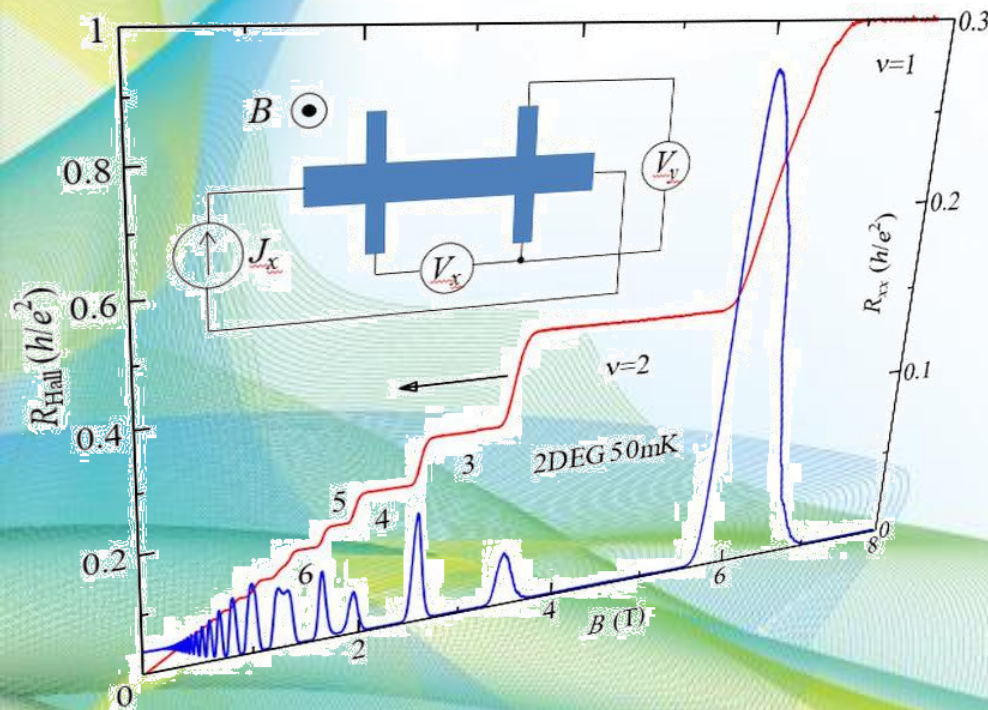


新単位系を支え，新単位系に 支えられる物性物理学



東京大学 物性研究所
ナノスケール物性研究部門

勝本信吾

「物性物理学」とは？

凝縮系（Condensed Matter）：多数の原子・分子が集合した系
気体・液体・固体

我々の問いかけ：

なぜ、これらの物質はこのような性質を持つのか？

・・・のような性質を持つ物質は存在しうるか？

これらを組み合わせて・・・のような系を作ると何が起きるか？

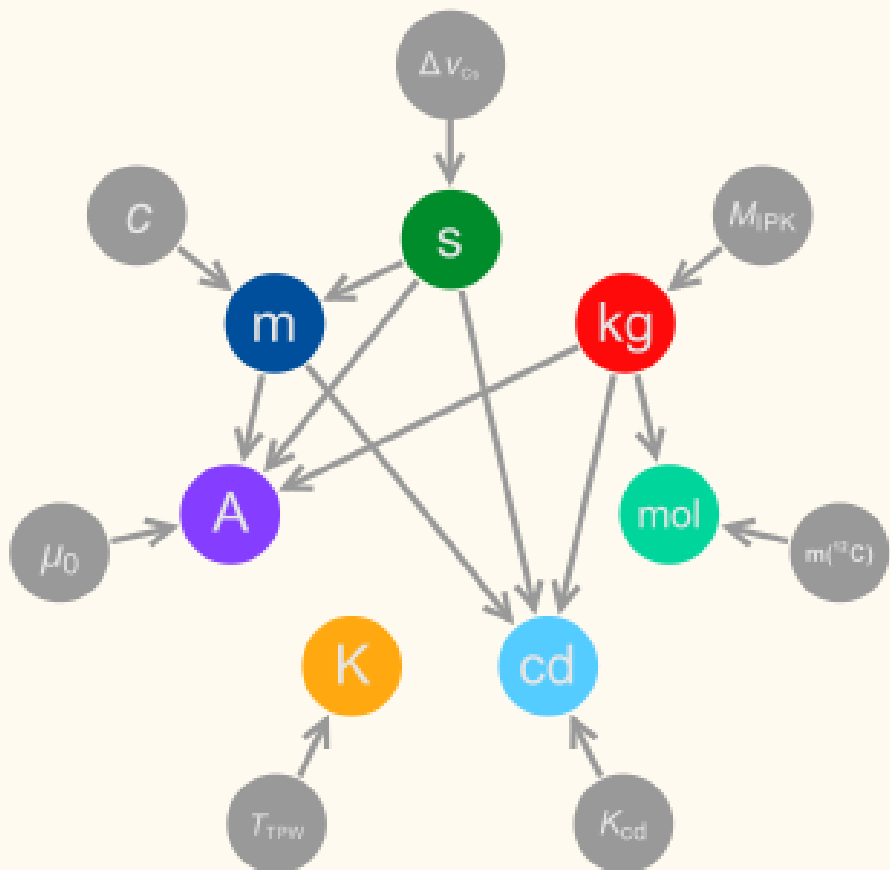
・
・

結局のところ **日常の物理学** である

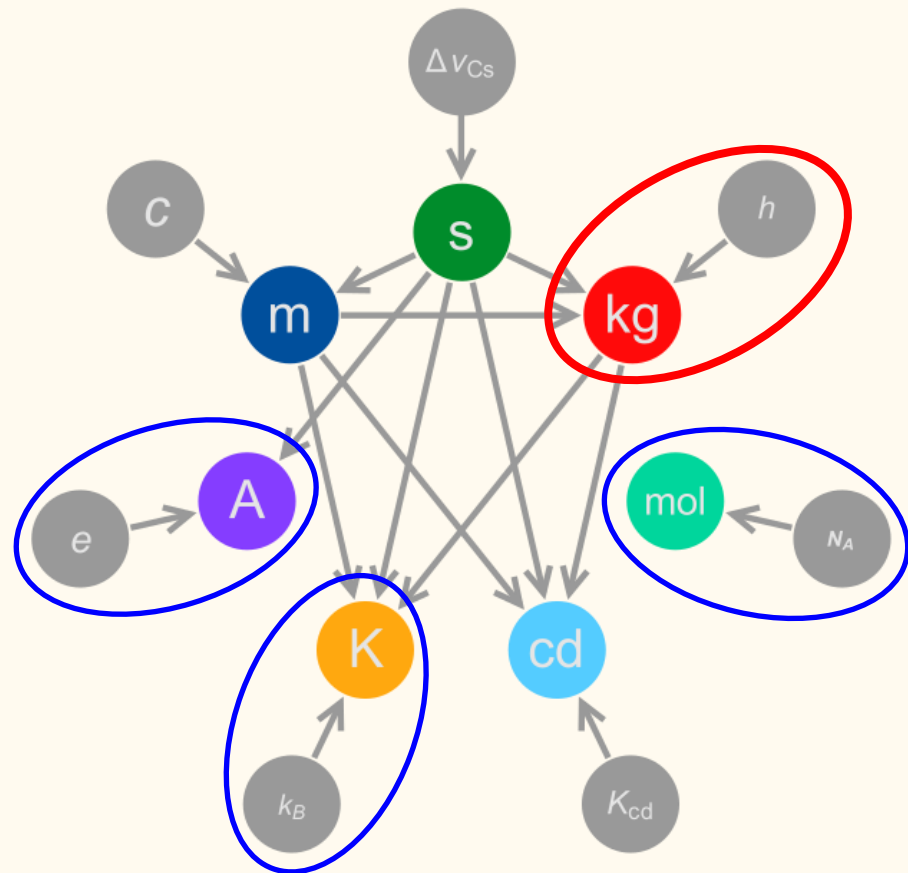
各物質の個性に大きく依存するこの分野の成果が一般的普遍的な基準を作る度量衡にどのように関係するのか？

新旧 SI 单位系

Old SI



New SI



1次温度計，電流計

1次温度計：気体温度計，単電子温度計，音響気体温度計，放射温度計，熱雑音(ジョンソン雑音)温度計

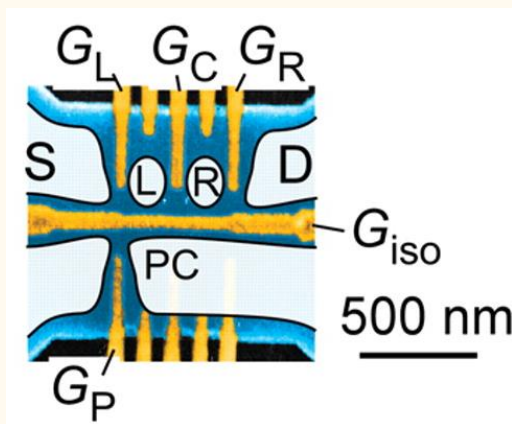
電圧雑音
パワースペクトル

$$\frac{\overline{v_{\text{noise}}^2}}{\Delta f} = 4k_B T R$$

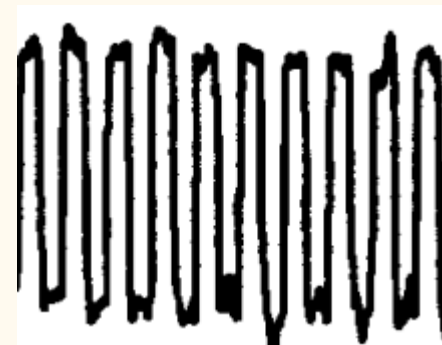
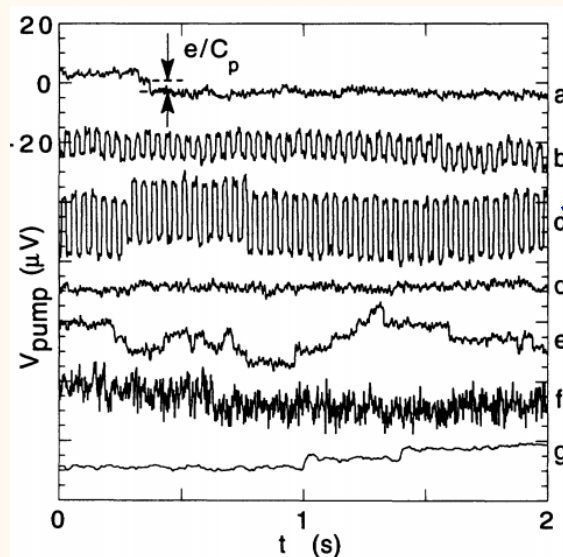
電気抵抗

水の3重点較正が不要になる

電流計：電子カウンタで構成できる



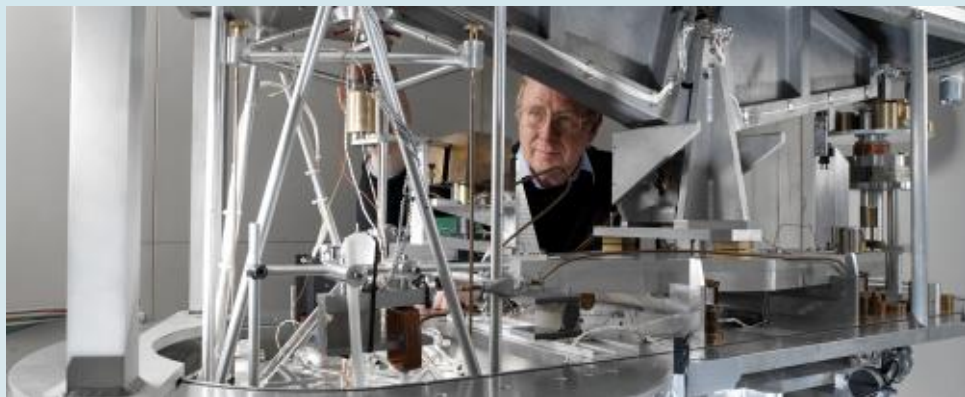
T. Fujisawa, et al.
Science **312**, 1634 (06).



