

低温サブゼミナール 単一電子トンネリング (Single Electron Tunneling)

NEC 基礎研究所 中村泰信

e-mail : yasunobu@qwave.cl.nec.co.jp

1. はじめに

「低温」という分科はどうも曖昧な分類で、学会においても非常に幅広い分野の人々がこの分科に参加しています。この大勢の人達が時間とお金を費やしてまで「低温」に求めるものは何か。それは熱エネルギーをある特徴的なエネルギーより小さくすることにより、今まで見えなかった現象を見えるようにすることでしょう。すなわち温度を下げることによりエネルギースケールの転換を実現しているのです。

物性物理においてエネルギースケールを転換する方法は他にもいくつもあります。例えば電場・磁場・圧力などを加える。あるいは物質合成によるもの、試料のサイズの変化によるものもあります。近年電子ビームリソグラフィなどの微細加工技術の発展によって急速に発展してきたのが、最後に挙げたサイズによるエネルギースケールの転換によって見えてきたもの、いわゆるメゾスコピック系の物理です。

メゾスコピック系の物理と呼ばれているものはサイズにしておよそ $1\text{nm}\sim 1\mu\text{m}$ 程度の大きさの系で研究されています。メゾ (中間) という名のとおりに、量子力学で記述されるミクロの領域と、固体物理学 (もちろん量子力学の上に成り立っている) で記述されるマクロな領域の間に位置しています。この領域では (例えば) 電子は固体中の Bloch 電子として振る舞いつつ、時に量子力学的な波動性・粒子性といった性質を観測量としてあらわに示してくれます。

今回のサブゼミナールではその中でも最近脚光を浴びている単一電子トンネリングという現象についてご紹介したいと思います。この現象では電荷の粒子性がトンネル電流の抑制となって顔を出してきます。電子をひとつひとつ情報として制御するコンピュータなどというものが出来るのは (出来るとしても) まだ遠い未来でしょうが、実験室で電圧源のつまみを回すたびに電子がひとつひとつ「ポコポコ」とトンネルするのを見たときの筆者の感動をお伝え出来れば幸いです。

2. 単一電子トンネリングの基礎 (within orthodox theory)

2.1 微小トンネル接合と帯電エネルギー

トンネル接合のサイズを小さくしていくとその接合容量もその面積に比例して減少します。今トンネル接合に隔てられた二つの電極を考えます。はじめ両電極が中性だったとして電子がひとつトンネルすると接合には e の電荷が帯電し $E_C = e^2/2C$ の帯電エネルギーが蓄えられます。大きな接合では無視することのできたこの帯電エネルギーも例えば接合の面積が

0.1 μm 角になるとおよそ 1K のオーダーになります。そこで温度をそれ以下に下げ熱揺らぎの効果を減らしてやると帯電エネルギーの効果が支配的になり、この場合トンネルを抑制する効果となって現れます。このような効果は 1950 から 60 年代にかけて微粒子を介したトンネリングの研究ですでに気づかれていました。

2.2 Orthodox 理論

1980 年代半ば Likharev らはこの帯電エネルギーの効果をトンネル接合の理論に取り込んで Orthodox 理論と呼ばれるモデルを提唱しました。このモデルには後に述べるような量子揺らぎの効果は含まれていませんが、微小トンネル接合において電子のトンネル確率を計算するときに帯電エネルギーの効果を取り入れその抑制（クーロンブロッケイド）を示し、また接合の表面電荷 q についてのマスター方程式から接合の電流電圧特性を計算しました。1987 年には Fulton らがはじめて単一電子トランジスタを作製し、いよいよ本格的な単一電子トンネリングの研究が始まりました。

2.3 単一接合・単一電子箱・単一電子トランジスタ

Orthodox 理論の枠内では電圧バイアスされた単一接合ではあるしきい値電圧以下ではトンネル電流が流れません。これは帯電エネルギーによりトンネル確率が抑制されたものでクーロンブロッケイドと呼ばれます。また電流バイアスされた単一接合では SET 振動と呼ばれる接合にかかる電圧が電流に比例した周波数で振動するという現象が予言され、観測されています。

単一電子箱と呼ばれる孤立した微小電極にトンネル接合を介して結合したアースとコンデンサを介して結合したゲート電極からなる素子では、ゲート電圧によって電子箱の中の電子数をひとつひとつコントロールすることができます。また単一電子トランジスタと呼ばれる、ソースドレイン間の 2 つの直列のトンネル接合とその間のアイランド電極にコンデンサを介して結合したゲート電極からなる素子では、ゲート電圧によってアイランド上に誘起される電荷 e の周期ごとにソースドレイン間の電流-電圧特性に現れるクーロンブロッケイドが 0 から最大まで変化します。ちょうど電界効果トランジスタのようにゲート電極でコンダクタンスを制御できる三端子素子として動作します。

