

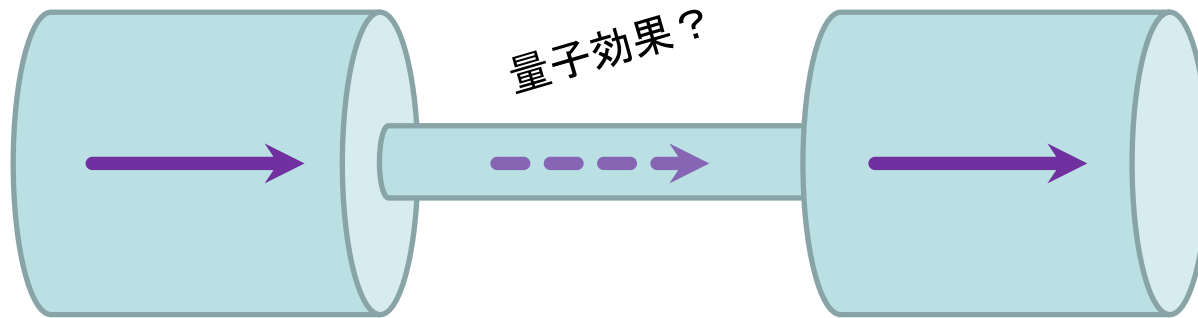
量子化コンダクタンス観測実験

半導体量子ポイントコンタクトと
金属量子細線を流れる電流の量子化

東京大学大学院工学系研究科
物理工学専攻 樽茶研究室 高倉樹

本で行う実験

とても細い導体を電流はどのように流れるのか？

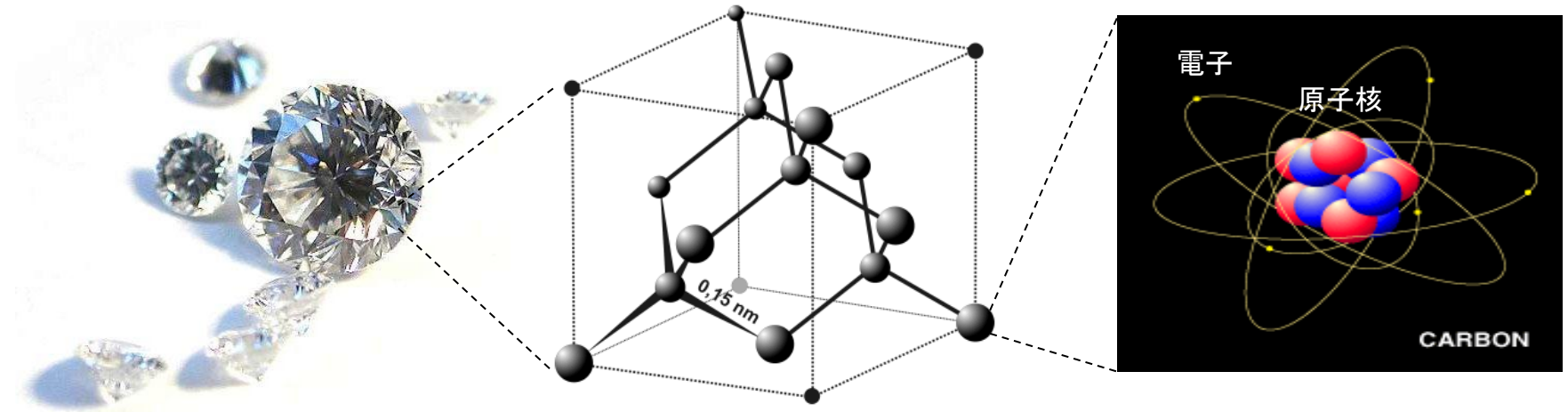


この現象はナノメートルスケールでの電子の振る舞いに関係があります。
2種類の試料を用いて実験してみましょう！

1. 半導体量子ポイントコンタクト
2. 金属細線

電子とは？（おさらい）

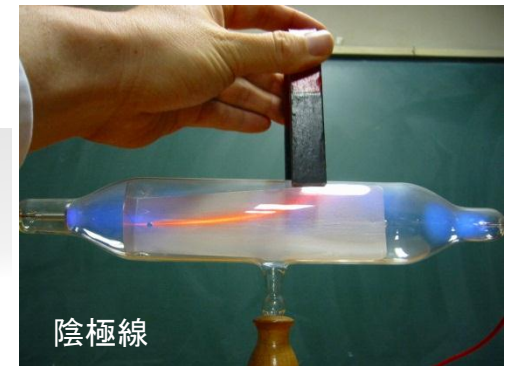
たとえばダイヤモンド・・・



電子とは？

電荷 ($-1.6 \times 10^{-19}\text{C}$) と質量 ($9.1 \times 10^{-31}\text{kg}$) をもつ素粒子である

C : クーロン



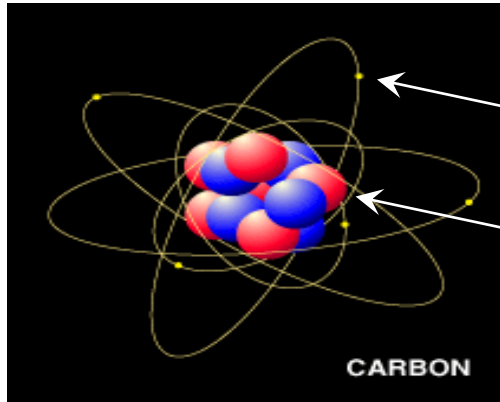
電子は「マイナスの電気」を帯びている（負に帯電している）



負電荷

正電荷と負電荷

原子の中にみられる電荷(電気を帯びた粒)

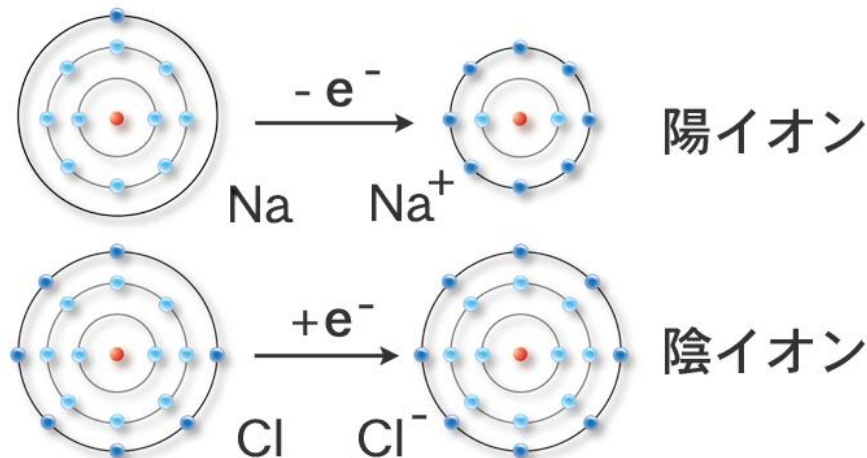


電子：**負**電荷 ($-1.6 \times 10^{-19}\text{C}$)

陽子：**正**電荷 ($+1.6 \times 10^{-19}\text{C}$)

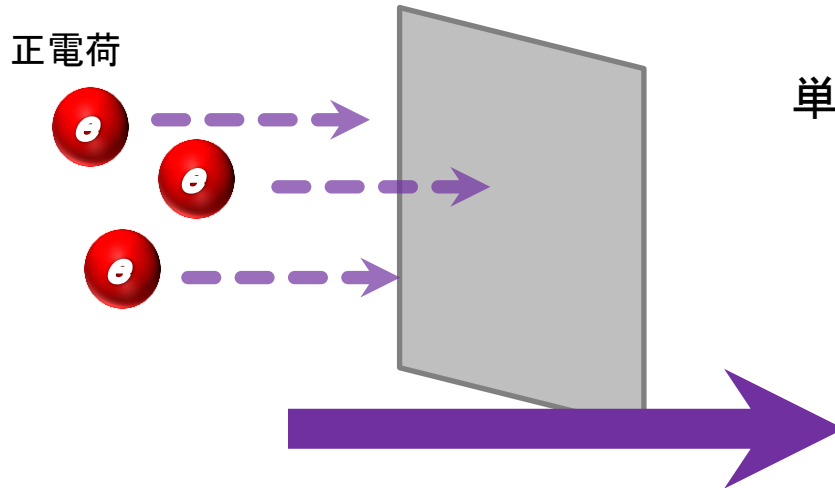
電荷素量 e

他にも陽イオン、陰イオンなど...



