

# 量子コンピュータの 仕組みと開発動向



藤井 啓祐

大阪大学 基礎工学研究科 教授

大阪大学 量子情報・量子生命研究センター 副センター長



QIQB

大阪大学 世界最先端研究機構  
量子情報・量子生命研究センター



# 自己紹介

## 藤井 啓祐 大阪大学 名誉教授

大阪大学大学院基礎工学研究科、教授（2019-現在）

大阪大学 量子情報・量子生命研究センター 副センター長（2020-現在）

理化学研究所 量子コンピュータ研究センター チームリーダー（2020-現在）

プロジェクト：文科省Q-LEAP 量子AI flagship 代表、JST COI-NEXT量子ソフトウェア拠点課題リーダー、内閣府Moonshot 課題推進者

受賞：京都大学総長賞(2011)、大阪大学賞(2020)、NISTEP2020(2020)、日本学術振興会賞(2022)

量子コンピュータ  
が大好きっ！

### 人材育成

未踏ターゲット事業ゲート式量子コンピュータ部門  
プロジェクトマネージャー



### 産学連携

株式会社 QunaSys創業メンバー  
最高技術顧問



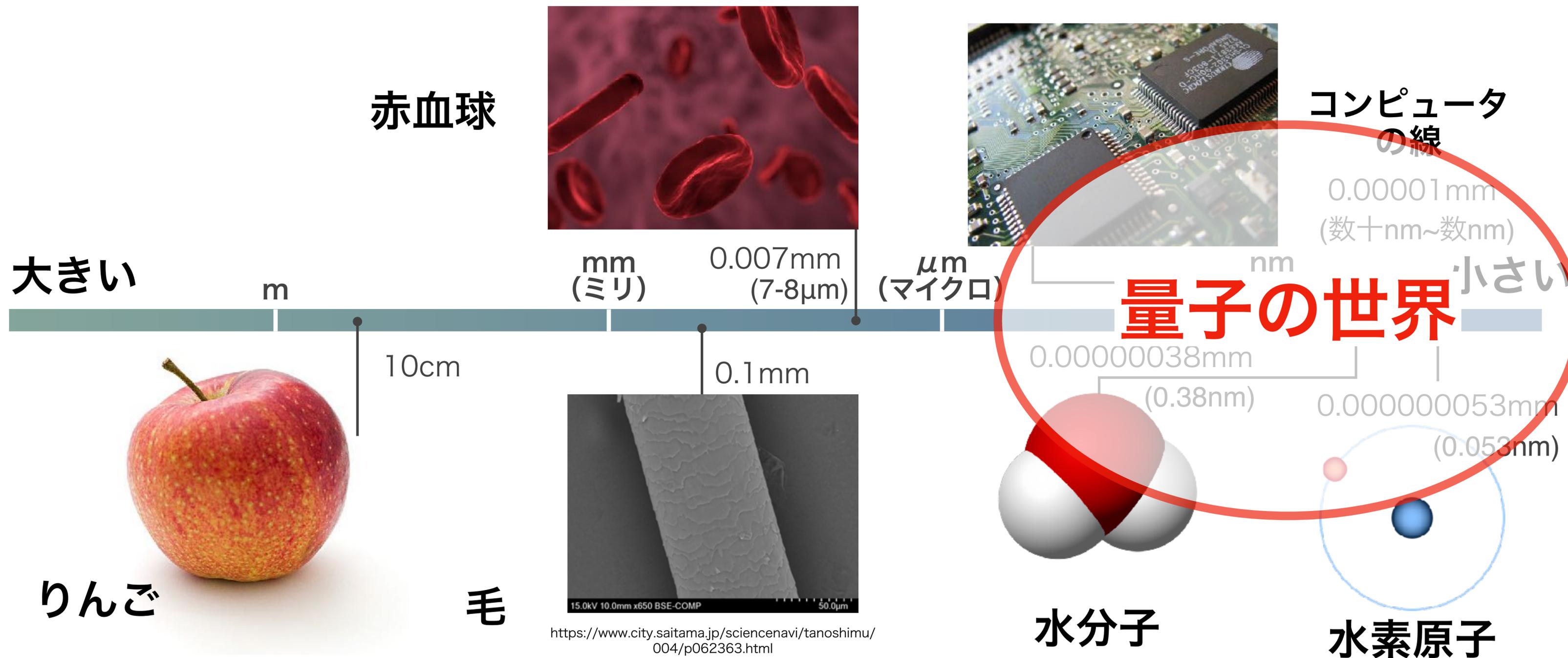


# はじめに、量子技術とは



# ミクロな世界を支配する量子力学

ミクロな世界を記述するもっとも基本的な物理法則



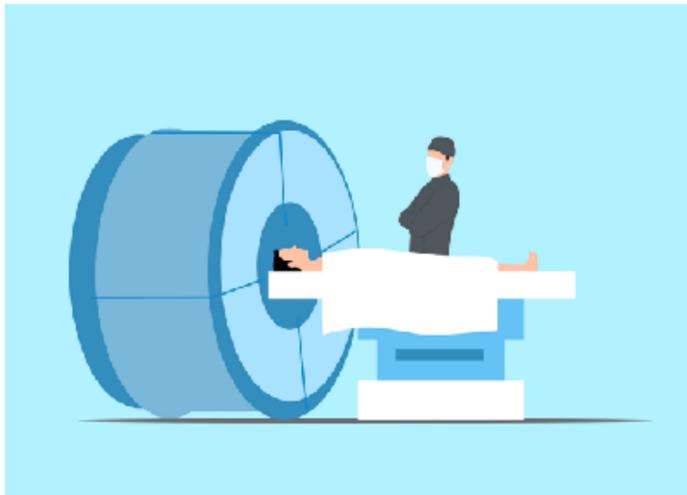
# 量子力学

## ミクロな世界を記述するもっとも基本的な物理法則

- 1900年代に入って構築された、原子・電子・分子などのミクロな世界を記述する基本的な物理の枠組み（量子技術0.0）
- 現代のテクノロジーの基礎

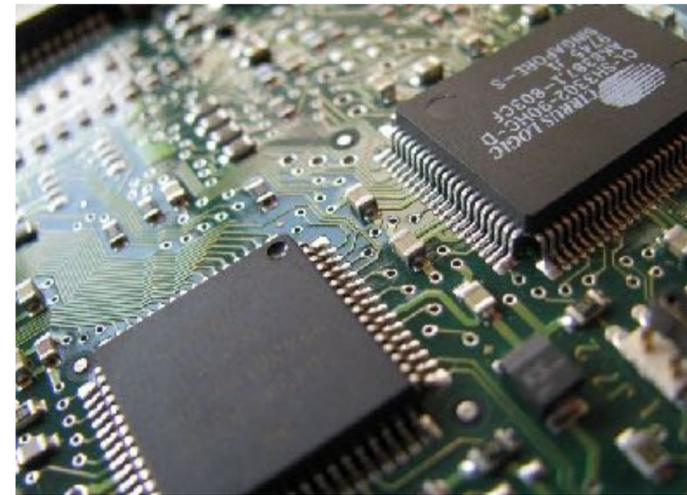
