

量子反射とトンネル効果

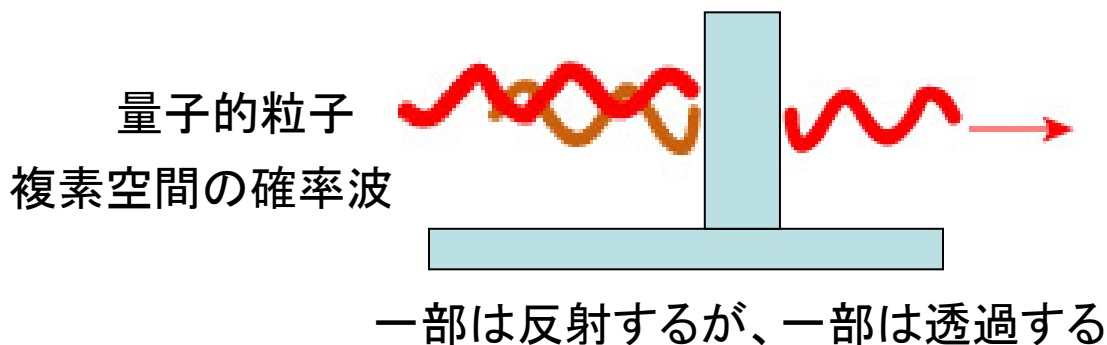
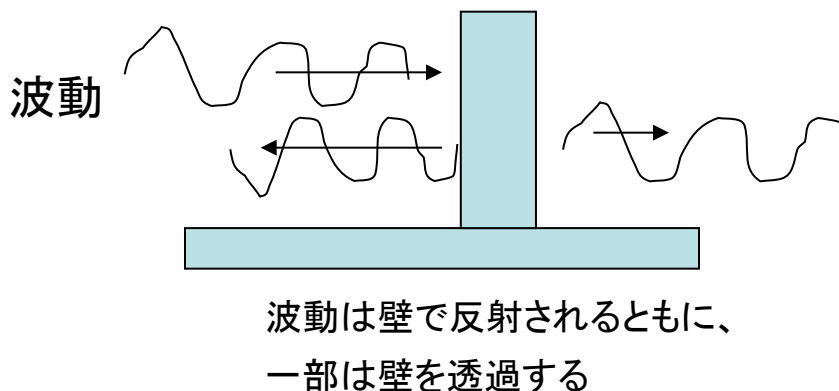
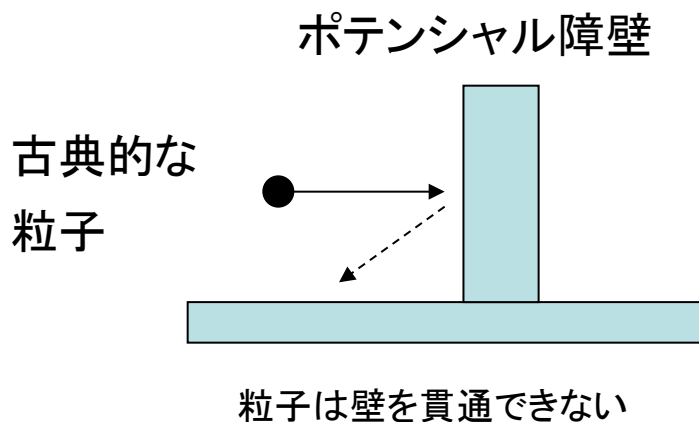
目次

1. ポテンシャル障壁に対する古典物理学、量子力学
2. 量子反射(階段状ポテンシャル障壁)
3. トンネル効果
4. トンネル効果の実例

made by R. Okamoto (Emeritus Prof., Kyushu Inst. of Tech.)

Filename=tunneling-summary150512.ppt

1. ポテンシャル障壁に対する古典物理学、量子力学

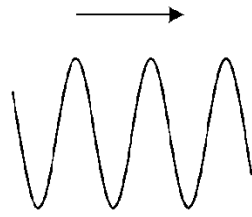
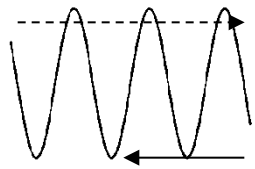


2.量子反射(階段状ポテンシャル障壁)

入射波 反射波
 $x < 0; \psi(x) = A \cdot e^{ikx} + B \cdot e^{-ikx}$

古典的な反射とは異なる!