電流は電子などの
電荷の流れに対応している

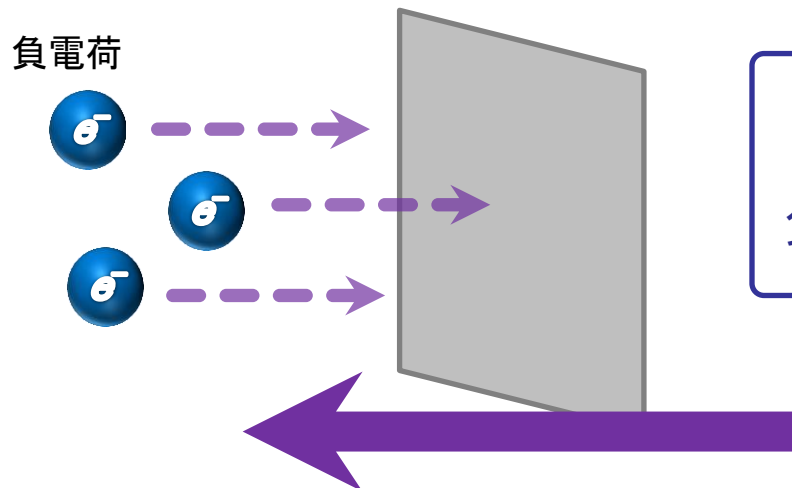
電流 = 電荷の流れ



単位時間あたりにある断面を通過する電荷量

$$A = C / s$$

アンペア = クーロン毎秒



正電荷の流れは正の電流

負電荷の流れは負の電流 = 逆向きの電流

導体・半導体・絶縁体

物質は電気の流れやすさによって大まかに3つに分類される

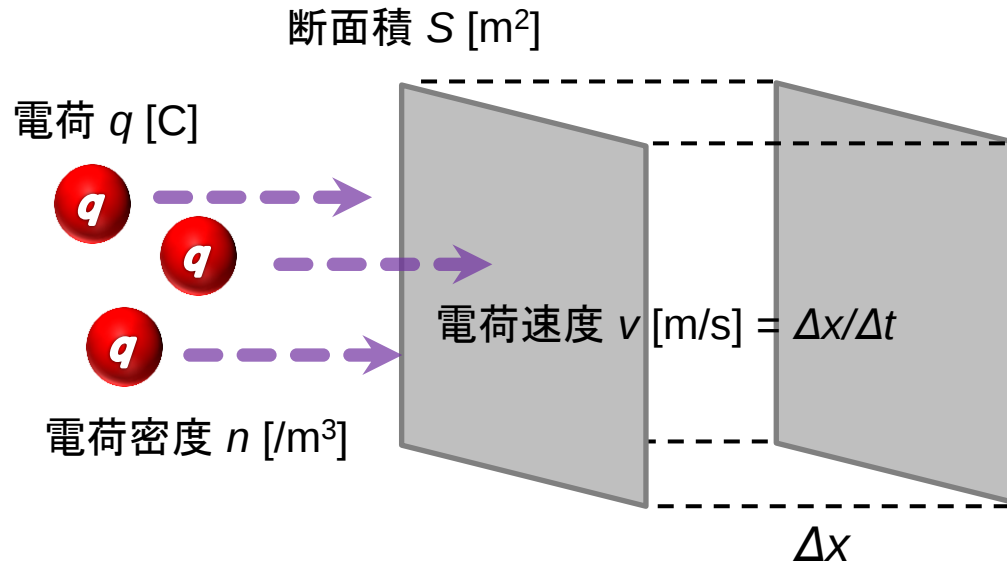
	特徴	主な物質	電気抵抗率 ($\Omega \cdot m$)
導体	電気をよく流す 金属光沢がある	金属	----- $10^{-5} \Omega \cdot m$
半導体	電気をあまり流さない ドーピングによって電気が流れやすくなる	シリコン	
絶縁体	電気をほとんど流さない	ガラス	----- $10^4 \Omega \cdot m$

固体中では電子が電流の担い手となっている



電子の振る舞いによって電流の流れやすさが決まる

電荷の運動と電流

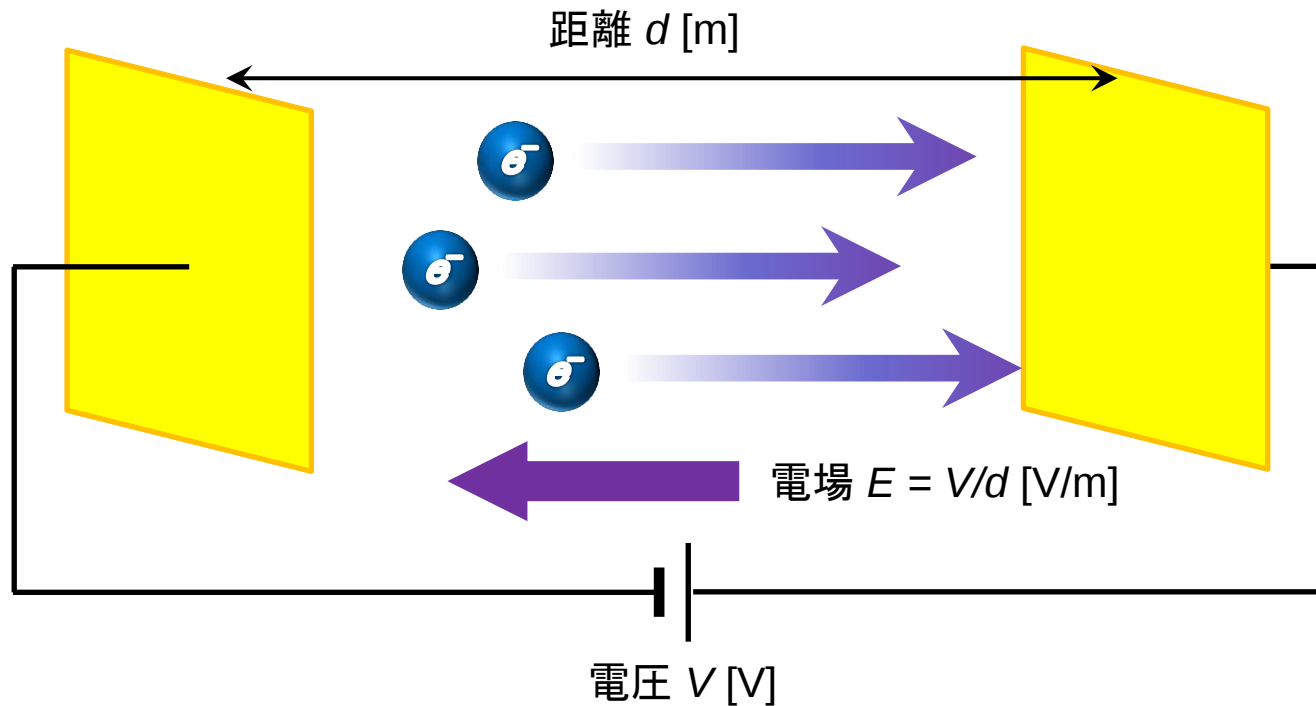


時間 Δt の間に断面積 S を通過する電荷は
体積 $S\Delta x$ の中に含まれる $Snq\Delta x$

$$I = Snq\Delta x / \Delta t$$
$$= vSnq$$

電流は電子の密度と速度に比例する

真空中での電子の運動



電子は eV/d の力を受けて**等加速度運動**する

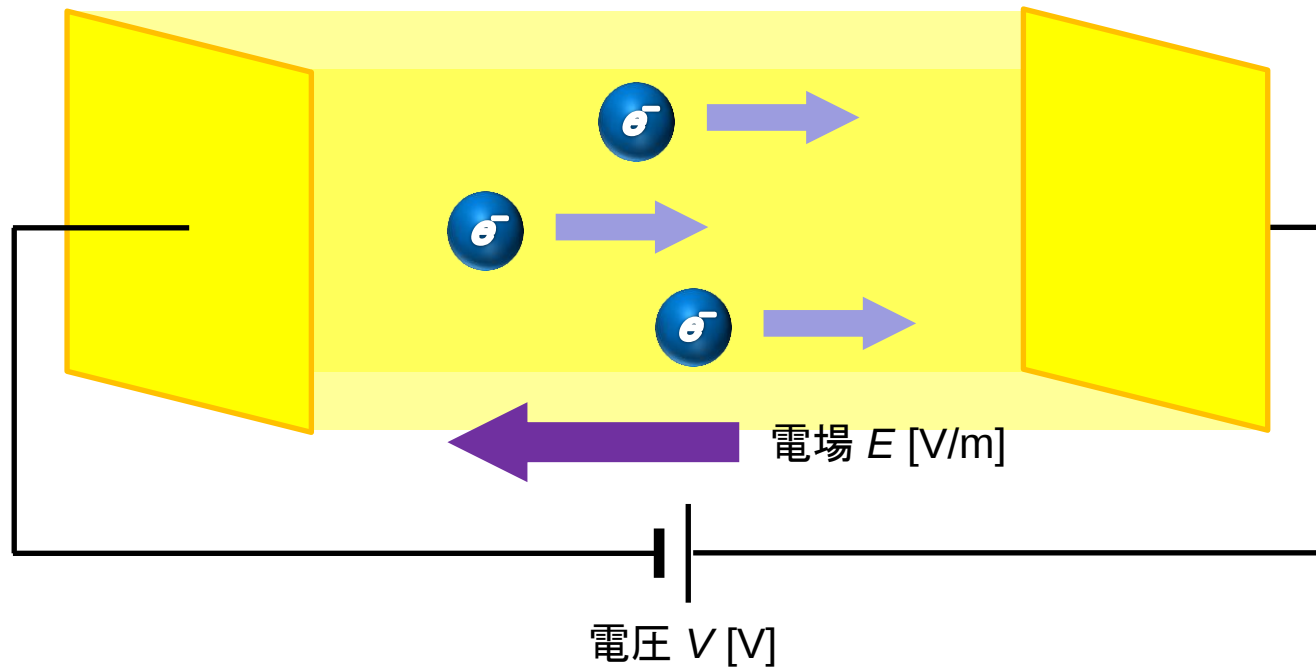


どんどん速くなる

$$ma = eE = eV/d$$

cf. 線形加速器、電子銃など

導体中での電子の運動(1)

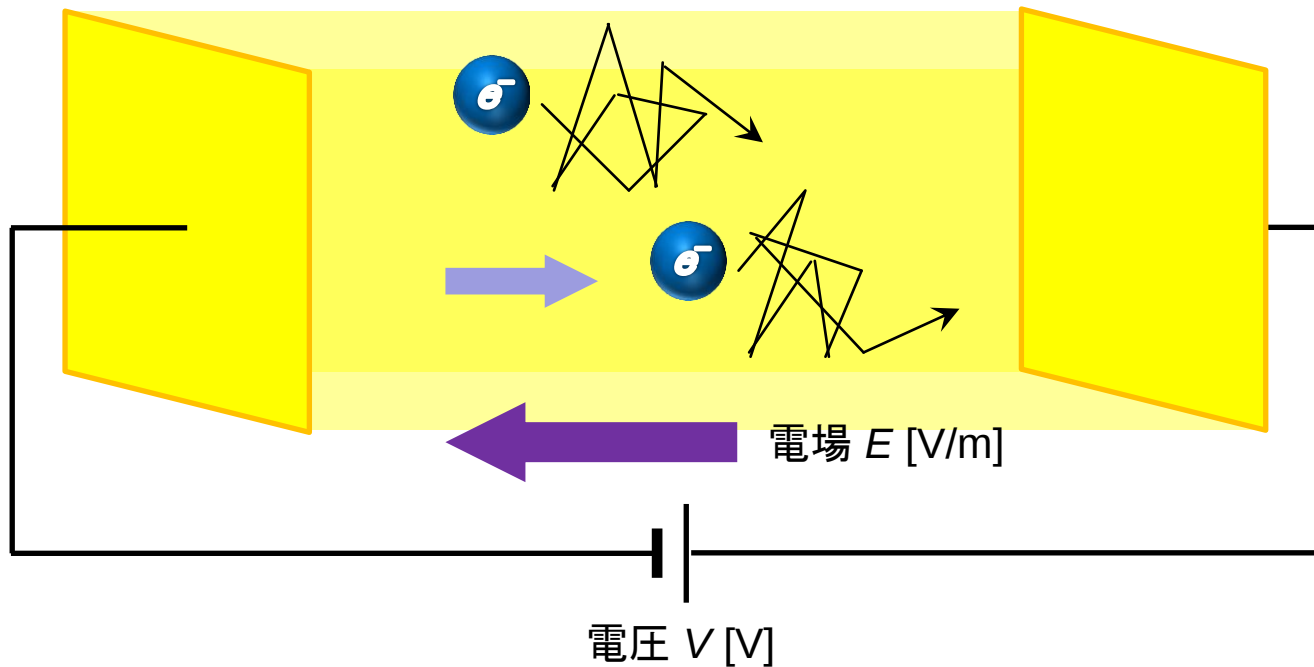


電子は等速運動する → 有限の電気抵抗(オームの法則)

$$V = RI$$

導体中での電子の運動(2)

実際には...

