

ICEPP 学部向け特別セミナー  
2026年6月5日

# 量子 × 素粒子物理の最前線

---

素粒子物理国際研究センター  
寺師 弘二

# なぜ素粒子物理か？



© NASA

いかに宇宙は始まったか，その運命は？

宇宙の最小構成要素：「素粒子」とは？

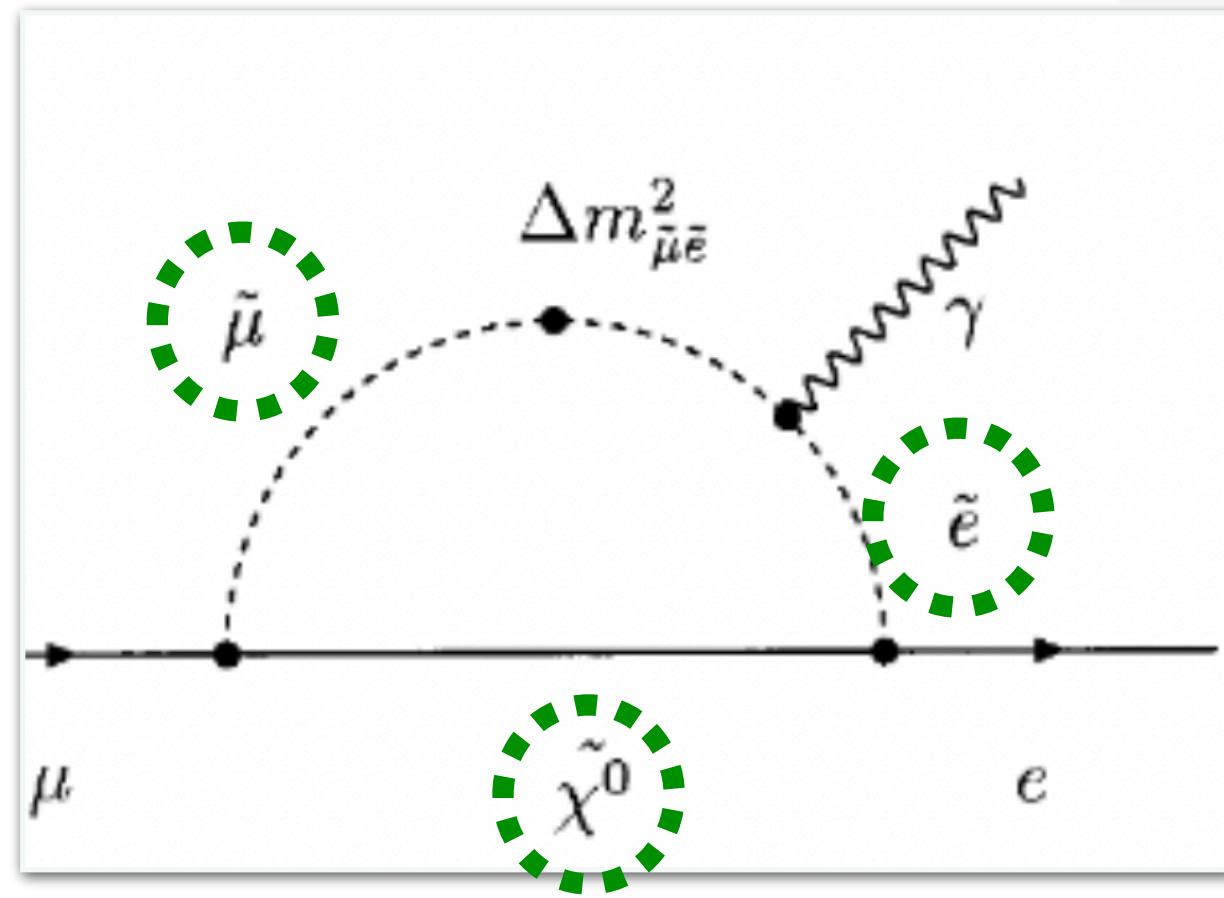
その間（素粒子間）に働く，力とは？

なぜ「そう」なっているか？

# 宇宙の始まりを知るには

① 高いエネルギーで粒子を衝突させる

LHC : 14TeV



② 稀に起こる現象を見る

J-Parc (東海村) , PSI (スイス)  
B-Factor (つくば)

- 量子力学の不確定性原理を利用
- 単時間・重い粒子が出現する
- 陽子崩壊 (神岡)



③ 遠い宇宙を見る

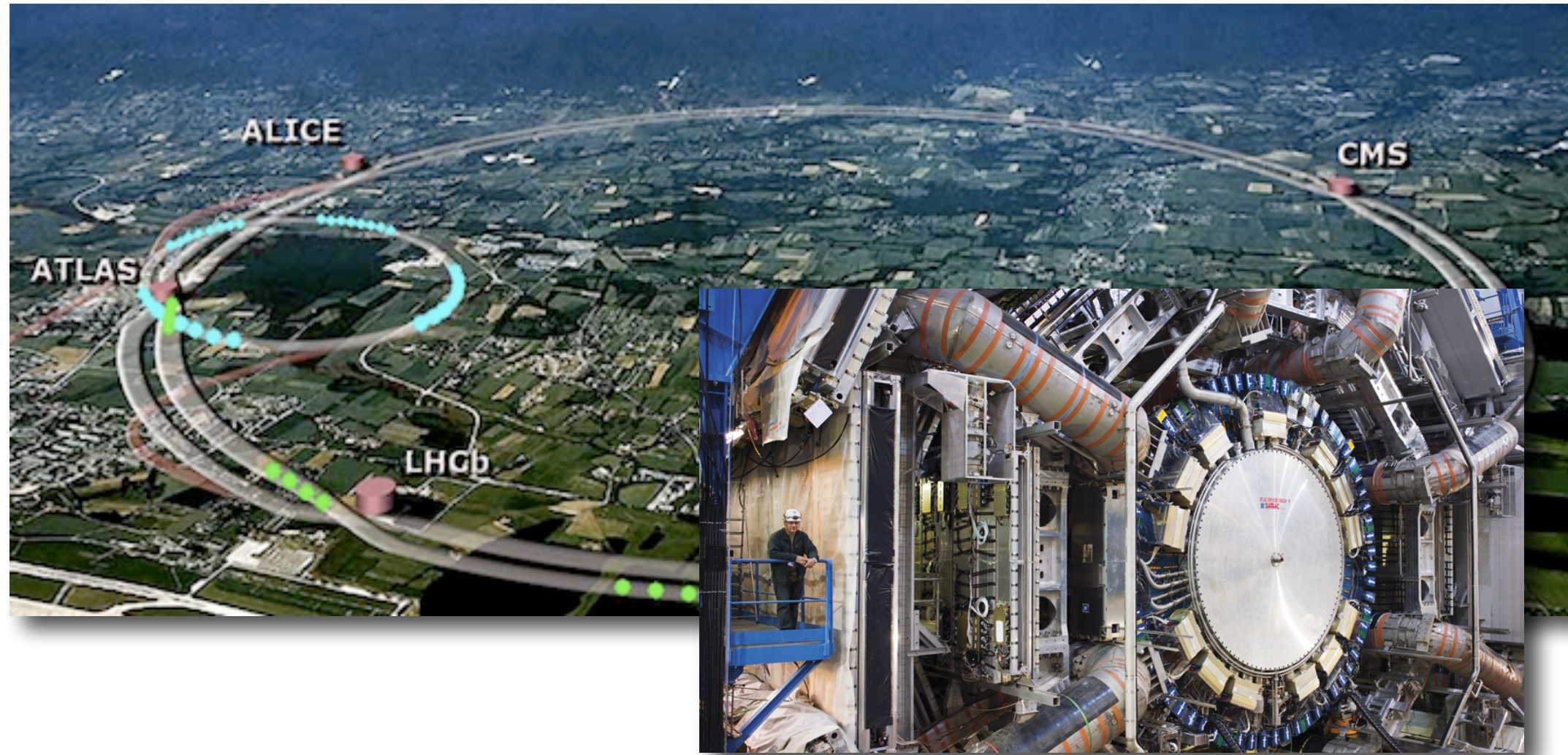
すばる望遠鏡  
重力波干渉計

何が当たるか分からないが、  
誰も見たことがない領域で実験

→ 新発見の可能性

# 宇宙の始まりを知るには

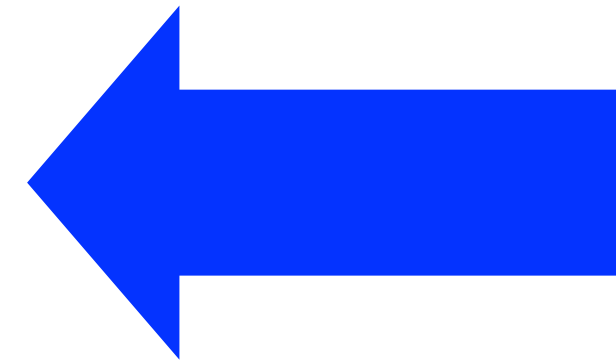
## 素粒子物理



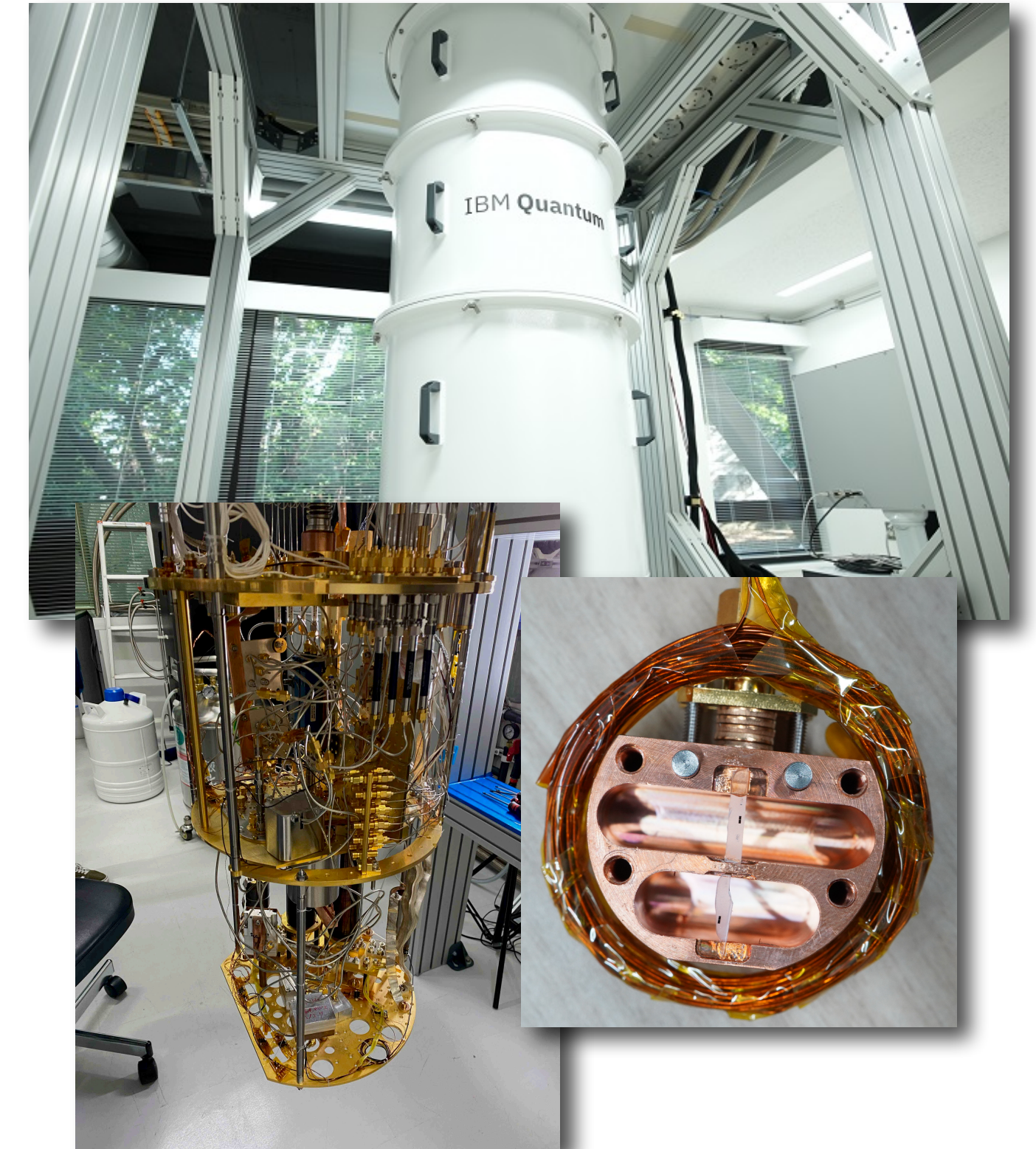
素粒子現象を調べることによって、  
宇宙の成り立ち、自然の仕組みを  
知りたい

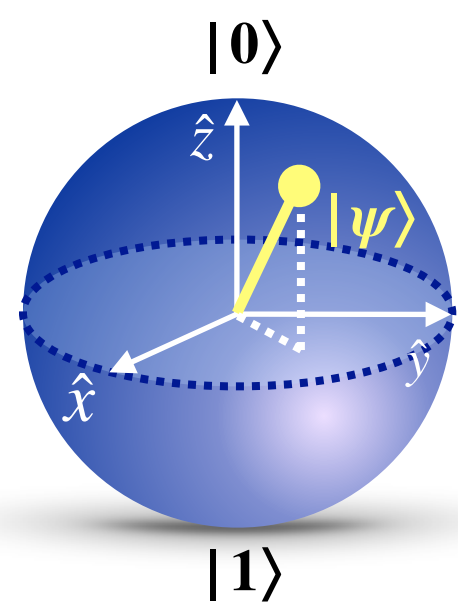
「なぜ」そうなったのか？

## 量子



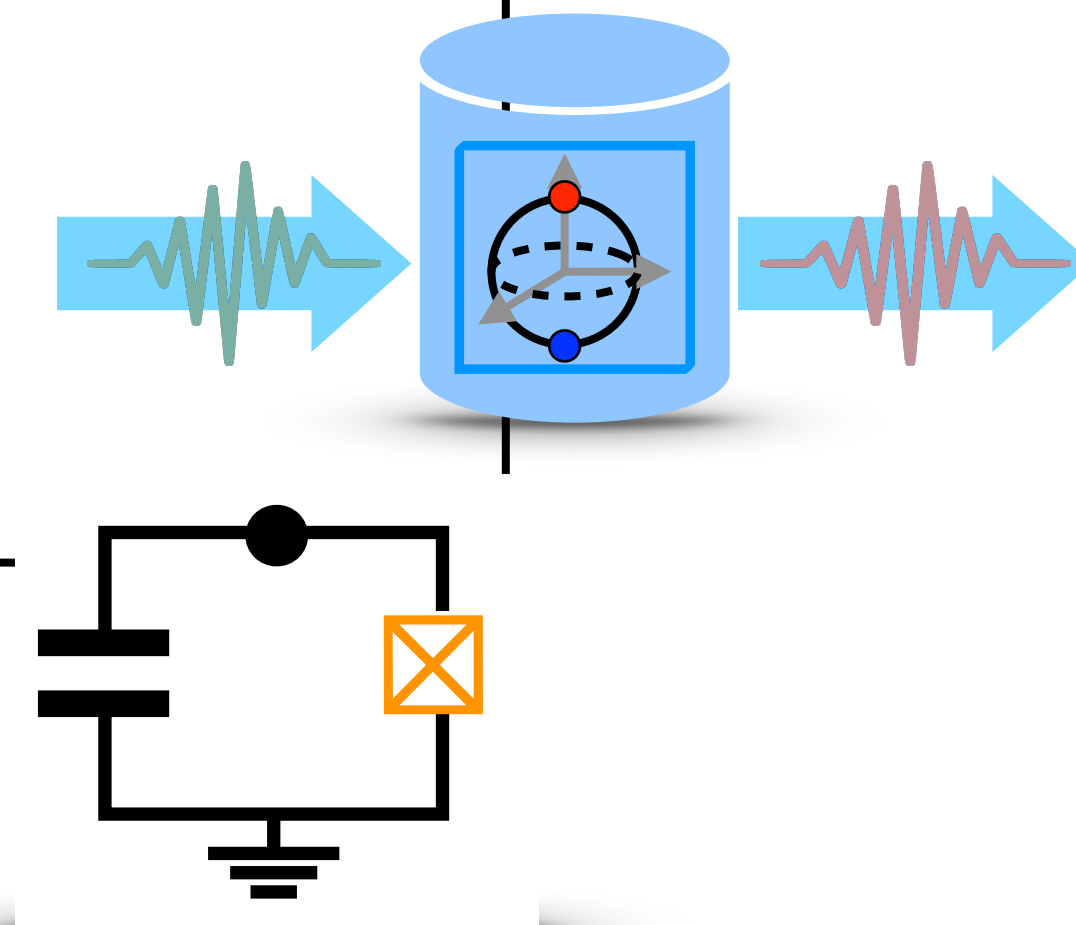
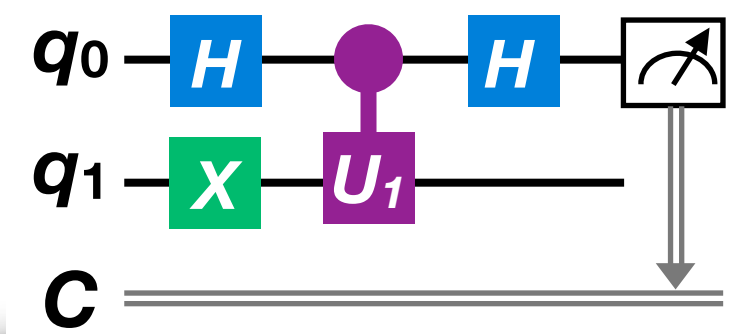
量子で何が  
できるか？





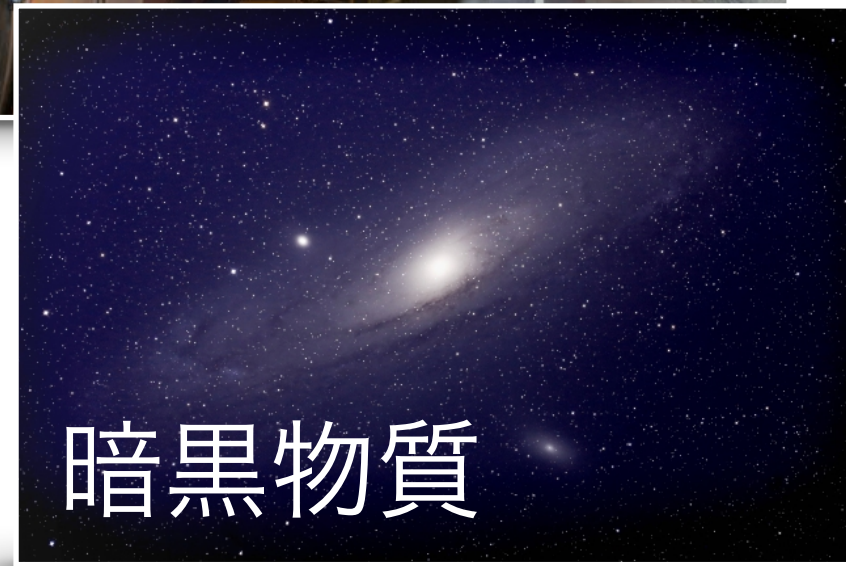
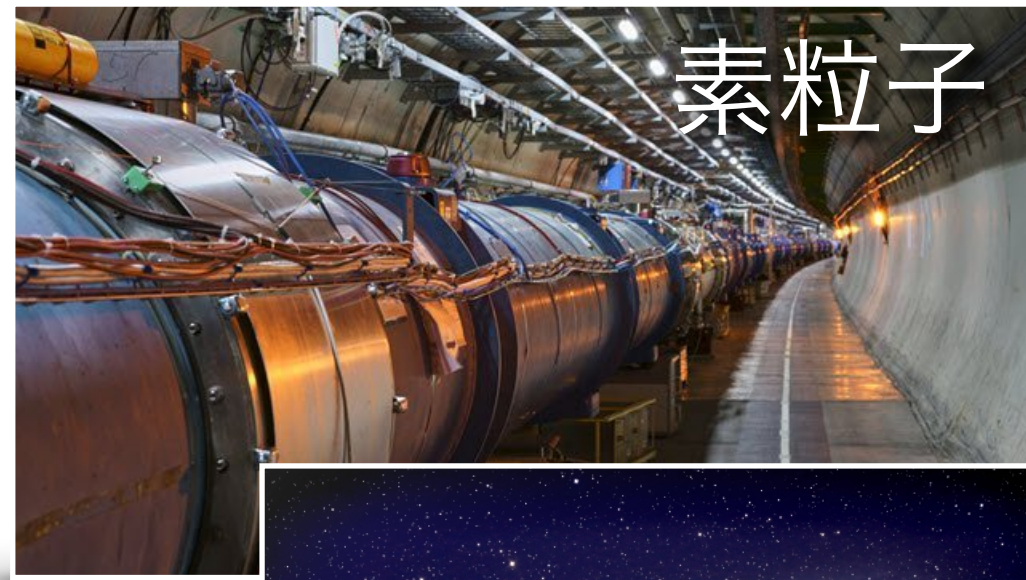
## 量子コンピュータ (FTQC, NISQ) ・量子センサーの研究開発

- ▶ 量子アルゴリズム、誤り耐性量子計算、量子エラー訂正
- ▶ 量子センシング、量子アルゴリズムによる感度向上
- ▶ FTQCに向けたハードウェア開発



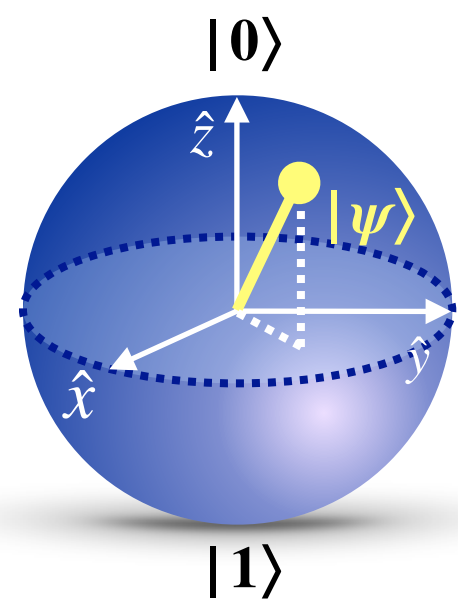
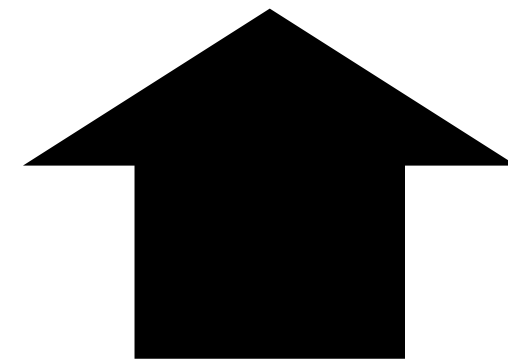
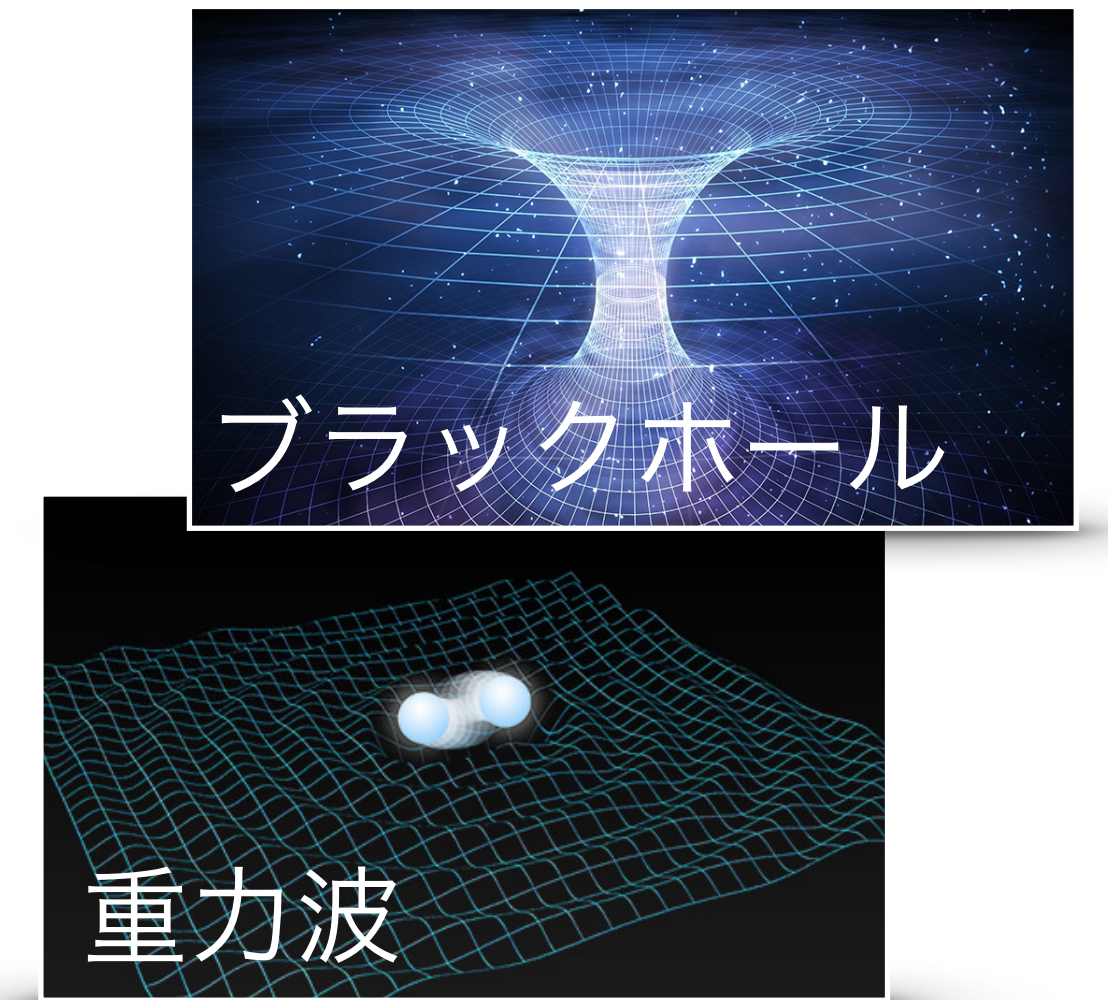
量子超越性の基礎を築き

# 物理の最先端領域を探求する



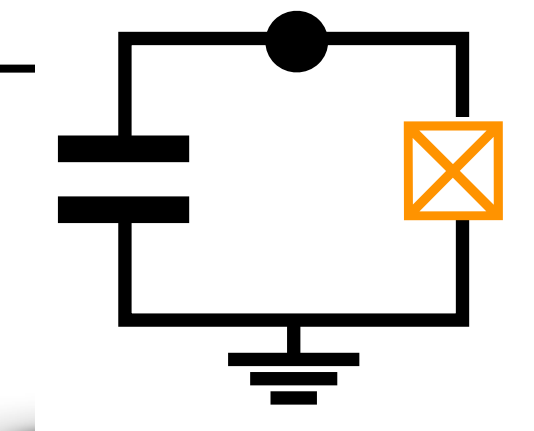
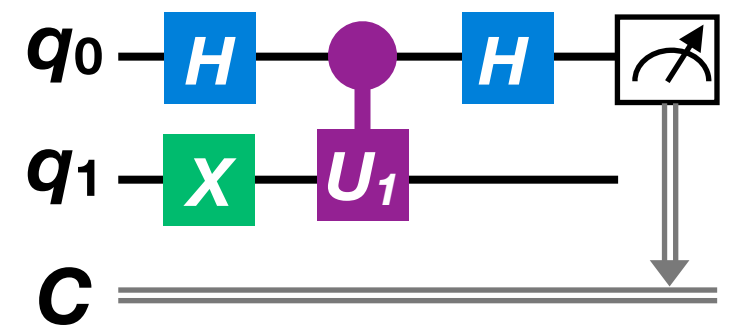
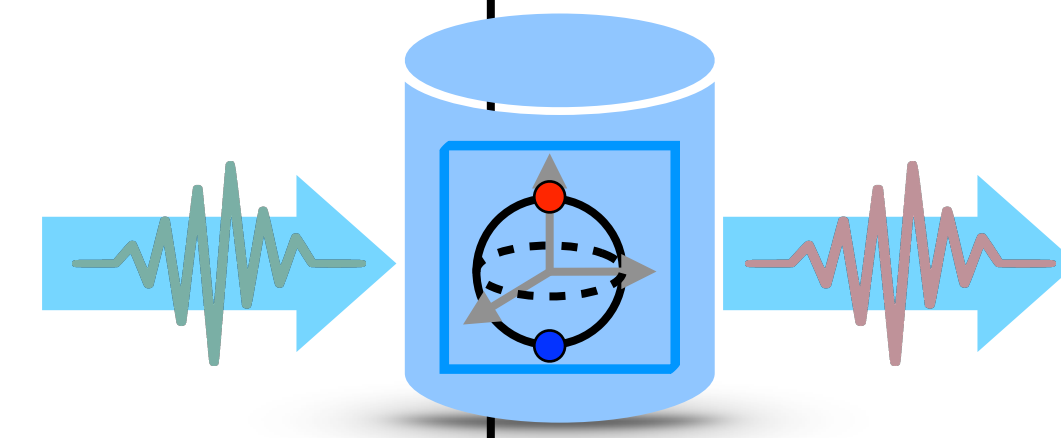
量子情報による素粒子物理・宇宙物理・  
重力の研究

- ▶ 既存の理論シミュレーション・データ解析・実験手法の限界を超える



量子コンピュータ (FTQC, NISQ) ・量子センサーの研究開発

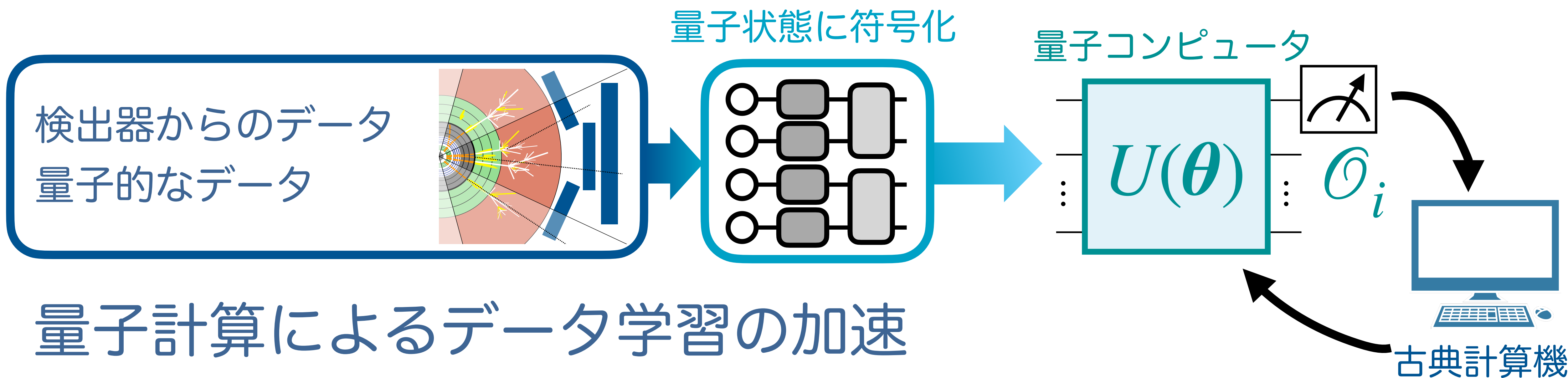
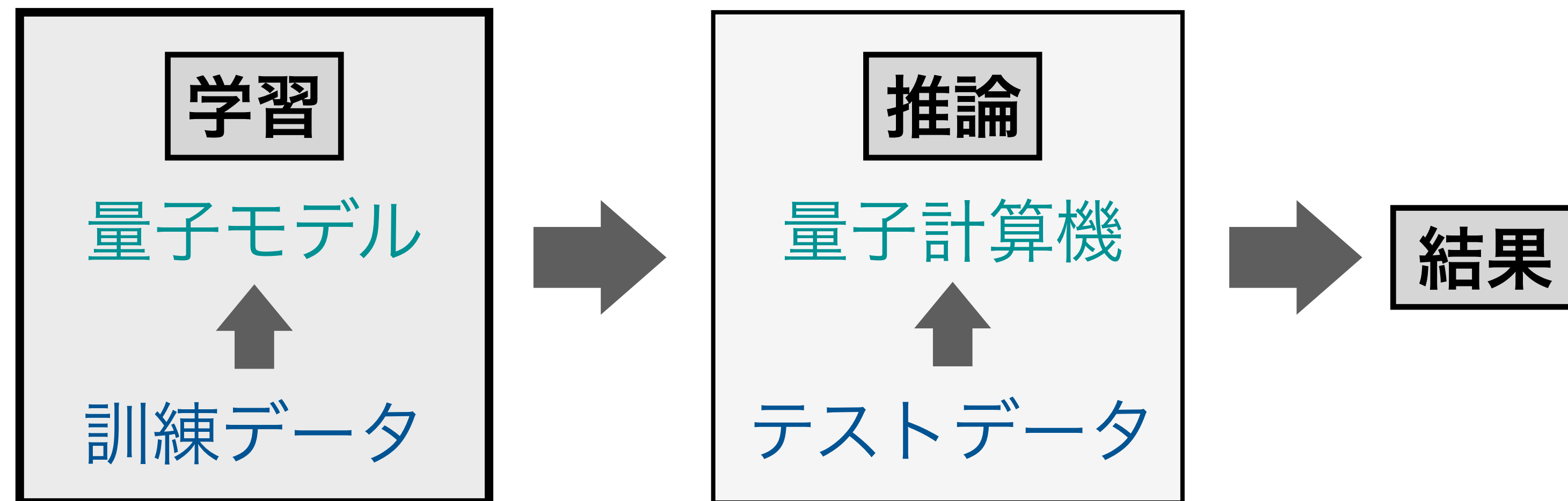
- ▶ 量子アルゴリズム、誤り耐性量子計算、量子エラー訂正
- ▶ 量子センシング、量子アルゴリズムによる感度向上
- ▶ FTQCに向けたハードウェア開発



