



# 量子コンピュータの作り方と 量子コンピュータの拓く未来

阿部英介

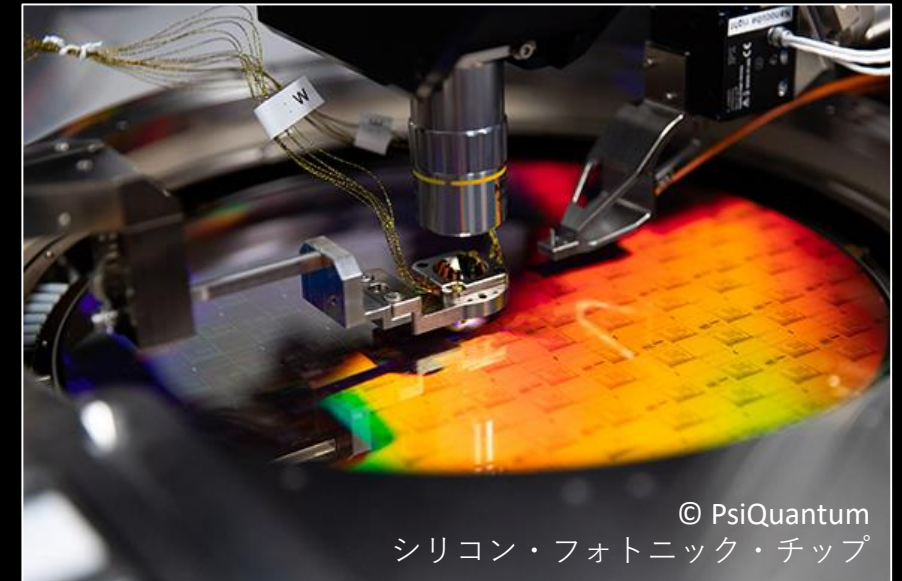
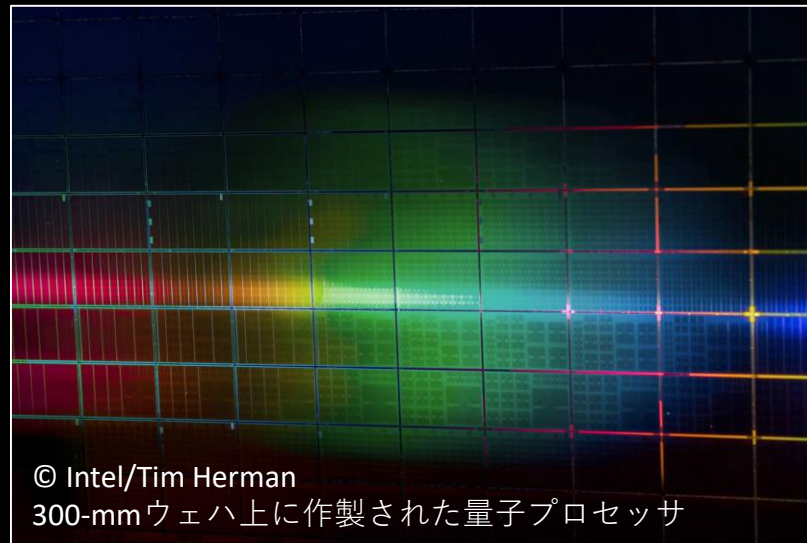
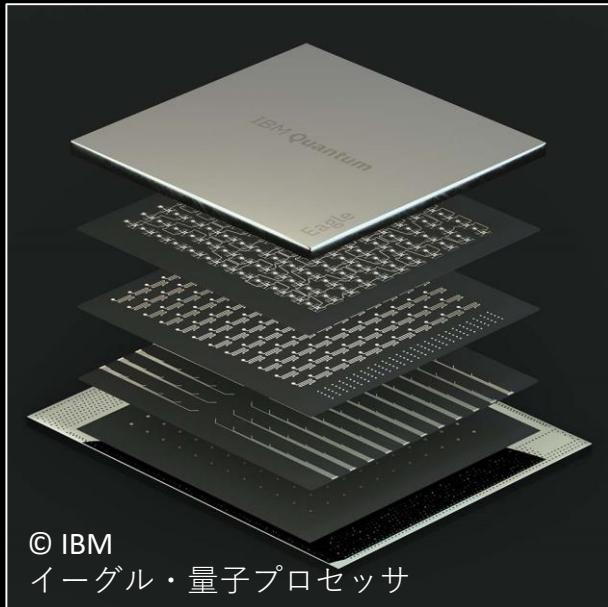
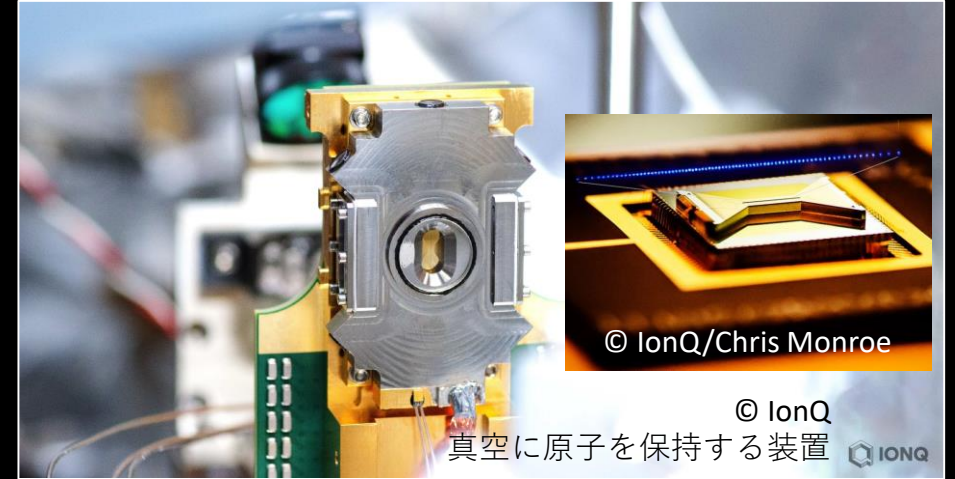
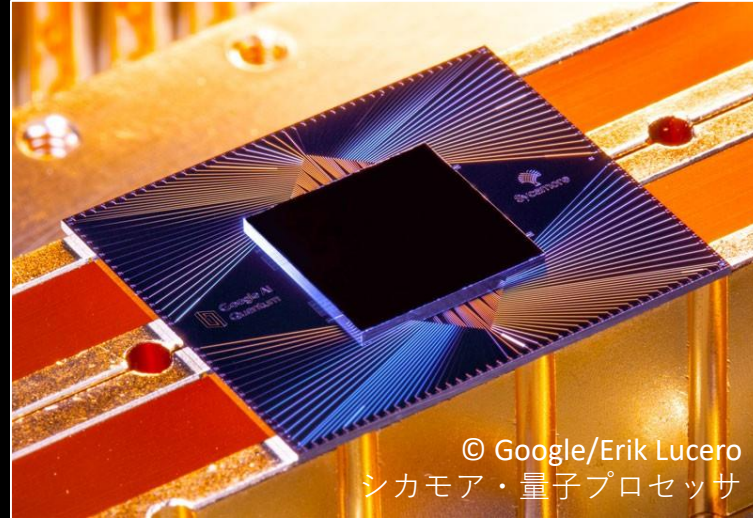
理化学研究所量子コンピュータ研究センター

2023年2月19日(日)

物性研究所一般講演会

「デジタル→量子の時代!? 量子コンピュータ、実現への壁」

# 量子の時代の幕開け



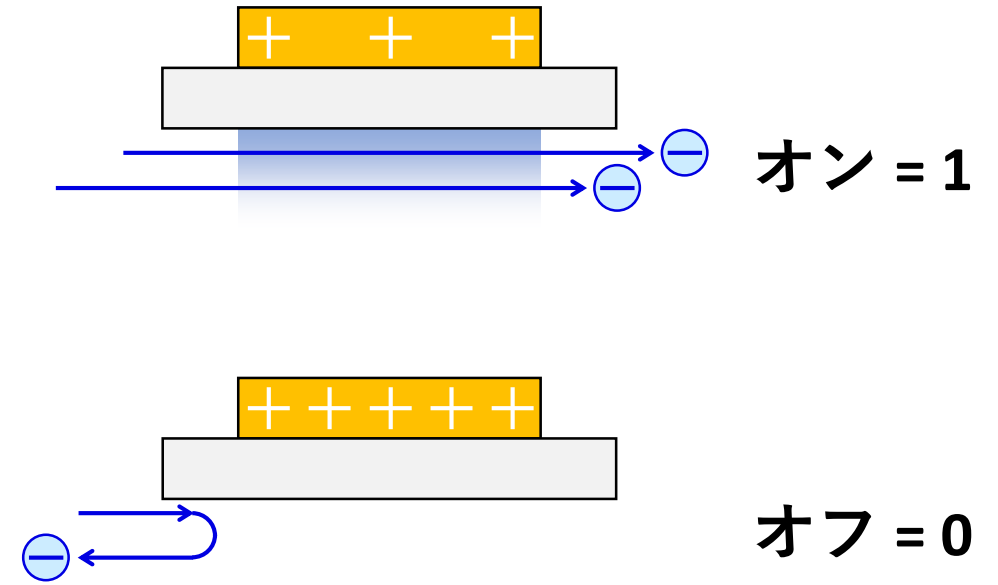
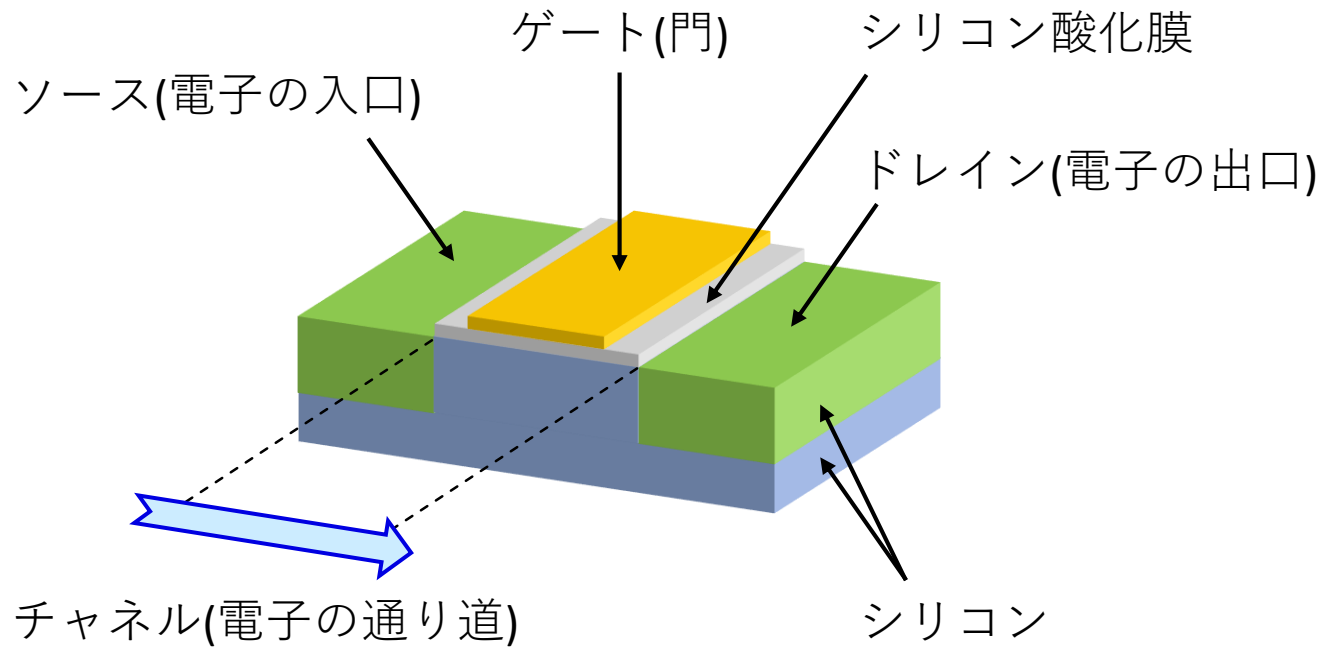
<https://quantum-computing.ibm.com/>  
<https://research.ibm.com/teams/quantum-hardware>

<https://quantumai.google/>  
<https://www.intel.com/content/www/us/en/research/quantum-computing.html>

<https://ionq.com/>  
<https://psiquantum.com/>

# その前に... デジタルの時代

トランジスタ → 電子の流れをオン・オフしてデジタル情報(ビット)を扱う素子



- トランジスタの数が多いほど扱える情報量(01011010011...)が増大
- チャネルが短いほど高速・高密度化

# デジタルの時代

## iPhone 14 Pro

- 1台に160億(=  $1.6 \times 10^{10}$ )個のトランジスタを使用



© Apple

7 cm

## Apple II

- 1台に3500個のトランジスタを使用
- 500万台以上販売(1977~1993年)
- $3500 \text{個/台} \times 500 \text{万台} = 175 \text{億個}$



(from Wikipedia)

