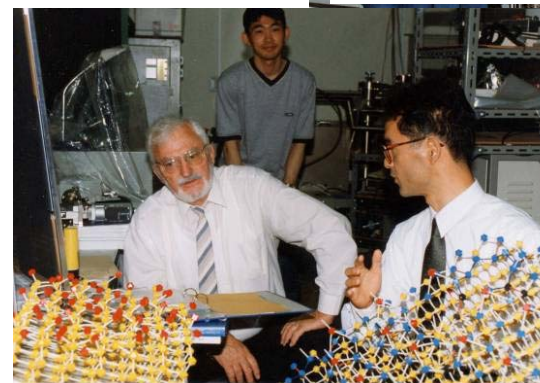
BinnigとRohrer の最初のSTM装置 First STM Apparatus by Binnig and Rohrer

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



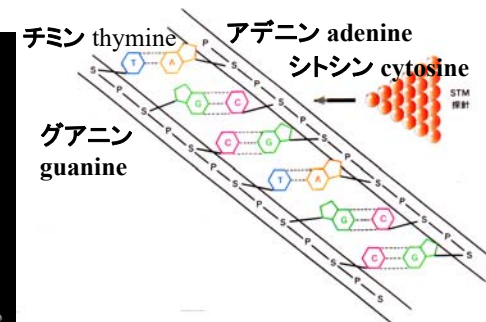
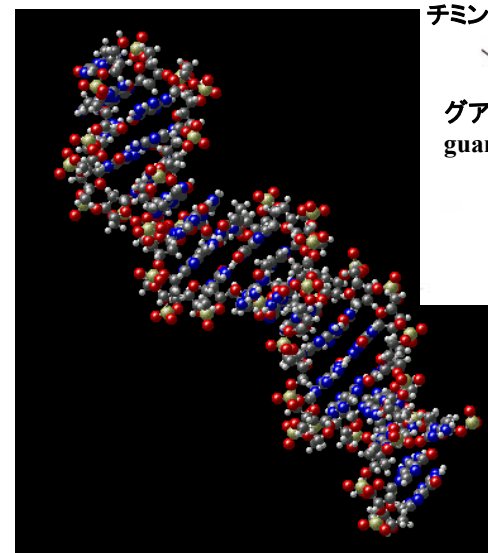
Heinrich Rohrer visited us.

1994



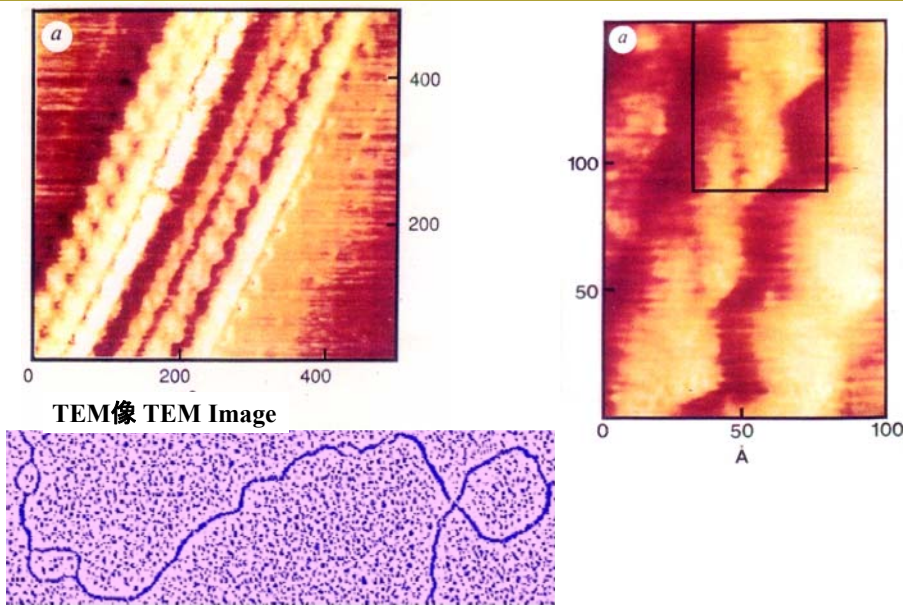
2002

DNA



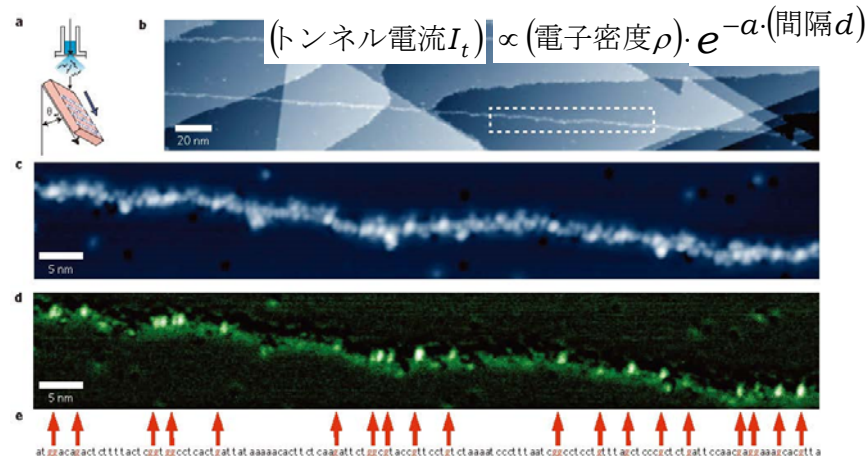
STMIによるDNAの直接観察
Direct Observation of DNA by STM

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).