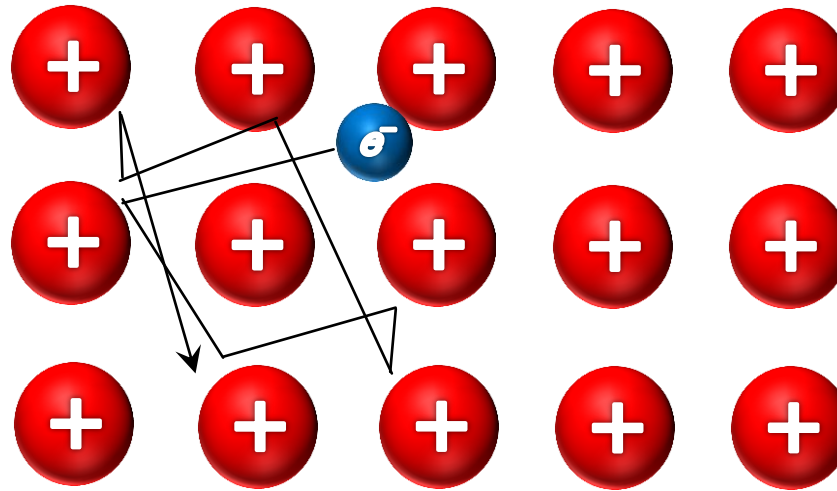


電子はランダムに動きながらゆっくり移動する(ドリフト電流)

これをドレーデモデルとよび、巨視的な電気抵抗を説明できる

導体中での電子の微視的運動(1)

金属には電気伝導に寄与する自由電子と、電子が抜けた後の陽イオンが存在する



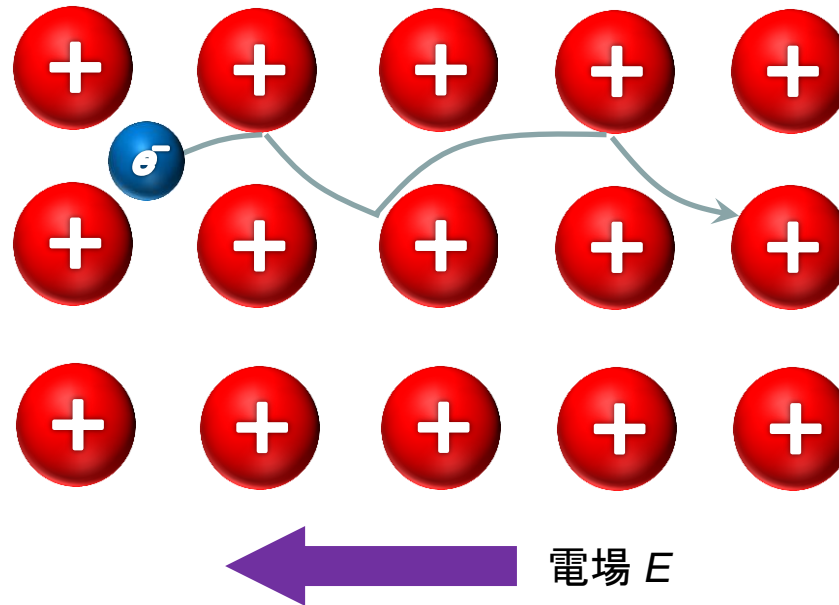
電場がないとき: ランダムな速い熱運動(フェルミ速度)、特定の方向へは流れない

典型的なフェルミ速度 $\sim 1000\text{km/s}$ (金属)

$\sim 100\text{km/s}$ (半導体2次元系)

導体中での電子の微視的運動(2)

自由電子は電場によって加速されては原子に衝突して速度を失うことを繰り返す



電場があるとき: ランダムな速い熱運動 + 電場に応じたゆっくりとした運動(ドリフト速度)

電子が金属原子に衝突するまでに進む

~10 nm(金属)

平均の距離(平均自由行程)

~10 μm (半導体2次元系)

導体を細くしていくと・・・？

オームの法則の電気抵抗

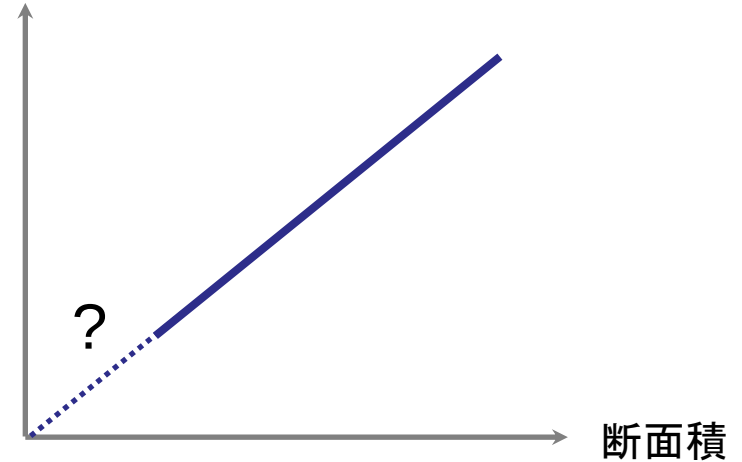
$$R = \rho \frac{l}{S}$$

l : 抵抗体の長さ

S : 抵抗体の断面積

長さが長いほど、断面積が小さいほど
抵抗は増大する

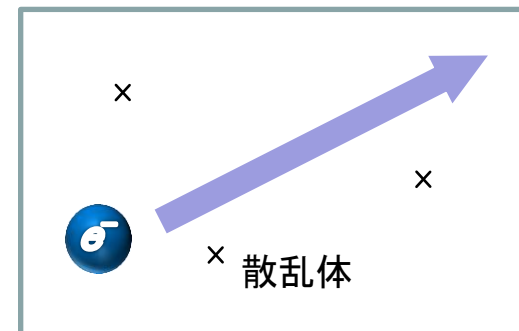
導体を流れる電流



平均自由行程よりも小さな構造

弾道的(バリスティック)伝導

ドルーデモデルが適用できない



量子力学に基づいて電気伝導をとりあつかう

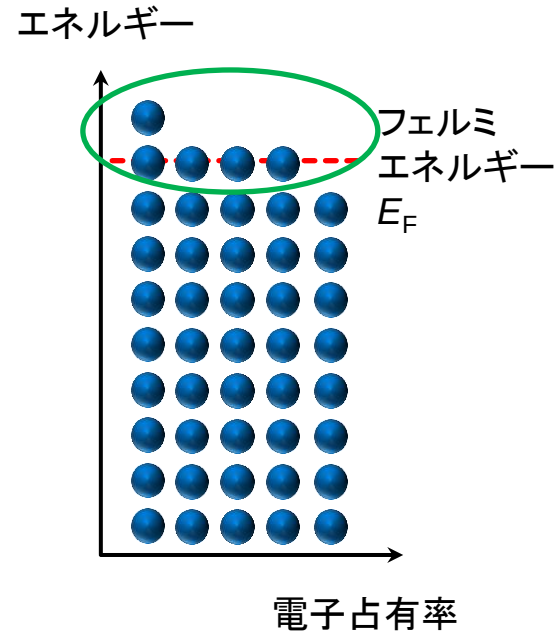
物質中の電子

電子はフェルミ粒子であり、フェルミ統計に従って分布する

$$\langle n_\nu(\varepsilon) \rangle = \frac{1}{\exp \left\{ \frac{1}{k_B T} (\varepsilon - \mu) \right\} + 1}$$

物質の性質はフェルミエネルギー近傍の電子によって決まる
電子の物質波長を特に**フェルミ波長** λ_F とよぶ

$$\lambda_F = \frac{2\pi}{k_F} \quad v_F = \frac{\hbar k_F}{m} \quad E_F = \frac{\hbar^2 k_F^2}{2m} = \frac{h^2}{2m\lambda_F^2}$$



典型的なフェルミ波長

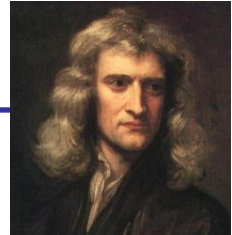
~1 nm(金属)

~50 nm(半導体2次元系)

閉じ込めサイズがフェルミ波長と同程度のときに
量子的な効果が表れる

量子力学の基本方程式

難しいですが数式そのものは分からなくて大丈夫！



Newton

ニュートンの運動方程式(古典力学)

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = F$$



物体に作用する力 F が分かれば
物体の位置 x が時間の関数として得られる

シュレーディンガー方程式(量子力学)

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x, t) \right] \psi$$



量子に作用するポテンシャル V から
量子の波動関数 Ψ が時間・位置の
関数として得られる



Schrödinger

1932年 ノーベル
物理学賞！

基本方程式の形がまったく異なる！！そもそも**波動関数**って何？

波動関数の例：量子的な調和振動子

まずは**古典的な調和振動子**を考えてみる

(ばねにつながれた質点、振り子など)

$$\text{復元力: } F = -kx$$

$$\text{振動子のもつポテンシャル: } V(x) = \frac{1}{2} kx^2$$

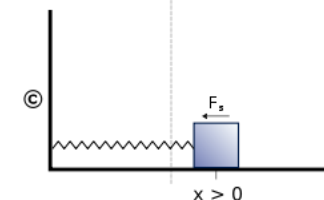
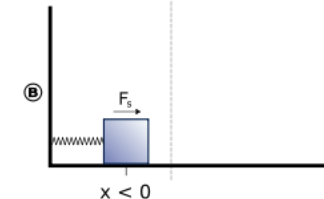
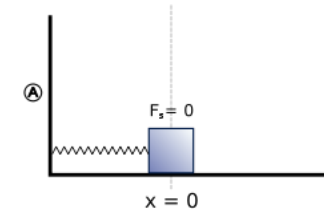
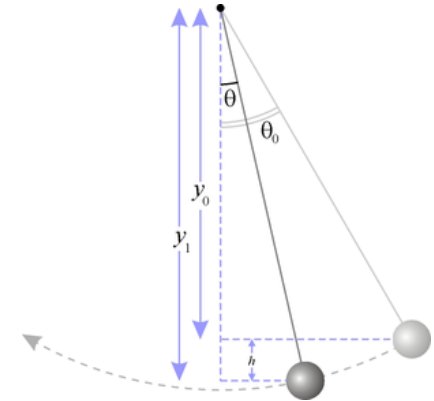
系の全力学的エネルギー

$$E = \frac{1}{2} m \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2} kx^2$$

