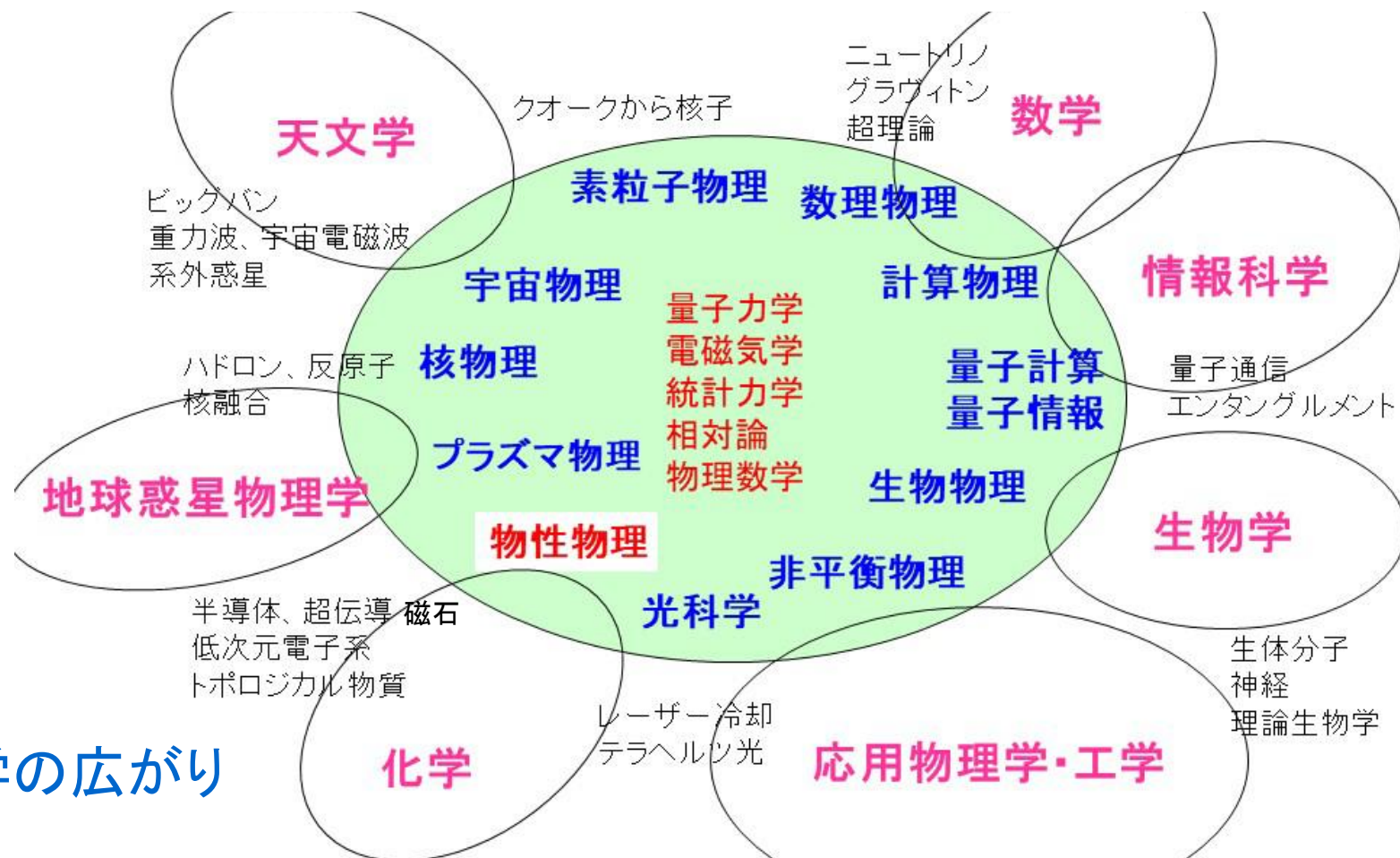


物質を解明して役立てる物理学 —日本人研究者たちの寄与—

長谷川 修司 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・理学部物理学科




物理学の広がり



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



 ショックレー
William B. Shockley

USA
Semiconductor
Laboratory of
Beckman
Instruments, Inc.

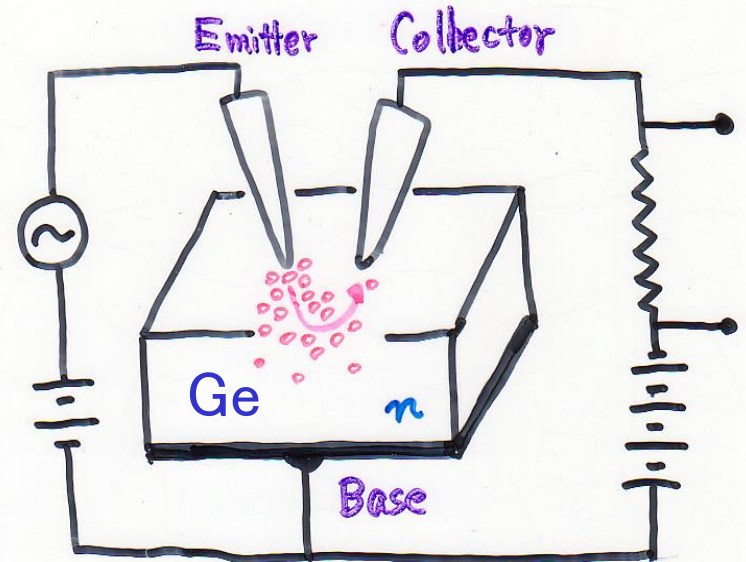
b. 1910
d. 1989




 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



The Nobel Prize in Physics 2000

ノーベル財団HPから

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”

“集積回路の発明に対して”



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

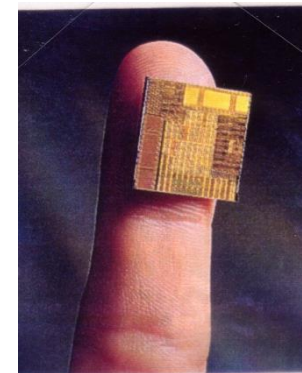
Jack S. Kilby

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。



応用物理

O Y O B U T U R I

Vol. 84 | No. 1

2015

(応用物理学会論文賞 受付中)

今さら聞けない? 若手会員のための LED 基礎

オン/オフ明確なドイツ人の研究スタイル

Research in Japan

核融合でテロ対策

料理の分解と合成

湯川秀樹の歌ころ



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



中村修二、赤崎勇、天野浩

応用物理学会誌から

JSAP PRODUCTS GUIDE

Web製品ガイド

応用物理関連製品 検索

■今月の広告特集 祝! LED

発光ダイオード Light Emitting Diode LED



LED信号



電球信号

RGBの3色のLEDで白色



長谷川撮影

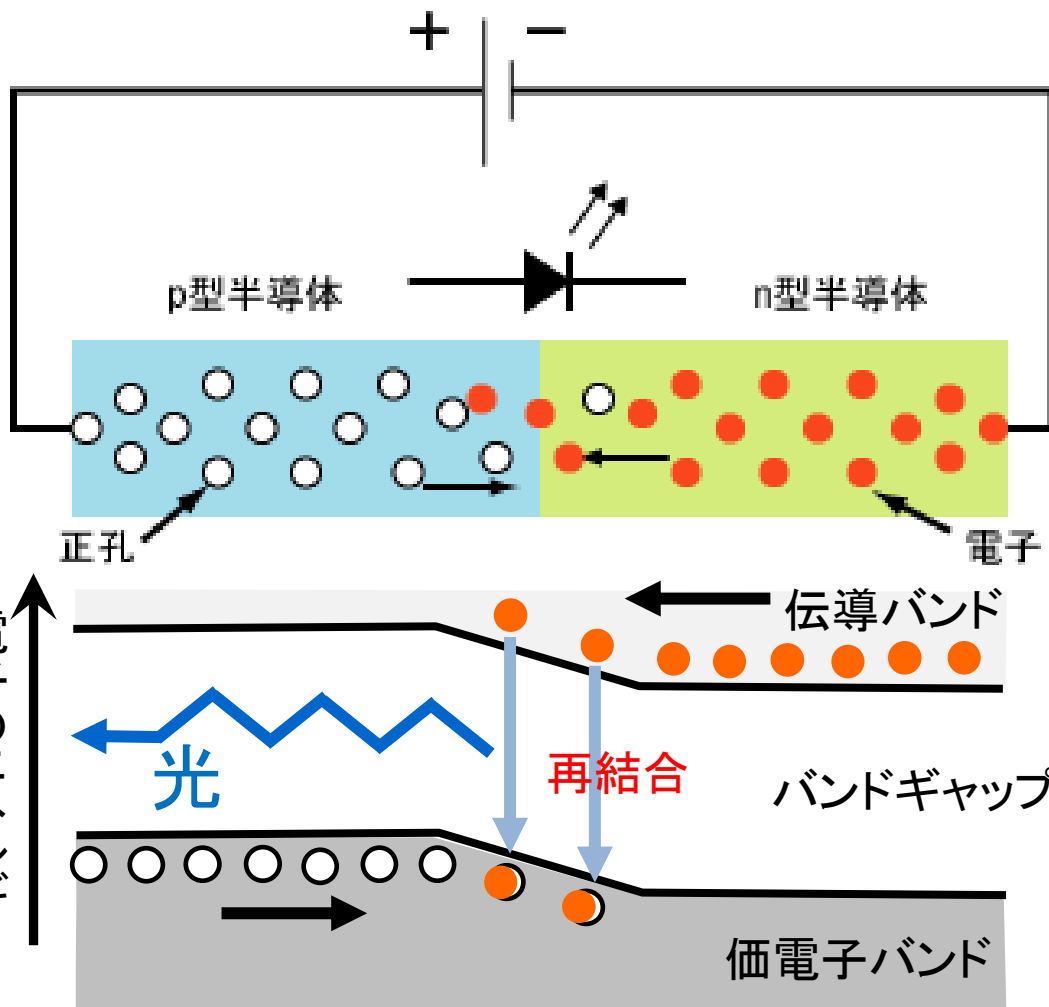


<https://pickles.tv/works/led-skytree/>

電気→光 : LED

光→電気 : 太陽電池

デジタルカメラ



Wikipediaより

青色: (In)GaN

緑色: InGaAs

赤色: AlGaAs

シリコン太陽電池



ペロブスカイト太陽電池

宮坂力(つとむ)

