【休憩】

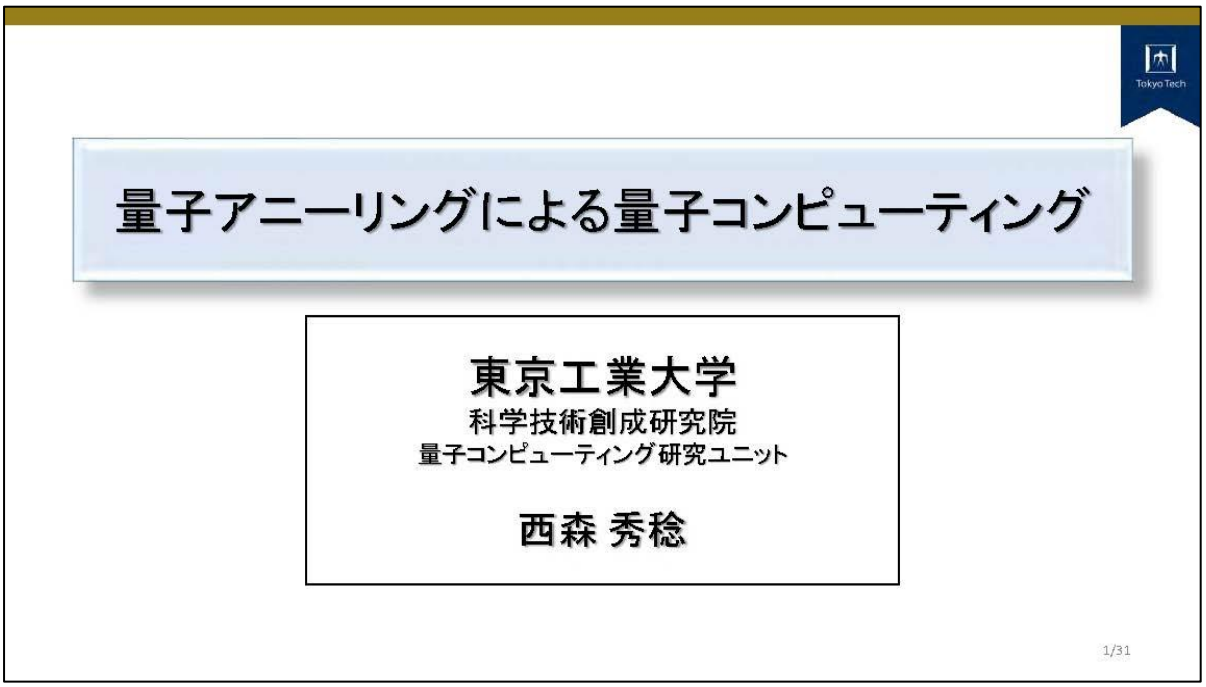
【司会】

二人目の講演者は、東京工業大学 科学技術創成研究院 量子コンピューティング研究ユニットの特任教授 西森秀稔先生です。

ご経歴を簡単にご紹介します。1982 年に東京大学の大学院博士課程を修了され、理学博士の学位を取得されました。カーネギーメロン大学、それからラトガース大学などの博士研究員を経て、1984 年から東京工業大学理学部物理学科の助手、90 年から同じく理学部物理学科の助教授、そして教授を経て、現在は、東京工業大学の科学技術創成研究院の特任教授として着任されておられます。

ご専門は様々な研究がありますが、特にスピングラスの研究、それから今回お話しいただく量子アニーリングの提唱、ということで、様々な賞も受賞されておられます。

それでは西森先生、よろしくお願いします。

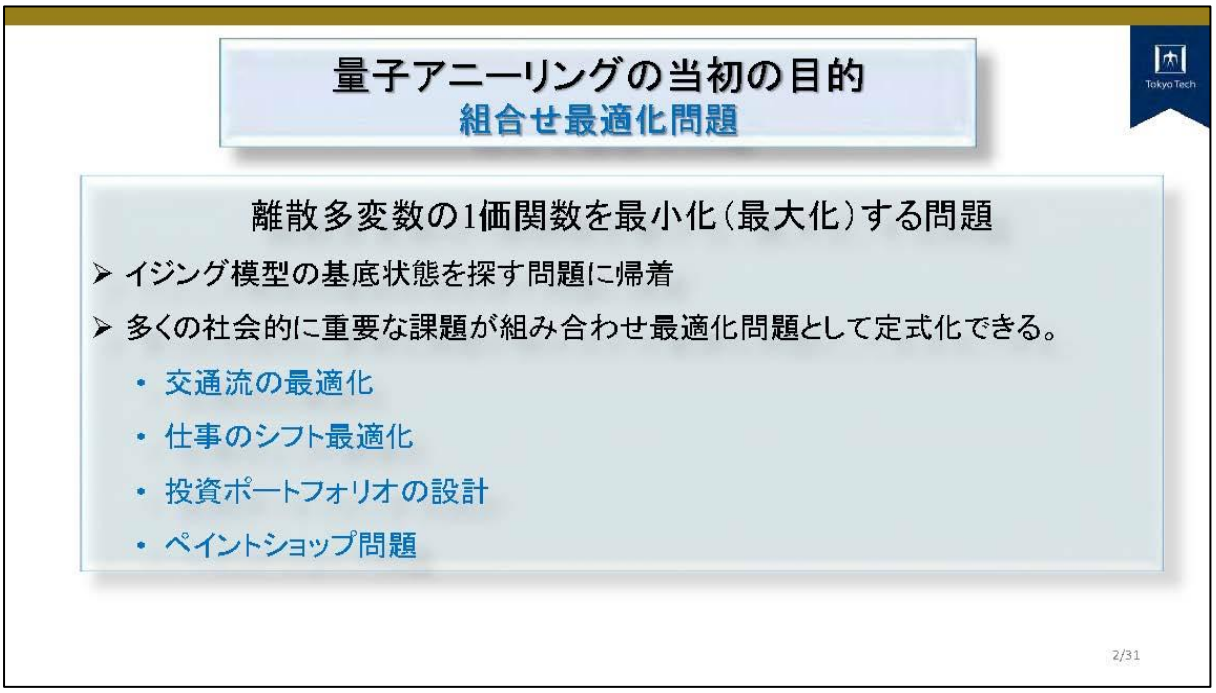


スライド 1

ご紹介ありがとうございます。東京工業大学の西森秀稔と申します。

今日は、「量子アニーリングによる量子コンピューティング」というタイトルで話す機会を与えていただきまして、どうもありがとうございます。今日は YouTube でいろんな人に見ていただくということで、どういう方が聴いておられるか見ておられるかちょっと測りかねて、どういう焦点の当て方をするか迷ったんですが、やっぱり仁科記念講演会ですので、物理の研究者あるいは学生の皆さんを主に念頭において、お話しするということにいたしました。

「量子アニーリングによる量子コンピューティング」という話なんですが、一言で言えば、物理の手法を使って、計算科学と言うか情報学というか、それからさらにその先に拡がる社会問題を解こうという話になっています。



スライド 2

量子アニーリングとはなにか、ということを一言で言ってしまうというのは、なかなか難しい問題なんですが、最初どういう問題意識として出発したか、現在、どういう話が主な目的になっているかということを申し上げますと、組み合わせ最適化問題というのを解くというのが、非常に重要なターゲットになっています。

組み合わせ最適化問題というのを定義として言えば、離散多変数の 1 価関数を最小化、あるいは最大化する問題ということになります。ちょっと言葉はいかめしいですが、たくさん変数があって、その関数の最小値あるいは最大値を求める。ただし、その変数が離散変数で飛び飛びの値を取る、という条件がついているということです。これ全部実関数ですので、最小化と最大化というのは、マイナスの符号をつければ同じことですので、ほとんど今日の話は最小化の方の話になります。

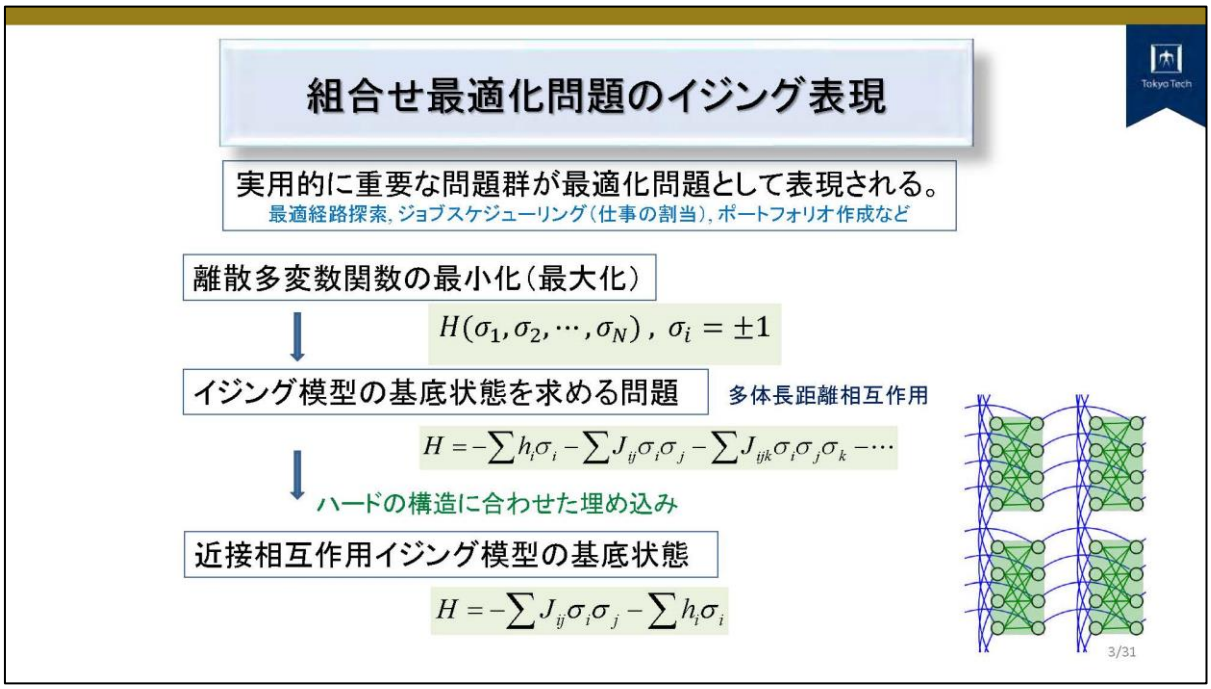
それで、これをなんで物理かというと、実は、イジング模型、物理の統計力学あるいは物性で言う、非常に簡単な磁石の模型のイジング模型の基底状態、最低エネルギーを探す問題というものに帰着する。ある意味、等価であるということが分かっています。そういう意味で、ある種の相互作用、場合によっては複雑な相互作用を持つイジング模型を調べて、その最低エネルギー状態、基底状態を探す、あるいはその状態だけではなくて、そのエネルギーを探すということをするというわけで、物理の手法が使える可能性が出てくるわけです。

これは、もちろん今の話の範囲内では物理の問題なんですが、実は組み合わせ最適化

問題という見方をすると、学問的な興味だけではなくて、非常にたくさんの社会的な重要な課題が、組み合わせ最適化問題として定式化できるということが知られています。

例えば、交通流の最適化、仕事のシフトの最適化、投資ポートフォリオの設計、あるいはペイントショップ問題。これはごく一部の例なんですが、これで見られるように、たくさんの社会の問題が、実は組み合わせ最適化問題として定式化できるために、この組み合わせ最適化問題をうまく解くことができれば、社会的なインパクト、社会的な影響が非常に大きいというわけで注目されている、という側面があるというわけです。

それで組み合わせ最適化問題とイジング模型、どういうふうに繋がるんだということを、まず簡単な例で 4 番目に出ているペイントショップ問題でお話しします。



スライド 3

その前に一般的な formulation を。

先ほど申し上げましたように、実用的な重要な問題群が、組み合わせ最適化問題として表現される。離散変数ですので、二進法で（バイナリーで）2 つの値の組で表現できる。二値の一番簡単な例っていうのは、 2 つの値をとる。0,1 あるいはプラスマイナス 1。

以下では 0,1 ではなくて、物理のイジング模型の伝統に従って±1 という変数を σ_i と書いてイジング変数と呼んで、これの N 個ある変数の関数 H、これは実はイジング模型のハミルトニアンになるんですが、これを最小化する問題、というふうに捉えること

にします。

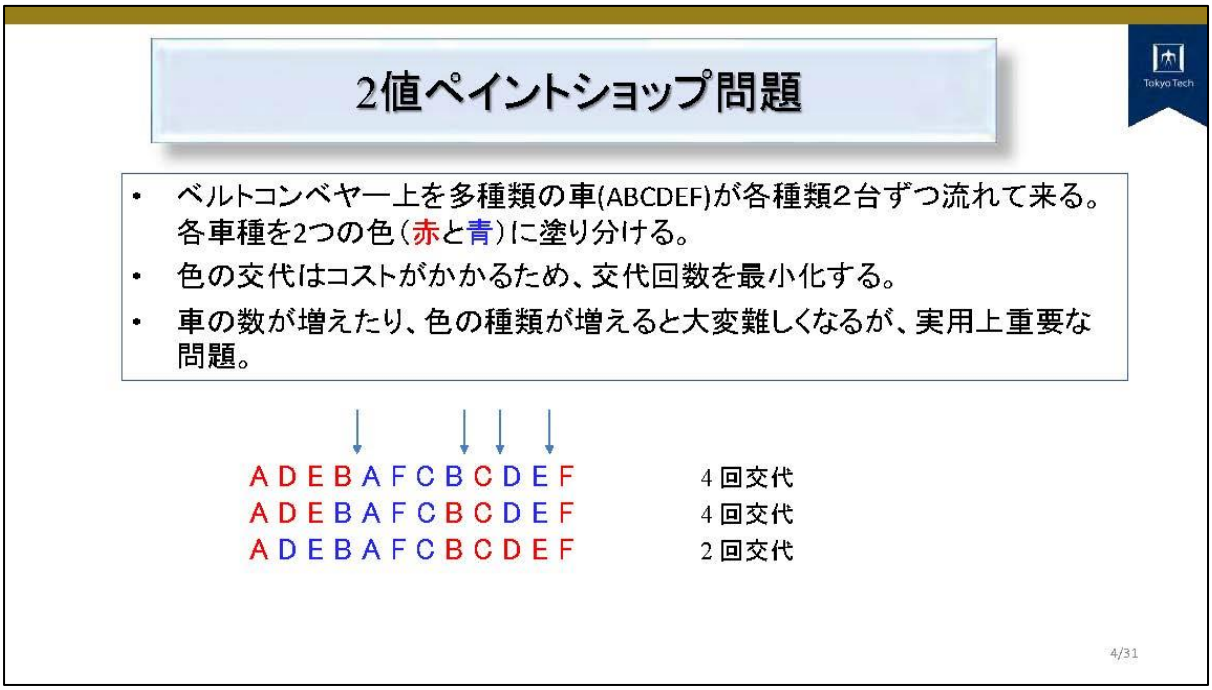
そうすると N 個変数がありますので、しかも離散変数ですので展開することができます。一個だけの項、それから２つ絡まっているいわゆる二体相互作用の項、それから三体相互作用の項、たくさん項は一般にはあるんですが、これは N が有限なら有限個で止まります。

なぜならば全部かけて N体相互作用、σ_1 から σ_N まで全部かけると、その先はさらに作ろうとすると自乗するとこれ 1 ですので、もう作れないというわけで、Nが有限である限り有限個の項で収まる。ただ、こういうふうにすると、i と j がかなり違う値、1 と Nのところにも相互作用があるような、複雑な相互作用を持ったイジング模型に一般にはなります。

これはこれで、ほぼ自明な簡単な話なんですが、実際に、実物の問題を解く、ハードウェアというものに落として解く、という試みが盛んになされています。後で紹介しますが。

そうするとハードウェア上ではたくさんの相互作用、例えば 3 つが同時に関わったような相互作用、4 つ、あるいはそれ以上のものというのは、直接的には現在は実現されていませんので、それはハードウェア上に埋め込みという、つまりハードウェアの構造に合わせてこの二体と一体の項だけで表現するということが必要になってきます。