## 量子技術1.0

### MRI (NMR 核磁気共鳴)



核スピン(微小な磁石)の  
量子的なふるまい

### 半導体



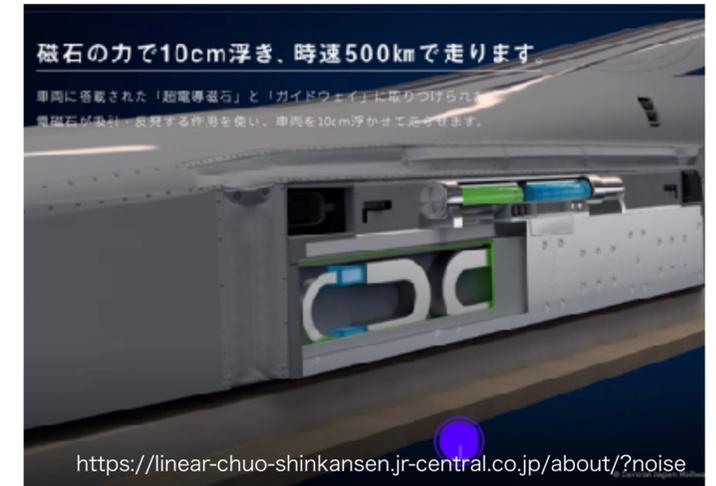
固体中の電子の量子的なふるまい

### レーザー



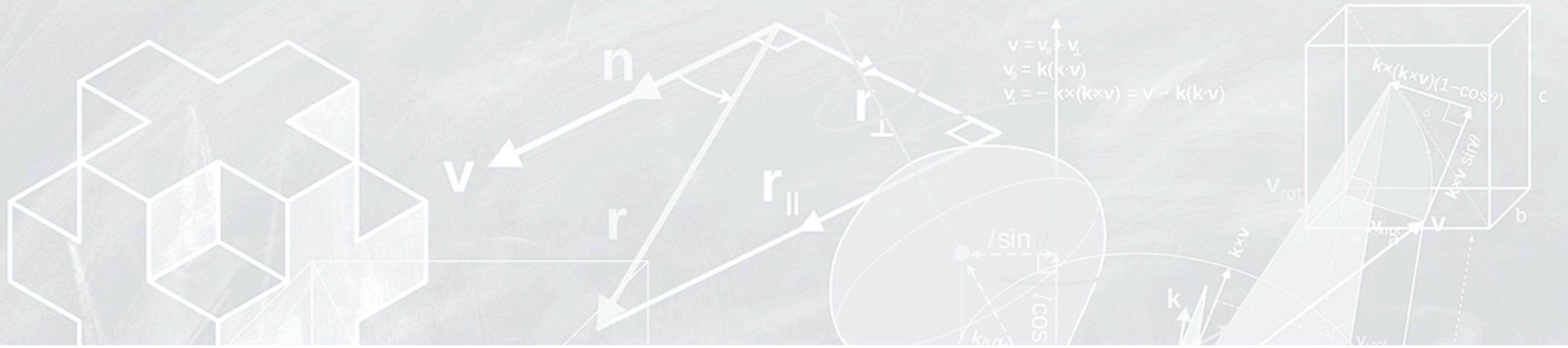
光の量子性

### 超電導



量子力学はエレクトロニクスの縁の下の力持ち





# 量子コンピュータ

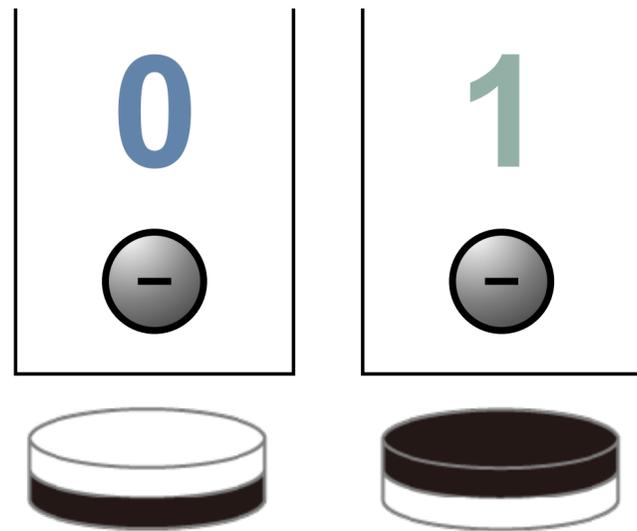


# 量子ビット

## 量子の世界の情報の最小単位

古典ビット

↑ 0 or 1 ↓  $x \in \{0, 1\}$



量子ビット

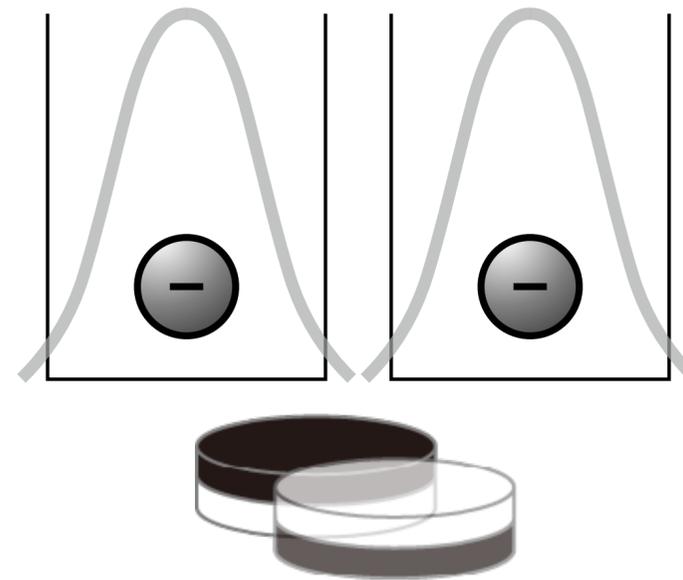


$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

0と1の重ね合わせ状態

複素ベクトル空間

$$|\psi\rangle = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$$



0か1かはまだ決定していない

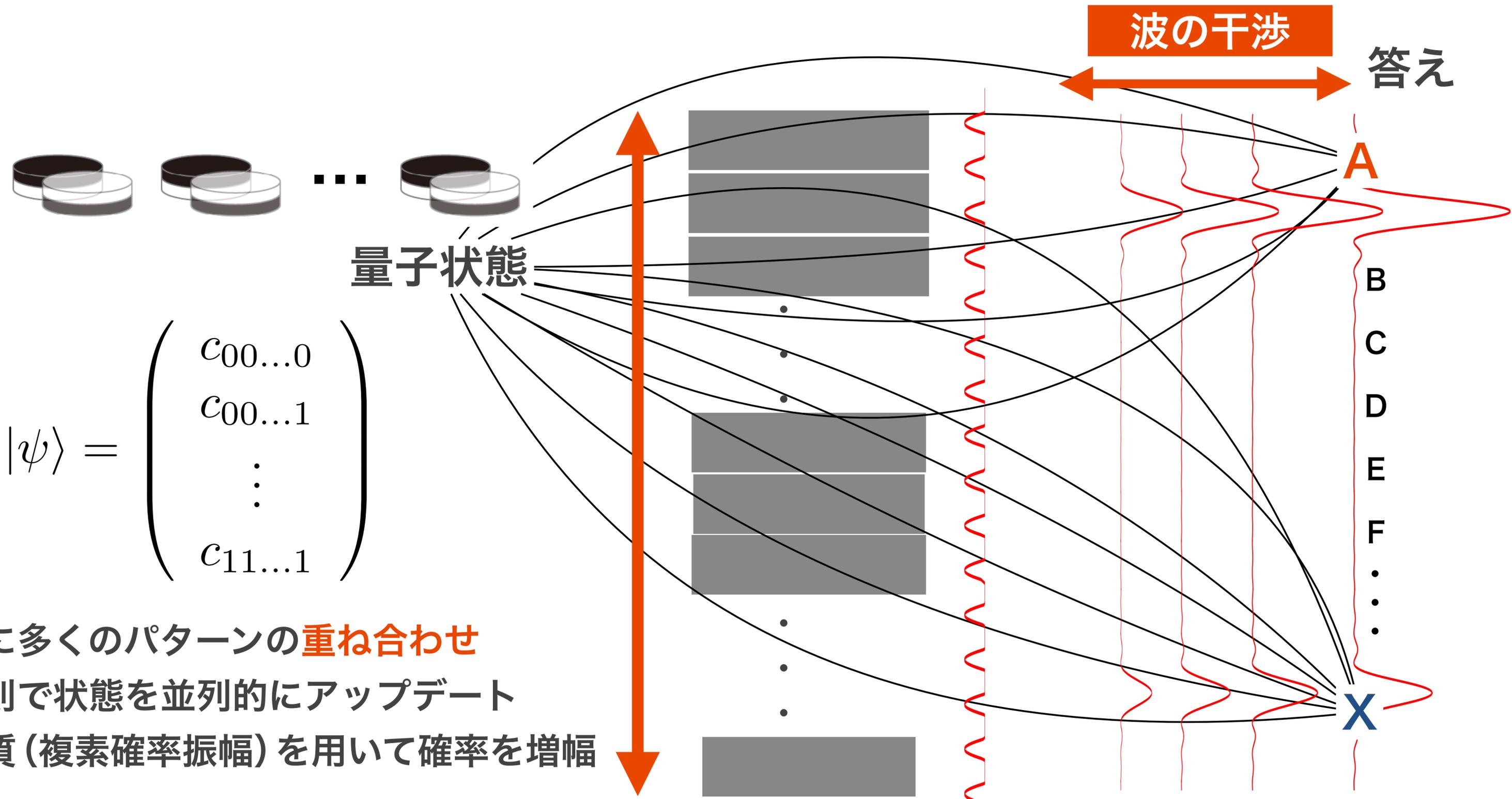
測定 0 or 1 ?

$$p_0 = |\alpha|^2$$

$$p_1 = |\beta|^2$$

絶対値の2乗が確率

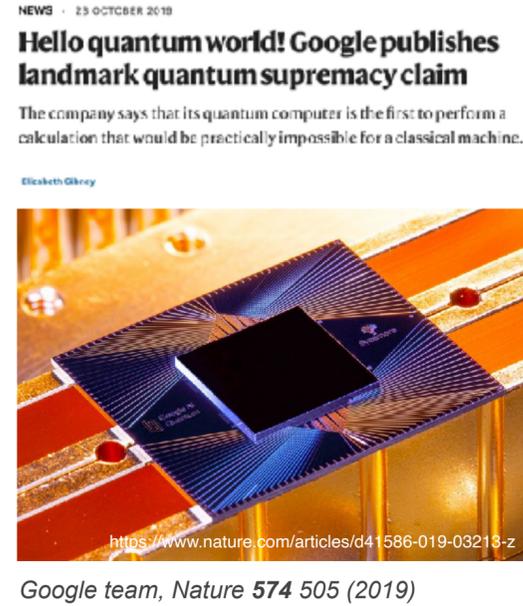
# 量子コンピュータ:確率を操作できるコンピュータ



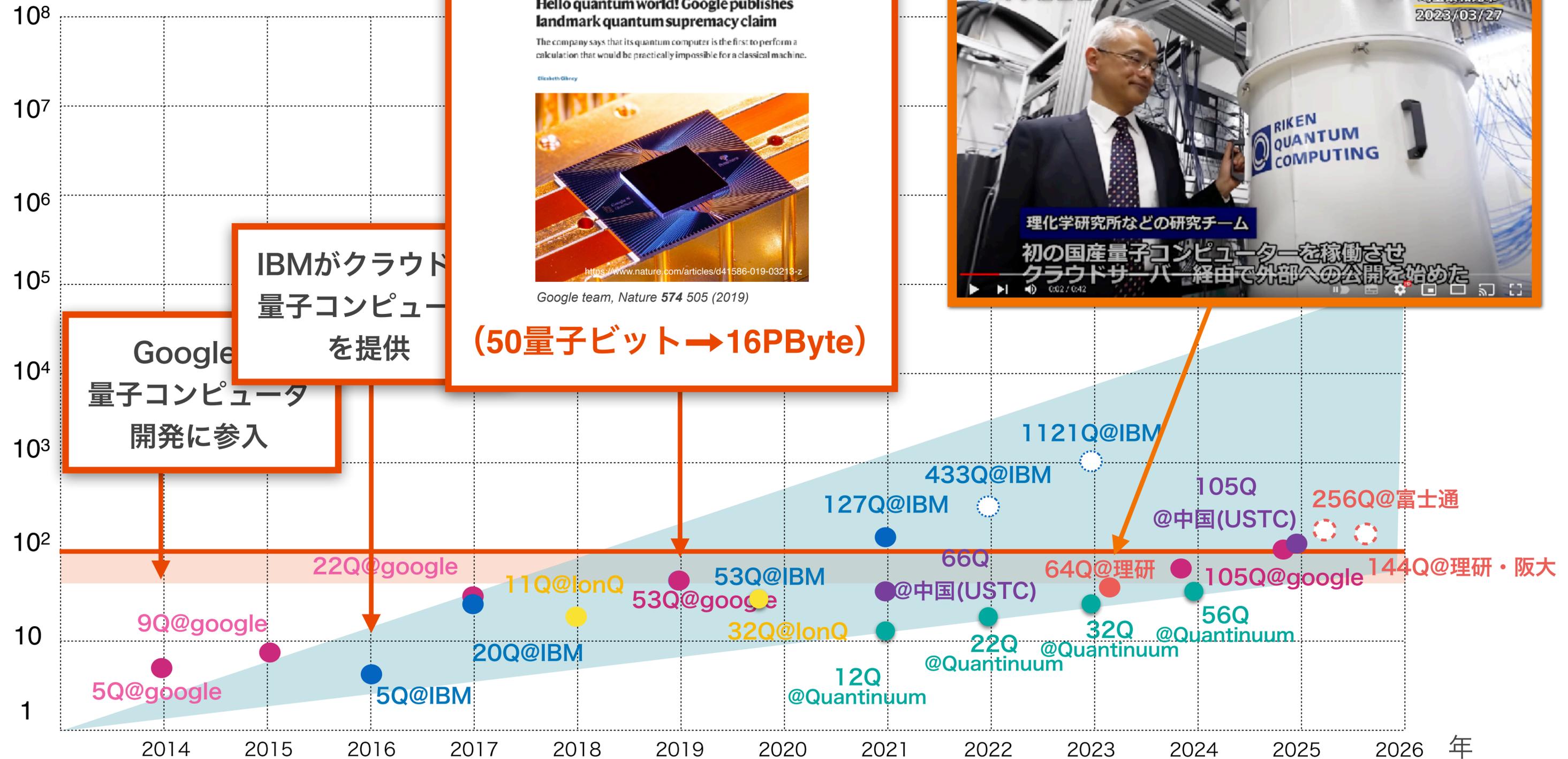
- 指数的に多くのパターンの重ね合わせ
- 物理法則で状態を並列的にアップデート
- 波の性質 (複素確率振幅) を用いて確率を増幅