CCDカメラ

Boyle, Smith

(2009ノーベル物理学賞)



ピンフォトダイオード
/CMOSセンサー

寺西信一

Queen Elizabeth

Prize for Engineering

2017



The Nobel Prize in Physics 1973

トンネル効果の発見

ノーベル財団HPから

半導体内で

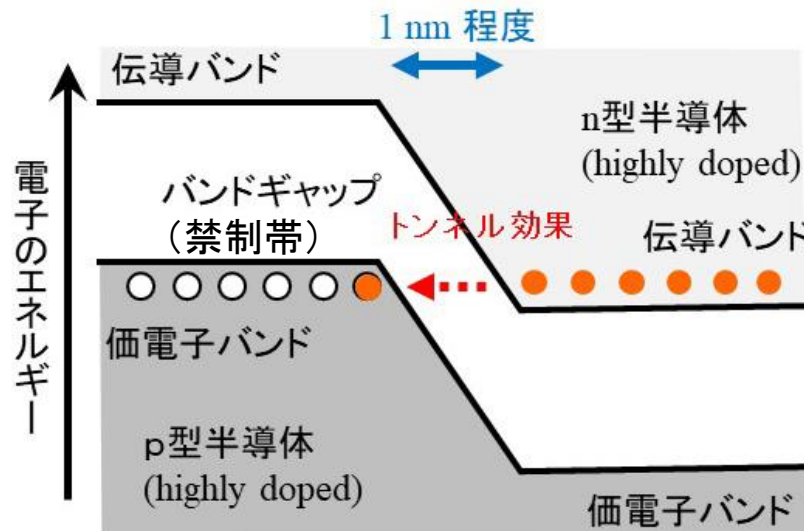
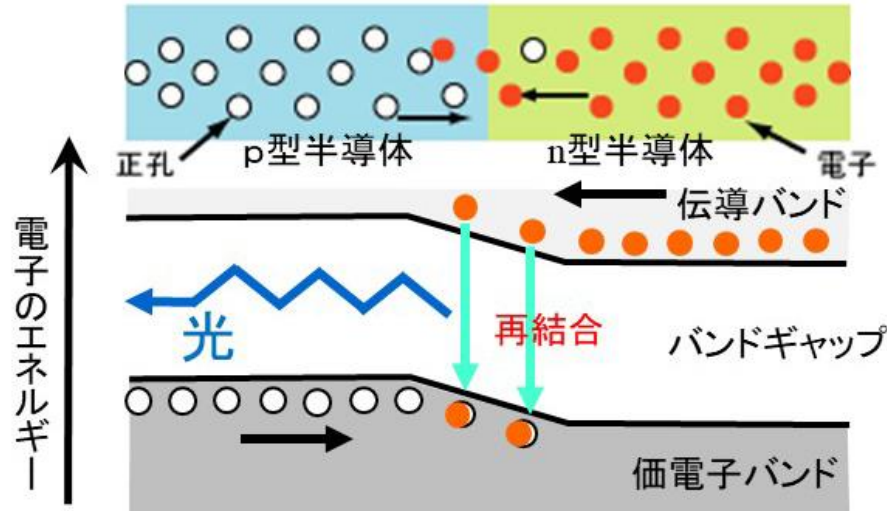


 江崎玲於奈

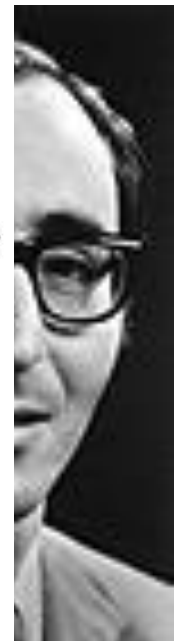
Leo Esaki

Japan
IBM

b. 1925



理論的予測



ジョン
Seshson

igdom
Cambridge

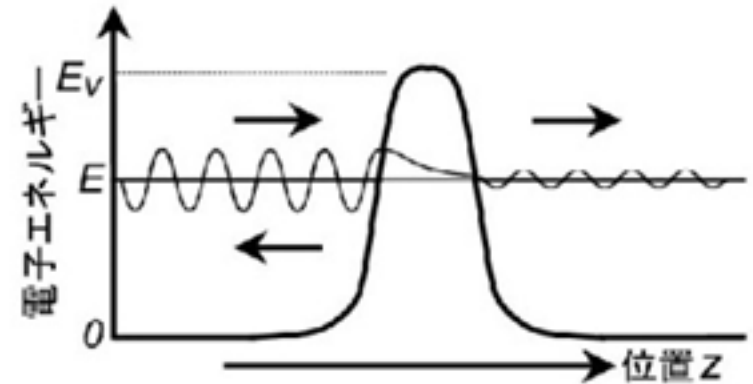
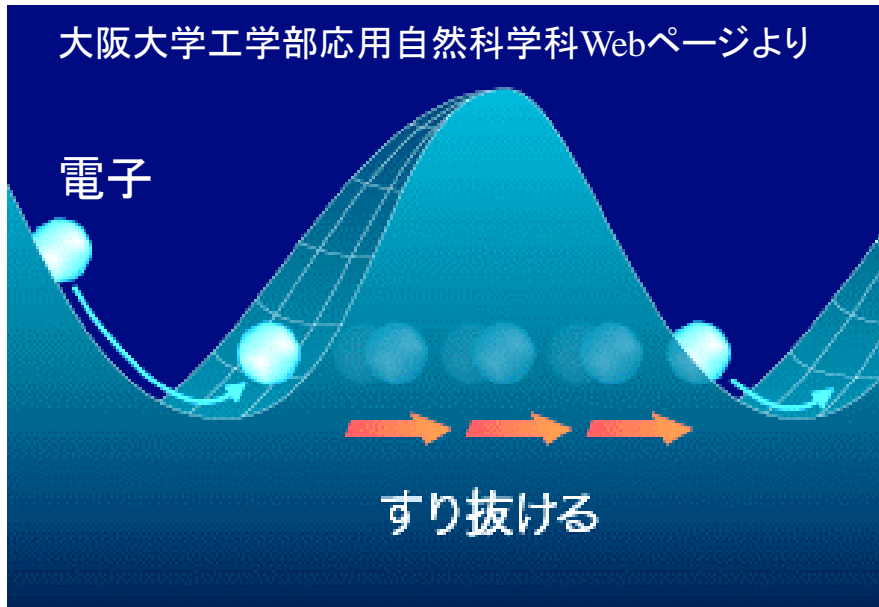
0

トンネル効果

山(ポテンシャル障壁)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)

大阪大学工学部応用自然科学科Webページより



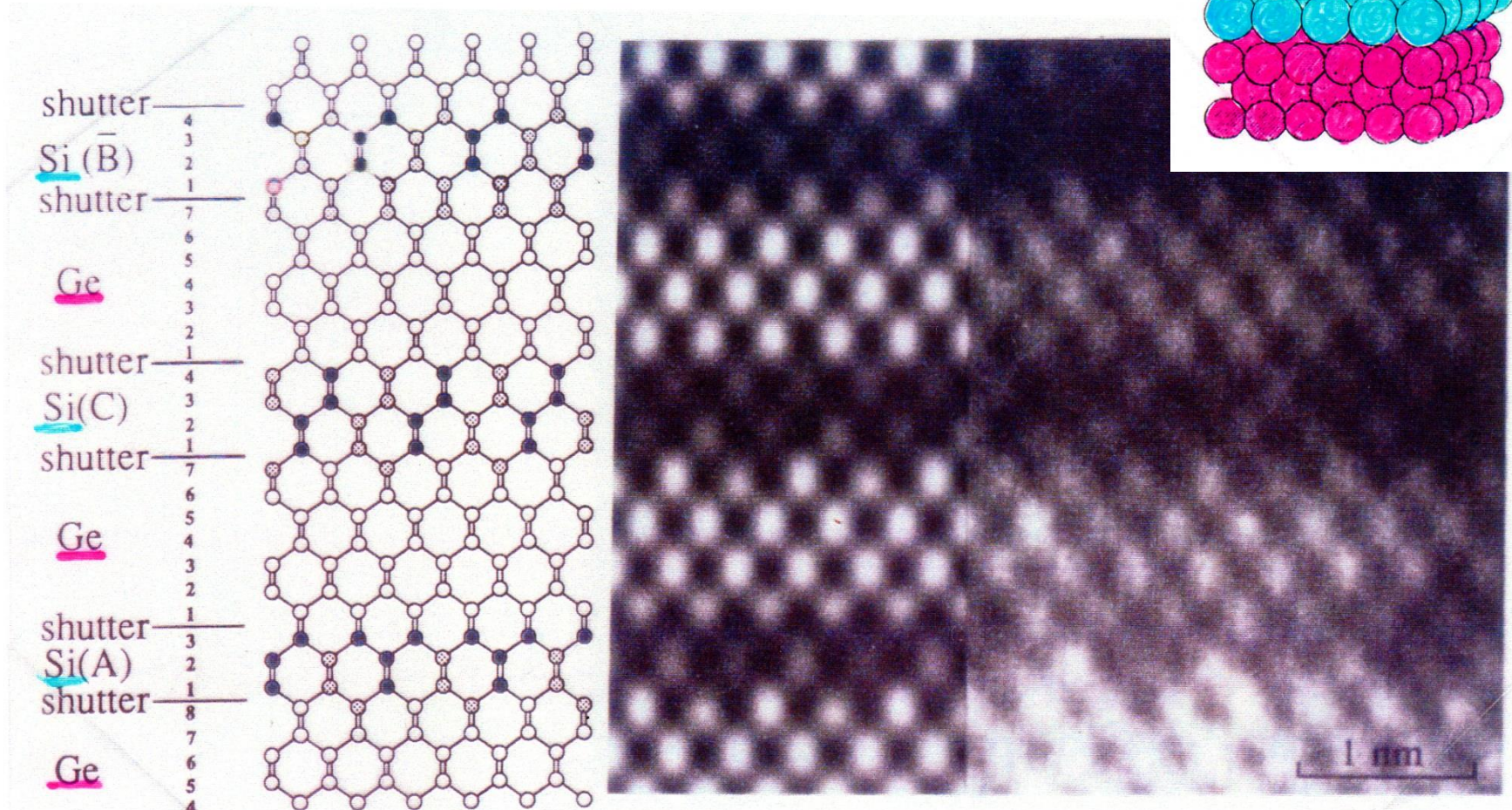
電子波が、ポテンシャル障壁に浸み込んで向こう側に染み出る。

電子がポテンシャル障壁の反対側にトンネルする。

- 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

超格子構造 - 人工結晶 Man-made Crystals

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)



