

平成23年度 国立情報学研究所 市民講座 第2回  
「新しい情報社会の扉を開く量子技術—量子コンピュータは本当に実現できるのか？」  
講師：山本 喜久  
(国立情報学研究所／スタンフォード大学 教授)

◆ 講 義 ◆

ご紹介いただきました山本です。

市民講座をするに当たって、この研究所の広報の方から、話とはとにかく分かりやすく、易しくするようにときつく言われています。

私が難しい話をすると次回から参加される方の数がどっと減るので、決して難しい話をしてはいけな  
いと言われたのですが、今日の話は非常に難しいです。

この研究所の若手研究者2人と私の3人しか知らない、ごく最近の研究所のアイデアを話します。

実際の学会発表は2週間後に行う予定ですが、今まで外に出していない話をするので、前半はともかく、  
後半に向かって急激に難しくなるので、これ以上は聞いても意味がないと思われて、苦痛になられた方  
は席を立っていただいてもショックではありません(笑)。

・スライド2「波の干渉」

今日の話はまず「波の干渉」からスタートします。

これはどの教科書にも出てくるヤングのダブルスリット干渉計といわれるものです。

海の近くで育った方は、多分よく幼児期に体験されたと思います。

波の山と谷が長距離にわたって確立されているような海の波が防波堤に当たって、その防波堤に二つ、  
船が出入りするような穴が開いているようなときは、ちょうど船の出入り口から第2の波が発生するよ  
うな形になります。

その波が岸に届くまでには、二つの開口部から出てきた波の山と山、もしくは谷と谷が重なると、波の  
振幅が大きくなって、その部分は明るい線となります。

海の波の場合、波高値が高くなります。

一方、別の場所では波の山と谷が重なって、その部分は波の振幅が打ち消し合って小さくなるので、暗  
い線になります。

一般には、海の波だけではなくて、いろいろな波について明線と暗線が繰り返し現れる現象があり、こ  
れを干渉縞と呼んでいます。

この海の波の代わりに、二つの開口部、この場合には小さなスリットですが、このスリットの置いてあ  
るところに、例えば半導体レーザーの発光面の像をレンズを使って結像することを考えると、半導体レ  
ーザーに流れる電流が非常に小さいとき、スクリーン上に干渉縞は見えません。

なぜかという、小さな電流を流したときに半導体から発光する光は上と下側の二つのスリットを通る  
光の山と谷がばらばらになっていて、山と山、谷と谷が強め合ったり、山と谷が弱め合ったりするこ  
とが長時間続かないからです。

ところが電流を上げていくと、ある電流値のところ、海の波が示す干渉縞と同じような干渉縞が半導

体レーザーの出力光に対しても現れます。

さらに電流を上げていくと、干渉縞の明るい部分と暗い部分の比は大きくなって、明確な干渉縞が見られます。

左端のように、あるしきい値よりも小さいところで動作している半導体の発光素子のことを発光ダイオードと呼んでおり、これは位相がそろわないインコヒーレント光のものです。

右端のように、しきい値より高い電流で動作した領域では位相のそろった波を出し、それを半導体レーザーと呼んでいます。

この実験から分かることは、光というのは海の波と同じように波動としてとらえることができ、その波動の山や谷が現れるタイミングによって、こういう干渉縞ができることが分かります。

### ・スライド3「アインシュタインの光電効果」

別の実験で、同じ光をある物質に当てると、物質の表面から電子が飛び出す現象があります。

これは「アインシュタインの光電効果」と呼ばれています。

このときに、光の強度を上げていくとたくさんの電子が飛び出すのですが、左端の図にあるように、一つ一つのパルスというのは電子が物質表面から飛び出したことに相当する信号なのですが、電子1個当たりの運動エネルギーは皆等しく、変化がありません。

光の強度を下げていくと、飛び出す電子の数は少なくなります、電子の持っている運動エネルギーは変化がないということになります。

この実験事実をどう理解すればよいかというと、光は一定のエネルギーを持った粒子から構成され、その単位を光量子もしくは光子と呼びます。

光の強度を下げるというのは、その光の中に含まれる光子数を減らすことに相当するということが分かります。

この光電効果の実験からいえるのは、「光は粒子である」ということです。

### ・スライド4「単一光子は干渉する？」

以上述べた二つの事柄をよくよく考えてみると、最初の実験では光は波動であるから干渉縞が見えたのですが、2番目の実験では、その光を構成しているのは、実は一つ一つの粒子であるところの光子だということになります。

すると、次のような実験をしたときにどういうことが起きるかというのが、よく出てくる疑問です。

もし、干渉縞を作ることに使った半導体レーザーのコヒーレント光を、ダブルスリットの面上でレンズを使って像を結像しておいて、レンズとダブルスリットの間に光減衰器を挿入し、光の強度を極限まで落とし、半導体レーザーを出てからスクリーンに到達するまでの間に、光子が最大でも一つしか伝搬していないような、非常に微弱な光を使ってスクリーン上にできる像を長時間観測したときに、果たして干渉縞が見えるかどうか。