30 cm

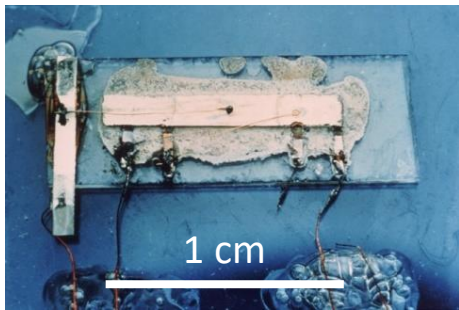


1960年以前

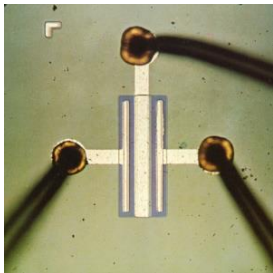


© Bell Labs

1 cm

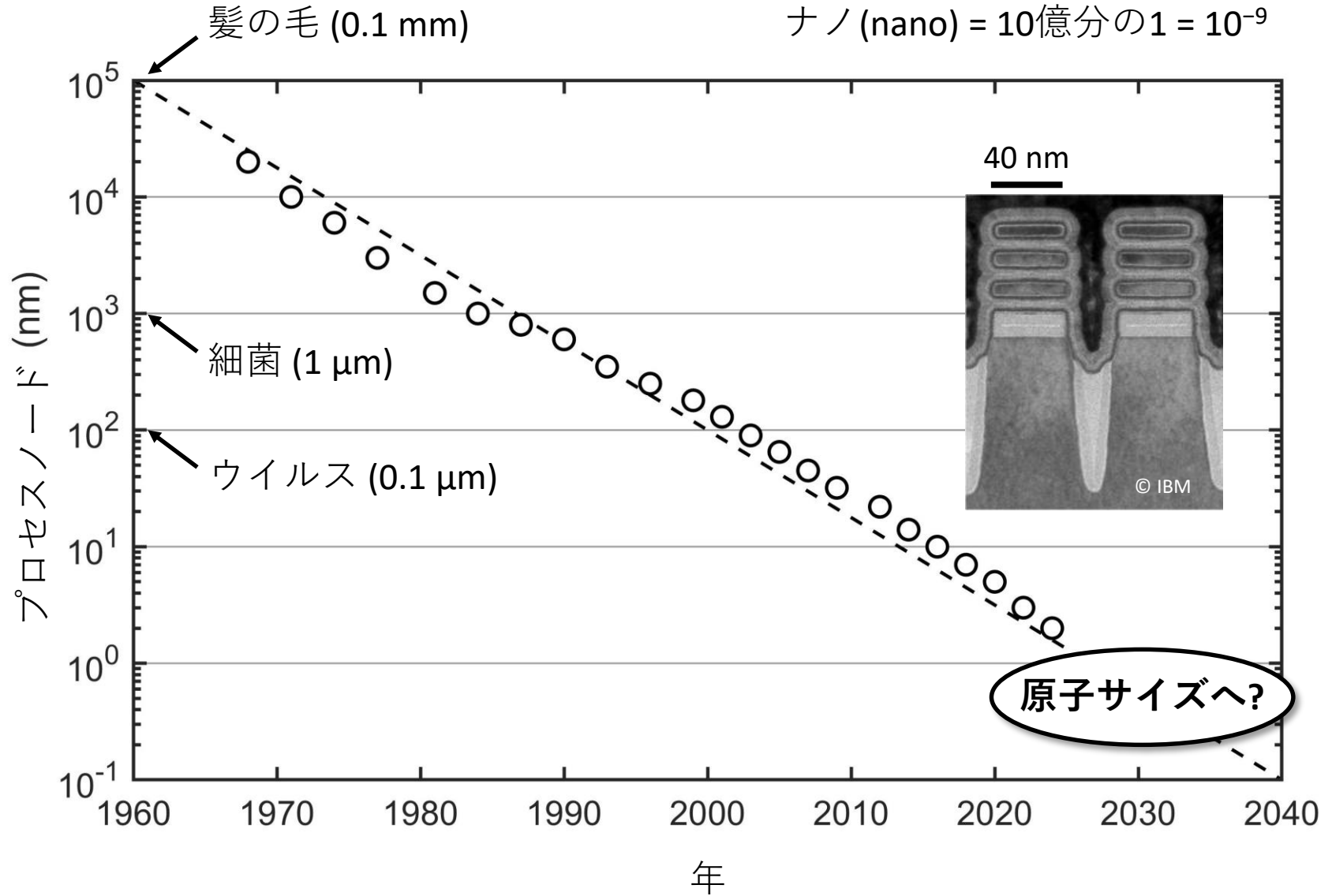


© Texas Instruments



© Fairchild

# トランジスタ小型化の歴史



# 単一原子トランジスタ

LETTERS

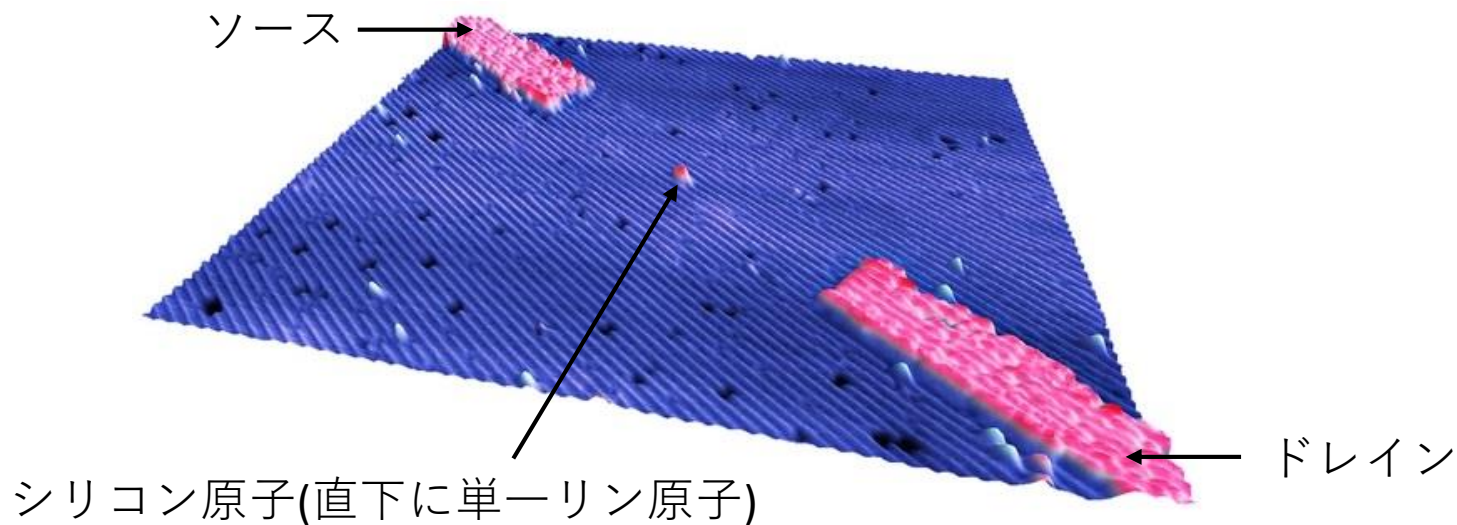
PUBLISHED ONLINE: 19 FEBRUARY 2012 | DOI: 10.1038/NNANO.2012.21

nature  
nanotechnology

## A single-atom transistor

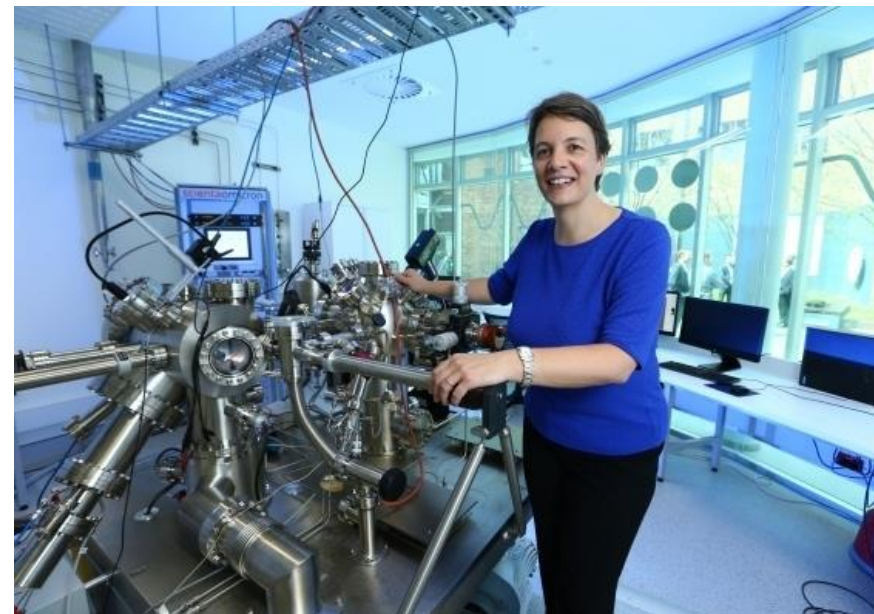
Martin Fuechsle<sup>1</sup>, Jill A. Miwa<sup>1</sup>, Suddhasatta Mahapatra<sup>1</sup>, Hoon Ryu<sup>2</sup>, Sunhee Lee<sup>3</sup>,  
Oliver Warschkow<sup>4</sup>, Lloyd C. L. Hollenberg<sup>5</sup>, Gerhard Klimeck<sup>3</sup> and Michelle Y. Simmons<sup>1\*</sup>

Nature Nanotechnology 7, 242 (2012)



© University of New South Wales

## シモンズ博士と走査型トンネル顕微鏡



© Britta Campion/News Corp

# 宇宙の原子を集めたら？

$A = 1 \text{ g}$ の物質中に含まれる原子の数 =  $6 \times 10^{23}$ 個 (アボガドロ数)

$B =$  太陽の質量 =  $2 \times 10^{33} \text{ g}$

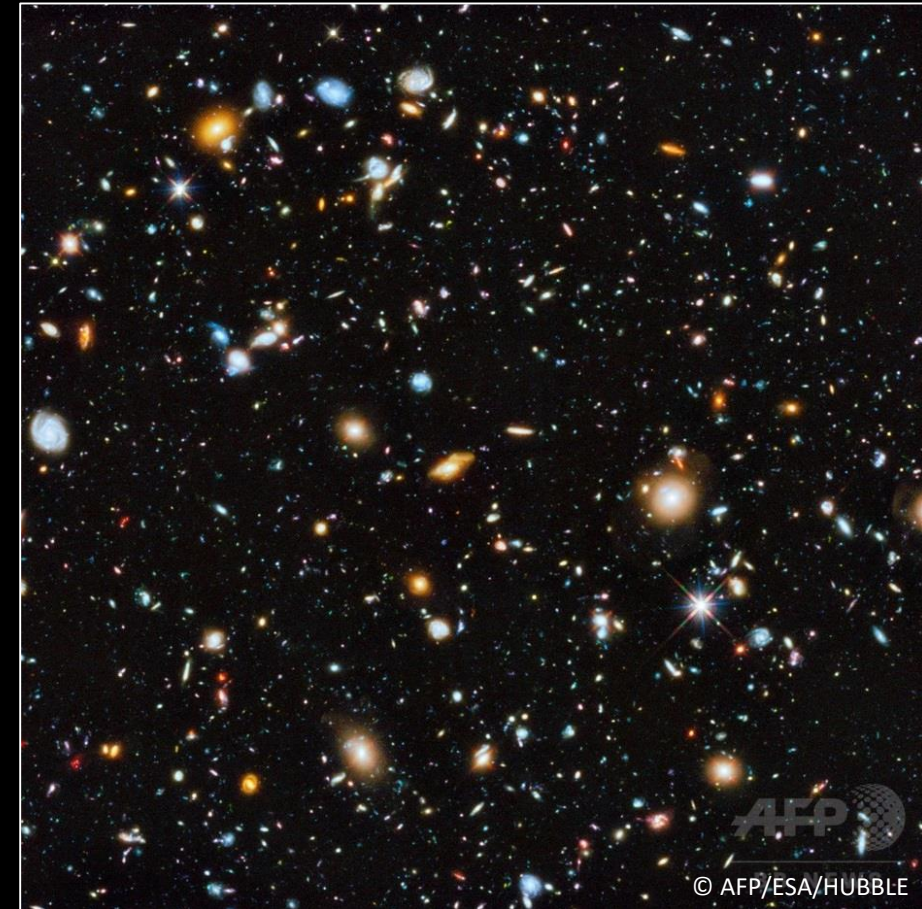
$C =$  太陽の原子数 =  $A \times B = 10^{57}$ 個

$D =$  銀河の星の数 =  $10^{12}$ 個

$E =$  宇宙の銀河の数 =  $10^{11}$ 個

→ 宇宙の原子の数 =  $C \times D \times E = \underline{10^{80}}$ 個

ハッブル宇宙望遠鏡の観測データより





# 宇宙の原子を集めたら？

$A = 1 \text{ g}$ の物質中に含まれる原子の数 =  $6 \times 10^{23}$ 個 (アボガドロ数)