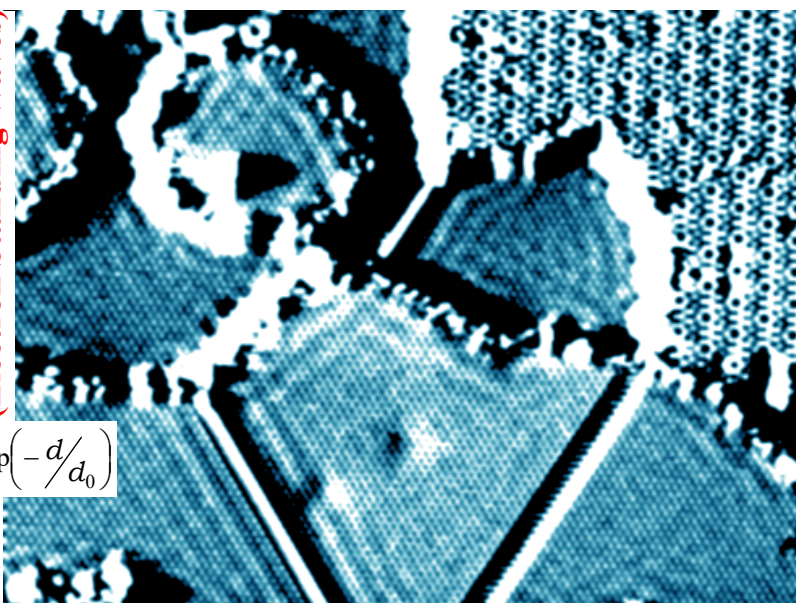
電圧を調節すると、グアニン分子だけが光ってみえる (電子密度の違い)
Guanine molecules only are observed brighter with a certain bias voltage (due to the electron density at the particular energy)

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

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

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

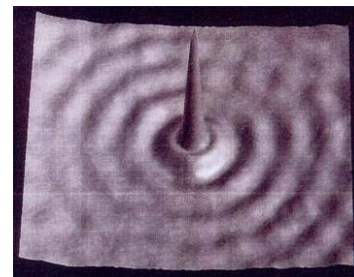
電子の波動関数 (の絶対値の2乗) が直接見える!!!
Electron wavefunction (its square of the absolute value) is directly observed!!!



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).

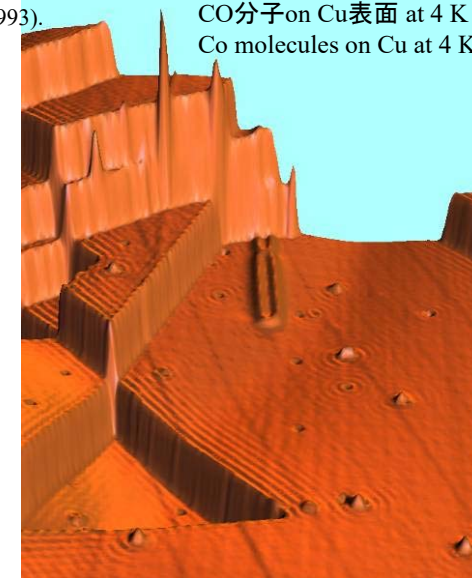
CO分子 on Cu表面 at 4 K
Co molecules on Cu at 4 K