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)



The Nobel Prize in Physics 2007

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

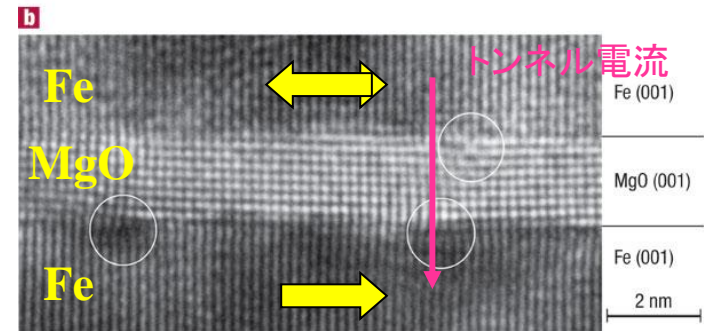
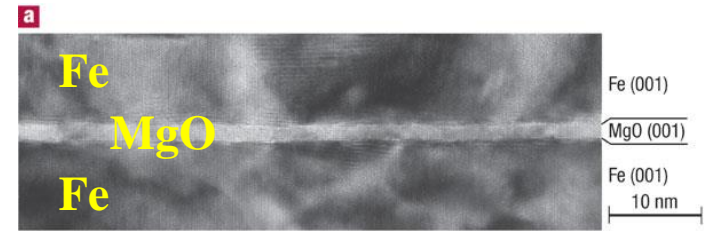
b. 1938



Peter Grünberg

Germany
Julich研究所

b. 1939

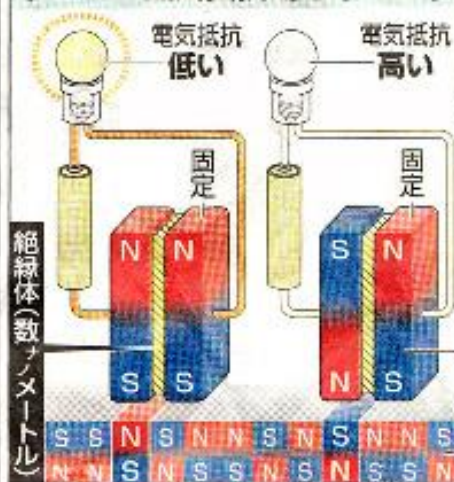


S. Yuasa, et al., Nature Materials 3, 868 (2004).

湯浅 新治

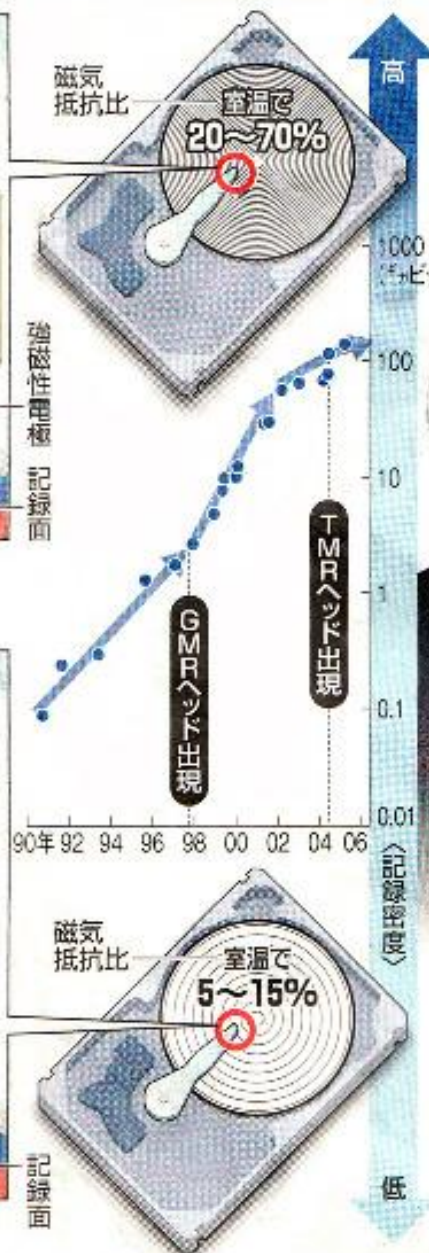
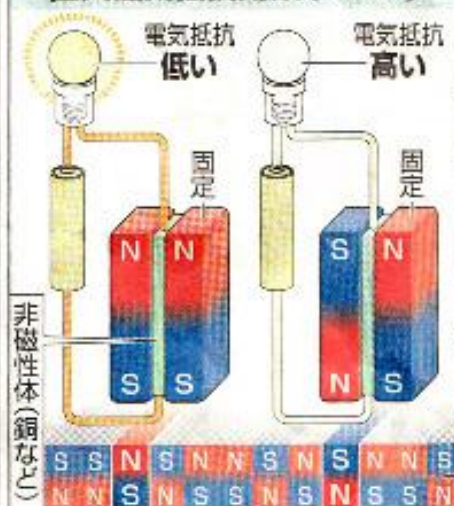
トンネル磁気抵抗効果

トンネル磁気抵抗効果(TMR)



※ 磁気抵抗比が高いほど記録密度が高い

巨大磁気抵抗効果(GMR)



宮崎照宣
東北大学
宮崎教授

グリュンベルク
教授

フェール教授

TMRを利用した
ハードディスクの磁気
ヘッド(TDK提供)

宮崎照宣

(てるのぶ)

室温での 巨大トンネル 磁気抵抗効果

MRAM 磁気ランダム アクセス メモリー



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 スチュワード・バレンタイン賞 (フラ)
- 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栄誉賞

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



The Nobel Prize in Physics 1986

ノーベル財団HPから

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

独

b. 1906

d. 1988

走査トンネル顕微鏡 (STM) の設計
Scanning Tunneling Microscope



ビニツヒ

Gerd Binnig

IBM, Zurich

独

b. 1947



ローラー

Heinrich Rohrer

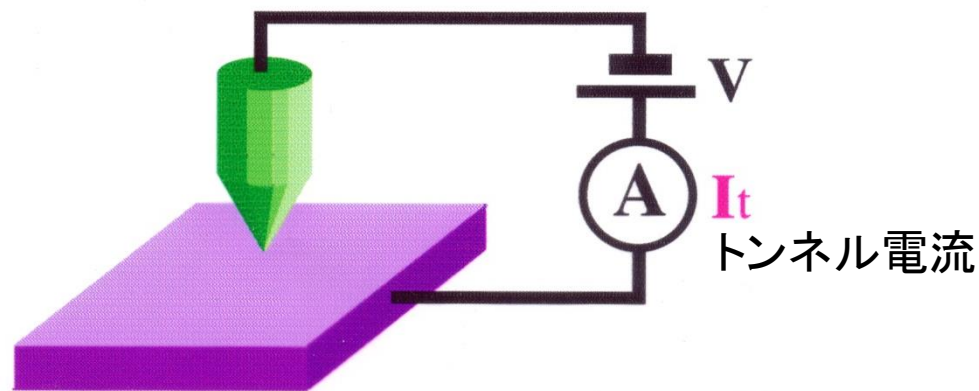
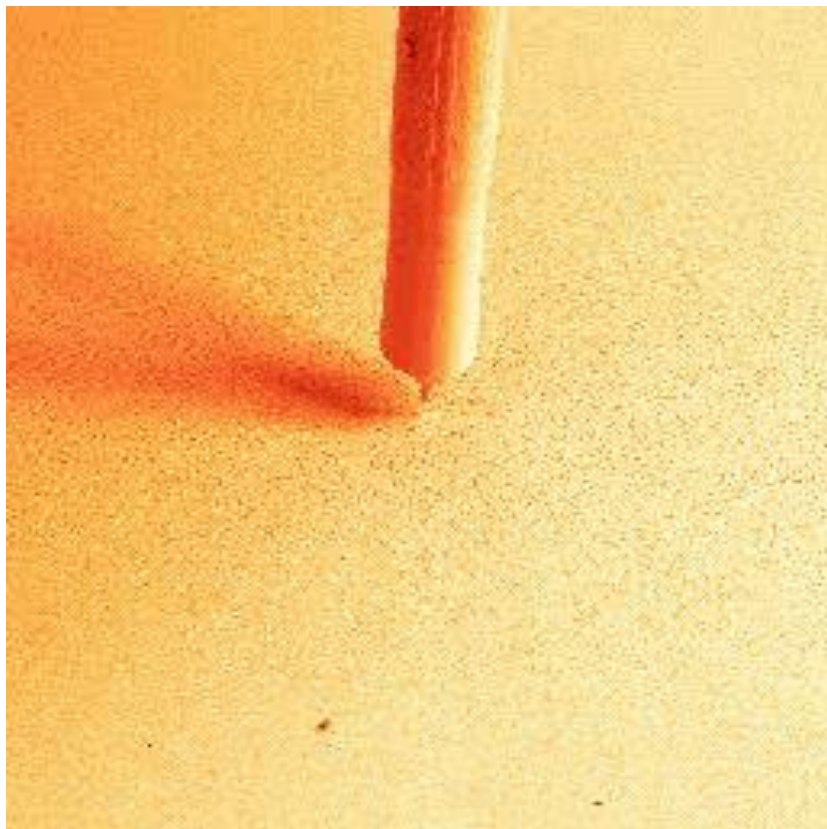
IBM, Zurich