## 量子超越性の基礎を築き

# 量子をどう使うか？

AIツールとして活用  
→ 量子機械学習



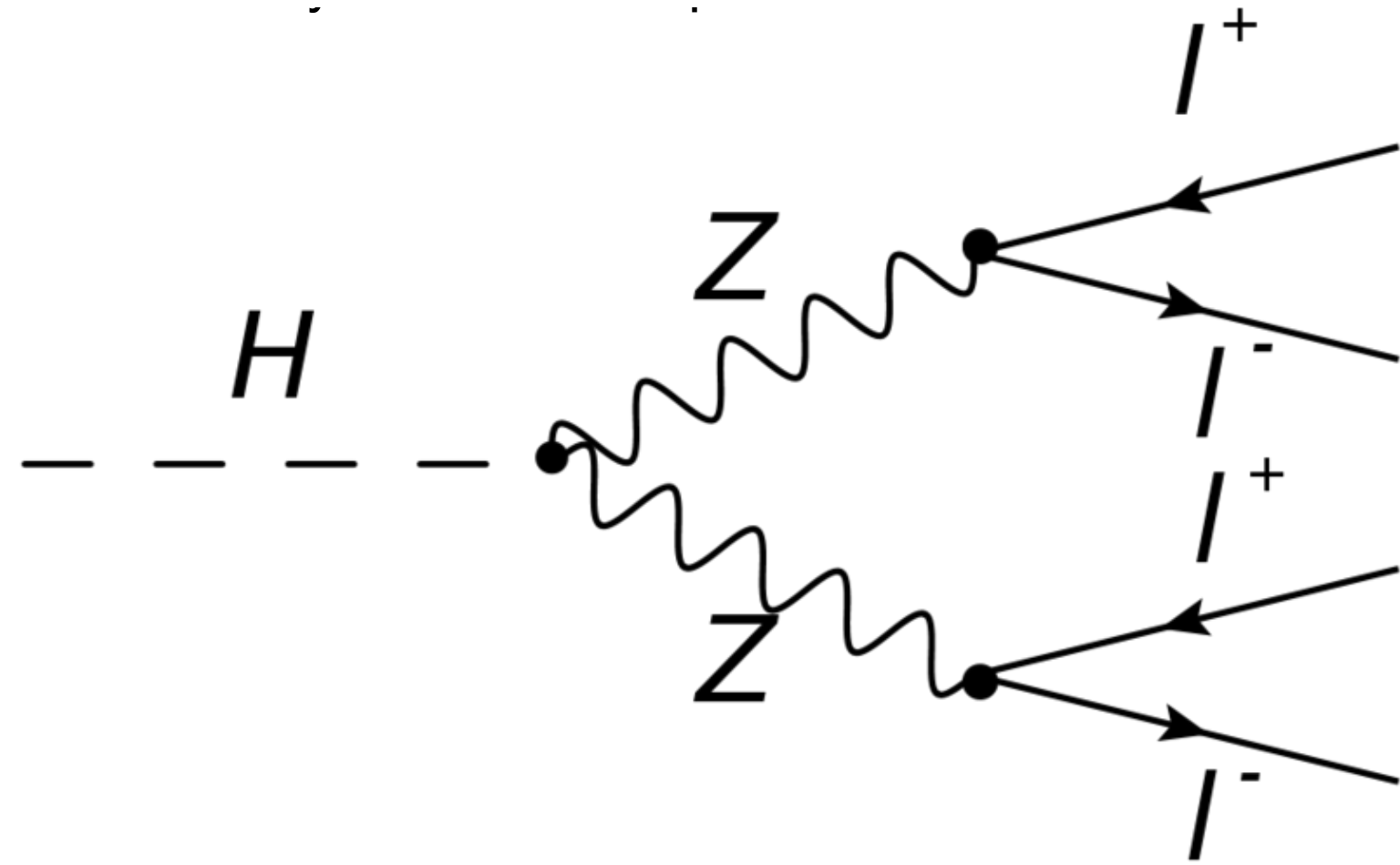
量子計算によるデータ学習の加速

# 同変量子ニューラルネットワークモデル

Z. Li, L. Nagano, K. Terashi, [Phys. Rev. Res. 6, 043028 \(2024\)](#)

空間中の点群 (point cloud) データに対して、  
回転対称性と入力順に対する不変性を持つ量子  
ニューラルネットワークモデルを構成

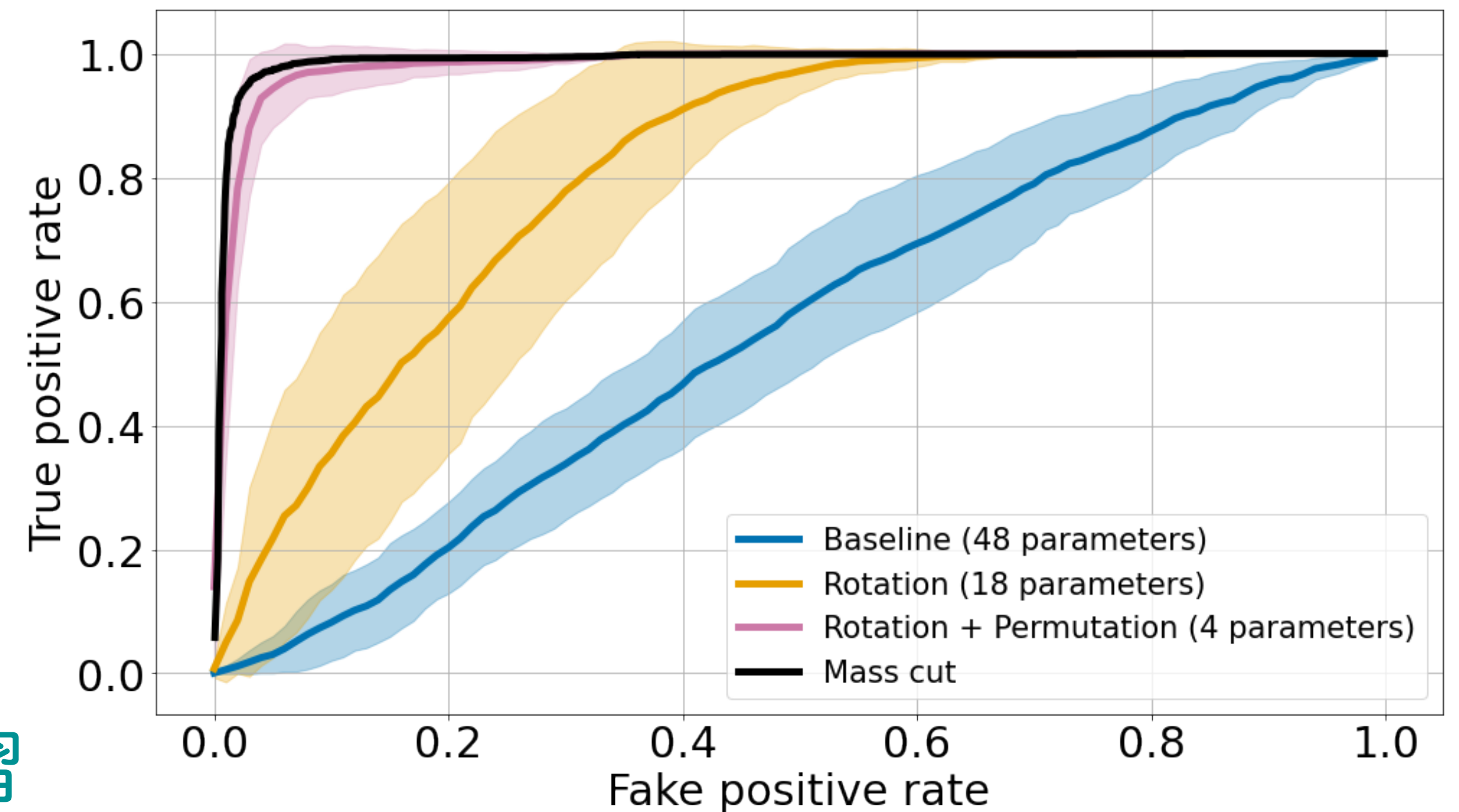
➡ 問題の対称性を取り入れることで、  
より効率的な学習が可能



$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\text{-leptons}$  の分類に応用

終状態4レプトンの各ペアの内積を入力

➡ ヒッグス粒子の“質量”を正しく学習



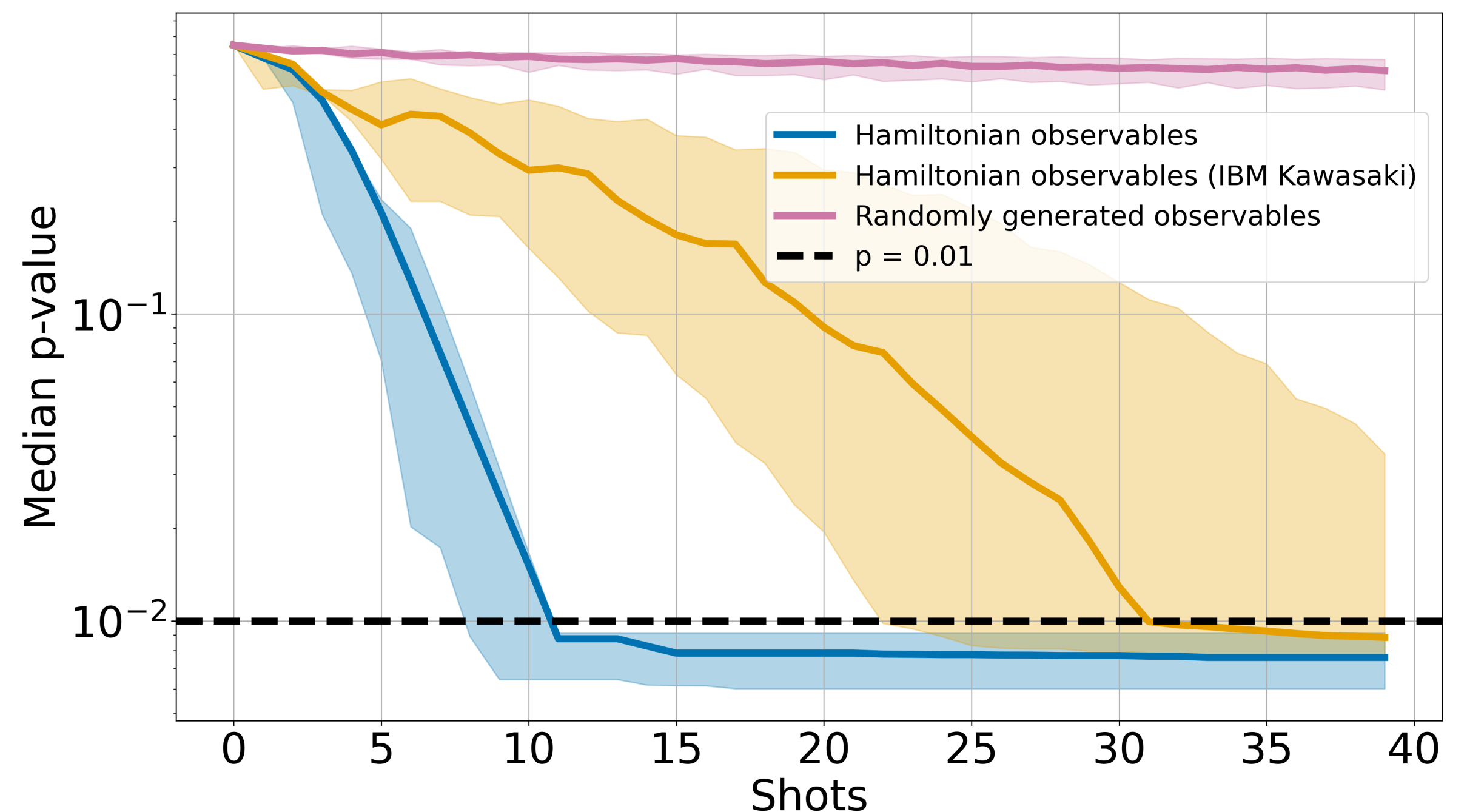
量子状態の候補の中からランダムに選んだテスト状態のラベルを識別する

➡ 量子コンピュータは状態測定にのみ使用、古典計算で分類

## スピン系の基底状態の識別

- ▶ ハイゼンベルク模型
- ▶ 対称性保護トポロジカル相のスピン模型
- ▶ 横磁場イジング模型
- ▶ 人工的に合成したハミルトニアン模型

観測量を最適化することで、  
効率的な識別が可能



➡ 将来的に、“量子場”のセンシングへ応用可能か？

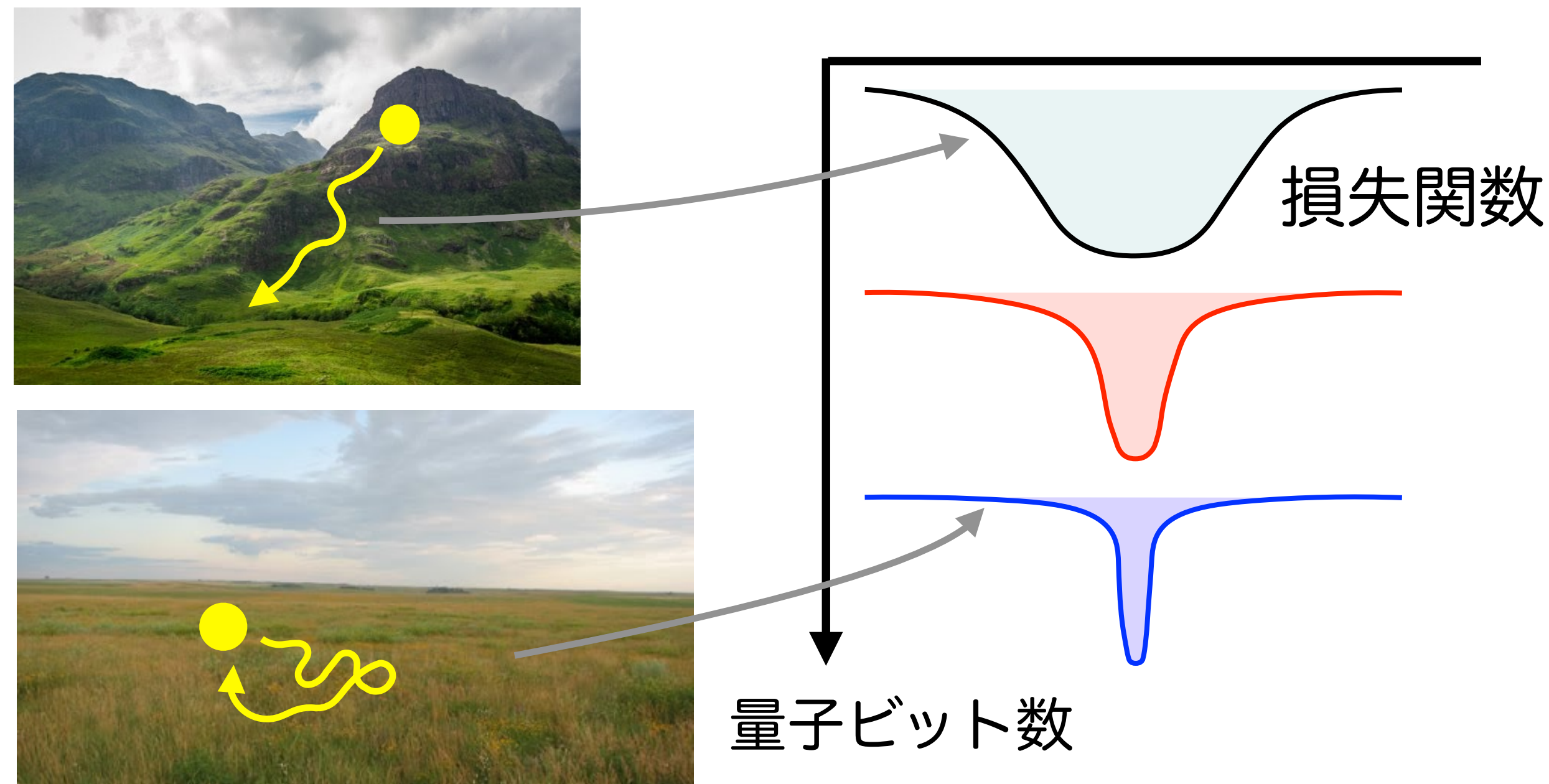
# 量子機械学習で取り組んでいること

## 量子機械学習の学習・汎化性の解明

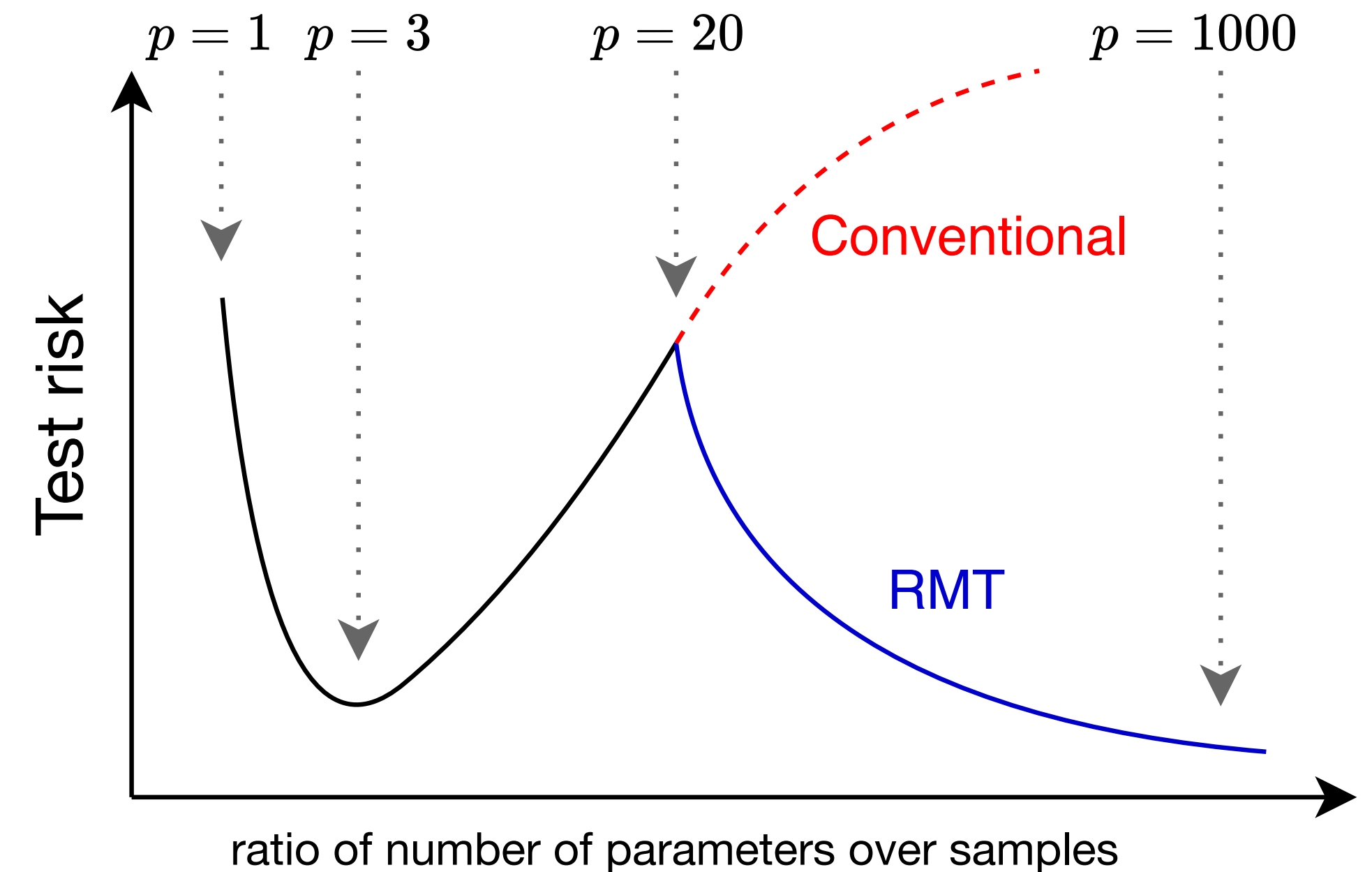
- ▶ 勾配消失問題と古典計算に対する優位性の関係
- ▶ 量子ダイナミクスなど、非自明な量子データに対する学習・汎化性

K. Kamisoyama, L. Nagano, K. Terashi,  
[arXiv:2604.17202](https://arxiv.org/abs/2604.17202)

### 勾配消失問題



### テスト予測誤差の二重降下

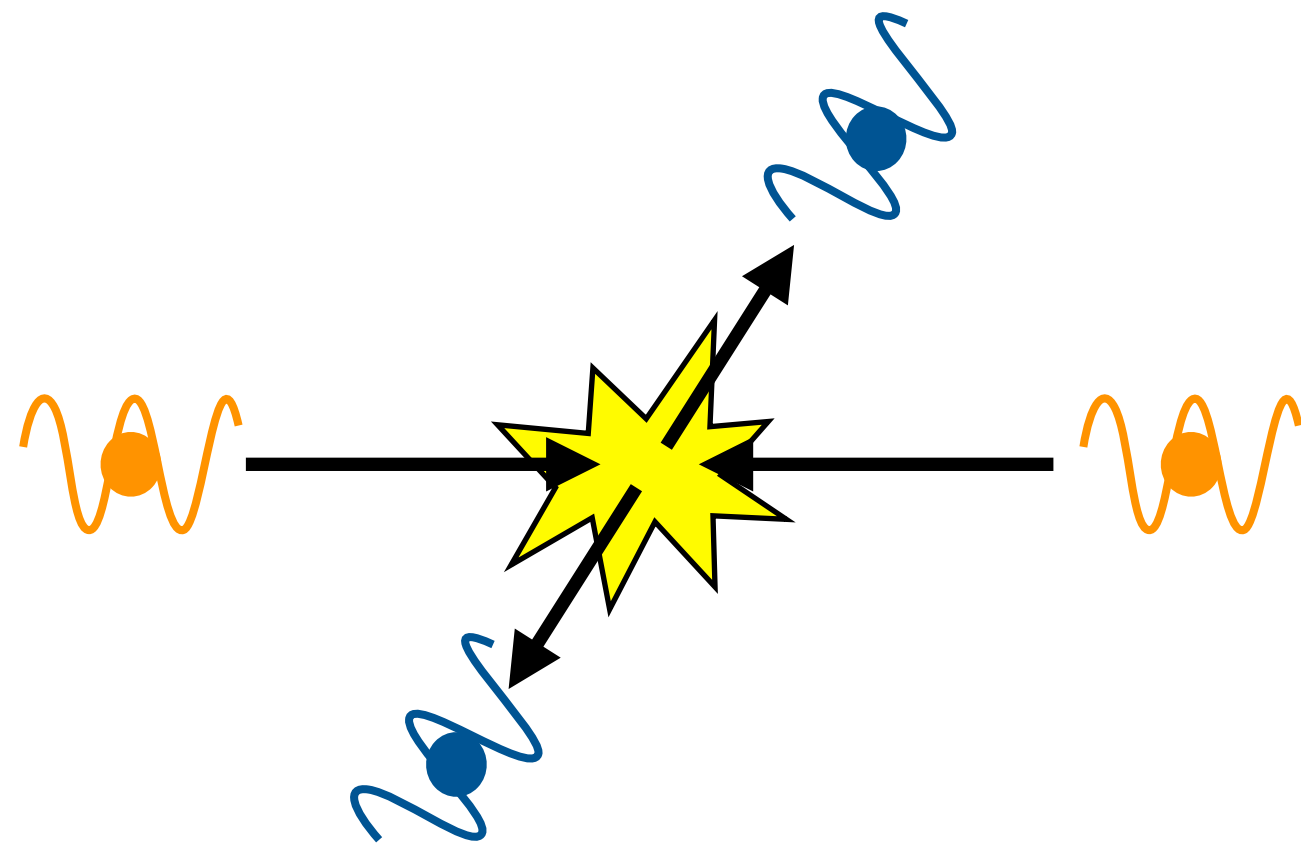


➡ 古典学習が難しく、勾配消失のない量子学習モデル

# 量子をどう使うか？

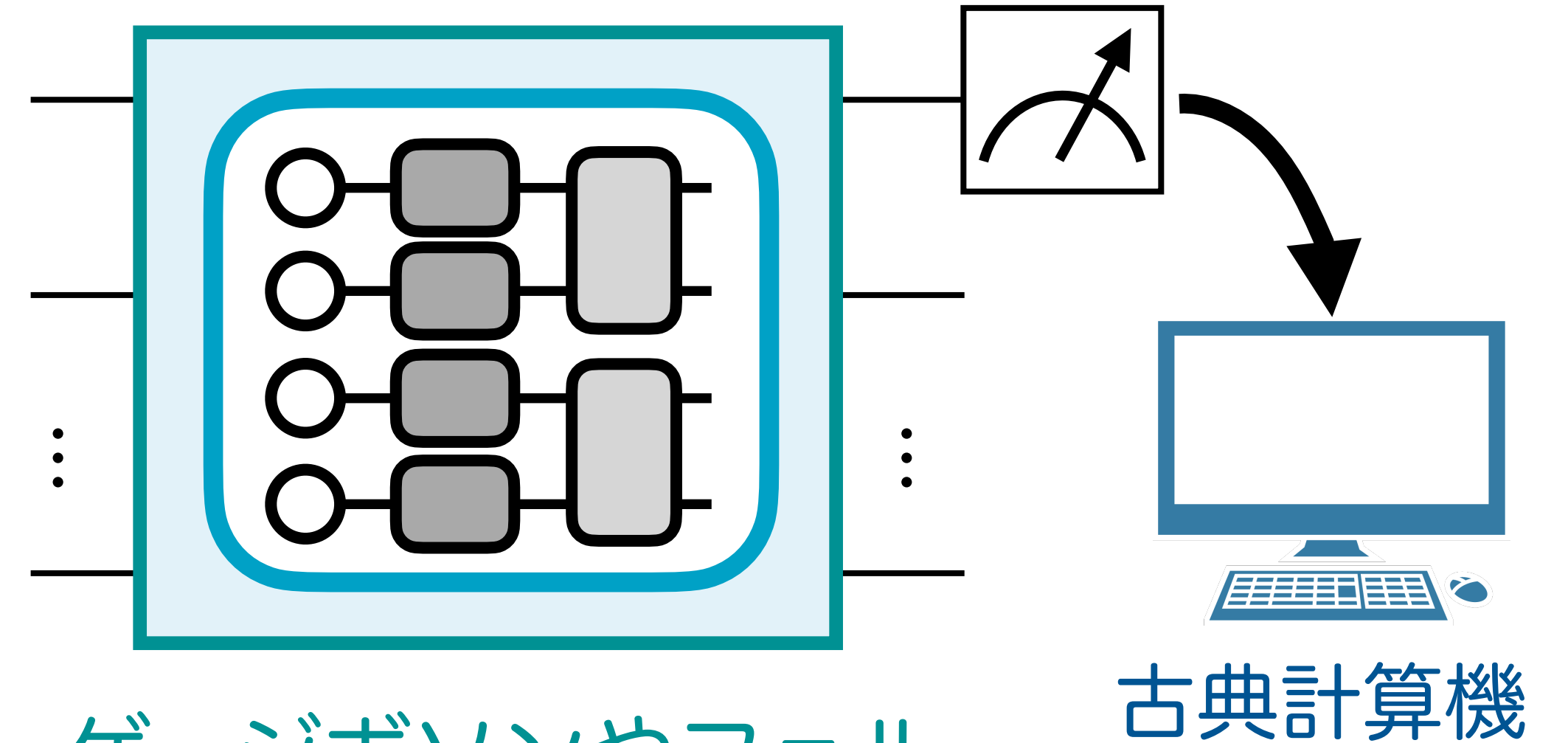
## シミュレータとして活用

場の量子論のシミュレーション



量子計算によるシミュレーション精度の向上

量子コンピュータ



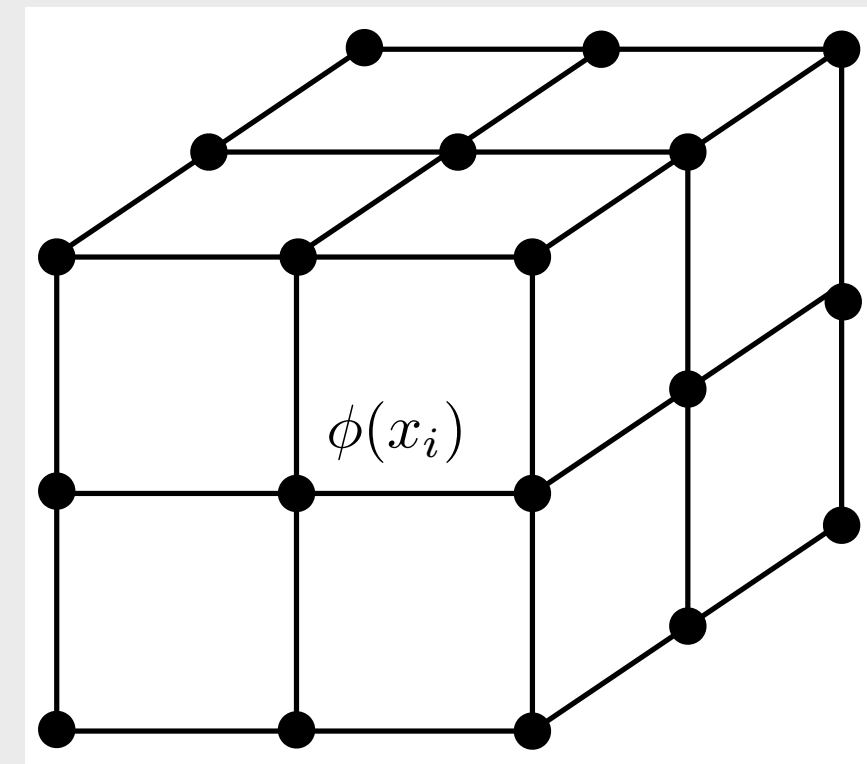
ゲージボソンやフェルミオンの場を量子状態として表現

# 量子シミュレーション

格子ゲージ理論は、素粒子理論を第一原理的に計算することが可能

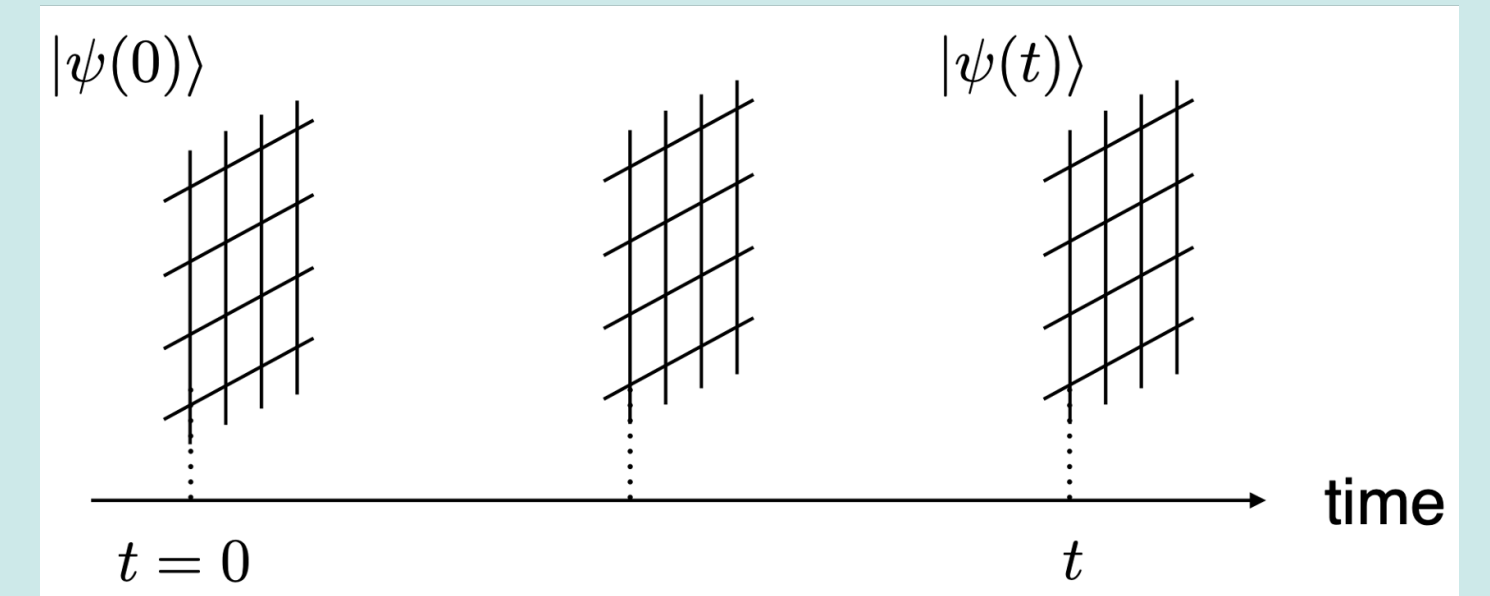
## 通常の格子ゲージ理論

- ▶ 時空間を離散化
  - ▶ 重点サンプリングによる  $e^{-S}$  の経路積分
- 符号問題が存在する



## ハミルトニアン形式の格子ゲージ理論

- ▶ 空間を離散化
  - ▶  $e^{-iHt}$  で時間発展を直接シミュレート
- 符号問題は存在しない



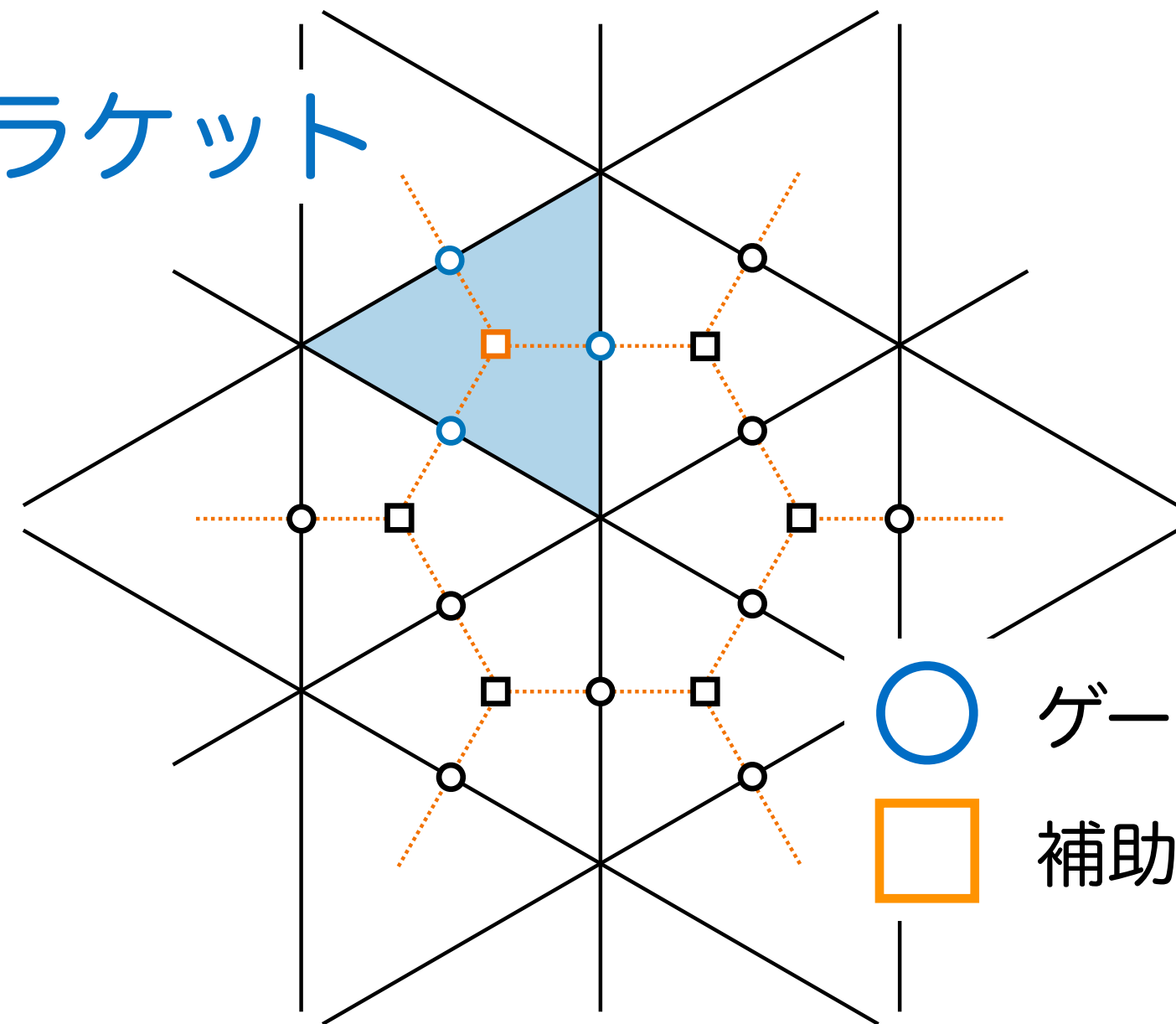
量子コンピュータに適している

量子計算の優位性を示すことができる有望な分野

# 2次元格子ゲージ理論の基底状態シミュレーション

ハミルトニアン 
$$H = - \sum_{e \in \mathcal{E}} Z(e) - \lambda \sum_{p \in \mathcal{P}} \prod_{e \in \partial p} X(e)$$

プラケット



○ ゲージ場量子ビット  
□ 補助量子ビット

ibm\_kawasaki

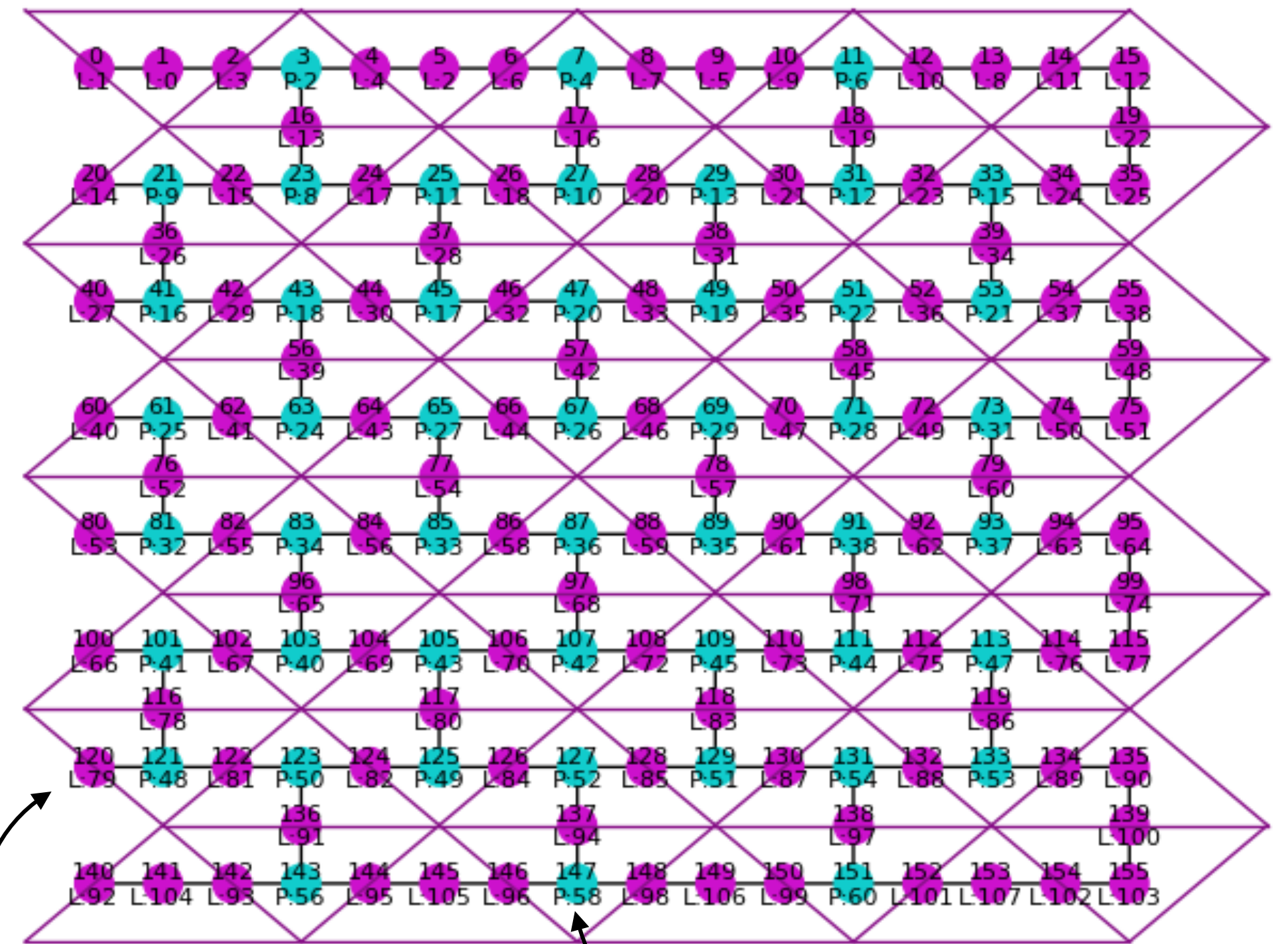


Miyabi (スパコン)



+

ibm\_kawasaki (Heron r2 - 156 qubits)



Link qubits = dynamic d.o.f.    Plaquette qubits = ancillae

全156量子ビットを利用  
(おそらく世界最大規模)

