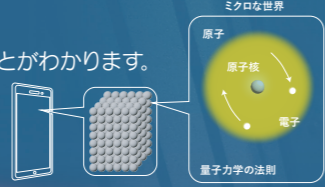


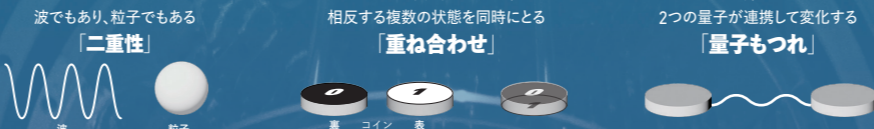
量子とは

身の回りのものをどんどん細かく見ていくと、髪の毛の太さの10万分の1ぐらいの大きさの原子からできていることがわかります。さらに原子は、原子核とそのまわりの電子からできています。これらの極小の世界では、ふだんは隠れて見えない不思議な物理法則(量子力学)が顔を出します。原子や電子など、量子力学にしたがい1つ2つと数えられるかたまりを「量子」と呼んでいます。



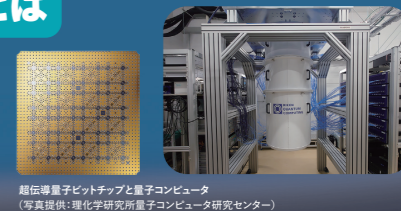
量子の性質

量子には日常感覚に反するような、不思議な性質がいくつかあります。



量子技術とは

二重性、重ね合わせ、量子もつれといった量子の性質を積極的に操作・制御し、活用するのが量子技術です。量子の性質を工学的に実装できるようになったことで、量子コンピュータ、量子通信や量子センサなど、これまでになかった先端的な技術が登場しました。



超伝導量子ビットチップと量子コンピュータ (写真提供: 理化学研究所量子コンピュータ研究センター)

2025 未来の技術を紹介

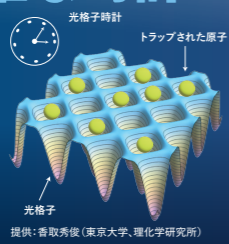
光格子時計の発表 (2001)

100億年たって正確 ● 東京大学のグループが光と原子を使った時計を考案しました。冷やした原子をレーザーで捉えて縦横にならべて、それらが出す光の周波数で時間を計ります。従来の原子時計より精密で、宇宙の年齢と同じ時間(推定138億年)がたっても1秒もずれない極めて正確な時計ができます。イオンを使った別の精密時計と並んで、いずれ1秒を定義するのに使われるでしょう。

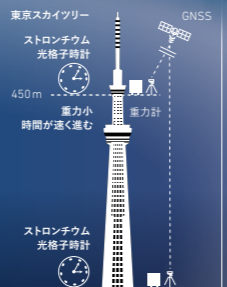
極めて正確な時計

高さが変わると時間が変わる (2020)

重力のわずかな違いを見る ● 一般相対性理論によれば、高い場所では重力が弱いので、時間が若干速く進みます。光格子時計を東京スカイツリーの地上と展望台に置いて、時間の流れの違いを確認しました。重力のわずかな違いによって、地下資源や地殻変動を見つけることができるかもしれません。



提供: 香取秀俊(東京大学、理化学研究所)



見えないを見るセンサ

量子コンピュータ誕生

暗号解読が可能に? (1994)

研究が加速 ● ショアが量子コンピュータで素因数分解を超高速度で行う方法を発見しました。

素因数分解ができる通信暗号が解けてしまうので、量子コンピュータ研究が一気に加速しました。

スピン1個の観測 (1993)

超高感度な量子センサへ ● 分子やダイヤモンドが持つスピンを1個だけ観測することで、温度などを超高感度で測れる道が開けます。

レーザー冷却誕生 (1985)

光で原子を止める ● 原子にレーザー光を当てると、原子が光を吸収・放出しながら大きく減速します。温度は原子の熱運動なので非常に冷たくなります。

量子コンピュータの発明 (1985)