# 量子コンピュータの進化

## 量子超越

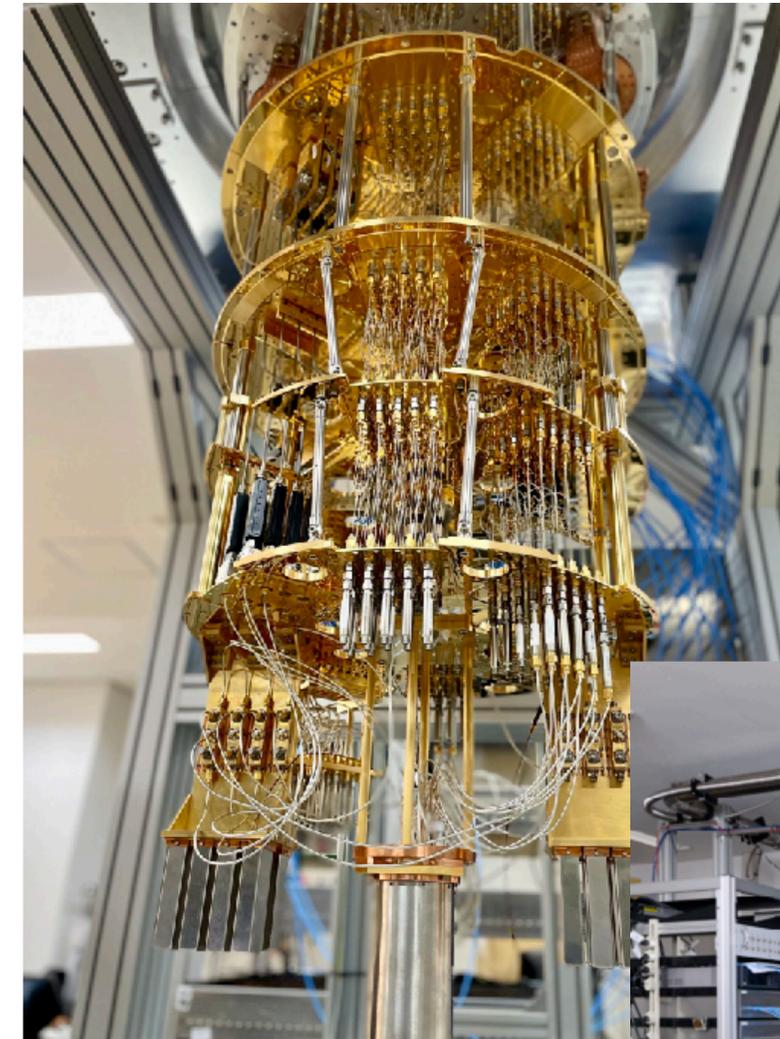


量子ビット数



# 超伝導量子コンピュータ@大阪大学

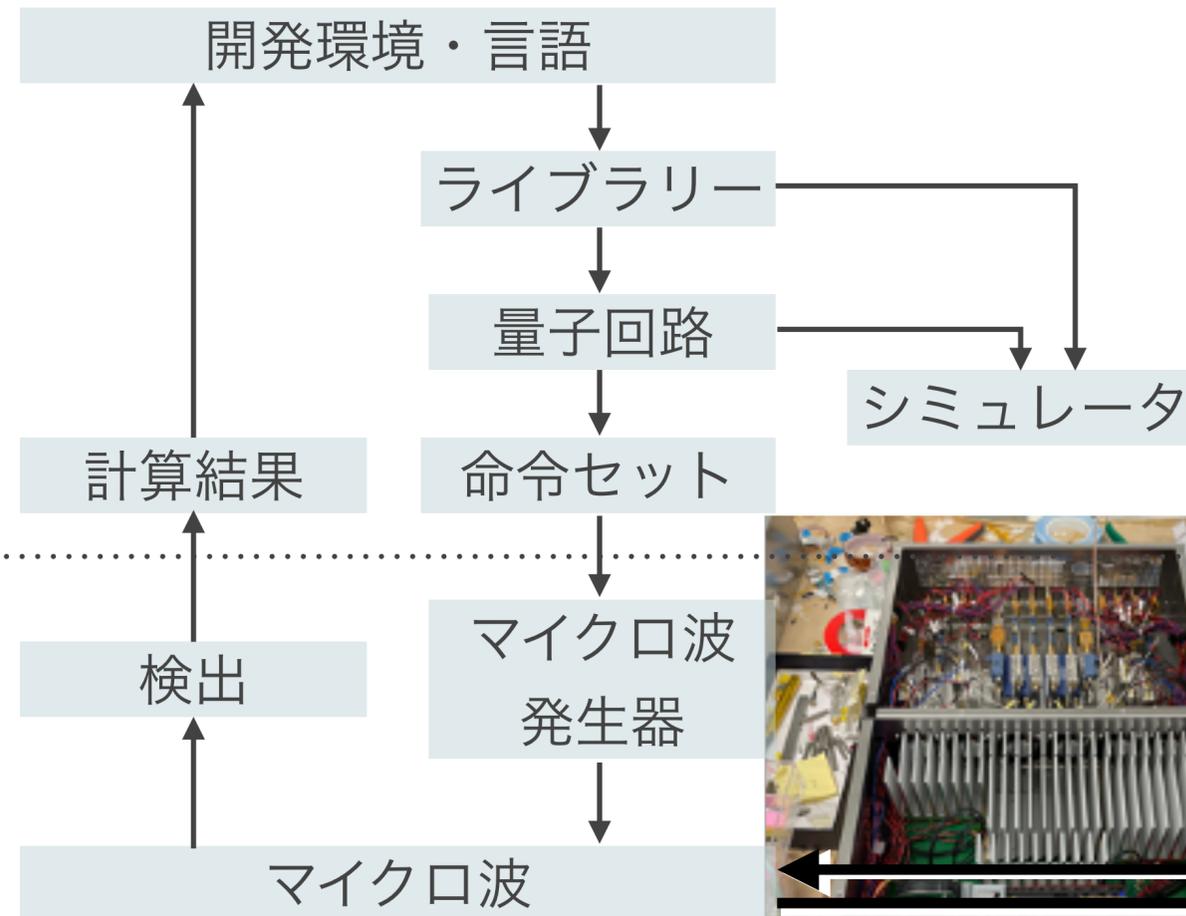
希釈冷凍機内部@阪大



量子コンピュータ@阪大 11



制御装置

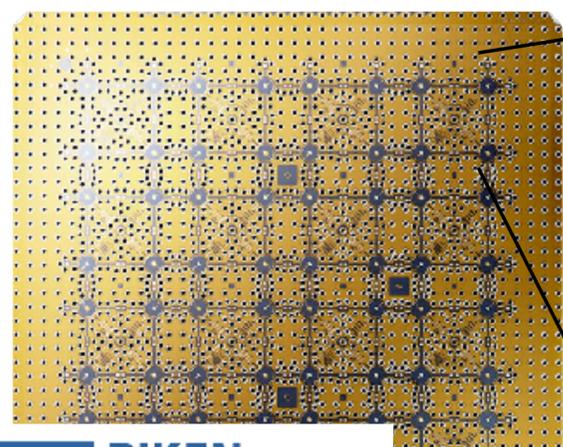


プログラマー



クラウドからアクセス

実験家



超伝導量子コンピュータチップ





じゅんこくさん

りょうし

# 純国産の量子コンピュータ

そうやく しんそざいかいはつ

創薬・新素材開発などで期待

きたい



創薬・新素材開発などで期待

# 純国産の量子コンピュータ

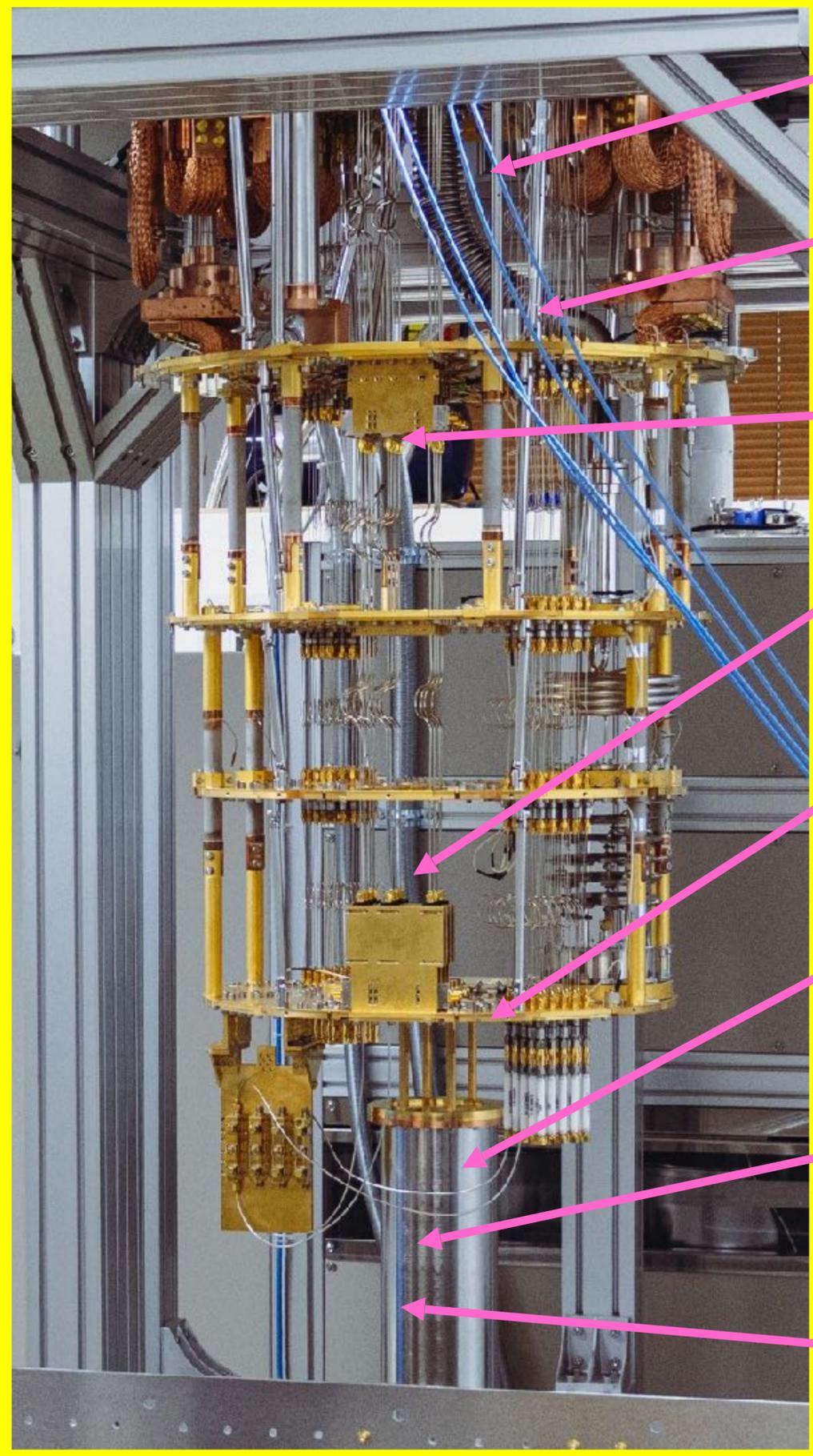
# 純国産量子コンピュータ

ソフトウェア(後述) 阪大、QunaSys、富士通、SEC、TIS、キューエル、e-trees

希釈冷凍機  
アルバック

低雑音電源  
NF回路

制御装置  
キューエル



室温ケーブル  
東京特殊電線

低温ケーブル  
コアックス

低雑音増幅器  
日通機

バンドパスフィルタ  
総合電子

赤外吸収体  
川島製作所

磁気シールド  
オータマ

チップパッケージ  
精研

量子ビットチップ  
理研

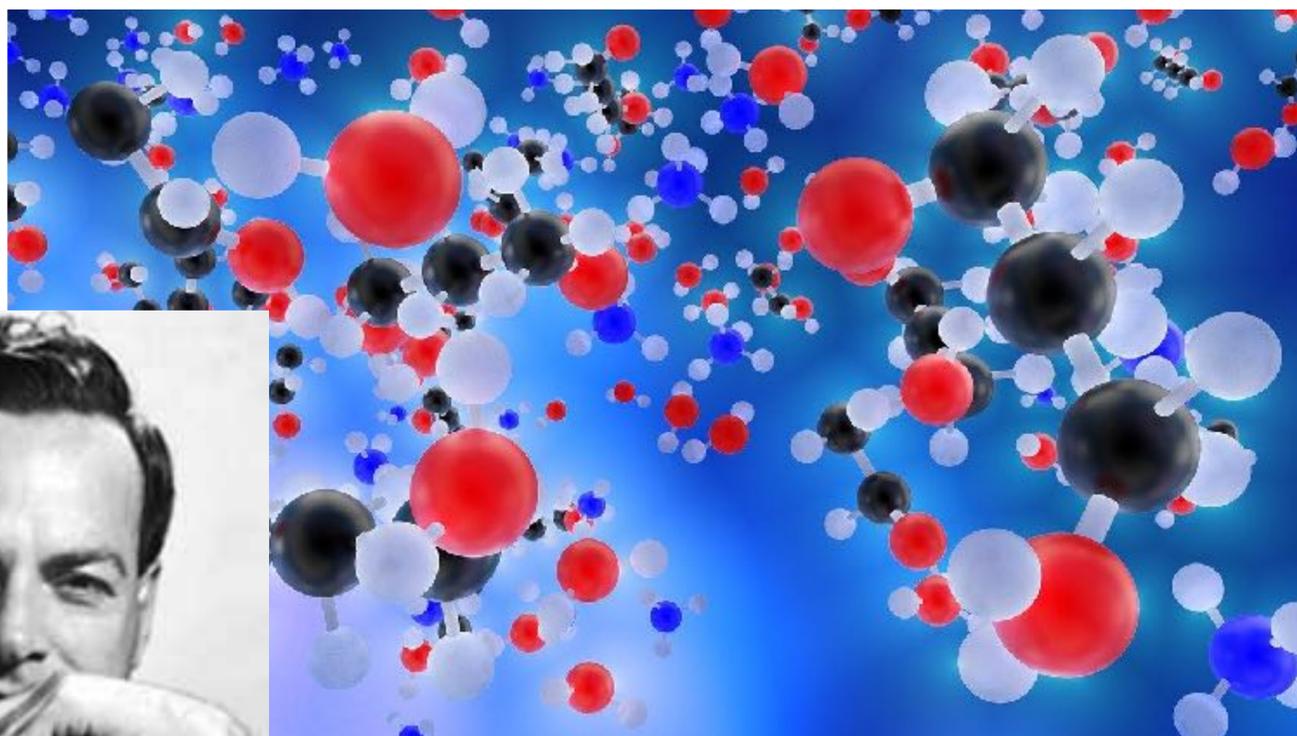


# 量子コンピュータで何ができるのか



# 量子コンピュータで何ができるのか

特定の問題に対して優位性があると期待されている



量子力学の原理で動作する  
コンピュータ



分子や材料など量子力学を必要とする計算

触媒開発、新機能材料、創薬 etc

[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1965/feynman-bio.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1965/feynman-bio.html)

