

1. 物性物理学とノーベル賞

Condensed Matter Physics and Nobel Prizes

1.1 超伝導 Superconductivity 超流動 Superfluidity に関するノーベル賞

Nobel Prizes about superconductivity and superfluidity

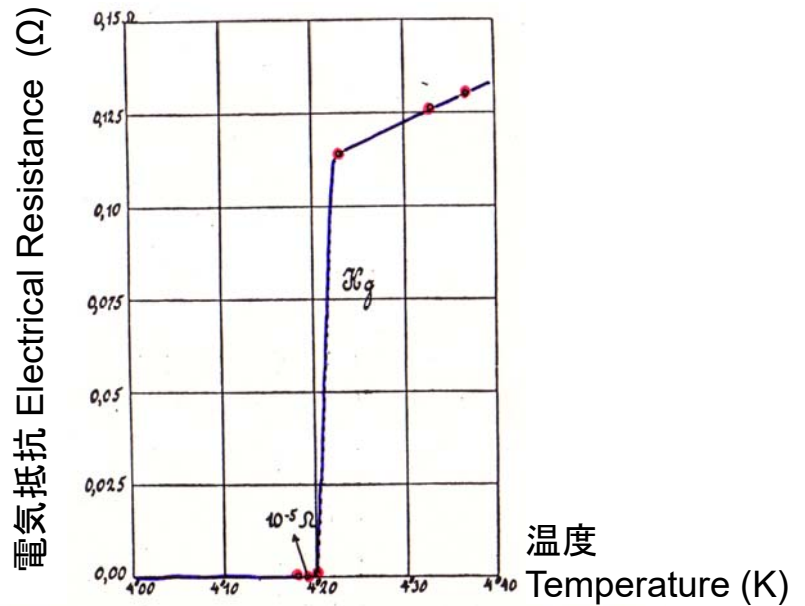


The Nobel Prize in Physics 1913

"for his investigations on the properties of matter at low temperatures which led, inter alia, to the production of liquid helium"
低温における物性の研究、とくに液体ヘリウムの生成に対して (1908年)



Heike Kamerlingh Onnes
the Netherlands
Leiden University
Leiden, the Netherlands
b. 1853
d. 1926



オームで表わした水銀の試料の抵抗と絶対温度の関係。カメルリン・オンネスによるこの図は超伝導の発見を記録するものである。

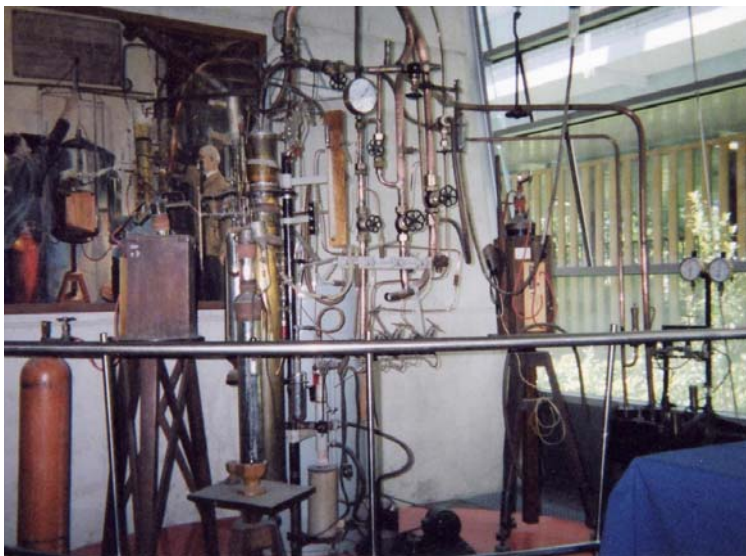
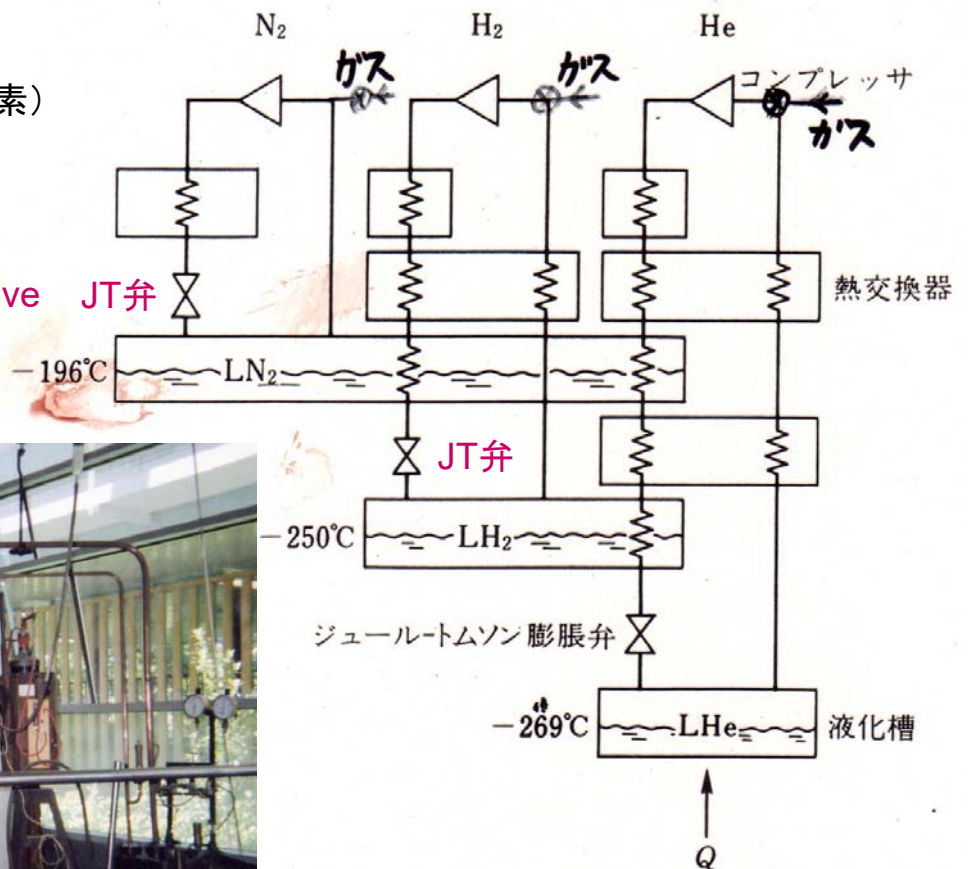
H. Kamerlingh Onnes, Akad. van Wetenschappen (Amsterdam) 14, 113, 818 (1911)

カスケード法 Cascade Method for obtaining Liq. He

Kamerling-Onnes (1908)

寒剤(液体窒素、液体水素)による多段の予冷でヘリウムの液化に成功

Joule-Thomson valve JT弁



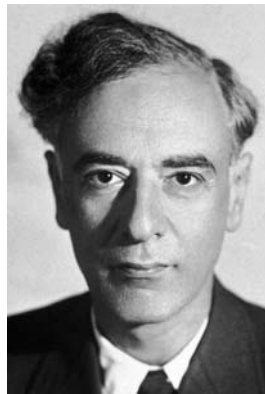
Leiden University, The Netherland



The Nobel Prize in Physics 1962

"for his pioneering theories for condensed matter, especially liquid helium"

凝縮系、とくに液体ヘリウムに関するパイオニア的な理論に対して



Lev Davidovich Landau

Academy of Sciences,
Moscow, USSR

b. 1908

d. 1968

1941 カピツァが発見したヘリウム4の超流動現象を理論的に説明

1950年代、量子フェルミ液体論を展開し、ヘリウム3の物性など、多くの物性を予言

液体ヘリウムや金属中の電子系にも応用されることとなるフェルミ液体の提唱

二次相転移の現象論(ランダウ理論)、

プラズマ振動の理論(ランダウ減衰)

Ginzburg-Landau理論

秩序パラメータ ψ を使った超伝導の現象論

$$F = F_n + \alpha|\psi|^2 + \frac{\beta}{2}|\psi|^4 + \frac{1}{2m}|(-i\hbar\nabla - 2e\mathbf{A})\psi|^2 + \frac{|\mathbf{H}|^2}{2\mu_0}$$



The Nobel Prize in Physics 1972

"for their jointly developed theory of Superconductivity, usually called the BCS-theory"

BCS理論と呼ばれる超伝導理論の開発に対して



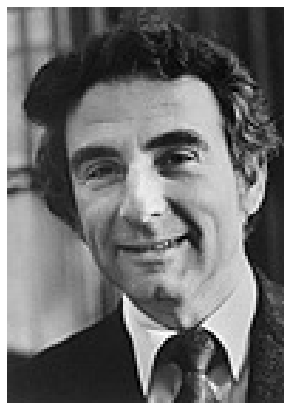
John Bardeen

🕒 1/3 of the prize

University of Illinois
Urbana, IL, USA

b. 1908

d. 1991



Leon Neil Cooper

🕒 1/3 of the prize

Brown University
Providence, RI, USA

b. 1930



John Robert Schrieffer

🕒 1/3 of the prize

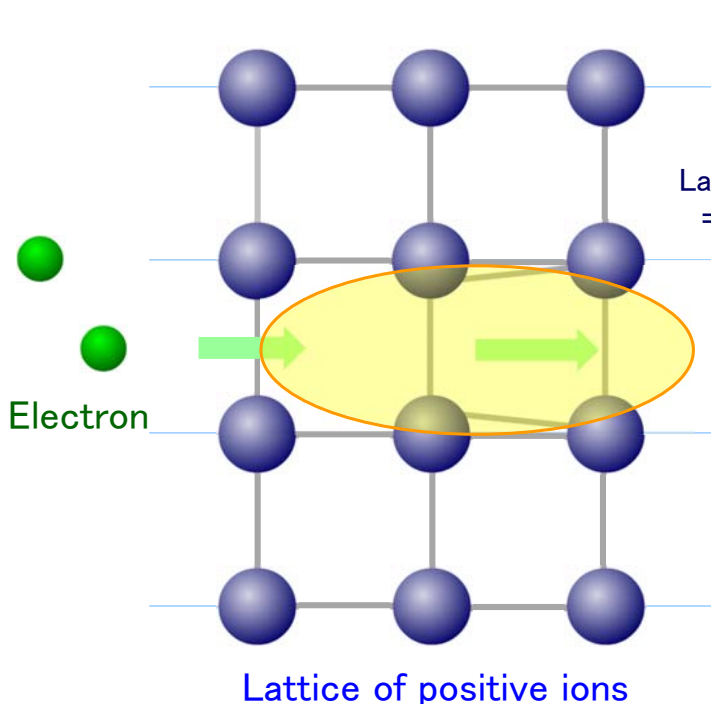
University of
Pennsylvania
Philadelphia, PA, USA

b. 1931

超伝導の起源: 電子対(クーパー対)の形成

Origin of Superconductivity: Electrons Pairs (Cooper Pairs) formation

BCS理論: Bardeen-Cooper-Schrieffer Theory (1957)



First Electron distorts lattice.



Lattice distortion produces extra positive charge.
⇒ Second Electron is attracted by the charge.



2つの電子が対になって
運動しているように見える
(Electron pair formation)

引力の起源—格子のひずみ
Attractive interaction; lattice distortion
BCS機構 BCS Mechanism

Lattice of positive ions

(福山秀敏先生ご提供)

2つの電子=Bose粒子⇒ボーズ・アイシュタイン凝縮
Two electrons = Boson ⇒ Bose-Einstein Condensation



The Nobel Prize in Physics 1956

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



William B. Shockley
USA
Semiconductor
Laboratory of
Beckman
Instruments, Inc.
b. 1910
d. 1989



John Bardeen
USA
University of Illinois
b. 1908
d. 1991



Walter H. Brattain
USA
Bell Telephone
Laboratories
b. 1931
d. 1987

BCS理論による超伝導臨界温度 Superconducting critical temperature by BCS theory

$$T_c = 1.13\theta_D \cdot \exp\left(-\frac{1}{N(0)V}\right) \leq \sim 30 \text{ K}$$

H																	He
Li	Be	超伝導臨界温度 (K) Superconducting critical temperatures (Experimental values)										B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
												1.19	6.7	4.6-6.1			
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
			0.39	5.3							0.9	1.09	5.4	0.5	6.9		
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
		0.5-2.7	0.55	9.2	0.92	7.8	0.5	325 μ			0.55	3.4	3.7;5.3	3.6	4.5		
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
1.5	1.8;5.1	4.8;5.9		4.4	0.01	1.7	0.65	0.14			4.15 3.95	2.39 1.45	7.2	3.9 7.2;8.5			
Fr	Ra	Ac															
			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
			1.7													0.1-0.7	
			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lw	
			1.37	1.3	0.2												

図 10.2 既知の超伝導体 (斜線を施した) 元素とその転移温度 T_c (単位は K) を示す周期表. 濃く影を施した元素は, 高圧下でのみ超伝導を示す.

Shaded elements: superconducting only under high pressure



The Nobel Prize in Physics 1987

“for their important break-through in the discovery of superconductivity in ceramic materials“ (1986年)
セラミック物質での超伝導の発見に対して

