

ICEPP 学部向け特別セミナー2024  
2024年6月10日

# 量子研究の最前線

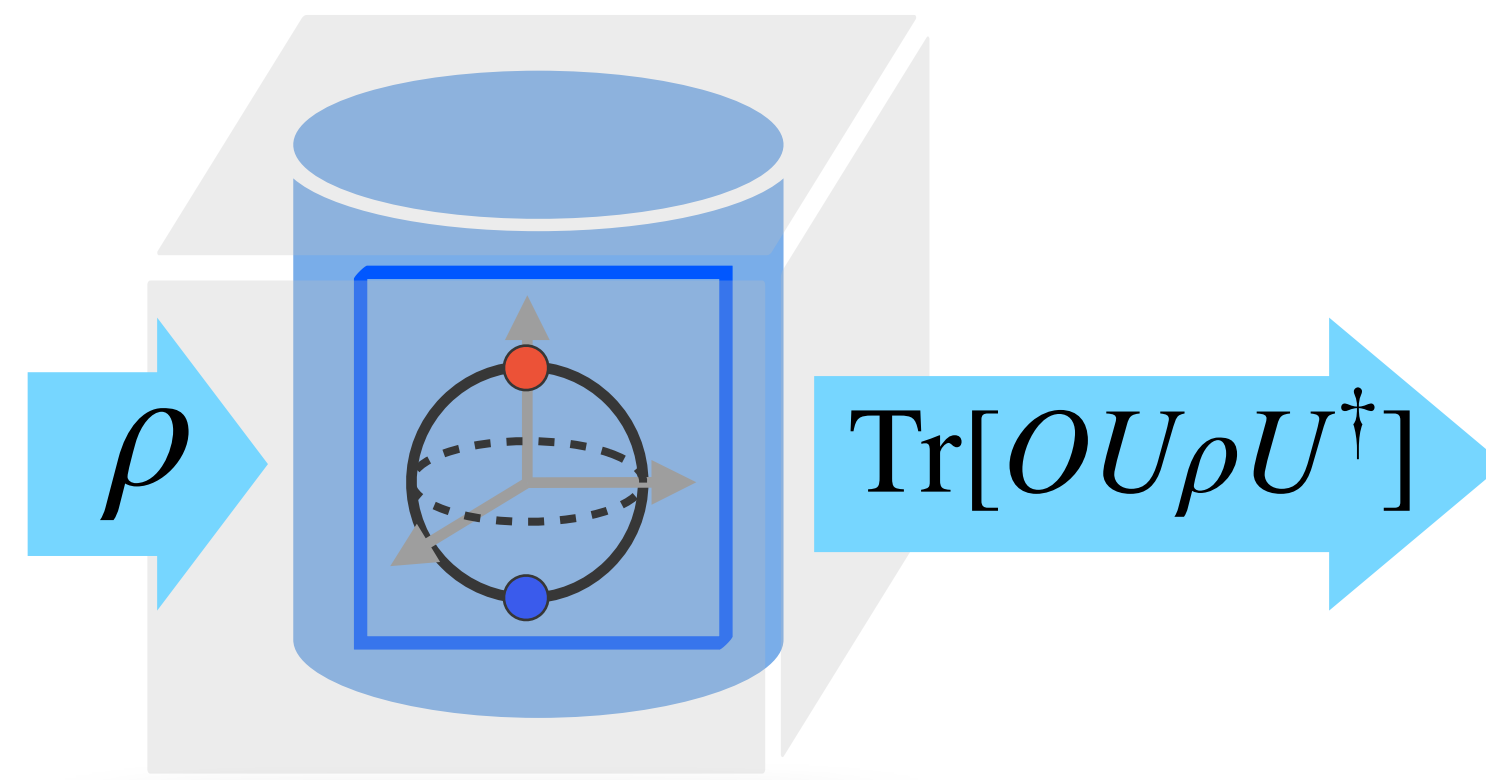
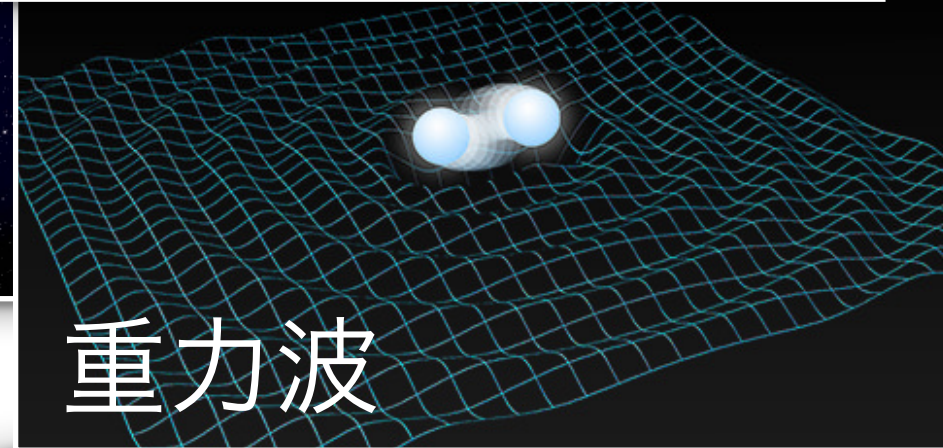
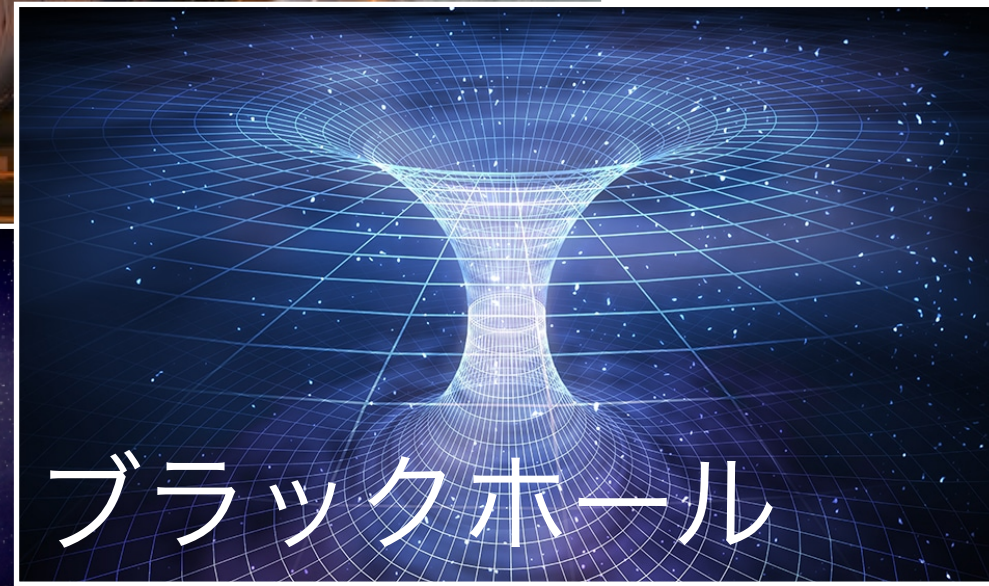
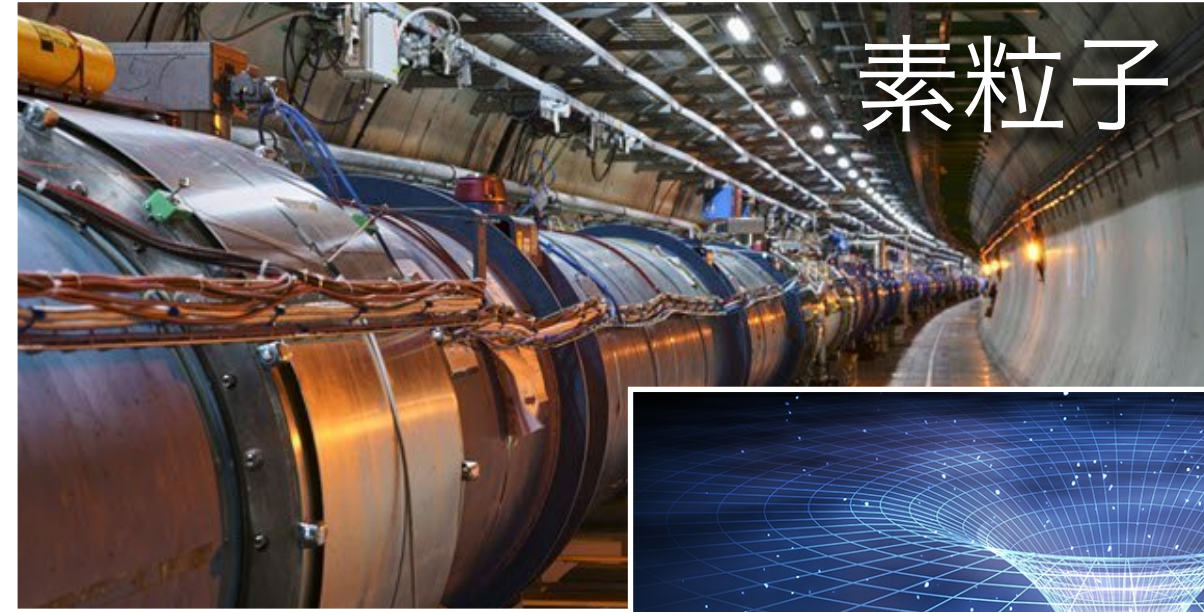
---

