

踊るパスワード ～Behind the Buzzword(3) 量子コンピュータ(3):

量子ビットを初期化する ～さあ、0猫と1猫を動かそう

<https://eetimes.jp/ee/articles/2006/23/news034.html>

今回のテーマはとにかく難しく、調査と勉強に明け暮れ、不眠に悩み、ついにはプロッホ球が夢に出てくるというありさまで。ですが、とにかく、量子コンピュータの計算を理解するための1歩を踏み出してみましょう。まずは、どんな計算をするにも避けて通れない、「量子ビットの初期化」を見ていきましょう。

2020年06月23日 11時30分 更新

[江端智一, EE Times Japan]



「業界のトレンド」といわれる技術の名称は、“パスワード”になることが少なくありません。“M2M” “ユビキタス” “Web2.0”、そして“AI”。理解不能な技術が登場すると、それに“もっともらしい名前”を付けて分かったフリをします。このように作られた名前に世界は踊り、私たち技術者を翻弄した揚げ句、最後は無責任に捨て去りました——ひと言の謝罪もなく。今ここに、かつて“AI”という技術は存在しない」と2年間叫び続けた著者が再び立ち上がります。あなたの「分かったフリ」を冷酷に問い詰め、糾弾するためです。⇒[連載バックナンバー](#)

あの小説に出てきた「トンネル効果」を考え直してみる

前回、量子井戸について記載した後、複数の読者の皆さんからメールを頂きましたが、その中で、私がショックを受けたフレーズは「化学の学生は一次元の井戸型ポテンシャルの方程式が解けないと3回生になれず留年になってしまう」でした。

「化学？ 力学(量子力学)ではなくて？」と思いながら読んでいたのですが、よく考えてみれば、化学とは、分子レベルで、物質をくっつけたり引き剥したりして、新しい材料や医薬を創成する技術の学問です。

化学専攻の学生が、量子レベルの振る舞いについて、シュレーディンガー方程式レベルの知識を持っていても不思議ではありません。しかし、ここで重要なのは、量子井戸における量子の確率的存在*)が、「高度な専門的知識」でなく、「大学の一般教養のレベルの知識」として取り扱われている、という事実です。

*) たった一つの量子の粒がさまざまな場所に同時に存在する、という、例の「気持ちの悪い現象」のことです。

私、「量子コンピュータの原理なんぞ、難しいから理解できなくてもいいんだ」と公言して、この連載を続けていますが—— 大学3年生の段階でシュレーディンガー方程式を理解している現役大学生と、その卒業生が、この日本に山ほど存在していると思ったら—— 恥ずかしさで、床の上を転げ回りそうになりました。

その数、推定100万人*)以上——

*) 日本の労働人口の3割を理系として、さらにその中の100人中5人(物理、化学、電気、原子力、地学(宇宙))程度と見積って、ざっくり、108万人)

「ふっ、あの江端にとっては、この程度の話が難しいんだ」と、日本中の108万人から冷笑されていると思ったら「この連載止めようか」と真剣に考えてしまいました。しかし、逆に言えば、日本の労働人口の98.5%は私の味方である、とポジティブに考え直すことにしました。

□

「トンネル効果」——前回お話しした、エネルギーレベルの低い量子が、高いエネルギーの壁を通り抜ける現象——を、最初に知ったのは、小学生の時に読んだ、故小松左京先生の小説「日本沈没」でした。

“小学生”って、『江端、またホラ吹いているだろう』と思われるかもしれませんが、これは本当の話です。

私、小学生の頃に、小松左京先生の本やら、他のSFの話やらをごちゃまぜにした、荒唐無稽な雑文(本人は小説と言いつ張っていましたが)を書いていて、しかも交換日記(そういうものがあつたのですよ、かつて)で、それを友人に見せていたという「黒歴史」があるのです(ちなみに、当時は、まだ、「セイバー」だの「サーバント」だの、「ダークフレームマスター」などというものは存在していませんでしたが)

今回、その小説「日本沈没」の中のでてくる「トンネル効果」の下りをもう一度読みたくなくて、Amazonの電子書籍を購入してしまいました(詳しくは、[筆者のブログ](#)をご一読ください)。

そんな訳で、20年ぶりくらいに、その「トンネル効果」が出てくる部分を読んでみたのですが、「んー、この設定、ちょっと厳しいんじゃないかなあ」と思いました。

「トンネル効果」という現象は、非常に微小な世界において発生する物理現象というイメージがありますが、量子力学は、古典力学の全部を包含するものです。ですから、海底のマントル層であろうが、地上の壁であろうが通用する「効果」です。

そこで、この機会に「人間が壁を通り抜ける確率」の計算を試みてみました。

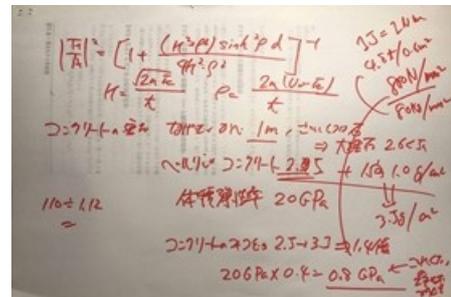
どうせ壁を使うのであれば有名な壁がいいなあ、と考えて、最初はイスラエルの「嘆きの壁」で検討を開始し始めたのですが、『政治、宗教、野球、恋愛については、人と議論してはならない』という私のモットーを思い出し、今回は、どこからもテロを受ける可能性のない「[ベルリンの壁](#)」に変更しました。

まずは、ベルリンの壁を通り抜けるためのエネルギーの計算(仮説)を行ってみました。

コンクリートの密度を2.5、人間を1.0とすると、壁に損傷を与えることなく壁を通過するには、壁の密度は通過の瞬間2.5→3.5に変化することになります。壁の密度変化率を0.4(=1-3.5/2.5)として、コンクリートの体積弾性率を20GPaとすると、壁の単位面積あたりの圧力は20x0.4=0.8GPa=800N/mm²(ざっくり、1mm²当たり80kgの圧力)となります(ただ、これはコンクリート固体表面での圧力計算であり、コンクリートの中の3次元空間移動中(?)の圧力と同じ扱いができるかには疑問が残りますが、面倒なのでこのまま話を進めます)。

次に、壁を通り抜ける物体である「私」の運動エネルギーの計算を行いました。

私の体重は、現在67.5kgなので、これを長さ1m、面積0.0675m²(=26cm x 26cm x 100cm)の角材(成分は水)と見たてて、この角材をベルリンの壁に突き刺していくというイメージに変換してみました。この場合、54ギガジュール(TNT火薬1トン分強)のエネルギーが必要という計算になりました。この値が、エネルギー障壁V₀となります。



ちょっと、この値、大きすぎるんじゃないかなー、と思い、実際のビル(20階立て)に使われる火薬を調べてみたところ、ざっくり8.4ギガジュール、TNT火薬0.2トンくらいでした。

ベルリンの壁に私を突き通すのに、ビルを6棟破壊するほどのエネルギーがいるかな? とも思ったのですが、コンクリートを「爆破」するのではなく「コンクリートの壁を破壊せず、その形状を1mmも変化させることもなく、私の体を力づくで壁の中にねじ込む」とすると、その位のエネルギーは必要かもしれないと思い、計算をそのまま続行しました。

ベルリンの壁dは2.5メートルくらいの厚さがあります。今回は、私が、全力疾走(歩行速度の約3倍の11km/h(=秒速v=3.0[m]程度)で、壁に激突をくりかえすものとししました。私の体重mは67.5kg だから、運動エネルギー1/2mv²として計算すると、運動エネルギーEは303.75ジュールとなります。

さて、ここにV₀, m, E, dの値が出そろいましたので、これを、壁を通り抜ける(トンネル効果)の確率の式に放り込んでみました(勉強させて頂いたサイト(動画)は[こちら](#))。

といっても、ディラック定数自体が、10⁻³⁴というすごい桁数で、電卓やエクセルやプログラム(C/C++, Go)で取り扱うことができませんでした。ですので、lim x→∞の時sinh(x)→1/2 x exp(x) = 0.5 x 10^{0.4343x}と見なして、手計算を強行しました。

今回は、前半に、量子コンピュータに関する日本人の意識や、量子コンピュータ技術開発の進捗、課題となっている技術の中の一つである冷却技術について、後半では、前回お話しした量子コンピュータの中でも、私の頭でギリギリ理解できる(?)電子を使った「量子ドット方式」の、現時点での実装方法を中心にお話をしていきたいと思います。