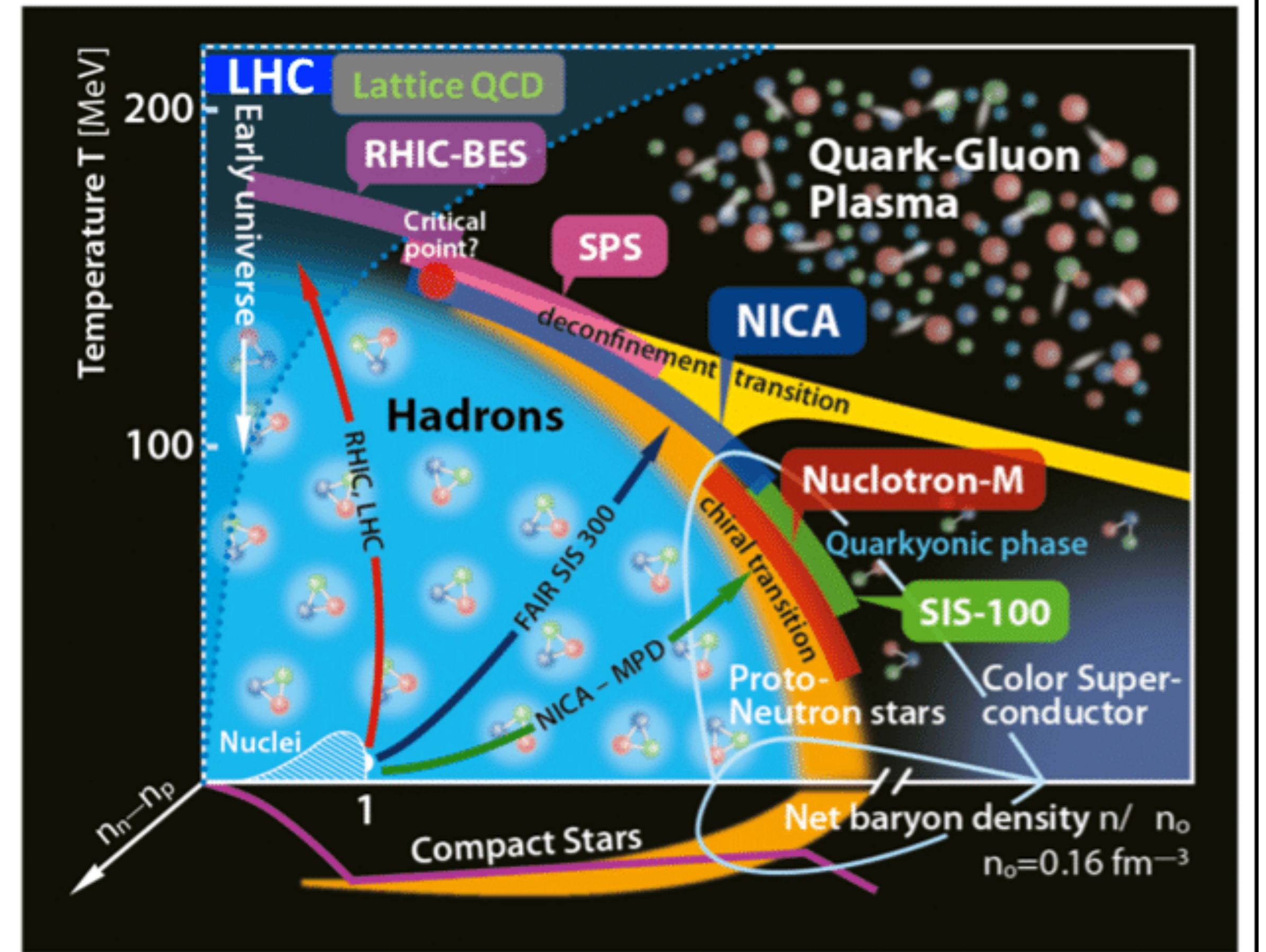
# 有限温度・有限密度のゲージ理論シミュレーション

中性子星やクォーク-グルーオンプラズマなど、高密度・高温状態の理解のための第一歩

熱アンサンブルの全状態において、ゲージ不変性を保ちながら効率的にサンプリングする手法を研究

(1+1)次元 $\mathbb{Z}_2$ 格子ゲージ理論において、有限温度・有限密度でのエネルギー密度、カイラル凝縮、クォーク数密度を正確に再現

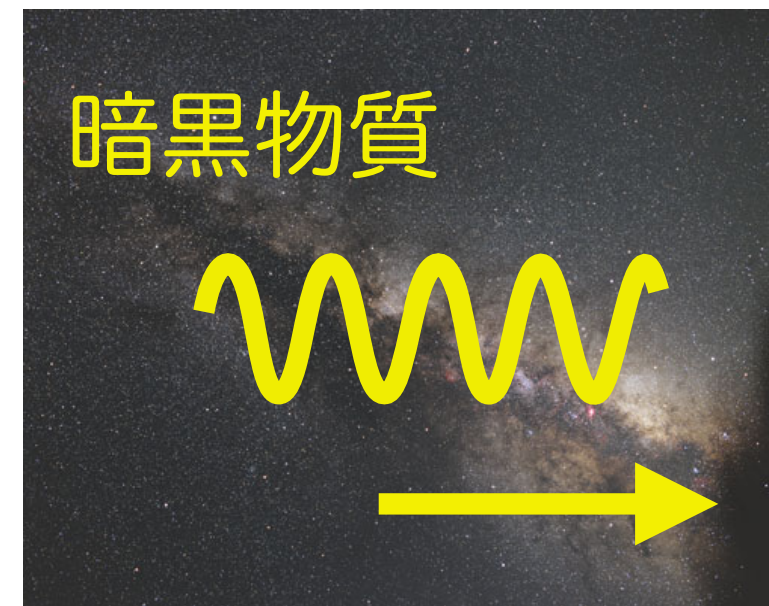
R. Maeno, [arXiv:2603.10932](https://arxiv.org/abs/2603.10932)



# 量子をどう使うか？

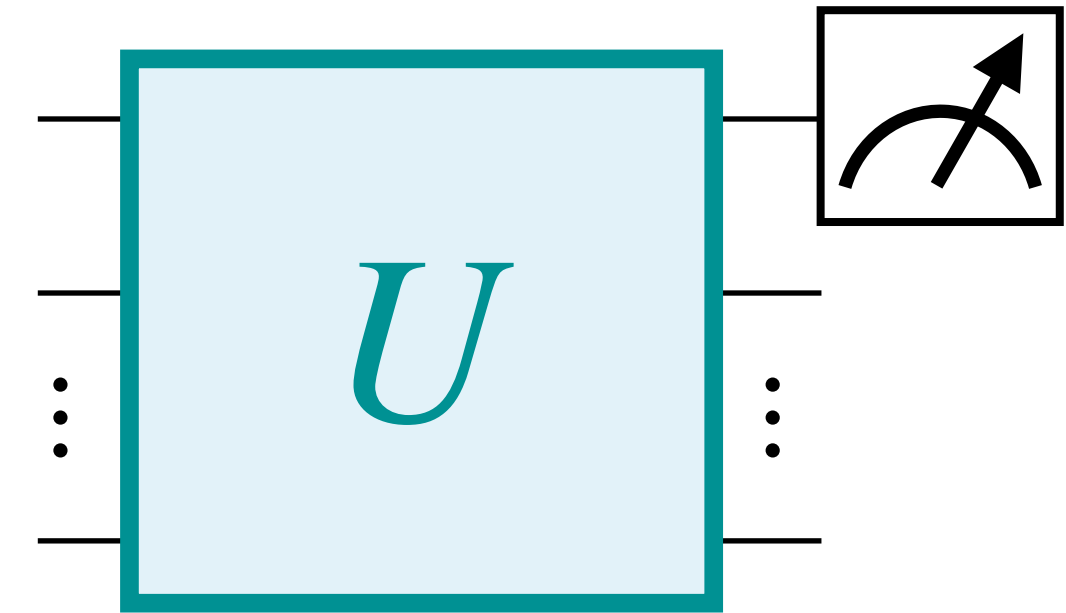
## 新しい実験ツールとして活用

量子センサーによる新現象の探索



測定器として活用  
直接励起実験

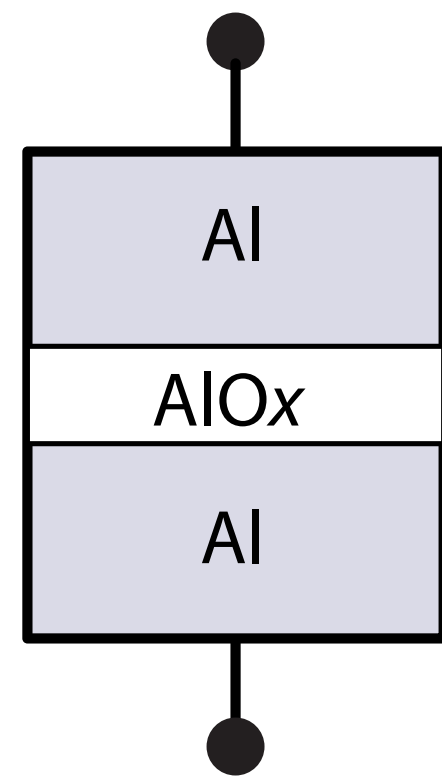
量子コンピュータ



測定器として活用  
ハロースコープ実験

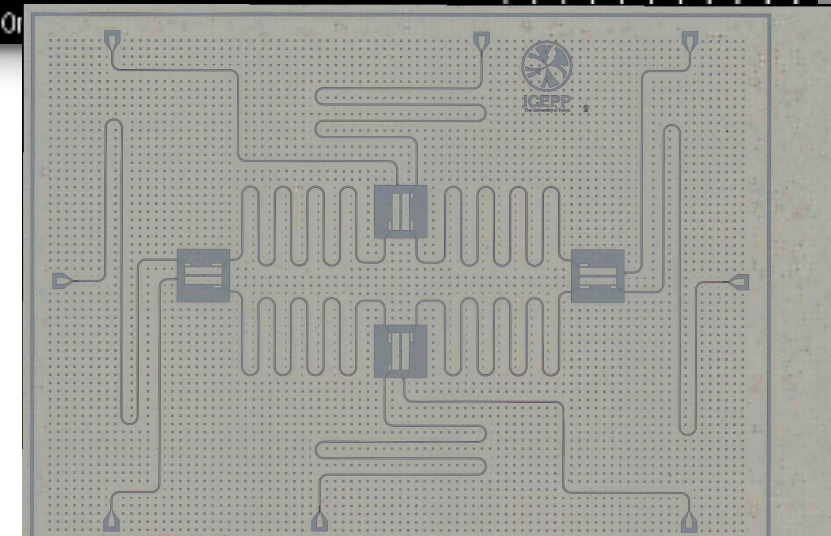
量子アルゴリズムで感度向上

# 超伝導量子デバイスの研究

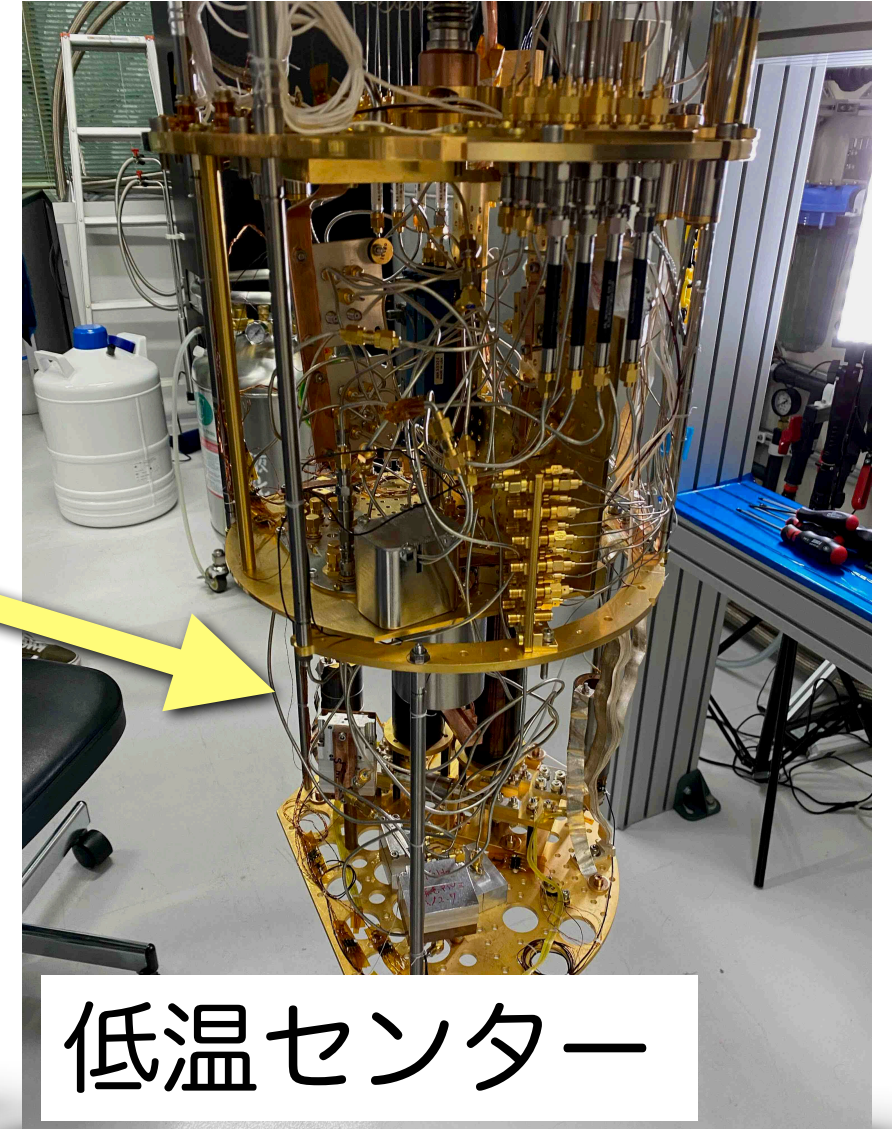
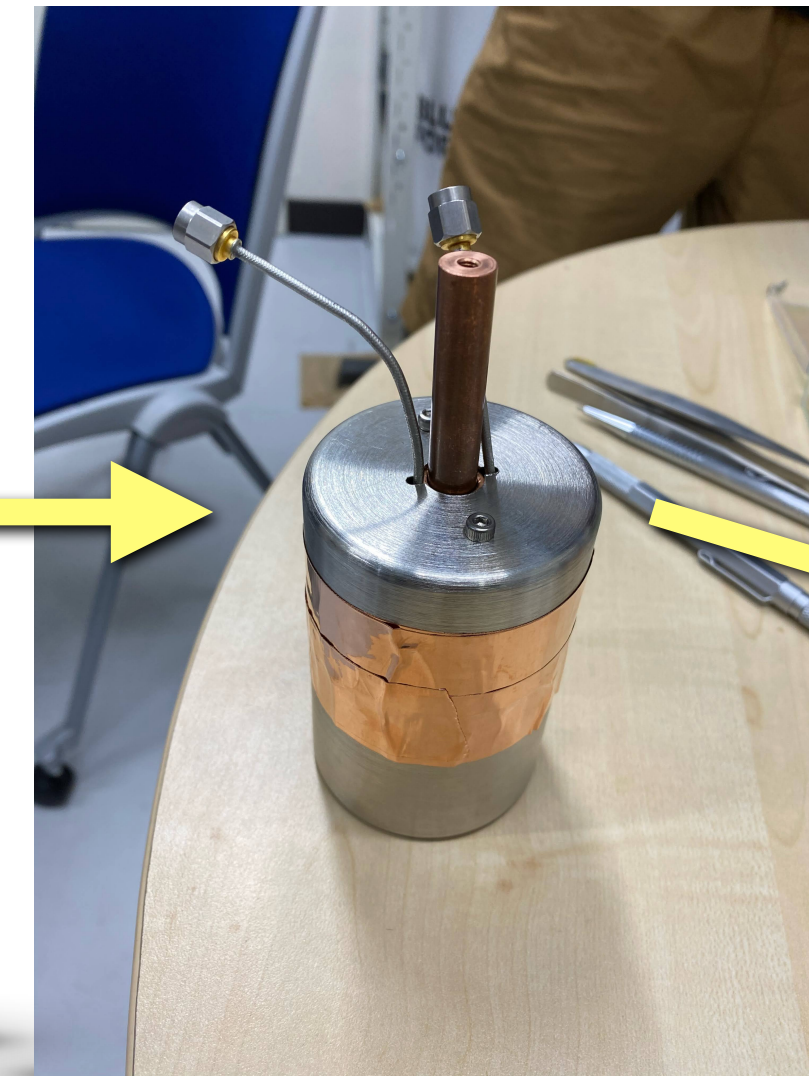
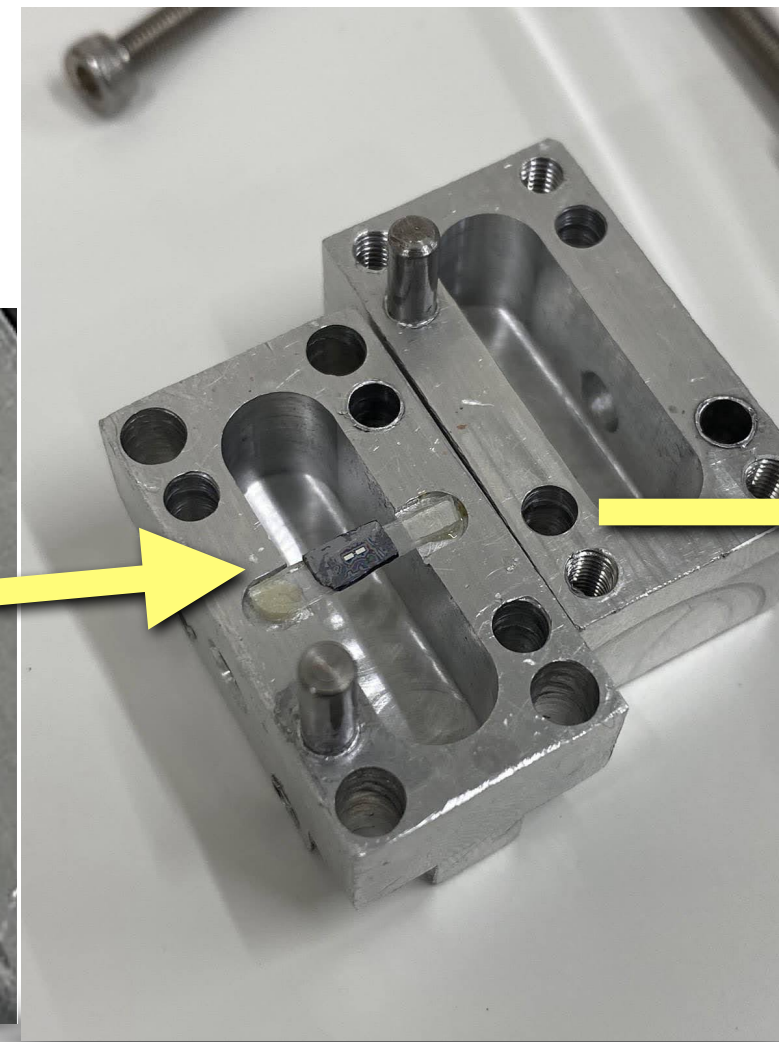


ジョセフソン接合

200 nm ×  
200 nm

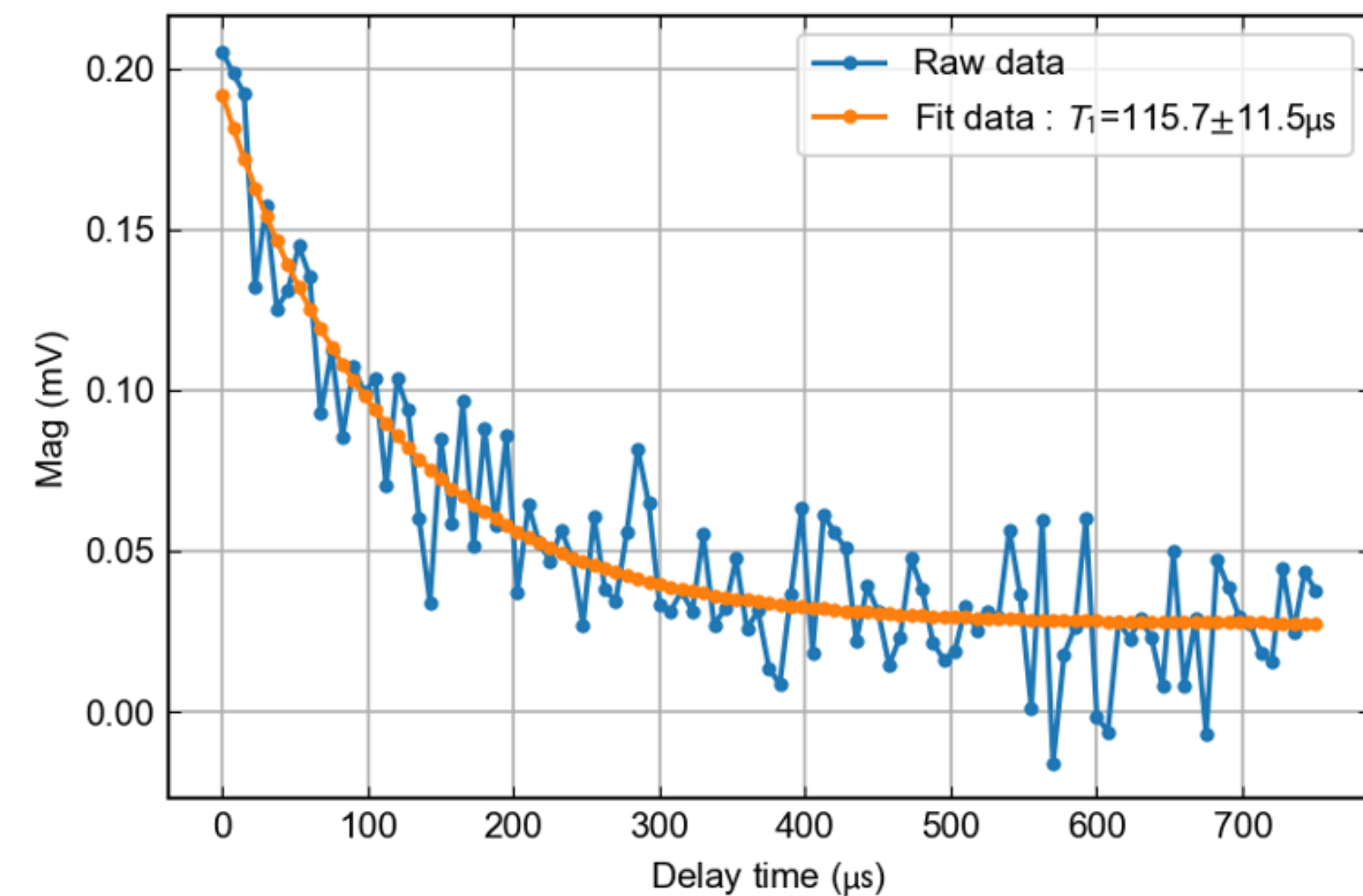


超伝導量子ビット



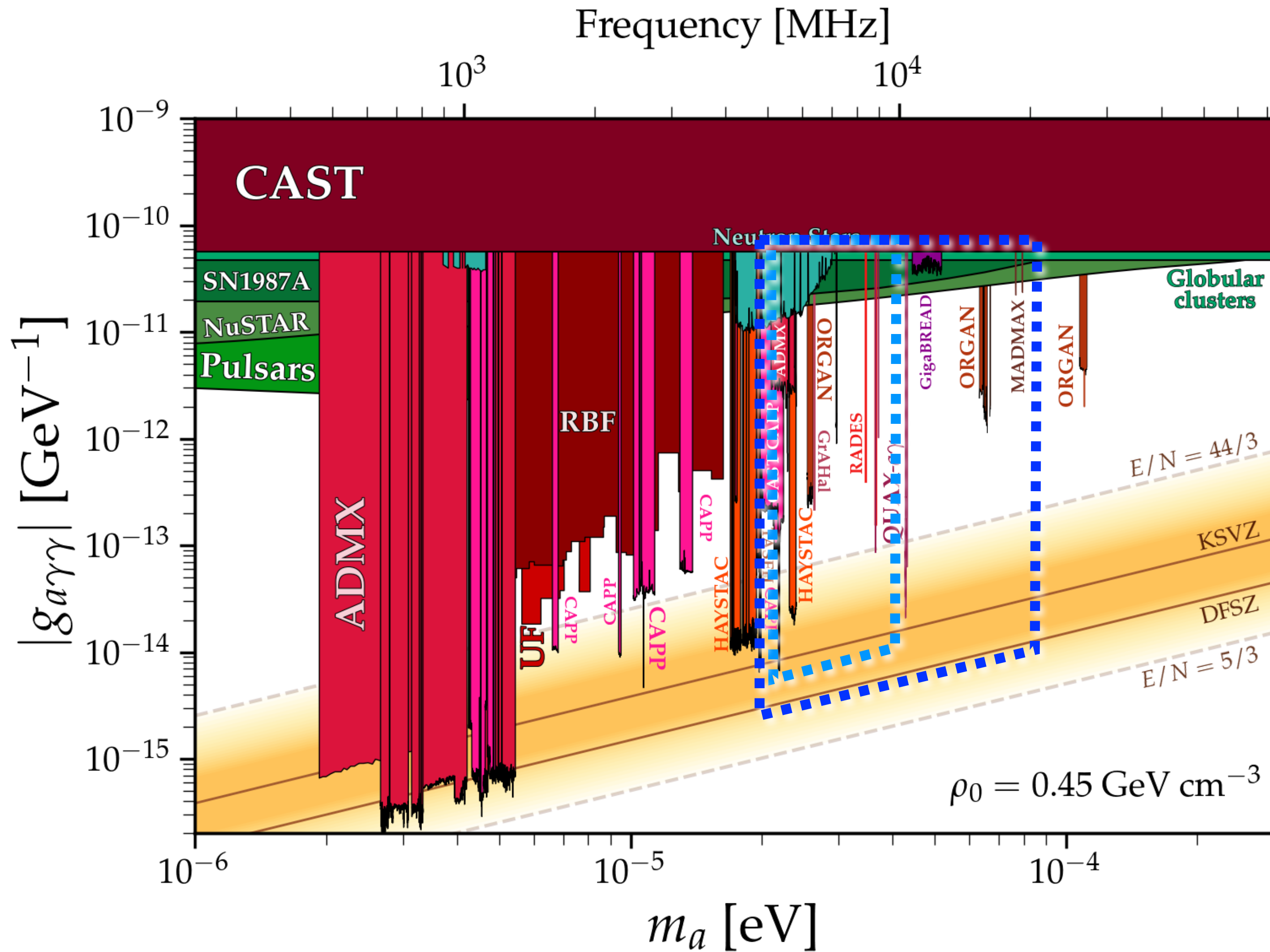
超伝導量子ビットを自分達で作って、  
実験に使う!!

超伝導量子ビットの作製プロセスを最適化し、  
100  $\mu$ sを超える寿命 ( $T_1$ ) を達成



# 暗黒物質探索への応用

## 超伝導量子ビットを使った波状暗黒物質（アクシオン, 暗黒光子）の探索



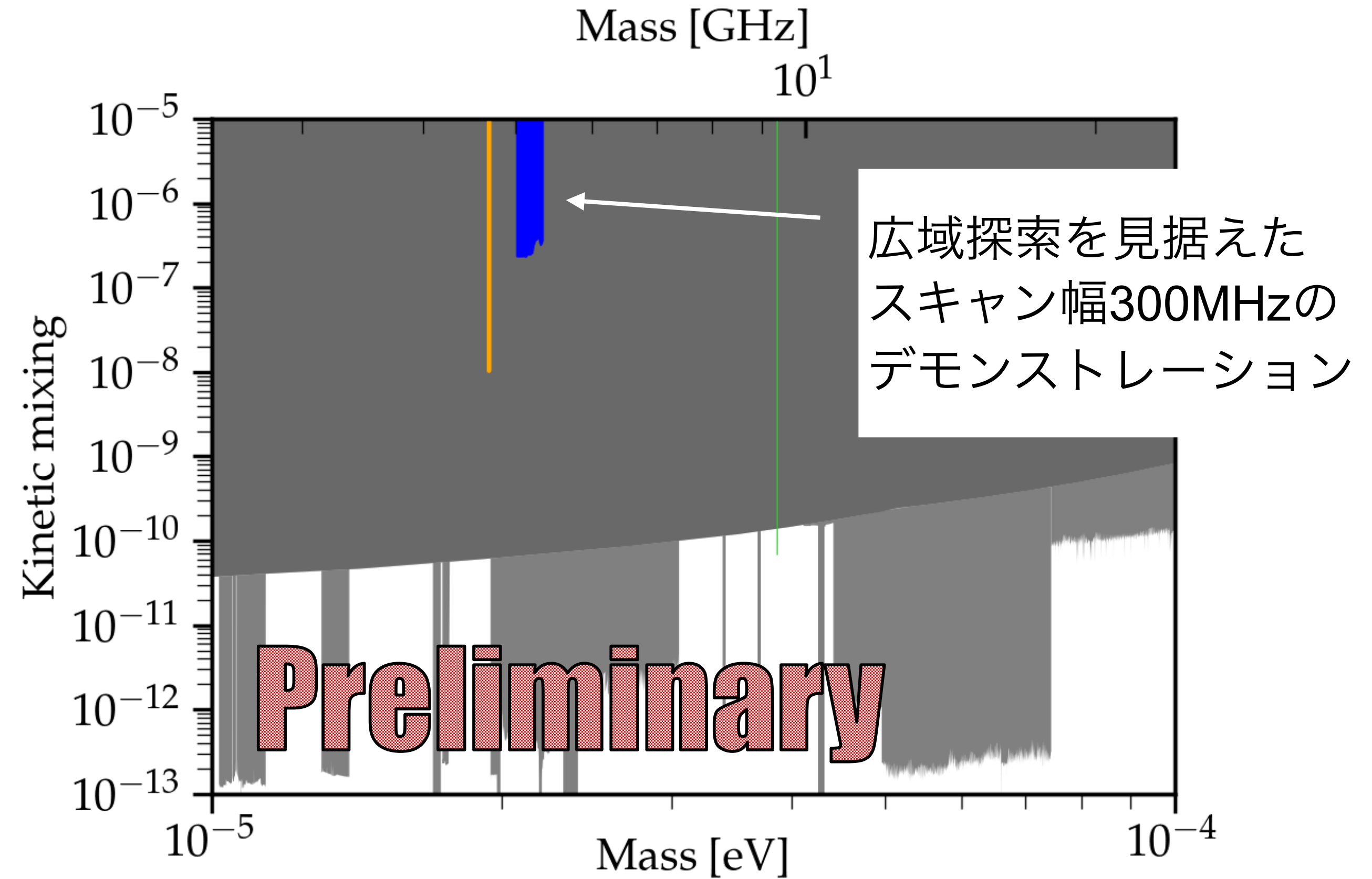
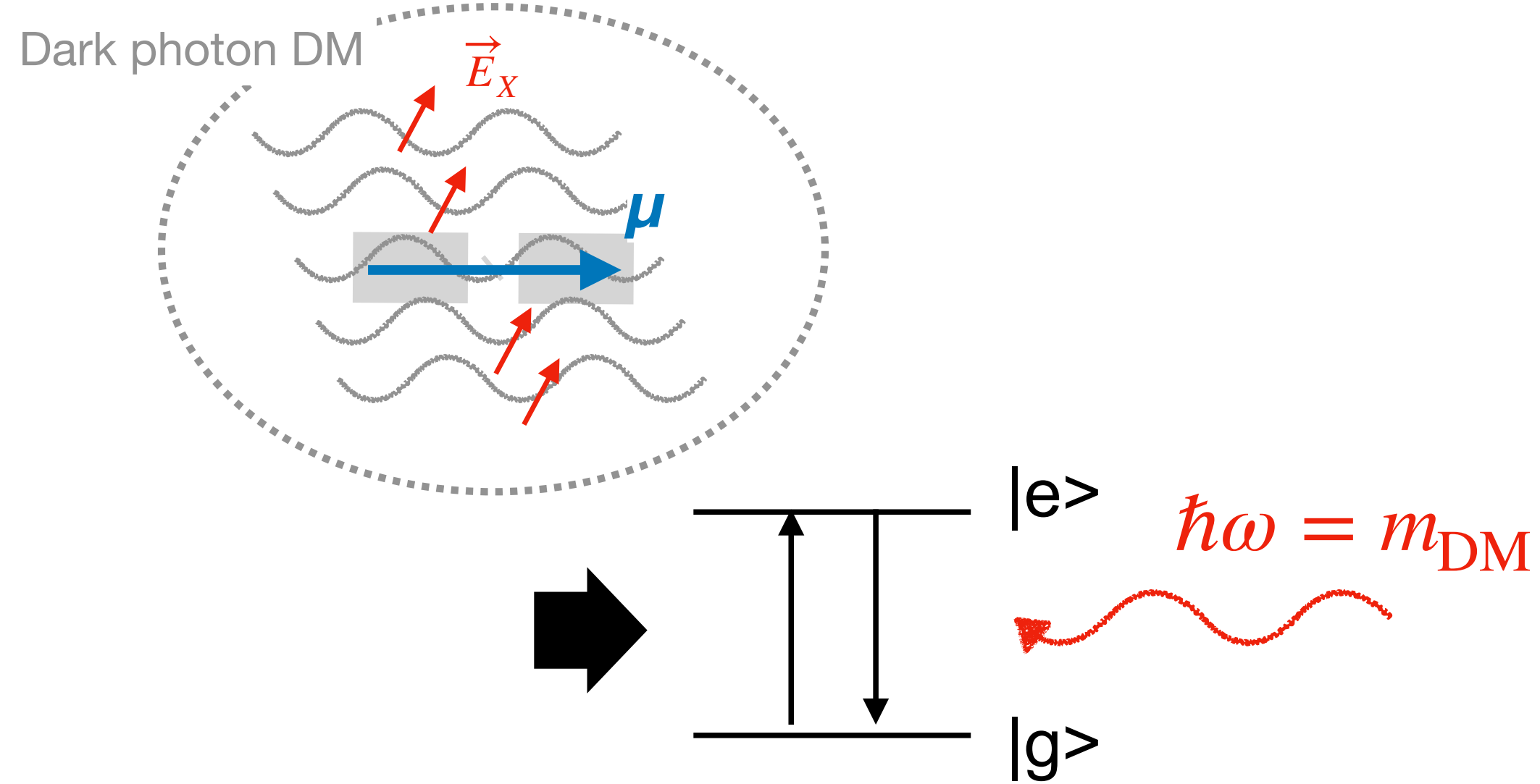
超伝導量子ビットは超強力な暗黒物質センサー

ジョセフソン接合



- ▶ 原子の $\mathcal{O}(10^6)$ 倍の強さで光子と結合
- ▶  $\mathcal{O}(\mu\text{eV})$ の低いエネルギー閾値
- ▶  $\mathcal{O}(100 \mu\text{s})$ のコヒーレンス時間内での状態操作が可能

