

#### **SEMINAR REPORT**

# NTTにおける量子情報処理技術への取り組み ~量子センシング~



NTT 物性科学基礎研究所 量子電子物性研究部 超伝導量子回路研究グループ グループリーダ 齊藤 志郎 氏

NTT 物性科学基礎研究所の齊藤と申します。本日はこのような場で講演の機会を与えていただきまして、まことにありがとうございます。本日は、「NTT における量子情報処理技術への取り組み」という題目で、量子センシングについてご紹介させていただきます。

まず、量子情報処理技術に関するイントロダクションとして 基礎的な話をします。続いて、量子センシングの簡単な紹介の 後に、超伝導量子ビット原理を説明し、さらに、超伝導磁束量 子ビットを用いた局所的な電子スピン共鳴の実験について紹介 して、最後にまとめとさせていただきます。

# 量子情報処理技術

これまでの量子デバイスの研究開発イメージは、図1左側に示すように、量子コンピュータの実現に向けて一直線に進んでいるような感がありました。量子鍵配送から始まり、量子シミュレーション、量子中継と開発した後、最終的には量子コンピュータに向けて一直線に進めていくというイメージでした。しかし、近年の開発イメージは少し変わってきています。量子コンピュータだけではなく、量子シミュレーションや、量子アニーリング、量子センシング、量子測定など、様々な応用が提案されて多様な広がりを見せてきました。

そこで、我々としては、量子情報技術における **Key technologies** の実現を目指して研究を進めたいと考えています。 特に最近 **NTT** では、図 **1** 右側に示す量子アニーリングと量子 センサの研究を進めていますが、本日は量子センサについてご 紹介します。

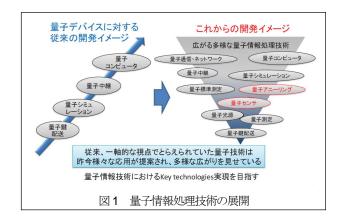
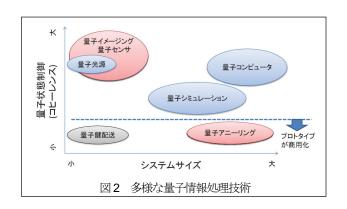


図2は、図1右側の様々な量子情報処理技術をグラフに表したものです。横軸はシステムサイズ、縦軸は量子状態の制御性、即ち、コヒーレンス時間で並べています。

量子状態はとても壊れやすく、この状態をキープするのは大変なのですが、量子状態をいかに長くキープできるかというのがコヒーレンス時間になります。ゆえに、コヒーレンス時間を長く保とうとすると、それだけ技術的には難しくなってきます。また、システムサイズを大きくしようとすると、やはり技術的に難しくなってきます。これら両方の極限にある量子コンピュータの実現はかなり難しく、最終目標と位置づけてもおかしくないでしょう。



これに対して、コヒーレンス時間がそれほど長くなくても良い量子鍵配送、あるいは量子アニーリングなどは、実はプロトタイプが商用化されていて、例えば、量子アニーリングでは、カナダの D-Wave 社が発売している D-wave マシンが 2000 ビットで動作している状況です。

量子コンピュータ実現に向けては、まずはシステムサイズを大きくしてからコヒーレンスの時間を長くする方法と、逆にコヒーレンスの時間を長くしてからシステムサイズを大きくする方法の2つの方向性があります。現在NTTでは、それぞれの方向性で、量子アニーリングと量子イメージング・量子センサの研究を進めています。

## 量子センシング

19世紀に光学顕微鏡が作られて、医学的に重要な細菌の発見が為されて、20世紀に入ってからは、電子顕微鏡によって、さらに小さな、感染症の原因であるウイルスが発見されるなど、センシングは非常に重要な技術となって来ています。現代では、MRI が医療現場で有効に使われようになり、センシング技術のさらなる向上が重要であると考えています。

量子センシングは、我々のグループが手掛けている研究で、 超伝導量子回路を用いて電子スピンの検出を目指しています。 図3に示すように、量子センシングには3つの方法があります。

