

Kawasaki Quantum Summer Camp 2024

量子コンピューター入門

Jul 29, 2024

沼田祈史
Kifumi Numata
IBM Quantum



IBM Corporation
創業 **1911**

IBM Japan
創業 **1937**

主な事業分野
情報システムに関する製品・サービスの提供

オペレーション
175ヶ国以上に事業拠点

従業員
20万人以上



最先端のテクノロジーと創造性をもって、
お客様とともに、仲間とともに、社会とともに、
あらゆる枠を超えて、より良い未来づくりに
取り組む企業グループ

Innovation

Diversity

Professional

IBMのイノベーションの歴史



創立

1911

世界初の汎用コンピュータ

1964

UPCバーコード開発

1973

IBMのAI「Watson」誕生

2011



1937

日本IBM 創立



1967

アポロ計画へ参画



1999

コンビニATMシステム開発



2023

AIスーツケース開発開始

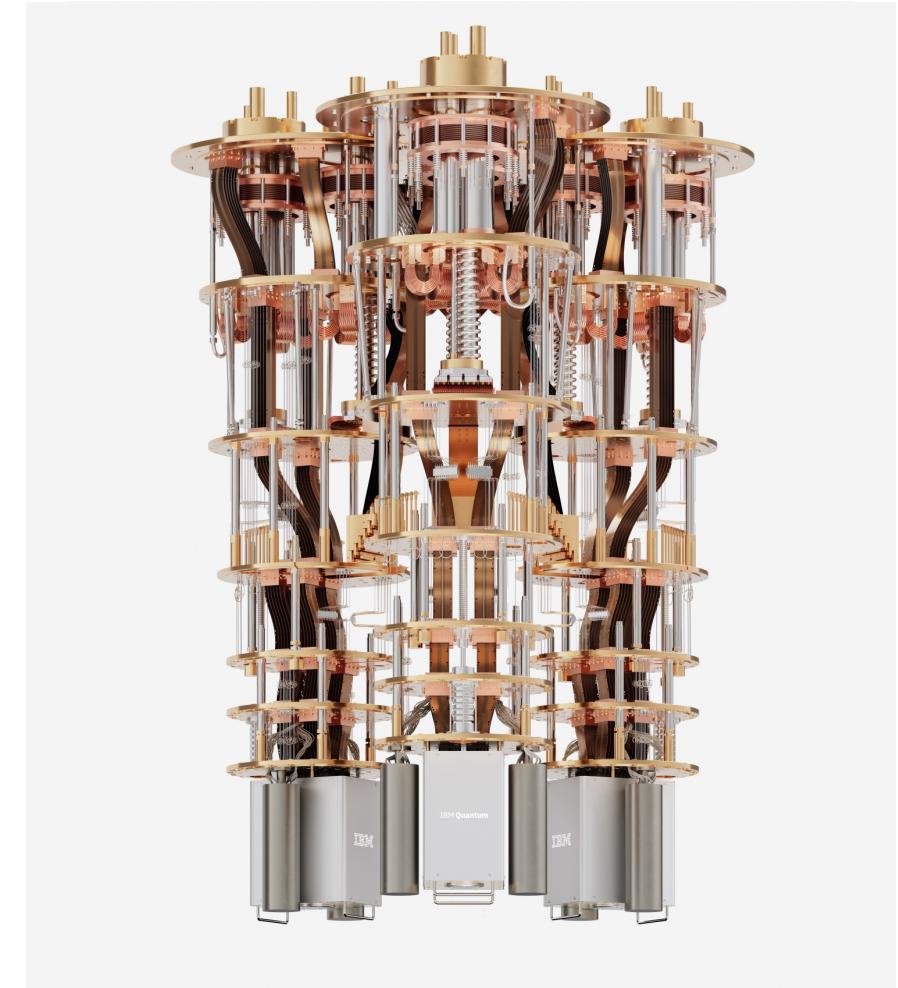


IBM



今日のゴール

量子コンピューターを
雰囲気だけでも
理解できた気になる！

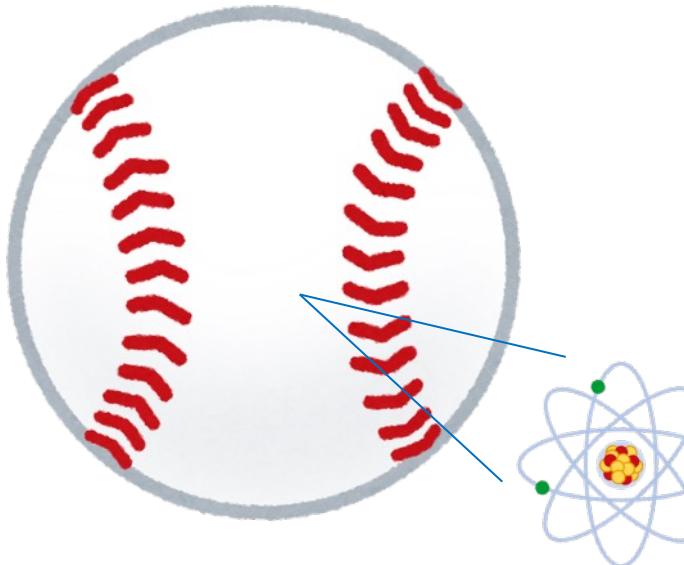


IBM®

量子とは？

量子とは？ Q

あらゆるものは、「原子」からできています。

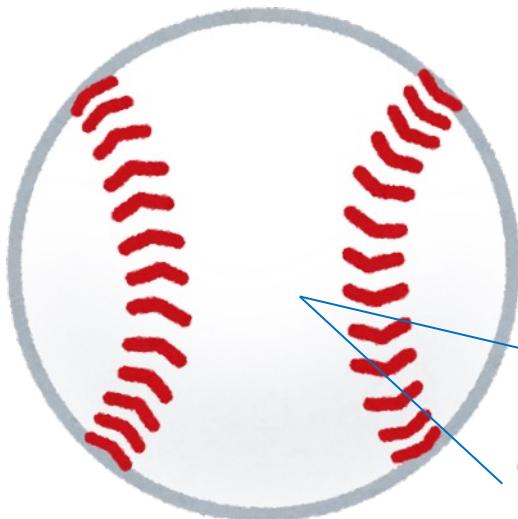


原子

量子とは？

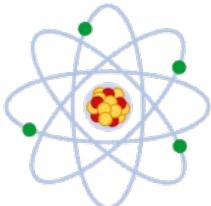


あらゆるものは、「原子」からできています。



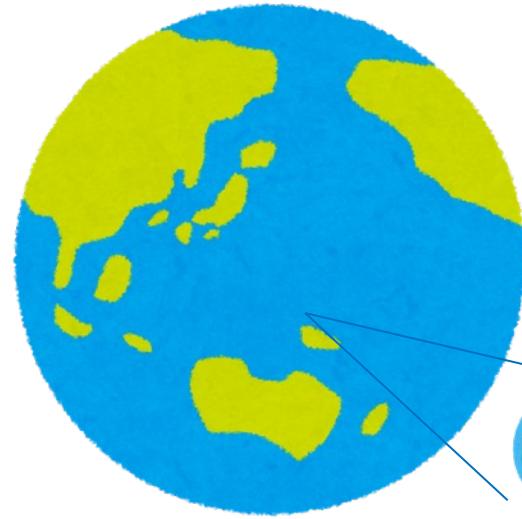
直径7cm

ほぼ
同じ比率



原子

直径0.1nm
ナノメートル



直径1万3000km



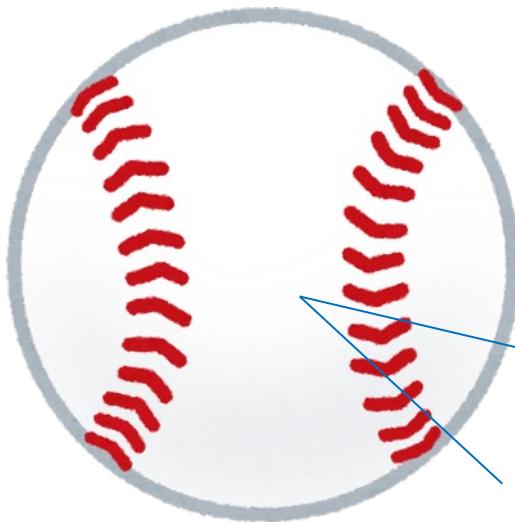
直径1cm

ビー玉

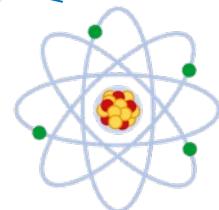
量子とは？



あらゆるものは、「原子」からできています。



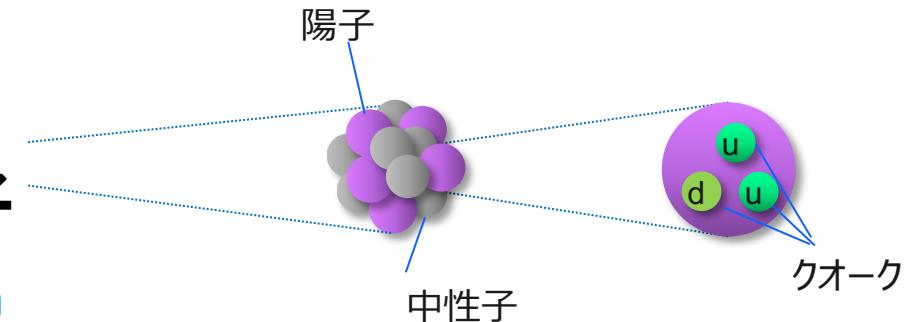
直径7cm



原子

直径0.1nm
ナノメートル

ミクロな世界
原子や原子より小さい物質を量子と呼びます。
このミクロな物質は、私たちの常識では説明できない、
不思議なふるまいをします。



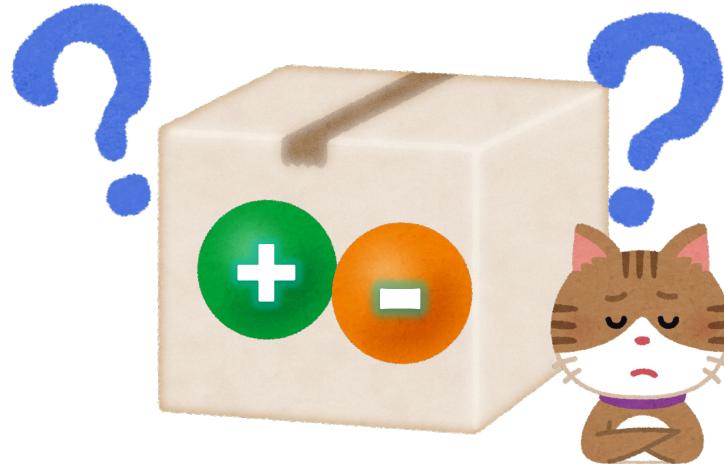