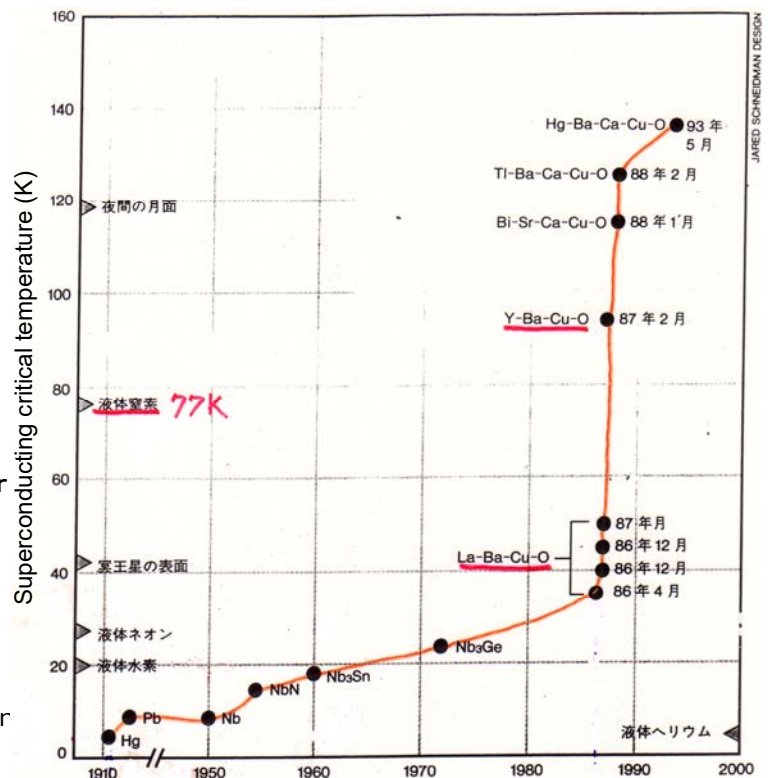


J. Georg Bednorz
1/2 of the prize
Federal Republic of Germany

K. Alexander Müller
1/2 of the prize
Switzerland

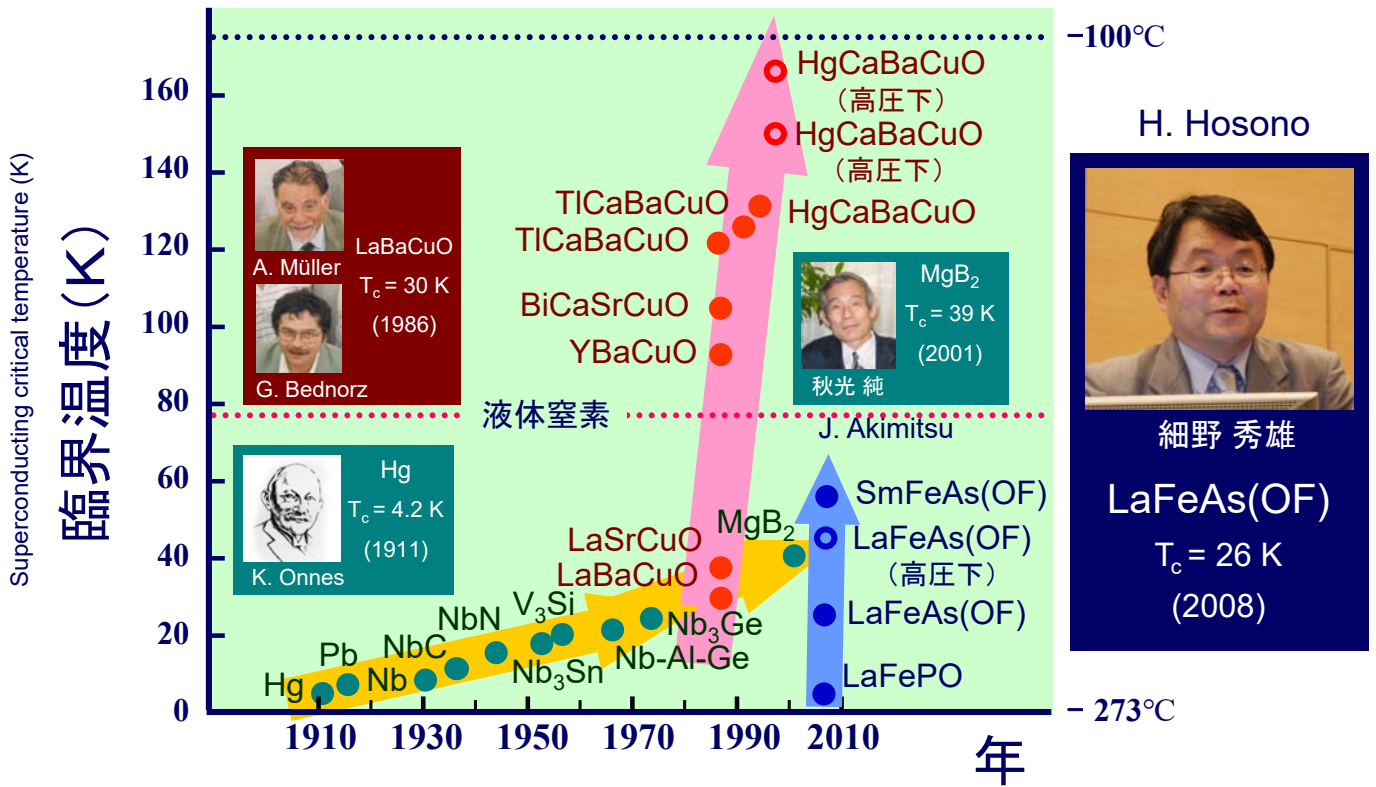
IBM Zurich Research Laboratory
Rüschlikon, Switzerland
b. 1950

IBM Zurich Research Laboratory
Rüschlikon, Switzerland
b. 1927



臨界温度の変遷

Development of Superconducting Critical Temperature

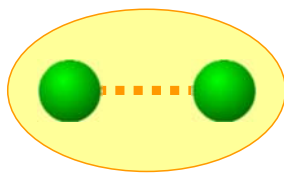


(福山秀敏先生ご提供)

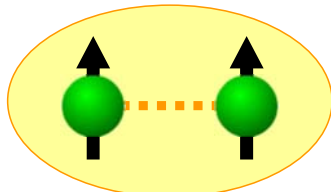
55

Spin of Cooper Pairs

3重項 (Spin triplet) と1重項 (Spin Singlet)

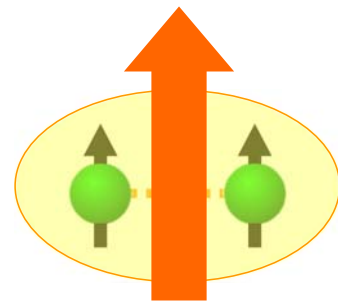


電子間の引力による電子対
(Cooper pair)

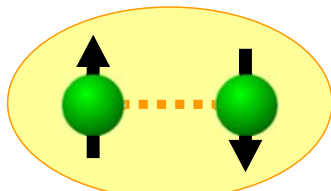


上向きスピン (S = 1/2) 上向きスピン (S = 1/2)

スピン3重項
Spin triplet

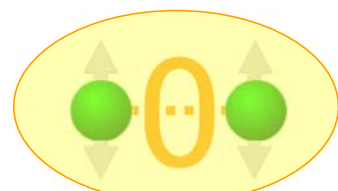


Total spin S = 1



上向きスピン (S = 1/2) 下向きスピン (S = -1/2)

スピン1重項
Spin singlet
BCS機構



Total spin S = 0

相互作用による反転のため
スピンが見えなくなる (S = 0)

(福山秀敏先生ご提供)

40

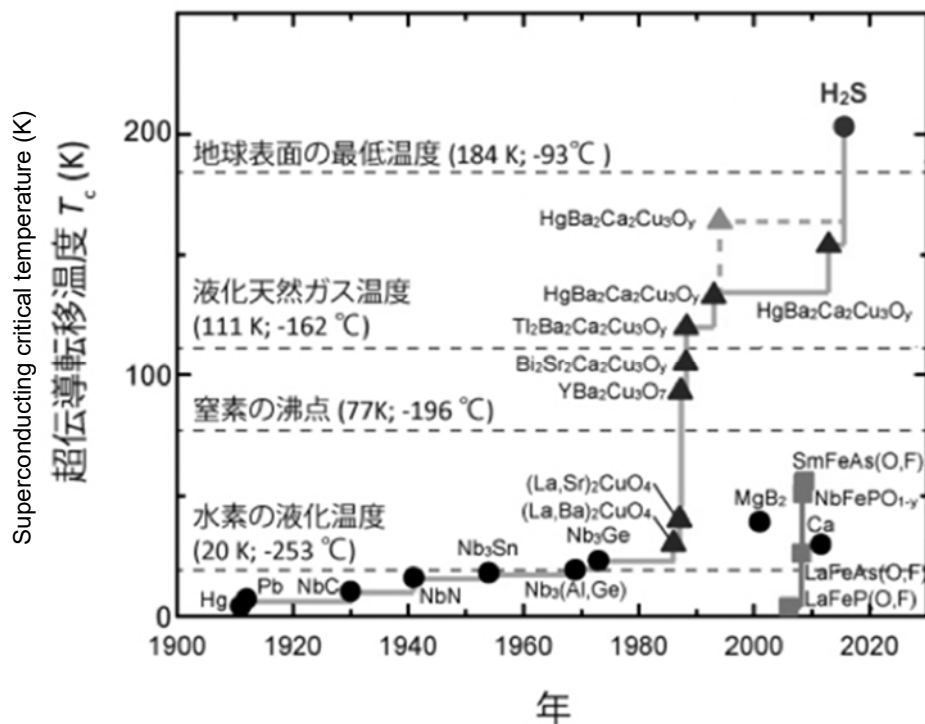


図1.9. さまざまな物質の超伝導転移温度。年を追って転移温度が高くなっているが、まだ室温(300 K)には到達していない。
http://www.spring8.or.jp/ja/news_publications/press_releases/2016/160510/より

長谷川修司 『トポロジカル物質とは何か』
 (ブルーバックス 2021)



The Nobel Prize in Physics 1996

"for their discovery of superfluidity in helium-3"
 ヘリウム3での超流動の発見 (2.3 mK)

^4He : 2 protons & 2 neutrons
 (Boson)
 ^3He : 2 protons & 1 neutron
 (Fermion)



David M. Lee
 USA
 Cornell University
 Ithaca, NY, USA
 b. 1931



Douglas D. Osheroff
 USA
 Stanford University
 Stanford, CA, USA
 b. 1945



Robert C. Richardson
 USA
 Cornell University
 Ithaca, NY, USA
 b. 1937

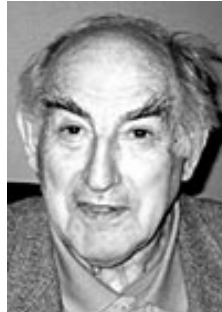


The Nobel Prize in Physics 2003

"for pioneering contributions to the theory of superconductors and superfluids"
超伝導および超流動の理論への寄与



Alexei A. Abrikosov
USA and Russia
Argonne National Laboratory
Argonne, IL, USA
b. 1928



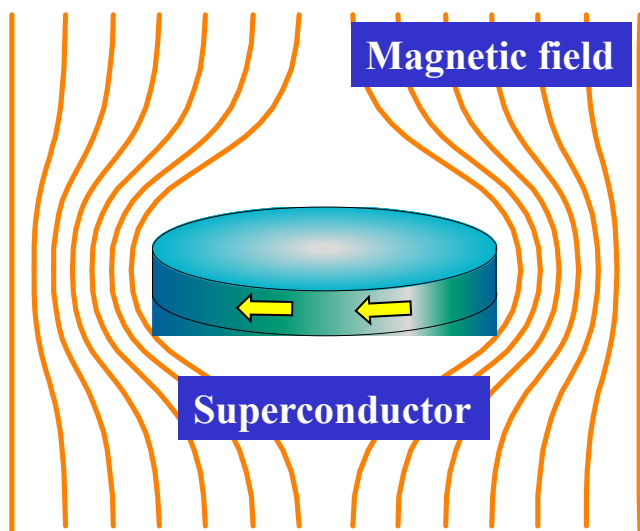
Vitaly L. Ginzburg
Russia
P.N. Lebedev Physical Institute
Moscow, Russia
b. 1916



Anthony J. Leggett
United Kingdom and USA
University of Illinois
Urbana, IL, USA
b. 1938

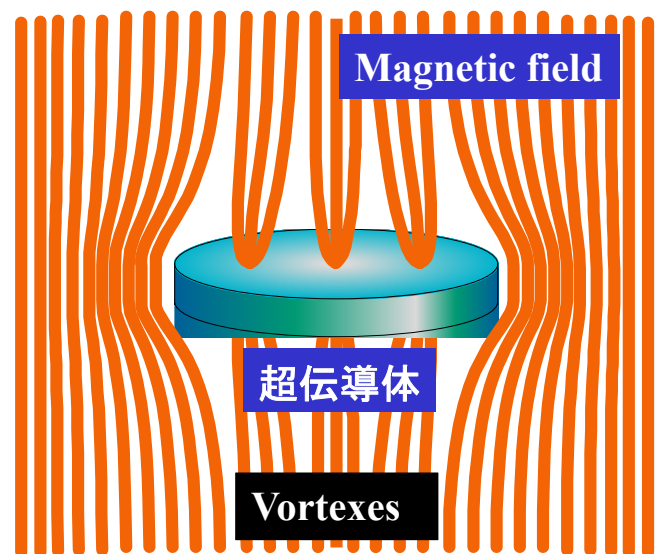
第2種超伝導体の磁束の振る舞い Magnetic flux in type-II superconductor

$H < H_{c1}$ (Lower critical field)



マイスナー状態
Meissner State

$H_{c1} < H < H_{c2}$ (Upper critical field)



ミックス状態
Mixed State

Vortexes arrange themselves regularly: Abrikosov lattice



The Nobel Prize in Physics 2001

"for the achievement of Bose-Einstein condensation in dilute gases of alkali atoms, and for early fundamental studies of the properties of the condensates"
アルカリ原子の希薄ガスでのボーズ・アインシュタイン凝縮の実現 $0.28 \mu\text{K}$

Laser Cooling



Eric A. Cornell

USA

University of Colorado,
JILA
Boulder, CO, USA
b. 1961



Wolfgang Ketterle

Federal Republic of
Germany

Massachusetts Institute of
Technology (MIT)
Cambridge, MA, USA
b. 1957



Carl E. Wieman

USA

University of Colorado,
JILA
Boulder, CO, USA
b. 1951

1.2. 半導体 Semiconductors に関するノーベル賞

Nobel Prizes about semiconductors



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”



シヨックレー
William B. Shockley

USA
Semiconductor
Laboratory of
Beckman
Instruments, Inc.
b. 1910
d. 1989



バーディーン
John Bardeen

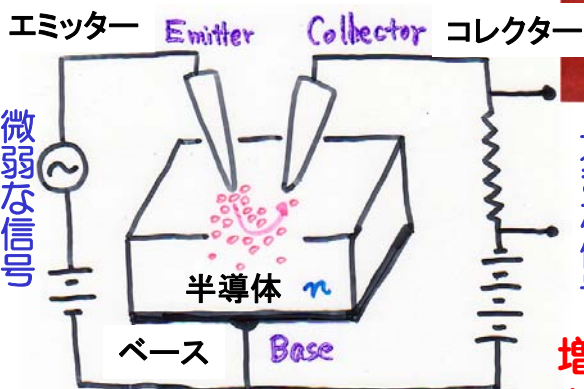
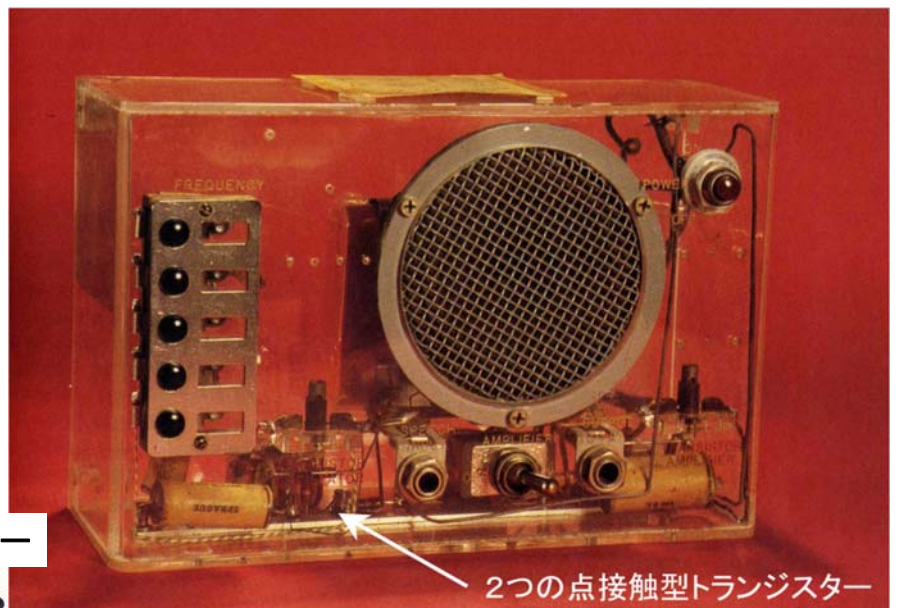
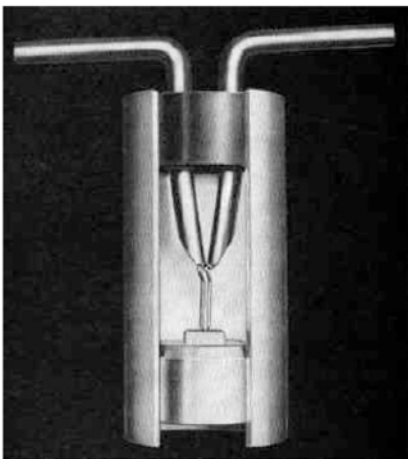
USA
University of Illinois
b. 1908
d. 1991



ブラッテン
Walter H. Brattain

USA
Bell Telephone
Laboratories
b. 1931
d. 1987

ベル研究所で作られた最初のトランジスタラジオ First transistor radio made at Bell Lab in 1947



大きな信号

増幅
Amprification

2つの点接触型トランジスタ

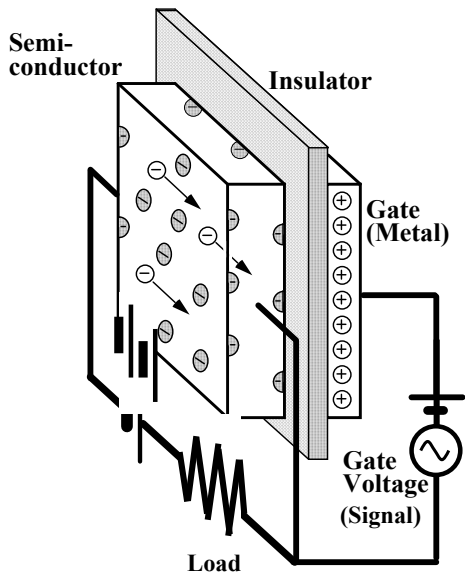
世界最初のトランジスタ・ラジオ

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。1948年

出典: M. Riordan, L. Hoddeson, "Crystal Fire",
(Norton Publishers, 1997).