*Nature isn't  
classical!*



$$A\vec{x} = \vec{b}$$

量子力学とは関係ないが、  
数理的構造が量子力学と相性がいいもの



素因数分解、機械学習(AI)、確率的な計算 etc

セキュリティ・AI・金融 etc

# 具体的な問題を解くために必要となる量子コンピュータの規模

## 素因数分解 (セキュリティーインパクト)

N bits の素因数分解  $\longrightarrow$   $O(N^3)$  Toffoli 演算  
2048bit  $\longrightarrow$   $\sim 10^{10}$  gates



エラー確率 0.1%, **20メガ量子ビット** ( $\sim 10^4$ /論理量子ビット), 8 時間

*"How to factor 2048 bit RSA integers in 8 hours using 20 million noisy qubits" Gidney-Ekera arXiv:1905.09749*

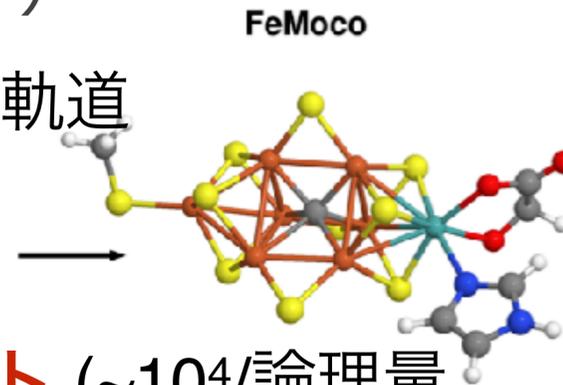
(classical : RSA-250 829bit, 2700 cores year Boudot et al 2020.2.28)

## 量子化学計算 (産業インパクト)

窒素固定触媒 FeMoco, 54電子, 54軌道

0.1-1mHa,  $\longrightarrow$   $10^{15}$  T演算

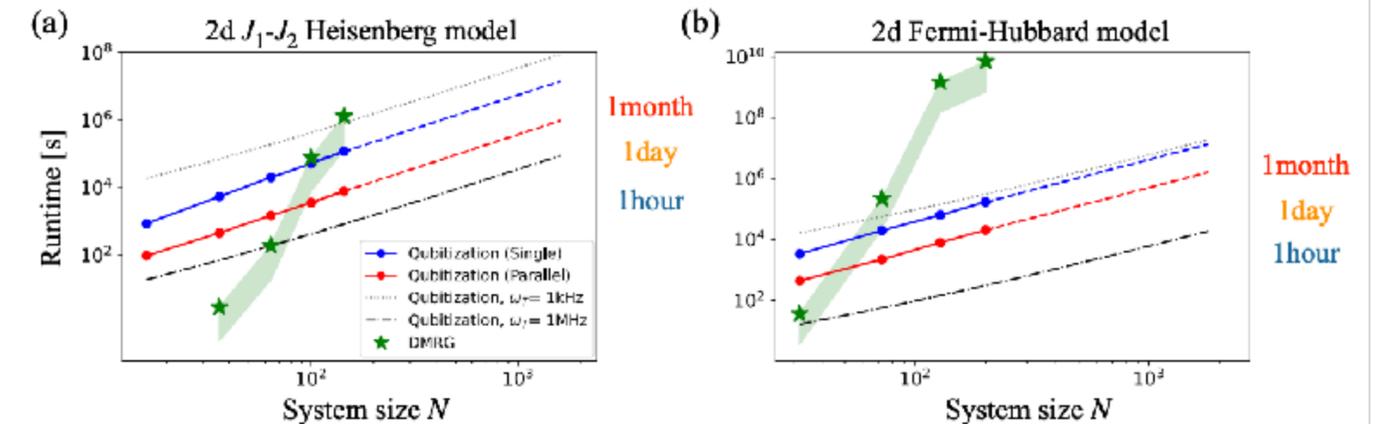
エラー確率 0.1%, **~2メガ量子ビット** ( $\sim 10^4$ /論理量子ビット), 15 日



*"Elucidating reaction mechanisms on quantum computers" Reiher et al, PNAS 2017*

## 物性物理 (学術的インパクト)

ハイゼンベルク模型、ハバード模型 (磁性体・超伝導)