電子をカウント
している様子

J. Martinis et al.,
PRL **72**, 904 (94).

単位系



キブル(Kibble) 天秤

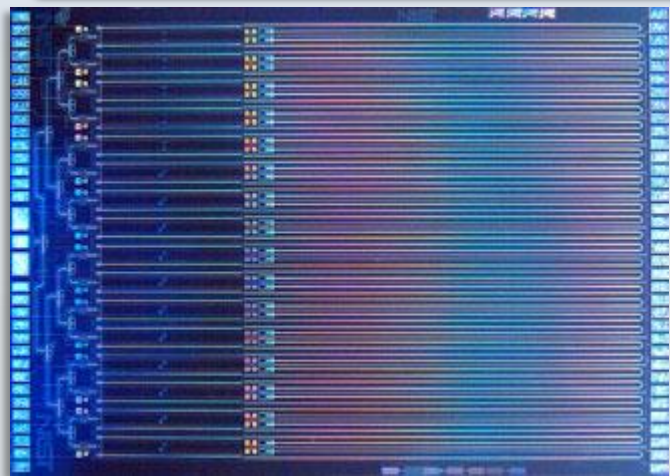
Dr. Ian Robinson

英国国立物理学研究所

<http://www.npl.co.uk/educate-explore/kibble-balance/>



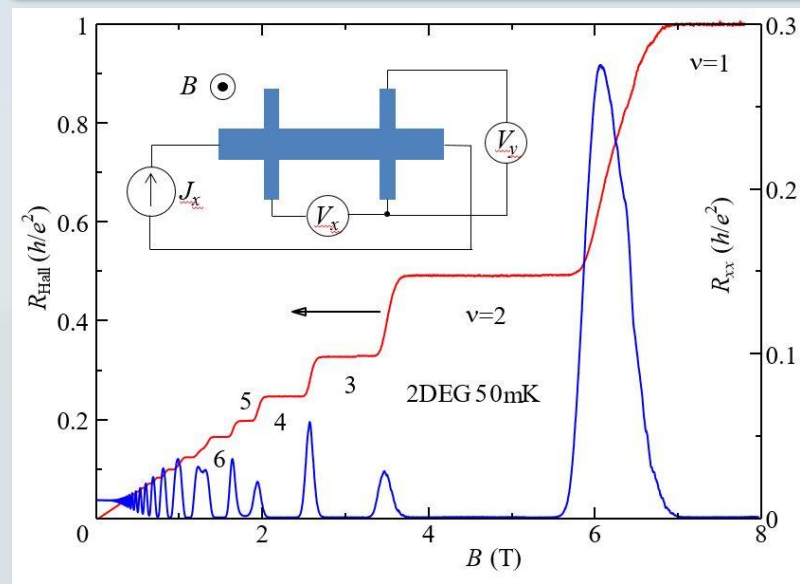
超伝導ジョセフソン効果



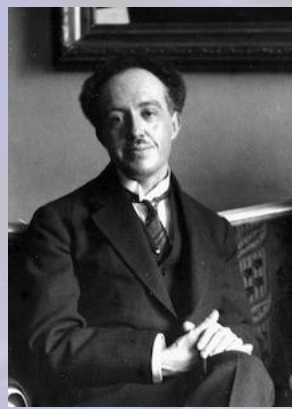
Programmable Josephson chip

<https://www.nist.gov/>

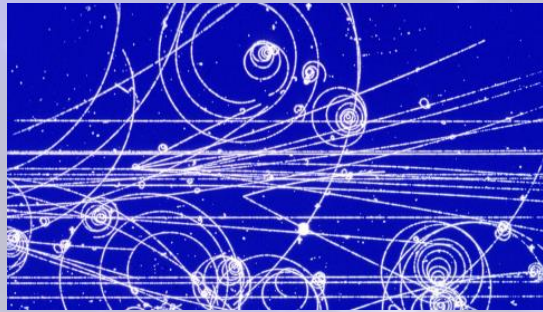
量子輸送, 量子ホール効果



Louis de Broglie



電子は波である



粒子

波



運動量

質量×速度

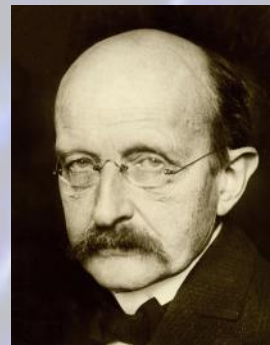
$$p = \frac{h}{\lambda}$$

波長の逆数
(波数)

運動エネルギー

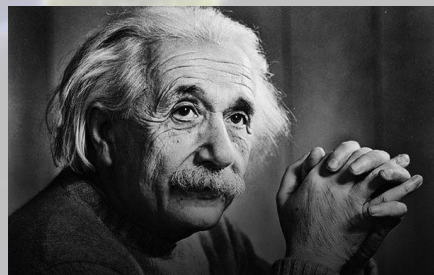
$$E = hf$$

周波数



Max Planck

光は粒である

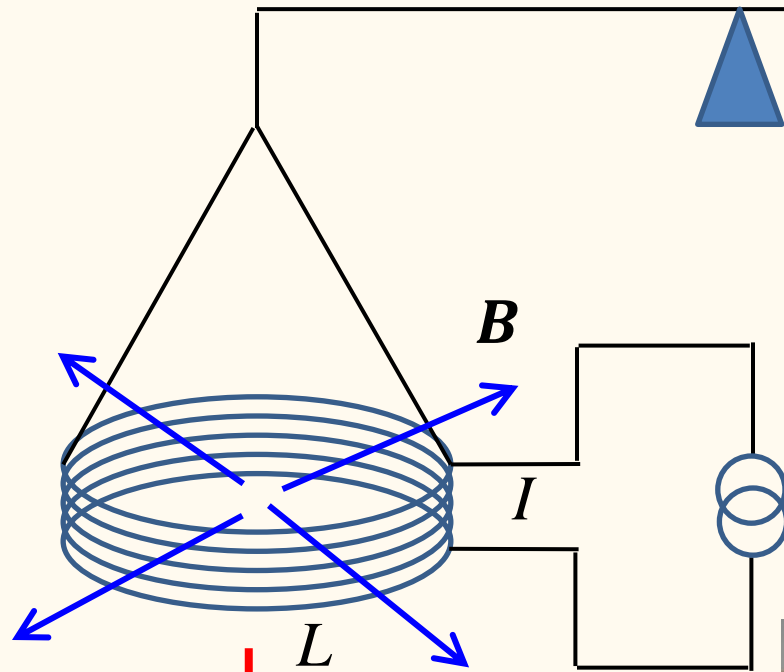


Albert Einstein

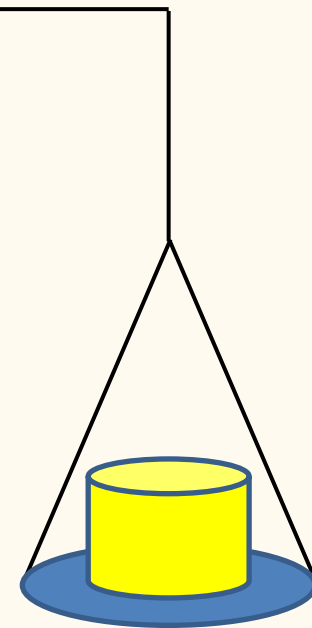
キブル (Kibble, watt) 天秤



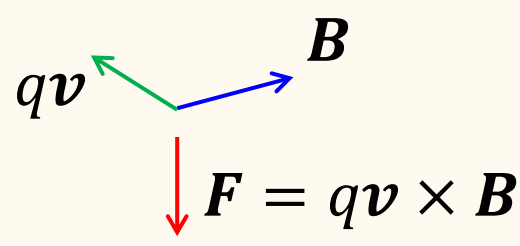
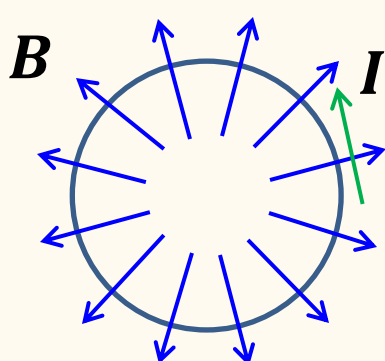
Bryan Kibble



$F_{el} = ILB$



$F_m = mg$

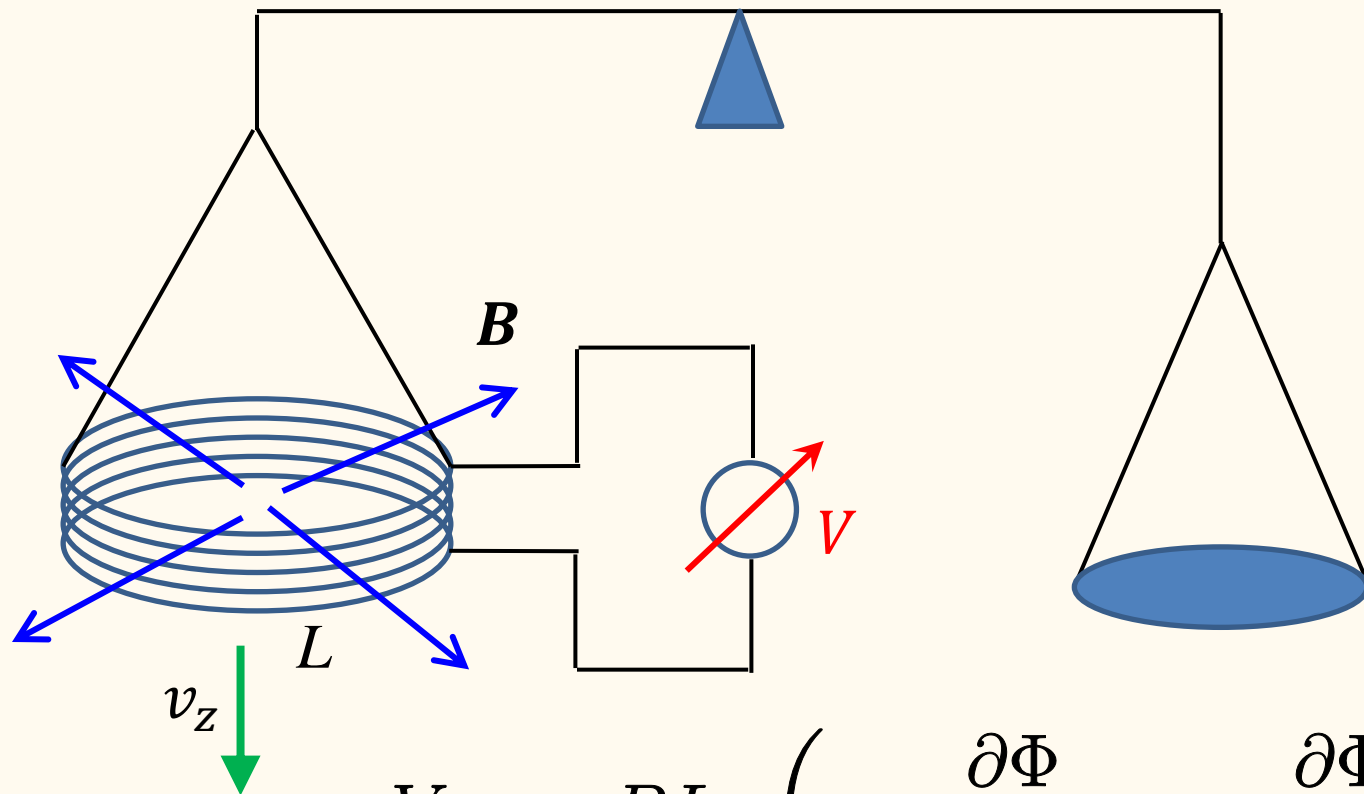


$ILB = mg$
電磁気力 重力

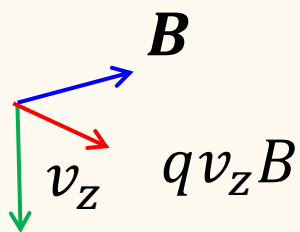
キブル (Kibble, watt) 天秤



Bryan Kibble



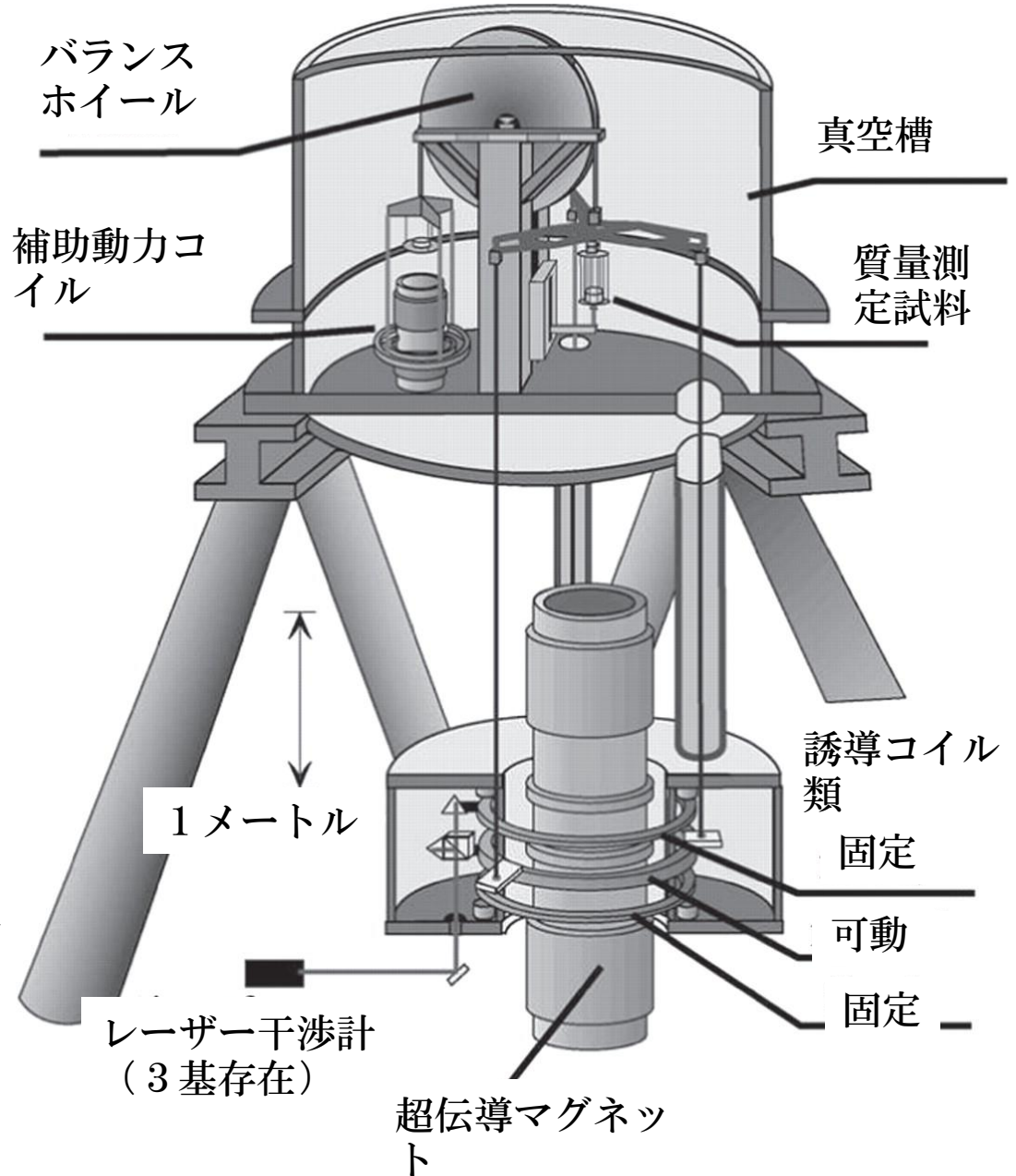
$$V = v_z B L \quad \left(= -\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -v_z \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)$$



