

# 素粒子物理と量子コンピューティング

素粒子物理国際研究センター  
寺師 弘二



# 量子コンピュータとは？

量子力学に従って振る舞う「モノ」を直接使って計算する機械

- ▶ 普通のコンピュータと同じ使い方をするものではない（少なくとも今は）
- ▶ 今の量子コンピュータは、量子力学の物理実験装置に近い

計算をするのは、何らかの「量子系」

- ▶ 特定の始状態に初期化できる
- ▶ 何度でも状態を変換することができる
- ▶ 終状態を読み出すことができる

このような性質を持つ量子系であれば、なんでも良い

- ▶ スピンの上向きと下向き、光の縦偏向と横偏向、時計回りと反時計回りの電流など



# 量子ビット = 量子情報を運ぶ基本単位

2つの基底（例えば $|0\rangle$ と $|1\rangle$ ）で表現できる量子系

$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

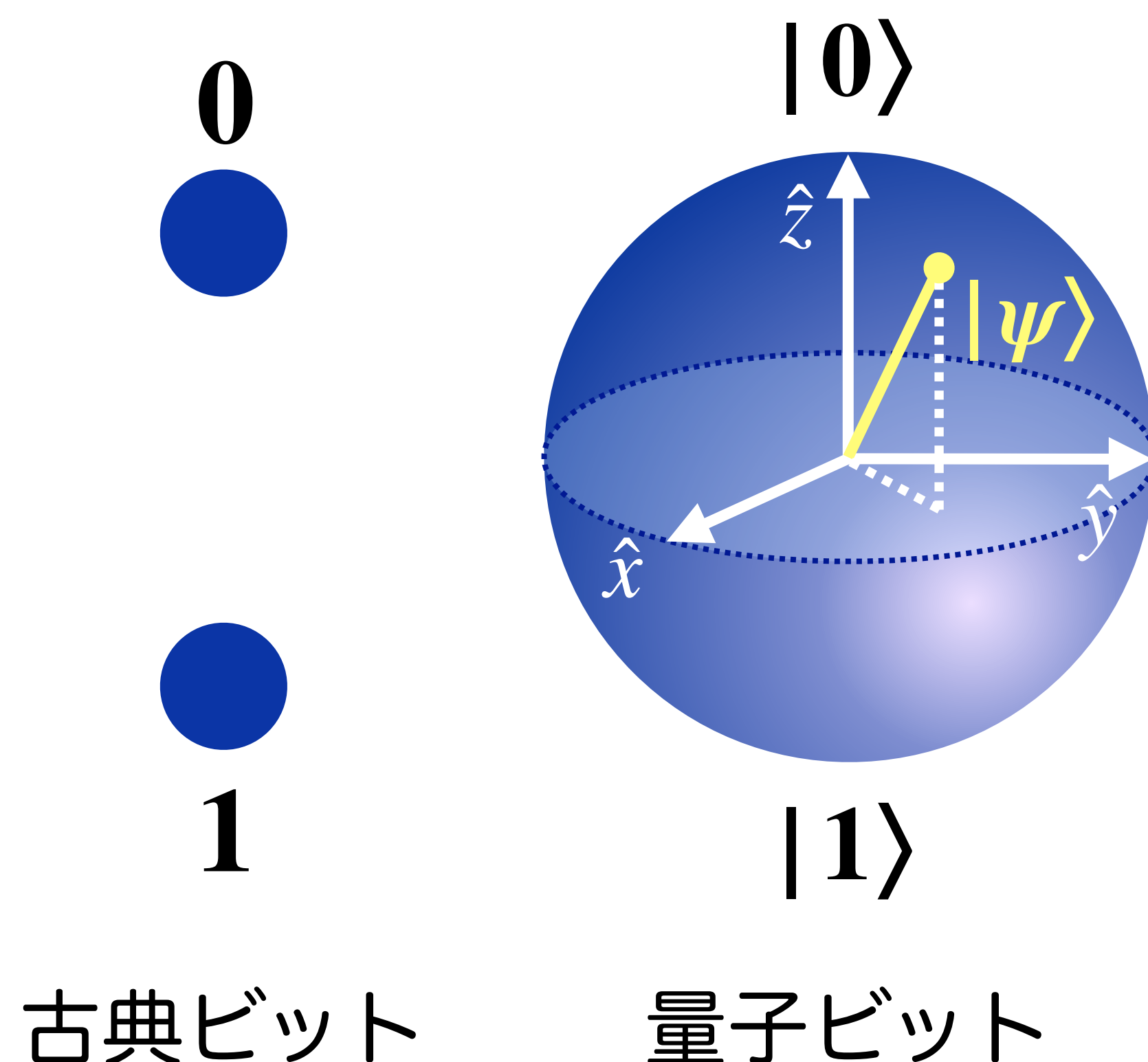
一般的な1量子ビットの状態

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$$

$\alpha, \beta$  : 確率振幅（複素数）

- 状態 $|\psi\rangle$ を測定すると、確率 $|\alpha|^2$ で0、 $|\beta|^2$ で1を得る
- $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ なので、全部で3つの自由度

状態変換はユニタリー演算（=行列計算）で行う

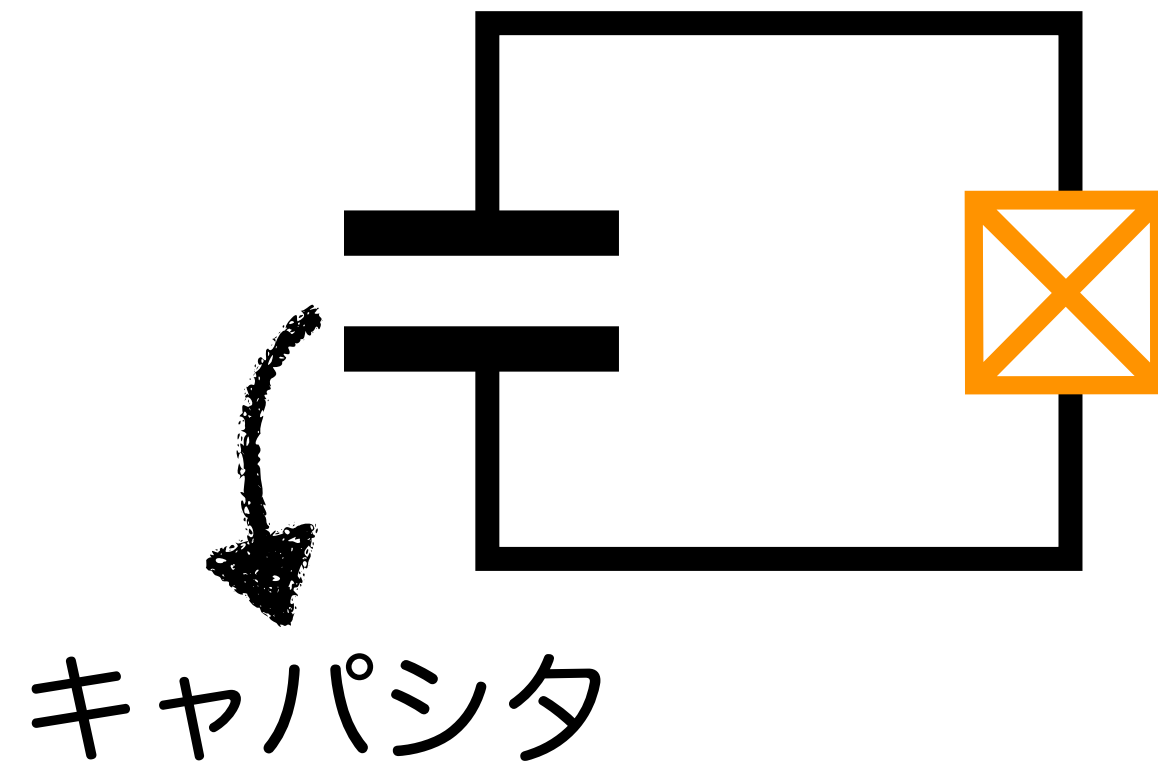


# 量子ビット = 量子情報を運ぶ基本単位

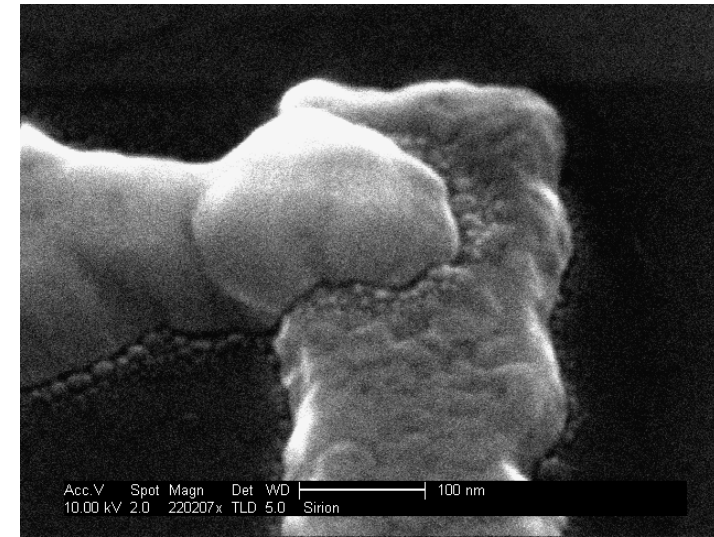
## 量子ビットの実体

### 超伝導量子ビット

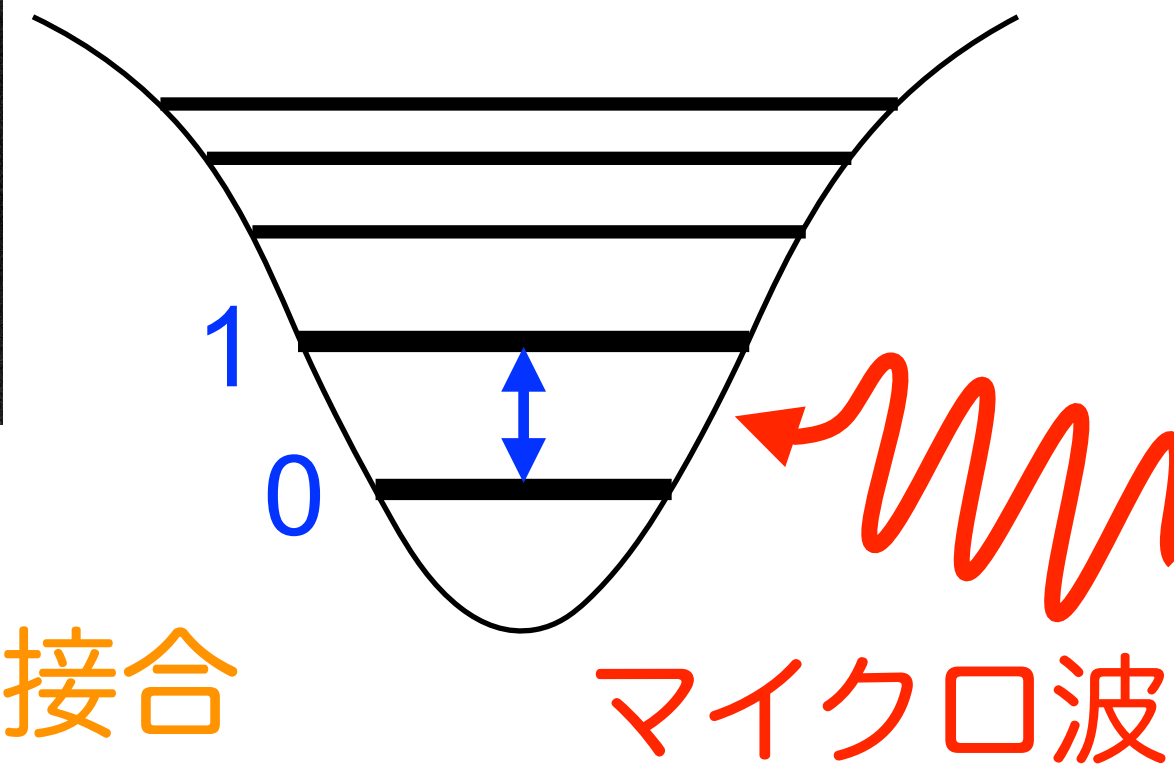
大きさ  $\sim 10^{-3}$  m



### “人工”原子



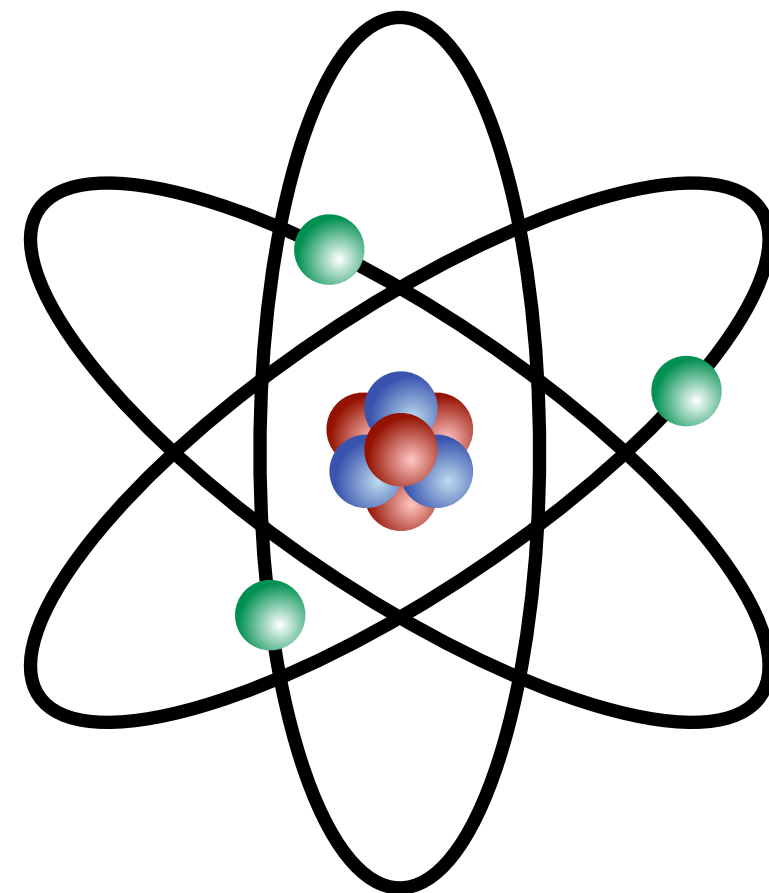
ジョセフソン接合  
(非線形インダクタ)



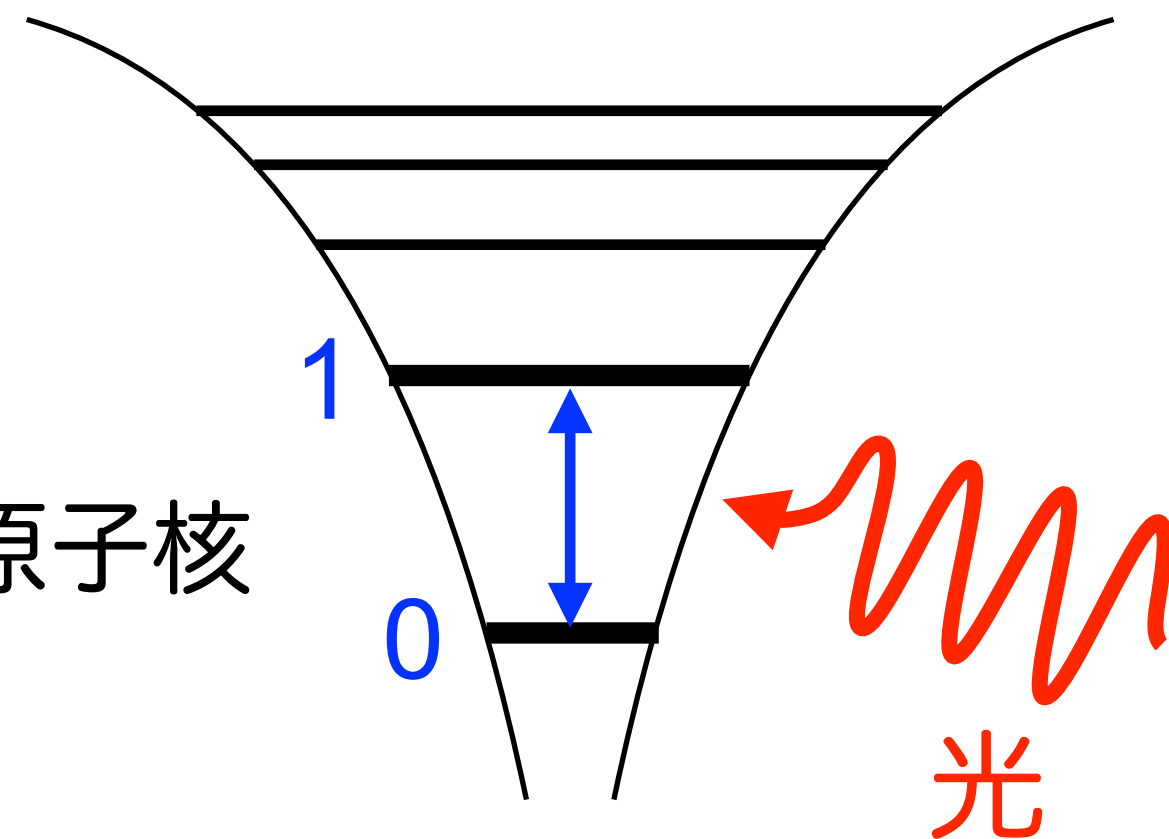
マイクロ波

### 原子

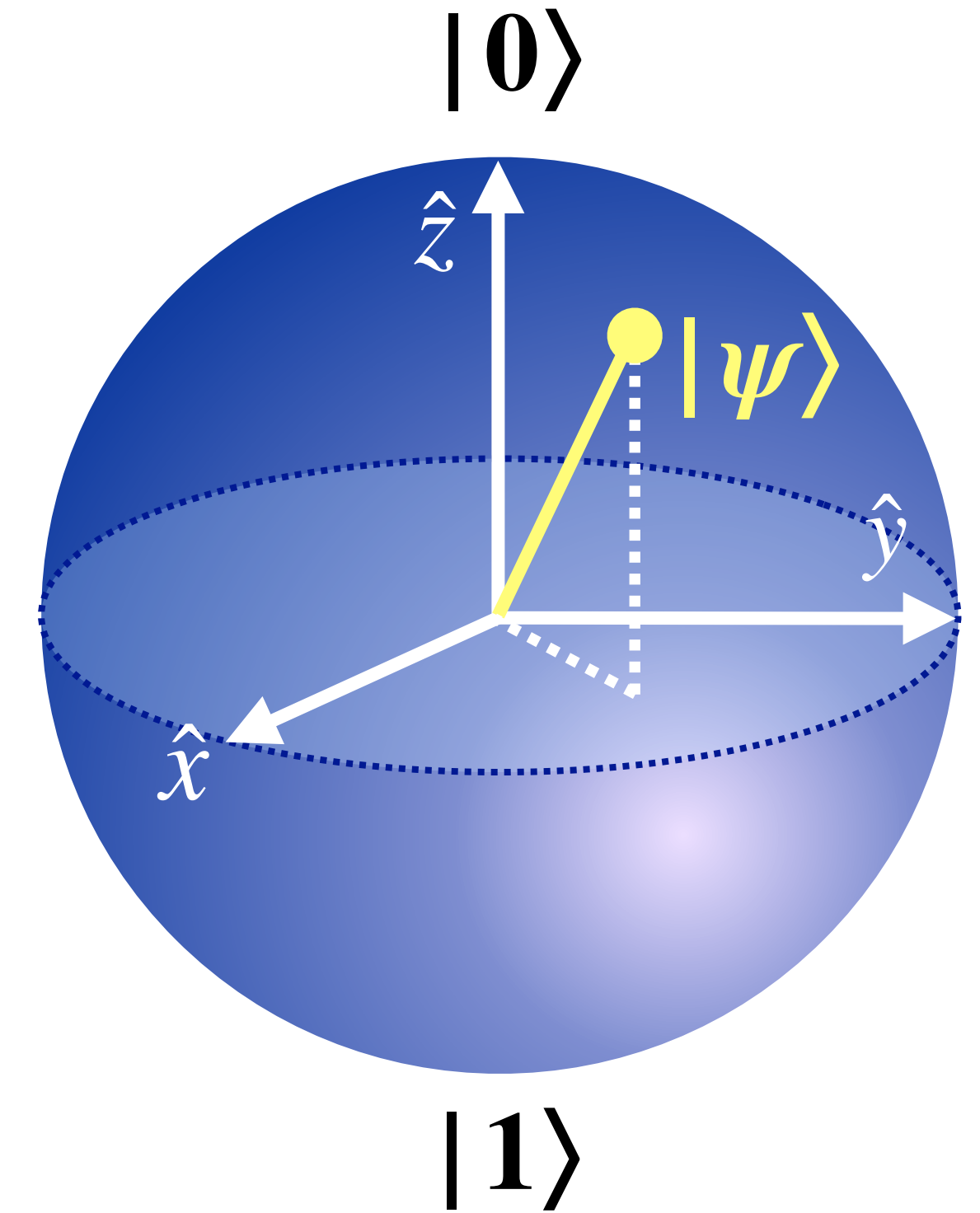
大きさ  $\sim 10^{-10}$  m



● 陽子 } 原子核  
● 中性子 }  
● 電子



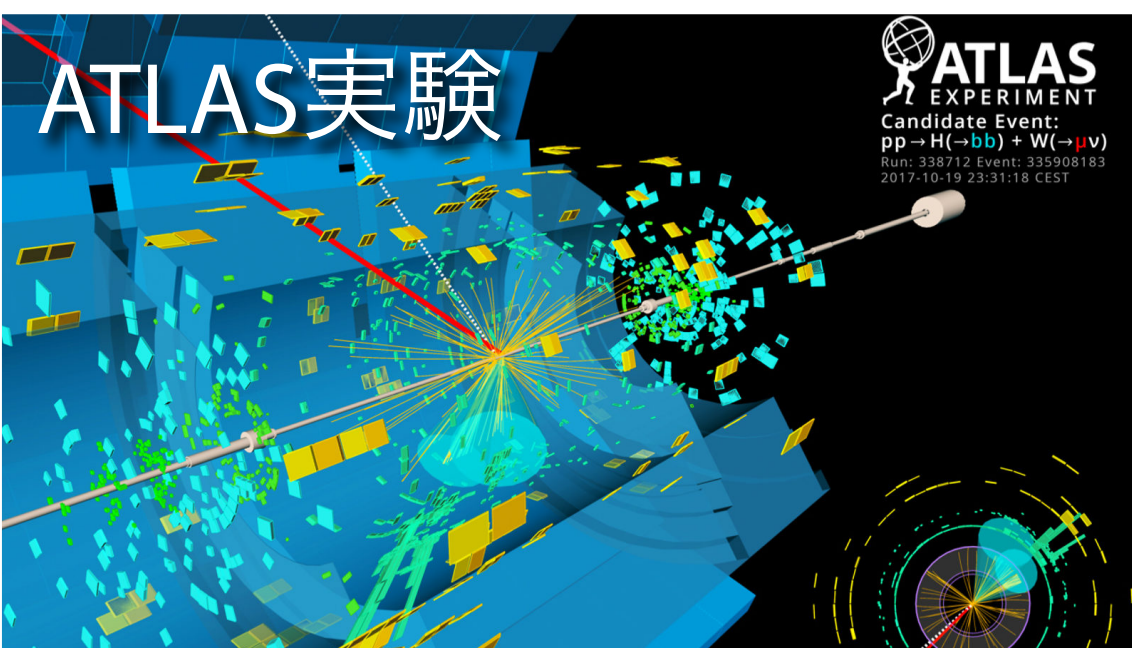
光



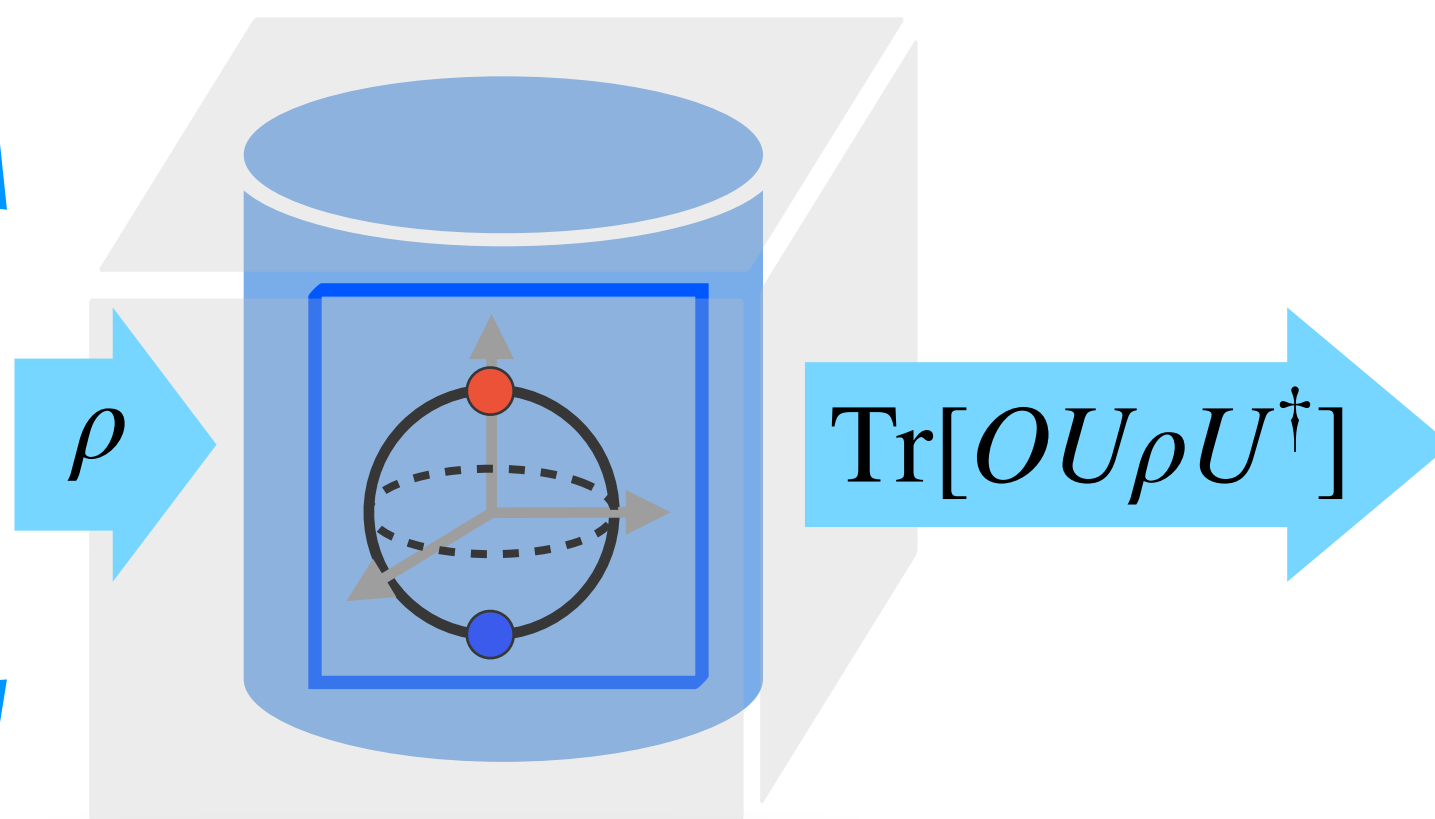
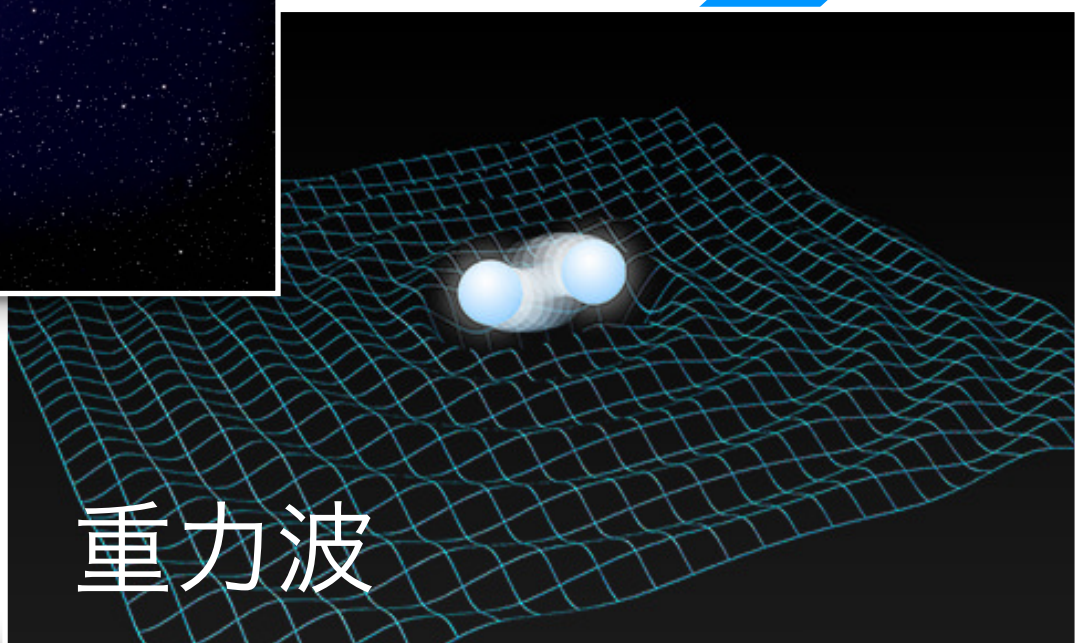
他にもいろいろあります



# なぜ量子コンピュータを考えるのか？



量子を使った素粒子・宇宙の研究

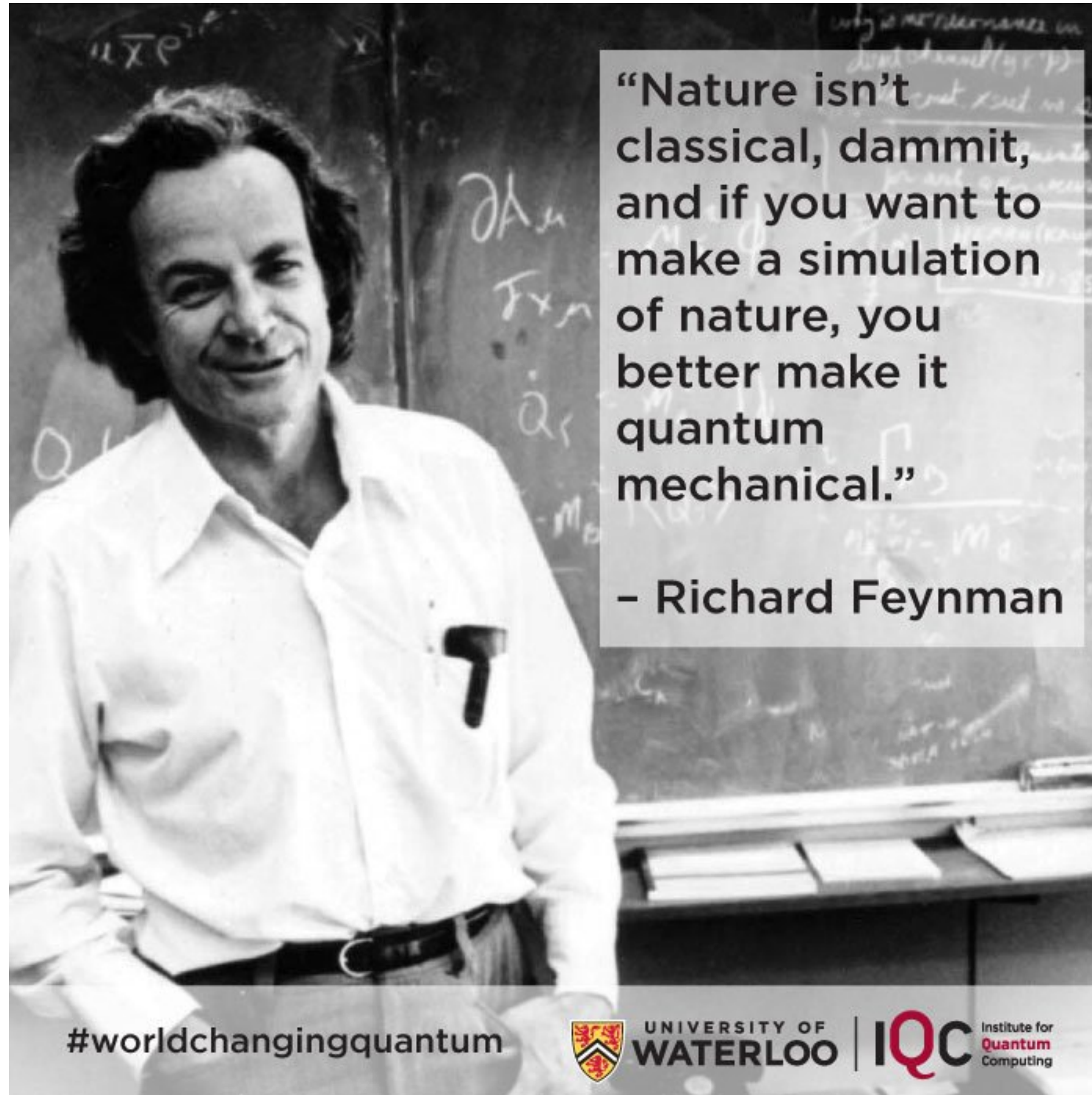


- ▶ 新粒子・暗黒物質の探索
- ▶ 素粒子の場の理論の量子シミュレーション
- ▶ 量子重力の理解



# 量子ダイナミクスシミュレーション

量子多体系のシミュレーションは、**量子コンピュータ応用の本丸**の一つ



“Nature isn’t classical, dammit, and if you want to make a simulation of nature, you better make it quantum mechanical.”