*) [Tさんツッコミ!] 量子ドット方式が理解できれば、超伝導方式や冷却原子方式、光方式なんかも理解できると思いますよ。

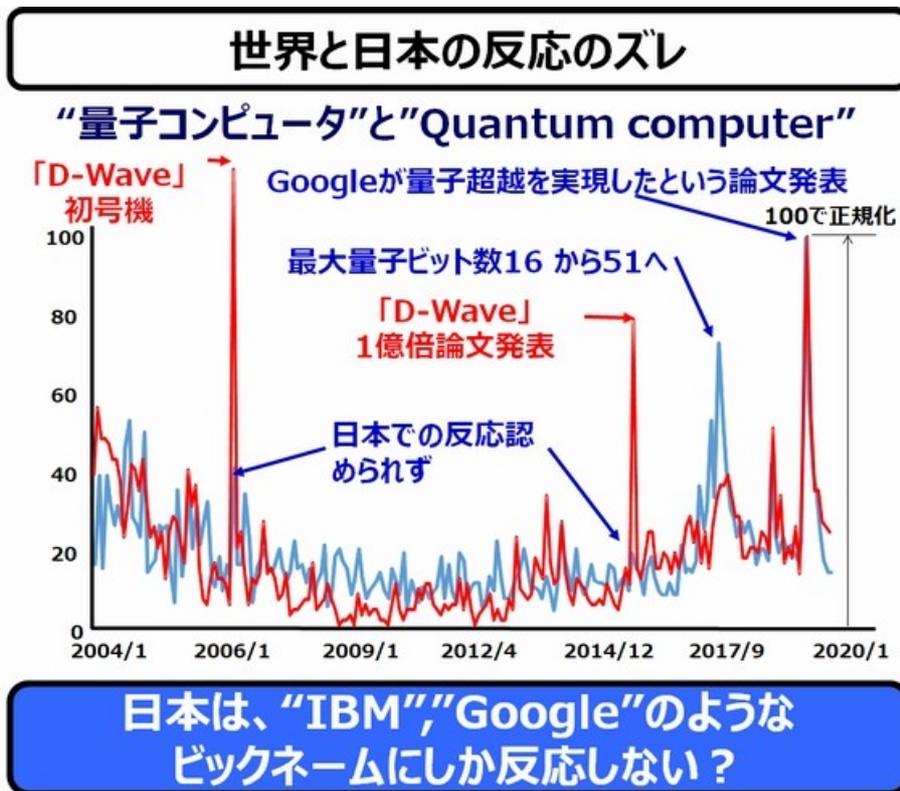
量子コンピュータの論理的、数学的な説明は、ネットを検索するだけでも相当数ヒットしますが、それに比べると、実装方式についての説明は、本当に少ないです。

この資料の少なさに困っていたら、前回から監修して頂けることになりました「量子コンピュータ大好きなTUさん、通称『量オタのTさん』」から、10以上の論文やら資料やらを送って頂きました。正直、この1カ月の週末は、この資料を読み解く作業に費やされたといっても過言ではありません。

□

前回「量子コンピュータ」の記事に関する、過去15年ほどのトレンド分析を行ったのですが、Tさんから、「海外と日本では、反応が違うようです」との指摘を受けました。

そこで今度は、前回同様、Googleトレンドを使って、「Quantum computer(量子コンピュータ)」という言葉を入れて、世界と日本とのニュースヘッダの見出し数の比較を行ってみました。



はっきりしたことは、“D-Wave”に対する、日本人の反応の薄さです。はっきり言えば、私たち日本人は、“IBM”とか“Google”とかのビッグネームが付いてこない、興味を示せないようです。

これは、前回お話しした“バズワード”に見られる、技術的理解なしにその技術を信じさせる効果(技術に投資する)が、違う方向に働いているように見えます。一言で言えば、“D-Wave?何それ? ミュージシャン?サーフィンボードの会社?”てなもんです。

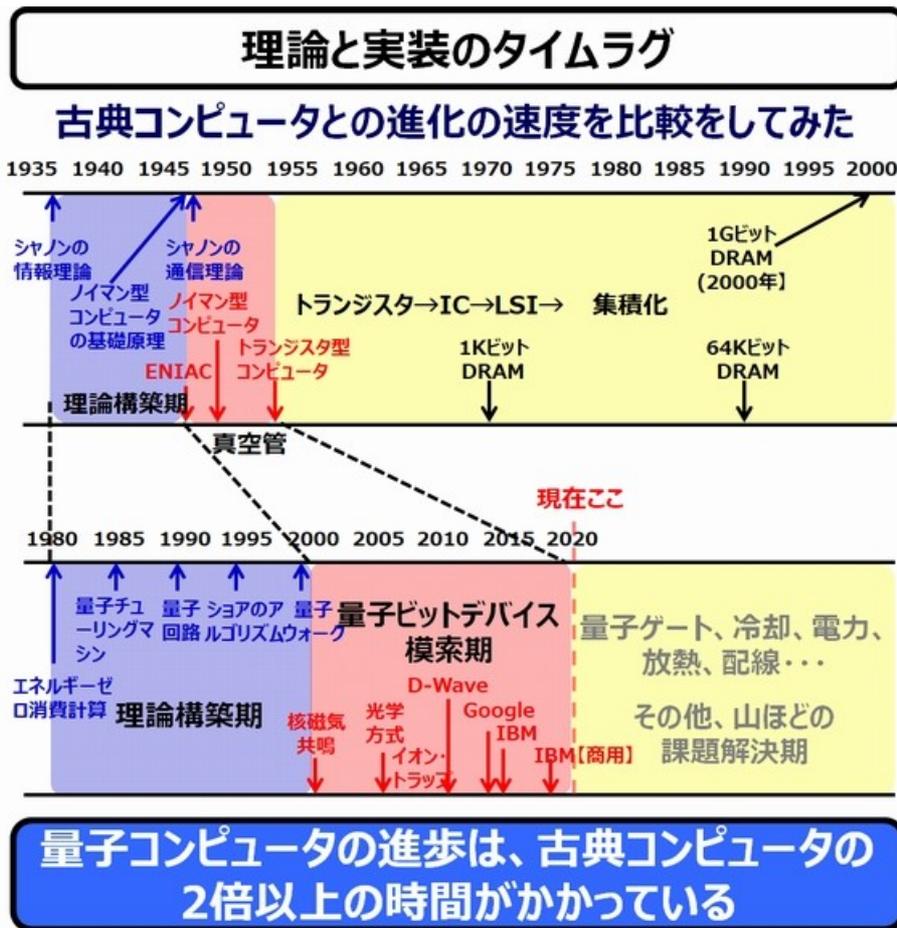
未知の技術に対して、ある種の権威を必要とするのは人間としての性(さが)ですので、批判には当たらないと思いますが、しかし、日本人の「量子コンピュータ」に対する興味や理解が、世界と比較して、かなり低いレベルにあるという状況は認めなければならないと思います。

もちろん、これは、「良い」とか「悪い」とか言う話ではありませんが、私を含めて日本人は「完成したもの/完成が保証されたもの」にだけに投資しようとする傾向がある、という(主に海外からの)批判は、上のグラフを見ている限り、的を射ているように思えます。

特に、私は、研究現場のフロントで、「費用対効果」を理由に、基礎的研究のプロジェクトが消えていったのを、数多く見てきました*)。

これについては、「[エンジニアの心を殺す者たち](#)」をご一読ください。

その一方で、日本や世界を問わず、私たち一般人の「量子コンピュータ」に対する、興味の小ささは、それなりに仕方がないのかもしれませんが。というのは、「量子コンピュータ」は、現在のコンピュータ(いわゆる「古典コンピュータ」と呼ばれているもの)と比べて、その発展速度が「遅い」からです。



上図は、私が自分で作った、古典コンピュータと量子コンピュータのイベントを比較した年表です。当然にスタートの時期は異なるのですが、理論構築から現実のモノ(デバイス)への実装、また、そのモノが商用ベースに乗るまでの時間を比較しても、量子コンピュータの方が2倍程度遅い、と言えます。

さらにシビアなことを言えば、現時点でも、量子ビットのデバイスは確定しておらず、その集積化にもメドは立っていない状態で、商用化の時期は(少なくとも、この私には)全く見えません。IBMが公開している量子コンピュータは、正直なところ、量子ビットをいじって試す程度のものに過ぎませんし、量子コンピュータのアプリケーションと呼べるものは、現時点で一つも動いていないと言えます。

もっとも、量子コンピュータの技術的進歩を、古典コンピュータと比較すること自体が、「暴力」と言って良いほど理不尽である、ということは分かっています。

それは、現実の世界では観測できない量子現象を理解することが相当難しい、ということに加えて、量子コンピュータの稼働環境が、古典コンピュータと比較して、お話にならないほど厳しいものだからです。

実用化が困難である理由要因

なぜか、この話題が記事に出てこない

	項目	内容	その他
1	冷却問題	量子デバイスは、絶対零度(-273.15℃)に限りなく近い環境下でのみ動作する	そもそも、こんな温度どうやって作り出すのか？
2	ノイズ問題	そもそも、量子コンピュータは「ジタバタしている量子」を取り扱う計算方式 この問題は、量子コンピュータに運命的に不随してくる	そもそもデジタル(古典)コンピュータですら、ノイズ問題(誤り符号問題)は発生している
3	集積化問題	(超伝導量子チップのサイズ→0.1mm角)をそのまま1億量子ビットに展開すると、(もっとも小さくしても)10m ² レベルのサイズになる	もし、量子ドットを半導体ウエハで実現できれば、集積度を上げられるかも・・・
4	発熱/電力問題	1ビットの観測に1本の信号ケーブルが必要であるとすると、1億本の信号ケーブルの配線が必要。	「全ての量子ビットを観測する」という必要はないかもしれないが・・・
5	「量子力学」教育問題	量子コンピュータの理論(数式)が理解できれば、量子コンピュータは動かせると勘違いする輩	連載開始前の私

総じて、困難な課題、てんこ盛り

私が調べただけでも、これだけの問題があり、その一つ一つが、古典コンピュータを作り出すのと同様、あるいはそれ以上の難しさです。

例えば、ノイズ問題などは、ノイズを除去すれば済むという話ではなく、量子コンピュータは、その問題を活用しているとも見なせますし、現在の技術のまま集積化すれば、とんでもなく大きな集積回路が必要になります。