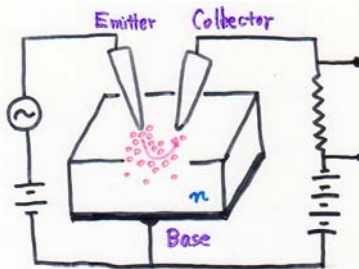
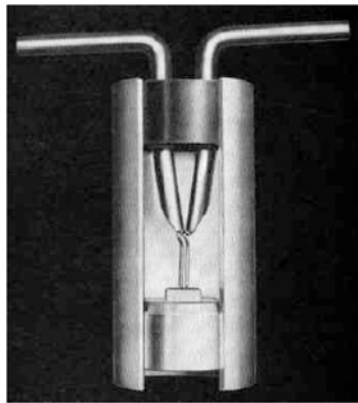
Various types of Transistors

電界効果トランジスタ Field-Effect Transistor



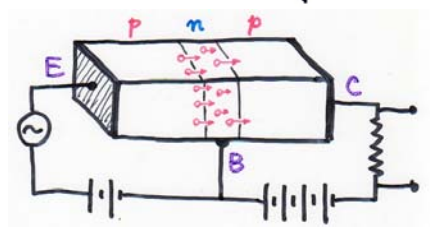
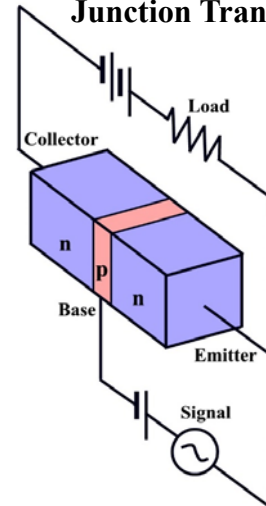
W. Shockley, G.L. Pearson,
Modulation of conductance of thin films of
semiconductors by surface charges,
Phys. Rev. **74** (1948) 232.

点接触トランジスタ Point-Contact Transistor



J. Bardeen, W.H. Brattain,
The transistor a semiconductor triode,
Phys. Rev. **74** (1948) 230.

接合トランジスタ Junction Transistor



W. Shockley,
The theory of p-n junctions in
Semiconductors and p-n junction
transistors,
Bell Sys. Tech. J. **28** (1949) 435.

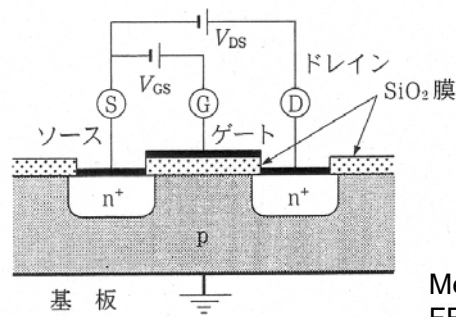
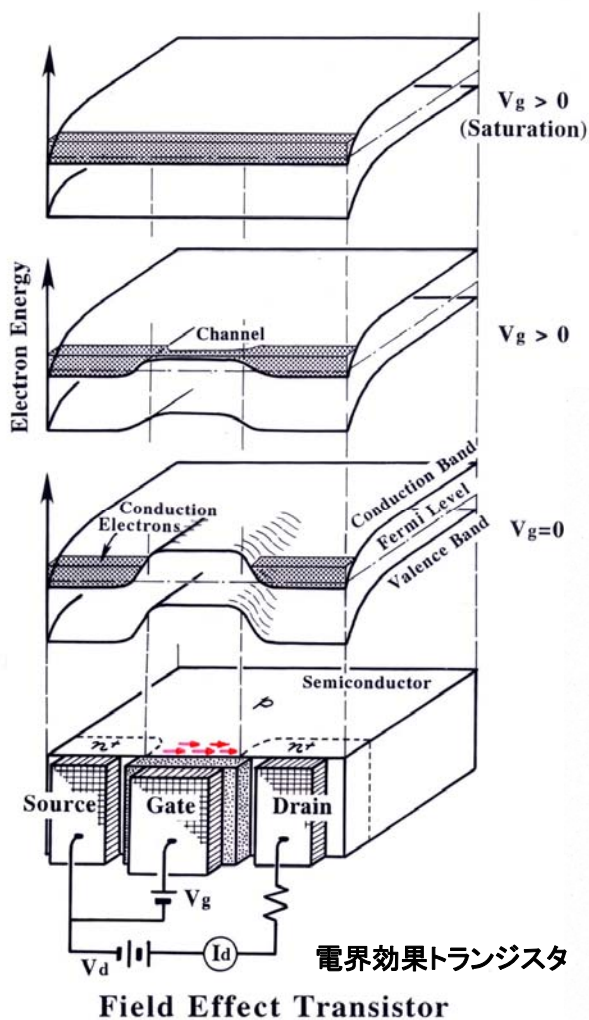


図 7.3 MOSFET の断面図
Metal-Oxide-Semiconductor
FET

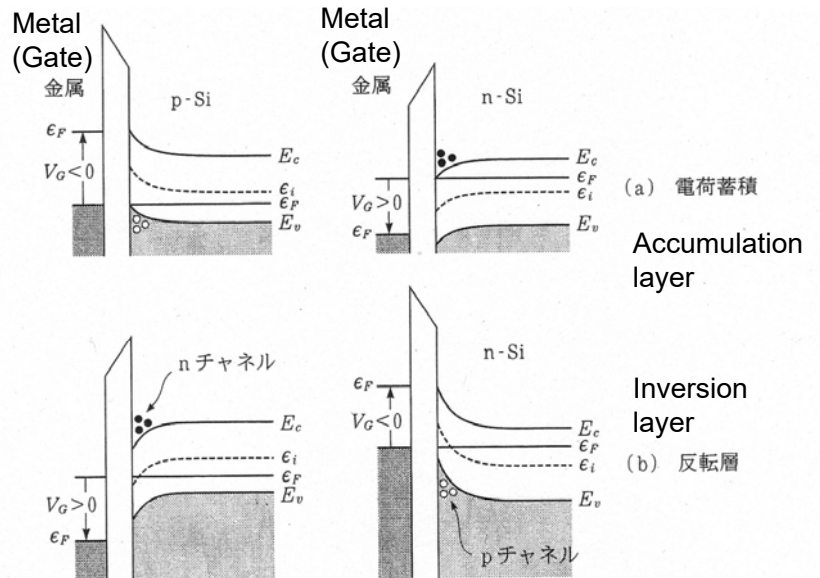
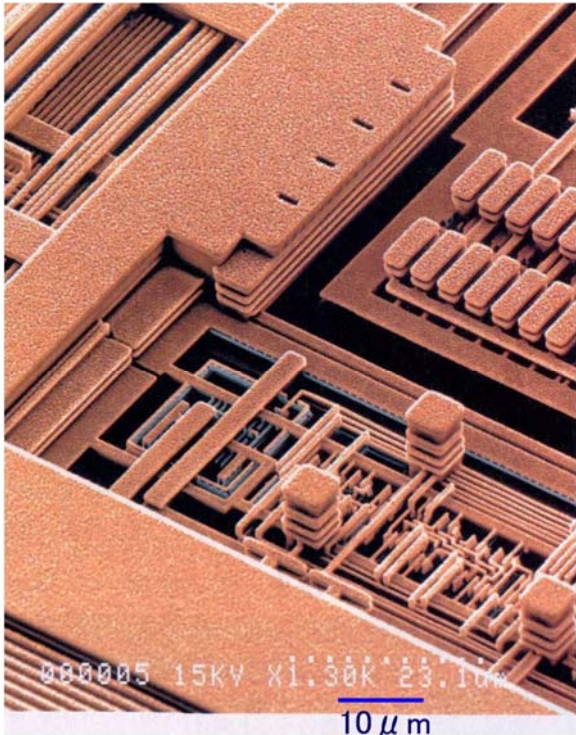


図 7.4 理想的 MOS 構造におけるエネルギーバンドダイアグラムのゲート電圧による変化 (ϵ_i は真性領域でのフェルミ準位 (化学ポテンシャル) であり, (4.7) を参照)

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

Gate length = 20 nm (Channel length)



Cu 配線の拡大図 Cu wiring
IBM社が開発した Cu 配線を使うCMOSセルベース LSI「SA-27」

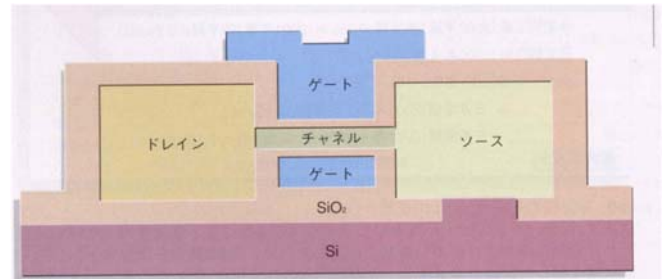
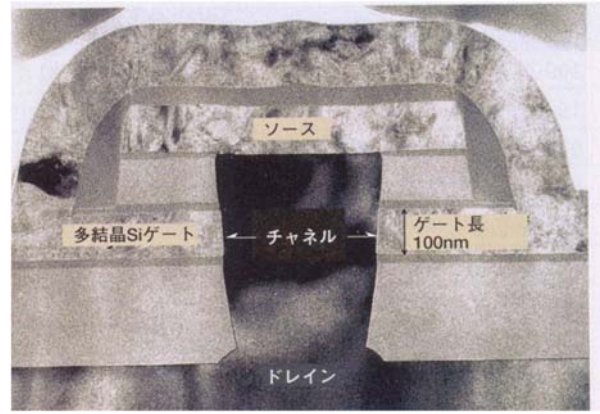
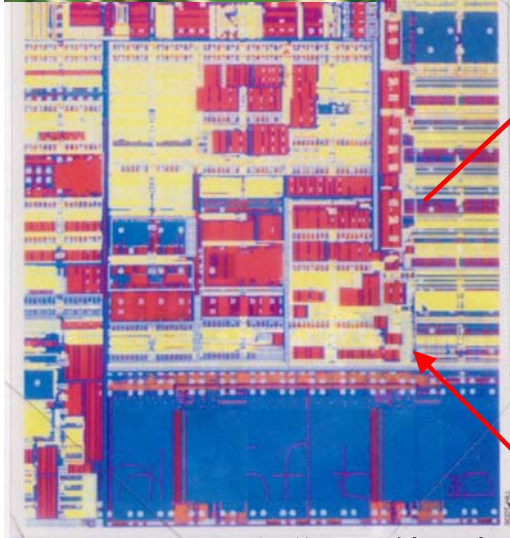
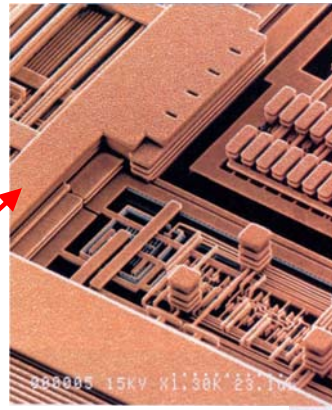


図7 ゲート長20nm以下をねらうダブル・ゲート・トランジスタ
米IBM Corp.が示した「ダブル・ゲート・トランジスタ」の構造。上下に設けた二つのゲートでチャンネルに流れる電流を制御する。従来構造よりも、チャンネル電流の経路を限定できるため、微細化による漏れ電流を抑えられる。(図：米IBM Corp.)

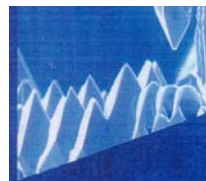
大規模集積 (LSI) 回路



光学顕微鏡写真 (ウィキメディア・コモンズから)



電子顕微鏡写真 (IBM HPから)



(サンヨー電子株式会社カタログから)

PCには
1億個以上のトランジスタが搭載
最小線幅 0.1 μm = 100 nm
=原子 300 列

Minimum line width 0.1 μm=100 nm
= 300 atom rows



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”

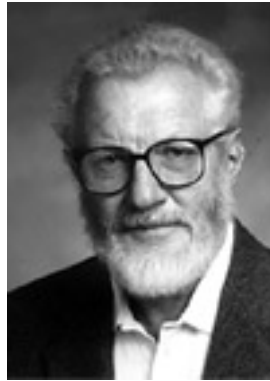
“集積回路の発明に対して”“for his part in the invention of the integrated circuit”



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

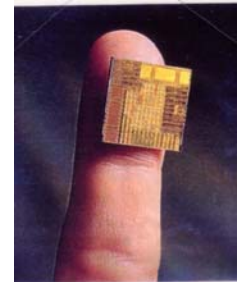


キルビー
Jack S. Kilby
USA

Texas Instruments
Dallas, TX, USA

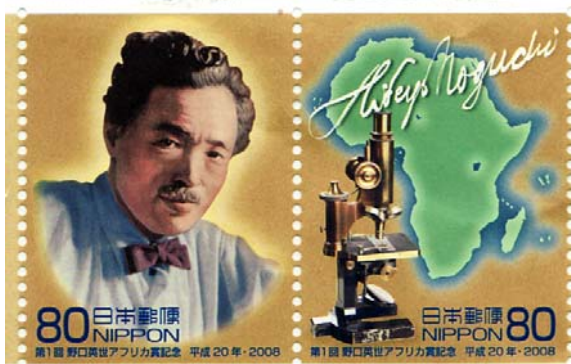
b. 1923

PC/スマホには、1億個以上のトランジスタが搭載。



More than 100 Million transistors are on a chip in PC/cell phone.