$$m = \frac{IV}{g v_z}$$

電力：ワット天秤

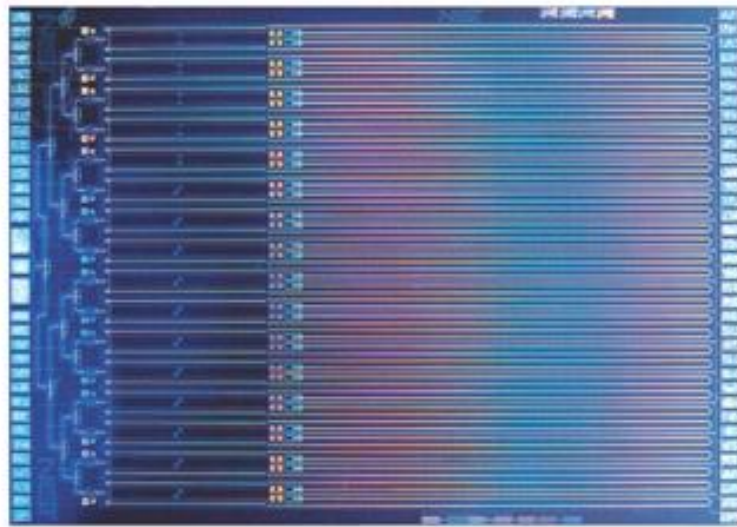
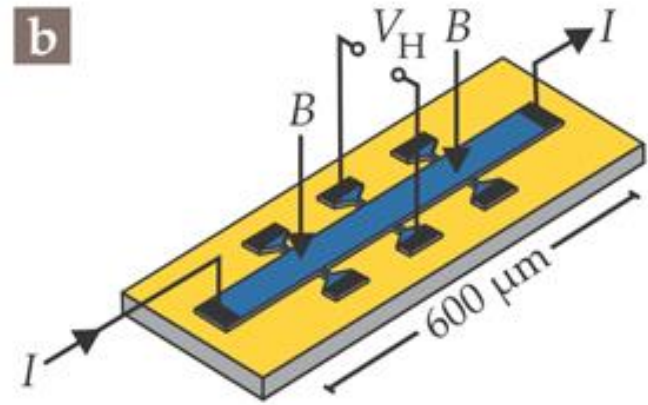
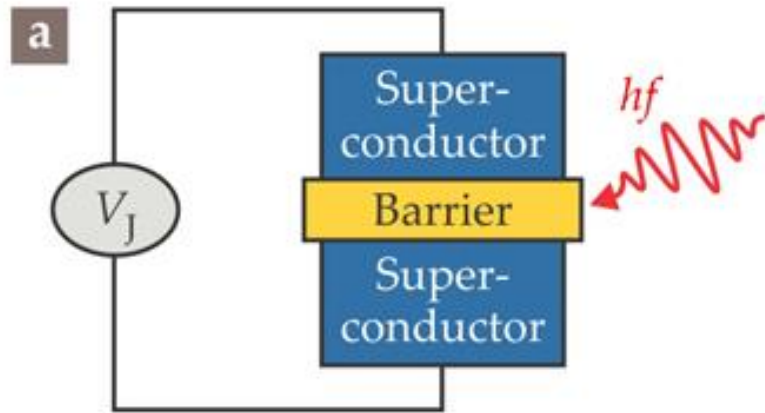
Kibble (watt) 天秤



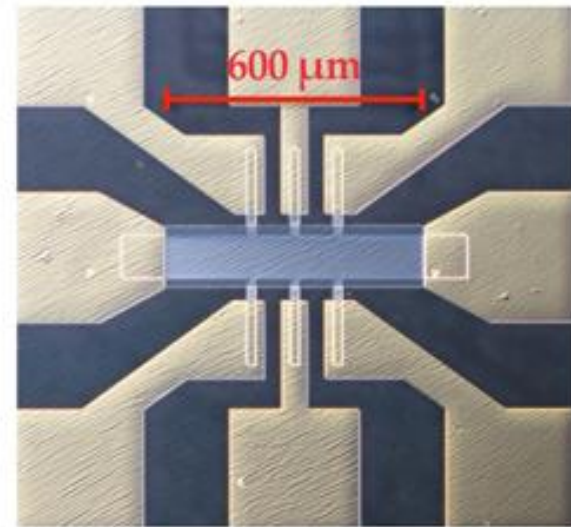
NIST (米国立標準研究所)
のKibble天秤

www.nist.gov

電力標準のための2つの量子デバイス



超伝導ジョセフソン素子
17 mm×12 mm
約 27万個



量子ホール素子
グラフェン
SiC 1900°C でSiを蒸発

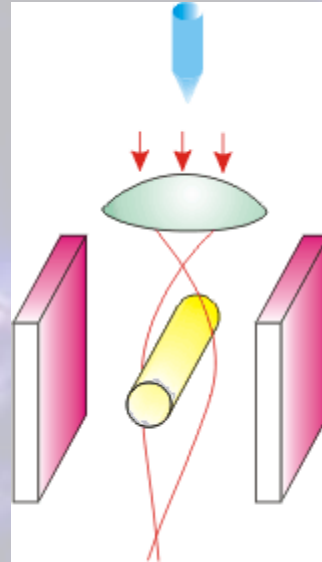
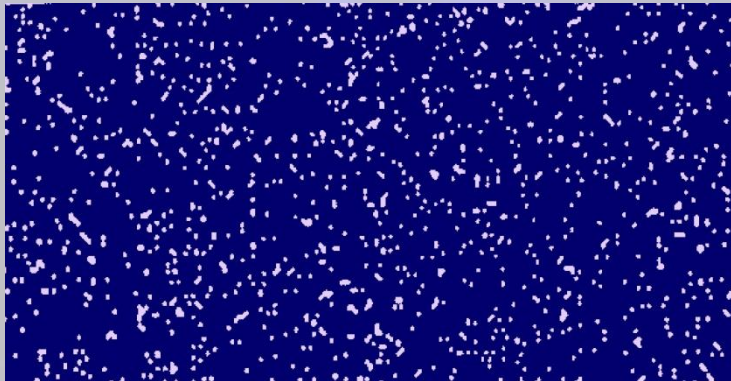
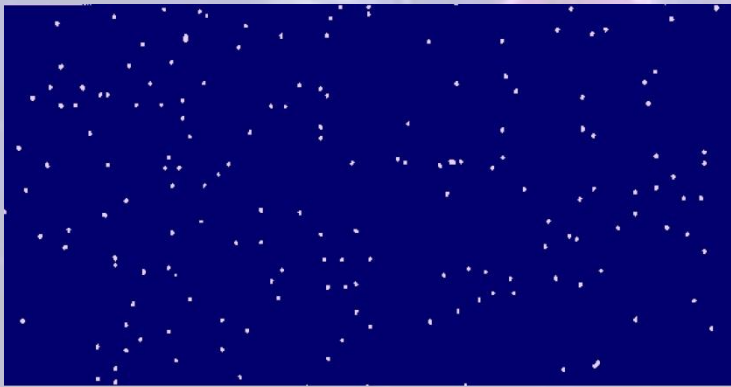
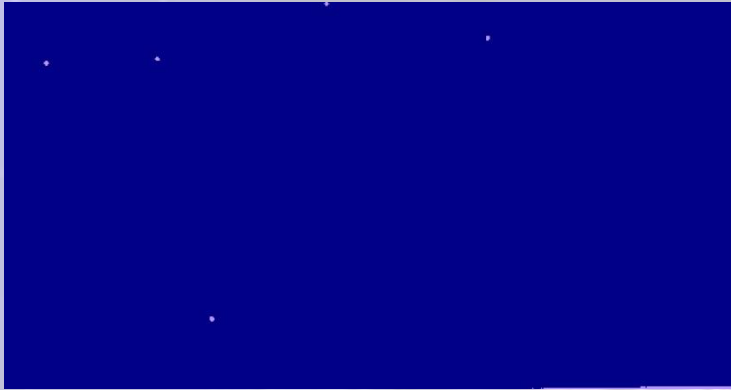
普遍的量子輸送現象

交流Josephson效果： $2eV = hf$ f : 周波数

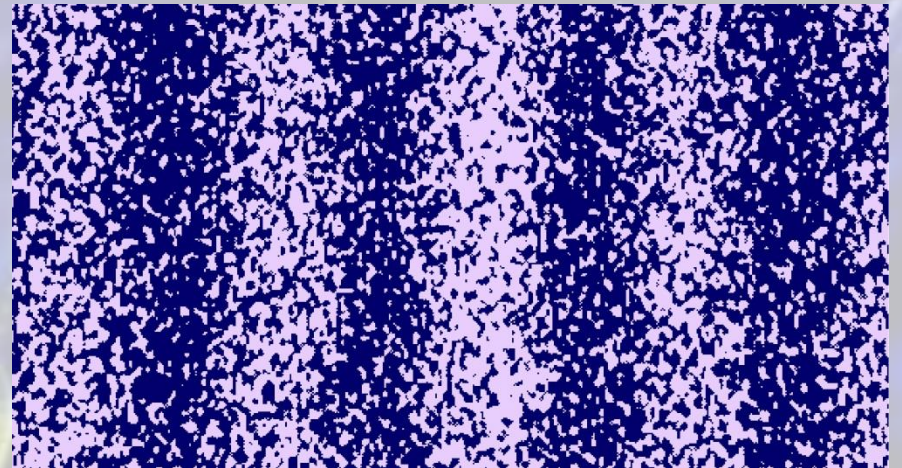
量子Hall效果（量子化伝導度）： $\frac{I}{V} = \frac{e^2}{h}$

$$m = \frac{IV}{gv_z} = h \frac{f^2}{4gv_z}$$

電子はどのような意味で「波」か？



外村 彰



確率の波，確率振幅

何故物性物理学が度量衡に使われるのか？

物理学原理に立脚した単位系：量子力学的な現象を基礎とする

量子力学的な現象の測定： 量子ゆらぎが存在

金属中の電子密度 $\sim 10^{23}$ 個/cc

1 mAの電流で1秒間に流れる電子数 $\sim 10^{16}$ 個

(理由その1) 短時間に超多数回の測定ができる

電磁氣的測定：運動しているのは、普遍的統一的性質を持つ電子，光子



(理由その2) 固体中にも普遍的な物理現象がある

超伝導 ジョセフソン効果

<https://www.nobelprize.org/>

The Nobel Prize in Physics 1973



Photo from the Nobel Foundation archive.

Leo Esaki

Prize share: 1/4



Photo from the Nobel Foundation archive.

Ivar Giaever

Prize share: 1/4



Photo from the Nobel Foundation archive.

Brian David Josephson

The Nobel Prize in Physics 1972



Photo from the Nobel Foundation archive.

John Bardeen

Prize share: 1/3



Photo from the Nobel Foundation archive.

Leon Neil Cooper

Prize share: 1/3



Photo from the Nobel Foundation archive.

John Robert Schrieffer

The Nobel Prize in Physics 2003



Photo from the Nobel Foundation archive.

Alexei A. Abrikosov

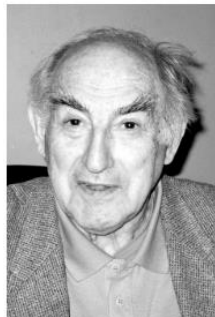


Photo from the Nobel Foundation archive.