スイス

b. 1933

d. 2013

走査トンネル顕微鏡 Scanning Tunneling Microscope STM



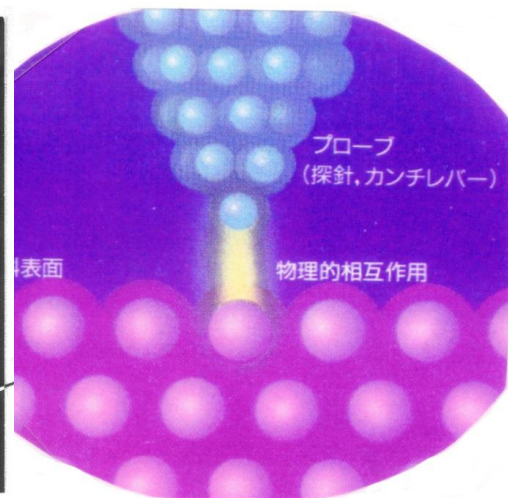
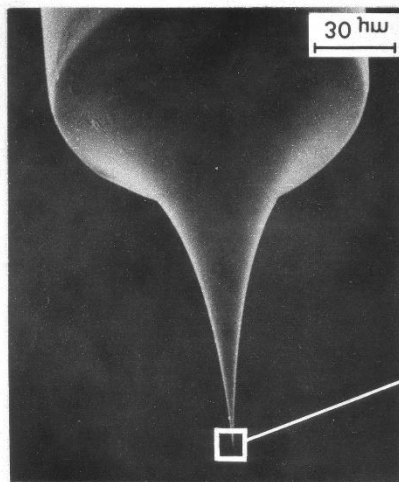
(トンネル電流)

$$\propto (\text{電子密度}) \cdot e^{-\kappa \cdot (\text{間隔})}$$

SEM像(走査電子顕微鏡)

By courtesy of Dr. Bert Voigtländer
(Jülich, Germany)

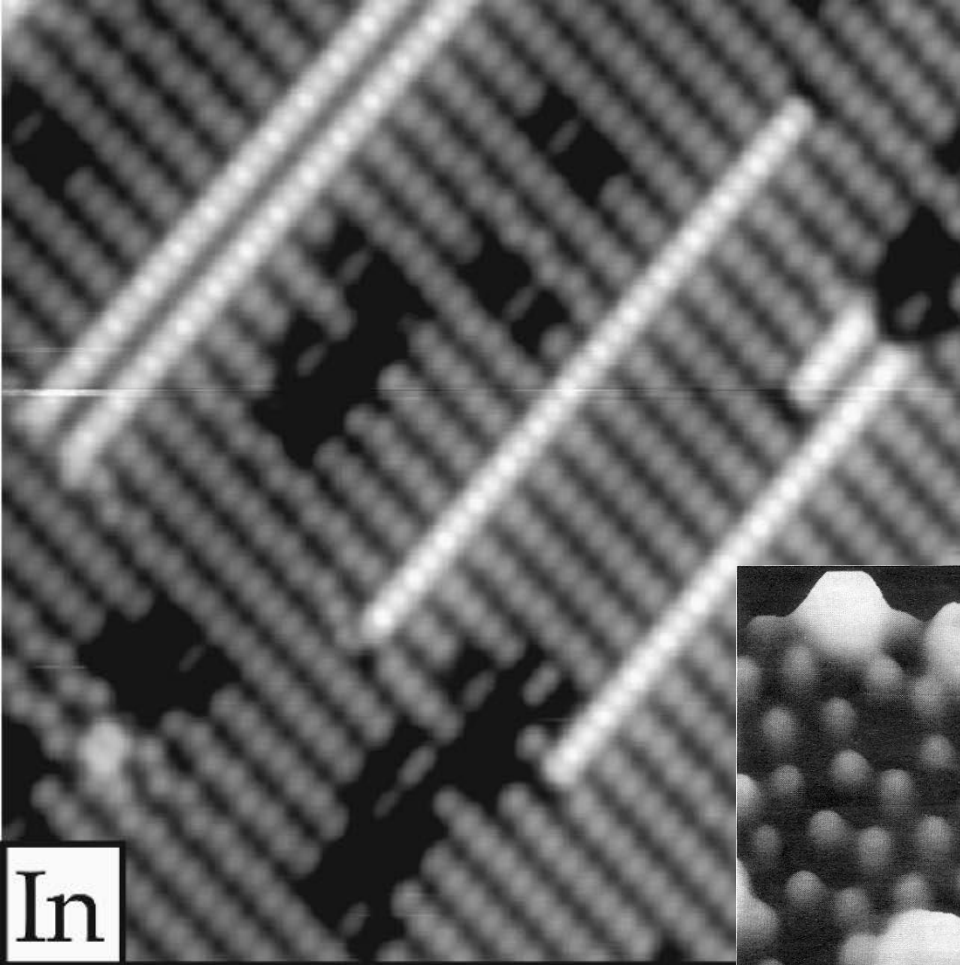
針を試料表面から1 nm程度の距離を保つように針を上げ下げして横方向に走査しながらトンネル電流を測定する。



STM像いろいろ

Ag原子数個のクラスター / Si(111)
電子雲が見える

St. Tosch, H. Neddermeyer, PRL **61**, 349 (1988)

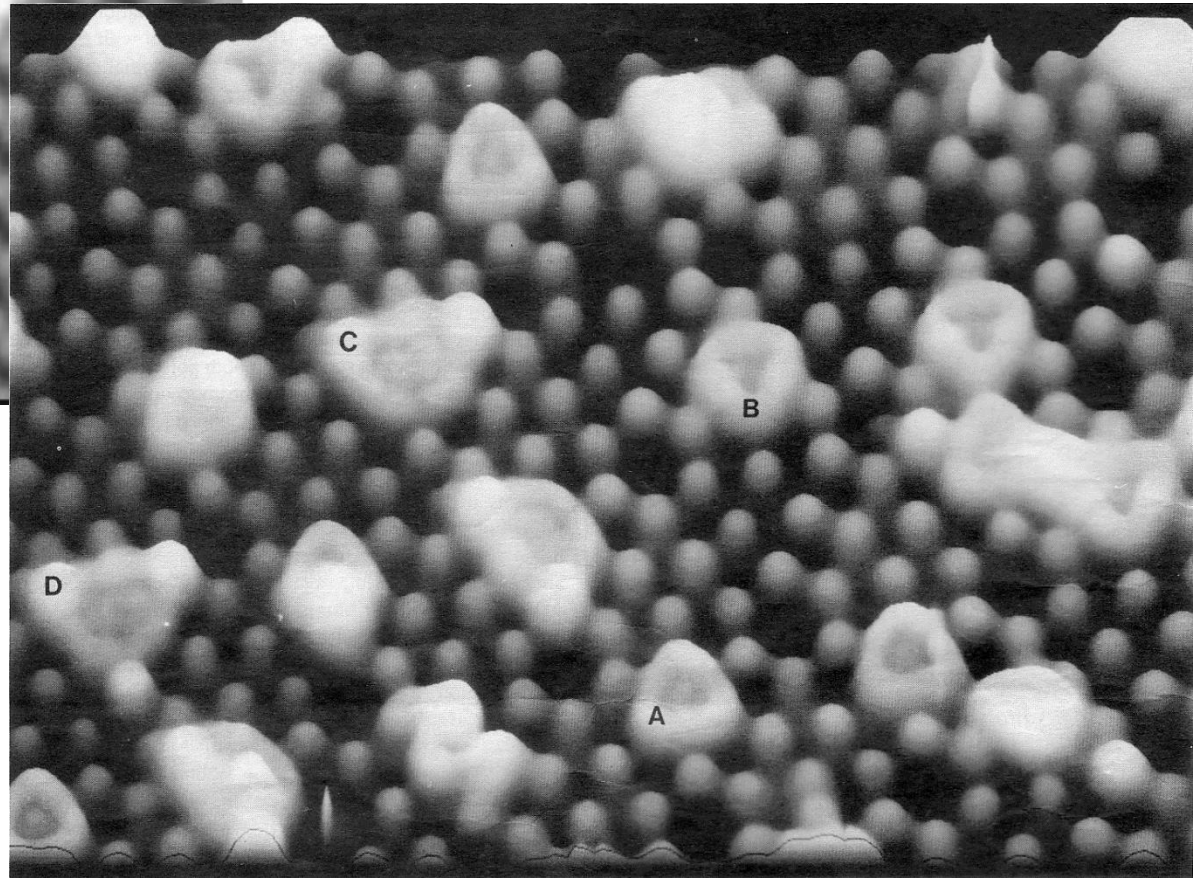


In

M.M.R. Evans, J. Nogami,
PRB **59**, 7644 (1998)

In 単原子鎖 / Si(001)

個々の原子が見える



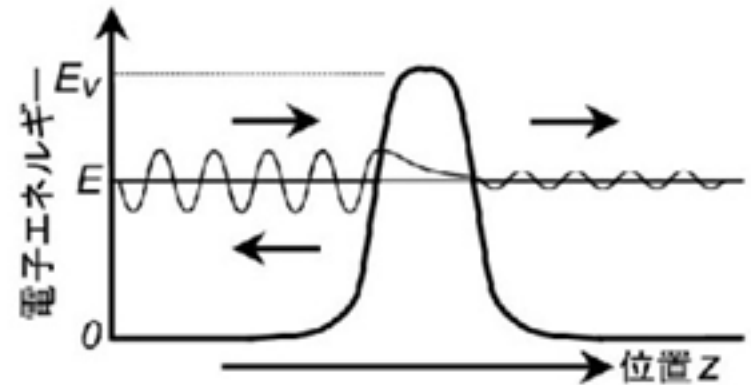
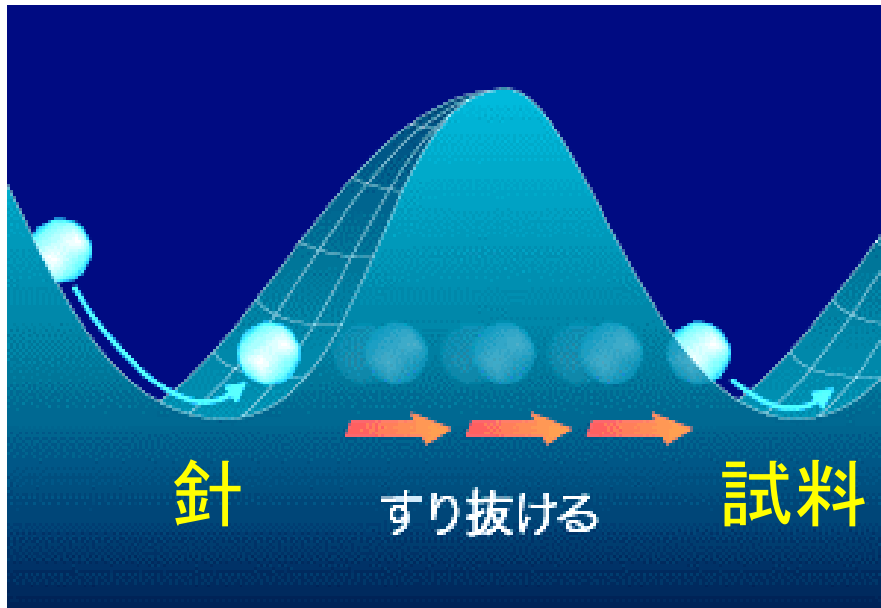