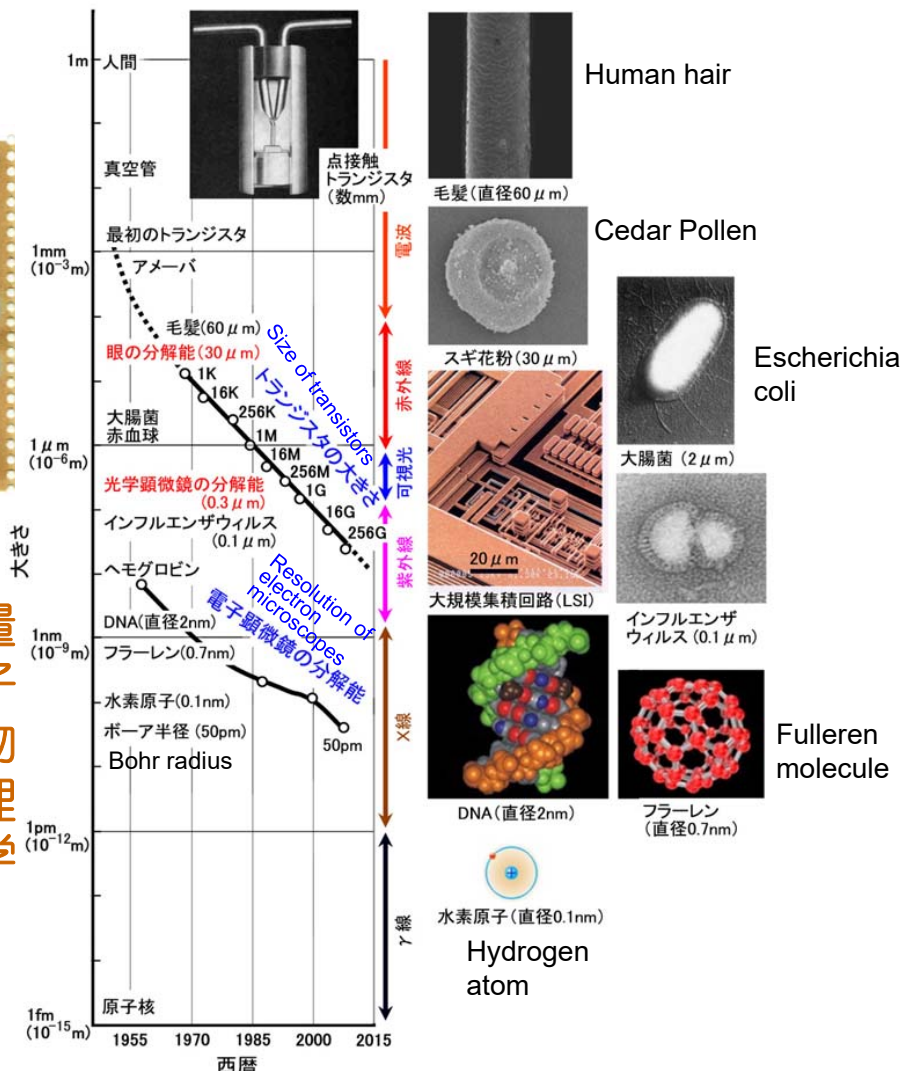
ものの大きさ Size of Things

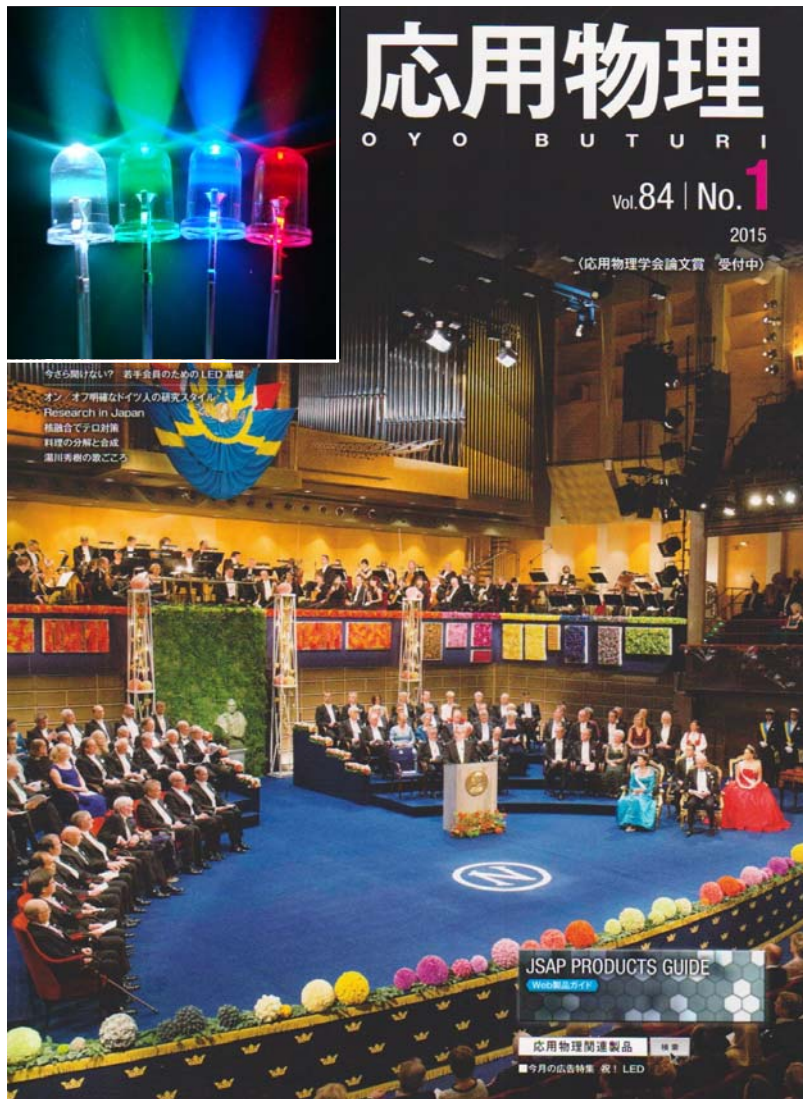


1 nm ナノメートル
= 10^{-9} m
= 10億分の1
メートル
1 billionth meter

長谷川 修司
「見えないものをみる」
東京大学出版会 2008年

Quantum Physics
量子物理学





2014年ノーベル物理学賞

明るく省エネの白色光源を可能にした、効率的な青色発光ダイオードの発明

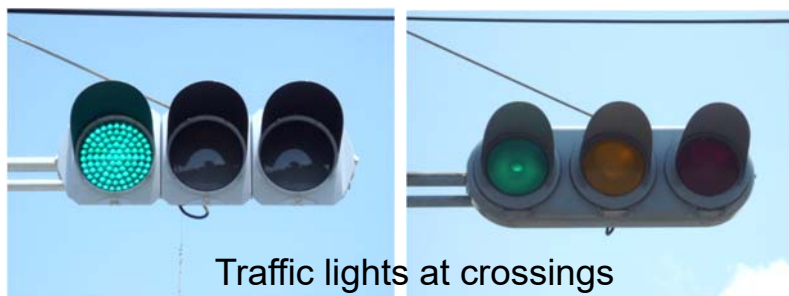
“for the invention of efficient blue light-emitting diodes which has enabled bright and energy-saving white light sources”



中村修二、赤崎勇、天野浩
S. Nakamura, I. Akasaki, H. Amano

応用物理学会誌から

発光ダイオード Light Emitting Diode LED



Traffic lights at crossings

LED信号

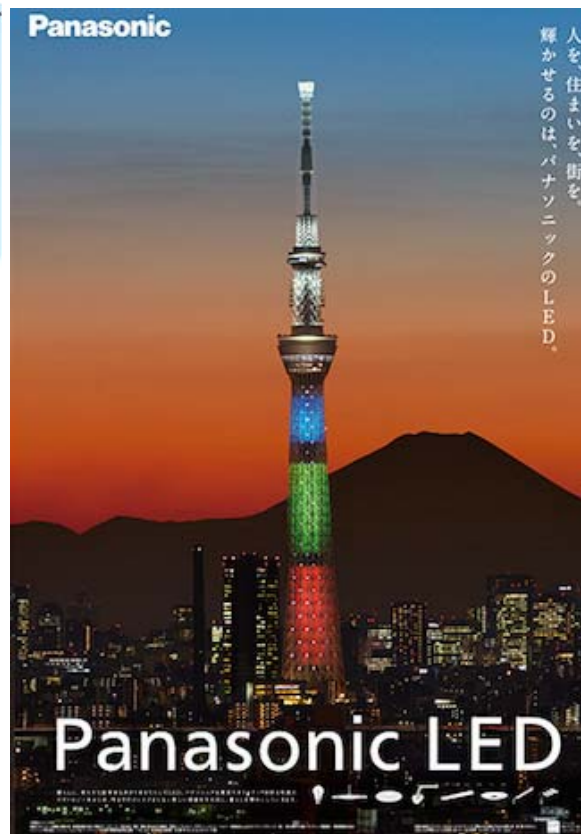
電球信号

RGBの3色のLEDで白色



Sign on Shinkansen

長谷川撮影



<https://pickles.tv/works/led-skytree/>

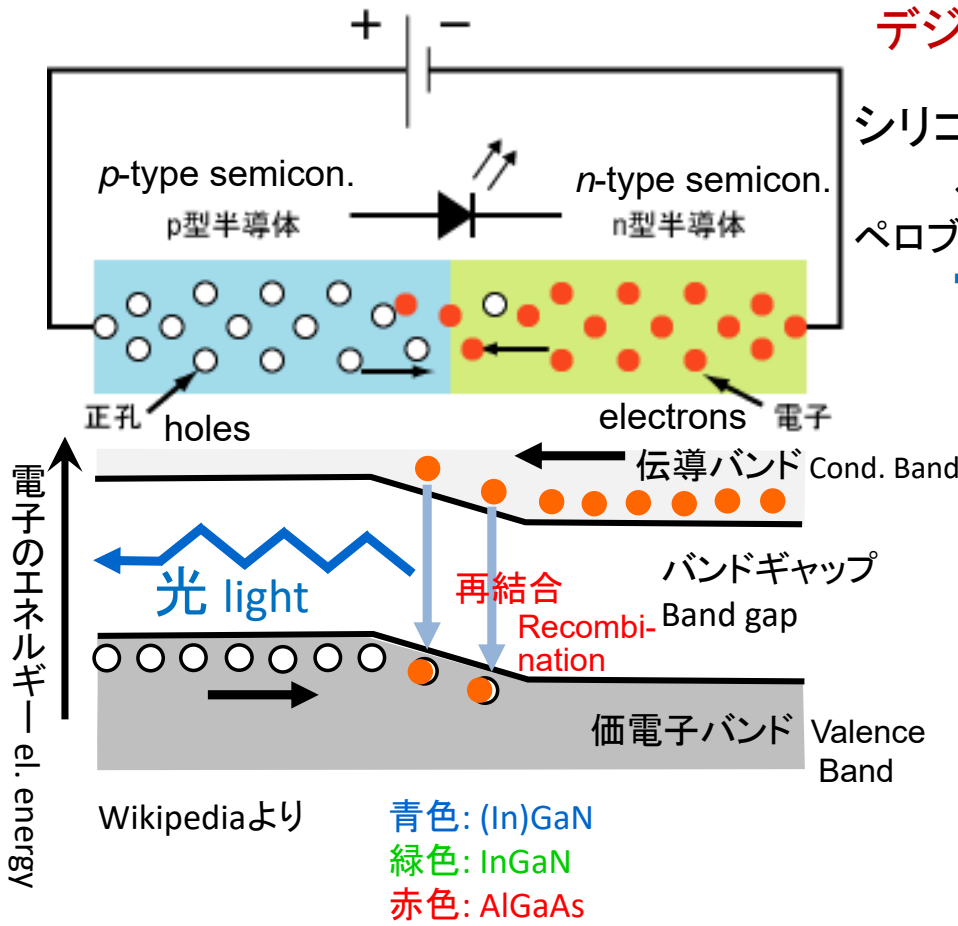
Tokyo Sky Tree Tower

電気→光 Electric current → light: LED

光→電気 light → electric current:

太陽電池 solar cell

デジタルカメラ digital camera



シリコン太陽電池 Si Solar cell

↓
ペロブスカイト太陽電池 Perovskite
宮坂力(つとむ) Miyasaka

CCDカメラ CCD Camera

Boyle, Smith
(2009ノーベル物理学賞)

↓
PIN Photodiodes/
CMOS sensors

寺西信一 Tranishi
Queen Elizabeth
Prize for Engineering
2017



The Nobel Prize in Physics 1973

ノーベル財団HPから

トンネル効果の発見
for discovery of tunneling effect

半導体内で
In semiconductors

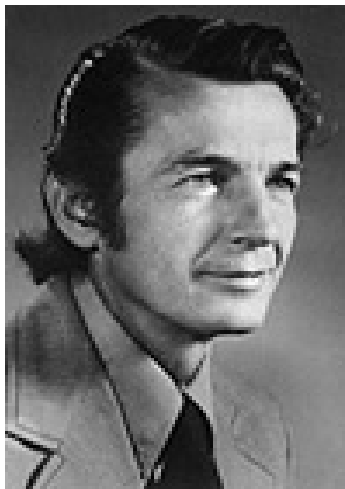


江崎玲於奈
Leo Esaki

Japan
IBM

b. 1925

超伝導体内で
in superconductors



ギエーバー
Ivar Giaever

USA
General Electric Company

b. 1929

ジョセフソン効果の理論的予測
Prediction of Josephson effect

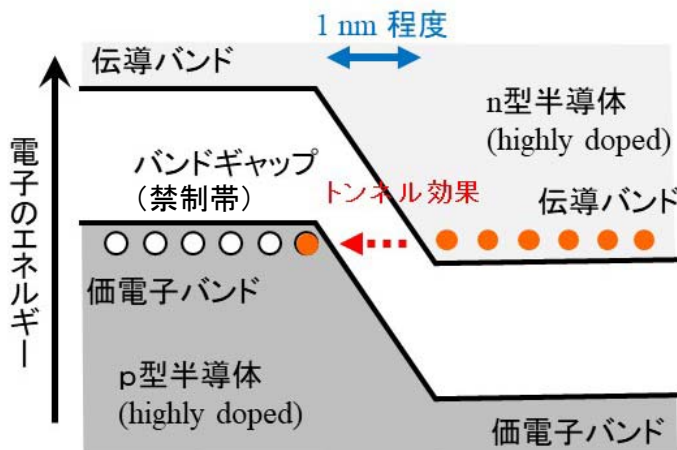
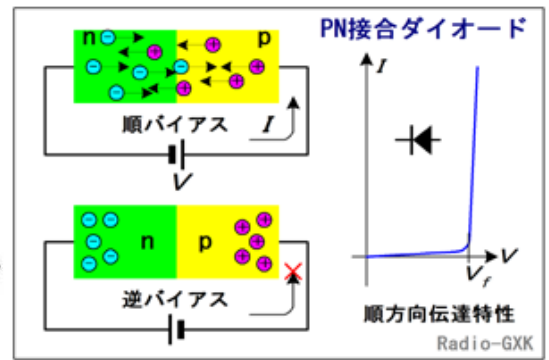
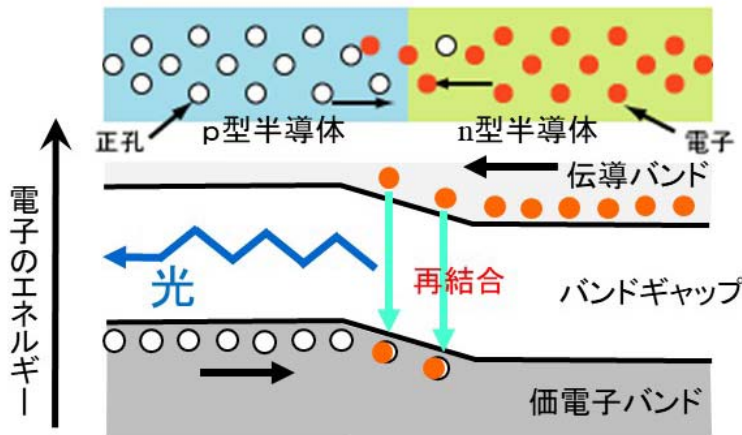