答えを知っている方もいらっしゃるかもしれませんが、干渉縞が見えると思う方はどのくらいいますか。見えないと思う方は。

では、単一光子を使った干渉の実験を浜松ホトニクス中央研究所で行ったビデオがあるので、それを見ていただきます。

(ナレーター) 実験で見てみましょう。光を、スリットを用いて二つの道筋に分け、そのスリットを通った後の光の振る舞いを後ろのスクリーンで観察していきます。

スクリーン上に明暗の縞模様が現れました。

この実験は半導体レーザーの光を減衰せずに、非常に強い強度でダブルスリットを励起した場合の結果です。

(ナレーター) これはスリットを通った二つの光がぶつかり合い、強め合ったり弱め合ったりした結果、起きたものと解釈されます。

これを光の干渉作用といいます。

縞模様の明るいところはお互いに強め合ったところ、逆に暗いところは弱め合ったところ。

これは、音のように波の性質を持っていると見られる現象です。

これは先ほど述べたように、半導体レーザーの出力光は非常に強度が高く、干渉計の中にたくさんのフォトンが波として伝搬している状況での実験です。

次に、半導体レーザーの出力光を極限まで減衰させて、光子が一つずつ干渉計の中を通るようにした場合の実験結果についてお示しします。

(ナレーター) そこでもう一つ実験を行ってみます。

光を粒子と考え、一つ一つの粒子がスリットを通った後どのような振る舞いをするかを、フォトンイメージング検出器で記録していきます。

実験は、光の粒子がスリットを通過するとき、粒子同士がぶつかり合い、相互作用を起こすことがないように、光の量を調節して行います。

実験開始。

もし、光が完全に粒子ならば、光源とスリットを結ぶ直線上を光は進むはず。

スリットを通った後の粒子の振る舞いがモニター上に点々となって現れてきました。

3分後。

粒子の振る舞いは、全くでたらめのように見えます。

必ずしも光源とスリットを結ぶ直線上には現れてきません。

さらに、粒子を積算していきます。

25 分後。

粒子の分布にある傾向が生まれてきました。

6 時間後。

不思議なことに、縞模様が現れてきました。

どうやら干渉縞のようです。

先ほどの干渉作用の実験から得られた干渉縞と比べてみます。

全く同じです。

干渉縞そのものです。

これは、光の粒子 1 個 1 個がそれ自身で干渉作用を起こした結果としか考えられません。

ええ、干渉は起こすのです。

先ほど、単一光子でヤングのダブルスリット干渉計をドライブしたときにも、このスクリーン上には積算すると干渉縞が現れるとたくさんの人が答えておられましたが、そのときに、一つ一つの光子が二つのスリットの上側と下側のどちらか一方しか通らないと思う人は何人ぐらいおられますか。

では、両方同時に通ると思われる方は、

はい、そのとおりです。

この実験を理解するためには、どうしても一つの光子が二つのスリットを同時に通過しなければ、理解できない現象です。

そのために、光子というのは粒子ではありますが、二つの異なった場所に同時に存在すると考えざるを得ません。

これは「光子の裁判」という名前でよく知られたことで、さまざまな本で引用されているかと思います。

#### ・スライド5「粒子—波動の二重性」

この実験の示していることが、量子力学の本質のすべてです。

量子の世界においては、系の状態がどうなっているかを表すのは、波動関数もしくは状態ベクトルといわれる数学的・抽象的な情報だけが存在しています。

その量子の世界に対して、例えば光電効果を用いて光子数を測定すると、フォトンが一ついた、二ついた、三ついたというのをパルスの数で見ることができます。

逆に、ダブルスリット干渉計を用いて上側のスリットと下側のスリットを通った波がどういう位相差を持っていたかを測定すれば、光の波動としての性質が表れるということになります。

量子古典の境界は何が決めているかという、抽象的な情報しかない世界と、例えばフォトンの数や、波動、光を波として見た場合の位相が確定した状態です。

その状態は、実は観測によってつくり出せます。

古典の世界の特徴である実在と呼ばれるもの、例えば粒子の位置や速度、波の振幅や位相が確定している状態は、量子の世界には存在しません。

そういう量子の世界から古典的な実在をつくるためには、どうしても観測をしないとけません。観測を粒子性に対して行うか、波動性に対して行うかは、実験家の手に委ねられていますが、二つの性質が同時に現れることはなくて、1回の実験ではどちらかの性質しか示すことができません。