- Richard Feynman

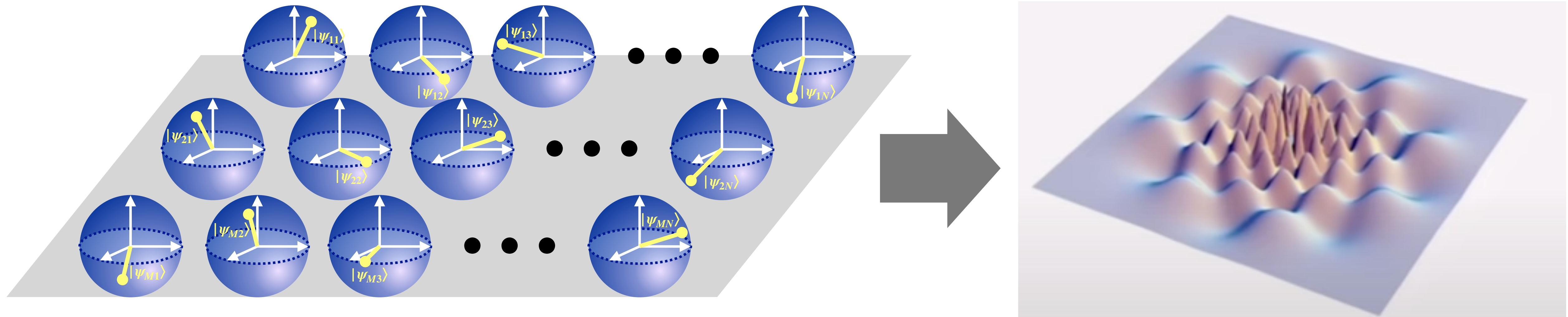
“量子シミュレーションをしたいなら、量子力学的な計算をする方が良いでしょう”

— ファインマン (1980年ごろ)



# 量子ダイナミクスシミュレーション

量子多体系のシミュレーションは、**量子コンピュータ応用の本丸**の一つ



量子コンピュータを使うことで、量子系の波動関数を表現し操作できる

➡ 素粒子理論を記述するゲージ場の粒子をシミュレートできる

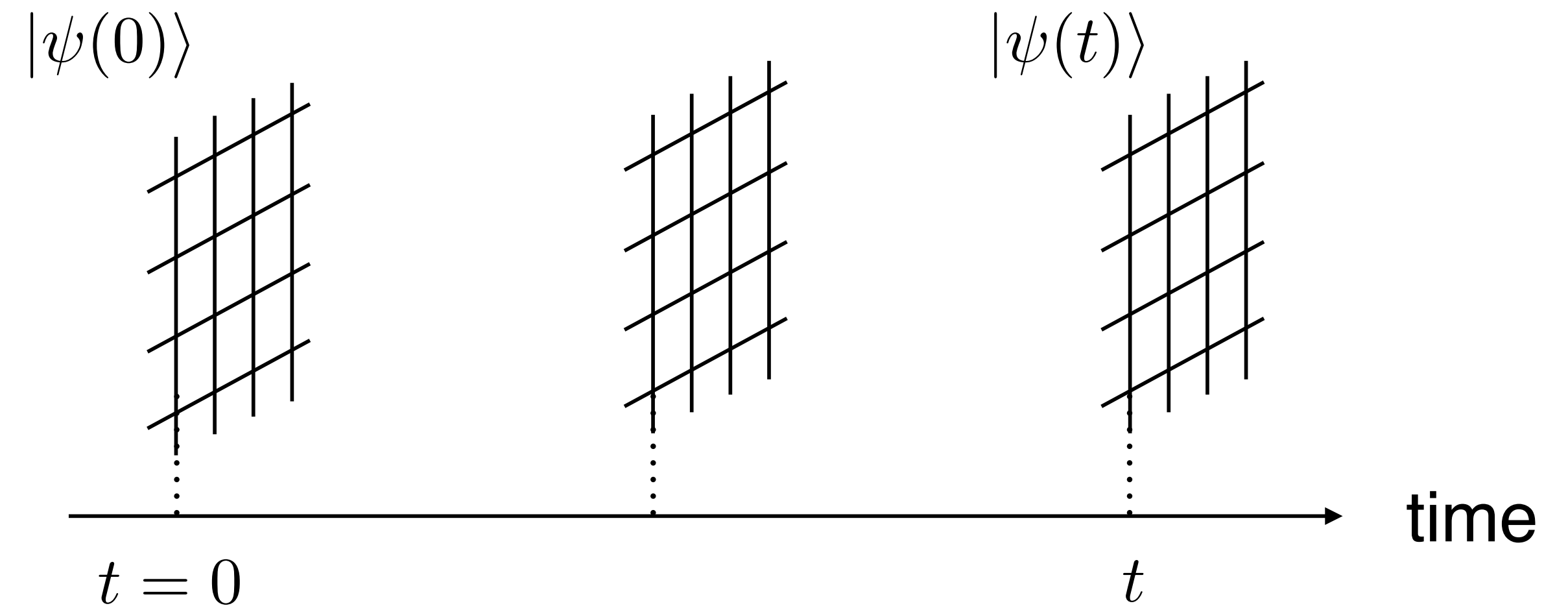
大きな系に対して、古典計算機よりも効率的にシミュレートできる可能性

# 量子ダイナミクスシミュレーション

量子多体系のシミュレーションは、**量子コンピュータ応用の本丸の一つ**

場の理論のハミルトニアンシミュレーション

- ▶ 空間を離散化
- ▶ フェルミオンをスピン系にマッピング
- ▶ ハミルトニアンに従って状態を時間発展



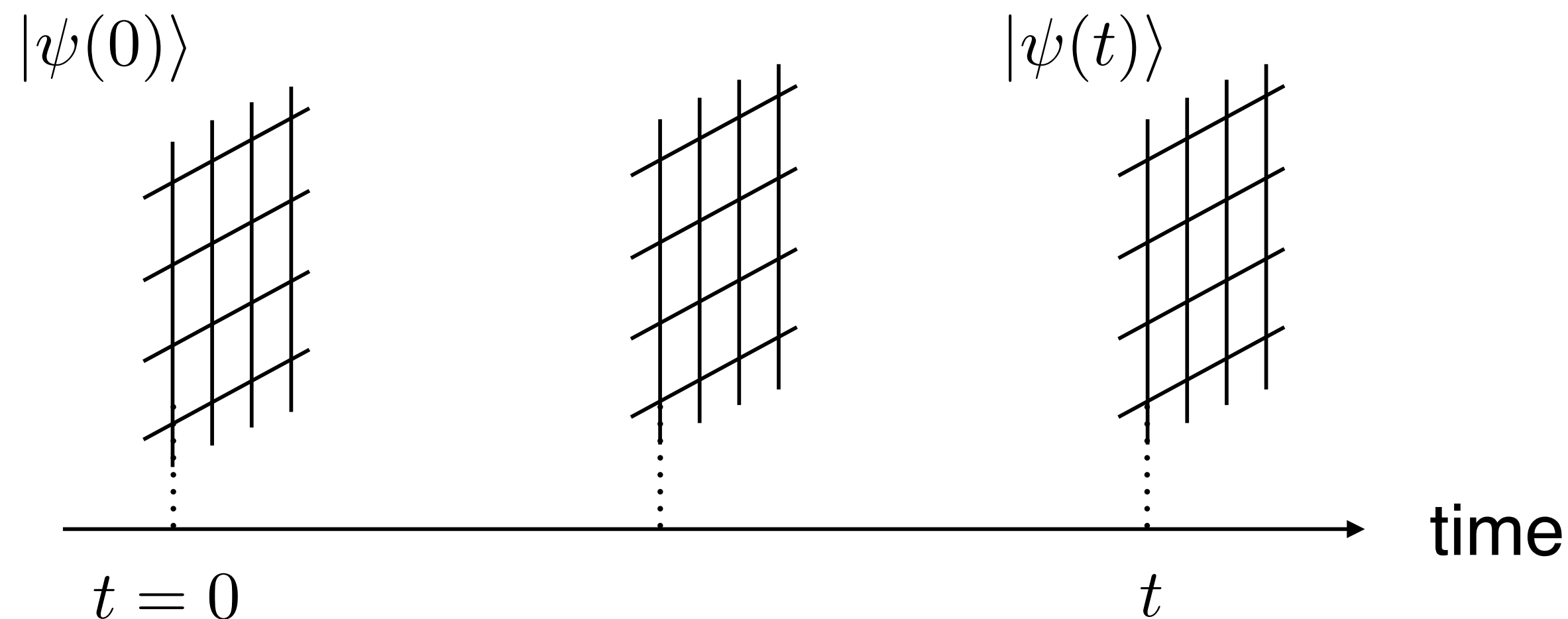


# 量子ダイナミクスシミュレーション

量子多体系のシミュレーションは、**量子コンピュータ応用の本丸の一つ**

場の理論のハミルトニアンシミュレーション

- ▶ 空間を離散化
- ▶ フェルミオンをスピン系にマッピング
- ▶ ハミルトニアンに従って状態を時間発展



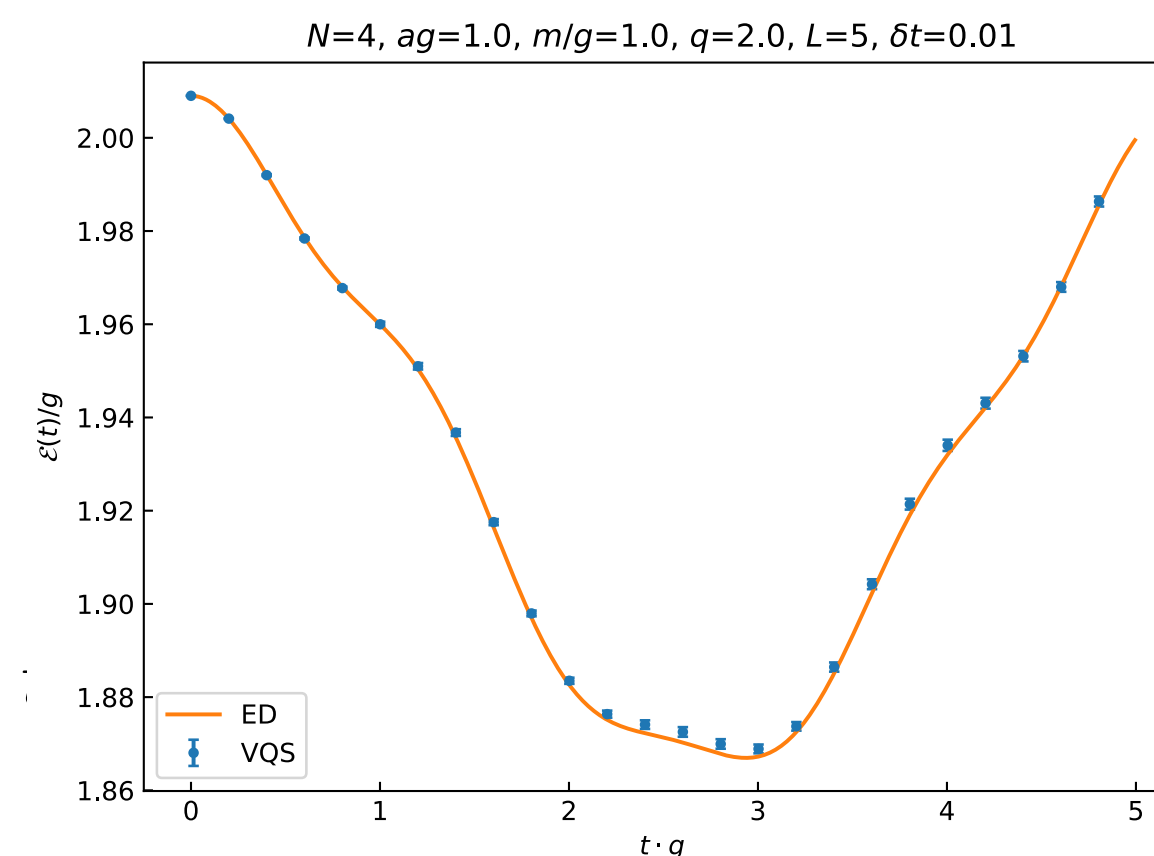
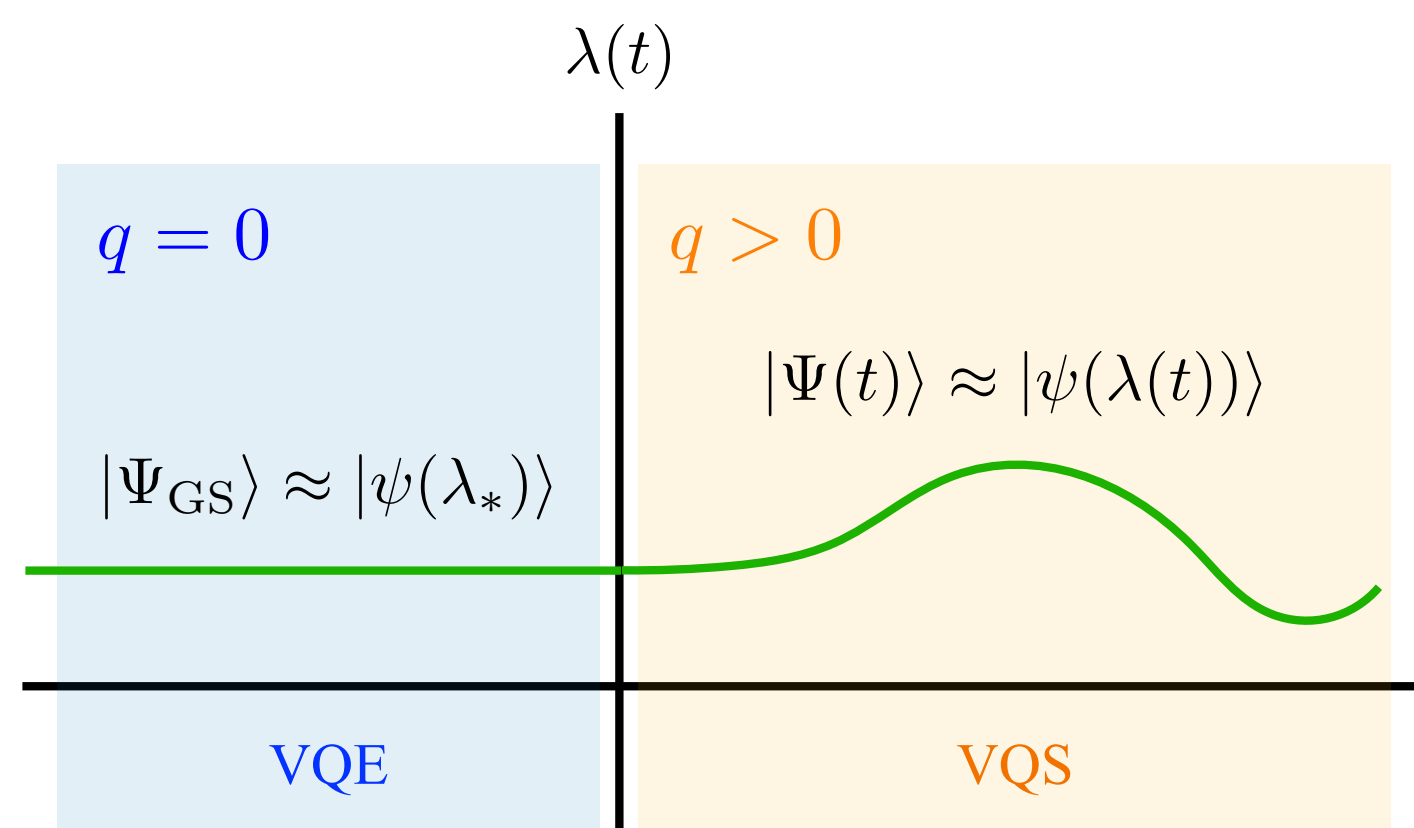
現在は1 + 1や1 + 2次元など、シンプルな系の研究が中心

## 1 + 1d U(1)ゲージ理論 (シュウィンガー模型)

- ▶ スクリーニング/閉じ込め
- ▶ **トポロジカル項**

$$H = J \sum_{j=0}^{N-2} \left( \sum_{k=0}^j \frac{Z_k + (-1)^k \left( \frac{\theta}{2\pi} \right)}{2} \right)^2 + \frac{\omega}{2} \sum_{j=0}^{N-2} (X_j X_{j+1} + Y_j Y_{j+1}) + \frac{m}{2} \sum_{j=0}^{N-2} (-1)^j Z_j$$

L. Nagano et al., [arXiv:2302.10933](https://arxiv.org/abs/2302.10933)

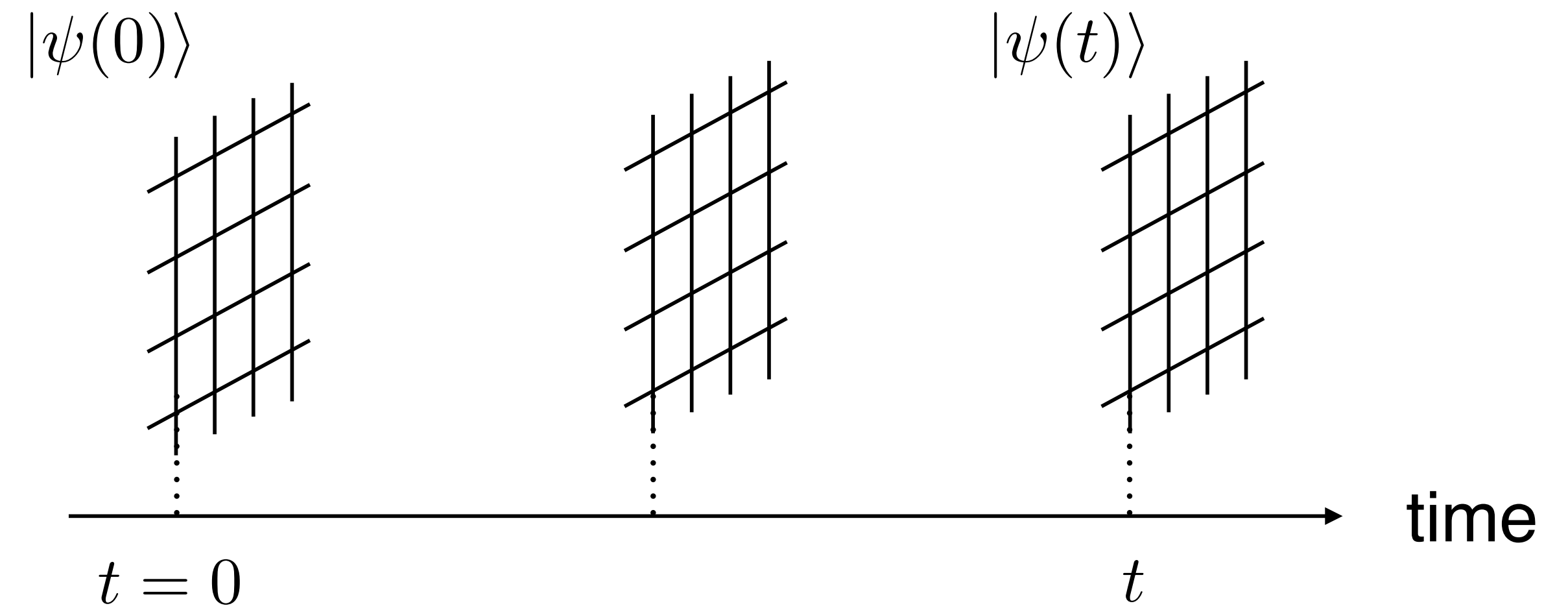


# 量子ダイナミクスシミュレーション

量子多体系のシミュレーションは、**量子コンピュータ応用の本丸の一つ**

場の理論のハミルトニアンシミュレーション

- ▶ 空間を離散化
- ▶ フェルミオンをスピン系にマッピング
- ▶ ハミルトニアンに従って状態を時間発展



現在は  $1+1$  や  $1+2$  次元など、シンプルな系の研究が中心

- ➡ 高次元系への拡張が課題
- まず  $1+2$  次元 QED の研究へ
- 将来的には、 $1+3$  次元の QCD へ

高エネルギー物理への応用

- ▶ 初期状態の生成 (入射粒子, 波束)
- ▶ ハミルトニアン発展 (散乱)
- ▶ 測定

➡ 指数的な高速化を期待

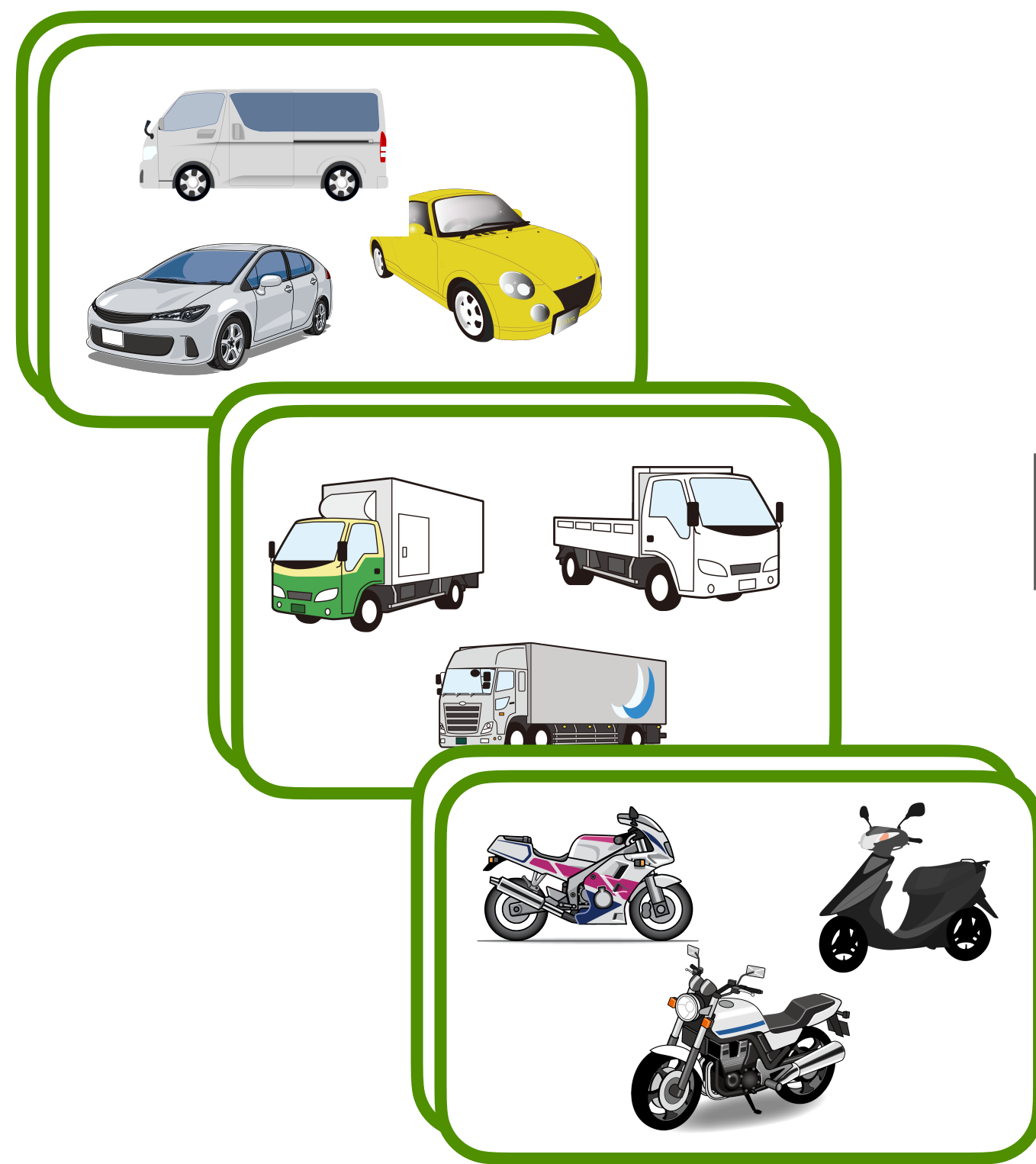


# 量子機械学習

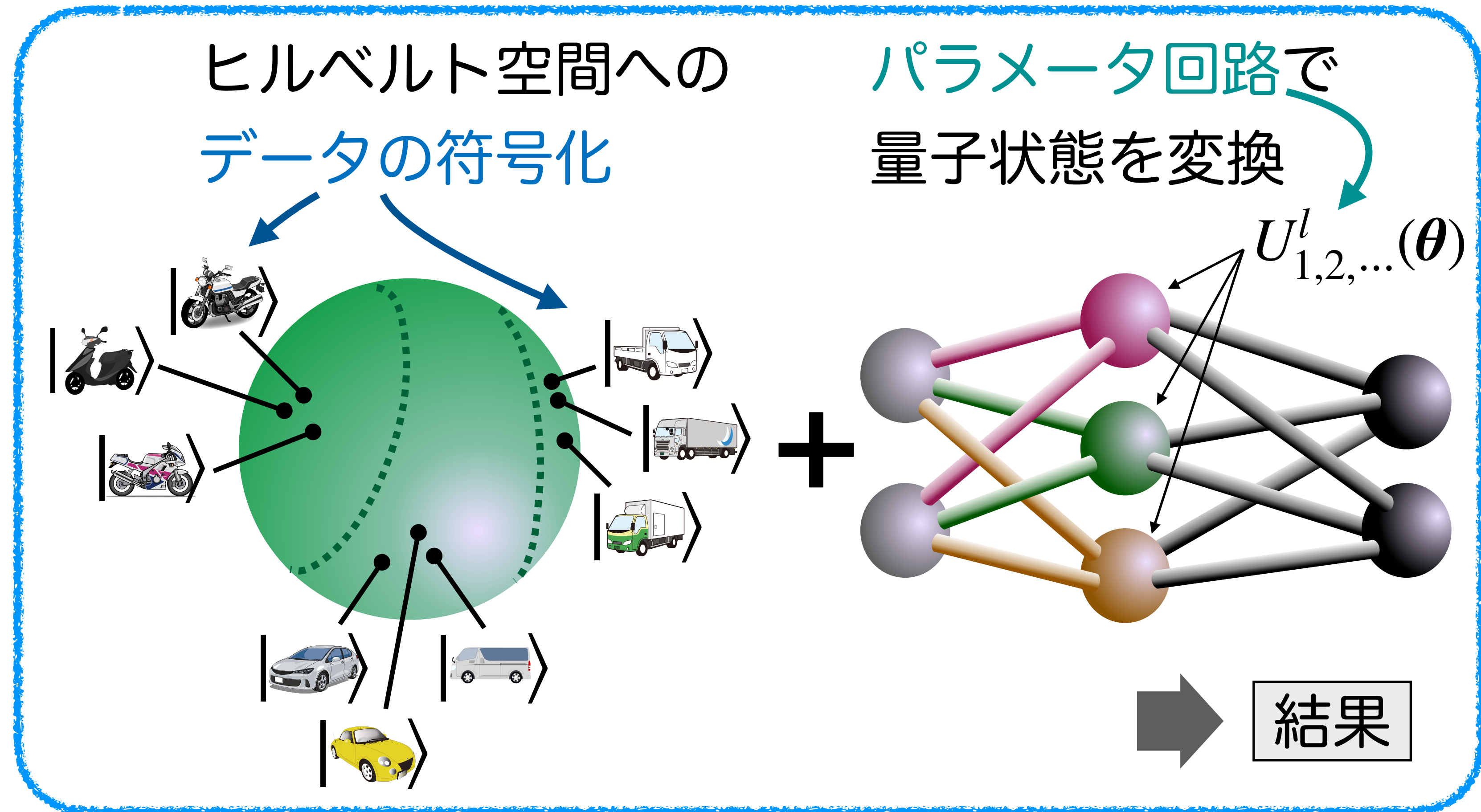
機械学習：データ  $\{x, y\}$  が与えられた時、 $\{x, y\}$  間の関係を求めたい

ある関数  $f(x_i, w)$  の出力  $\tilde{y}_i$  が  $\tilde{y}_i \simeq y_i$  となるような関数  $f$  とパラメータ  $w$  を決定する ➡ 学習

例えば画像分類の場合



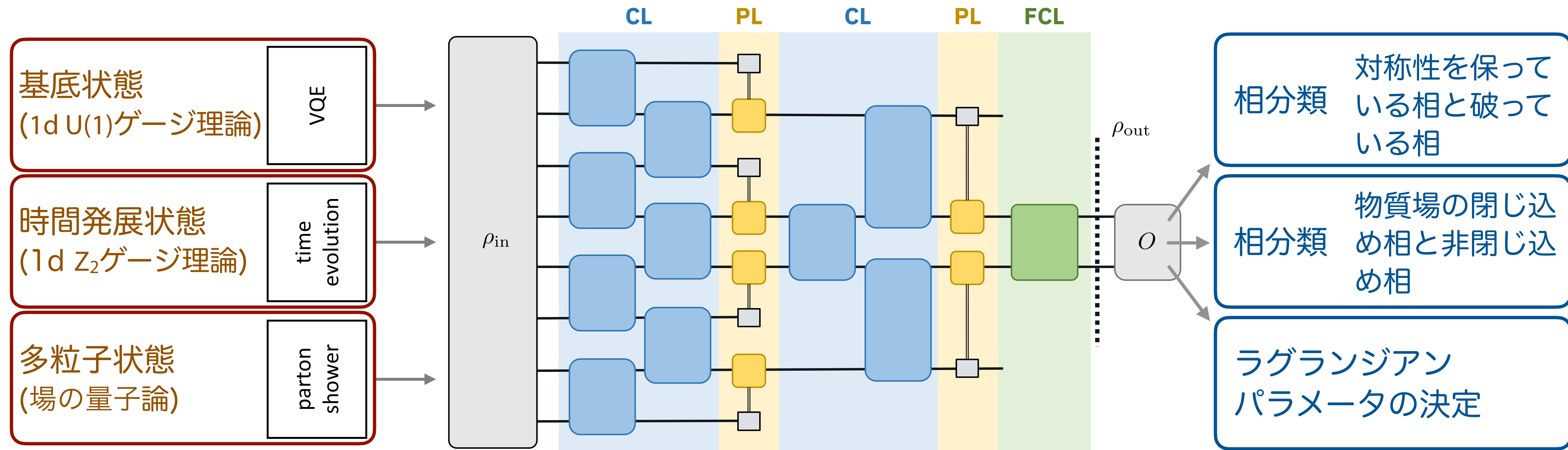
## 量子ニューラルネットワーク



# 量子シミュレーション+量子機械学習

物理系の量子状態(波動関数)を入力データとして、  
その性質を量子コンピュータで学習する

➡ 量子データの学習によって、  
非自明な予測が可能か？



古典計算に対する汎化性や計算コストでの優位性？

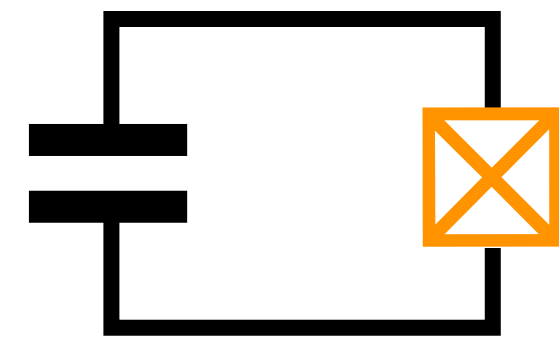


# 超伝導トランズモンの開発

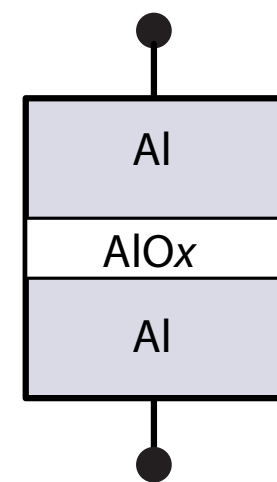
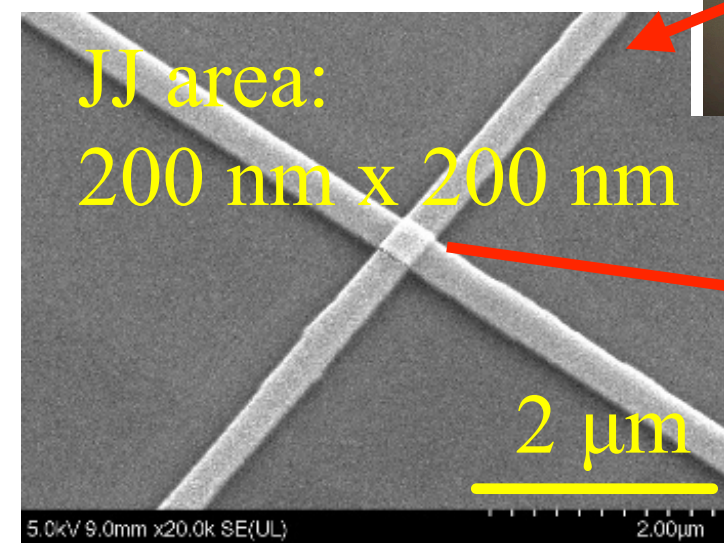
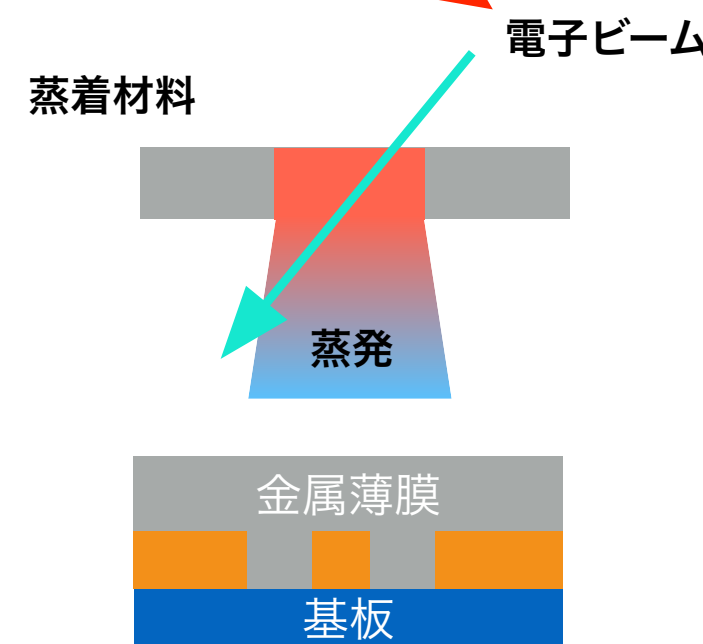
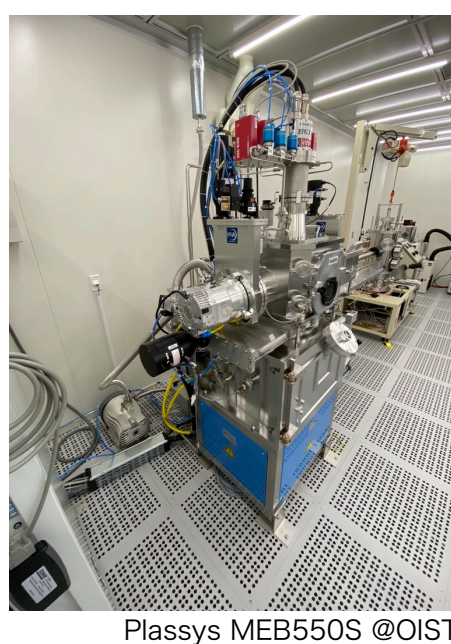
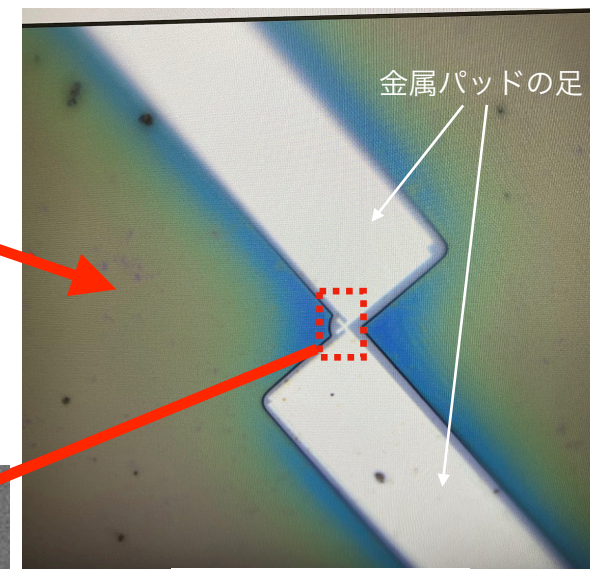
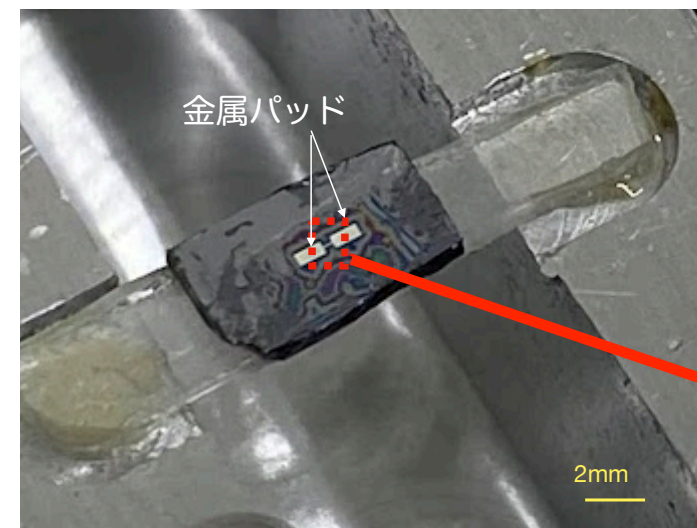
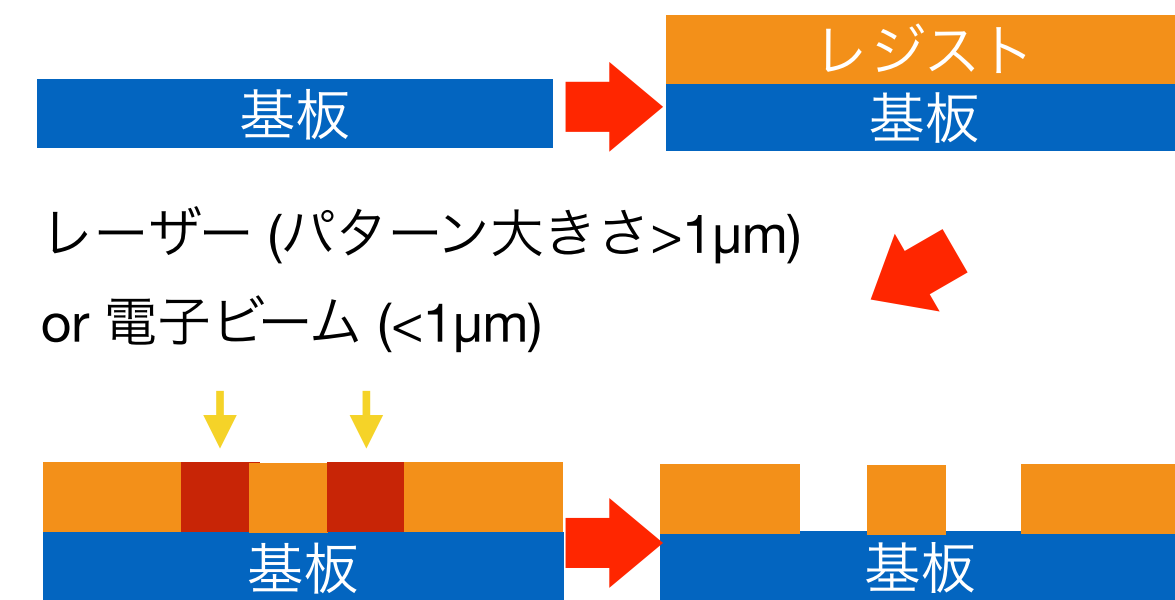
多準位系を用いることで、量子計算能力は指数的に向上する可能性がある

