これらの極小の世界では、ふだんは隠れて見えない

高さが変わると時間が変わる

つけることができるかもしれません。

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。



L □ Ŕ

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。 波でもあり、粒子でもある 「二重性」

コインの裏と表のような、 相反する複数の状態を同時にとる 「重ね合わせ」

量子の性質

どんなに離れていても 2つの量子が連携して変化する 「量子もつれ」

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

量子コンピュータ、量子诵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。

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、





光格子時計の発表(2001)

025

. 000

100億年たっても正確 ● 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。 従来の原子時計上り精密で 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。

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 ●

NFC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

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

り、その見方が変わりました。

MRIの誕生 (1973)

体内を見る ● NMRで体内のオ

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か

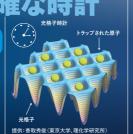
できます。MRI(核磁気共鳴画

像法)といい、病気の診断に使

NMR技術が誕生 (1938)

われています。

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 所では重力が弱いため、時間が若 干凍く進みます。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



原子 マイクロ波

成功しました。超伝導チップで量 ンピュータで素因数分解を超 高速に行う方法を発見しました。

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 子やダイヤモンドが持つスピン いとの見方もありました。起きた を1個だけ観測することで、温度 エラーを訂正する方法が見つか などを超高感度で測れる道が 開けます。

**

義されました。

研究が加速 ● ショアが量子コ | 素因数分解ができると通信暗号が | ました。 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。

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 量子コンピュータが必要だしと ので非常に冷たくなります。

量子コンピュータの発明(1985)

450m (Z)

ストロンチウム 光格子時計

重力小 重力計 時間が速く進む -

墓開け ● ドイチュが量子コン ピュータの理論をつくり、実 現を目指した研究が始まり

ファインマンの洞察(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 見抜きました。

超伝導の解明 (1957)

がゼロになる現象「超伝導」が

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

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。

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。



化学結合の解明(1927)

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 1つの最も単純な原子です。この ミュレーションは今も難しい課題 りも波長の長い電磁波で精密 水素原子2つが結合する仕組み

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

に測るNMR(核磁気共鳴)の技 術が誕生しました。スピンを測る されました。その と、複雑な分子の構造や化学反 後、物質の性質 応のしく を量子力学で みがわか 理解する研究が 進み、化学や材料

化学への応用 ● 水素は電子が しかし、複雑な分子や物質のシ



滋石の量子 ● 雷子や原子核は 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 ミクロな世界を解き かす あり、量子として ふるまいます。

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。

上量子技術 量子コンピュータまでの100年!

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「叡」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 7.量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

0000....

 $0 \bigcirc 0 \cdots \cdots \bigcirc 1$

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

50量子ピット 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。

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 で記憶できます。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くらいの時間がか かるような難しい問題も、超高速で計算できるのです。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。

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

国産量子コンピュータ始動

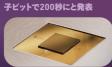
国産初の量子コンピュータ「叡 が3月に理化学研究所で稼働し ました。富士通、大阪大学で2、3 号機が公開され、「国産量子コン ピュータ元年」となりました。

東京で量子暗号始動(2010

結ぶ光ファイバーを用いて、量 子暗号通信の実証実験が始ま

国際量子科学技術年(2025

スパコンで1万年の計算が53章



生成AIが普及(2023) コンピュータのトランジスタ数 1000億個超(2022)

> 5G通信開始(2020 暗号通貨開始(2009

スマホ普及 (2007

GNSS運用開始(1995

インターネット普及(1995

インターネットの暗号技術へ

パソコン普及 (1985

RSA暗号誕生(1977)

GPS衛星の原子時計で位置決定

した。その後、光子を利用した実

験に欧米の3つのグループが原

功しました。現在東京大学などが

ベルの不等式 ● アインシュタイ │ あるのかは謎のままでした。しか

ンらが批判していた「量子もつし、ベルがある特別な式を発見し

れ」の不気味な繋がりが本当に たことで、実験で調べることがで

体の量子的な状態が離れ た場所にある別の物体に 飛び移る「量子テレポー

研究している光量子コンピュータ にも使われています。

Nと1の重ね合わせを、ビットにち なみ量子ビットと名付けました。

きるようになりました

の「ベルの不等式」

を破る結果が出れ

ば、それまでの物理

を超える離れた繋が

ない ● ベネットらが量子暗号を提 案しました。暗号化したメッセージを 解く「鍵」のデータを光子を使って送 ります。盗聴されると跡が残るので、 安全を確認しながら通信できます。

だクラウザーらやアスペらの光子

を使った実験でベルの不等式が

本当に破れることが確認されまし

た。量子もつれが実証され、量子

力学の最大の謎の1つに決着が

つきました。その後、量子を使った

高度な実験をしたツァイリンガー

を加えた3人が2022年のノーベ

スーパーコンピュータ 開発競争 (1970-アポロ11号月面着陸 (1969)

インターネット誕生 (1969) トランジスタを使った現在の コンピュータ誕生 (1953)

量子もつれは本当だった

重ね合わせ (1925-1935)

複数の状態が同時に ● コインの 表と裏が同時に出るような、不思議 な状態を「重ね合わせ」と呼んでい ます。量子は相反する2つの状態を 同時に取ることができるのです。量 子を測ってみると2

つが重ね合わさっ た状態は消えて、ど

量子もつれ(1935)

離れても繋がっている ● 2つの | 生命の重ね合わせ? ● シュレー 量子が「量子もつれ」になると、ど んなに離れていても一方を測っ た瞬間にもう一方の状態が決ま る不思議な現象がおきます。



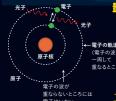
シュレーディンガーの猫(1935)

ディンガーは、量子力学では猫も 「生きている状態」と「死んでいる 状態」を同時にとる「重ねあわせ」 になるのかと問いかけました。

情報理論誕生(1948) トランジスタ誕生 (1948) 量子力学で、電子のふるまいを 予測して実現。 電流で0と1が切替可能に

AIの概念誕生 (1950)

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 ー電子の軌道 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。

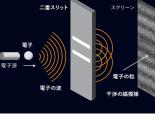
量子の理論が誕生

 $\mathrm{i}\hbar\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\hat{A} = [\hat{A},\hat{H}] \equiv \hat{A}\hat{H} - \hat{H}\hat{A} \quad \mathrm{i}\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi(x,t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x,t)\right]\psi(x,t) \quad \left\{A,B\right\}_{\mathrm{PB}} = \sum\left(\frac{\partial A}{\partial q_r}\frac{\partial B}{\partial p_r} - \frac{\partial B}{\partial q_r}\frac{\partial A}{\partial p_r}\right) = \sum_{i}\frac{\partial A}{\partial q_r}\frac{\partial B}{\partial p_r} - \frac{\partial B}{\partial q_r}\frac{\partial A}{\partial p_r}$ ディラックの量子力学への変換方法 シュレーディンガーの波動方程式



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。





1925