2002年 Rohrer博士の訪問

トンネル効果 ← 電子の波動性

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。

- 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



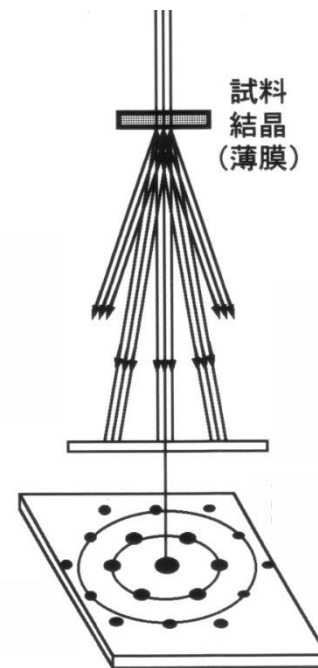
de Broglie が予言した電子の波動性を実証

The Nobel Prize in Physics 1937

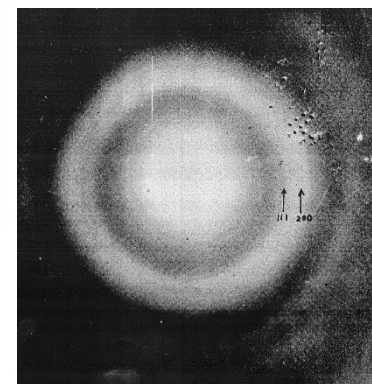
”for their experimental discovery of the diffraction of electrons by crystals”

結晶による電子の回折の実験的発見

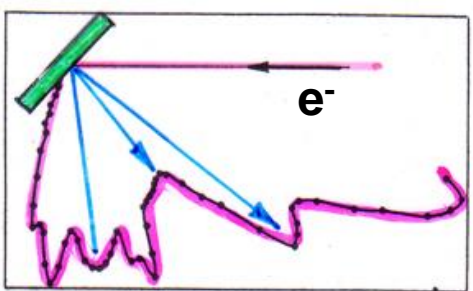
ノーベル財団のHPから



透過型電子回折

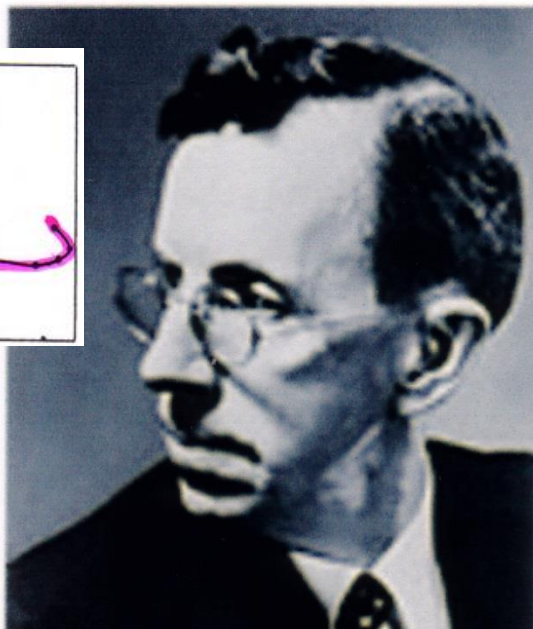


多結晶Au 薄膜の電子回折パターン (デバイリングパターン)



Ni 結晶のLEED

反射型電子回折



C. Davisson, L.H. Germer;
Phys. Rev. **30**, 705 (1927)

Clinton Joseph Davisson
USA
Bell Telephone Laboratories



G. P. Thomson : Proc. Roy.
Soc. Ser. A., **117** 600 (1928).

George Paget Thomson
Great Britain
London University

電子の波動性

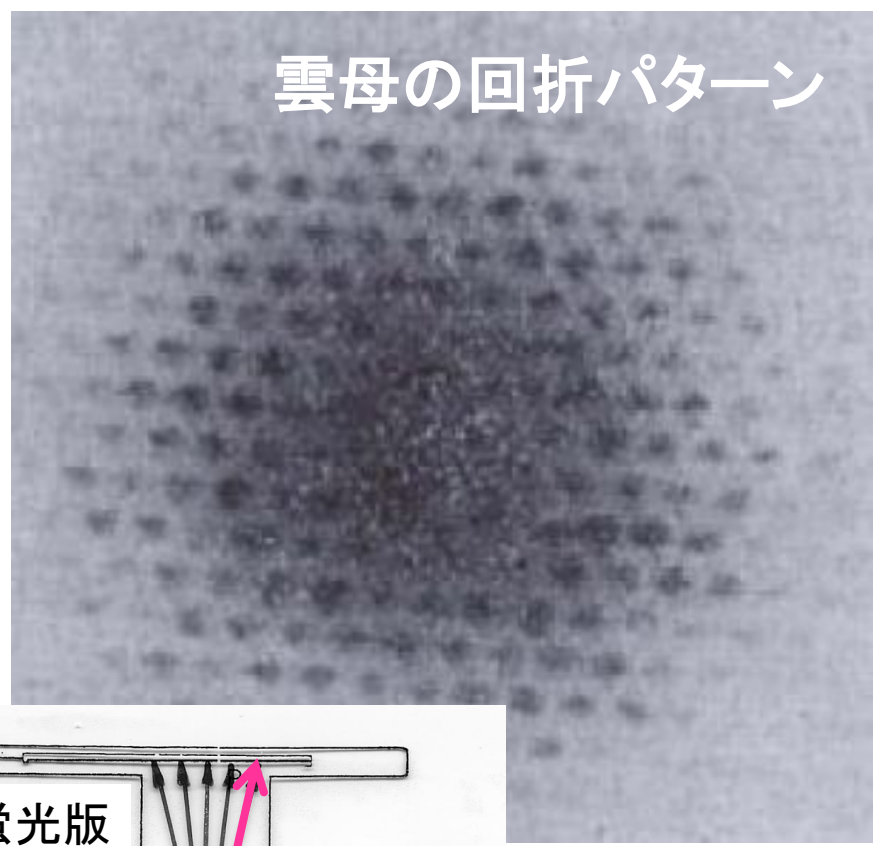
菊池正士(理研)の電子線回折の実験(1928)

Proceedings of the Imperial Academy 4(6),
271-274 (1928),
“Diffraction of Cathode Rays by Mica”