仮に、暗号を解読する量子コンピュータの量子ビットが”1億ビット”必要である、とした上で、その量子コンピュータを動かす電力を、”1量子ゲート1W程度”と相当乱暴に決めてみると、量子コンピュータ一台あたりの消費電力は1億ワットとなり、1000台の量子コンピュータを稼働するだけで、日本中の消費電力の全部を持っていかれます*) (関連記事:「[日本の電力は足りているのか?—“メイドの数”に換算して、検証してみる\(後編\)](#)」)。

*) 量子コンピュータには、コヒーレンス時間があり、連続稼働という概念はありませんが(後述)。

電力をガブガブ使って、発熱を無制限にして良いというのであれば、古典コンピュータだって、まだまだ性能を上げることができますので、量子コンピュータの優位性が出てこなくなります。

冷却問題 ラスト3℃からの挑戦

さて、今回は、この問題の中でも、特に量子コンピュータ特有の「冷却問題」に着目してみたいと思います。

前回お話しした通り、量子コンピュータの量子ビットのデバイスは、常温に置いておくと「猫カフェ」状態(量子の励起が発生して、“0猫”、“1猫”以外にも、“2猫”、“3猫”、“4猫”……と、無限匹のネコが無秩序に登場してくる状態)になります。

以後、"0猫"、"1猫"を「飼い猫」、"2猫"、"3猫"、"4猫"……を「野良猫」と呼ばせて頂きます(この呼び方を着想されたのは、メールで資料を送って頂いた読者の佐藤大輔様です)。

これを回避するためには、量子ビットのデバイスを超低温(絶対零度ギリギリ)に配置しなければなりません、これがとても難しいのです。

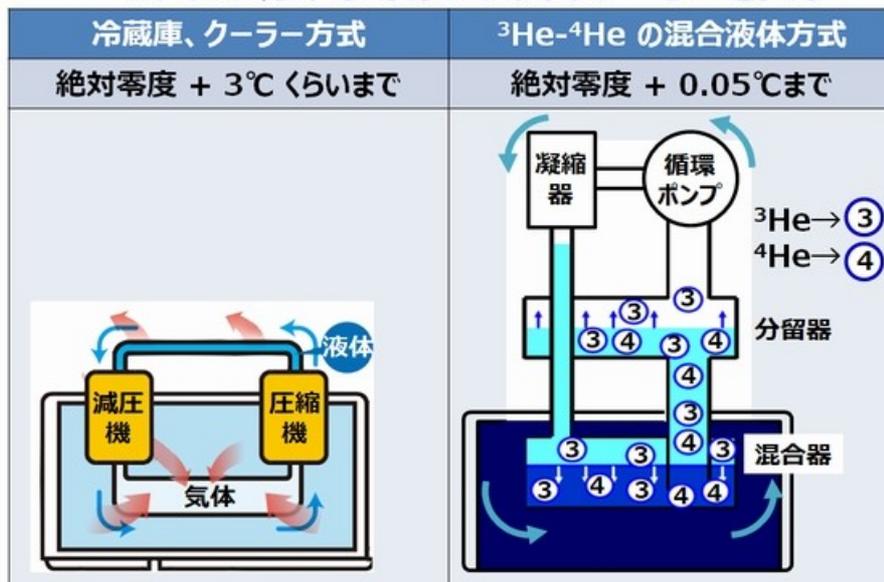
[Tさんツッコミ!] 半導体量子ドット方式や、超伝導を用いる方式では必要ですが、イオントラップなどの原子を直接量子ビットとして使う方式では、レーザー冷却という方式で(レーザーを使って)冷却を行います。

-270℃(絶対零度+3℃)くらいまでは、冷蔵庫とクーラーの原理を使えます。この原理とは、インフルエンザの予防接種をする時に、アルコールを皮膚に塗った時に感じる、あの冷たさと同じです。簡単に言うと、皮膚から蒸発したアルコールを、高圧で圧縮して液体に戻して、放熱した後、使い回すというものです。

しかし、絶対零度とは、全ての物質が停止してしまう、完全な熱量死の世界です。この世界では、触媒(上記の例での、アルコール)すら動かなくなってしまいます。つまり絶対零度に近づくほど、絶対零度を作れなくなるという矛盾が発生するのです。しかし、これではまだ量子デバイスの「野良猫」の登場を抑える温度には足りないのです。

冷却問題 -270℃くらいまで

-270℃くらいまでは冷蔵庫、クーラーと同じ



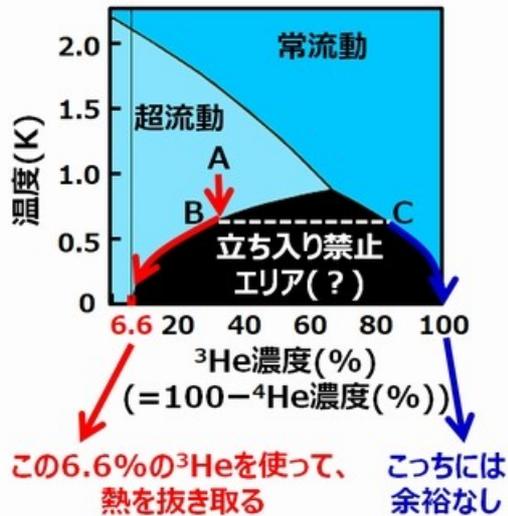
残り3℃の闘い

有名な方法として、 ^3He - ^4He の混合液体方式というものがあります。この方法を理解するのに相当骨が折れましたが、どこの誰が見つけたのかは不明ですが、本当にすごい方法です。

絶対零度に近づく、この混合液体は、 ^3He の層と ^4He の2つの層に分離します。さらに、分離したところから、 ^3He を蒸発させて抜き出すのです。

冷却問題 ラスト3°Cからの挑戦

上の図は ^3He - ^4He の混合液体の相図



^3He - ^4He 混合液体を低温に冷却すると、 ^3He 濃度の濃い濃厚相と、薄い希薄相の2相に分離する

通常の混合液体とは違い、絶対零度ですら希薄相には ^3He が約7%程度混ざっているという特徴がある

^3He を“蒸発”させれば、冷却し続けられる

この ^3He は、限りなく絶対零度に近い状態にあっても、まだ動かすことができます(超流動)ので、先ほど説明した、アルコールのように熱を抜き取っては、外部に吐き出す触媒として使い回せば良いのです。これによって、0.05K(絶対零度+0.05°C)までの冷却が可能となります。

しかし、これが容易ならざる技術であることも、ご理解頂けると幸いです。人間が入っていけるデータセンタの温度とは格が違いますし、少なくとも江端家に設置できるようなものではないことは明らかです*)。

*)一応、ヘリウムの値段や入手ルートについても調べてみました。

ところで、この量子コンピュータの冷却問題を調べている途中で、ちょっと驚くような話を見つけてしまいました。なんと、「常温で動く量子コンピュータ」というものです。今回は、この話は割愛しますが、興味のある人は、「QNN」で調べてみてください。

[Tさんツッコミ!] ImPACT(革新的研究開発推進プログラム)プロジェクトのQNNを、室温量子コンピュータ(の代表)のように扱うのは大きな誤解となりますので、注意してください。光を使う方式や上記イオントラップも含めたレーザー冷却(レーザー光を用いて、気体分子の温度を絶対零度近くまで冷却する方法)を使う方式は、基本的に冷却器(希釈冷凍機)は必要ありません。これらの方式も、各大学、研究機関で活発に研究されています。つまり、室温の方式はたくさんあります(→(江端)この方法につきましては、次回詳細に説明致します)。

私、量子コンピュータは「とにかく冷やすもの」と思っていたので、かなり認識が違っていたなあ、と思いつつ、「そういえば、量子コンピュータの定義って、まだちゃんと調べたことなかったなあ」と気が付きました。私は「量子コンピュータとは、量子的な振る舞い(×量子そのもの)を使うもの」くらいのイメージしか持っていませんでした。

調べてみると「定義」ではないのですが、「要請」という形で、以下のような考え方があり、これが現時点では主流になっているようです(以下、江端風に言い回しを変えています)。

量子コンピュータへの要請

「ディビンチェンソの要請」の江端の理解

#	項目	説明
1	初期化	量子状態をある初期状態に準備できること
2	プログラマブル	複数の量子状態を使って、任意の論理演算ができること
3	観測	計算後の量子状態を正確に読み出せること
4	集積化	十分な規模の集積化ができること
5	計算時間が保持できること	量子が「崩れ去ってしまう前に」、すべての計算が終了すること(*)

(*)「コヒーレンス時間」については、後日説明予定

ちなみに、現在の量子コンピュータの連続稼働時間は、0.0001秒(100マイクロ秒)

次回以降にお話しますが、量子コンピュータとは、現在の皆さんが使っているようなパソコンとは全く別ものです。計算は1回限りの一発勝負で、その計算時間は、1万分の1秒以内に完了させなければなりません。

いろいろな方面から批判されそうですが、現状の量子コンピュータは「使い捨てコンピュータ」——とまでは言わないまでも、「打ち上げ花火コンピュータ」であることは事実です。要するに、打ち上げるまでの準備(冷却、量子の初期化、その他)が大変で、量子的振る舞いを計算可能な状態に維持し続けることが、めちゃくちゃに難しいからです。これをコヒーレンス時間と言います*)。