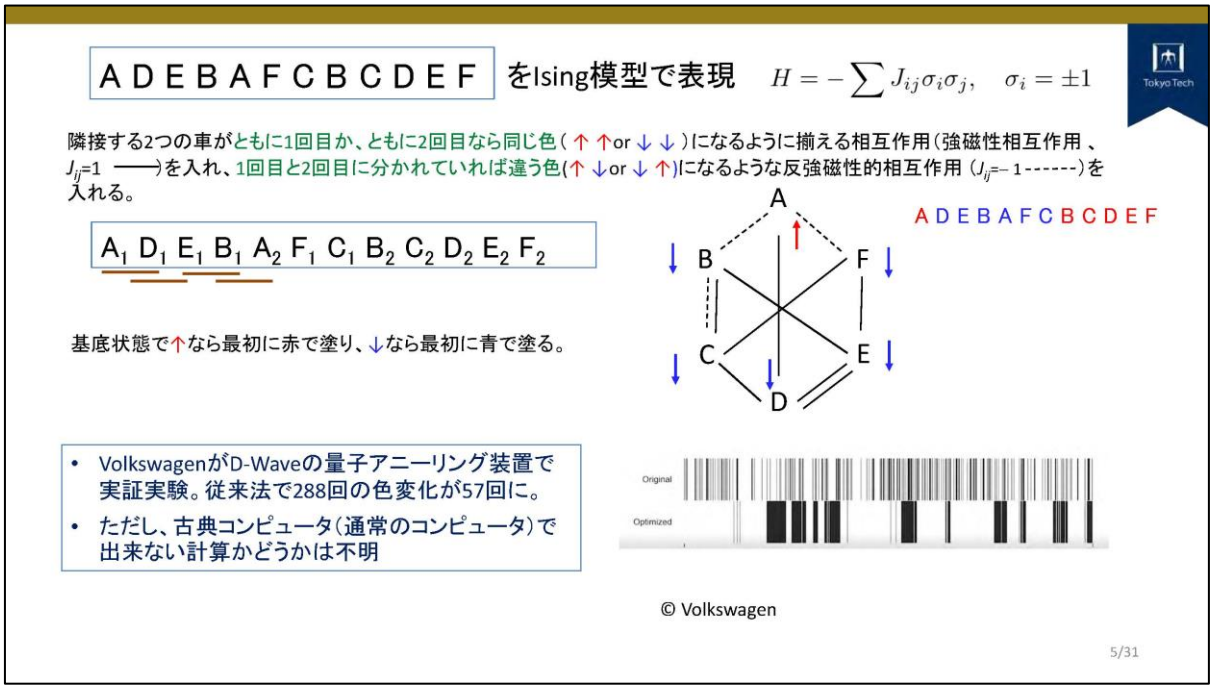
ここに右にあるのは、D-Wave っていう会社が作ってる量子アニーリングマシンのチップの非常に簡単な模式図なんですが、ここに一つ一つの丸がイジングスピンだと思うと、まあこういう構造になって、この線があるところに相互作用があるというわけで、近くの者同士は相互作用してるんですが、例えば左上と右下、こういう遠くの間には直接の相互作用はないというわけで、言わばこの途中の別の変数を媒介として、端と端を繋ぐというようなことをする、そういうことをすると、結局、任意の組み合わせ最適化問題がこういう形で表現できる。少なくとも近似的に表現できるということが知られています。ですから、この一体と二体のイジング模型の基底状態を解く方法を考えればいい、という問題になります。



スライド 4

それで、今申し上げた組合せ最適化問題を、イジング模型に落とすというこの辺の話を、具体的に社会的に重要な問題で一つご説明します。これ実は Volkswagen がこのごろやっている話なんですが、ベルトコンベア上をいろんな種類の車が次々に流れてくる、ここでは 6 種類なんですが、ABCDEF、それで各種類 2 台ずつ、例えば A が 2 台、B が 2 台、ずっといって F が 2 台、2 台づつ流れてくる。これは簡単化なんですが、したいのはそれぞれの種類の車を 2 つの色に塗り分ける、A を赤と青、B も赤と青というふうに塗り分ける。これは実は実用的に重要な問題で、もちろん最終的に商品として出るときにはいろんな色があるんですが、最初の工程では下塗りとして黒と白に塗り分けるそうです。パッと見て分かるように赤と青で描いていますが、そういう意味で実用的な意義があります。制約条件として、色の交代を途中でするとコストがかかるため、できるだけ交代回数を（色が変わる回数）を小さくしたい。これが 2 値のペイントショップ問題という問題です。そんなに複雑な問題ではないように見えますが、実はこの車の種類が増えたり、いろんな種類が日常になると非常に難しくなる。言わゆる NP hard、NP 困難な問題と言われる非常に難しいクラスの答えになって容易には解けない、けれど実用上重要な問題だということを分かっていただけるかと思います。それでこの例では、こういう順番に、ADEBA…F という順番に車が流れてくる。そこで、とにかく二台目が来ない、A の二台目が来るまでは同じ色で塗る、交代を小さくしたいので、ここで A が二台目来るので色を変える、またずっと続けていって C が二台目の時には色を

変えないといけない、こういうふうに、いわば場当たり的にやると、この場合には 4 回交代する、4 回の色交代がある。ちょっとやり方を変えても 4 回、でも実はうまくすると 2 回で済む、ということがこの例では知られています。A が来てその次で D が初めて来るんですがとにかくここで変えてみるということをやってその次に、B が 2 回目に来た時にはどうしても制約条件からやむを得ずに、B を塗り分けないといけないですから、そうすると、あと同じ色で済むというわけで、うまくやると、場当たり的にやるよりもかなり減らすことができます。このもっと大きな例は、この次のページでお見せします。

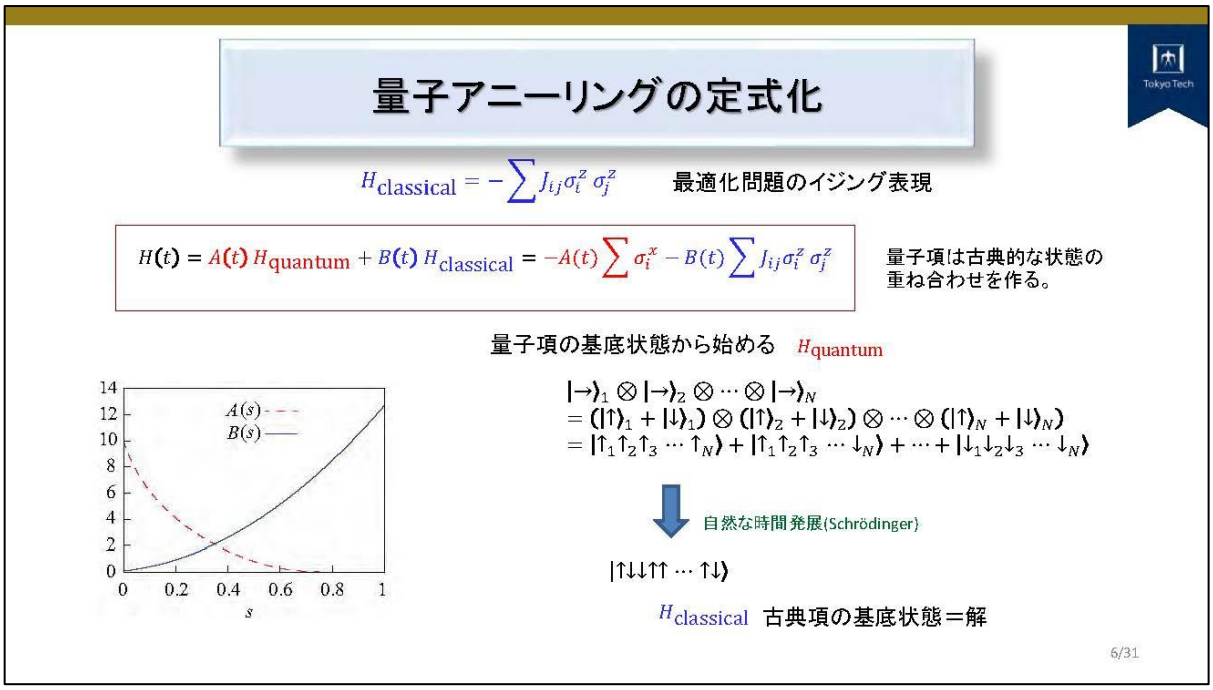


スライド 5

これをイジング模型で表現する、これ実はそんなに難しくなくて、イジング模型の項、エネルギーというかハミルトニアンをこうやって書いてあるんですが、この *Jij* を *i* と *j* ごとに±1 の相互作用を決める、隣接する二つの車がともに 1 回目かともに 2 回目ならば、できるだけ同じ色になるように、この二つの値を、±1 というのは青と赤を表してますが、同じようになるように強磁性的相互作用、つまり *J* が 1、プラスの値ならば、これが二つ同じ値の時にエネルギーが低くなりますので、強磁性的な相互作用を入れる。隣接する 2 つの車が 1 回目と 2 回目に分かれていると、違う色にしたほうがいい、というわけで、違う色の方が安定になるように、ここのマイナス 1 を、ここにマイナス 1 を入れますとここにマイナスがありますので、ここのマイナスとここの *Jij* のマイナスが打ち消しあってプラスになって σ_i と σ_j がプラスとマイナス、違う状態になる方がエネ

ルギーが低くて安定になる、こういう方針でやっていきます。それで何回目かということを明記したのがこれで、ここまでは一回目で A が 2 回目、F は 1 回目、C が 1 回目、・・・F が 2 回目、これを見ながら順番に割り当てていきます。まず最初、A と D 両方とも 1 回目なので強磁性的相互作用、同じ状態になるような相互作用プラス 1 をいれます。その次は D と E も 1 回目なので強磁性的相互作用、E-B。次は B と A は、1 回目と 2 回目、1 と 2 なので反強磁性、違う状態になるように反強磁性相互作用を入れます。こうやって次々に入れていくと、こういう相互作用の組を持つイジング模型になります。こうやって、2 値のペイントショップ問題がイジング模型に落ちると。ここ 2 回出てきてプラスとマイナスがありますので 0 になって打ち消し合ってますが。とにかく実線のところは同じ状態になるように、点線のところが逆になるような状態にこの±1 を探せという問題となって、答えはこうなっています。この答っていうのは最初は A が 1 であとは全部最初に来た時に青にしろというわけで、さきほど前のページでお見せした非常に少ない回数の交代 2 回で済むという正解が出てくるわけです。これは非常に簡単な例なんですが、実は Volkswagen が実証実験をやってまして、これを五百数十台の車があるという問題で、後でご紹介する量子アニーリング装置、D-Wave という会社が開発した量子アニーリング装置で実証実験をしたところ、従来法では、この上に書いてある 288 回の色変化、赤と青じゃなくて黒と白になってますが、赤と青、黒と白の色変化が 288 回であったのが、このやりかたでやると 57 回になると。約 1/4 で大幅なコスト削減になる、という報告をしばらく前の国際会議でしてました。工場の現場でこの方法を使うための研究をさらに続けてするそうです。ただこの例が、五百何十かの車のペイントショップ問題が、量子アニーリングで解けることは確かなんですが、通常のコンピュータ、古典コンピュータで解けないかどうかってのは彼らは明らかにしてない。おそらくまだ解ける範囲の問題だと思います。ただ実証実験としては非常に面白い。なお、同じ組み合わせ最適化問題が実はアニーリングではなくて、ゲート方式と言われる量子コンピュータでもあるアルゴリズムで解くことができることが知られてますが、実はゲート方式の量子コンピュータって、まだかなり小規模でノイズが非常に大きいので、この同じペイントショップ問題をゲート方式の QAOA という方法でやると 11 台ぐらいで非常にランダムな結果になってしまう、という報告も彼らはしてます。余裕があれ

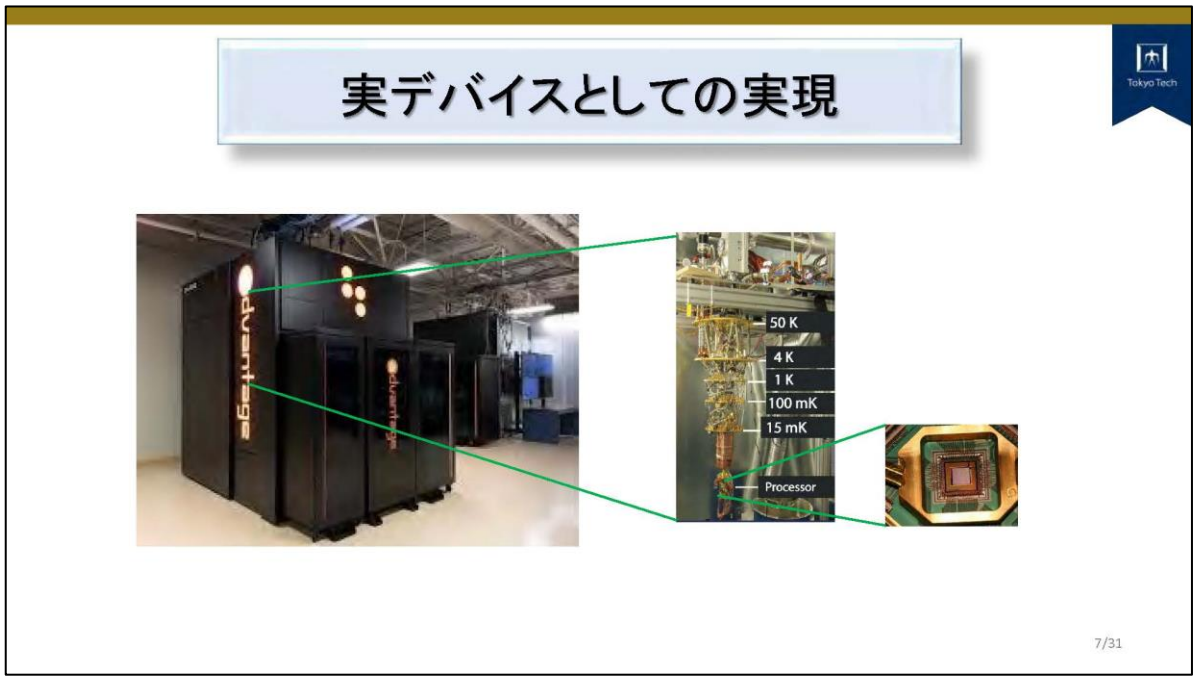
ば後でご紹介します。



スライド 6

今までは最適化問題をイジング模型で表すというわけで量子力学は全然入ってこなかったんですが、じゃあイジング模型の最低エネルギー状態、基底状態をどうやって量子力学で解くか、量子アニーリングの考え方を次に説明します。*H*classical と書いてあるのはこの最小化したいハミルトニアン、コスト関数と言われるもんなんですがこれの *Jij* を与えた時にこの σ_{iz} 、パウリ行列の Z 成分と言われる±1 の固有値を持つ演算子行列なんですが、*Jij* を与えた時にこの σ_{iz} 、σ_{jz} がどういう±1 をとるとこの全体としての値が最小になるかということを見つけたい。そのために量子項を導入します。パウリ行列の *x* 成分と言う演算子なんですが、これは±１の二つの状態の間の遷移を起こす、量子力学的な遷移を起こす、という項になっています。最初この A のほう、量子力学的な項の強さを有限にして、古典的なイジング模型の係数を 0 にします。つまり量子項の基底状態から始める。そうするとこれは量子力学でこれ *x* と書いてますが象徴的に右方向を *x* 方向とすると、全部右方向を向いて σ_x の固有状態になっているのが一番安定な基底状態。量子力学で横方向の σ_x の安定な基底状態ってのは実は縦方向 Z 方向で言うと、上と下が量子力学的に同じ確率で重ね合わせられた状態と等しい、ということが知られています。これがすべてのスピンというか量子ビットについて成立しますので、積を取って展開すると全部の量子ビットがプラス 1、上を向いた状態から全部の量子ビットが下を向いた状態、マイナス 1 の状態までが同じ振幅で同じケースで足し合