$B =$  太陽の質量 =  $2 \times 10^{33} \text{ g}$

$C =$  太陽の原子数 =  $A \times B = 10^{57}$ 個

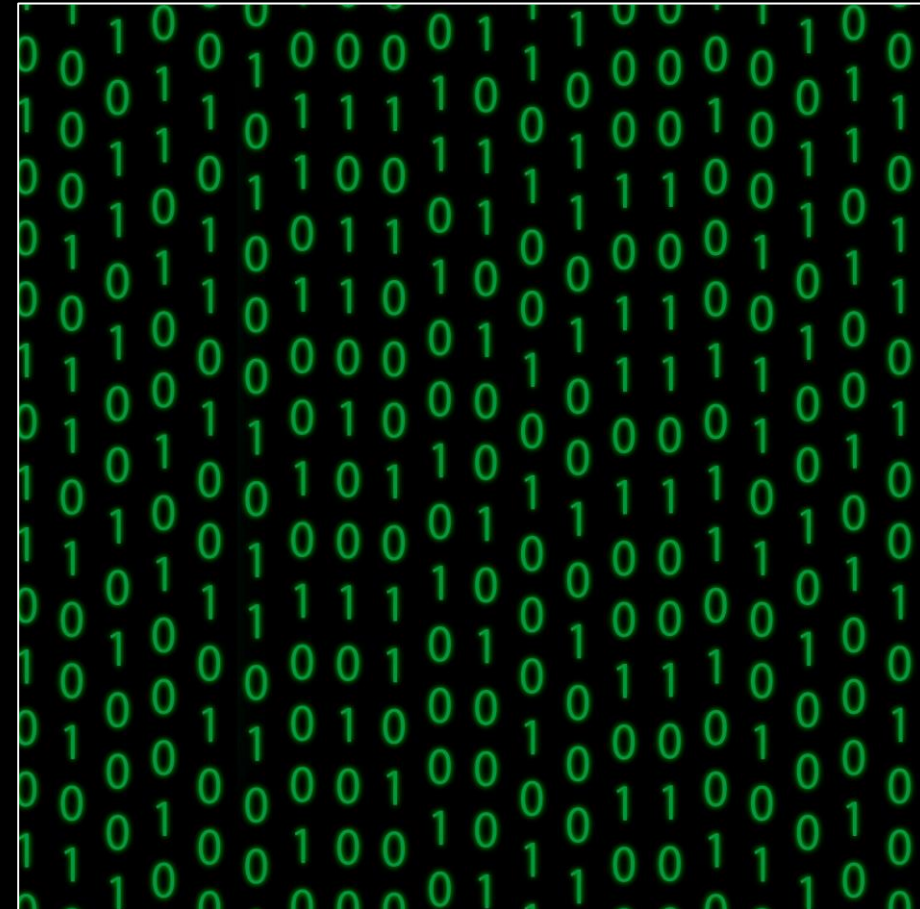
$D =$  銀河の星の数 =  $10^{12}$ 個

$E =$  宇宙の銀河の数 =  $10^{11}$ 個

→ 宇宙の原子の数 =  $C \times D \times E = \underline{10^{80}}$ 個

↑

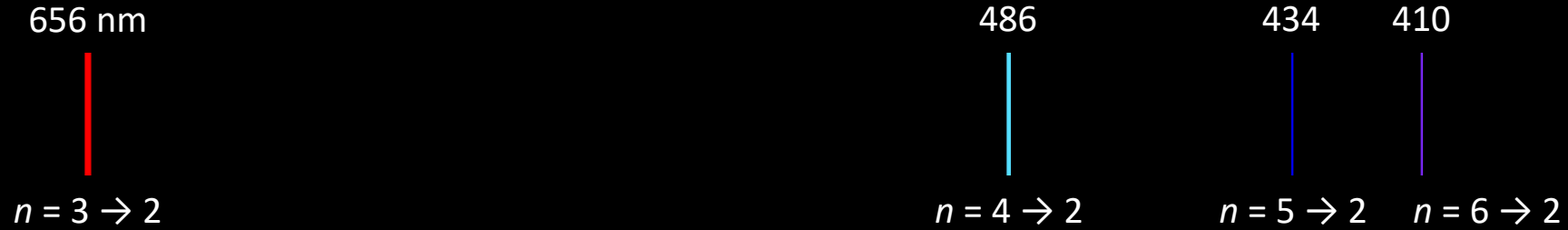
扱える情報量の限界？



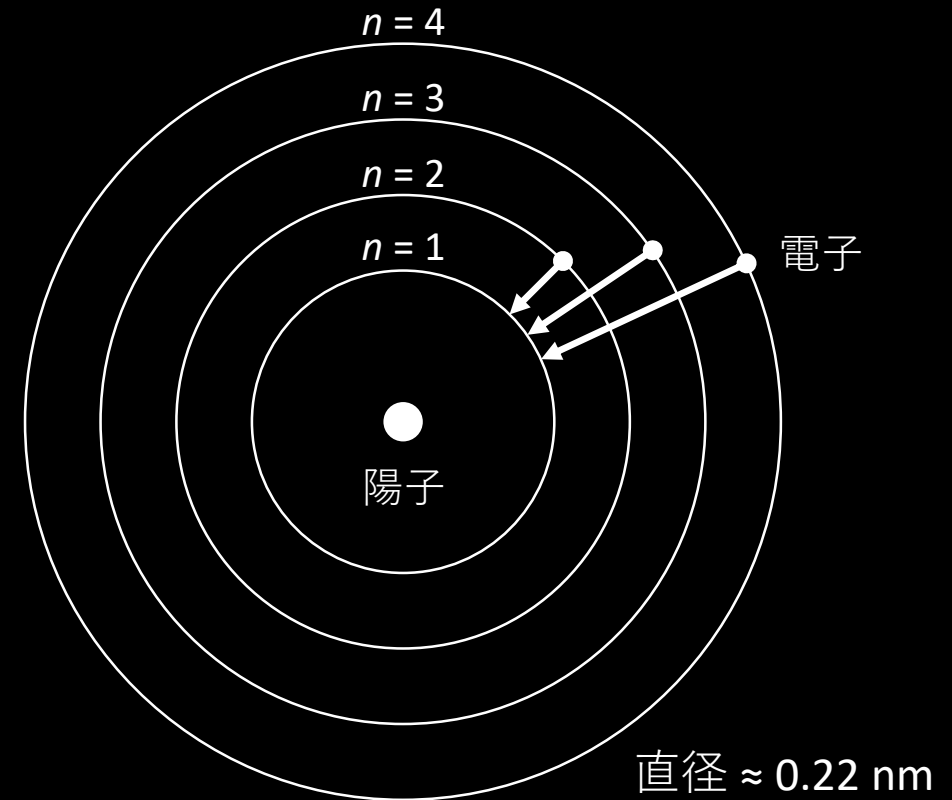


# 量子力学 ～原子の世界の物理法則～

## 水素原子のスペクトルの例

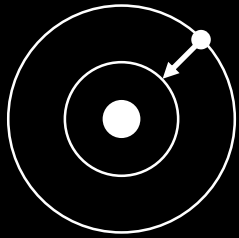


電子は特定の軌道・エネルギーしか取れない  
(古典力学ではエネルギーは連続)

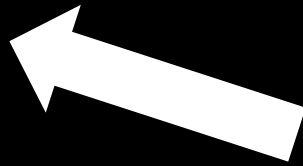


# 量子力学の勢力拡大

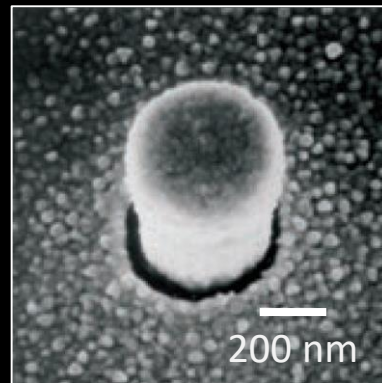
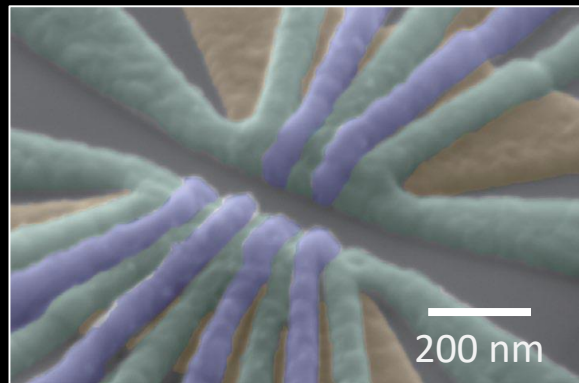
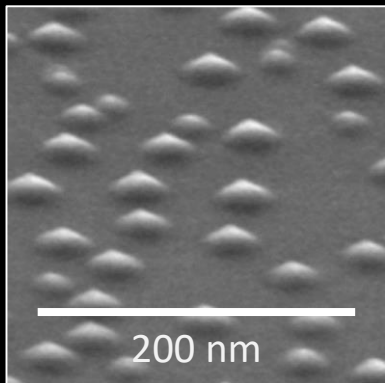
## “人工原子”



- 原子サイズでなくても**条件次第**で飛び飛びのエネルギーを取る
- 原子の性質を自分たちでデザインできる

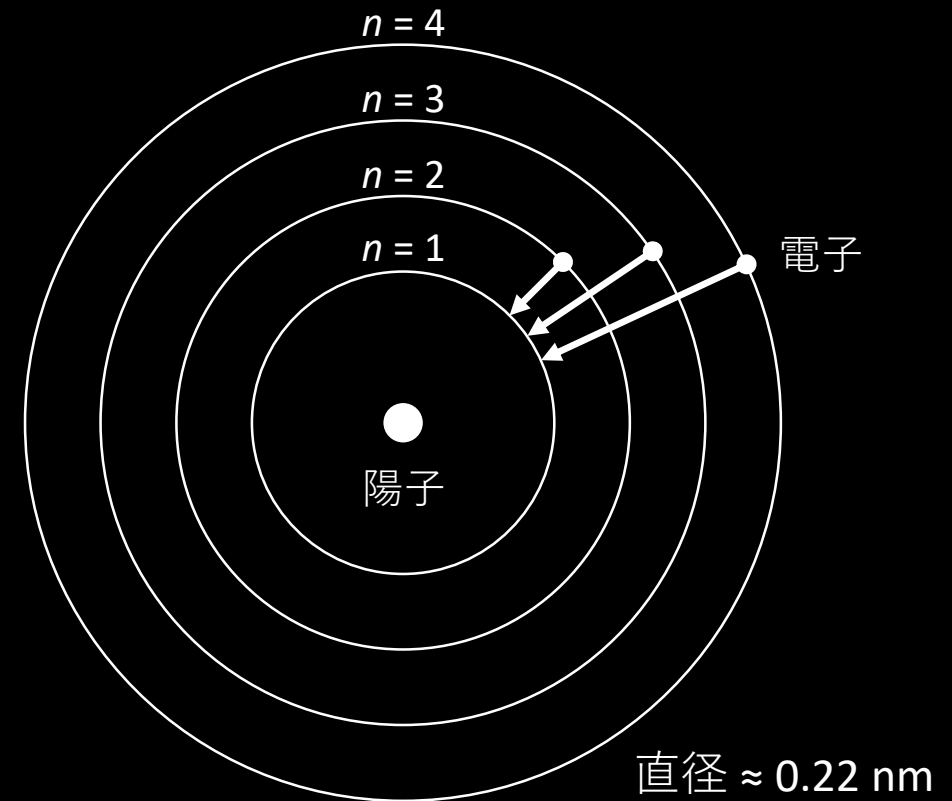


## 半導体を用いた人工原子の例



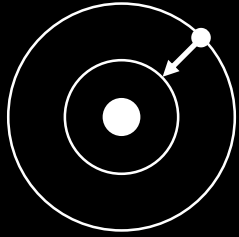
Nature **608**, 682 (2022)

Rep. Prog. Phys. **64**, 701 (2001)

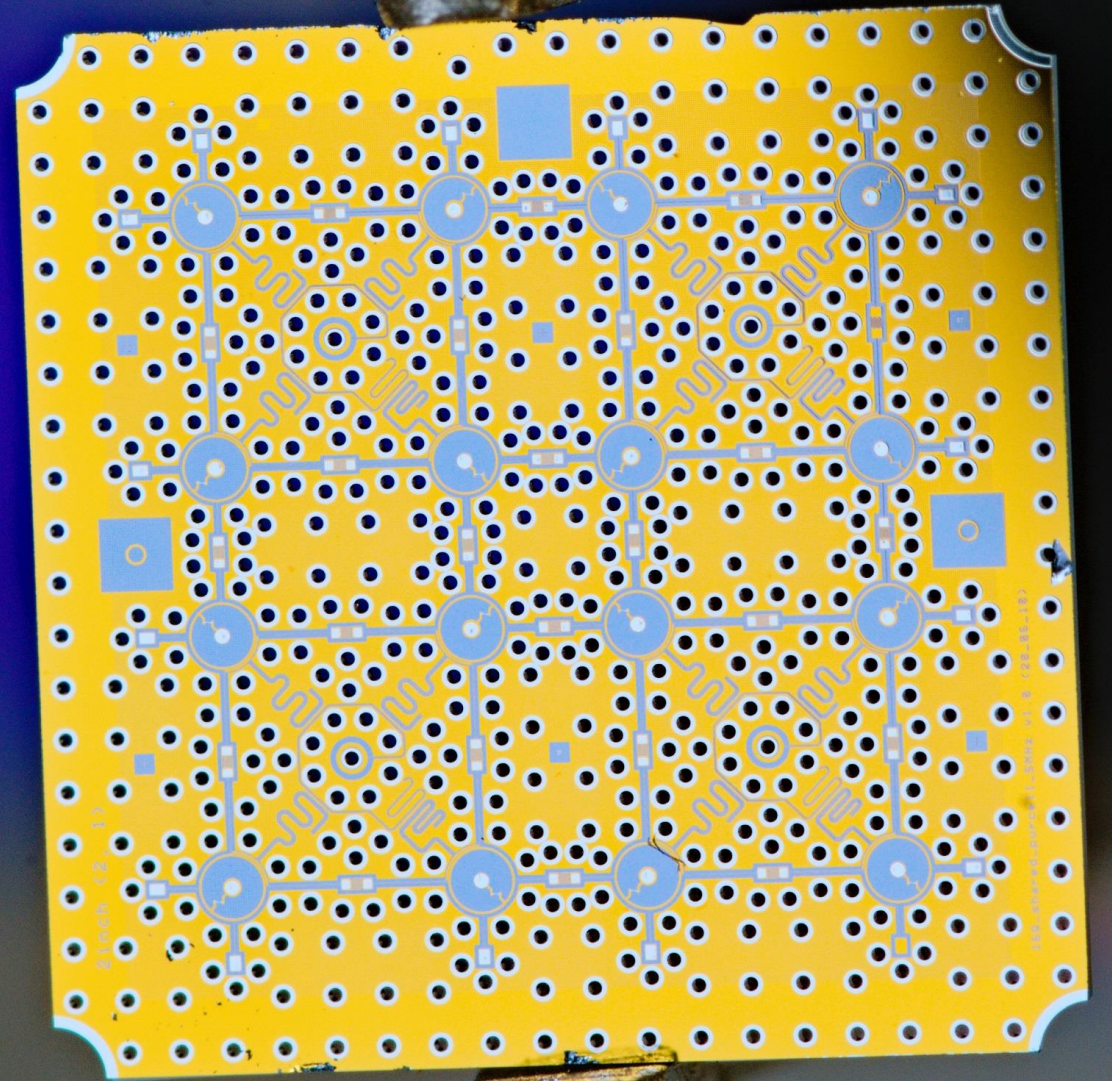


# 超伝導体を用いた人工原子

“人工原子”



- エネルギーは水素原子の25万分の1
- 2つの軌道だけを考えればよいように設計

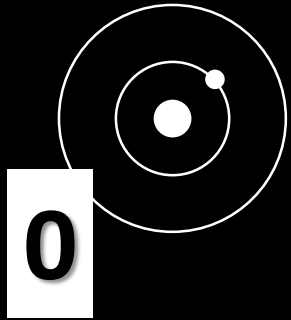
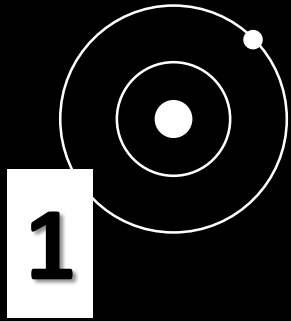