### ・スライド6「光の偏波」

少し話題を変えて、「光の偏波」について述べます。

光というのは電磁波の一種で、進行方向に対して垂直な方向に電界と磁界が振動し、そして伝搬するという現象です。

そして、電界と磁界の振動方向は互いに垂直で、進行方向に対して垂直な平面内にあります。

そのような光を平面波と呼びます。

代表的な光の偏光状態の一つには、例えば垂直偏光があります。

それは電界が、この座標軸で言うと、x軸の方向に振動しているような光です。

逆に水平偏光は、電界がy軸の方向に振動しているようなものをいいます。

任意の偏光状態というのは、実は、垂直偏光と水平偏光の成分の振幅比を任意に選んで、二つの波の間の位相差を適当に選ぶことによって表すことができます。

そのような概念をポアンカレ球と呼び、赤道上の対抗する2点が垂直偏光と水平偏光に対応していますが、この二つの波の振幅と位相を決定すると、それを足し算することによって、球面上の任意の点（任意の偏光方向）を表すことが数学的に可能になります。

逆に言うと、自由度が二つしかないということになります。

例えば、垂直偏光と水平偏光を同振幅で位相を90度だけ遅らせて足し算すると、どういことが起きるでしょうか。

垂直偏光が電界の最大値を取っているときに、位相が90度遅れた水平偏光はまだ0点にいるので、二つの点を足すと、真上のベクトルがつくれます。

それから時間が4分の1周期たつと、垂直偏光成分は0点に落ちて、水平偏光成分は最大振幅を取るので、合成したベクトルは右に来ます。

半周期たつと、垂直偏光成分はマイナスに電界が振れて、水平偏光は再び0点に来るので、ベクトルは下の点に来ます。

さらに4分の1周期たつと、垂直偏光成分はまた0点に戻り、水平偏光は逆位相に振れるので、合成するとベクトルは左の点に来ます。

さらに4分の1周期たつと、元に戻ります。

ちょうど光の周波数で周期1回分時間がたつと、電界が1回転、右回りする偏光状態が出来ます。

それを右回り円偏光と呼んでいます。

光子には、こうした偏光という内部自由度があります。

それはちょうど、電子や水素原子核である陽子が生まれながらにしてスピンと呼ばれる自転を持っているために、陽子の場合、磁場が上の方向に発生し、電子の場合、負の電荷を持っているので逆方向に磁場が発生しますが、スピンを持った粒子と同じような性質をフォトンを持つことができるということが分かります。

繰り返しになりますが、光子は水素原子核や電子と同様に、スピン2分の1の内部自由度を持った粒子であるとスライドから分かります。

### ・スライド7「1つの光子を多くの異なる場所に同時に存在させる—多モード単一光子状態—」

そこで、最初の大事な考え方がこのスライドにまとめてあります。

一つの光子を多くの異なる場所に同時に存在させる、つまり、単一光子を、二つのスリットを同時に通すのではなくて、M個のスリットを同時に通します。

そのとき、一つのフォトンがM番目のスリットを同時に通っていて、しかもそのフォトンが偏光という自由度を持っています。

例えば単一光子の偏光方向を垂直偏光に準備したとすると、この垂直偏光がベースを変えて、右回りに回る偏光と、左回りに回る偏光を基準にとると、その二つの基準が同振幅と同位相で重ね合わされたものとなります。

右回りと左回りの電界はこういう運動をします。1回こういう運動をするベクトルを足し算すると、電場ベクトルはプラスEからゼロにいて、マイナスEにいて、ゼロにいて、プラスEに戻る。

垂直に変動することになります。

垂直偏光を持った単一光子をつくることは、右回りと左回りの偏光を持った単一光子を半分ずつ用意して、それを同位相で足し合わせるすることになります。

そういう状態を数学的にどう表すか。

もしこのフォトンがスリット1にいれば、右回りと左回りの線形の重ね合わせの状態です。

2番目のスリットにいても、M番目のスリットにいても同じという形になります。

この掛け算をそれぞれ計算すると、単一光子が占有できる状態はスリット1からスリットMまですべて右回りの状態から始まって、最後のM番目のスリットが左回りの円偏光になる状態、その一つ前だけが左回り円偏光になる状態を経由して、最終的にはすべてのスリットを通る単一光子が左回り円偏光になる状態です。

全部で幾つ状態があるかという、ここに二項があつて、ここに二項があつて、ここに二項があつてというものがM回掛け算されるので、二項定理から、2のM乗個の異なる状態が単一光子によって表されます。

トリックは非常に簡単で、一つの光子が二つの状態を同時に占有します。

右に回る状態と左に回る状態が一つの光子の中で同時に存在しています。

その光子がどの場所にも同時に存在するということを認めれば、先ほどの単一光子の干渉縞の実験結果を認めれば、この式のように単一光子の状態が書けることが自然に帰結されます。