Vitaly L. Ginzburg



Photo from the Nobel Foundation archive.

Anthony J. Leggett

The Nobel Prize in Physics 1987



Photo from the Nobel Foundation archive.

J. Georg Bednorz



Photo from the Nobel Foundation archive.

K. Alexander Müller

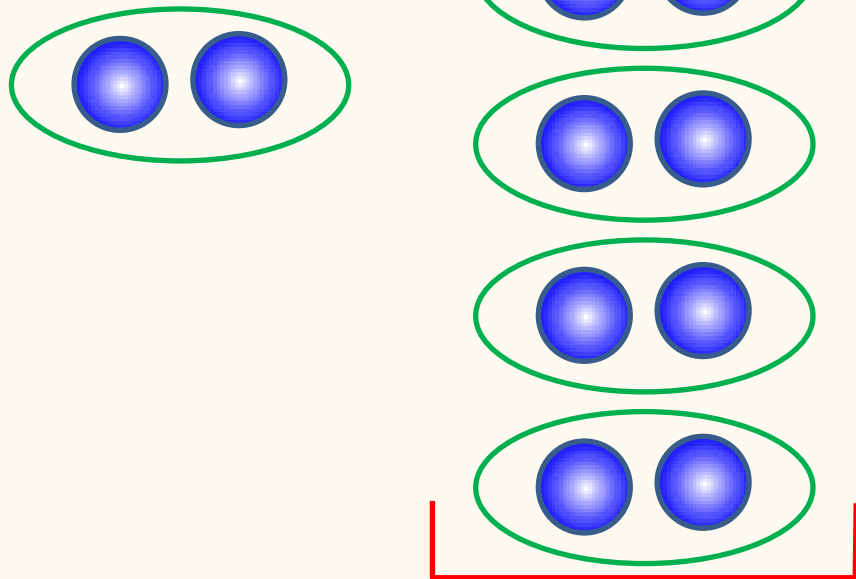
超伝導とはどのような状態か？

電子：フェルミ粒子



1つの状態に1個だけ収容できる

クーパー対

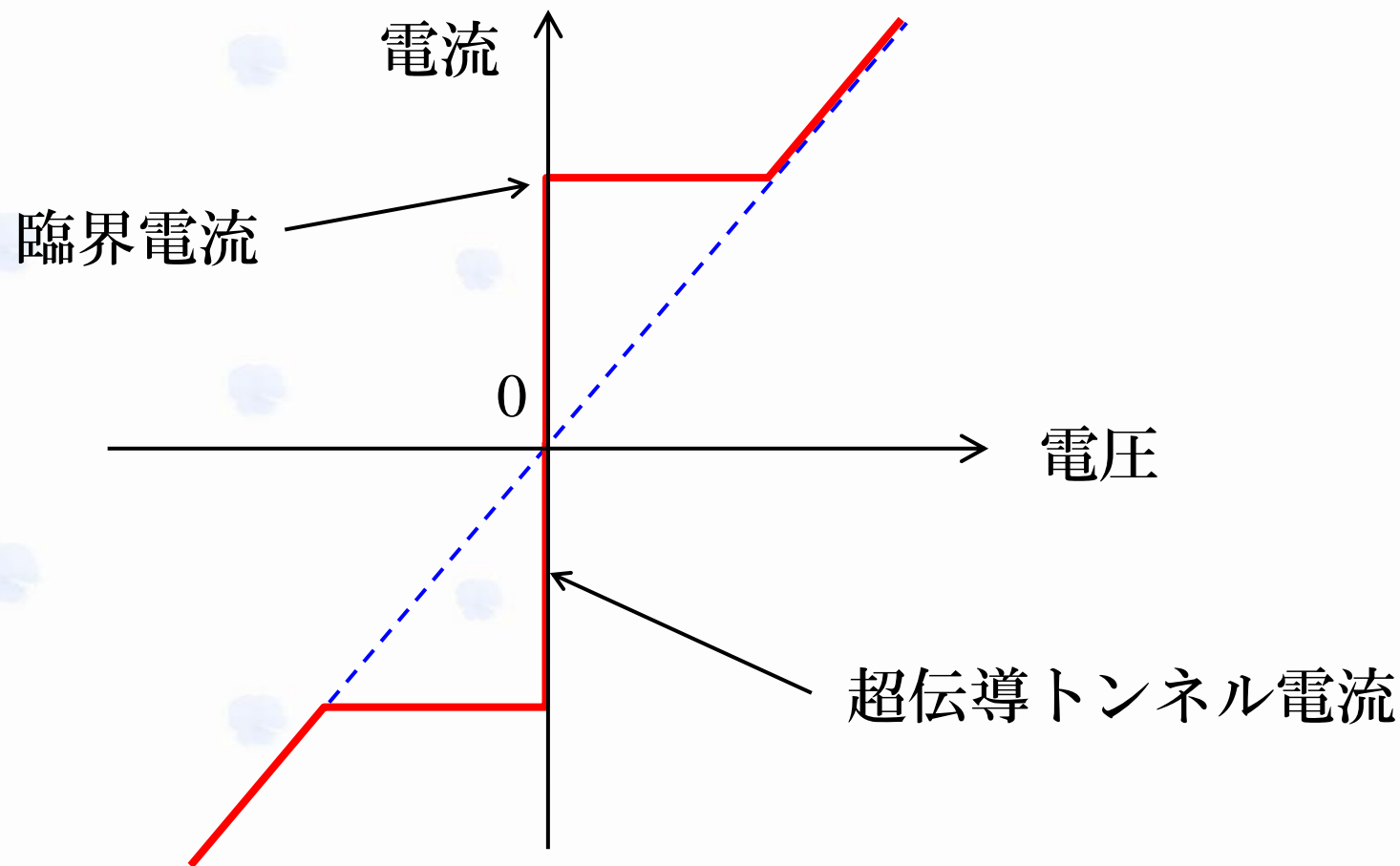
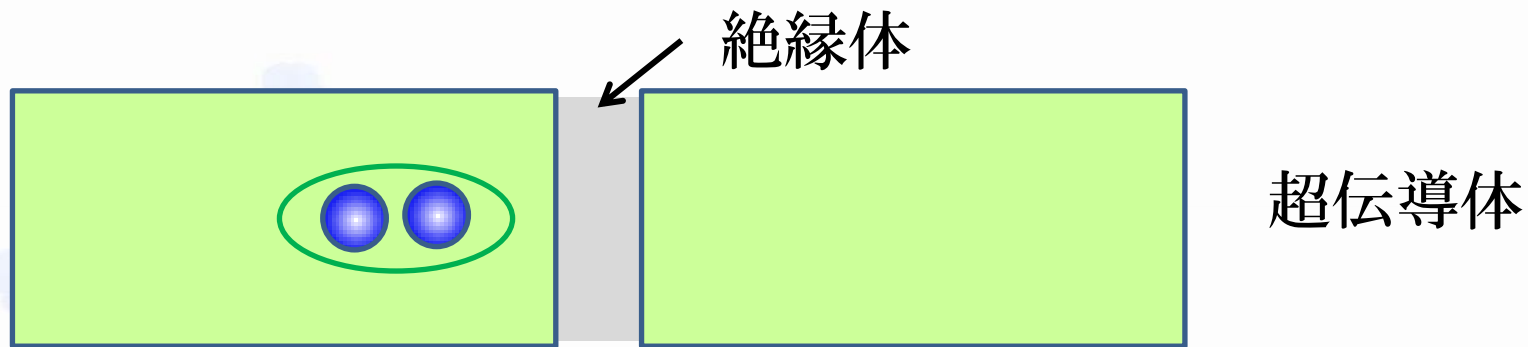