量子の不思議な現象：量子重ね合わせ

量子は1つしかなくとも、複数の状態を同時にとることができます。



量子の不思議な現象：量子重ね合わせ

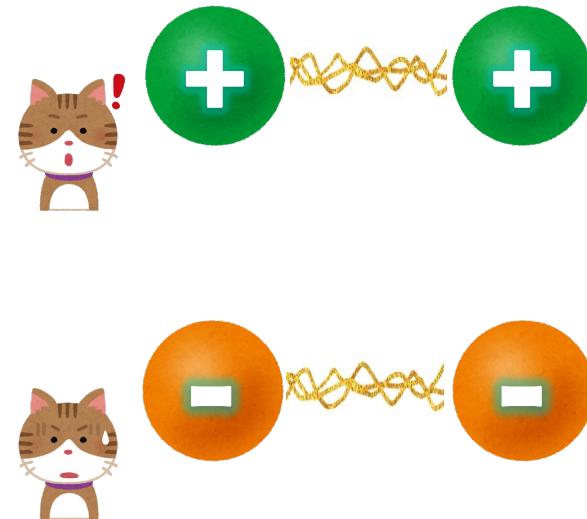
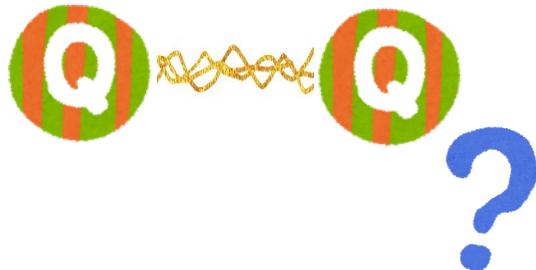
量子は1つしかなくとも、複数の状態を同時にとることができます。



例えば、+と-の2つの状態が共存していて、観測するとどちらかの状態に決まります。（分らなくて大丈夫です！量子とは直感では理解できないものです！）

量子の不思議な現象：量子もつれ

「量子もつれ」という特別な関係のふたごの量子は、
片方の状態を測定すると、もう片方の状態が測定しなくても分かります。
(片方しか測定していないのに！)



量子の不思議な現象：量子もつれ

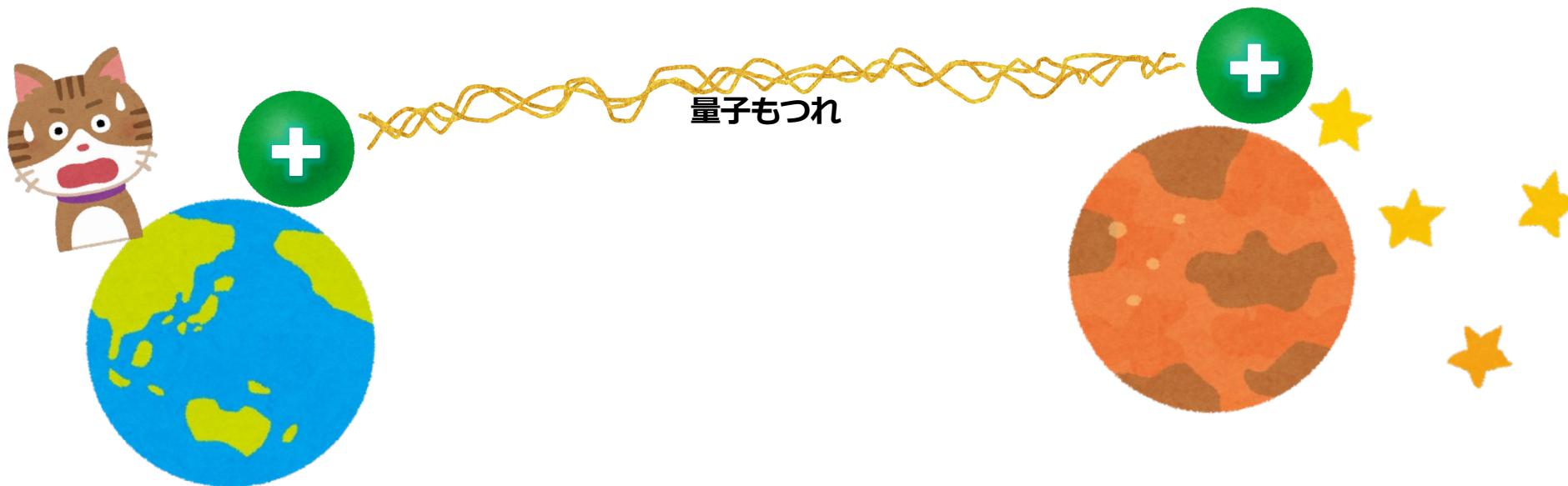
「量子もつれ」状態のふたごの量子を離れ離れにします。

地球の量子を測定して「+」と判明したら、火星の量子の状態はどうなるでしょうか？



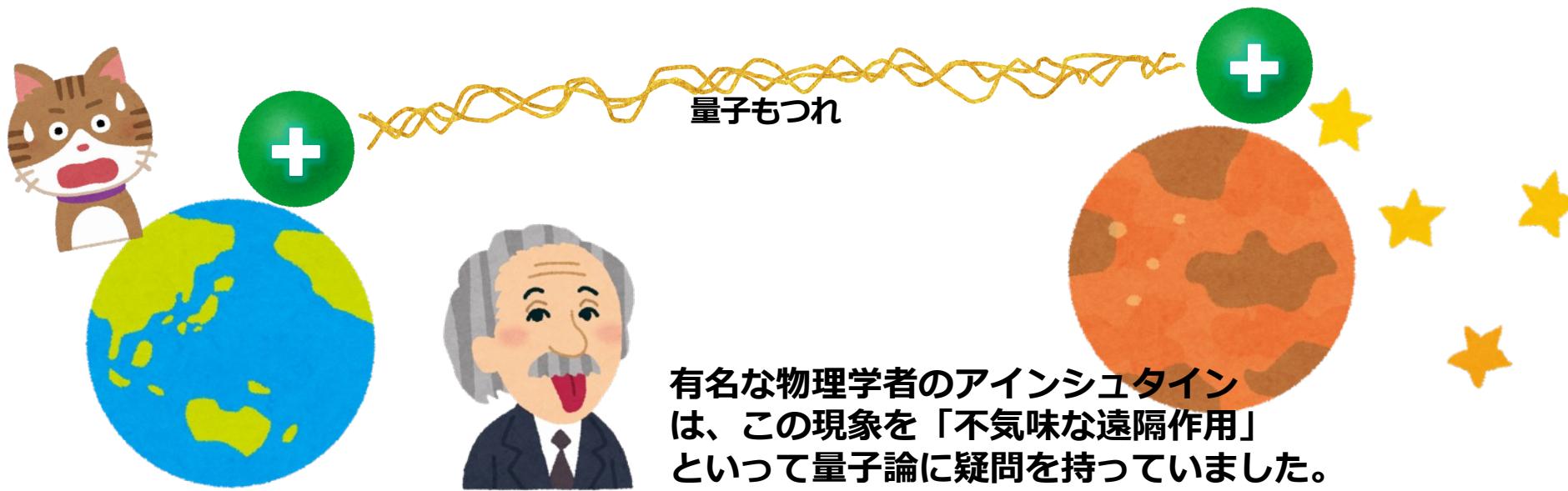
量子の不思議な現象：量子もつれ

「量子もつれ」状態のふたごの量子を離れ離れにしても
片方を測定するだけで、遠く離れたもう片方の量子の状態は測定しなくとも分かります！



量子の不思議な現象：量子もつれ

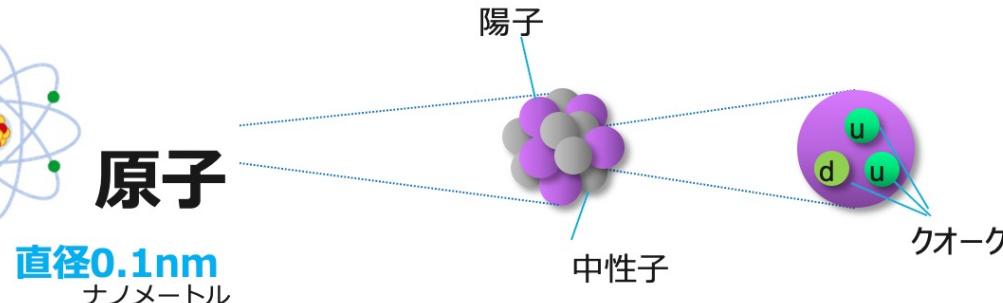
「量子もつれ」状態のふたごの量子を離れ離れにしても
片方を測定するだけで、遠く離れたもう片方の量子の状態は測定しなくとも分かります！



量子コンピューターは 量子の現象を仕組みとして使ったコンピューター



量子力学は、ミクロの世界を表現する物理法則
「重ね合わせ」「量子もつれ（エンタングルメント）」
などの量子現象を表現する手法。



量子コンピューターは、この自然界に存在する**量子力学**の法則を利用したもの。
これまでのコンピューターの計算処理とは根本的に異なる手法を使っています。

量子コンピューターとは？

白黒写真



カラー写真



量子コンピューターとは？

白黒写真



カラー写真



カラーフィルムの発明によって、「色」という物理現象を活用した、写真の芸術的・技術的な選択肢が広がった

量子コンピューターとは？

白黒写真



カラー写真



「重ね合わせ」「量子もつれ」という、これまでずっと世の中に存在していたものを制御できるようになってきたので
量子コンピューターが生まれた！

量子コンピューターを世界に先駆けて クラウド経由でアクセス可能に(2016)