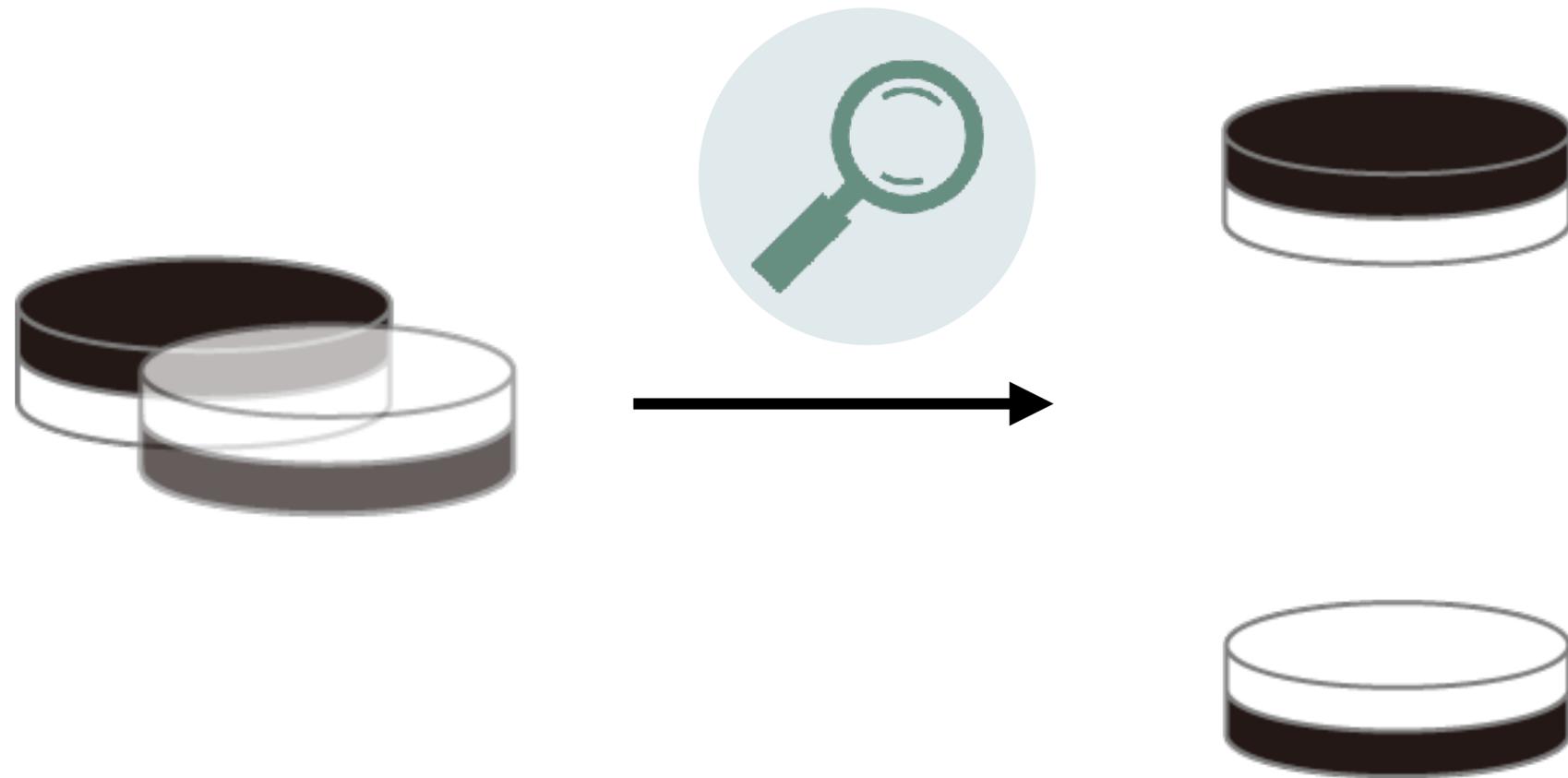


エラー確率 0.1%, **~0.5メガ量子ビット** ( $\sim 10^3$ /論理量子ビット), 15 時間

# 量子ビットはノイズに弱い

重ね合わせ=鶴の恩返し、覗くと壊れる

0と1の重ね合わせ状態



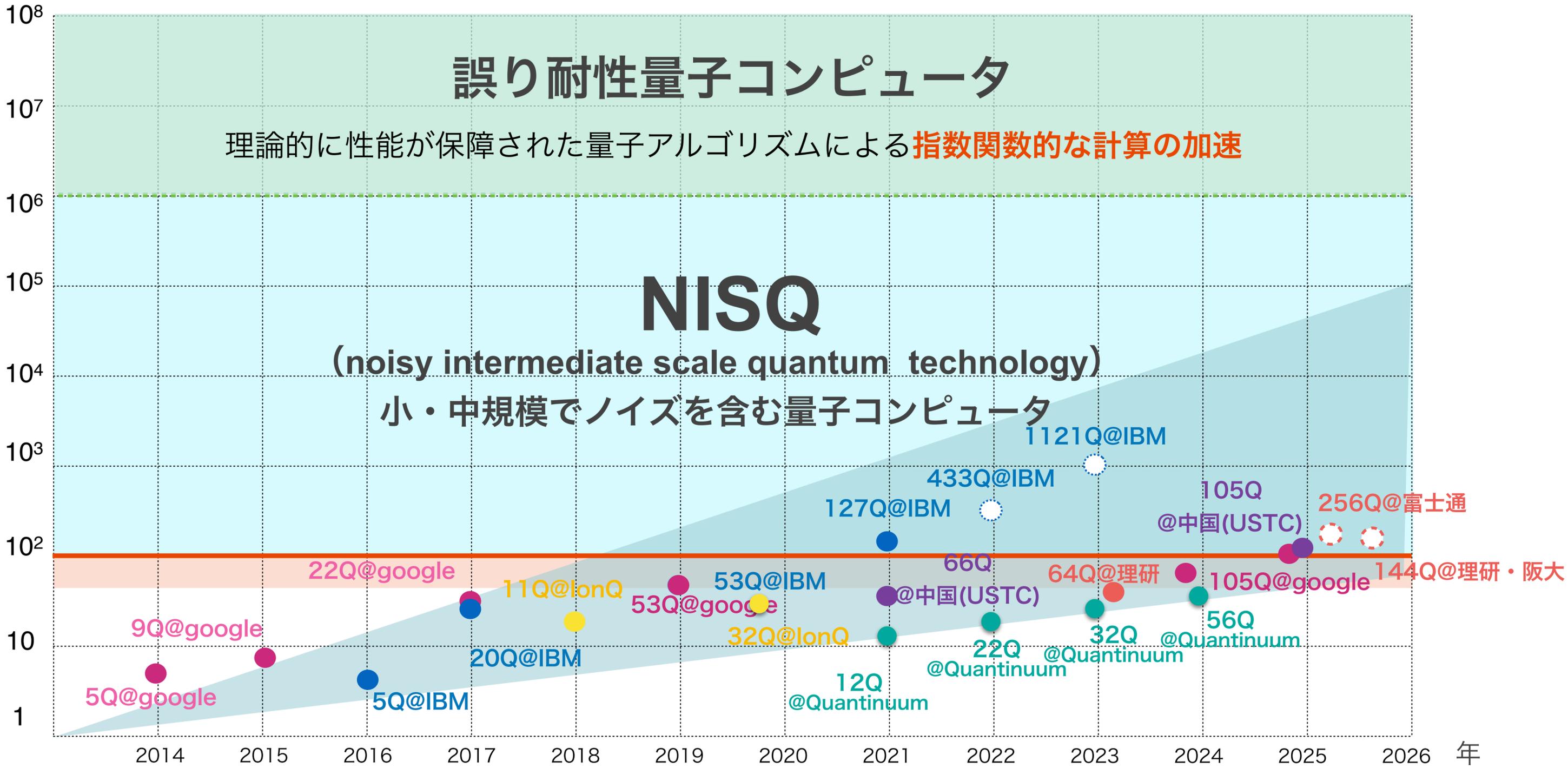
不純物や外場との相互作用  
などによって環境系が意図せず  
量子ビットを覗き込んでしまう  
→ デコヒーレンス