素粒子物理国際研究センター  
寺師 弘二

# なぜ量子コンピュータ・量子センサーを考えるのか？

素粒子物理や宇宙物理は、量子技術と親和性の高い研究テーマが多い

量子は強力なツールになる!!



- ▶ 新粒子・暗黒物質の発見
- ▶ 量子重力の理解
- ▶ 物質・力による創発現象の解明

素粒子物理・宇宙物理・重力への量子技術の応用

- ▶ 既存のシミュレーション・データ解析・検出器手法の限界を超える

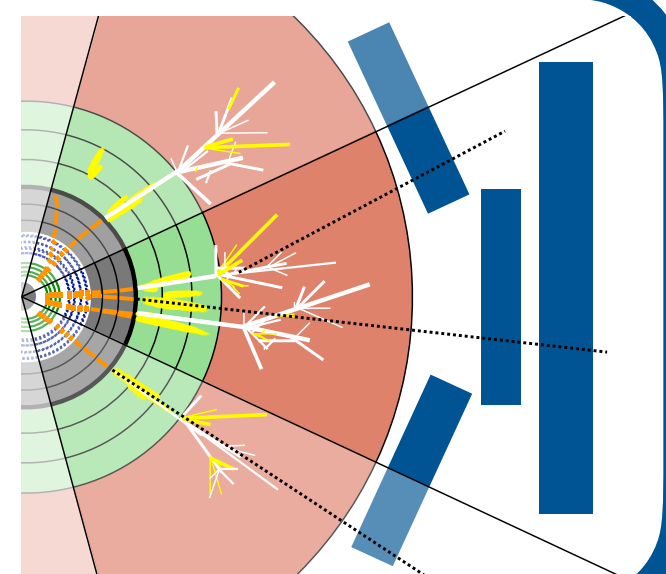
量子コンピュータ(NISQ, FTQC)・量子センサーの研究開発

- ▶ 新しい量子計算・量子ビット技術の追求
- ▶ NISQを実用化し、役立つ問題を解く

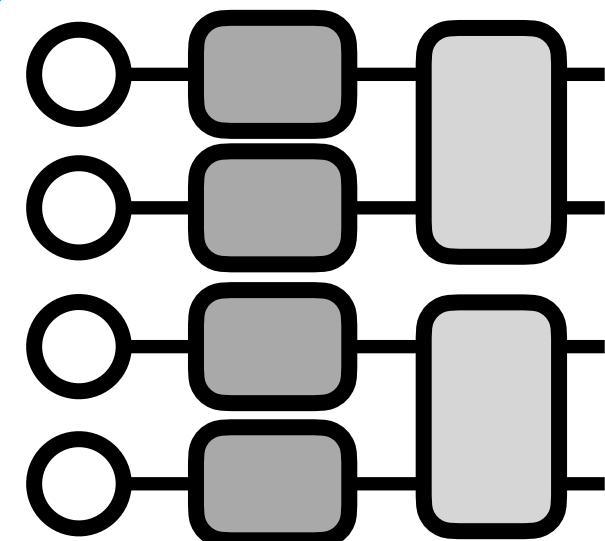
# 量子コンピュータをどう使うか？

新しいデータ解析ツールとして

検出器データの処理

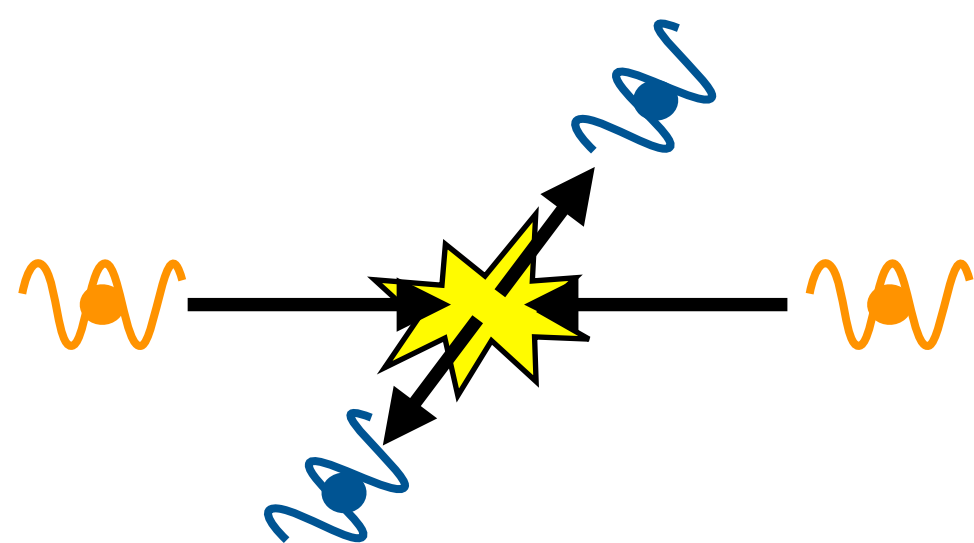