1 cm<sup>2</sup>

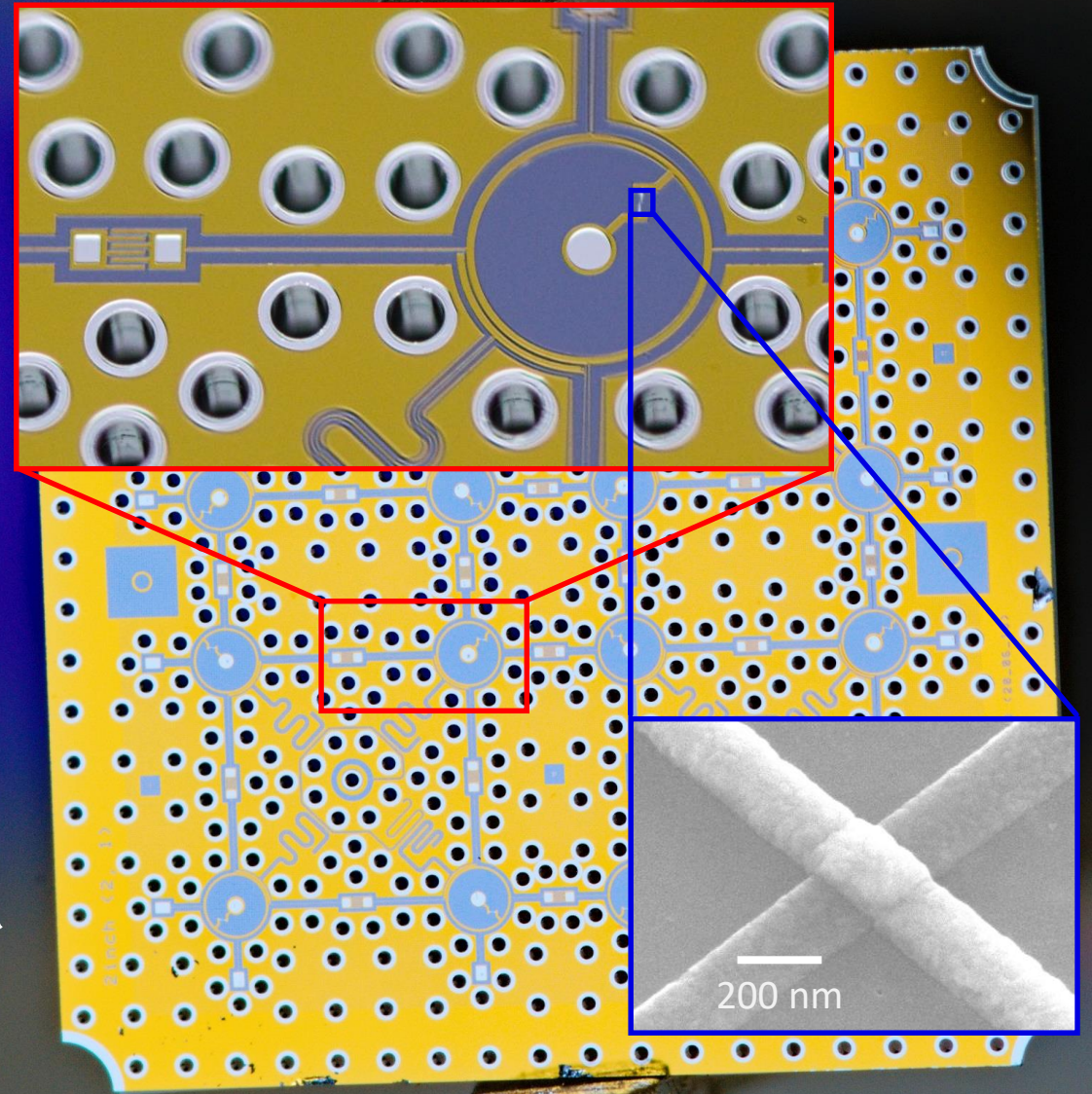
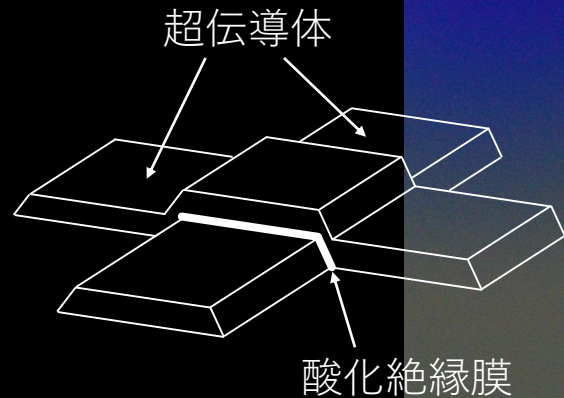


# 超伝導を用いた人工原子

“量子ビット”



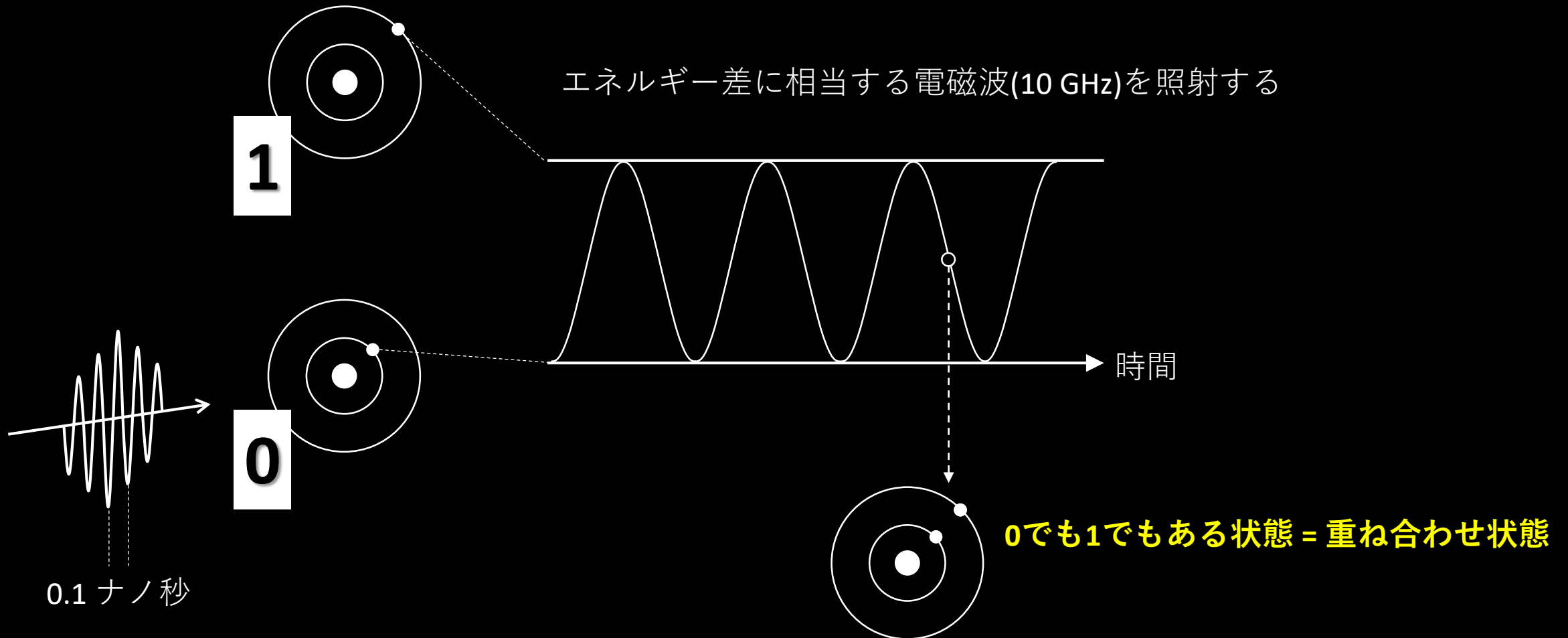
ジョセフソン接合



1 cm<sup>2</sup>

# 量子コンピュータ

個々の量子ビット・量子ビット間相互作用を**量子力学の原理に基づいて制御する**ことで  
通常のコンピュータ(トランジスタ)では困難な計算を実行する



# 量子コンピュータ

個々の量子ビット・量子ビット間相互作用を**量子力学の原理に基づいて制御**することで  
通常のコンピュータ(トランジスタ)では困難な計算を実行する

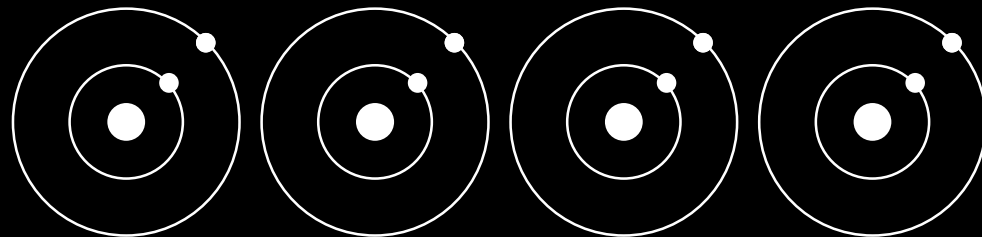
4量子ビットの重ね合わせ状態 →  $2^4 = 16$ 個のビット列を**同時に**実現(指数関数で増大)



3量子ビットの重ね合わせ状態 → 000・001・010・011・100・101・110・111を**同時に**実現



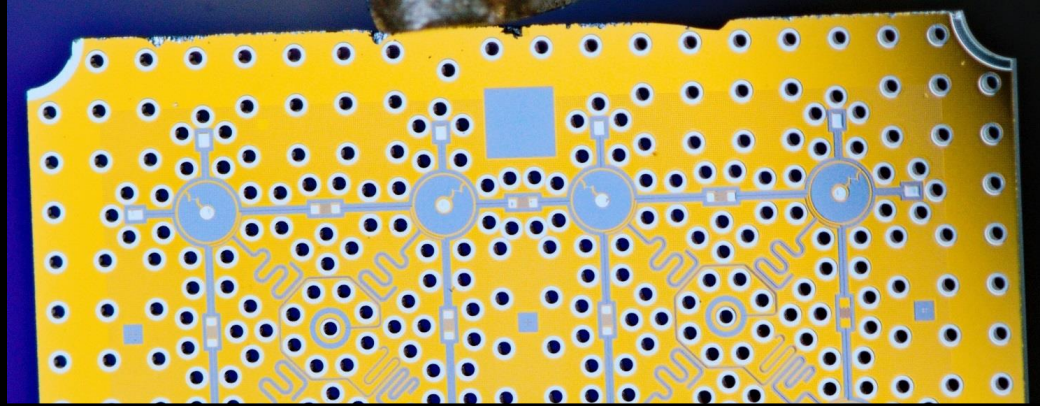
2量子ビットの重ね合わせ状態 → 00・01・10・11を**同時に**実現





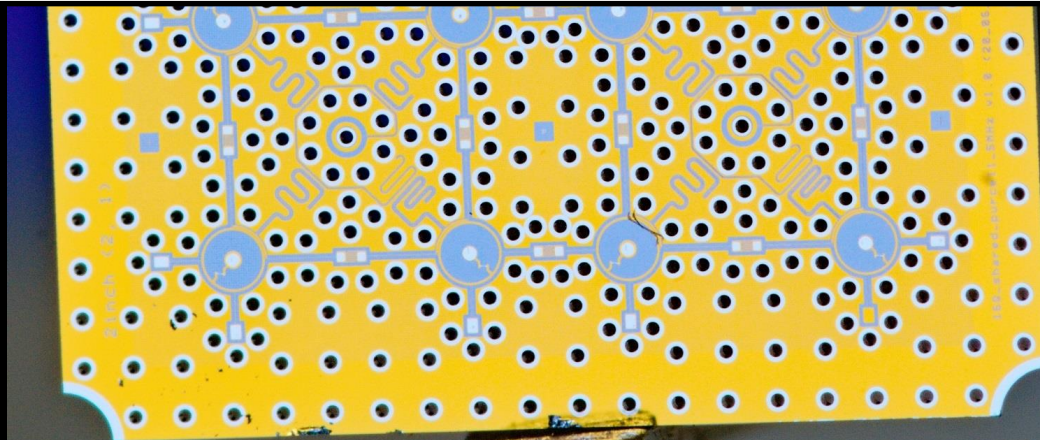
# 量子コンピュータ

個々の量子ビット・量子ビット間相互作用を**量子力学の原理に基づいて制御する**ことで  
通常のコンピュータ(トランジスタ)では困難な計算を実行する



$$10^{80} < 2^{266}$$

266量子ビットあれば宇宙の全ての原子にビット情報を書き込むよりも多くの情報を扱える



# 量子コンピュータの拓く未来

## 物質設計



### 量子を量子のまま扱える優位性

- 高温超伝導
- 触媒反応
- 創薬

## データサイエンス



量子情報化社会の到来!?

## セキュリティ



### 計算量クラスの優位性

- 暗号解読

### 大量のデータを一度に扱える優位性

- データ検索
- 人工知能
- 物流・交通量最適化

# 量子コンピュータ研究センター

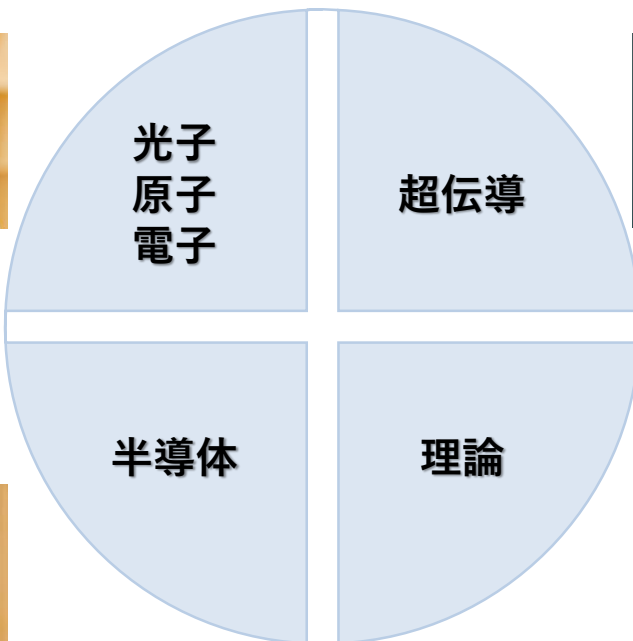
さまざまな量子を用いて今までにないコンピュータを作る

古澤明 (副センター長)  
福原武  
川上恵里加



野口篤史

中村泰信 (センター長)  
蔡兆申  
阿部英介  
田淵豊



萬伸一 (副センター長)



樽茶清吾



藤井啓祐  
フランコ・ノリ  
柚木清司  
桑原知剛



ダニエル・ロス

佐藤信太郎  
(理研RQC-富士通連携センター副センター長)