## 3準位(Qutrit)トランズモンとマルチジャンクション量子ビットの研究

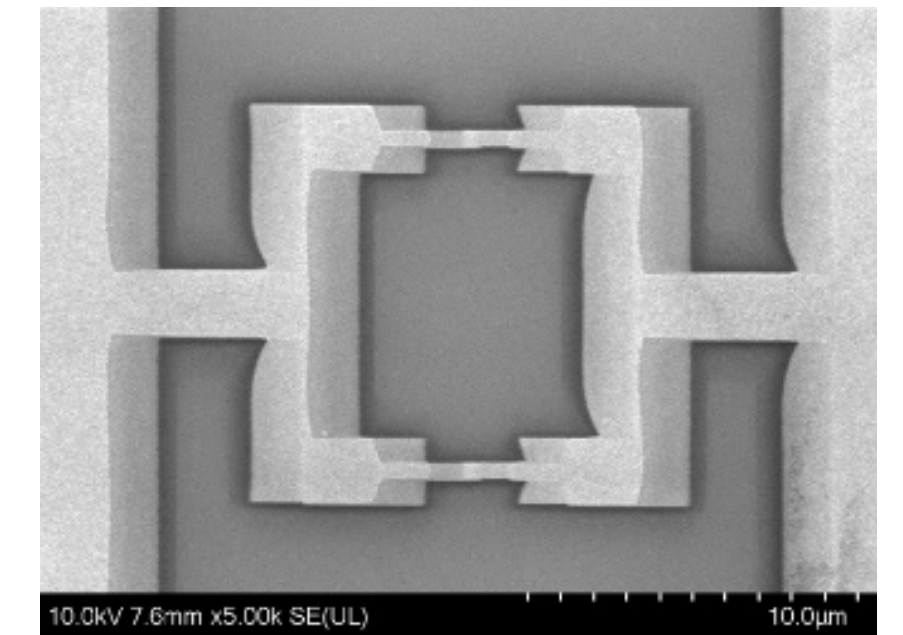
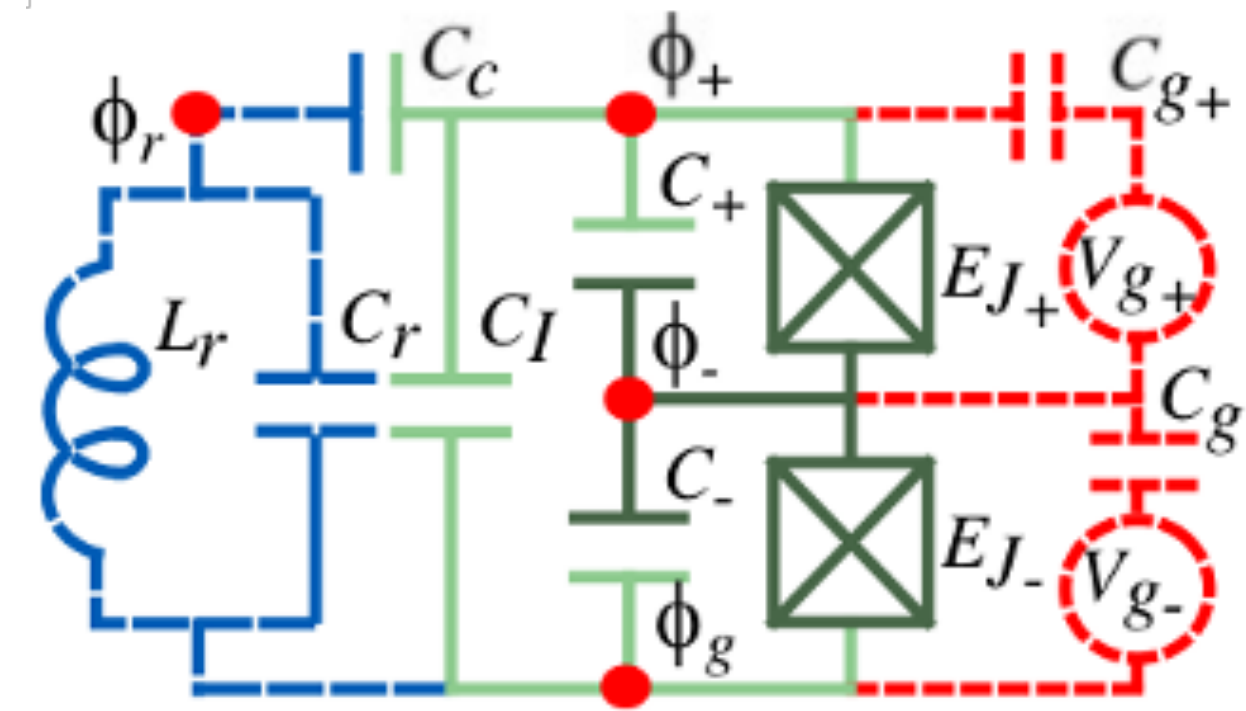
### ジョセフソン接合の製作



### ICEPP製作の超伝導量子ビット



### マルチジャンクション量子ビット

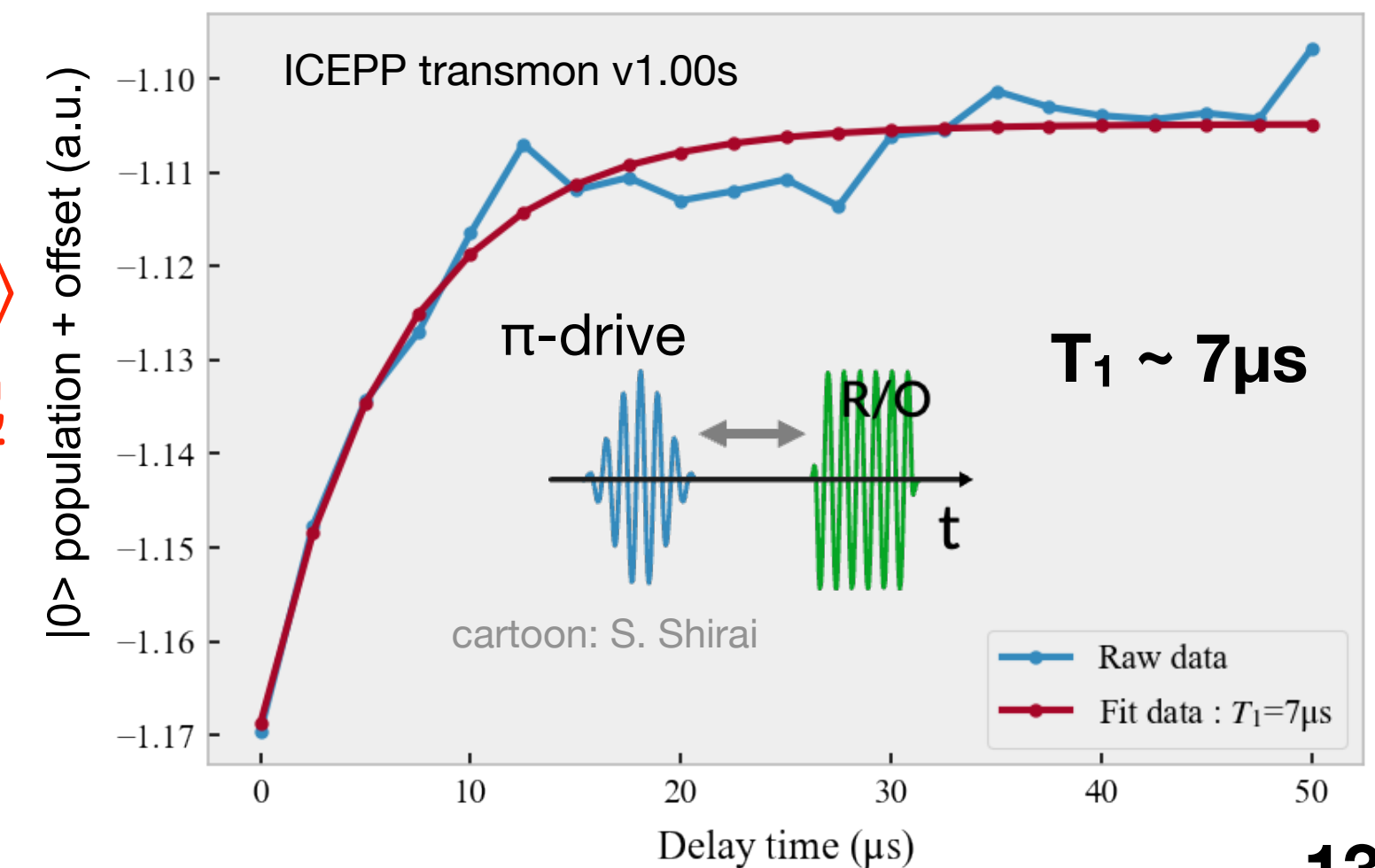


### 量子ビットの特性測定

$T_1$ : 縦緩和( $|1\rangle \rightarrow |0\rangle$  への脱励起)が起こるまでの時間

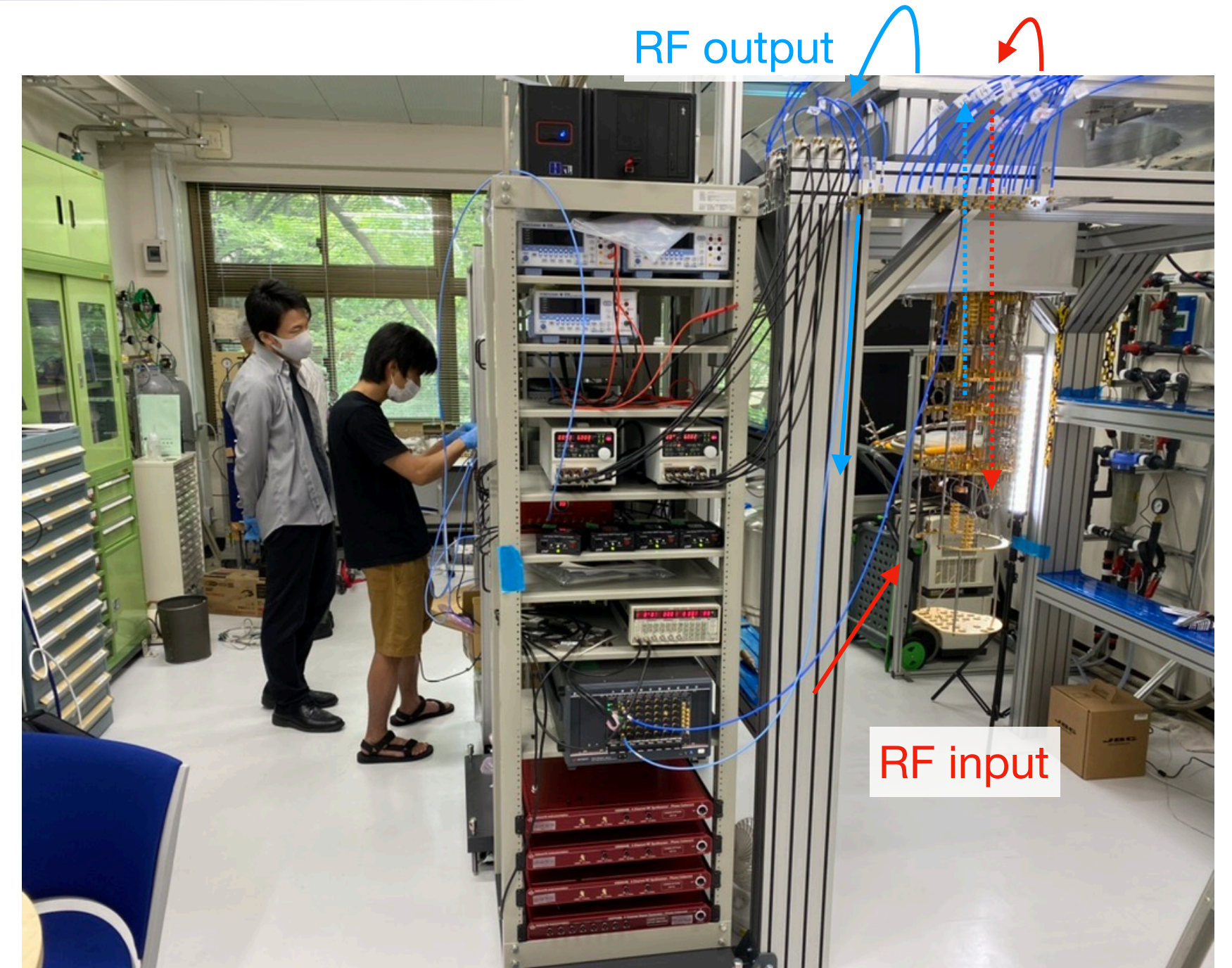
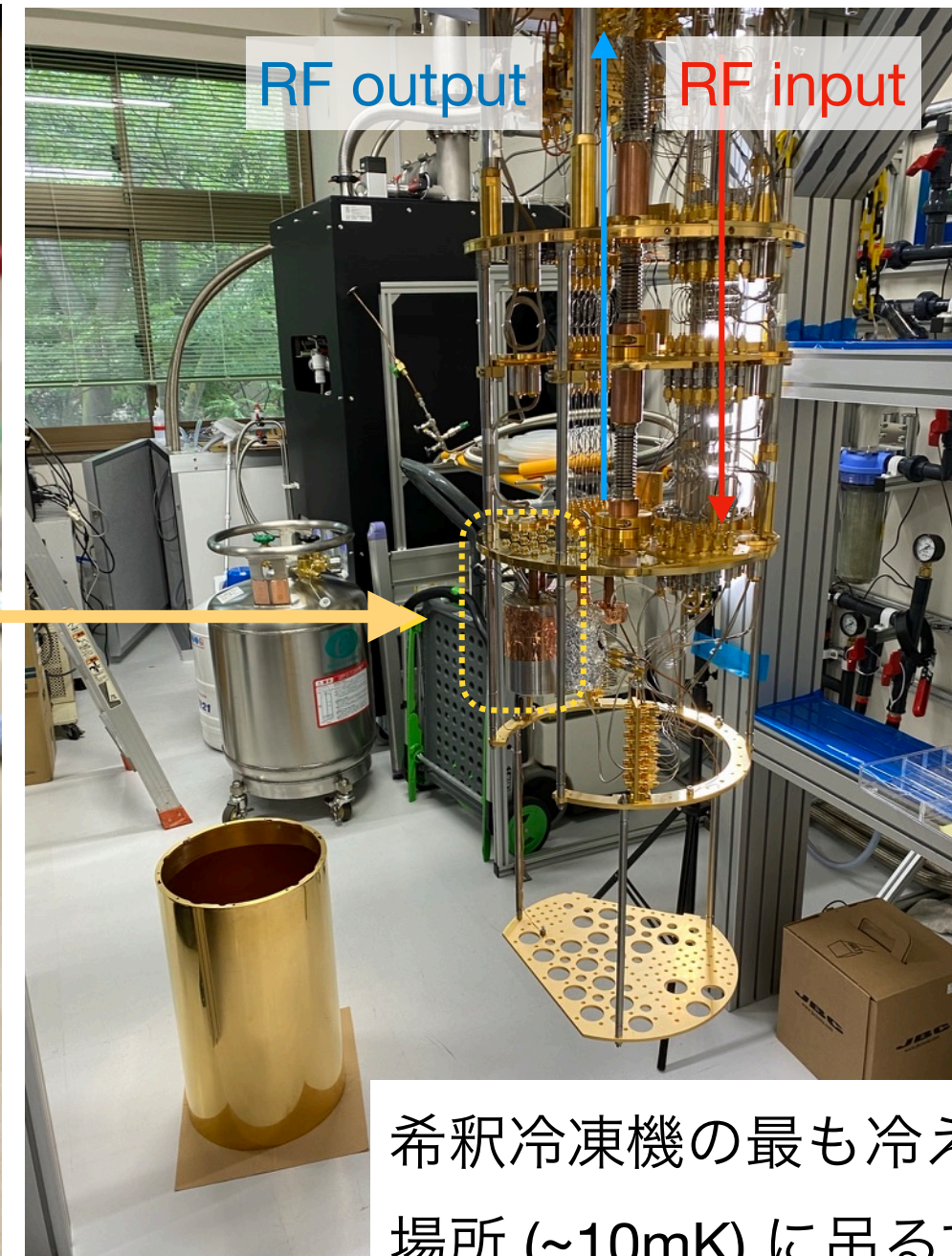
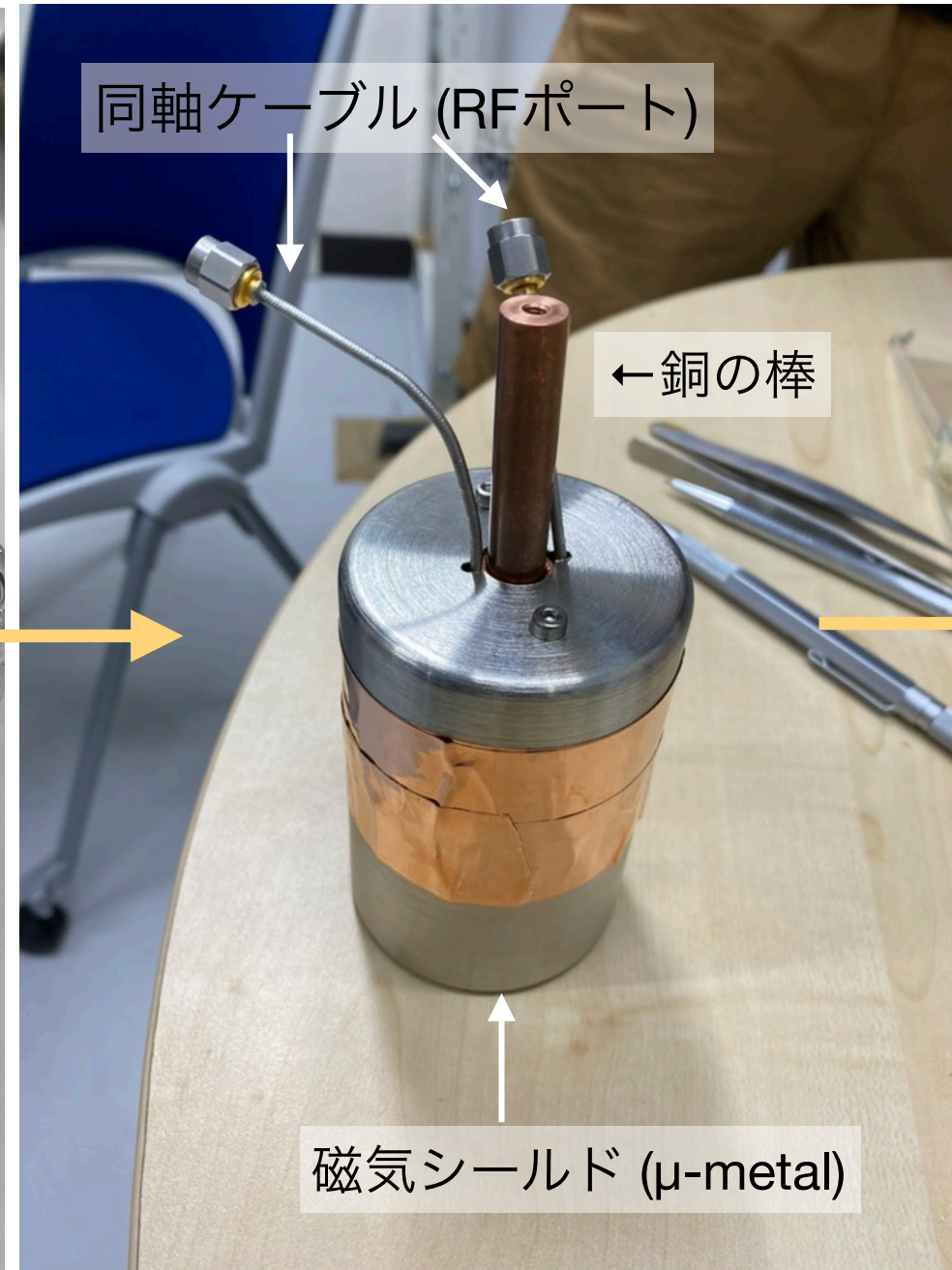
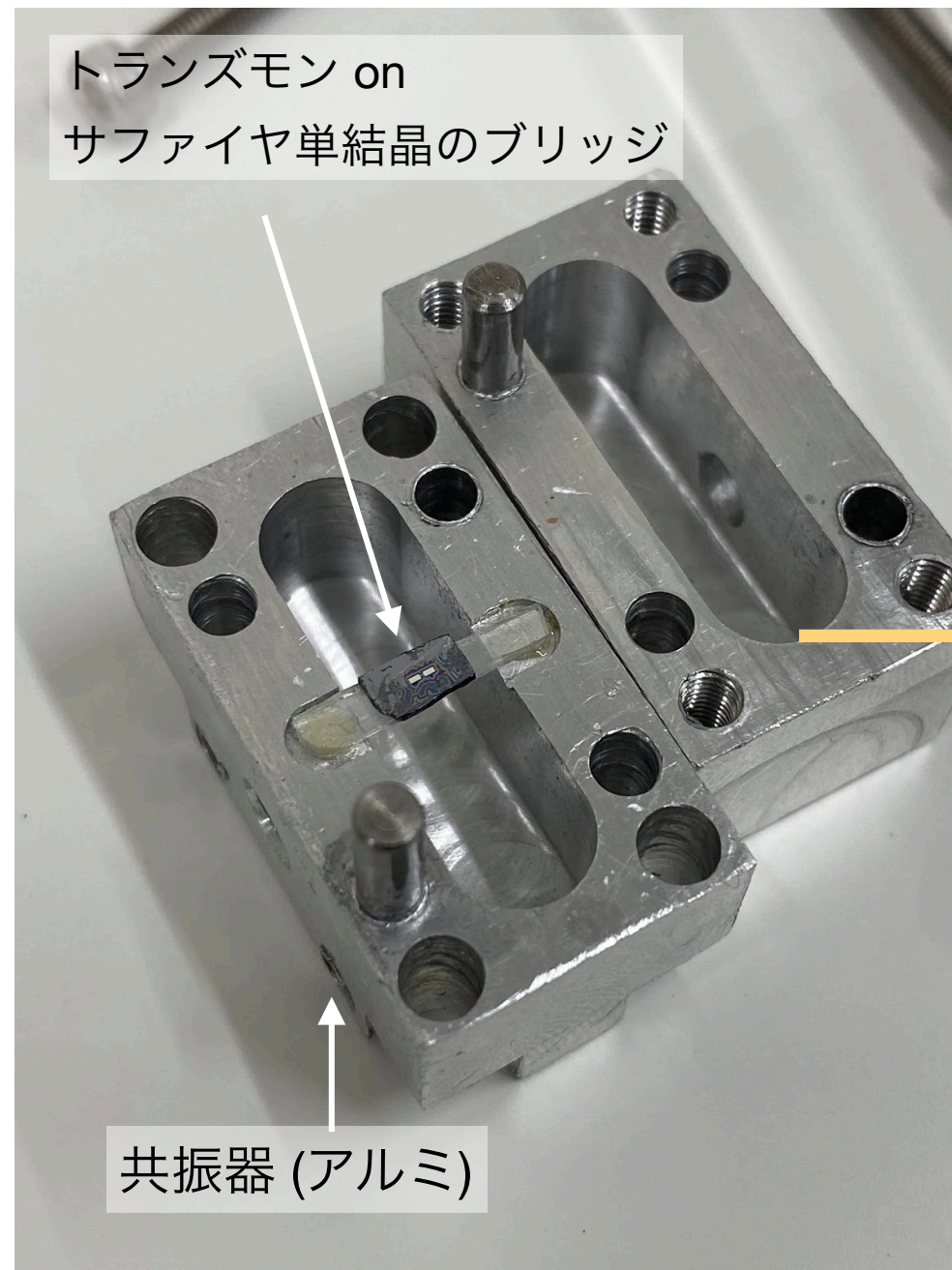
自然放出、準粒子生成 (宇宙線) など

$|1\rangle$ に励起後放置した際の $|1\rangle$ の割合 vs 放置時間





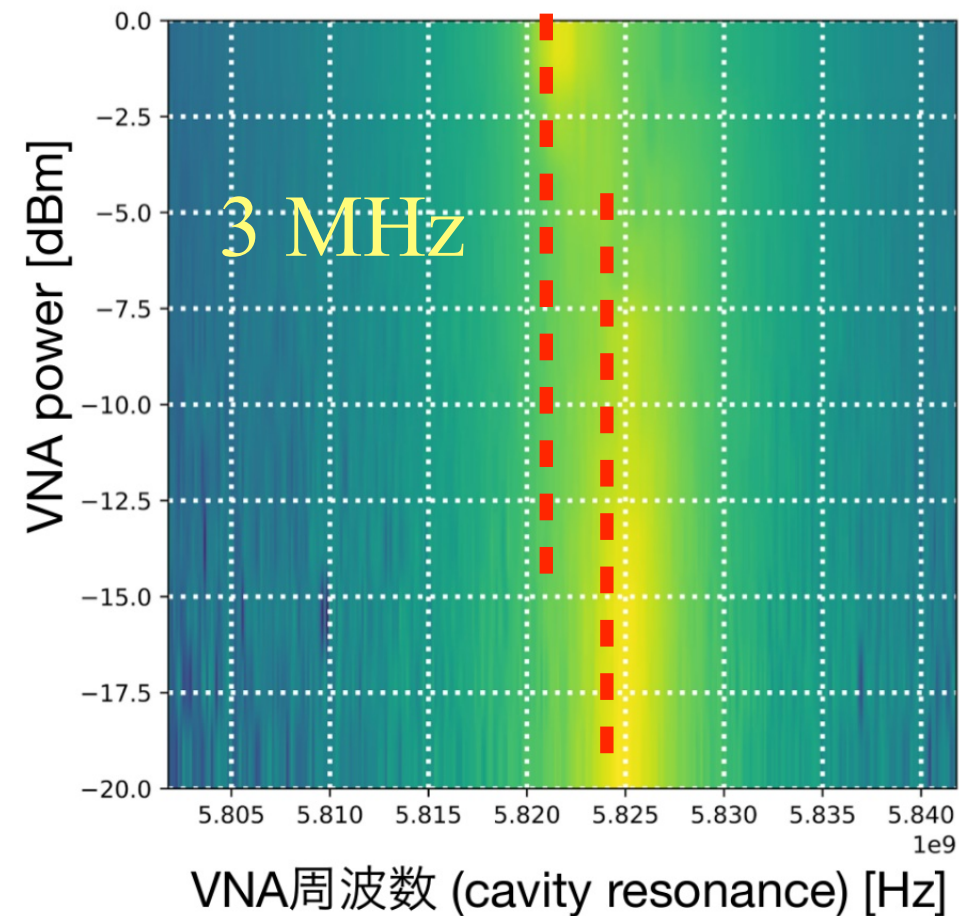
# 超伝導トランズモン-3D共振器の開発



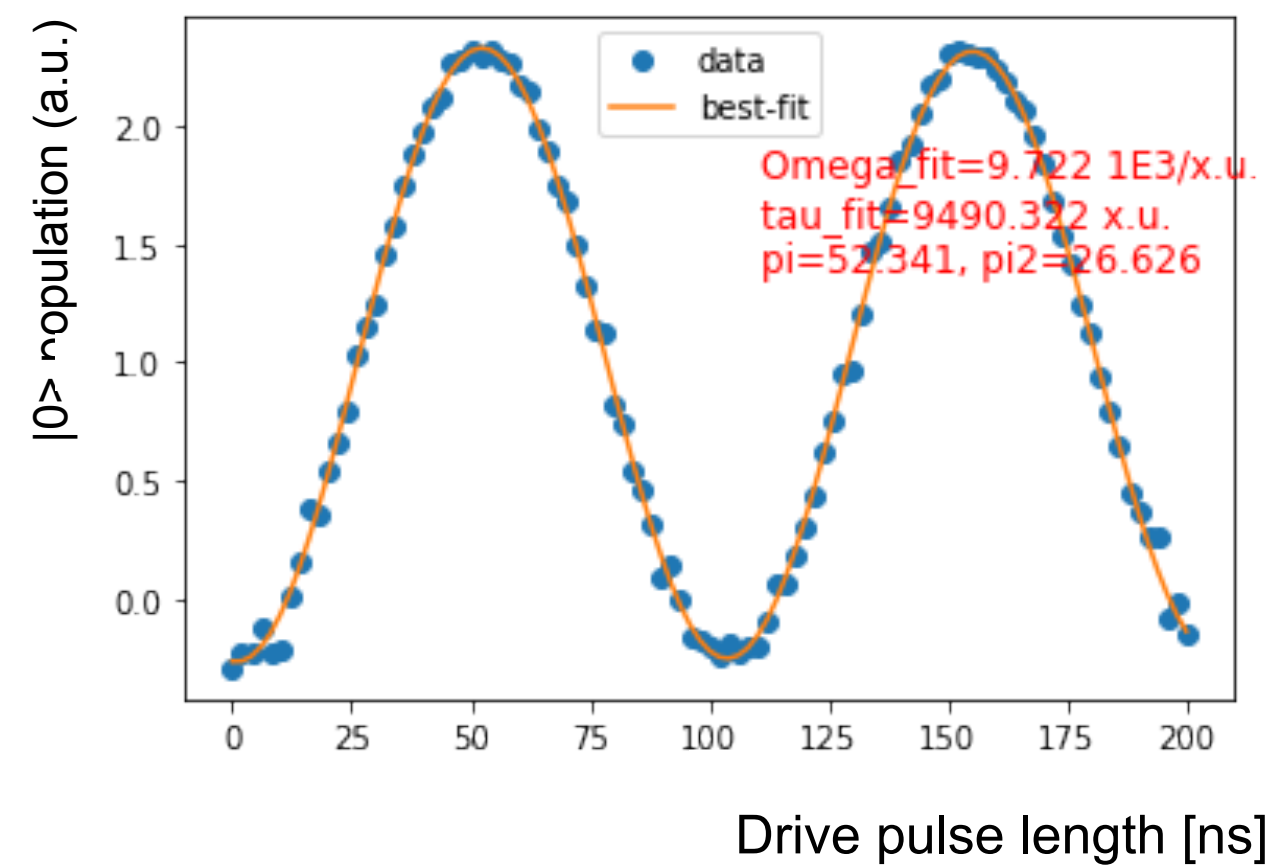
## 量子ビット-共振器結合

## 量子ビットの操作・読み出し

### ラムシフト

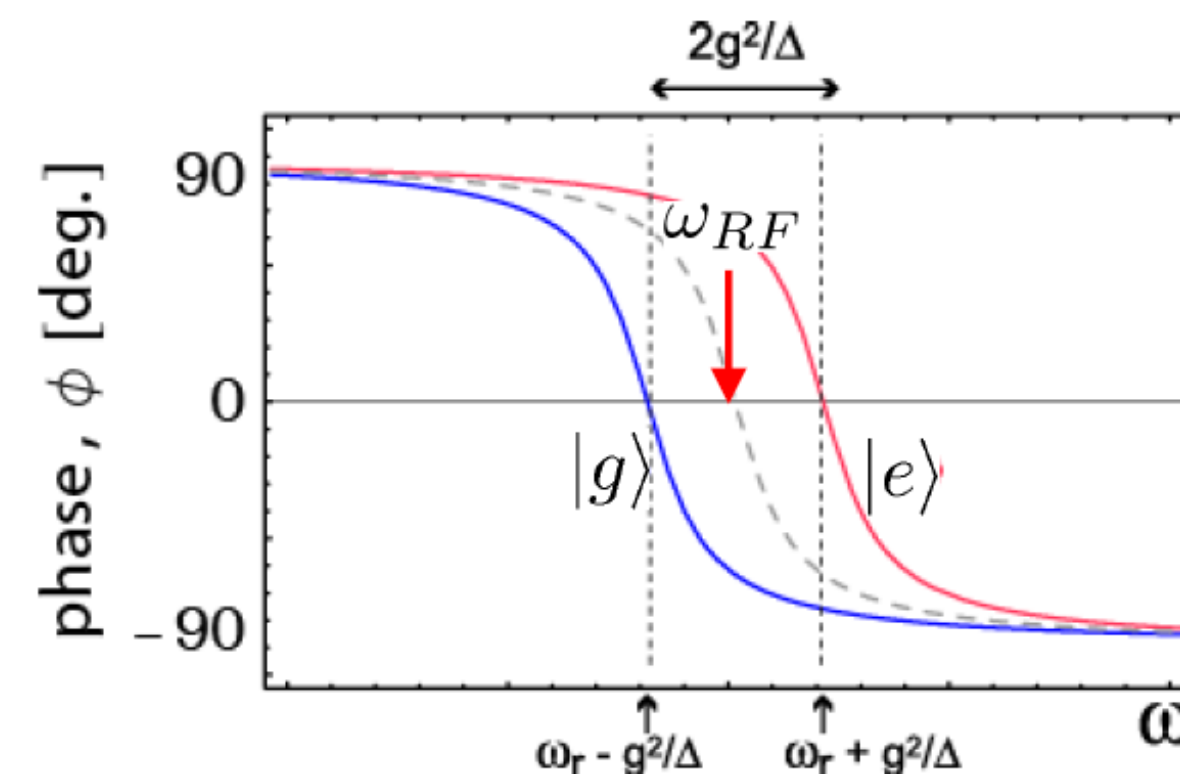


### ラビ振動 ( $|0\rangle \leftrightarrow |1\rangle$ )

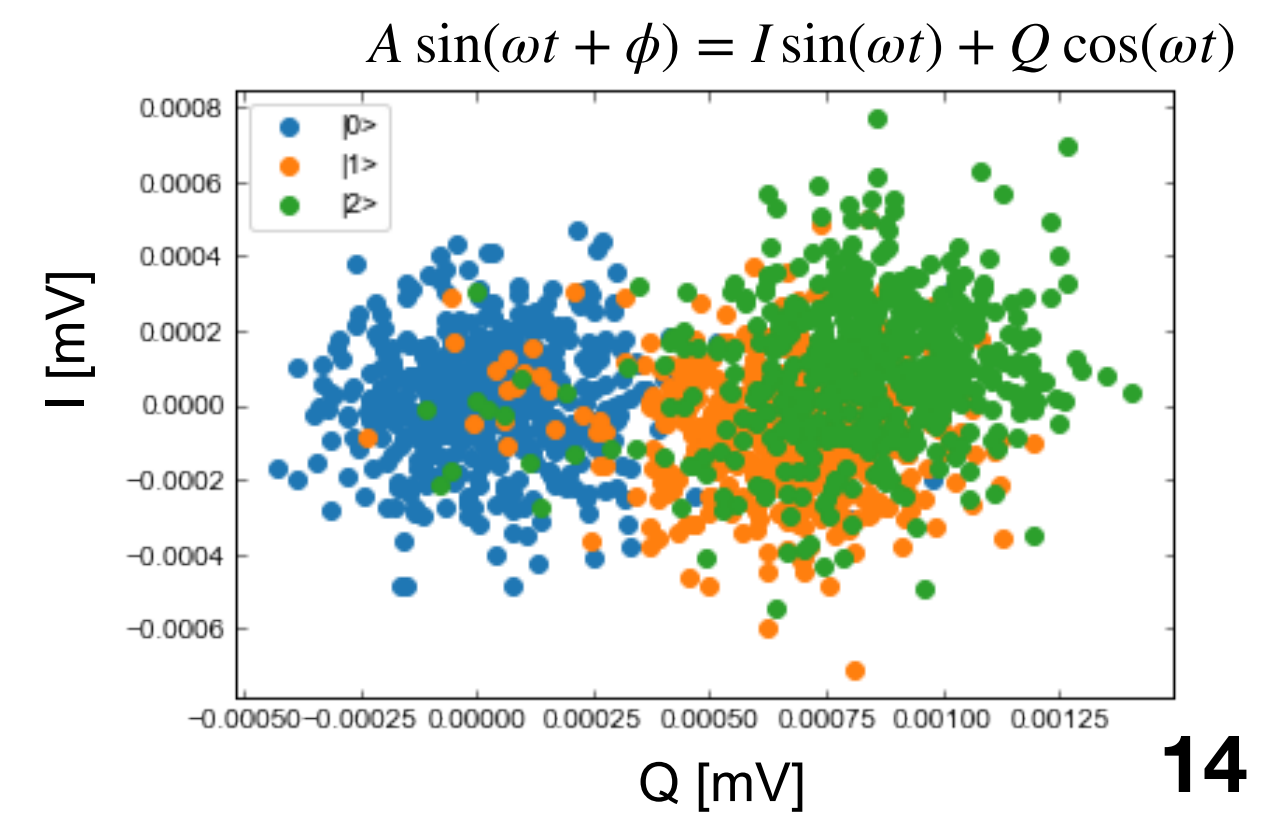


### 量子ビットの状態による共振周波数の変化

透過波の位相



透過波の位相 (I/Q plane表示)