量子状態に変換



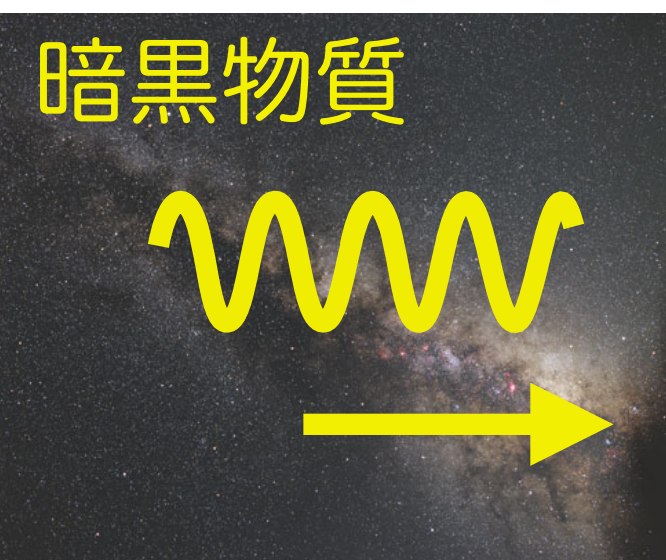
新しいシミュレーションツールとして

場の量子論のシミュレーション

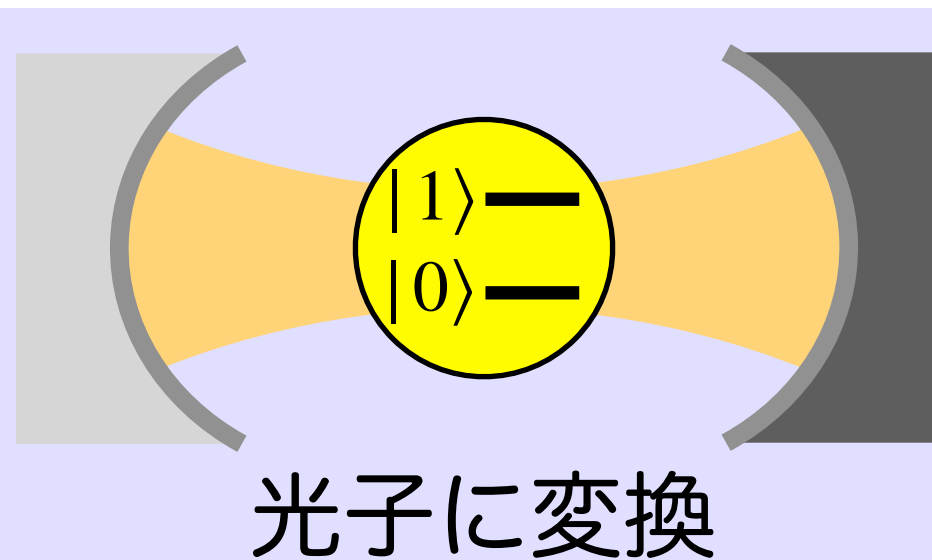


新しい実験ツールとして

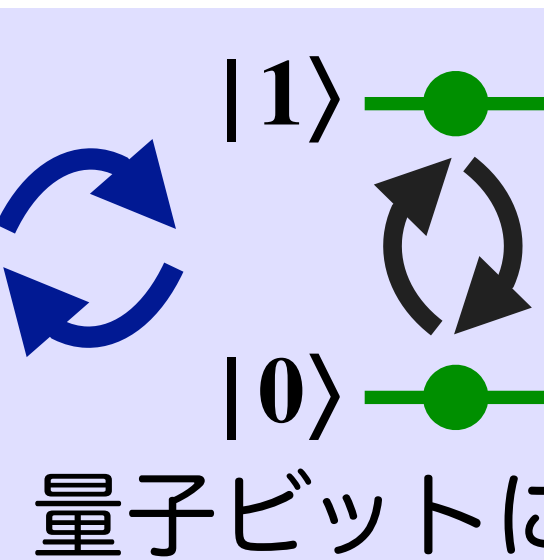
量子センサーによる  
新現象の探索



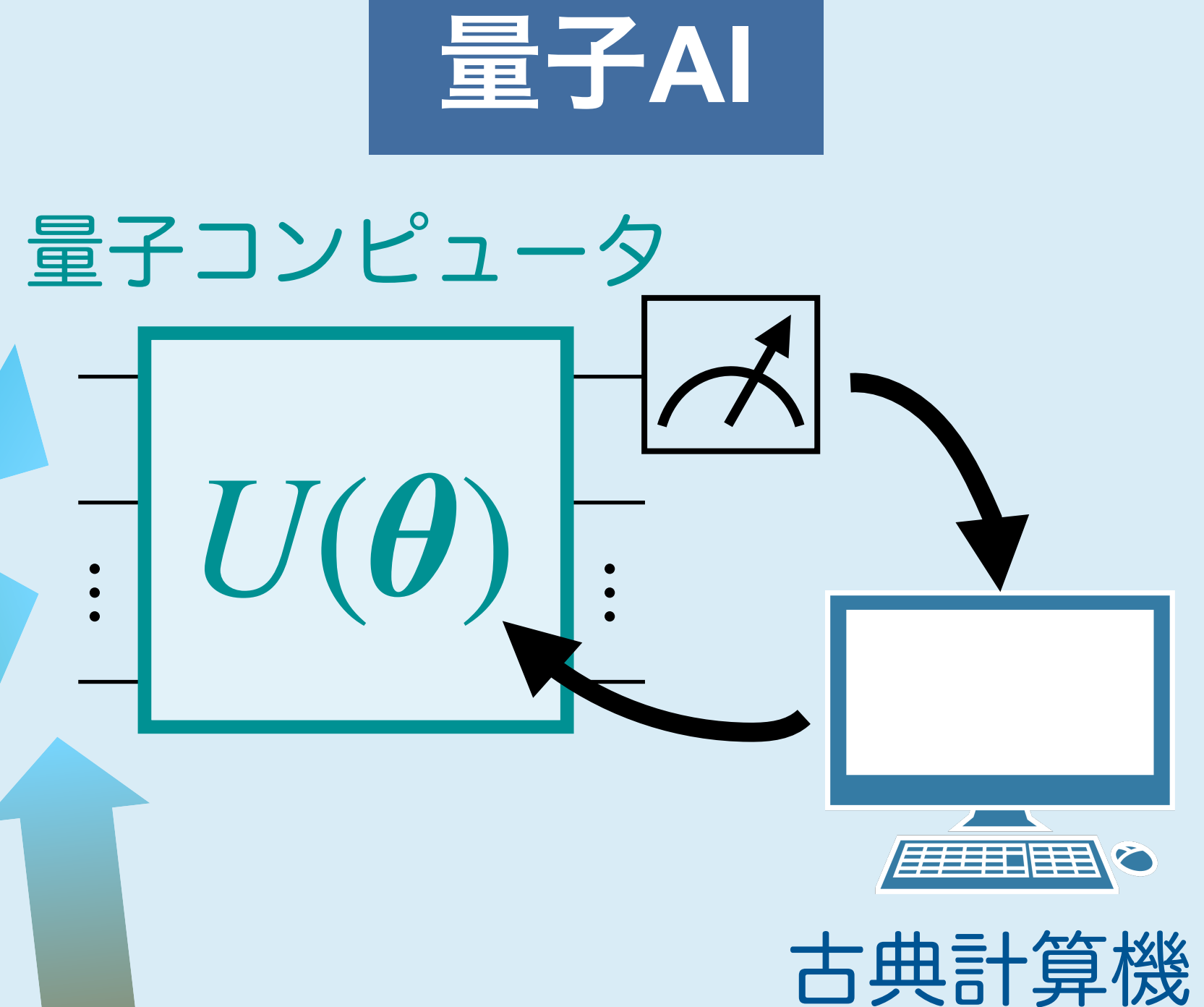
光子に変換



量子ビットに変換



測定器として活用



# 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

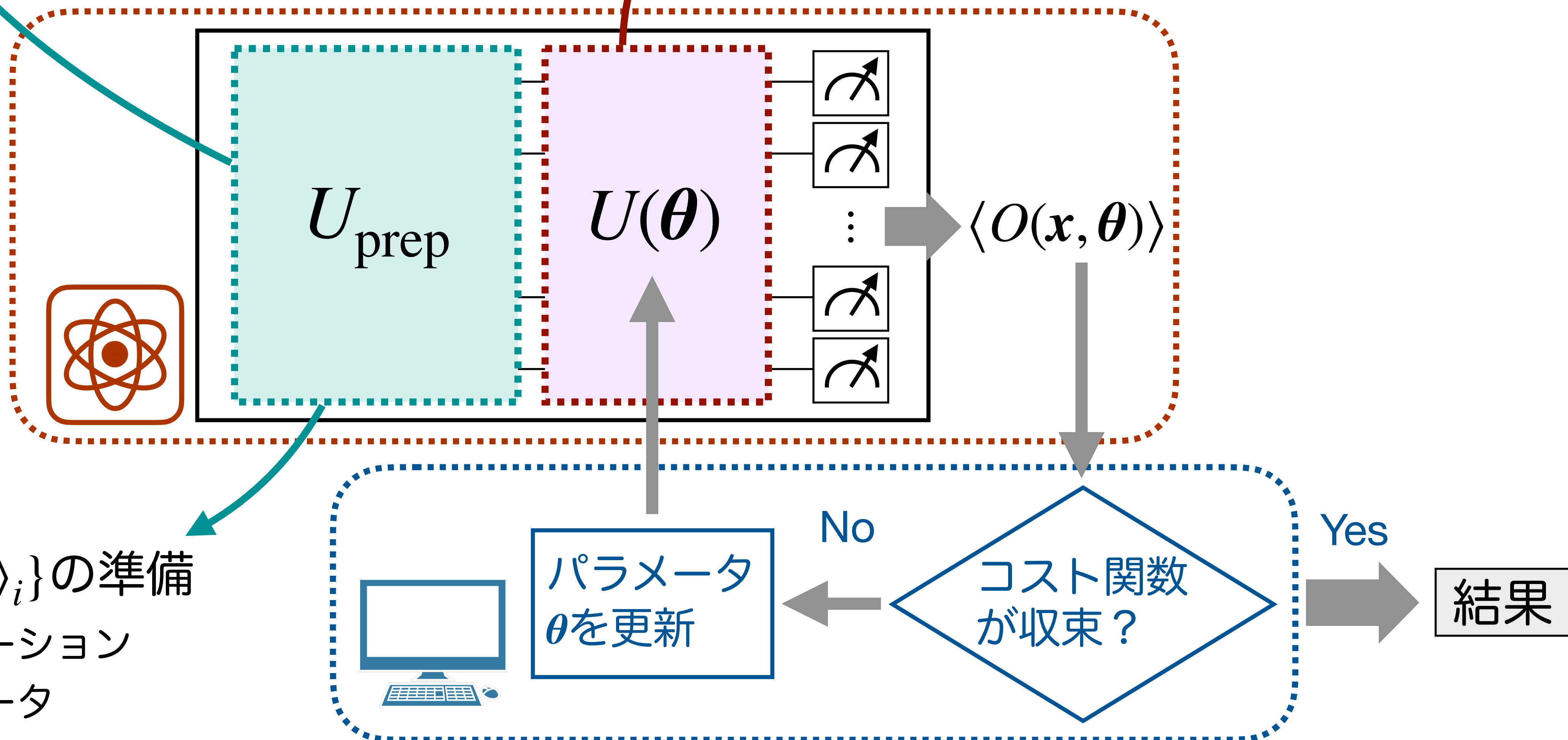
$\{|\phi\rangle_i, y_i\}$

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

...