$E > V_0$ の場合



$x > 0; \psi(x) \propto e^{ik'x},$

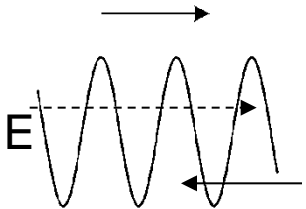
$$k' \equiv \sqrt{2m(E - V_0) / \hbar^2}$$

\mathcal{X} 反射率 > 0 、透過率 < 1

反射率 + 透過率 = 1

しかし、透過波にも障壁の効果

$E < V_0$ の場合



$x > 0; \psi(x) \propto e^{-\gamma x},$

$$\gamma \equiv \sqrt{2m(V_0 - E) / \hbar^2}$$

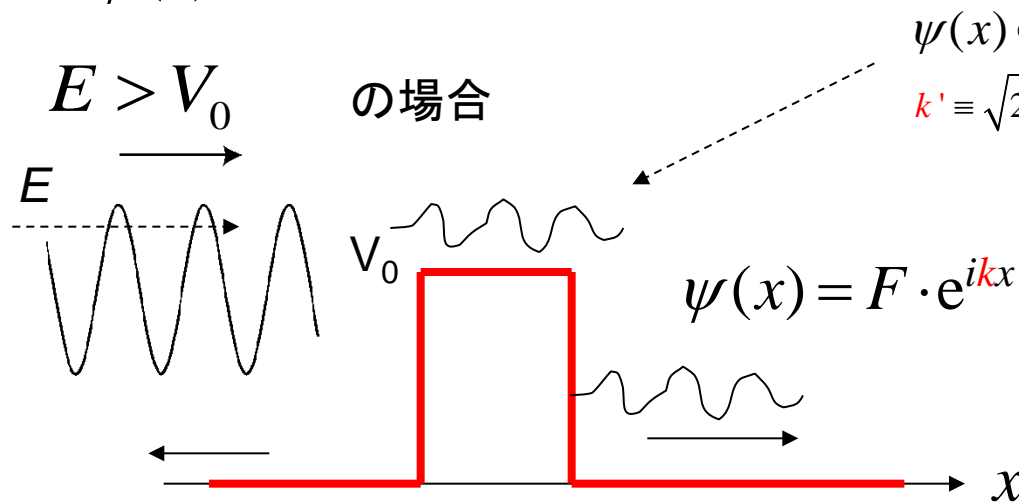
反射率 = 1、透過率 = 0

しかし、波動関数は壁の中に浸透する!