60万人以上のユーザー
2595本以上の論文

2021年 新川崎・創造のもりに



創造のもりが広がる

画像出典：川崎市公式YouTubeチャンネルより

日本は米国とドイツに次いで3番目に導入

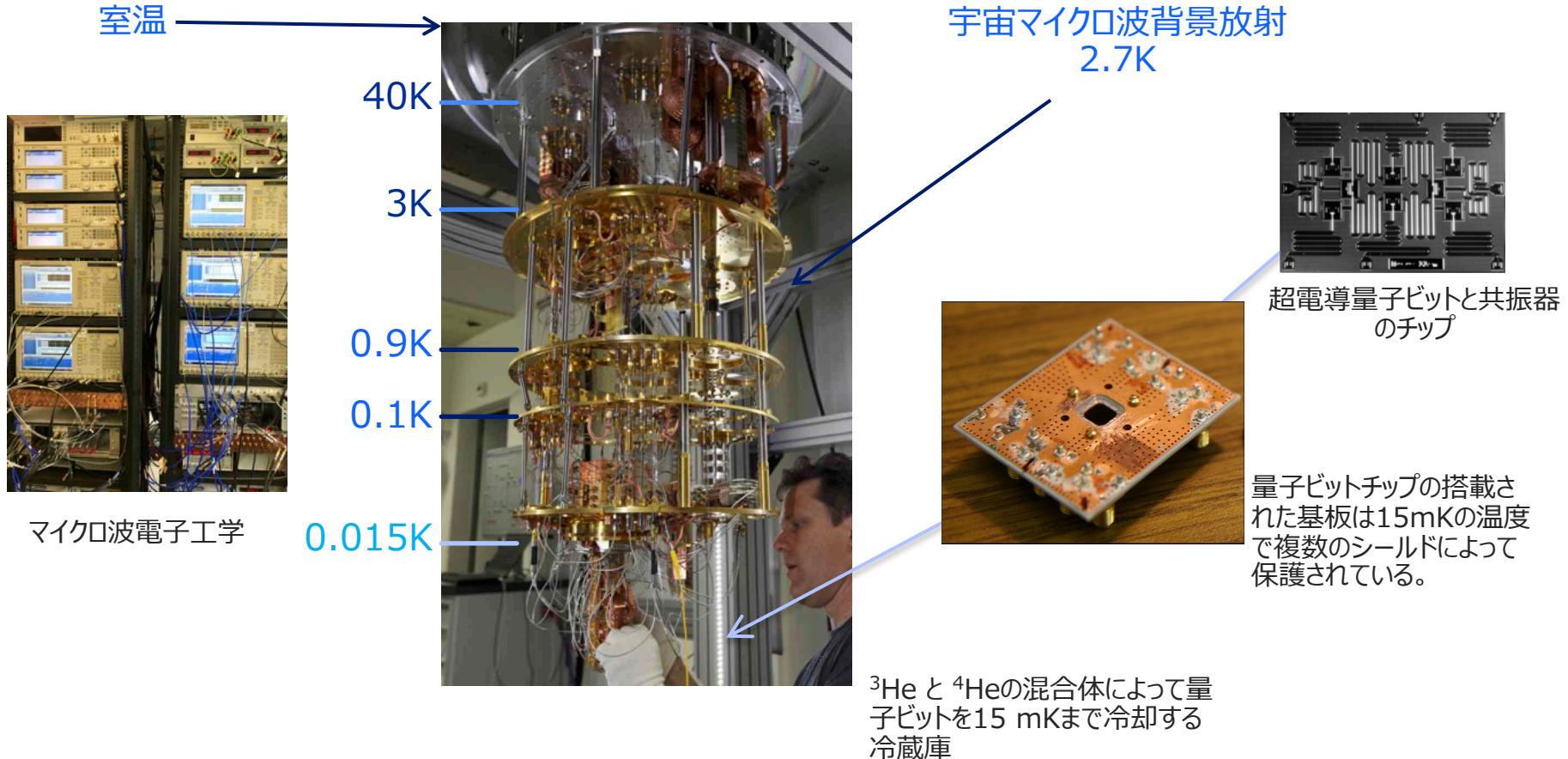


2023年 127量子ビットにアップグレード！

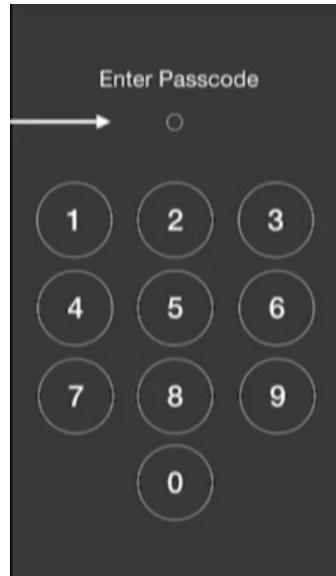
IBM Quantum



量子コンピューティングの構造

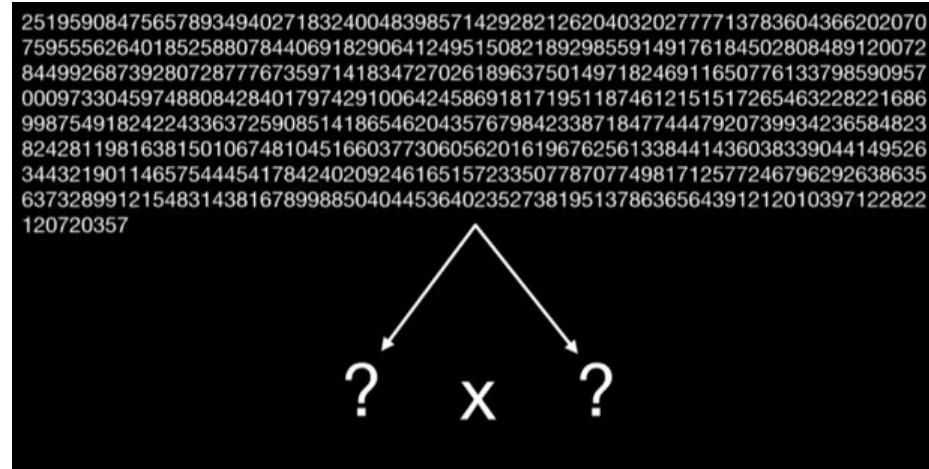
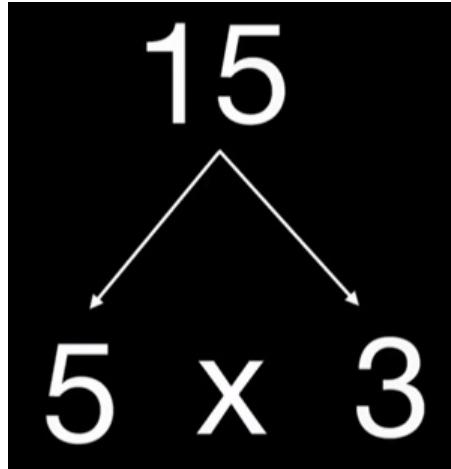