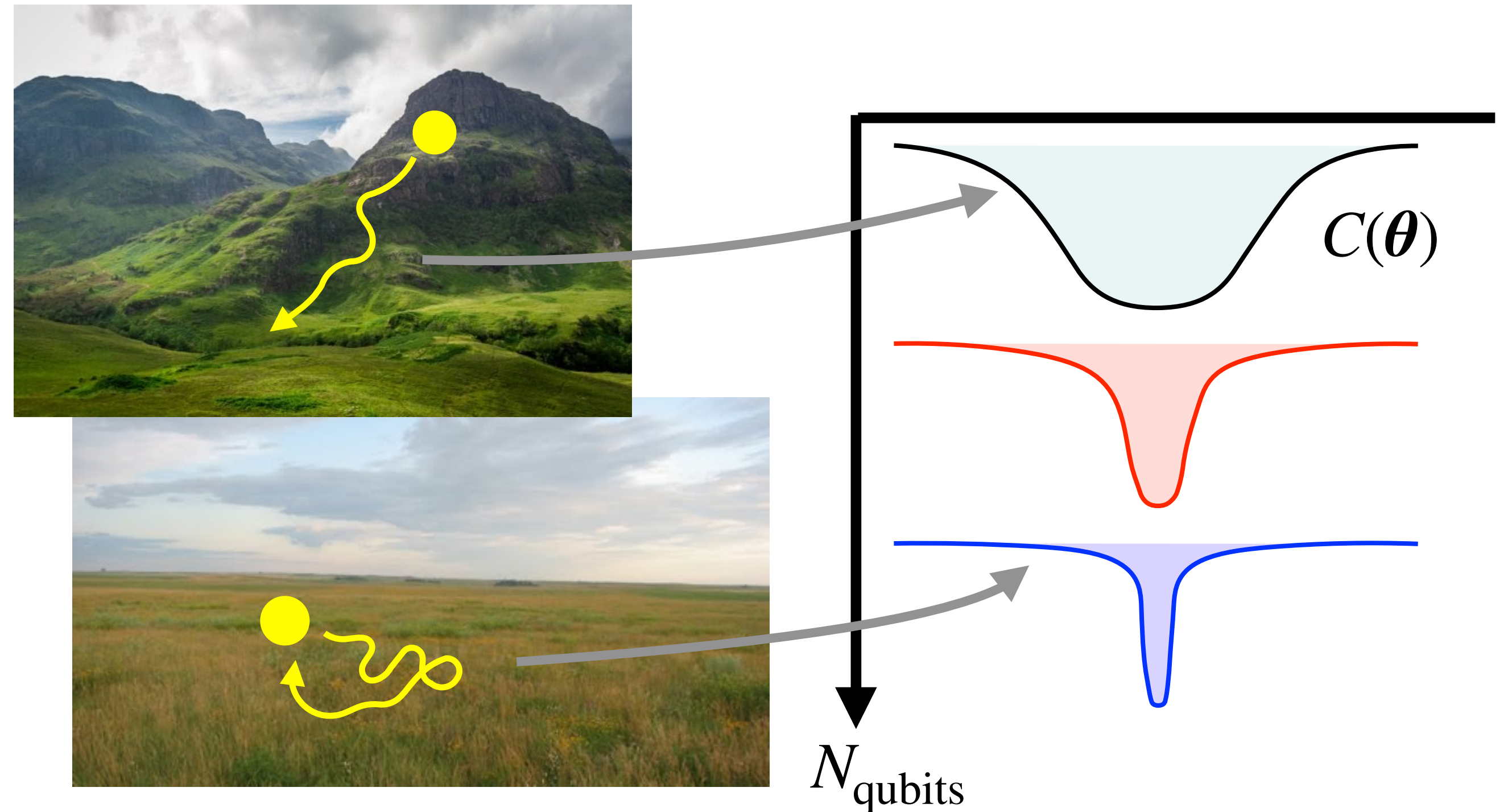
# バレンプラトー問題

パラメータ回路を使った量子機械学習は、量子ビット数の増加とともに学習が難しくなることが知られている

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

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

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



勾配の大きさが量子ビット数とともに指数的に小さくなる