3. トンネル効果

入射波 反射波

$$x < 0; \psi(x) = A \cdot e^{ikx} + B \cdot e^{-ikx}$$

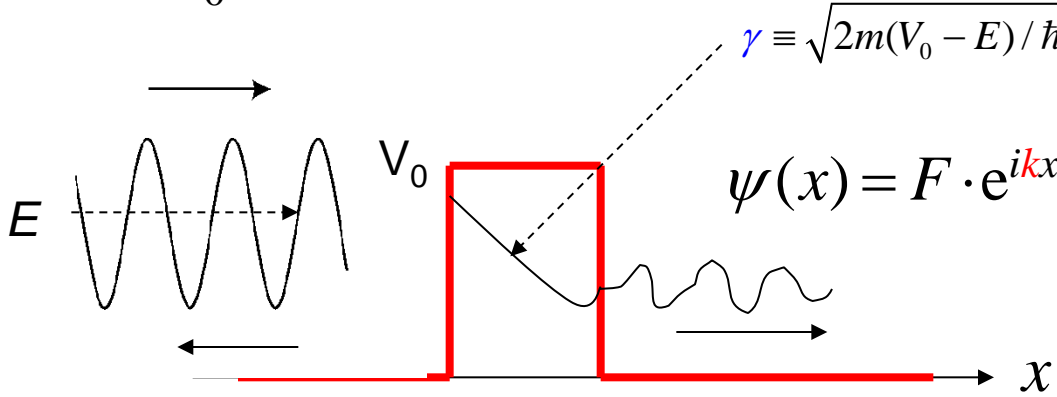


$$\psi(x) \propto e^{ik'x},$$

$$k' \equiv \sqrt{2m(E - V_0) / \hbar^2}$$

反射率 + 透過率 = 1

$E < V_0$ の場合



$$\psi(x) = C \cdot e^{\gamma x} + D \cdot e^{-\gamma x}$$

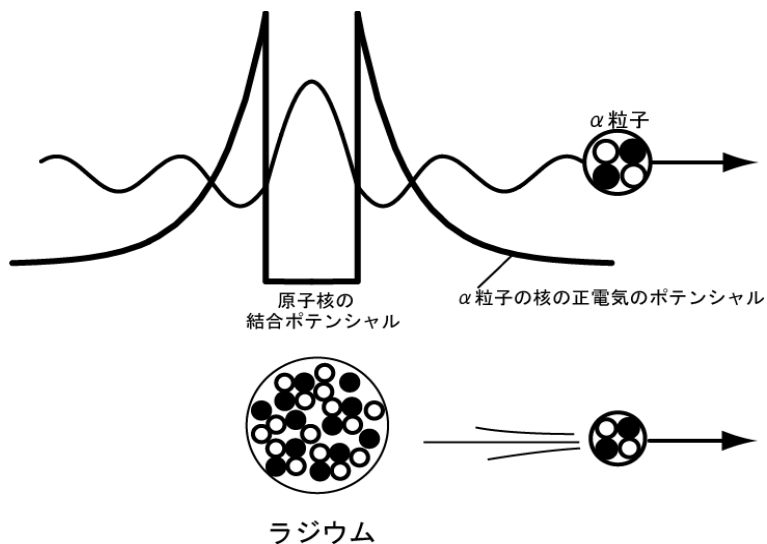
$$\gamma \equiv \sqrt{2m(V_0 - E) / \hbar^2}$$