沢山の対が凝縮した状態

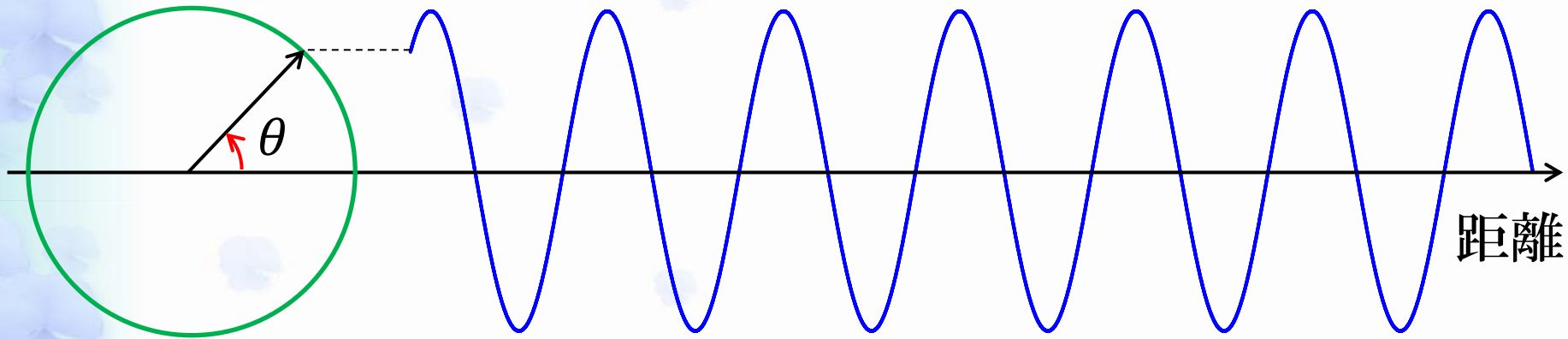
超伝導状態

1つの波の状態

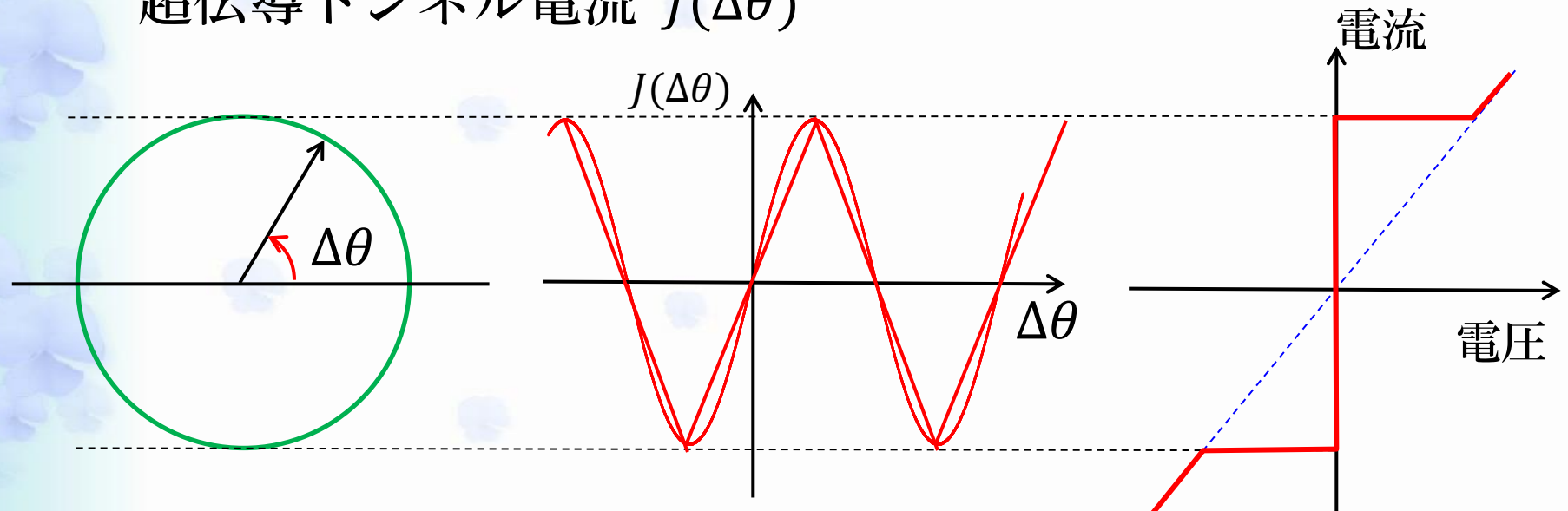
ジョセフソン効果



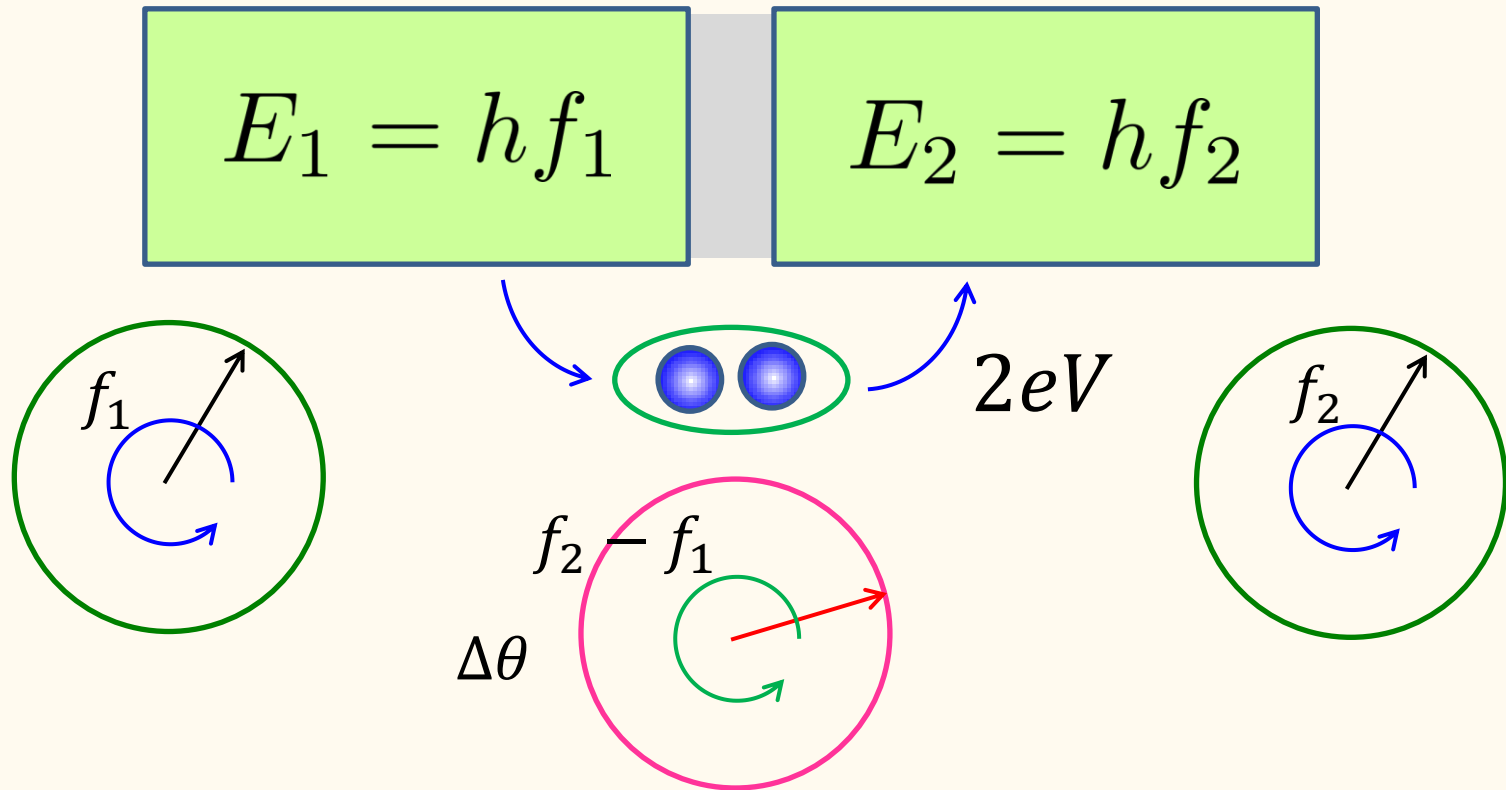
ジョセフソン効果



位相 θ の進行 \rightarrow 波動の進行 \rightarrow 電流 (超伝導の場合)
位相差 $\Delta\theta$ があれば, 電流 (超伝導波動) は流れる
超伝導トンネル電流 $J(\Delta\theta)$



交流ジョセフソン効果

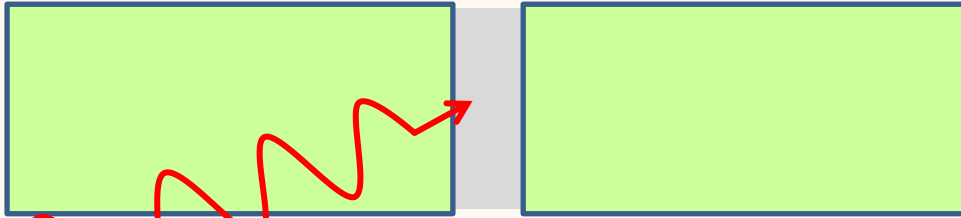


$$2eV = \Delta E = E_2 - E_1 = h(f_2 - f_1) = hf$$

$$f = \frac{2e}{h}V$$

交流ジョセフソン効果

シャピロ (Shapiro) 階段

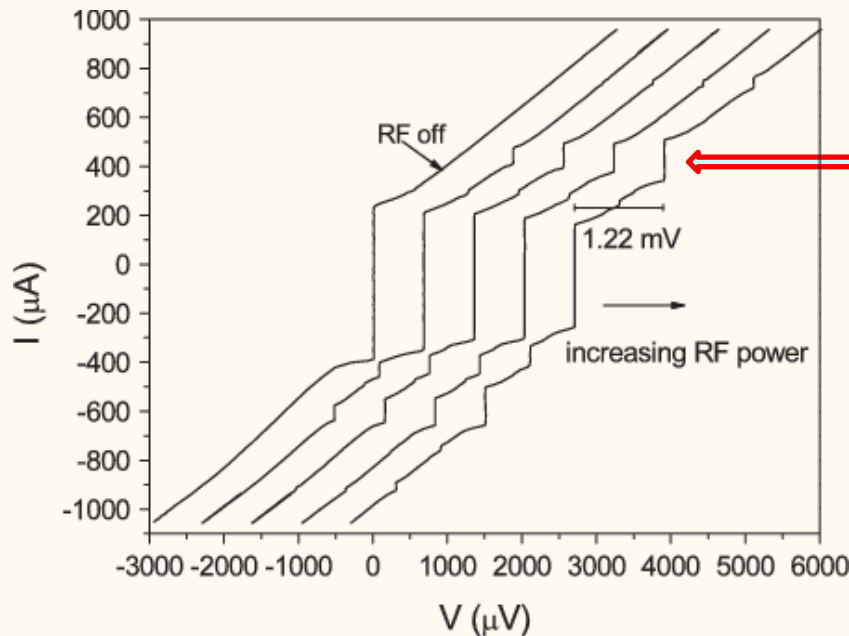


$E = hf_0$ 電磁波 (光子) の印加

非線形性による周波数間の「引き込み現象」

$$f = \frac{2eV}{h} = nf_0 \quad n = 1, 2, \dots,$$


$$V_n = n \frac{hf_0}{2e}$$



J. Du *et al.*
Supercond. Sci. Tech. **21**,125025 ('12)

量子ホール効果

<https://www.nobelprize.org/>


 The Nobel Prize in Physics 1985
Klaus von Klitzing

Share this:      15

The Nobel Prize in Physics 1985



Klaus von Klitzing
Prize share: 1/1

 The Nobel Prize in Physics 1998
Robert B. Laughlin, Horst L. Störmer, Daniel C. Tsui

Share this:      17

The Nobel Prize in Physics 1998




Robert B. Laughlin
Prize share: 1/3



Horst L. Störmer
Prize share: 1/3



Daniel C. Tsui
Prize share: 1/3

 The Nobel Prize in Physics 2010
Andre Geim, Konstantin Novoselov

Share this:      112


The Nobel Prize in Physics 2010



Photo: U. Montan
Andre Geim
Prize share: 1/2



Photo: U. Montan
Konstantin
Novoselov
Prize share: 1/2

 The Nobel Prize in Physics 2016
David J. Thouless, F. Duncan M. Haldane, J. Michael Kosterlitz

Share this:      1.9K

The Nobel Prize in Physics 2016



Photo: A. Mahmoud
David J. Thouless
Prize share: 1/2

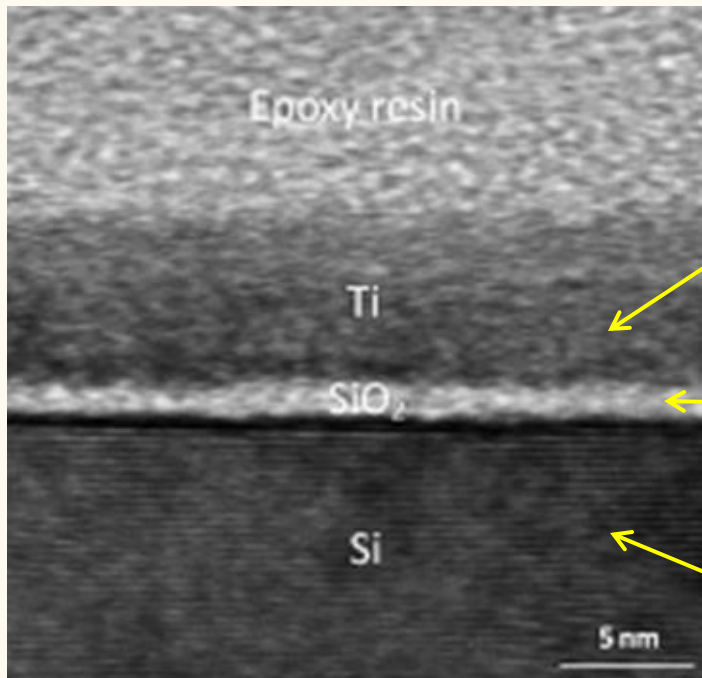


Photo: A. Mahmoud
F. Duncan M.
Haldane
Prize share: 1/4



Photo: A. Mahmoud
J. Michael Kosterlitz
Prize share: 1/4

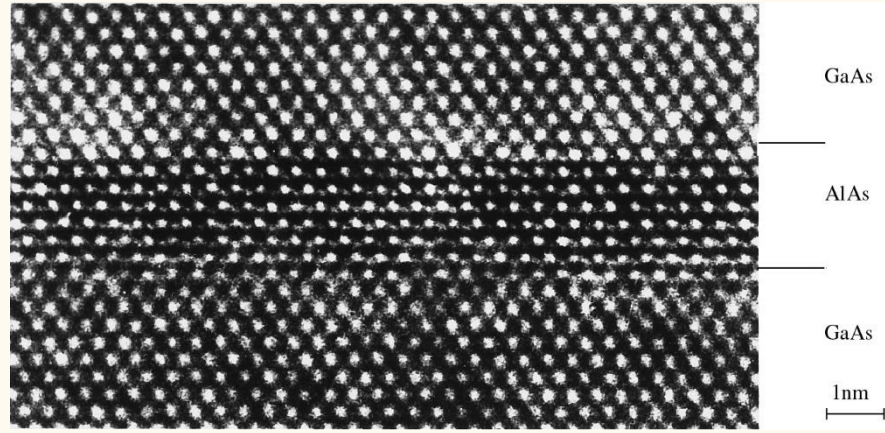
2次元の電子系



金属

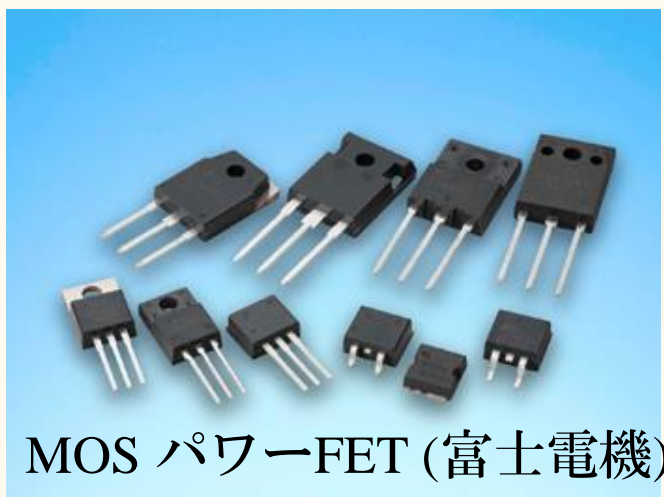
酸化物

シリコン

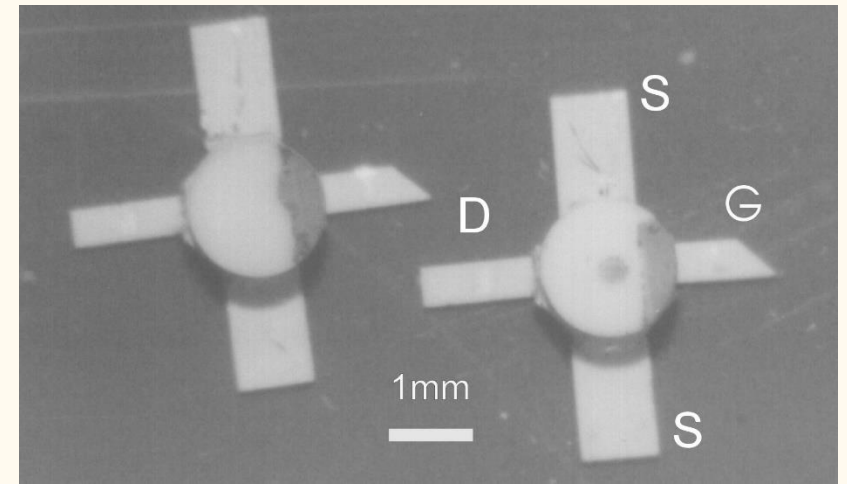


高電子移動度トランジスタ(HEMT)

Yu, Wang, Sensors **10**, 10155 ('10)