- 1. 量子化したエネルギー準位を有する量子状態を利用して物理量を測定 原子 原子 原子 アイト
- 振動モード、超伝導量子ビット、スピン量子ビット、原子、イオン等

  2. 量子コヒーレンスを利用して物理量を測定空間的な位相の干渉。

時間的な重ね合わせ状態

3. 量子エンタングルメントを利用して測定感度を向上 GHZ状態等を利用してゼンベルグ限界に到達可

 $|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\cdots0\rangle + |11\cdots1\rangle)$  コヒーレンスと測定時間が重要

図3 量子センシングの方法

1 つ目は、量子化したエネルギー準位を有する量子状態を利用して、物理量を測定する方法です。例えば、図3右上に示すように、原子、イオンなどには離散的なエネルギー準位が存在していて、基底準位|g>と励起準位|e>との間の遷移を吸収分光測定することで、2 つの準位間の周波数 f を測定することができます。このエネルギー準位の間隔が外部の磁場や電場で変化する場合、外部の磁場、電場をエネルギー準位の変化で検出できます。このように、量子化した準位を使って物理量を測定するものを量子センサと呼びます。

どのような系が量子センサとして使われているかというと、原子、イオン、電子スピンなどの天然の系や、ナノメカの振動モード、超伝導量子ビットの状態、スピン量子ビットの状態などの人為的に作った系です。これら人工物でも量子化したエネルギー準位が実現され、外場をセンシングできます。

2つ目は、量子コヒーレンスを利用して物理量を測定する方法です。この中には、空間的な位相の干渉を用いたセンサがあり、有名な例では、光の干渉を利用して重力波を検出したレーザー干渉計重力波観測所(LIGO: Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) が挙げられます。他には、微小な磁場を検出する

ことのできる超伝導量子干渉計も、超伝導リングの空間的な位相の干渉を利用した量子センサであると言えます。

もう一つ、時間的な重ね合わせを使ったものがあります。量子状態というのは、古典的なビットでは0と1の2値しか取り得ませんが、量子ビットでは0と1、その重ね合わせ状態を取ることができます。図3中央に示すように、南極のところ|g>が基底準位0、北極のところ|e>が励起準位1とすると、0と1の重ね合わせがちょうど赤道上の矢印の向きになります。この0と1の重ね合わせ状態は通常そのまま固定しているのですが、外場がかかると赤道上で回転します。その回転する角度を測ることで、微小な磁場あるいは電場の変化を測定します。

3 つ目は、量子エンタングルメントを利用して測定感度を向上させる方法です。例えば、n 個の量子ビットを持ってきて、全てがエンタングルしている状態、|0000>+|1111>は、n 個の独立した量子ビットの場合より外場に対してはるかに感度が高くて、より精密なセンサになるというのが量子エンタングルメントを利用した測定です。

これは、全ての量子測定について言えることですが、先ほどの原子の準位を測ることや赤道を回転する角度を測ることは、量子コヒーレンスが壊れてしまうと難しくなります。量子センシングの感度を良くするためには、できるだけ量子状態を長く保つこと、すなわちコヒーレンス時間の長い量子系が重要になってきます。つまり、量子センシングでは、コヒーレンス時間の長い方が性能が良いということになります。

## 超伝導量子ビット

我々は磁場センサを作ろうと思っているのですが、図4に示すような様々な測定系があります。超伝導磁束量子ビットは、超伝導ループを使った磁場センサになります。超伝導量子干渉計(SQUID: Superconducting quantum interference device)は、すでにコマーシャルベースで出回っています。他には、原子集団やNV中心(Nitrogen-Vacancy Center)があります。



NV 中心は、ダイヤモンド中の電子スピンのことですが、スピン集団を用いた NV 中心集団センサ、単独スピンによる単一NV 中心センサの実例が報告されています。

単一NV中心は、電子スピンが1つなので、非常に空間分解能が高くて細かいパターンを見ることができますが、一方で、電子スピンが1つしかないので感度が落ちます。原子集団は、10の何乗個という多くの原子が集まっていて非常に感度が良いのですが、集団になっていることで空間分解能が落ちます。