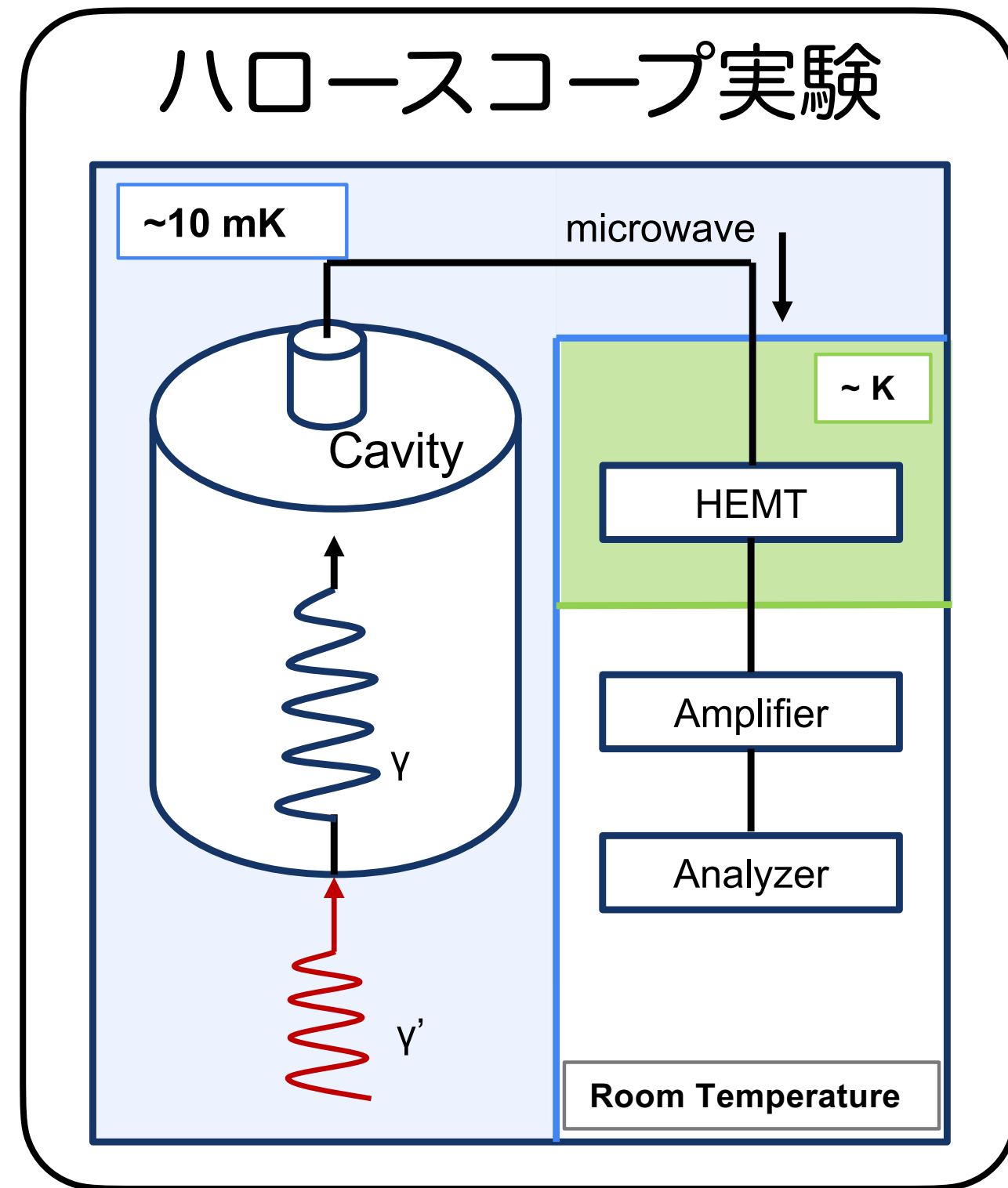
暗黒物質が変換したマイクロ波で  
量子ビットを励起



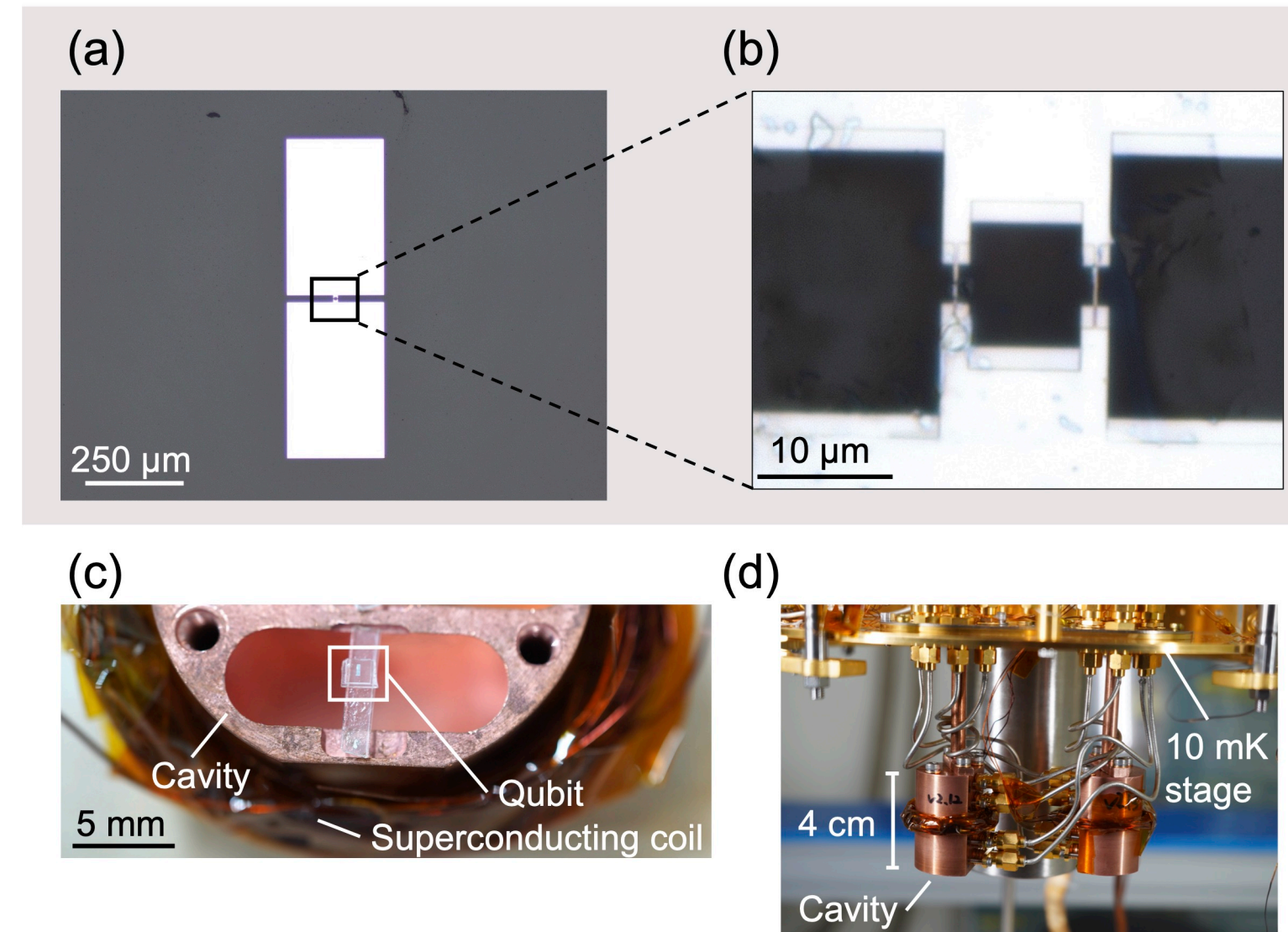
強磁場下で作動する超伝導量子ビットを開発中

➡ アクシオン暗黒物質の探索へ

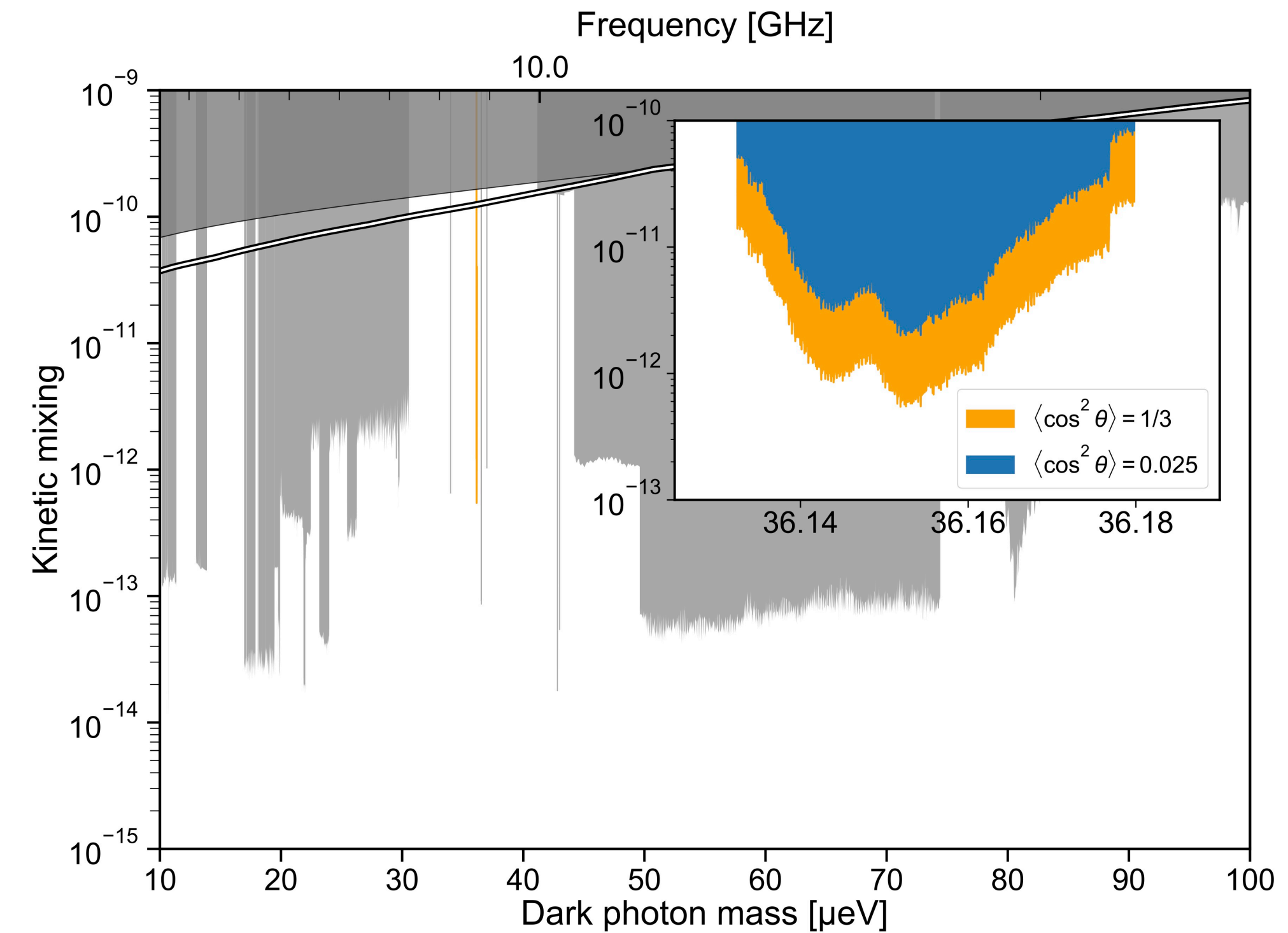
S. Chen et al., [arXiv:2407.19755](https://arxiv.org/abs/2407.19755)



### SQUID型量子ビット



### 最初の探索結果

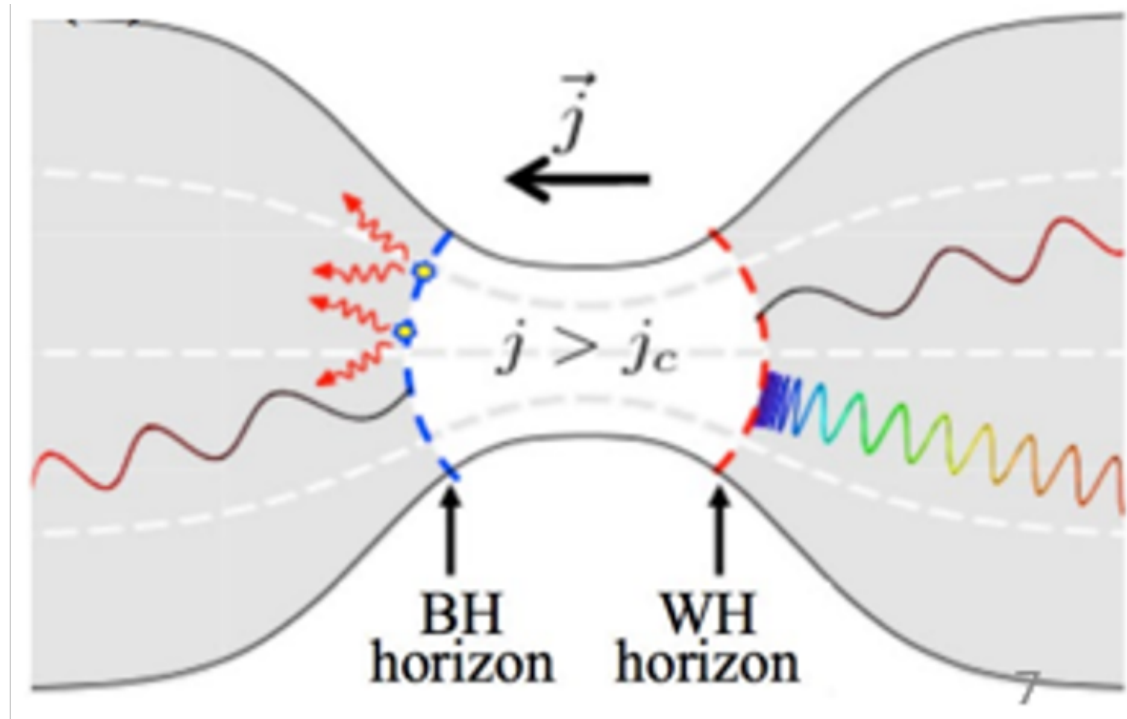


- ▶ SQUID型量子ビットを外部磁場で変調
- ▶ キャビティ結合を通じて、キャビティ周波数を変調

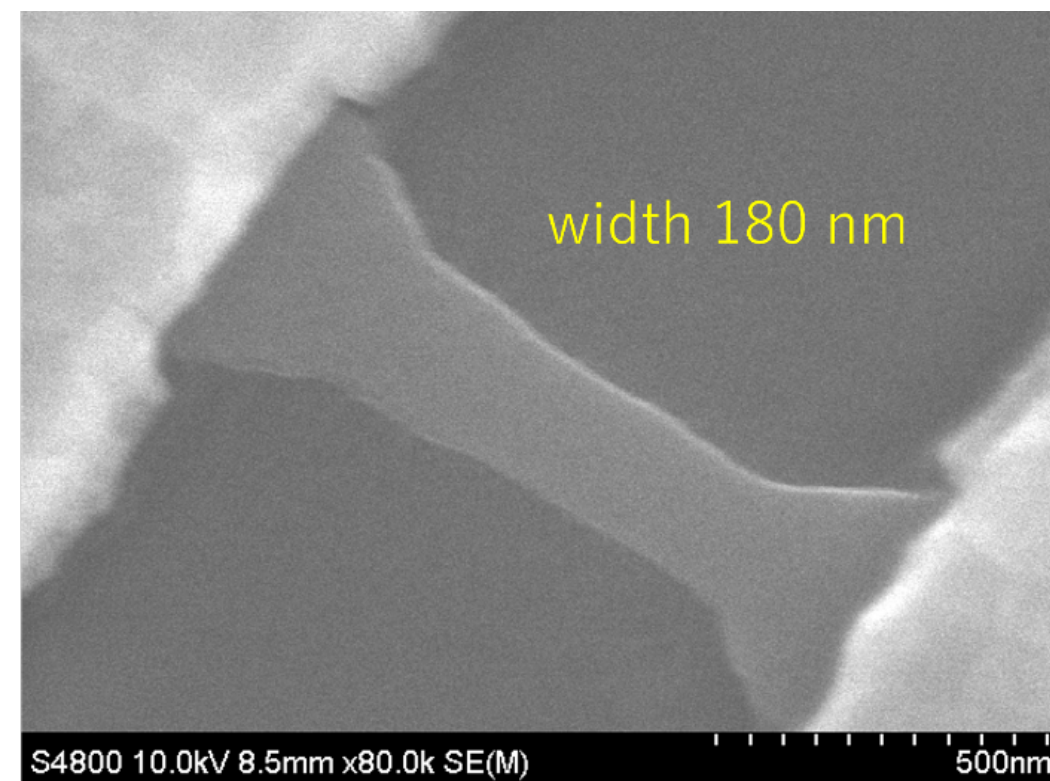
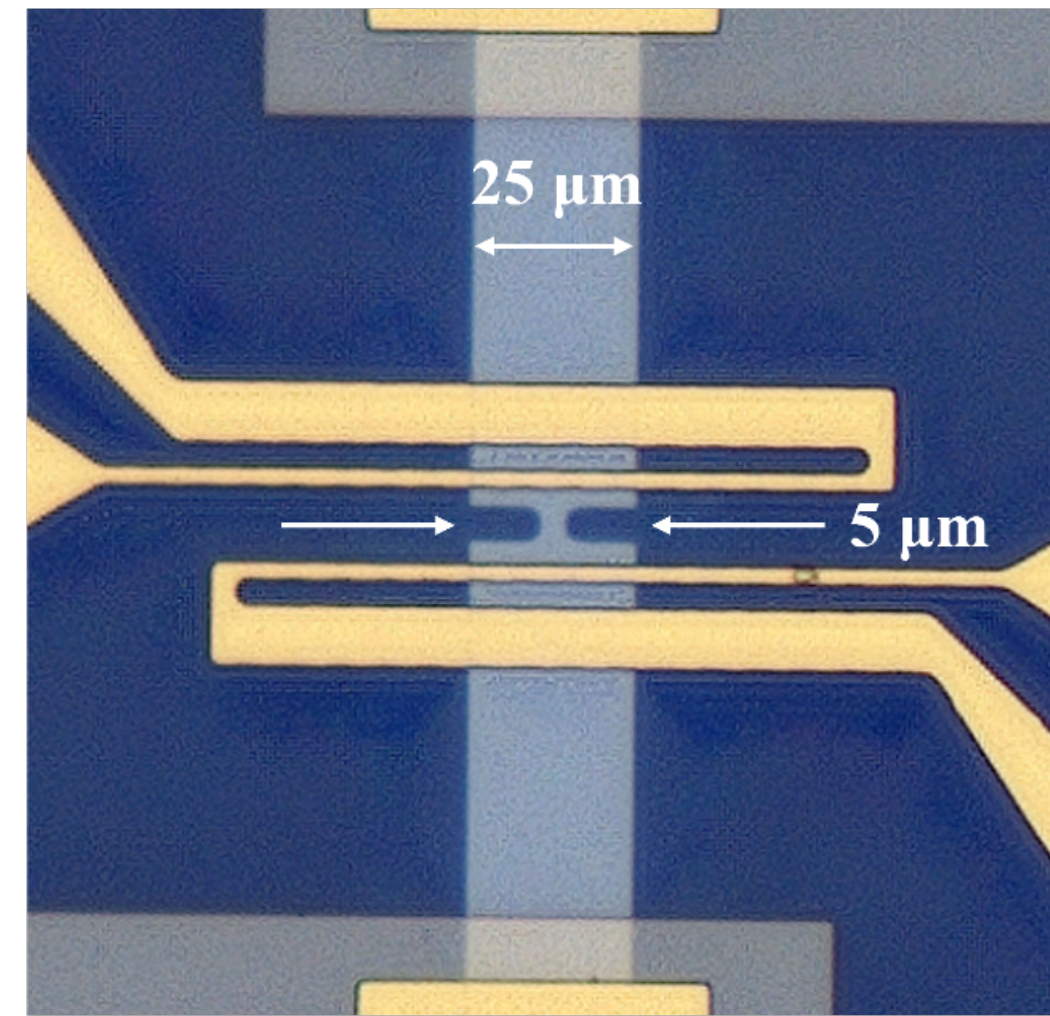
K. Nakazono et al., [arXiv:2505.15619](https://arxiv.org/abs/2505.15619)

# スピン波を用いた人工ブラックホールの生成

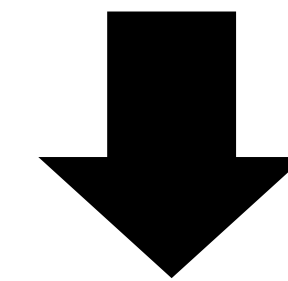
狭窄構造を持つ強磁性金属を使って、人工ブラックホール（事象の地平面）を作る



Roldán-Molina+ PRL '17

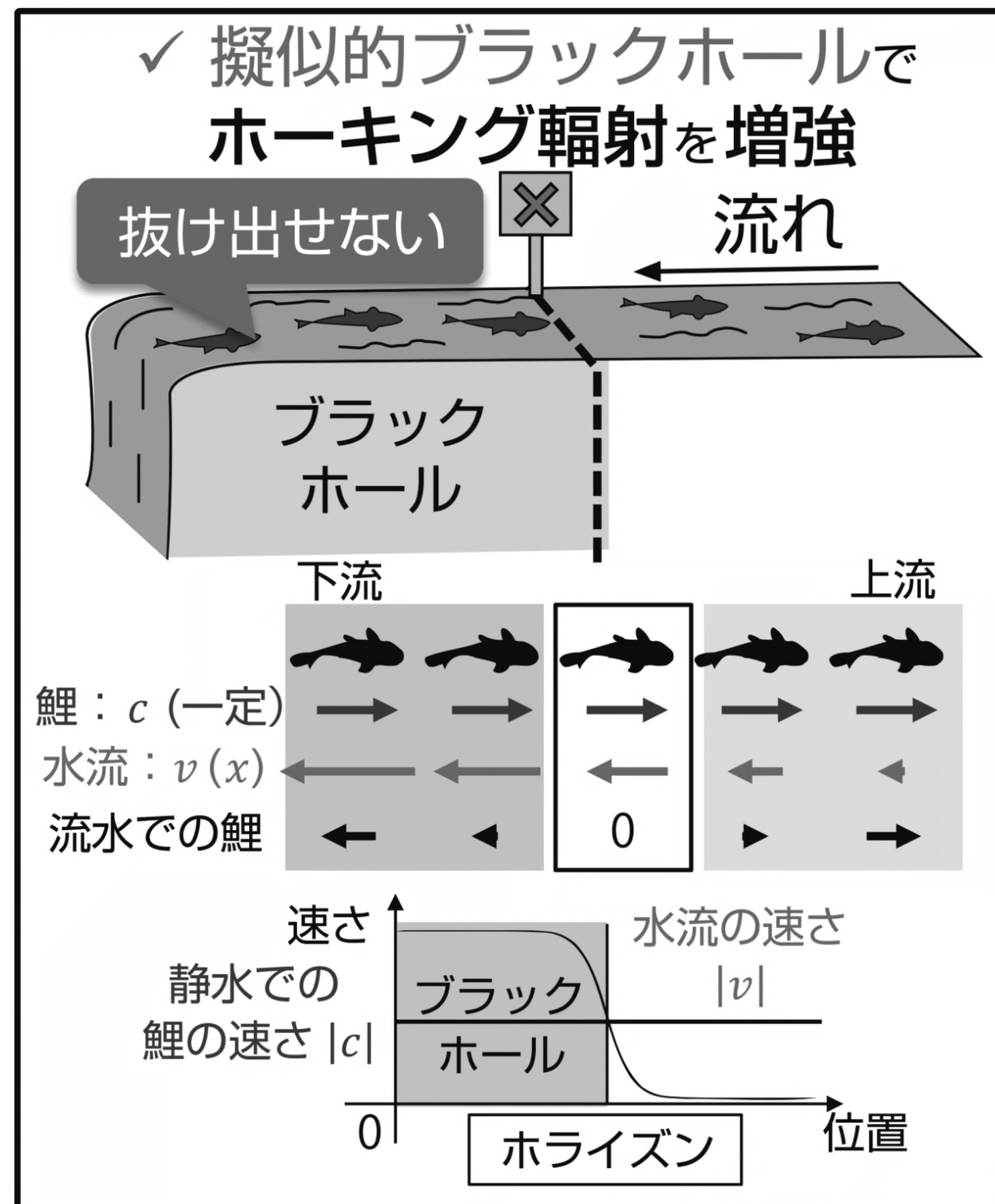


パルス幅 200nsのパルス電流で、  
6%のドップラーシフトを観測  
(先行研究から1桁以上の改善)



数nsのパルス電流、サブミクロン  
スケールのボトルネック構造へ

100%ドップラーシフト =  
「事象の地平面」の生成を目指す



# 量子アルゴリズムによる加速

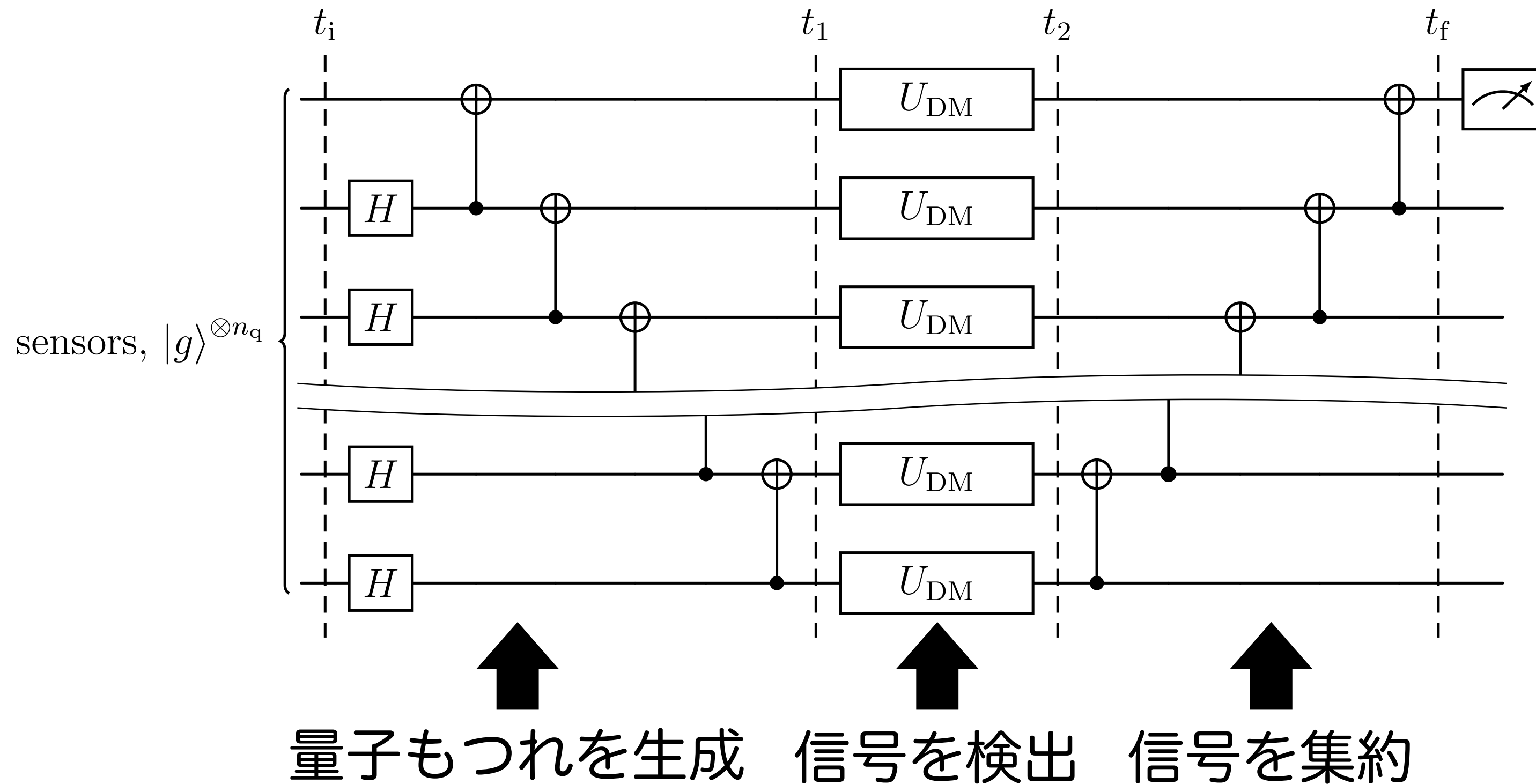
## 超伝導量子ビットの直接励起による探索

量子ビットをエンタングルさせることで、信号感度を二乗で加速

▶ 独立な $n$ 量子ビット系： $N_{\text{sig}} \propto n_q P_{g \rightarrow e}^{(1)} \simeq n_q \eta^2 \tau^2$  (→ 標準量子限界)

▶ エンタングルした $n$ 量子ビット系： $N_{\text{sig}}^{(\text{GHZ})} \propto P_{g \rightarrow e}^{(\text{GHZ})} \simeq n_q^2 \eta^2 \tau^2$  (→ ハイゼンベルク限界)

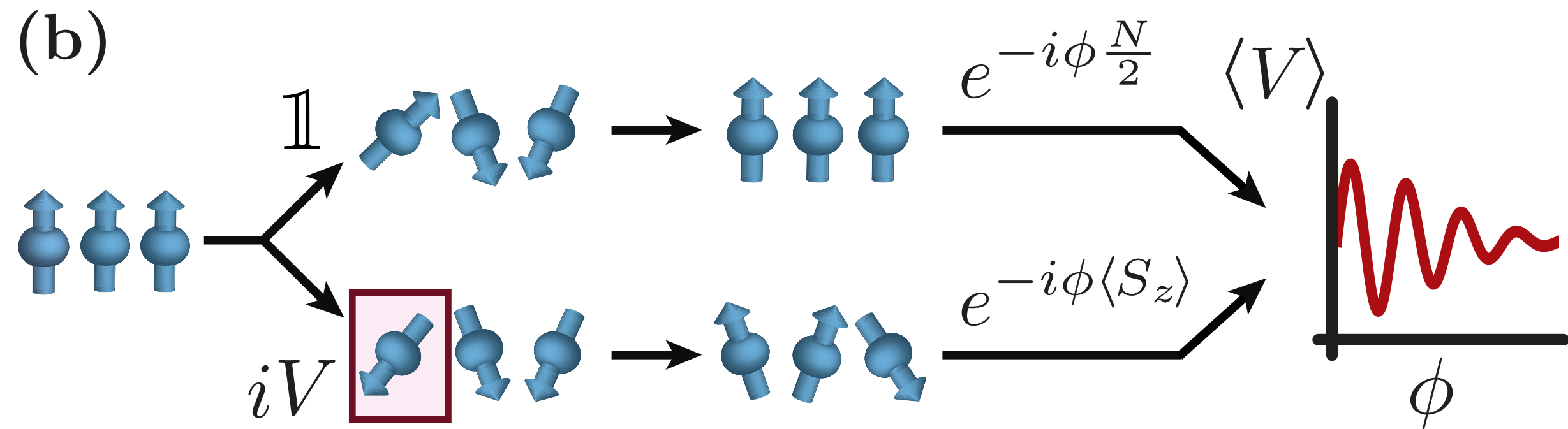
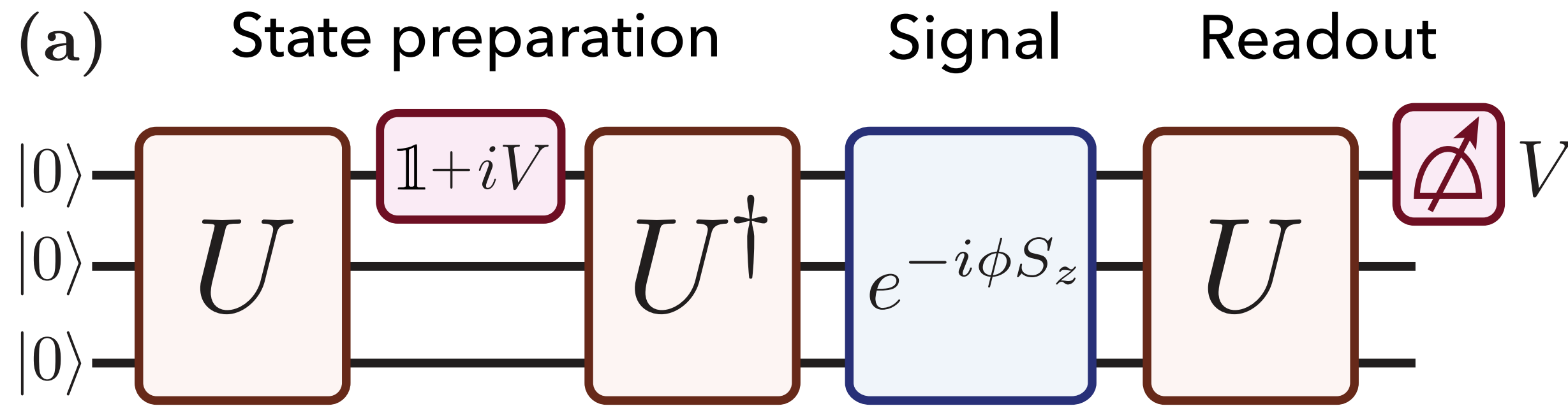
S. Chen et al., [arXiv:2407.19755](https://arxiv.org/abs/2407.19755)



しかし、 $n$ 量子ビットGHZ状態の寿命は、一般的に $n$ とともに減少  
( $\tau_{\text{GHZ}} \sim \tau_{\text{single}}/n$ )

# 量子アルゴリズムによる加速

## 量子マツハ・ツェンダー干渉計



$V$ で微小な摂動を与え、 $U = e^{-iHt}$ で  
摂動を全体に拡散（スクランブル）

➡ ハイゼンベルク限界（の半分）  
の感度を達成可能

GHZ状態を作る必要がない

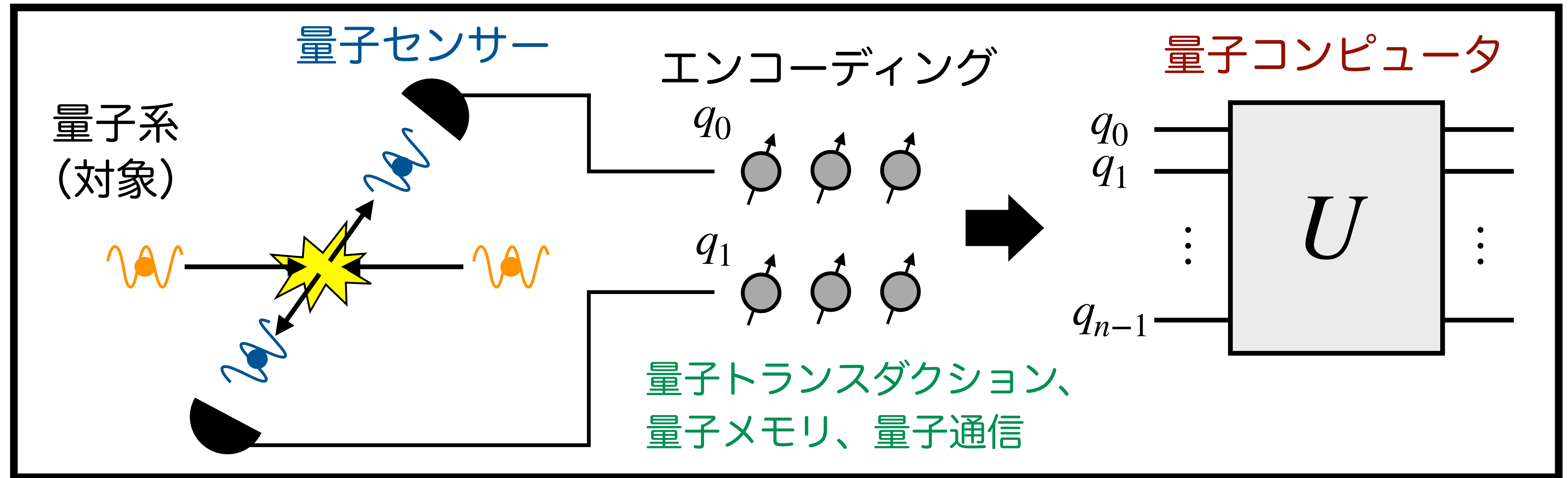
暗黒物質探索へ応用できないか？

二つの経路を通った量子状態が最後に  
干渉し、信号を増幅

Kobrin et al., [arXiv:2411.12794](https://arxiv.org/abs/2411.12794)

# 量子化した次世代の素粒子実験 — FTQCは必須 —

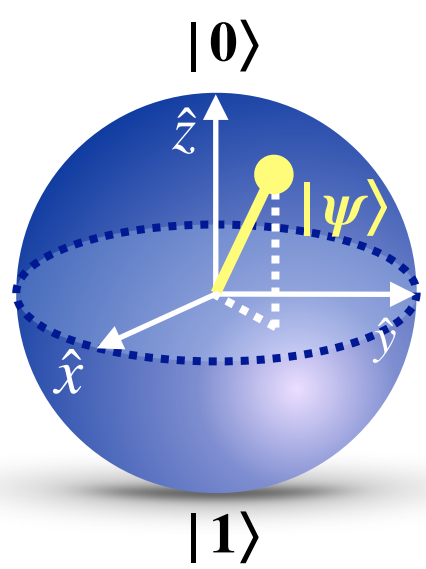
量子技術のコヒーレント接続による、素粒子ダイナミクスの量子実験、第一原理的な説明は可能か



**全く新しいフロンティア!!**

挑戦したい方は、ぜひ一緒に考えてみましょう

## アルゴリズム



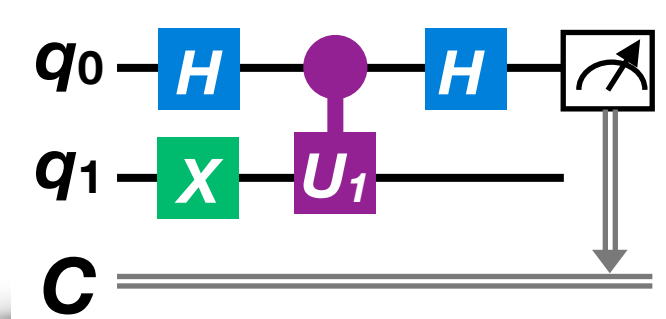
### 量子機械学習

- ▶ 汎化性の理論解析 上曾山(D3)
- ▶ 対称性を持つ学習モデル
- ▶ 量子ダイナミクスの学習 Boseong, Tavarnelli, Tacchino

### 場の量子論のシミュレーション

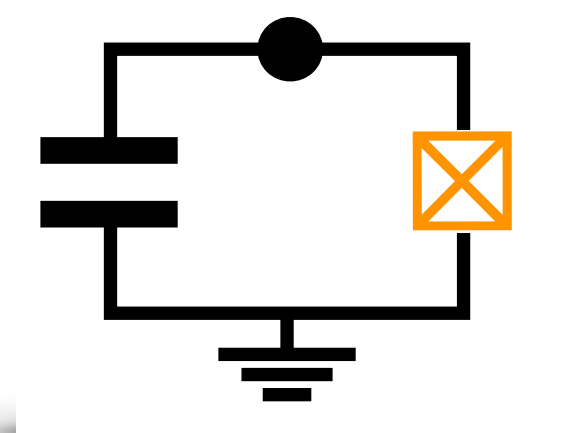
- ▶ 1次元 $Z_2$ ゲージ理論 王(M2)
- ▶ 2次元 $Z_2$ ゲージ理論 飯山, 永野
- ▶ 2次元SU(2)ゲージ理論 BERKELEY LAB 加地, 永野  
Bringing Science Solutions to the World
- ▶ 磁気モノポール-フェルミオン散乱 Fermilab 鈴木, 永野
- ▶ 有限温度・有限密度系 前野(D2)

## ソフトウェア



- ▶ 量子エラー訂正：
  - 量子ノイズ推定 駒田(D1)
  - 接続符号によるエラー訂正 鄭(M2)
- ▶ 量子回路の最適化 (AQCEL)

## ハードウェア



### 暗黒物質探索 (DarQ実験)

- 渡邊, 中園, 河井(D2)
- ▶ デバイス設計、製作、軟正
  - ▶ 強磁場耐性デバイス

### 人工ブラックホール

- の研究 稲田, 中山
- ▶ ナノ構造磁性体
  - ▶ 超伝導量子マテリアル

### FTQCに向けたハードウェア開発

- 稲田, 三野
- ▶ 量子アンプ、アイソレータ、サーキュレータ

# バックアップ

---

# 量子機械学習 (量子ニューラルネットワークモデル)

古典データ  $\{x_i, y_i\}$

データの符号化  $|\phi(x)\rangle = U_{\text{in}}(x) |0\rangle^{\otimes n}$

パラメータ回路 (Ansatz) で状態を変換

$|\psi(x, \theta)\rangle = U(\theta) |\phi(x)\rangle$

量子データ

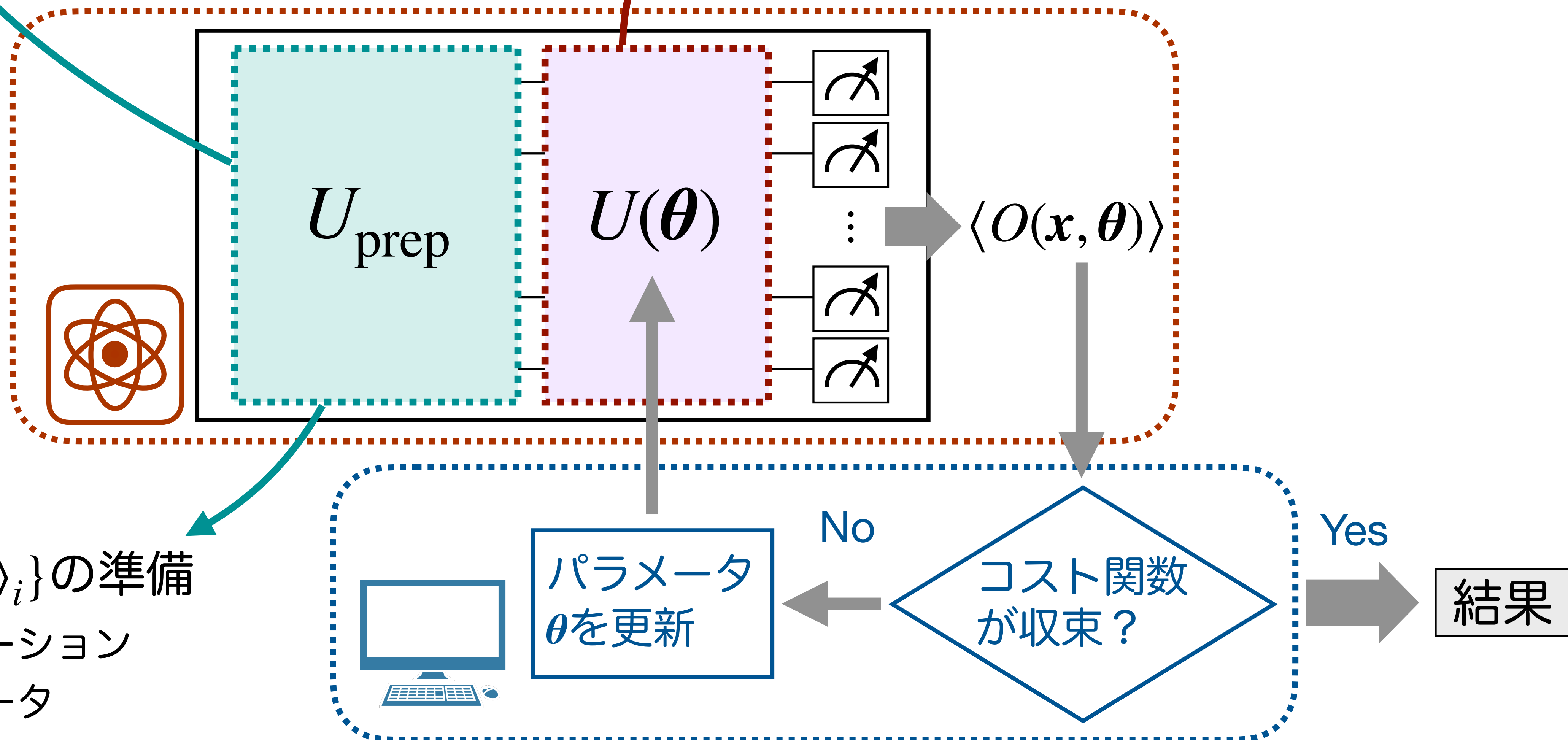
$\{|\phi\rangle_i, y_i\}$

波動関数  $\{|\phi\rangle_i\}$  の準備

量子シミュレーション

量子コンピュータ

...