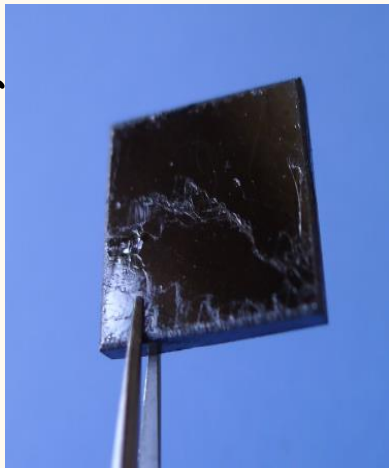


MOS パワーFET (富士電機)

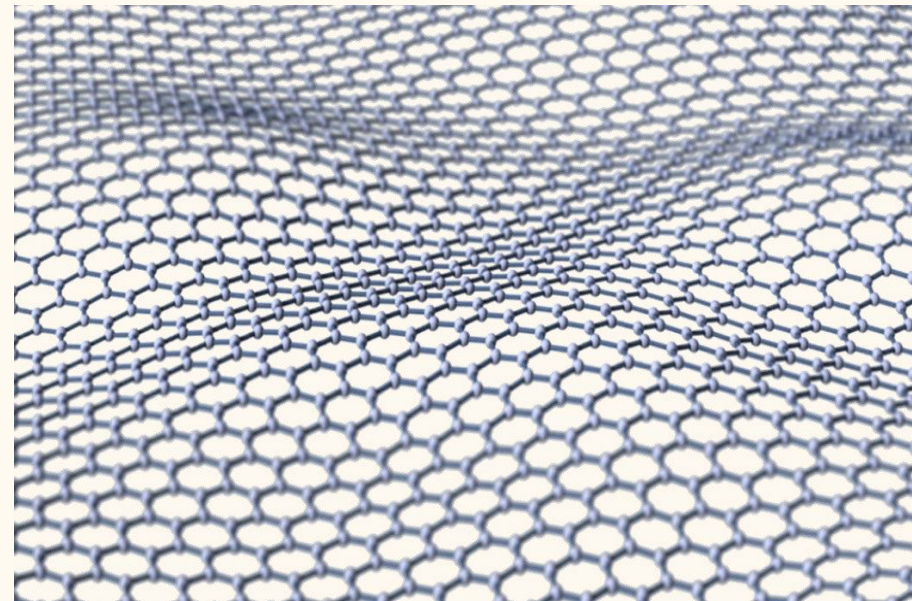
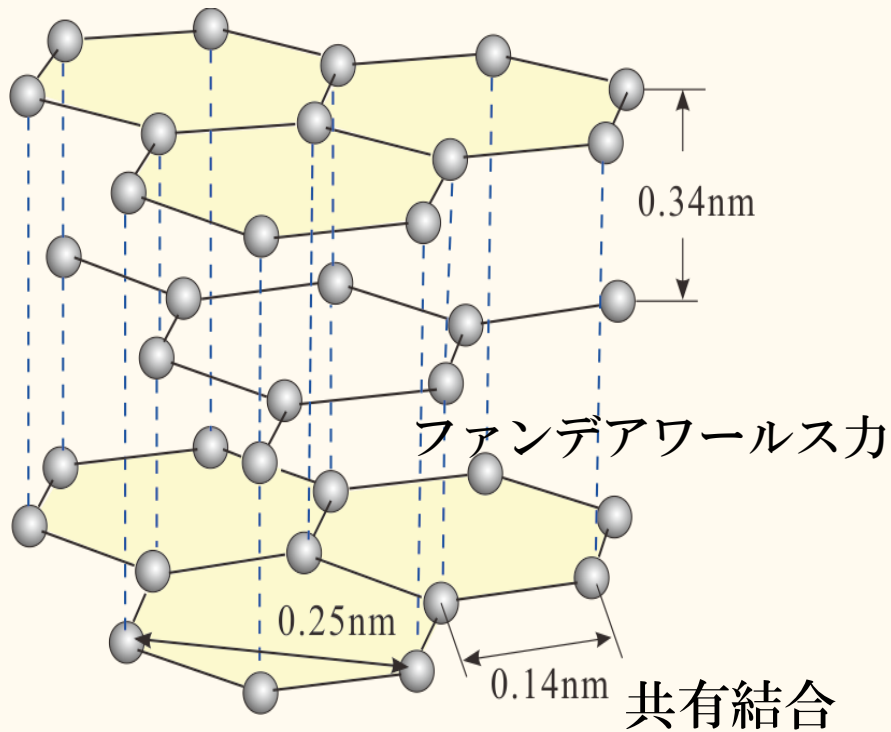
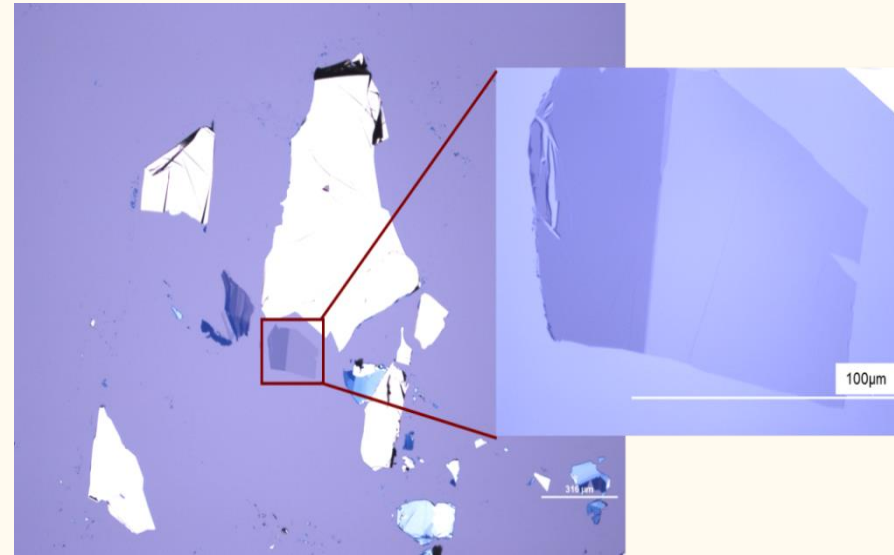