反射率 + 透過率 = 1

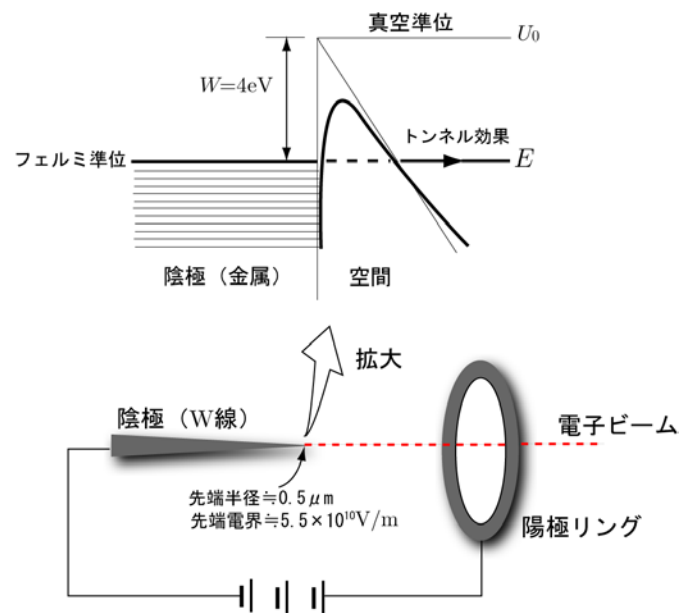
透過率 > 0

4. トンネル効果の実例

(1) アルファ崩壊

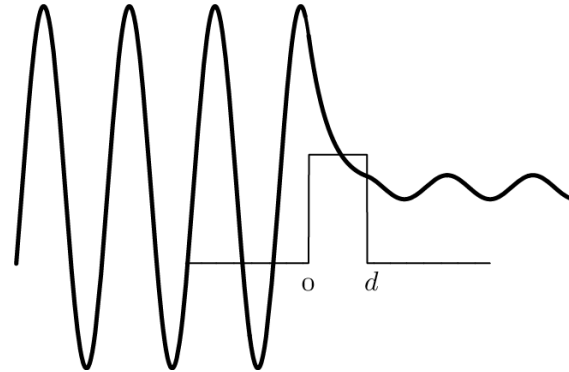
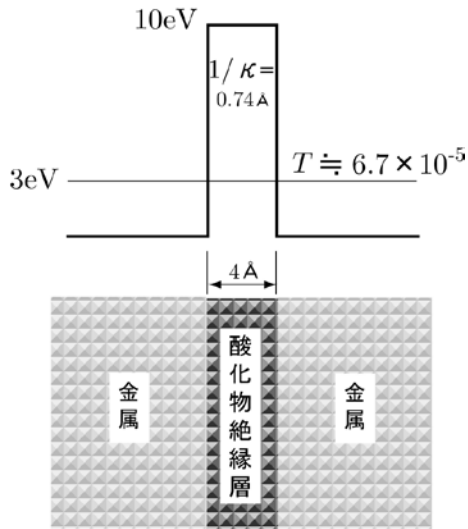


(2) 電界による電子の放出

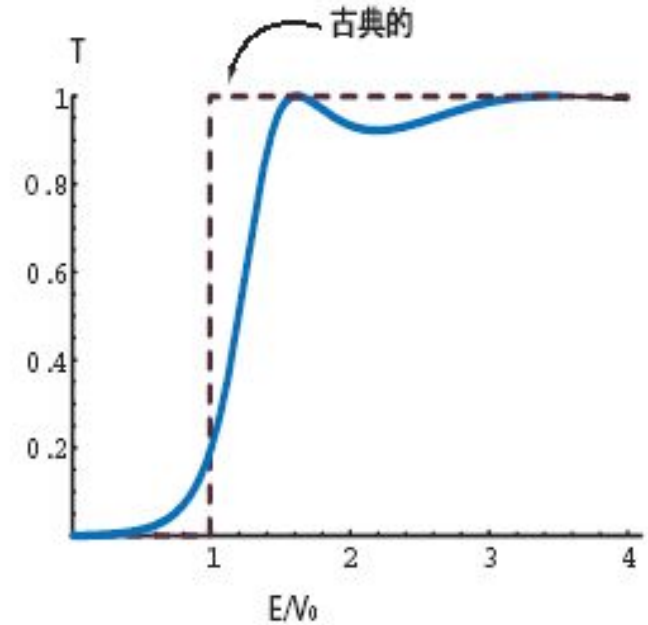


1928年、G.Gamowにより
 α 崩壊がトンネル効果
の最初の例として理解された。

(3) 薄い絶縁層の透過



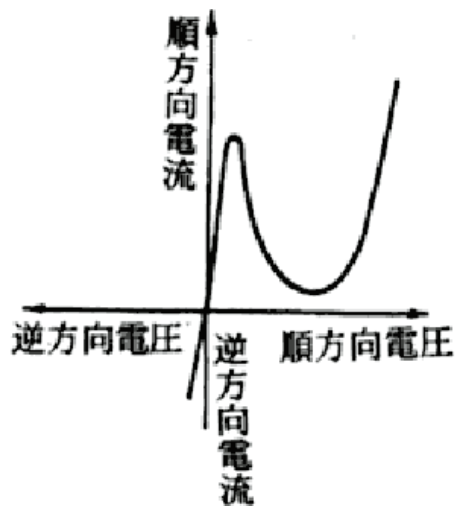
波動関数



透過率のエネルギー依存性

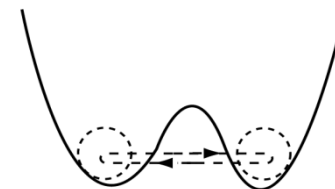
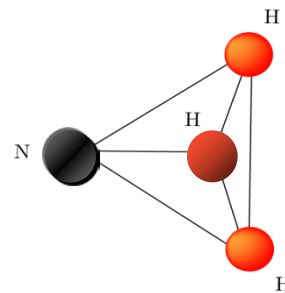
古典的には、粒子の入射エネルギーが障壁のポテンシャルよりも小さいときは、透過率はゼロとなり透過することはできない。しかし、量的には、エネルギーが障壁のポテンシャルより小さくても透過率はゼロとはならず、一部が透過する。