その意味は、単一光子はたった一つの粒子ですが、 $2$  の  $M$  乗個の異なった状態を同時に表すことができるということです。

#### ・スライド8「現代コンピューターと量子コンピューター」

話題を少し変えて、現代の電子コンピューターと量子コンピューターはどこが本質的に違うかを簡単にまとめます。

現代コンピューターというのは、一つの入力値に対して次々と計算を実行し、それが終わると、入力値を別の入力値に変えて、また同じ計算を行うというのを合計  $2$  の  $M$  乗回行い、最終的な答えを得る仕掛けになっています。

量子コンピューターは、1個の光子を  $M$  個の異なる場所に同時に存在させて、しかも  $2$  個の異なる偏波状態に同時に存在させることによって、すべてのスリットで偏光状態が右回り円偏光であるものから、すべてのスリットで左回り円偏光である状態までの、全部で  $2$  の  $M$  乗通りの異なった状態を、たった一つの粒子、光子で表して、計算を同時に行わせ、一気に答えを出すという仕掛けになっています。量子力学という線形重ね合わせの原理を使うと、恐らく計算の高速化が図れるだろうという考え方です。これは量子パラレルリズムと呼ばれ、1985年にイギリスの物理学者デイビッド・ドイッチによって提唱されました。

#### ・スライド9「量子パラレルリズムの威力」

この量子パラレルリズムの威力はどういうオーダーのものかを分かりやすく説明するために、代表的な数値を出しています。

例えばスリットの数が  $30$  あるときです。

ここでは「モード」という言葉を使っていますが、それはスリットであっても共振器であっても、光を閉じ込める箱でもいいのですが、光のいる場所を指定するものを「モード」と呼びます。

単一光子を  $30$  のモードに分配すると、 $2$  の  $30$  乗は大体  $10$  の  $9$  乗のオーダーなので、全世界の総人口と同じ数だけの入力値を同時に表すことができます。

スリットの数を  $90$  まで増やすと、 $2$  の  $90$  乗という数は大体  $10$  の  $42$  乗で、これは地球を構成するすべての原子数に相当します。

たった一つの粒子を使って、たった  $90$  のモードしか使っていないのに、抽象的な量子力学の世界では、 $10$  の  $42$  乗という非常にたくさんの情報を同時に表すことができるのです。

これが量子コンピューターや量子パラレルリズムに人々を駆り立てる最大のモチベーションとなっています。

#### ・スライド10「クラスPとクラスNP」

話題を少し変えさせていただき、次に計算量の話をします。

よく計算機科学でクラス P やクラス NP がありますが、P とは「決定性チューリングマシンにおいて多項式時間で解ける問題」と定義されています。

皆さまがお持ちのパソコンから開発に数千億円かかるスーパーコンピューターまで、基本的には同じ動作原理で動いていて、そのコンピューターの動作原理を数学的モデルで表したものがチューリングマシンと呼ばれます。

そして、計算機の中の状態と計算機に指令を与えるヘッダーの二つの状態が分かっているとき、計算機の状態を次にどう変えるか、ヘッダーはどちらに動くか、ヘッダー自身の状態をどう変えるか、これら三つのアクションがあらかじめ約束されていて、現在を知らせる二つの情報が分かれば未来を決定することが約束されているものを「決定性チューリングマシン」といいます。

その決定性チューリングマシンで、問題のサイズが大きくなっても比較的短時間のうちに解けるような問題をクラス P といいます。

一方、NP とは、非決定性チューリングマシンを使ったときにだけ、多項式時間で解ける問題です。非決定性チューリングマシンというのは仮想的なコンピューターで、現実には存在しませんが、先ほど述べたヘッダーの状態と計算機の状態という二つの状態が分かっている、その次のステップとして何をしたらいいかが初めから決まっていない、どちらにどう動くかが分かっているようなコンピューターのことを、数学用語で「非決定性チューリングマシン」と呼びます。

では、何が動作原理を決めているかという、そのピクチャーははっきりしていませんが、正しい答えの方向に計算機をドライブするところを、幸運にも選択しながら動いていくような理想的なコンピューターです。

たくさん問題が NP クラスに属しています。

それを決定性チューリングマシン、現在のコンピューターで、多項式時間で解けるようなアルゴリズムが見つからないかと、長い間、アルゴリズムの研究者が研究してきました。

何千とある NP 問題の中で、たった一つもそのアルゴリズムが見つかっていないので、分野の中では P と NP は違うのだと予測されています。

証明はされていないのですが。

それとは別に NP 完全というクラスがあり、これはクラス NP に属し、クラス NP のすべての問題が多項式時間でこれに帰着される問題をいいます。

例えば充足可能性問題 (SATisfiability 問題)、SAT といわれるものです。

あるいはハミルトン閉路問題、これは有名な巡回セールスマン問題の特殊例ですが、そういうさまざまな問題が数千見つかっていて、それらはすべて NP 完全問題だと分かっています。