ジョセフソン
Brian D. Josephson

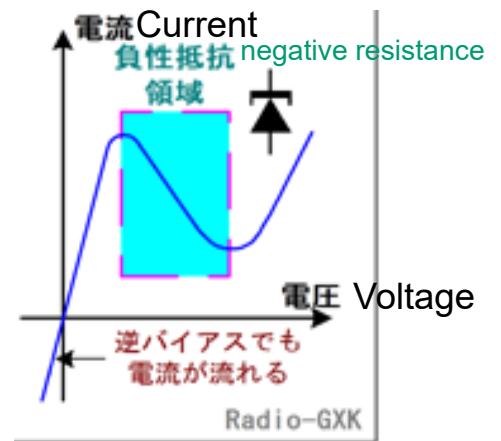
United Kingdom
University of Cambridge

b. 1940

(light-emitting) diodes



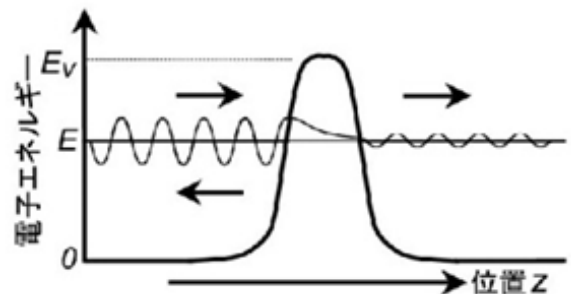
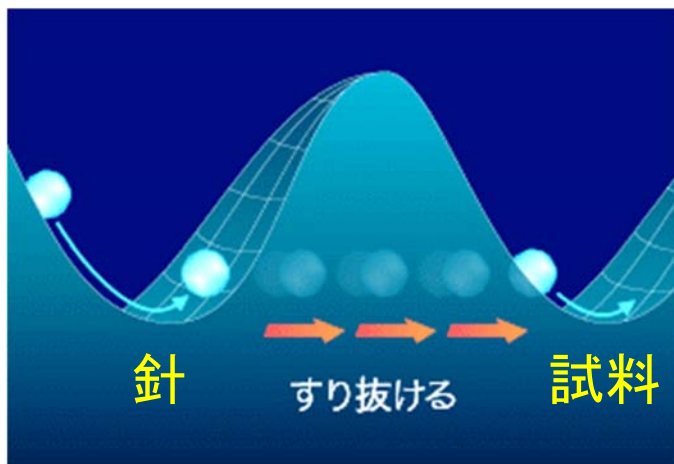
トンネル(エサキ)ダイオード
Tunnel (Esaki) diodes



Tunnel Effect ← Wave nature of electrons

山の向こう側に行くには

- 古典物理学: 山を乗り越える (マクロな世界)
- **量子物理学**: ふもとをすり抜ける (ミクロな世界)



波が、山を染み透って向こう側に染み出る。

針の中にいる電子が試料側にトンネルする。

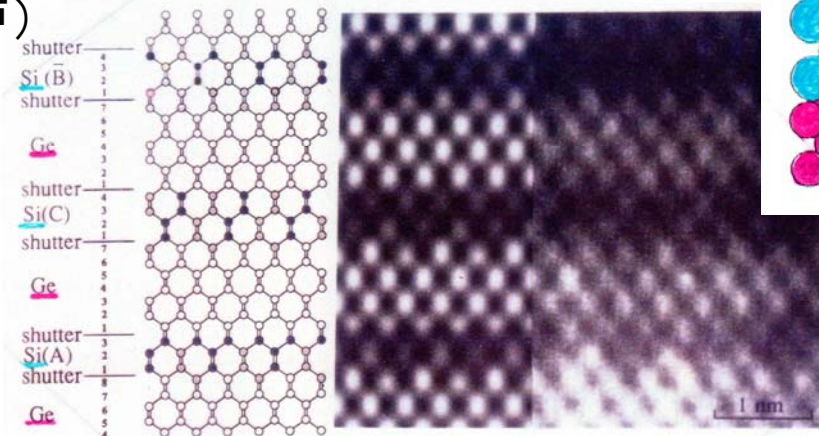
WKB approximation

- 山が低いほど
 - 山の幅が狭いほど
 - 粒子が軽いほど
- } **トンネルする確率が高くなる**



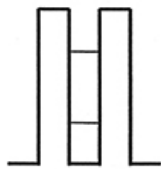
異なる原子を積み重ねる—江崎玲於奈
→ 自然には存在しない人工物質
(量子井戸)

Quantum well

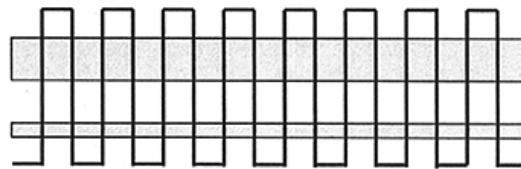


GeSi超格子の電子顕微鏡写真

出典: D. E. Jesson, et al., in SiGe Based Technologies (North Holland, 1992)



二重障壁構造(共鳴トンネル構造)



超格子構造

超格子構造

⇒ ミニバンド mini bands

バンドギャップの

人為的制御

Control of band gap size



The Nobel Prize in Physics 2007

for the discovery of Giant Magnetoresistance

巨大磁気抵抗効果の発見 → 磁気ヘッド (ハードディスクの小型化・高密度化) MRAM



Albert Fert

France
南パリ大学

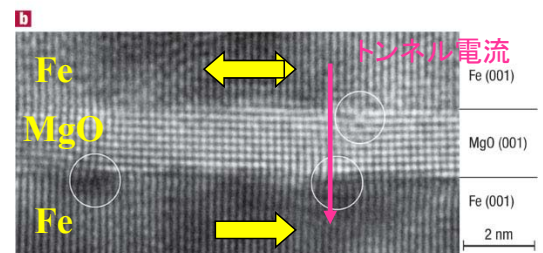
b. 1938



Peter Grünberg

Germany
Julich研究所

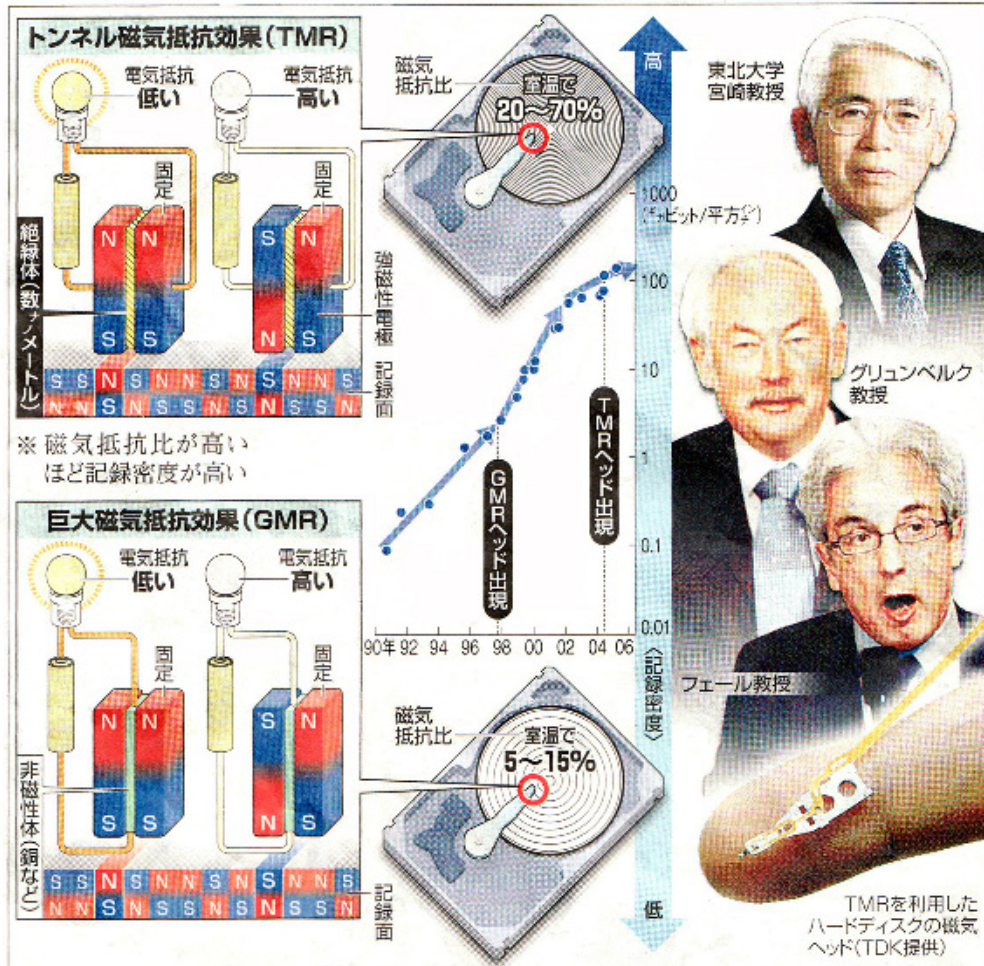
b. 1939



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

湯浅 新治

トンネル磁気抵抗効果
Tunnel Magneto-Resistance Effect



宮崎照宣 T. Miyazaki
(てるのぶ)
室温での
巨大トンネル
磁気抵抗効果
Giant tunnel magneto-
Resistance effect at RT

MRAM
磁気ランダム
アクセス
メモリー
Magneto-
resistance
random access
memory



JAPAN PRIZE

Japan Prize

The Japan Prize Foundation

Laureates

平成記念研究助成

ビデオ

イベント



Laureates of the Japan Prize 日本国際賞

1973年のノーベル賞
から25年後！

Year Country



江崎 玲於奈博士

1998 Japan Prize 受賞者 江崎玲於奈博士

授賞対象分野：新材料の設計・創製と機能発現
授賞業績：人工超格子結晶概念の創出と実現による新機能材料
記念講演：半導体超格子の誕生とその発展

主な受賞等

- 1959 仁科賞
- 1960 朝日賞 東洋レーヨン科学技術賞
- 1961 モーリス・リーブマン賞 スチュワー
- 1965 日本学士院賞
- 1973 ノーベル物理学賞
- 1974 文化勲章
- 1985 米国物理学会国際賞
- 1991 IEEE榮譽賞

人工超格子結晶概念の創出と実現
による新機能材料の発展への貢献
For the creation and realization of the
concept of man-made superlattice
crystals which lead to generation of
new materials with useful applications

1.3. 低次元系 Low-dimensional systems に関するノーベル賞

Nobel Prizes about low-dimensional systems



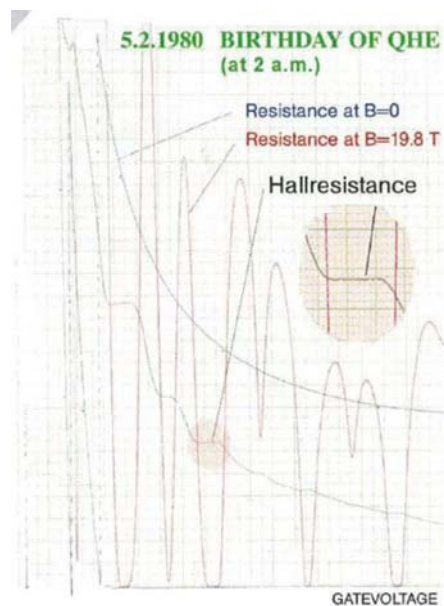
The Nobel Prize in Physics 1985

for the discovery of the quantized Hall effect (QHE)
量子ホール効果の発見に対して

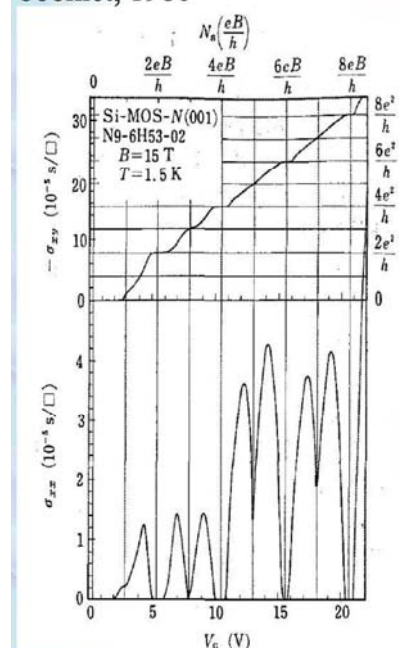


Klaus von Klitzing

Max-Planck-Institut für
Festkörperforschung,
Stuttgart, 独
b. 1943



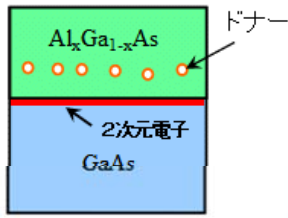
Oji international seminar
booklet, 1980



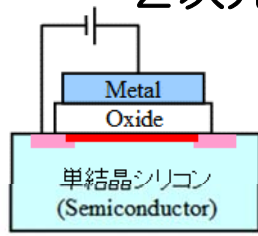
川路紳治(学習院大)の
講演概要集の図

2次元電子系 Two-dimensional electronic systems

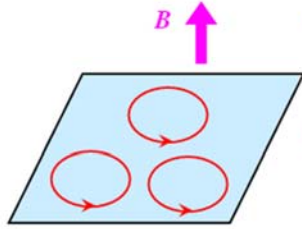
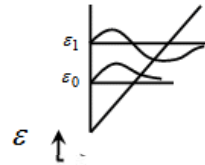
岡本研究室HPより
Okamoto Lab



