

伊藤 悦子 (基礎物理学研究所 准教授)



簡単に私自身の自己紹介をします。私は名古屋市出身で、高校は名古屋市立向陽高等学校を卒業しました。大学から大阪に移りまして、大阪大学の理学部に進学して、学部の4年間と、大学院修士と博士の5年間、大阪で過ごしました。専門は、物理学の中の素粒子理論を専攻していきまして、そこで博士号を取得しています。今年度の4月から、基礎物理学研究所に着任しました。

これがその基研の建物で、湯川さんがいたときから使っている建物で、私の研究室もここにあります。今日は、登壇者が現れるたびに京大のキャンパスの数が増えていくんですけども、私の基礎物理学研究所は、京大の本部のある京都市左京区にあります。この中には、湯川さんが使っていた本とか、当時の研究ノートも記念館としてありますので、もし京都に来られることがありましたら、ぜひお立ち寄りください。ちなみに、これは最近リニューアルした湯川さんの新しい銅像になります。

この基礎物理学研究所の歴代所長がウィキペディアに丁寧に書いてありまして、初代は、当然、湯川さんでして、20 年くらい所長をされています。私にちょっと関係しているのが、7 代目の益川敏英さんです。実は益川さんは、私の高校の先輩で、私が高校 2 年生のときに、益川さんも同じく素粒子理論の研究者なんですけれども、後で出てきます素粒子の中にクォークというものがあります、そのクォークが 6 種類あることを最初に提案しまして、6 種類目のクォークが、ちょうど私が高校 2 年生のときに見つかりまして、私の高校では非常に盛り上がっていました。その後、益川さんは 2008 年にノーベル賞を受賞しています。

第19回 京都大学附置研究所・センター シンポジウム @ まつもと市民芸術館, 2024/03/02

- ・名古屋出身
向陽高等学校卒業
- ・大阪大学(学部、大学院)
素粒子論研究室
- ・今年度4月から
「基礎物理学研究所」
1949年 湯川秀樹がノーベル賞を受賞
したのを記念して1952年に設立
1953年京都大学の附置研究所



代	姓名	存活時間	婚配對象	備考
第1代	趙思和	1950年5月1日 - 1970年3月31日	鄭子蘭子	
第2代	趙志輝	1970年4月1日 - 1980年3月31日	鄭子蘭子	
第3代	趙志強子	1980年4月1日 - 1990年3月31日	李麗蓮、何紹蓮	
第4代	趙志強子	1990年4月1日 - 1998年3月31日	鄭志子蘭	再婚
第5代	趙志強子	1998年4月1日 - 1999年3月31日	鄭志子蘭	
第6代	趙志強子	1999年4月1日 - 1999年3月31日	趙志子蘭	
第7代	趙志強子	1997年4月1日 - 2003年3月31日	鄭志子蘭	
第8代	趙志強子	2003年4月1日 - 2007年3月31日	鄭志子蘭	
第9代	趙志強子	2007年4月1日 - 2011年3月31日	鄭志子蘭	
第10代	趙志強子	2011年4月1日 - 2013年3月31日	鄭志子蘭	再婚
第11代	趙志強子	2013年4月1日 - 2017年3月31日	李麗蓮、何紹蓮	
第12代	趙志強子	2017年4月1日 - 2018年3月31日	李麗蓮、何紹蓮	

Wikipediaより

湯川さんも、益川さんも、私も、素粒子理論を研究しています。素粒子は何かといいますと、世界は何でできているかを研究する分野です。素粒子は、この漢字が示すように、粒子の素になっていまして、世界の全ての物質、我々人間の細胞とかDNA もあの物質です。ここに見えている机とか、そういうものもみんな素粒子でできています。目に見えない空気も、素粒子でできています。

物質をどんどん、どんどん分割していきますと、最終的には分子、または分子構造を持たないものは原子でできています。このへんぐらいまでは高校生で勉強しているかと思います。原子はアトムといいますけれども、もともとは、これ以上分割できないものという意味でした。なので、昔は原子が素粒子だと考えられていました。

ところが、実は原子の中には内部構造がありまして、中心にプラスの電荷を持っている原子核と呼ばれるものと、その周りを電子がふわふわ飛んでいます。この電子は、今でもまだ素粒子と、これ以上分割できない基本的な粒子だと考えられています。一方で、真ん中にいた原子核は、これも素粒子ではないということがその後分かりまして、この絵だとピンクと黄色で塗られていますけれども、ピンク色の陽子と、黄色の中性子という 2 種類の粒子がたくさん集まって原子核ができていたことが、ちょうど湯川さんのころに分かってきました。