# 量子プロセッサ

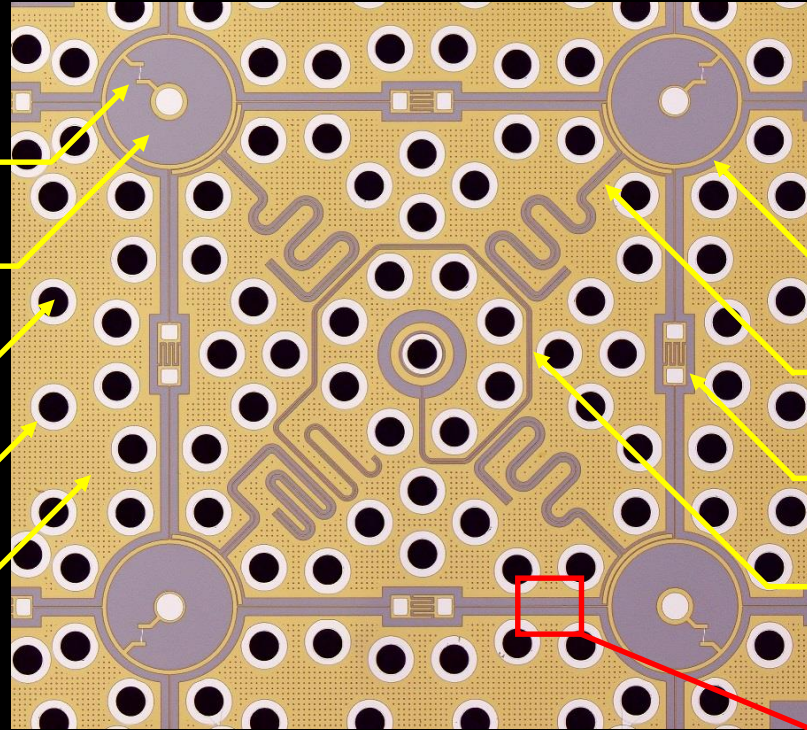
ジョセフソン接合

シリコン基板

シリコン貫通電極

アルミニウム側壁

窒化チタン膜

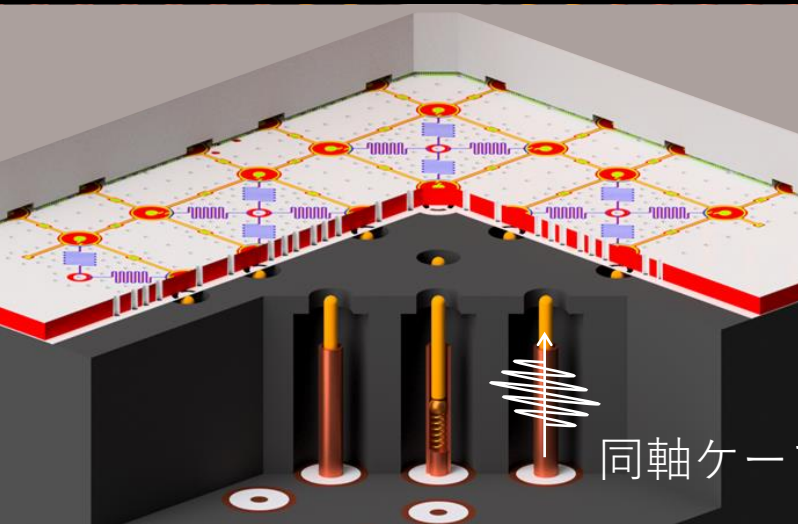


量子ビット(8 GHz)

測定用共振器(10 GHz)

結合キャパシタ

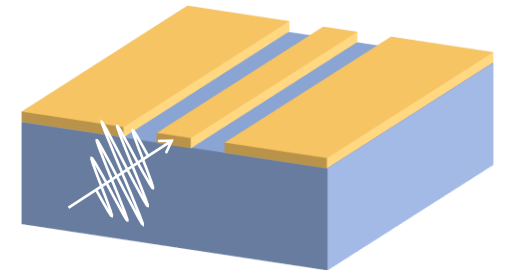
多重読み出し回路



同軸ケーブル(3次元)

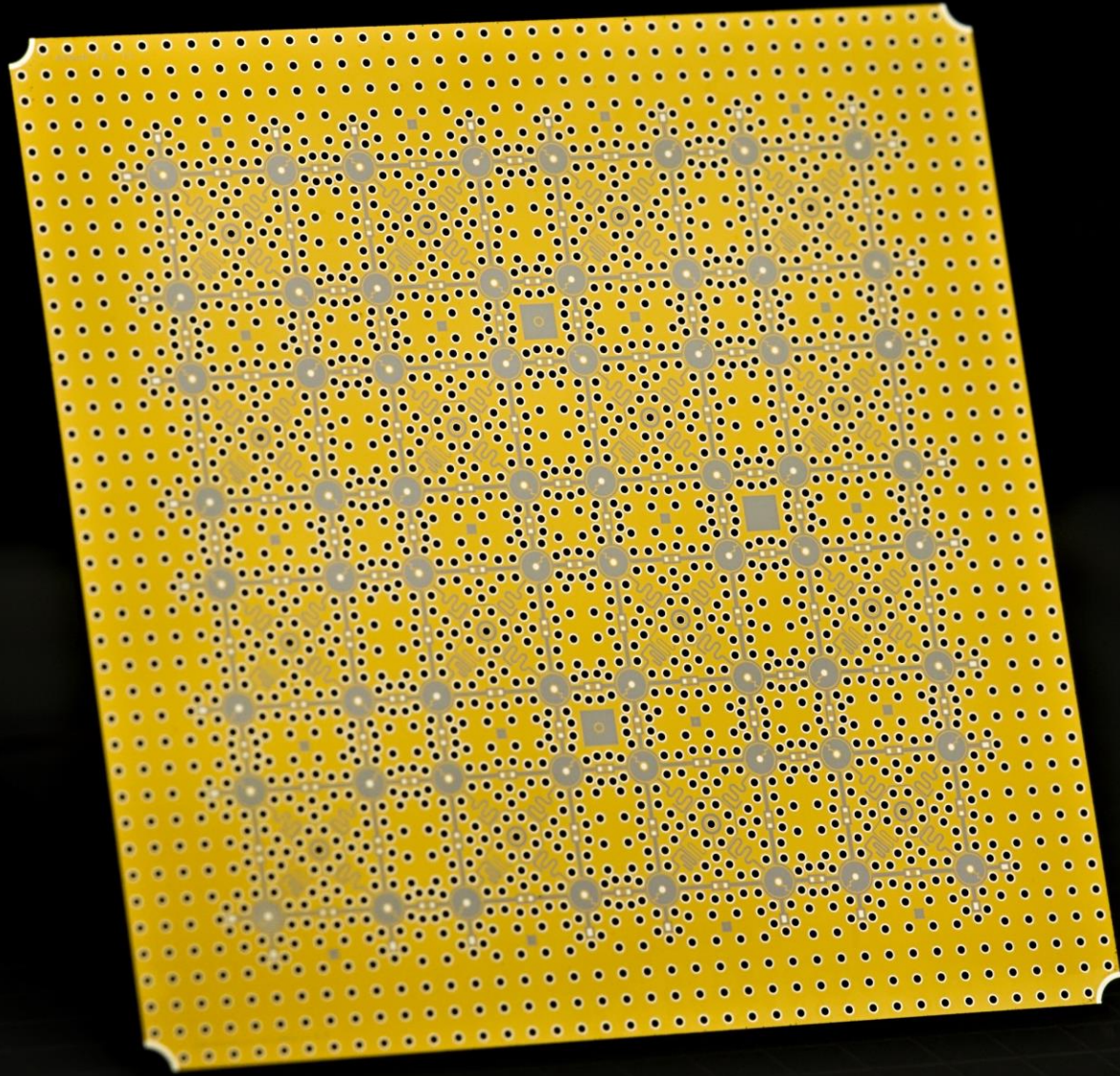
マイクロ波の“道”が量子ビットを繋ぐ

平面導波路(2次元・低損失)





# 64量子ビットチップ



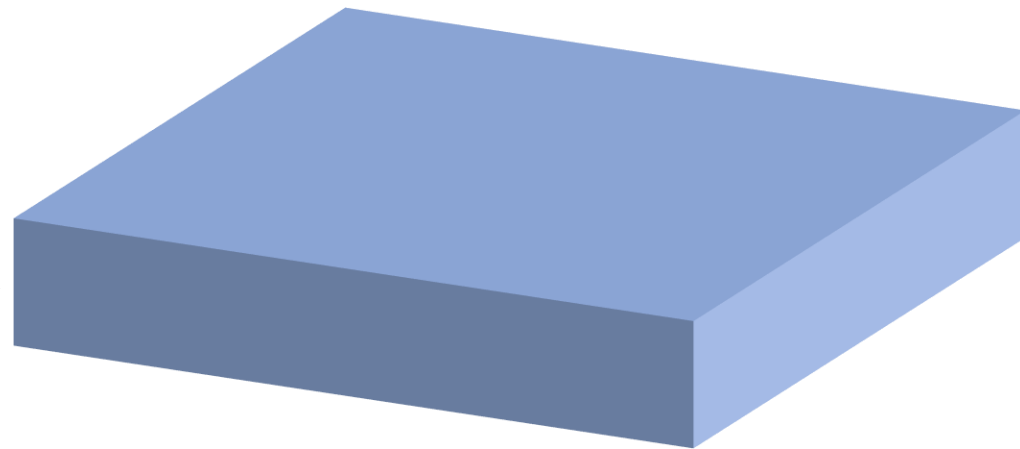
2022年6月2日 首相官邸



[https://www.kantei.go.jp/jp/101\\_kishida/actions/202206/02kagaku.html](https://www.kantei.go.jp/jp/101_kishida/actions/202206/02kagaku.html)