ヘテロ構造



MOS構造



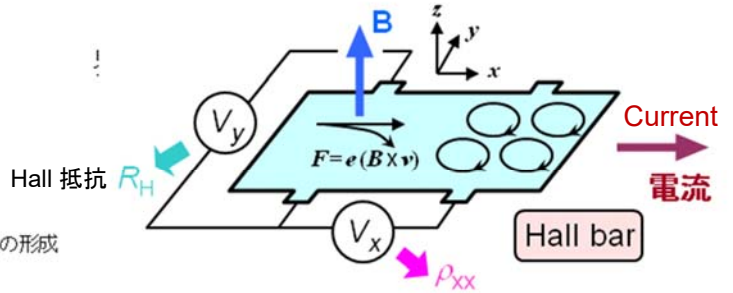
$B=0$ のとき $\epsilon = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*}$

磁場中では $\epsilon = \hbar \omega_c \left(n + \frac{1}{2} \right)$ $n=0, 1, 2, 3, \dots$

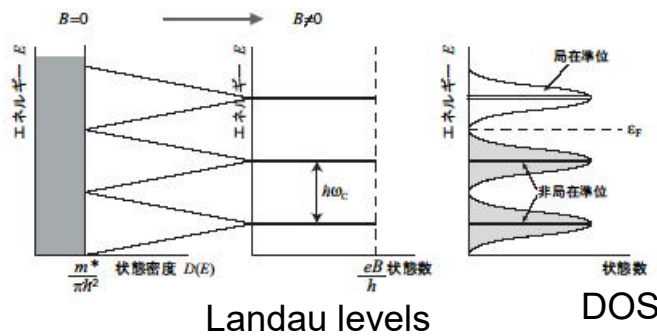
ランダウ準位の形成

サイクロトロン(角)周波数 (ラーマー)

$\omega_c = \frac{eB}{m^*}$

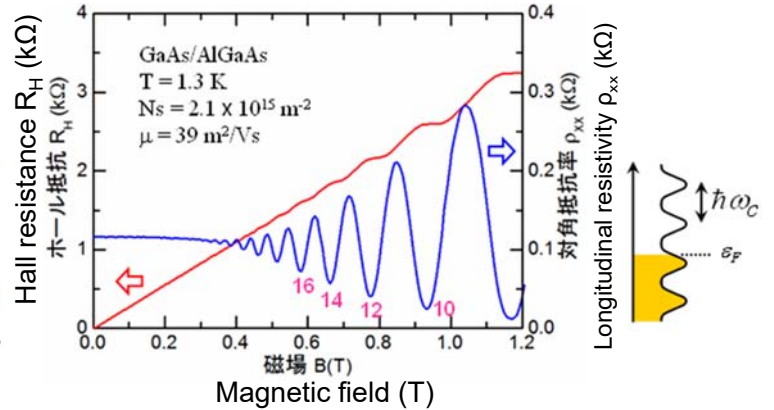


Shubnikov-de Haas 振動 oscillation



Landau levels

DOS



2次元電子系：量子ホール効果 Quantum Hall Effect

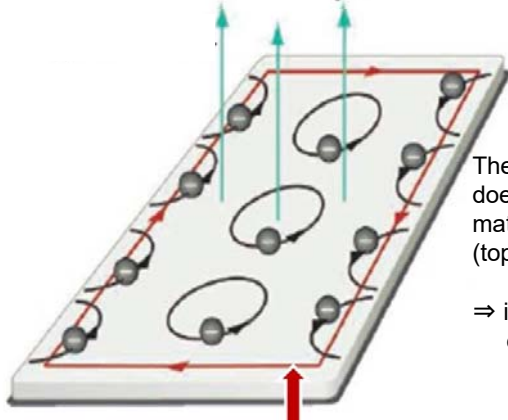
岡本研究室HPより
Okamoto Lab

Von Klitzing 定数 $\frac{h}{e^2} = 25812.8074434(84) \Omega$

Integer QHE

整数量子ホール効果

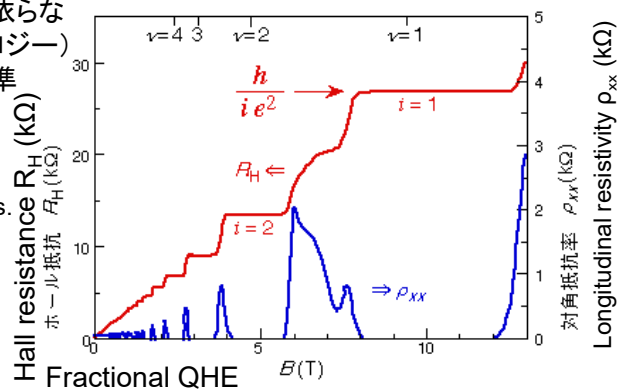
von Klitzing
1985 Nobel Prize



試料の種類や形に依らない一定値(⇒トポロジー)
電気抵抗の国際標準

The von Klitzing constant does not depend on the materials and size of samples. (topological nature)

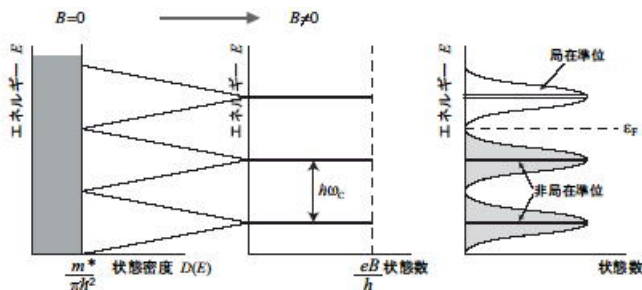
⇒ international standard of electrical resistance



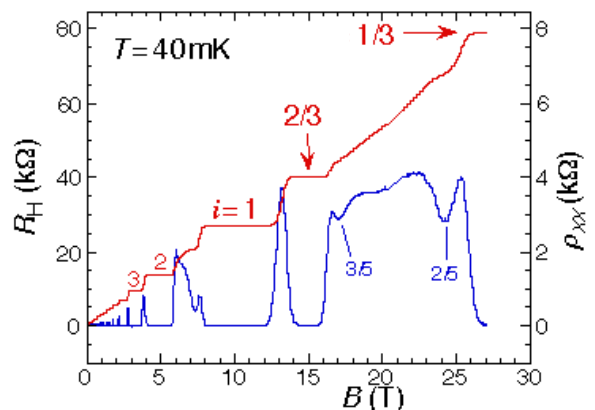
Fractional QHE

分数量子ホール効果

Laughlin, Stomer, Tsui
1998 Nobel Prize



Landau levels



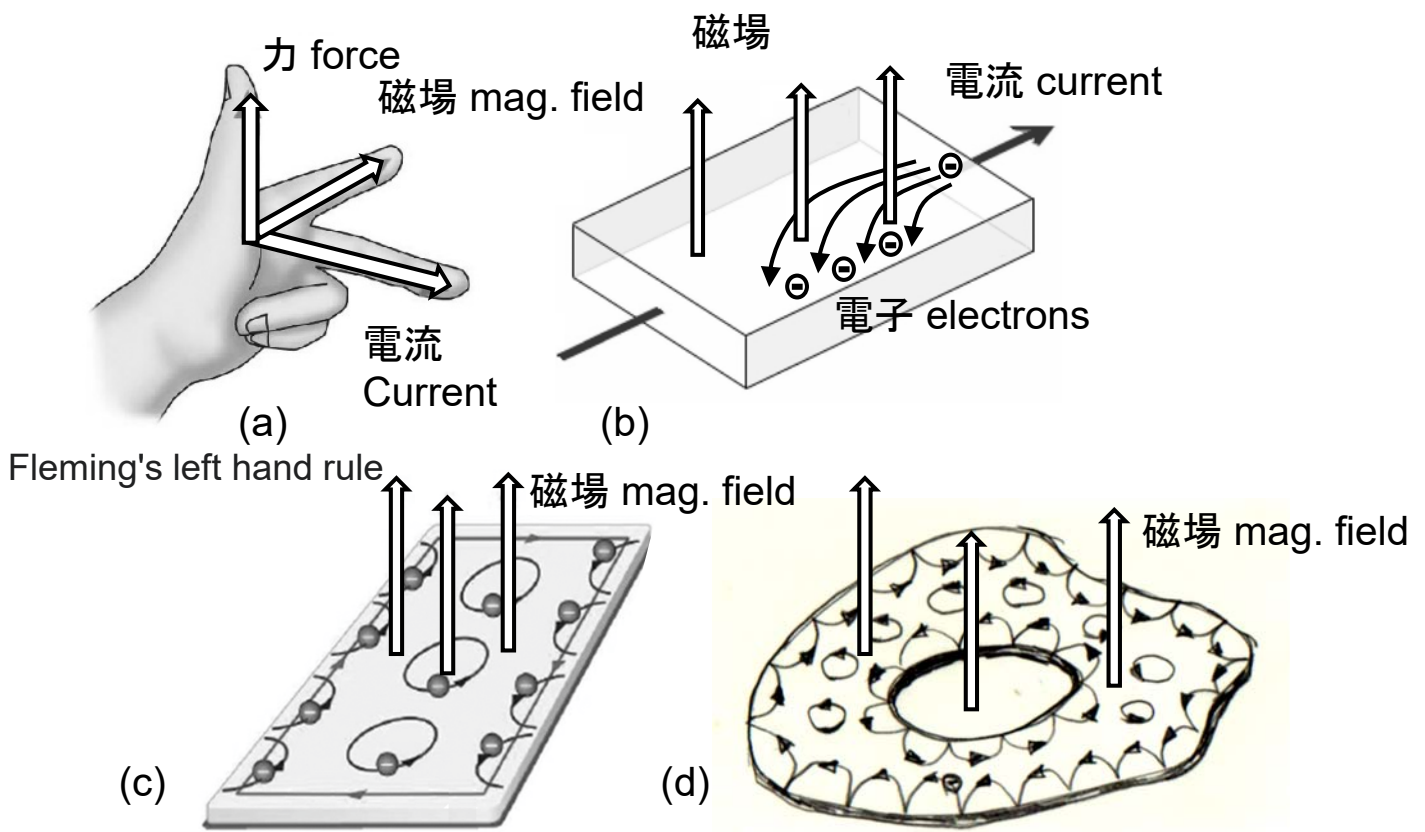


図 1.17. (a) フレミングの左手の法則。磁場のなかを電流が流れるとき、電流が受ける力の方向を示す。(b) ホール効果。磁場によって電子が受ける力で進路が曲げられる。(c) (d) 量子ホール効果の概念図。



The Nobel Prize in Physics 1998

for their discovery of a new form of quantum fluid with fractionally charged excitations
 分数電荷をもつ励起による新しい形の量子液体の発見に対して
 (分数量子ホール効果 fractional quantum Hall effect (FQHE))



Robert B. Laughlin

USA
 Stanford University
 b. 1950



Horst L. Störmer

Germany
 Columbia University
 b. 1949



Daniel C. Tsui

China
 Princeton University
 b. 1939

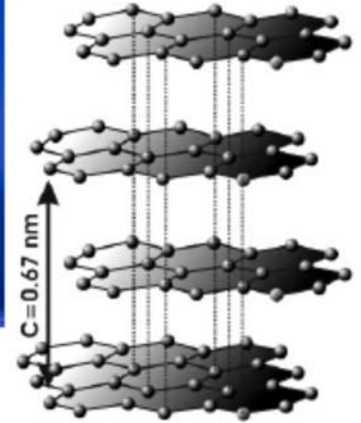
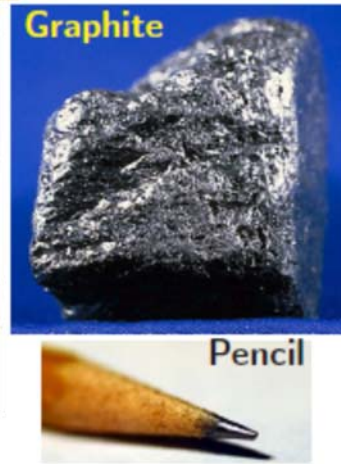
Von Klitzingの整数量子ホール効果は基本的に1体問題だが、分数量子ホール効果は電子間クーロン相互作用を取り入れた多体効果であり、分数電荷、アニオン、複合粒子($\nu=1/m$ の分数量子ホール効果は、電子1個にm本の磁束量子を貼り付けた状態)などの新概念につながった。

FQHE is a many-body phenomenon including el-el-interaction \Rightarrow fractional charge, anyon, composite Fermion



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 graphen



A. K. Geim
b. 1958



K.S. Novoselov
b. 1974

グラフェン(黒鉛)

University of Manchester, UK

単層グラフェンで(半奇数)量子ホール効果を観測し、質量ゼロのDirac粒子を実証
They observed (half-integer) QHE at graphene, verifying massless Dirac electrons.



The Nobel Prize in Physics 2016

for theoretical discoveries of topological phase transitions and topological phases of matter

トポロジカル相転移と物質のトポロジカル相の理論的発見



David J. Thouless
Prize share: 1/2



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



J. Michael Kosterlitz
Prize share: 1/4

TKNN theory of QHE

USA
Univ. Washington

USA
Princeton Univ.

USA
Brown Univ.