# ブラックホール/ワームホールのシミュレーション

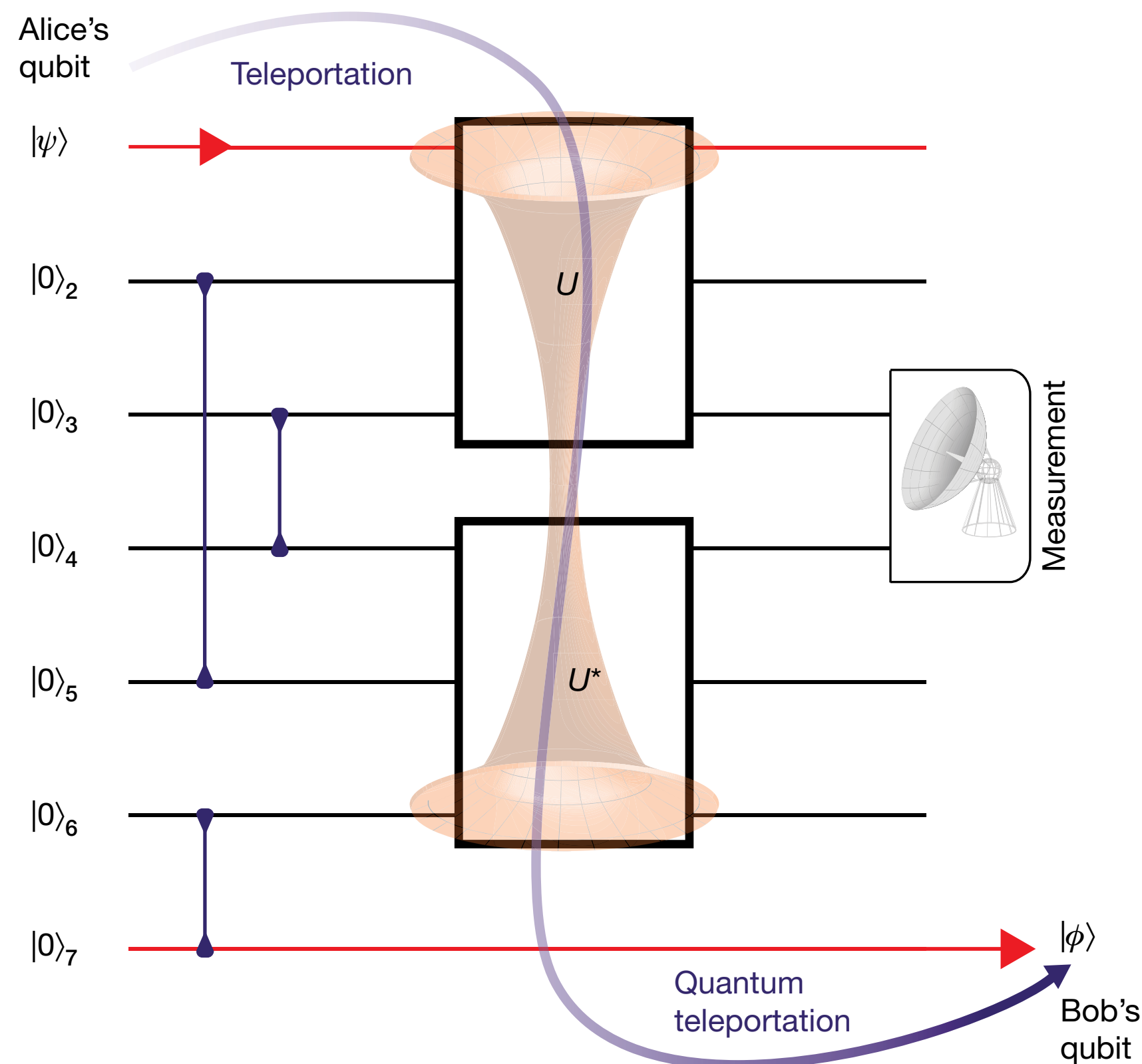
量子情報と時空の関係について、量子コンピュータを使った研究が始まっている

量子もつれを使って、ワームホールのダイナミクスを検証する

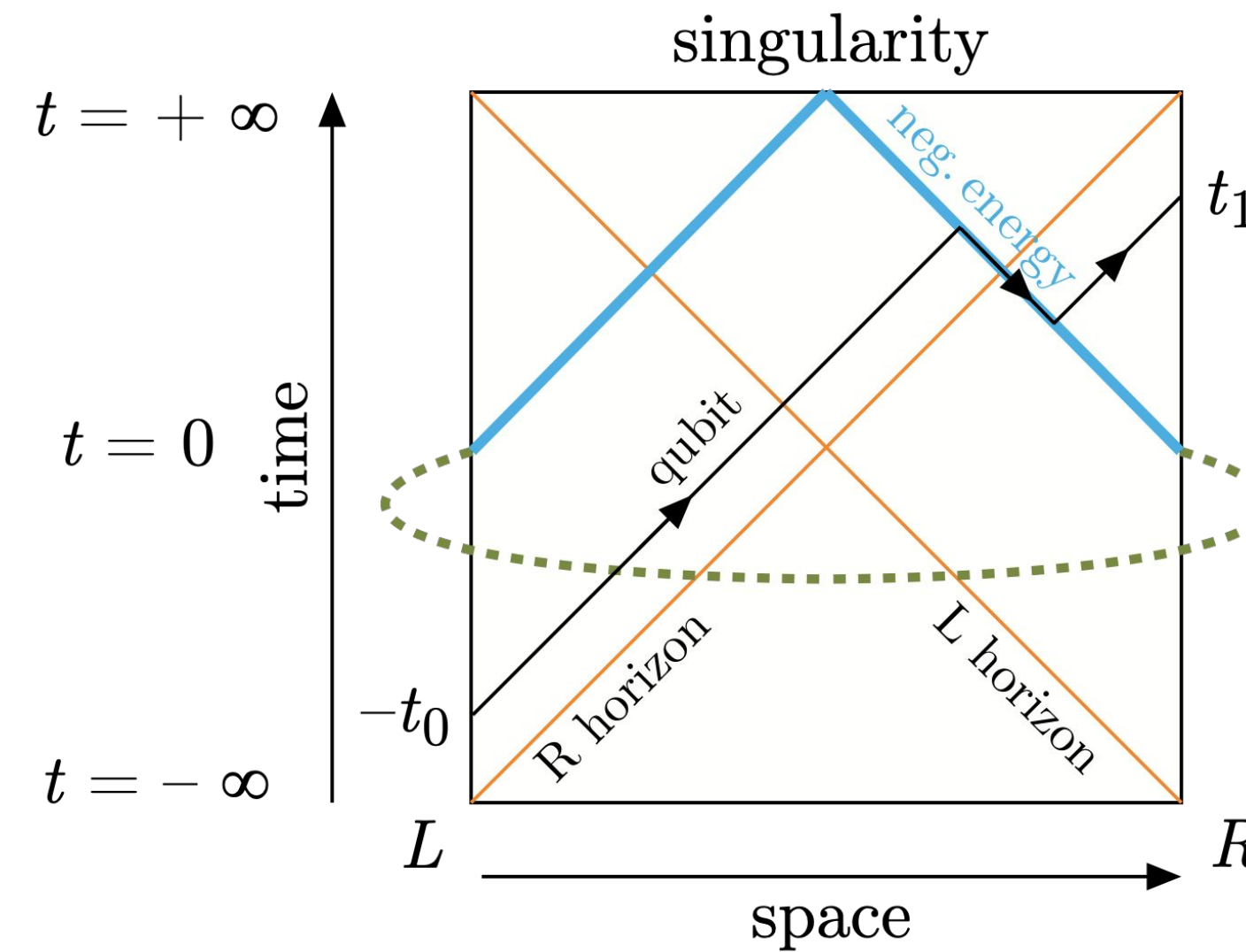
▶ 量子情報のスクランブリング

重力理論でのワームホールとAdS/CFT対応している量子回路を提案

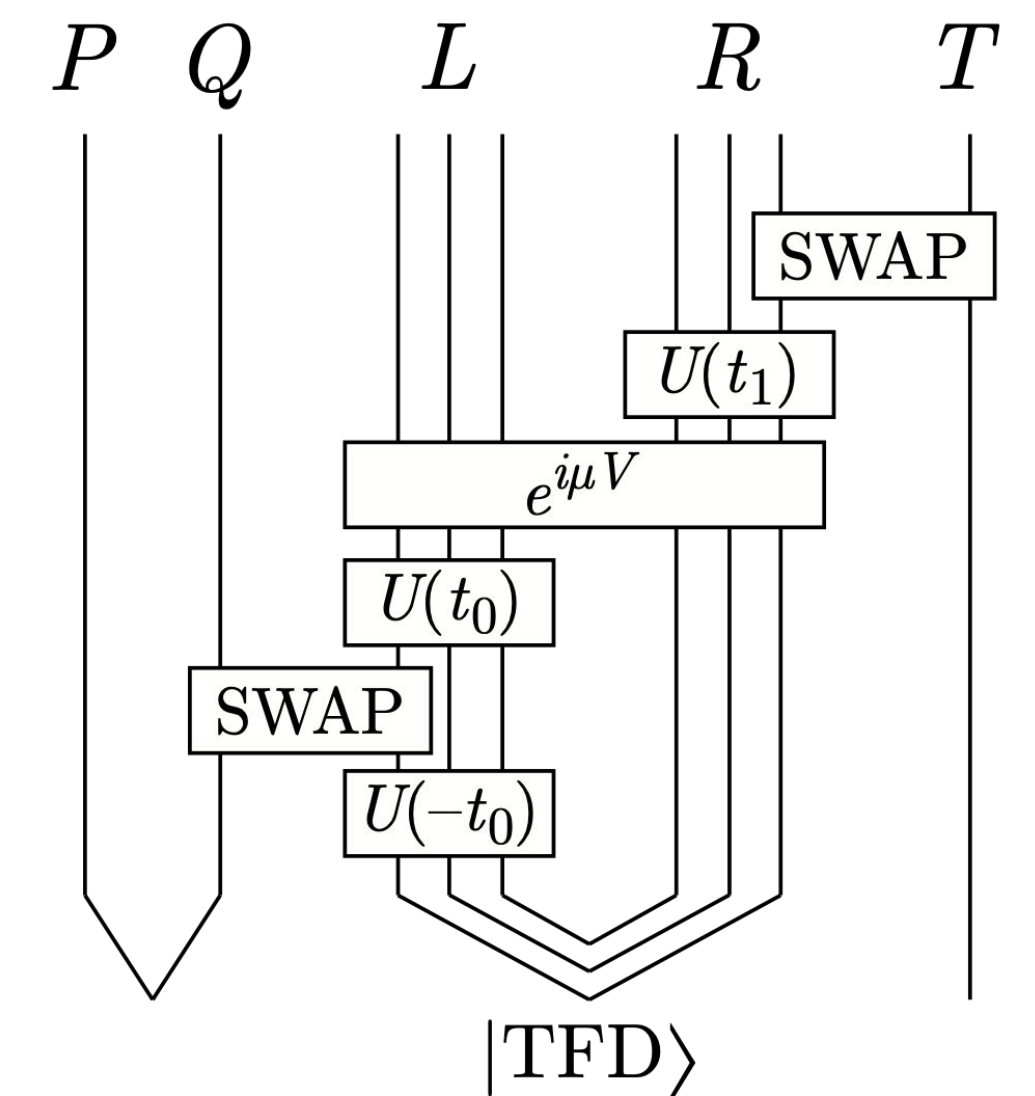
▶ ワームホールと矛盾しない現象を観測



[K. A. Landsman et al., Nature 567, 61 \(2019\)](#)



Wormhole in spacetime



Quantum dynamics on boundary

[D. Jafferis et al., Nature 612, 51 \(2022\)](#)

ICEPPでも、今後取り組んで行きたい

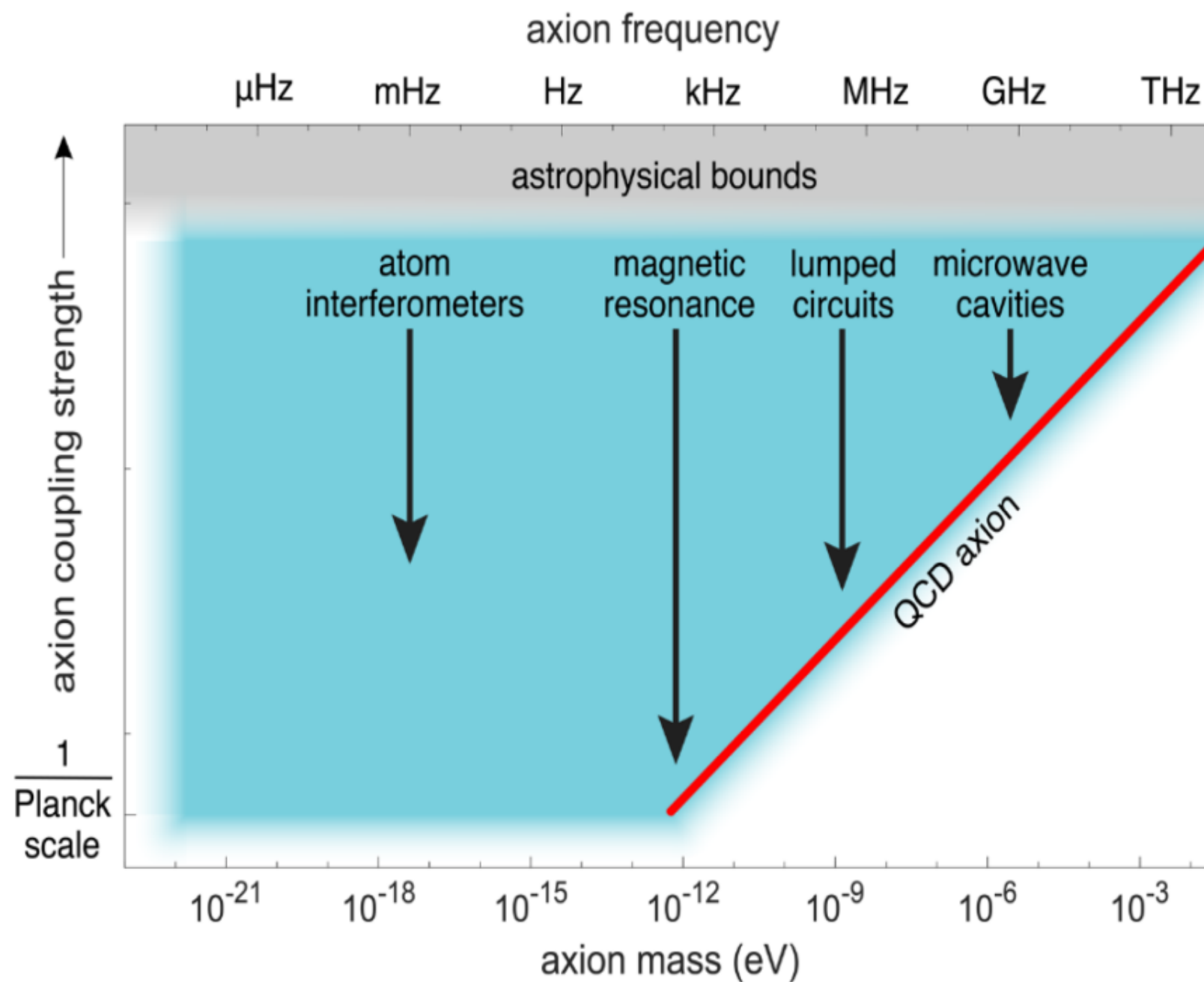


# 素粒子・宇宙物理への量子センサーの応用

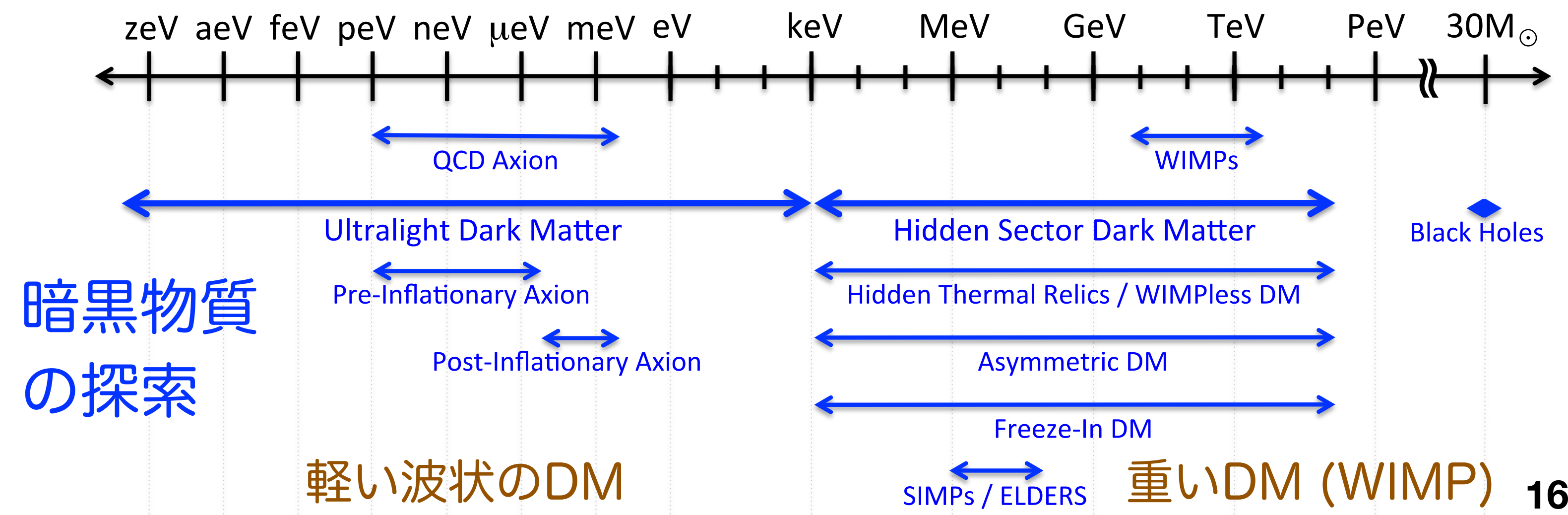
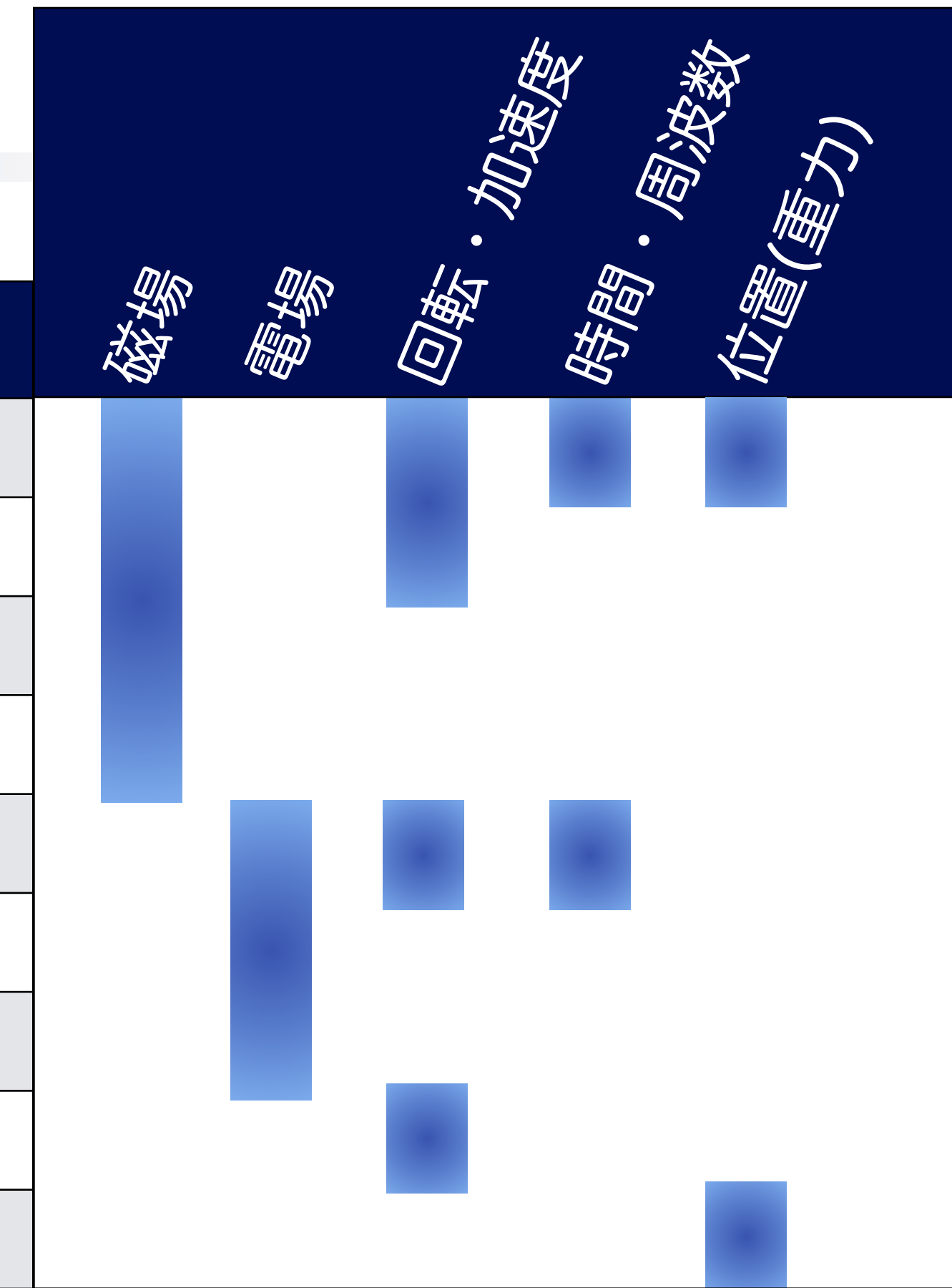
様々な量子センサーの開発が進んでいる

基礎科学への応用

## 重力波の観測



センサーのタイプ	量子ビット
中性原子	原子スピン
量子欠陥 (NV中心)	電子スピン
核磁気共鳴	原子核スピン
SQUID	超伝導電流
捕獲イオン	内部スピン, 振動モード
超伝導トランズモン	電荷固有値
スクイーズド光子	光
オプトメカニクス	フォノン
干渉計	光・原子



暗黒物質の探索

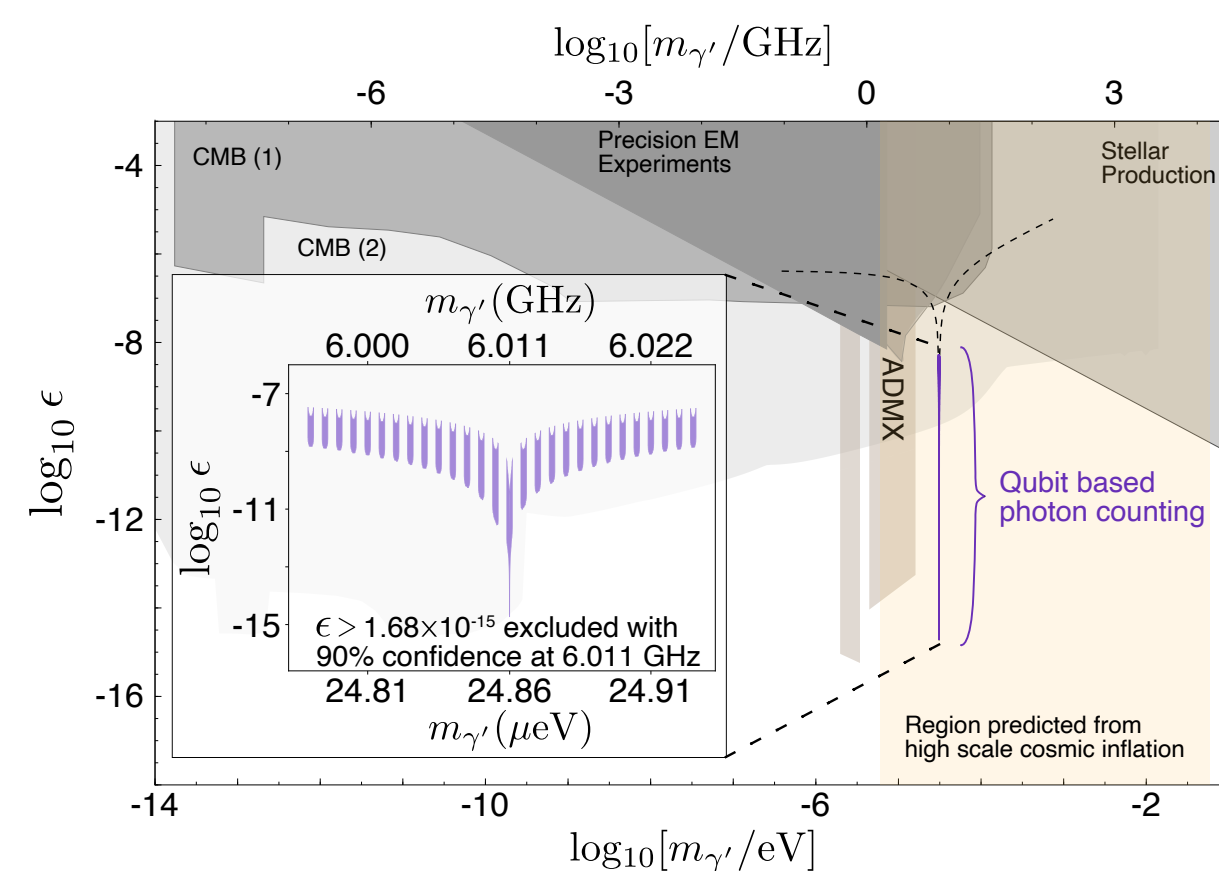
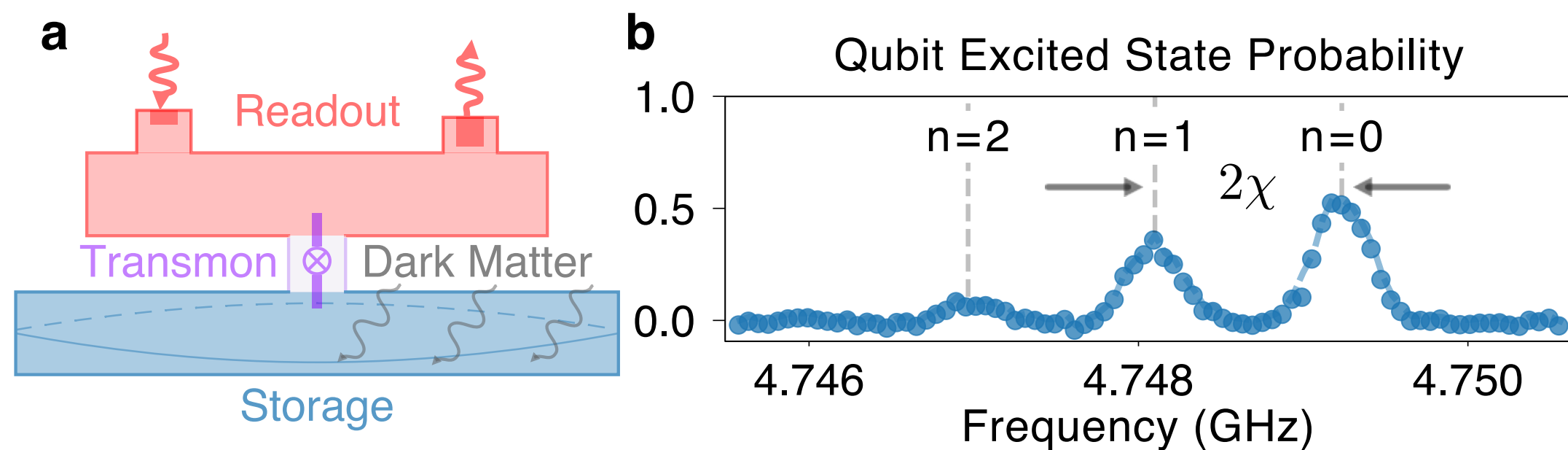
軽い波状のDM

SIMPs / ELDERS 重いDM (WIMP)

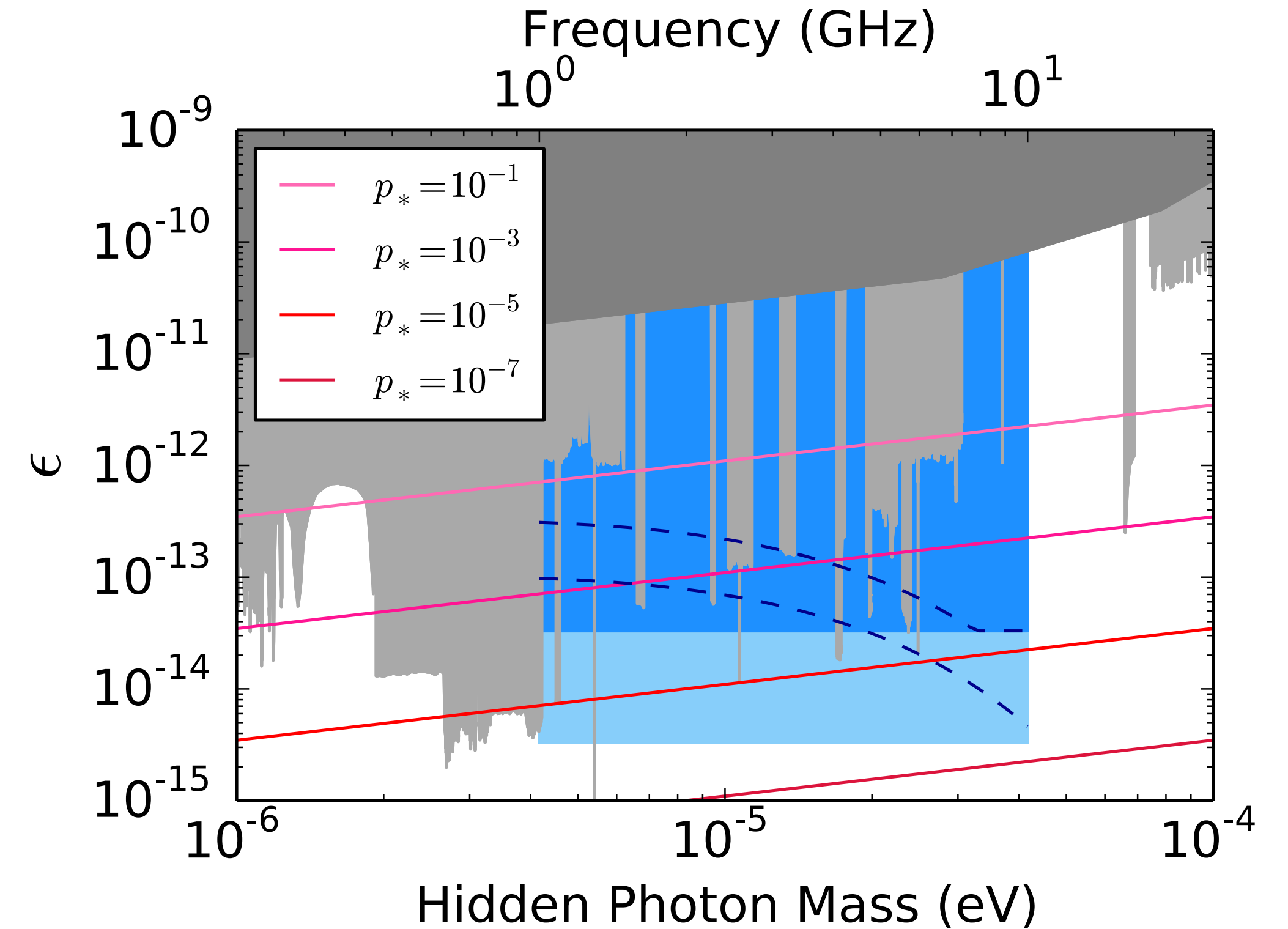
# 暗黒物質の探索

## 超伝導量子ビットを量子センサーとして使い、暗黒物質を探索する

- ▶ 共振器中で暗黒物質 (e.g, ダークフォトン) 由来の光子が生成
- ▶ 共振器中の光子数に依存して、超伝導量子ビットの遷移周波数が変わる
- ▶ 超伝導量子ビットの状態を分散読み出しする



[A. Dixit et al., PRL 126, 141302 \(2021\)](#)



[S. Chen et al., arXiv:2212.03884](#)

- ▶ ダークフォトンが光子に変換
- ▶ 光子が作る電場によって、量子ビットの状態が遷移
- ▶ 遷移率を測定し、暗黒物質を検知する



# 重力波の観測

## 共振器を使った重力波の観測

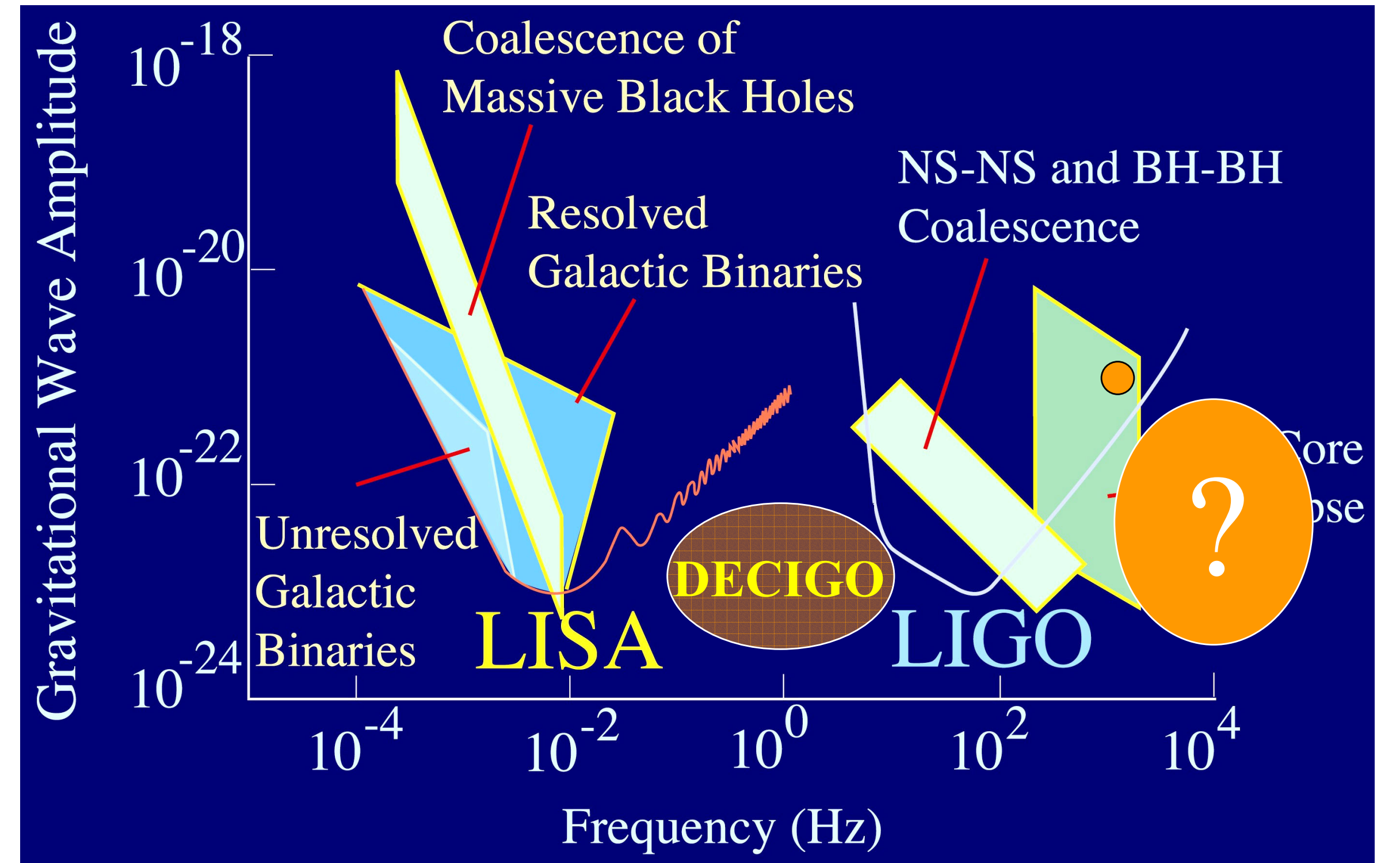
- ▶ 結合した共振器の内部モードへのエネルギー移行を使って重力波を捉える
- ▶ チューニング用セルを使って、内部モードの周波数差  $|\omega_2 - \omega_1|$  を調整する
- ▶  $|\omega_2 - \omega_1| = \Omega$  の周波数を持つ重力波を検知