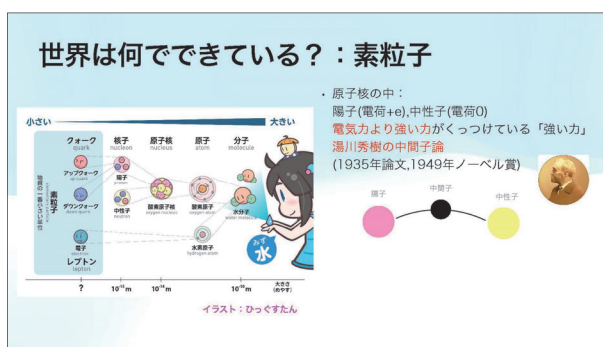
湯川さんは何を考えたか、何でノーベル賞をもらえたかといいますと、この陽子と中性子は、陽子がプラスの電荷を持っています。一方で中性子は中性という言葉が示すように電荷を持っていません。当時自然界で知られていた力は、ニュートンが発見した万有引力の法則の重力と、電磁気力だったんですけれども、電気力だけを考えると、陽子はプラスの電荷を持っているので、陽子同士、プラスの電荷を持っているもの同士は反発し合うわけです。中性子は電荷を持っていないので力が働かないはずですが、それにもかかわらず、我々を作っている原子の中心の原子核は、陽子と中性子がぎゅっとくっ付いていて、ばらばらにならない。これはなぜだろうかということを湯川さんは考えました。

湯川さんがたどり着いた結論は、電気力では本当は反発し合う陽子同士の、もっと強い力がぎゅっと働いていて、この陽子や中性子をくっ付けているんだと考えました。それは電磁気よりも強い力なので、強い力というのが正式名称なんですけれども、それを核力と呼んだりもします。

湯川さんは、陽子と中性子の間に中間子という、それまで知られていなかった未知の粒子が間を飛んで、陽子と中性子をくっ付けているのではないかと発表しまして、その後ノーベル賞を受賞しました。

ところが、湯川さんの時代は陽子や中性子が素粒子だったんですけれども、今や陽子や中性子も素粒子ではなくて、中に内部構造があることが分かっています。さらに分割できる小さな粒子があります。そのことをクォークと全般的に呼ぶんですけれども、今は 2 種類ありまして、この赤い色で塗ってあるアップクォークと、ダウクォークという 2 種類の粒子からできています。

陽子と中性子は別々の粒子だと思われていたんですが、中身はどちらもアップクォークとダウクォークでできていて、陽子はアップクォークが 2 つでダウクォークが 1 個、中性子はアップクォークが 1 個でダウクォークが 2 つからできている。実は同じ粒子が素になっていて、組



み合わせが違っただけで陽子になったり、中性子になったりすることまで、今は分かっています。

今のところ、アップクォーク、ダウンクォーク、電子が、これ以上分割できない素粒子だと考えられています。

我々の研究は、物質を作っている基本的な粒子が何か、それらの基本的な素粒子に働いている力はどうなっているのだろうか、それでどうやって物質を作っているのだろうか、ということの研究をしています。

湯川さんは、陽子と中性子に働く力は、中間子が飛んで核力になっていると考えていましたが、今はさらに基本構造があって、クォークに働いている力があります。このことを、量子色力学、QCD と呼んだりしますが、このクォークたちに働く力、これを理解したいというのが、今の我々の大きな目標になっています。

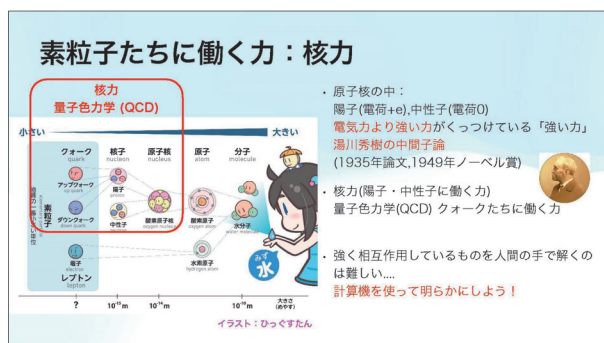
ただ、このクォークたちに働く力は、ここに書いてあるように強い力なんですね。たくさんの粒子同士の間にお互いに強い力が働いているときは、それを手計算で計算するのは非常に難しいので、そこはコンピュータ、計算機を使って明らかにするのが、今や主流の研究方法になっています。