(3)エサキダイオード



1957年に江崎玲於奈氏が発明した。
図からわかるように、順方向に電流を流すと、トンネル効果により、ある電圧領域では電圧をかけるほどに流れる電流量が少なくなるという「負性抵抗」が現れる。

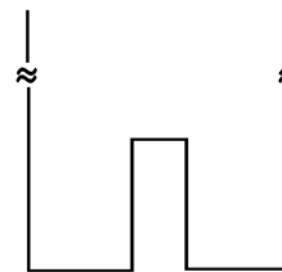
(4)アンモニア分子におけるトンネル効果



(a) Nの上下運動

(b) N原子に働くポテンシャル

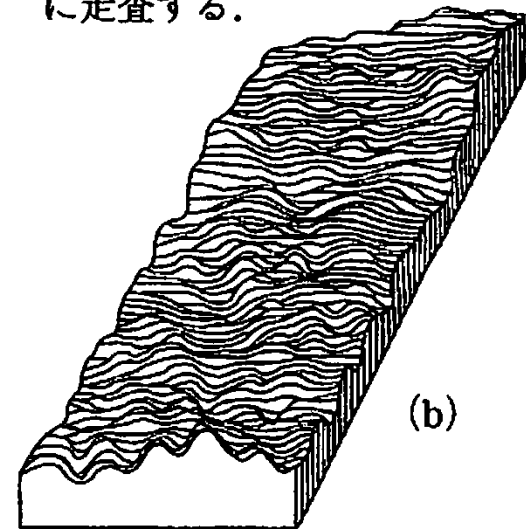
モデル化



トンネル効果の実例

走査型トンネル顕微鏡

金属針を1000万分の1 cm ぐらいの位置まで試料の表面に近づける。1 mV~1 V の電圧を加え、試料面に走査する。



(a) 結晶表面の原子配列

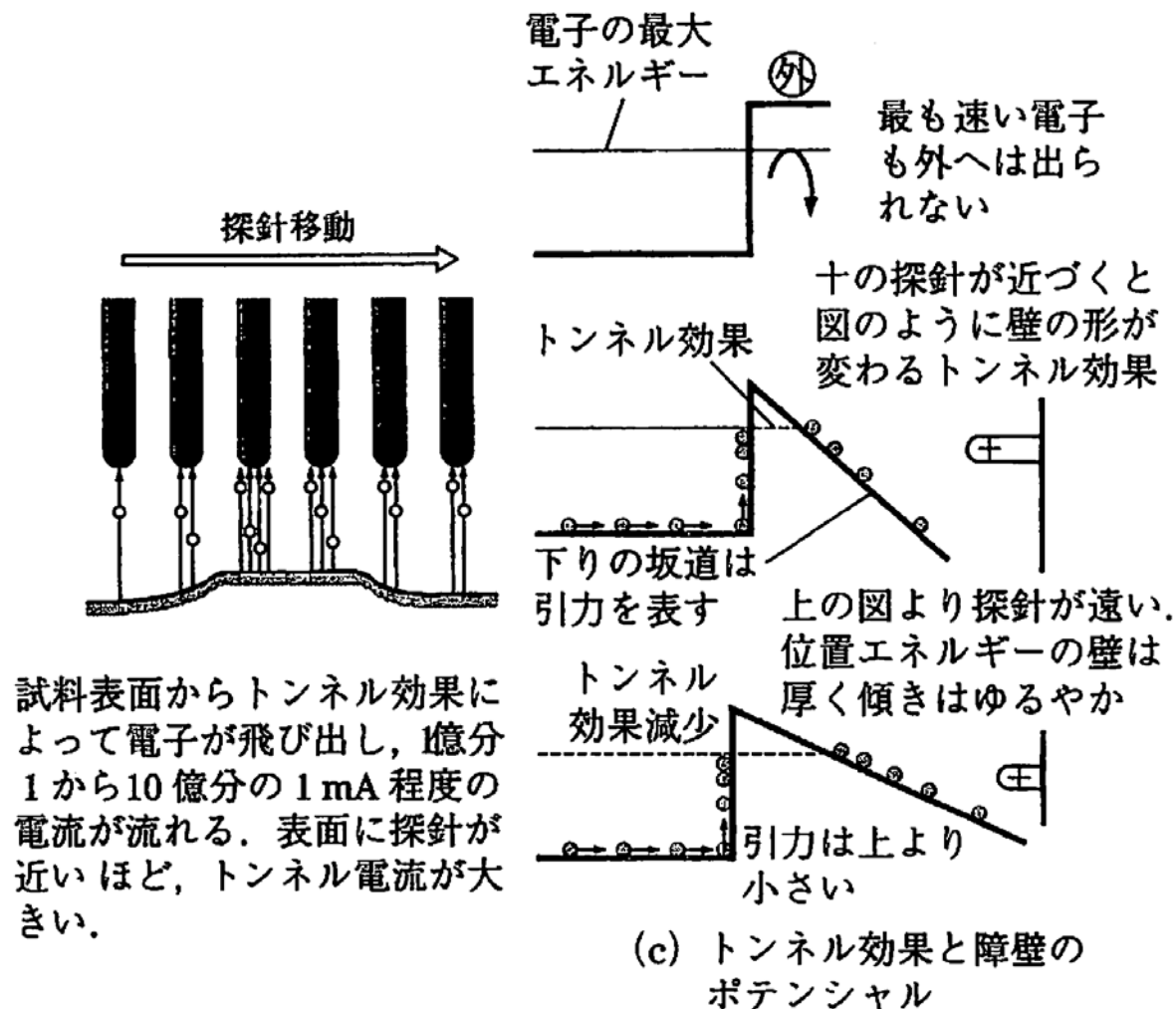