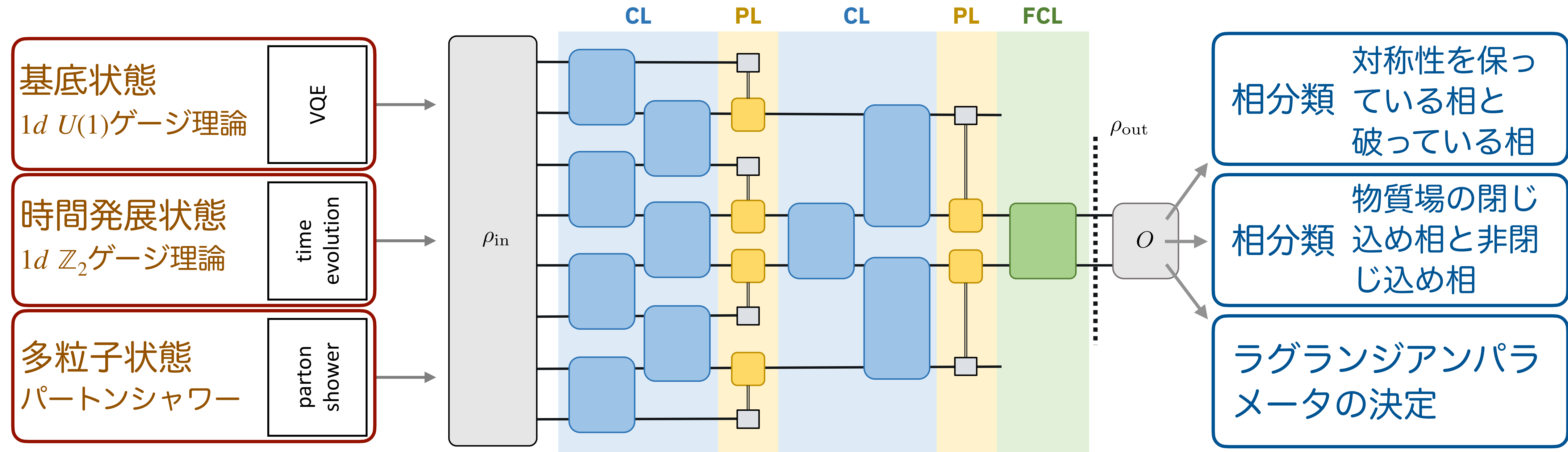


# 量子的なデータ + 機械学習

ある量子系の状態(波動関数)を入力データとして、量子コンピュータを使って解析する

➡ 量子データ学習によって非自明な予測が可能か？

高エネルギー物理の量子シミュレーションを使って生成した状態を学習する



## 素粒子理論・高エネルギー実験 の新領域を開拓

- ▶ 量子機械学習によるデータ解析・シミュレーション応用
- ▶ 格子ゲージ理論の量子計算

## 未踏領域での暗黒物質の探索・ 人工ブラックホールの生成

- ▶ 新規超伝導トランズモン・量子センサーの開発
- ▶ 量子アルゴリズムによる加速
- ▶ 素粒子実験への量子応用

## 量子情報による計算可能領域の拡大

- ▶ 量子誤り訂正
- ▶ 誤り耐性量子計算アルゴリズム
- ▶ HPC統合による量子計算

## 超伝導FTQCに向けた ハードウェア開発

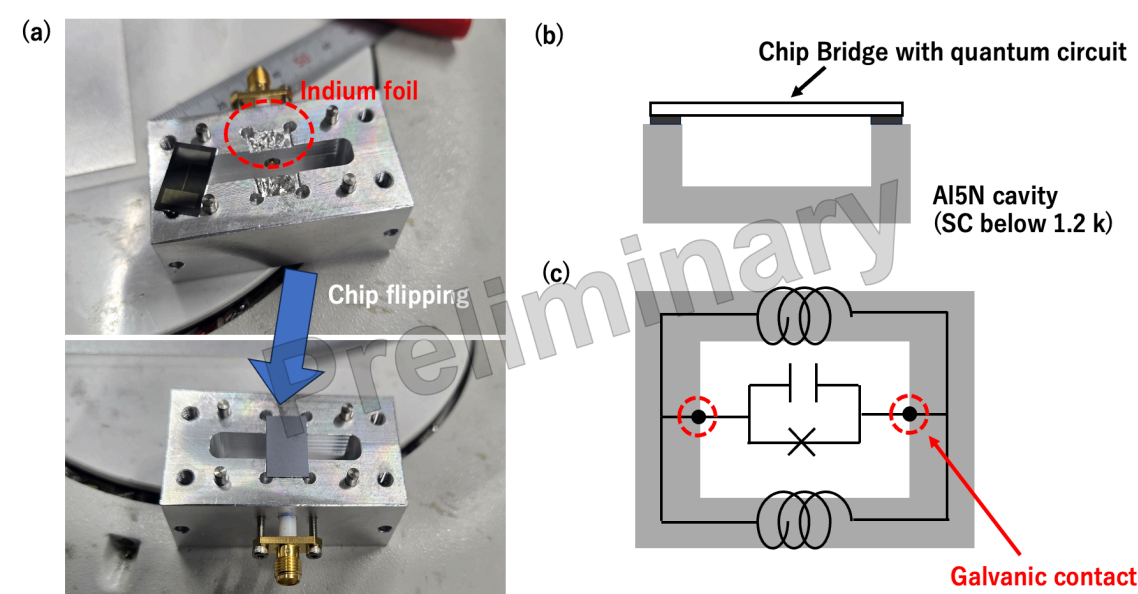
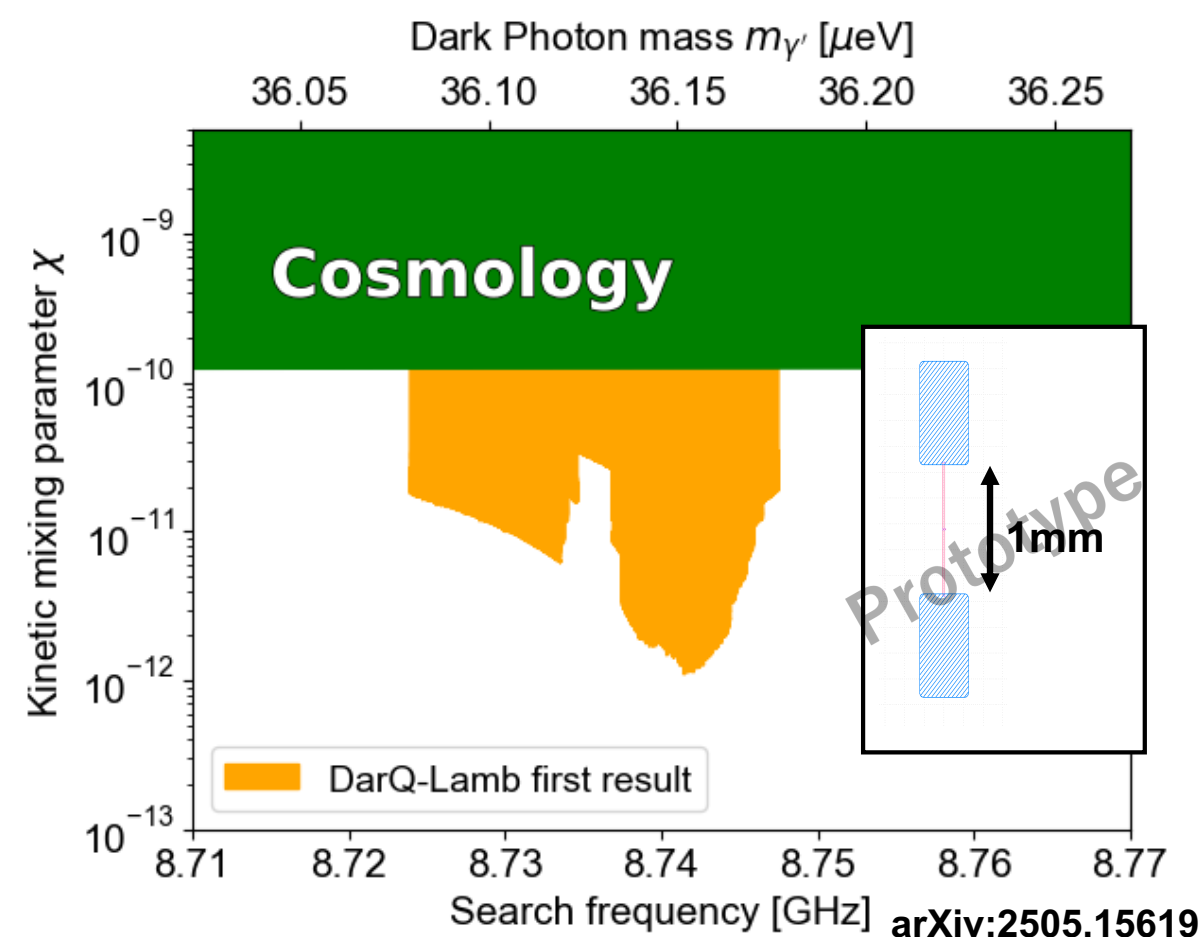
- ▶ 信号の多重伝送技術
- ▶ 高密度デバイスの開発

# 量子ハードウェアと素粒子・宇宙物理

## 量子ビットによる共振器周波数の変調を用いたダークフォトン探索実験

arXiv:2505.15619

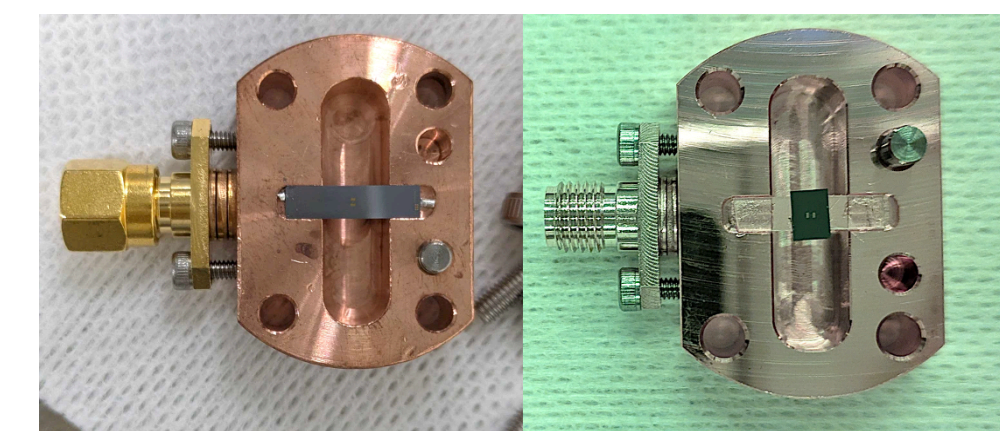
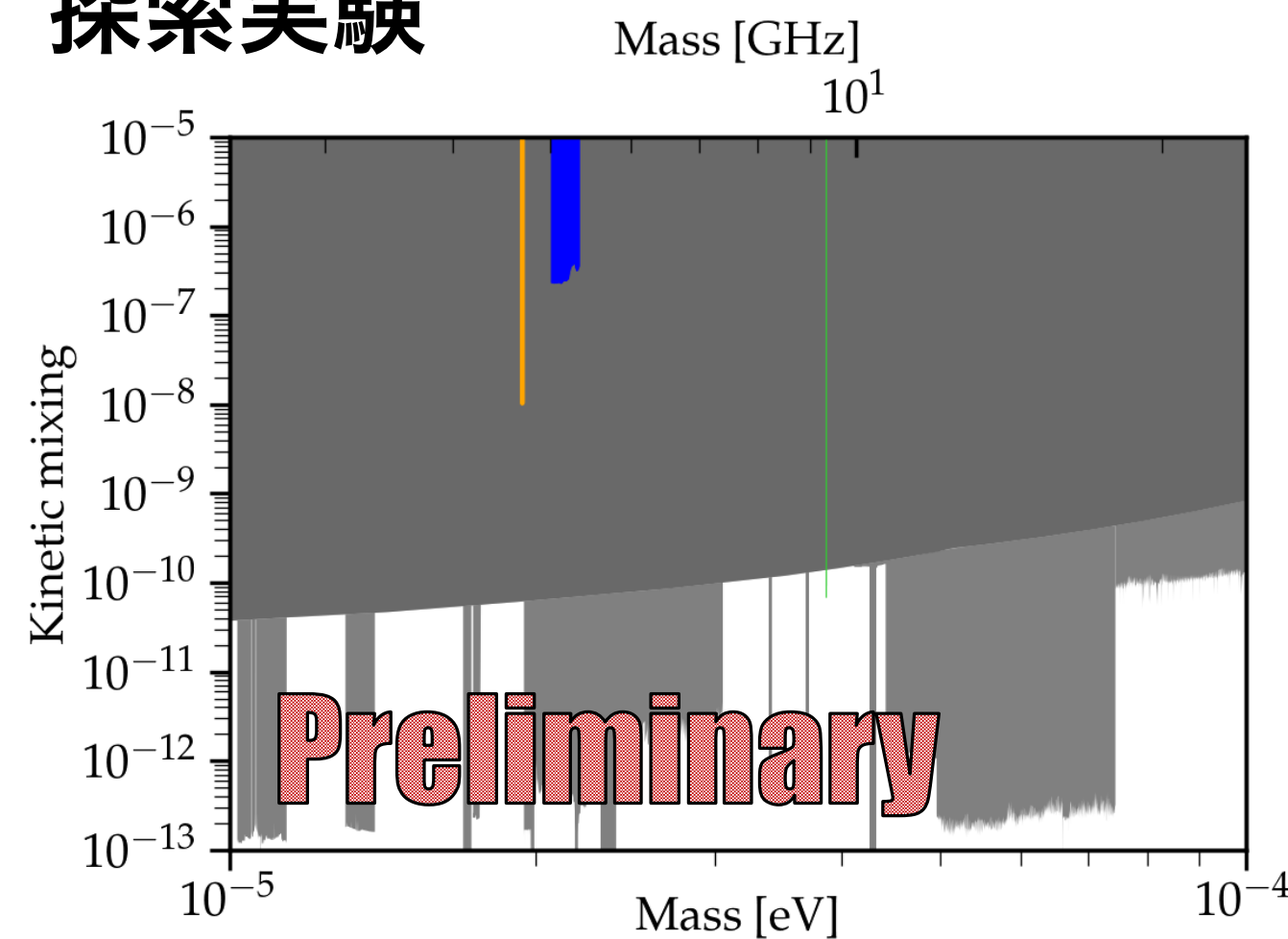
### DarQ-Lamb



さらなる広帯域化へ向けた強結合量子ビットを開発中

## 量子ビットの直接励起を用いたダークフォトン探索実験

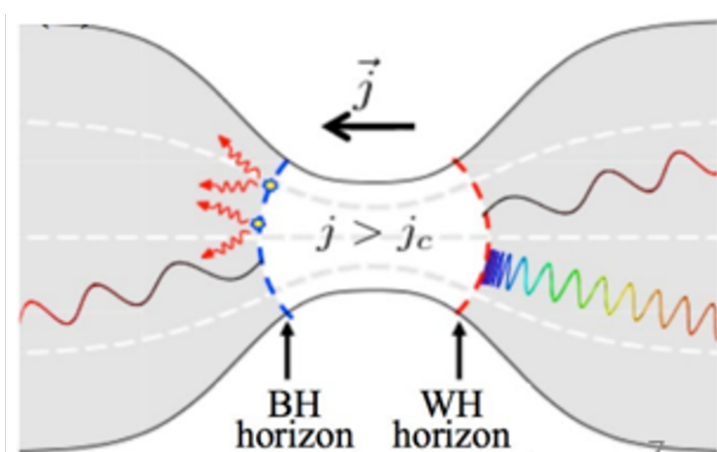
### DarQ-Direct



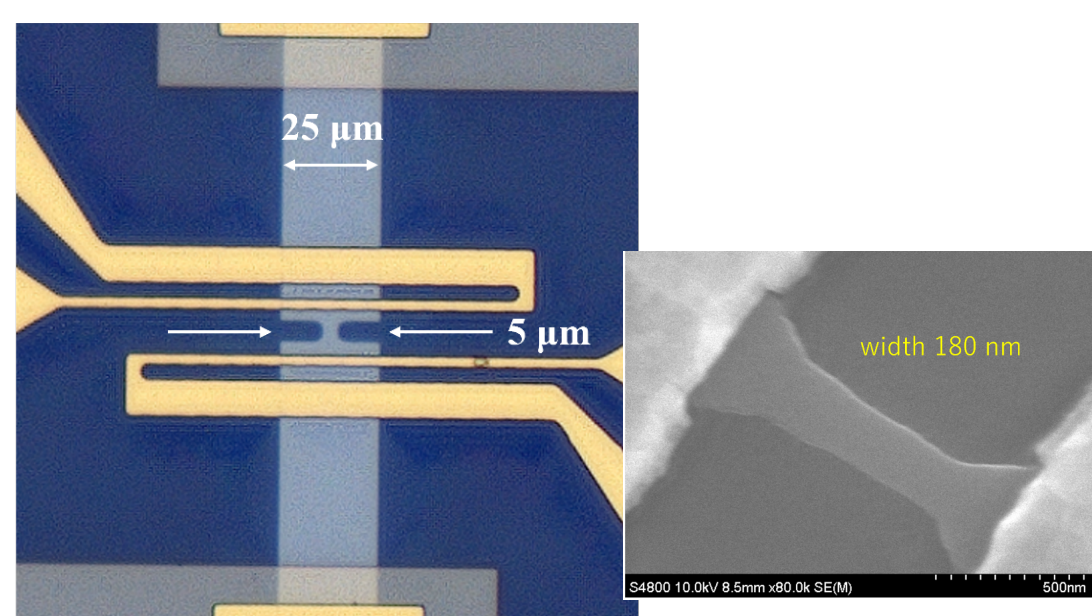
弱結合 強結合

量子ビット-共振器間の結合強度を変えたセットアップ

## スピン波を用いた人工ブラックホール生成



Roldán-Molina+ PRL '17



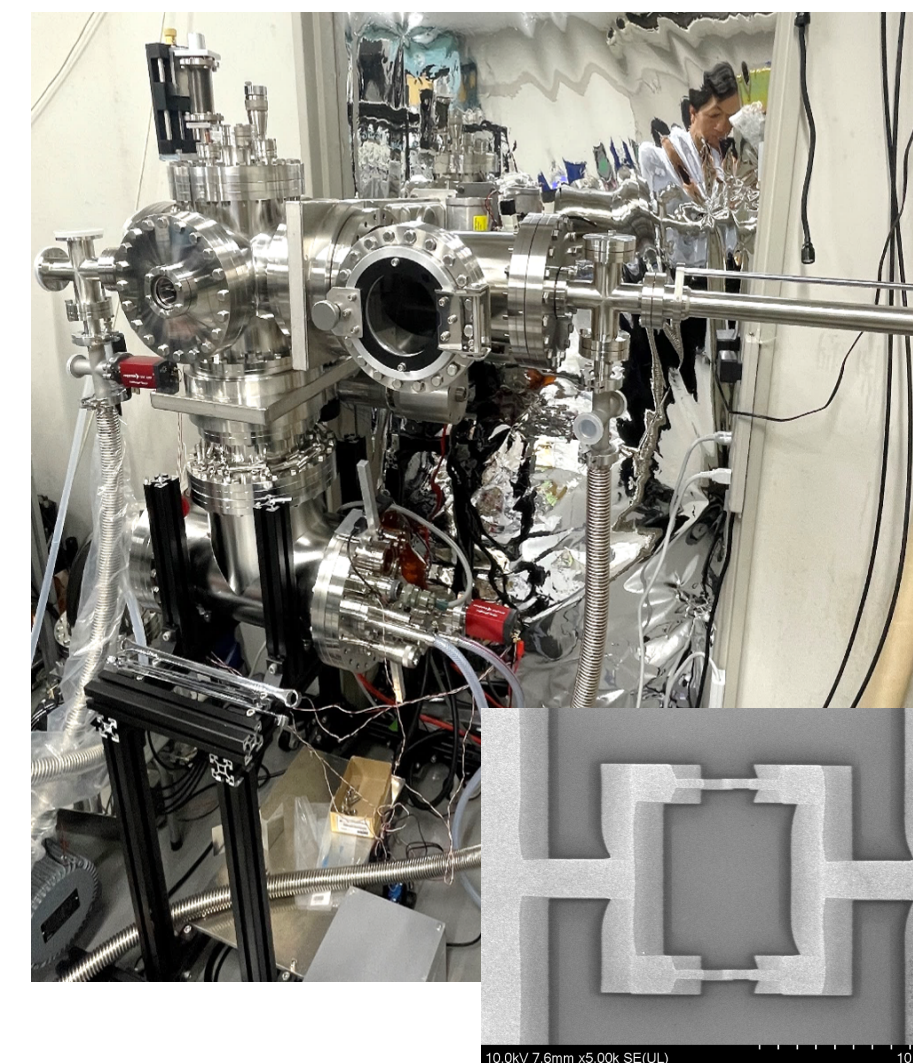
▶ 6%のドップラーシフトを観測 (先行研究から1桁以上の改善)

▶ 狭窄構造を持つ強磁性金属を使って、スピン波にドップラーシフトを起こす

100%ドップラーシフト = 「事象の地平面」の生成を目指す

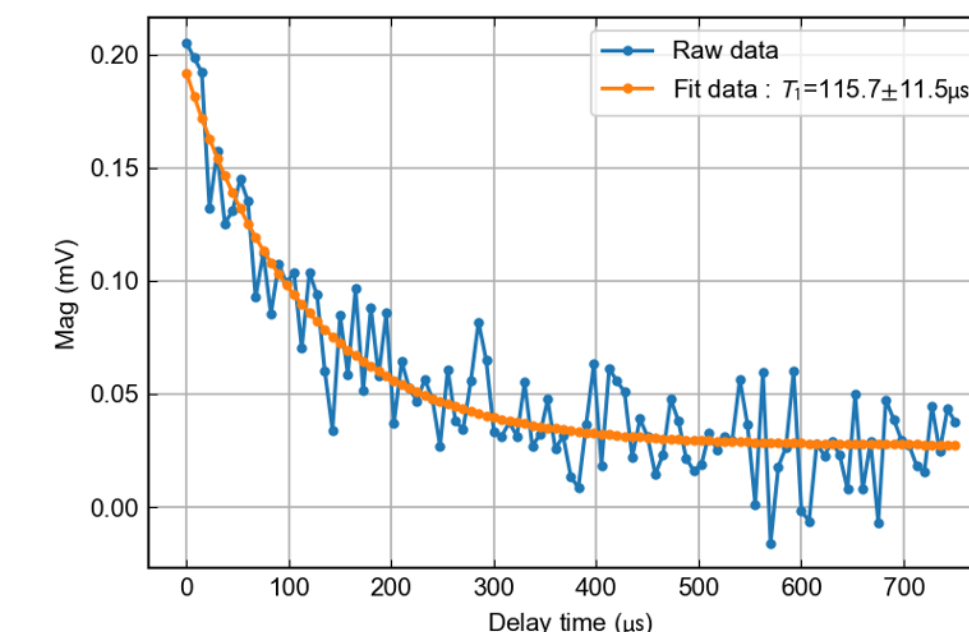
## 超伝導量子ビットの製作

- ▶ 超伝導量子ビットの心臓部であるジョセフソン接合を作製するための装置を開発
- ▶ 量子ビット以外にも、ジョセフソン接合を利用した超伝導検出器などの作製に利用



## 暗黒物質探索のための単一光子検出器の開発

超伝導量子ビットの作製プロセスの最適化により、100 μsを超える寿命 (T1) を達成



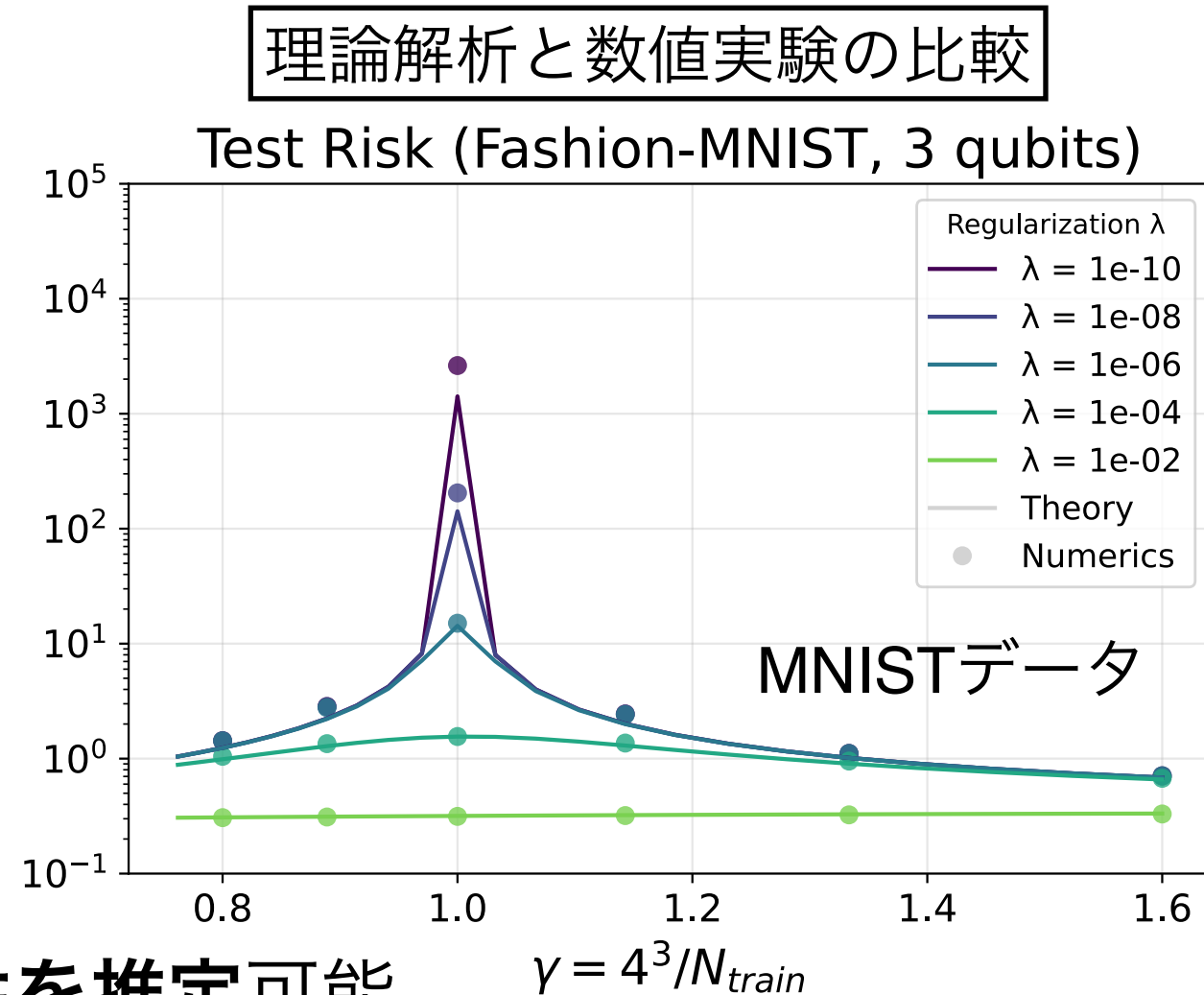
# 量子ソフトウェアと素粒子物理

## 量子機械学習の研究

量子機械学習モデルは、テストデータに対してどういう予測が可能か

量子カーネルモデルの汎化性を解析するフレームワークを構築 [arXiv:2604.17202](https://arxiv.org/abs/2604.17202)

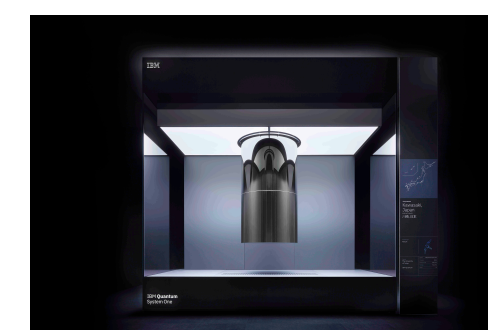
→ データの情報から汎化性を推定可能



## 素粒子ゲージ理論の量子シミュレーション

量子コンピュータ

スパコン

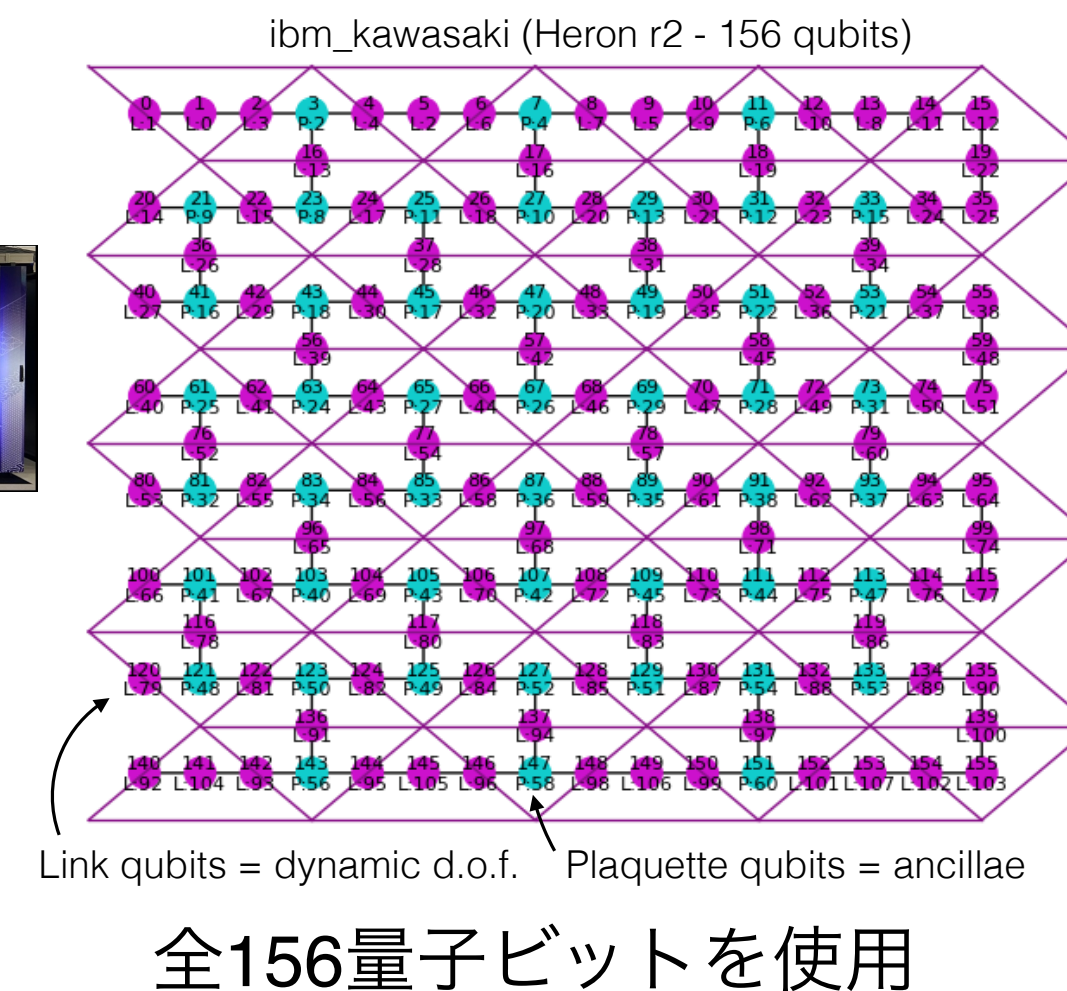


IBM 156量子ビット

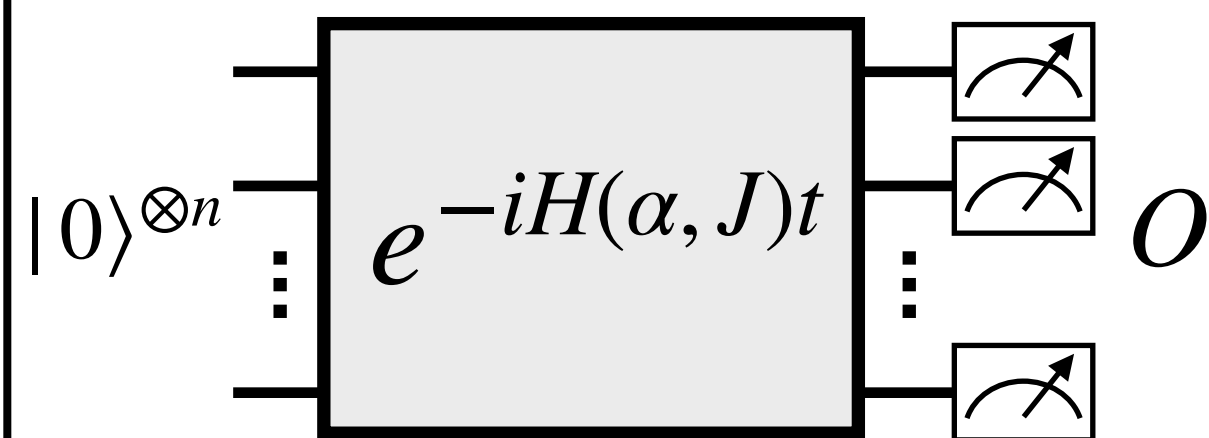


Miyabi-G NVIDIA GH200 (1,120ノード)