従来のコンピューターが苦手な計算



パスワードの桁数	試行回数	
1 桁	→ 10 回	
4 桁	→ 10,000 回	
6 桁	→ 100万 回	

素因数分解



現在のコンピューター：47億年

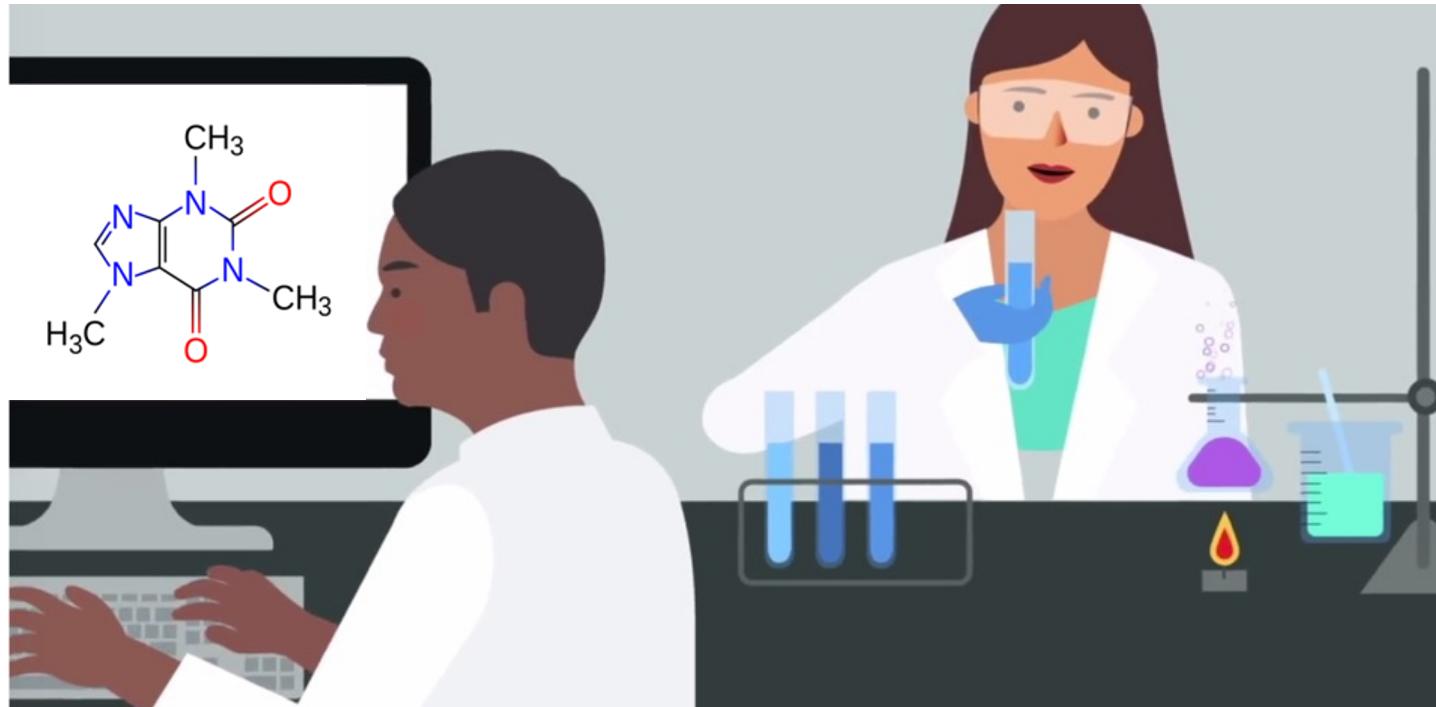


量子コンピューター：8時間

この仕組みは、RSA暗号に使われています。

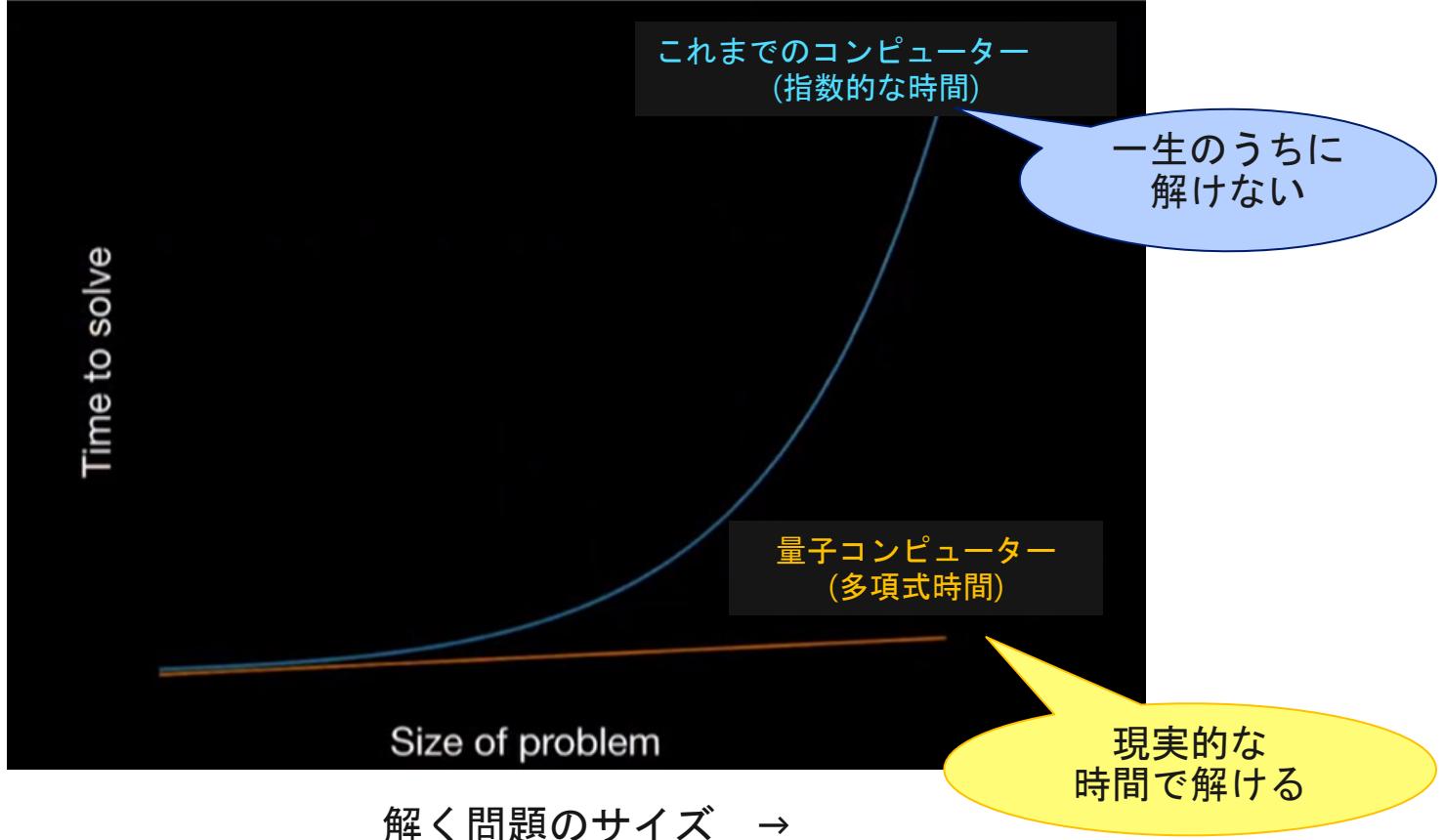
量子化学シミュレーション

現在のコンピューターで、カフェイン分子の一つのエネルギー状態を表現するには**10⁴⁸ ビット (~ 10³²PB)**必要。

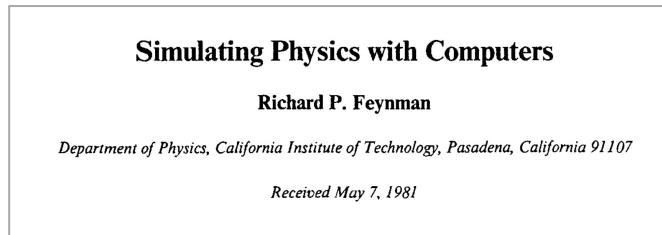


材料開発・新薬創製

解くのにかかる時間 →

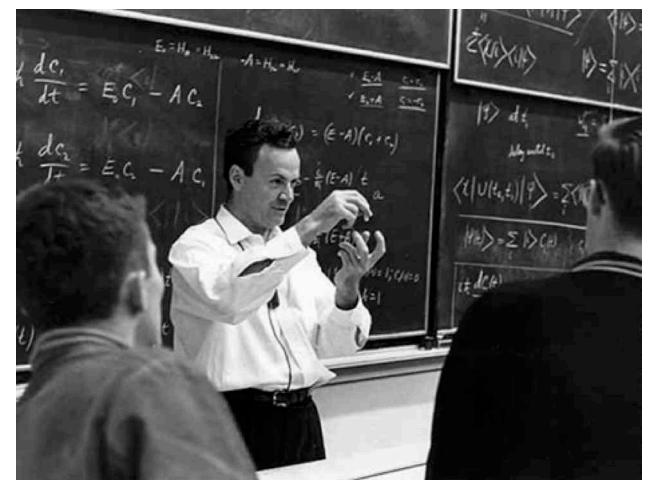


自然界は古典的な理論では説明できない。
だから、自然を予測したいのであれば、
量子力学の原理でコンピューターを作らなくてはいけない。

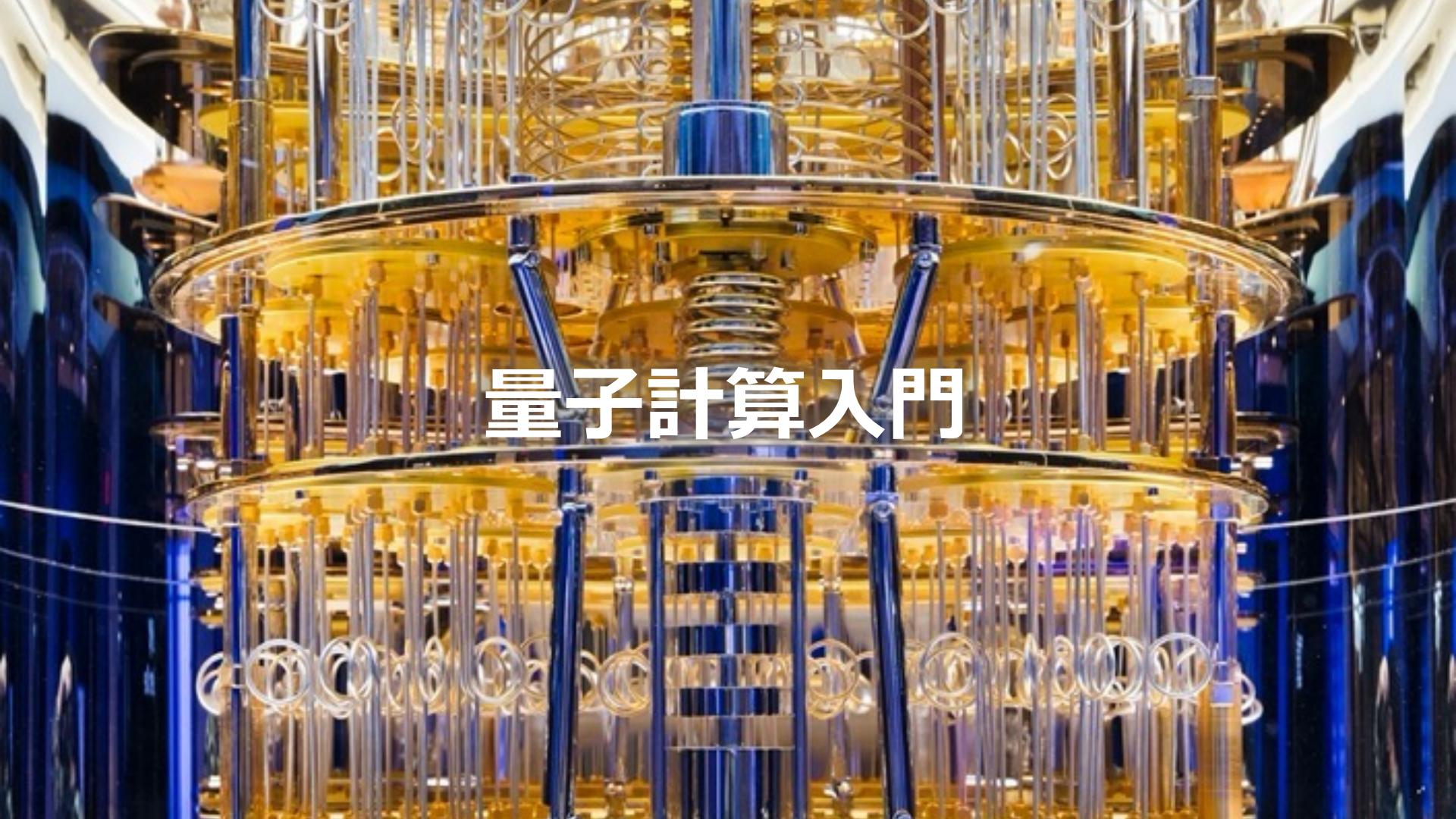


International Journal of Theoretical Physics, Vol 21, Nos. 6/7, 1982
コンピューターによる物理現象のシミュレーション

Richard P. Feynman
Department of Physics, California Institute of Technology, Pasadena,
California 91107