Thouless-Kohmoto-NighYngale-den Nijs

b. 1934
d. 2019

b. 1951

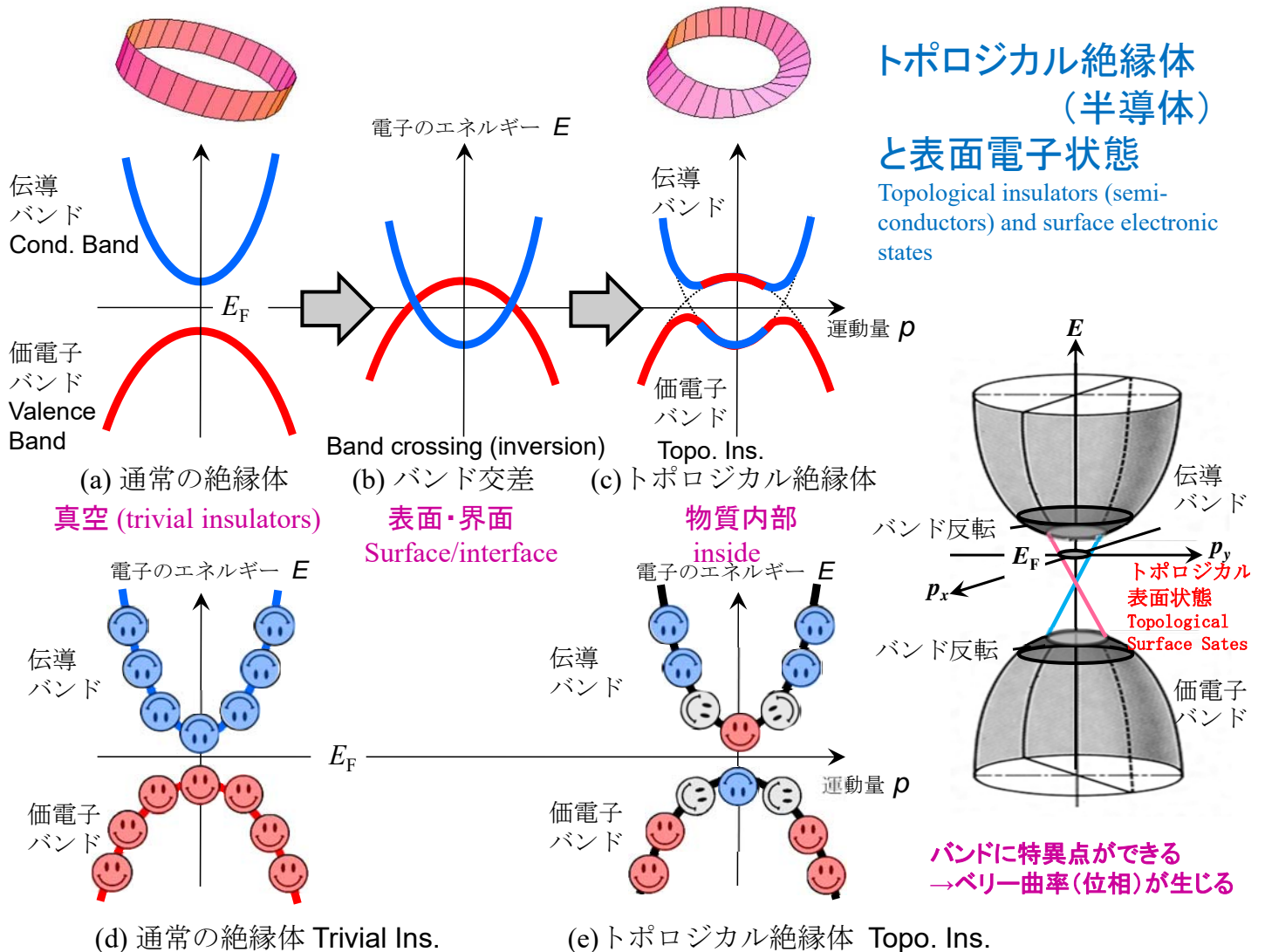
b. 1943

David J. Thouless
 F. Duncan M. Haldane
 J. Michael Kosterlitz

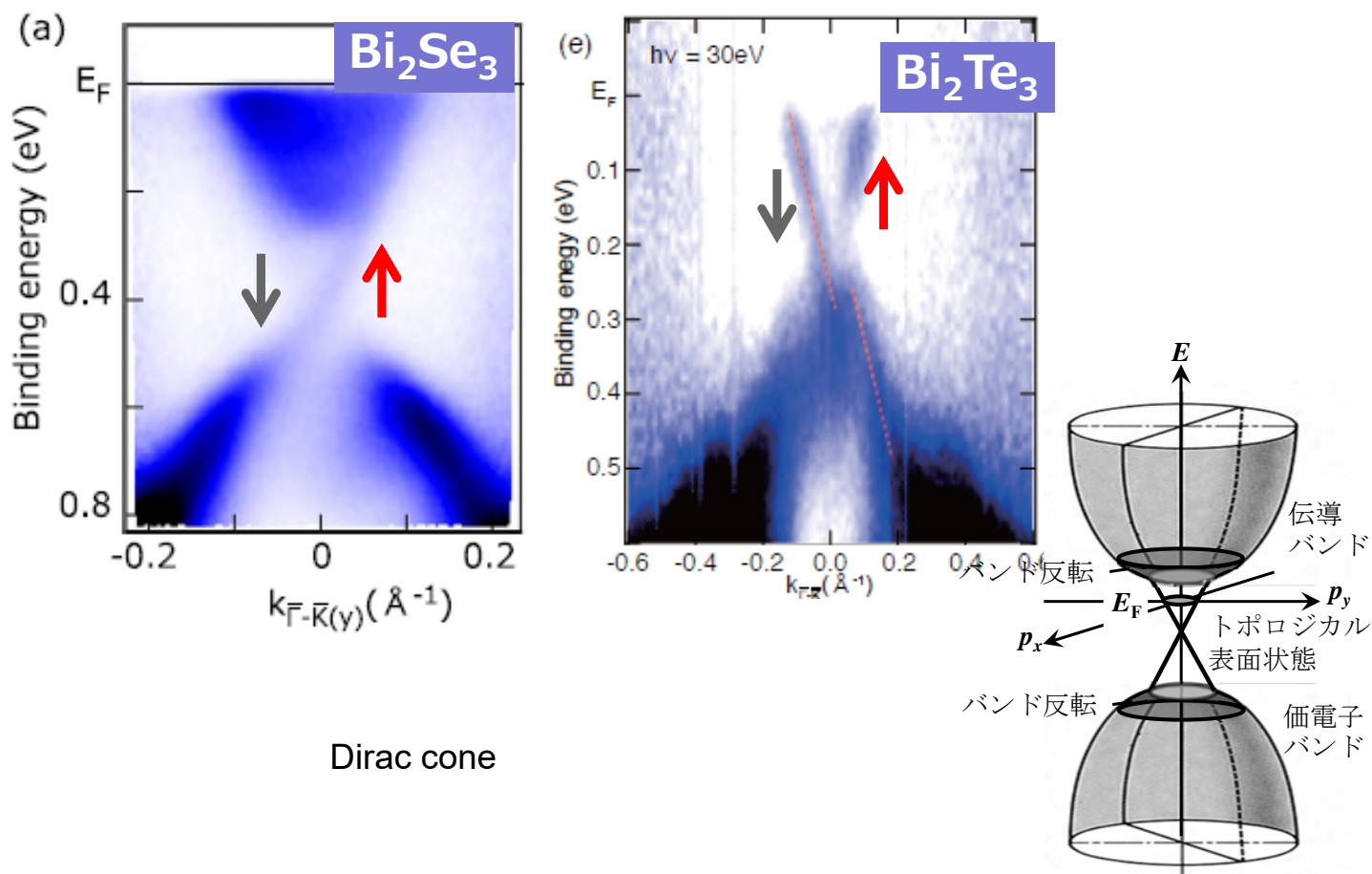
Share this



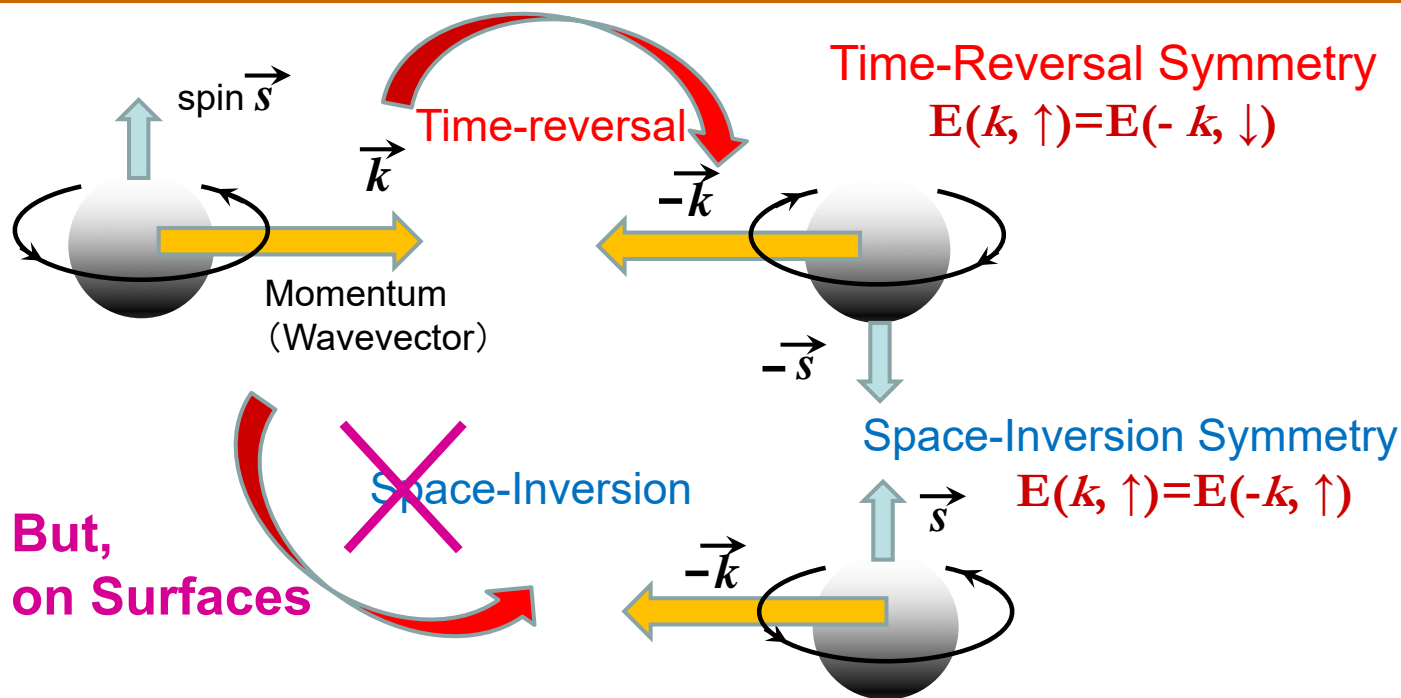
Announcement of the 2016 Nobel Prize in Physics by Professor Göran K. Hansson, Secretary General of the Royal Swedish Academy of Sciences, on 4 October 2016.



Dirac Cones of Topological Insulators



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

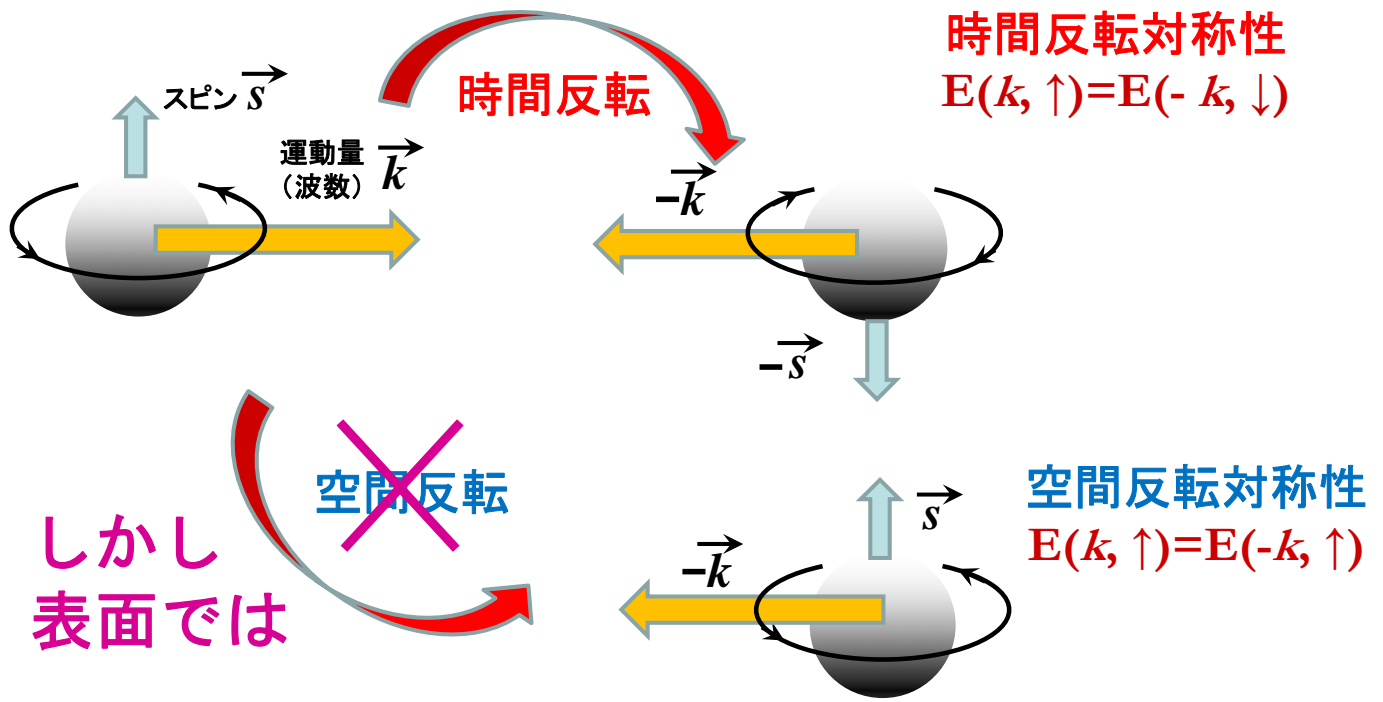


Time-Rev. Sym. + Space-Inv. Sym. \Rightarrow Spin(Kramers) Degenera

Spin-Split in Surface States

$$E(k, \uparrow) \neq E(k, \downarrow)$$

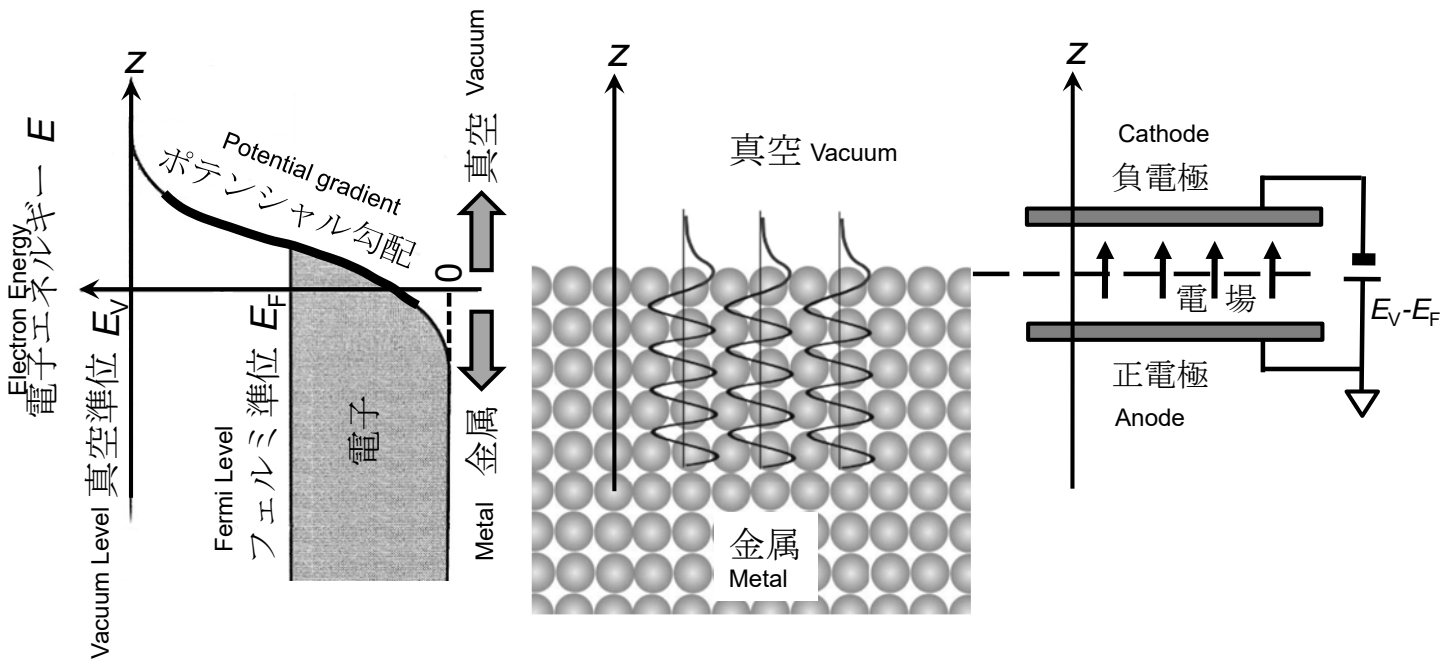
電子のエネルギーは運動量(とスピン)で決まる



時間反転対称性 + 空間反転対称性 \Rightarrow スピン (Kramers) 縮退

表面電子状態ではスピン分裂 $\leftarrow E(k, \uparrow) \neq E(k, \downarrow)$

結晶表面では必ず空間反転対称性が破れている
 Space-inversion symmetry is always broken down at crystal surfaces.