運動エネルギー

ポテンシャルエネルギー

系の全力学的エネルギーは連続的な値をとる
全エネルギーを定めると粒子の存在範囲も決まる



波動関数の例：量子的な調和振動子

次に**量子的な調和振動子**を考えてみる（静電ポテンシャルに束縛された電子など）

$$\text{振動子のもつポテンシャル: } V(x) = \frac{1}{2} kx^2 = \frac{1}{2} m\omega^2 x^2$$

このポテンシャルのもとでシュレーディンガー方程式を解くと・・・（かなりややこしい）

$$\text{波動関数 } \psi_n(x) = c H_n \left(\sqrt{\frac{m\omega}{\hbar}} x \right) e^{-\frac{m\omega}{2\hbar} x^2}$$

$$\text{系のエネルギー } E_n = \hbar\omega \left(n + \frac{1}{2} \right)$$

量子力学特有の不思議な性質

方程式の解は無数にある ($n = 0, 1, 2, \dots$)

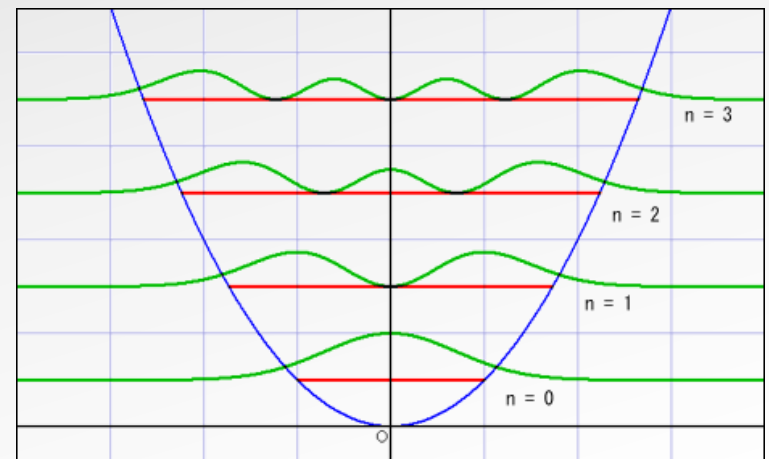
系の全力学的エネルギーは**離散的な値**をとる

粒子は観測によって**確率的に位置が決まる**

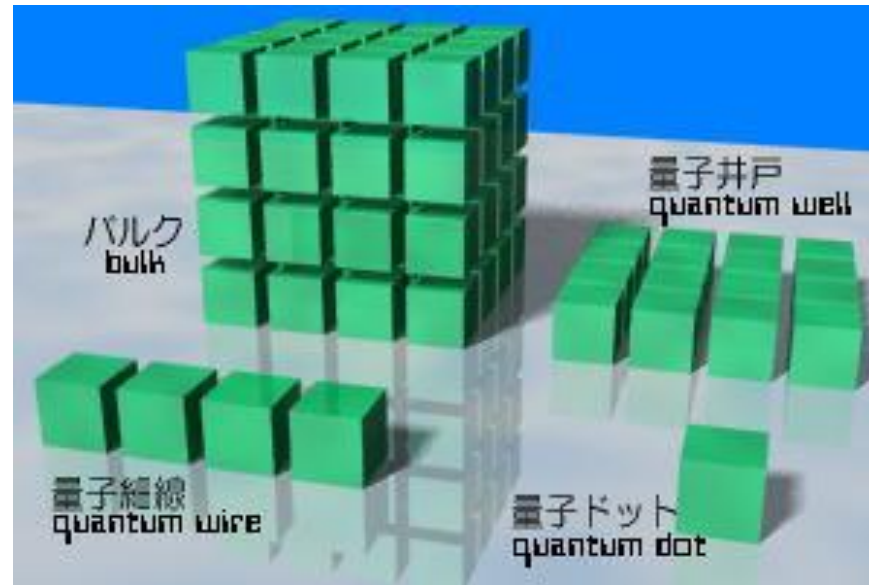
波動関数は古典的な場合よりも外に染み出す

最低エネルギーが0より大きい(**零点振動**)

粒子の存在確率 $p(x) = |\psi(x)|^2$



閉じ込めによる量子化



量子細線では電子は進行方向以外は閉じ込められている

閉じ込めポテンシャルによって量子細線の中の状態は離散的なエネルギーを取る

量子細線を通る電流は離散化すると考えられる

量子細線で電流はどのように観測されるか？

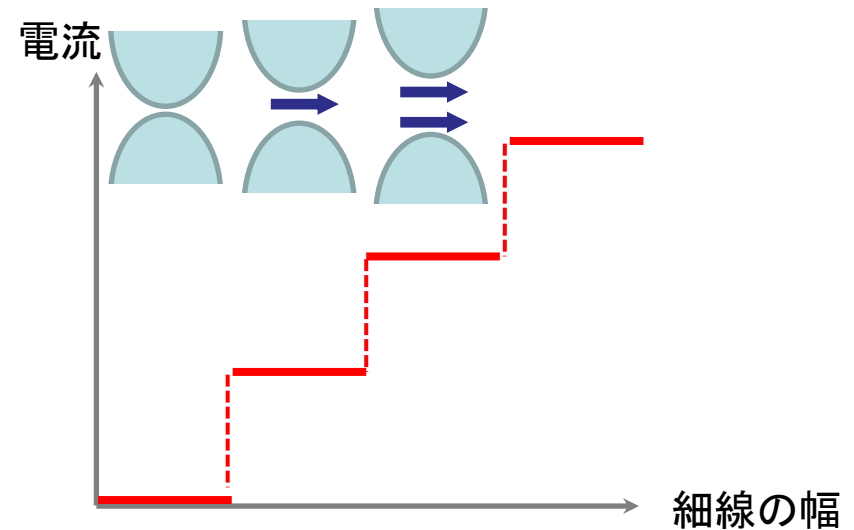
ヒント

電子のもつエネルギーは一定の値(フェルミエネルギー)以下である
閉じ込めによって量子細線内のエネルギーは離散化している(チャネル)