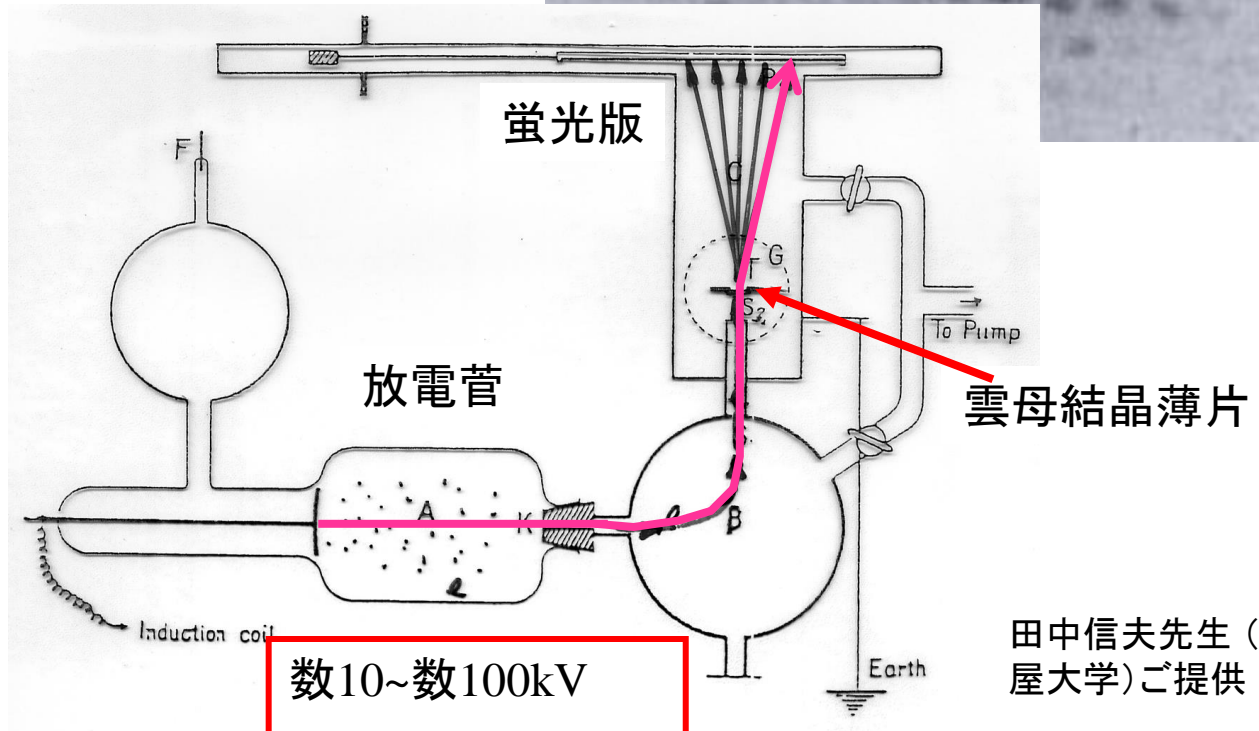


<https://www.findagrave.com/memorial/210386464/seishi-kikuchi>

X線回折パターンと
同じブラッグ点



雲母の回折パターン

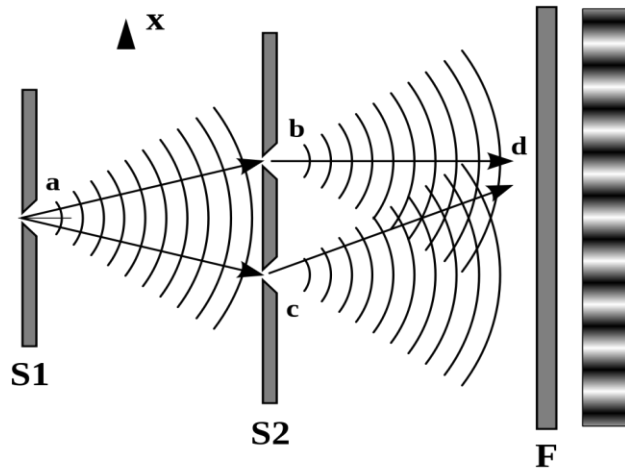
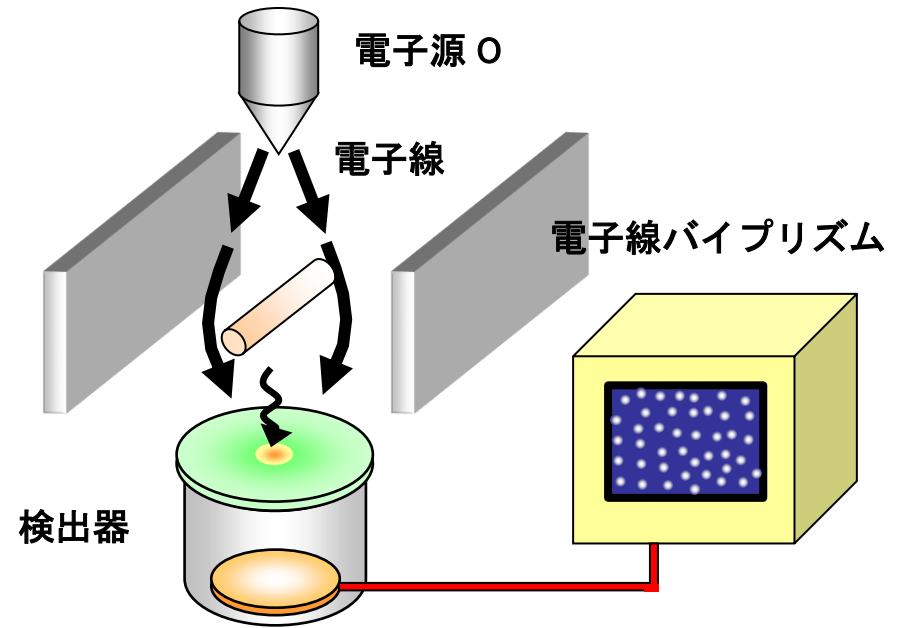
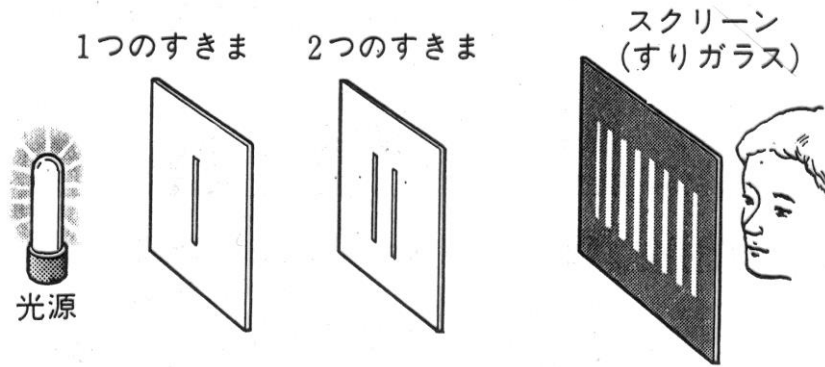


数10~数100kV

田中信夫先生(名古屋大学)ご提供

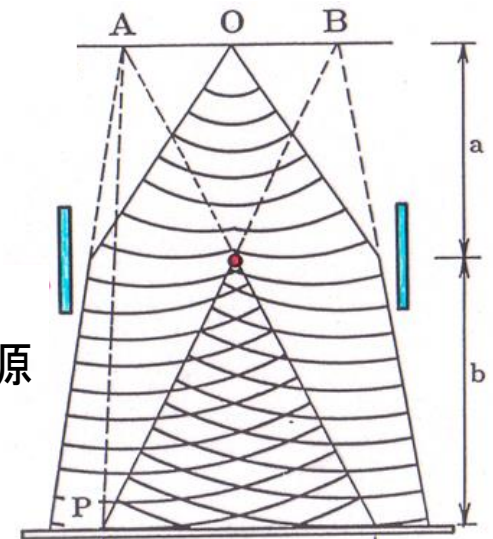
電子波によるヤングの干渉実験（二重スリット実験）

光によるヤングの干渉実験



Wikidedia より

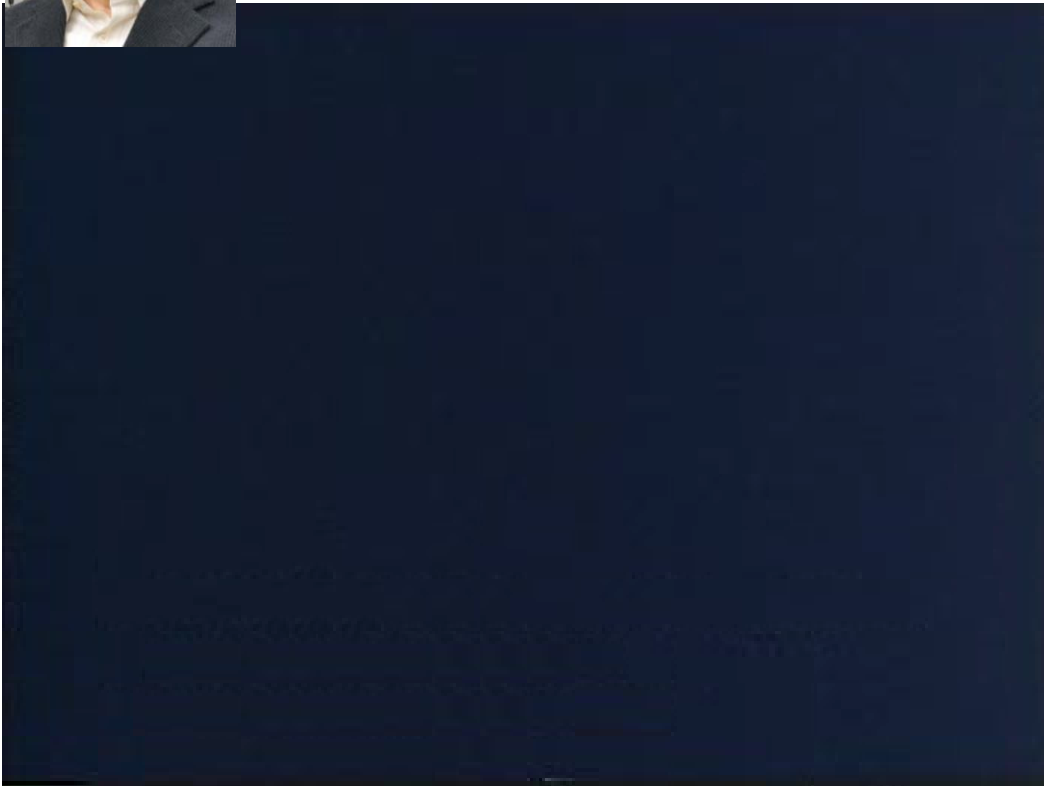
電子源Oから出た電子波は広がってバイプリズムの右と左側を通過し、曲げられて重なる。あたかも仮想電子源AとBから出た波が重なるように。





外村彰

『世界でもっとも美しい10の科学実験』

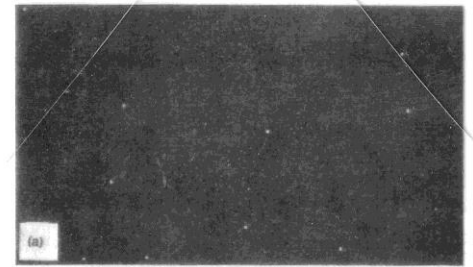


<https://www.hitachi.co.jp/rd/research/materials/quantum/movie/index.html>

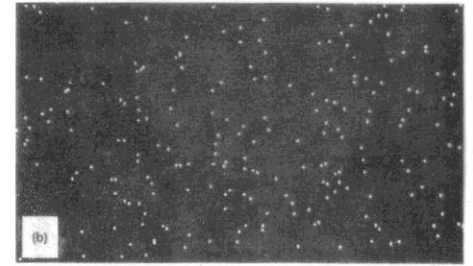
A. Tonomura, *et al.*, *Am J. Phys.* **57**, 117-120 (1989).