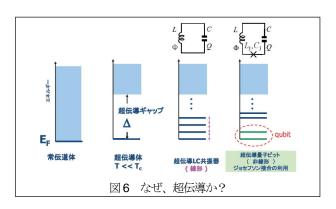
それぞれこのような特徴があり、グラフに示すと図5右のようになります。横軸は空間分解能、縦軸は磁気感度です。原子集団は、空間分解能は低いけれど、感度は非常に高いです。一方、単一の電子スピンによる NV 中心は、空間分解能はとても良いけれど、感度はあまり良くないです。これに対して、超伝導磁束量子ビットは中間あたりに位置していて、それなりの空間分解度と感度を実現しています。

図5左は、このような感度と空間分解能で測れるものの例を示しています。例えば、SQUIDが得意する領域は、脳磁や心磁を測ることができます。一方、ナノの領域、単一の電子スピンの領域となると、蛋白質や生体分子などの非常に微細なパターンを見ることができます。その中間領域では、細胞、物性、スピン流などが見られると期待されています。それぞれ感度と空間分解能によって、計測できるものが異なるのがお分かりいただけると思います。



我々は、超伝導磁束量子ビットを用いた局所的な電子スピン 共鳴の実験を行いました。まず、なぜ超伝導を使うのかという ところから、図6にてご説明します。

先ほど、コヒーレンス時間が重要なことを説明しましたが、常伝導体の金属は、電子がいっぱい詰まっていて、電子のエネルギー準位の上には多くのエネルギー準位があって、少し励起されると、その励起された電子がコヒーレンスを壊してしまうという問題があります。フェルミ面 Er より上に連続的な準位があることは、コヒーレンスの面からは良くない特性です。超伝導体では、フェルミ面の上に超伝導ギャップがあって、ここにエネルギー準位がないことでコヒーレンスを壊す要因がなくなって、好ましい状態になっています。

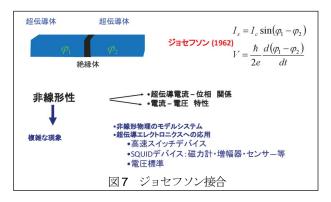


ただし、そこにはエネルギー準位がないので、量子ビットと

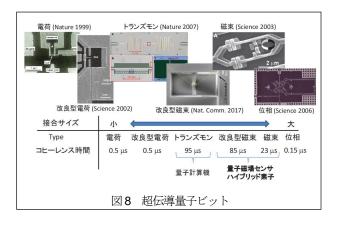
しても使えません。人為的に離散的なエネルギー準位を作る必要があります。そのために、LC 共振器を用います。LC 共振器は線形素子なので、作り出されるエネルギー準位は等間隔になります。量子ビットとして使うためには、下の方の2準位を取り出さなければいけないのですが、準位が等間隔なので、励起すると上の方まで励起されてしまいます。下位の2準位だけを使って、例えば、スピンのアップとダウンを作るためには、エネルギー準位を等間隔ではなくする必要があります。

そこで用いるのが、ジョセフソン接合と呼ばれる超伝導特有の素子です。ジョセフソン接合は非線形性を持っていて、この接合を有する回路では下位の2準位がさらに上の準位とは隔離され、この2つだけを使って人為的なスピンのアップとダウンを作ることができます。ゆえに、このジョセフソン接合は、超伝導を使った量子ビットでは非常に重要になってきます。

ジョセフソン接合は、図7左に示すように、2つの超伝導体の間に薄い絶縁体を挟み込んだ構造になっていて、2つの超伝導体が弱く結びついた素子です。通常の超伝導体とは異なる様相を呈して、流れる超伝導の電流が2つの位相 φ1と φ2の差に対して sin の振る舞いをするという特徴があります。実は、この sin というのが重要で、通常のオームの法則では V=IR と電流と電圧の間は線形な関係にあるのですが、電流と位相の間に sin という線形ではない関係が現れて、非線形性を示すようになります。この非線形性を導入することで、図6で示したような2準位系(量子ビット)を作ることができます。