この計算機科学の定理からいえるのは、すべての NP 問題は多項式時間で NP 完全問題へマッピングできるということです。

数千ある NP 完全問題のたった一つでも何とか解きたいというのが、計算機科学の研究者の夢です。

### ・スライド11「イジング・モデル」

さらに話を変えます。

イジング・モデルというのがあります。

これはドイツの物理学者イジングという人が大学院生だったときに提案したモデルで、ある種の磁性体を記述するために導入されました。

系のエネルギーは、スピンの向きがアップかダウンかのいずれであるかによって次のように決められます。

$H$ はエネルギーの関数です。

$\sigma_{iz}$ は、 $i$  番目のサイトのスピンの向きが上向き (+1)、下向き (-1) のどちらかを取ります。

$\sigma_{jz}$ は、 $j$  番目のスピンの向きが+1か、-1かということです。

その積の形でエネルギーが決まることになります。

$J$ のことを相互作用の強さといいます。

例えば  $J_{ij}$  が正であれば、 $i$  サイトと  $j$  サイトの二つのスピンは逆向きになろうとします。

なぜなら、 $\sigma_i$  と  $\sigma_j$  が -1 になるので、正の数に掛け算すると  $\sigma_i \sigma_j$  のタームが負になるので、エネルギーを下げる方向に働くことになります。

逆に  $J_{ij}$  が負であれば、二つのスピンはそろおう形になります。

この単純なイジング・モデルは、実は非常に長い期間、90年ぐらい、物理学で研究されています。

なぜなら、1次元と2次元のイジング・モデルについては厳密解も得られていますし、計算科学的にはクラスPで、左上の式のような拘束条件があるとき、絶対零度のKのときにどのようなスピンの状態が出るかは、1次元・2次元では比較的容易ですが、2次元でも直流の磁場をかける、あるいは3次元のモデルになると、これはクラスNPで、1925年にイジング・モデルが提案されてから今年に至るまで、まだ厳密解も見つかっておらず、計算機的にも解かれていない問題になります。

例えば3次元のイジング・モデルを仮に多項式時間で解くようなマシンが発見されれば、すべてのNP問題は多項式時間でNP完全問題にマッピングされるので、NP問題はすべて多項式時間で解ける、芋づる式に解けるということになります。

イジング・マシンというのは研究が長年にわたって行われてきたもので、特に3次元のイジング・マシンの実現は一つの大きな課題になっています。

### ・スライド12「多モード単一光子状態でイジング・モデルを実装できるか？」

さて、われわれが興味を持っていること、そして、今日お話するパンチラインは、このスライド1枚に集約されています。

先ほど述べた単一光子を多モードに分岐して、一つの光子をたくさんの場所に同時に存在させて、2のM乗という膨大な数の入力値を表すような状態を使って、3次元のイジング・モデルを多項式時間で解けるかという問題をわれわれは興味を持って研究しています。

それに対する答えをつい最近見つけました。

これはそのアイデアで、注入同期レーザーシステムを使おうと考えています。

この発明には二つのポイントがあります。

一つは、干渉計を使って量子パラレルリズムを実現する。

これは先ほど述べたことと全く同じです。

マスターレーザーの光を、アイソレーターを介して、M個のスレーブレーザーへ。

先ほどの干渉計のスリットが、ここではレーザー共振器に代わっています。

このM個のスレーブレーザーは自励発振して、たくさんのコヒーレントなフォトンを放出するようにしています。

そこに、マスターレーザーからアイソレーターを介して、例えば垂直偏光の光を注入すると、すべてのスレーブレーザーはマスターレーザーと同じ周波数と同じ位相、偏波で発振することになります。

この現象を発振器の注入同期と呼びます。

そのことによって、M個のスレーブレーザーが2のM乗の異なった状態を同時に表しているということを実現しています。

逆に言うと、マスターレーザーから出射された単一光子は、この光学系を介してM個のスレーブレーザーに同時に存在しているという形になっています。

イジング・モデルを実装するためには、どうしても相互作用項  $J_{ij}$  を実装しなければいけません。

その実装する回路として量子フィードバックという概念をここでは導入しています。

どういうものかという、このスレーブレーザーの偏光状態をほかのスレーブレーザーに全部、光のパスを介して注入同期することによって教える。

あるいは、このスレーブレーザーの偏光状態が今どこにあるかを、フィードバック回路を通して、すべてのスレーブレーザーに教える。

そうすると、この相互作用項を実装できることが数学的に見つけられます。

具体的には、このレーザーシステムは全体で一つの複合レーザーとして動作しています。

### ・スライド11「イジング・モデル」

イジング・モデルとは何かというと、この左上の式の拘束条件があるとき、エネルギーが最も小さい、 $\sigma_{iz}$  の、1番目のスピンはアップなのかダウンなのか、2番目のスピンはアップなのかダウンなのか、探してくるという問題です。