*)このコヒーレンス時間を、2023年に10倍(1ミリ秒)にする目標を掲げて研究開発をしている会社があります。

このように考えていくと、量子コンピュータと現状のコンピュータ(古典コンピュータ)を同じ土俵で比較検討することには、あまり意味がないのかもしれない。

[Tさんツッコミ!]「打ち上げ花火コンピュータ」は、量子コンピュータの本質ではありません。現在のエラー訂正のない量子コンピュータ(NISQなどと呼ばれる)がそうになっているだけです。現状は実装困難ですが、将来的には量子エラー訂正が実装され、これが実行されれば、コヒーレンス時間は半永久的に続くものとなります。多くの研究者がそれを目指しています。

量子井戸を半導体ウエハーで作る

さて、ここから後半に入ります。「量子ドット方式」の実現方法について、お話ししたいと思います。

まず、量子ドットを実現するには、量子井戸を作れなければなりません。前回は、その原理を書いたところで、私が力尽きました。今回は、その実装について説明する予定でしたが、読者の方から、「量子井戸が、半導体ウエハー*)で作れる」ことを教えて頂きましたので、本人のご許諾を頂き、全部の資料と説明を使わせて頂きます。

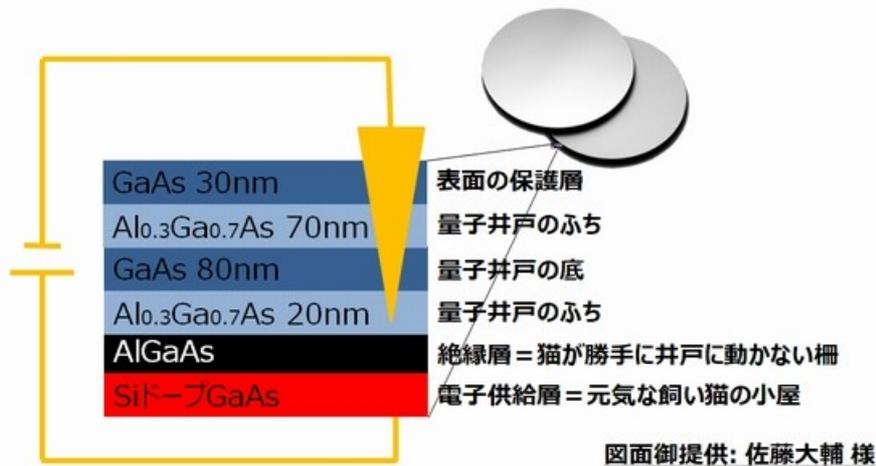
*)資料を御提供して頂いた佐藤様から「このウエハーは、「シリコンウエハー」と呼ぶにはシリコンの含有量が少なく、「GaAs基板」では分かりにくいと思いますので、「半導体ウエハー」としてはいかがでしょうか」とご提案頂きました。

EE Times Japanの読者の皆さんならご存じの通りですが、IC、LSIなどの半導体デバイスは、全て半導体ウエハー(シリコンウエハー)上に回路パターンを焼き付け、エッチング、ドーピング、配線形成、ダイシング、ボンディングという工程を経て完成します。

量子井戸が、半導体ウエハ上に作れるのであれば、(ちょっと拙速な結論かもしれませんが)、現状の半導体技術で、量子ドットビットが作れる(量産できる)、ということです(よね?)。ちょっとワクワクしてきました。

量子井戸の作り方(1)

読者の方から教えて頂いた
量子井戸を作る半導体ウエハー構造の一例



頂いたメールを、以下に展開させていただきます。

- (1) 量子井戸自体は(半導体ウエハーの)構造が出来れば完成です
- (2) 製造時に不純物がどうしても混入します。その結果、不要な電子(野良猫)も発生します
- (3) そこで、この井戸を1K(絶対零度+1°C)くらいまで冷やします
- (4) すると、野良猫(2猫、3猫……)は全滅し、飼い猫(0猫)は大人しくなります



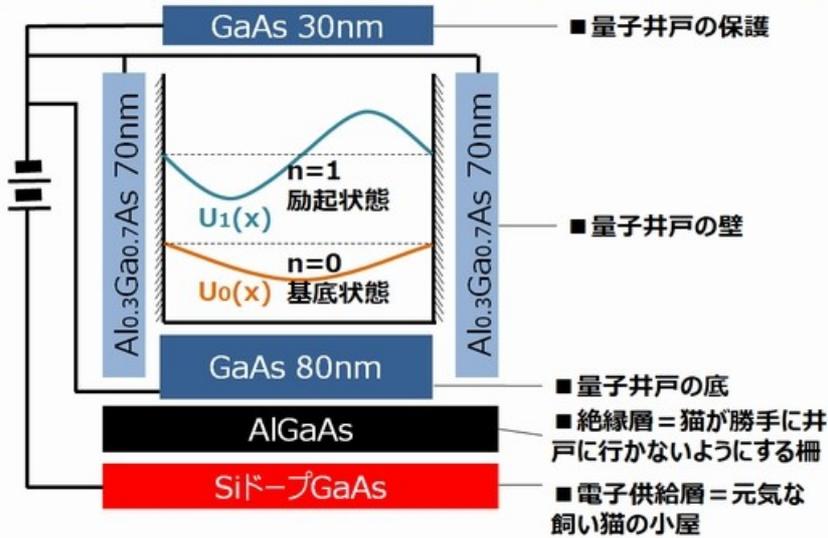
- (5) 電極に電圧を印加し、飼い猫(0猫)を井戸に向かわせます
- (6) 飼い猫は井戸の底でおとなしくしています

以上で量子ドットを作る準備が出来ました。

半導体ウエハーの図のままでは、私には理解できなかったのですが、前回作成した量子井戸の周りに、各層を配置してみました。

量子井戸の作り方(2)

量子井戸の形に合わせて配置してみた図(by 江端)

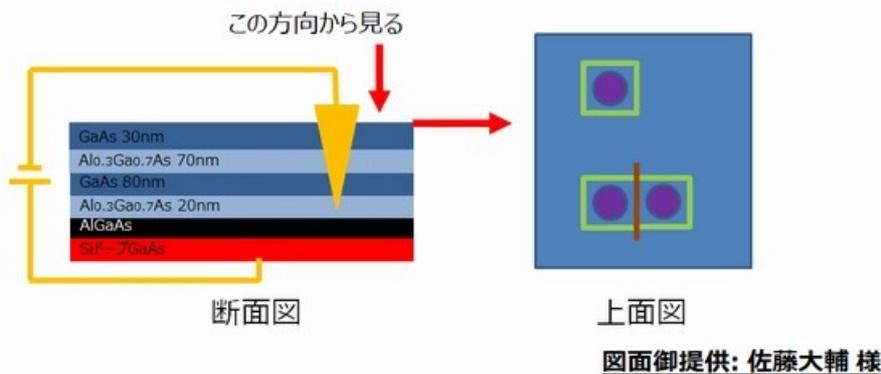


要するに、量子井戸を加圧して、“0猫”を閉じ込める、という理解で良いようです。

さてお話を続けます。

量子井戸の作り方(3)

“0猫”と“1猫”だけの猫カフェ(量子ドット)の完成へ



(7) 地下100nmの所に猫がいる量子井戸の底があります

(8) 表面に電極を形成し+に印加すると猫は紫の領域から出られません(猫は電子ですから)

(8) 高さ方向は井戸の底から動けないので制限され、電極で縦横方向の移動を制限されたので点(ドット)領域にしかいられなくなりました。量子ドットの完成です

(9) なるべく冷やして狭いところに猫を押し込めば、0猫1猫だけになります

(10) また四角の電極を2個並べて、中間部分(濃い緑部分)だけ別電圧で制御すればゲートとして機能するはずと当時言われていました

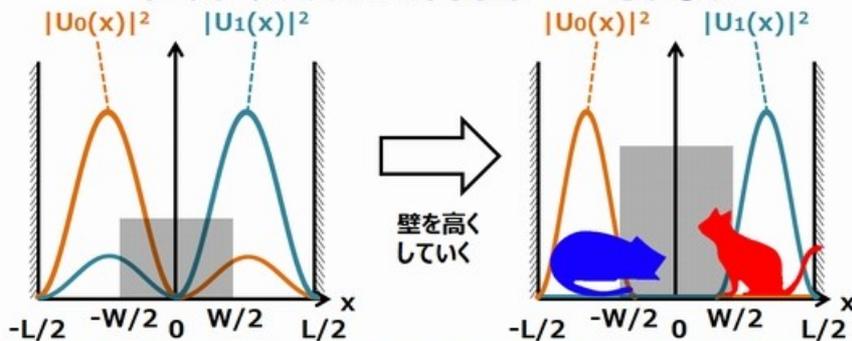
さて、ここまでで、私は、量子井戸のハードウェアをイメージすることができました(佐藤さまに、再度、感謝申し上げます)。

量子井戸の中に壁を作る

さて、ここから、前回、この量子井戸の中に“0猫”と“1猫”を別々の場所で管理する方法として、「量子井戸の中に壁を作る」という話をしましたが、この実現方法についてお話します。