幕開け ● ドイツが量子コンピュータの理論をつくり、実現を目指した研究が始まりました。

ファイマンの洞察 (1981)

現在のコンピュータでは自然現象を計算できない ● 「自然は量子でできている。だから自然をシミュレートするには量子的にふるまう量子コンピュータが必要だ」と見抜きました。

想像を超える未来

量子の不思議な性質を使うと、この宇宙にある全ての原子の数より多くの情報を同時に扱えます。今より桁違いに速いコンピュータや、100億年たってもずれない時計など、想像を超える技術が実現するでしょう。

量子と量子技術

今から100年前に登場した量子力学は、数々の不思議な現象を予言しました。それらは実験で確かめられ、100年後の今、新たな情報通信を拓きました。

*背景は2023年に発表された国産量子コンピュータ初号機「こゝろ」の内部です(右上写真参照)。極低温の冷凍機の中で64量子ビット超伝導回路が計算しています。

なぜ速いのか?

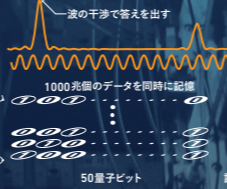
量子の世界では、1つの物体が様々な状態に同時になることができます。電子コンピュータはこの性質を使って、膨大な数のデータを同時に計算します。

現在のコンピュータ



複数のトランジスタにデータを記憶させて計算します。その計算が終わったら、次のデータを記憶させ計算します。

量子コンピュータ



量子ビットを並べて量子もつれにすると、大量のデータを同時に記憶できます。それらを一度に計算します。

現在のコンピュータでは、トランジスタ50個に記憶できるのは50桁のデータ1個です。記憶するデータを変えながら、それぞれ計算します。量子コンピュータでは、量子ビット50個に1000兆個のデータを重ねて記憶できます。そのすべてを同時に試すので、現在のコンピュータでは宇宙の年齢ぐらいの時間がかかるような難しい問題も、超高速で計算できます。超伝導、光、イオン、原子、半導体などを使った量子コンピュータの開発が進んでいます。

2000 不思議を使う

超伝導量子ビット誕生 (1999)

最初の量子コンピュータチップ ● NECの研究グループが、超伝導を使った世界初の量子ビット実験に成功しました。超伝導チップで量子の重ね合わせをつくりました。

エラー訂正法の発見 (1995)

実現に一気に近づく ● 量子ビットは極めて繊細でエラーが起きやすく、実際には動作しないとの見方もありました。起きたエラーを訂正する方法が見つかり、その見方が変わりました。

量子コンピュータ誕生

暗号解読が可能に? (1994)

研究が加速 ● ショアが量子コンピュータで素因数分解を超高速度で行う方法を発見しました。

スピン1個の観測 (1993)

超高感度な量子センサへ ● 分子やダイヤモンドが持つスピンを1個だけ観測することで、温度などを超高感度で測れる道が開けます。

レーザー冷却誕生 (1985)

光で原子を止める ● 原子にレーザー光を当てると、原子が光を吸収・放出しながら大きく減速します。温度は原子の熱運動なので非常に冷たくなります。

量子コンピュータの発明 (1985)

幕開け ● ドイツが量子コンピュータの理論をつくり、実現を目指した研究が始まりました。

ファイマンの洞察 (1981)

現在のコンピュータでは自然現象を計算できない ● 「自然は量子でできている。だから自然をシミュレートするには量子的にふるまう量子コンピュータが必要だ」と見抜きました。

1975 不思議を超える

MRIの誕生 (1973)

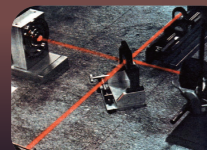
体内を見る ● NMRで体内の水の中の水素の原子核スピンを測ると、体の中を画像に描くことができます。MRI(核磁気共鳴画像法)といい、病気の診断に使われています。

原子時計の誕生 (1949)

超精密な時計 ● 原子が吸収・放出するマイクロ波の波を時計の「振り子」として用いる原子時計が登場。この時計で1秒が定義されました。

レーザーの発明 (1960)