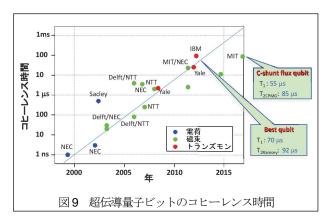


量子ビットとして動作する超伝導量子ビットは、ジョセフソン接合のサイズによって分類することができます(図8)。接合のサイズが小さいときは、電荷がよい量子数となって、電荷の0と1が量子状態の0と1となるような量子ビットができます。また、接合のサイズが大きくなると、位相がよい量子数となって、位相量子ビットが実現されます。



その間に位置するような量子ビットも開発されていて、特に中央にあるトランズモンは、最もコヒーレンス時間が長くて、量子計算機などへの応用が進んでいます。一方で、磁束量子ビットは、コヒーレンス時間がかなり長く、しかも磁場に対する感度があるので、磁場センサやハイブリッド素子などへの応用が進められています。

図9は、これら超伝導量子ビッドのコヒーレンス時間をプロットしたものです。1999年に東京大学の中村泰信教授が初めて超伝導量子ビッドのコヒーレント動作に成功したのですが、そのときのコヒーレンス時間はほんの1nsでした。現在、コヒーレンス時間は5桁も伸びて、0.1msまで到達しています。超伝導量子ビット分野の発展はとても速く、色々な研究者が次々と参入してきているので、コヒーレンス時間も飛躍的に伸びて来ています。

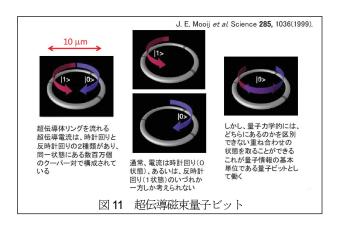


IBM は、すでに5量子ビットのクラウドサービスを展開していて、今年は16量子ビットのベータ版も公開されています。 Google は、9量子ビットの集積回路で量子誤り訂正を実証していて、今年中に49量子ビットを目指すと発表しています。

欧州のデルフト大学は、Intel と組んでいて、現在、Intel が 17 量子ビットのチップを作製して、デルフト大学に渡したと発表されています。最近、中国でも資金を投入して研究が急速に進んでいますが、10 量子ビットのエンタングルメントを実証するまで至っています。以上4つは、ゲート型の量子コンピュータです。一方、量子アニーリングの D-Wave マシンは、すでに 2000量子ビットまで開発が進んでいる状況です。図 10 に示すように、超伝導を利用した量子ビットの集積化はかなり進んでいます。10 年ぐらい前は、どのような物理系で量子コンピュータを実現すれば良いのだろうかと色々と研究が競われていたのですが、最近では、超伝導がかなり有力な候補となってきています。



我々は、超伝導量子ビットの中でも、磁束量子ビットと呼ばれるタイプを使って磁束計を作ろうとしています。図 11 に示すように、超伝導リングに3ヶ所のジョセフソン接合を作製します。



超伝導リングは、その中を永久電流が流れて、磁束をトラップする性質があります。電流が右回りに流れている状態を磁束 0 の状態、左回りに流れている状態を磁束 1 の状態とすると、超伝導では、0 の状態、1 の状態のように、整数磁束の状態しか取れません。そこで、ジョセフソン接合で超伝導の弱いところを作って、外から 0.5 個分の磁束に相当する磁場をかけると、0 と 1 の重ね合わせ状態を作ることができます。この重ね合わせができるというのが、超伝導磁束量子ビットの特徴です。

重ね合わせができると、2 つのエネルギー間をマイクロ波で コントロールすることができ、例えば、左回りに流れている電 流状態にマイクロ波をかけると、右回りの状態に変化させるこ とができます。

図 12 右は、磁束量子ビットのエネルギー準位を描いたものです。外部から印加する磁束に対して量子ビットのエネルギーが変化するので、この変化を使って外部磁場をセンシングすることができます。

図 12 左が実際の素子の写真です。内側のループが 3 ヶ所に ジョセフソン接合を有する磁束量子ビットで、外側のループは dc-SQUID (direct current SQUID) です。SQUID をセンサとし て使って、磁束量子ビットが作り出す磁場を測ります。SQUID も非常に感度の良い磁場センサなのですが、磁束量子ビットの 方が、外側の dc-SQUID よりはるかに感度の高い磁場センサと なります。