誤り耐性のない量子コンピュータで、大きな物理系をシミュレートできるか



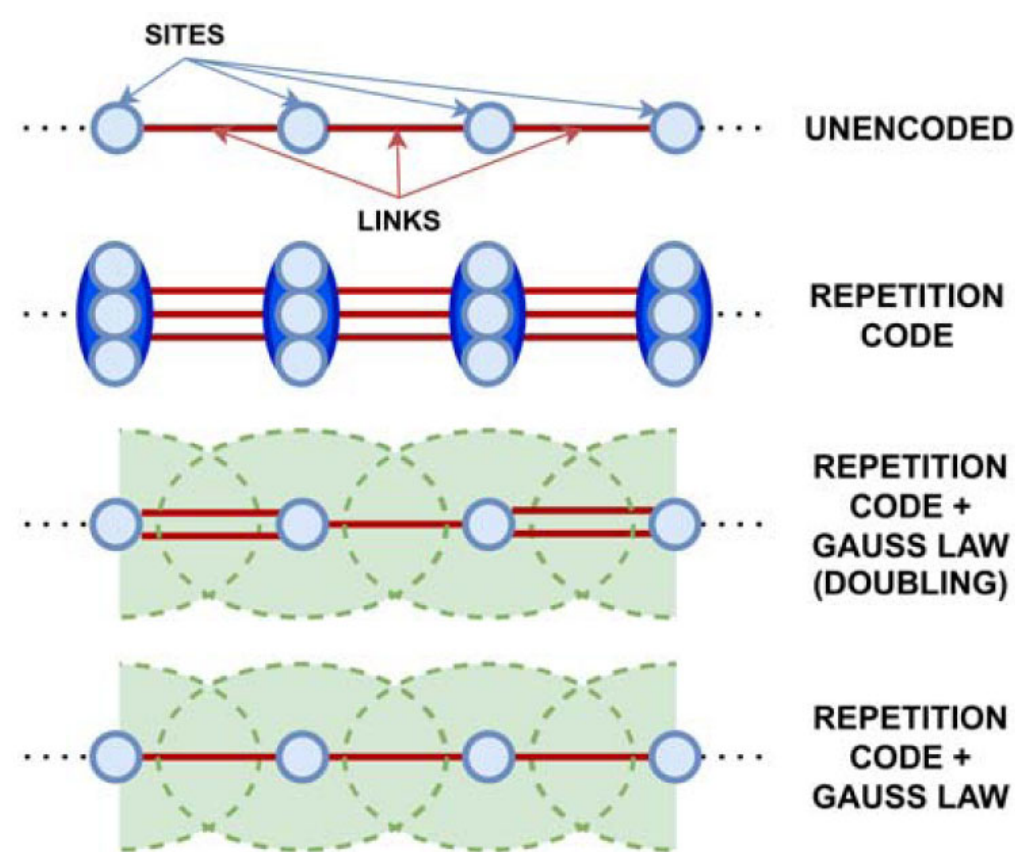
## 量子ダイナミクスの学習



ハミルトニアンの時間発展状態に対する物理量の期待値を学習し、予測

## 素粒子ゲージ理論での量子誤り訂正

- ▶ 例えば、繰り返し符号による冗長化
- ▶ 局所ゲージ対称性 (ガウス則) の応用で、より効率的に

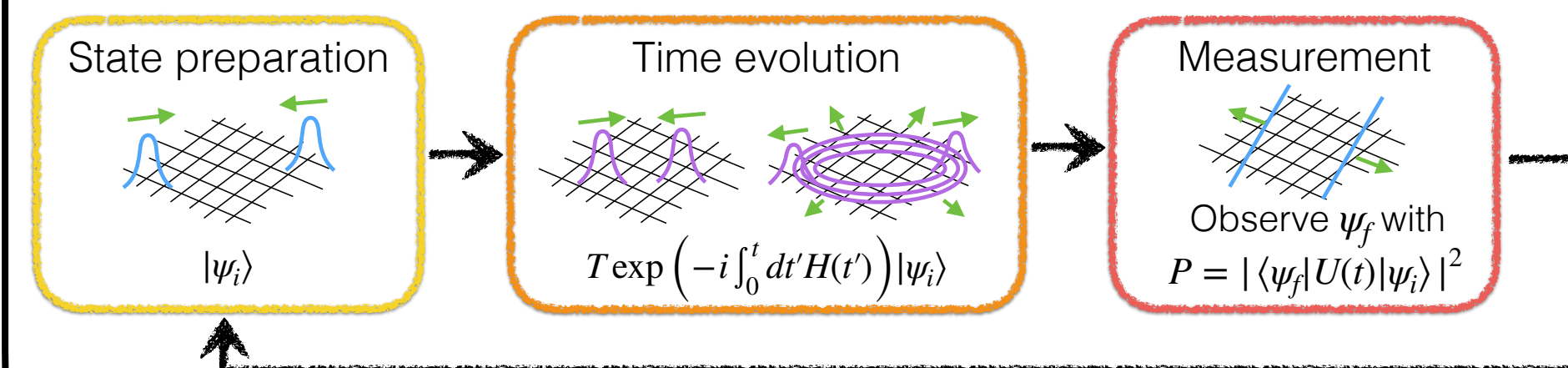


→ エラーロバスト & 効率的な量子シミュレーションを目指す

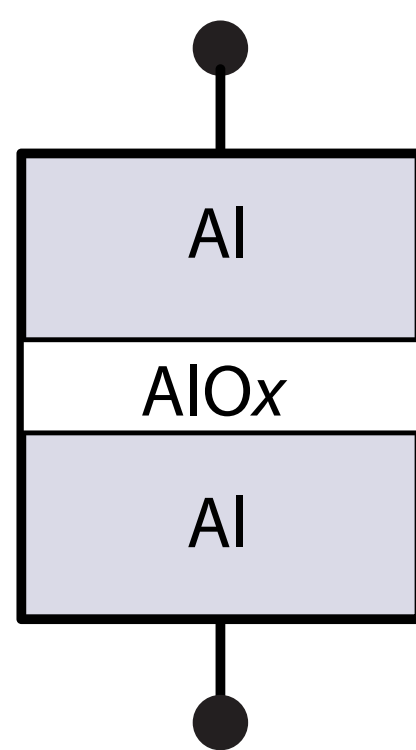
## 量子イベントジェネレーター

古典モンテカルロ法によるイベント生成は、根本的なスケーリング問題に直面

→ 実時間発展 + Shotベースのサンプリングによる量子イベント生成

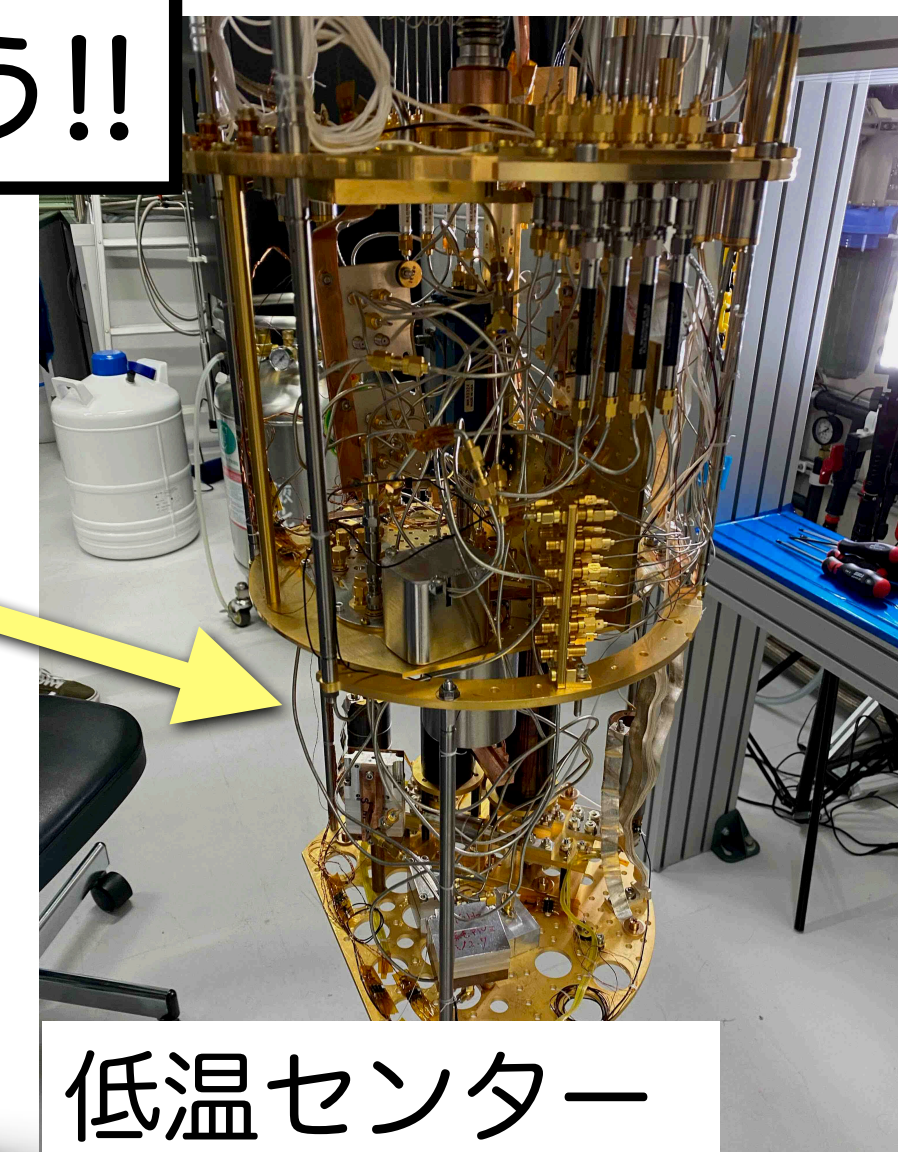
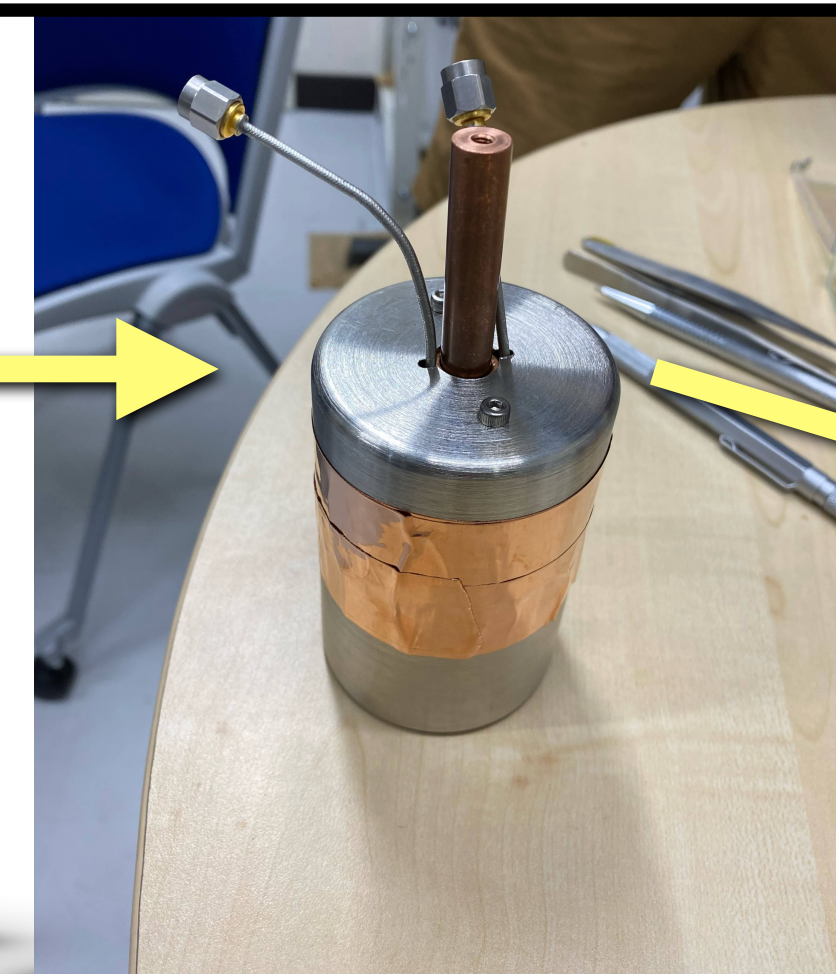
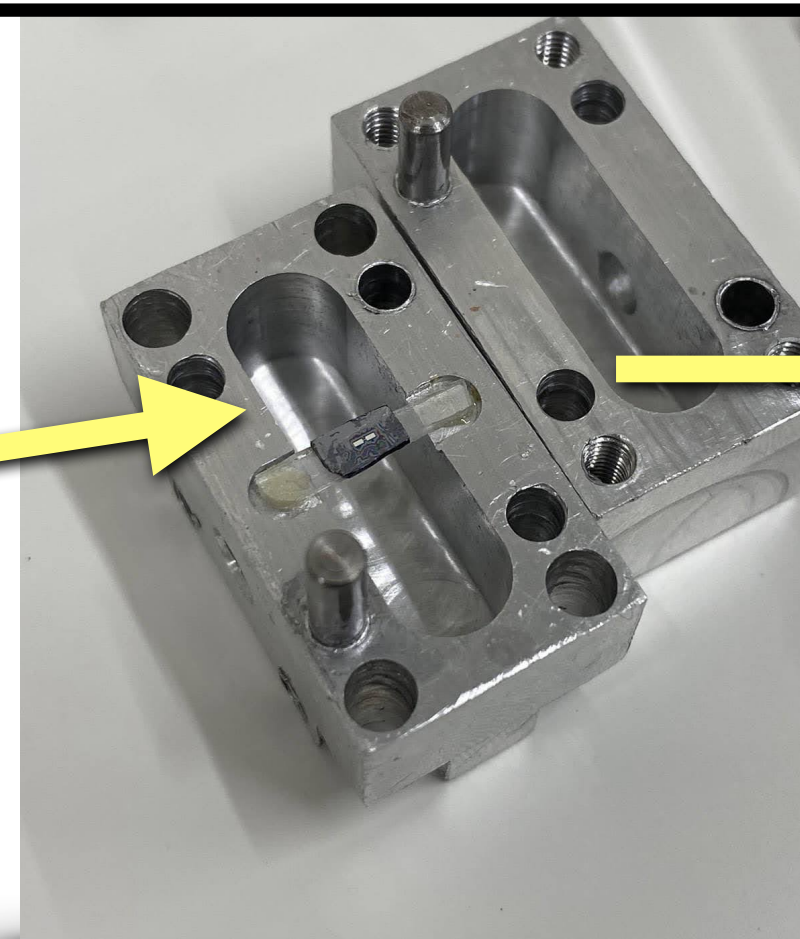
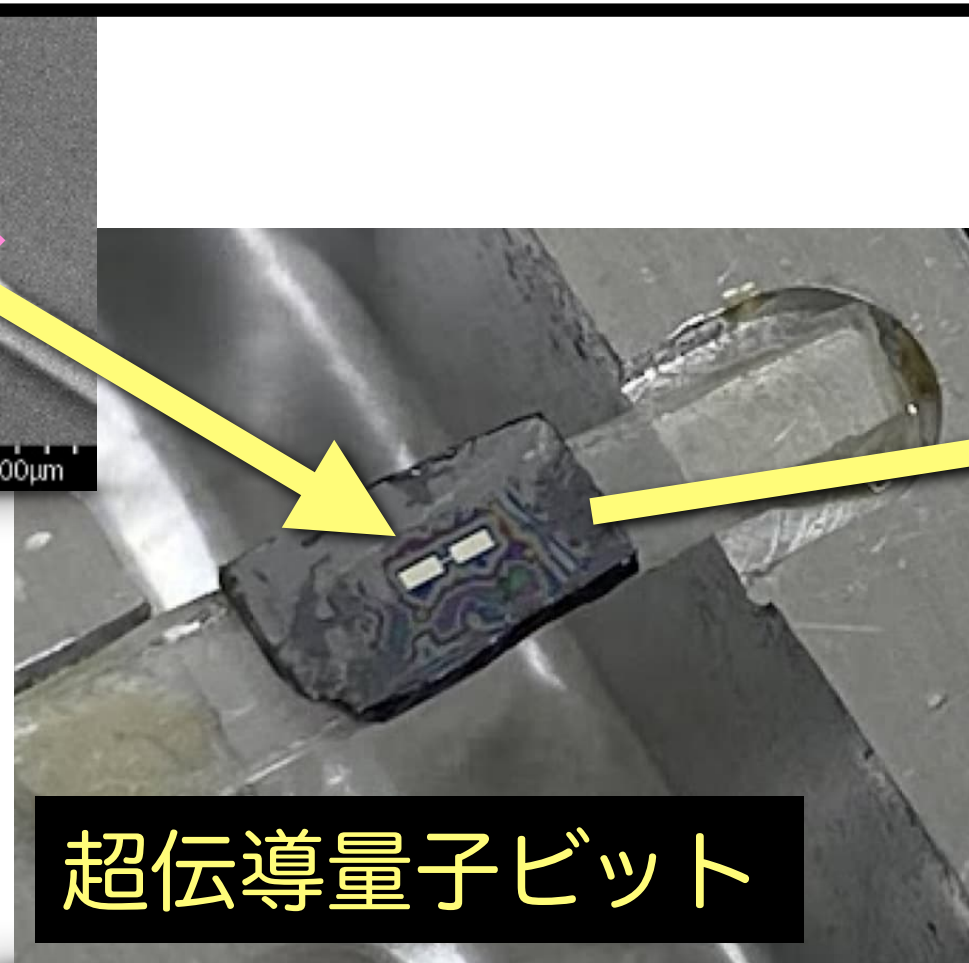
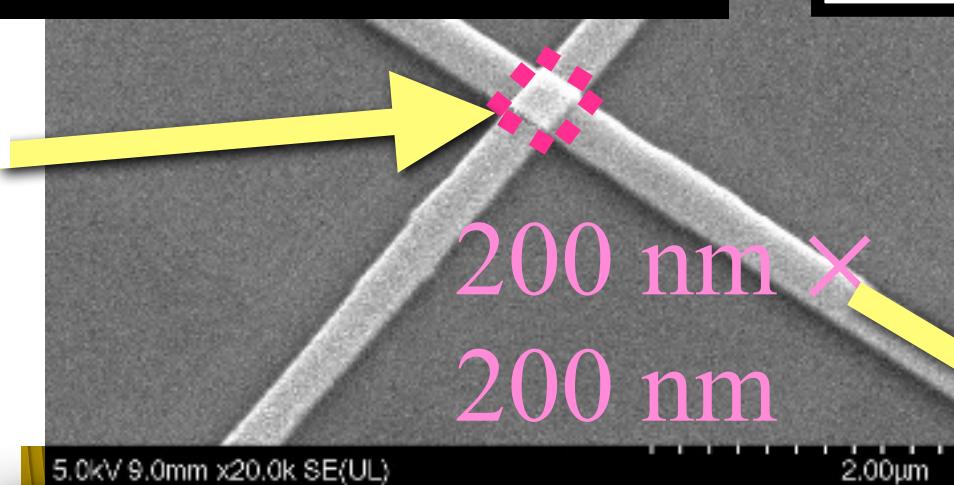


# 量子センサーを使った基礎物理実験

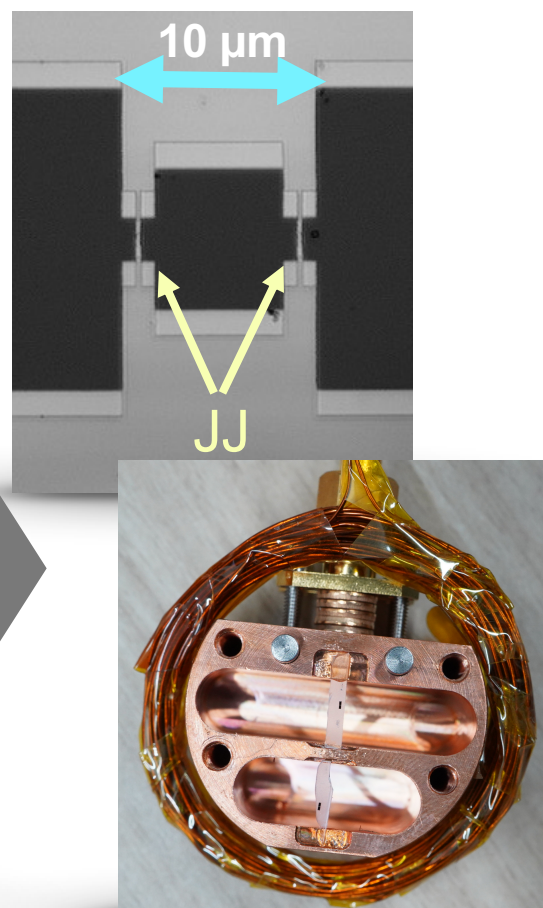
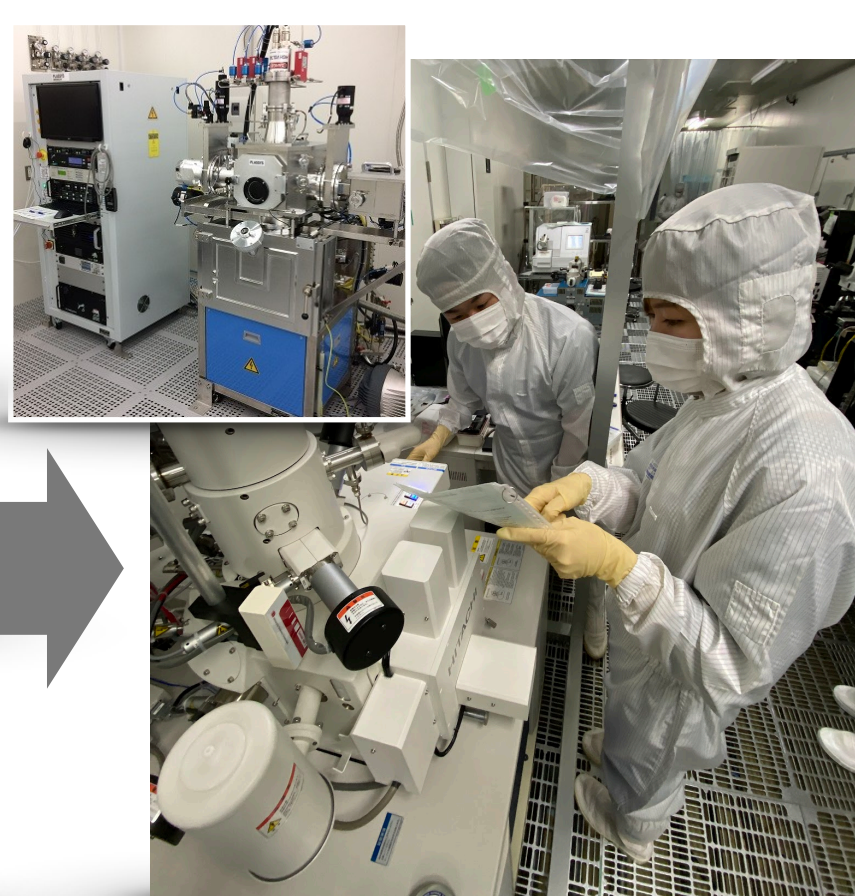


ジョセフソン接合

超伝導量子ビットを自分達で作ри、実験に使う!!

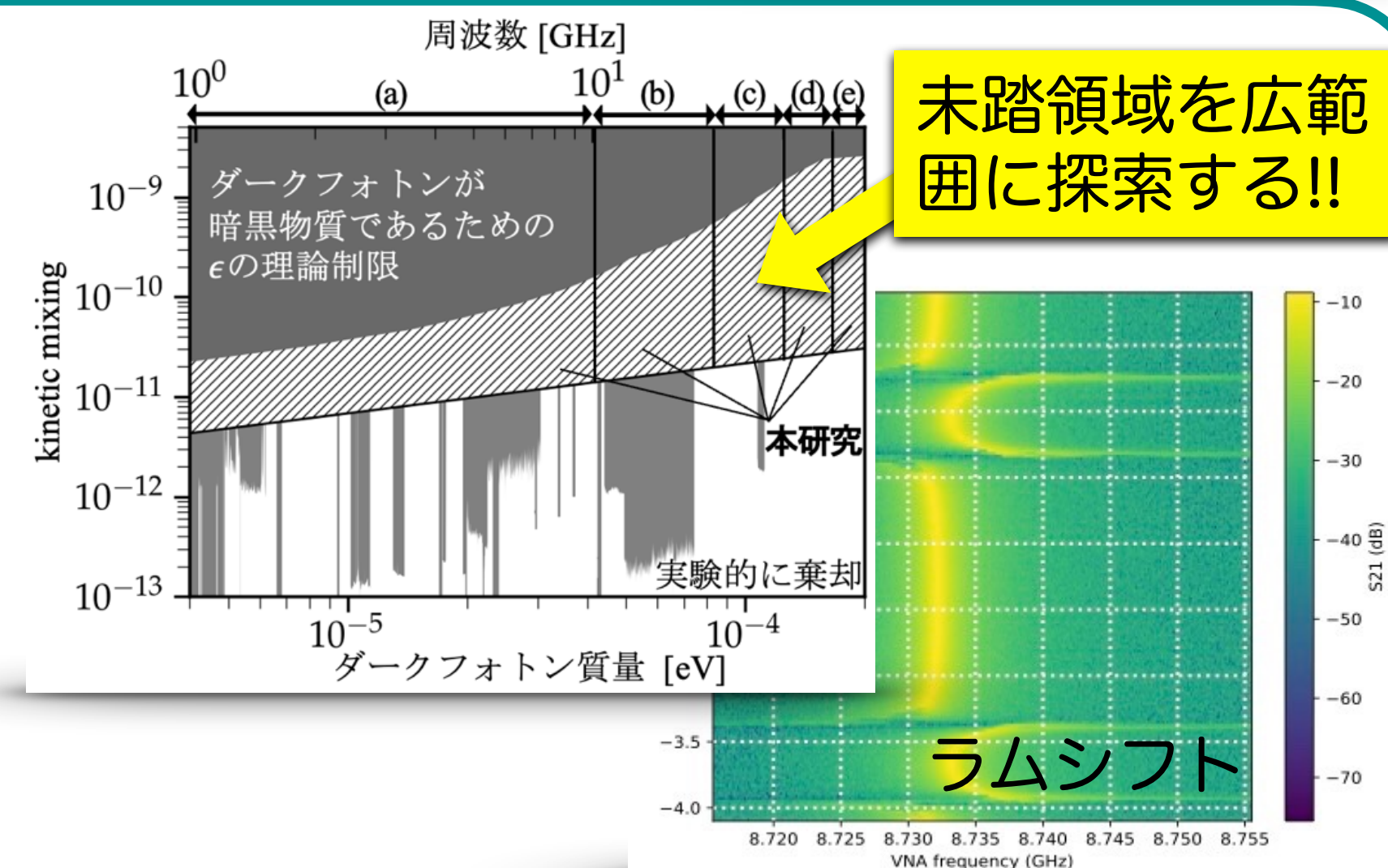
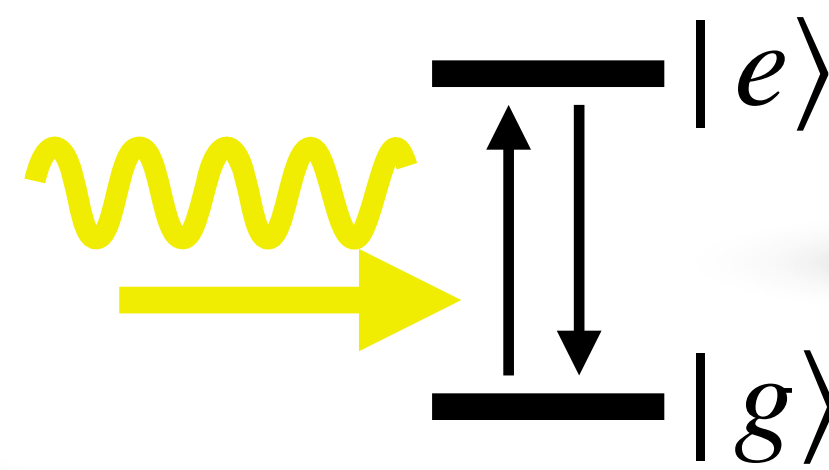


## 超伝導量子ビットの開発・高度化



## 暗黒物質の探索

暗黒物質が変換した光を量子ビットで検出する



若手スタッフ・学生が主体になり、アイデア出しから設計・開発・実験まで

# 研究サポートも手厚い!

## 量子コンピュータ実習 (Sセメ) の様子

### 量子コンピューティングワークブック

NEC

量子コンピューティング・ワークブック

Search this book...

量子コンピューティング・ワークブックへようこそ!

量子コンピュータに触れる  
CHSH不等式の破れを確認する  
【課題】量子相関を調べる

超並列計算機としての量子コンピュータ  
単純な量子回路をゼロから書く  
4兆通りの足し算を同時に行う  
【課題】量子計算

量子ダイナミクスシミュレーション  
物理系を表現する

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

このワークブックは、東京大学量子ネイティブからソフトまで」の付属教材でも話題が設けられています。受講者は課題ベ

ワークブック全体を通じて、Qiskitとい Experience (IBMQ)の量子コンピュータで実習を始める前に実習の準備を参考に準

問い合わせ

ワークブックに関する質問・意見・訂正してください。その他の問い合わせやお寄せください。

q nec.jp

NEC

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

### IBM量子コンピュータ (浅野)

2022年度

2023年度

- ▶ 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量子コンピュータ実機を実習に使えるのは、多分世界中で東大だけ?

サポート体制も万全!!

ICEPPで量子研究をしている大学院生は、入学時の経験はゼロ (の人が多い) です

興味ある方、ぜひ一緒にやりましょう!!

光量子

核磁気共鳴

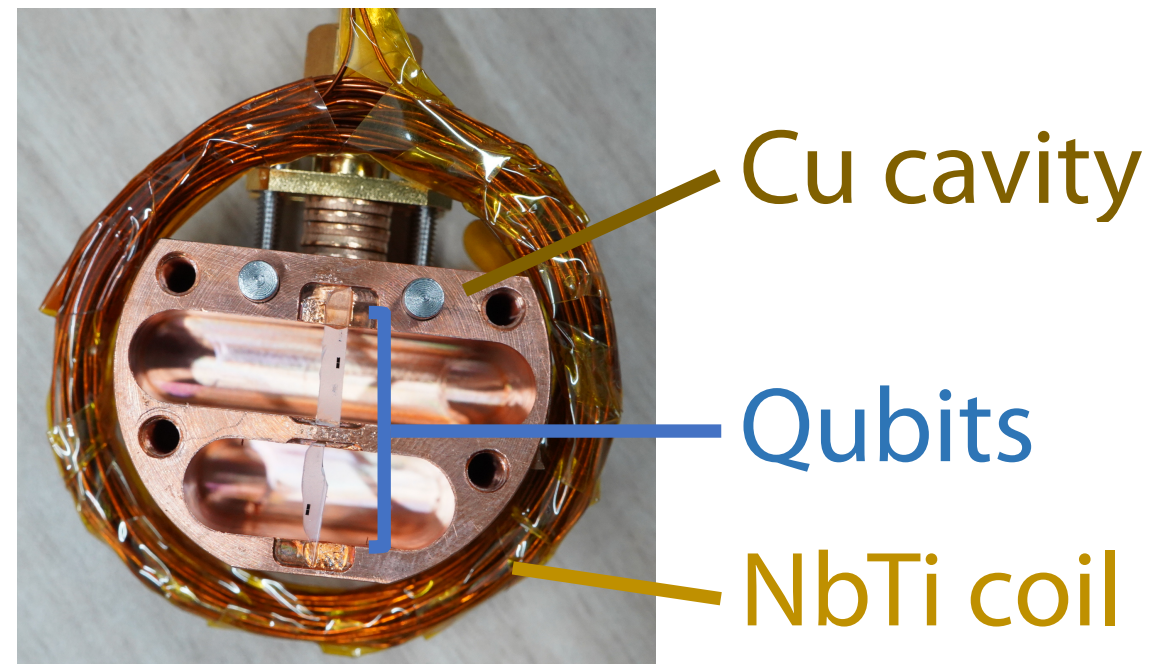
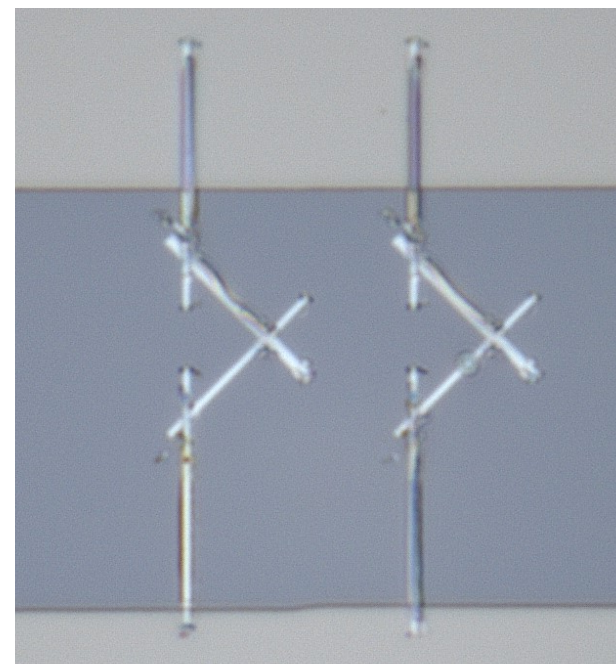
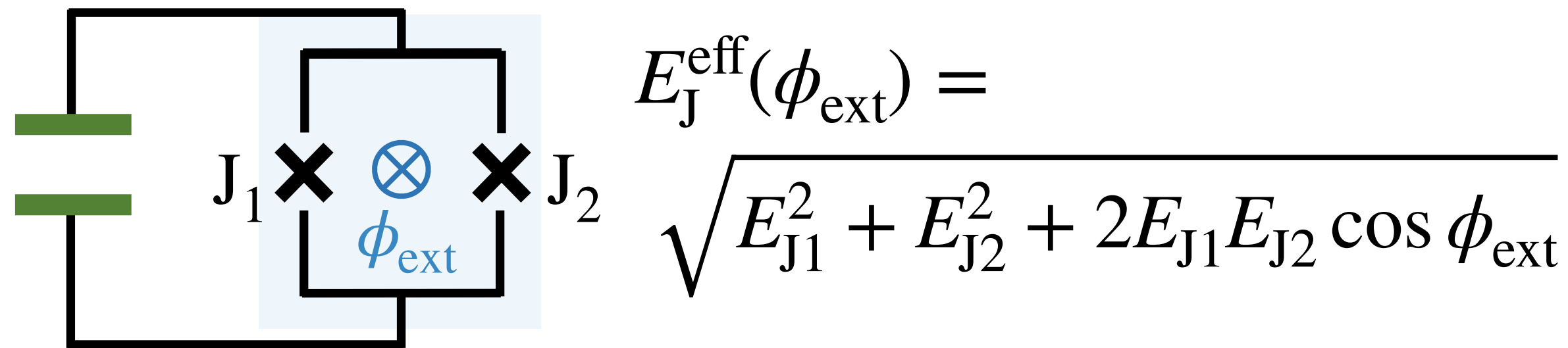
# 超伝導量子デバイスの研究

超伝導量子ビットを使った波状暗黒物質（アクシオン, 暗黒光子）の探索

量子ビットの遷移周波数の変調 → 質量領域をスキャン

## SQUID

量子ビットを貫く磁束を変えることで、  
量子ビットの遷移周波数を変調



Magnetic field by electric current

## AC stark shift

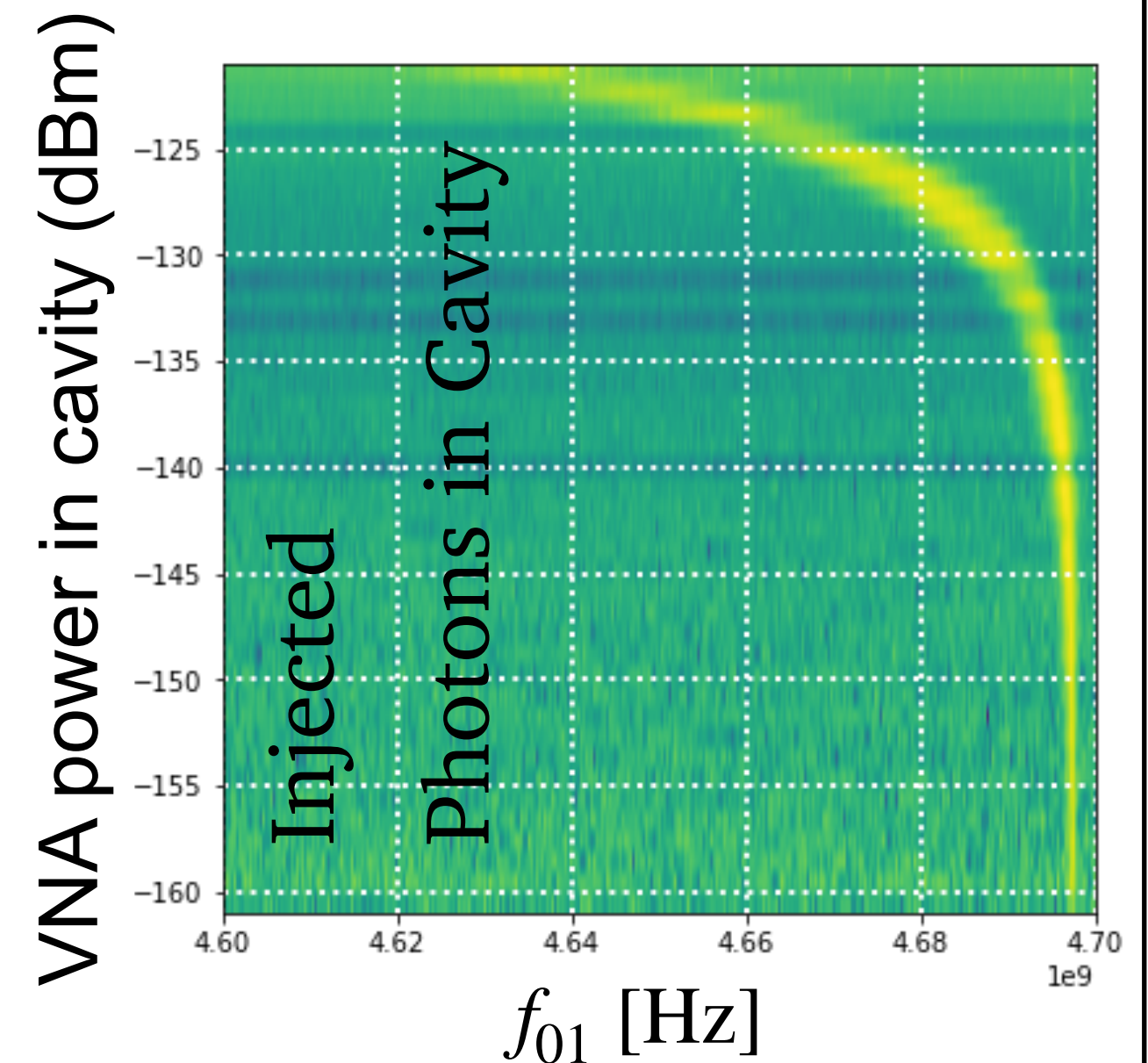
キャビティに非共鳴周波数の光子を入射し、  
量子ビットの遷移周波数を変調

$$\Delta f_{01} = \frac{\delta_q \Omega_s^2}{2\Delta_{qs}(\delta_q + \Delta_{qs})}$$

