



第60回 学位取得者 ・ 第17回 学術奨励賞

学位取得者・学術奨励賞受賞者の紹介

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

ともなが あきよし
朝永 顕成

東京理科大学 理学部第一部 物理学科 2013年度 入学
理学研究科 物理学専攻 2018年度 修士課程修了
理学研究科 物理学専攻 2021年度 博士課程修了

超伝導量子デバイスのための 超強結合現象

私は2013年に理学部物理学科に入学してから2022年3月に博士を取得するまで9年間本学に通っていましたが、思い返すと本当に楽しい学生生活でした。この度理学博士を拝命するとともに、学術奨励賞を頂きましたので、私の博士課程の研究を簡単に紹介させていただければと思います。

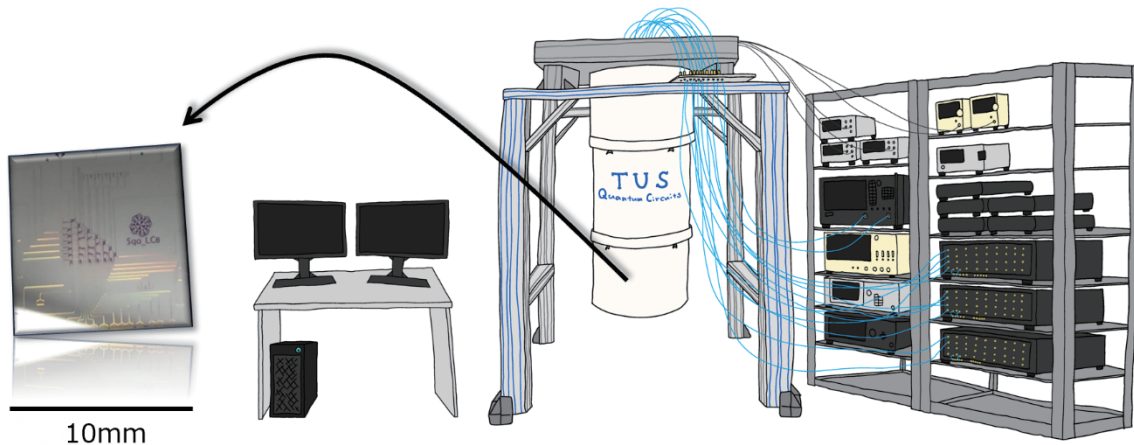
◆超強結合との出会い

博士課程で表題のテーマに取り組むに至ったのは、学部4年次に蔡研究室の門を叩いたとき、新しい量子アニーリングマシンのアーキテクチャを考えてほしいと言われたことに遡ります。その新しいアーキテクチャに「超強結合」という奇妙な現象を使う必要があったのです。これは、R. ファインマン、J. シュウイングー、朝永振一郎にはじまる量子電磁力学の中で、共振器と原子の相互作用を扱う共振器量子電磁力学という分野の話になります。共振器の中に自然原子を閉じ込めた場合、その結合エネルギーは頑張っても共振器中の光子と比べると 10^{-6} 程度です。一方で、超伝導体を使って（ここではAlとNb）人工的に原子のエネルギー構造を模した回路（人工原子）を作り、LC共振器と結合したときは、近年の技術的進歩もあり、結合エネルギーは共振器中の光子と同程度まで上げることができます。こうした系では、自然界ではごく稀にしか起こらない現象が簡単に再現できたり、そもそも今まであり得なかった現象もみたりすることができます。例えば、光子というのはそれ以上割ることのできない粒子ですが、たった1つの光子が2個以上の原子を同時に励起したり、基底状態ですでに光子と原子の間にエンタングルメントがあったり、基底状態で仮想光

子という見かけ上の光子をもっており、それを実光子として取り出したりといったことができると言われていています。上記のような実験を研究員になった現在も続けており、近々成果を報告できると考えています。そしてこのような特異な現象は、単純に物理学的な面白さだけでなく、将来的に新しいデバイスを開発するためのプラットフォームになる可能性を秘めています。