スピンの全部で90あると解になる可能性があるものは、地球を構成している原子の総数と等しい。

そのたくさんの状態の中から、たった一つの基底状態、エネルギーが最も小さい状態を探してきなさいというのがイジング・モデルです。

### ・スライド12「多モード単一光子状態でイジング・モデルを実装できるか？」

それをするために、ここではフィードバック回路によって偏光モードに異なった損失を与えていて、そ

の中で最も小さな損失を持ったスレーブレーザーの偏光モードの組み合わせが、一つの大きなレーザーシステムの中で自動的に自然に選択されるという仕掛けになっています。

### ・スライド13「負の温度」

少し話題をまた飛ばします。

次々と飛んで申し訳ないのですが、負の温度について説明します。

通常の物理系においては、例えば二つのエネルギー準位を持った原子が、ある正の有限温度にあると、その原子の電子は、エネルギーの低い状態を占有する確率が、エネルギーの高い状態を占有する確率より大きくなっています。

その占有確率の比は、実はボルツマン分布で与えられることが分かっています。

このエネルギー、 $E_2 - E_1$  がこの場合は正なので、これが1より大きいためには温度は正でなければいけません。

温度は正で、エネルギーが低い状態のポピュレーションはエネルギーが高い状態のポピュレーションより大きい、その状態を正常分布といいます。

それに対して、レーザーに使われる増幅媒質のようなものでは、同じ2準位原子系に外側からエネルギーを投入し、そのことによって人工的にエネルギーの高い準位のポピュレーションをエネルギーの低い準位のポピュレーションより大きくすることを実現しています。

それによってレーザーは動作しているのですが、同じ系を同じボルツマン分布で記述しようとする、分子が正であるにもかかわらず、この比が1よりも小さくなければいけないということは、温度が負でなければいけないこととなります。

このような反転分布をしている系は、普通、負の温度で記述されます。

外からエネルギーを入れた非平衡系では温度は必ずしも正でなくてもよいというのが、この反転分布の考え方であって、レーザーの発明の一番肝になる部分です。

### ・スライド14「イジングモデルの解：2つの絶対零度」

M個の注入同期レーザーを使ったイジング・モデルのマシーンと、通常の磁性材料、M個のスピンのもとと存在しているもので、自然にイジング・モデルを形成しているものの違いをスライドにまとめました。

自然結晶の中でM個のスピンの取るエネルギー状態の最もエネルギーの低いものが $E_0$ 、その次に低いものが $E_1$ 、その次に低いものが $E_2$ 、一番高いものを $E_2^M$ とします。

この分布がどうなっているかを考えると、このエネルギー差が非常に、 $kbT$ 、 $kb$  はボルツマン定数、 $T$  は絶対温度ですが、温度が非常に高い限界では、ほとんどすべての状態が同じ確率で占有されています。このままでは基底状態が見つかりません。

基底状態を自然結晶で見つけるためには、温度を冷やしていくしかありません。

絶対零度に漸近したときに、初めてすべてのスピンのこの基底状態と全く同じ状態を取るので、

占有率が 100%になります。

M 個のスピン系、自然結晶のようなものを持ってくると、最低エネルギー状態は絶対零度で実現されますが、物を絶対零度に冷やすことは実験的には非常に難しく、この方法は、少なくともコンピューターとしては現実的な解とは言えません。

M 個のレーザーを使った場合、ここに書いてあるのは、レーザーの利得から共振器の損失を引いたもので、エネルギーに対応したものに相当します。

ここにレーザー発振のしきい値、レーザー利得と共振器がバランスしたときにレーザー発振するのですが、ポンプレベルが小さいときは、共振器損失の方がレーザー利得より大きいため、実効的にはたかさんの偏光モードがほぼ同じ確率で現れます。

それは先ほどのアナロジーで言うと、負の温度をレーザー系が実現していて、エネルギーの一番高い状態が最もポピュレーションが大きく、エネルギーの一番小さい状態がポピュレーションは小さいのですが、確率的にはランダムに分布しています。

もちろんこれをマイナスの絶対零度に持っていけば、エネルギーが最も高い状態に占有確率が 100%になるので、このモードだけでレーザー発振させれば解が求まります。

やっていることは、基本的にはプラスの零度に系を冷やすか、マイナスの零度に系を温めるかの違いですが、M 個の注入同期レーザーの最小損失偏光状態は比較的、あるいは実験的に容易に見つけられ、単一モード発振させればよいということで、こういう考え方があります。