波長がそろった強い光 ● たくさんの原子から出た光の波がそろうことで強い光が出るレーザーが発明されました。通信、医療、工業などに使われています。

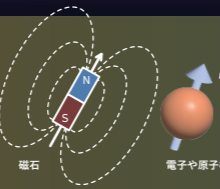


最初に撮影されたと思われるレーザー光 (Image: AIP)

超伝導の解明 (1957)

BCS理論 ● 極低温で電気抵抗がゼロになる現象「超伝導」が量子力学で説明できました。超伝導磁石 ● 超伝導でつくる超強力な電磁石はMRIやリニアモーターカーなどに使われています。超伝導量子干渉計(SQUID) ● 超伝導によって超高感度な磁気センサが作れます。

原子・分子を測る



スピン (1925-1928)

磁石の量子 ● 電子や原子核は磁石の性質を持っていて、これを「スピン」と呼びます。磁石の磁場のように向きがあり、量子としてふるまいます。

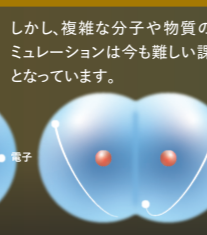
1950 量子の不思議

NMR技術が発見 (1938)

スピンでわかること ● 物質中の原子核のスピンの変化を、光よりも波長の長い電磁波で精密に測るNMR(核磁気共鳴)の技術が発見されました。スピンを測ると、複雑な分子の構造や化学反応のしくみがわかります。

化学結合の解明 (1927)

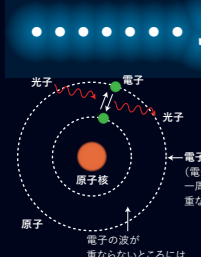
化学への応用 ● 水素は電子が1つの最も単純な原子です。この水素原子2つが結合する仕組みが量子力学で解明されました。その後、物質の性質を量子力学で理解する研究が進み、化学や材料科学が発展しました。



ミクロな世界を解き明かす

1925 量子の発見

エネルギーは階段のように増える



量子のはじまり ● プランクが最小単位のエネルギーのかたまりとして「量子」を考え出しました。ボーアは、原子には中心に原子核があり、まわりに波のような電子があると考えました。電子のいるところ(軌道)は1周すると電子の波がきれいに揃う位置に決まります。電子が今の軌道から別の軌道に飛び移るとき、原子は光(光子)を放出したり、吸収したりします。そのため、光子のエネルギーが飛び飛びになります。

量子の理論が誕生

$$i\hbar \frac{d}{dt} \hat{A} = [\hat{A}, \hat{H}] = \hat{A}\hat{H} - \hat{H}\hat{A}$$

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(x, t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x, t) \right] \psi(x, t)$$

$$\{A, B\}_{PB} = \sum \left(\frac{\partial A}{\partial q_i} \frac{\partial B}{\partial p_i} - \frac{\partial B}{\partial q_i} \frac{\partial A}{\partial p_i} \right) \rightarrow \{A, B\}_{DB} = \frac{1}{i\hbar} (\hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A})$$



ヴェルナー・ハイゼンベルク (Image: AIP)

量子はどう運動するの? ● 不思議な量子のふるまいを示す式は、ハイゼンベルクとシュレーディンガーがそれぞれ発見しました。この2つの同じ結果を出す式は、ディラックらによって整理され、最終的に「量子力学」となりました。これを使って様々な現象を予測できるようになりました。



エルヴィン・シュレーディンガー (Image: AIP)

1個の電子が2つの窓を通る

二重スリット実験 ● 電子も光子も「量子」としてふるまいます。たとえば、電子を2つの隙間(スリット)を通してスクリーンに当てると「粒子」として現れます。ただし、「波」の性質もあるので、スリットを通った電子の波同士が重なって、強め合ったり弱め合ったりする干渉が起こります。そして、電子の粒が縞模様を描きます。光子でも同じ実験ができます。量子は「粒子」であり、同時に「波」なのです。