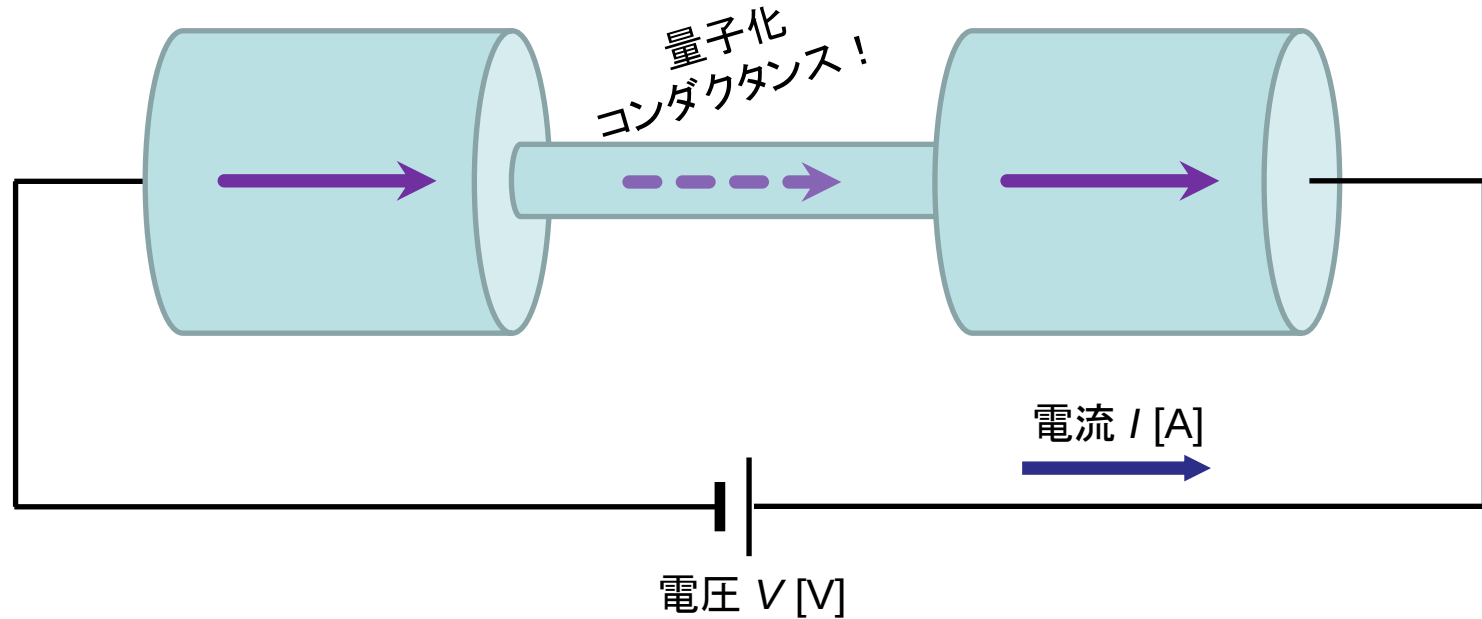
電子の持つエネルギー以下のチャネル
を通して電子は伝導する



量子細線内のチャネルの数に応じた
ステップ状の電流が観測される



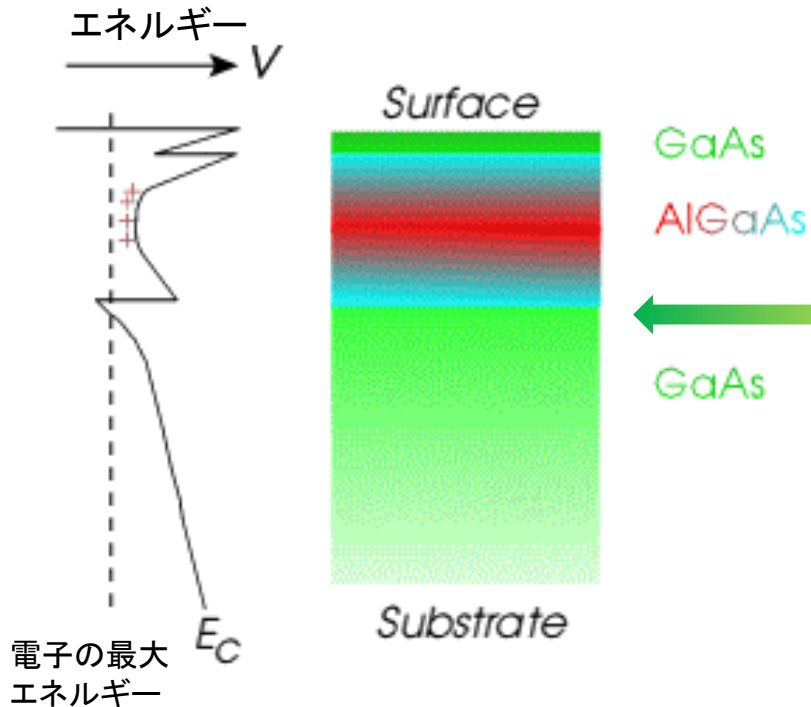
本で行う実験



2種類の試料(半導体量子ポイントコンタクト、金属細線)に対して電圧を印加し、試料を流れる電流を測定します。

量子化された電流を観測しよう！

半導体2次元電子系

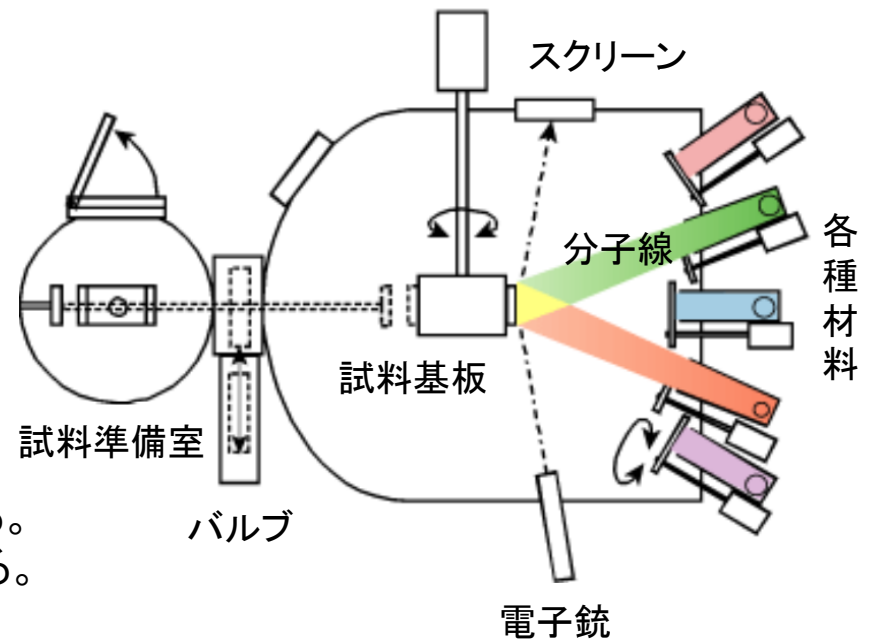


ある異なる種類の半導体(例: GaAsとAlGaAs)を原子レベルで積層させると、その界面に伝導電子が溜まるような基板を作ることができる。

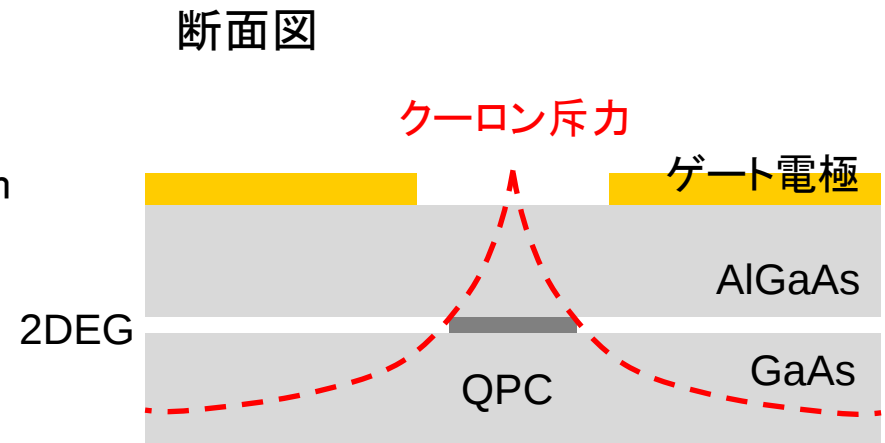
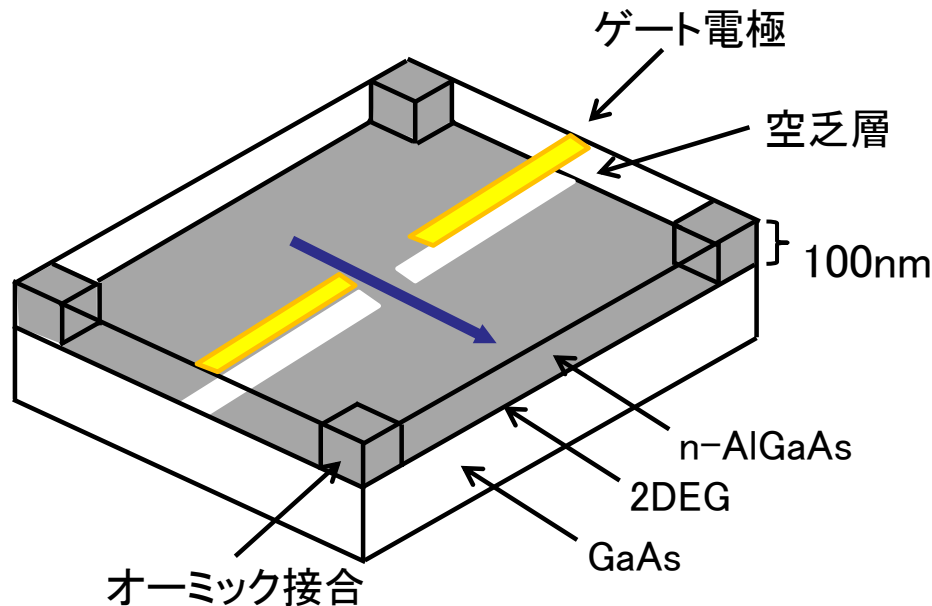
2次元電子気体 (2DEG)

分子線エピタキシー:

超高真空中で、材料を分子線(ビーム)で蒸着する。
材料の成分比を原子層レベルで正確に制御できる。
一層ずつ観察しながら成長することができる。



量子ポイントコンタクト (QPC)



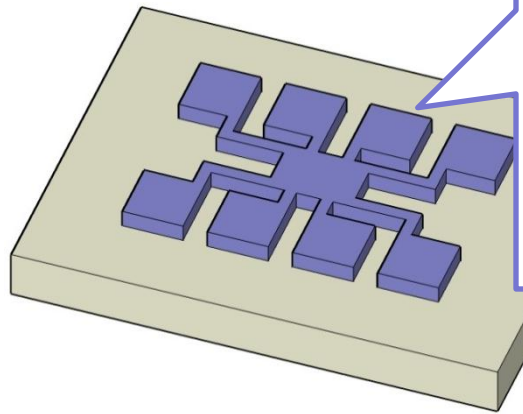
基板表面に取り付けたゲート電極に負の電圧を印加し、クーロン反発でゲート直下の2次元電子を追い出す(空乏層)

ゲート電極間に極めて細い電子の通り道(量子細線)を形成することが可能

ゲート電圧を調整することで細線の幅を変えることができる

デバイスの作り方

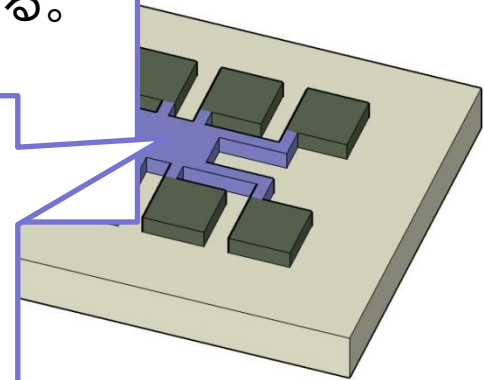
1. 不要な部分を取り除く



必要な特性の基板を用意する。
分子線エピタキシー装置を用いる。
所望の形状にリソグラフィーし、

電子面に導通をとるために、
金属を蒸着して加熱する。
→電流・電圧が測れるようになる。

2. 電流・電圧を測れるようにす

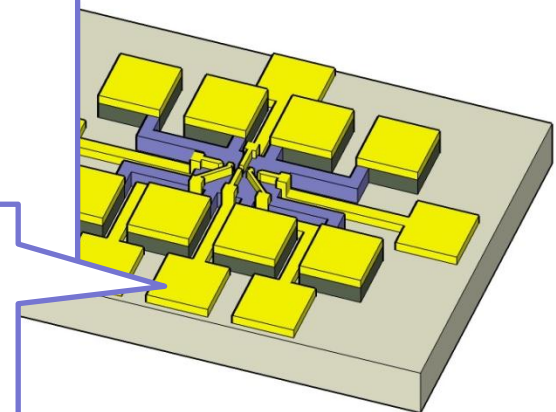
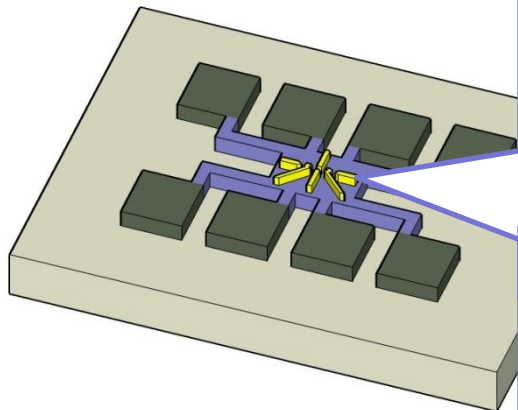