わされた状態、これから出発することになります。この 2 の N 乗個あるんですが 2^N 個の中からこの後ろのイジング模型を最小化する一つを選び出す、という問題になっています。それで我々答えを知らないわけですから全ての可能性に対して同じ振幅同じ確率を割り当ててから、真っ白の状態から出発するというのはリーズナブルな話だと思います。それでどうやってするかというと、ここから始めて quantum の係数は有限で classical の係数が 0 というところから始めて、quantum 量子項の横磁場項の係数を 0 に近づけていく。横軸は時間なんですが、s と書いてありますが t と実質的に同じものです、で古典項のイジング模型の係数を有限に持っていく。こういう時間依存性を持った係数によって、このハミルトニアンで制御された量子系を動かす、つまり時間依存のシュレディンガー方程式に従って、システムを自然に発展させるわけです。そうすると、最終的には量子項の係数がゼロになって、古典項だけ残りますので、この中から一つだけが選ばれる。これは実は、この基底状態になっている。なぜかと言うと、最初一番エネルギーの低い基底状態から始めて、この時間変化が十分ゆっくりならば断熱定理、というのがありまして、この途中の状態でもこの全体のハミルトニアンの波動関数ってのは、一番エネルギーの低い基底状態に近いところをたどる、ということが知られてますので、そういうたどり方がもしできたとすると、最終的には 最終的に残るハミルトニアンつまりイジング模型の基底状態にたどり着く、というわけになってます。いうわけでこういう量子項の基底状態から始めて、後はある意味放っておけば答えが求まるという、うまいといえばうまい方法になってます。これが量子アニーリングです。

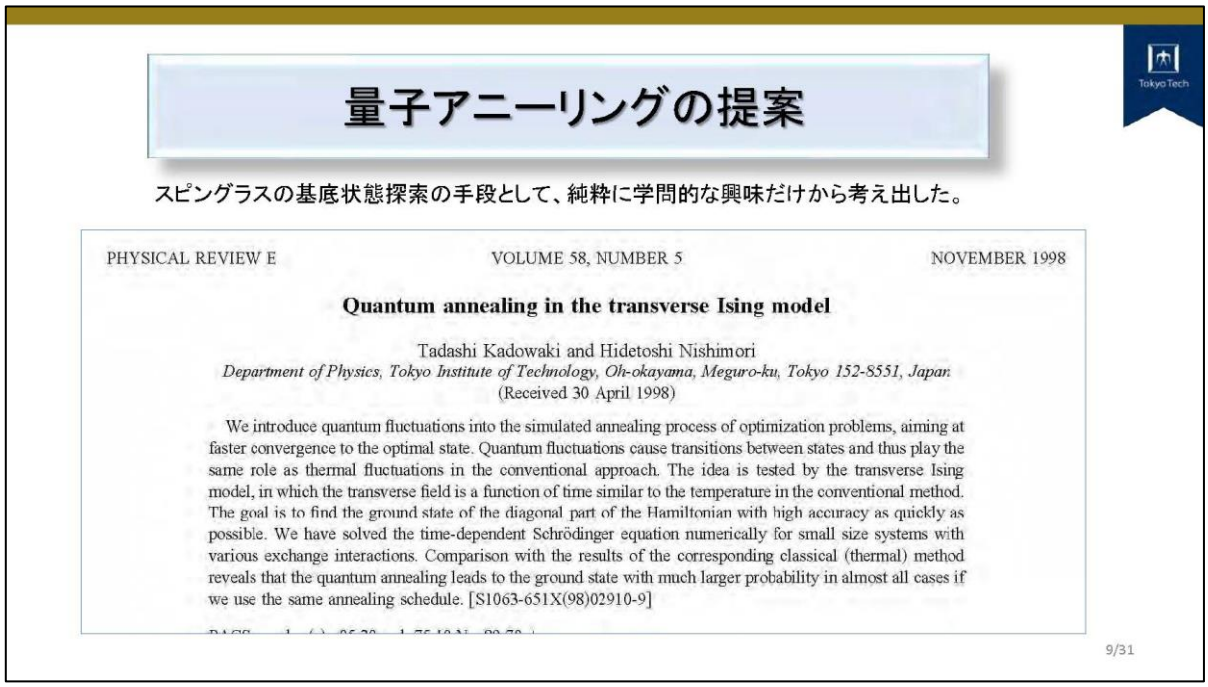


スライド 7

で、これは理論なんですが、もちろん実はデバイスとしてこれは実現されてまして、D-Wave というカナダの小さな会社なんですが、開発して既に売り出しています。数十億円ですので、お金のある方は一度購入を検討されてはいかがでしょうか。超低温にして、十数 mK に冷やして超伝導の状態の小さなリングで量子力学的な効果を実現して、前のページで申し上げた理論を、文字どおりそのままこのチップ上で実現している。もちろん近似的なんですが、そういうデバイスになってます。

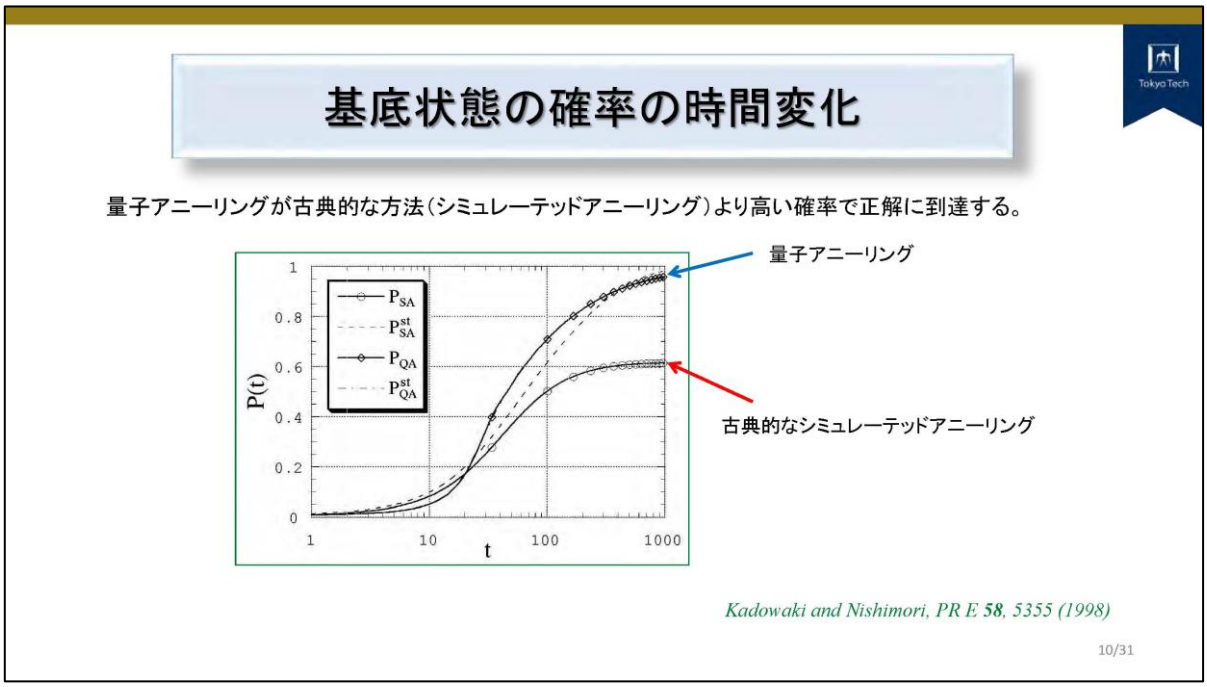
スライド 8

それでこのデバイス、後でご紹介しますが、2011 年に市販されるようになって、ほぼ 10 年経っているんですが、いろんな研究機関や企業が導入しまして、非常に大きな話題になっている。Lockheed Martin と南カリフォルニア大が最初に導入した。後、Google と NASA が 2013 年、2014 年かな？に導入して非常に大きな話題になりました。それからロスアラモス国立研究所も導入してます。ここまでは全部アメリカなんですが、D-Wave はカナダの会社なんですが、こういう形で実機を導入しているのは実はアメリカ、現時点ではアメリカだけなんです。来年、ドイツの Jülich にある非常に大規模な研究所が導入する、と決めたと聞いています。他にも、ここには載っていないアメリカの企業や国家機関がかなりの台数導入して使っている、という話を聞いています。それから自分の会社や研究機関・大学の敷地に置いてなくてもクラウドでサービス提供してまして、クラウドで使ってるユーザーは非常に多数に上るようです。あの AWS、Amazon のサービスの上でも、クラウドアクセスができるシステムになってます。こういう形で非常に大きなユーザー、およびにその実運用の広がりを見せています。



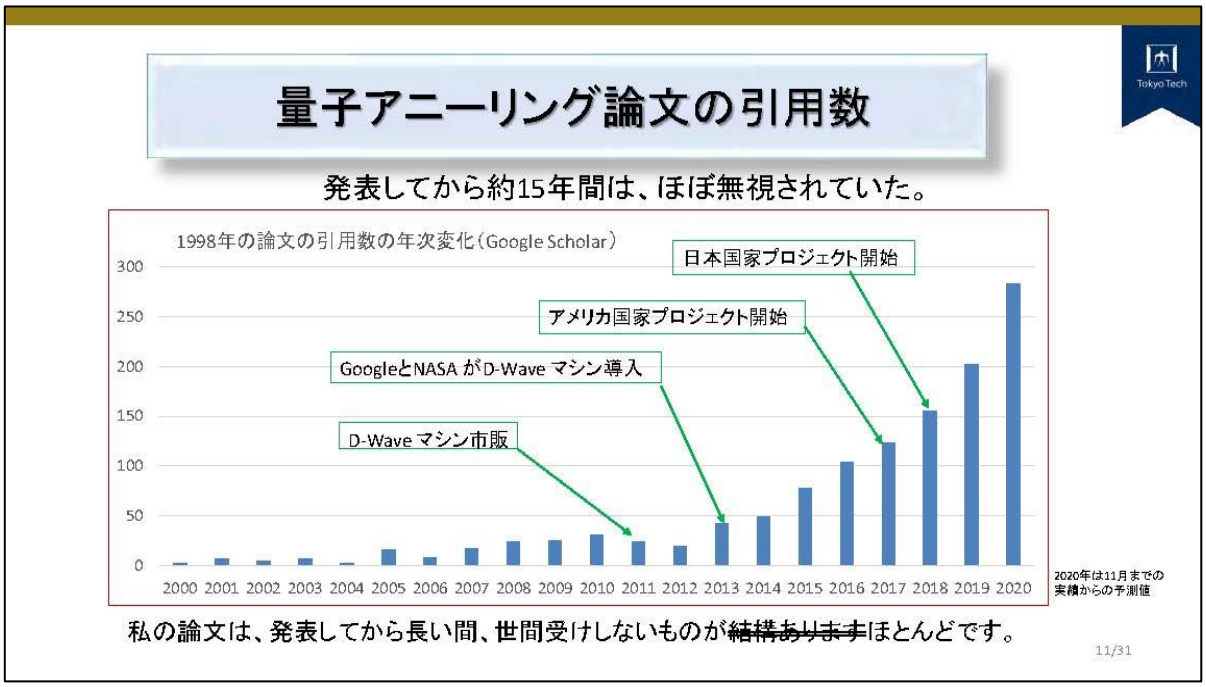
スライド 9

それでこれ実は、我々が 1998 年に提案した論文が発端になってまして、ここにある”Quantum annealing in the transverse Ising model” という論文なんですが、これは、この 1st author の門脇さんの博士論文です。これやったときには、組み合わせ最適化問題で社会的にインパクトがある、ということは全く考えてなくて、複雑な相互作用、J_{ij} がいろんな値をランダムにとる複雑な相互作用を持つスピングラスの最低エネルギー状態、基底状態を探す方法として純粋に学問的な興味だけから考えました。それが実機を作って応用しようという運動が起きる、というのは全く想定していませんでした。



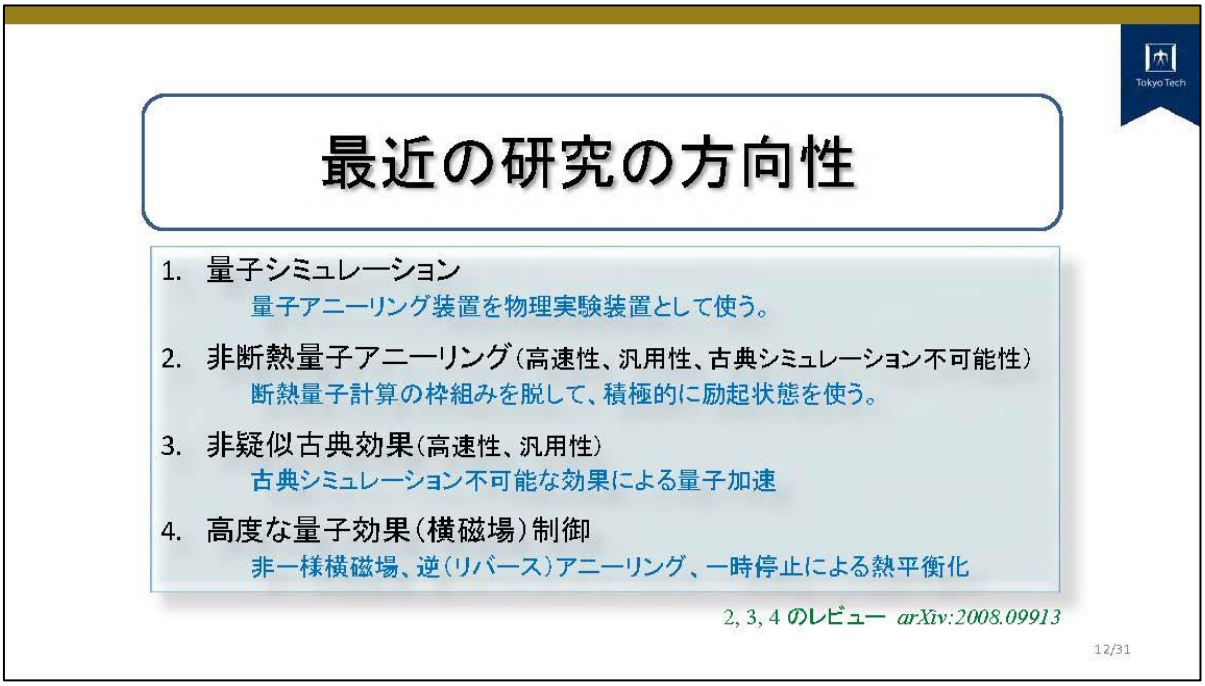
スライド １０

で、これその最初の論文の一つのグラフなんですが、横軸時間で縦軸が各時刻において基底状態にシステムが居る確率です。小さなシステムでの数値的な計算なんですが、先ほどのハミルトニアンによる時間依存シュレディンガー方程式を解くと、確かに量子項を大きくしていくにしたがって基底状態に居る確率が増えて行って、十分長い時間経てばほぼ１に近づいている。なかなかうまくいっているなと。古典的な、量子力学を使わないシミュレーテッド・アニーリングという手法が以前から知られてまして、確率的にいろんな状態を次々に探索していく方法なんですが、それで同じ問題を同じようなスケジュールで解かしてみると、実はやっぱり時間とともに、基底状態に居る確率は増えていくんですが、途中で止まってしまう。確率はゼロではないんですが、量子アニーリングに比べて同じ時間で比べると確率がかなり小さい。その当時調べた全ての例に対して、小さい例なんですが全ての例に対して、こういうデータが出てきて我々非常に驚きました。なんで量子力学を使うと同じようなアイデアで古典的にやった時よりもうまくいくんだろう、といろいろと考えたんですが、直観的な説明はできない。量子トンネリング効果と言いますが、それは象徴的な言い方で、トンネリングがどう効いているんだと説明しろと言われるとなかなか困る状況だったわけです。それでその当時は面白いねで実は終わってしまった。