到達した
電子総数

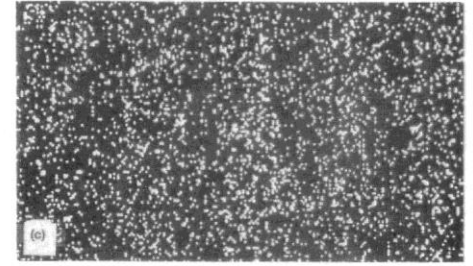
10



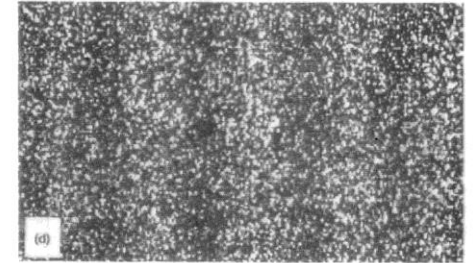
100



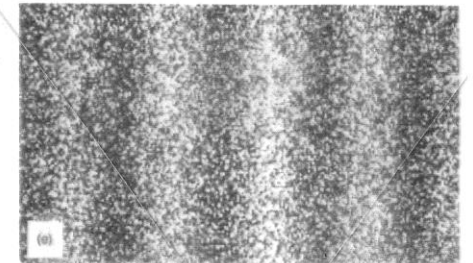
3000



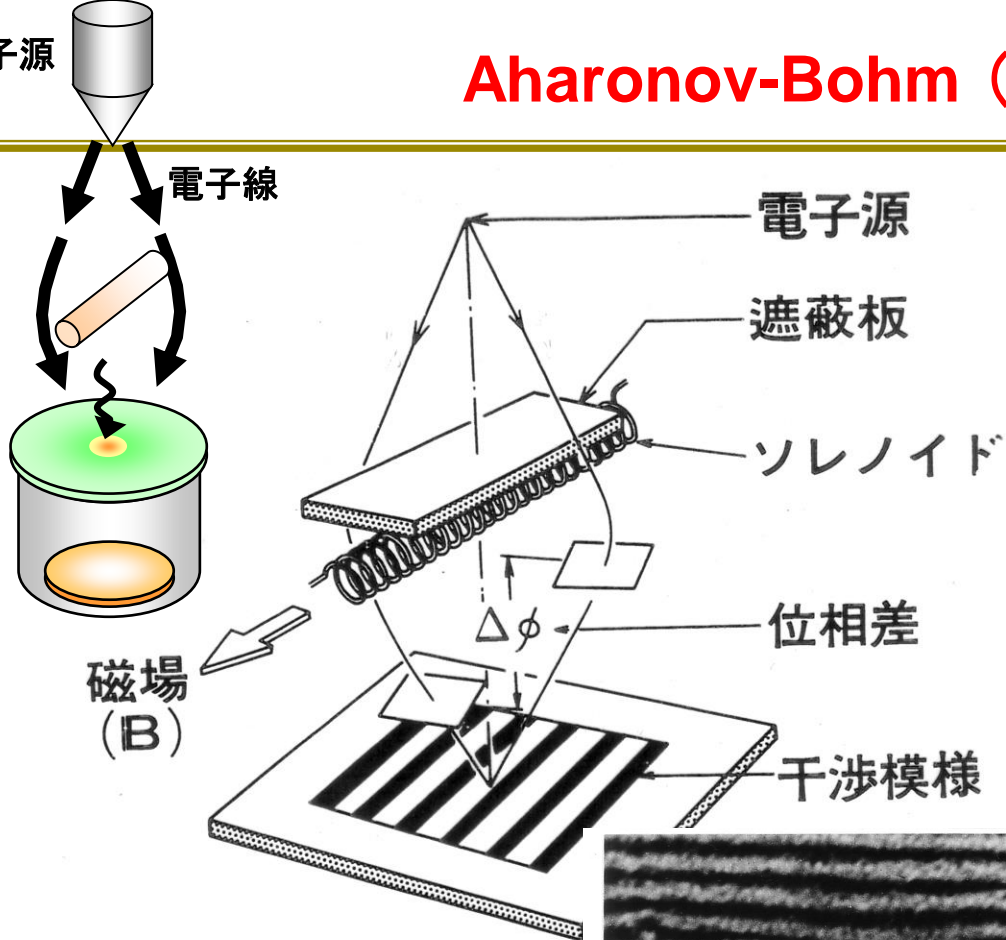
20000



70000



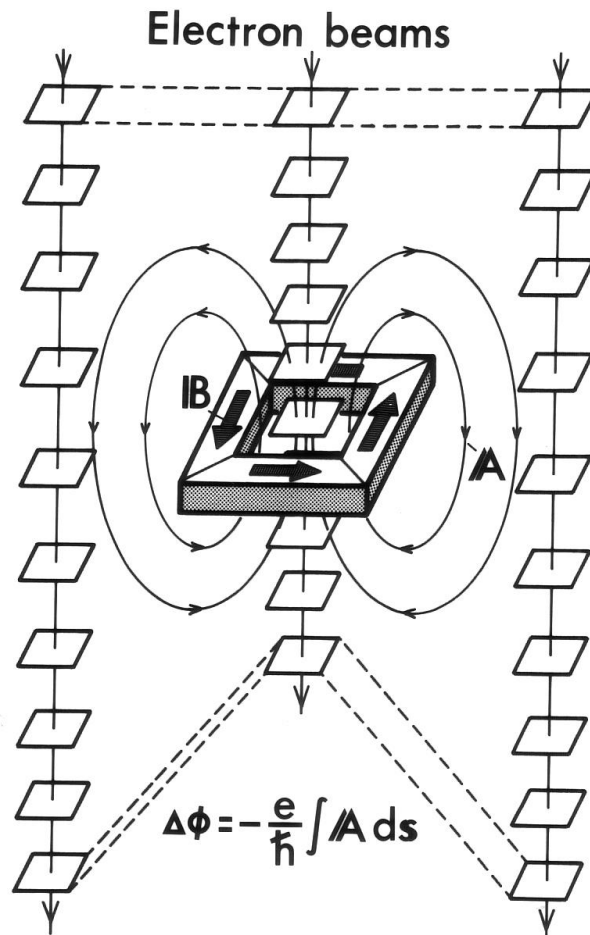
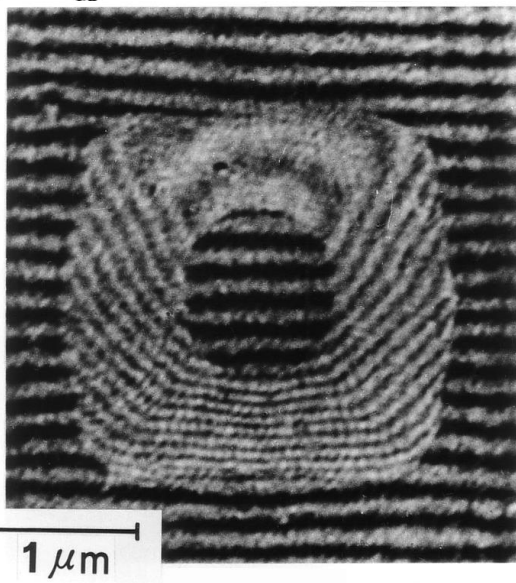
Aharonov-Bohm (AB) 効果の実証実験その1



ベクトル・ポテンシャルによる
電子波の位相のずれ

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{e}{h} \int_{\text{軌道}} \vec{A} \cdot d\vec{r}$$

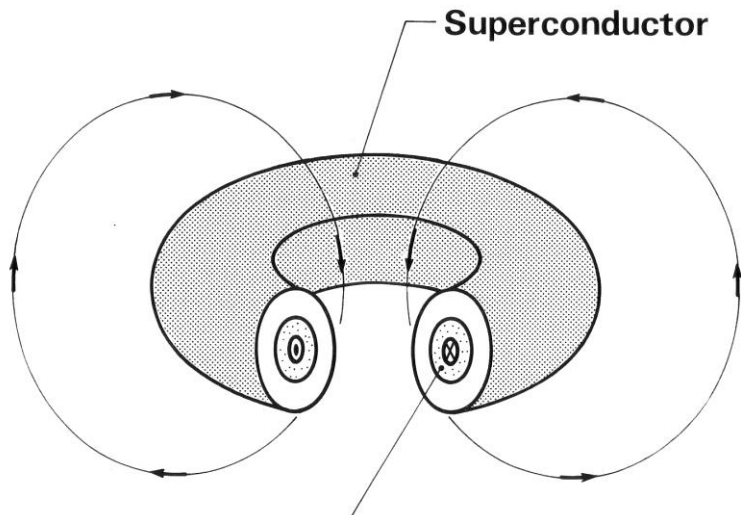
AB位相



Phase Shift of Electron Beams

外村 彰 (日立), et al
Physical Review Letters
48, 1443 (1982)

Aharonov-Bohm (AB) 効果の決定的な実証実験



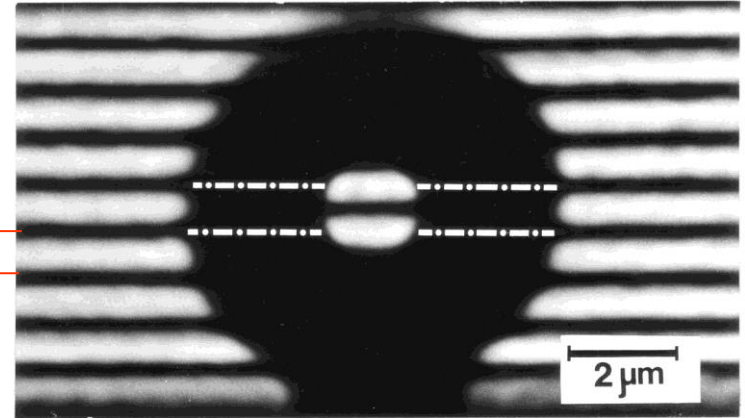
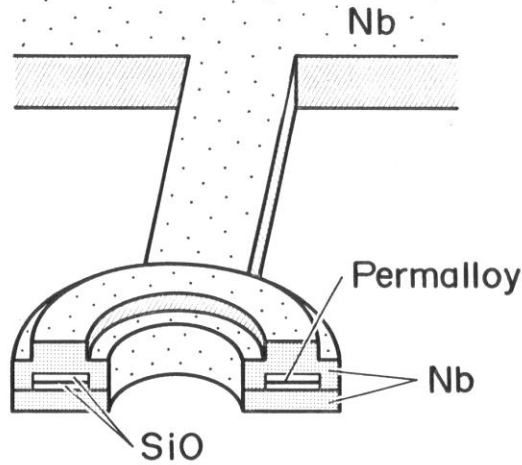
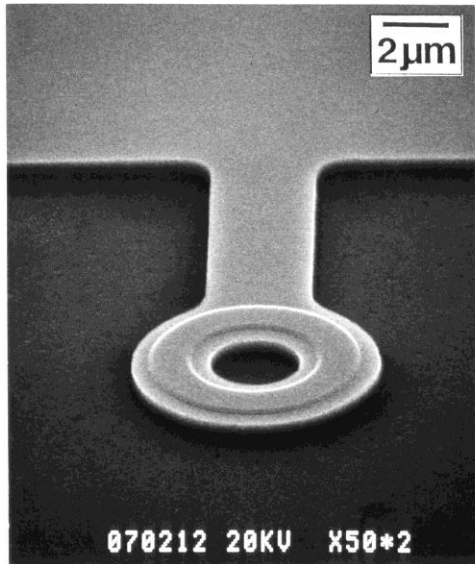
外村 彰 (日立) et al, Phys. Rev. Lett. **56**, 792 (1986)