#### ・スライド 「適者生存—Survival of the Fittest—」

今日の内容は、つまるところはこれだと思います。

ダーウィンの進化論にある「適者生存」という考え方は、ある生物系は環境に最も適したものを探して、最も適したもののだけが適者として生き残り続けるというものです。

われわれの考えている注入同期レーザーマシンは、そのレーザーシステムがあたかも生き物のように、光子数をレーザー装置全体の中で最大にするような、特定の偏光状態を自ら見つけ出して、その生存競争に勝ち残った最適状態を実現し、そこに生存し続ける。

その生存し続けている状態こそが、欲しかったイジング・モデルの解になっているというものです。

グラフで描くと、最初、計算が始まる前には、すべてのスレーブレーザーは垂直偏光状態でしたが、そこから試行錯誤を繰り返し、1 番目のスレーブレーザーは右回り円偏光、2 番目は左回り円偏光、最後のレーザーは右回り円偏光という特別な偏光状態を、例えば 2 の 90 乗の中から一つだけ選び出して、その状態で落ち着くというのが動作原理です。

#### ・スライド 15 「イジングマシンはスーパーコンピューターが宇宙の寿命かかってもできない計算を一瞬で終わらせる」

サイト数、これはスピンの数です。

スピンの数が 0 から 1000 個まで。

これは自然結晶の中では大した数ではなく、原子の数に相当するもので、比較的小さな磁石だと思ってください。

たった 1000 個のスピンのから成る小さな磁石ですが、それのあるイジング・モデルが与えられたとき、エネルギーが一番小さいスピンの状態は何かというのを現在のスーパーコンピューターで見つけようとすると、かかる計算時間を、ナノ秒を単位にして、 $\log_{10}$  をベースにした対数表示にしています。

これが 2 の M 乗で上がっていくために、計算時間が 1 年というのは大体ここに相当しています。

先ほど述べた 2 の 90 乗、ちょうど地球を構成している全原子数と同じ数だけの候補からたった一つの正解を見つけてくるのに、現在のスーパーコンピューターが費やす時間は、1 年と 1 億年の間くらいです。

では、すべての宇宙の物質がブラックホールに吸収され、ブラックホール自体が蒸発して宇宙が消滅するまでに、どのくらいのサイト数が処理できるかという、400 以下です。

本当に小さな磁石しか、現在の方法では解けません。

提案したイジング・マシンでは、それが 10 ナノ秒以下という時間スケールでできるだろうと考えています。

結論は、提案した注入同期レーザーマシンは、NP 完全問題イジング・モデルを多項式時間で解ける。多項式時間と指数関数時間の違いがここに表れることになります。

#### ・スライド 16 「従来型量子コンピューターの姿」

今日の話は大体これで終わりです。

5 分ほど時間がありますので、さっと量子コンピューターの話をしてします。

今日の話は、世の中で言われている量子コンピューターとは全然違うものです。

私の研究室はスタンフォード大学の中にも置いてあり、そこは、いわゆる本当の量子コンピューターというか、従来型の量子コンピューターの研究をしています。

そこではどういう研究をしているか、ざっと説明します。

従来型の量子コンピューターを作るためには、まずスピン、アップかダウンかを定める電子を閉じ込める量子ドットというものを作ります。

例えば、バンドギャップの小さな半導体（インジウム砒素）を、バンドギャップの大きな半導体（ガリウム砒素）で包み込んだようなものです。

量子ドットは 10 ナノメートルぐらいのサイズで、10 億分の 1mm ぐらいの直径です。

それを 1 ミクロン間隔で正方格子状に並べます。

1 ミクロンは 1000 分の 1mm ぐらいの長さです。

そのようにして、非常に膨大な数の量子ドットを並べて、そこに一つずつスピンを閉じ込めます。

そのスピンはアップかダウンかという 2 値を取るなので、2 の M 乗個の状態を表すことができます。

それをプレーナマイクロキャビティという光の共振器に閉じ込めます。

これは縦方向の層構造を示していて、2 分の 1 波長、長さにして 1150 ナノメートルぐらいです。

1 億分の 1mm ぐらいの薄さの活性層の中央に量子ドットを閉じ込め、その両側を高反射膜でサンドイッチ

チしたものです。

そういう素地を作っておいて、レーザー光を3本当てて、電子のスピンを操作したり、状態を読み出ししたりします。

そのために必要なシリコンのMEMS ミラーを使って、この装置の上側から光を制御して入れます。

光の読み出しも検出器のアレイで読み出します。

その装置がここに埋め込んであり、ここにたくさんの量子ビットがあつて、それを制御する光系と読み出す光系があります。

このピンクの部分が量子系と言われ、量子力学的な原理で動作している領域で、その外側に量子ビットを保護するためのトリックをするバーチャル層があります。

これは外界と量子ビットを切り離すための小さなトリックですが、それをする層があります。

さらにその外側に量子ビットを保護するための、量子誤り訂正コードをかける層があります。

その後初めて論理層が出てきて、そこにある種のアゴリズムを実装するという階層構造を取って初めて、誤りのない正しい量子コンピューターができる筋立てになっています。

#### ・スライド17「何が間違っていたのか？—従来型量子コンピューターの本当の話—」

その話の本当のところはどうなっているかという、このスライドに書いてあります。

M個のスピンを使って、2のM乗通りの異なった入力値を表していますが、この量子コンピューターは決して単一光子の干渉計ではなくて、M=90、M=100といった多スピン干渉計です。