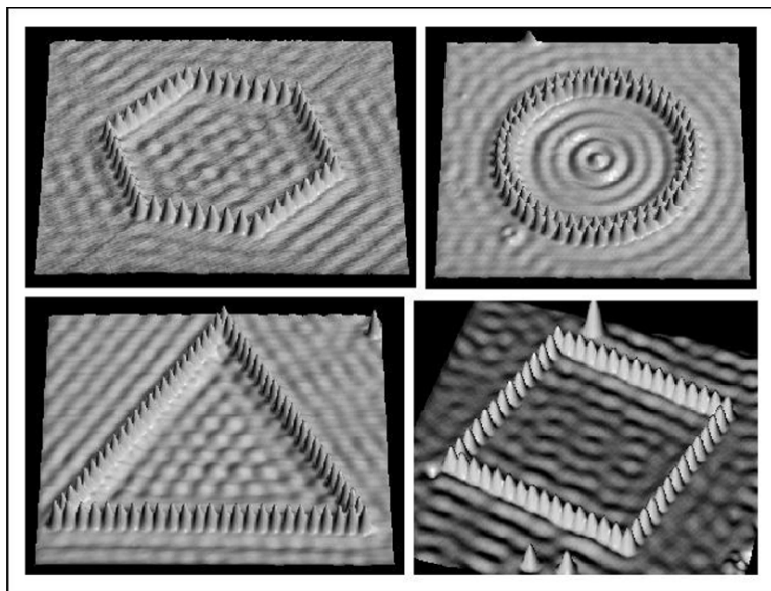
Fe atoms on Cu crystal

s-wave s波

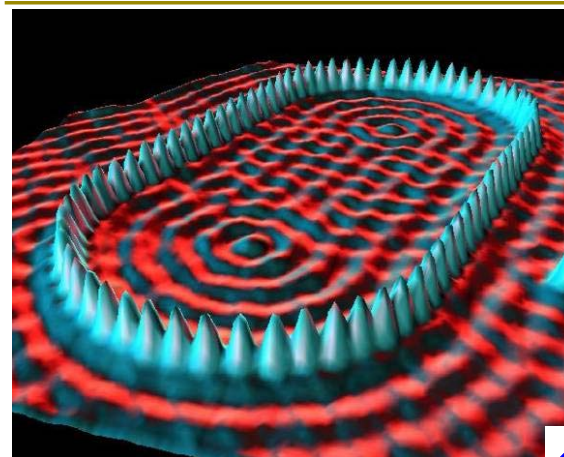
→ 同心円状のさざなみ
Concentric Ripples



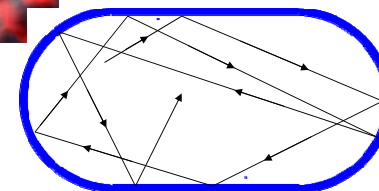
Various Quantum Corral



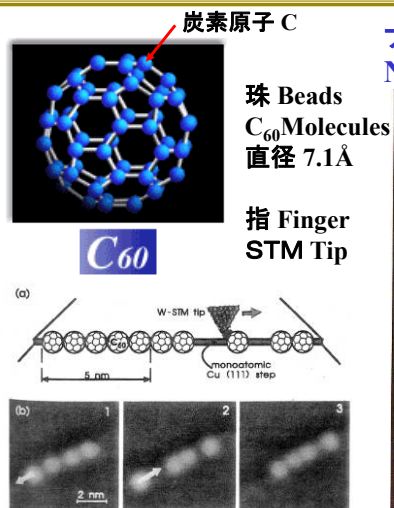
Quatum Studium 量子スタジアム



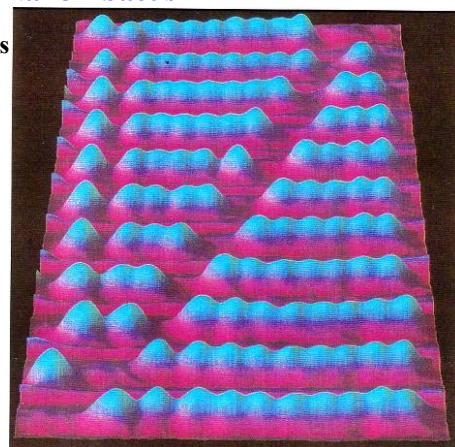
ビリヤード問題
Billiard Problem
粒子 Particle
↓
波 Wave
量子カオス
Quantum Chaos



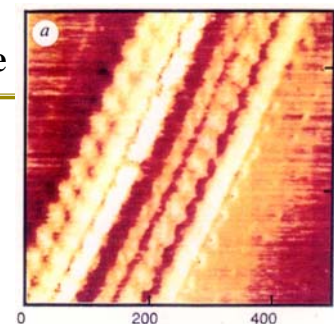
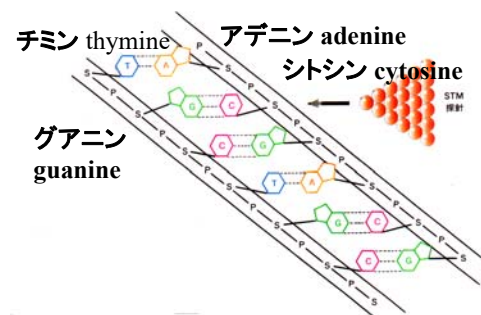
分子操作 Molecule Manipulation フラーレン C₆₀ 分子 Fullene Molecule



ナノそろばん Nano Abacus

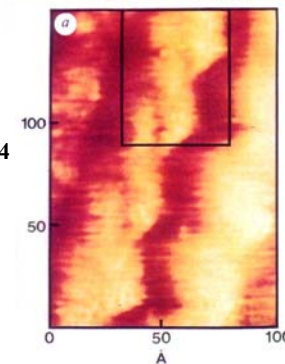
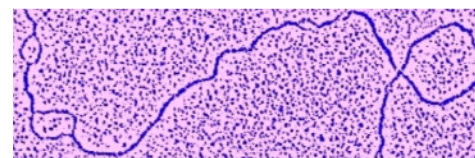


Direct Observation of DNA Molecule



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

TEM像



分子操作 Molecule Manipulation

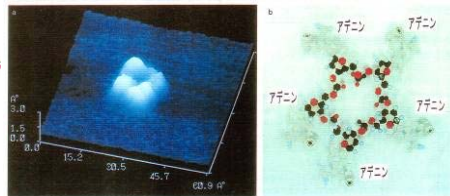
DNA塩基分子 DNA Bases

川合知ら T. Kwai (大阪大学 Osaka U.)