ということで、今日は、タイトルでは量子コンピュータと書きましたが、主にコンピュータと素粒子の世界について話したいと思います。

今、はじめにの部分が終わって、この後、今や古典コンピュータと呼ばれるようになってしまいましたけれども、皆さんの普通のパソコンとか、スーパーコンピュータとか、皆さん普通思い浮かべるコンピュータで、この素粒子の世界のどういことが明らかになってきたかを紹介したいと思います。その後、最近登場した量子コンピュータを使って、古典コンピュータでは解けなかった理論がもしかしたら解けるんじゃないかという期待を、ちょっとお話ししたいと思います。

まず最初に、古典コンピュータ、今まで従来のコンピュータを使って、この素粒子の世界がどうやって分かってきたかということをお話したいと思います。まず、どうやって計算するかという話をしたいんですけども、その前に、何を計算したいかということをお話したいと思います。

我々物理学の研究者は、何を計算したいかといういろいろあるんですけども、多少なじみがあるかと思って、こういうものを持ってきました。高校で物理を勉強したことがある人は、こういう問題をたくさん解かされたと思います。時刻 $t=0$



量子コンピュータと素粒子の世界

1. はじめに
2. 古典コンピュータで分かった素粒子の世界
3. 素粒子の世界を計算する - 量子コンピュータ編 -
4. まとめ

古典コンピュータで素粒子の世界をどう計算するか？

のときに、粒子が位置 x の場所にいました。初速度 v で運動し始めました。そのとき 10 秒後、粒子はどの位置にいて、どれくらいのスピードで、どちらに向かって走っているか、求めましょうという問題があります。よく計算すると思います。

我々の目に見える範囲ぐらいの原子よりも大きな世界は、ニュートンの運動方程式という

式に従って、粒子が運動しているときに、そこに働いた力、摩擦力とか、空気抵抗とか、そういうものが分かれば、粒子が 10 秒後、20 秒後、100 万年後どこにいて、どの速度で走っているかが厳密に分かります。なので、このビリヤードの白い球をパコンと打ったときに、与えた力を正確に決めることができ、台とボールの摩擦が正確に分かれば、白いボールがどう動いて、黄色いボールにあたったときに、その後、黄色いボールと白いボールがどう動くかも完全に分かります。

ところが、素粒子の世界はちょっと違います。原子よりも小さな世界の粒子は、実はニュートンの運動方程式ではもはや記述できなくて、量子力学の方程式に従います。量子力学は、2 つ大きな重要な原理があります。1 つは重ね合わせの原理と呼ばれるもので、これは状態共存と呼ばれたりもします。これは、粒子が 1 個しかいないのに複数の状態を取ることができるというものです。

もう 1 つは、不確定性原理といいまして、粒子の位置と速度、どこにいて、どれくらいの速度で走っているか、その両方を同時に正確に決めることは絶対できないという原理です。必ず不確定になってしまうという原理です。

この 2 つの原理が、我々にはなじみがないんですけれども、この 2 つのことがあります。量子の世界での粒子の運動を考えようと思ったときには、こんなことが起こります。ある時刻 $t=0$ のときに、粒子が x の位置にいたとします。そうしますと、一瞬後、1 秒後、どこに行くかっていうのは実は決まらないんですね。位置 x にいることが分かっていると、今度は速度の不確定性が非常に大きくなって、どちらに向かって走っていくのか分からない。なので、1 秒後、こっちに向かっているかもしれないし、こっちに向かっているかもしれないし、こっちに向かっているかもしれない。状態共存がありますので、それらの状態を全て同時に取ることができる、というのが量子の世界です。

そうしますと、粒子がこの x という位置から x' という位置に運動したとき、この粒子は、ここからここへ行く間に、いろいろな経路を同時に通ってきています。こっちを通るときもあるし、こっちを通っているのもあるし、こっちを通っているのもあります。

素粒子の運動を正確に計算しようと思えば、これらの考えられる経路全部を足し合わせた計算が必要になります。足し合わせることは積分といいますので、ファインマンの経路積分、経路を全部積分するので経路積分と呼ばれたりもしますが、こんなことを計算しないといけない。それは、さすがに人間の手で、無限通りある経路を全部積分するのは無理なので、コンピュータでやらせましょうということになります。

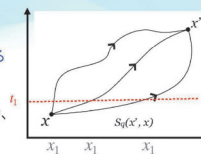
何を計算したいか？：粒子の運動(古典論)

- 時刻 $t=0$ の時に位置 x にいた粒子が初速度 v で運動し始めた時刻 t での粒子の位置、速度を求めよ
- ニュートンの運動方程式で運動中に外から加わった力(ポテンシャル)がわかれば一意に決まる