スライド　１１

これは、ちょっと余計な話なんですがその論文の引用数の時間変化で、1998 年に発表されてから十数年はほぼ無視されてた。ところが D-Wave がデバイスを発表して売り出して、それを Google と NASA が導入してから、急速に研究が進展するようになって、3 年前にアメリカのかなり大規模な国家プロジェクトが発足して、2 年前には日本でも NEDO が国家プロジェクトを開始したと。こういうふうに急速に、ほぼ指数関数的に引用数が伸びて非常に驚いているところです。我々は純粋に科学的な興味から応用なんかまったく念頭に置かずに考えた話が、デバイスとして実現されて、それがいろんな国家プロジェクト、アメリカの大規模な国家プロジェクトとか日本の国家プロジェクトに結びついて、たくさんの研究者がそれを研究するようになって、しかも社会実装に向けていろんなところが、大企業からベンチャーまで動き出してる、っていうのは全く予想しなかった。それを狙ってやったわけではなくて、全く予想しなかった話で、なんていうかちょっと怖いような、なんでこんなこと起きてるのか私には分からないというのが正直なところです。これはだから、私以外のなんかの力が働いてこうなったんですが、こう下に書いてあるように私の論文のほとんどはここフラットで、それは余計なことなんですが。



スライド 12

それで、これが量子アニーリングの考え方と発展の一側面なんですが、もちろん、いろんな理論的な研究も実験的な研究も、あるいは社会実装も同時に進行している非常に面白い分野で、全貌を紹介することはとてもできませんので、簡単に最近の研究の方向性というのをご紹介して、そのうちの１つを詳しくお話しすることにします。この次からお話しするのは量子シミュレーションといって、量子アニーリングマシンを、最適化装置としてではなくて実は物理実験装置として使う、つまり横磁場イジング模型に相当する物理現象は実際にあのチップで起きてるわけで、それを利用して物理の研究をしよう、という動きがここ数年急速に立ち上がりつつあります。それのご紹介は後でします。それ以外にも、最適化操作、最適化問題を解く装置としてみた時に、さらに高度ないろいろな量子効果を制御することによって、今までできなかったことができるようになる可能性を追求するという研究は急速に進展してまして、例えば非断熱量子アニーリング、つまり先ほど断熱定理というのを申し上げて、非常にゆっくりパラメータを動かすと、ずっと基底状態をたどり続けるということを言ったんですが、それ実際になかなか難しいですし、理論的にも断熱にこだわりすぎるとうまく必ずしもいかない、ということが分かってきたために、励起状態を積極的に使って、非断熱遷移を使って、高速あるいは古典的なシミュレーションが不可能な領域を探索しよう、という動きが急速に立ち上がりつつあります。実は励起状態をうまく使うと汎用性、つまり組み合わせ最適化問題に限らず、任意の量子計算ができるということも理論的に分かっています。それから非疑

似古典効果、これはちょっと直観的に説明が難しいんですが、量子モンテカルロという古典的なシミュレーション、横磁場イジング模型の古典的なシミュレーションの手法はあるんですが、非疑似古典効果というのを入れると、いわゆる負符号問題というのが出てきて、古典的な量子モンテカルロ・シミュレーションが不可能になります。ということは古典的な対応する手法ではできない、という意味で量子加速が見られる可能性がある。しかも、その非疑似古典効果をうまく入れると、やはり汎用性が出てきて任意の量子計算ができる、という意味で非常に面白い。というわけで非疑似古典効果がどういう場合に高速性を発揮するか、あるいはデバイス実験としてどういうやりかたをすると良いか、という研究が盛んになされています。それから横磁場イジング模型のカテゴリーの範囲内でも、横磁場を一斉に制御するのではなくて、個別に、各量子ビット、各場所ごとに個別に制御することによって問題を（困難を）回避する、あるいはリバースアニーリングという、量子状態から始めるんじゃなくて、ある種の古典状態から始めて、一回量子効果を強めてもう一回弱める、そういうことをすることによって、単純に量子力学的な状態から出発するよりもうまく行く、場合があるということが知られています。それもどういう場合にうまくいくか、あるいは、それをデバイスとしてどういうふうに実現すればいいか、という研究が急速に進んでいます。それから途中で一回止めることによって、熱平衡化で、熱平衡化すると基底状態に理論的に落ちますのでうまくいくと。どういうタイミングで何をすればいいかということに関する研究も進んでいます。2,3,4については詳しく紹介する余裕が今日はありませんので、ここに書いてある最近のレビューをご覧ください。arXiv の 2008.09913 です。

量子シミュレーションへの展開

物理実験装置としての利用、物質科学への応用

13/31

スライド 13

量子シミュレーションの話をいたします。

量子アニーリングによる量子シミュレーションの例

平衡状態の性質

- 3次元スピングラス — *Harris et al., Science (2018)*
- Kosterlitz-Thouless転移 — *King et al., Nature (2018)* ⬅
- スピンアイス — *King et al., arXiv:2007.10555*
- Shastry-Sutherland模型 — *Kairys et al., arXiv:2003.01019* ⬅
- 場の理論 — *Abel et al., arXiv:2003.07374*
- 量子Griffiths特異性 — *Nishimura et al., Phys. Rev. A (2020)*

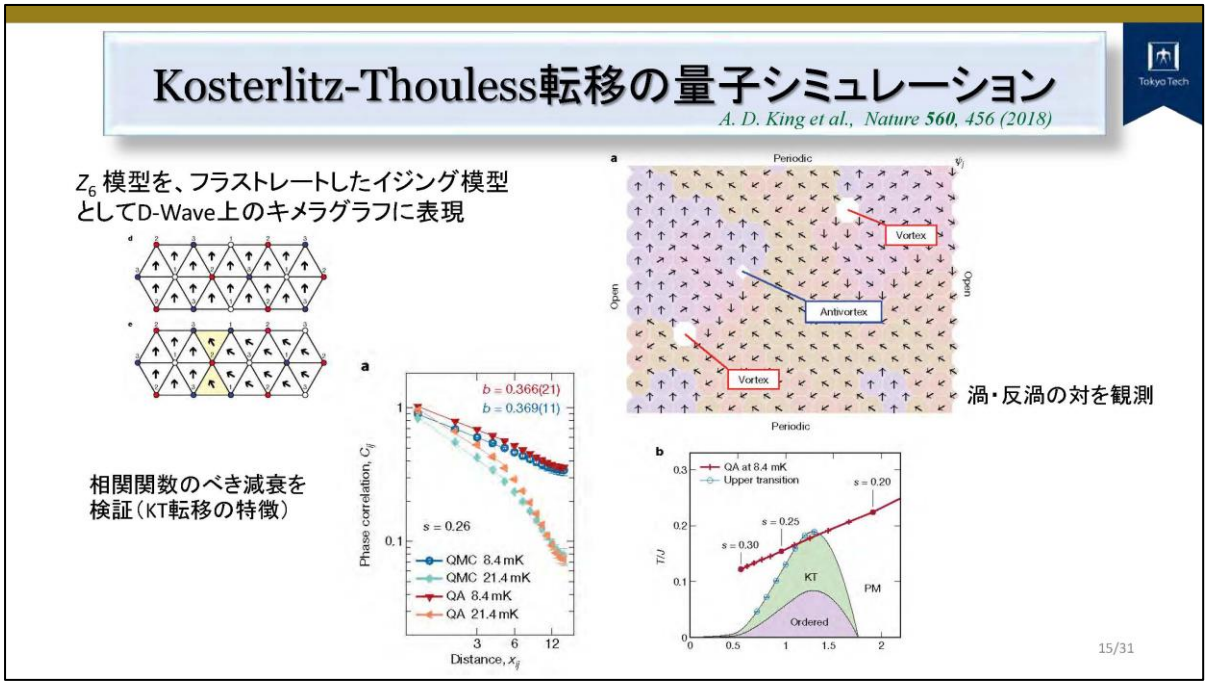
非平衡(動的)状態の性質

- Kibble-Zurek機構 — *Gardas et al., Sci. Rep. (2018)*; *Weinberg et al., Phys. Rev. Lett. (2020)*
- 拡張Kibble-Zurek機構 — *Bando et al., Phys. Rev. Res. (2020)* ⬅

14/31

スライド 14

最近のいくつかの例なんですが、平衡状態の物理を、量子アニーリングのデバイスを用いて調べる、という話がいくつか出てまして、例えば 3 次元のスピングラスの相図を調べる、あるいはトポロジカル相転移の原型といわれる Kosterlitz-Thouless 転移を調べる、これは後で簡単にご紹介します。それからスピンアイス、あるいは Shastry-Sutherland 模型という複雑な、フラストレートした相互作用を持つ物理系、イジング模型の基底状態を調べる、この Shastry-Sutherland 模型の話も後でご紹介します。それから場の理論も、ある種の近似をして離散化してイジング模型で表現して、量子アニーリングマシンに乗せようという話が出てきています。それから量子 Griffiths 特異性という、非常に微妙な特異性をもつランダムなスピン系をシミュレートする、という話もあります。これは実は、我々のグループの西村さんの博士論文なんですが、そういう話もあります。これまでは、この 6 つの例は平衡状態、時間に依存しない状態のシミュレーションの例なんですが、非平衡状態、時間に依存する状態の性質を調べるという話も出てきてまして、Kibble-Zurek 機構という、相転移を有限の速さでクロスすると欠陥ができる、その欠陥の数の話、これは後で詳しくご紹介します。こういう例が出てきています。



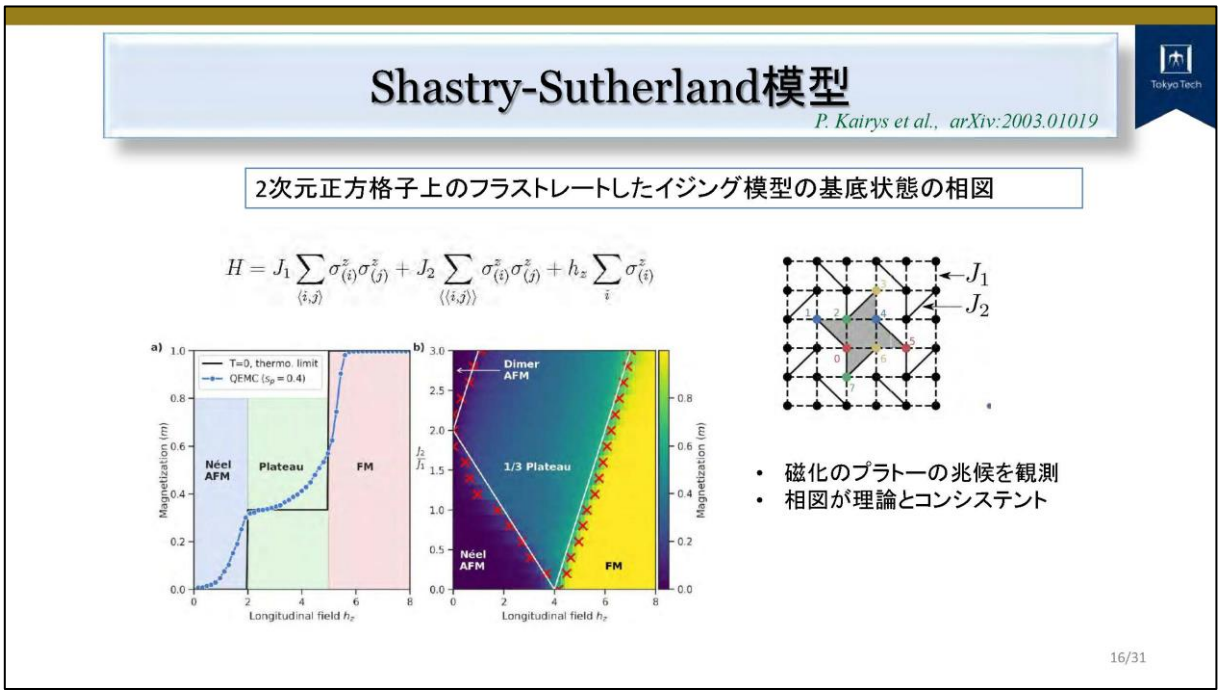
スライド 15

まず Kosterlitz-Thouless 転移の量子シミュレーション、というのはどういうことをやっているかといいますと、Kosterlitz-Thouless 転移というのは 2 次元 XY 模型っていって、平面上に連続的にいろんな方向を向ける矢印があって、それが隣同士相互作用

している。で、欠陥ができたり、vortex（渦）といわれる欠陥ができたり、それらがペアになって、一種の凝縮現象を起こしたりという話なんですが、横磁場イジング模型、プラスマイナスという値しかとらない横磁場イジング模型を、連続的な値をとる Kosterlitz-Thouless 転移の XY 模型に変換するという話が、これは昔から知られてまして、イジング模型を三角格子上に作りまして、この三角格子を先ほど言った D-Wave のキメラグラフといわれるチップ上に落とすんですが、三角格子上のイジングスピンの配位によって、この三角の一つ一つに矢印の向きを決めるという、asignment をします。

そうすると、この 3 つのスピンの値によってこの矢印の方向が 6 つ可能になって、いわゆる Z_6 模型、という模型になります。つまり連続的に丸く 2π の値をとれるのではなくて 6 個の方向しかとれないんですが、つまり飛び飛びになっているんですが、その飛び飛びの刻みがある程度量子揺らぎ、あるいは温度揺らぎが大きくなると打ち消されて、連続と effective に等価になる、ということが知られています。

そういうわけで、こういううまいフラストレートしたイジング模型を Z_6 模型に落とすことによって、Kosterlitz-Thouless 転移を調べたというのがこの話です。この Nature に載った非常に有名な論文です。これ見ていただくと、ここに vortex といわれる矢印がぐるぐる回っている。ここに antivortex という別の回り方をしてる。これがペアになっている状況が、あるパラメータの範囲で実現するということを目で見て観測している。それだけではなくて、いろいろなパラメータを、横磁場の強さやデバイス上の実際の温度をうまく制御すると、vortex と antivortex がペアになって結びついていって、遠くの方の相関関数が、ゆっくり冪的に減衰する領域があるということが理論的に分かっていて―これ量子モンテカルロによるシミュレーションですが―それを検証してみると、確かにこの Kosterlitz-Thouless 相といわれる相にパラメータを合わせると、横軸が距離で縦軸が相関関数なんですが、相関関数が冪減衰してるという Kosterlitz-Thouless 転移の予言に一致する結果が得られる、というわけで Kosterlitz-Thouless 転移の量子シミュレーションができた、という報告を彼らはしてます。ただこれは、今ちょっと申し上げましたように、古典的なコンピュータ、通常のコンピュータでシミュレートできる範囲、だけどとにかく量子シミュレーションが平衡状態に関してできたという話になっています。