$\Omega_s$  : amplitude of injected photons

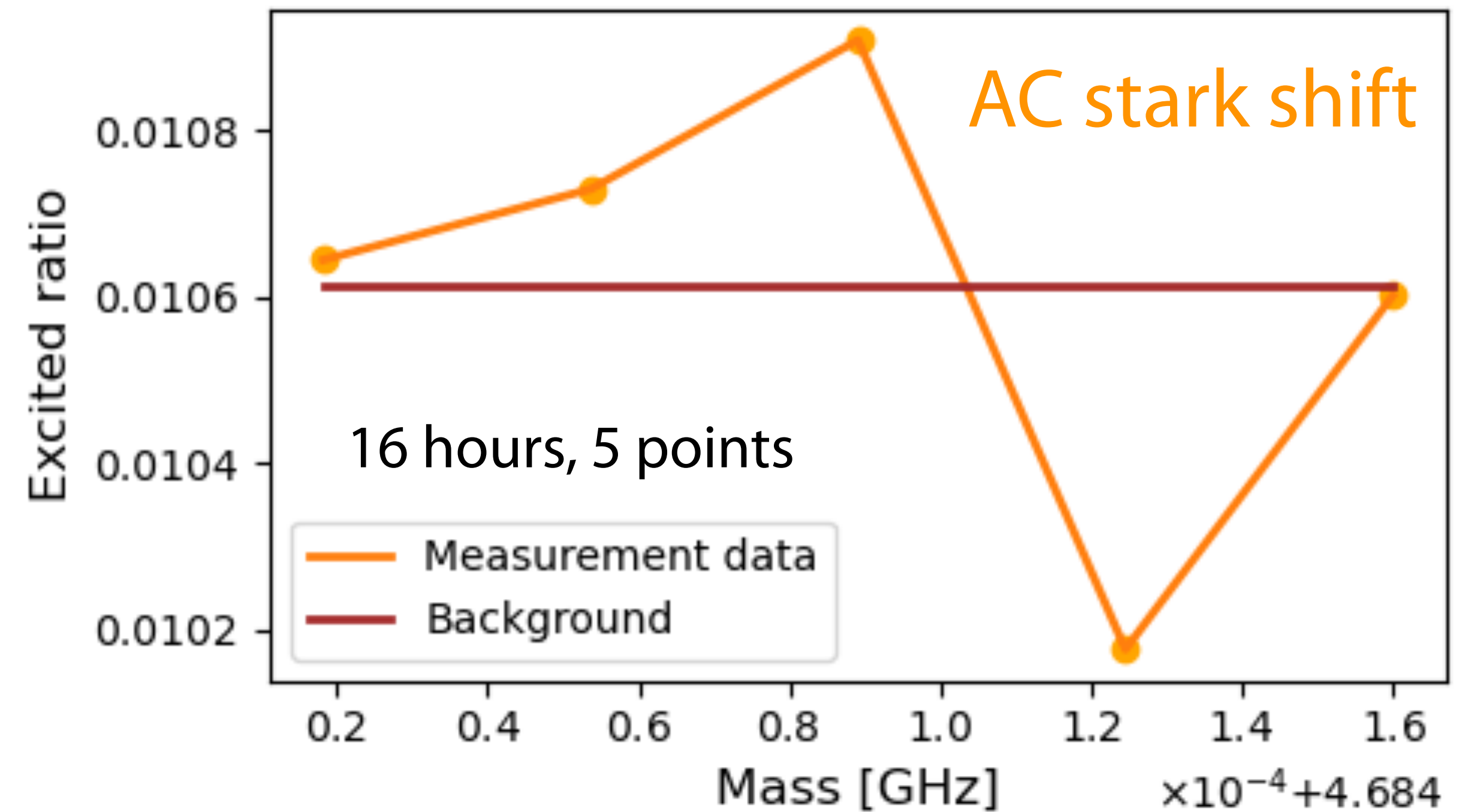
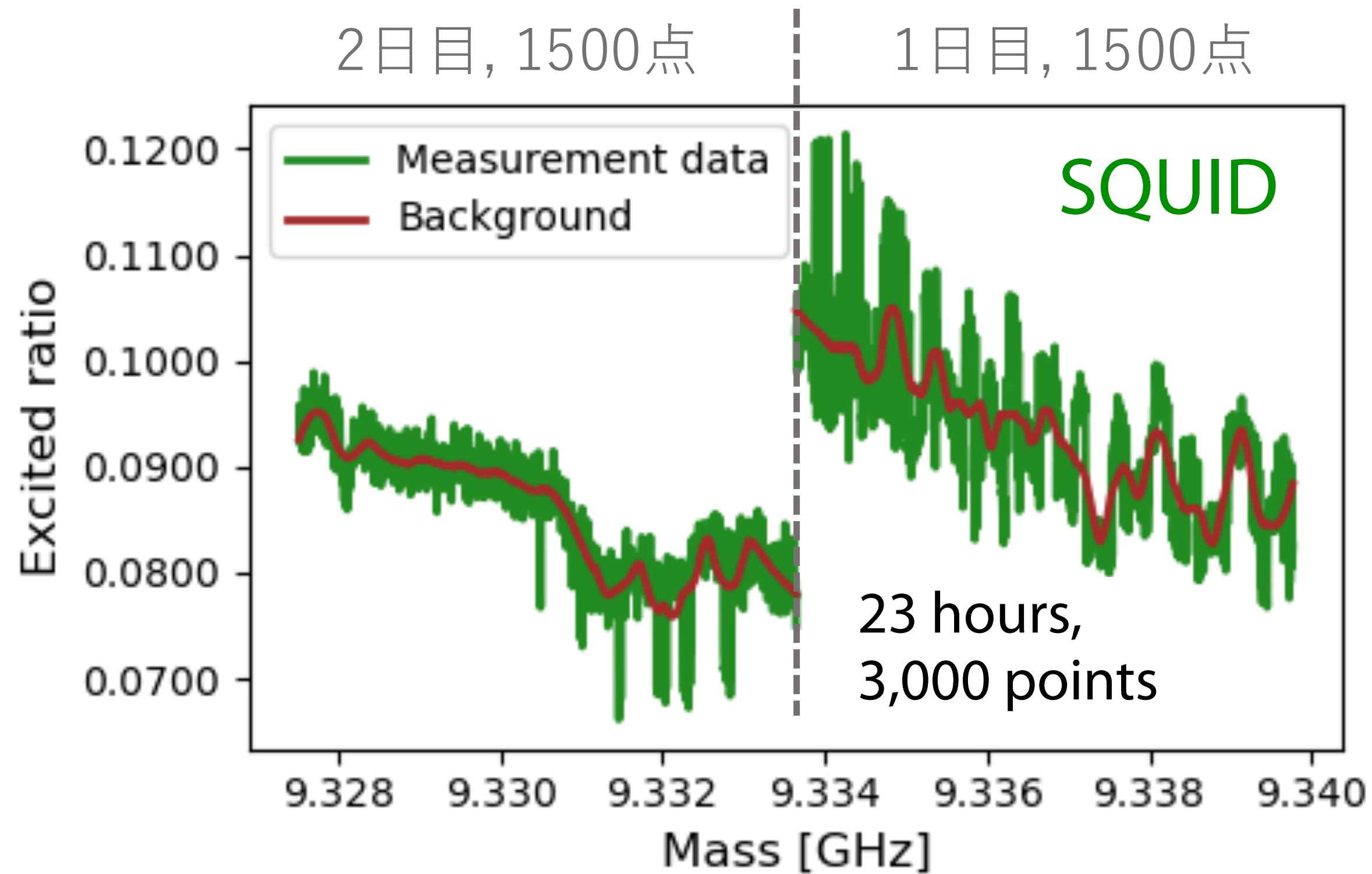
$\delta_q$  : qubit anharmonicity

$\Delta_{qs}$  : frequency difference between  $f_{01}$  and injected photons



# 超伝導量子ビットの直接励起による探索

## 2つの量子ビットを使った最初の実験



# キャビティ周波数の変調

超伝導量子ビットとキャビティの強い結合を利用した、  
新しいキャビティ周波数の変調方法を開発

Jaynes-Cummings  
Hamiltonian

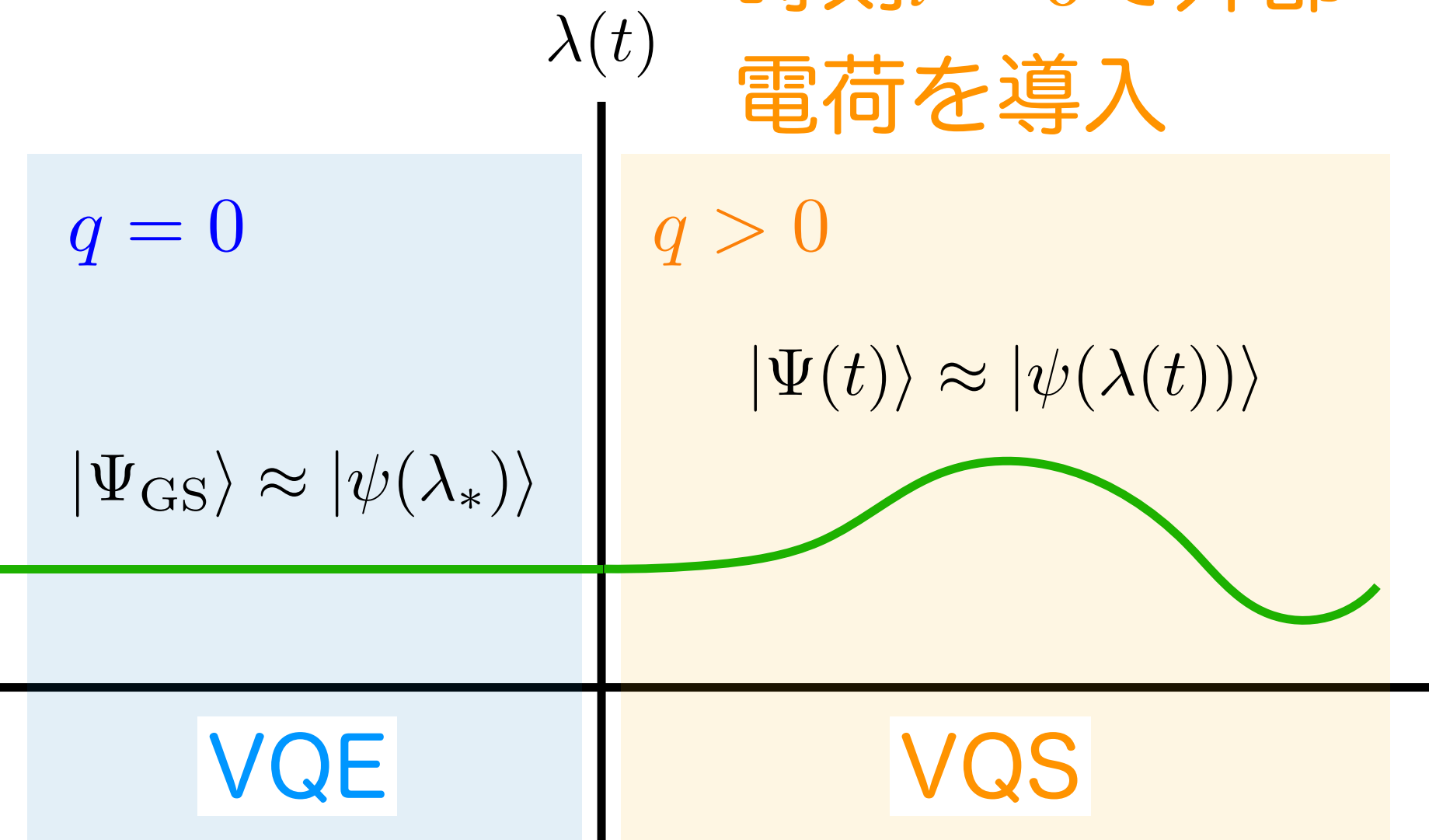
$$H = \frac{\hbar}{2} \left( \underbrace{\omega_q + \frac{g^2}{\Delta}}_{\text{量子ビット周波数}} \right) \sigma_z + \hbar \left[ \underbrace{\omega_c + \frac{g^2}{\Delta} \sigma_z}_{\text{キャビティ周波数}} \right] a^\dagger a \quad \Delta := |\omega_q - \omega_c|$$

➡ 相互作用項  $\frac{g^2}{\Delta}$  を使ってキャビティ周波数を変調

(1 + 1)d U(1)格子ゲージ理論 (シュウィンガーモデル) でのクエンチダイナミクス

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

時刻  $t = 0$  で外部  
電荷を導入



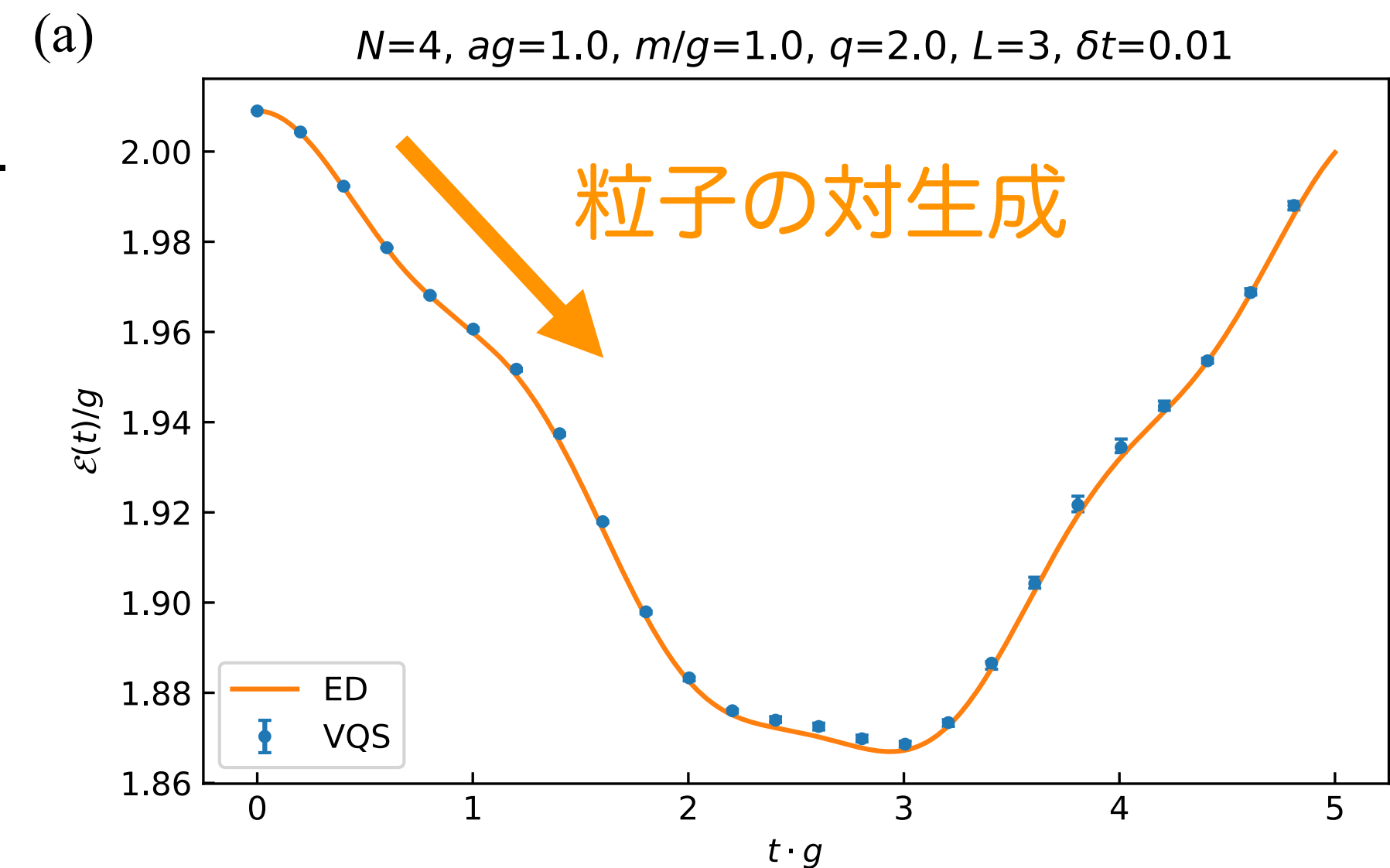
パラメータの時間発展によって状態の時間発展を行う

$$M_{ij} = \text{Re} \frac{\partial \langle \psi(\theta) |}{\partial \theta_i} \frac{\partial | \psi(\theta) \rangle}{\partial \theta_j}$$

$$V_i = \text{Im} \frac{\partial \langle \psi(\theta) |}{\partial \theta_i} H | \psi(\theta) \rangle$$

古典計算で解く

$$\sum_j M_{ij} \dot{\theta}_j = V_i$$



強い外部電場による粒子の生成

→ シュウィンガー効果

# 量子コンピュータの進展

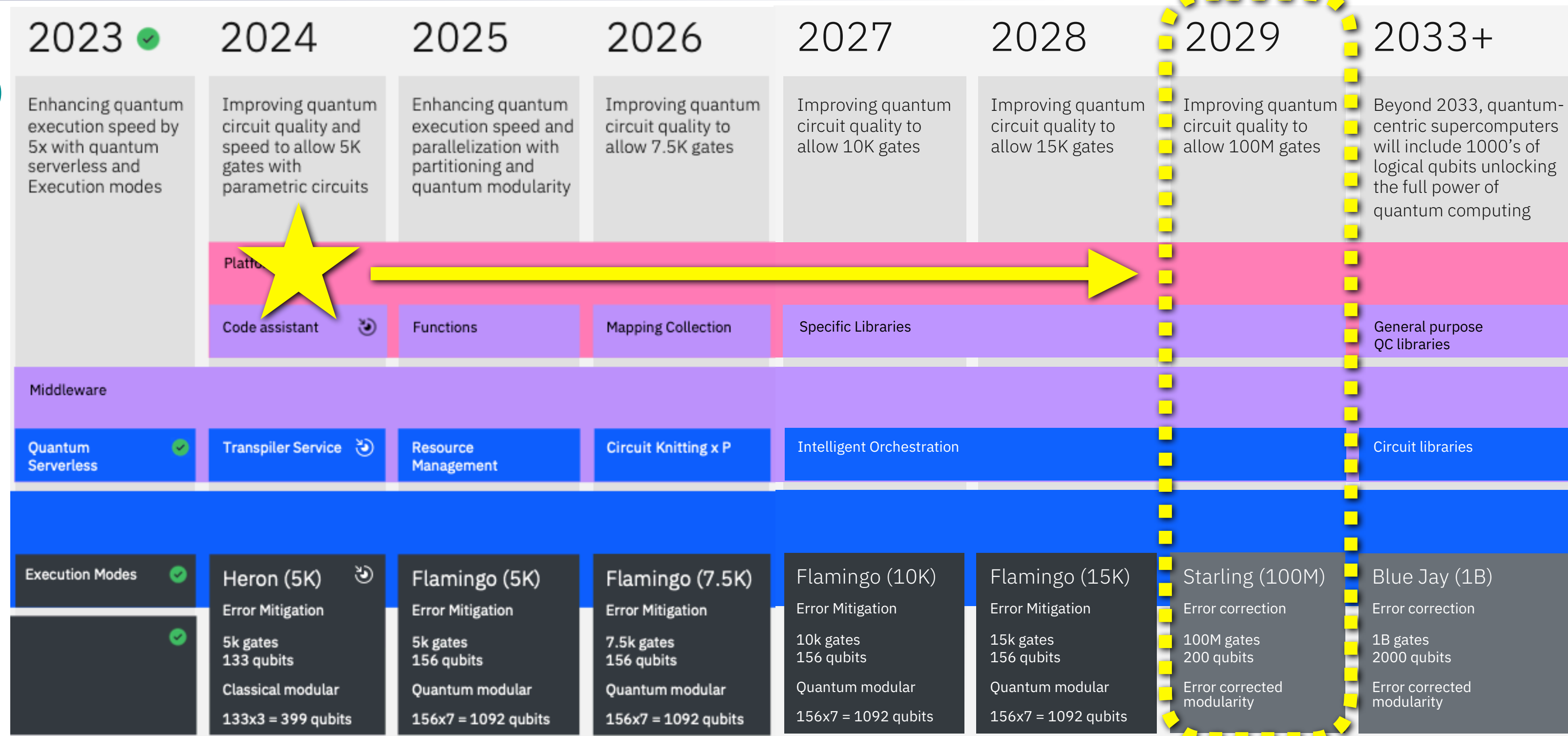
# IBMのロードマップ

今後5年で10万量子ビットの世界が視界に入ってくる

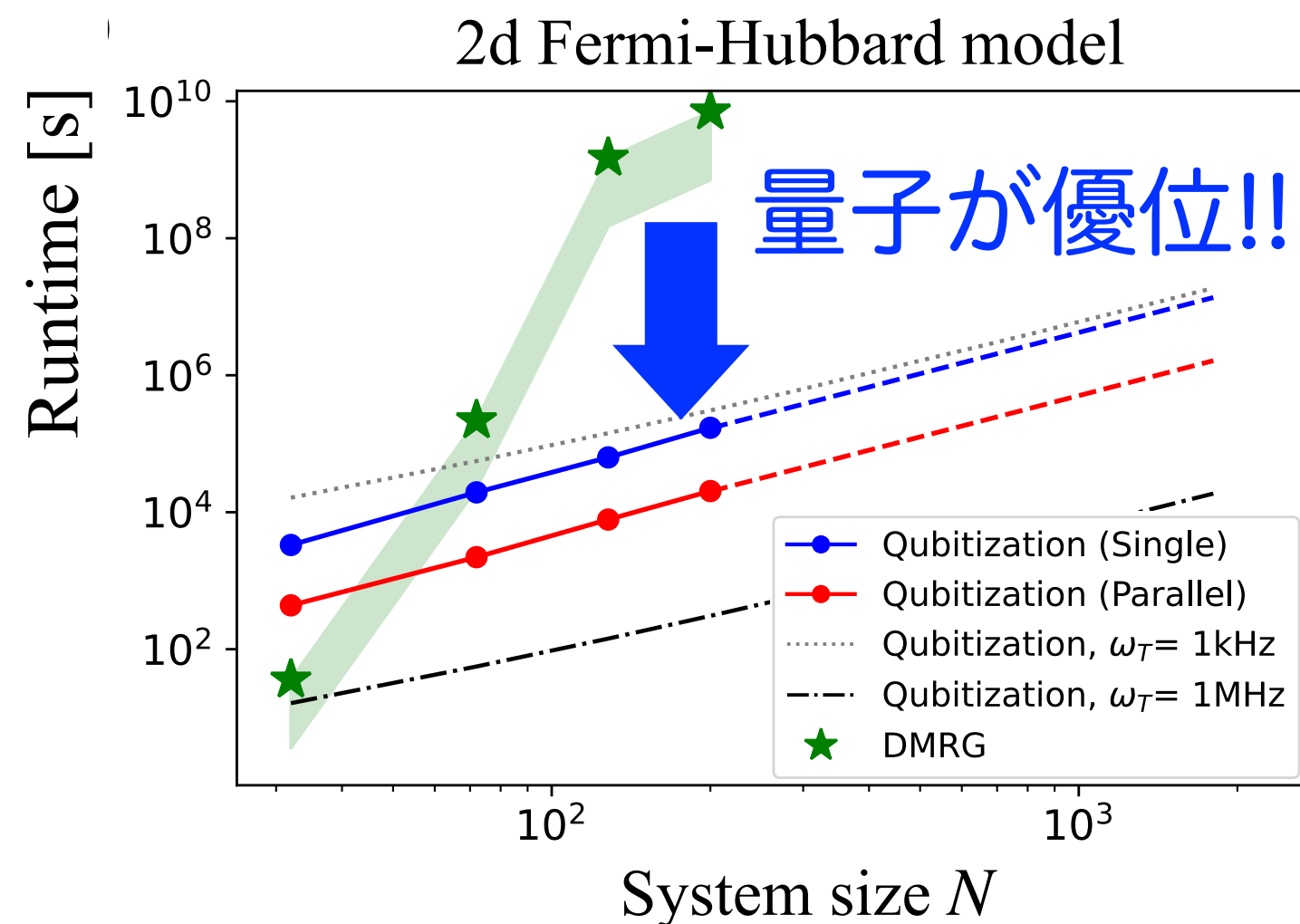
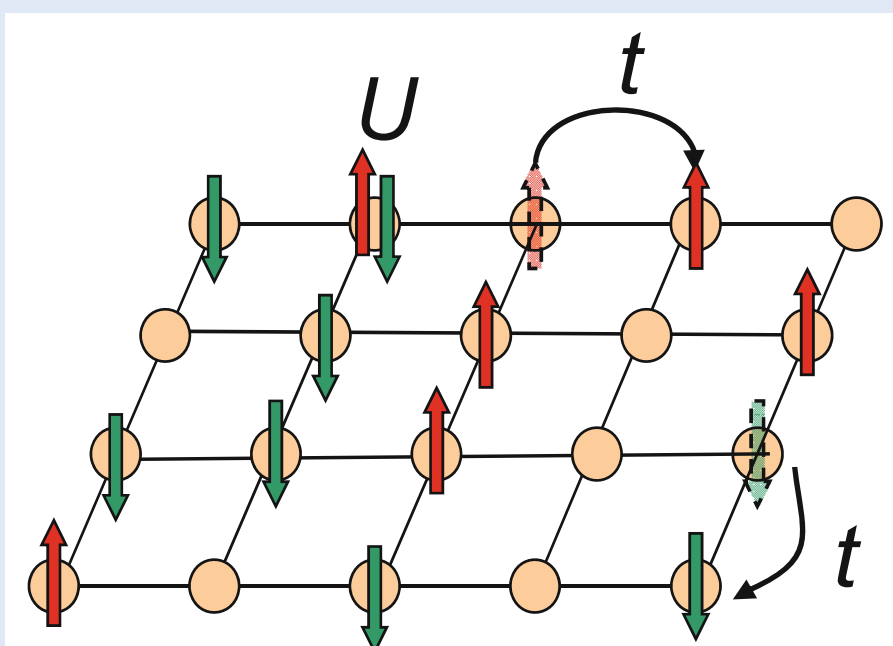
エラー訂正可能な200論理量子ビット (~2029年)

➡フルに使えれば、確実に古典を超える!!

10万量子ビットあれば...

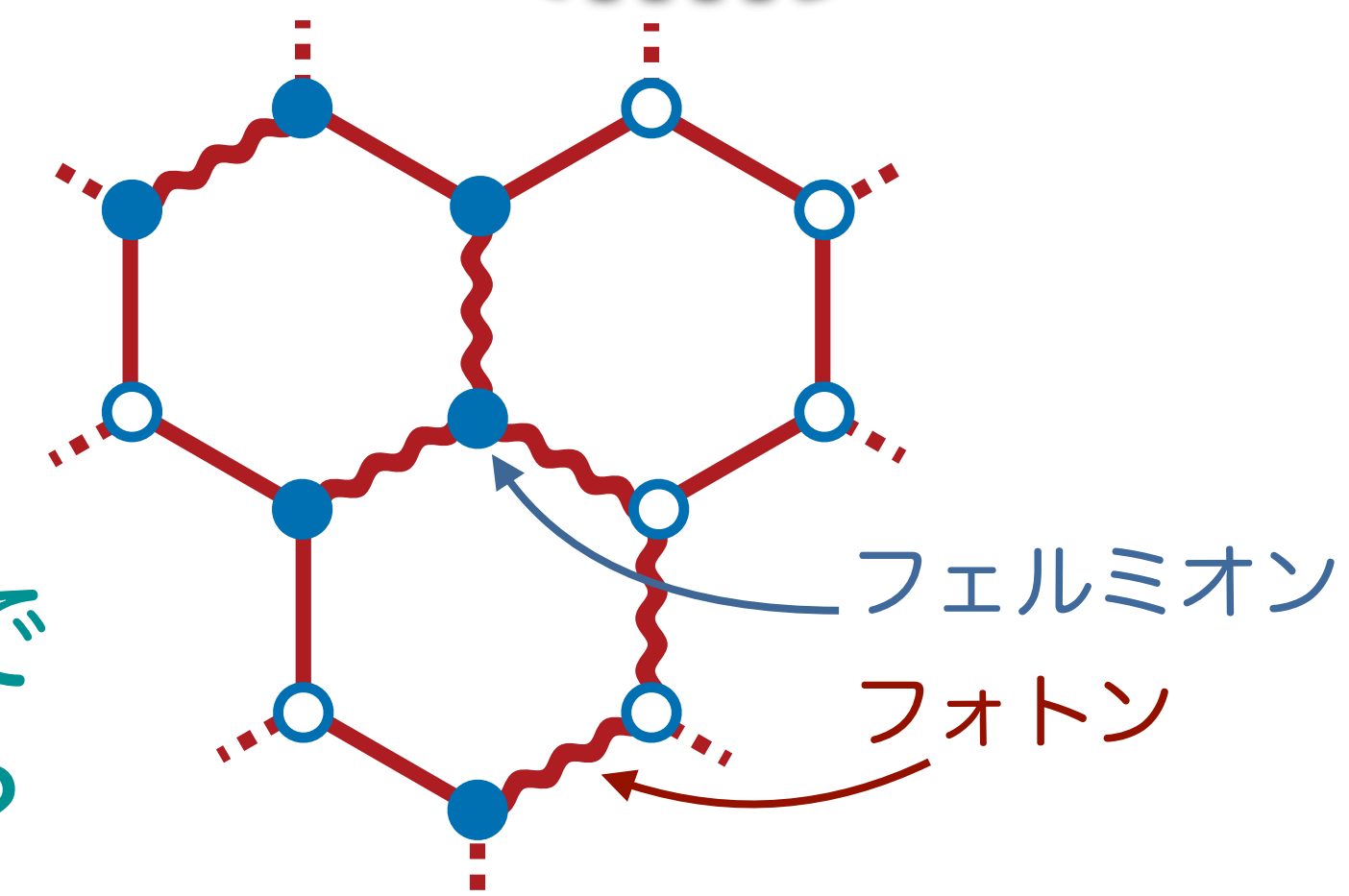


## 2次元スピン模型



1 month  
1 day  
1 hour

素粒子物理で  
できないか?



2次元格子ゲージ理論 37

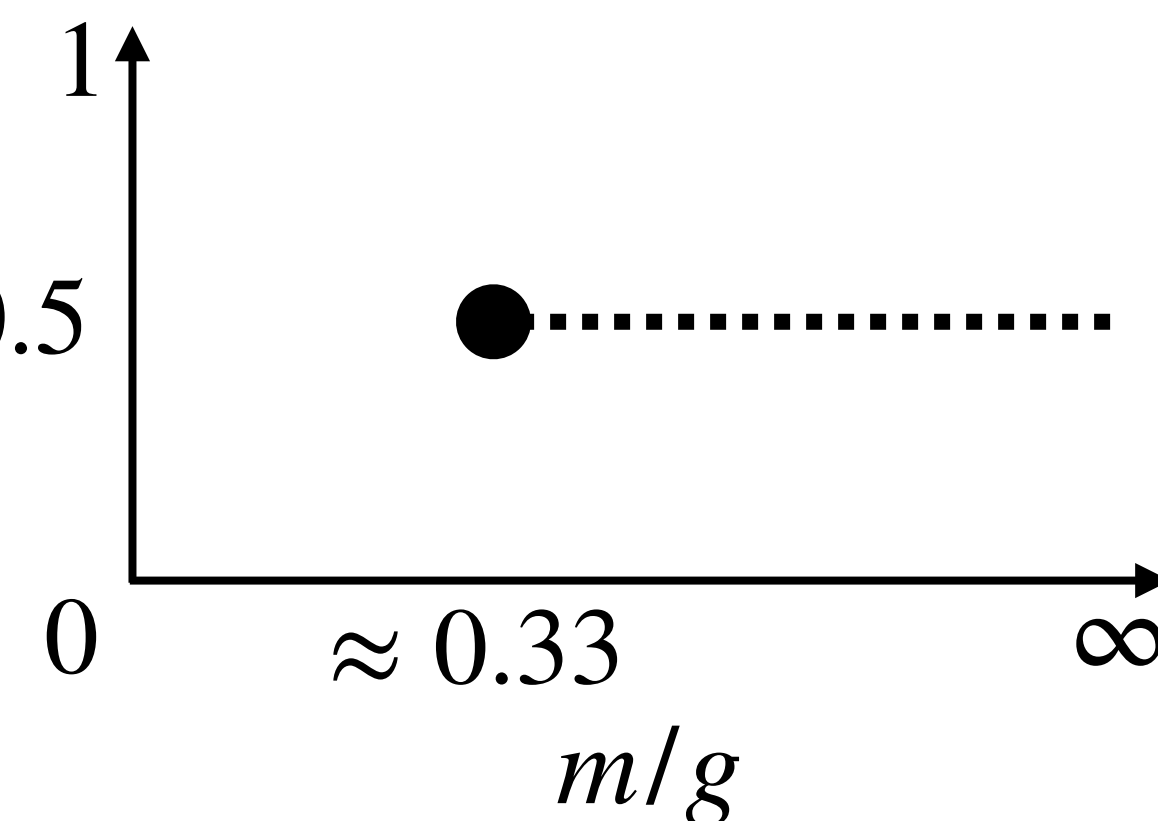
# 量子データの学習 I

## 1+1次元 $U(1)$ ゲージ理論 (シュウィンガーモデル)

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

- ▶ シンプルなモデルだが、遮蔽や閉じ込めなど非自明な効果を持つ
- ▶ **トポロジカル項**によって、 $\theta = \pi, m/g = m_c/g \approx 0.33$ で相転移を示す

$m$ - $\theta$ 平面での相転移

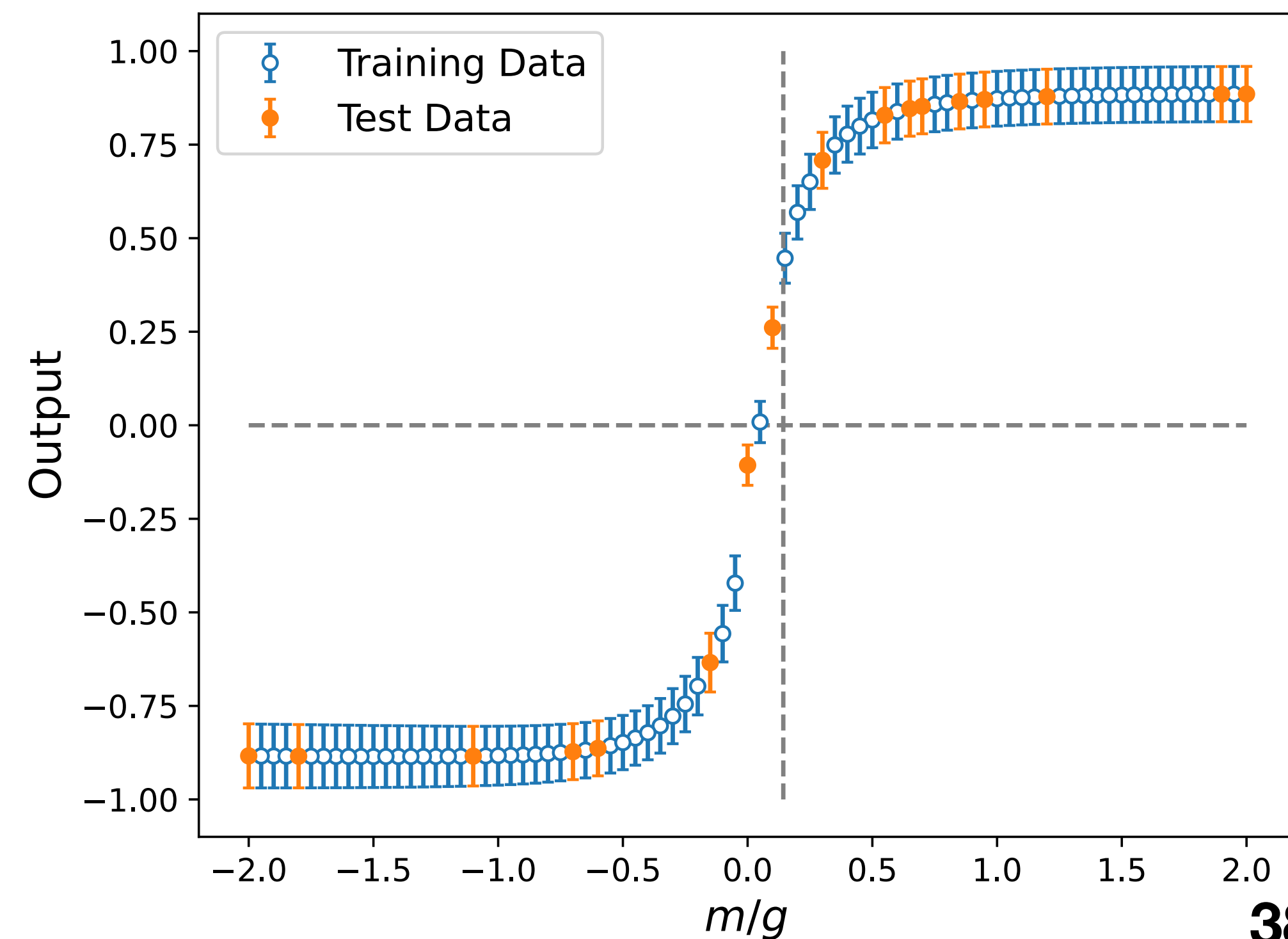
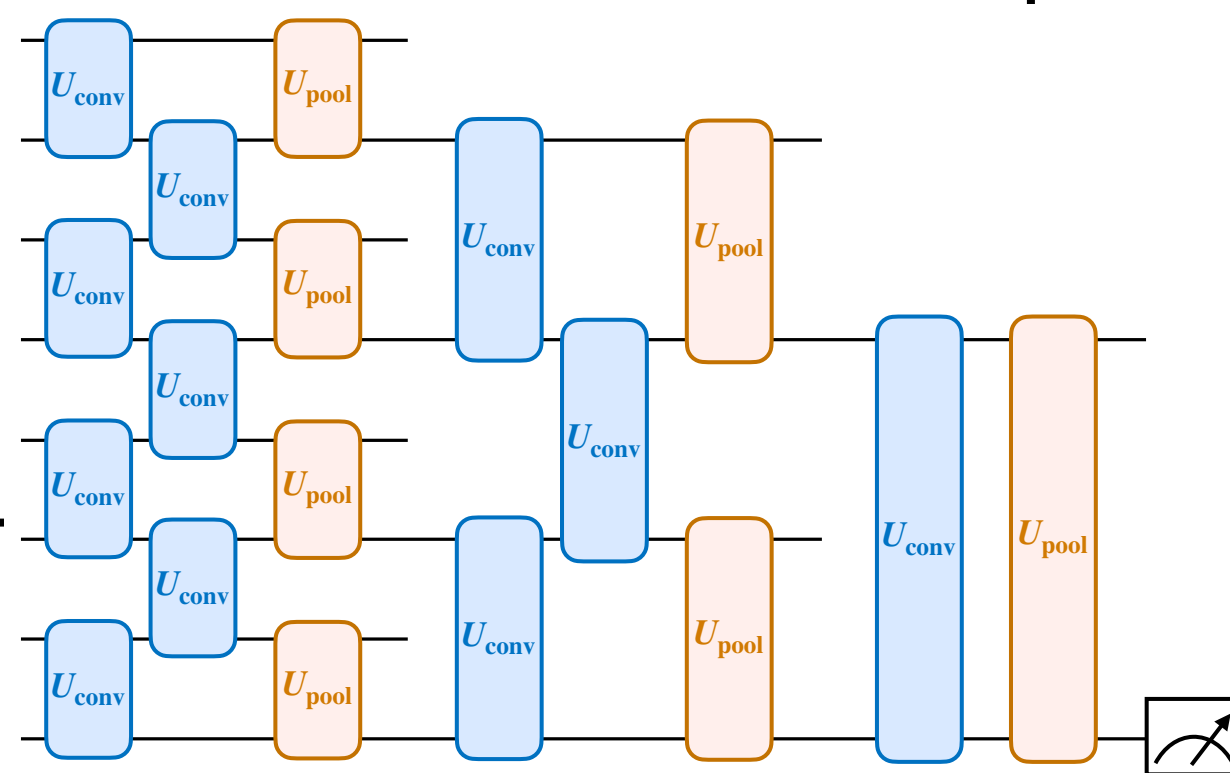


### 量子データの生成と分類

- ▶ 物理パラメータ： $N = N_s = 8, ag = 2, \theta = \pi$ に設定
- ▶ VQEを使い、基底状態 $|\psi_{GS}(m)\rangle$ を $m/g \in [-2, 2]$ で生成
- ▶ QCNN出力で相分類を行う