素粒子(量子論での粒子)の運動

- 量子の世界の粒子は「量子力学」にしたがう
「重ね合わせの原理 (状態の共存)」
・・・1つの粒子が複数の「状態」を取れる
- 「不確定性原理」
・・・粒子の位置と速度の両方を正確に決めることができない
- ある地点 (x) から別の地点 (x') へ粒子が運動する時、
いるんな経路を通る！
全ての経路を足し合わせた計算が必要！！
(ファインマンの経路積分)



コンピュータは、皆さんが電卓を使っている段階では、人間でもできるような計算を速く正確にやるだけですけども、コンピュータの真の価値は、実は人間ではできないような方法で、同等の計算をすることができます。その例が、実はこの話に関係してまして、あらゆる経路について足し合わせようと思ったときにどうするかといいますと、コンピュータ

では、乱数を振っていろいろな状態を作り合わせて、それを足し合わせることをします。この乱数を振る方法のことをモンテカルロ法と呼んだりしますが、ギャンブルみたいなのでモンテカルロ法といいますけれども、こういう乱数を振って計算します。

ただ漫然と乱数を振っていると、いろいろなものがありすぎるので、QCD のクォークたちに働く力を計算している情報はどこに入るかという、いろいろな経路を取るといったときに、理論によって通りやすい経路と、あまり通らない経路があります。例えば、我々が山と山の間に挟まれた谷にいて、この位置からこの位置に行きたいと思ったとき、我々は、普通は山の上のほうを歩いていくことはしませんね。疲れるのでしません。我々人間は、谷底をテクテク歩いて行きます。

でも、量子の世界の粒子は、上のほうに行く経路を取ったりもします。ただ、いかに量子の世界の粒子といえども、上のほうに行くのはちょっと損するので、遠回りになってしまうので、あまり通らないんですね。通ることはあるんですけど、あまり通りません。やっぱり、谷底のほうを通る粒子がたくさんあります。ですので、たくさん通る経路にたくさん点を打つ、乱数を振ってたくさん点を打って足し合わせることをします。それがモンテカルロ法とか、重点サンプリング法、たくさん通る重要な経路だけをたくさんサンプルしましょうということで、重点サンプリング法というものを使います。

それによって、いきなり式が出てきましたけれども、この経路積分という積分の記号で書かれる式を計算しまして、ここの P と書いてあるのが、理論の情報に対応している、どういう経路を通るのが良いかという確率になります。

このようなかたちで計算機を使って研究しています。実際に使っている計算機はどれくらいのものかといいますと、皆さんも聞いたことがあるかもしれませんが、スーパーコンピュータの「富岳」が神戸の理研にあります。この富岳は、スパコンに関する世界ランキングが、ランキングの方法によって何種類かあるんですが、その中で4つのランキングで2年間1位をずっとキープしていたスパコンになります。今はそのうち2つぐらいが1位ではなくなっちゃったんですけども、世界トップレベルのスーパーコンピュータが日本にあります。

コンピュータがすごいコンピュータだというときに、大体2つの指標があるんですけども、皆さんのパソコンとかもそうだと思いますが、1つは演算性能といって、1秒間にどれくらい計算できるかです。この富岳は1秒間400京回足し算掛け算ができます。400京という単位はあまり

古典計算機：モンテカルロ法(重点サンプリング法)

・あらゆる経路について足し合わせるには？

乱数を振って様々な状態を作り出して全部足し合わせ！

・理論によって「通りやすい経路」と「あまり通らない経路」がある

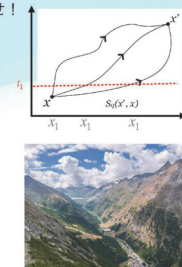
考えている系の相互作用(=力・理論)に依存

・重点サンプリング法(モンテカルロ法的一种)

通りやすい経路にたくさん点を打つ

・物理量の計算: $\langle \phi \rangle = \frac{1}{Z} \int D\phi \phi P[\phi]$

$P[\phi]$ (理論の情報)を確率の重みとする



スーパーコンピュータ「富岳」

・スパコンに関する世界ランキング4つで2年間1位を獲得
「TOP500」「HPCG」「HPL-AI」「Graph500」

・演算性能: 400PFlops(ペタフロップス,倍精度)

1秒間に 4×10^{17} (400京) 回の浮動小数点演算

総メモリ: 4.85PiB(ペビバイト, 1PiB=2⁵⁰B)