鶴の恩返し

# 量子コンピュータの進化

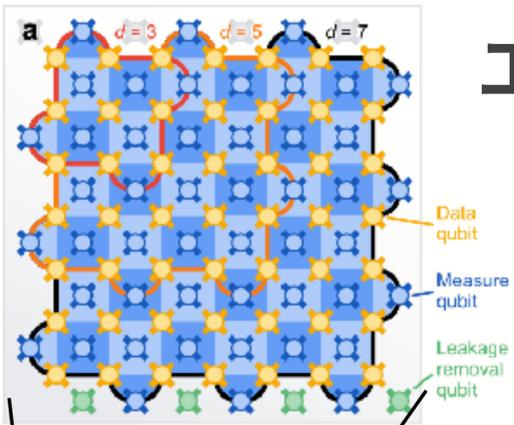
量子ビット数



# 魔法状態工場-量子コンピュータに魔法の力を授ける-

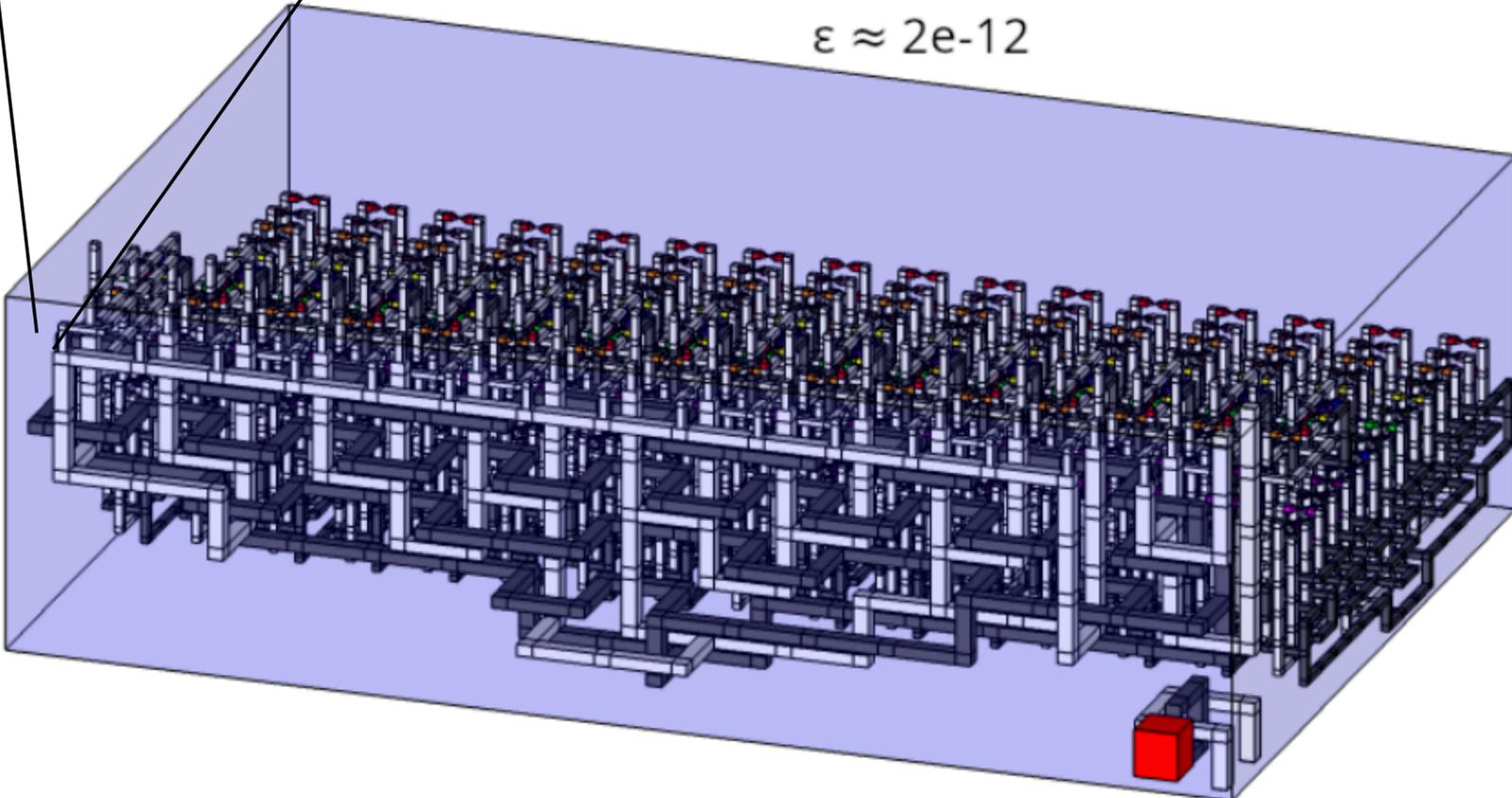
## エラー訂正符号に符号化された「論理量子ビット」

魔法状態：万能な量子計算に必須な量子ゲートのための特殊な状態

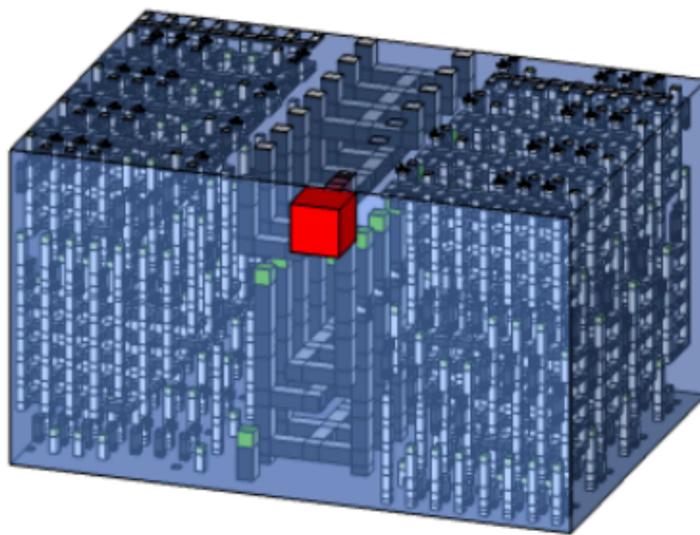


Fowler Devitt 2013

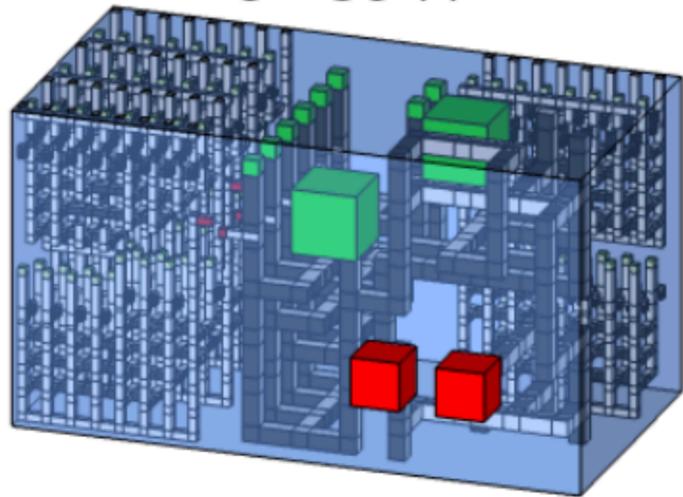
"A bridge to lower overhead quantum computation"  
 $\epsilon \approx 2e-12$



Gidney Fowler 2019  
"Efficient magic state factories with a catalyzed CCZ→2T transformation"  
 $\epsilon \approx 3e-11$



Fowler Gidney 2018  
"Low overhead quantum computation using lattice surgery"  
 $\epsilon \approx 9e-17$

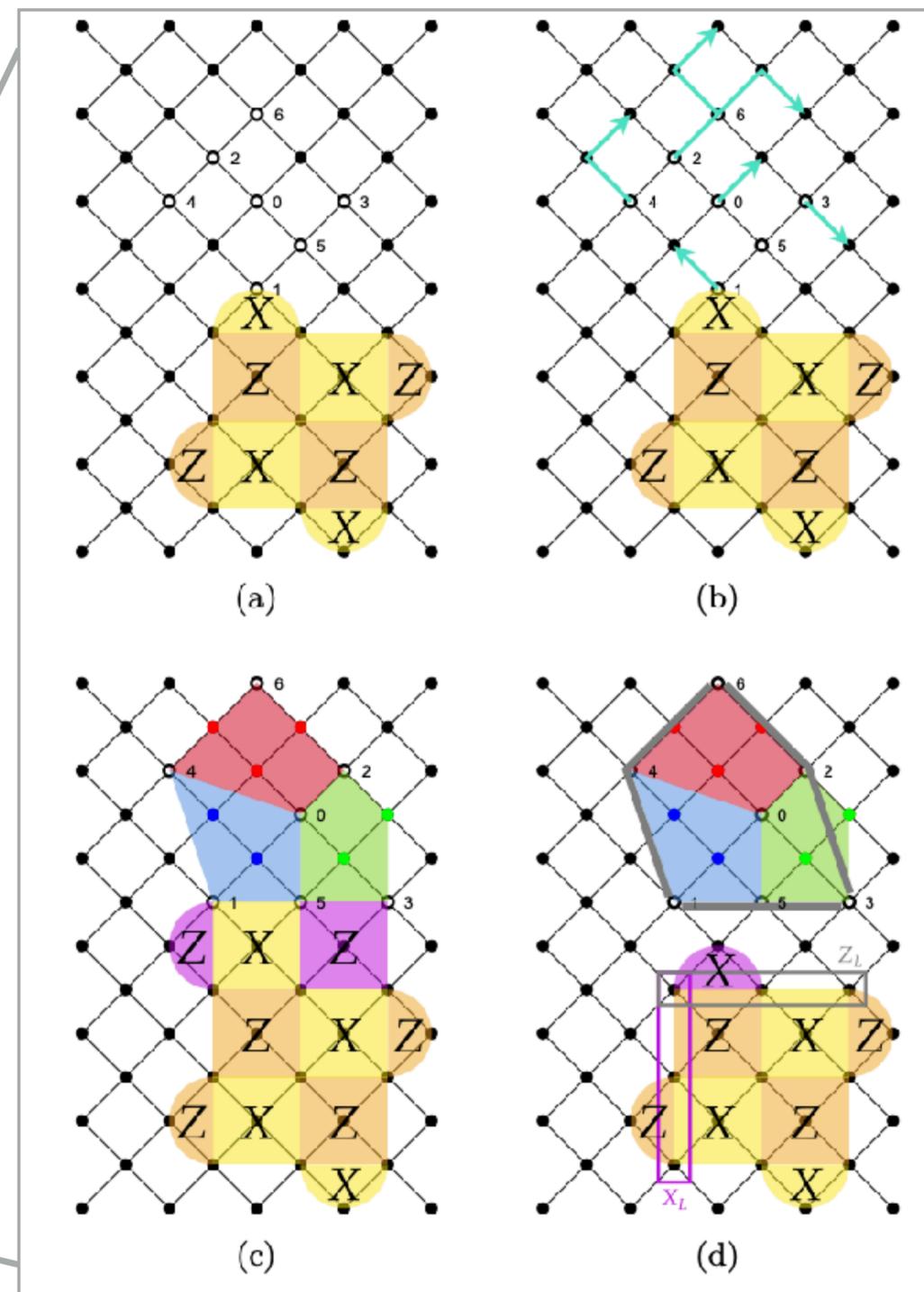
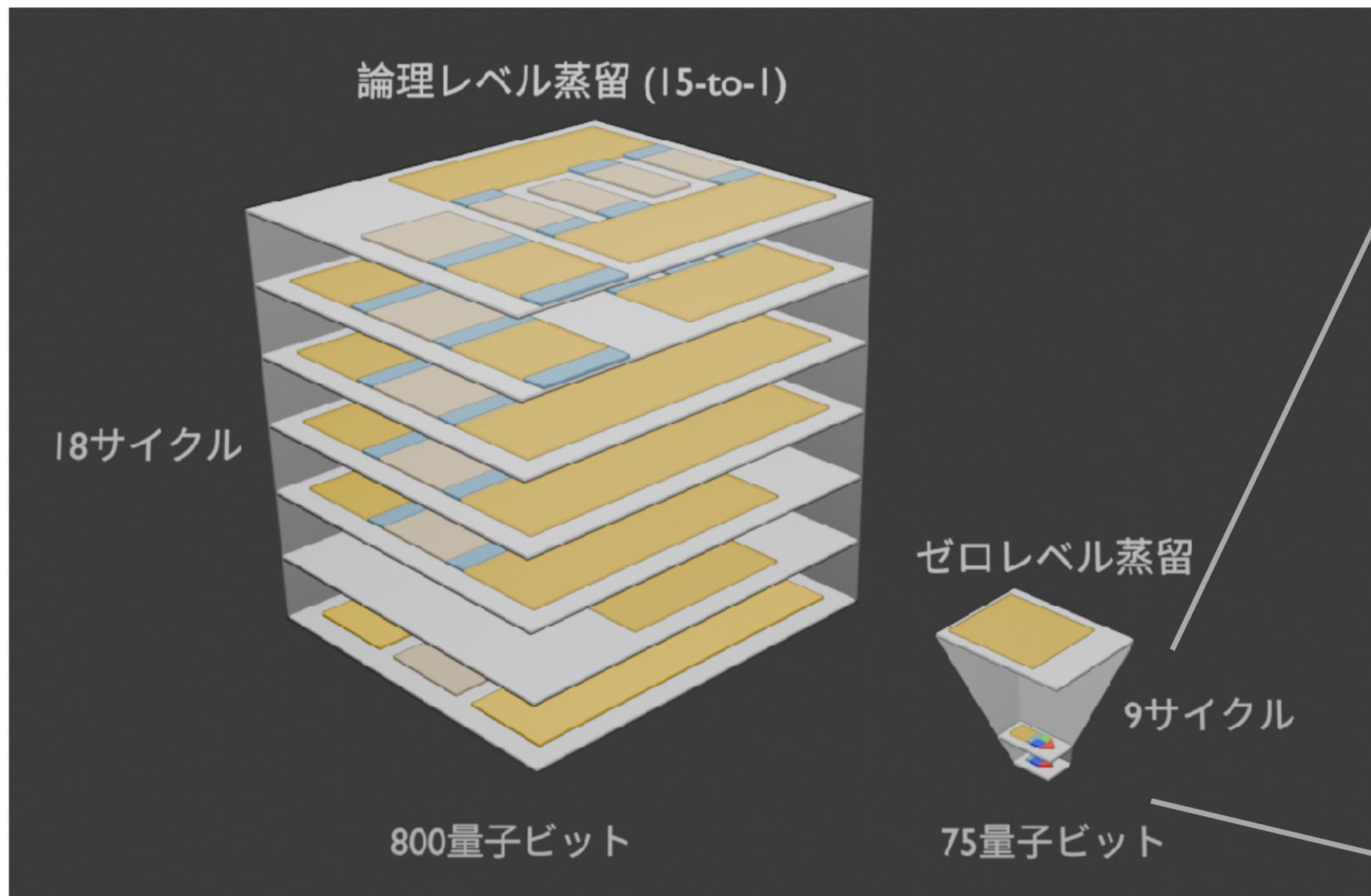