➡ バレンプラトー

# バレンプラトー問題

量子機械学習には古典データの符号化が必要

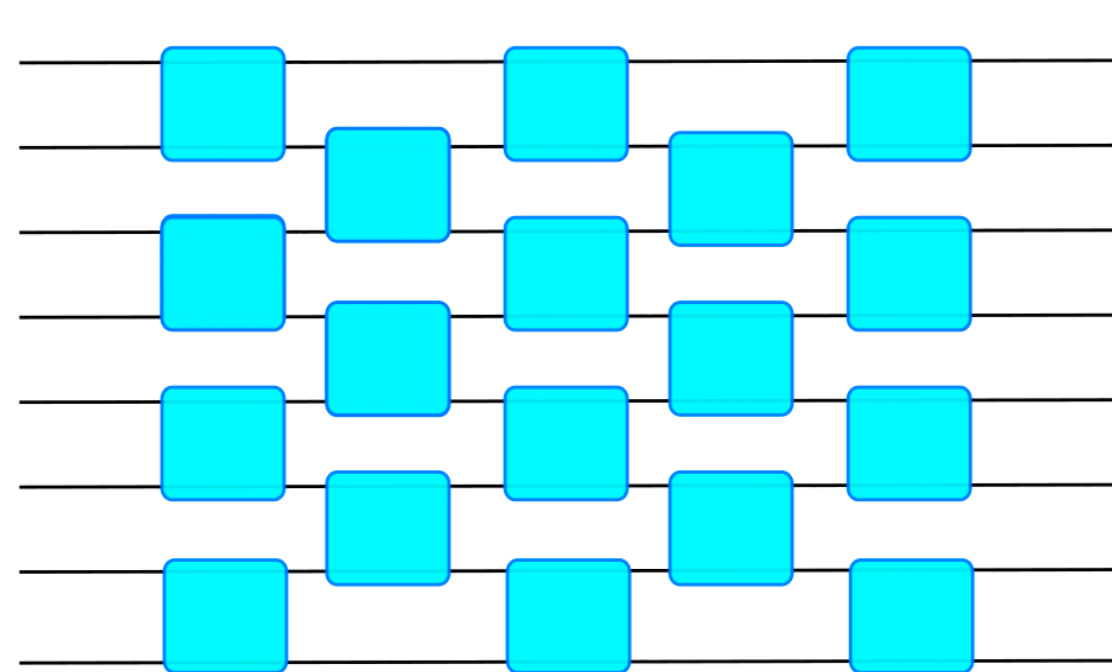
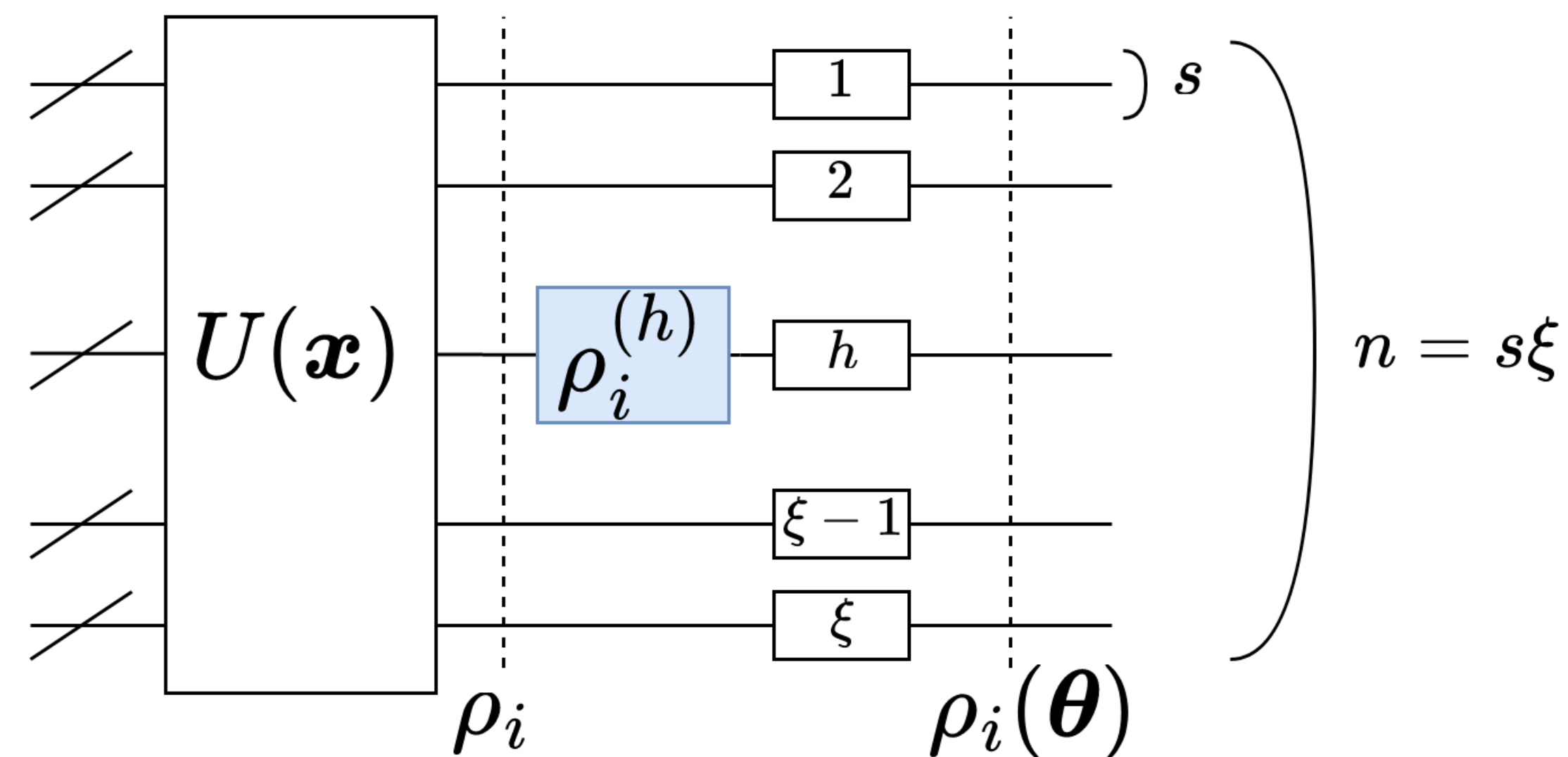
上曾山 (現D1), 修士論文

→ どういう状況でデータの符号化が勾配消失を起こすのかを理解する

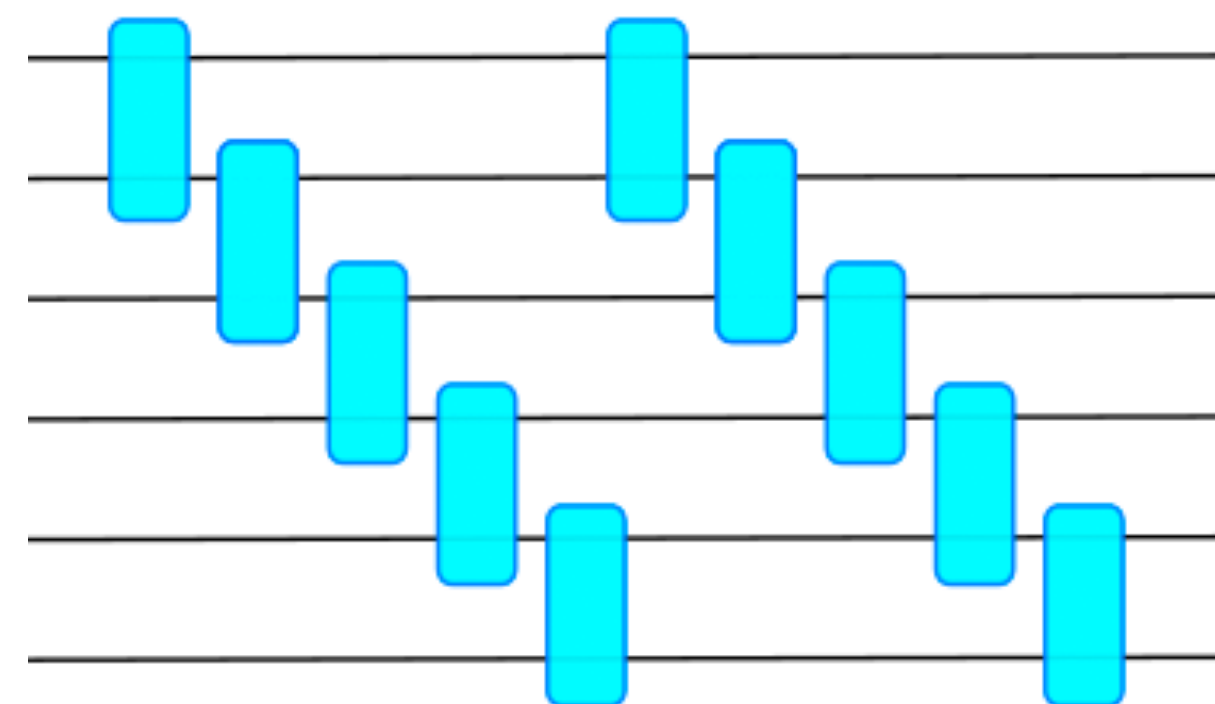
損失関数  $\mathcal{L}(\theta)$  の勾配の分散を、Hilbert-Schmidt 距離を使って評価