見慣れないと思うんですけど一、十、百、千、万でいって、億、兆の上に京という単位があるんですけども、その 400 京回、1 秒間に足し算掛け算ができます。

もう 1 個コンピュータの性能を評価するときに大事なのが、メモリーです。皆さんのスマホでも、メモリーがどれくらいかって結構大事だと思うんですけども、どれくらいのデータを載せられるかというのに対応しています。携帯とかだと、250 メガとか、それくらいだと思いますが、富岳は 4.85 ペピバイトという聞いた事のない単位なんですけれども、この 1 ペピバイトが、2 の 50 乗バイトになっています。後で計算してみてください。すごい数の 0 が続くと思います。これくらいすごく大きなデータを扱って、ものすごい速度で計算できるのがスーパーコンピュータになります。

そういうスーパーコンピュータを使って、世界中のいろいろなスパコンを使って、素粒子の研究はなされてきました。いろいろな成果があるんですけども、ここでは 2 つだけ、面白そうなものを選んで持ってきました。

QCD の性質、クォークたちの理論の性質として面白いと私が思っているものの 1 つです。

実は、陽子は、先ほど、クォーク 3 つからできています。アップクォーク 2 つとダウルクォーク 1 個からできていますといいましたけれども、このアップクォークとダウルクォークの質量を全部足すと、単位は無視してもらって、10 ぐらいの重さにしかありません。ところが、この 3 つがくっ付いた陽子の質量は、1000 ぐらいの質量になります。だから全部足したものの 100 倍重くなります。その 100 倍重くなる元は、クォーク同士が強く相互作用して、相互作用によって出てきたエネルギーで重くなる、ということになります。これが 100 倍になるのか、1 万倍になるのか、5 倍になるのかは、正確に計算することができないと分かりません。でも、スパコンを使った計算だと、それが正確にできることが、この 20 年ぐらいの間に分かってきました。

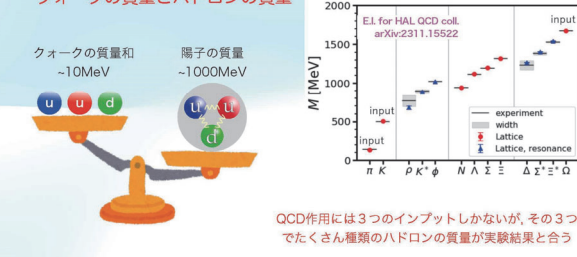
QCD の理論をインプットにしまして、いろいろな粒子があるんですけども、陽子や、ここに中性子がいるんですけども、赤や青で書かれているのが、スパコンを使って計算された値で、黒い線が、実験で分かった本当の粒子の質量なんですけれども、それがピタッと一致することが分かりました。これは、私がこの 2 年くらい頑張ってスパコン富岳を使ってやった研究の成果になります。

それから、2 つ目の QCD の性質として、湯川さんは陽子と中性子の間に中間子が飛んで核力が働いて原子核が形成されているという話をしましたけれども、今や陽子や中性子はクォークからできていることが分かりました。実は、中間子も素粒子ではなくて、クォークと反クォークというクォークの親戚みたいなもの

スーパーコンピュータで分かった素粒子の世界 (これまでの成果と課題)

QCDの性質(1)

・ クォークの質量とハドロン質量

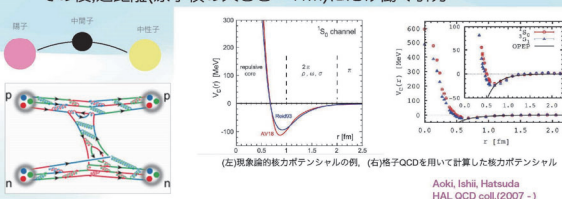


QCDの性質(2)

・ 核力ポテンシャル

核子同士が近いとパウリの排他率で斥力

その後、近距離(原子核の大きさ $\sim 1\text{fm}$)にだけ働く引力



からできています。そうすると、陽子と中性子をくっ付けている力もクォークの理論、QCD の理論から計算できるはずです。

実際には、3つのクォークを持っている陽子と、3つのクォークからできている中性子が、途中で中間子というクォークと反クォークをやりとりしてくっ付いていることが分かりました。陽子や中性子の間に働いている力は、これは縦軸が力として、ここが0で、上にあるのは斥力といって反発し合っていて、下にあると引力、引き合う力になっています。

これが、湯川さんの時代は、原子核がつぶれないために、あまり粒子同士がくっ付いてきたら、ちょっと離れるように動いてくれて、原子核くらいの大きさのところでちょうど引き合ってくれて、原子核の大きさよりも大きくなると、その力が及ばなくなるというのが予想でした。そうしないと隣にある原子核と引き合っちゃったらどんどんつぶれてしまうので、斥力があって、引力があって、だんだん0になっているはずだという感じだったんですけども、これはQCDのクォーク同士の相互作用を正確に計算することで、スパコンを使って、本当にこういう力が働いているんだよということも、分かるようになりました。