This  
 $\epsilon \approx$

# ゼロレベル魔法状態蒸留

T. Itogawa et al. "Even more efficient magic state distillation by zero-level distillation." PRX Quantum (2024)

論理量子ビットを利用しない、“ゼロレベル”魔法状態蒸留法を構築



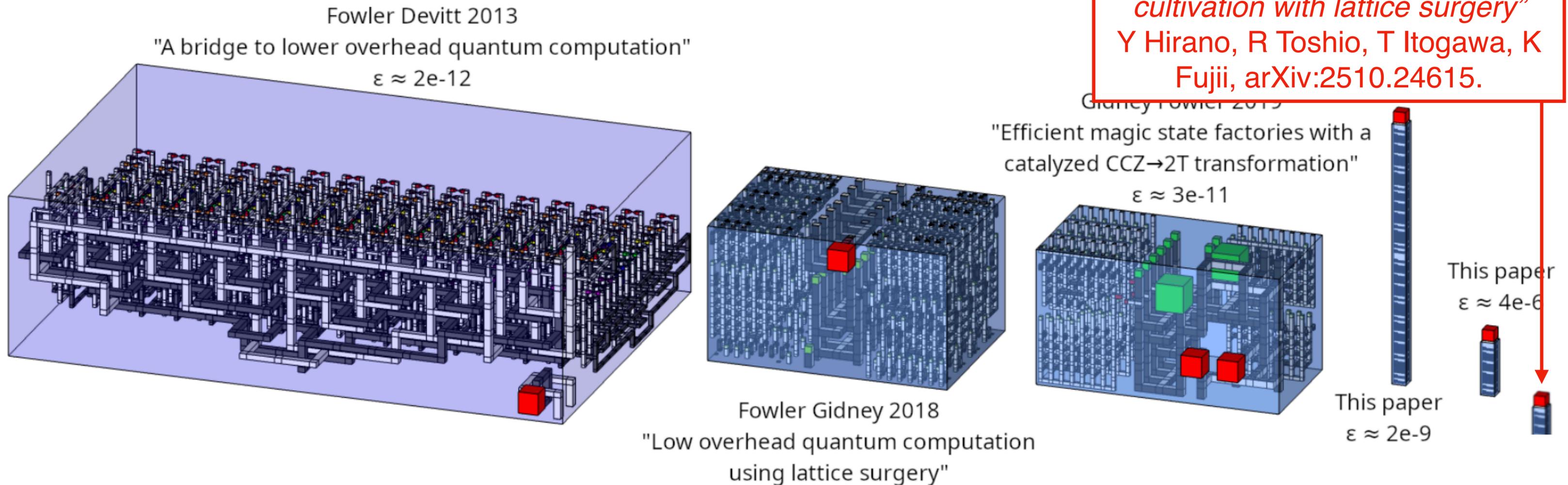
1つの論理量子ビット程度のオーバーヘッドで蒸留

# 魔法状態の栽培 (magic state cultivation)

C. Gidney et al., (Google) "Magic state cultivation: growing T states as cheap as CNOT gates." arXiv:2409.17595.

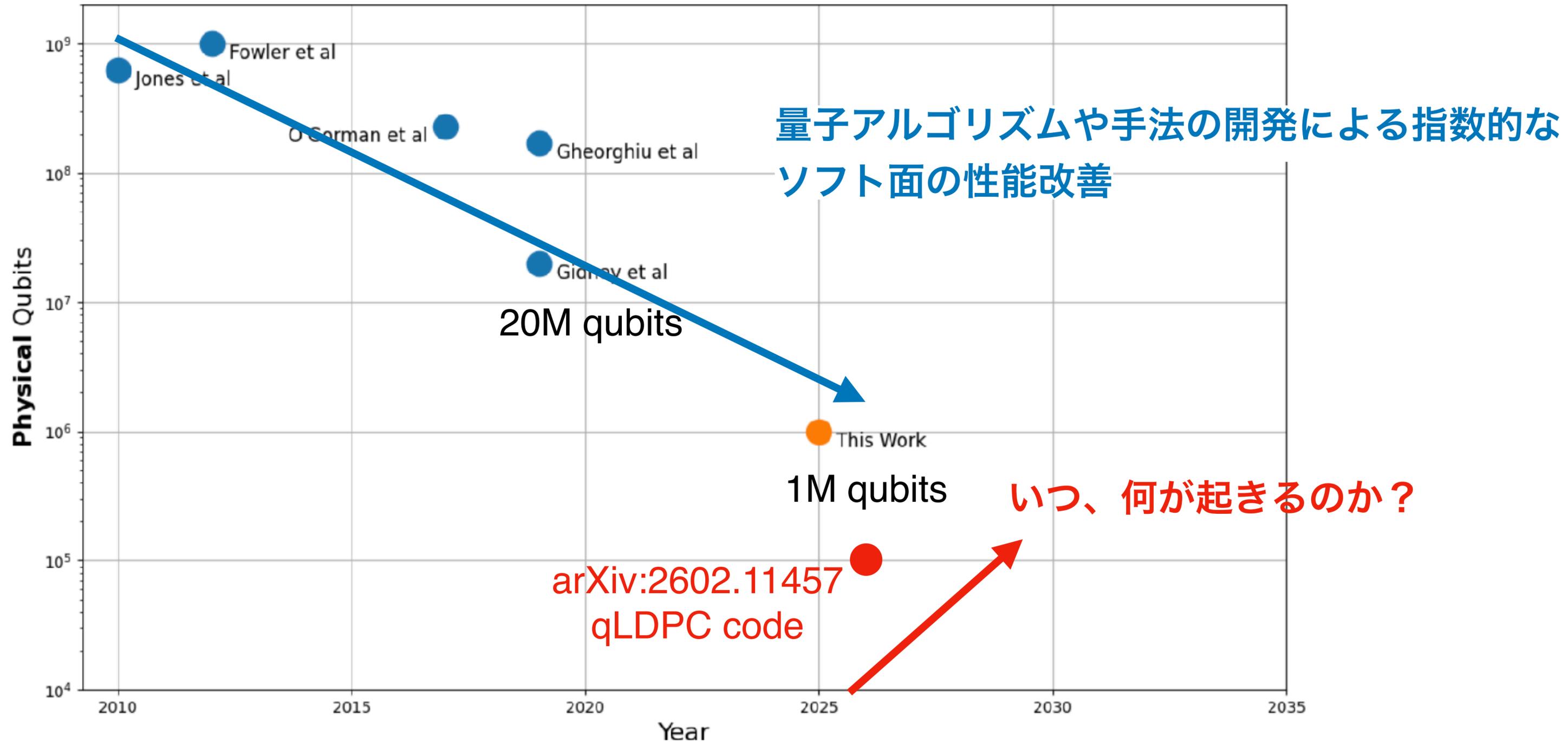
Itogawa et al [Ito+24] improved on this by showing that the idea still works with a simple square grid connectivity and  $10^{-5}$  uniform depolarizing circuit noise. These improvements are what brought the construction to our attention. In this paper we further refine the construction, enormously improving its performance. We m

**[NEW]** "Efficient magic state cultivation with lattice surgery"  
Y Hirano, R Toshio, T Itogawa, K Fujii, arXiv:2510.24615.



2048bitの素因数分解に必要な量子ビット数が1/10に！

# RSA-2048の解読に必要な量子ビット数



C. Gidney, "How to factor 2048 bit RSA integers with less than a million noisy qubits." arXiv preprint arXiv:2505.15917 (2025).