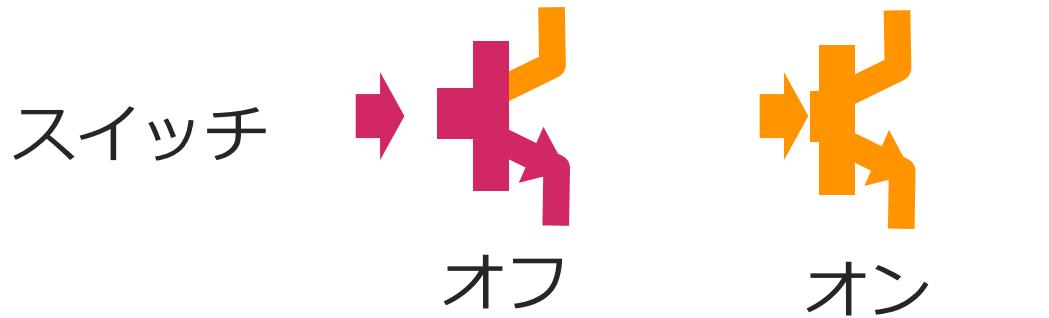


ファインマン先生



量子計算入門

コンピューターの中は、ビットで計算



ビット

0 1

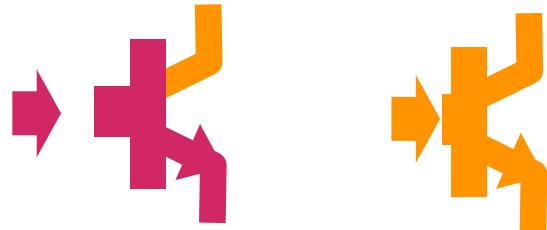
ビットの値を示す。左側は「0」（赤色）、右側は「1」（オレンジ色）。

例)

文字列	ビット
7	111
A	0100 0001



いつも使っている コンピューターのビット



0 または 1

どちらか

いつも使っている
コンピューターのビット

0 または 1

どちらか

量子コンピューターの
量子ビット

0 と 1

両方

「重ね合わせ」

いつも使っている
コンピューターのビット

0 または 1

どちらか



量子コンピューターの
量子ビット

0 と 1

両方

「重ね合わせ」

いつも使っている
コンピューターのビット

0 または 1

どちらか



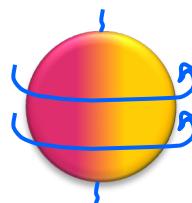
量子コンピューターの
量子ビット

0 と 1

両方

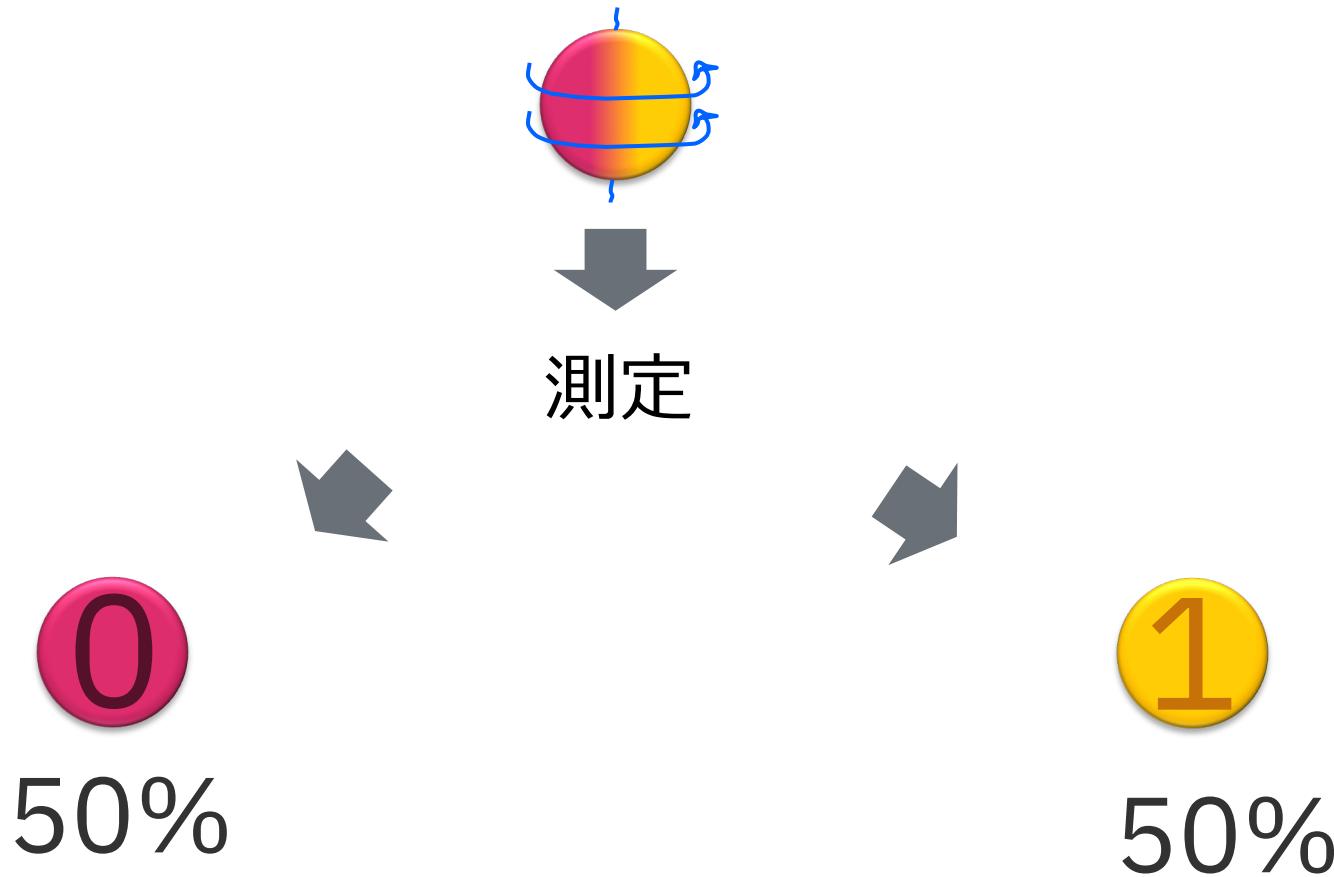
「重ね合わせ」

くるくる回っているコイン（イメージ）

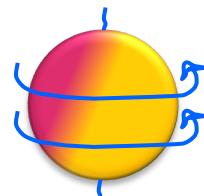


測定すると表か裏にバシッと決まる

重ね合わせ状態の量子ビット



重ね合わせ状態の量子ビット



測定

五分五分でない状態も作れる



0

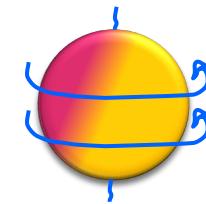
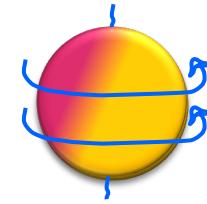
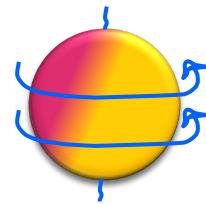
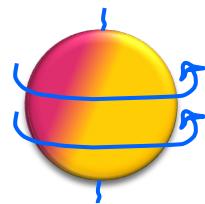
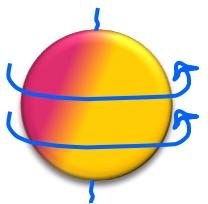
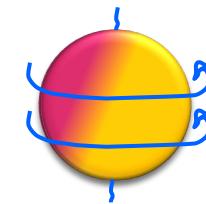
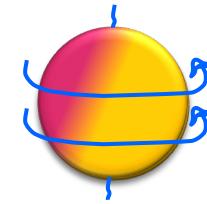
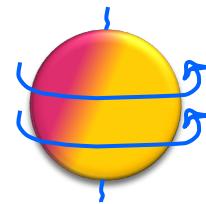
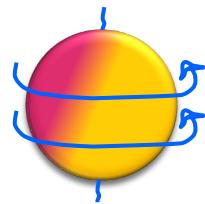
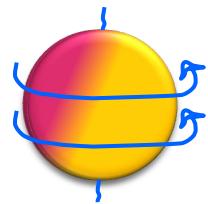
10%