3. 微細電極を取り付ける

電子を閉じ込めるための
微細な電極を作製する。
パターン作製には
電子線描画装置を用いる。

試料に導通をとるための
大きな電極を作製する。

4. 大きな電極を取り付ける



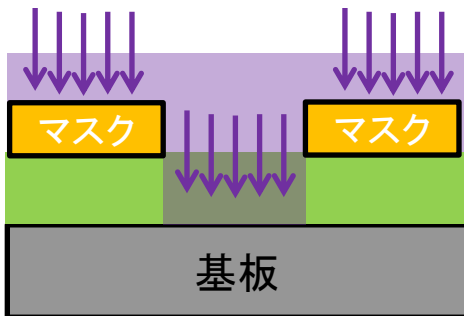
リソグラフィーの手順

所望の形状(パターン)通りに基板に加工を施すための手順。

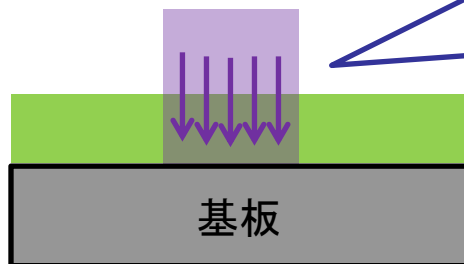
1. レジスト塗布



2. 露光



または



1. よく洗浄した基板の上に

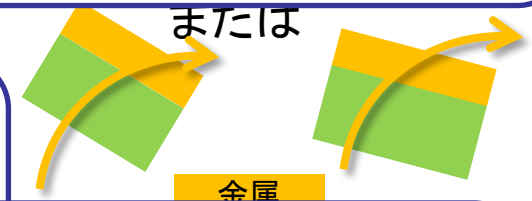
5. 残っているレジストを
溶液で溶かして取り除く。

2. 予めパターンを施した
遮光マスクをのせて
紫外線を照射する

2. コンピュータ制御により、
パターン通りにビームを
照射する。

5. リフトオフ

3. 照射して変性した部分の
レジストを、溶液で溶か
して取り除く。



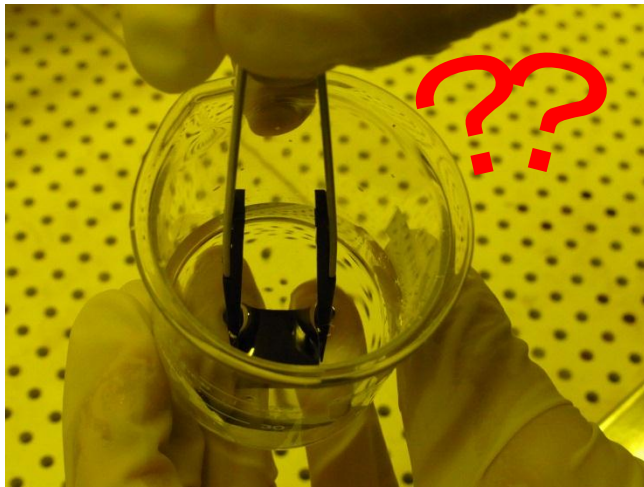
4. 削る。
レジストで保護されてい
る部分はそのまま。

4. 金属を蒸着する。

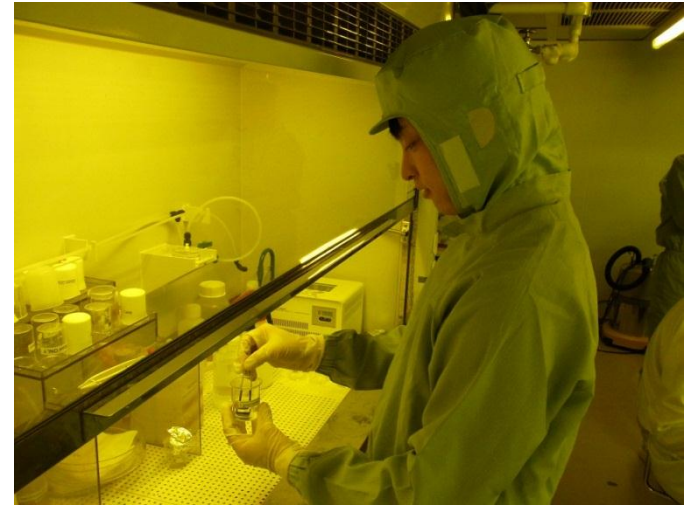
リソグラフィーとは

基板

きれいな電子系を有する基板



細かく思い通りに加工を施したい！ → リソグラフィー



不要な部分の除去
金属電極の加工

基板

金属

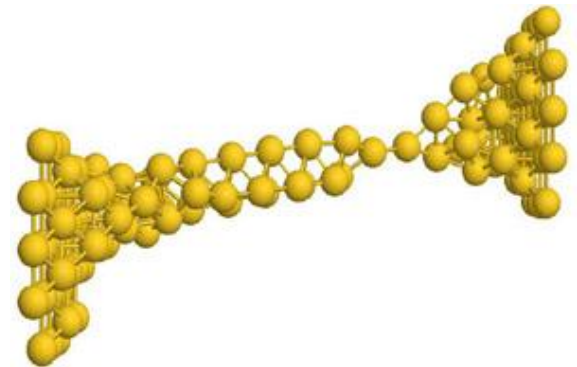
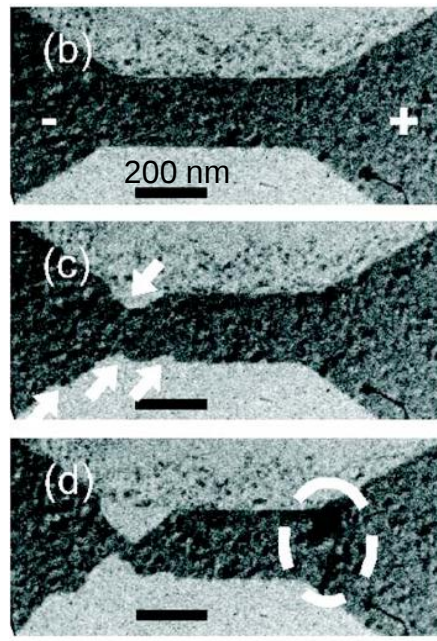
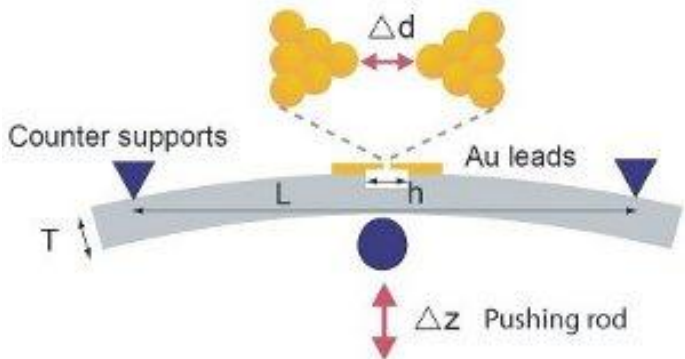
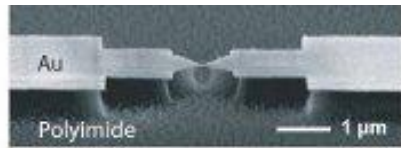
基板

金属細線

金属ナノワイヤ: ~100nm以下の径の金属細線

メカニカルブレークジャンクション法(機械的に破断する)やエレクトロマイグレーション法(ジュール熱で加熱して切断)などで形成する

特に今回は切断直前の1原子単位で繋がっている細線の伝導度を測定する



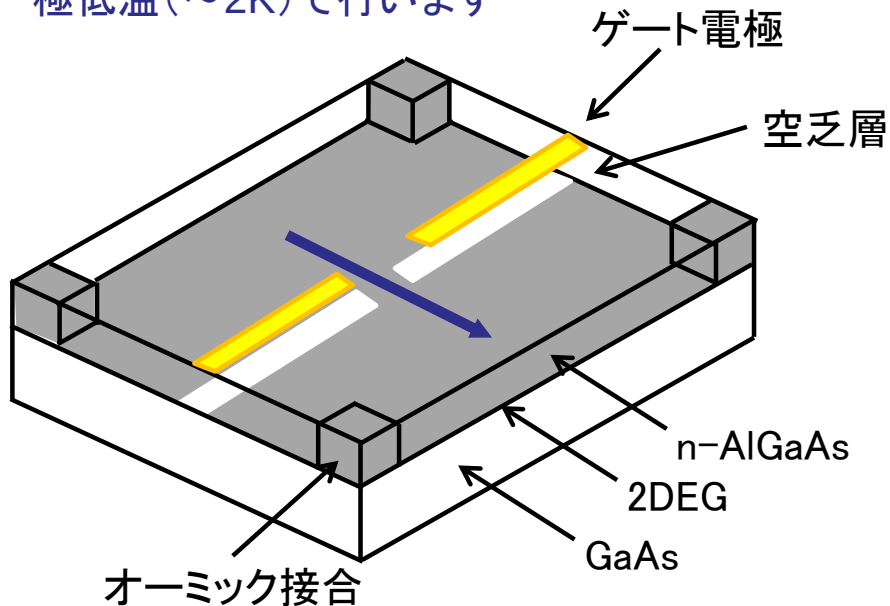
理論計算によって求めた
金細線の原子構造

金のナノワイヤ形成の様子: <http://sc-smn.jst.go.jp/flv1500/fl036904-032.swf>

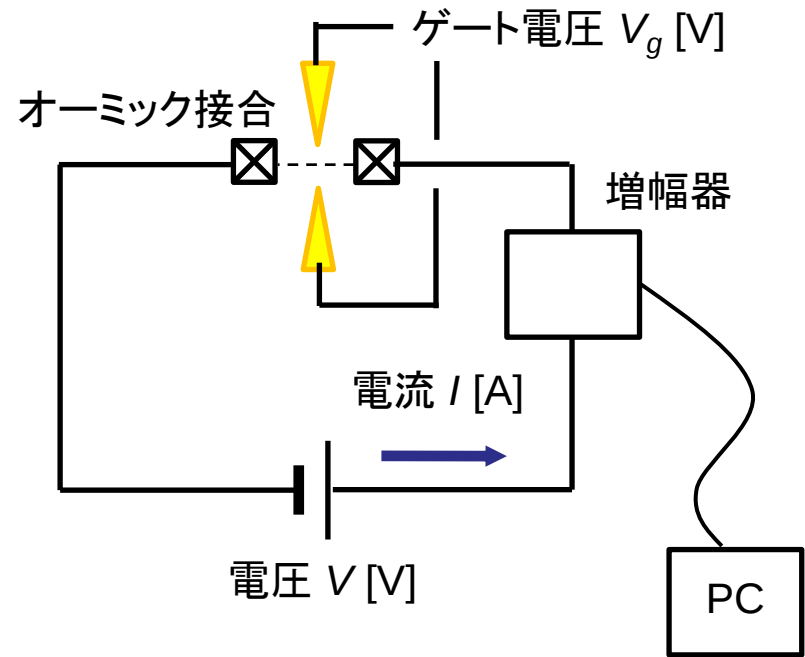
<http://www.youtube.com/watch?v=tiEEfUXcRvA>