[G. Gemme et al., Proceedings](#)

## SCRF detectors for gravitational waves

G. Gemme et al., 2003 Workshop on RF Superconductivity

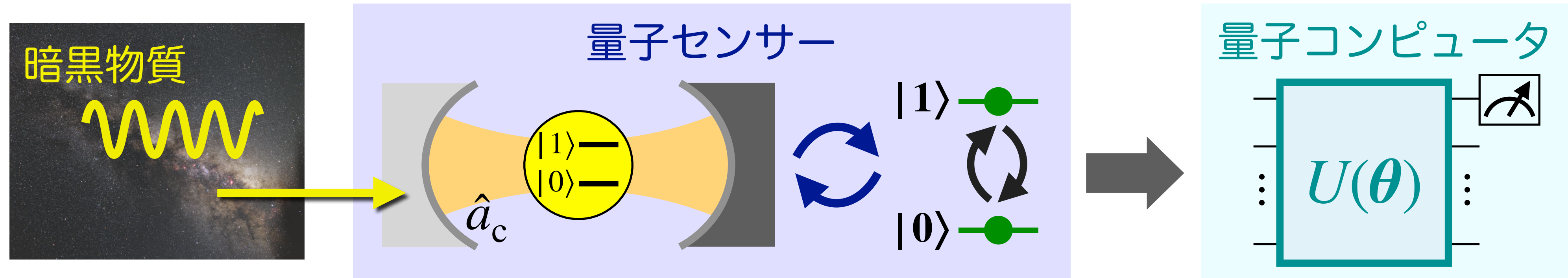


➡ 10 kHz – 10 MHzの重力波がターゲット

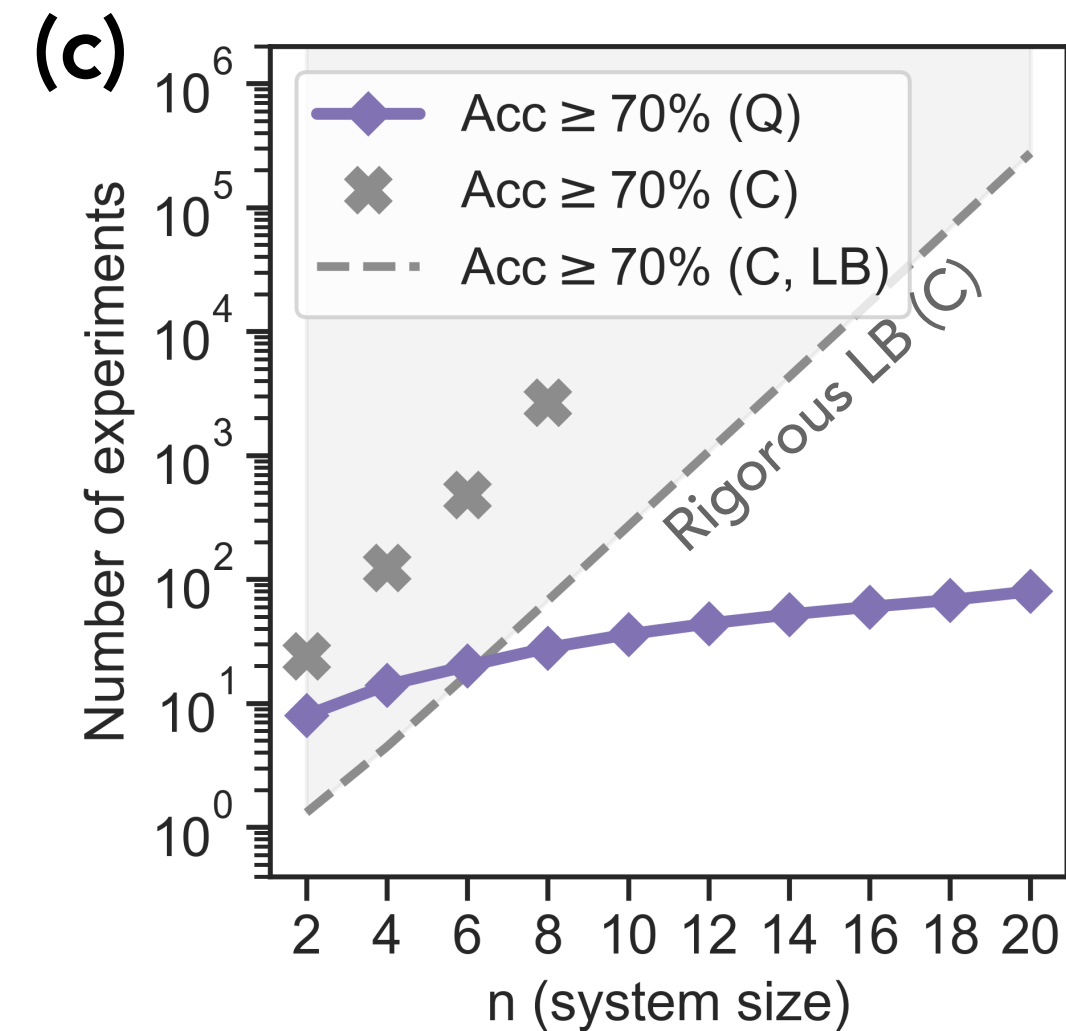
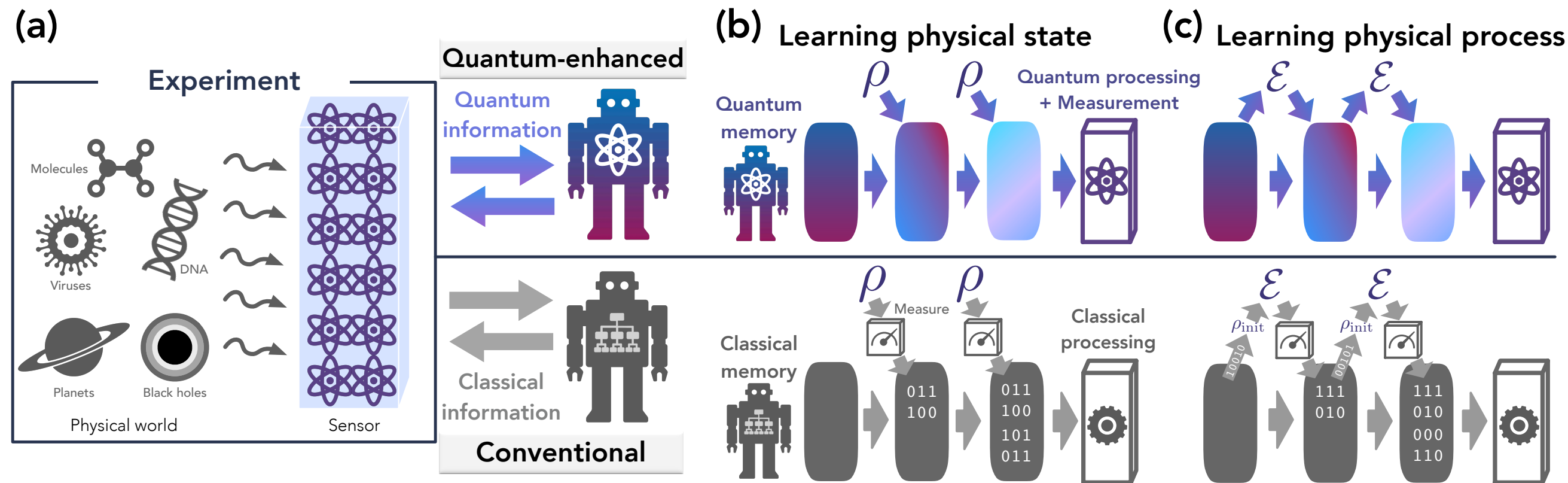


# 量子技術の可能性

量子センサー+量子コンピュータで感度向上？



[H. Y. Huang et al., arXiv:2112.00778](https://arxiv.org/abs/2112.00778)



古典計算に比べ、  
指数的な計算コストの削減が可能

その他にも

- ▶ 宇宙背景ニュートリノ検出器？
- ▶ 超低温 (< 1 mK) での暗黒物質探索への応用？
- ▶ ...

ICEPPでは、常に新しい  
アイデアに挑戦できます



# まとめ

ATLAS実験グループでは、量子コンピュータ・量子センサーの研究と基礎物理への応用に取り組んでいます。

## 5つの応用例を紹介

- ▶ 量子ダイナミクスシミュレーション
- ▶ 量子機械学習
- ▶ 超伝導トランズモンの開発
- ▶ ブラックホール/ワームホールのシミュレーション
- ▶ 素粒子・宇宙物理への量子センサーの応用

他にも面白いテーマはあります。

- ▶ 素粒子実験データの再構成（例えば荷電粒子の飛跡）
- ▶ 量子アルゴリズムの最適化、量子ソフトウェア

**挑戦してみたい方、大歓迎!!**

## 量子コンピュータの教育



東京大学  
量子ネイティブ育成センター  
Quantum Native Education Center  
The University of Tokyo



量子コンピュータ実習をやっています

量子コンピューティング・ワークブックへようこそ！

このウェブサイトは、量子コンピューティングを手を動かして学びたい方のための入門教材です。量子力学や計算科学の前提知識を極力必要とせず、大学一年程度の数学とPythonプログラミングの知識があれば、ゼロから量子コンピューティングを自習できるような教材を目指しています。

内容は東京大学素粒子物理国際研究センター (ICEPP) の研究者が選定・執筆しました。私たちの関心は、量子計算そのものを理解することでもありますが、それ以上に量子コンピュータを実際を使って科学や技術を進展させることに向いています。そのため、この教材で扱うトピックや順番は一般的な量子コンピューティングの入門書と異なっています。より体系立った量子計算の理解のためには参考文献に挙げた入門書をおすすめします。

このワークブックは、東京大学量子ネイティブ育成センターの「ハードからソフトまで」の付属教材でもあり、課題が設けられています。受講者は課題ページをご覧ください。

ワークブック全体を通じて、QiskitというPythonライブラリを用いて量子コンピュータで実行する実験を始める前に実習の準備を参考に準備をお願いします。

問い合わせ  
ワークブックに関する質問・意見・訂正など、お気軽にメールでお寄せください。その他の問い合わせやご意見もお待ちしております。

ソフトウェア



ハードウェア

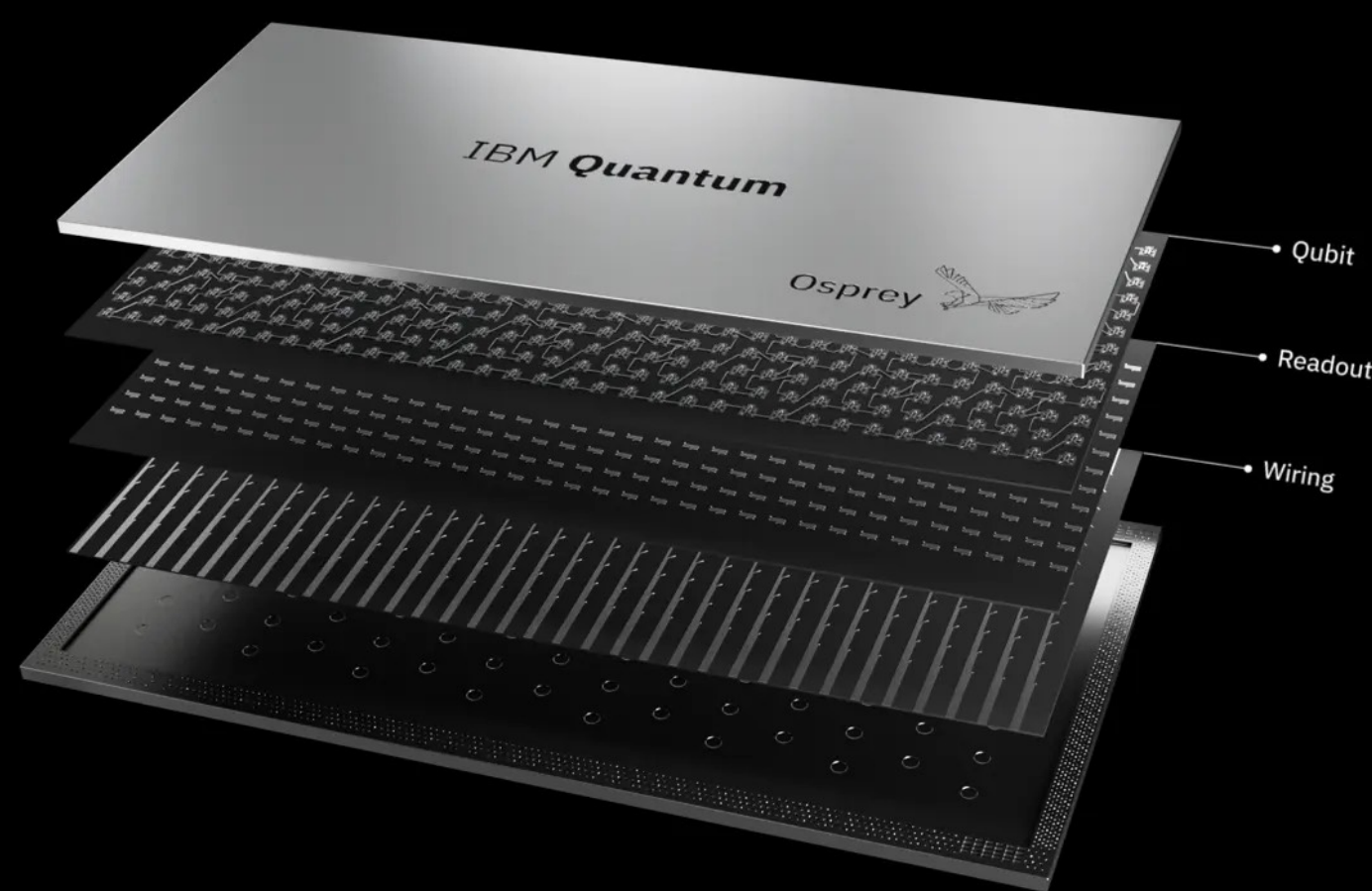
学習素材もたくさんあります



# バックアップ

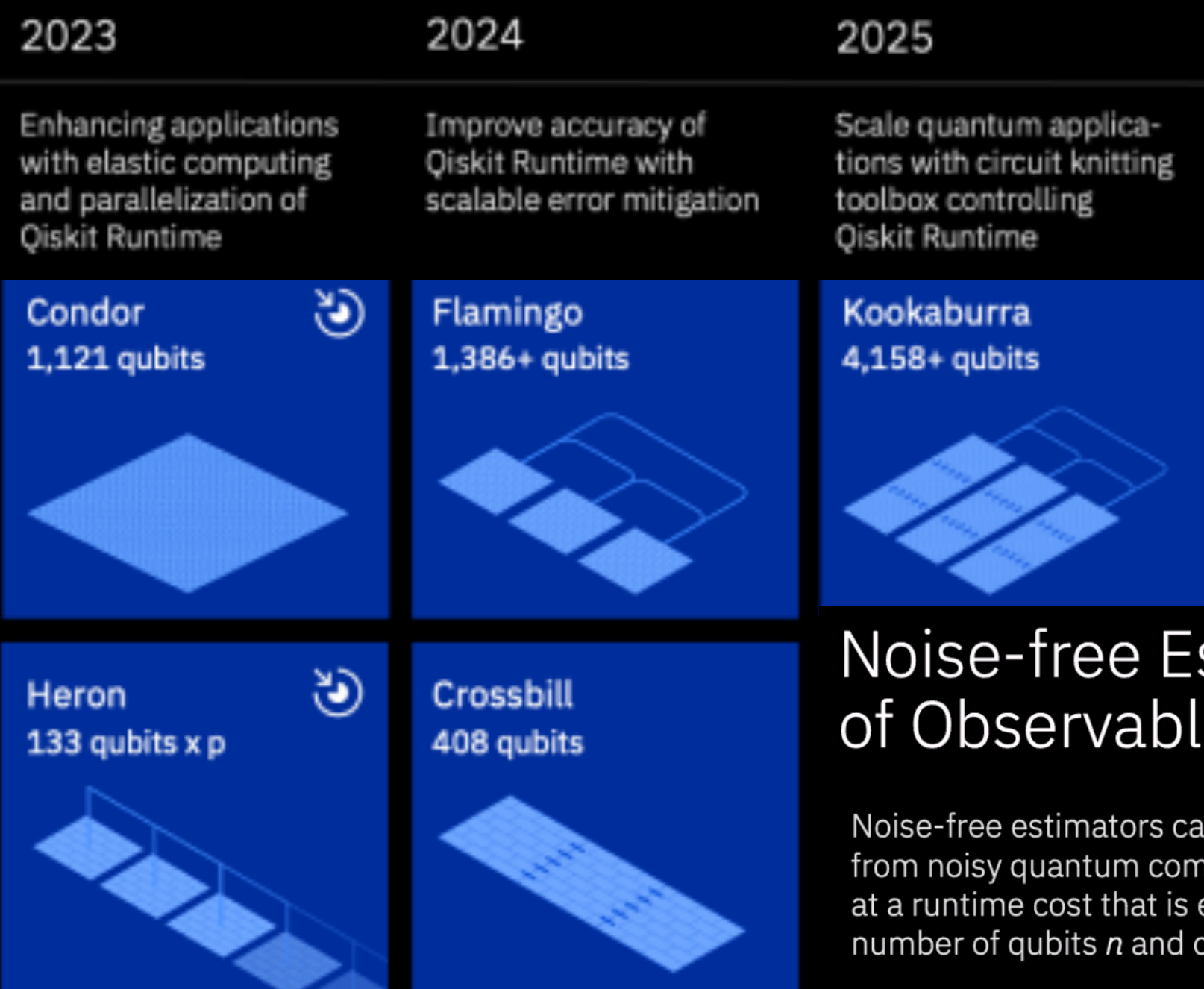
---

# 量子コンピュータの進展



433量子ビット  
(2022年)

1121量子ビット (2023年)  
4158+量子ビット (2025年)

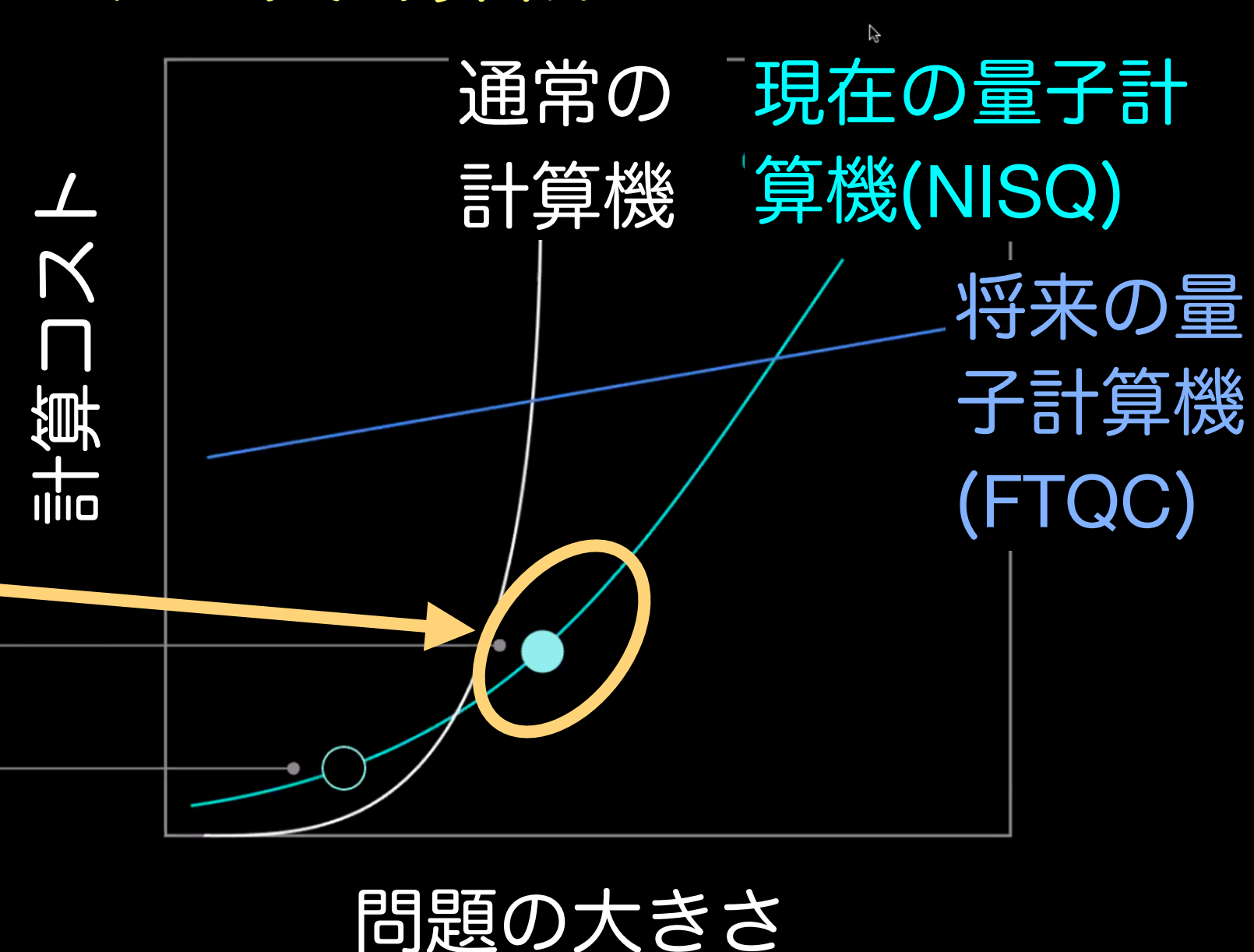


IBM量子コンピュータ (新川崎)