◆博士課程の苦悩と成果

一方、私の博士課程の研究はそれは地味なもので、成果の出ない時期が長く続きました。最初に始めたのは回路理論の勉強と、超伝導回路の設計、そして作製です。回路設計には様々な落とし穴があり、作製にかかる多くのステップに慣れないうちは1つのサンプルを作るのにひと月以上の時間を要しました。ともかく、超強結合デバイスを狙った形で作れるようになるまで修士と博士課程のほぼすべてを費やしたといっても過言ではありません。何かの記事で「実験なんて100回でも失敗したら良い」と書いてありましたが、作製にひと月、測定にひと月かかるので100回失敗するとキャリアが終わるといふのはこの分野ではあるあるで、しかしどんくさい私は、あらゆる落とし穴に嵌り、デバイスが思った通りにできない原因を毎日考えていました。実験の成果が出てきたのは、博士1年になったころです。成果といっても、設計通りなら1本に見えるはずのスペクトルがなぜか2本見えるという奇妙なものでした。しかし私の物理的興味は、この現象に偶然ではない原因があるはずだといいました。我々の量子ビットは、超伝導量子回路で作られます。超伝導体の中では、多数の電子が2つずつのペアを



【図】研究室の実験システム。中央が希釈冷凍機で、右に制御装置が並ぶ。左は実際の超伝導量子回路（8量子ビット）の写真。

組んでフォノン（格子振動が量子化したもの）と結合することによって、量子状態を保持しています。量子状態というと、原子や分子といったごくごく小さな系でしか見られないようにも思われますが、超伝導体という特殊な系は、目にも見える程度の大きさで、驚くべきことに、量子なのです。量子の不思議な性質の一つにトンネル効果があり、量子性を持ったものは、古典系で考えた時にはエネルギー的に超えられない壁も、確率的に超える（確率の染み出し）ことができるというものです。そして、量子ビットを作るのに重要なコンポーネントに、ジョセフソン接合があり、これがトンネル効果を利用しています。ジョセフソン接合は、2つの超伝導体を小さなエネルギーギャップ（たとえば薄い絶縁膜など）で接続します。すると各超伝導体は量子的位相を持っていますが、その両者の位相のずれに応じた電流が流れる、つまりトンネルするのです。これによって超伝導体内の量子的な電流を制御し、量子ビットという形にします。超伝導体の巨視的量子状態では必ず電子がペアを作っていますが、何らかのノイズ、例えば宇宙線などの影響を受けて時々そのペアが壊れて電子が独りぼっちになります。これを準粒子と呼んでいます。これが時々ジョセフソン接合をトンネルして、電子1個分量子ビット中の電荷がずれてエネルギー変化を起こします。スペクトルでは、準粒子トンネリングがマイクロ秒で起こるのに対して、測定にミリ秒かかるため平均して2本に見えるのです。量子ビットのエネルギーがずれる原因は電場か磁場かといった具合なのでそれぞれの場合に対して詳細にモデルを立てたところ、準粒子のトンネルによる効果と実験結果がぴったりと一致したのです。自分の立てたモデルが実験結果を忠実に再現するというのは最高に気持ちの良い瞬間です。この研究成果は、準粒子のト

ンネルメカニズムの1つを明らかにし、超強結合量子ビットの設計指針を与えました。他にも博士課程の研究では、2つの共振器間に世界で初めて超強結合を実装し、私の立てた理論モデルは実験結果を非常にきれいに説明しました。これらの研究は世界を変えるような大発見ではないですが、私にとってはたくさんの学びがあり、今後の研究にも生きてくると感じています。

◆量子コンピュータ研究のこれから

最後に少しだけ超伝導量子コンピュータと蔡研・吉原研の話をしたと思います。私は今でも客員研究員として本学の先生や学生と一緒に研究をしています。24年前に、中村・Pashkin・蔡が1ビットを動かしてから世界のトップは今1000ビットにたどり着き、日本は少し後れを取っていますが量子コンピュータの研究はまだ始まったばかりといっても過言ではありません。【図】は、現在吉原研に置かれている実験システムを表していますが、世界の他の研究室でも設備は大体同じようなものです。まず中央に冷凍機がありサンプルをmKまで冷やしています。そしてマイクロ波や電流電圧等を因加する種々の制御装置（右）、それらを統合する古典コンピュータがあります。量子ビットが乗ったチップは1cm各で10ビット程度ですので、数cm角で数億個以上のトランジスタが乗った現在の古典コンピュータと比べると非常に大きいです。また研究室の設備では10量子ビット程度が制御できますので、この大きさを見るとちょうど真空管で古典コンピュータをつくっていたような時期に似ています。ですから、これからも様々な技術革新が必要で、本学をはじめ日本の研究機関も、まだまだ活躍できる場所がありますので、続報を期待して頂ければと思います。