# 量子コンピュータの作り方

シリコン基板



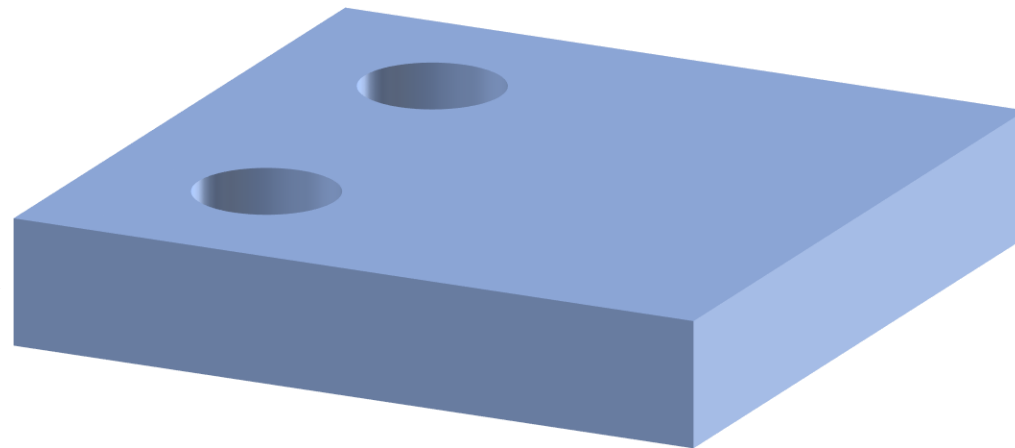


# 量子コンピュータの作り方



貫通穴パターン描画と加工

シリコン基板 →



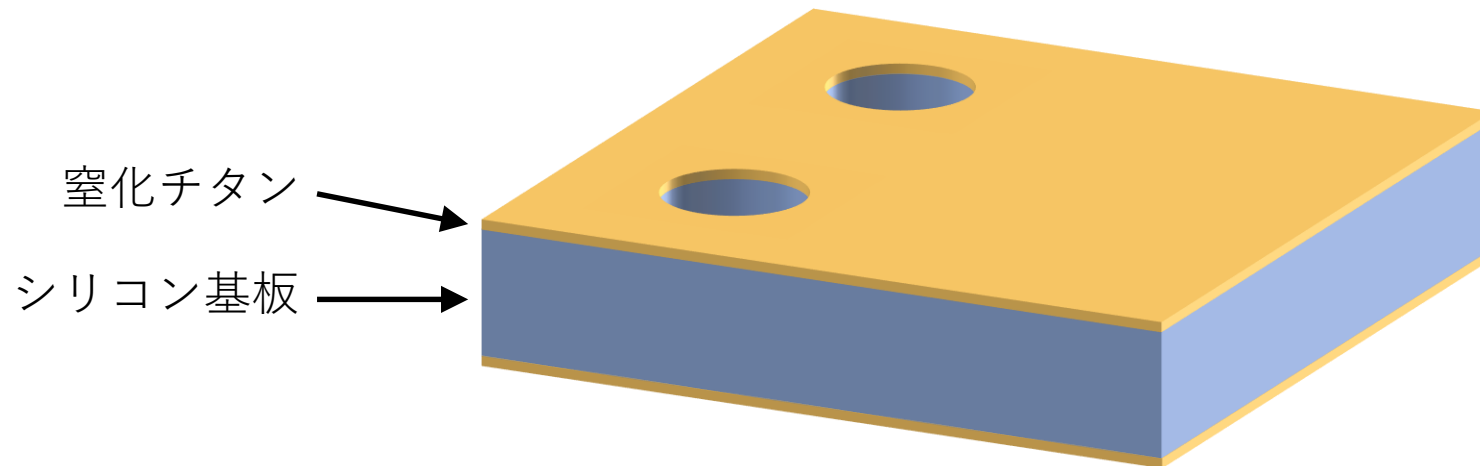
# 量子コンピュータの作り方



貫通穴パターン描画と加工



窒化チタン膜蒸着



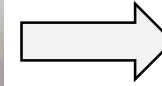
# 量子コンピュータの作り方



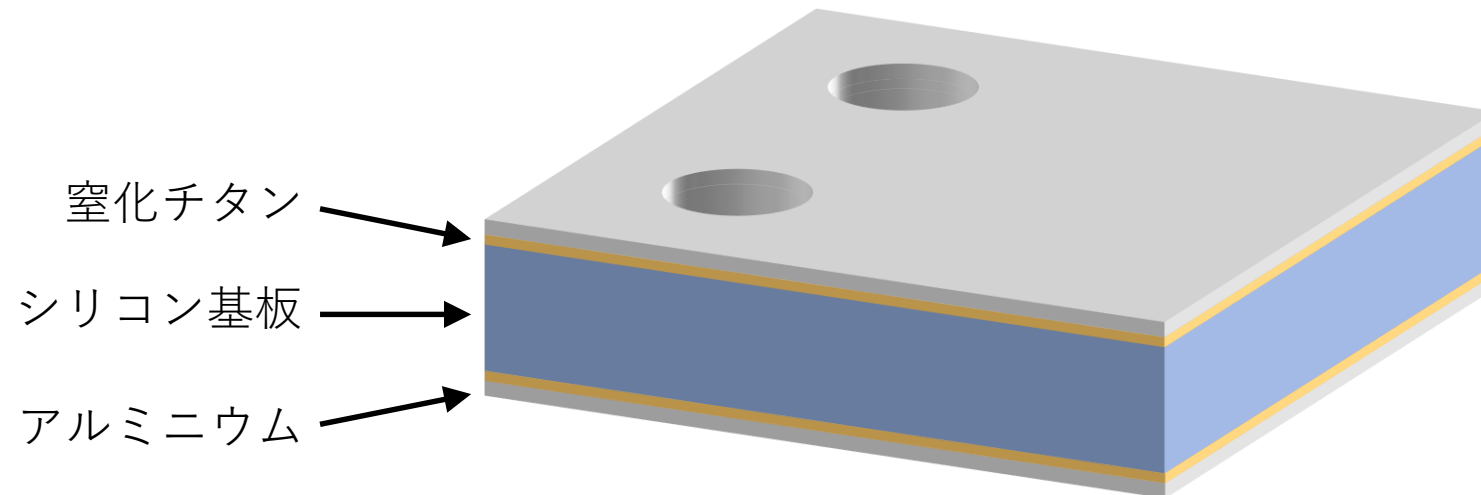
貫通穴パターン描画と加工



窒化チタン膜蒸着

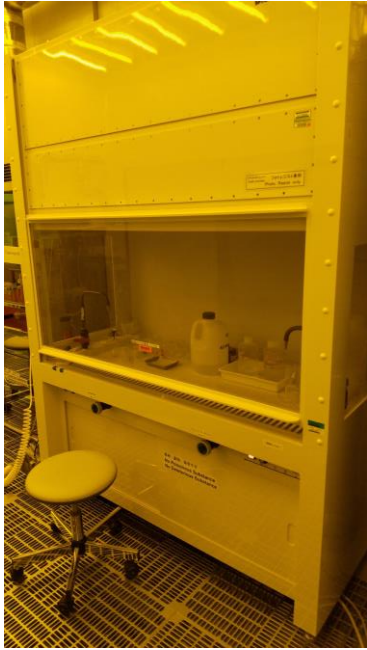


アルミニウム膜蒸着

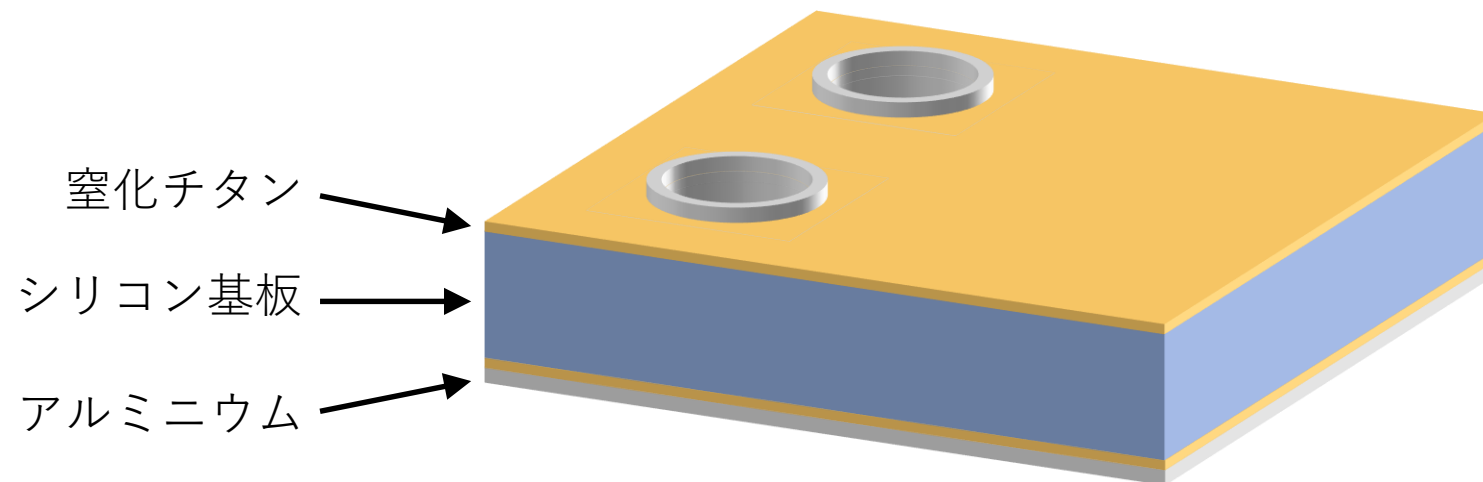




# 量子コンピュータの作り方



側壁パターン描画と加工

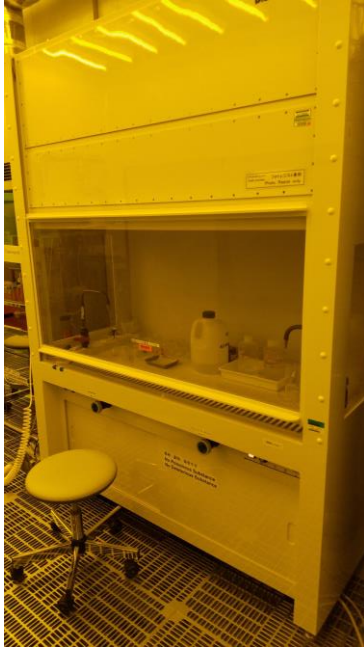


窒化チタン

シリコン基板

アルミニウム

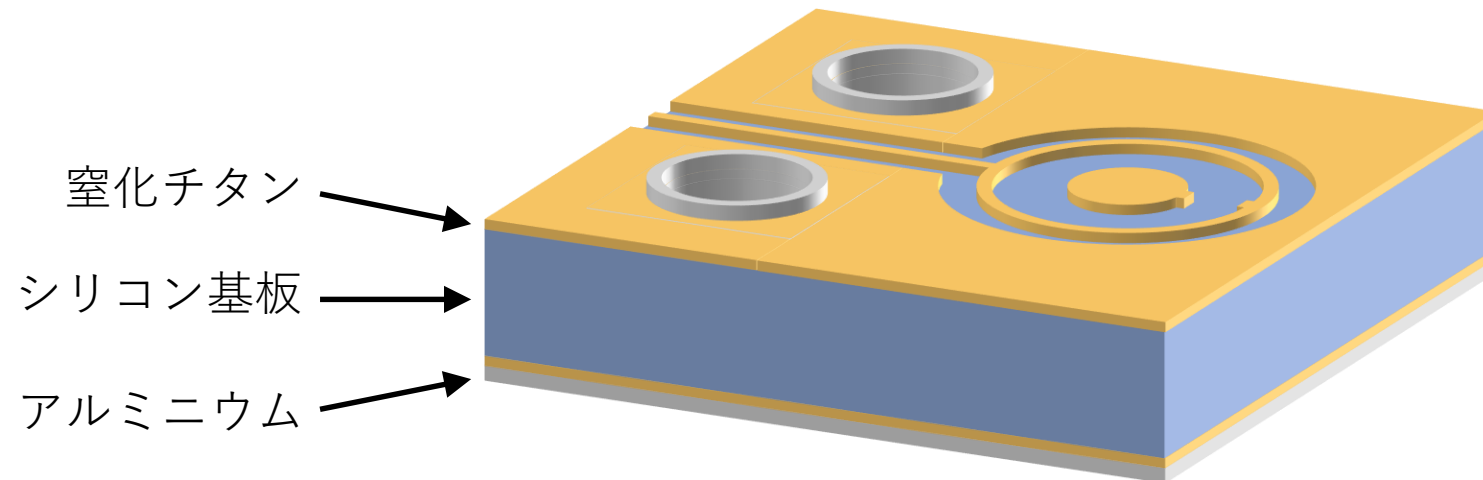