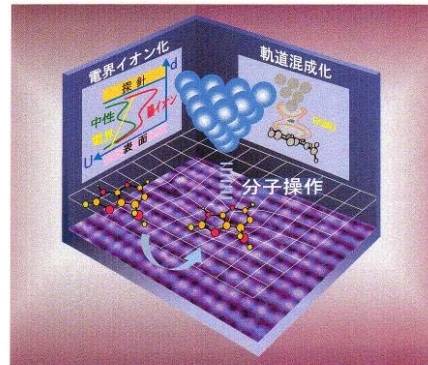
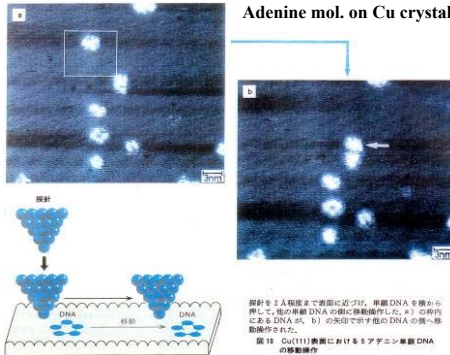
日本物理学会誌

- バリオ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-神岡加速器ニュートリノ振動実験
- 進化分子工学のすすめ
- 軟X線エリゾメトリー
- 宝石一考

BUTSURI
1997 VOL. 52 No. 9

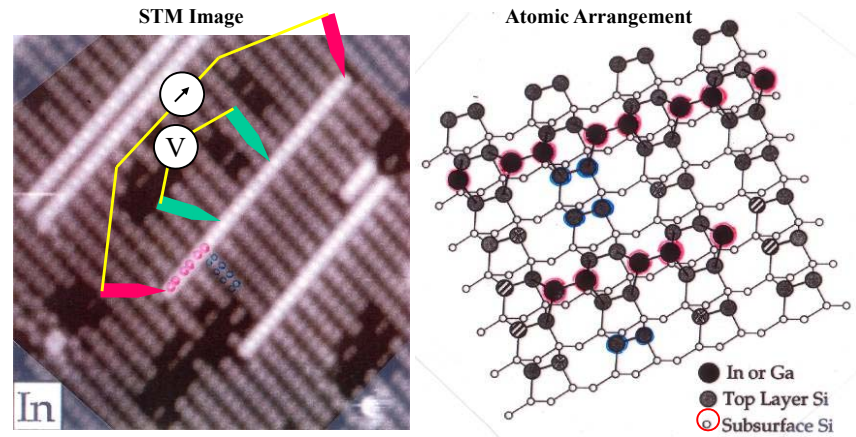


銅結晶表面上に吸着させたアデニン分子
Adenine mol. on Cu crystal



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 |

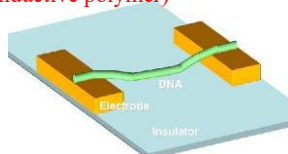
Physica E 33 (2006) 1-12

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

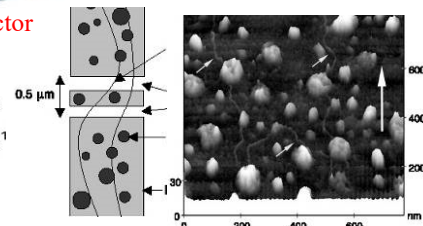
Proximity-Induced Superconductivity in DNA

A. Yu. Kasumov,^{1,2*} M. Kociak,¹ S. Guéron,¹ B. Reulet,¹
V. T. Volkov,² D. V. Klinov,³ H. Bouchiat¹

12 JANUARY 2001 VOL 291 SCIENCE

Masateru Taniguchi, Tomoji Kawai*

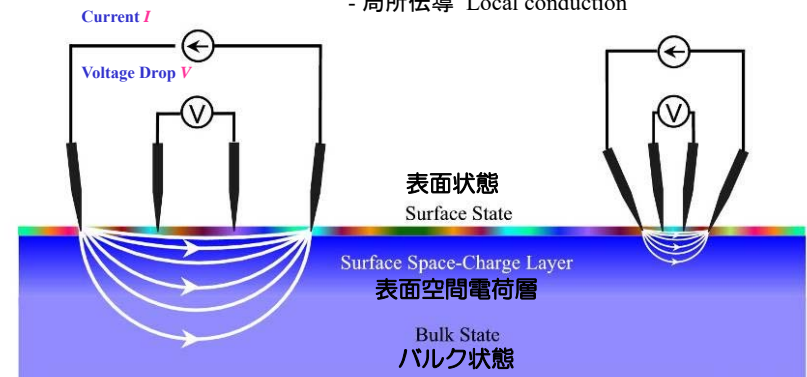
Semiconductor
poly(dG)-poly(dC); p型半導体
poly(dA)-poly(dT); n型半導体