今年秋に  
127量子ビットへ

エラー緩和ができる量子計算機は、古典計算機を超えるか？



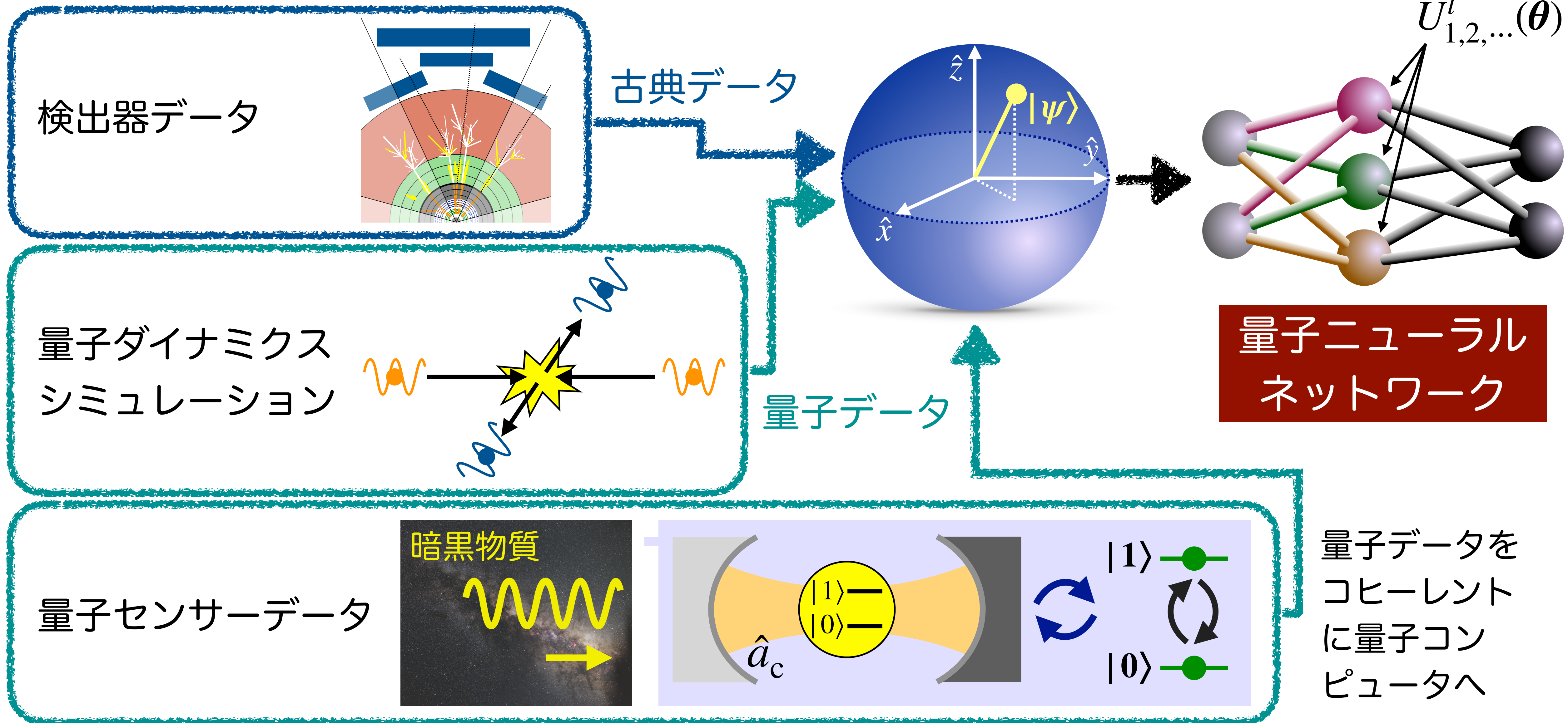
今後数年で目指しているターゲット  
面白いことができそう。。

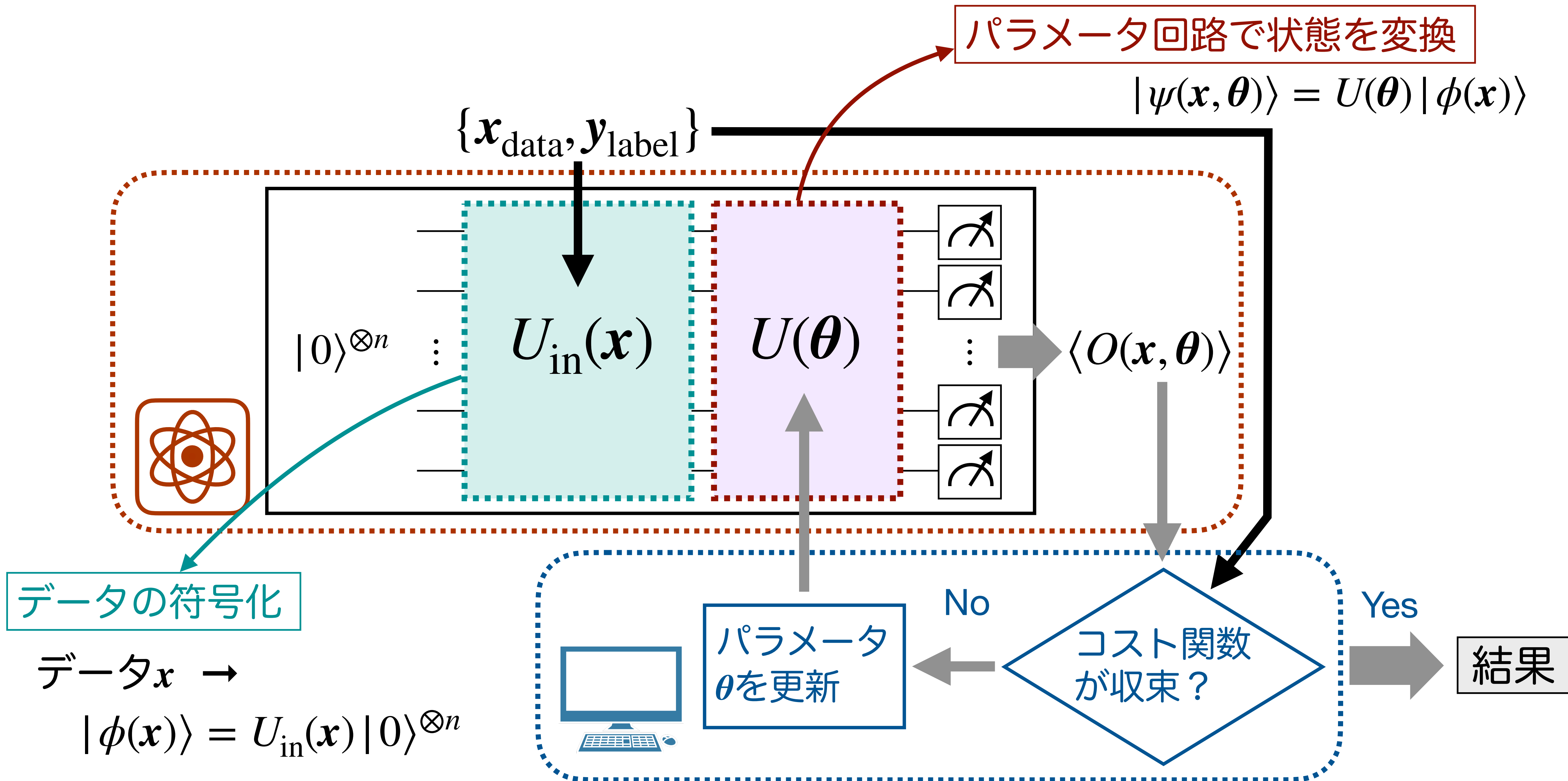
IBM Quantum



# 量子コンピュータ + AI → 量子AI

古典計算に対して、近い将来NISQが優位になる可能性のある分野



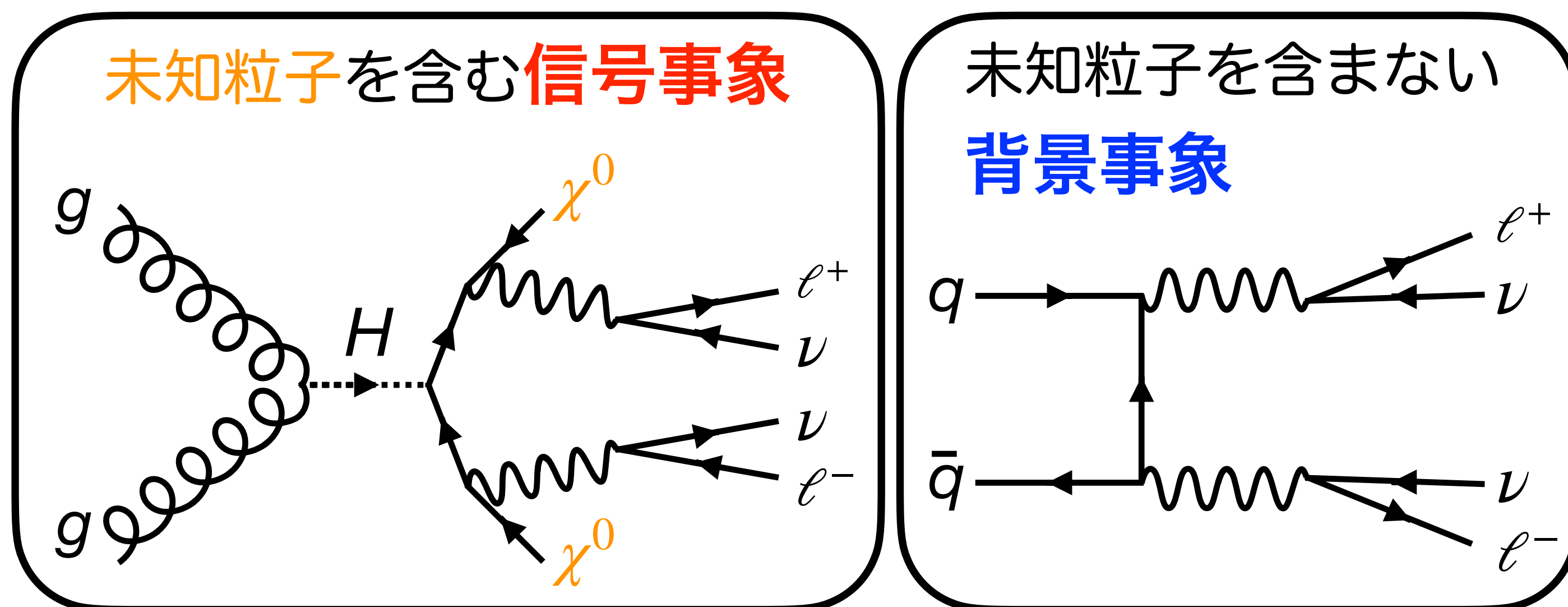




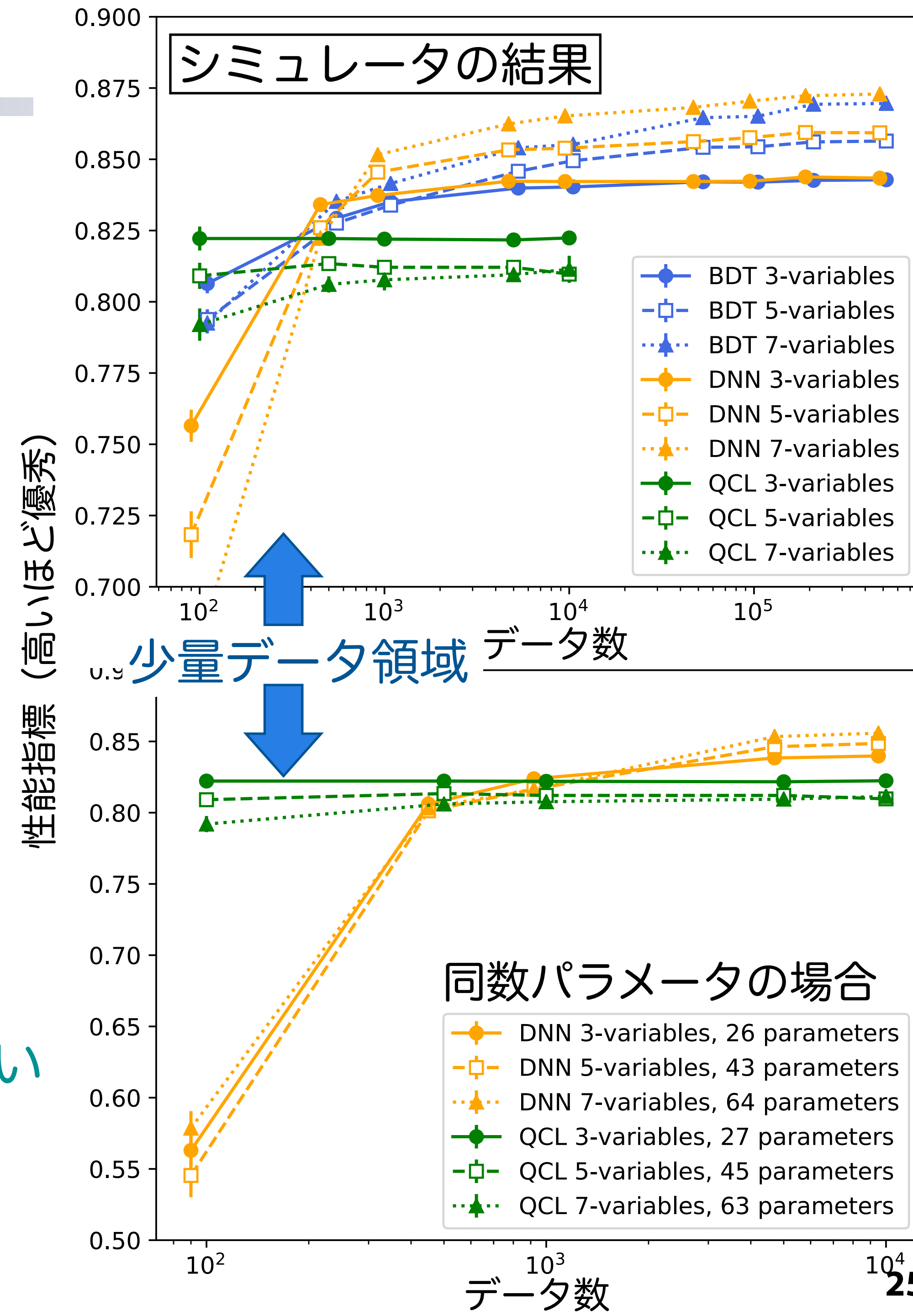
# 教師あり量子機械学習

データの中から、未知粒子の信号を含む  
事象を選別する

K. Terashi et al.,  
[Comput. Softw. Big Sci. 5, 2 \(2021\)](#)



- ▶ 量子機械学習の性能はデータサイズに強くは依存しない
- ▶ 少数パラメータでも効率の良い学習ができる可能性



# バレンプラトー問題

変分量子アルゴリズム(パラメータ回路)の学習性能は、量子ビット数の増加とともに難しくなることが知られている

J. R. McClean et al., [Nat. Commun. 9, 4812 \(2018\)](#)

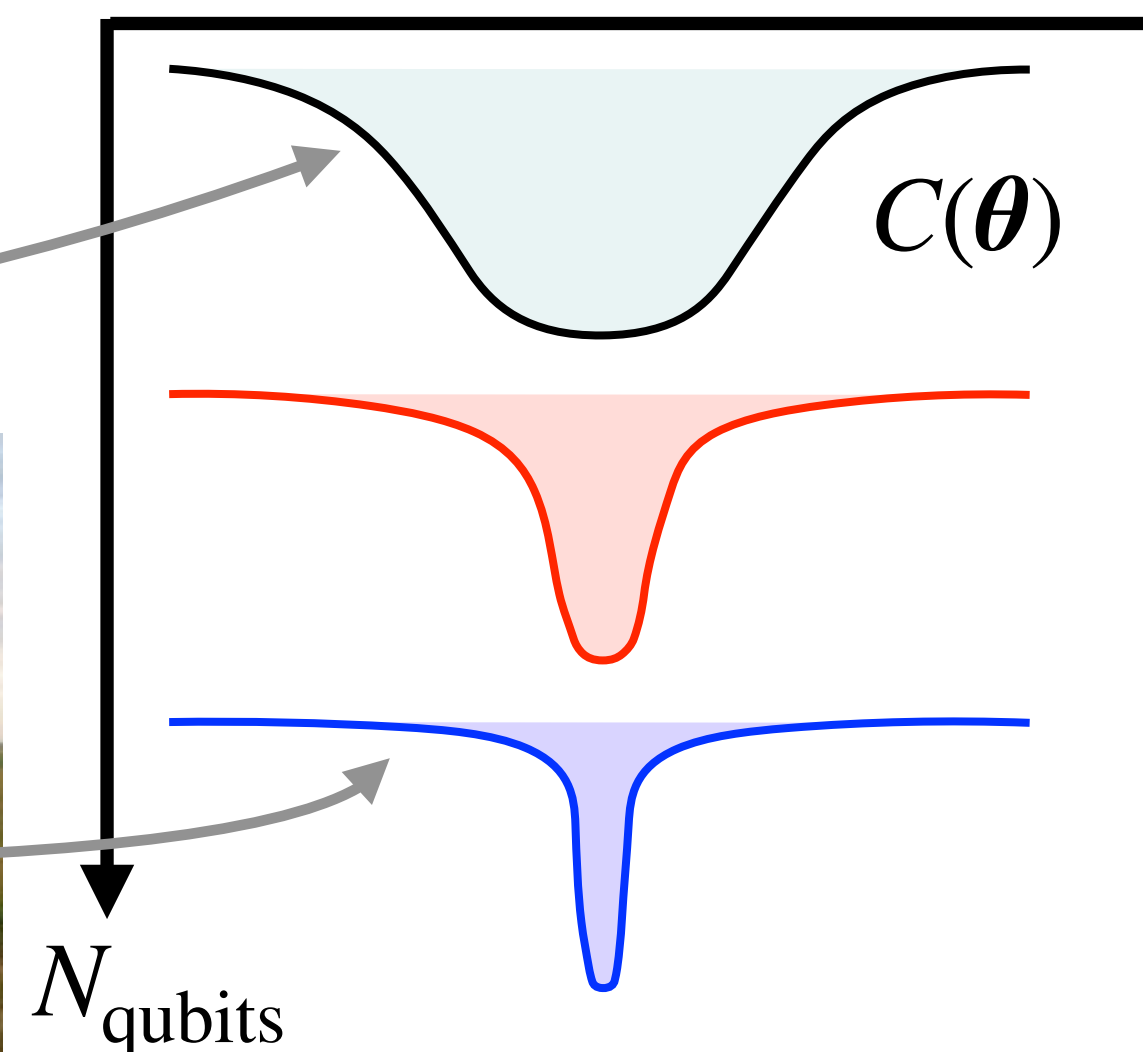
$$\text{コスト関数 } C(\theta) = \text{Tr}[OU(\theta)\rho U^\dagger(\theta)]$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow E_{\theta \sim \text{uniform}} \left[ \frac{\partial C(\theta)}{\partial \theta_i} \right] &= 0 \\ V_{\theta \sim \text{uniform}} \left[ \frac{\partial C(\theta)}{\partial \theta_i} \right] &= \mathcal{O}(b^{-n}) \quad (b > 1) \end{aligned}$$

勾配の消失



➡ バレンプラトー



勾配消失は、様々な要因で起こることが分かってきた

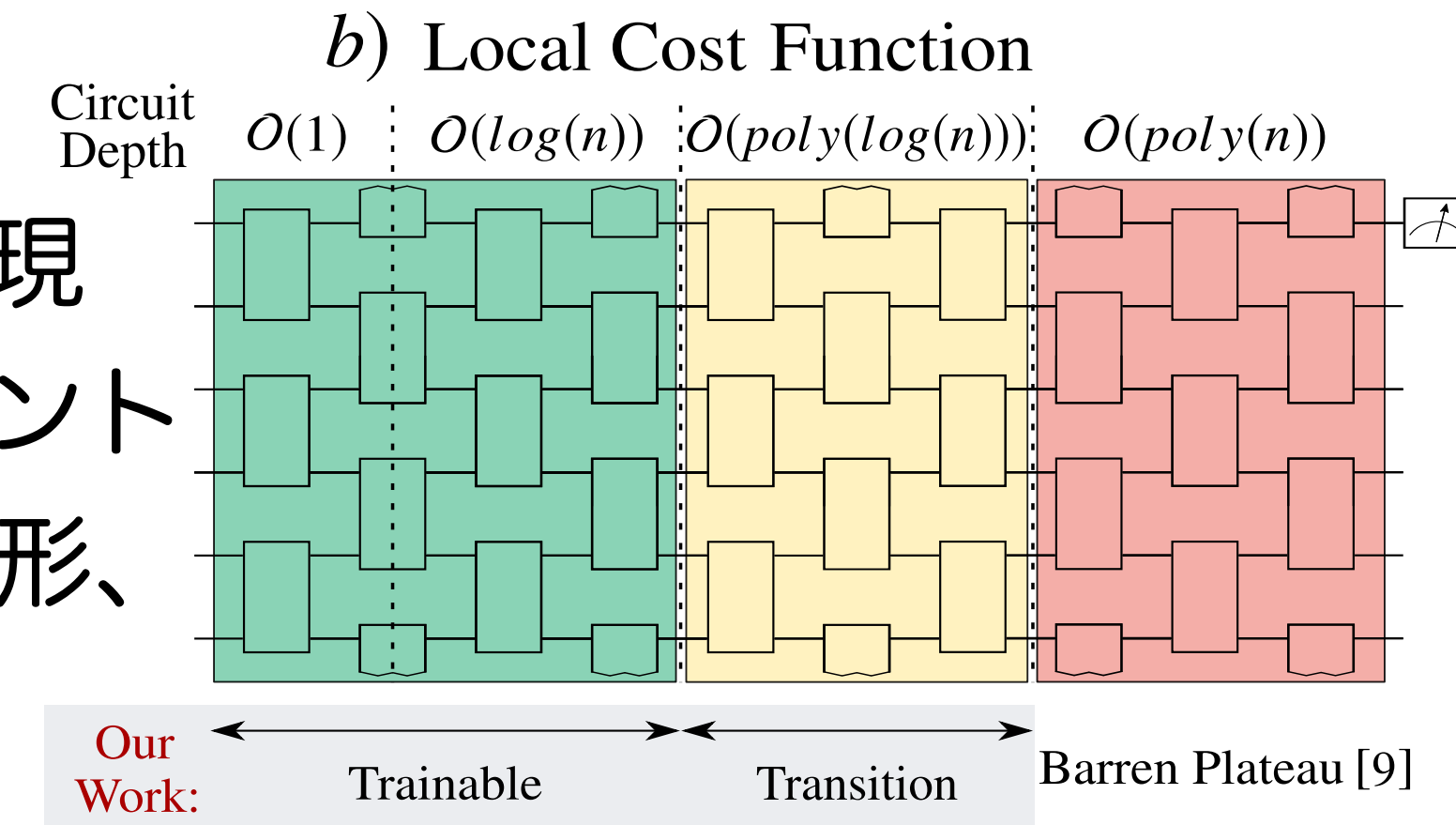
- ▶ パラメータ回路の表現力、エンタングルメントの強さ、コスト関数形、ノイズなど

e.g, [A. Arrasmith et al., Quant. Sci. Technol. 7, 045015 \(2022\)](#)

量子機械学習特有の勾配消失についても研究が進んでいる

- ▶ データ符号化による勾配消失の解析手法

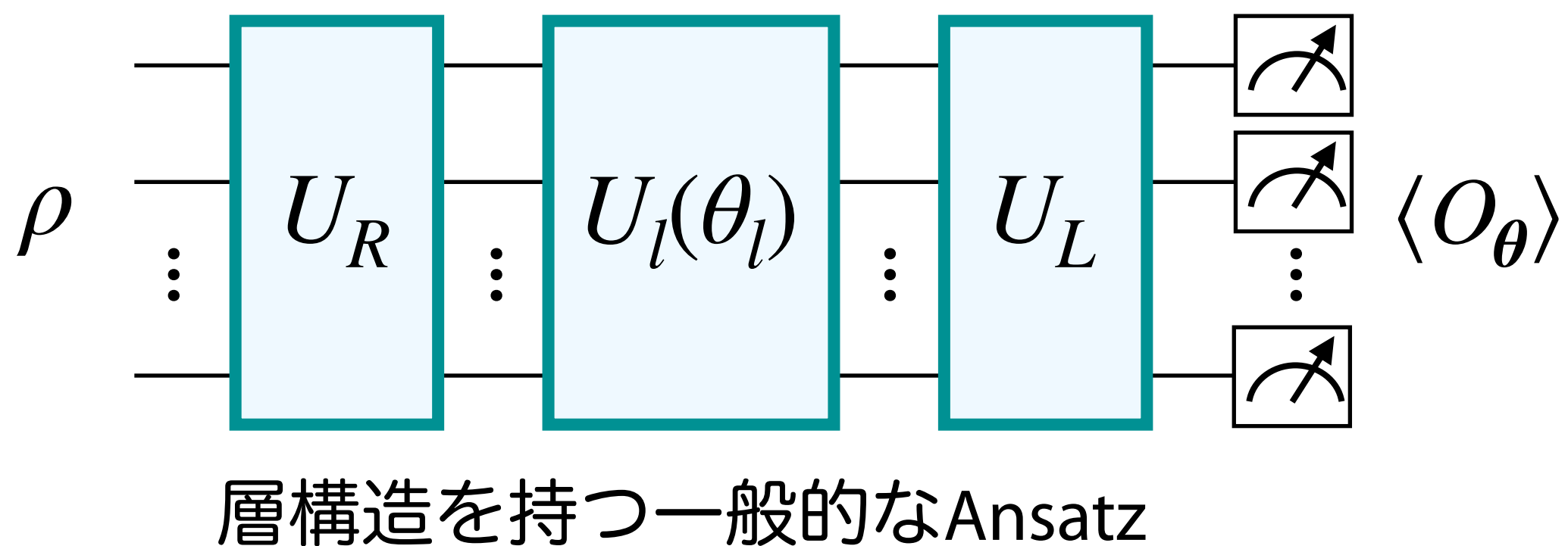
[S. Thanaslip et al., arXiv:2110.14753](#)



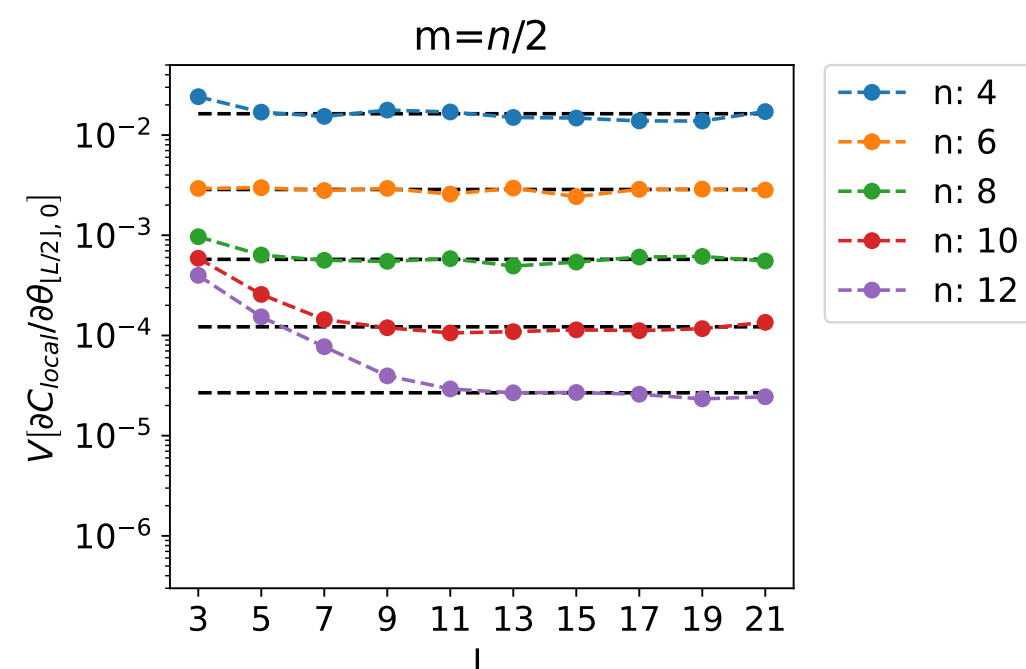
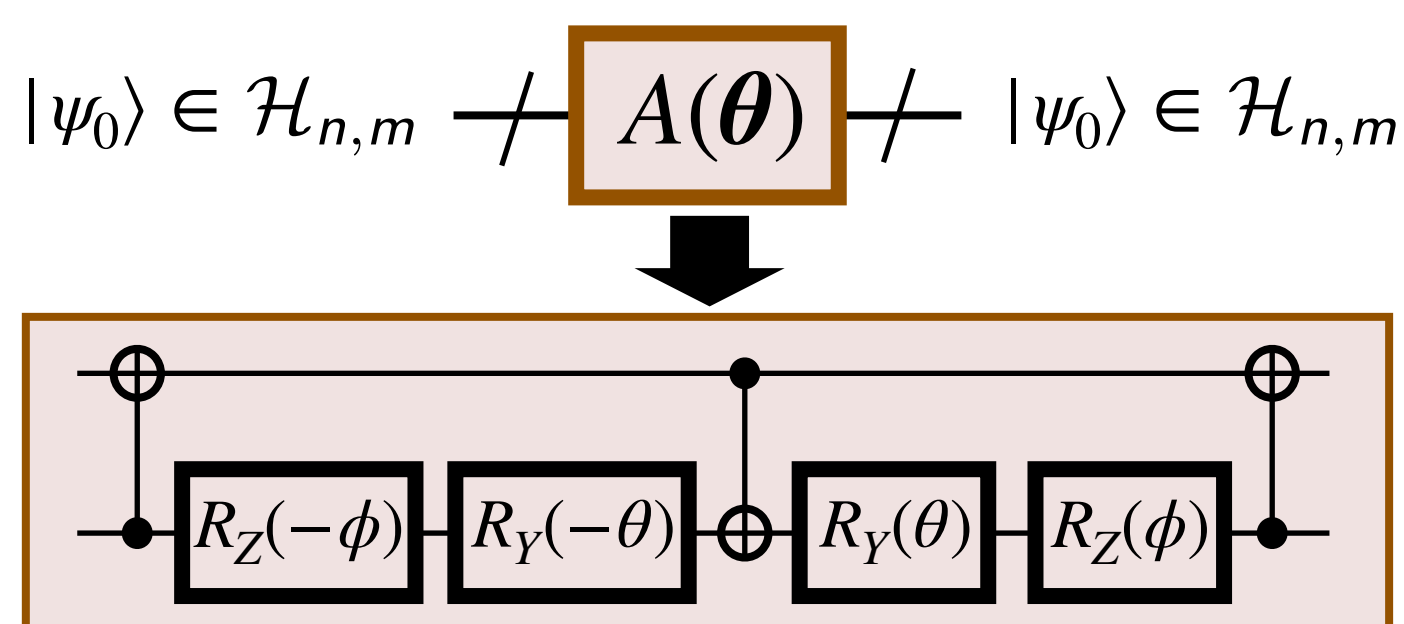


# バレンプラトー問題

- ▶ Ansatz構造に依存しないコスト関数の一般的性質の解析 → 勾配消失の要因の導出



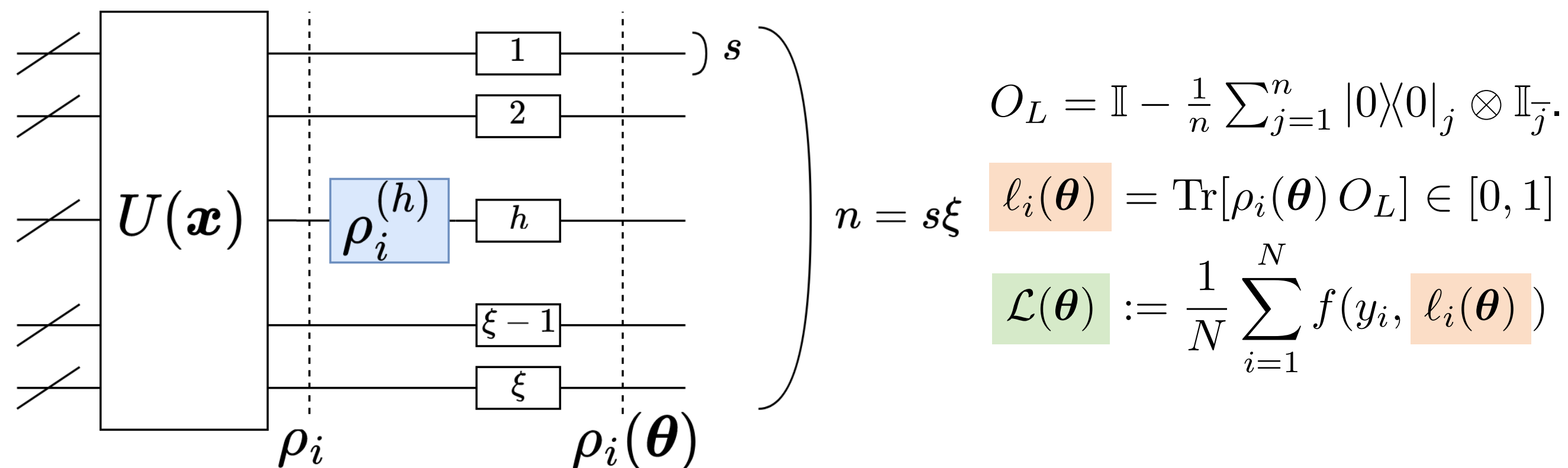
- ▶ 問題を考慮したAnsatzを使った場合の、コスト関数と勾配消失の関係の数値検証



大久保, 永野, 量子ソフトウェア研究会 (2022/5)

量子機械学習には古典データの符号化が必要

→ 符号化用のAnsatzに由来する勾配消失の理解



損失関数  $\mathcal{L}(\theta)$  の勾配分散(の上限)を、Hilbert-Schmidt 距離を使って解析的に評価

$$\text{Var}_\theta[\partial_{\theta_\nu} \mathcal{L}(\theta)] \leq A_f \times r_{n,s} \times \int_{\mathbb{U}_x} dU D_{HS}(\rho_x^{(h)}, \mathbb{I}/2^s)$$

データ符号化に依存する項のスケールングを評価し、勾配消失を起こさないための必要条件を導出

上曾山, 永野, 寺師 日本物理学会 (2023/3)

次のステップ：勾配分散の下限を解析的に調べる

# 量子ダイナミクスシミュレーション+機械学習

量子データの学習によって、非自明な予測が可能か？

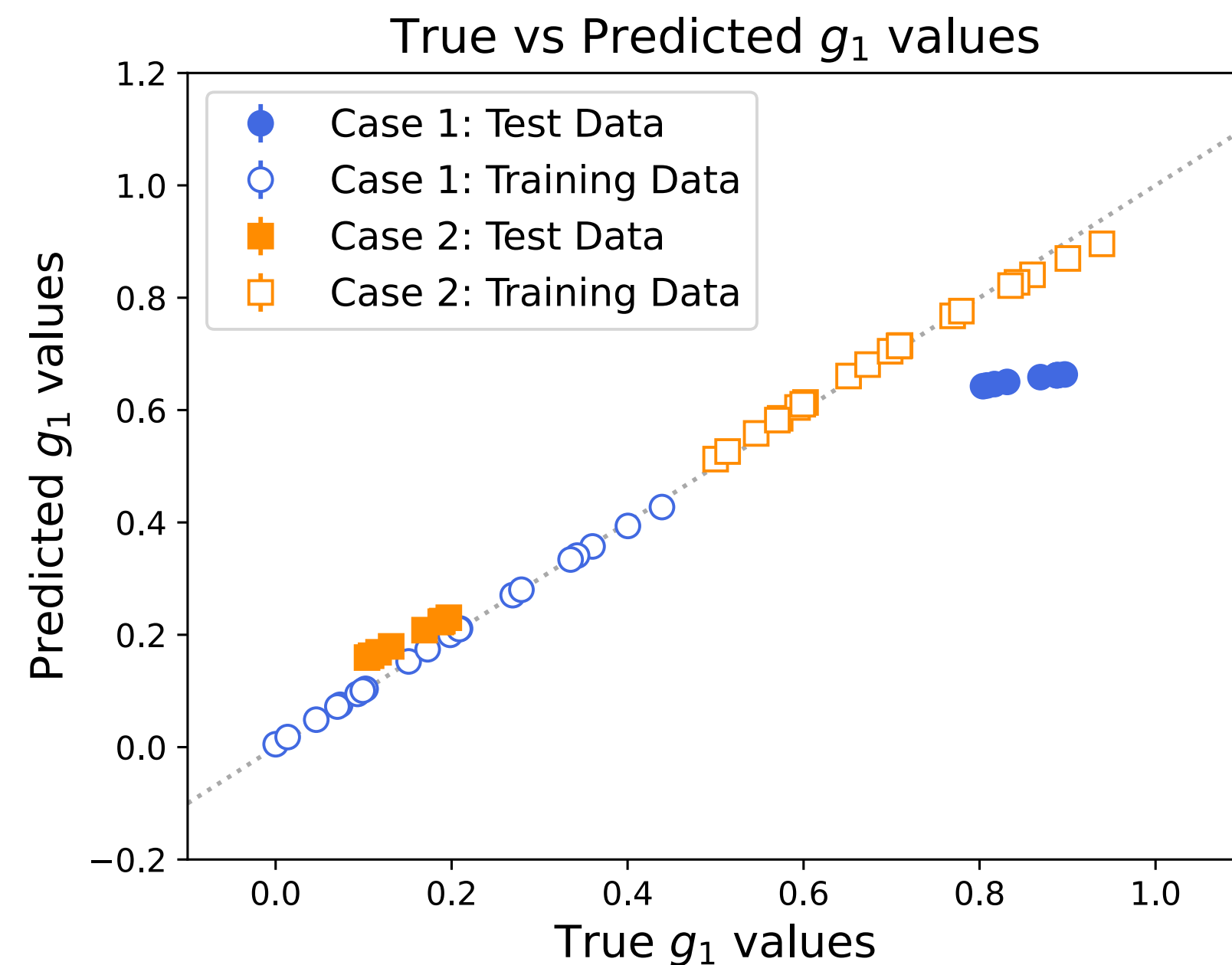
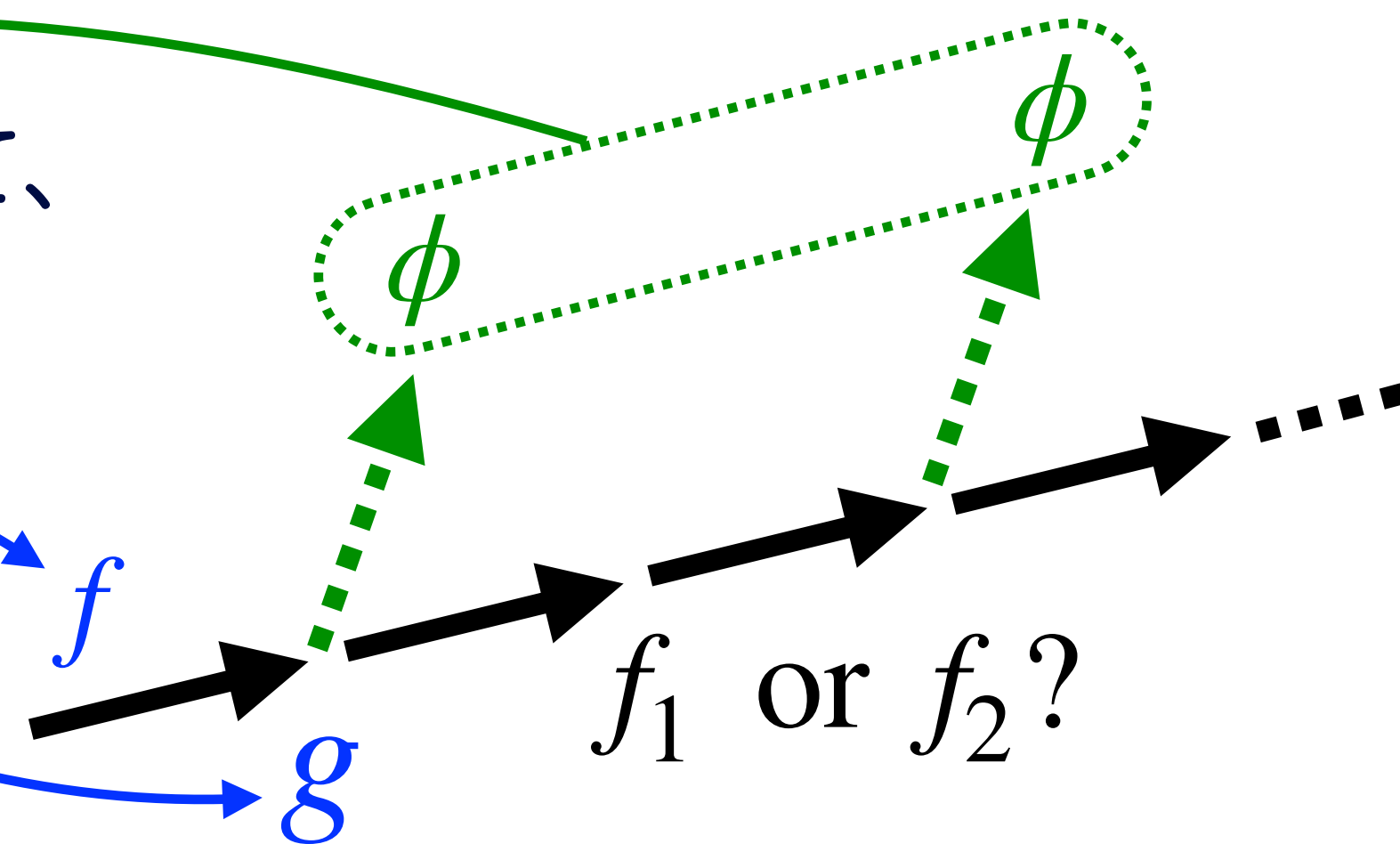
**パートンシャワー** ➡ 高エネルギー物理での基礎過程の一つ

放出された $\phi$ 粒子を入力として、

シャワーの性質:

- ▶  $f$  粒子のフレーバー
- ▶  $f\phi$ 間の結合定数 $g$

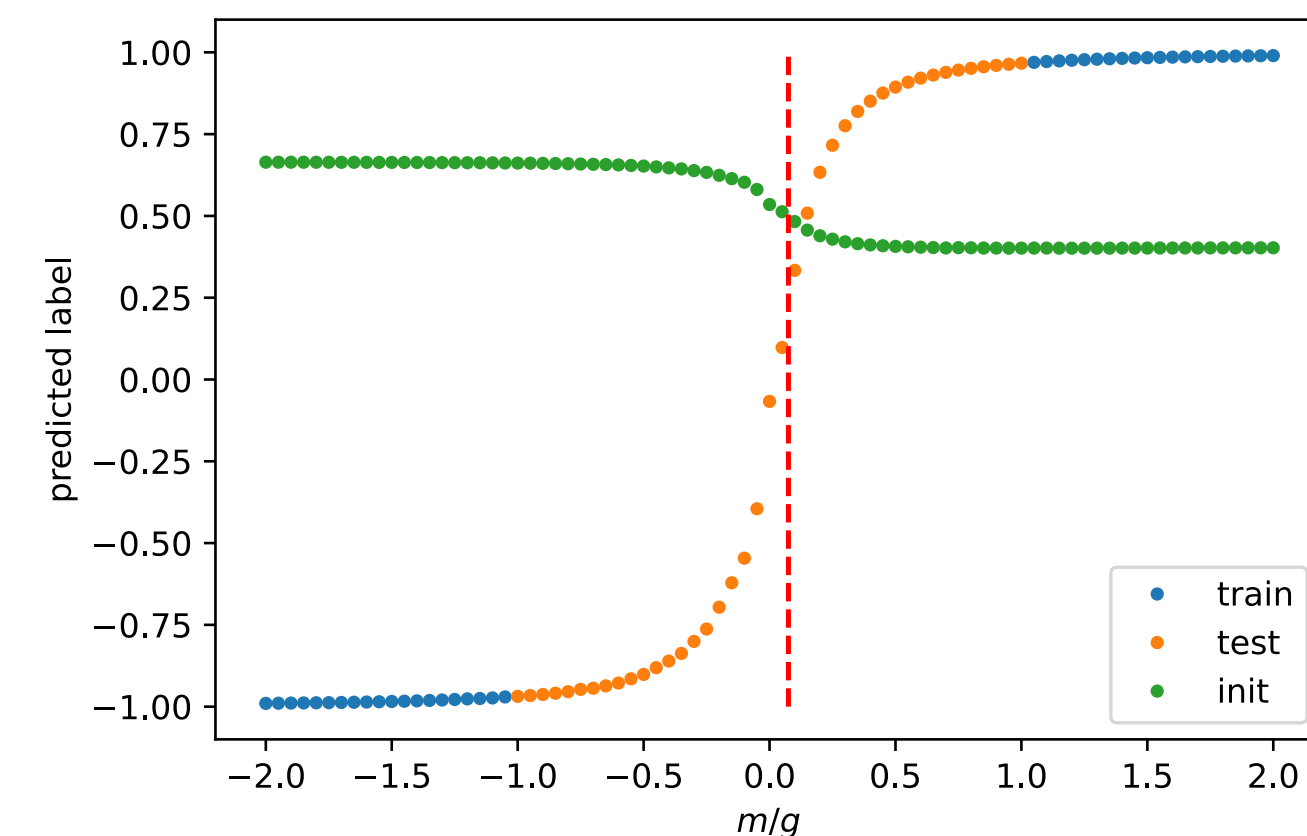
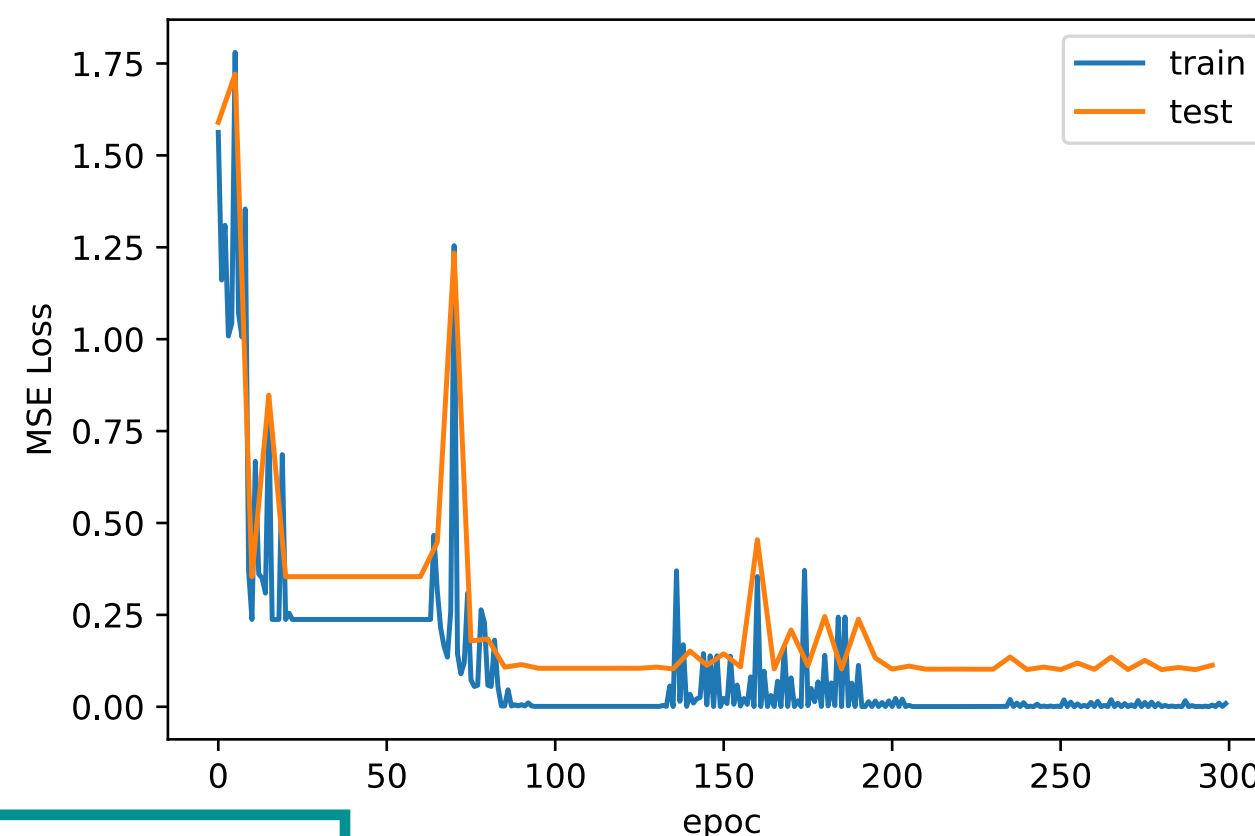
を引き出す



**シュウィンガー(1次元QED)模型** ➡ シンプルな場の理論モデル

トポロジカル項による相転移を識別する

- ▶ フェルミオン場の量子状態  $\{|\psi^{(i)}\rangle\}$  をデータとして生成
- ▶ 量子AIを使って、その状態が属する相を見つける