(既出)“0猫”と“1猫”の発生場所を限定する

真ん中に“壁”を叩き落す
但し、今度の壁の高さは“ ∞ ”としない

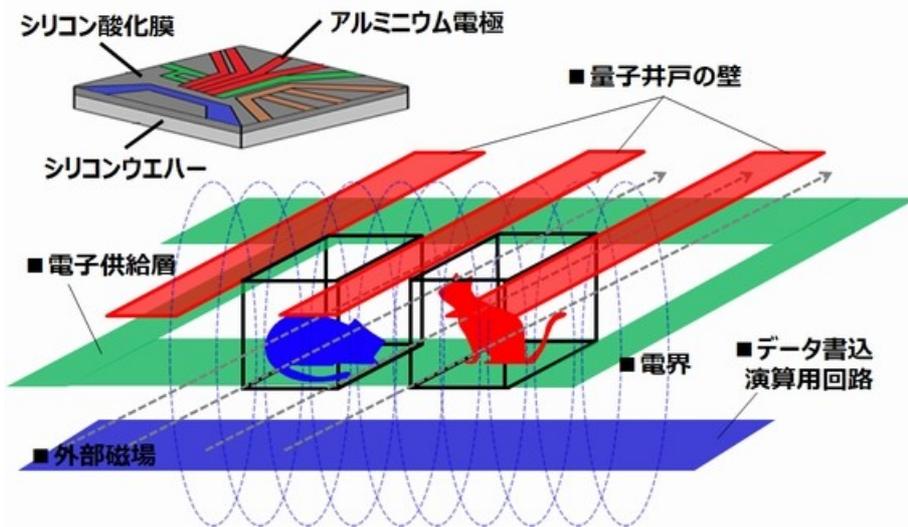


井戸の中で1つの電子(の異なる波長)が、同時に左右に存在する —— が実現する

簡単に言えば、前述した量子井戸の壁と壁の間に、さらに壁をもう一枚追加する、というイメージです。

どうやって0猫と1猫を飼いならす？

答え:量子井戸の中に、箱を2つ作る



絶対零度と電圧で量子井戸の底に縛り着けている”0猫”に、光子のエサを適量与えて、”1猫”が登場できるように少しだけ元気にさせた上、さらに強烈な外部磁界を浴させ、動物虐待の限りを尽くします(量子ゲートを動かす時には、さらに電場の嵐の中にさらします)。

こうして、“0猫”と”1猫”の両方の性質を併せ持ち(イメージとしては、虐待によって”躁”と”鬱”の状態を”同時発症してしまふようになった猫”)が、“0猫”と”1猫”がそれぞれ確率50%ずつでそれぞれの箱に存在するようになります*)。

*)そろそろ、猫好きの担当Mさんがキレル頃かもしれませんが、構わずに、説明を強行します。(例えとはいえ、なかなかにつらいです(涙)。が、「好奇心は猫をも殺す」ということわざもあるくらいですから、びったりの例えなのかもしれません(担当M))

しかし、計算可能な量子ビットを作る(初期化する)ためには、“0猫”と”1猫”が重ね合わさった猫を作り出すだけでは足りないのです。

この"0猫"と"1猫"の大きさを変えたり、彼等が飛び跳ねるタイミングを微妙にずらしたりしなければなりません。逆に言えば、この「大きさ」と「タイミング」さえ制御できれば、量子ビットの初期化はそれで完成したと言えます。

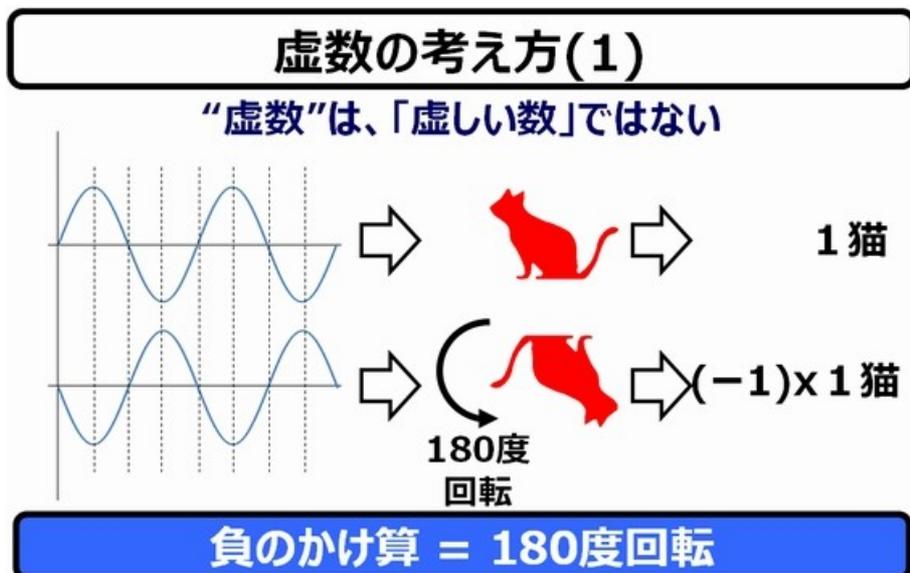
そして、この「タイミング」を表現する極めて便利な道具が「虚数」なのです。今回、この虚数について集中的な解説を行います(本シリーズにおいて、これを最後の「虚数」の説明とします)。

「虚数」について、猫で考えてみる

まず、量子ビットとは、1匹の"猫"です。ただし、この"猫"は、"0猫"も"1猫"の2匹の猫が重ね合わさっていて、同時に確率的に別々の場所に存在しています。50%:50%で存在している場合もあれば、70%:30%の比率で存在している場合があります。この50%とか70%とか30%が、猫の「大きさ」です。

次に「タイミング」ですが、これは、"0猫"と"1猫"が、どのようにドタバタ ———— といっても規則正しく、バネが振動するように動いていますが ———— 両方の猫が完全に同じように、「アイドルデュオの振り付け」のように、あるいは「デュエットのアーティスティック(シンクロナイズド)スイミング」のように動いている時、この時、「位相差0」と言います。

これに対して、"0猫"と"1猫"が、鏡に映ったように対称に動いている時、これを、2匹の位相が"マイナス1"、または位相差180度と言います。これを"1猫"で表現したものが以下の図になります。

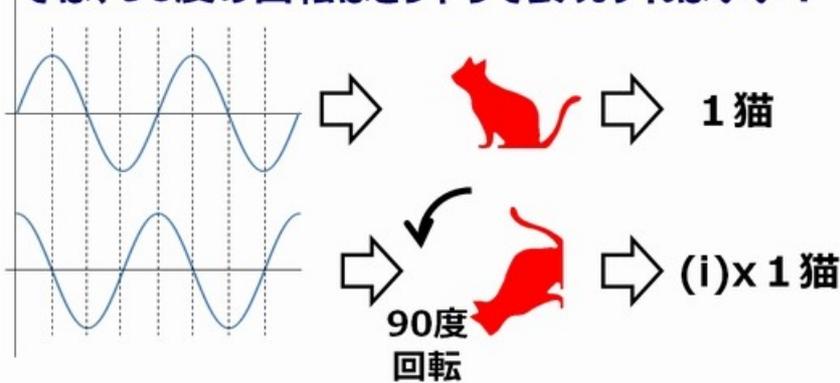


下の"1猫"は、上の"1猫"と全く逆方向に動いています。

では、位相差0度と位相差180度の真ん中の状態、つまり、その真ん中状態だけズレている状態は、どのように表現できるかというと、これを、2匹の位相が"i"、または位相差90度になっている、と言います。

虚数の考え方(2)

では、90度の回転はどうやって表現すればいい？



iのかけ算 = 90度回転

ここで、さらに、位相差90度を与えたいとすればどうすれば良いか？ 簡単です。もう一度”i”をかけ算すれば良いのです。 $i \times i = -1$ となり、180度の回転になっています。つまり、”i”をかけ算するということは、0度と180度の真ん中の状態にする、という意味です。

”虚数”とは、”+ (プラス)”と”- (マイナス)”のど真ん中の状態を示す、”i”という、偉大なる第三の符号です。これを”虚しい数、虚数”などと翻訳した日本人 — 出てきやがれ。

“虚数”以前に、“マイナス”が発見されたのが6世紀くらいで、経済に最初に導入されたのが11世紀のイタリアという説があります。“マイナス”を使えない世界での商売は散々だったそうです。赤字という概念がなかったので、利益でなくなった段階で、即、倒産、となっていたとか(ただし、この話、ウラが取れていません)。

“マイナス”もちょっと前までは、“虚数”と同じ扱いを受けていた訳ですから、あと1000年くらいすれば、“虚数”も日常生活で普通に使われるようになるかもしれません。

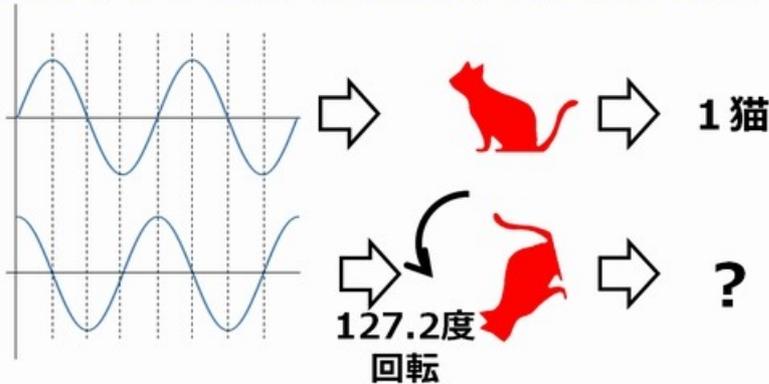
なるほど、iが90度回転であることは分かった — ならば、任意の角度の回転、23.4度とか、127.2度の回転はどうなるのか、という、実はここまでの話は全て $\cos(\text{回転角度}) + i \sin(\text{回転角度})$ という式で一般化できるのです。これがオイラーの公式($e^{i\theta} = \cos(\theta) + i \sin(\theta)$)です。