1

90%

「0」 10%、「1」 90%の重ね合わせの量子ビットを



「0」10%、「1」90%の重ね合わせの量子ビットを
10回測定すると

0

1

1

1

1

1

1

1

1

1

2ビット



または



または



または



のうちどれか1つ

2量子ビット



と



と



と



の重ね合わせ

2ビット



または



または



または

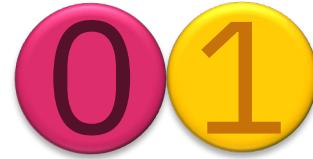


のうちどれか1つ

2量子ビット



と



と



と



25%

25%

25%

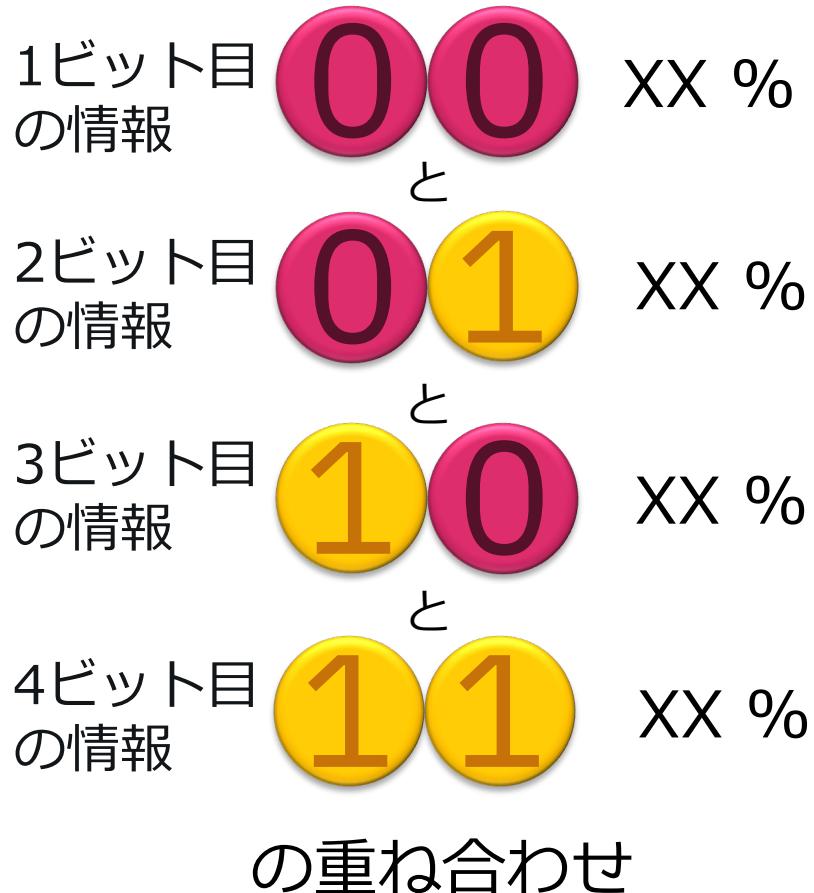
25%

の重ね合わせ

2ビット



2量子ビット



3ビット



3量子ビット

0 0 0
1ビット目の情報

0 0 1
2ビット目の情報

0 1 0
3ビット目の情報

0 1 1
4ビット目の情報

1 0 0
5ビット目の情報

1 0 1
6ビット目の情報

1 1 0
7ビット目の情報

1 1 1
8ビット目の情報

の重ね合わせ

nビット



までの 2^n 個の可能な状態の
いずれか

n量子ビット



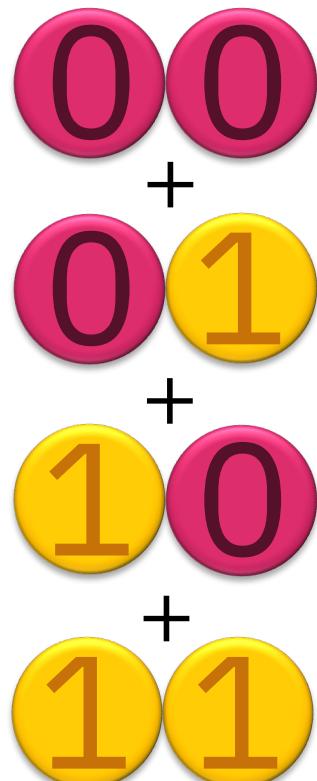
までの 2^n 個の可能な状態の
重ね合わせ

この重ね合わせは、量子計算の特徴の1つです。

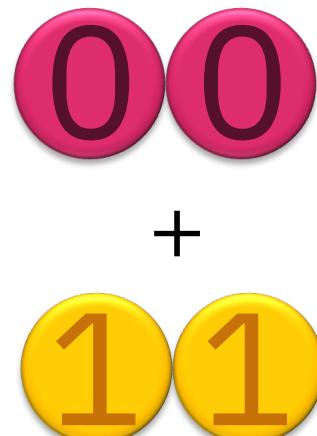
量子重ね合わせ

$$\begin{array}{c} 00 \\ + \\ 01 \\ + \\ 10 \\ + \\ 11 \end{array}$$

量子重ね合わせ



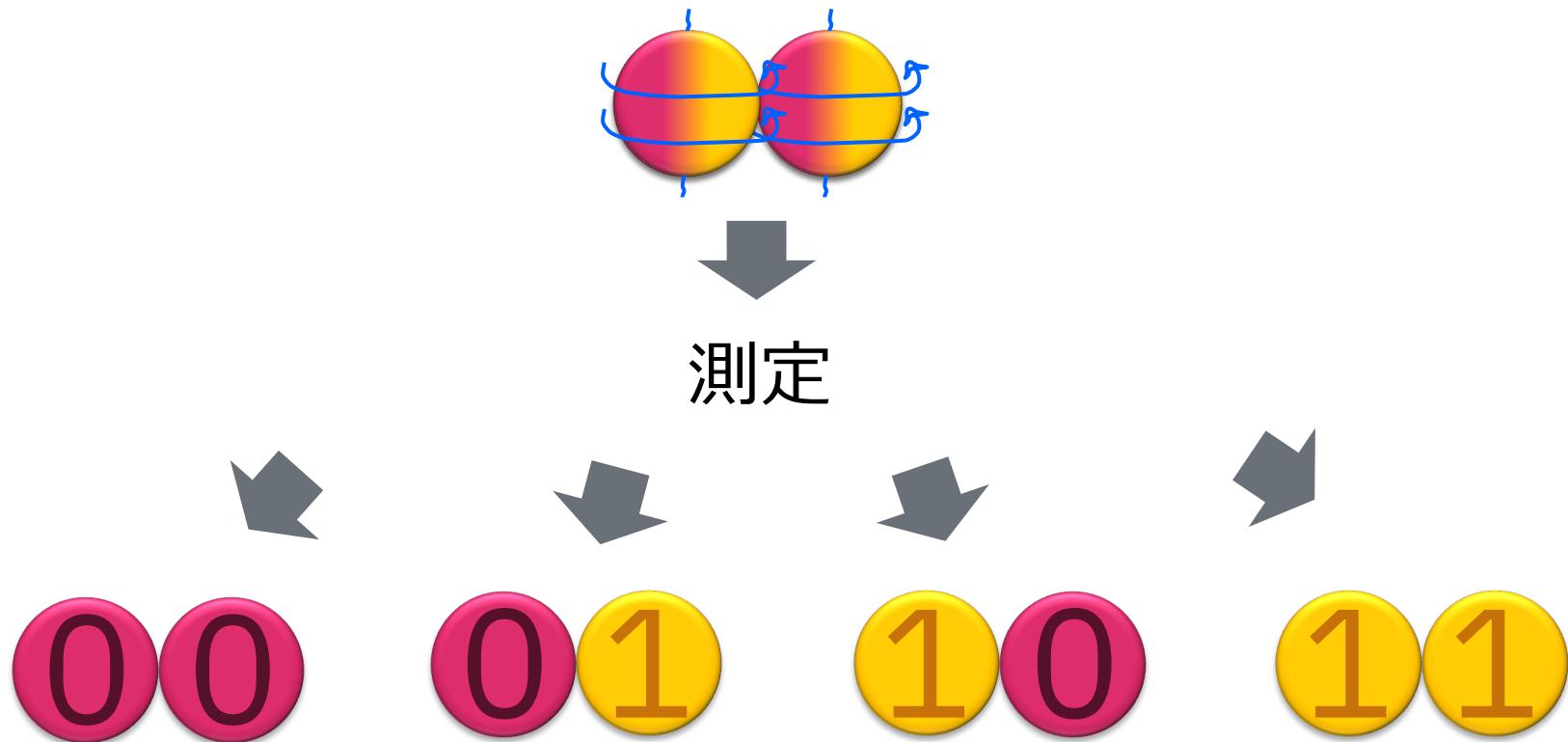
エンタングルメント (量子もつれ)