というのが、現在、スパコンを使った、古典コンピュータを使って分かった結果なんですけれども、ところが、モンテカルロ法を使ったスパコンを使った計算では、計算したいんですけども、できない理論があります。その一番有名なものは、中性子星の中というものです。

今まで原子の中のすごく小さい話をしていたんですが、急に宇宙の話になりますけれども、

宇宙の中には中性子星という重たくて小さい星があります。これは、太陽よりもうちょっと大きい恒星が最後に超新星爆発をした後に、何にも残らない恒星と、ブラックホールが残る恒星と、それ以外に中性子星というブラックホールのなり損ないみたいな、重くて小さい星ができることがあります。この中性子星は、名前に中性子という言葉が入っているように、実は90%以上が中性子でできている。中性子だけからできている重い星があります。

これが、中性子がぎゅっと集まってできた星です。これは中性子でできているので、必ずQCDで計算できるはずなんですけれども、たくさん中性子がいる状態の計算をするのは、モンテカルロ法、重点サンプリング法では難しい。何が難しくなるかというと、理論の情報に確率を使いますと言いましたが、この確率が実は複素数という虚数が入ってきてしまって、確率としては役に立たなくなってしまう、ということが起こっています。

モンテカルロ法は、非常にいろいろなことが分かってきたんですが、こうやって使えない理論がありまして、最近、20年くらい、だんだんそれが深刻な問題だということが分かりまして、何かそれに変わる計算方法がないかということ、世界中の研究者が考えていました。そこで登場したのが量子コンピュータという状況になっています。

最後、5分、10分くらいで、量子コンピュータでどうということが分かりそうか。実はまだ全

モンテカルロ法では解けない物理系



重くて小さい星 中性子星
太陽の質量くらい、半径10km
超新星1987Aの爆発の後に
できてるはず？

- ・モンテカルロ法ではできないけど
計算したい理論
- ・実時間発展
- ・中性子星の中(有限密度QCD)
- ・重点サンプリング法
物理量の計算: $\langle O \rangle = \frac{1}{Z} \int D\phi O(\phi) P(\phi)$
 $P(\phi)$ (理論の情報)を確率の重みとする
ここが負になったり複素数になったり
- ・重点サンプリング法に代わる計算法?
・量子計算

国立天文台
アルマ observatory
WebPageより

素粒子の世界を計算する
- 量子コンピュータ編 -

然できていないんですけれども、期待感だけを話したいと思います。

まず量子コンピュータは、最近ちょっと耳にするようになりましたが、どういうものかといいますと、先ほどこっと出てきました、量子力学の重ね合わせの原理を使って作ったマシンです。ハードウェアです。普通、コンピュータはビットというものにデータを入れますが、その1個のビットが重ね合わせ状態を持っているようなビットになっています。それをキュービットと呼んだりもします。

量子コンピュータは、いろいろな人が今作っている段階で、IBMとか、Googleとか、大企業も必死になって作っていますし、日本だと理研の「叡(えい)」とか、大阪大学でも作っています。まだまだいろいろ発展途上な分野になっています。

ただ、量子コンピュータが出来上がったら、いろいろ、今までの古典コンピュータよりもいいだろうと期待されている優位性がいくつかありまして、1つはメモリーの優位性があります。古典コンピュータは、ビットの数が増えれば増えるほど、その数に比例して扱えるメモリーの数も増えていきます。それは、ビットの数がn倍増えると、扱えるメモリーもn倍になるという感じなんですけれども、量子コンピュータは指数関数、2のn乗という形で増えていきます。なので、nが2だったら4なんですけど、nが3になったら8になって、というふうに倍々ゲームでメモリーが増えていくということで、あっという間に量子コンピュータのメモリーのほうが大きくなるという期待があります。

それ以外にも、古典コンピュータでも、積分をするときに乱数を振って計算するなんていう人間ではできないような計算方法を考えましたが、新しいハードウェア、新しいマシンができると、それに対応した新しい計算方法が必ず開発されるだろうと考えられていまして、みんな今、それを一生懸命やっているんですけれども、そうすると、そういうのを使ったら、今まで難しかった計算が簡単にできるようになるんじゃないかなと考えられています。