実際に $\cos(180度) + i \sin(180度) = -1$ ですし、 $\cos(90度) + i \sin(90度) = i$ になっています。

三角関数不要とかほざいていやがる日本人 — 出てきやがれ。

虚数の考え方(3)

では、127.2度の回転はどうやって表現すればいい？



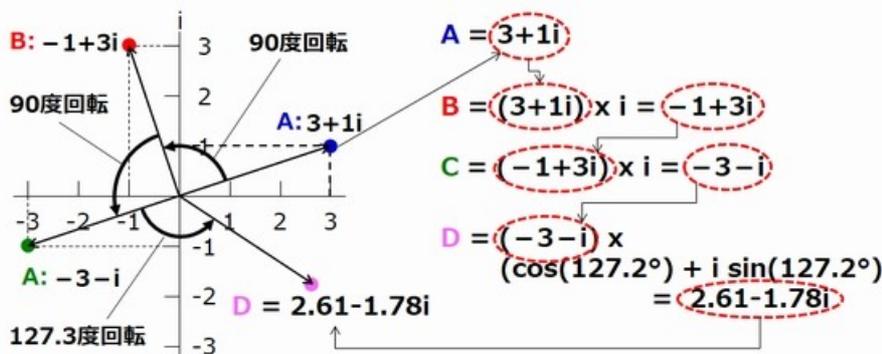
答: $(\cos(127.2\text{度}) + i \sin(127.2\text{度})) \times 1\text{猫}$

**$\cos(\text{回転角度}) + i \sin(\text{回転角度})$ で
どんな角度(位相)の"猫"も表現可能**

さて、私がデタラメな説明をしていないことを以下の図で証明します。実際の複素数を使って、これがちゃんと回転後の座標に移動しているのが分かると思います。

虚数の考え方(まとめ)

かなり凄い「万能ナイフ」です



この万能感、伝わりますか？

「マイナスかけるマイナスが、どうしてプラスになるの？」という小学生の子どもには、「180度回転して、さらに180度回転して、一周して戻ってくるからだよ」と言えば足りず、「二回かけ算して負数になる数ってどういうこと？」という高校生の子どもには、「負数の180度回転に対して、その半分の90度回転することだよ」と言えば足りず。

ネットを見ると、虚数解とは「解がないこと」てなことが平気で書かれていますがバカ言ってんじゃねーよ。

虚数軸上に(あー、虚数軸を説明するのに、“虚数”という言葉を使わなければならないことにイライラするー)、ちゃんと解があります。負数の概念がなかったころには、負のX軸も負のY軸もなかったように、たまたま現在の数学では、虚数軸を現わしていないだけのことです(参考1、参考2)。

それにしても、本当に、この“虚数”という言葉、なんとかならんかなあ！ ———— と思っています。

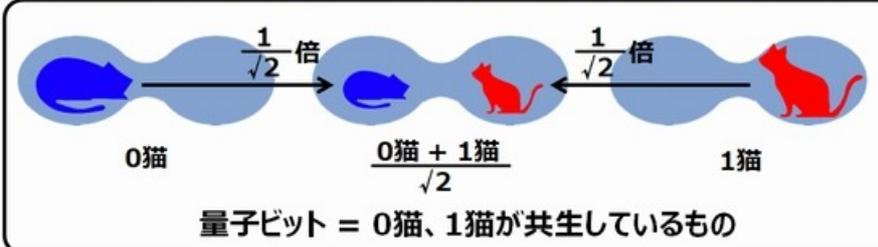
虚数は、「虚しい数」ではなく現実世界に普通に存在している数です。虚数を「虚数」と言い続けている限り、量子コンピュータを理解する人が全然増えないこない気がするのです(この『"虚数"を「虚数」以外の言葉で表現したい』について、あなたのアイデアを[お聞かせください](#) [※たった1問だけのアンケートです])

「量子ビットの初期化」だけでも、こんなに大変なのです……

量子ビットの話に戻しましょう。量子ビットは、「大きさ」と「動き方のタイミング」の異なる「0猫」と「1猫」の重ね合わせからなる「1匹の猫」として、以下、私のコラムでは以下のような図で表記します。

量子ビットの状態を示す方法

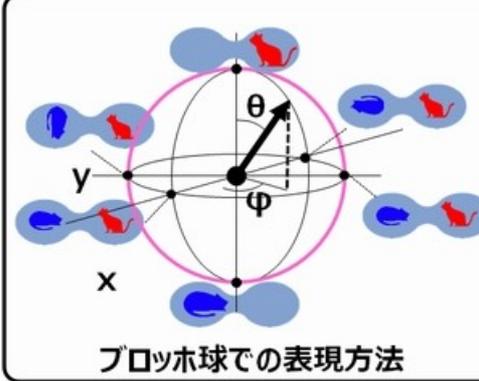
量子ビットとは0猫と1猫の重ね合わせの猫である



量子ビット = 0猫、1猫が共生しているもの



“1猫”の位相の表現方法



ブロッホ球での表現方法

量子ビットで計算をするには、
自力で“猫”を作り出さなければならない

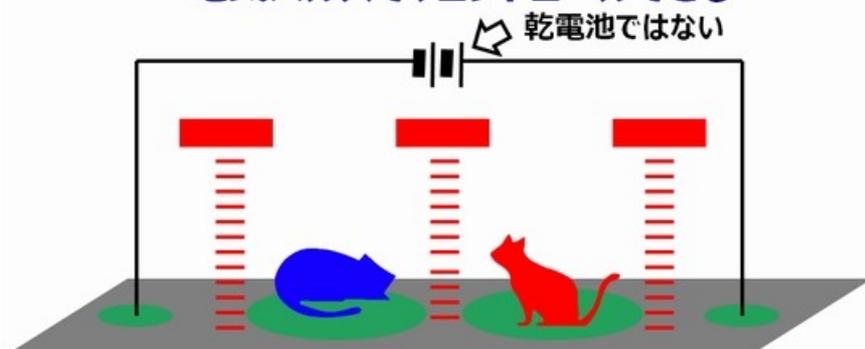
次回以降、量子ビットを使った量子ゲートの計算方法の説明を致しますが、そのためには、まず、計算前の量子ビットを初期化しなければなりません。これは、プログラム開始時に、初期変数に値を入力するようなものです。int a=2;とか、double b = 1.234;のようなものです。

基本的には、量子ビットのブロッホ球の球面上の任意の場所の値を設定できなければなりません。“0猫”だけ、あるいは、“1猫”だけ(ブロッホ球の最下部、最上部)を出現させるというのなら、そんなに難しくないかもしれませんが、なによりもまず、“0猫”と“1猫”を同時に、かつ一定の確率で出現させる、という量子ビットの初期化処理が必要となります。

そんなことが本当にできるのか —— 実は、量子井戸の両端に加圧(電圧を加える)して、電気パルスを発生させて、その発生時間を変化させることで、“0猫”と“1猫”をコントロールすることができるようです。イメージとしては以下の図のような感じになります。

どうやって0猫と1猫を制御する？

電気パルスで、コントロールできる



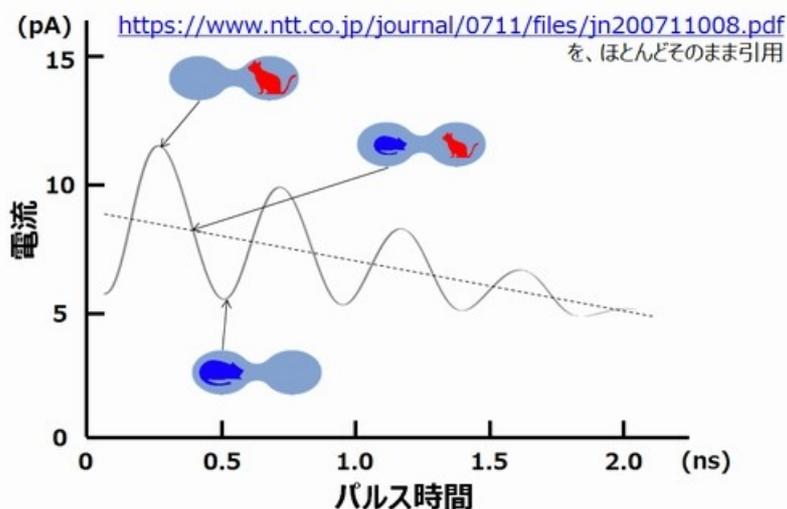
さあ、“0猫”と“1猫”を動かそう

この仕組みで、猫の大きさを制御できる理由は、よく分かりません。しかし、各種の論文の著者が「制御できる」といっているので、これ以上はツッコまないことにします（私、もう疲れているんです）。