# 量子コンピュータの作り方



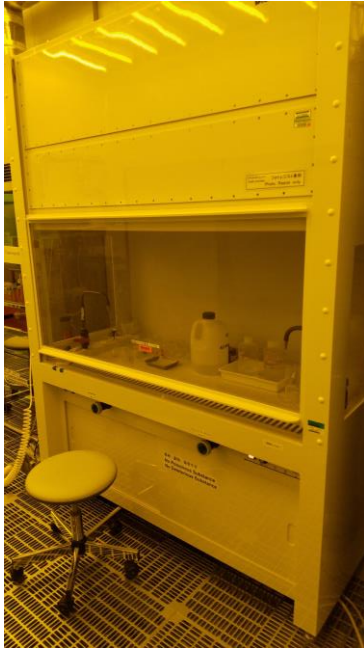
側壁パターン描画と加工



導波路パターン描画と加工



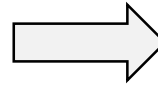
# 量子コンピュータの作り方



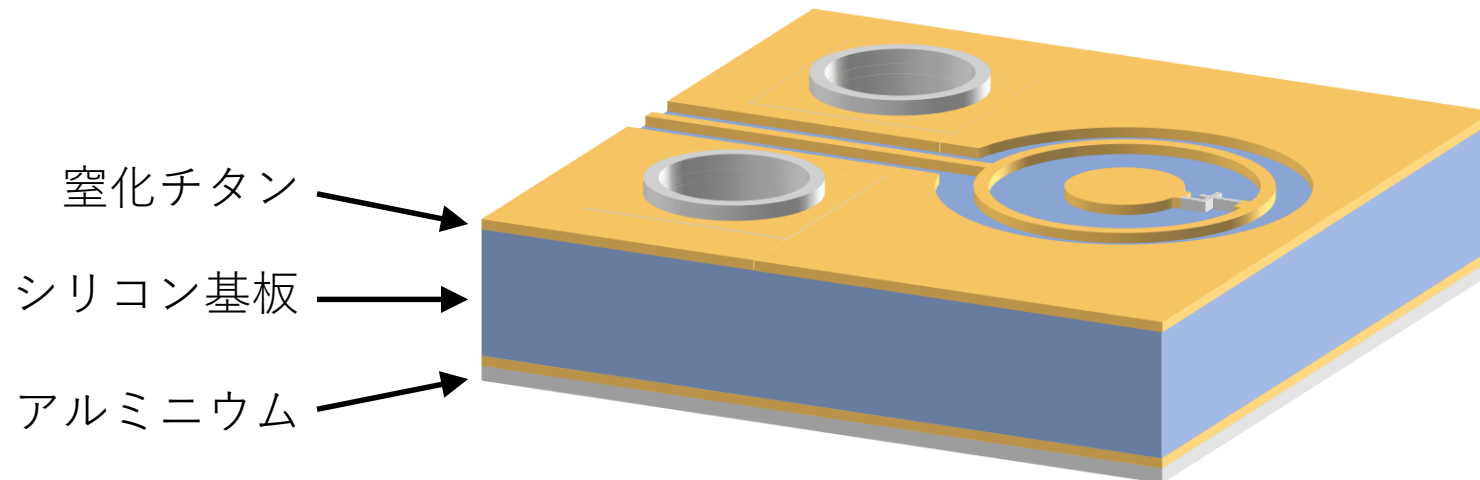
側壁パターン描画と加工



導波路パターン描画と加工

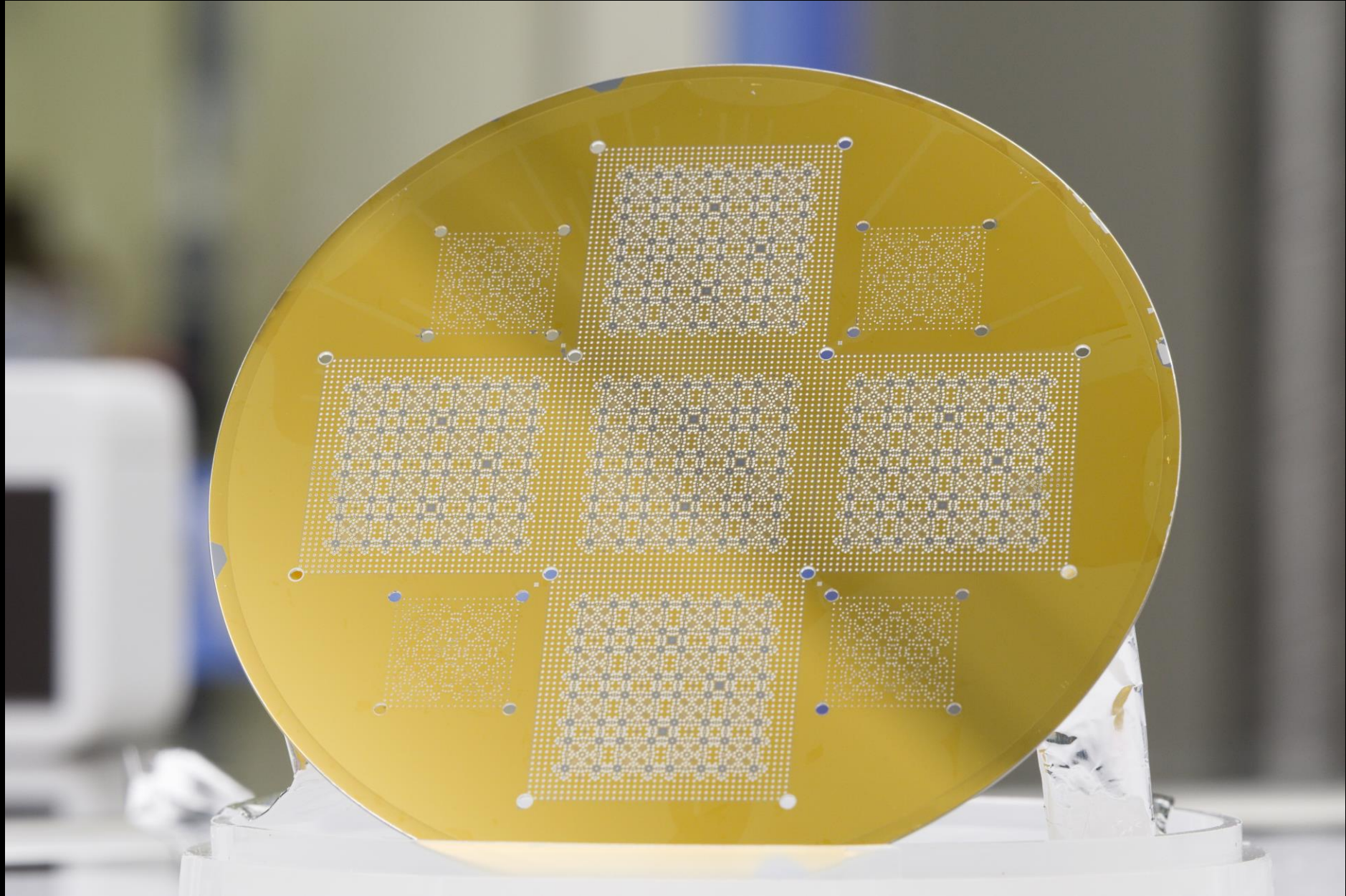


ジョセフソン接合パターン描画と蒸着



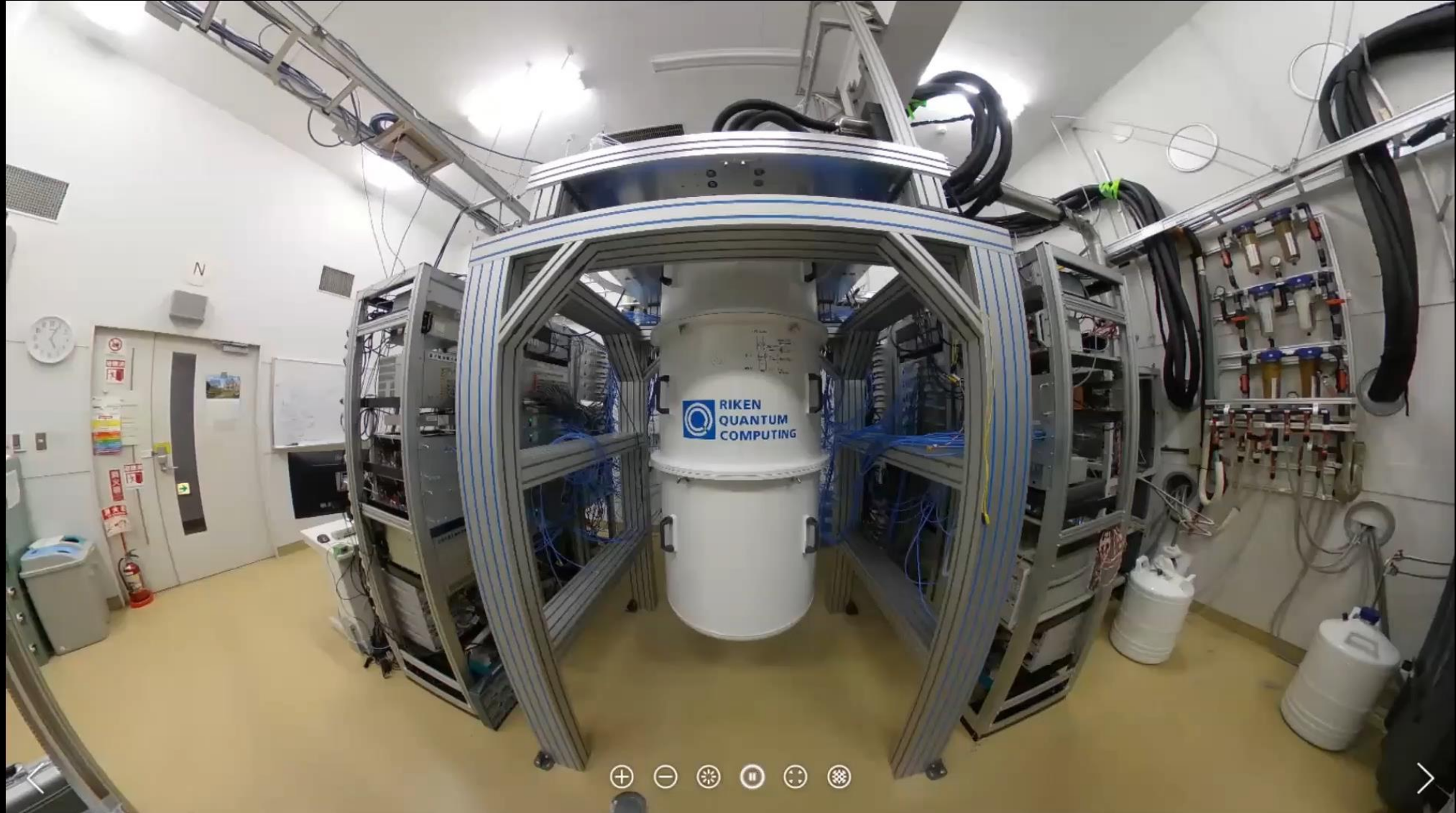


完成



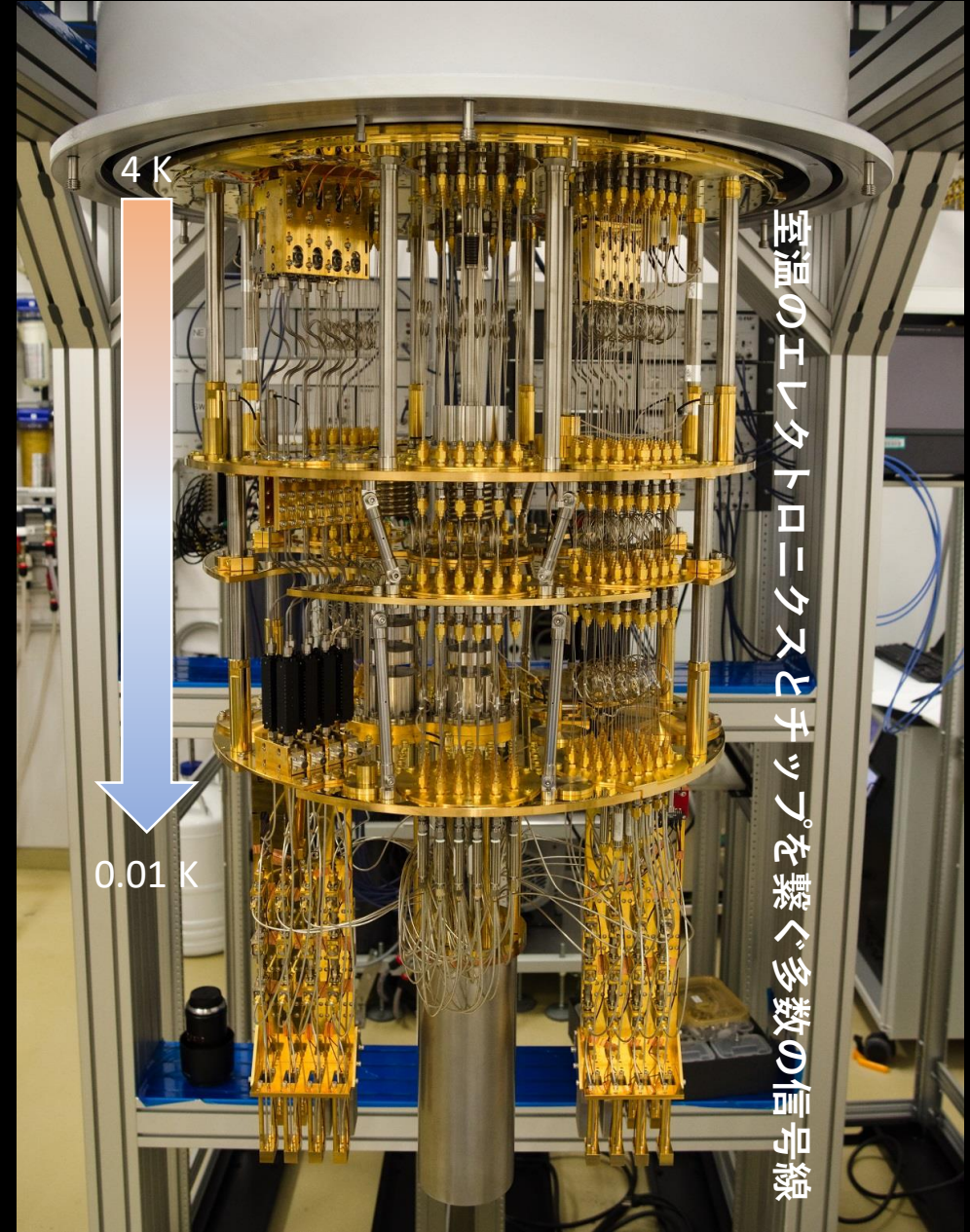
# 量子コンピュータ@理研

冷却装置温度 = 0.01 K (摂氏-273.15度より0.01度高い)  $\leftrightarrow$  エネルギー = 10 GHz = 0.48 K



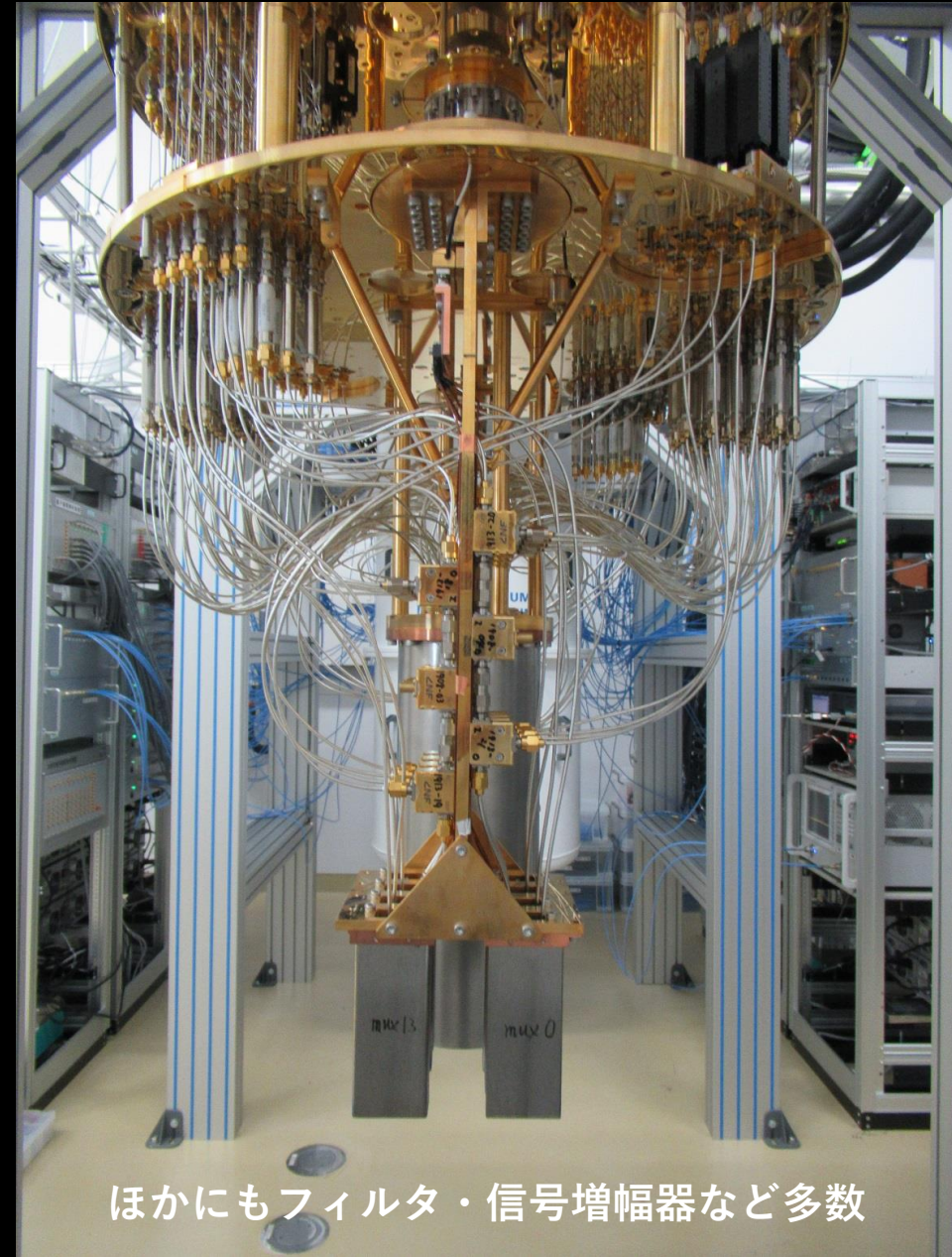
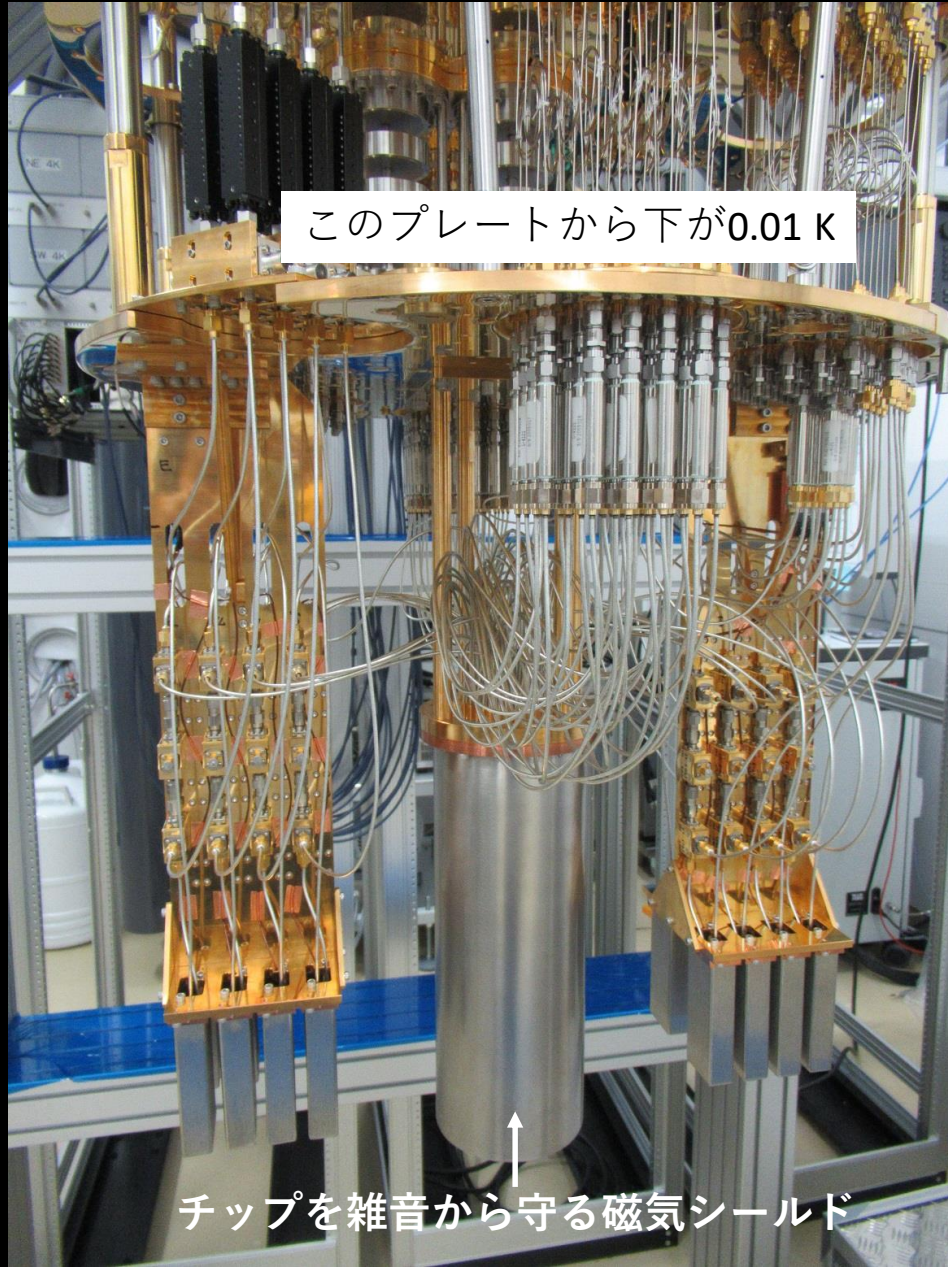