具体例もいくつかありまして、一番有名なのですと、素因数分解といって、暗号を送るときに使っている計算が、量子コンピュータが登場したら一瞬でできるようになって、今の暗号システムは、恐らく無力になるだろうと考えられています。そういうような新しいアルゴリズムが、素粒子の研究にも出てくるんじゃないかなと期待しています。

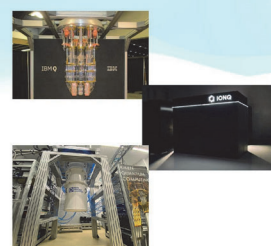
ただ、今すぐ使えるのかということ、実は使えなくて、量子コンピュータには2つ大きな課題が、現状あります。1つが、量子エラーが起こるというものがあって、実は、今の量子コ

量子コンピュータ

・量子力学の「重ね合わせ(状態共存)の原理」「量子もつれ」を用いたハードウェア

ゲート型量子計算機

- ・超電導素子を使ったもの
IBM Q, Sycamore (Google), Rigetti
理研「叡(えい)」, 阪大QIQB
- ・イオントラップ型
Ion Q
- ・光量子型

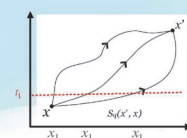


測定型量子計算機

- ・光量子型

期待される優位性

- ・メモリーの優位性
量子状態を記述するときに(qubit)の数Nに対して古典コンピュータはNに比例した状態を記述($\sim O(N)$)
量子コンピュータは 2^N 次元の状態を記述
- ・負の確率の出現(計算経路の消滅と計算の高速性)
量子論の経路積分が高速に解けるかも?(モンテカルロとは全く異なる方法)
可能な全ての経路を(正しい確率で)足し合わせないといけない
- ・新しいハードウェアに対応した新しいアルゴリズムを開発
それを使って今まで難しかった計算ができるようになる
ex.) 最適化問題、素因数分解など



量子コンピュータ全体の課題

- ・量子エラーが起こる
環境からの影響で勝手に反転するなど、制御操作をするときの誤差
(反転させようとしてもきちんとならなかったり)
ゲート演算の正確さは $10^{-2} \sim 10^{-3}$
(100-1000回演算すると1回失敗する)
- ・サイズが小さい
サイズ(qubit)の数は
N ~ 20-400くらい



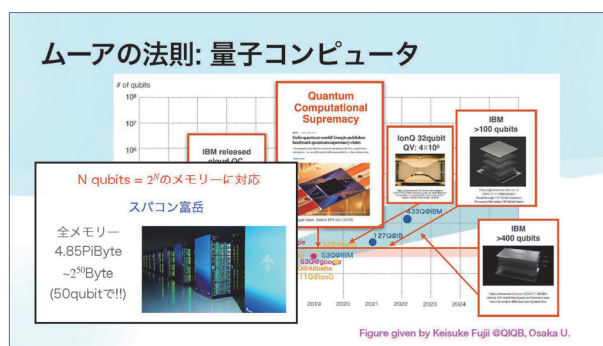
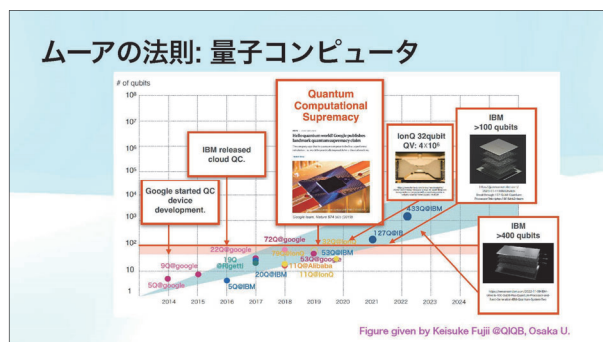
ンピュータは、足し算、掛け算を計算していると 100 回から 1000 回に 1 回失敗します。1 秒間に 400 京回とか計算している間には何万回と計算をミスしてしまいます。そんな何万回も計算ミスされると、欲しい答えは全然出てこないの、それを何とかしないといけないうことが最大の問題になっていまして、例えば一般雑誌の『日経サイエンス』とかにも、量子コンピュータ最大の壁、間違えちゃうのをどうやって直すかっていうのが、今一番深刻な問題になっています。

もう 1 つは、サイズが小さいとよくいわれていました。ところが、これはだいぶ良くなってきてまして、量子コンピュータのサイズ、どれくらいのキュービット数かということなんですけれども、量子コンピュータは、2014 年に Google が 5 キュービットの量子コンピュータ、5 個ビットが並んでいるちっちゃい量子コンピュータを作りました。そこから 10 年の間に、実は倍々ゲームのように増えていって、今は 400 キュービットを超える量子コンピュータができています。これは IBM でできています。