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

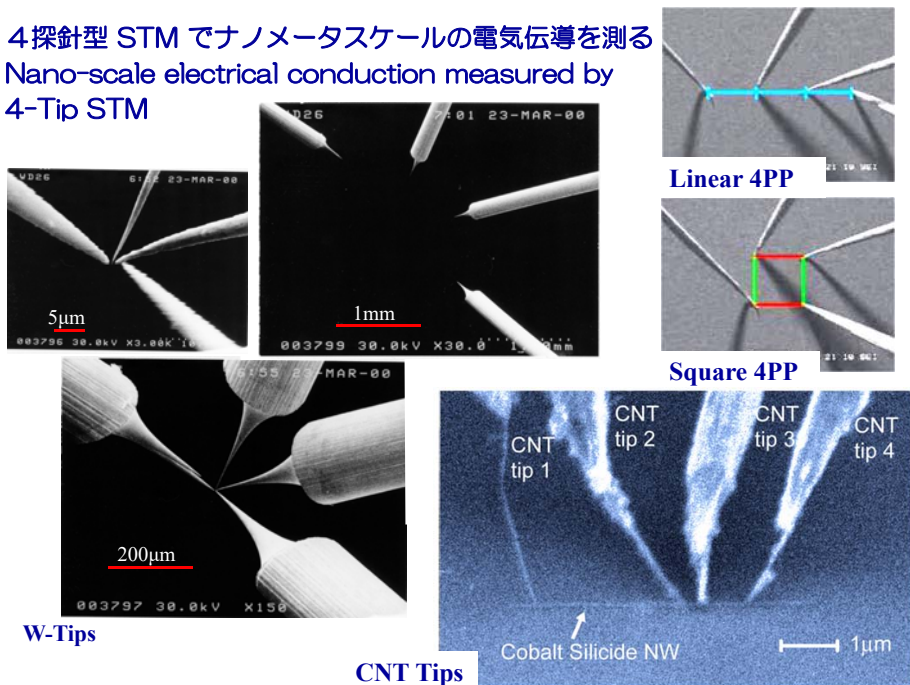
- Resistance $R = \frac{V}{I} \cdot C$ C: Correction Factor
- 接触抵抗の除外 Avoiding contact resistance
 - 3つの伝導チャンネル Three channels for conduction
 - 表面感度 Surface sensitivity
 - 局所伝導 Local conduction



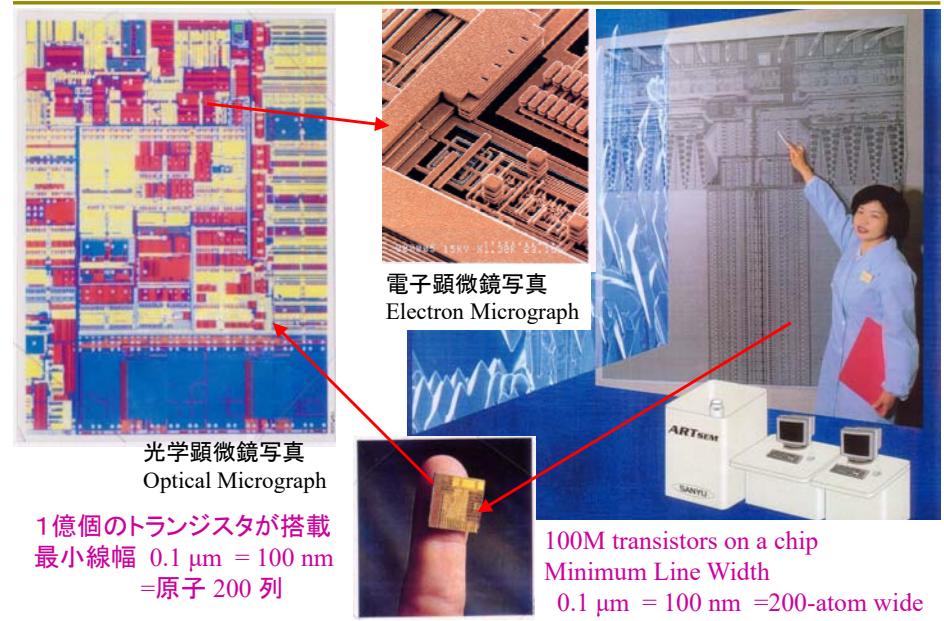
Macro-4-Point Probe
バルク敏感 Bulk sensitive
(表面鈍感 Insensitive to surface)