グラフェン：2次元物質

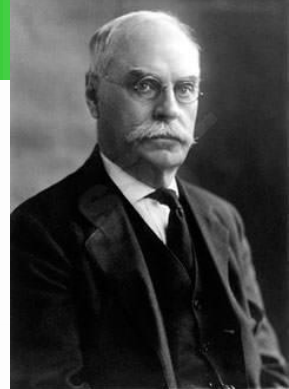
グラファイト



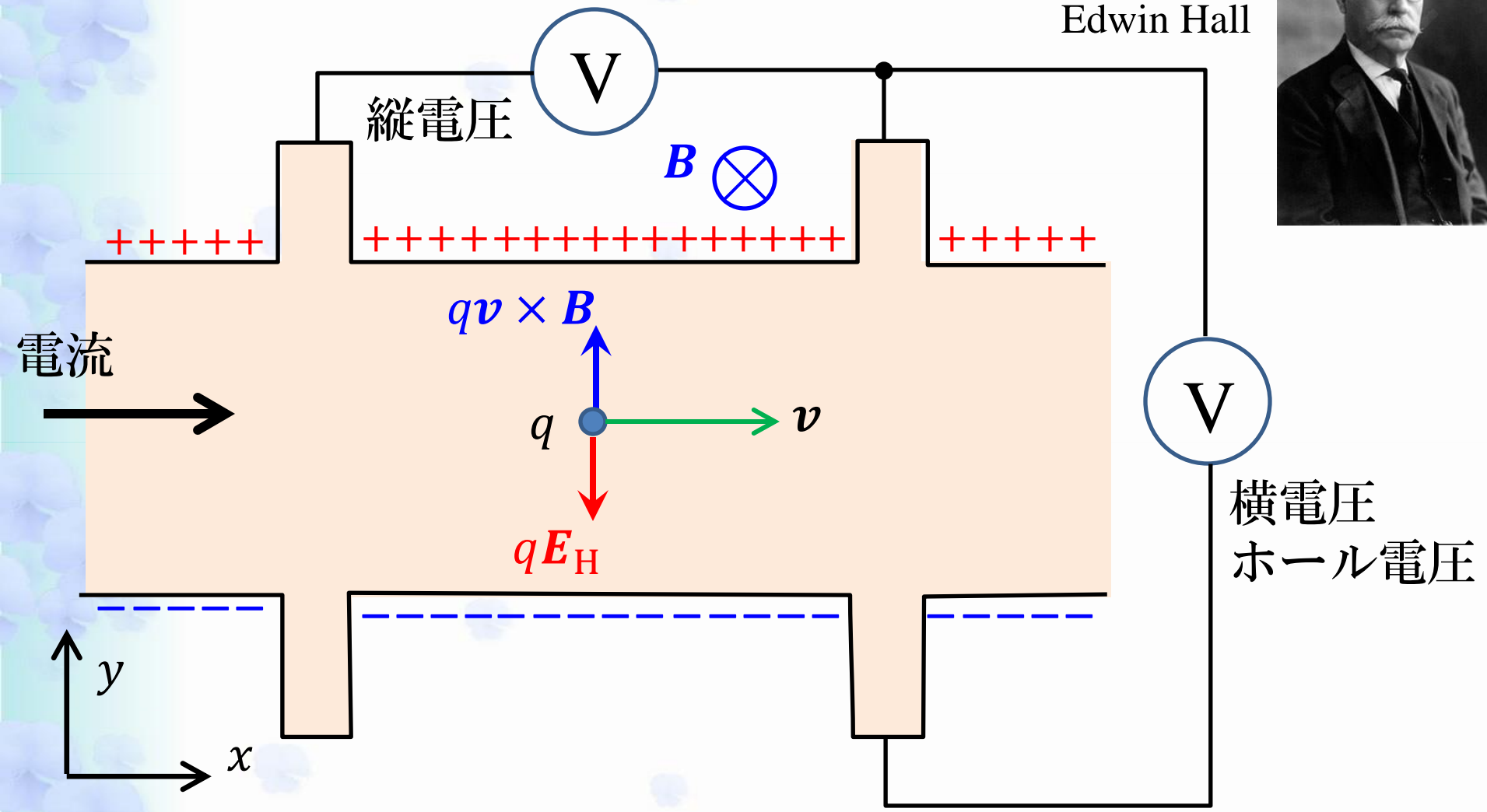
グラフェン



ホール(Hall) 効果

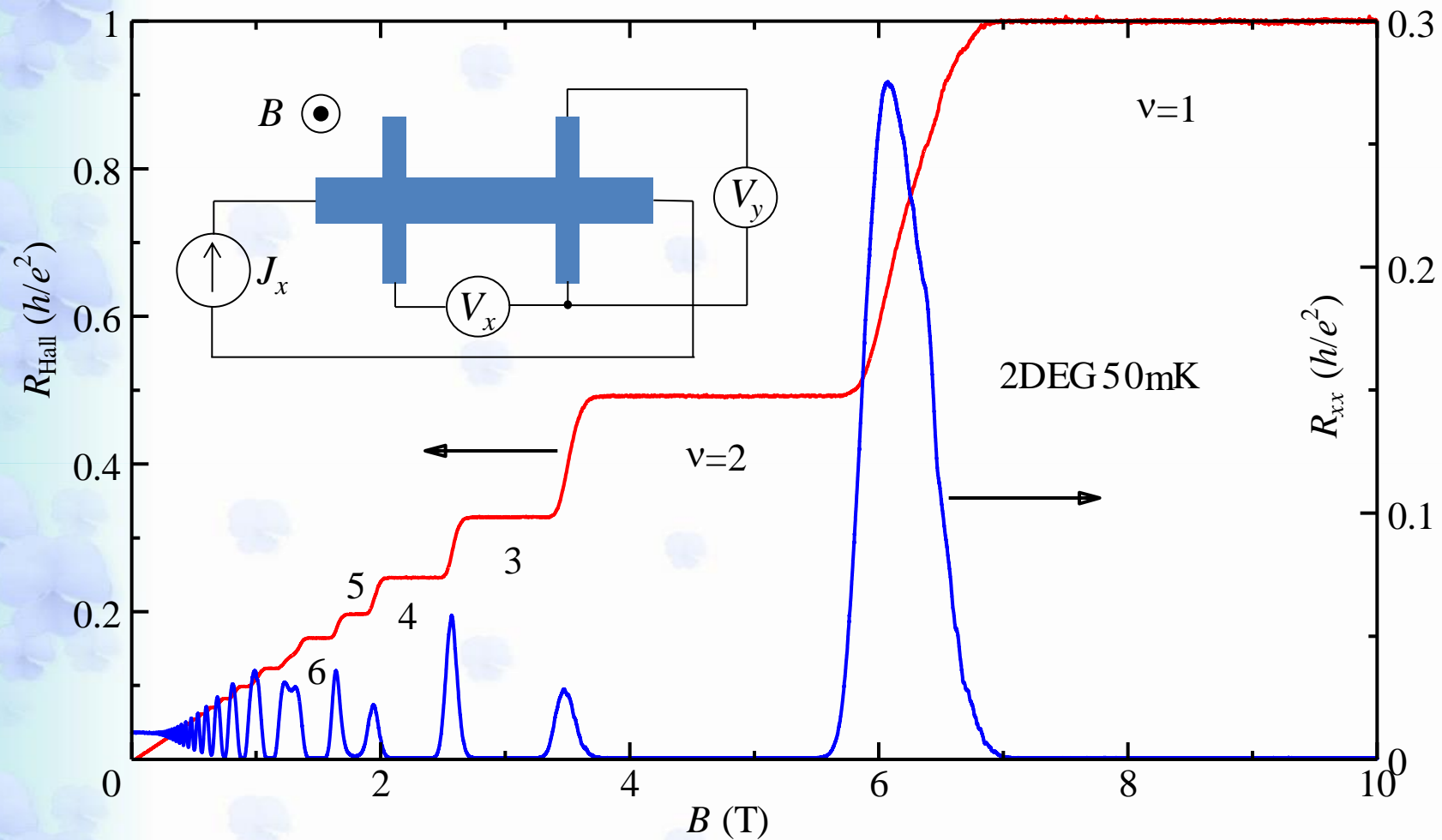


Edwin Hall



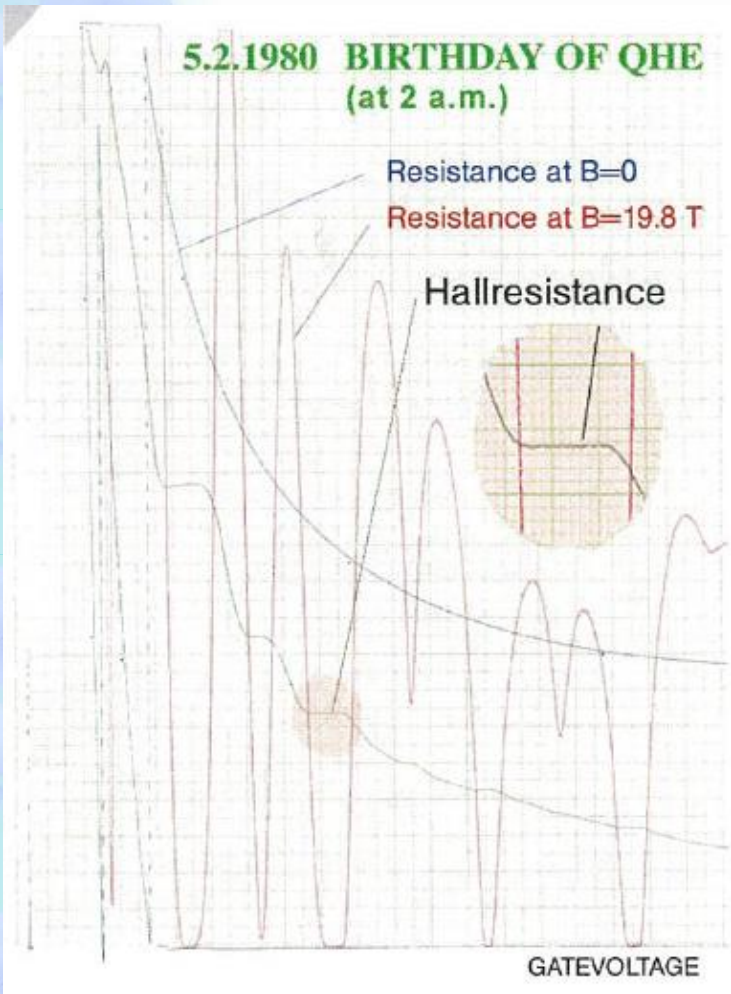
$$R_{xx} = \frac{\text{(縦電圧)}}{\text{(電流)}} \quad \text{(縦抵抗)} \quad R_{xy} = \frac{\text{(ホール電圧)}}{\text{(電流)}} \quad \text{(ホール抵抗)}$$

整数量子ホール効果



$$R_{xy} = \frac{1}{n} \frac{e^2}{h} \quad (n = 1, 2, \dots)$$

量子ホール効果の発見



Notes 4/5.2.1980

rotating sample holder

pin connections

$$E_H = R_H \cdot I = \frac{1}{n \cdot e} \cdot B \cdot \frac{I}{b}$$

$$U_H = \frac{B}{n \cdot e} \cdot I$$

$$U_H = \frac{2 \cdot 10^{-8} \cdot B \cdot I}{e \cdot e \cdot B} = \frac{h}{e^2} \cdot I$$

$N = \frac{eB}{2\pi k}$ ($\nu_s \cdot \nu_v = 1$)

$\frac{h}{4\pi^2 m} \cdot \frac{t_c}{e^2} = \rho_{xy} = \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{e^2} \cdot \sqrt{\frac{m}{c_0}} \Rightarrow 25813 \Omega$

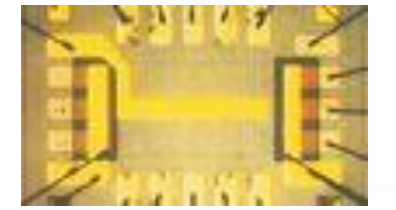
notes of the phone call to PTB
PTB 531/5720 (5.2.1980)
Prof. v. Klitz 2240

$\mu_c = 4\pi \cdot 10^{-9} \frac{V_s}{A \cdot c}$
 $\xi_0 = 0.8854 \cdot 10^{-13} \frac{A \cdot s}{V \cdot a}$

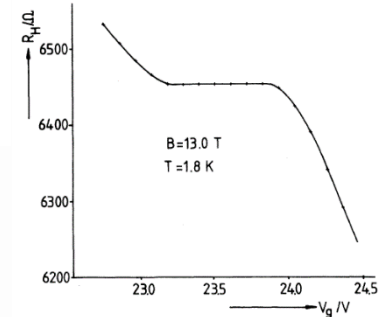
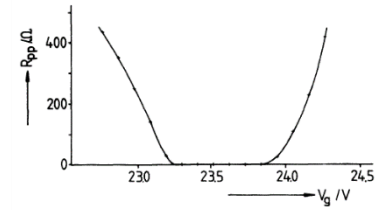
$\sqrt{\frac{h}{m}} = 2.65 \cdot 10^{-3} \Omega^{-1}$
 $\sqrt{\frac{h}{e^2}} = 376.7 \Omega$

25813 Ω : N } 25813 \rightarrow 25163.46
1M Ω parallel } 12906.5 12742.04
6453.25 6411.27
226.63 326.25
2151.08 2146.47

quantized resistances with and without the input resistance of the x-y recorder



Klaus von Klitzing

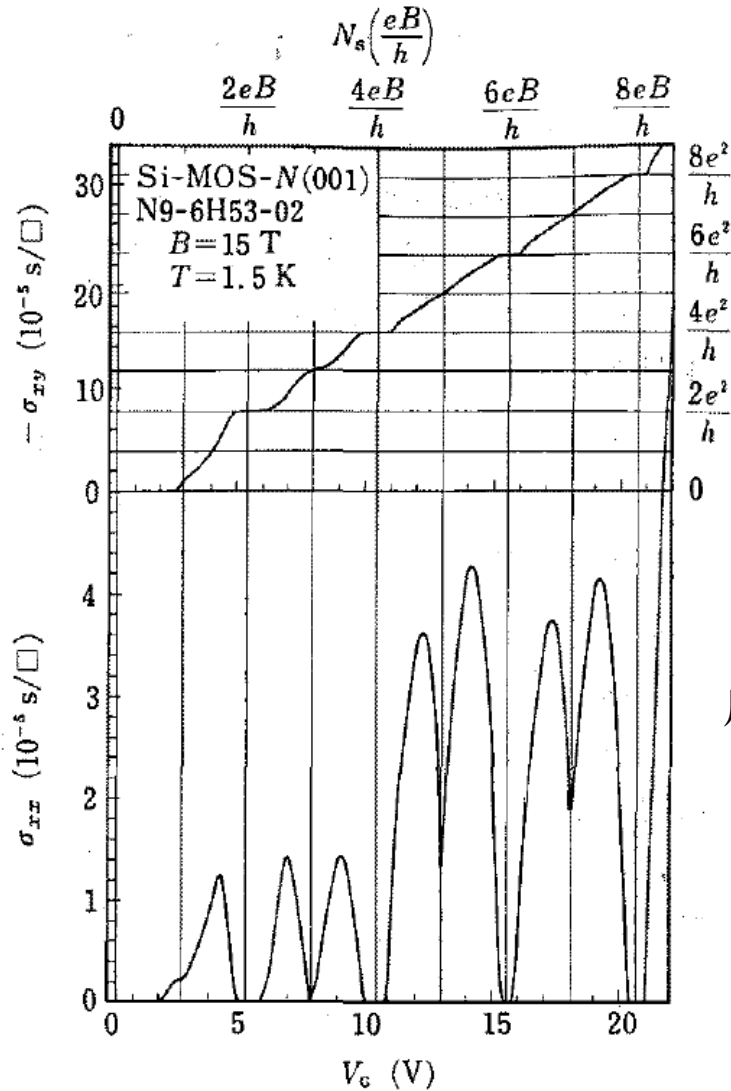


Phys. Rev. Lett. **45**, 494 (1980)

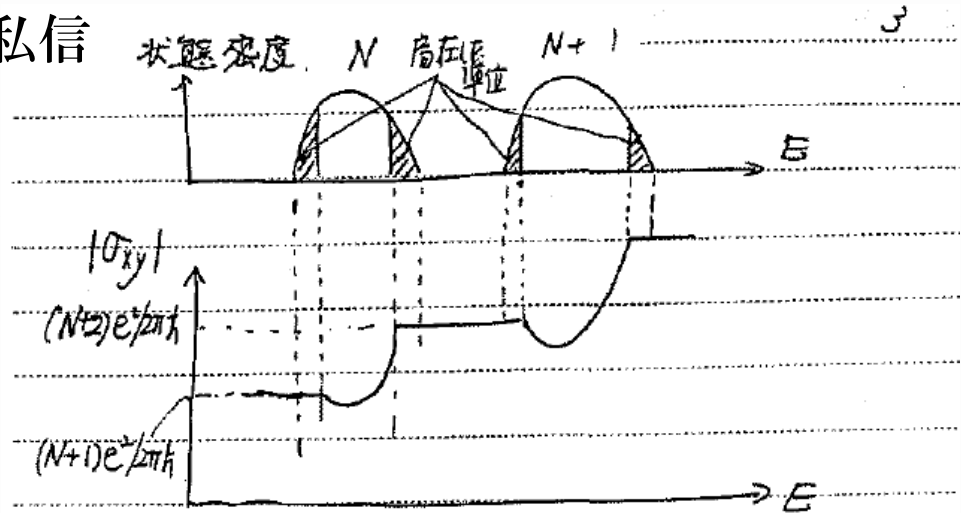
実は日本でも・・・

Oji international seminar
booklet, 1980

安藤の私信
(1974)

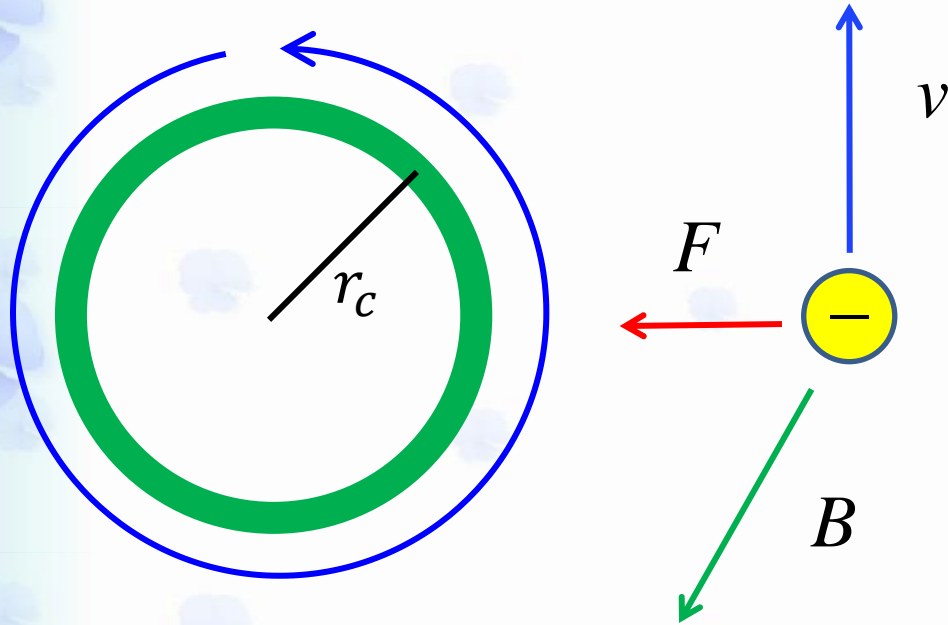


川路紳治



安藤恒也

2次元電子系とランダウ量子化



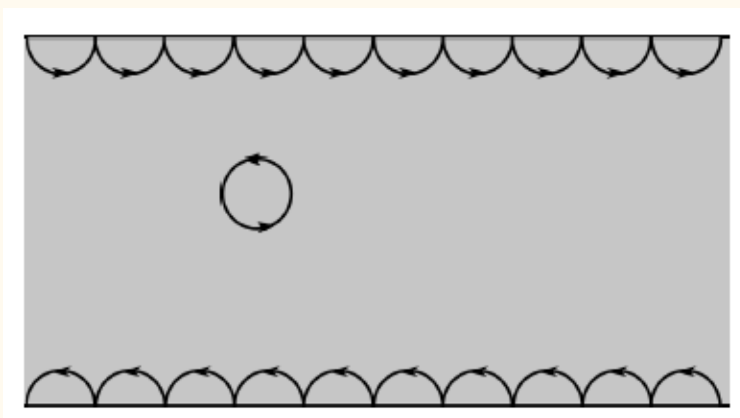
サイクロトロン運動

2次元系では、軌道がサイクロトロン円内に閉じ込められる：
ランダウ量子化

$$E_n = hf_c \left(n + \frac{1}{2} \right) \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