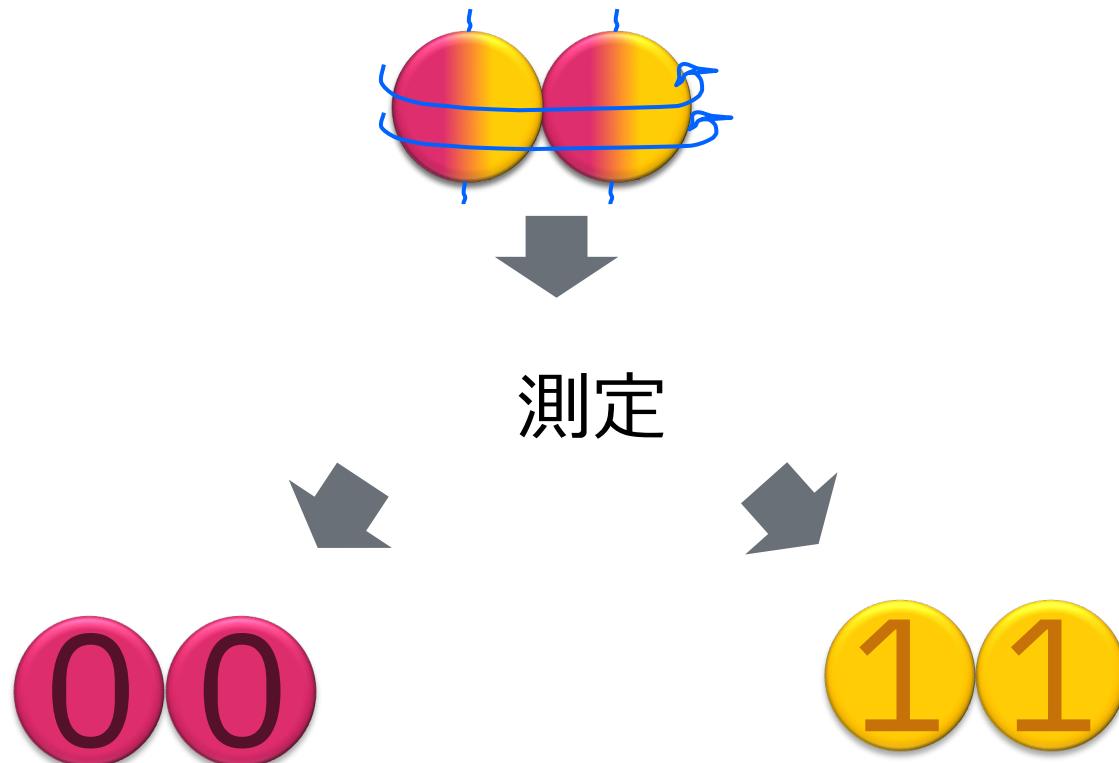
ベル状態

複数の量子ビット同士に
ある特定の強い相関関係がある

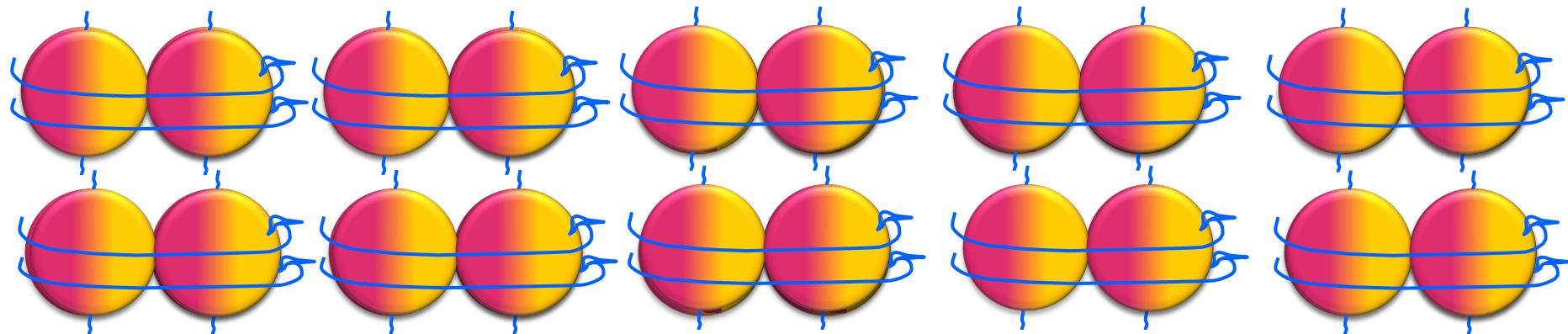
重ね合わせ状態の量子ビット



エンタングル状態の量子ビット



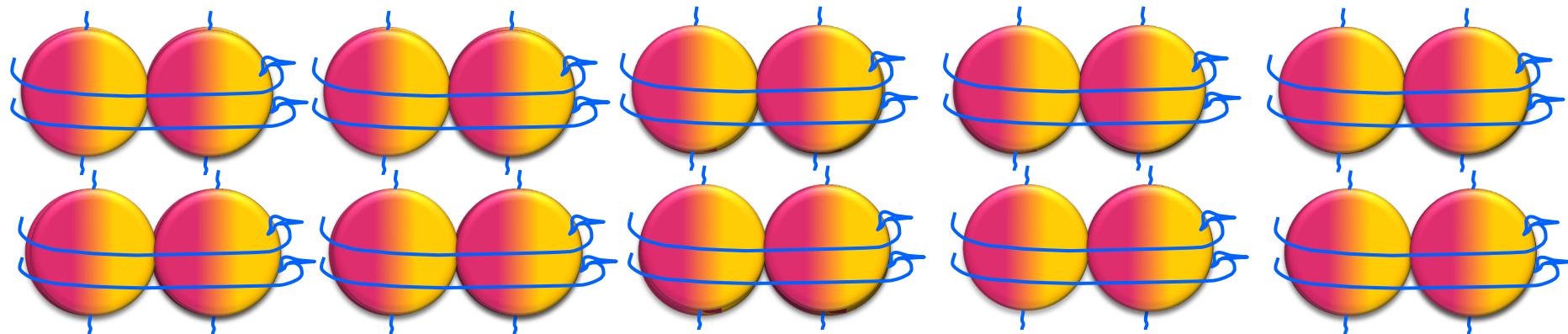
10個の同じエンタングル状態の2量子ビットを



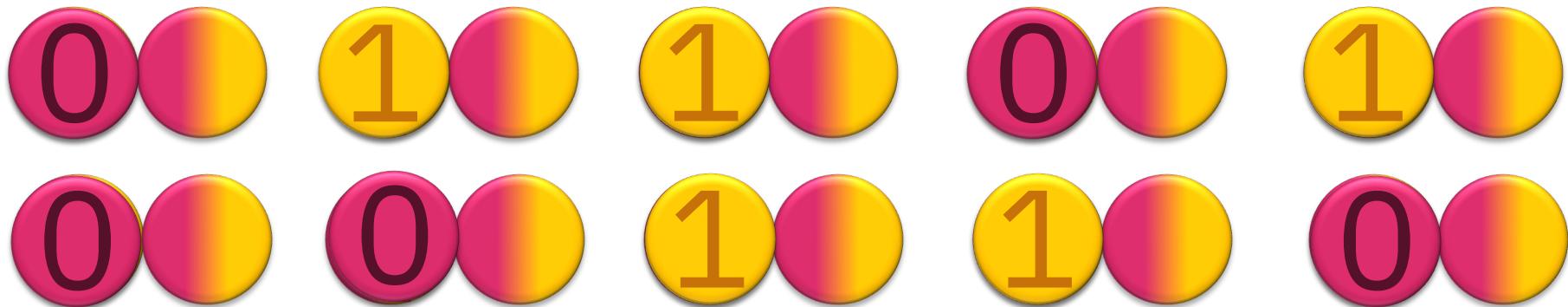
10個の同じエンタングル状態の2量子ビットを
測定すると



10個の同じエンタングル状態の2量子ビットの
片方だけを測定すると？



10個の同じエンタングル状態の2量子ビットの
片方だけを測定すると



もう片方は測定しなくても状態がわかる

このエンタングルメントも、量子計算の特徴の1つです。

量子重ね合わせ

0 0 0	0 0 1
0 1 0	0 1 1
1 0 0	1 0 1
1 1 0	1 1 1

エンタングルメント (量子もつれ)

0 0 0	+	1 1 1
-------	---	-------

量子重ね合わせ



12.5%



12.5%



12.5%



12.5%



12.5%



12.5%



12.5%



12.5%

エンタングルメント (量子もつれ)



50%

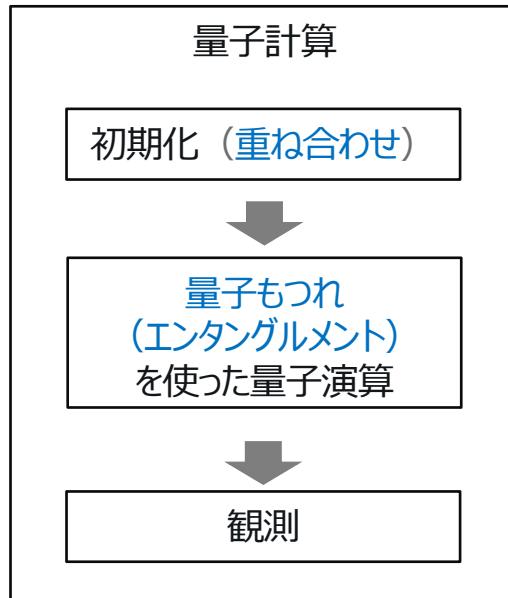
+



50%

GHZ状態

量子アルゴリズム



重ね合わせの状態では確率は全て同じ



量子ビットを干渉させる演算



特定のパターンの
確率のみを高める



量子計算では、量子状態の重ね合わせ（並列計算）を干渉（量子もつれ・エンタングルメント）させてほしい解を取り出す。

現在の量子コンピューターはまだノイズ
の影響を受けやすい

Noisy Intermediate-Scale Quantum Computer
ノイズのある小中規模の量子コンピューター



Fault-tolerant Universal Quantum Computer
エラー耐性のある万能量子コンピューターへ

Development Roadmap

IBM Quantum

	2016–2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2033+		
Data Scientist	Run quantum circuits on the IBM Quantum Platform	Release multi-dimensional roadmap publicly with initial aim focused on scaling	Enhancing quantum execution speed by 100x with Qiskit Runtime	Bring dynamic circuits to unlock more computations	Enhancing quantum execution speed by 5x with quantum serverless and Execution modes	Improving quantum circuit quality and speed to allow 5K gates with parametric circuits	Enhancing quantum execution speed and parallelization with partitioning and quantum modularity	Improving quantum circuit quality to allow 7.5K gates	Improving quantum circuit quality to allow 10K gates	Improving quantum circuit quality to allow 15K gates	Improving quantum circuit quality to allow 100M gates	Beyond 2033, quantum-centric supercomputers will include 1000's of logical qubits unlocking the full power of quantum computing		
Researchers						Platform	Code assistant	Functions	Mapping Collection	Specific Libraries		General purpose QC libraries		
Quantum Physicist	IBM Quantum Experience				Qiskit Runtime	Quantum Serverless	Transpiler Service	Resource Management	Circuit Knitting x P	Intelligent Orchestration		Circuit libraries		
	Early	Canary 5 qubits Albatross 16 qubits Penguin 20 qubits Prototype 53 qubits	Falcon Benchmarking 27 qubits	QASM3	Dynamic circuits	Execution Modes	Heron (5K) Error Mitigation 5k gates 133 qubits Classical modular 133x3 = 399 qubits	Flamingo (5K) Error Mitigation 5k gates 156 qubits Quantum modular 156x7 = 1092 qubits	Flamingo (7.5K) Error Mitigation 7.5k gates 156 qubits Quantum modular 156x7 = 1092 qubits	Flamingo (10K) Error Mitigation 10k gates 156 qubits Quantum modular 156x7 = 1092 qubits	Flamingo (15K) Error Mitigation 15k gates 156 qubits Quantum modular 156x7 = 1092 qubits	Starling (100M) Error correction 100M gates 200 qubits	Starling (100M) Error correction 100M gates 200 qubits	Blue Jay (1B) Error correction 1B gates 2000 qubits

Innovation Roadmap

Software Innovation	IBM Quantum Experience	Qiskit Circuit and operator API with compilation to multiple targets	Application modules Modules for domain specific application and algorithm workflows	Qiskit Runtime Performance and abstract through Primitives	Serverless Demonstrate concepts of quantum centric-supercomputing	AI enhanced quantum Prototype demonstrations of AI enhanced circuit transpilation	Resource management System partitioning to enable parallel execution	Scalable circuit knitting Circuit partitioning with classical reconstruction at HPC scale	Error correction decoder Demonstration of a quantum system with real-time error correction decoder			
Hardware Innovation	Early Canary 5 qubits Albatross 16 qubits	Falcon Penguin 20 qubits Prototype 53 qubits	Hummingbird Demonstrate scaling with I/O routing with Bump bonds	Eagle Demonstrate scaling with MLW and TSV	Osprey Enabling scaling with high density signal delivery	Condor Single system scaling and fridge capacity	Flamingo Demonstrate scaling with modular connectors	Kookaburra Demonstrate scaling with nonlocal c-coupler	Cockatoo Demonstrate path to improved quality with logical memory	Starling Demonstrate path to improved quality with logical communication		

Executed by IBM

On target



IBM Quantum

2023 ✓

2024

2025

2026

2027

2028

2029

2033+

Enhancing quantum execution speed by 5x with quantum serverless and Execution modes

Improving quantum circuit quality and speed to allow 5K gates with parametric circuits

Enhancing quantum execution speed and parallelization with partitioning and quantum modularity

Improving quantum circuit quality to allow 7.5K gates

Improving quantum circuit quality to allow 10K gates

Improving quantum circuit quality to allow 15K gates

Improving quantum circuit quality to allow 100M gates

Beyond 2033, quantum-centric supercomputers will include 1000's of logical qubits unlocking the full power of quantum computing