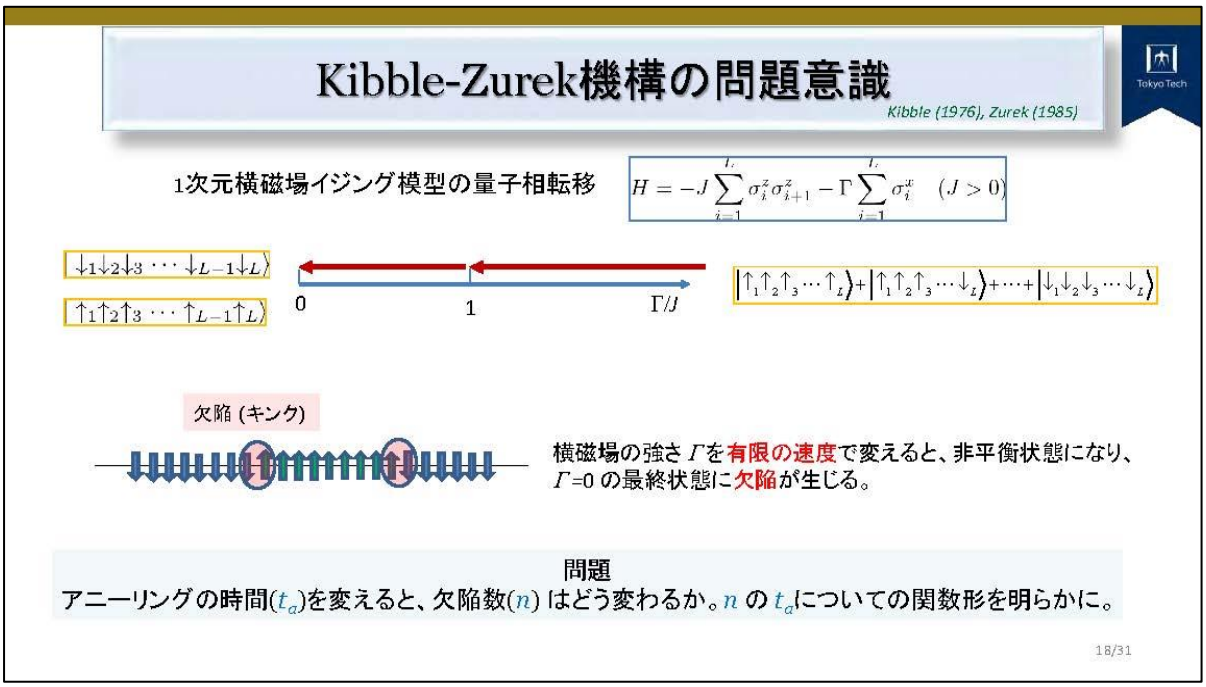


スライド　16

それからもう一つご紹介するのは、Shastry-Sutherland 模型というフラストレートしたイジング模型の話でして、これはわりと最近なんですが、こういう 2 次元の正方格子上にイジングスピンが乗っていて、隣同士強磁性的相互作用、で、こう斜めに反強磁性的相互作用が入っていて、ここのスピンとここのスピンは反対になりたい、でも、ここら辺は縦の方向あるいは横の方向には同じ方向になりたい、というわけで、いわゆるフラストレーションがあって、パラメータの取り方によって、このスピンがどっちの方向を向くかってなかなか決まりにくい、難しい問題です。これはイジング模型ですので、横磁場をかければ直接 D-Wave のデバイス上で実現できます。これがその理論と実験との比較で、横軸がここに入ってる σ_z の係数、z 方向を縦と言って縦磁場の強さ、縦軸が磁化、イジングスピンの揃い方、で理論として分かっているのは、この縦磁場の強さの関数としていわゆるプラトー、ステップができる、あるところでガクンと、基底状態ではガクンと磁化が飛んで 1/3 のところに飛んで、さらに強くするとあるところでガクンと飛ぶ、こういうことが知られています。実際 D-Wave デバイス上で、この基底状態を横磁場を制御することによって求めてみると、こういう青の点で示されたようなデータが出てきた。もちろん、いろいろな不完全さがデバイスにはありますし、大きさが限られてる有限系の実験ですので、綺麗な理論的な無限系のカーブに完全に一致しているわけではないですが、明らかにここで何か異常が起きている。あるいはここで何か異常が起きている、ということが見て取れる。で、これがプラトーの兆候だとこの著者たちは

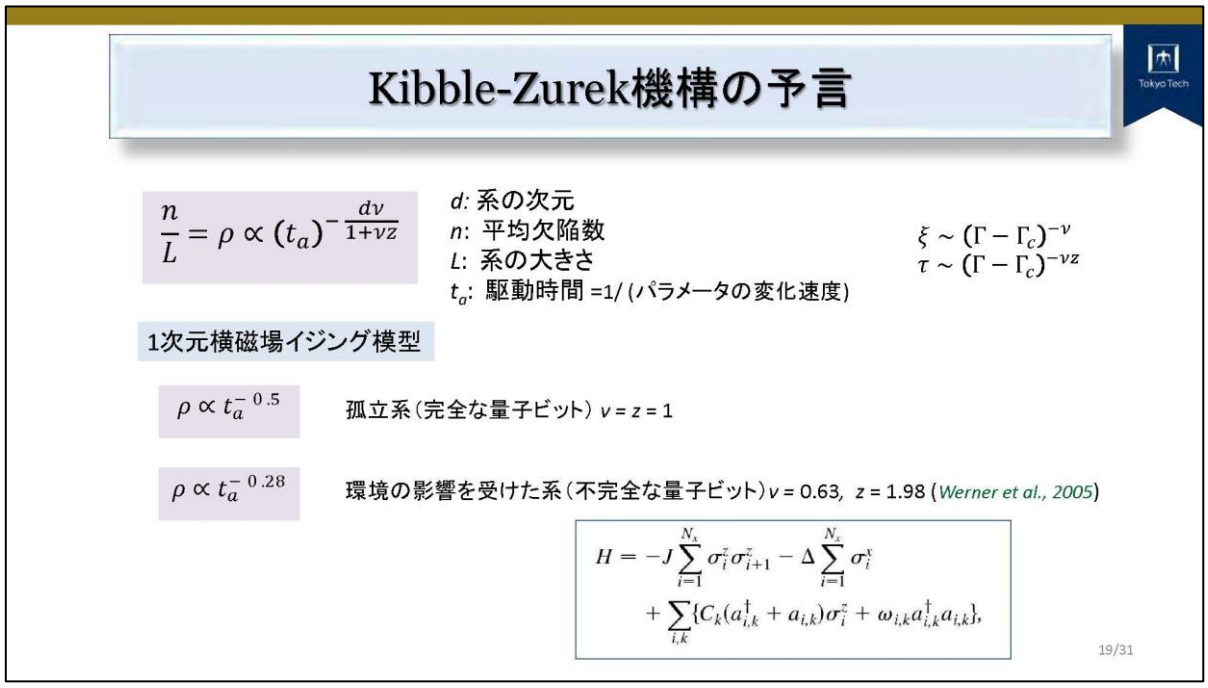
言ってて、この点を相図上にプロットすると、横軸がこの図と同じ縦磁場の強さ、縦軸が J_2 と J_1 この係数の比で、色んな相が出てくるんですが、この理論的に白の線で示されている相境界と、実験的に求められた相境界が非常によく一致してる、という意味で実際にこの Shastry-Sutherland 模型が D-Wave デバイス上でシミュレートできた、量子シミュレーションだという事を言ってます。これ量子シミュレーションと言うか、実際にこのハミルトニアンに相当する横磁場イジング模型を、デバイス上で実現してるわけで、シミュレーションというより物理実験に近い、というか物理実験ほとんどそのもの、あえていえばシミュレーションというよりエミュレーションに近い概念です。これも理論的に分かってる話を、実験的に検証したという意味で理論の範囲を超えてないんですが、まぁこういうことができるようになってる。で、ここからがあと 7、8 分いただいて、量子シミュレーション、我々がやった拡張 Kibble-Zurek 機構の量子シミュレーションという話です。

スライド 17



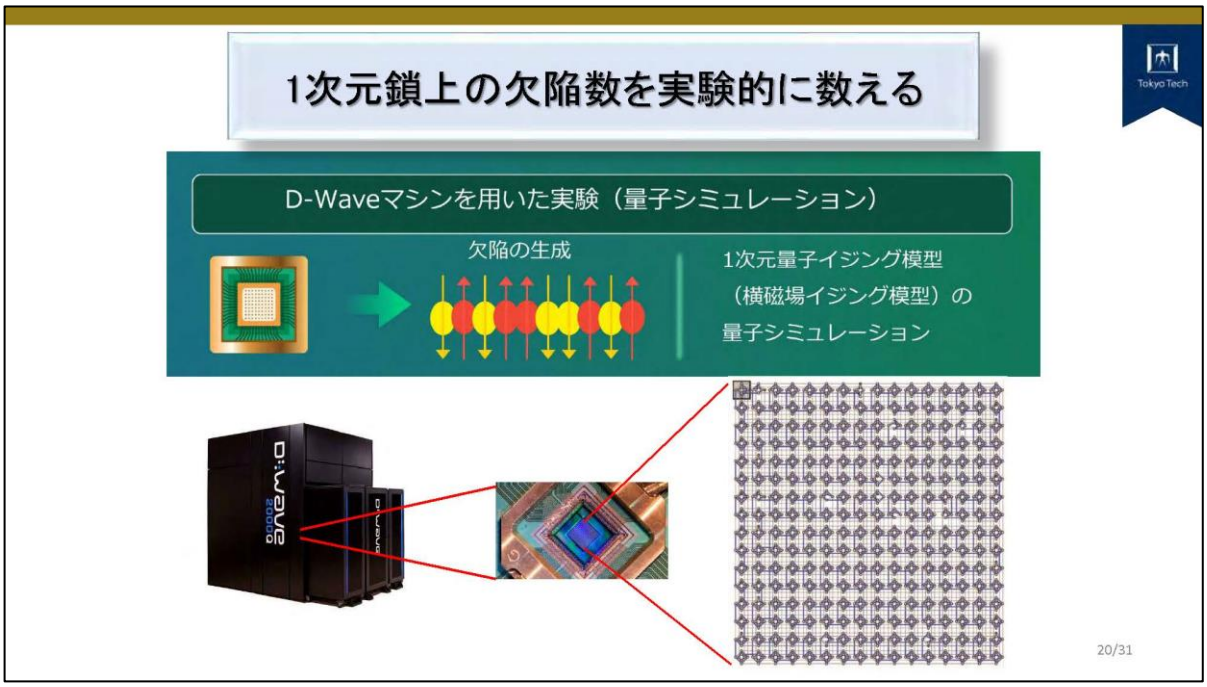
スライド 18

1 次元量子横磁場イジング模型で、この横磁場を強くすると、最初に言いましたように、すべての状態が同じ確率で重ね合わされた、いわゆる量子常磁性相になるんですが、横磁場の強さを弱くしていくとあるところで相転移が起きて、最終的に横磁場を 0 にするとこれ強磁性的な相互作用ですので、全部アップか全部ダウンの 2 つが縮退した状態になる。ここに相転移があるんですが、有限の速さでこの横磁場の強さを小さくしていくと、最終的に完全に揃った状態にはならなくてキンク、欠陥ができます。この有限の速度の関数として、つまり、どのぐらいゆっくりやるか、どのぐらいの時間をかけてやるかという、アニーリング時間の関数として欠陥数がどうなるかというのが Kibble-Zurek 機構の問題です。Kibble-Zurek 機構の予言がありましてちょっと時間がありませんので飛ばします。



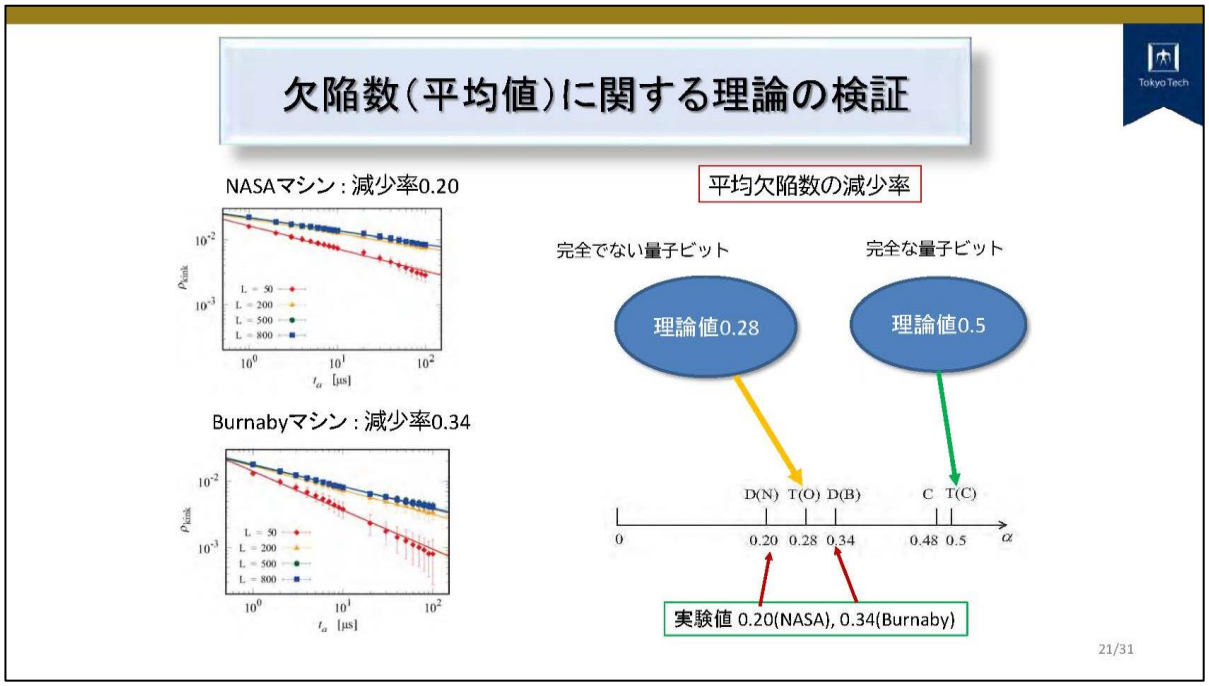
スライド 19

量子ビットが完全に理想的に出来てる、σ^{Zz} とか σ^{x} で表現されるパウリ行列そのものできちんと動いてるとすると、この欠陥の数の密度、欠陥の数をチェーンの長さで、1 次元の場合にはチェーンの長さで割った密度が、計算時間、駆動時間の 0.5 乗で落ちる、計算時間が長くなれば、ゆっくりになるので欠陥ができにくいのでだんだん小さくなるんですが、その冪が－0.5 だということが分かっています。これが Kibble-Zurek 機構の予言です。一方不完全な量子ビット、環境の影響を受けた系だと、実はこの係数が、ここに入ってくるいろんな臨界指数とよばれる係数が変わってきて－0.28 になるということが分かっています。そこで我々は実際にこの現象をデバイスのチップの上で動かしてみて、どっちの冪が現実に近いかということをやってみました。つまり D-Wave のチップ上にこの 1 次元を、チップの中にたくさん量子ビットがあるんですがこう 1 次元の線状に結んでみて、最長 800 個の量子ビットを結んだ、L が 800 の、長さ 800 のチェーンを作ってそれを繰り返し、ひとつのパラメータについて 20 万回実験を繰り返すという、かなり膨大な非常に膨大な実験をしました。これが結果でして、２つのマシンで、NASA にあるマシンとバーナビー、D-Wave の本社にあるマシン、両方クラウドで使ってやったんですが、横軸が実験時間、つまり右へ行くほど長い時間をかけてゆっくりやってるので。



スライド 20

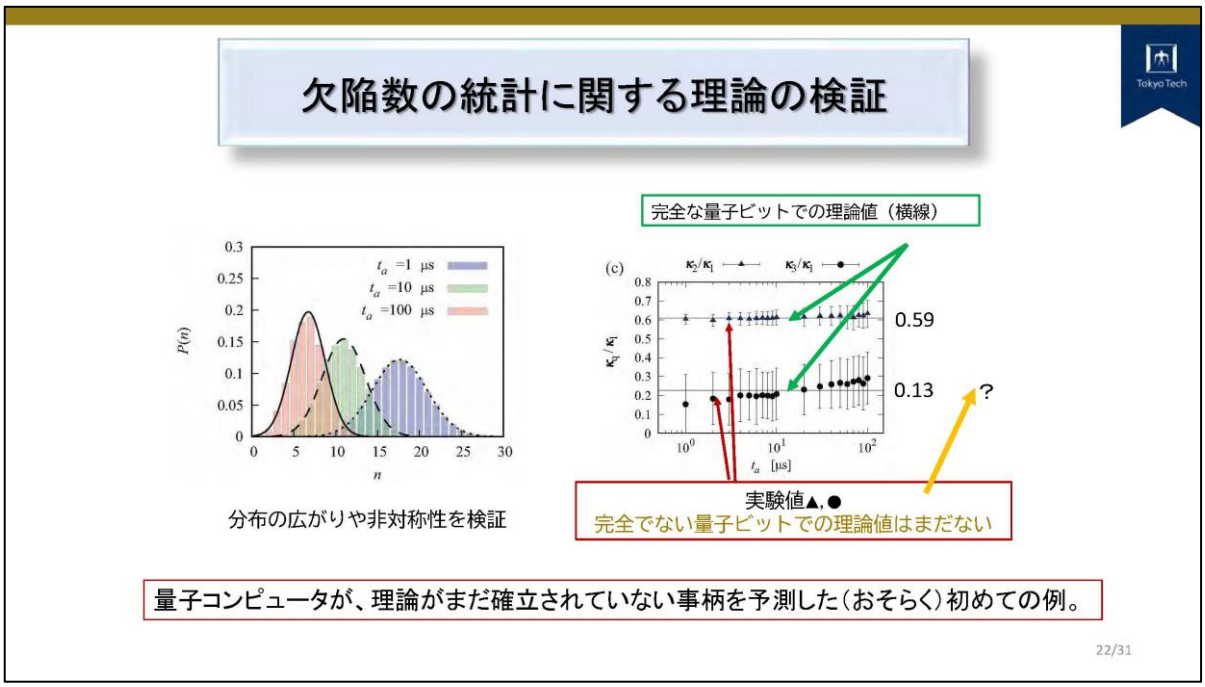
L が 800 の、長さ 800 のチェーンを作ってそれを繰り返し、ひとつのパラメータについて 20 万回実験を繰り返すという、かなり膨大な非常に膨大な実験をしました。これが結果でして、２つのマシンで、NASA にあるマシンとバーナビー、D-Wave の本社にあるマシン、両方クラウドで使ってやったんですが、横軸が実験時間、つまり右へ行くほど長い時間をかけてゆっくりやってるので、