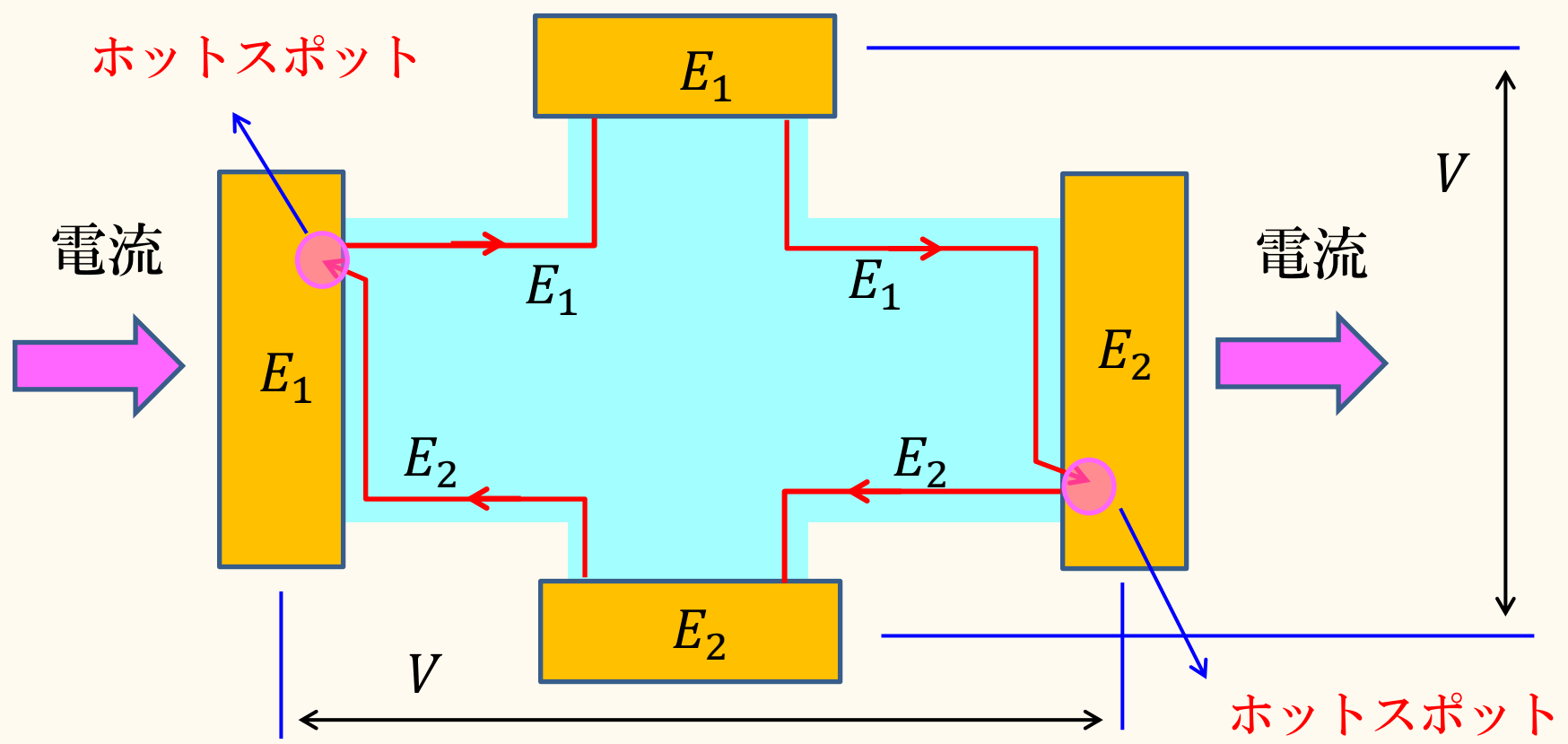
f_c : サイクロトロン周波数

量子ホール端状態



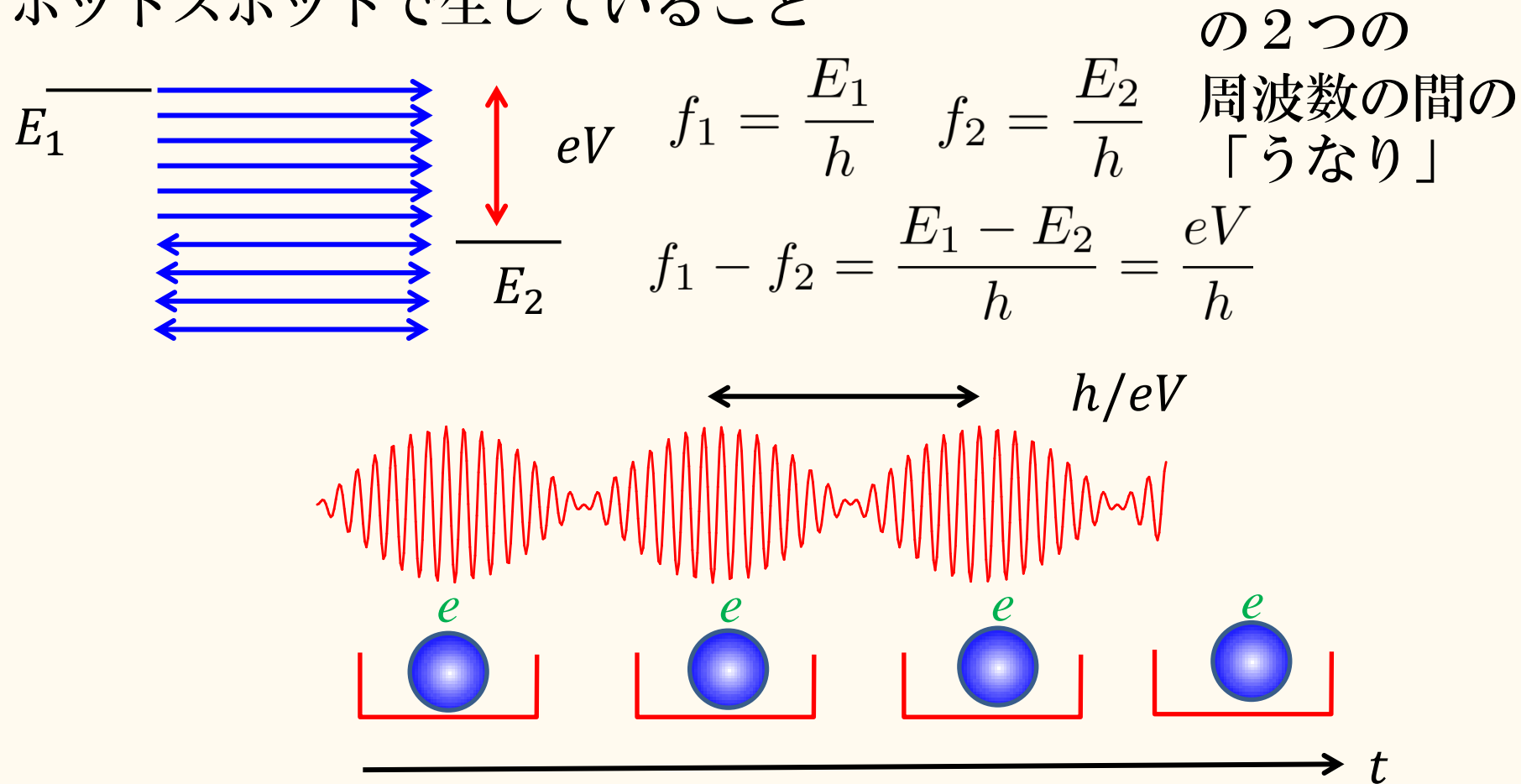
試料の端に反射しながら走る軌道
だけが電流を運べる：端状態

一方向にしか進めない
半人前の1次元状態



1次元系の電気伝導度

ホットスポットで生じていること



単位時間あたりに運ばれる電荷：電流

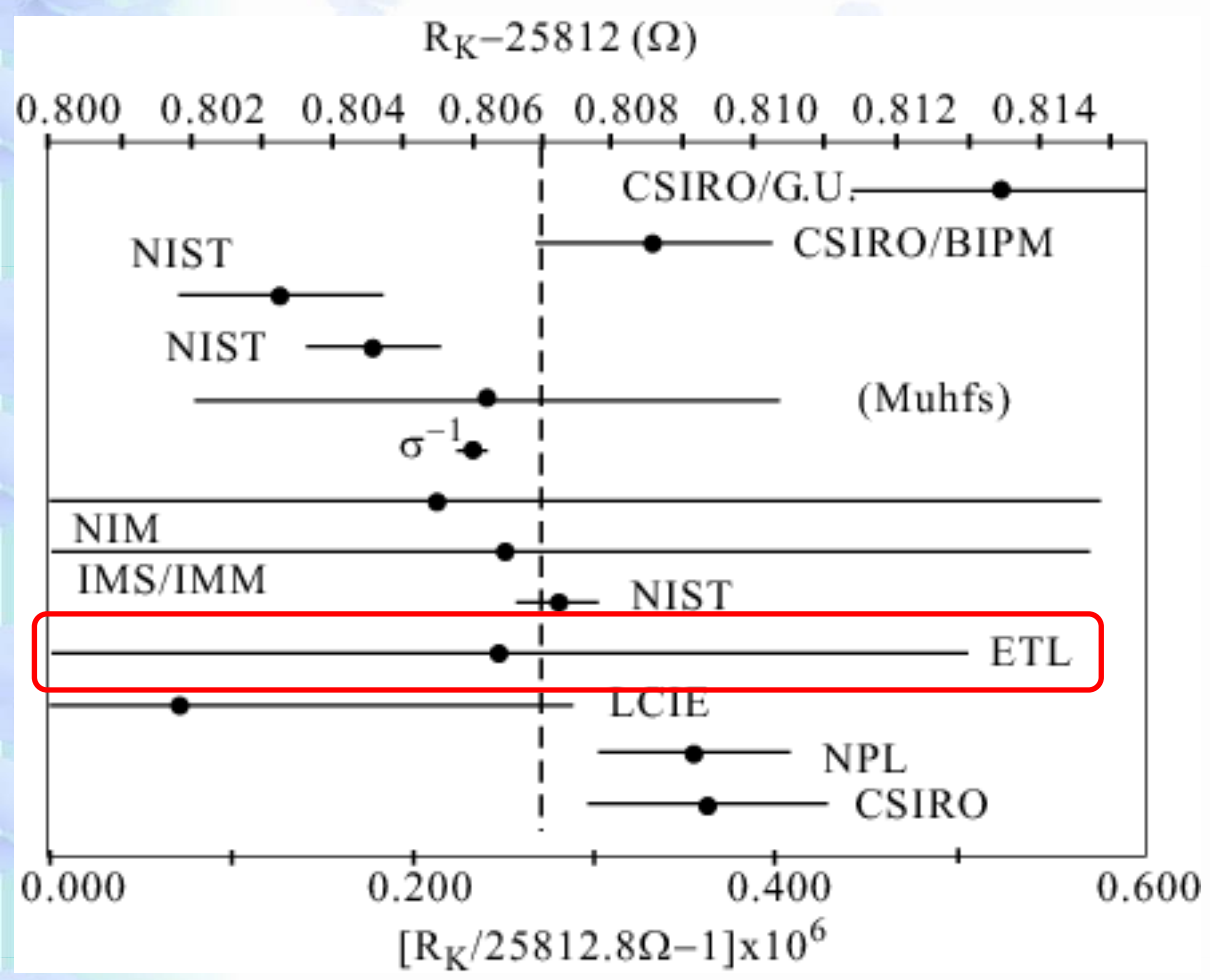
$$J = f \times e = \frac{eV}{h} \times e = \frac{e^2}{h} V$$

抵抗標準

$$R_K = \frac{h}{e^2}$$

von Klitzing 定数

25812.8074434(84) V/A



山内睦子 吉広和夫

木下讓止 稲垣勝哉

電総研 4 人組

K. Yoshihiro et al., Phys. Rev. B33, 6874 ('86).

物性物理学と度量衡

新単位系の恩恵：
温度計測
電流計測

物性物理学がなぜ度量衡に使われるのか

短時間に超多数回の測定ができる

固体中にも普遍的な物理現象がある
超伝導ジョセフソン効果
量子ホール効果