キュービットの数で扱えるデータの量が決まるといいましたけれども、スパコン富岳は、2 の 50 乗のメモリーを持っています。そうすると、実は 50 キュービットの量子コンピュータがあれば、富岳に匹敵するメモリーを作り出すことができます。ですので、現状、400 キュービットを超えていますので、メモリーという意味では富岳を圧倒するようなコンピュータができています。ただ、最初に申し上げたように、計算を失敗するので、これをフルに使って、何か新しい結果が出るような状況には至っていません。

最後に、私が最近何をやっているかを、1 分ぐらいでお話したいんですけども、夢の誤り訂正、失敗しちゃったのを直せるような理論が出来上がった量子コンピュータができたときに、どういう研究ができるかをいろいろ考えて研究しています。特にモンテカルロ法、従来の方法では研究が難しかったような理論を研究しています。

例えば、さすがに QCD までやるのは難しいので、一次元の電磁気の理論を計算しまして、モンテカルロ法では計算しづらいような特殊な環境下では、普通電気の力はプラスの電荷とマイナスの電荷は引き合いますが、特殊な環境下では、その間に反発する力が働きますよというのを、同じ基礎物理学研究所の方たちと 2 年くらい前に研究しました。

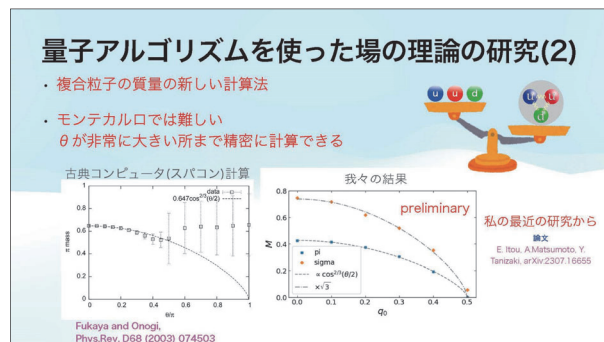


また、先ほど陽子は、もともとできている小さいクォークたちの質量よりもずっと重いですよっていう話をしましたけれども、そういう複合粒子、いろいろな粒子がくっ付いた粒子の質量を計算する計算方法を考える研究もしています。従来のモンテカルロ法を使ったコンピュータではエラーが大きくて、理論的にはこうなるだろうと予想されていたのが再現できないような計算があったんですけれども、それに対して、きれいに理論と予想が一致するような結果が得られますよというのを、この間の7月に研究しました。

ということで、最後、まとめますと、この世界、全ての物質は、原子からどんどん分割していった、クォークでできています。その間には強い力が働いて、原子核、つまり物質を形成しています。その力を理解するには、コンピュータを使っています、これは人間とは違ったアプローチで問題を解くことができます。従来の古典コンピュータですと、乱数を使って積分するモンテカルロ法がありました。量子コンピュータでは、量子状態の重ね合わせを保存したまま計算することができます。今まで、素粒子原子核の分野は、40年くらい前からコンピュータを使った研究が進んできていまして、いろいろ明らかになったんですけども、中性子星の物理はいまだにできない状況にあります。それは、量子コンピュータが作られましたら、新しいアルゴリズムによって、こういうことが研究できるんじゃないかなと考えています。

最後に、おまけですけども、実は量子コンピュータは、皆さんも使えます。無料で使えます。IBMがIBM-Qっていうのをクラウドで上げていまして、「IBM Quantum」で検索しますと、最初にメールアドレスを登録しないと行けませんが、使うことができます。興味がある方は、ぜひ使って遊んでみてください。

以上となります。



まとめ

まとめ

- 世界(物質)は原子→原子核→陽子・中性子→クォークで出来ている。強い力が働いて原子核が形成される
- 計算機は人間とは異なったアプローチで問題を解く
古典計算ではモンテカルロ法(乱数を使って積分をする)
量子計算では量子状態の重ね合わせを保持して計算
- 素粒子・原子核理論のQCDの性質は40年にわたってモンテカルロ法で明らかになってきた
- 重点サンプリング法では解けなかった系(中性子星の中など)は？
量子コンピュータが作られようとする今、新しいアルゴリズムによりこれまで計算できなかった物理が明らかになるかもしれない

おまけ

- 量子コンピュータ(IBM-Q)は無料で使えます！
- 「IBM, Quantum Platform」で検索
- オンライン解説
IBM qiskit (日本語もあり)
Quantum Native Dojo
(量子ネイティブ道場)