スライド 21

欠陥数、欠陥の密度が小さくなっているという意味で、右肩下がりのグラフになっています。Log-log プロットです。冪減少してます。NASA のマシンだとこの減少率が 0.2 と、この一番短いチェーンについてはちょっと別の要素があって、これは理論の適用範囲から外れているので外したんですが、他の長さ、200, 500, 800 はほぼ同じカーブになってまして、NASA のマシンだと 0.2、バーナビーだと 0.3、というわけで前のページでご紹介した理論値、完全な量子ビット、完全に横磁場イジング模型のハミルトニアンどおりに動いているとした場合の 0.5 とは程遠い。完全でない量子ビットとした場合の、つまり環境と相互作用している量子ビットとした場合の、ある種の相互作用をしているとした場合の量子ビットの理論値は 0.28 なんですが、もちろん 0.2 と 0.34 と 0.28 というのは違うといえば違うんですが、どちらを選べと言われれば明らかに完全でない量子ビット、環境と相互作用してる量子ビットの方に軍配が上がる、という結果になります。じゃあこの 2 つの差はどうなのか、という疑問が当然あるんですが、我々が興味があるのはユニバーサルな、一般的なマシンの、個々のマシンの特性に依らない性質ですので、この 0.20, 0.28, 0.34 の違いを説明するのは、個々のマシンに特化した理論を作らないといけないと、そこは物理の観点からはあまり興味がないので、universality class を判定するという意味では、左の方がまず間違えないというのが我々の考え方で

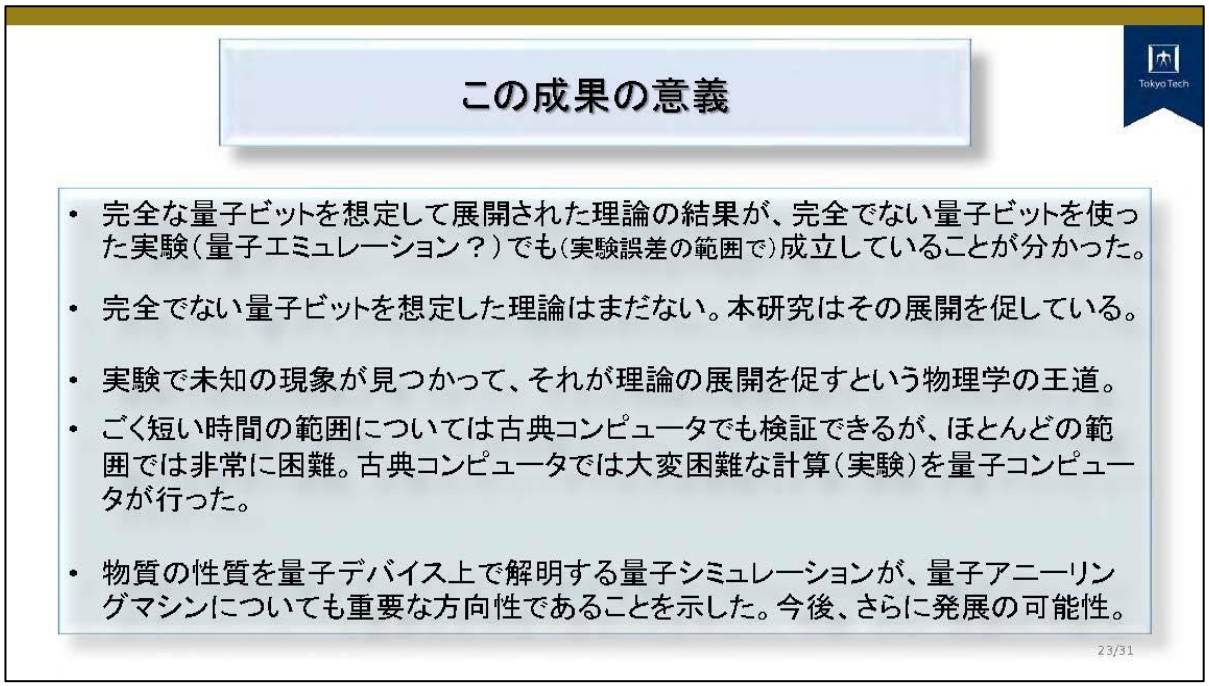
す。ここで、この量子ビットは完全でない、どういう意味で完全でないかというと、さきほどちょっと説明し損ねたんで、そこの横磁場イジング模型に、この σ^z というのに、これ Boson のオペレータなんですが Boson がカップルしてる、いわゆる Caldeira-Leggett model という、こういう模型に基づく量子シミュレーションの指数を使っている。これは何を表しているかというと、超伝導量子ビットで超伝導カレントが流れているんですが、その超伝導カレントが理想的な流れ方をしてなくてふらついていると、そういうものを表現していると考えられています。その影響をはっきり受けてて、指数が 0.5 から 0.28 の付近に落ちてる。まあ完全でないということは、実際のデバイスですので当然予想されてますが、こういう定量的な検証によって明らかにされた。で、ここまでは既存の理論の検証だったんですが、ここからが実は面白いところ、少なくても我々には面白いところで、先ほど申し上げましたように、各データ点、20 万回実験を繰り返してて非常に膨大なデータがあって、先ほど紹介したのは平均値なんですが、



スライド 22

欠陥の数が実は平均値の周りにバラついています。パラメータによって色々バラつきの仕方が違う。そのバラつきの仕方のこの標準偏差やら 3 次の cumulant がどうなるか、ということに対しても完全な量子ビットを仮定した場合には理論が最近あります。この仕事の共著者の Adolfo del Campo という人の理論なんですが、それによりますと 2 次の cumulant と 1 次の cumulant の比が、実験時間によらず定数が 0.59 になるという

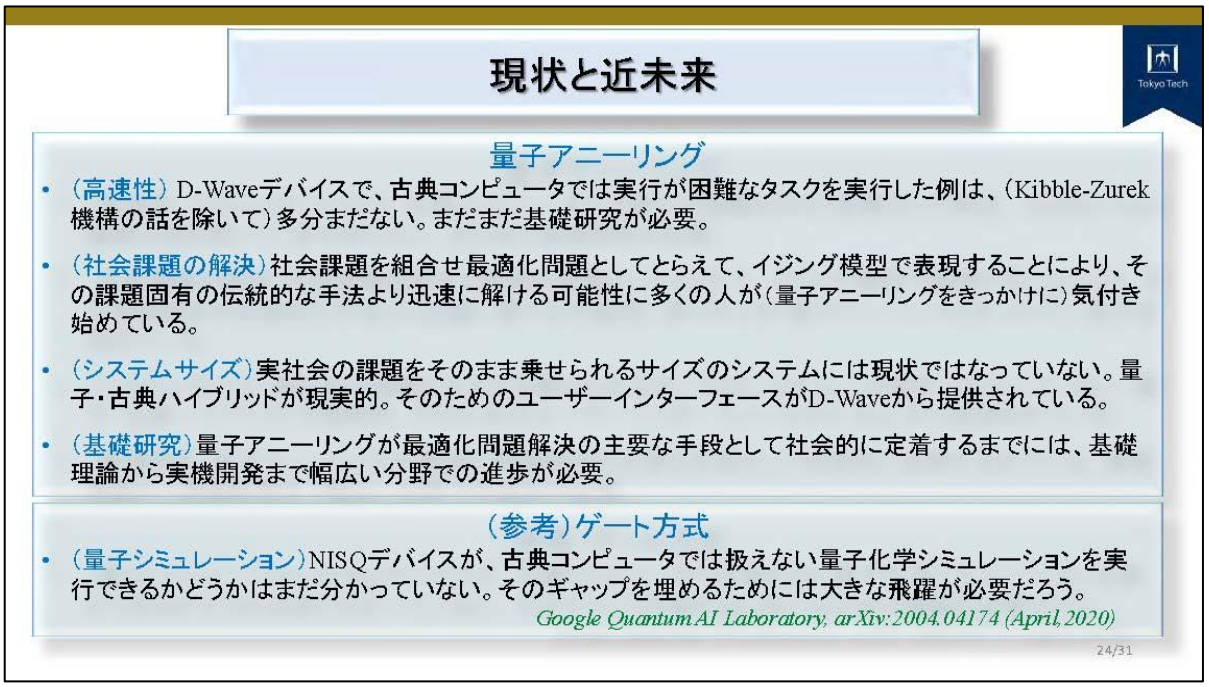
驚くべき結果です。1 次の cumulant、2 次の cumulant、3 次の cumulant　個別にとると実験によって先ほどお見せしたように、実験時間によって右肩下がりになってるんですが、比をとると一定になっている。で 3 次の cumulant と 1 次の cumulant の比率も一定になる、こういう予言もあります。ただしこれは完全な量子ビットに関する理論です。で実際にこの統計を解析してみますと、実はこの二つの値が実験誤差の範囲内で理論と非常によく一致してます。しかし、この前の平均値の解析からは、量子ビットってのは周りの Boson の影響を受けてるということがはっきり分かった、それにもかかわらず完全な、つまり Boson の影響を受けてない孤立した量子ビットと仮定した理論と一致するというのは何なんだろう、と我々はかなり首をひねったんですが、結局この理論を完全でない、Boson と相互作用している環境の影響を受けている量子ビットまで拡張しても、おそらくこれとほとんど同じ予言が得られるだろう、つまり理論がまだ確立されてない現象、事柄を予測したおそらく初めての例、これを一種の量子コンピュータだということにすると、量子コンピュータ、量子コンピューティングマシンが理論がまだ確立されてない事柄を予測したおそらく初めての例、ということになります。



スライド 23

今申し上げましたことを文字で書いたんですが、完全な量子ビットを想定して展開さ

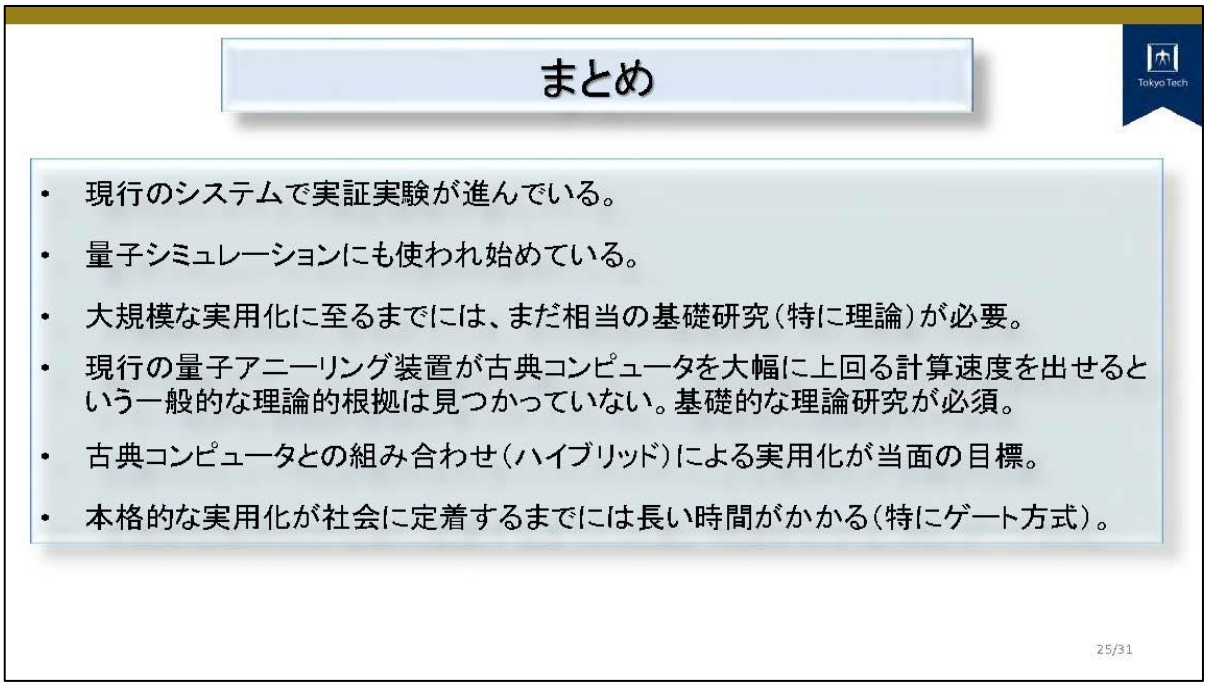
れた理論の結果が、完全でない量子ビットを使った実験、量子シミュレーションでも成立してる。で、完全でない量子ビットを想定した理論の展開を促してる。実験で未知の現象が見つかって、それが理論の展開を促すという物理学の王道を行っているわけです。今の話は実は古典的なコンピュータでシミュレートはほぼ不可能です。短い時間についてはできますが先の実験時間、百マイクロ秒とか数百マイクロ秒まではできません。そういう意味で古典コンピュータではできない範囲で実験をしてみてそれが出来た。これ非常に面白い現象だと思ってまして、今後 10 年ぐらいたつと 20 年ぐらいたつと非常に注目されてるんじゃないかと私は思ってます。



スライド 24

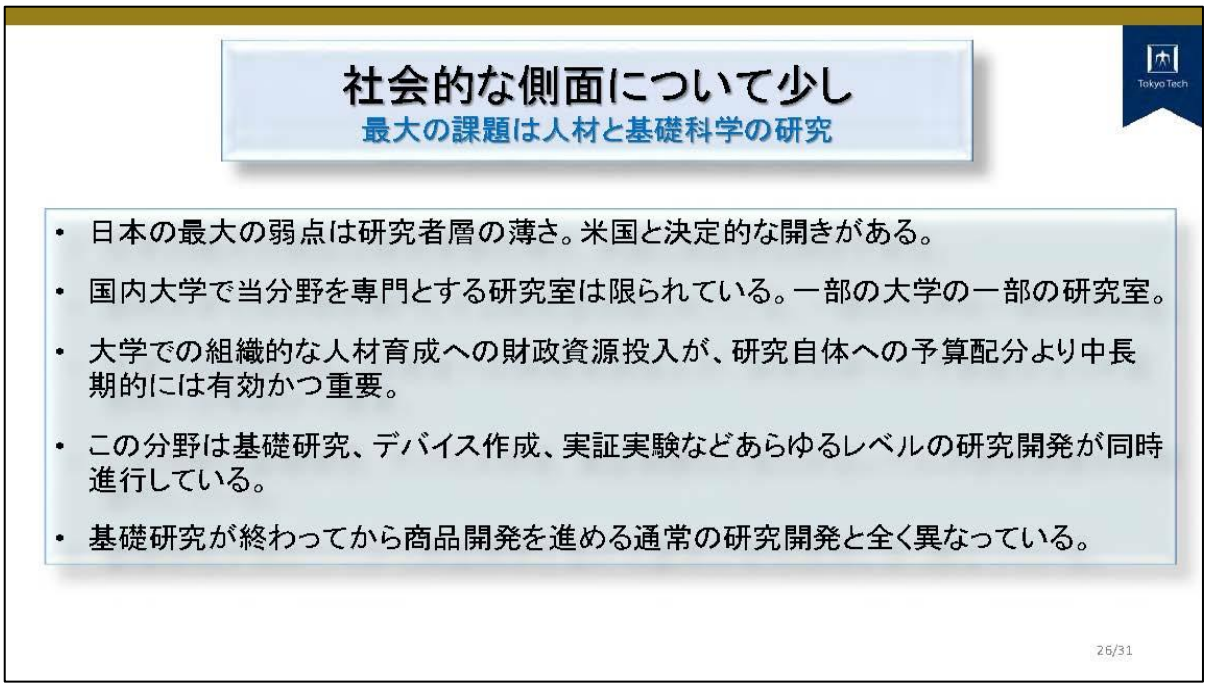
ほぼ終わりなんですが、量子アニーリングで最適化問題が高速に解けるかということに関しては、まだまだ基礎研究が必要ではっきり分かってないです。古典コンピュータで実行困難なタスクを実行した例は、今申し上げた Kibble-Zurek の話を除いて、私の知る限りないです。社会課題に対しても実証実験が次々に展開されていますが、それ本当に通常の古典コンピュータでできない問題なんか、っていうことに関しては、システマティックな検証はあまりない、いやほとんどないです。それから高速性だけではなくて、システムサイズに関してもまだ今動いているマシン、最近のマシン 5000 量子ビットで実課題の大きな問題をそのまま載せるシステムになってなくて、古典／量子をうまく使い分けてハイブリッドが現実的で、そのためのユーザーインターフェースが実は D-Wave から提供されていて非常に有用です。分かってないことが理論的にもたくさんあって、量子アニーリングが社会課題の解決の主要な手段として定着するまでには、基礎研究から実機開発まで非常に幅広い分野の進歩が必要だ、というのが現状です。ゲート方式の量子コンピュータでも、理論的にはうまく作ればきちんと作れば理論どおりに作ればいろんなすごいことができるって事は分かってるんですが、NISQ と言われる 5 年 10 年スケールでできると思われる小規模なノイズのあるデバイスが、古典コンピュータでは扱えない量子化学シミュレーション、例えば量子化学シミュレーションなんかが期待されてるんですが、実行できるかどうかってのは実ははっきり分かっていない。そ