まず、この電気パルスの時間を変化させることで、“0猫”と“1猫”の出現確率を変えることができます。これはパルス時間に対して振動的に変化するので“ラビ振動”と呼ばれています。

ラビ振動による量子ビットの制御(1)

パルス時間で、0猫と1猫の出現確率を制御できる



「NTT技術ジャーナル 2007.11」の図を引用

原理はともあれ、これで、“0猫”と“1猫”の大きさをを変えることができることが分かりました。しかし、このパルス時間の単位はナノ秒であり、これは、光がたった30cm進む時間です。

私、この単位を使ったのは、屋内設置型のGPS衛星を作っていた時以来ですが、ナノ秒レベルのパルスを制御するのがどれほど難しいかは、他の人より理解できていると思います。

そして、パルスで使う電流量は、ピコアンペアです。これはフォトダイオードの暗電流（漏れ電流）の単位です。これ普通は素子の不良で発生する、超ウルトラ級の微量電流です。こんな電流を制御するというのは、（私の古い電気の知識では）スコープ外です。

量子ビットの初期化(まだ計算が開始すらされていない)ですら、これだけの超厳密制御が必要ということに、めまいを感じます。

しかし、まあ、なんとか、このパルス時間と電流の制御ができて、「0猫」と「1猫」の大きさを変えられることができたとしても、「0猫」と「1猫」の動き方(タイミング)まではコントロールできるとは思えません。なぜなら、ここでのパラメータはパルス時間という1次元のパラメータですが、量子ビットの初期化は、「大きさ」と「タイミング(位相)」の両方、つまり2次元パラメータを制御しなければならないからです。

つまり、このパルス時間の1パラメータだけでは、ブロッホ球上の任意の場所の量子ビットは作れないはずなのです。

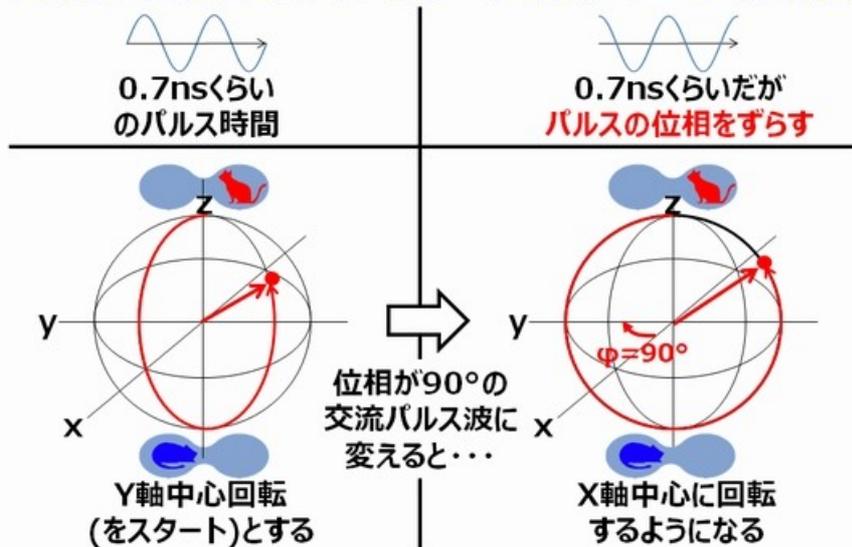
ここから、私の1週間に及ぶ、論文や資料との格闘の日々が始まりました。しかし、ラビ振動による出現確率の調整の話は登場するものの、位相調整方式についての言及が見つけれませんでした。

もう訳が分からなくてヘトヘトになって、夢の中にまでブロッホ球が登場してくるようになって、ついに、私は「量オタのTさん」に泣き付くに至りました。Tさんは、私の質問の意図を理解されて、「なるほど、もっともな疑問です」とご納得頂き、その後、いろいろ調べていただくことになりました。

結果として、Tさんは、電気パルスの周期の位相をずらすことで、ブロッホ球のもう一つの軸まわりの回転ができることを、突き止めてくれました。

ラビ振動による量子ビットの制御(2)

パルス周期の位相で、もう一つのパラメータも動かす

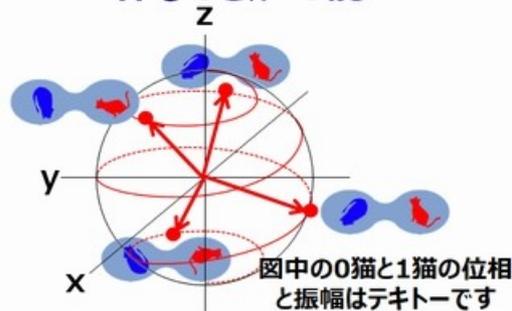


2軸がコントロールできれば、
どんな量子ビットでも作れる(はず)

つまり、パルス時間とパルス周期の位相を変化させることで、少なくとも量子ドットビットの初期化は原理的には可能である、ということです。これが分かった後、私はようやく安眠することができるようになりました。

ラビ振動による量子ビットの制御(3)

ブロッホ球上の、いかなる0猫と1猫の組み合わせも
作ることが可能



ところで、「ブロッホ球って何だったっけ？」
→次回にお話します

今回の調査で分かったこと、それは、最終的に「観測」することで、量子ビットはデジタル的に”0”か”1”に確定するもの、量子ビットの初期化処理はつまるところ「アナログ処理」だということです。

デジタルは、”0”と”1”以外の状態以外許さない、ということで、雑音を排除し、高精度かつ超正確な計算を実現しています。一方、今回のラビ振動を使った量子ビットの初期化は、アナログの時間とアナログの位相を使うことで、ブロッホ球上の全ての点の量子ビットを作り出します。

しかし、前述した用に、ナノ秒単位のピコアンペアのパルス信号(しかも位相変動も含む)の制御が、そう簡単にはできるとは思えません。

私は、量子コンピュータのノイズ問題について、まだきちんと勉強していませんが、今回の量子ビットの初期化処理だけを見ても、これが相当に面倒な問題なんだろうな—ということは、直感的に分かります。

[Tさんツッコミ!] 最初の初期化は、”0猫”状態だけにするので、それほど難しくないと思います。しかし、後の量子計算(単一量子ビットゲート)で量子ビットの状態を制御する必要性が出てきます。

いずれにしても — 量子ビットの初期化まで(まだ量子ゲートにすら届いていない状態)で、この調査と勉強と不眠の日々。

……なぜ私は、こんな目に遭っているのだろうか？

*)それは編集部が原稿を依頼したからです(担当M)

ともあれ、「今度、連載の依頼を受けるときは、もっと詳細な事前調査を徹底的にしよう」とあらためて誓った、この1カ月でした。

*)おっしゃる通りです(担当M)

現時点で「量子コンピュータは動いている」と言えるのか？

では、今回の内容をまとめます。

【1】シュレーディンガー方程式を理解できる人の国内人口は100万人を越えているかもしれないという推定をしましたが、「それでも98.5%の人は理解していない→故に、この連載には意義がある」と開き直すことにしました。

【2】「トンネル効果」をマクロな物理現象から理解する手段として、「ベルリンの壁、通り抜け問題」を設定し、実際に計算をしてみました。この結果、量子のような微小な世界において観測される物理現象を、マクロな世界で考えてみることには、あ

まり意味がない、ということが分かりました。

【3】Googleトレンドを使ったデータ分析から、(1)我が国の国民の量子コンピュータへの関心はあまり大きくない、(2)パスワード的と逆方向の振る舞いとして、ビッグネーム以外の研究発表にも関心を示さない、という仮説を立ててみました。

【4】量子コンピュータと古典コンピュータの年表を作成して、それぞれのイベントを書き込んで比較してみたところ、現時点において、量子コンピュータの進化の速度が2倍程度遅い、という結果と同時に、その理由として、古典コンピュータとは比較にならないほどの、困難な技術的課題が山ほどあることが分かりました。さらに、その一つである冷却問題についての具体的な事例を紹介しました。

【5】前回のコラムで紹介した「量子井戸」の具体的な作り方について、読者の方より寄せて頂いた資料を用いて説明を致しました。半導体ウェハーを使う方法を紹介していただき、電子を使った量子ドットビットについての実用化は、意外に近いかもしれないという、私の期待が高まっています。

【6】量子ビットを理解する上で避けて通れない、虚数の考え方について、“0猫”、“1猫”を例題に、できるだけ詳細に、ウザいくらいにしつこく解説を試みてみました。

【7】最後に“ラビ振動”とパルス信号の厳密制御による、量子ドットビットの初期化の方法について、具体的に説明しました。

以上です。

□

さて、今回で量子コンピュータの連載第3回なのですが、現時点で、まだ量子コンピュータが動き出してすらいない(量子ビットの初期化の一例をなんとか紹介しただけ)ということに、がく然としています。

私は、量子コンピュータの全てを語り尽くしたいなどと、1mm足りとも思っておらず、ただ、普通に「変だな」「分からないな」と思うことを、普通に調べているだけなのに、その調査の量の膨大さに圧倒されています。

まず初回の、量子コンピュータが量子を使っているのではない(量子の振る舞いを利用している)ということから、2回目の量子ドットビットの初期化方法、そして、今回、ようやく量子ビットのハードウェアの一例を、自分なりに理解したところです。

その途中で、トンネル効果の数値計算やら、量子コンピュータ開発の進捗やら、冷却問題やら、気になったことを調べているだけなのに、この進み具合には、正直頭を抱えています(Mさん、どうしましょう?)。