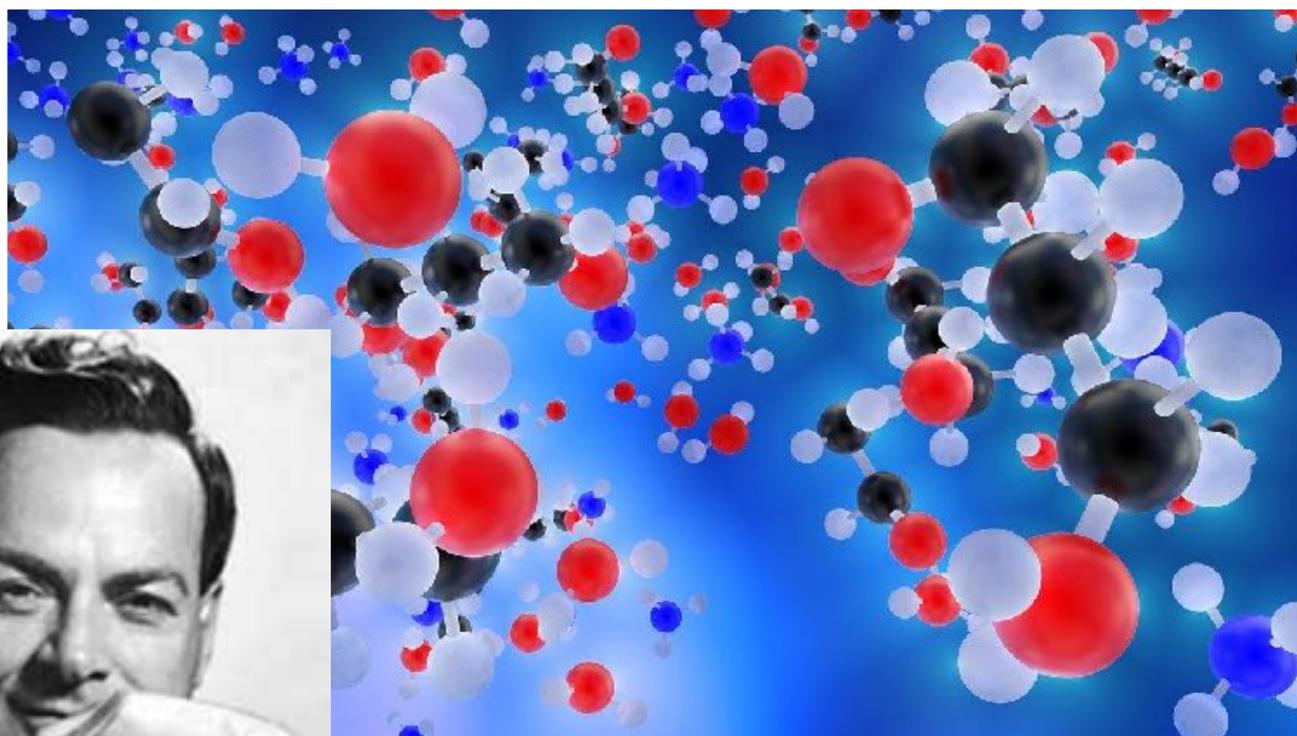


# 量子コンピュータによる社会課題の解決



# 量子コンピュータで何ができるのか

特定の問題に対して優位性があると期待されている



量子力学の原理で動作する  
コンピュータ



分子や材料など量子力学を必要とする計算

触媒開発、新機能材料、創薬 etc



$$A\vec{x} = \vec{b}$$

量子力学とは関係ないが、  
数理的構造が量子力学と相性がいいもの



素因数分解、機械学習(AI)、確率的な計算 etc

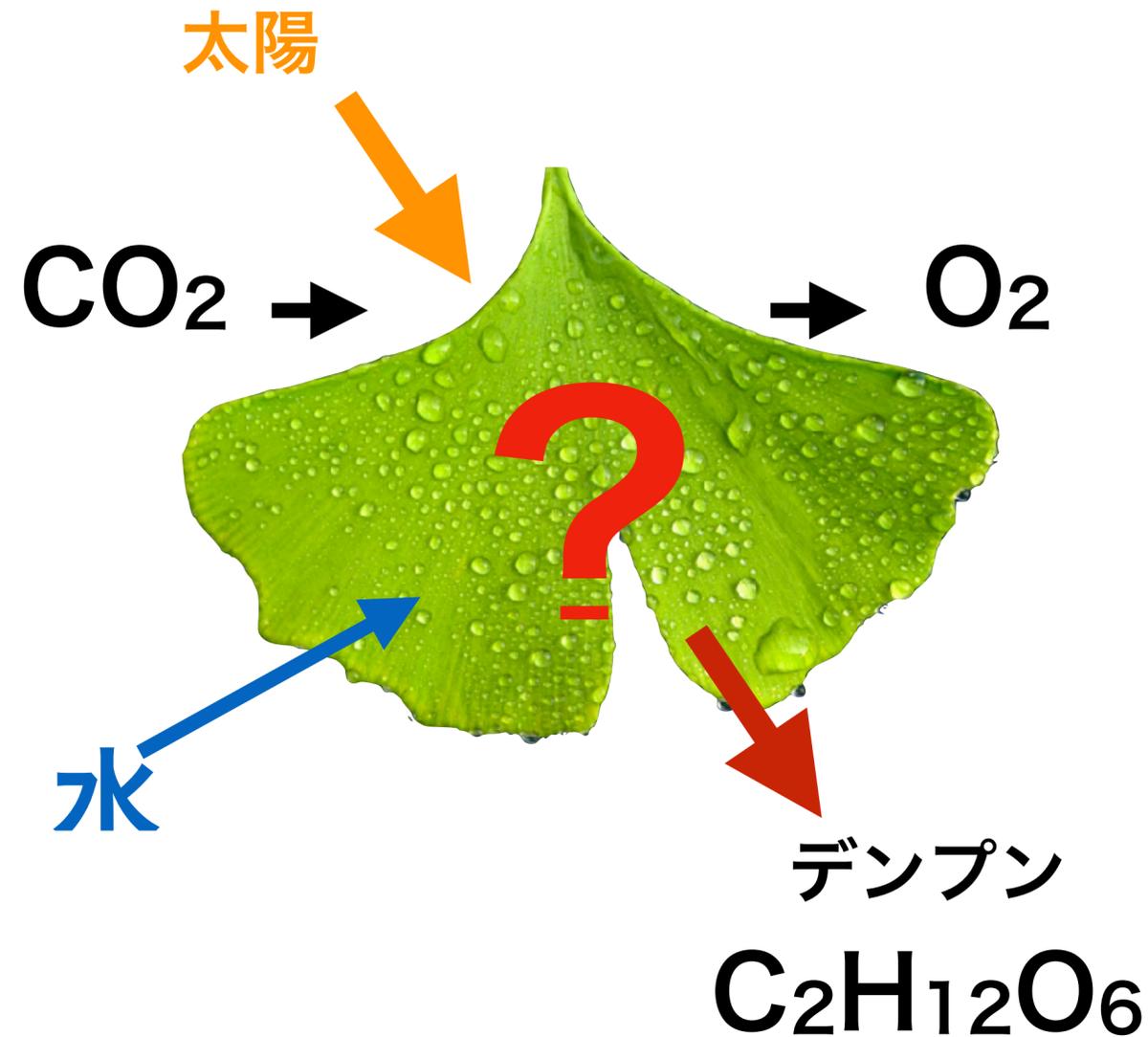
セキュリティ・AI・金融 etc

[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1965/feynman-bio.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1965/feynman-bio.html)

*Nature isn't  
classical!*

# 量子コンピュータを使って解決したい地球規模の問題

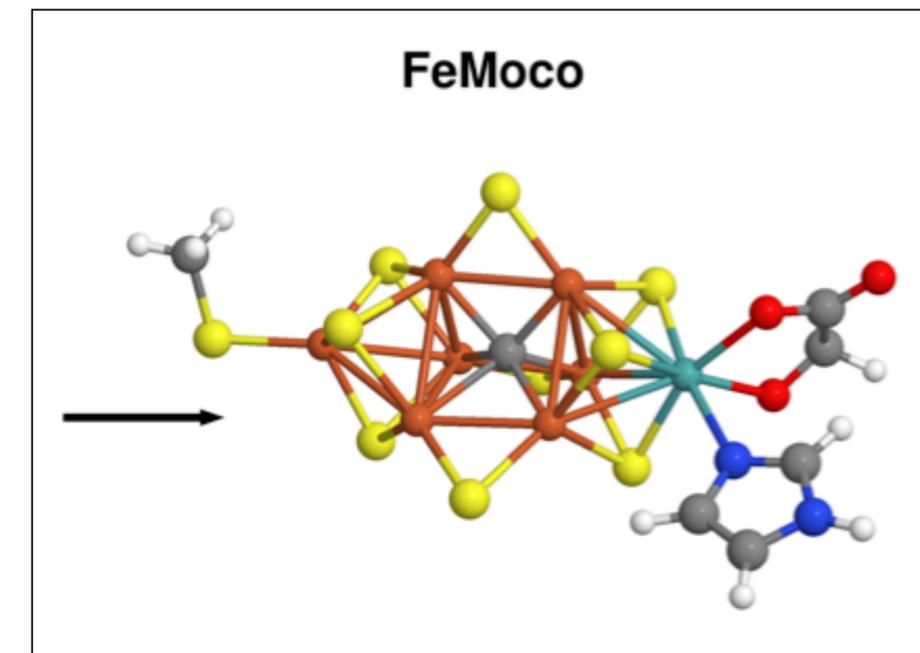
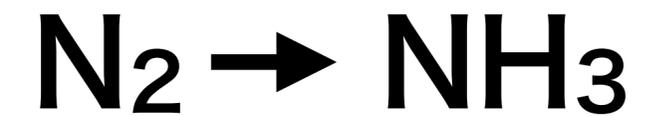
## 光合成



## 窒素固定



窒素は肥料  
を作るために必須  
燃料としての利用も



"Elucidating reaction mechanisms on quantum computers" Reiher et al, PNAS 2017

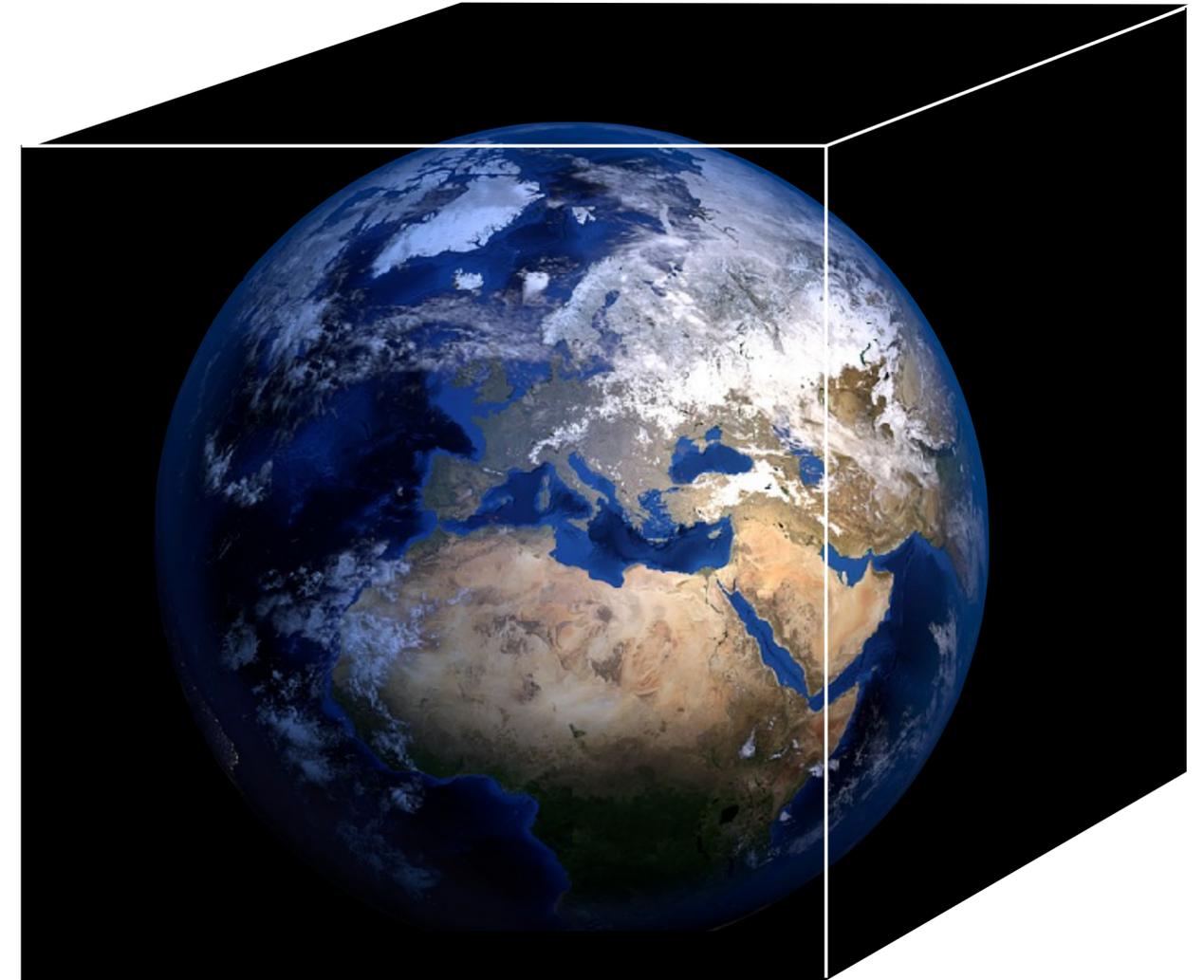
自然界を「量子レベル」で理解して、新しい「ものづくり」へ

# 自然界をよりよく理解し、新たなテクノロジーとして応用



## 渡り鳥のコンパスモデル

*“Chemical compass model of avian magnetoreception”* K Maeda, et al.,  
Nature (2008)



## 地球というコンピュータで46億年かけて見つけた「答え」の理解

*“A quantum computer is not just a smaller or faster version of today's computers — it represents a fundamentally new way of harnessing nature.”* S. Aaronson

# 量子テクノロジーで拓く未来社会

## ムーンショット目標6

2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現

### 量子計測・センシング

生物からより高感度なセンシング (BMI、MRI)  
地下資源探索・自動運転・慣性航法

量子レベルの  
情報を取得



量子AI?



【トップ研究者が90分解説 量子コンピュータの全て】2050年までに世界は激変／...

地球規模  
を実現す

人工光合成

最前線の研究者による  
ゼロからわかる超入門の書

# AIを超える 衝撃がやってくる

重版続々!

作家 橘玲氏 京都大学教授 橋本幸士氏  
東京大学教授 西成活裕氏 絶賛!

大阪大学教授 藤井啓祐

教養としての  
量子コンピュータ

最前線の研究者による  
ゼロからわかる超入門の書

大阪大学量子情報・  
量子生命研究センター副センター長  
藤井啓祐 著