のギャップを埋めるためには大きな飛躍は必要だろうと、実は Google のチーム自体が最近の arXiv の論文で言っています。



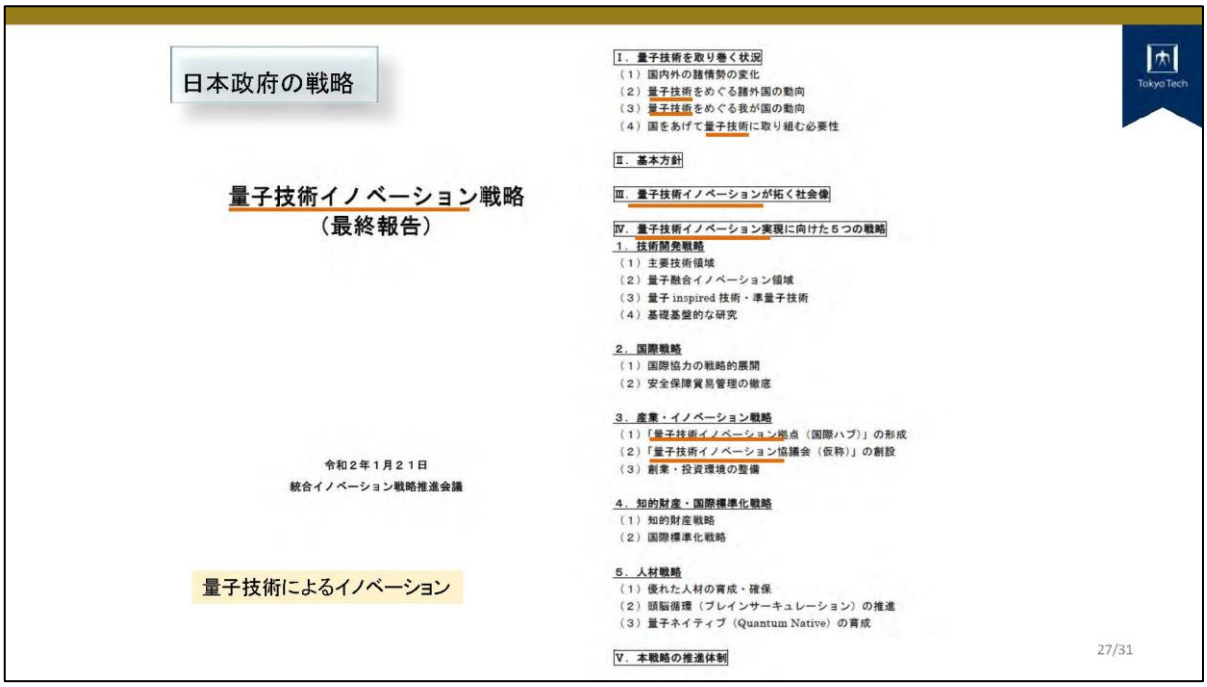
スライド 25

ですから、まだまだ基礎研究が必要というわけで、現行のシステムで実証実験が進んでいて量子シミュレーションにも使われ始めていますが、大規模な実用化に至るまでには、まだ相当の基礎研究、特に理論的な研究が必要で、例えば速くできるかどうか、ということに関してもまだ未解決です。当面は古典コンピュータの組み合わせによるハイブリッドが目標で、本格的な実用化が社会に定着するまでには長い時間かかる、ゲート方式はアニーリングよりもさらに時間がかかると思われます。で、50 分になりましたがあと 2、3 分使わせていただいて、



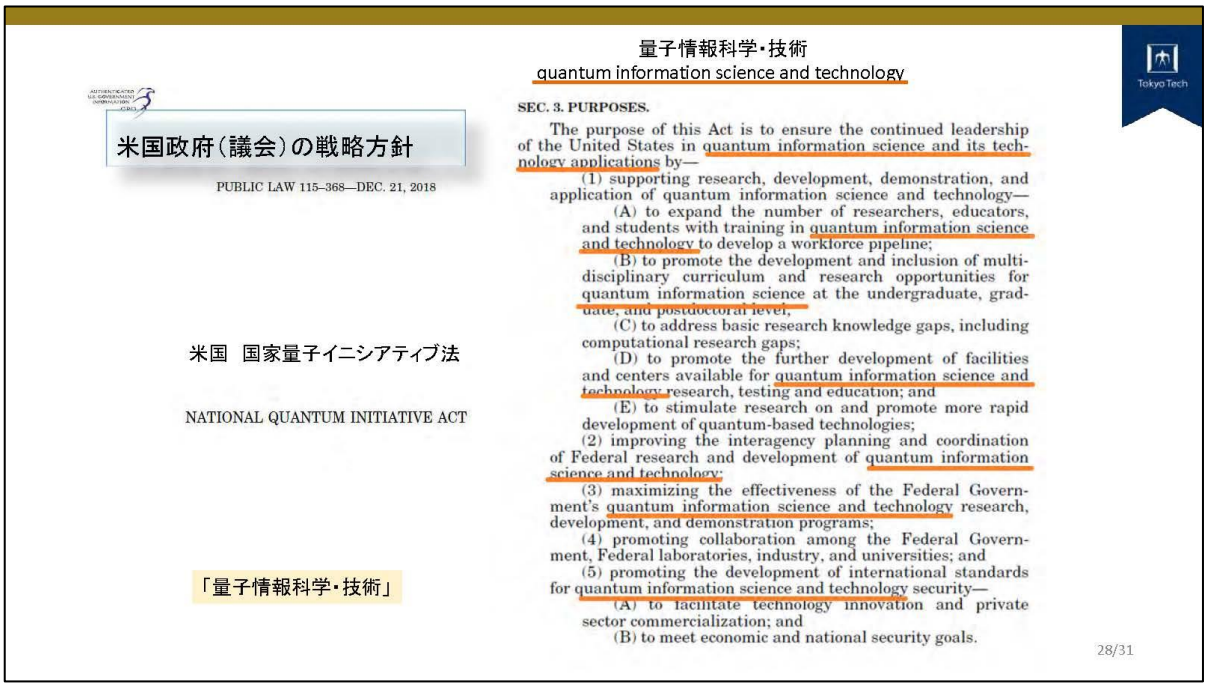
スライド 26

社会的な課題に関して、いろんなところで話させられるもんですから、ちょっと私の意見を申し上げますと、実はアメリカのプロジェクトにも参加してやっているんですが、ひしひしと感じるのはやっぱり研究者の層の厚さが全然違う。定量的に数えたわけじゃないですが一桁違う。国内大学でも量子アニーリングに限らず、量子コンピューティングを専門とする研究室は非常に限られている。量子に関する予算はどんどん着くようにはなったんですが、大学・基礎研究・人材育成・教育に大きな投資をしないととても追いつけない。この分野は非常に面白い、変わった分野でして、普通の商品開発のように基礎研究はとうの昔に終わって、デバイスを作ってそれを売るというスタイルになってなくて、理論も含めて基礎研究から商品開発まで同時に進行してる非常に特異な分野なんですね。その特性を理解しないと、なかなかうまくいかない。そこは実は日本の政府の戦略と、アメリカの方針とかなり文章に違いがよく表れてまして、



スライド 27

これちょうど１年ぐらい前に出た日本の政府の戦略の文章なんですが、量子技術イノベーション戦略というタイトルで、技術を使ってイノベーションを起こすということを繰り返しているんです。



スライド 28

ところがそのアメリカの政府あるいは議会の戦略、これは国家量子イニシアティブ法という法律になってるんですが、それを見ると、quantum information science and technology、science and technology、科学と技術が必ずペアになって出てくるんですね。技術イノベーションでなくて科学技術なんです。そこのスタンスがまず違う。それからこの量子技術イノベーション戦略見ると、色んな項目、何をやるかということが書いてあるんですが、人材育成が 5 項目の最下位なんです、やるんだけど最下位。それに対してさきほどのアメリカの量子イニシアティブ法をみると、最初のこの目的の最初のところに、量子科学情報技術に通じた研究者教育者学生の数を増やし、人材の供給体制を確立する教育が最初だと一番重要だということを言ってるんですね。だから、そこら辺をきちんと考え直さないと、差は開く一方だと私は思ってまして基礎科学と教育への投資が必要だ、ということは色んな所で訴えてます。今日もちょっと触れさせていただきました。どうもありがとうございます。

日本政府の戦略

量子技術イノベーション戦略
（最終報告）

令和２年１月２１日
統合イノベーション戦略推進会議

人材育成の優先順位は最下位

Ⅰ．量子技術を取り巻く状況
（１）国内外の諸情勢の変化
（２）量子技術をめぐる諸外国の動向
（３）量子技術をめぐる我が国の動向
（４）国をあげて量子技術に取り組む必要性

Ⅱ．基本方針

Ⅲ．量子技術イノベーションが拓く社会像

Ⅳ．量子技術イノベーション実現に向けた５つの戦略
１．技術開発戦略
（１）主要技術領域
（２）量子融合イノベーション領域
（３）量子 inspired 技術・準量子技術
（４）基礎基盤的な研究

２．国際戦略
（１）国際協力の戦略的展開
（２）安全保障貿易管理の徹底

３．産業・イノベーション戦略
（１）「量子技術イノベーション拠点（国際ハブ）」の形成
（２）「量子技術イノベーション協議会（仮称）」の創設
（３）創業・投資環境の整備

４．知的財産・国際標準化戦略
（１）知的財産戦略
（２）国際標準化戦略

５．人材戦略
（１）優れた人材の育成・確保
（２）頭脳循環（ブレインサーキュレーション）の推進
（３）量子ネイティブ（Quantum Native）の育成

Ⅴ．本戦略の推進体制

スライド 29

米国政府（議会）の戦略方針

PUBLIC LAW 115–368—DEC. 21, 2018

人材育成が最優先課題

米国　国家量子イニシアティブ法
NATIONAL QUANTUM INITIATIVE ACT

本法律は、次の施策を実施することにより、量子情報科学とその技術面での応用において、米国がリーダーシップを取り続けられる体制を保証することを目的とする。

(A) 量子情報科学技術に通じた研究者、教育者、学生の数を増やし、人材の供給体制を確立する。

(B) 学部、大学院、ポスドクの各レベルにおいて、量子情報科学に関わる学際的なカリキュラムや研究推進の機会の開発を進める。

SEC. 3. PURPOSES.

The purpose of this Act is to ensure the continued leadership of the United States in quantum information science and its technology applications by—

(1) supporting research, development, demonstration, and application of quantum information science and technology—

(A) to expand the number of researchers, educators, and students with training in quantum information science and technology to develop a workforce pipeline;

(B) to promote the development and inclusion of multidisciplinary curriculum and research opportunities for quantum information science at the undergraduate, graduate, and postdoctoral level;

(C) to address basic research knowledge gaps, including computational research gaps;

(D) to promote the further development of facilities and centers available for quantum information science and technology research, testing and education; and

(E) to stimulate research on and promote more rapid development of quantum-based technologies;

(2) improving the interagency planning and coordination of Federal research and development of quantum information science and technology;

(3) maximizing the effectiveness of the Federal Government's quantum information science and technology research, development, and demonstration programs;

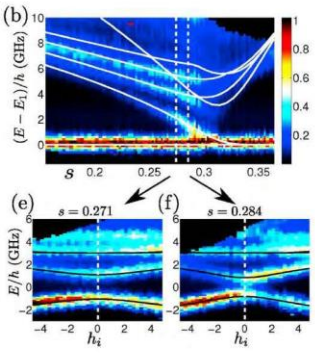
スライド 30

基礎科学と教育への投資を！

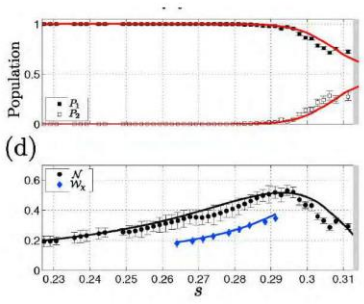
スライド 31

本当に量子力学で動いているのか
エネルギースペクトルと量子もつれ

*Lanting et al, Phys. Rev. X **4**, 021041 (2014)*



単一量子ビットのコヒーレンス時間: 10-100 ns、計算時間 : μs to ms

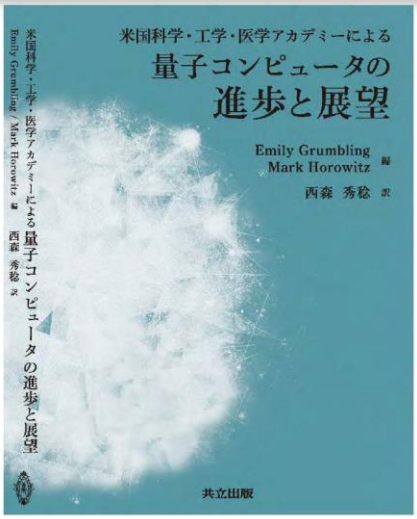


個々の量子ビットが孤立しているときのデコヒーレンスと、量子アニーリングの動作中に多くの量子ビットが結合して多体系を構成しているときのデコヒーレンスはメカニズムが違う。Energy eigenbasisの間のデコヒーレンス。

*Albash and Lidar, Phys. Rev. A **91**, 062320 (2015)*

スライド 32

量子アニーリングは量子コンピューティングか



量子コンピューティングの現状と展望に関する米国科学・工学・医学アカデミーの膨大な報告書 (2018)

スライド 33

ように設計されている。しかしながら，こうした操作には時間がかかり，量子アルゴリズム全体としての高速化の効果を低下させている。

量子現象独特の性質は量子コンピュータの計算力の源泉になっていると同時に，その使い方に大きな制約を課している。

2.6 実用的な量子コンピュータの可能性

以前に述べたように，古典ではなく量子的な相互作用を利用する計算により新しいタイプの計算装置の可能性が出てくる。それは，今日の最速のスーパーコンピュータや将来開発されるどのような古典コンピュータでも扱えないような計算問題を処理する可能性を持っている。例えば，暗号への応用の可能性に注目が集まっているのに加えて，化学，物質科学，生物学における量子系のシミュレーションへの応用にも関心が向けられている。特に，新しい物質開発への応用の可能性が重要である。

世界中の実験研究者たちが各種の量子ビット技術を使って，有用な計算ができるゲートベースやアナログのコンピュータを開発するべく力を尽くしている。本書では，こうした装置を活用するためのアプリケーションに加えて，ハードウェアおよびソフトウェアプラットフォームの進展を議論する。量子コンピューティング装置はまだ開発の初期段階にあり，その機能は装置のタイプや技術の成熟度に依存しているので，参照や比較が容易になるように量子コンピュータのカテゴリーを以下のように定義しておくとよい。