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

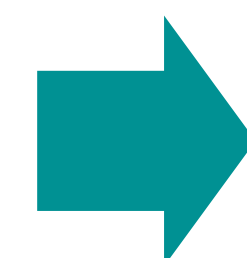
具体的な回路に対して、勾配分散のデータ入力に依存する項の寄与を解析的に計算



ALT



MPS



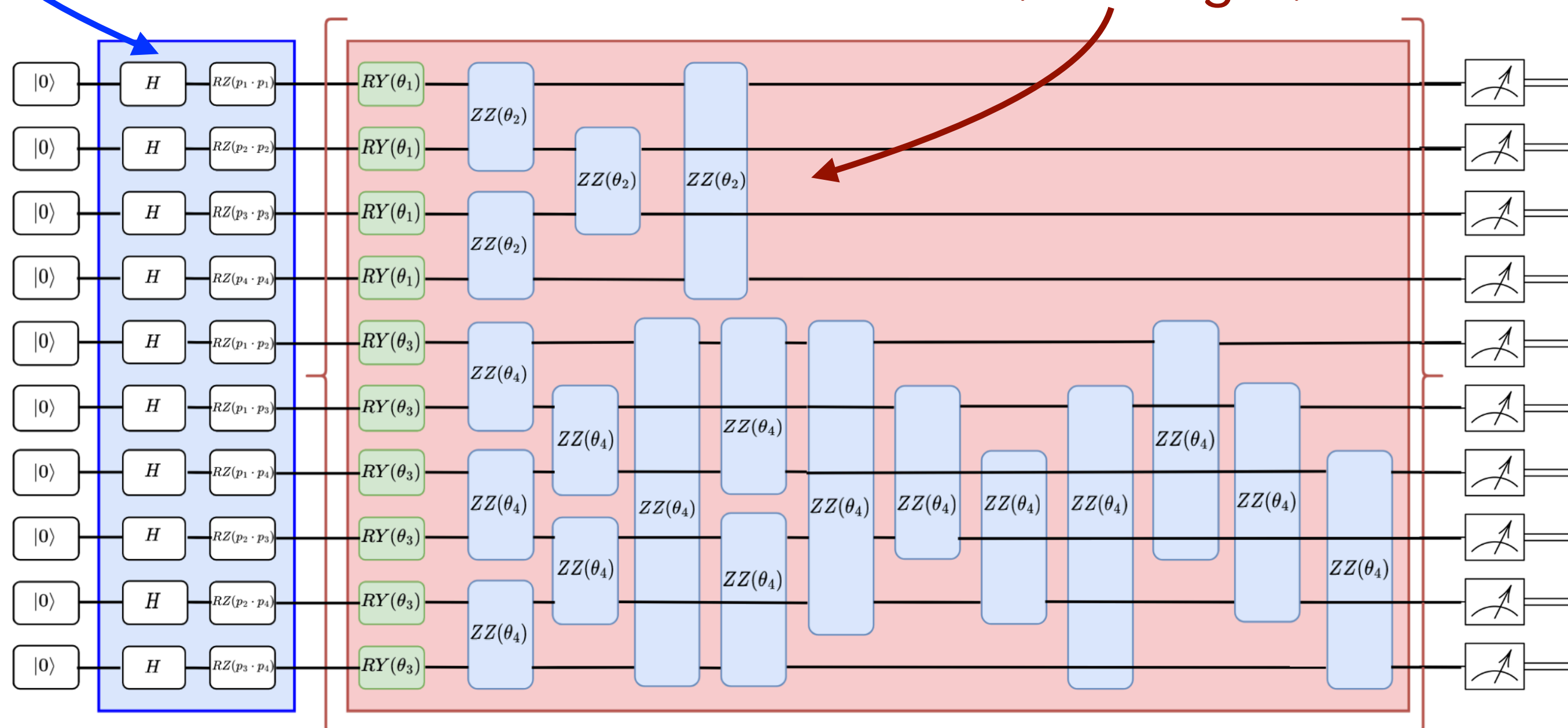
勾配消失を起こさないための  
必要条件を導出した

機械学習では、問題の対称性を活用することで学習・予測性能が向上する

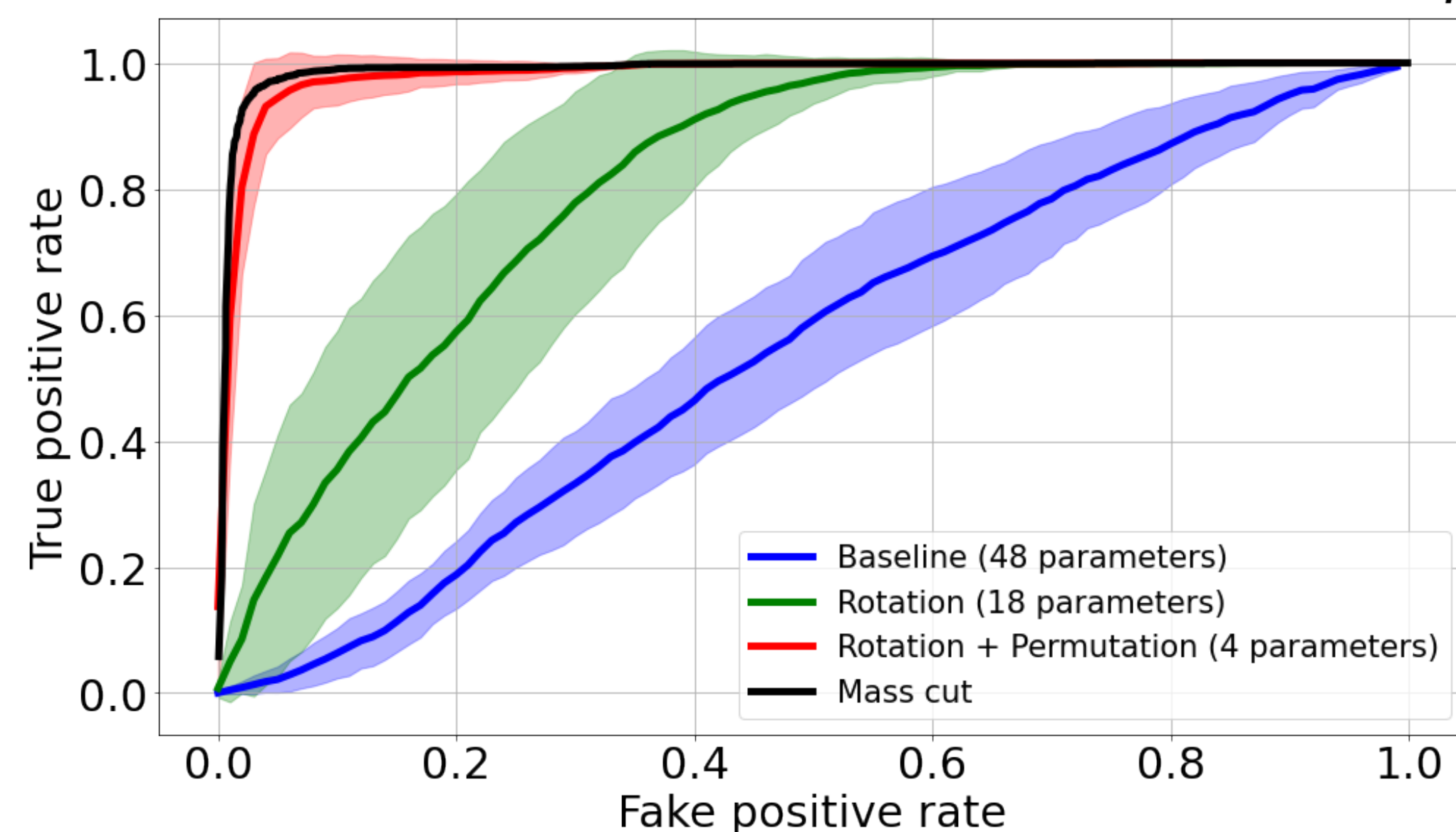
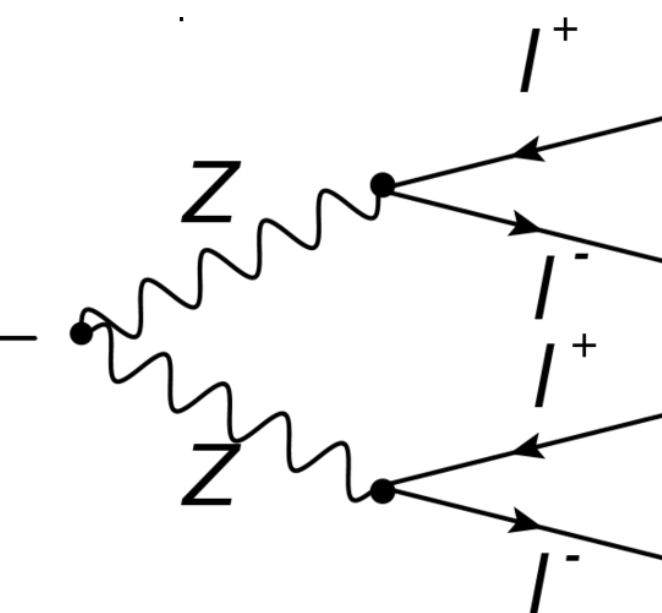
- ▶ 物理は対称性の宝庫（ローレンツ変換、回転、空間・時間反転、CP変換、…）
- ▶ しかし、連続的な対称性を量子計算に導入することは一般的に自明ではない