2.4 SET の応用

SET 素子の応用については大きく分けて 2 つの方向が考えられています。ひとつはアナログ素子として単一電子トランジスタを用いた高感度な電荷計（SQUID による高感度磁束計と対応）、微小トンネル接合列を用いた絶対温度計、単一電子ポンプあるいは単一電子ターンスタイルなどと呼ばれる電子をクロックあたりひとつずつ運ぶ素子を利用した電流標準など、素子を単体として用いる利用法です。もうひとつは素子を集積化して論理回路、メモリなどとして用いようというものです。現在の段階ではまだ動作温度が限られていることや素子間の製造上のばらつきなどからとりあえず前者の単体デバイスから実現されていくものと考えられます。しかしながらこれらの用途は限られた分野のものとなるでしょう。後者の応用にはさらに二つのタイプがあります。ひとつは既存の CMOS の論理回路を単一電子

トランジスタで置き換えるもの、もうひとつは単一電子ロジックと呼ばれる、情報の担い手を電子ひとつひとつとする方法です。ともにシミュレーションによる研究は進んでいますが実現にはまだ相当の技術的進歩が必要とされるでしょう。

すべての応用において最大の課題となっているのがバックグラウンド電荷の問題です。SET 素子は電荷にたいして高感度であるという特性上、例えば基板表面など素子の周辺に存在する電荷の揺らぎなどに非常に大きく影響されやすいという宿命を持っています。いかにこの揺らぎを抑えることができるかということが応用に向けての大きな問題です。

2.5 SET 素子の作製方法

単一電子トンネリングの原理が非常に単純だったことからわかるように、このような現象は電極と微小なトンネル接合(列)とさえあれば材料を選ばずに様々な系で実現します。今までもっとも多く実験されてきたのは電子ビームリソグラフィと斜め蒸着法を用いて作製された Al/AIO_x/Al 接合や、電子ビームリソグラフィを用いて作られた半導体 2 次元電子ガス上のショットキーゲートにより形成されるトンネル接合により電極と隔てられた半導体量子ドットです。両者はサイズにして 100nm のオーダーで、ともにおよそ 1K 以下でしか動作しませんが、Orthodox 理論の実証、超伝導の効果、量子ドット中のエネルギーレベルの量子化の効果などの実験において大変役に立ってきました。

最近ではさらに Si 量子細線の熱酸化や微粒子に STM の探針を近づける方法などにより 77K、300K といったより高温での動作が確認されています。(すでに「低温」ではない!) ここではもはや nm オーダーの微細構造が要求されるようになります。高温動作するすなわち大きい帯電エネルギーを持つ SET 素子を制御性よく作製するプロセス方法を開発することは今後の発展に欠かせません。

3. 単一電子トンネリングと量子揺らぎ (beyond orthodox theory)

3.1 co-tunneling

Orthodox 理論ではトンネル効果として接合を介した最低次の効果のみを取り入れていました(そのためトンネル抵抗 $\gg R_K = h/e^2 = 25.8k\Omega$ が必要)が、その後、より高次の項の寄与も計算されています。最低次のトンネルがエネルギー的に禁止されているときにも、co-tunneling の名前のおりエネルギーの高い仮想的な中間状態を介しながら複数のトンネル過程によって最終的にエネルギーの低い状態へと到達するものです。トンネル抵抗が R_K へ近づくにつれてこのような高次の効果は重要となり非摂動論的な取り扱いが必要となってきます。実験でも co-tunneling の効果はいくつか報告されていますが、単一電子箱における電荷の揺らぎなど、接合を介した量子揺らぎはまだ研究の必要があります。

3.2 電磁場環境の効果

接合に帯電した電荷は接合を介して揺らぐと同時に接合につながれた外部回路を介しても揺らぎます。これが電磁場環境の効果と呼ばれているものです。一番顕著な例は電圧バイアスされた単一接合です。揺らぎを考えない場合電流-電圧特性はクーロンブロックイドを

示すはずですが、実際には線形の特性になってしまいます。これは電子がトンネルすると同時に電源が接合の表面電荷を一定に保つように電荷の再分布をおこなってしまうため帯電エネルギーによるブロッケイドが効かなくなってしまうためと理解できます。ブロッケイドを観測するためにはリード線に大きな抵抗($\gg R_k$)を入れて素早い電荷の揺らぎ(再分布)を阻止する必要があります。