▶アナログ量子コンピュータ（量子アニーラ，断熱量子コンピュータ，直接的な量子シミュレーション）
このシステムは，量子ゲートは使わずに，ハミルトニアンのパラメータのアナログ値を変化させて量子ビットをコヒーレントに操作して動作する。例えば，「量子アニーラ」では，量子ビットの組をある初期状態に準備して，システムに影響を与えるエネルギーをゆっくり変化させる。最終ハミルトニアンが解きたい問題を表すようにしておくと，量子ビットの最終状態が高い確率で問題の解になっている。「断熱量子コンピュータ（AQC, adiabatic

quantum computer)」は，量子ビットを初期ハミルトニアンの基底状態にしてから，計算の間ずっと基底状態（最低エネルギー状態）に留まるようハミルトニアンをゆっくり変化させる。AQC はゲートを用いてはいないが，ゲートベースの量子コンピュータと理論的には同じ計算能力を持つ。ただし，完全な誤り訂正を実現する実用的な方法は開発されていない。

▶ノイズあり中規模量子 (NISQ) コンピュータ[18]
このシステムはコヒーレントな量子ビットの組にゲート演算を行うが，誤りをすべて抑制するために必要な量子誤り訂正は伴わない。ノイズがある程度乗った量子系で実行可能なように計算を設計しなければならず，ゲート誤りやデコヒーレンスで結果が不明確にならないよう，少ないステップ数（浅い論理深度）で完結しなければならない。本書では，こうしたシステムを「デジタル NISQ」コンピュータとも呼ぶ。

▶完全な誤り訂正を持つゲートベースの量子コンピュータ
このシステムは量子ビットにゲートベースの演算を施し，計算中に発生するあらゆるノイズ（制御信号やデバイス製造上の不完全さ，量子ビット同士の意図せぬ相互作用や環境の影響など）を訂正する量子誤り訂正を実行する。このシステムでは誤り率が大幅に抑えられているので，すべての計算が信頼性をもって実行されていると見ることができる。この装置を設計するにあたっては，完全に誤りが訂正された論理ビットを何千個も有するまで大規模化できるようにしなければならない。

ゲートベースの量子コンピュータの実現の仕方にはいろいろとある。どの方法であっても有名な DiVincenzo の基準を満たす必要がある[19]。

1. 性質がよくわかっていて量子ビットとして使える量子 2 準位系の集まりであること。
2. 量子ビットを初期化できること。
3. 計算や誤り訂正に十分な長さのコヒーレンス時間を持つこと。
4. 「量子ゲート」として知られているユニバーサルな量子計算のための量子演算が実行できること。
5. 他の量子ビットの状態を乱さずに量子ビットを 1 つずつ測定できること。

スライド 34

【司会】

どうもありがとうございました。アニーリングの事始めから最新の研究とそして基礎科学への投資というところまで非常に幅広くお話をしていただきました。ありがとうございます。

それではご質問をまた先ほどと同じようにチャットに書き込んでいただければと思います。またタイムラグがあると思いますので、その間にじゃあ私の方から質問させていただきますが、あの最初にもともと量子アニーリングを提唱された時は全く違う観点で、応用ということを考えておられなかったということなんですけど、それが実機につながっていったあたりは、どういうきっかけで全く寝耳に水のうちにそういう実機開発が進んでいたということなんですか、その辺りはどういう感じなんでしょうか。

【西森】

短くいえば、そういうことになります。それも色々な経緯がありまして、1998 年に我々の論文が出たんですが、その 2 年後に MIT のグループ、 Edward Farhi という人を中心とする MIT のグループが、量子断熱計算というタイトルで実質的に同じ考え方、物理として同じ考え方で最適化問題を解くという、それプレプリントでその翌年に

サイエンスに載ったんですが出しまして、そのサイエンスの論文に我々の論文がプレプリントとして引用されてるんですが関係した話もあると一行で。彼らは最適化問題という視点があったと、それだけではなくて彼らの周りにいた Seth Lloyd セスロイドという物理学者なんですが彼が D-Wave の創始者にこれを実際にデバイスとして作ってみると面白いぞということで持ちかけたらしいんですね。そこらへんが北米での、アメリカ、カナダでの話の出発点になってまして、私はそういう動きは全く知らなかったです。この 10 年の間に D-Wave はその suggestion に刺激されていろんな開発を進めてる。2010 年頃になっていろんな噂が出てくるようになって、D-Wave はほとんどこの間 scientific な論文書かなかったんですね。時々記者会見をして 16bit のシステムができたというようなことを言ったもんですから、その当時はゲート模型っていうのは 1 量子ビットとか 2 量子ビットをようやく作る段階で、16 ビットも動くわけがない、と散々叩かれてあれはインチキだってことになってたんです。私もそういう噂を耳にしたんですが、ここで突然商業化された。私は知りませんでした。実は 2010 年頃 D-Wave 創始者からメールが来て、北米に我々のデバイスを設置する動きをしてるが日本ではそういう話は興味がないか、と聞かれたんですが、私は怪しいグループは相手にしてないし、してはいけないで、しかもそんな金はないと思って断ったんです。これを言うと必ず怒られるんですが。そこらへんが MIT と東京工業大学の世間に対する、ベンチャーというか実際にアイデアをものにして社会に出して社会を変えてみようという発想の違いだと、やっぱり教育に行きつくいうことを感じています。

【司会】

なるほど、分かりました。少し質問が出ております。量子コンピュータは人工知能の開発にどのような影響を与えると思われますかという質問です。

【西森】

与えられる側面はあると思います。ゲート模型では、いろんな人工知能に関係するアルゴリズムが開発されています。それを全部ご紹介する力は私にはないんですが、例えばある種の機械学習のタスクに出てくる線形演算を高速化するアルゴリズム、というのが開発されています。あるいはアニーリングでいうと最適化問題で、先ほどの橋本さんのお話にもあったんですが、関数型をうまく探す、パラメータをフィットするというのは、入力とするサンプル、教師付き学習というやつで、実際にデバイスが出す出力と、望ましい出力の差を小さくする、でその差を小さくするってのは最適化問題という形に

落とせる場合があって、その場合にはアニーリングを使うというわけで、うまくいくとゲート模型あるいはアニーリングは、機械学習、人工知能の開発に、ある程度以上役に立つと思います。

【司会】

次の質問は D-Wave マシンではスピン間の J は任意に設定できるのでしょうか、という質問です。

【西森】

ある範囲で任意に設定できます。先ほど言いましたように、遠くの方の量子ビットは直接結びついてないので中継ぎをしないといけないんですが、そこをうまくクリアすればできます。

【司会】

次の質問は、理想的でない場合の量子アニーリングの計算結果の正答率、答えとか分散の値は、実装の仕方には依らないのでしょうか。

【西森】

それはデバイス上へのチェーンの乗せ方をたくさんやって、そのサンプルを含めて20万超えやって平均だけを見てるんですね。たくさんやった時の統計がこれでして、ですからその実装の仕方によらない、実装の仕方の fluctuation を含めた統計が、こういう形で理想的な量子ビットの理論と合ってるというのが我々の結論です。

【司会】

また次の質問がありました。二つ質問があって、現在使われている原理、いろんな量子コンピュータの原理があると思いますが、それでユニバーサルな量子コンピュータにたどり着けると思いますでしょうか、それとも全く新しいアプローチが必要でしょうか、ということですがまず。

【西森】

アニーリングで拡張する、先ほど非疑似古典効果で言ったんですが、拡張すると理論的には汎用ユニバーサルな計算ができるって事が知られてますが、それはかなり複雑なデバイスを複雑な制御で動かさないといけないので、あんまり現実的ではないと思いま

す。ユニバーサルにしようと思うと、ゲート模型でやる方が、はるかに近いと思います。ですから原理的にはできるけど、実験的にはあるいは社会的実用的には、ほとんど意味がないと思います。

【司会】

ではゲート型とアニーリング型は使い分けるという感じになると。

【西森】

最適化問題に関しては、やっぱりアニーリングの方が強いと思います。ちょっと今日は端折ったんですが、最適化問題をゲート型でやろうという試みも、QAOA というアルゴリズムで、ハイブリッドアルゴリズムでなされてまして、それは必ずしも現状のチップではうまくいかない、17 量子ビットぐらいでスピングラス問題だと、へたってしまって答えがランダムになってしまうというような報告が、実はこれも Google から出されています。ですから使い分けだと思います。

【司会】

二つ目の質問は、光量子コンピュータに関してはどのようにお考えでしょうか。

【西森】

光量子コンピュータは私は詳細に知っているわけではないので、強いことは言えないんですが、一般的にはうまくいくと非常に強いということが知られていると思います。光っていうのは原理的に量子で相互作用がほとんどないですので。ただ逆に言うと、相互作用をうまく制御するのが難しい、ということになると思います。

【司会】

現状では、まだ端緒についたばかりという感じで、

【西森】

ただごく最近、中国のグループ、潘さんのグループが、Boson サンプリングという一種の乱数を発生する実験で、いわゆる量子超越性を達成したという報告がなされてます。ただそれも非常に特殊な、去年の Google の乱数のサンプリングと同じようなもので、実用かどうかはともかくとして理論的に科学的には非常に面白い。そういう意味では進展はしていますが実用的なものを作るというのはかなりまだいろんな問題をクリアし

ないといけないと思います。

【司会】

次の質問は D-Wave が作った量子コンピュータは、本物の量子コンピュータなのですか、まあ量子コンピュータの定義によるんでしょうけども、それから量子ビットはノイズに弱いと言われていますが、D-Wave の場合にはそのノイズをどのように解消してるのでしょうか、という質問です。

【西森】

これはその一つの答えになるデータでして、一つの量子ビットのコヒーレンス時間、量子状態が保持される時間というのを一つ測ってみると、D-Wave のチップというのは非常に短くて、数十ナノ秒、それに対してデバイスが動いている計算時間っていうのはマイクロ秒からミリ秒、ざっくり言って千倍なんですね。壊れる時間の千倍計算して、量子力学的な計算をしてるわけがないという批判がずっとあったんですが、実は現在は色んなデータが積み重なってきて、個々の量子ビットが孤立している時のデコヒーレンス、コヒーレンスが保たれる時間と、量子ビット全体が結合して、アニーリングは常に全体が結合してますので、相互作用で、結合しているときのシステムとしてのコヒーレンスというのは、メカニズムが全く違うということになっています。理論的にもここに書いてある Albash, Lidar の話がありますし、実験的にも、ここ横軸が時間で縦軸がエネルギースペクトルなんですが、比較的小さな系なんですが理論的に求められた白のエネルギースペクトルと実験的に求められたエネルギーが一致してるという意味で、この非常に長い計算、単一量子ビットのコヒーレンス時間に比べて非常に長い時間の量子力学的な効果がきちんと残ってる。あるいはエンタングルメント、量子力学的に顕著な特徴を表す量なんですが、それも時間とともにきちんと理論と合ってる、というデータがはっきり出てまして、ミリ秒になると怪しいんですが、数百マイクロ秒までは量子力学的に動いているということに、この分野では疑いを持ってる人はいません。

【司会】

そうすると、ゲート型の場合で一個一個のコヒーレンス時間を問題にするのと、アニーリング型で全体というのはだいぶ違うんですね、概念的な

【西森】

全然違います。いわゆる energy eigenbasis でコヒーレンスが決まる、つまりエネル

ギースペクトルがこうあって、その間がいろいろ行き来するというような状態になってまして、 逆に上から下へ落ちてくる遷移があるもんで、デコヒーレンスがうまく働く場合もあるんです。ですから、あんまり単純ではないけど、コヒーレンスが良くなると理論近くになるのでより良い、というのは確かなのでコヒーレンスを高める努力はされています。もう一つ、量子コンピュータかという批判は常にあるので、これも FAQ なので、それは定義に依るのでなんとも、一般的には言いようがないんですが、いろんな動きがあって、国際標準を決めようという動きが、IEEE 情報関係の国際組織で動いてまして、一つのきっかけになるのが、このアメリカの科学・工学・医学アカデミーが、ちょうど 2 年くらい前になるのかな、出した膨大な報告書がありまして、これ私が訳したので買っていただいても差し支えないんですが、まあ冗談はともかくとして、この中にはっきりと、ちょっと見にくいかもしれませんが、量子コンピュータのカテゴリーを以下のように定義しておく、アナログ量子コンピュータ、量子アニーラも量子コンピュータの一種だ、それから NISQ と呼ばれる、比較的小さなノイズのあるゲート型の量子コンピュータ、それから理想的な大きな量子コンピュータ、この 3 種類ある。つまりアニーリングマシンも量子コンピュータであるということが、このアカデミーの報告書ではっきり宣言されてまして、これが国際標準の策定に影響を与えています。

【司会】

ありがとうございます。これで最後の質問にしたいと思いますが、量子コンピュータは、何年後コマーシャルで使われるようになると思われるでしょうか。

【西森】

テレビのコマーシャルですね、リクルートコミュニケーションズというリクルートの関係の会社が、量子アニーリングを彼らのサイトの広告の最適化という方向で実証実験してまして、ある意味使われようとしています。いろんな実証実験に使ってまして、コマーシャルの最適化という、広い意味でのコマーシャルの最適化も、本当に常に、量子アニーリングでやってるかどうかは疑問ですが、実証試験の段階に入っています。

【司会】

実証実験でアニーリングに関しては結果が出てると。

【西森】

いい結果が出ていると聞いています。

【司会】

すいません。またもう一つ、切りがないかもしれませんが学生さんで、量子コンピュータは実際に社会で使われながら同時に研究を進められてるって事ですが、現在量子コンピュータのエンジニアというのはあまり聞かないのですが、将来的にデータサイエンティストでも務まるのでしょうか、それともやっぱりその量子ということに関して特化した教育が必要なのかということかと思いますが

【西森】

エンジニアというのは、ソフトウェアエンジニアのことなんでしょうね。多分このコンテクストから言うと。ソフトだとするとアニーリングとゲートは大分違ってましてアニーリングはイジング模型に社会問題を落として、相互作用 J_{ij} をマシンに投げる、というのをユーザはするという意味で、量子を全然使わないんですね、ユーザーサイドでは。量子の部分はブラックボックスが全部やってくれる、というわけで量子力学は知らなくてもできます。ゲートの方は量子力学を知らないとアルゴリズムを組んで動かすということができませんが、そんなに難しい話ではなくて量子力学を最初から教科書に沿ってサクライとかメシアとかやらないといけないというレベルではなくて、今日省略しましたが 2×2 の行列の演算ができれば十分なので、非常に簡単です。基本的には大学の理工系の 1 年生の数学が分かっていればできる、というわけで新たな膨大な勉強は原理的には必要ないと思います。ですから安心してよろしいと思います。

【司会】

そういう意味では、最後に言われた教育をきちっとやれば多くの人材が育ってくるはずだと

【西森】

それに向けての教科書がもうアメリカでは出版されてまして、今私にそれ翻訳しないかという話が来てて、それを読んでいるところなんですが、そういう動きもちょっと日本は遅れているような気がします。

【司会】

はい、どうもありがとうございました。これで今回の講演会を終了したいと思いますが、最後に一言だけ。今共有させていただきましたが、仁科記念講演会というのは、こ

れまでに行われた講演会の、今回は今ちょうどここにあります橋本さんと西森さんですが、昨年のもの、昨年のは動画として残っておりますし、それ以外にもポスター、それから講演録と言うような形で録画あるいは文章で残っております。今回のものに関しても、何らかの形で、少し時間はかかるかもしれませんが公開するというふうに聞いておりますので、適宜、この仁科記念財団のホームページをチェックしていただけるとありがたいと思います。それでは、長い間ですが、今日も非常に多くの方々、ピーク時に 380 名近くの方々が参加していただきました。どうもありがとうございました。またこれを機会に、あの仁科記念財団、それから仁科記念講演会、それから基礎科学に関して興味を持っていただければと思います。それではこれでおしまいしたいと思います。ありがとうございました。