Platform

Code assistant



Functions

Mapping Collection

Specific Libraries

General purpose QC libraries

Middleware

Quantum Serverless

Transpiler Service



Resource Management

Circuit Knitting x P

Intelligent Orchestration

Circuit libraries

Execution Modes

Heron (5K)



Flamingo (5K)

Error Mitigation

5k gates
133 qubitsClassical modular
 $133 \times 3 = 399$ qubits

Error Mitigation

5k gates
156 qubitsQuantum modular
 $156 \times 7 = 1092$ qubits

Flamingo (7.5K)

Error Mitigation

7.5k gates
156 qubitsQuantum modular
 $156 \times 7 = 1092$ qubits

Flamingo (10K)

Error Mitigation

10k gates
156 qubitsQuantum modular
 $156 \times 7 = 1092$ qubits

Flamingo (15K)

Error Mitigation

15k gates
156 qubitsQuantum modular
 $156 \times 7 = 1092$ qubits

Starling (100M)

Error correction

100M gates
200 qubitsError corrected modularity
 $156 \times 7 = 1092$ qubits

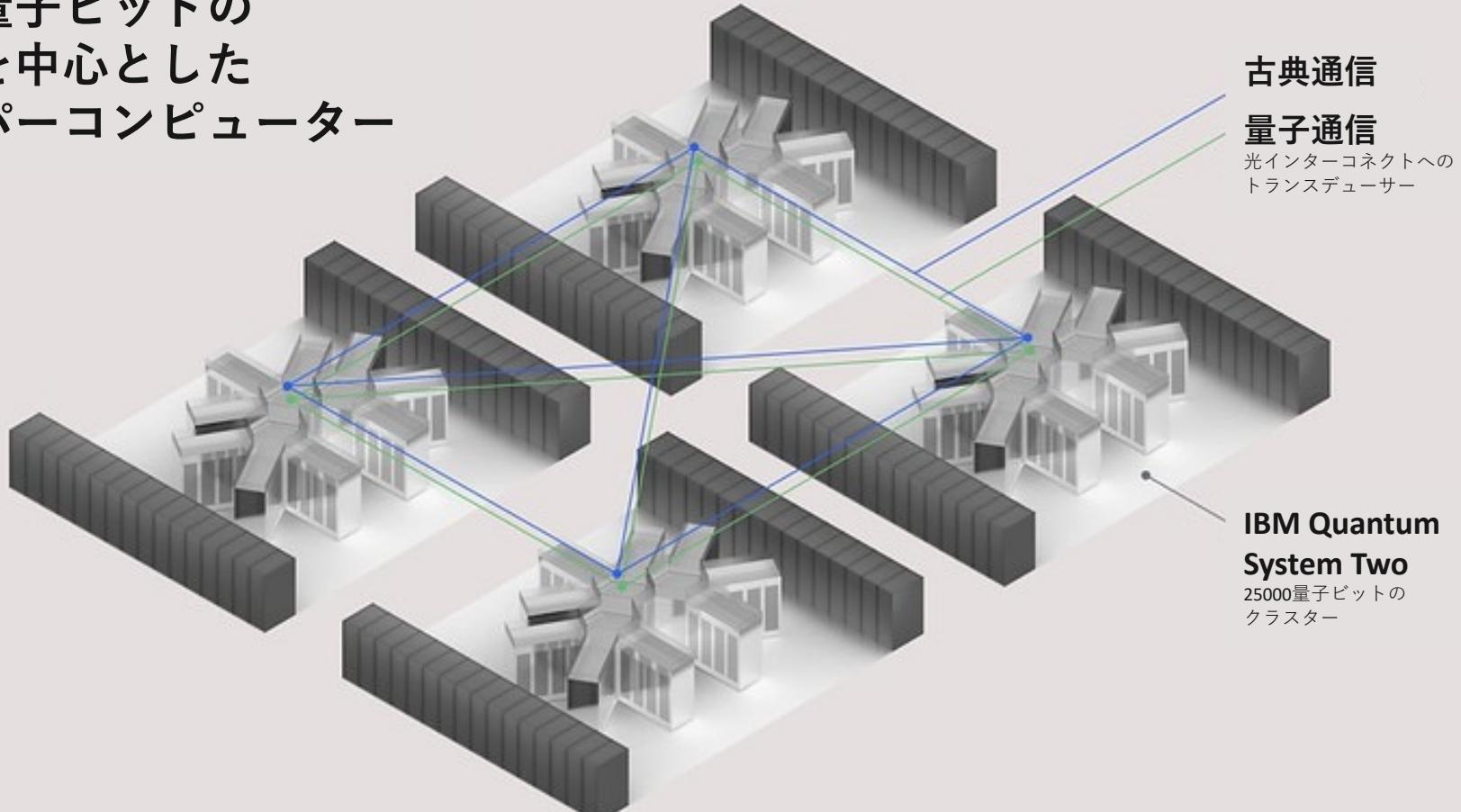
Blue Jay (1B)

Error correction

1B gates
2000 qubitsError corrected modularity
 $156 \times 7 = 1092$ qubits

10万量子ビットの 量子を中心とした スーパーコンピューター

2033



IBM Quantum

理研、IBMの次世代量子システムをスーパーコンピュータ「富岳」に連携

IBM

IBM Newsroom

ニュースリリース

お知らせ

日本IBM社長略歴

リーダーシップ

グローバル・リーダーシップ

グローバル・ニュースルーム

理研、IBMの次世代量子システムをスーパーコンピュータ「富岳」に連携

理研および共同研究者は、*IBM Quantum System Two*をオンプレミスで利用可能に

量子を中心としたスーパーコンピューティング向けのアプリケーション開発を加速させることを目的とした、「富岳」と同じ建物に設置される唯一の量子システム

*IBM Quantum System Two*が米国以外で初めて稼働予定

2024年04月30日

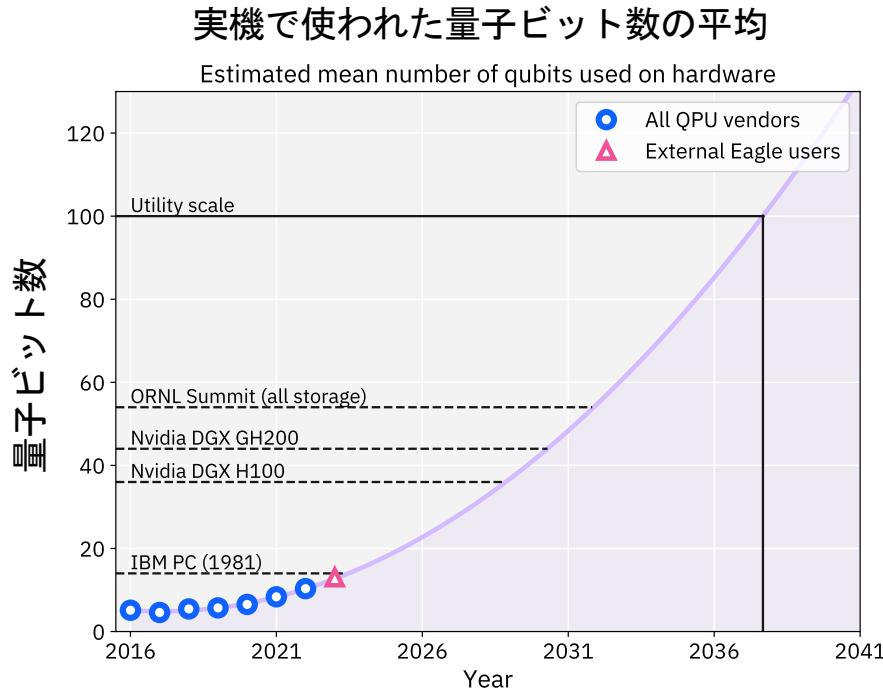


世界をリードして、
量子コンピューターと
スパコンを連携するための
システムソフトウェアや
プラットフォームを構築し、
有効性を実証する予定。

これまで行われた量子コンピューターの実機実験は 20量子ビット以下ばかりでした

量子ビット数は確実に増えていますが、
実際に行われた計算は、
ノートパソコンでできる古典計算と同じ
レベルであったということです。

(*) 20量子ビットであれば、古典コンピューター
で量子計算のシミュレーションが可能です。



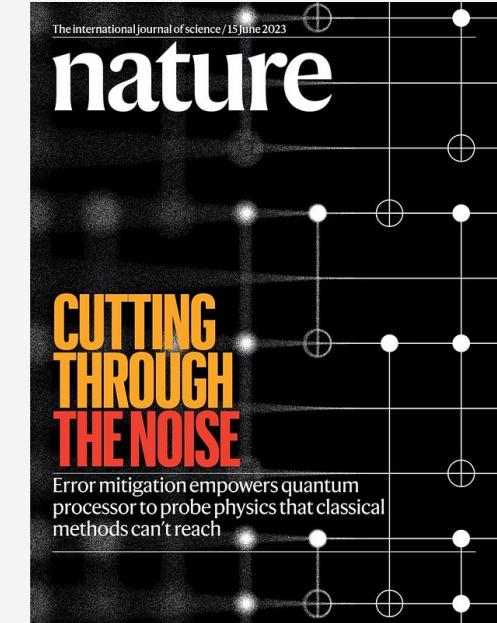
Data for all vendors taken from: arXiv:2307.16130

「エラー耐性前の 量子コンピューティングの有用性の 証拠」

エラー制御・エラー緩和の技術を使って、
ノイズのある127量子ビットの量子コンピューター
で物理現象の期待値を計算。

古典計算の能力を超えた実用規模(Utility scale)の
領域へ進化。

<https://www.nature.com/articles/s41586-023-06096-3>



まとめ

量子コンピューターは

- 量子力学の性質（重ね合わせ、もつれ）を使った新しい計算技術。
- 従来のコンピューターよりも速いのではなく、異なる原理(量子力学の原理)を活用して、効率良く解を導きだす。
- 黎明期(れいめいき)のテクノロジーであり、実用化に向けて今後、量子システムの性能を全体的に高めていくことが必要。
- 創薬、新しい材料の開発、最適化問題、そしてAIなどへの応用も期待。

皆さんは量子ネイティブ世代！量子コンピューターは面白いです。

ぜひ量子コンピューターの世界に飛び込んでみて、世界に羽ばたいてください！