実験の上ではリード線に付随する浮遊容量のために電荷の揺らぎを完全に抑えることは大変困難ですが、最近環境(リード線のインピーダンス)を制御した実験が行われ、環境の効果を量子力学的に取り扱った理論とのよい一致を示しています。

4. 超伝導と単一電子トンネリング

4.1 Bloch 振動

電流バイアスされた微小ジョセフソン接合では電圧バイアスされたジョセフソン接合における交流ジョセフソン効果と双対な効果として、Bloch 振動と呼ばれる電圧が電流に比例した周波数で振動する現象が起こります。この名前はもともと固体(周期ポテンシャル)中の Bloch 電子に電場をかけると電子は実空間上では電流を運ばずに振動するという予想からきています。実際の固体中では散乱などのためこの現象は観測されていないのですが、微小ジョセフソン接合の表面電荷の振動という現象として類似の効果が観測されました。

4.2 パリティ効果

超伝導を勉強すると誰でも一度は「全電子数が奇数だったらクーパーペアを組めなかった電子はどうするの」と考えることでしょう。超伝導体中の全電子数が奇数か偶数か。小さい電極でも 10^{10} 乗個程度の伝導電子が含まれていますが、その中の偶奇の区別が一連のパリティ効果と呼ばれる実験で観測されています。この実験では微小な超伝導電極にトンネルにより電子を注入するときのエネルギーについて調べます。奇数個目の電子を注入するときにはこの電子はクーパーペアを組めずに準粒子となるため準粒子のエネルギー Δ だけ余分にエネルギーが必要となります。実験では単一電子箱に電荷を注入するときのゲート電荷の周期、あるいは単一電子トランジスタを流れる超伝導電流のゲート変調周期が常伝導時の e に対して $2e$ となって現れます。

4.3 ジョセフソン-準粒子サイクル

超伝導電極からなる単一電子トランジスタではクーパーペアのトンネルと準粒子のトンネルとが起こるため、様々な電流の寄与があります。その中で一方の接合をクーパーペアがトンネルし、続いてもう片方の接合を準粒子が二つトンネルするという過程をジョセフソン-準粒子サイクルと呼びます。この現象は見方を変えれば、クーパーペアがコヒーレント振動をしようとしているところに準粒子トンネルという横槍(あるいは観測)が入りコヒーレンスが失われてしまう、というようにとれます。コヒーレントな状態からインコヒーレントな状態へどう移り変わるのか、それはジョセフソンエネルギーと準粒子のトンネル確率の比によっていると考えられます。

5. 半導体量子ドットと単一電子トンネリング

5.1 単一電子スペクトロスコピー

半導体量子ドット中では電子の小さい有効質量によりエネルギーレベルが量子化することがよく知られています。このドット中にトンネル接合を介して電子をひとつ注入するときのエネルギーを調べ、その結果からドット中のエネルギーレベルの分布を調べるのが単一電子スペクトロスコピーと呼ばれる実験です。この実験から強磁場中でのエネルギーレベルの振る舞いなどが調べられ、理論との比較により量子ドット中の電子-電子相互作用の機構などに関して研究が進んでいます。

5.2 可変トンネルバリア

ショットキーゲートによるポテンシャルの変調によって形成されるトンネル接合はゲート電圧によってその高さなどが可変であるという特徴を持っています。これを利用して単一電子トランジスタのトンネルバリアを交互に上げ下げして電子をクロックに同期してひとつずつ運ぶターンスタイルの実験が行われています。また接合の抵抗を広い範囲で変えることが可能なので最近接合を介した量子揺らぎの研究にも用いられはじめています。

6. おわりに

単一電子トンネリングの基本とその発展について紹介してきました。基本となる Orthodox 理論の範囲内での理解はなされていると思いますが、量子揺らぎの効果などについてはまだまだ実験が必要です。また超伝導電極、半導体量子ドットとの結合は大変美しい実り多い結果を与えてくれています。今後の発展が期待されるところです。さらに今回取り上げることでできなかった微小トンネル接合の1次元あるいは2次元アレイなどでも帯電効果による多様な現象が観測されています。

余談ですが、筆者がこの分野に飛び込むきっかけとなったのは常伝導金属の微小リングに流れる永久電流という実験の論文を読んだことかもしれません。一次元リング上の自由電子という量子力学の問題から始まるこの現象のモデルは、いろいろな「固体物理的な」補正を加えつつもまだ実験との完全な対応が得られていないようです。メゾスコピック系においては今まで量子効果が見えたという面での成果が大きかったように思いますが、筆者個人としては今後固体物理のフロンティアとしてのメゾスコピック系という研究が出来ないだろうかというところにも興味を持っています。