半導体量子ポイントコンタクトのコンダクタンス測定

※実験は冷凍機を用いて
極低温($\sim 2\text{K}$)で行います



回路概略

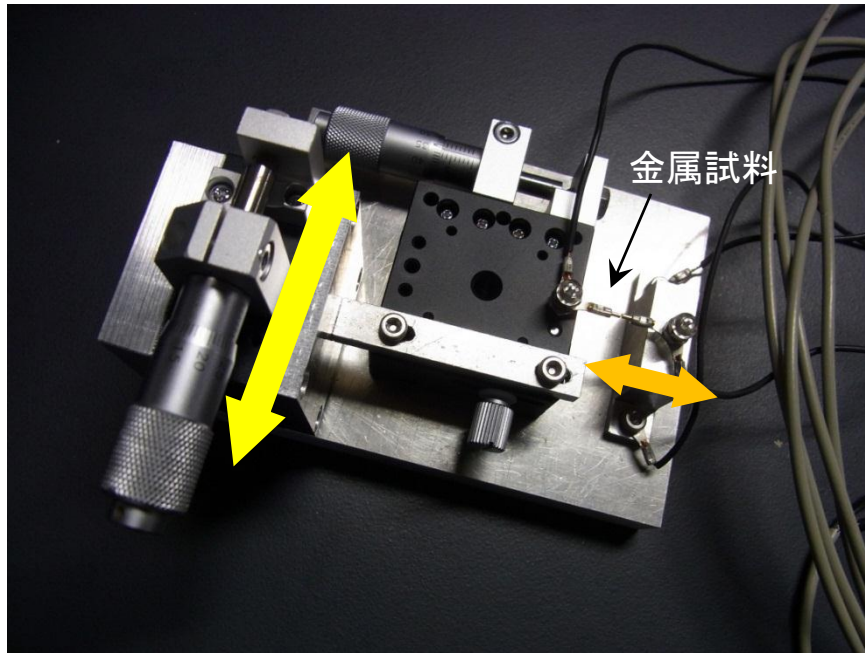


ゲート電極に負電圧を印加して量子ポイントコンタクトを形成
ゲート電圧を変化させながらチャネルを通る電流を測定

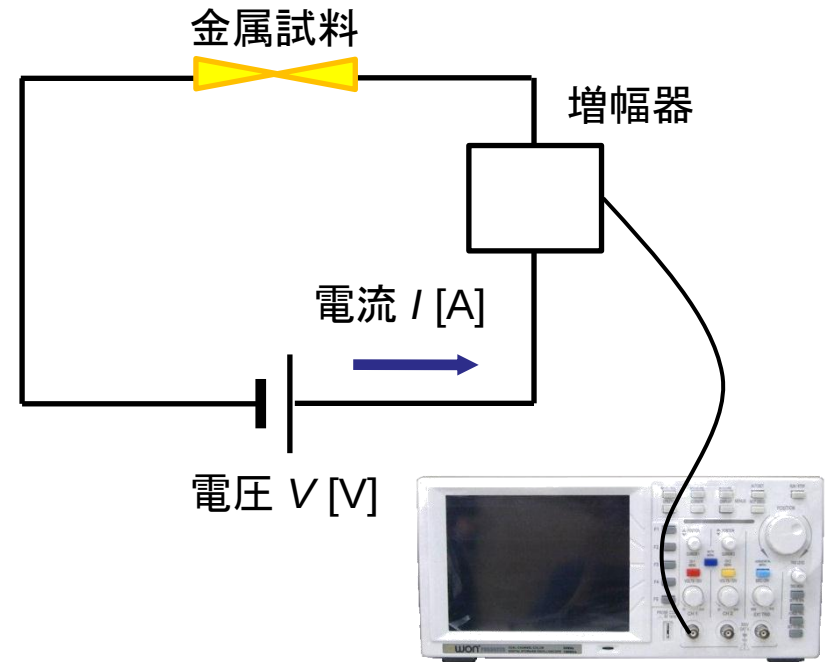
電流の変化の様子をゲート電圧の関数として観測してみましょう！

金属細線のコンダクタンス測定

※実験は室温で行います



回路概略



2つの金属試料を接触させたのち、マイクロメータを用いてゆっくり引き離す
試料に定電圧を印加し、流れる電流をオシロスコープで測定

細線の切断に伴う電流の変化をリアルタイムで観察してみましょう！

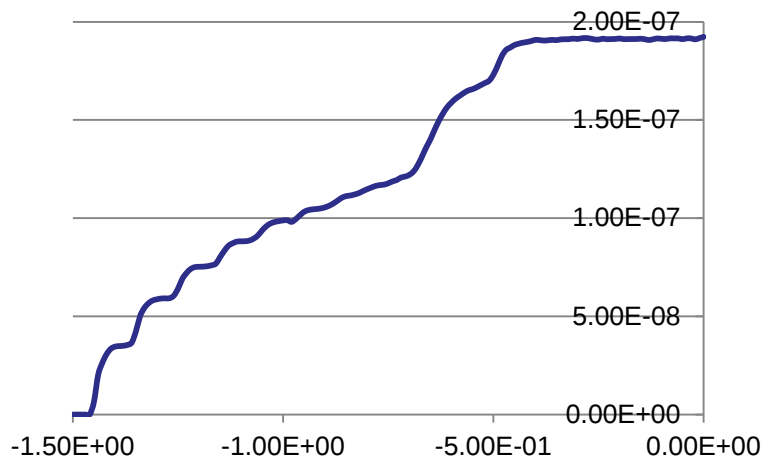
量子化コンダクタンス観測実験

実験の解説と復習

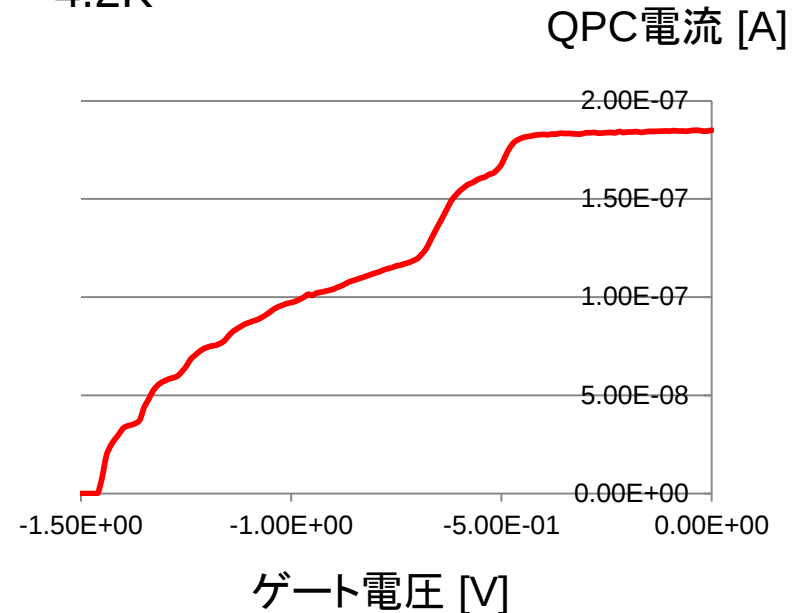
東京大学大学院工学系研究科
物理工学専攻 樽茶研究室 高倉樹

量子ポイントコンタクトの量子化コンダクタンス

1.95K



4.2K



✓ check point

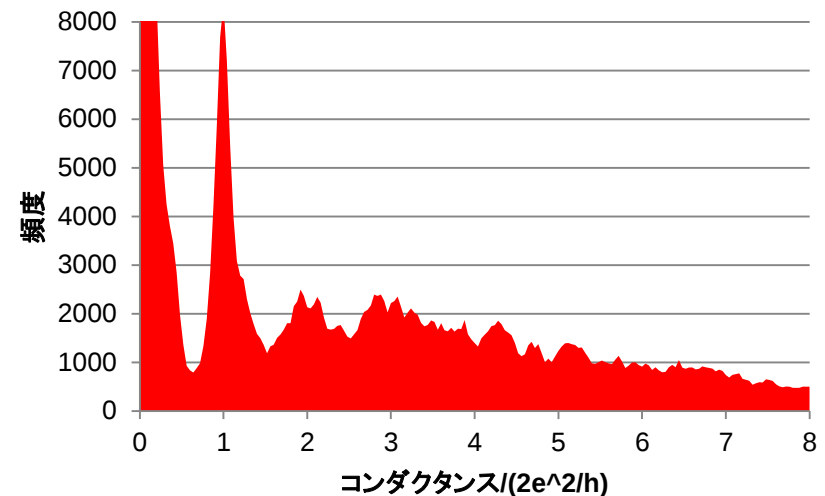
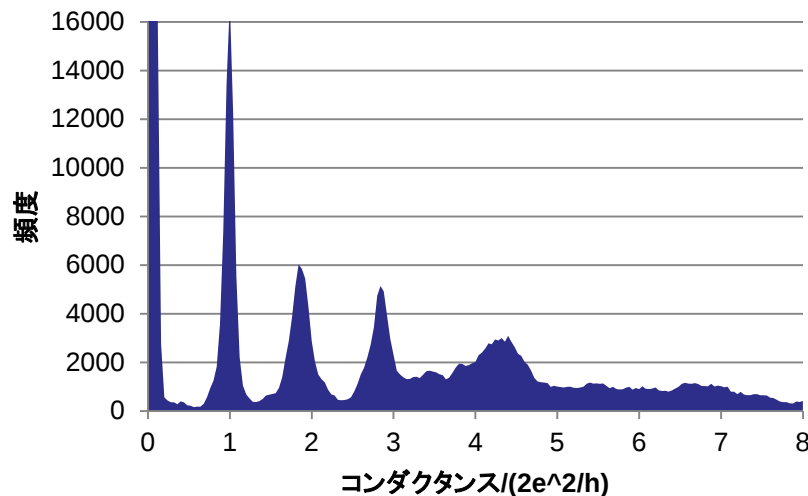
ゲート電圧の関数として電流ステップは観測されましたか？