➡ 回転対称性と並べ替え操作の対称性を効率的に実装できる量子ニューラルネットワークのモデルを構築

ベクトルの内積を入力 (Weyl'sの定理)      並べ替え操作に対して対称な量子ゲートを実装 (Twirling法)  $\times N$



$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\text{-leptons}$  の分類問題に応用

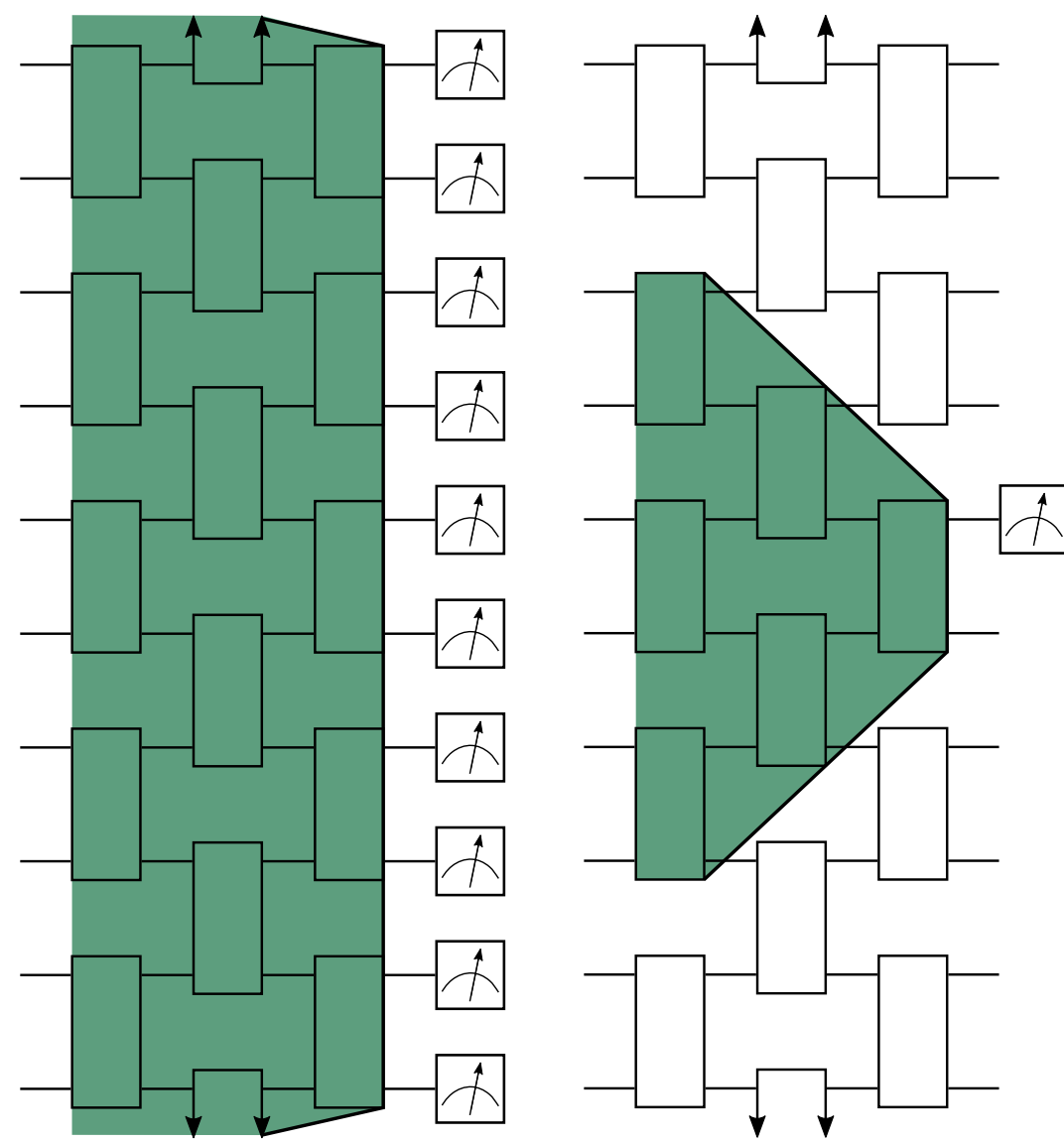


# 量子機械学習の研究目標

## 量子機械学習の学習・汎化性の解明

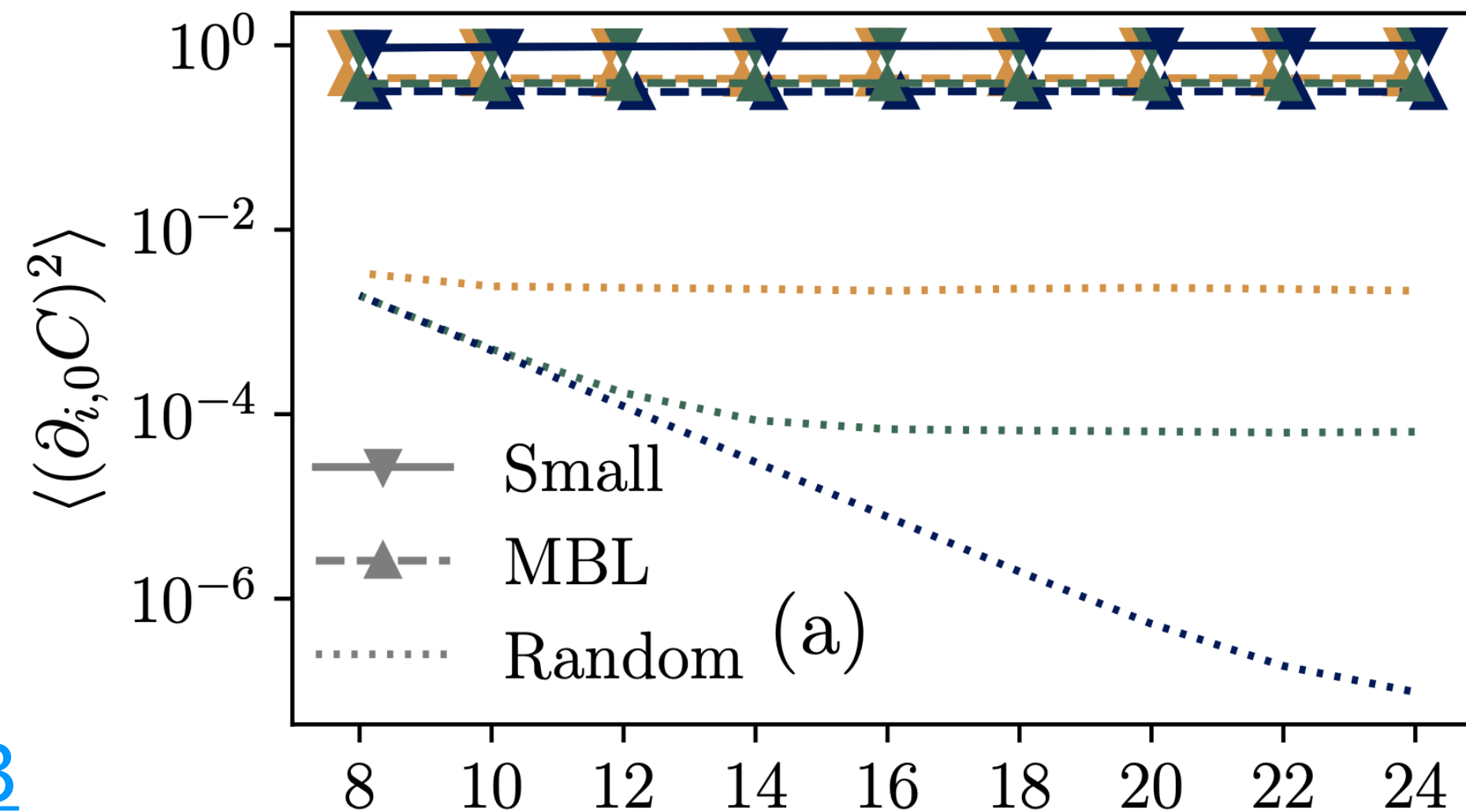
- ▶ 勾配消失問題と古典計算に対する優位性の関係
- ▶ 物理系の波動関数など、非自明な量子データに対する学習・汎化性

➡ 実問題に適用可能な学習モデルの開発



勾配消失を起こさない学習モデルは古典シミュレーション可能か？

[M. Cerezo et al., 2023](#)



勾配消失を起こさないパラメータ初期化の方法？

[C-Y Park et al., 2024](#)