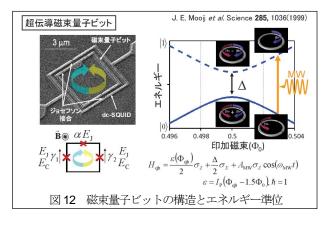
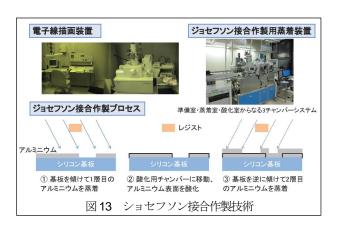


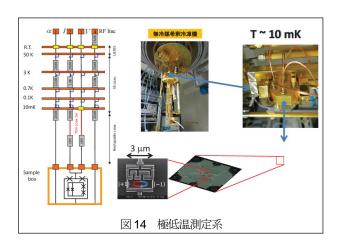
図13に、磁束量子ビットの作製方法を示します。半導体の微細加工技術と同じで、電子線描画装置を使って、非常に微細なパ

ターンを描きます。そこにジョセフソン接合作製用蒸着装置とい うものを使って、超伝導体であるアルミニウムを蒸着します。

作製プロセス (図 13 下) は、シリコン基板の上にレジストがあって、①斜めにアルミニウムを蒸着させると、アルミニウムのパターンができます。②そのアルミニウム表面を酸化させます。③先ほどとは反対側からアルミニウムを蒸着させると、重なりの部分ができ、そこが超伝導体一酸化膜絶縁体一超伝導体のジョセフソン接合となります。こうして、非常に微細な接合を精度良く作ることができます。



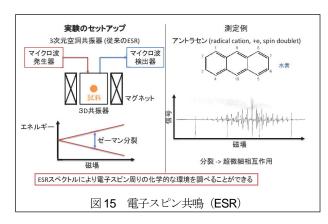
測定では、図 14 示す無冷媒希釈冷凍機を用いて、試料を 10 ミリケルビンという絶対零度に近い温度まで冷やします。図 14 の写真は、10 ミリケルビンの温度のプレートの下に設置されたサンプルホルダーから、試料チップ、磁束量子ビットまでを表しています。サンプルホルダーの回りには、磁場をかけるための電磁石(コイル)が取りつけられています。



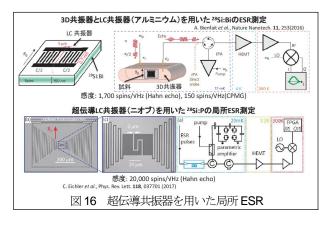
#### 局所的な電子スピン共鳴

通常の電子スピン共鳴 (ESR: Electron Spin Resonance) の 測定系は、図 15 のようになっています。概ねセンチメートルサイズの3次元共振器にセンチメートルサイズの試料を入れて、共振器にマイクロ波を加えて、透過して来るマイクロ波を測ります。入力波が共振器と共鳴しているときだけ透過してきて、シグナルが検出されます。

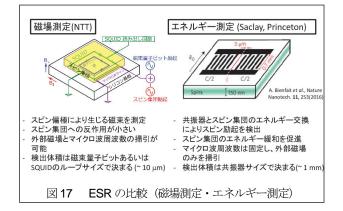
試料には多くの電子スピンが含まれていて、磁場をかけるとスピンのエネルギーが分裂して、その分裂エネルギーがちょうど共振器の共鳴周波数と一致したところでシグナルに変化が現れます。このように、シグナルの変化を見るのが電子スピン共鳴です。



センチメートルサイズの3次元共振器を用いるため、通常の電子スピン共鳴では大きなサンプルしか測ることができませんが、最近、超伝導共振器を用いた局所電子スピン共鳴という実験が行われています(図16)。チップ上に2次元LC共振器を形成して、そのLC共振器の近傍にあるスピン、ここではシリコン中のビスマスの電子スピンを測定しています。フランスのSaclay研究所では、150スピンほどの検出感度を実現しています。シリコン中のリンの電子スピンを検出する同様な実験は、Princeton大学でも行われています。