図 3.15 走査型トンネル顕微鏡 (STM)
 (小暮陽三, 絵でわかる量子力学, 日本実業出版社, 1990)

勝本信吾「メゾスコピック系」(朝倉書店)

マクロ量子コヒーレンスに関する実験

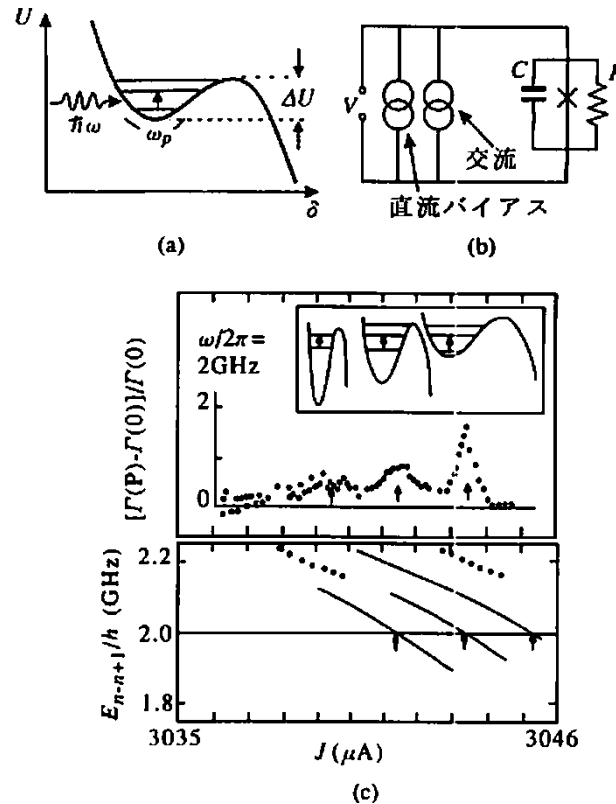


図 9.5 微小接合にマイクロ波を照射することで、ポテンシャル中の位相変数の離散化を調べた実験。(a) 実験の概念図。ポテンシャル中にできる離散準位間隔に相当するマイクロ波を照射してトンネルを補助する。(b) 実験回路。右の 3 素子の並列回路はジョセフソン接合の等価回路。(c) 電流を増やすとポテンシャルの傾きが増加するためエネルギー間隔が変化し、2GHz に一致するとトンネル確率が増加する。矢印が見積もられる一致点。

佐藤勝彦 「宇宙はわれわれの宇宙だけではなかった」

(同文書院 1991 年)