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

Bloch Function → **Band Structure**

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

Electron standing wave near atomic steps on surface

Metal Coated-CNT W Tip

20~30 nm



The Nobel Prize in Chemistry 2014

Nobel Foundation

超解像蛍光顕微鏡の開発 for the development of super-resolved fluorescence microscopy

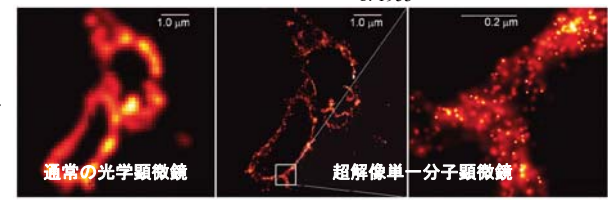


Eric Betzig
Howard Hughes Medical Institute, 米国
b. 1960

Stefan W. Hell
MPI Biophysical Chemistry, 独
b. 1962

William E. Moerner
Stanford University
米国
b. 1953

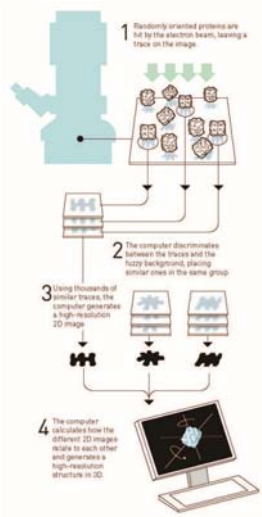
リソソームの像



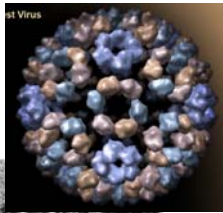
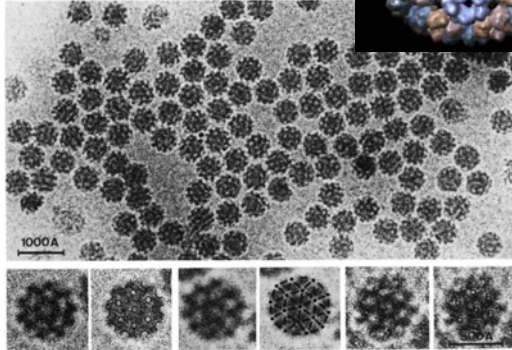


The Nobel Prize in Chemistry 2017

生体分子の構造を高分解能で決定するクライオ電子顕微鏡法の開発
for developing cryo-electron microscopy for the high-resolution structure determination of biomolecules in solution



M. Adrian, et al., Nature 308, 32 (1984).



The Nobel Prize in Physics 2010

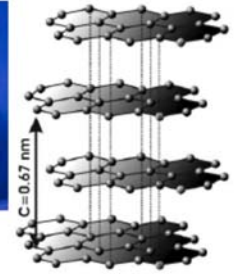
2次元物質グラフェンに関する画期的な実験
Groundbreaking experiments of two-dimensional material graphene



A. K. Geim
b. 1958



K.S. Novoselov
b. 1974



University of Manchester, UK

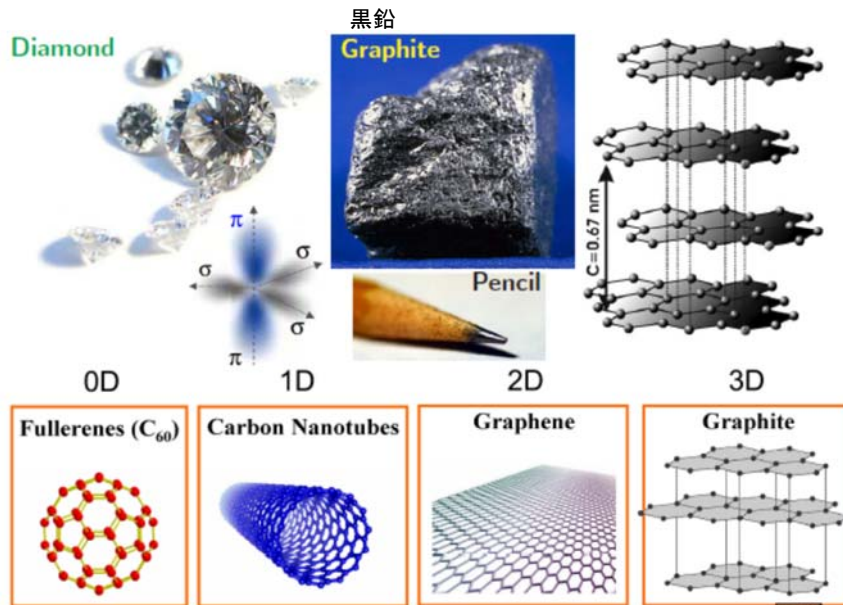
Graphene グラフェン(黒鉛)



levitating a frog in a very strong magnetic field due to diamagnetism of water in the frog

A. K. Geim, Ig Nobel Prize at 2000, for levitating a frog with magnets

2010年ノーベル物理学賞 グラフェン



Nobel (Chemistry) 1996

Nobel (Physics) 2020

Repeated peeling of HOPG using scotch tape

AFM Image

1.2 nm 0.4 nm 0.8 nm

20 μm

Optical microscope image

FET: Field Effect Transistor ($n_s < 5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$)
[MOSFET (10^{13} cm^{-2}) HEMT (10^{12} cm^{-2})]

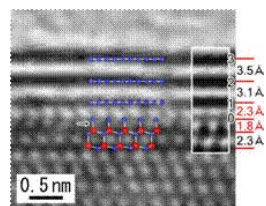
K.S. Novoselov et al., Science 306, 666 (2004)