前述の2例(図17右のエネルギー測定方法)では、電子スピンと共振器が共鳴している周波数でないと測れません。測定できる領域はほぼ1点、磁場をスイープして共鳴したところだけです。それに対してNTTで実験を進めている図17左の磁場測定方法は、スピン集団が作り出す磁場を磁束量子ビットとdc-SQUIDで測定しています。スピンが作り出す磁場自体を測っていて、エネルギーが共鳴する必要がないので、あらゆる周波数、あらゆる磁場でスピン情報が得られます。



共振器と共鳴している周波数だけを測るエネルギー測定と比べて、スピン偏極によって生じる磁場を測定する我々の手法は、幅広い周波数領域の測定に適しています。また、共振器がミリメートルサイズなのに対して、磁束量子ビットはマイクロメートルサイズなので、非常に高い空間分解能が得られます。

測定に用いた試料はエルビウムをドープしたYSO単結晶で、 実際に測定したのはエルビウムの電子スピンです。エルビウム は特殊な原子で、核スピンは0と7/2の2種類があります。図 18に示すように、核スピン0のものは、磁場をかけても電子ス ピンがゼーマン分裂するだけでシンプルなエネルギー準位を示 しますが、7/2のものは電子スピンが核スピンと相互作用して、 とても複雑なエネルギー準位を示すことが知られています。

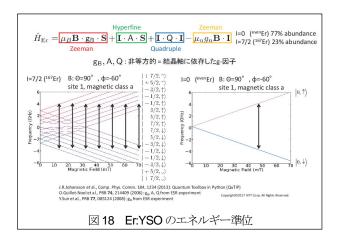
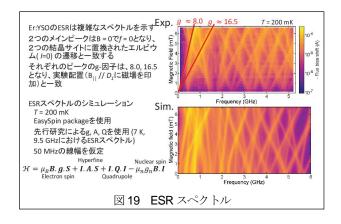


図 19 は、測定結果です。横軸が周波数で、縦軸の外部磁場をスイープすると、複雑なエネルギー準位間の遷移に相当する 共鳴が観測されます。理論値からのシミュレーションをよく再 現していて、我々の磁場測定 ESR が確かにエルビウムの電子 スピンを測れていることがわかります。



NTTの磁束量子ビットは、Saclay 研究所や Princeton 大学の共振器と比べて、検出体積が小さい、すなわち空間分解能が高いという結果が得られています。感度と検出体積には破線で示すようなトレードオフの関係があり、両特性を考えると磁束量子ビットは非常に優れていると言えます。今は500個ほどの電子スピンが検出できていますが、将来は単一電子スピンが検出で

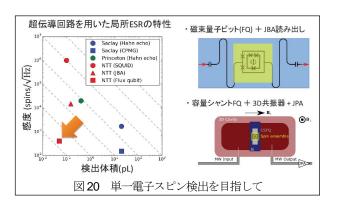
きるところまで感度を上げる予定です。そのためには図 20 右

に示すような方法で、量子ビットのコヒーレンス時間を延ばし、

測定を高速化する必要があります。

図20左は、検出体積と感度の関係をプロットしたものです。

それから、検出器をチップ上にアレー化した2次元イメージングも考えていて、検出器を並べて、その上に載せた試料のスピン 共鳴イメージングなどができたらおもしろいと考えています。



## まとめ

以上まとめますと、量子センシングについて、超伝導量子回路を用いて局所的な電子スピン共鳴を測定し、500 スピンまでの感度を達成したことをご紹介しました。

量子センシングは、我々のグループが国立情報学研究所、中国科学院との共同研究で進めているもので、JST、CREST の支援を受けています。

以上、ご清聴ありがとうございました。

本講演録は、平成29年11月24日に開催されたSCAT主催「第102回テレコム技術情報セミナー」のテーマ、「量子コンピュータの動向」の講演内容です。

\*掲載の記事・写真・イラストなど、すべてのコンテンツの無断複写・転載・公衆送信等を禁じます。