# 量子コンピュータの中身



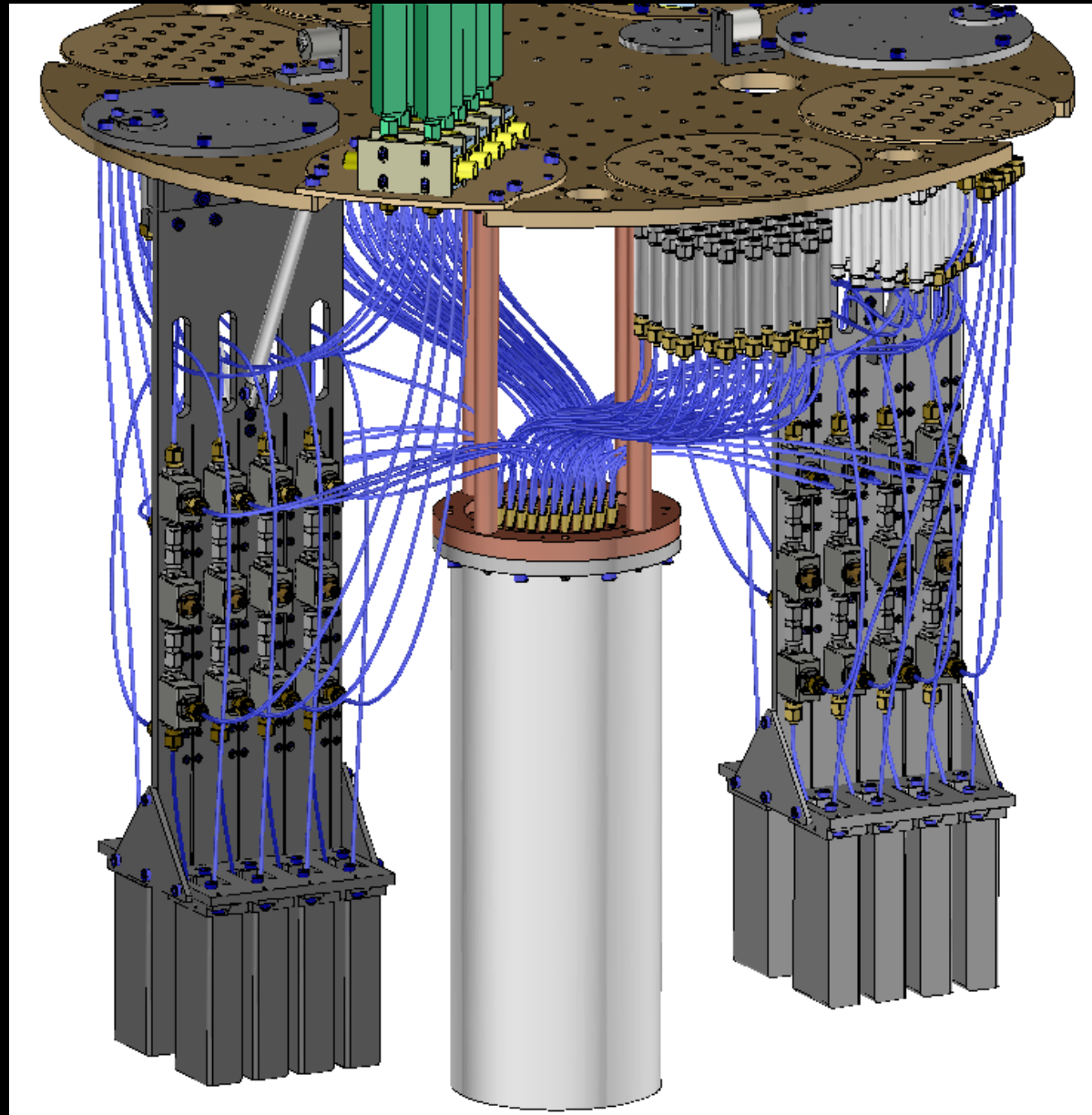


# 量子コンピュータの中身

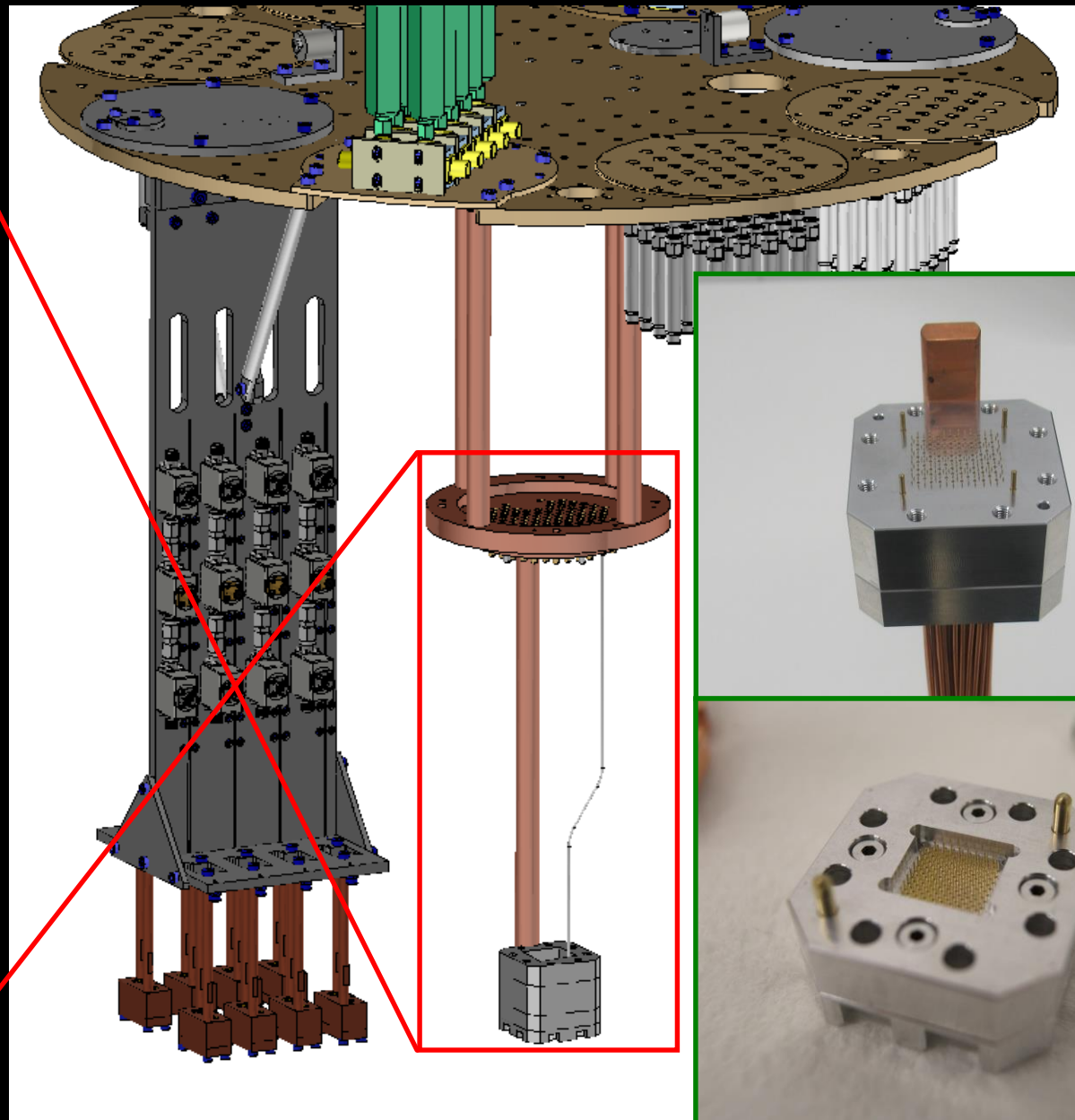




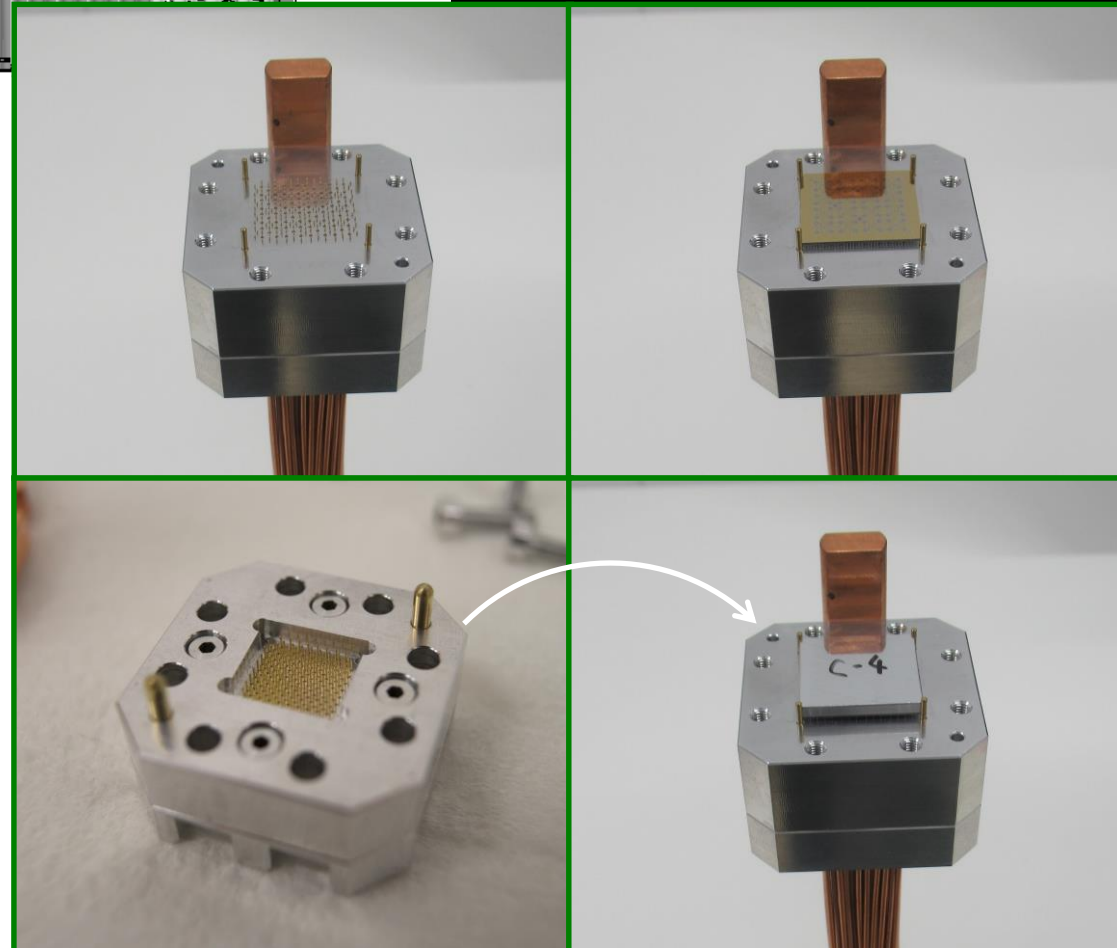
# 量子コンピュータの中身



# 量子コンピュータの中身



チップと信号線が繋がる





# 量子コンピュータの現在地

- 2022年11月に**IBM**が**433量子ビット**プロセッサを発表
- 2025年までに**4000量子ビット超**を目指している

## 物質設計

- まだまだ新規材料開発とまではいかない
- 通常のコンピュータと連携させて計算 → 量子・古典ハイブリッド

## データサイエンス

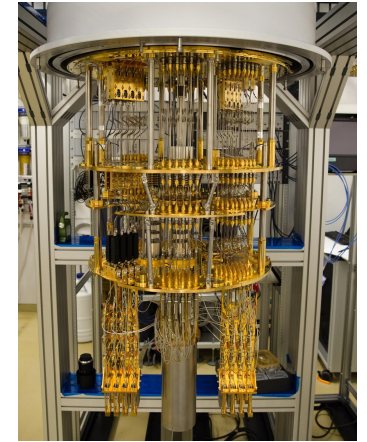
- 最適化問題専用マシンの開発 → 量子アニーリング
- “量子データ”の扱いでは比較的すぐに優位性が出るかもしれない

## セキュリティ

- 100万量子ビット以上のエラー訂正可能な量子コンピュータが必要
- 将来の量子コンピュータでも破られない暗号の開発 → 耐量子セキュリティ

## 理研の取り組み

- トランスフォーマティブ・リサーチ・イノベーション・プラットフォーム(TRIP)
- 量子を含めた研究データの蓄積・統合・活用



# 量子ビット数の拡大に向けて

100万量子ビットチップは単純計算で一辺2.5メートル

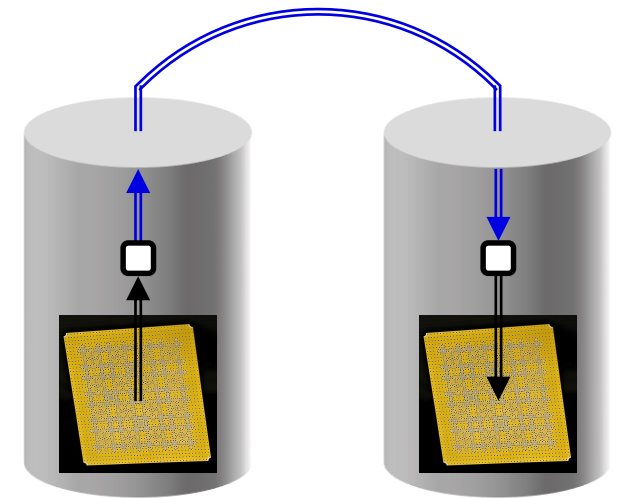
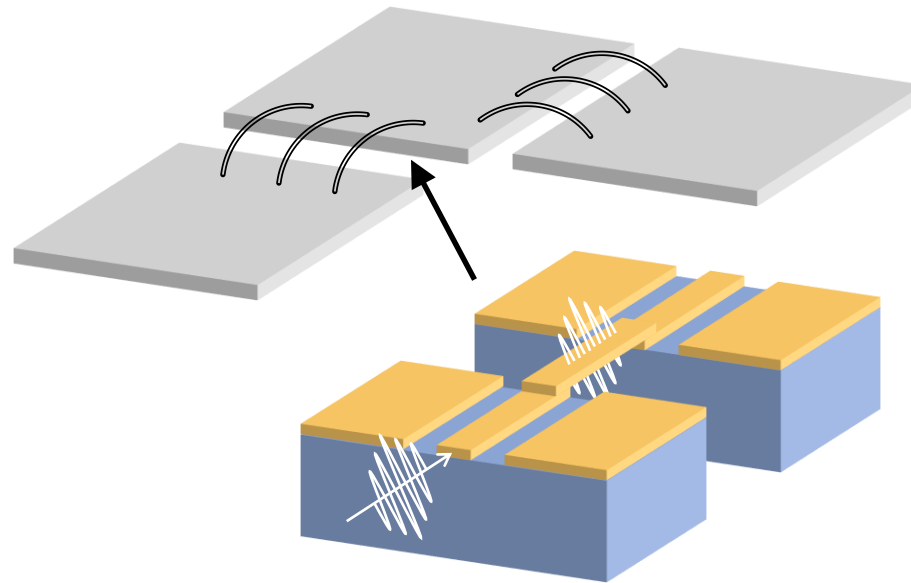
冷却装置の大型化 → 可能だが限界あり

エレクトロニクス的小型化 → デジタル技術の得意分野

冷却装置間通信 → 量子メディア変換



チップの分割 → マイクロ波伝送技術



マイクロ波量子情報

量子ビットを実現する新たな材料の探索  
→ 勝本先生のご講演