ゲート電極の間隔によってどのような違いが生じたでしょうか？

温度による特性の変化についても考察してみましょう

金属細線の量子化コンダクタンス

Au 129mV 100us range res=25 (200回) Cu 129mV 100us range res25 (200回)



✓ check point

実時間測定で電流ステップは観測できましたか？

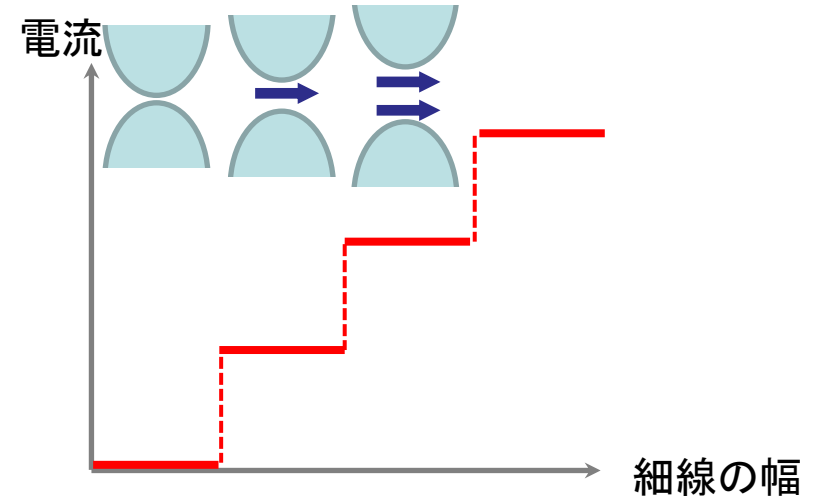
ヒストグラムを描くとコンダクタンスの量子化の様子が明瞭に見られます

材質の違い、磁化の有無による変化について考察してみましょう

二つの実験結果の共通点と相違点

共通点

ステップ状の電流が観測された
ステップに対応する電導度は等
間隔である



相違点

測定温度が全く異なる
半導体試料では温度を上げると
量子化が見えにくくなる



どうしてこのような性質が現れるのでしょうか？

不思議な値・・・コンダクタンス量子

コンダクタンス(電導度、抵抗の逆数)はある一定の値の整数倍をとる

$$G_0 = \frac{e^2}{h}$$

コンダクタンス量子(1/25.8kΩ)

e : 素電荷 h : プランク定数

導出は少し難しい・・・

スピンの縮退している(同じエネルギーをとって上向きと下向きが区別できない)とき、量子化の単位は $2e^2/h$

スピン自由度の分2倍になる

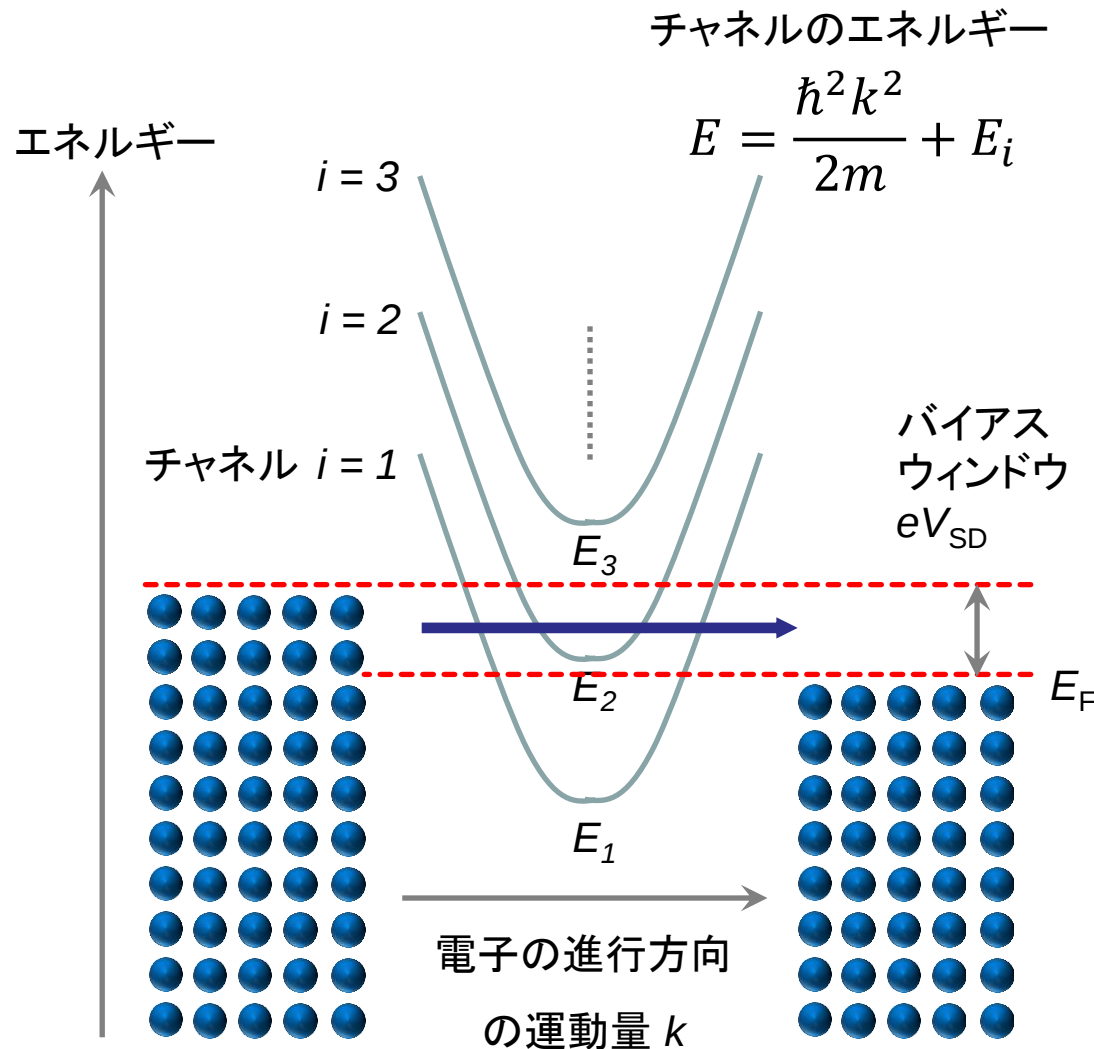
閉じ込めのある系のコンダクタンスは以下の公式で表される

$$G = G_0 \sum_{i=1}^n T_i$$

2端子ランダウアー公式

n : チャンネル数 T_i : 各チャンネルの透過率

エネルギー状態の模式図



バイアスウィンドウに挟まれたチャンネルが電子の伝導に寄与する

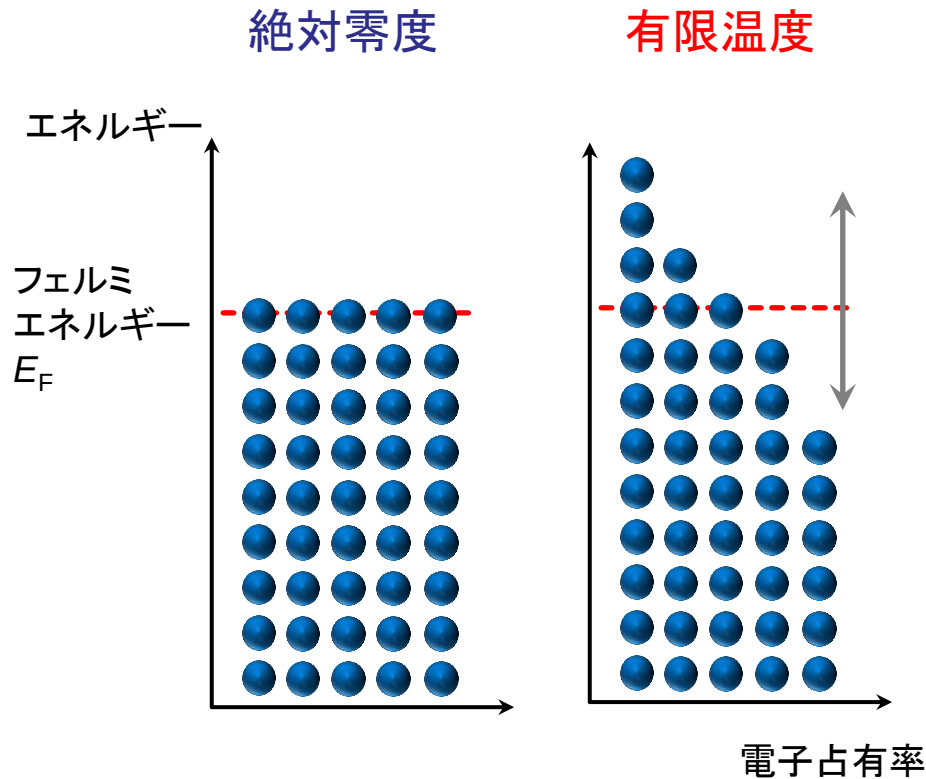
チャンネルの固有エネルギー E_i は閉じ込めポテンシャルで決まる(半導体QPC:ゲート電圧、金属細線:原子配置)

チャンネル間のエネルギー間隔

~1 meV(半導体QPC)

~1 eV(金属細線)

温度による影響



フェルミ分布関数

$$\langle n_\nu(\varepsilon) \rangle = \frac{1}{\exp \left\{ \frac{1}{k_B T} (\varepsilon - \mu) \right\} + 1}$$

温度による
電子状態の広がり
 $k_B T$
(k_B : ボルツマン定数)

$$k_B T = 86 \mu\text{eV} \text{ (1K)} \\ 25 \text{ meV} \text{ (300K)}$$

温度によるエネルギーより
対象のエネルギーが十分大きいときに
量子効果が観測される！

まとめ

電子のド・ブロイ波長(フェルミ波長)程度の1次元構造では電流はステップ状に観測される
(量子細線)

量子細線のコンダクタンス(電導度、抵抗の逆数)は一定の値 $G_0 = e^2/h$ に量子化され、
ランダウアー公式に従う

温度やバイアス電圧によるエネルギーよりも量子化のエネルギーが十分に大きいときに
量子効果が明瞭に観測される