Vector potential \vec{A}

↑
位相差 = 2π

Magnetic field

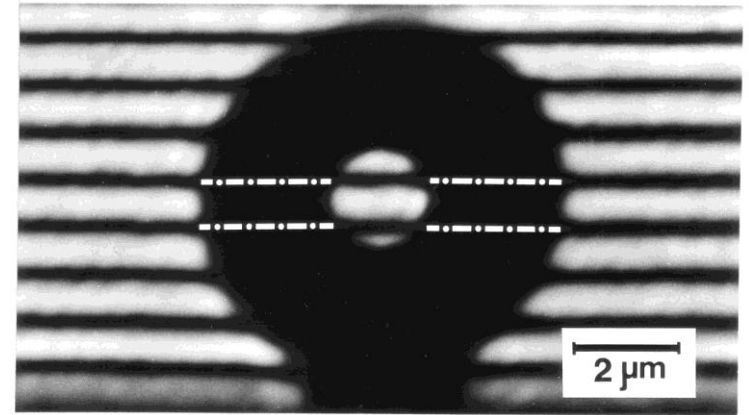
$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{e}{h} \int_{\text{軌道}} \vec{A} \cdot d\vec{r}$$



Electron Phase Distribution

磁束 = $h/2e$ の奇数倍

→ 位相差 = 2π の半奇数倍



Electron Phase Distribution

磁束 = $h/2e$ の偶数倍

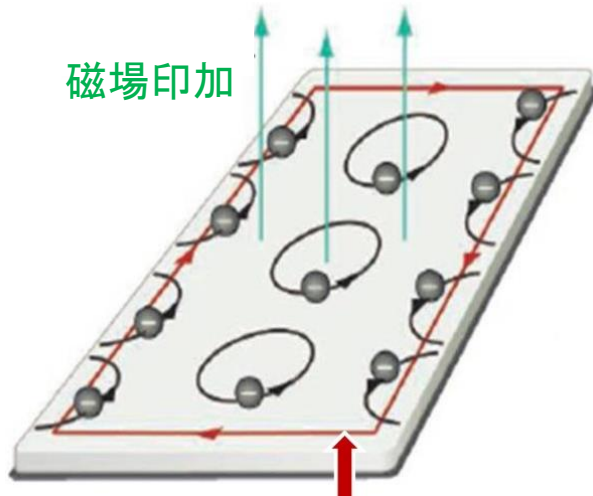
→ 位相差 = 2π の整数倍

ベクトルポテンシャル A は
実験で検出できる観測可能量 $\vec{B} = \text{rot } \vec{A}$

電子波の幾何学的位相：AB位相とベリー位相

量子ホール効果

2次元電子系
GaAs/AlGaAs, MOS-FET

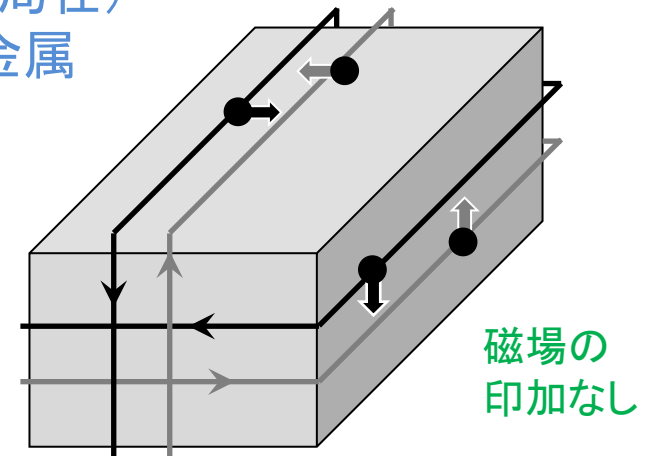


内部は絶縁体(局在)
エッジ・表面は金属

- リアル磁場によるベクトルポテンシャル
- ⇒ AB位相(幾何学的位相)
- ⇒ 実空間に曲率
- ⇒ トポロジカルに非自明

トポロジカル絶縁体

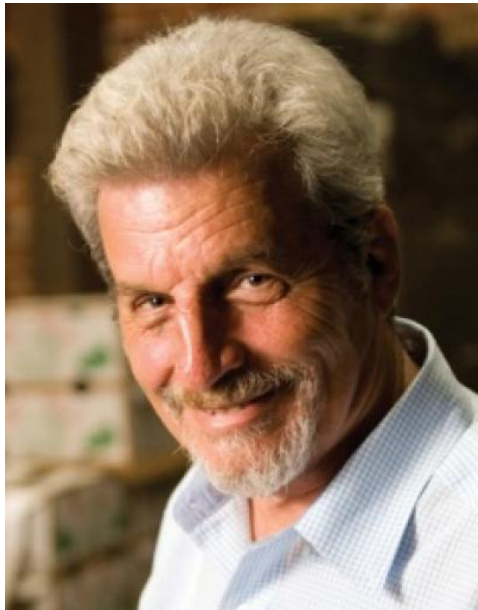
Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , ...



物質中の電子だけが感じる磁場

- 仮想磁場による”ベクトルポテンシャル”
- ⇒ Berry位相(幾何学的位相)
- ⇒ 運動量空間(バンド)に曲率
- ⇒ トポロジカルに非自明

幾何学的位相の発見



<https://www.eurekalert.org/multimedia/720746>

Yakir Aharonov
Tel Aviv University, Israel

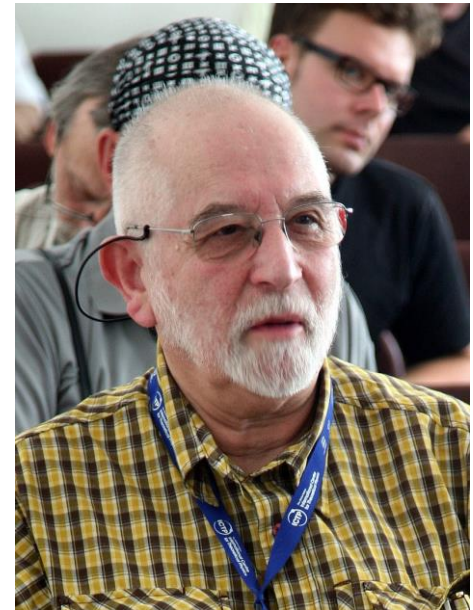
b. 1932



Nature **486**, 324 (2012)

Akira Tonomura
Hitachi, Ltd., Japan

b. 1942
d. 2012



Wikipedia より

Sir Michael Victor Berry
University of Bristol, UK

b. 1941

まとめ — 物性物理学 —

物質のなかのマイクロ宇宙の奥深い謎

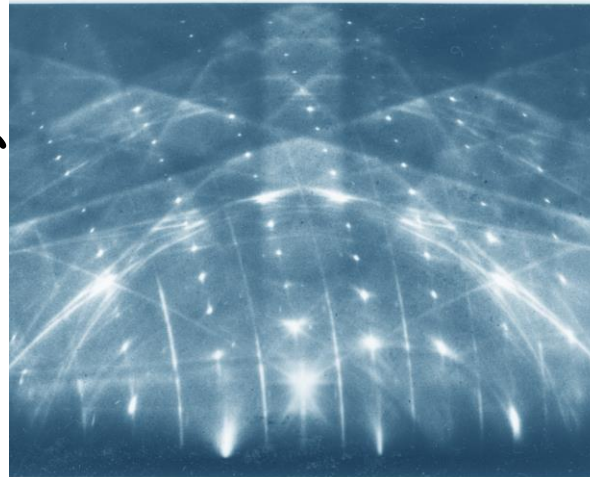
半導体、超伝導、磁石、トポロジカル物質、…

世の中を変える革新的な技術にもつながる

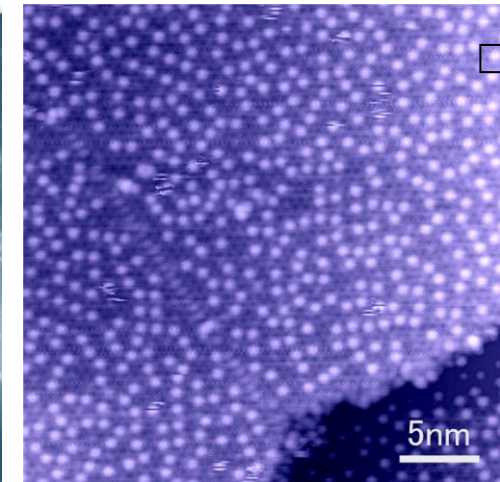
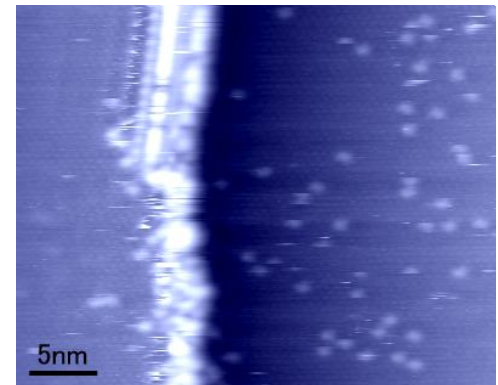
エレクトロニクス、
オプトエレクトロニクス、
スピントロニクス、…

Energy harvesting
Energy saving …

Si 結晶表面からの電子回折



Si 結晶表面上を動き回るCs原子



(長谷川研究室での成果)

ノーベル賞は(科学は)つながっている 「巨人の肩に立つ」