Graphene on SiC crystal surface

Relativistic Dirac electron

$$E = \sqrt{(mc^2)^2 + (\hbar k)^2}$$

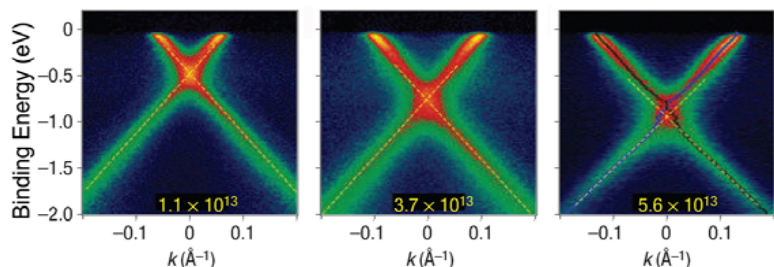
$m = 0$ **Zero Mass**
 $E = \pm \hbar k$ **High mobility**



(M. Kusunoki @ Nagoya U.)

Non-relativistic

$$E = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$$



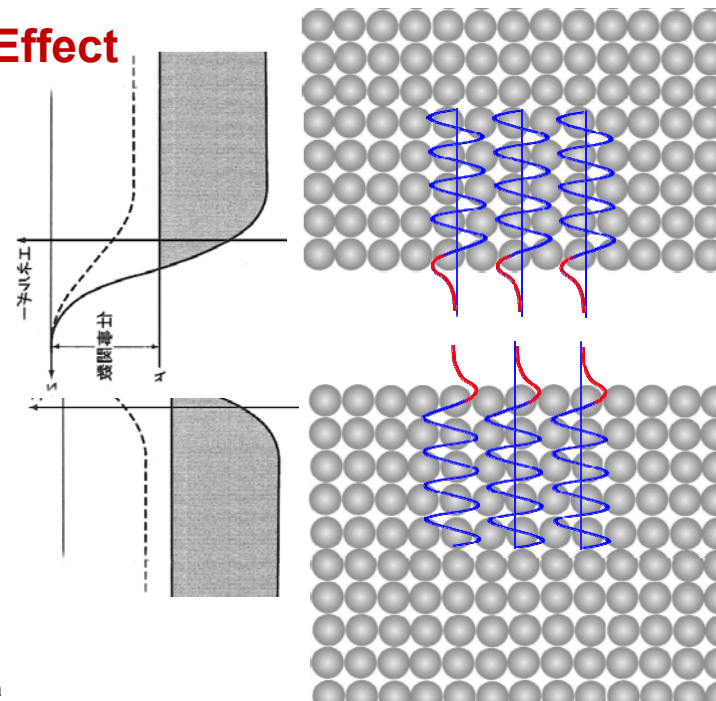
Band dispersion revealed by ARPES (Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy)

A. Bostwick, et al., Nature Physics 3, 36 (2007).

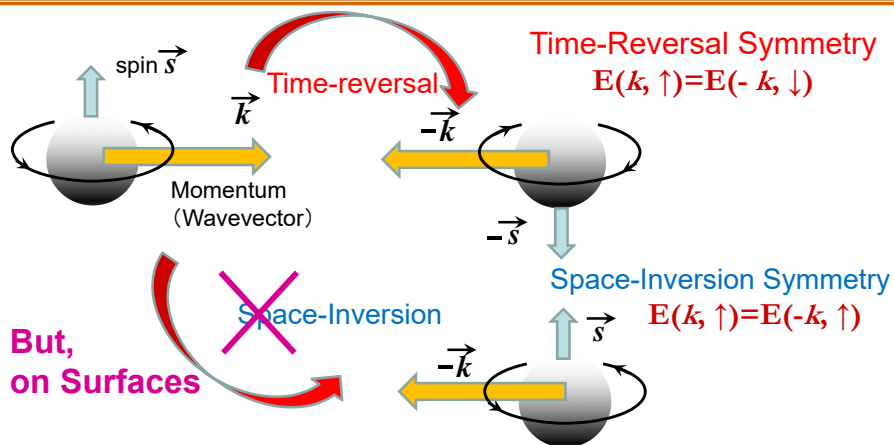
Rashba Effect



Emmanuel I. Rashba



The electron energy is determined by its momentum (and **spin**).



Time-Rev. Sym. + Space-Inv. Sym. \Rightarrow Spin(Kramers) Degenera

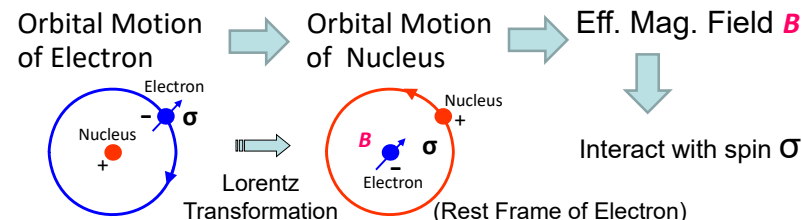
Spin-Split in Surface States $\leftarrow E(k, \uparrow) \neq E(k, \downarrow)$

Difference in Energy between Spin \uparrow and Spin \downarrow

$$H = \frac{1}{2m} p^2 + V(x) + \frac{1}{4mc^2} \sigma \cdot (\text{grad } V \times p)$$