汎化性能の検証、ハミルトニアンのパラメータ決定



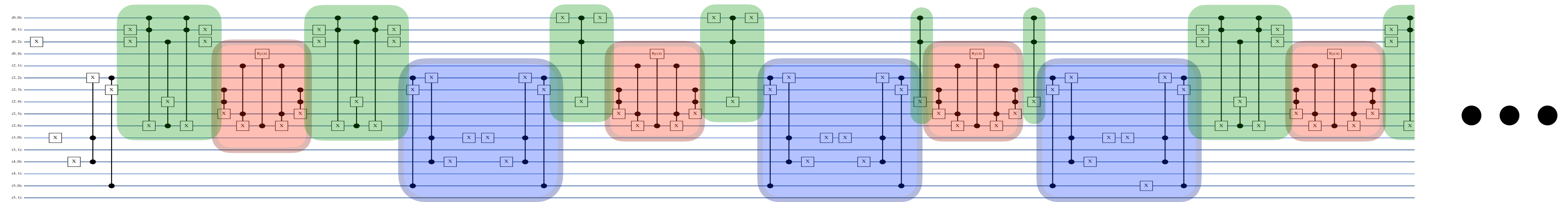
# 量子ソフトウェア

量子アルゴリズム → 量子回路

回路の最適化

AQCEL最適化ツール

[arXiv:2102.10008](https://arxiv.org/abs/2102.10008)

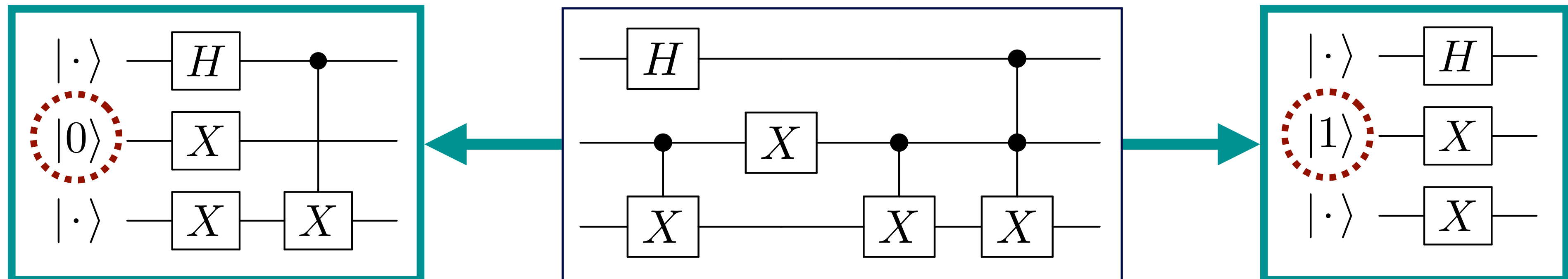


繰り返しゲートの同定

余分なビット制御の削除

余分なゲートの削除

状態の等価性を保ちながら、初期状態に応じて  
不要なゲート制御を多項式時間で削除する





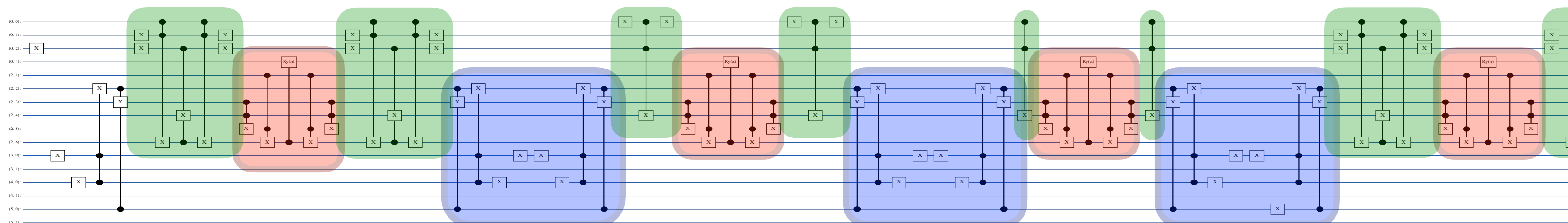
# 量子ソフトウェア

量子アルゴリズム → 量子回路

回路の最適化

AQCEL最適化ツール

[arXiv:2102.10008](https://arxiv.org/abs/2102.10008)



繰り返しゲートの同定

余分なビット制御の削除

余分なゲートの削除

全体の振幅

真の振幅

ノイズによる振幅

閾値

$|0\rangle$   $|1\rangle$   $|2\rangle$   $|3\rangle$   $|4\rangle$   $|5\rangle$  ...  $|13\rangle$   $|14\rangle$   $|15\rangle$

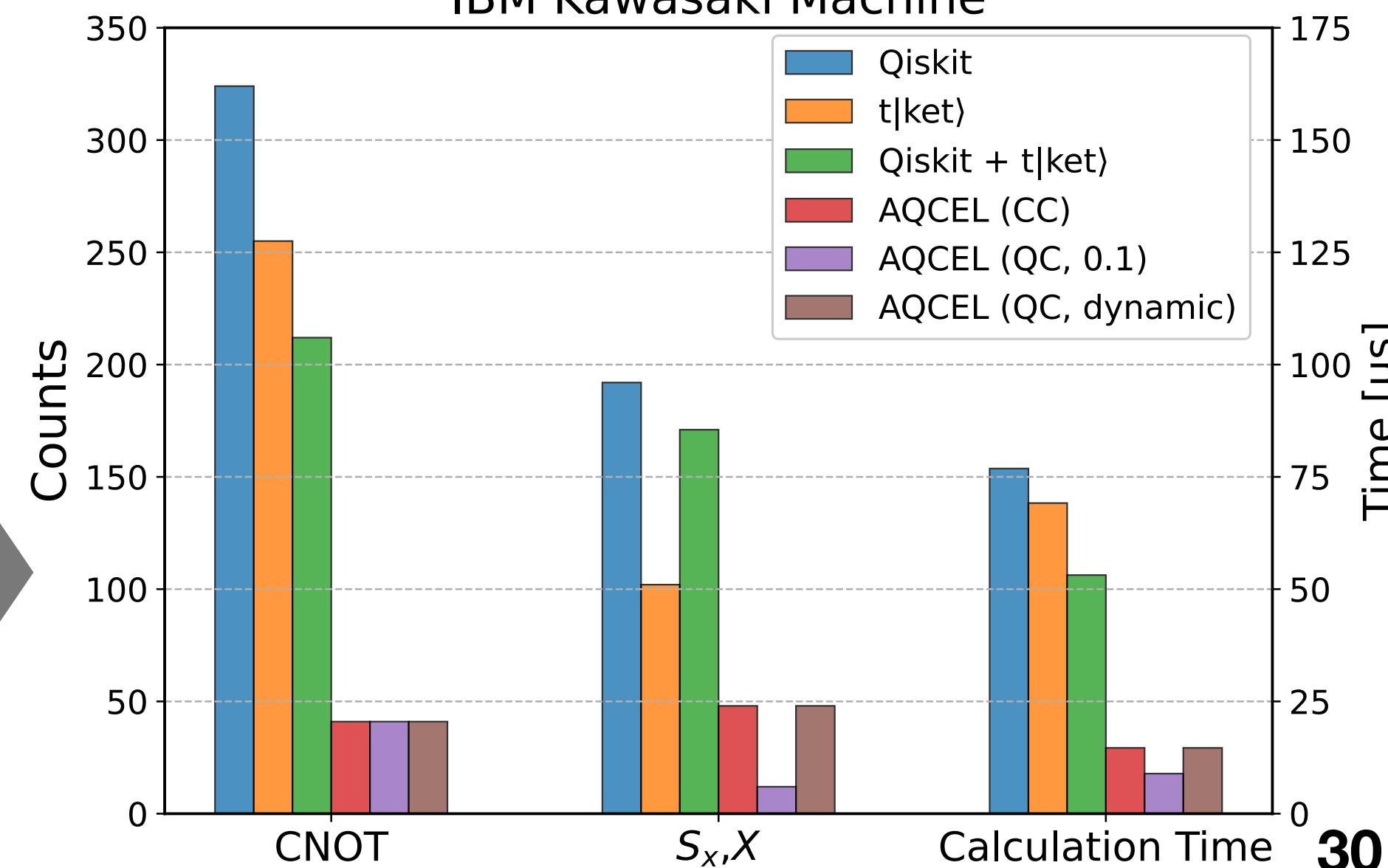
ノイズを除いた振幅

$|0\rangle$   $|1\rangle$   $|2\rangle$   $|3\rangle$   $|4\rangle$   $|5\rangle$  ...  $|13\rangle$   $|14\rangle$   $|15\rangle$

実機での基底測定

多項式時間でのビット制御削除

IBM Kawasaki Machine



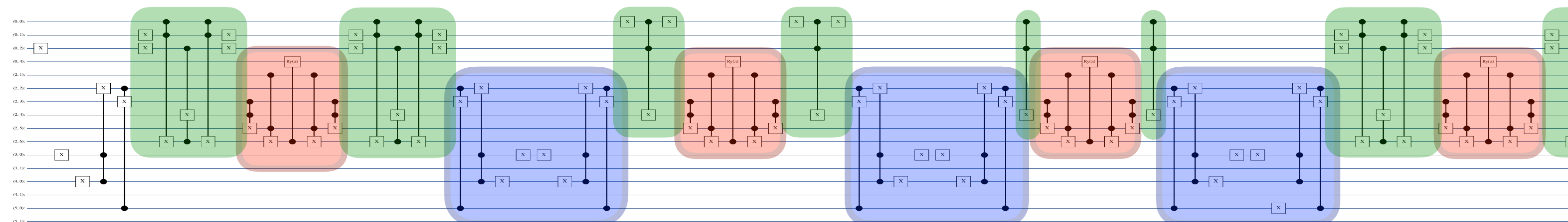
# ハードウェア制御

量子アルゴリズム → 量子回路

## AQCEL最適化ツール

[arXiv:2102.10008](https://arxiv.org/abs/2102.10008)

回路の最適化

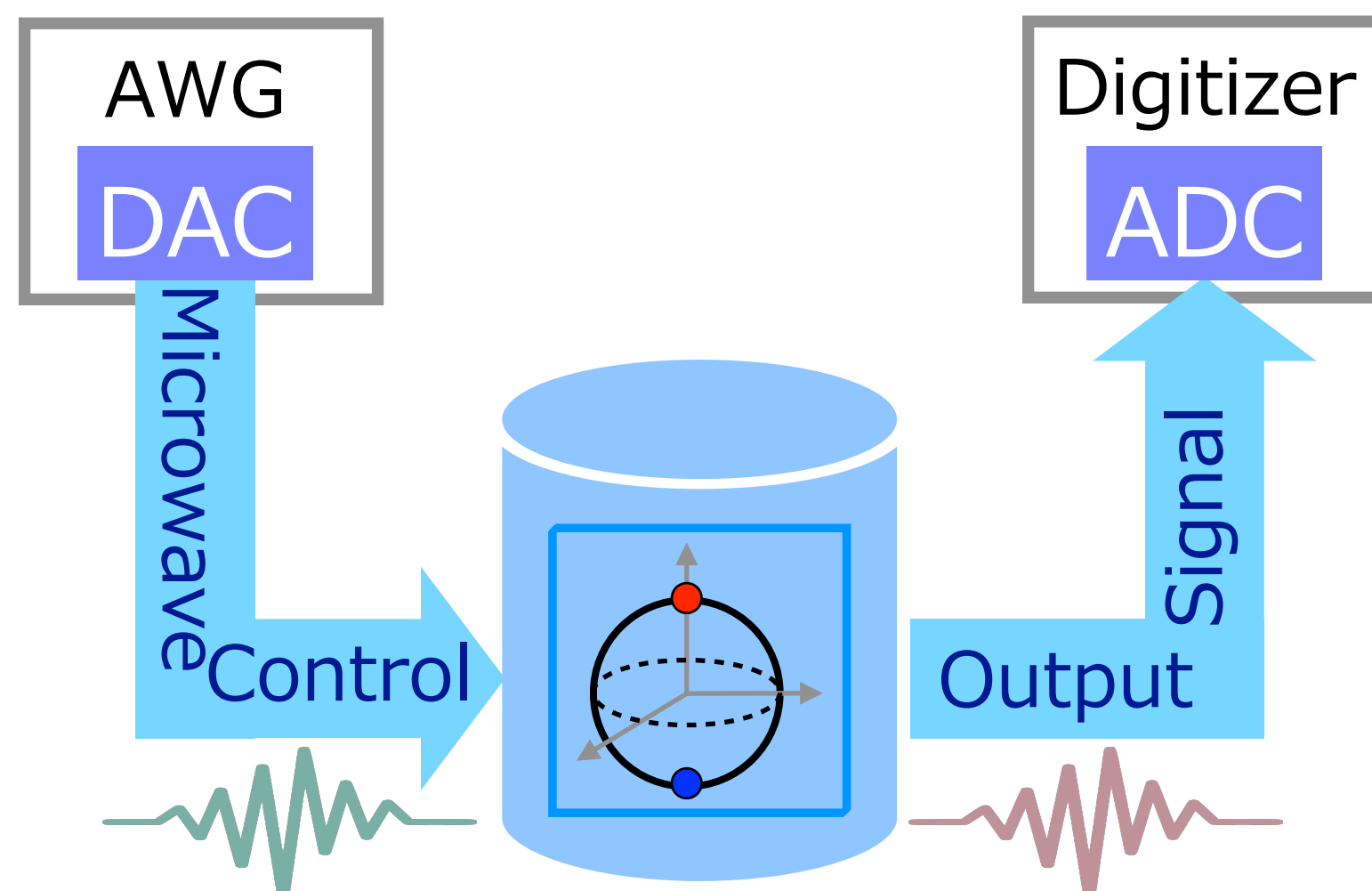


繰り返しゲートの同定

余分なビット制御の削除

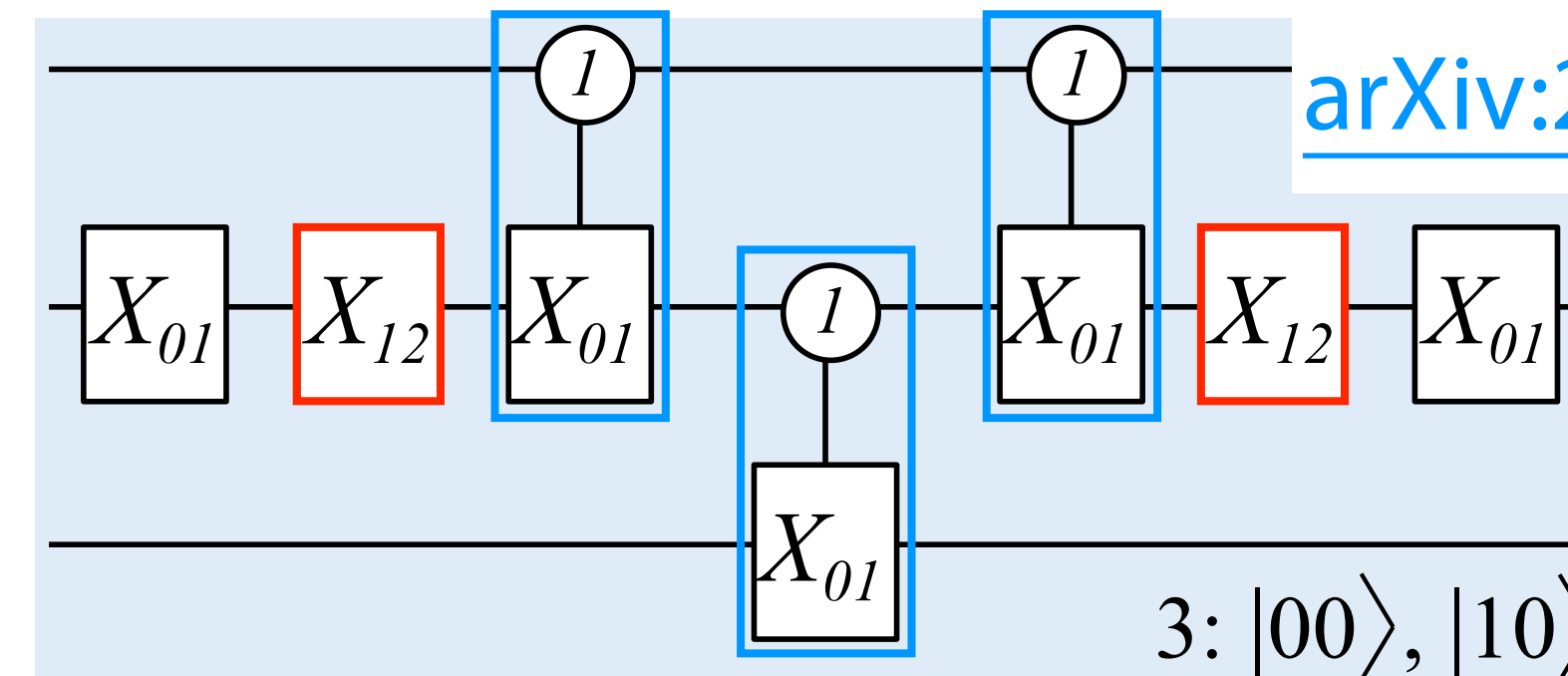
余分なゲートの削除

パルスの最適化



トフォリゲートの量子トリット実装

[arXiv:2109.00086](https://arxiv.org/abs/2109.00086)



量子トリットゲートのパルス実装を進めている

アプリケーションに適したパルス設計



# 量子トリットを用いたトフォリゲート実装

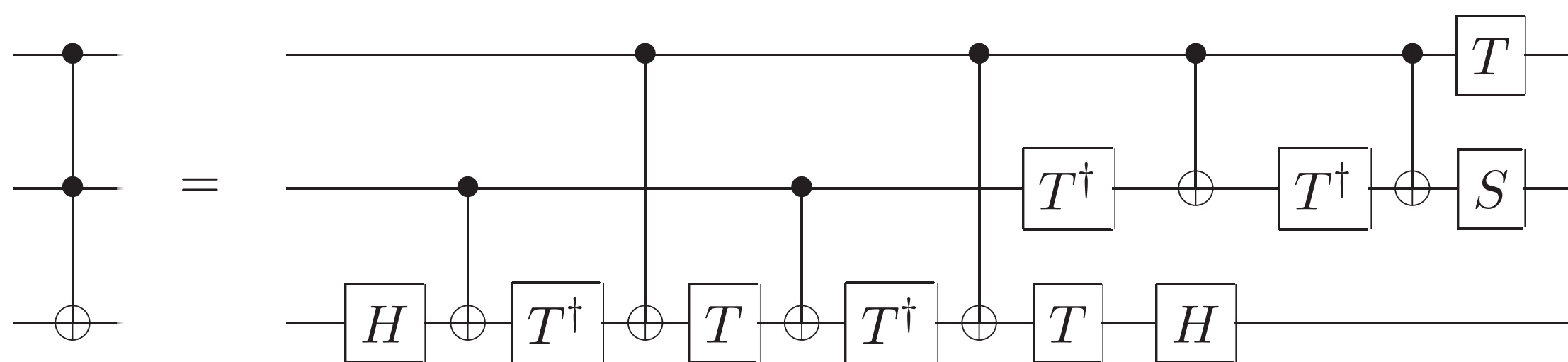
$d$ 準位系(Qudit)の高い内部自由度を使い、量子ビットより低コストで計算ができる可能性

3準位系(Qutrit)をパルスエンジニアリングで実装する → 既存のシステムで実現可能

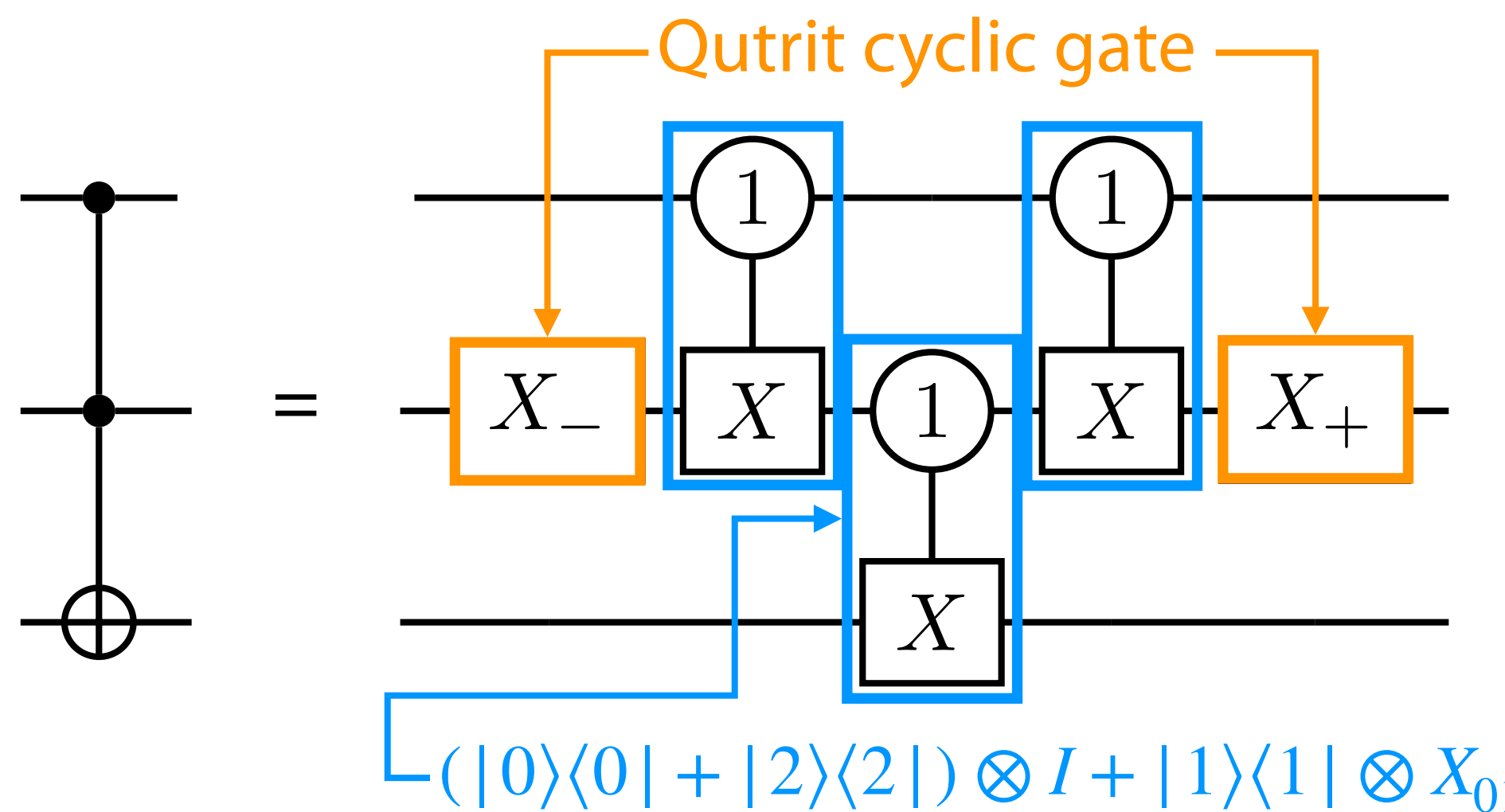
トフォリゲートはユニバーサル計算・エラー補正・高エネルギー物理シミュレーションへの応用が可能

## 通常の実装

→ 少なくとも6個のCNOTが必要

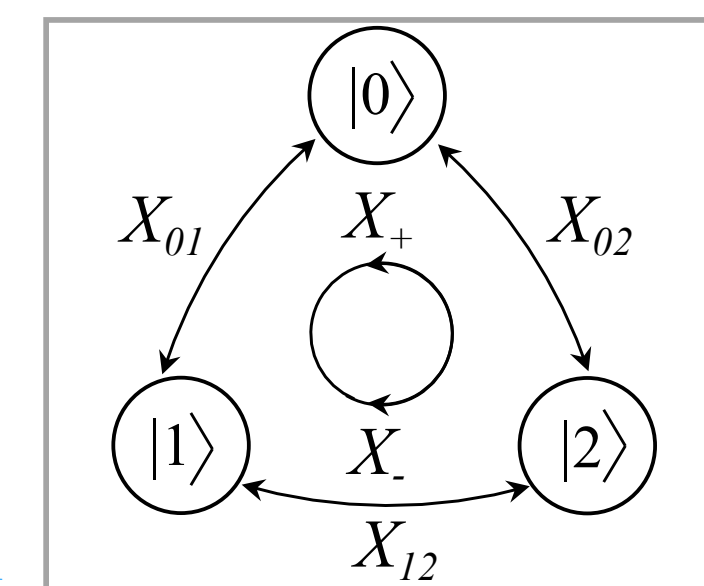


## 量子トリットを用いた実装



Inada et al.,  
[arXiv:2109.00086](https://arxiv.org/abs/2109.00086)

$$X_+ = X\Xi \quad X_- = \Xi X$$



➡ CNOTを減らすことが可能

量子トリット  
実装の課題

- ▶  $|2\rangle$ 状態は電荷揺らぎに弱く、 $\omega_{12}$ 周波数がランダムにずれていく
- ▶ 他準位への漏れによって、遷移周波数にずれが起こる

# 量子トリットを用いたトフォリゲート実装

量子トリットによるトフォリ実装のためのパルスを開発し、IBM量子コンピュータで検証した

1量子トリットゲート： $X_{01}, X_{12}$

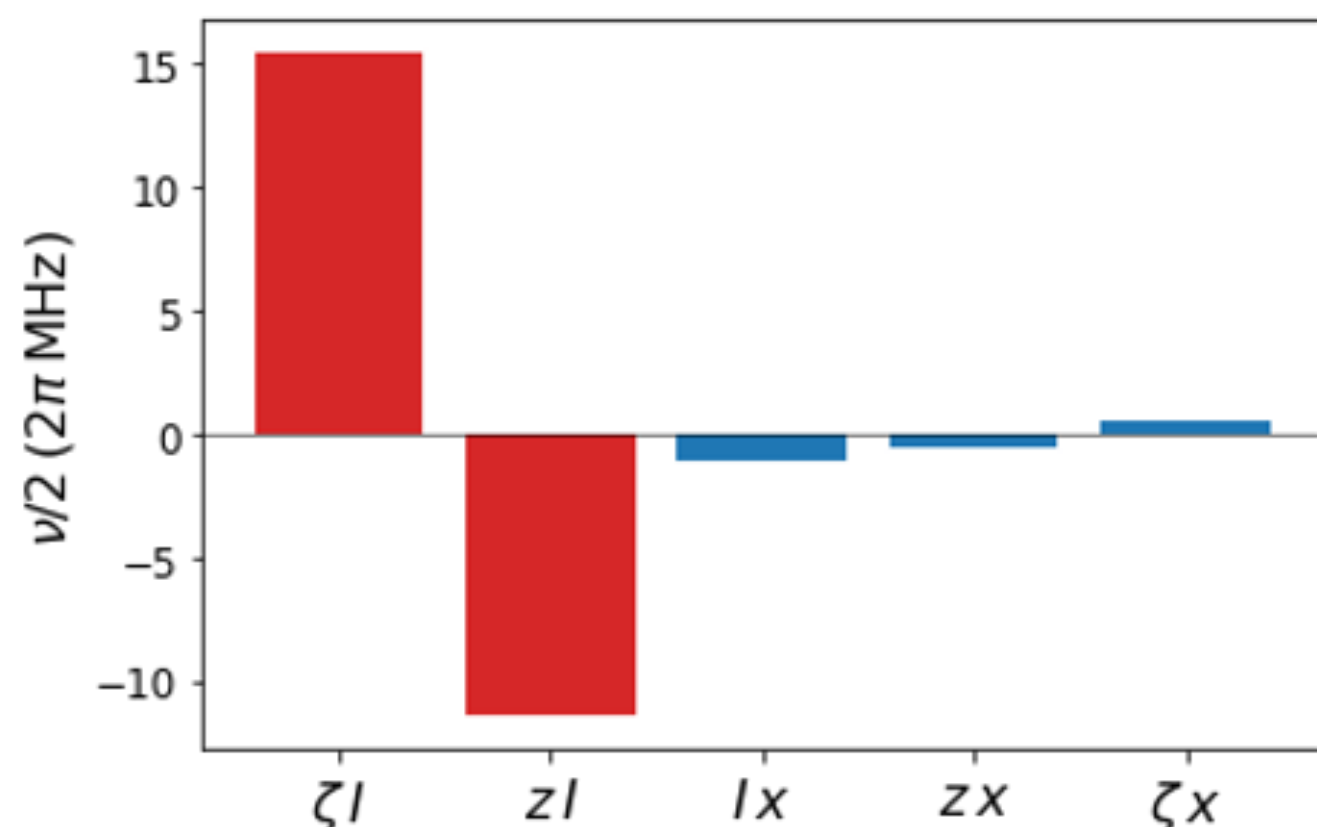
$|0\rangle \rightarrow |1\rangle, |1\rangle \rightarrow |2\rangle$  遷移周波数でのXゲート

2量子トリットゲート： $C_1X_{01}$

量子トリットペアに対する交差共鳴パルス

➡ 実効ハミルトニアン

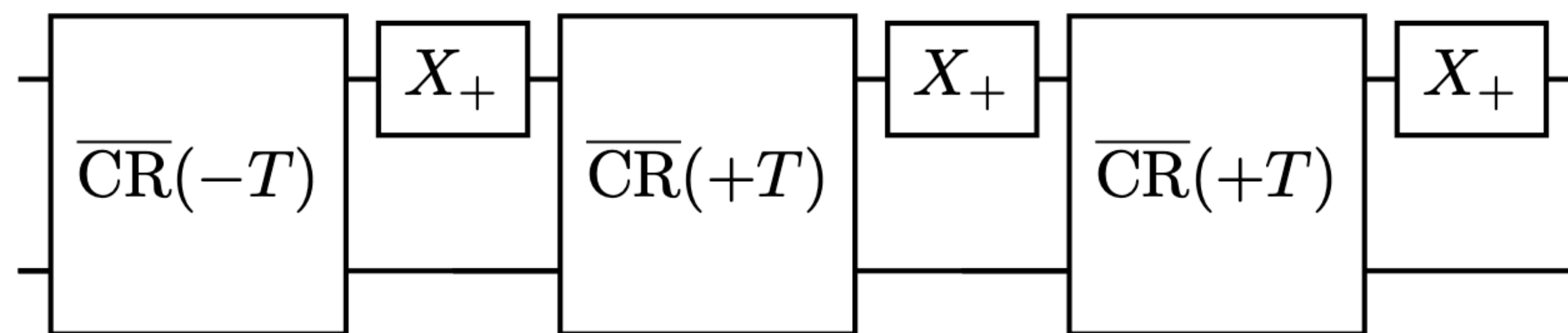
$$H_{\text{CR}}^{\pm} = \nu_{zI} \frac{zI}{2} \pm \nu_{zx} \frac{zx}{2} + \nu_{\zeta I} \frac{\zeta I}{2} \pm \nu_{\zeta x} \frac{\zeta x}{2} \pm \nu_{Ix} \frac{Ix}{2}$$



Generatorの係数

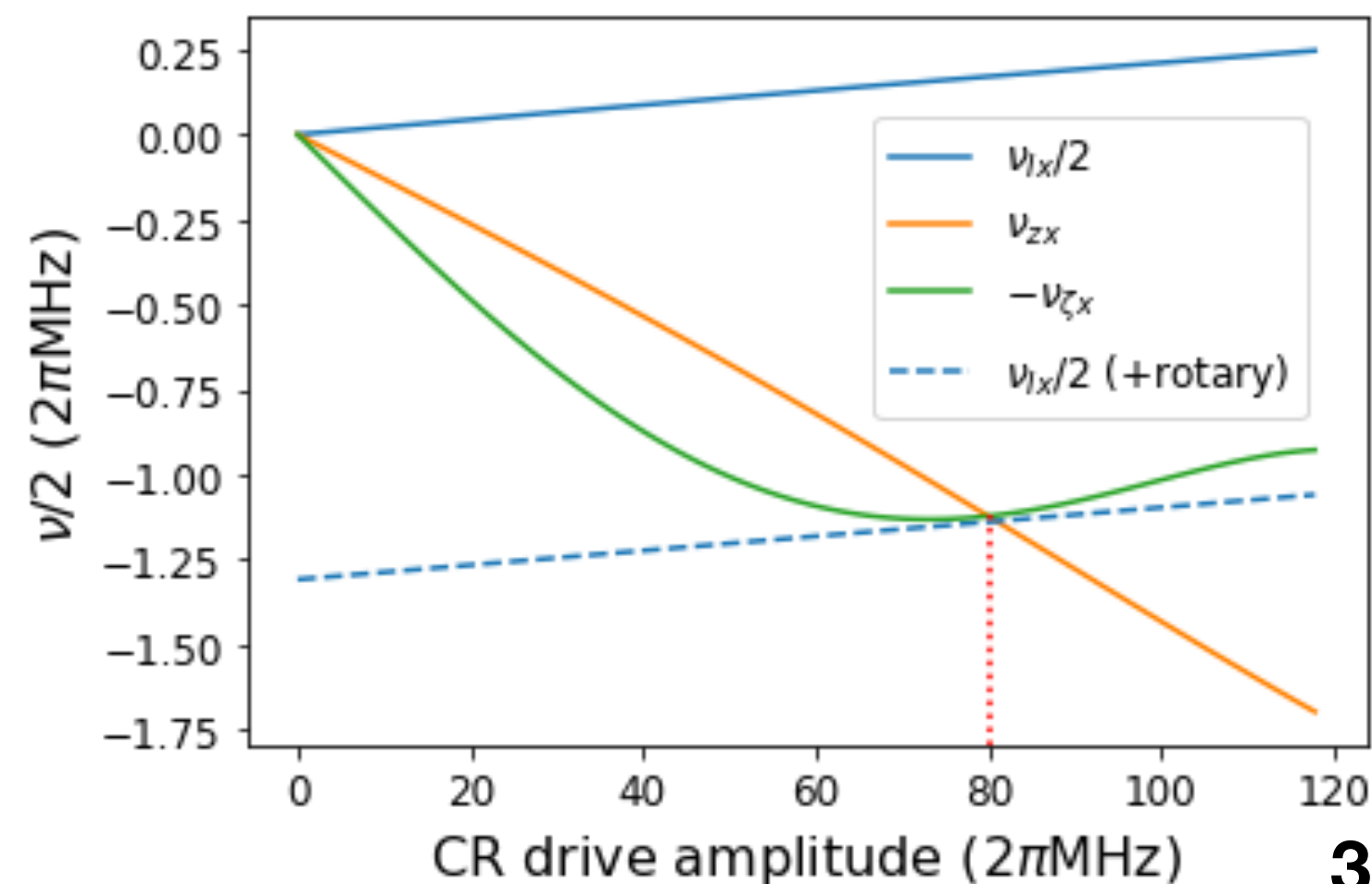
意図しない項 ( $zI, \zeta I$ ) の寄与が大きく、それらを取り除く必要がある

➡ エコー交差共鳴パルスを使って、 $zI, \zeta I$ 項の寄与を打ち消す



$\nu_{zx} = -\nu_{\zeta x} = \nu_{Ix}/2$  の振幅を持つ駆動パルスを使うことで、 $(|0\rangle\langle 0| + |2\rangle\langle 2|) \otimes I + |1\rangle\langle 1| \otimes X_{01}$  として機能する