(a) 結晶表面近くのポテンシャル

Potential distribution near crystal surface

(b) 結晶表面近くの断面図

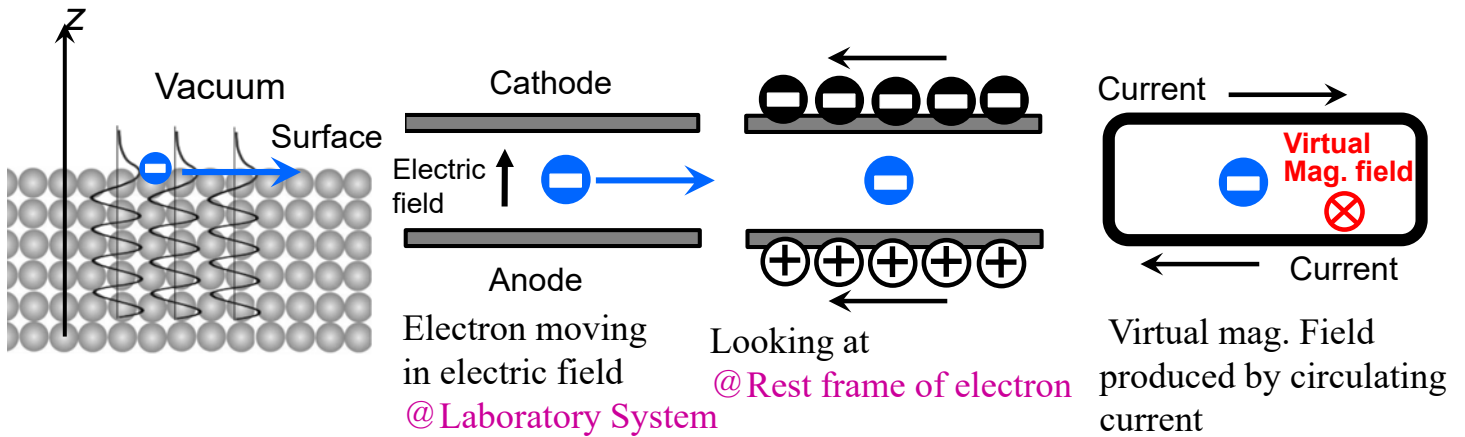
A schematic of cross section near crystal surface

(c) 結晶表面近くの電場

Mimic the electric field near crystal surface

Spin-Orbit Interaction for Moving Surface Electrons

An electron moving at a crystal surface feels virtual magnetic field.



- ⇒ Virtual mag. field // surface ⊥ electron momentum
- ⇒ Spin-momentum locking spin ⊥ momentum

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

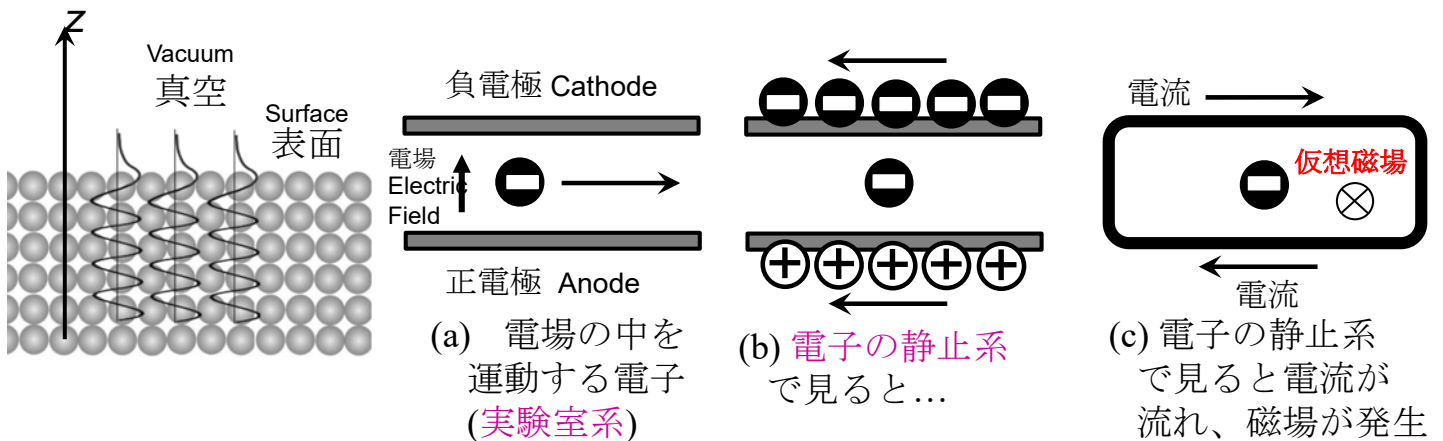
Electron spin

Electron spin interacts with virtual mag. field.
⇒ energy difference depending on spin direction

表面電子の運動によるスピン軌道相互作用

Spin-orbit interaction by motion of surface electrons

結晶表面近傍で運動する電子には仮想磁場がかかっている。
Surface electrons moving at surface feel imaginary magnetic field



- ⇒ 仮想磁場は表面に平行方向
しかも、電子の運動方向と直交

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

電子のスピン

仮想磁場と電子のスピンが相互作用
⇒ スピンの向きによってエネルギーが異なる

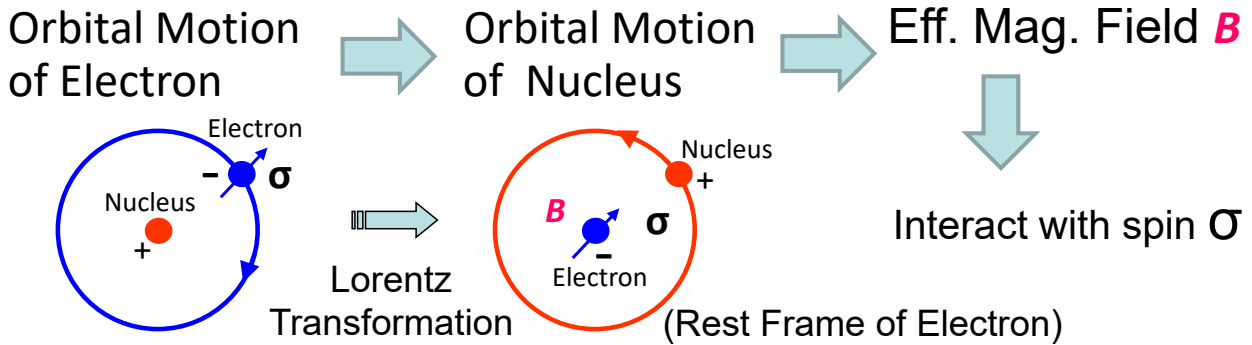
⇒ スピン運動量locking spin ⊥ momentum

Difference in Energy between Spin \uparrow and Spin \downarrow

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

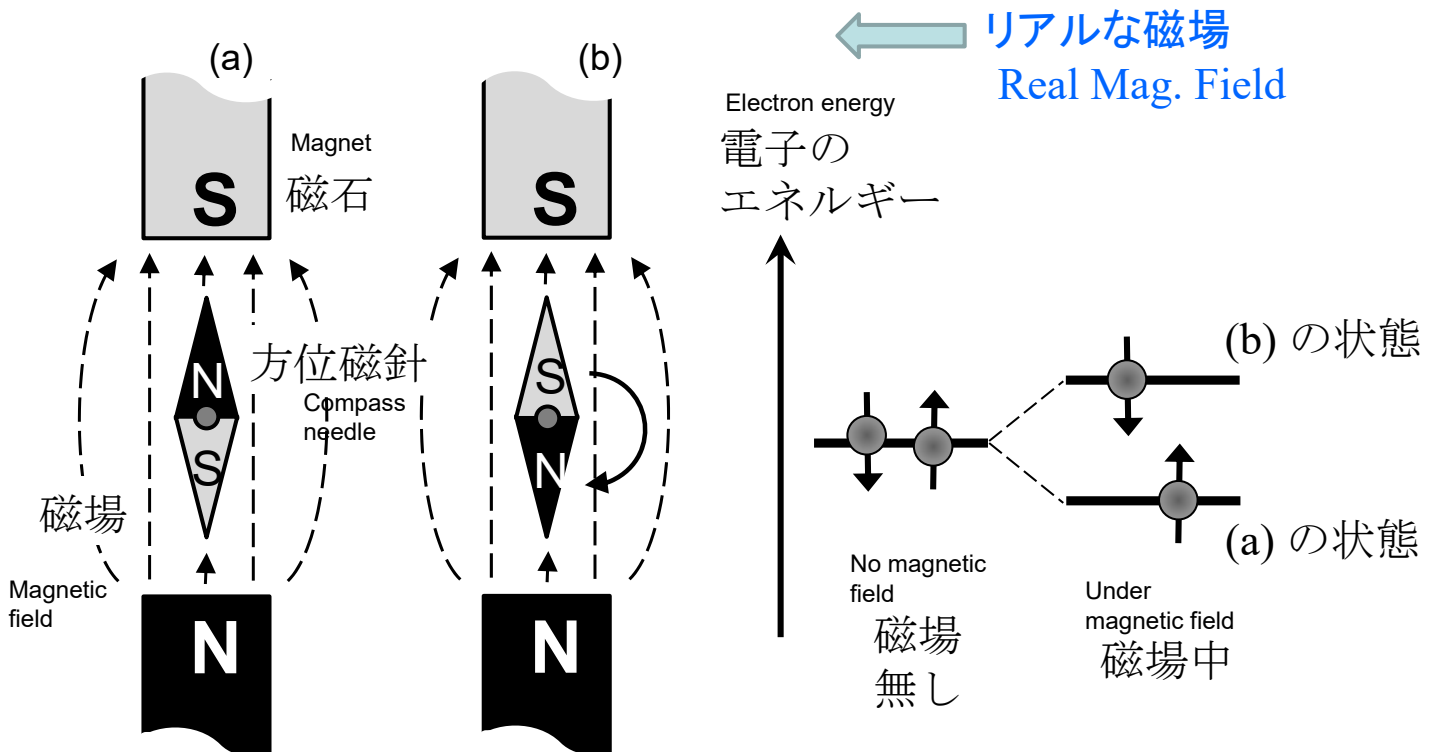
Spin-Orbit-Coupling Hamiltonian

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



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

Zeeman Effect スピンが磁場に平行か反平行かでエネルギーが異なる
Energy depends on the spin direction (parallel or anti-parallel) with respect to the magnetic field.



Rashba Effect/ Topological insulators

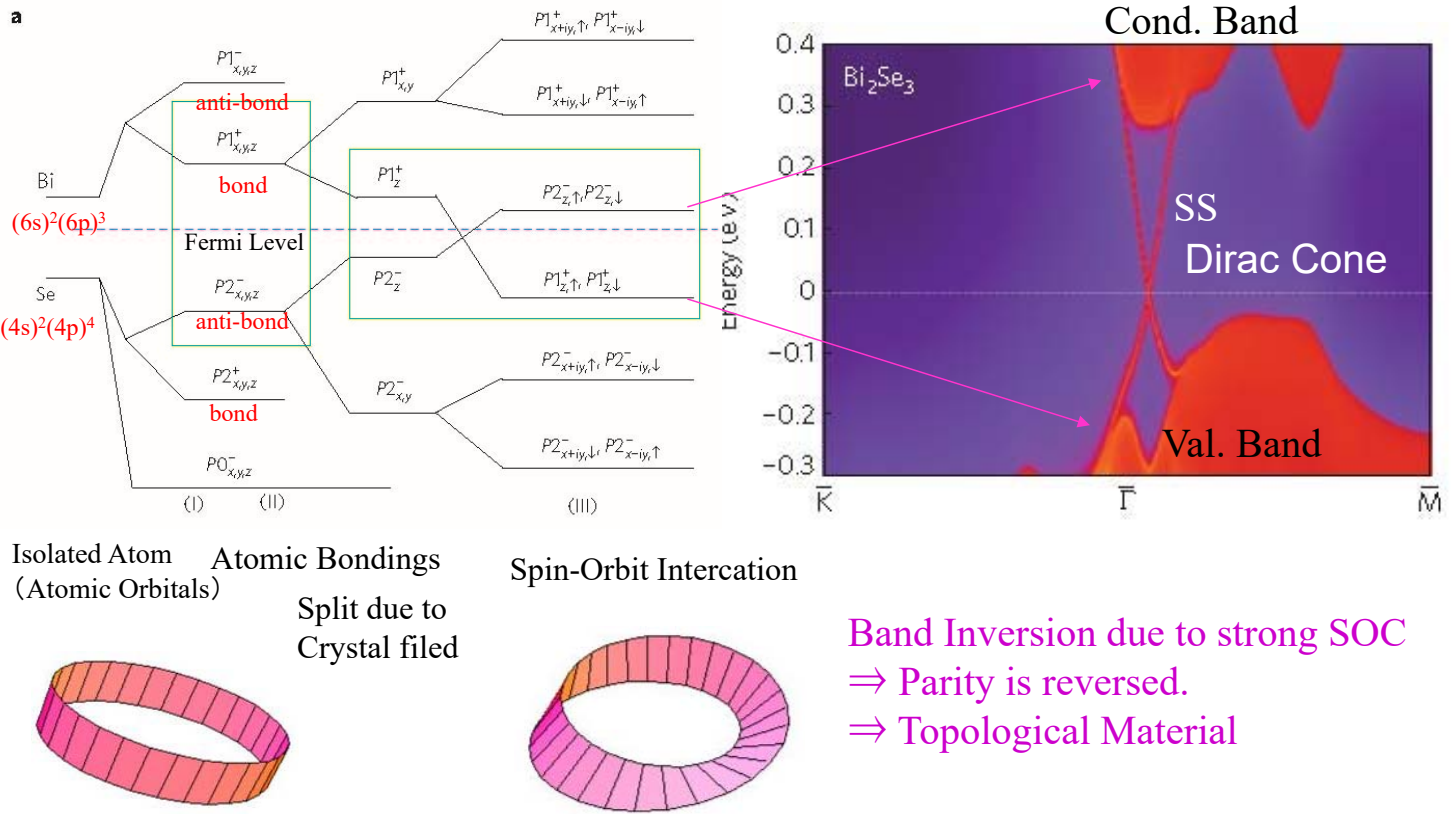
Virtual Mag. Field due to spin-orbit interaction

スピン軌道相互作用に起因する**仮想磁場**

→ スピンの向きによってエネルギーが異なる
Energy depends on the spin direction with respect to the virtual magnetic field.

Electronic States of Bi_2Se_3 (Theory)

H. Zhang, et al., Nature Physics (May 2009)



Topological Surface States

$\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x, \text{Bi}_2\text{Te}_3, \text{Bi}_2\text{Se}_3,$

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

\Rightarrow Extension to 3D Materials

\Leftarrow Strong SO Interaction produces effective B.