ラベル：

$$y_m = \begin{cases} +1 & (m > m_c) \\ -1 & (m < m_c) \end{cases}$$

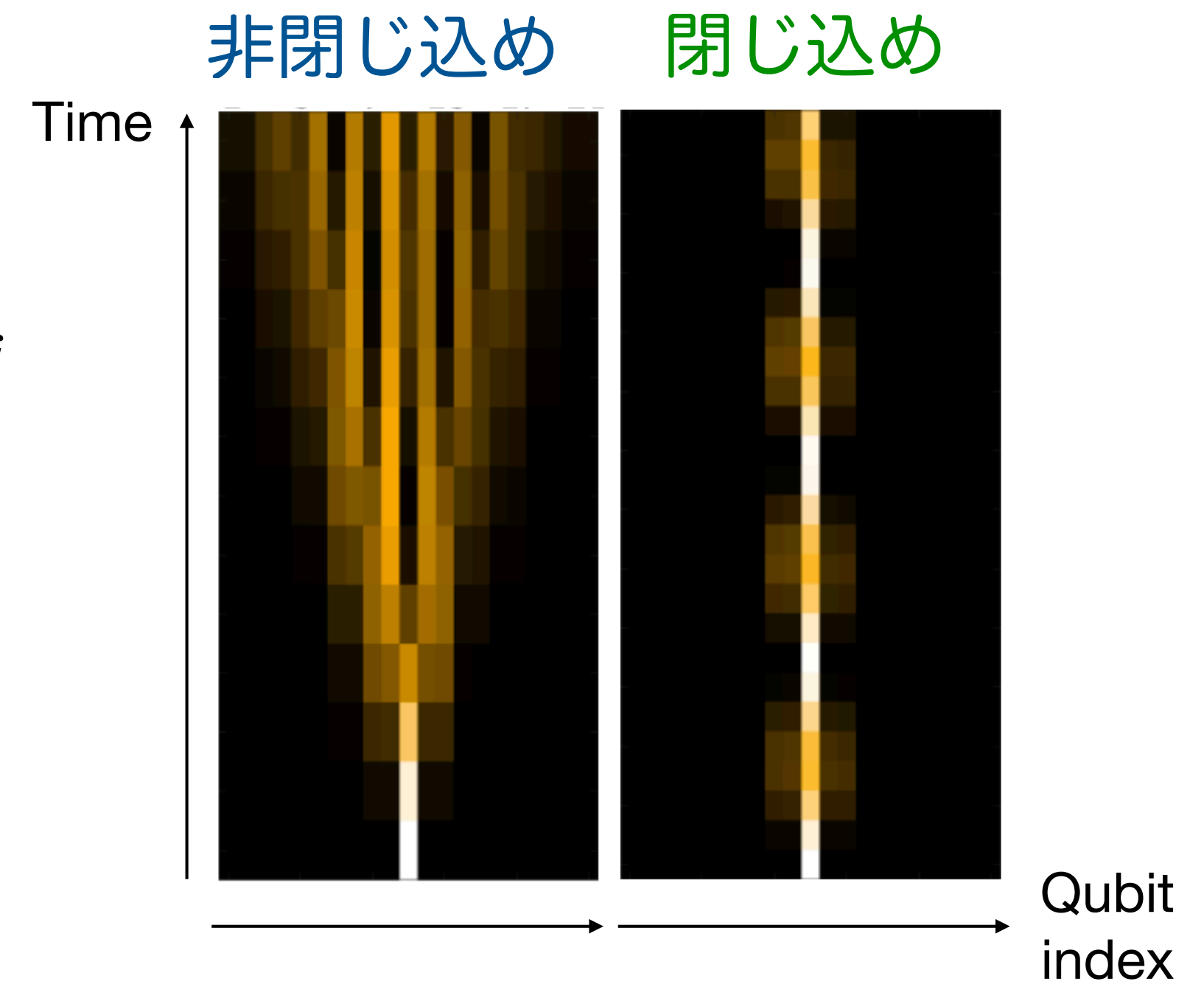


# 量子データの学習 II

## 1+1次元 $\mathbb{Z}_2$ ゲージ理論

$$H = -\frac{J}{2} \sum_{j=0}^{N_s-1} (X_j Z_{j,j+1} X_{j+1} + Y_j Z_{j,j+1} Y_{j+1}) - f \sum_{j=0}^{N_s-2} X_{j,j+1} + \frac{m}{2} \sum_{j=0}^{N_s-1} (-1)^j Z_j$$

- ▶ **バックグラウンド  $\mathbb{Z}_2$  ゲージ場** (第2項) が存在するかどうかで振る舞いが変わる
- ▶ 閉じ込め相 ( $f \neq 0$ ) と非閉じ込め相 ( $f = 0$ )

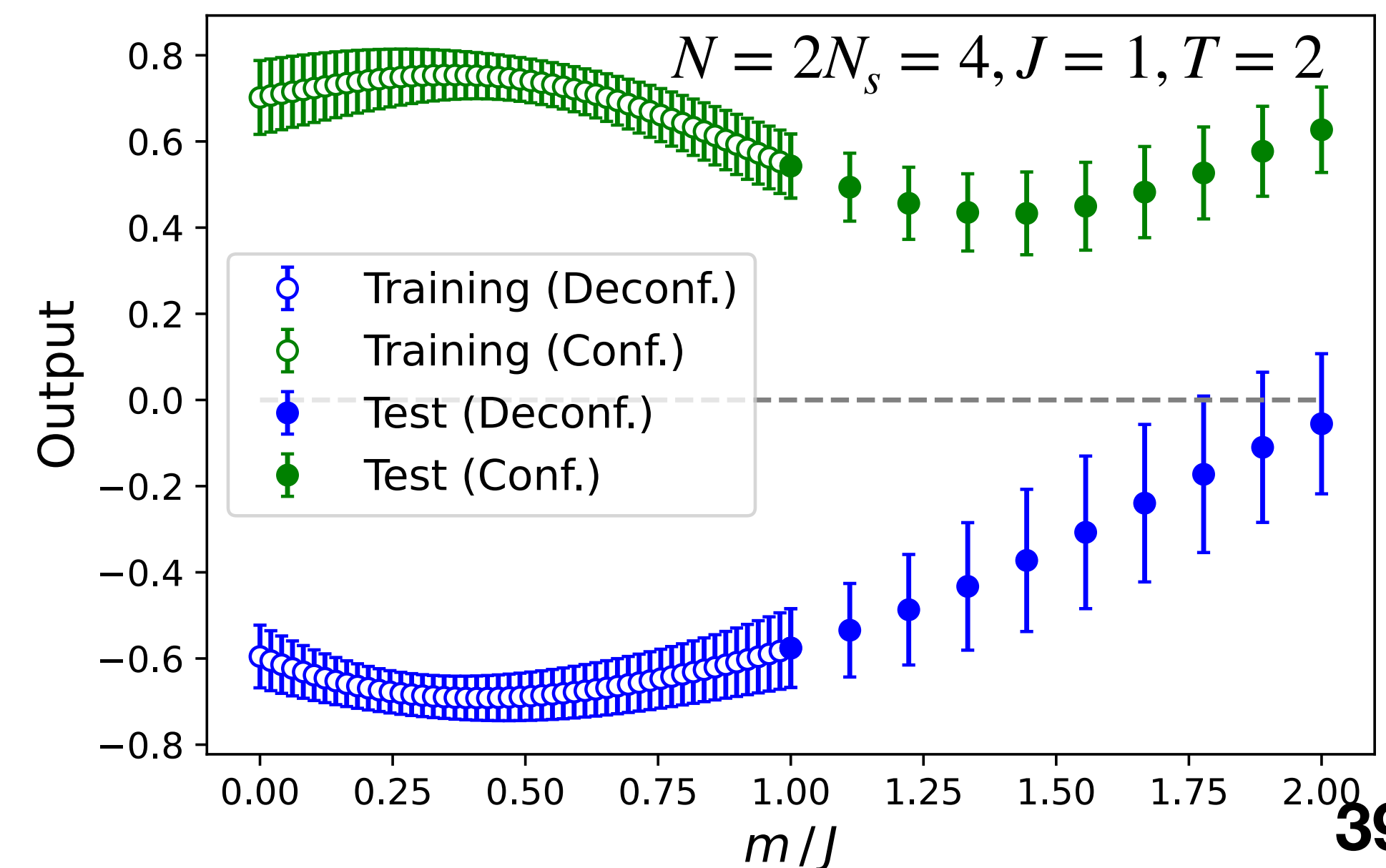
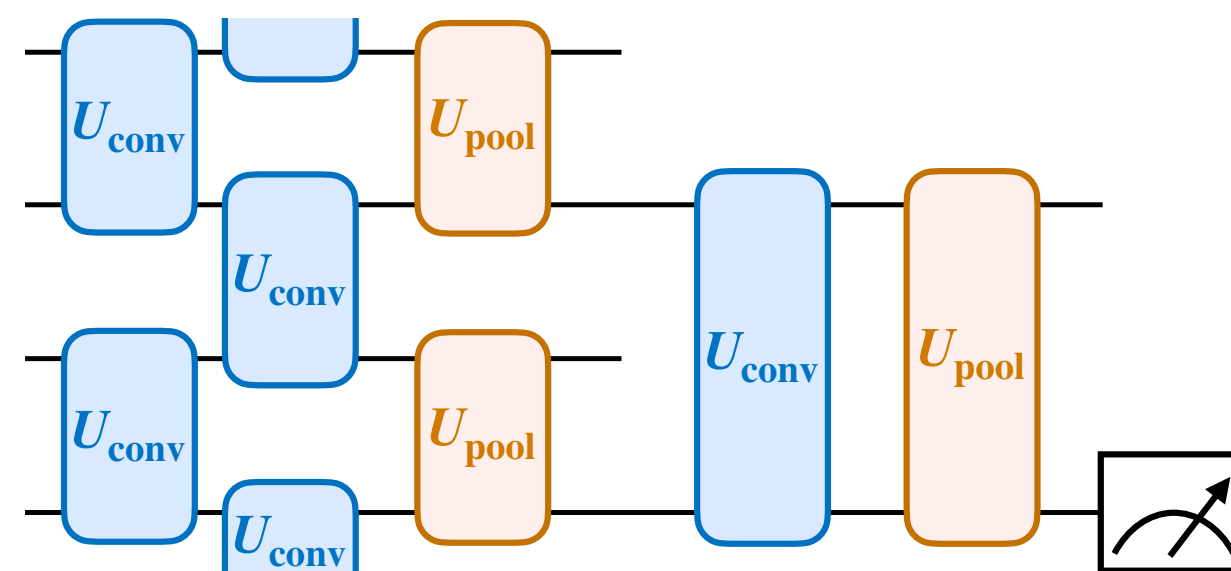


### 量子データの生成と分類

- ▶ 物理パラメータ:  $N = 2N_s = 4, J = 1, T = 2$  に設定
- ▶ 鈴木-トロッター分解で、時間発展状態  $|\psi(m, f)\rangle = e^{-iH(m, f)T} |\psi_0\rangle$  を  $m \in [0, 2], f \in \{0, 3\}$  で生成
- ▶ QCNN出力で相分類を行う

ラベル:

$$y_m = \begin{cases} +1 & (f \neq 0) \\ -1 & (f = 0) \end{cases}$$

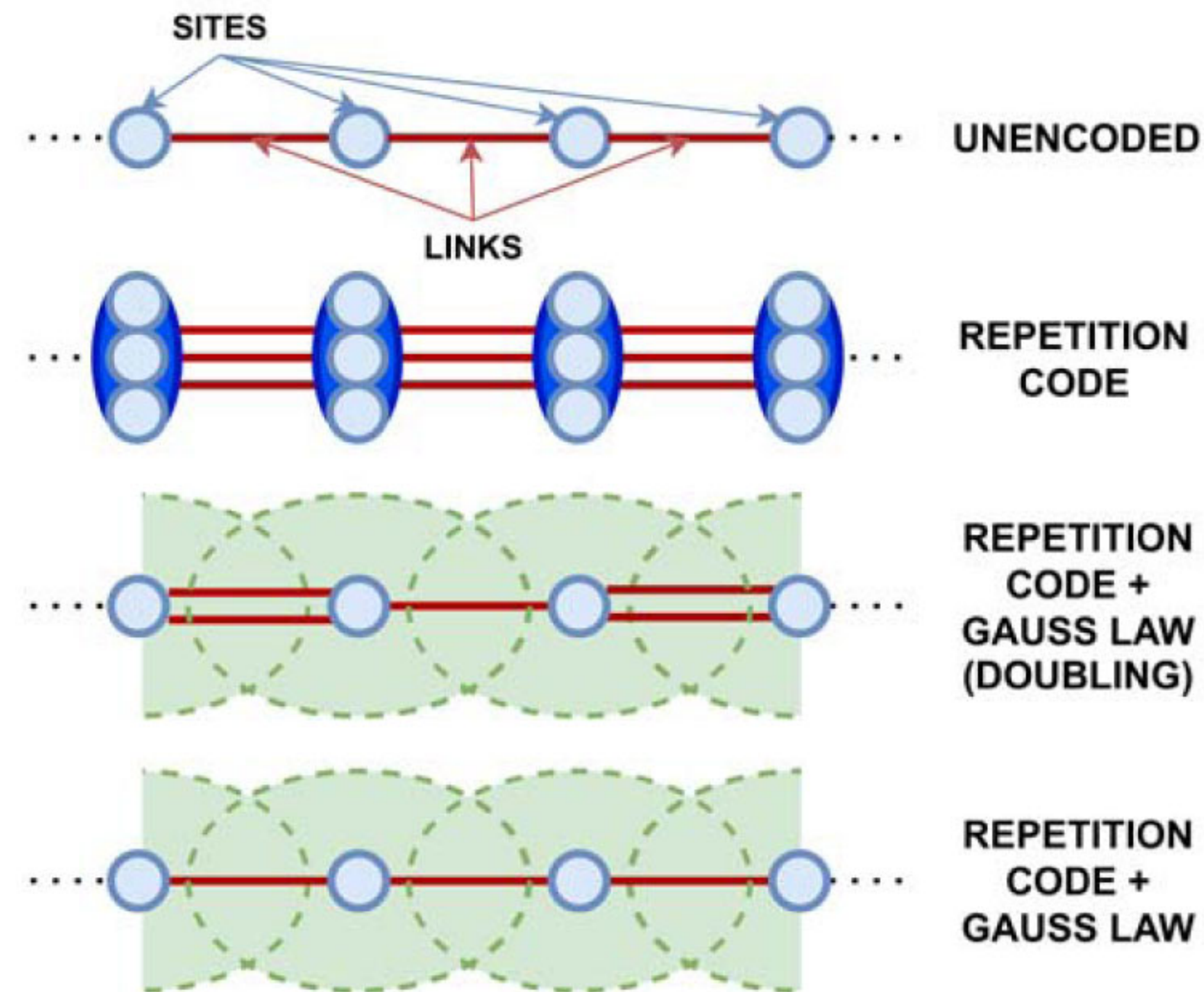


# 誤り耐性のある量子コンピュータの研究

物理系の対称性を活用することで、問題に適したエラー訂正が可能になる

対称性の要請によるエラー訂正手法を検討中

- ▶ 局所ゲージ対称性のガウス則演算子 $G$ はハミルトニアン $H$ と可換
- ▶  $G$ と $H$ を同時測定し、 $G$ の固有値 $s$ からエラーを判定
- ▶ 初期状態の期待値 $s_{\text{exp}}$ に戻すように状態を補正し、エラーを訂正



Early FTQCでのエラー訂正手法の研究

- ▶ 既存のエラー訂正符号と部分空間展開法を使う手法を検討中
- ▶ シンドローム測定を行わないことで、初期のエラー訂正に適している可能性

[M. Carena et al., 2024](#),  
[A. Rajput et al., 2021](#)

[J. R. McClean et al., 2021](#)

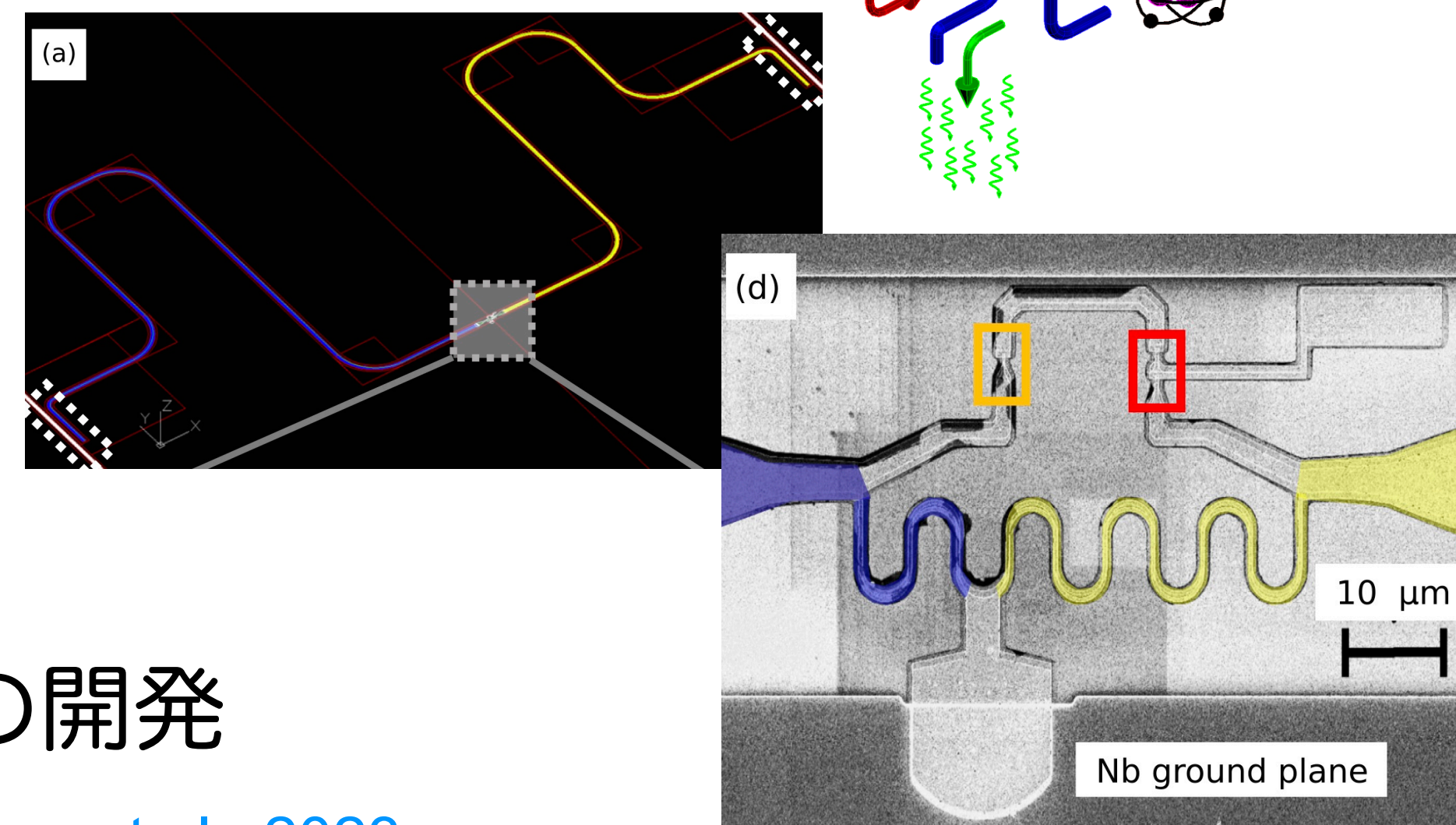
# 誤り耐性のある量子コンピュータの研究

誤り耐性を持つ論理量子ビットには、多数の物理量子ビット、エラー検知・訂正のための信号処理が必要

マイクロ波回路素子と希釈冷凍機内の配線が、超伝導量子ビット数のスケールアップの大きなボトルネック

通常の強磁性体ベースの素子 $\sim \mathcal{O}(\text{cm}^3)$ では、 $\mathcal{O}(10^3)$ 量子ビットが限界

[R. Upadhyay et al., 2023](#)

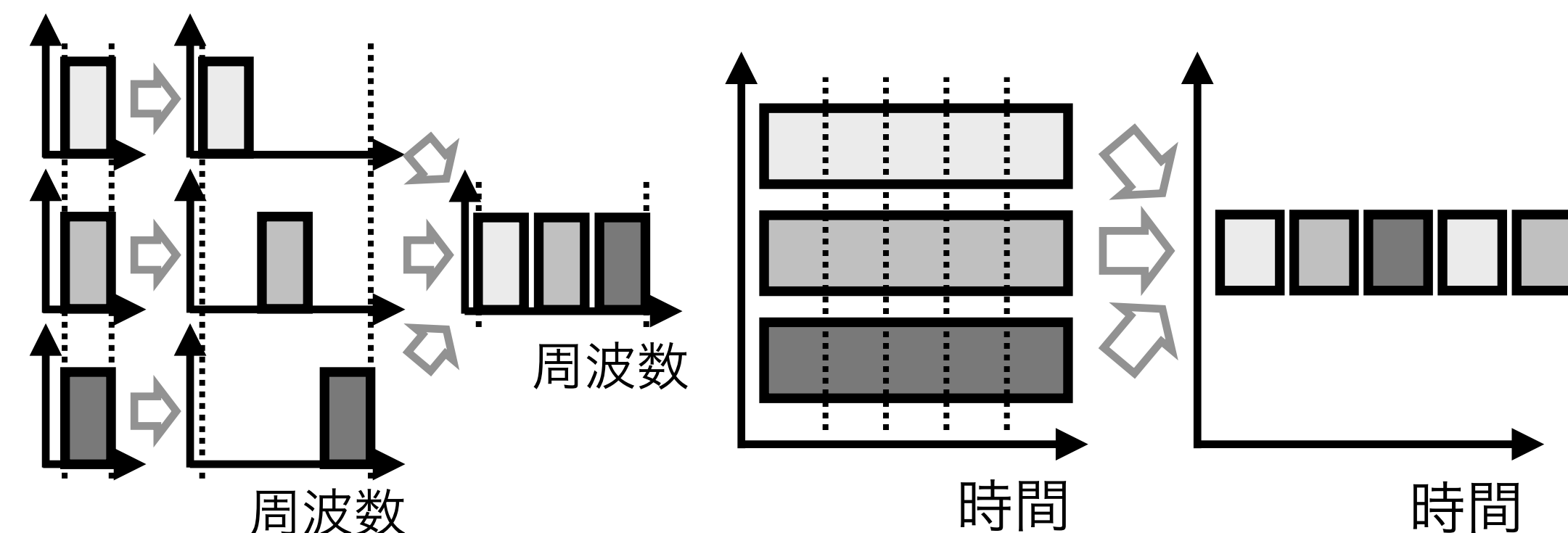


## 超伝導ジョセフソン接合ベースのオンチップ回路素子の開発

- ▶ 現在の最高性能：相反度 3dB・挿入損失 10dB [R. Navarathna et al., 2023](#)
- ▶ 強磁性体ベースの典型的な相反度 40dB・挿入損失 2dB

## 時間領域での信号多重化技術の開発

- ▶ 量子ビットと導波管の結合強度の向上
- ▶ 状態測定のための信号処理に注力



超伝導量子ビットによるセンサーの感度向上、大型化にとっても重要

# アニーリングによる飛跡再構成

## 量子アニーリング

M. Saito et al., CHEP 2019

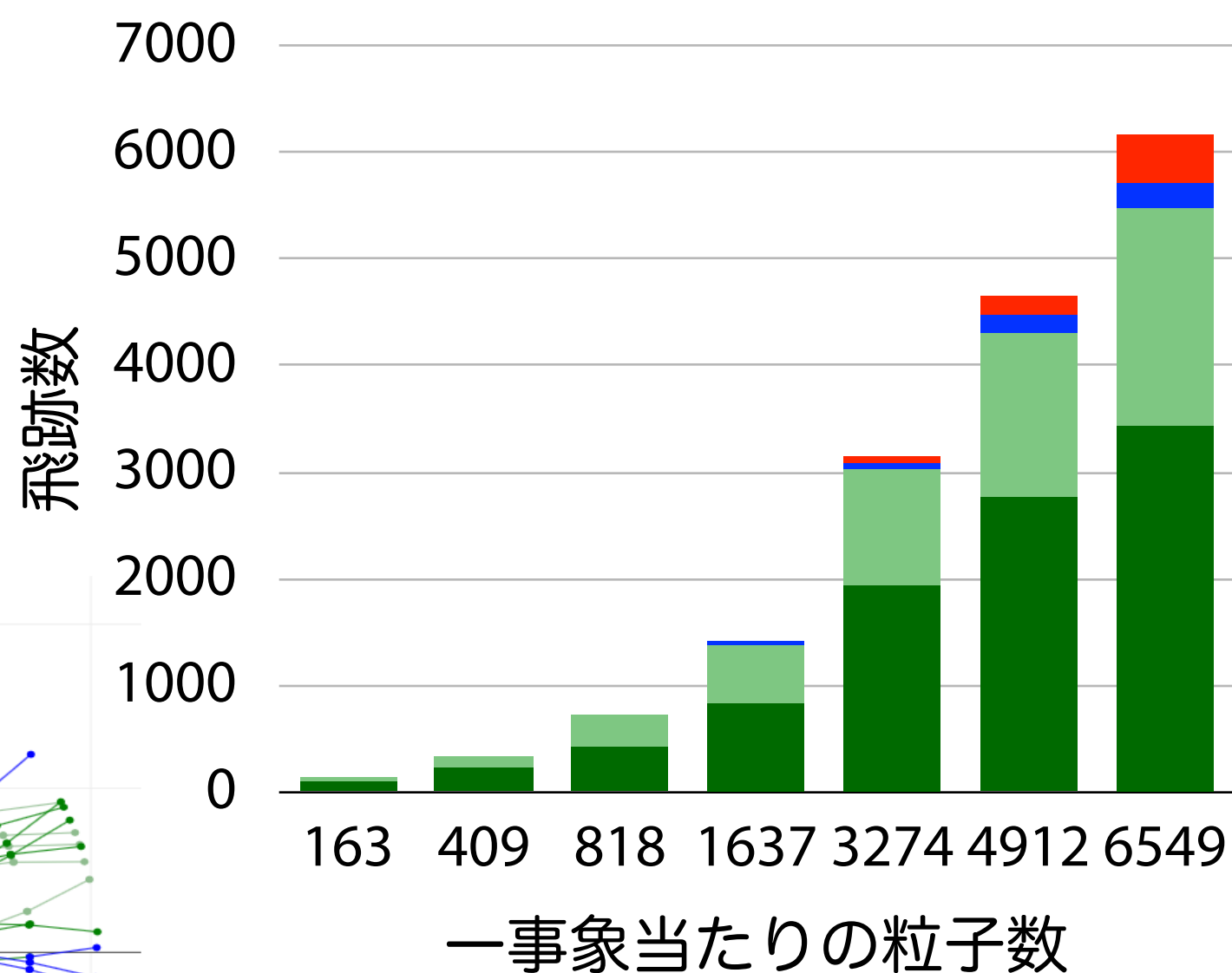
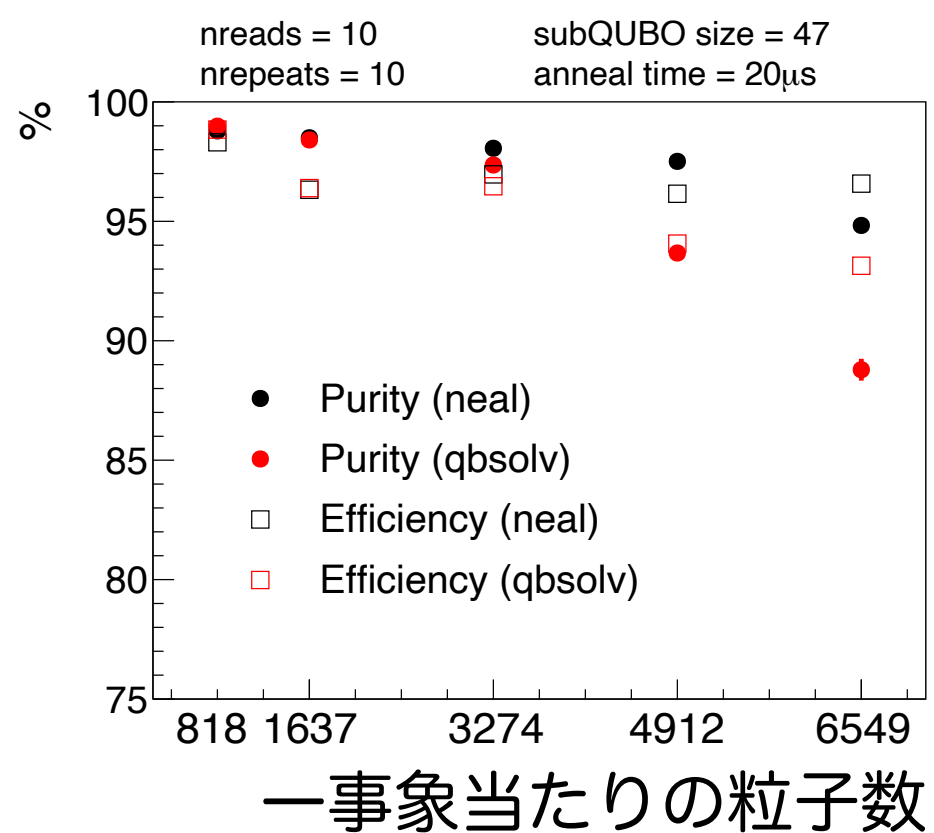


### D-Wave量子アニーラ

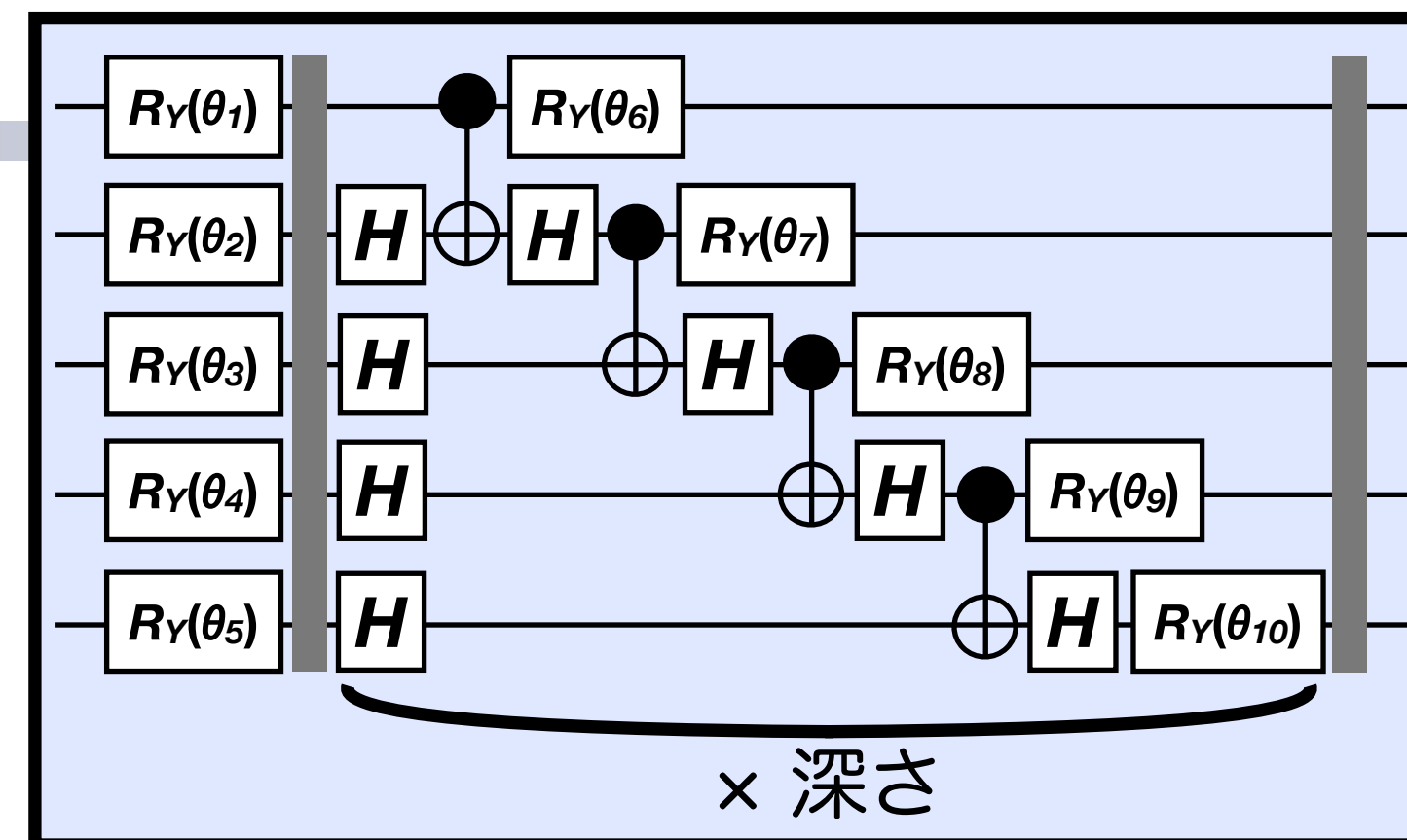
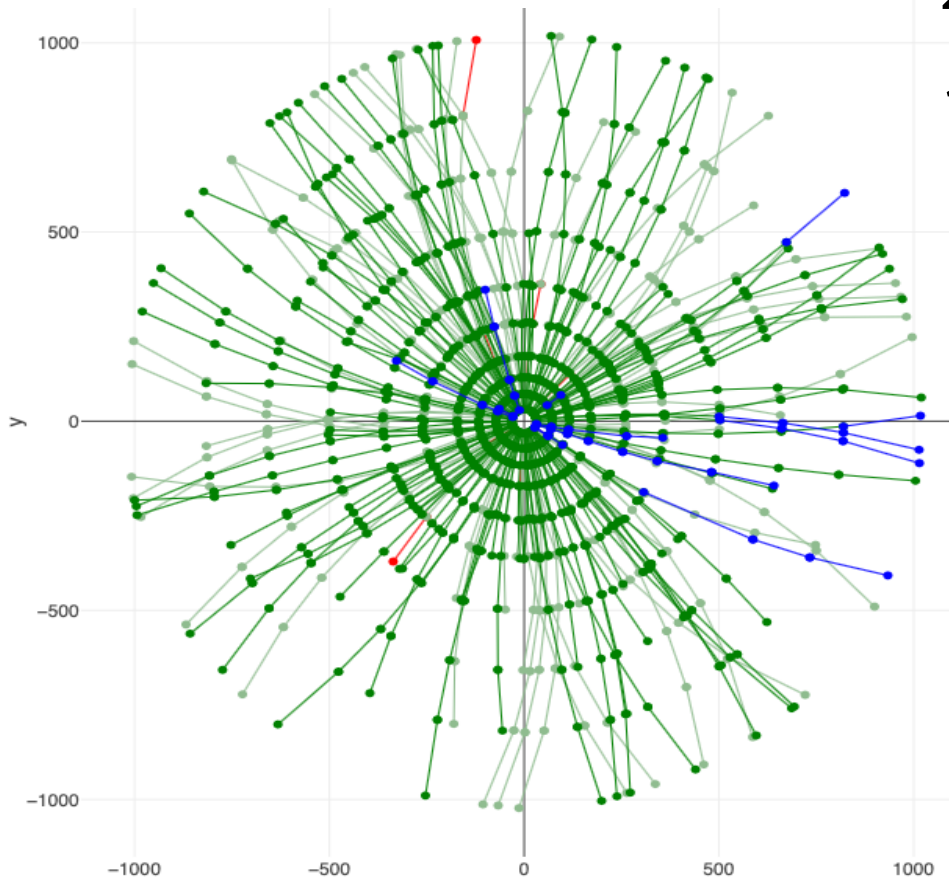
- ▶ 2048超伝導量子ビット
- ▶ アニーリング時間  $\sim 20\mu s$

LBNLとの  
共同研究

- 再構成できた(高い運動量を持つ粒子の)飛跡
- 再構成できた(低い運動量を持つ粒子の)飛跡
- 再構成できなかった飛跡
- 粒子に対応しない飛跡



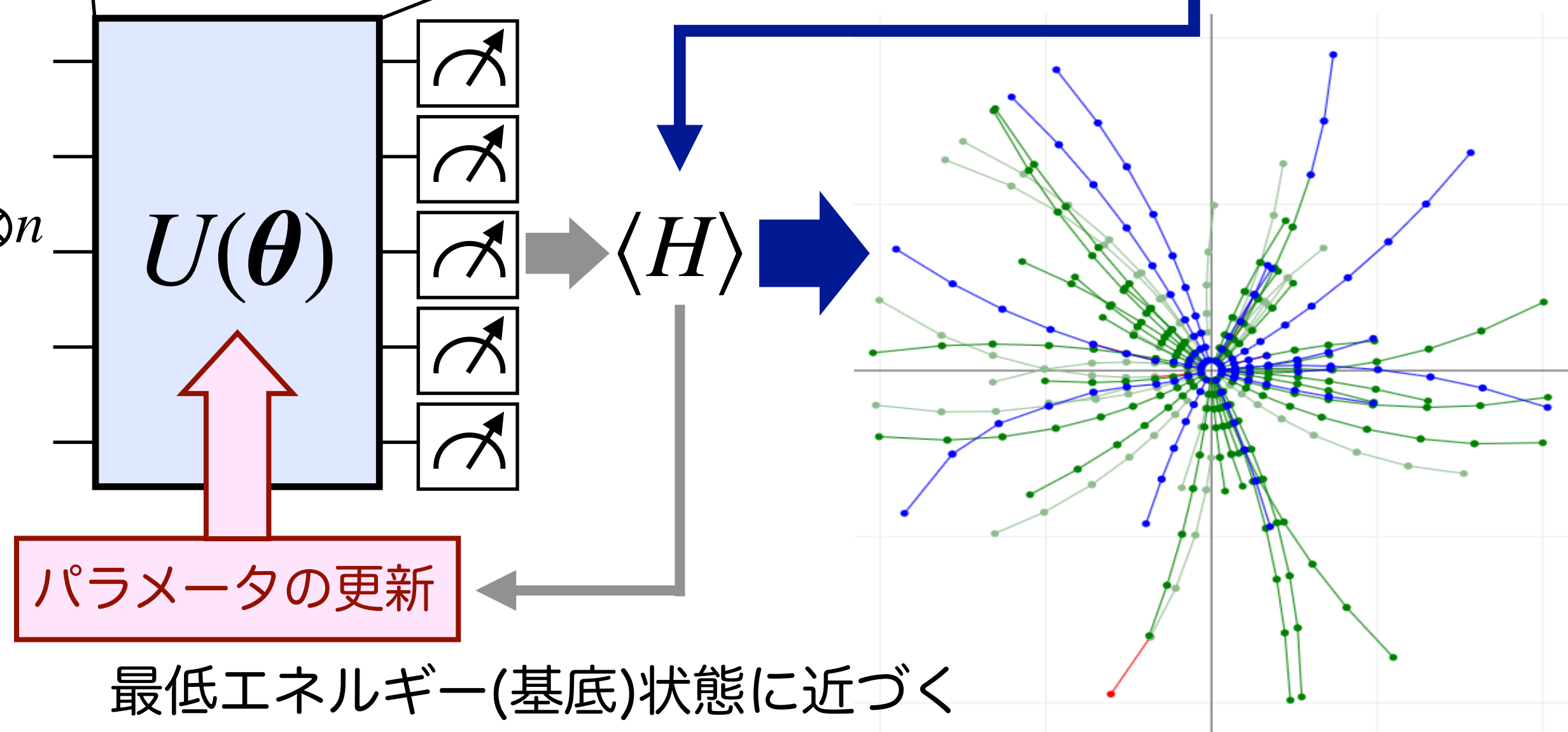
>95%以上の効率で  
粒子の再構成が可能



量子ゲート

イジングモデルに  
マッピング

$$H = \sum_i h_i s_i + \sum_i \sum_{j>i} J_{ij} s_i s_j$$



➡ 将来的に、実験に応用できる可能性を持つ