それは、外界とインタラクションして、一つのスピンが失われる、その位相の情報を失ってしまうと、すべての状態ベクトル、量子コンピューターの中の装置そのものが全部壊れてしまうというデリケートなものです。

そのひ弱な量子ビットをデコヒーレンスから守るためには、量子誤り訂正コードを何重にもかけないといけません。

意味のある因数分解をするためにどのくらいの量子ビットを準備しないとイケないかは、研究の結果から分かっています。

一つの量子ビットを表すためには最低2万個のスピンを使わないといけません。

2万個のスピンで1量子ビットを表します。

ですから、チップ上に全部で10億個のスピンを正方格子状に並べないといけません。

その各々を少なくとも99.99%の精度で制御しない限り、誤り訂正のアーキテクチャーは完成しません。

このようにスピンを制御する時間を例えば100ピコ秒（100億分の1秒）という非常に速い時間スケールで制御したとしても、計算が終了するまで1週間ぐらいかかります。

#### ・スライド 「量子誤り訂正コードで量子ビットを守る—過保護に育てられたひ弱な子供のように—」

それはごく普通に考えれば決して現実的なものではなくて、ちょうど過保護に育てられたひ弱な子供があまり社会の役に立たないように、量子ビットも非常に過保護に、何重にも保護されているために、オーバーヘッドが非常に大きく、とてもエンジニアリングソリューションとは思えないというのが私自身

の考えです。

#### ・スライド18「今日の結論」

今日の結論ですが、多スピン干渉計である従来の量子コンピューターは、恐らく何百年たっても実現できるようなものにはなりません。

SFだという人がいれば、そのとおりだと思います。

それでは、今日提案した1光子の干渉計は絶対に実用技術になるのかというと、それはまだ分かりませんが、少なくとも5年のうちには答えは出てくるのではないかと考えています。

なぜ5年かというと、レーザーにしてもNMRにしても、非常に大きな発明は、基本的な着想が起きてから、それが実現されて世の中に出ていくまでの遅延時間が大体5年なのです。

量子コンピューターの現在のアーキテクチャーは1995年には提案されたものですから、既に15年以上の月日がたっています。

その意味でも、恐らくエンジニアリングソリューションにはなっていないと考えています。

最後のクイズです。

この写真が何かご存じの方、おられますか。

(参加者) 昔のコンピューター。

(山 本) 昔のコンピューターです。もう少し詳しく。

(参加者) ENIAC (エニアック)。

(山 本) ちょっと違います。近いですが。

(参加者) エニグマ？

(山 本) いえ、違います。

あっ、エニグマと言われましたか？ 近いです。

ほかに。

(参加者) チューリングマシン。

(山 本) ええ、チューリングマシンではあるのです (笑)。

これは第二次世界大戦中に英国が秘密裏に開発した、世界で最初のコンピューターです。

真空管2400本からできているもので、何のために開発されたかというと、これを解読するためです。

これは第二次世界大戦中にドイツ軍が使ったエニグマという暗号です。

これを解読するために、コロッセスという最初の電子式のコンピューターが開発されました。実際にエニグマの解読に成功したことは、第二次世界大戦中はもちろん、1970年代後半まで秘密裏にされていて、実物は当時のチャーチル首相の命令で手のひらサイズより小さく粉々に分解されて捨てられたので、この写真のものは残っていません。

言いたかったことは、新しいコンピューターを作るときにはどうしてもターゲットが必要です。われわれは、それはNP完全問題である3次元のイジング・モデルだと思っています。そのイジング・モデルが解ければいろいろな波及効果があるので、それを多項式時間で解けるようなものを現実的な解で探していくことに、将来性があるのではないかと考えています。

以上です。

(拍手)

#### ◆ Q&Aより ◆

市民講座当日は詳しく歴史の解説をする時間がなかったので、エニグマ暗号の改良版ローレンツ暗号を広義のエニグマと紹介しました。チューリングがコロッセス開発チームのリーダーではなく、メンバーの一人にすぎなかったことは事実ですが、後年のチューリングマシンの概念を確立する上で、コロッセス開発が彼にとって有益であったのも事実だと思われます。