量子トリットベースのCNOT実装が可能

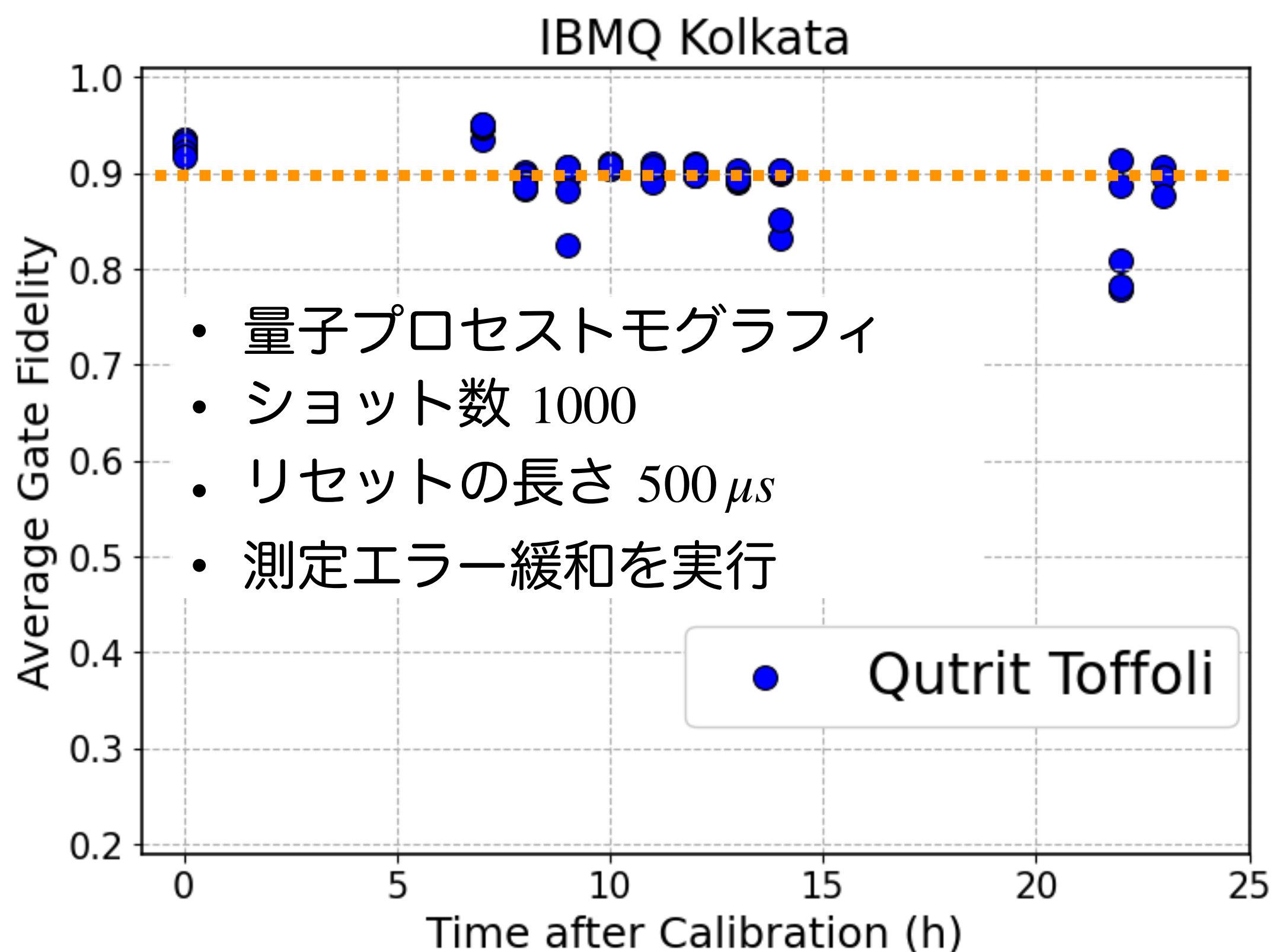




# 量子トリットを用いたトフォリゲート実装の実験

Qiskit Pulseを使ってトフォリゲートのパルスシーケンスを設計し、IBM量子コンピュータibmq\_kolkataに実装した

フィデリティを24時間に渡って測定し、周波数のずれに対してロバストであることを実証

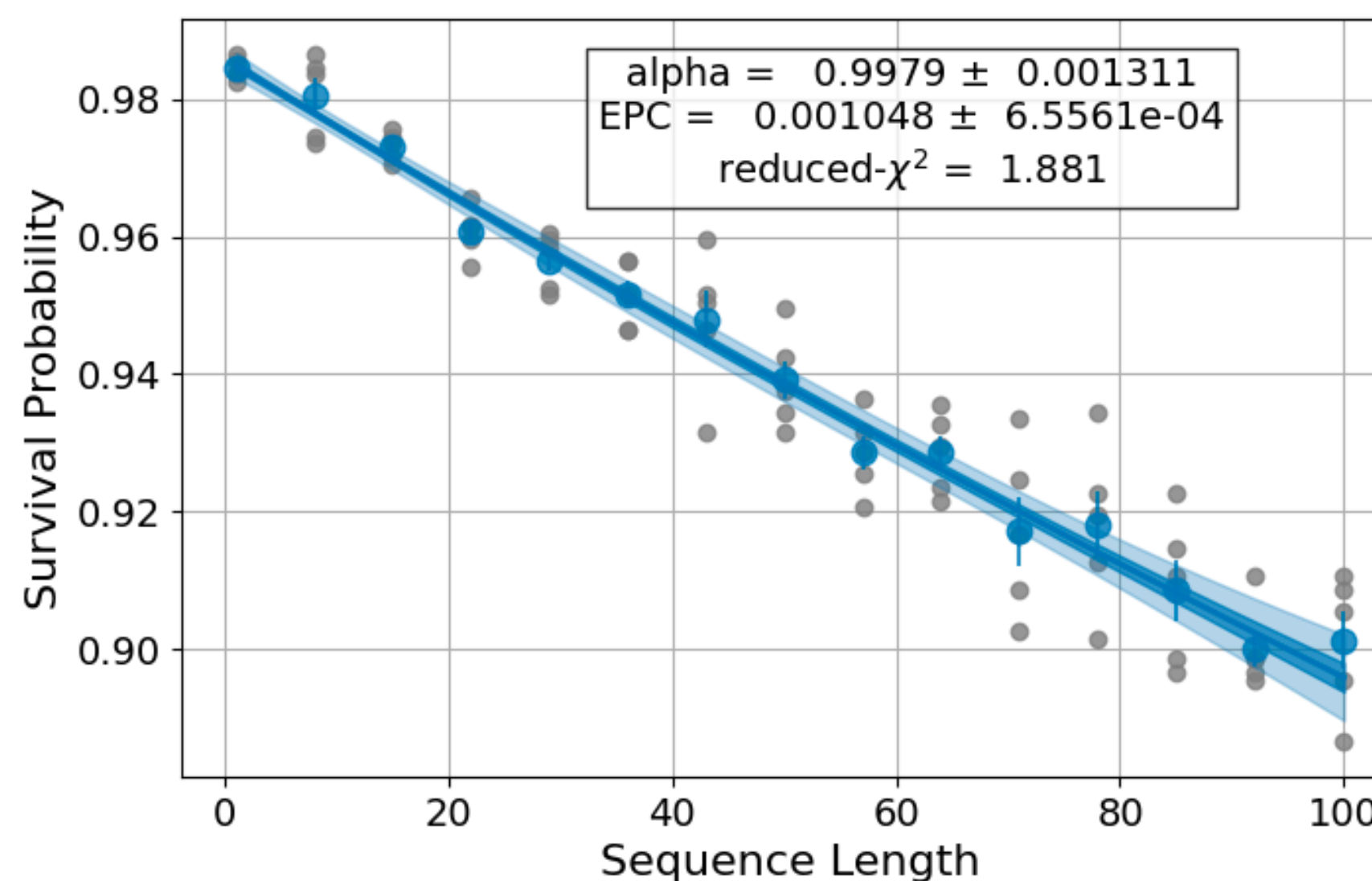


Qiskit Runtime用のパルス較正プログラムを作成中

- 1量子トリットゲートからトフォリシーケンスまで
- Qiskit Experimentを使ったパルス較正の自動解析

量子トリットゲートの精度向上

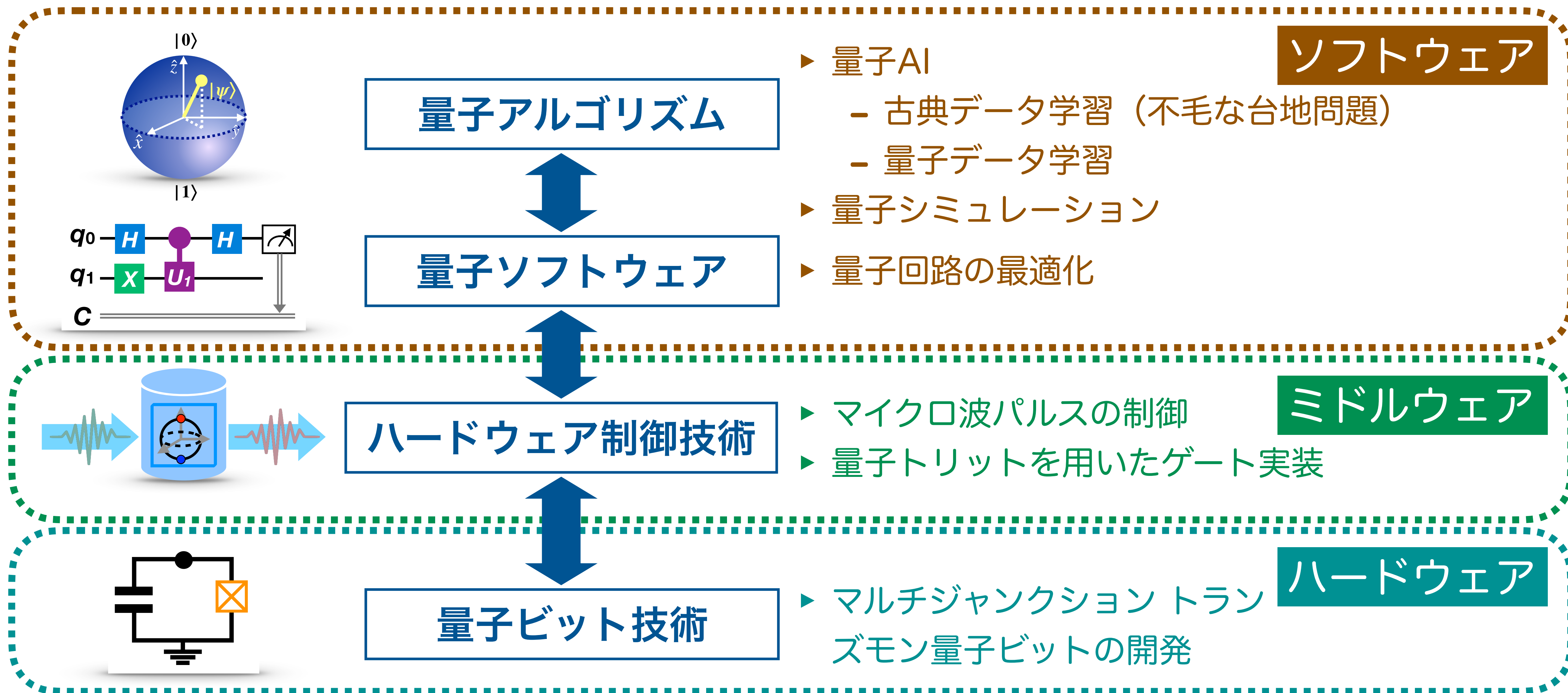
- 1量子トリットゲート、量子トリット-量子ビットCNOTゲート



IEEE Quantum Week (2022/9)で張(M2)が報告  
[Proceedings in IEEE Xplore](#)

# 量子コンピュータの研究開発

量子コンピューティング技術の各階層で、目的に応じた開発(Co-design)が重要



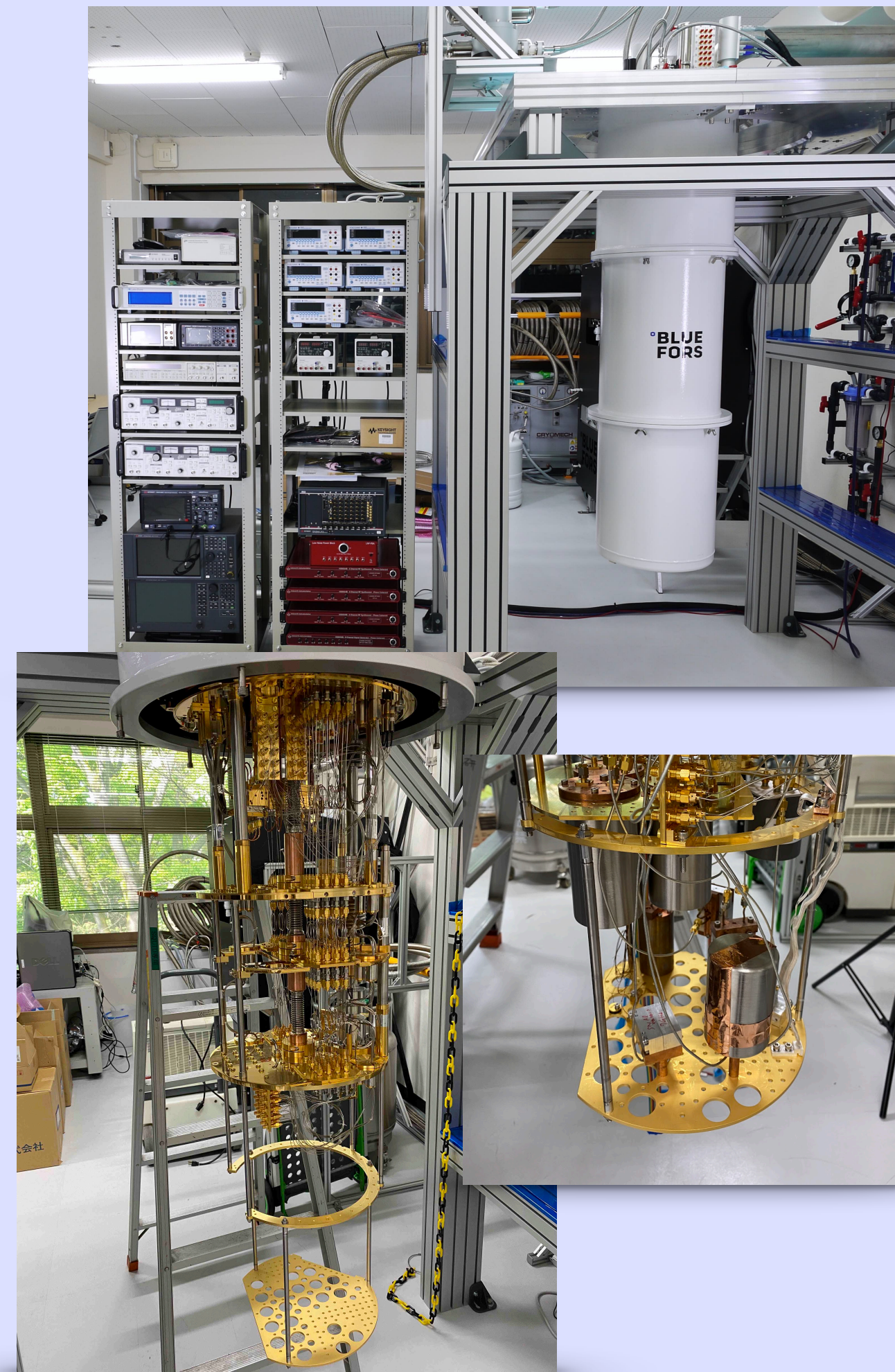


# 研究環境

## 超微細リソグラフィ・ ナノ計測拠点（武田CR）



## 極低温量子プラットフォーム フォーム（浅野）



## ハードウェアテスト センター（浅野）



## IBM System One（新川崎）





# ICEPPでの量子コンピュータ教育

研究を始めるための教育環境も充実

量子ネイティブ育成センター



[qnec.jp](https://qnec.jp)

量子コンピューティング・ワークブックへようこそ!

このウェブサイトは、量子コンピューティングを手を動かして学びたい方のための入門教材です。量子力学や計算科学の前提知識を極力必要とせず、大学一年程度の数学とPythonプログラミングの知識があれば、ゼロから量子コンピューティングを自習できるような教材を目指しています。

内容は東京大学素粒子物理国際研究センター (ICEPP) の研究者が選定・執筆しました。私たちの関心は、量子計算そのものを理解することでもありますが、それ以上に量子コンピュータを実際を使って科学や技術を進展させることに向いています。そのため、この教材で扱うトピックや順番は一般的な量子コンピューティングの入門書と異なっています。より体系立った量子計算の理解のためには参考文献に挙げた入門書をおすすめします。

このワークブックは、東京大学量子ネイティブ育成センターによる講義「IBM Qを使った量子コンピューター入門：ハードからソフトまで」の付属教材でもあります。教材の章立ては講義の時間に対応しており、各章の最後に実習課題が設けられています。受講者は課題ページ中で指定された内容をレポートとして提出してください。

ワークブック全体を通じて、QiskitというPythonライブラリでプログラムを書き、作成した量子回路をIBM Quantum Experience (IBMQ)の量子コンピュータで実行します。IBMQを利用するにはアカウントを作成する必要がありますので、実習を始める前に実習の準備を参考に準備をすることをおすすめします。

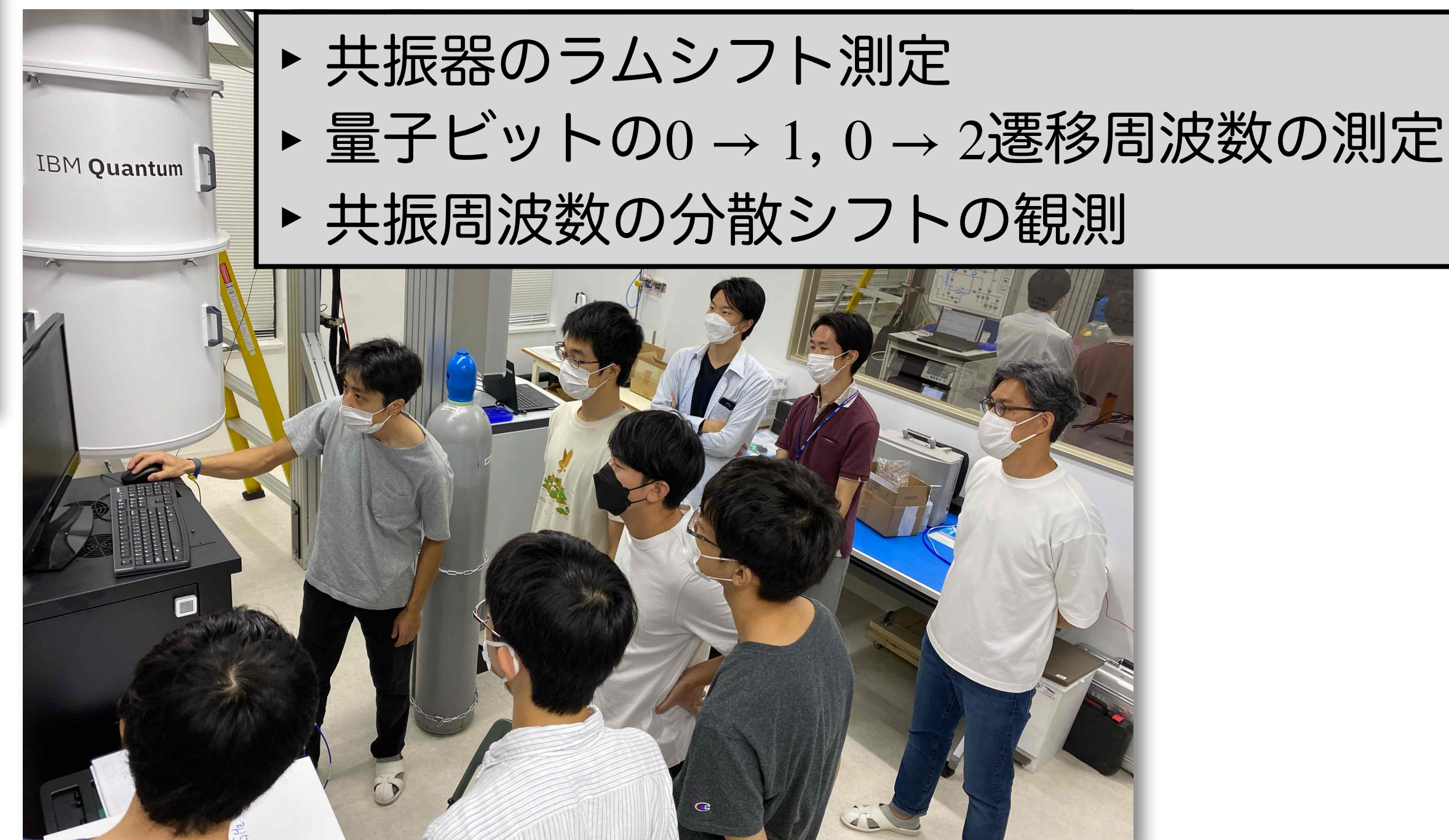
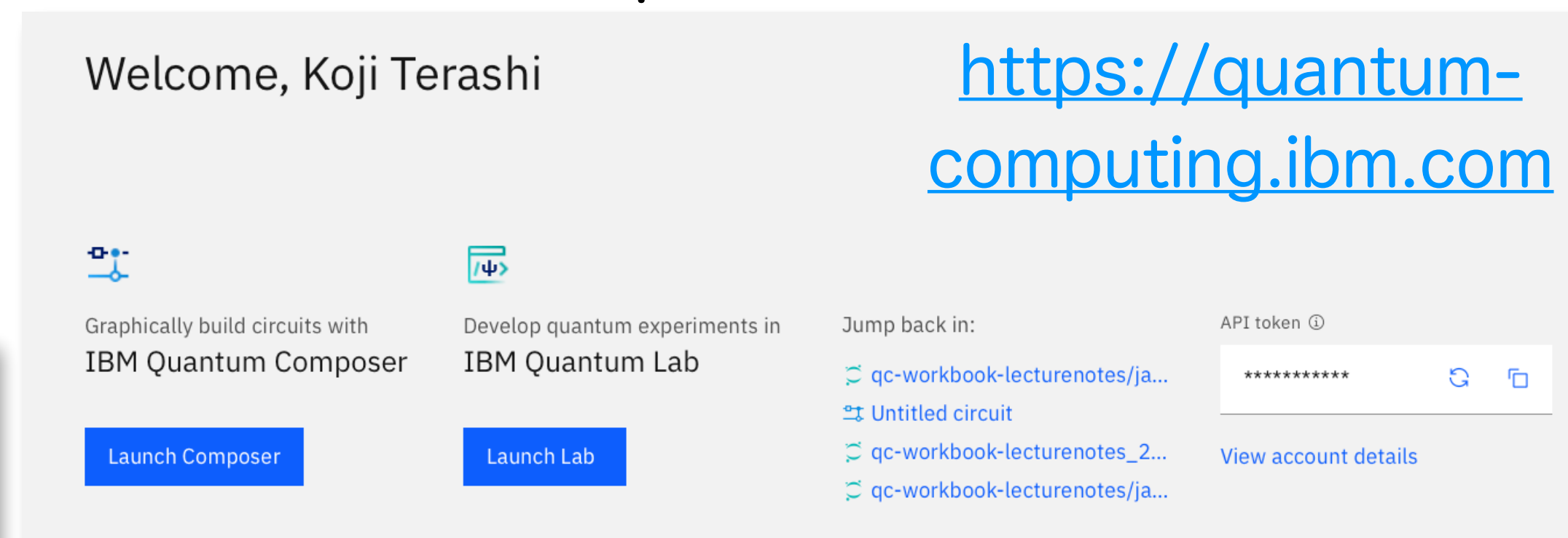
問い合わせ

ワークブックに関する質問・意見・訂正などがあれば、各ページ右上のgithubのアイコンの下のopen issueをクリックしてください。その他の問い合わせやご意見は `qnec@icepp.s.u-tokyo.ac.jp` へお寄せください。

量子コンピューティング  
ワークブック

理学部1号館10階

IBM量子コンピュータの実機を使った実習  
IBM Quantum Experience

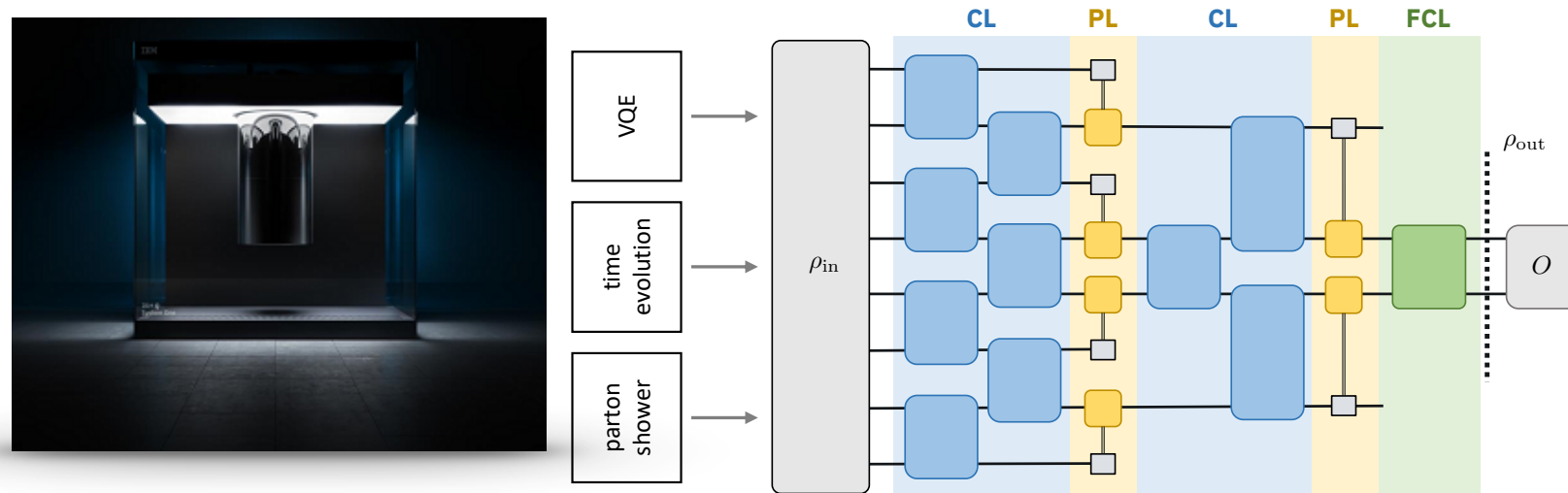


- ▶ 共振器のラムシフト測定
- ▶ 量子ビットの  $0 \rightarrow 1$ ,  $0 \rightarrow 2$  遷移周波数の測定
- ▶ 共振周波数の分散シフトの観測

IBM量子コンピュータ (浅野)



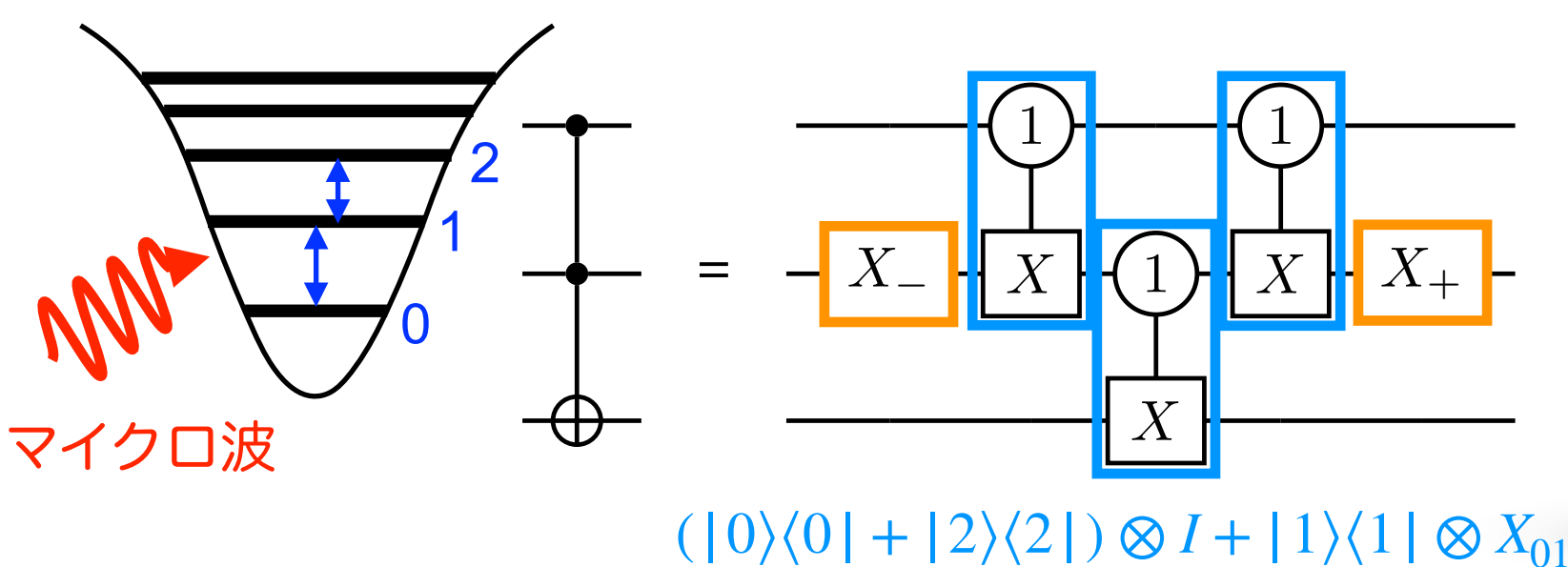
## 量子AI・量子シミュレーション・量子ソフトウェア



## 量子機械学習・量子シミュレーションの研究



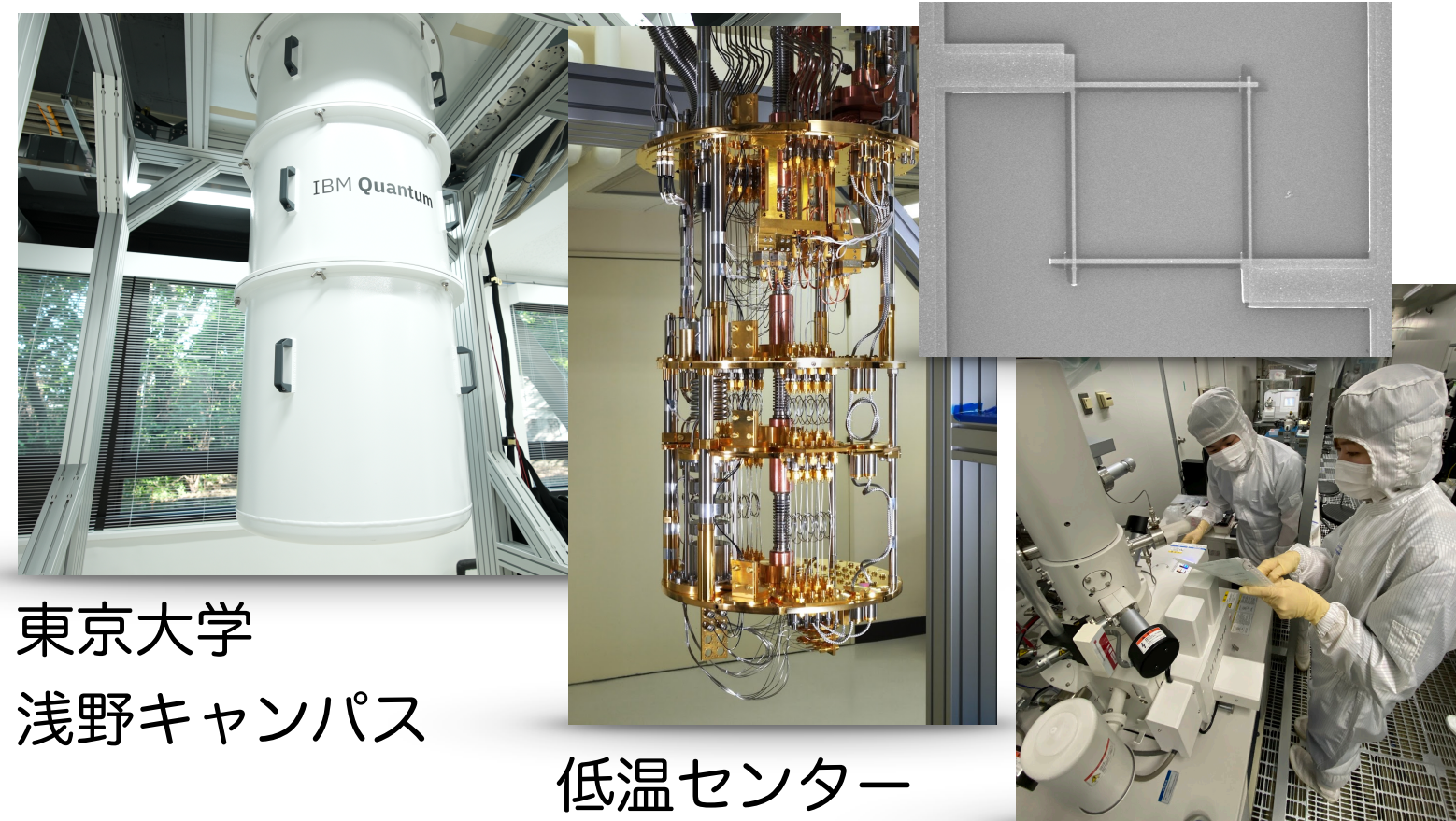
→ [IBM量子コンピュータ \(新川崎\)](#)



## 量子回路・ゲートの設計、実装の最適化

とても新しい分野です。挑戦してみたい方、大歓迎!!

## 超伝導量子ハードウェア・量子センサー実験

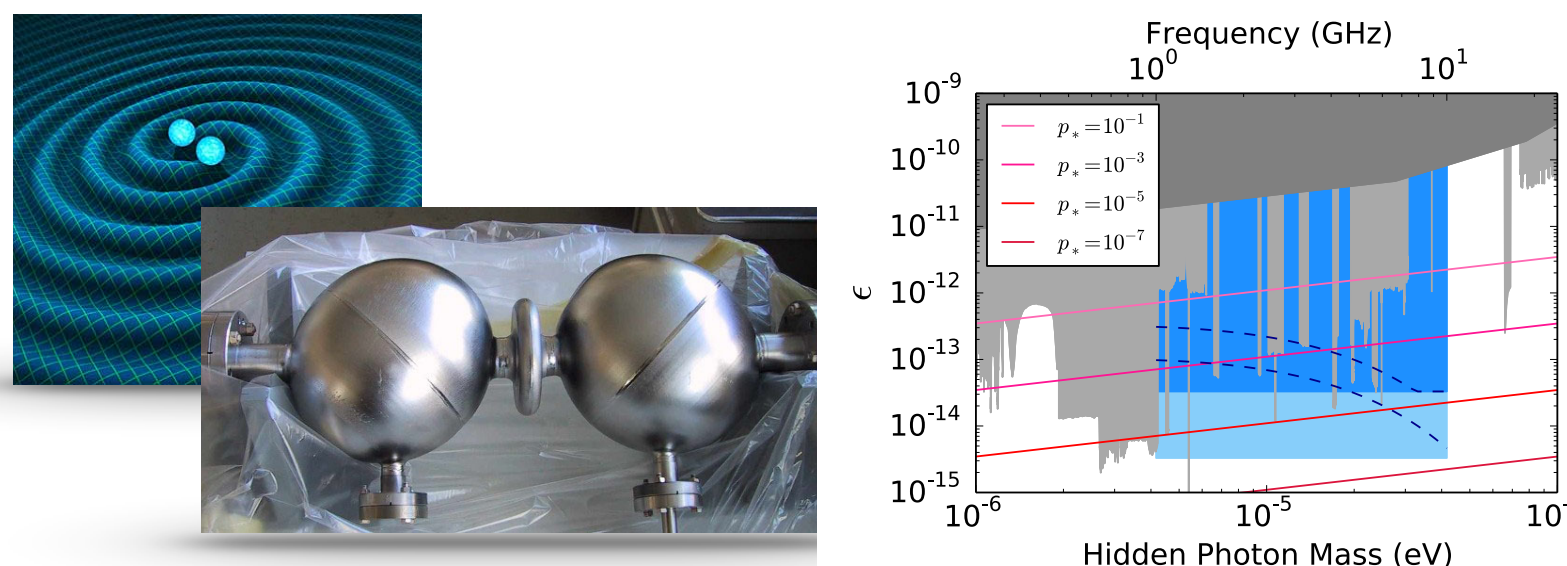


東京大学  
浅野キャンパス

低温センター

## 超伝導量子ビットの開発・高度化

- [ハードウェア・テストセンター](#)
- [量子プラットフォーム \(低温センター\)](#)



## 暗黒物質・重力波の探索

## 量子コンピュータ教育・共同研究



理学部1号館10階



## 量子コンピュータ実習 → [QNEC](#)

- ▶ 量子コンピューティング教材 (実習用ワークブック)

## 共同研究

- ▶ 国際共同研究：バークレー研究所・フェルミ研究所・シカゴ大学
- ▶ IBM・民間企業との共同研究

→ [IBM-東京大学コラボレーションセンター](#)