Spin-Orbit-Coupling Hamiltonian

$(\text{grad } V \times p) =$ Effective Magnetic Field B



Difference between \uparrow and \downarrow
 $=$ Zeeman Energy by Eff. Mag. Field B

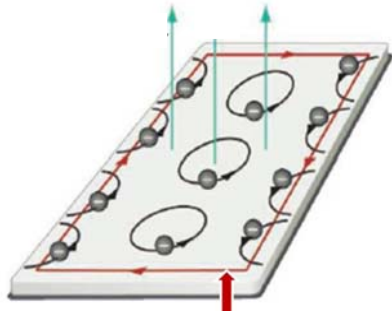
Topological Surface States



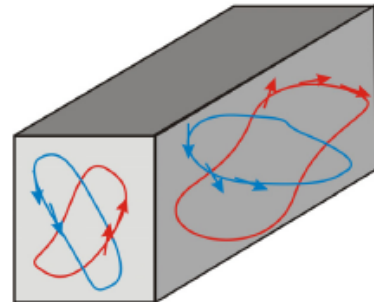
Analogue of Edge States in Quantum Hall States (2DEG)

⇒ Extension to 3D Materials

⇐ Strong **Spin-Orbit Interaction** produces effective B.



QHE (Nobel Prizes 1985, 1998)



TI (Nobel Prize 2016, more?)



The Nobel Prize in Physics 2016

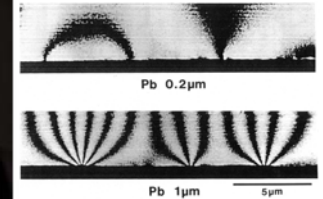
物質のトポロジカル相転移とトポロジカル相の理論的発見
for theoretical discoveries of topological phase transitions and topological phases of matter



David J. Thouless
Prize share: 1/2

F. Duncan M. Haldane
Prize share: 1/4

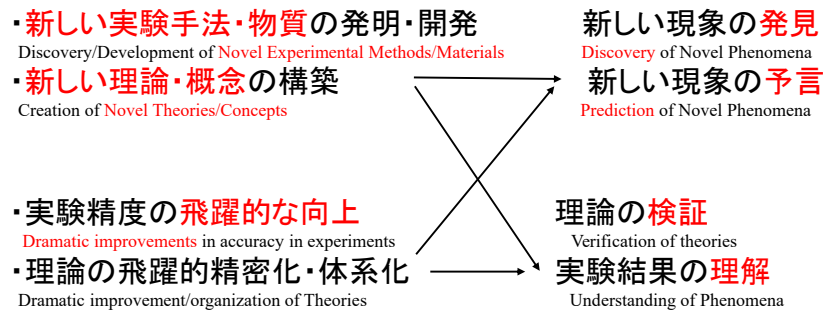
J. Michael Kosterlitz
Prize share: 1/4



S. Hasegawa, et al.,
Phys. Rev. B **43**, 7631(1991)

(B)KT (Berezinskii-Kosterlitz-Thouless) Transition: phase Trans. At 2D XY model; superconductivity/superfluidity at thin films
TKNN Number (Thouless-Kohmoto-Nighting-den Nijs) Topological number at Quantum Hall Effect
Haldane model for Anomalous Quantum Hall Effect → Topological Insulators

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

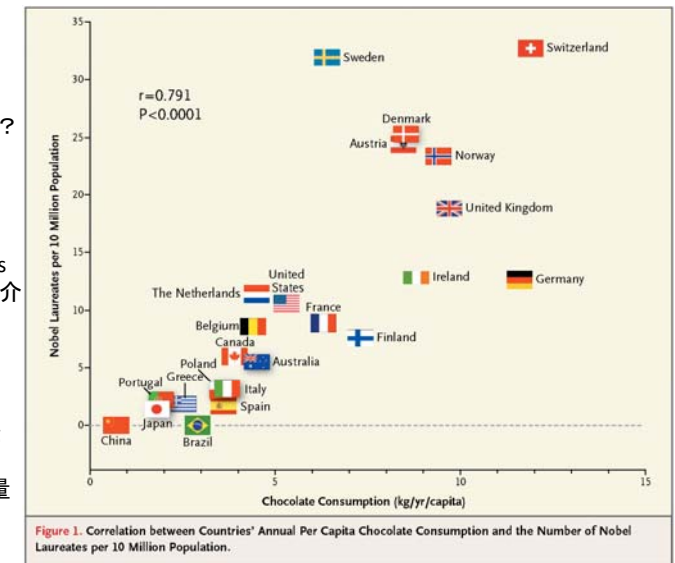


➡ **世の中を変える Change our world**
考え方を考える Change our concepts/understandings

チョコレートを食べると
ノーベル賞がもらえるか？

丸山宏
応用物理学会
Bulletin of Japanese
Society of Applied Physics
83 (12), 1022 (2014)で紹介

各国1千万人あたりの
ノーベル賞受賞者数と
国民一人あたりの
年間チョコレート消費量



F. H. Messerli, "Chocolate Consumption, Cognitive Function, and Nobel Laureates",
The New England Journal of Medicine, **367**(16), 1562 (2012)