もちろん、これは私(の頭)が悪い、というのは認めるところではあるのですが、やはり最大の弊害は、「パスワード」として取り扱われる量子コンピュータの記事です。

まあ、ぶっちゃけ正直に言ってしまいますとね —— 『現時点で、量子コンピュータって、本当に動いていると言える?』って思っています。

私は、世の中の記事を読んで、『量子コンピュータって、バリバリに稼働している、もしくはその直前状態である』と思っていたからこそ、この連載を引き受けたのですが、いざ箱を開いてみたら、びっくり仰天 —— 解決しなければならない困難な技術的課題の、雨あられ状態です。

一体、量子コンピュータの記事を書いているライター達は、一体何を見て、何を調べて、何を分かったつもりで記事を書いているのか —— 直接、自宅に押しかけて、首を締め上げて問い詰めたいくらいです(私は本気です)。

もちろん、量子コンピュータに係わっている人の全てが、このような無責任なライターではありません。今回Tさんに送って貰った論文の執筆者の方々は、極めて客観的に、正確に、現状の量子コンピュータの状況と限界を理解していることが、(そして、量子コンピュータに対する飽くなき情熱も)読み取れました。

ということは、パスワード生産装置として機能している、無責任ライターたちは、ろくすっぽ論文も読まずに、あるいは読んでいたとしても、自分の中に生じた疑問を解決しようとする努力を行うことなく、記事を書いていると推認されます。

—— 自分は専門家じゃないから、理解できなくてもいいんだ。

この無責任で安直な開き直りこそが、パスワードの萌芽となっているのは、ほぼ確定といってもよいでしょう。

もちろん、パスワードには、それなりの効果(新技術に対する投資効果等)があるというお話は、前回のコラムでもしました。

しかし、今回に関しては、1カ月もの間、私を論文と文献調査の地獄の突き落した、このパスワード生成装置である無責任なライターたちを「私は許すことができない」のです。

今の私は、憤怒の炎で燃えたぎっています。

「江端さん、それは言うてはいけないセリフです」

後輩:「最近の江端さんのコラムでは、頻繁にYouTubeを引用されていますね」

江端:「まあ、実際のところ、私、”量子井戸”も、”シュレーディンガー方程式”も、もう専門書なんぞ使っていないからね。かなりの部分をYouTubeの講義で勉強している」

後輩:「そういえば、コロナ禍の”外出自粛”と”遠隔授業”は、現場の教師たちに、過酷なITリテラシーの向上を要求していますね*)」

*) [著者のブログ](#)

江端:「少なくとも、『学校へのスマホ持参に関する論争』にはケリがついただろう。加えて、予想もしない方向での「教育改革」……というか、「教育崩壊」が始まっているし*)」

*) [著者のブログ](#)

後輩:「まあ、それはさておき、今回は、冒頭の『"量子井戸"の量子計算は、化学専攻の大学生の一般教養』の話から、いきなり盛り込んできましたねえ」

江端:「今回、その”井戸”も”シュレーディンガー”も、まあ、信じられないくらい優れた動画が山ほどあって、ビックリしているんだ。これが、ある分野の人間にとっては「専門知識」ではなく「常識」であることにも、驚いている」

後輩:「江端さん、恥ずかしさで転げ回ってしまう、と書いていましたけど、まあ、私たち理系の世界って、基本的に、お互いに分からないことだらけじゃないですか」

江端:「まあね。そういえば、轢断のシバタ先生(医師)が、『コンピュータのカーネルを改造できる江端さんに比べれば、私のやっている手術なんて簡単なものですよ』というようなことをメールに書かれてきたことがあったんだけど、あの時は『そんな訳あるかあ——!』って、ツッコんでしまったなあ*)」

*) 私が殺した(壊した)カーネルの数は、100を下ることはないでしょう。

後輩:「これは、身内びいきもあるかもしれませんが、私たち理系の世界には、自分たちの技術に対して傲慢にならず、他の人の技術に対して高い敬意を払うことができる、そういう文化があると思うんですよ」

江端:「確かに、『自分の分野の知識を、他人が理解できなくても、それは当然だ』と思えるし、その逆も当然だと思える。理系同士は、”相互敬意”の関係を作りやすいのかもしれない」

後輩:「『[理解し合えないことを理解し合う](#)』ことの意義については、江端さんの十八番(おはこ)ですしね」

□

後輩:「そういう観点から見ると、今回の江端さんのコラムには、かなり文句を言いたいです」

江端:「という？」

後輩:「江端さんは、これまで、自分の周りにいる人間たちの無責任な無理難題を、現場にとどまって『形』にするために奮闘努力をしてきたんでしょ？」

江端:「そうだなあ。深夜の自動車の中でコーディングしたり、雨や風の中で配線の防水テープを巻いたり、深夜4時ごろに大学キャンパスを走り回ったり、毎日、突然のシステムダウンや通信障害におびえて、眠れない日々でノイローゼ直前まで至ったり——そして、『誰も助けてくれなかった』かなあ」

後輩:「そんな地獄の中にあって『まだ動かないのか?』と言い放つのではなく、『ここまで作ったのか!すごいぞ!!』とってくれたら、どんなに助かっただろうに、とか思ったことはありませんか？」

江端:「そんな言うまでもない。うれしくて、泣いてしまうかもしれない。でも、私の作ったシステムを誰も理解してくれないし、そのシステムの複雑さに1mmたりとも近づこうとすらしてくれないんだ*)。そんな彼らから、『ここまで作ったのか!すごいぞ!!』なんて言葉が出てくるわけないだろう」

*)もちろん、私は『自分が作ったシステムは、他人には簡単に理解できない』ことも、良く知っていますが。

後輩:「その通りです、江端さん。それではお尋ねしますが、今の江端さんは、このコラム執筆のために、七転八倒の日々を送り、『量子コンピュータという名の地獄』を俯瞰できる立ち位置にいる訳ですよ」

江端:「まあ、そうだな」

後輩:「今の江端さんは、量子コンピュータを「概説する」立ち位置ではなく、「フィールドで闘っている人」の地獄が見えているんですよ」

江端:「まあ、そうだな」

後輩:「ならば、世界中の誰でもない江端さん。今のあなたこそが、量子コンピュータの地獄で闘っている人に対して、『ここまで作ったのか!すごいぞ!!』と、彼らを鼓舞し、力づけ、勇気を与える側に立ってなくて、どうするんですか!」

江端:「え？」

後輩:「『現時点で、量子コンピュータって、本当に動いていると言える?』——江端さん、これはダメです。これは、同じ様な地獄の現場で闘ってきた「フィールドのエンジニア」が言っているセリフではない」

江端:「いや、私の批判の対象は、無知で、無勉強で、外国の研究者の言葉を翻訳して並べるだけの記事しか書けない、自称『技術ライター』たちであって……」

後輩:「そんなことは分かっています。しかし、あの低能ライターたちへの江端さんの痛烈な批判が、量子コンピュータのフィールドエンジニアたちにも被弾して、彼らの心が折れてしまったら、どう責任を取るつもりなんですか？」

江端:「そんな、ムチャな……」

後輩:「江端さんが考えているより、このシリーズのコラムが、この量子コンピュータの世界の人達に与える影響は大きいんですよ。私は、日本中の量子コンピュータに関わる全ての人を読んでいと確信しています」

江端:「そうかなあ？」

後輩:「もう一度、確認しますが、少なくとも、江端さんは、量子コンピュータに関わる人たちを支える側ですよ」

江端:「もちろんだ。私は、いつ、いかなる時も、闘うエンジニアの側に立つ者だ」

後輩:「それなら、江端さんは、その旗幟(きし)を明らかにしなければなりません。今こそ、『量子コンピュータは必ず私達の目の前に現われ、私たち人類に輝かしい未来を与える』と、高らかに宣言するのです——あの低能ライターたちとは違ったアプローチで」



Profile

江端智一（えばた ともいち）

日本の大手総合電機メーカーの主任研究員。1991年に入社。「サンマとサバ」を2種類のセンサーだけで判別するという電子レンジの食品自動判別アルゴリズムの発明を皮切りに、エンジン制御からネットワーク監視、無線ネットワーク、屋内GPS、鉄道システムまで幅広い分野の研究開発に携わる。

意外な視点から繰り出される特許発明には定評が高く、特許権に関して強いこだわりを持つ。特に熾烈（しれつ）を極めた海外特許庁との戦いにおいて、審査官を交代させるまで戦い抜いて特許査定を奪取した話は、今なお伝説として「本人」が語り継いでいる。共同研究のために赴任した米国での2年間の生活では、会話の1割の単語だけを拾って残りの9割を推測し、相手の言っている内容を理解しないで会話を強行するという希少な能力を獲得し、凱旋帰国。

私生活においては、辛辣（しんらつ）な切り口で語られるエッセイをWebサイト「[こぼれネット](#)」で発表し続け、カルト的なファンから圧倒的な支持を得ている。また週末には、LANを敷設するために自宅の庭に穴を掘り、侵入検知センサーを設置し、24時間体制のホームセキュリティシステムを構築することを趣味としている。このシステムは現在も拡張を続けており、その完成形態は「本人」も知らない。

本連載の内容は、個人の意見および見解であり、所属する組織を代表したものではありません。

Copyright © ITmedia, Inc. All Rights Reserved.