古典シミュレーション可能性と量子回路の設計・パラメータ初期化の関係を調査中

➡ 古典シミュレーションが難しく、勾配消失のない量子学習モデルを目指す



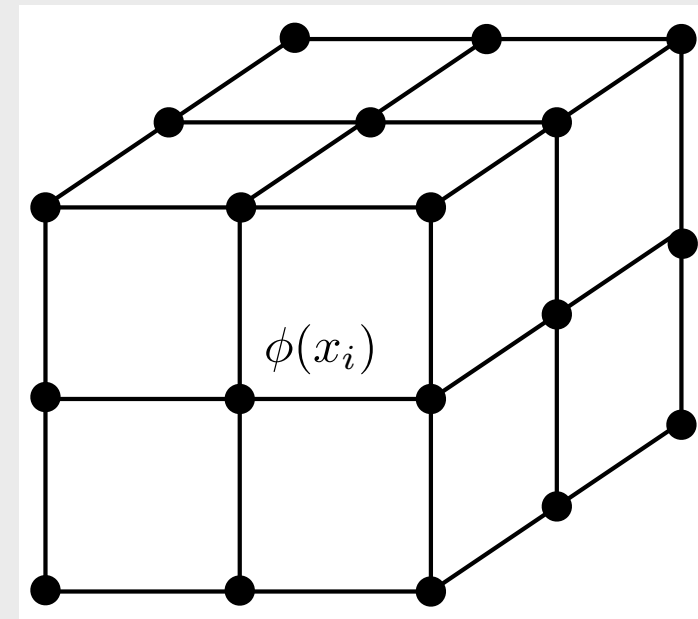
# 量子シミュレーション

量子コンピュータによるシミュレーションは、非常にパワフルな手法になりうる

格子QCD理論は、強い相互作用の第一原理計算が可能

## 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

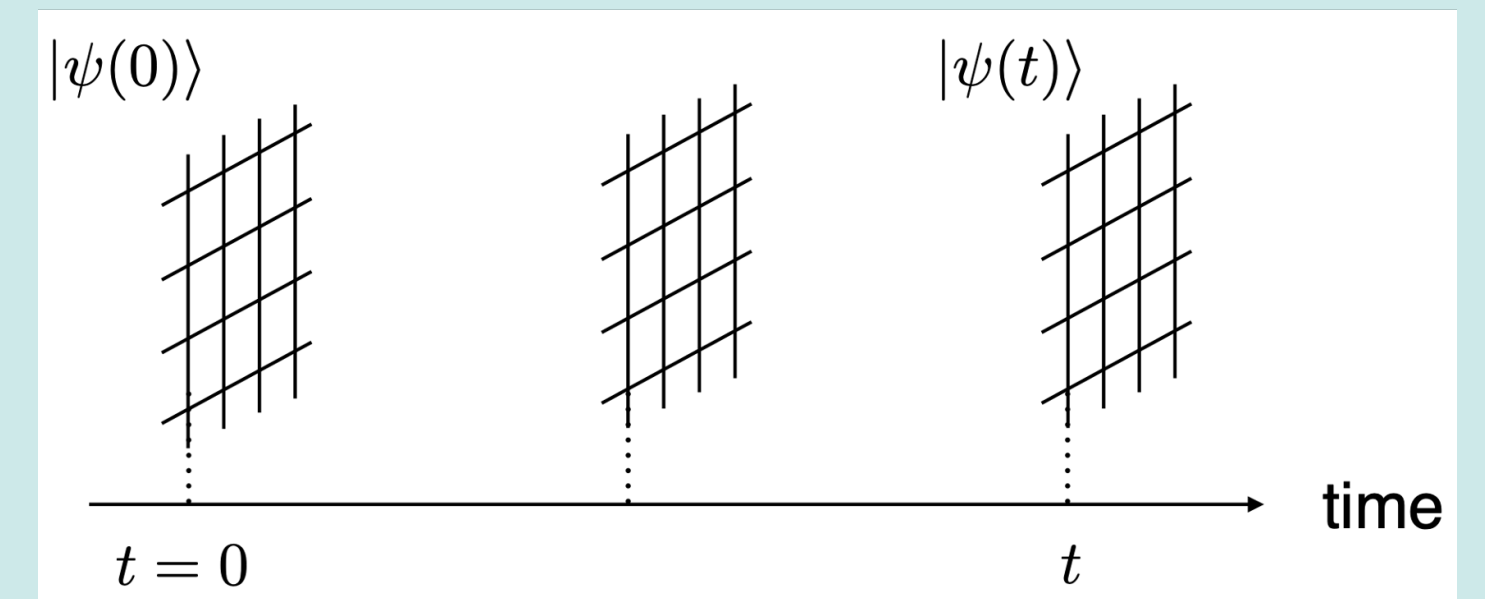


符号問題が存在する (e.g,  $S \in \mathbb{C}$ )

- 有限密度系、有限温度系
- トポロジカル項の存在

## 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

- ゲージ場の自由度は無次元
- 局所ゲージ対称性の要請

実時間ダイナミクス (例えば非平衡現象、粒子の散乱) のシミュレーション

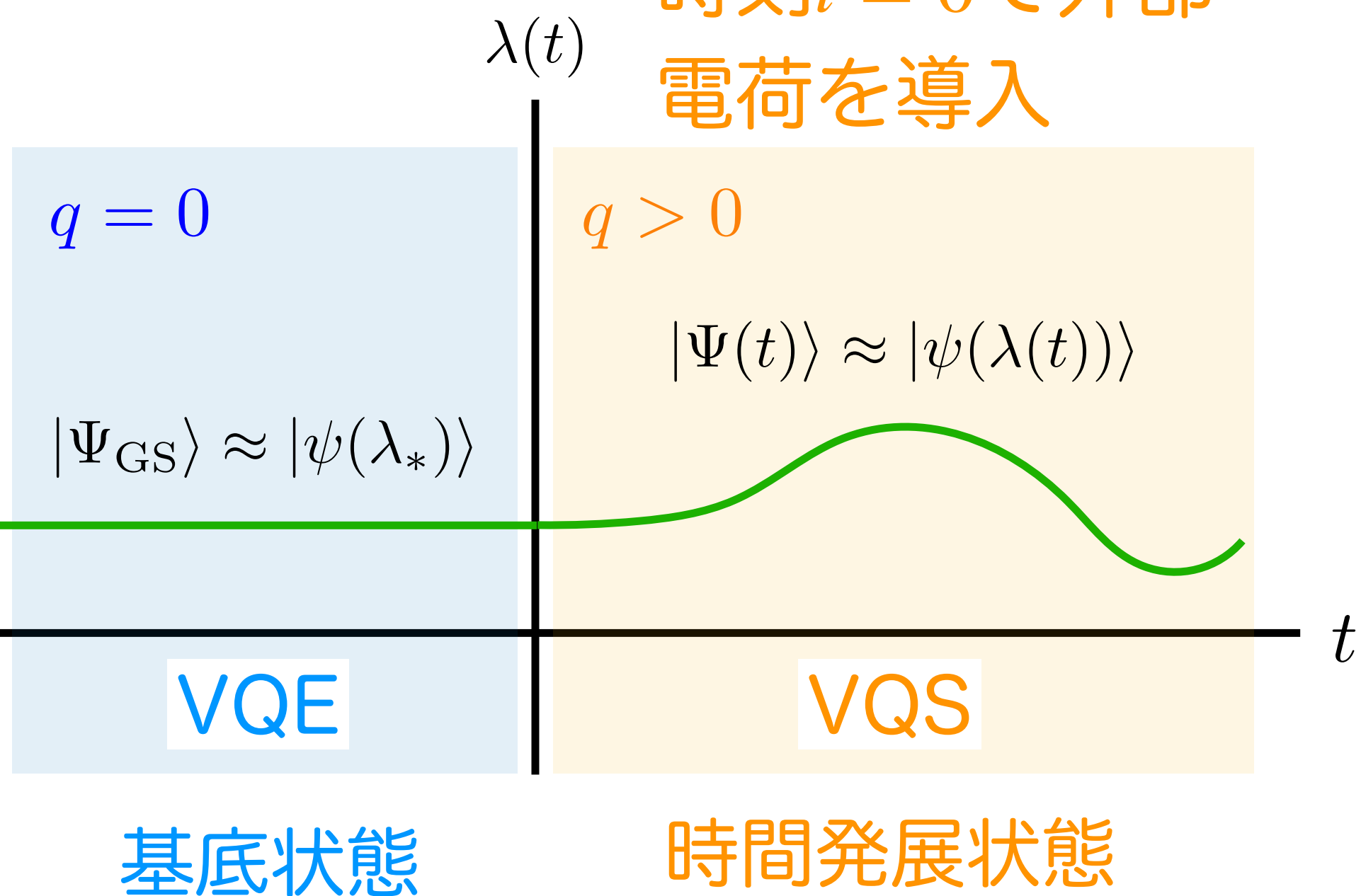
➡ 量子計算の優位性を示すことができる有望な分野

(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

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

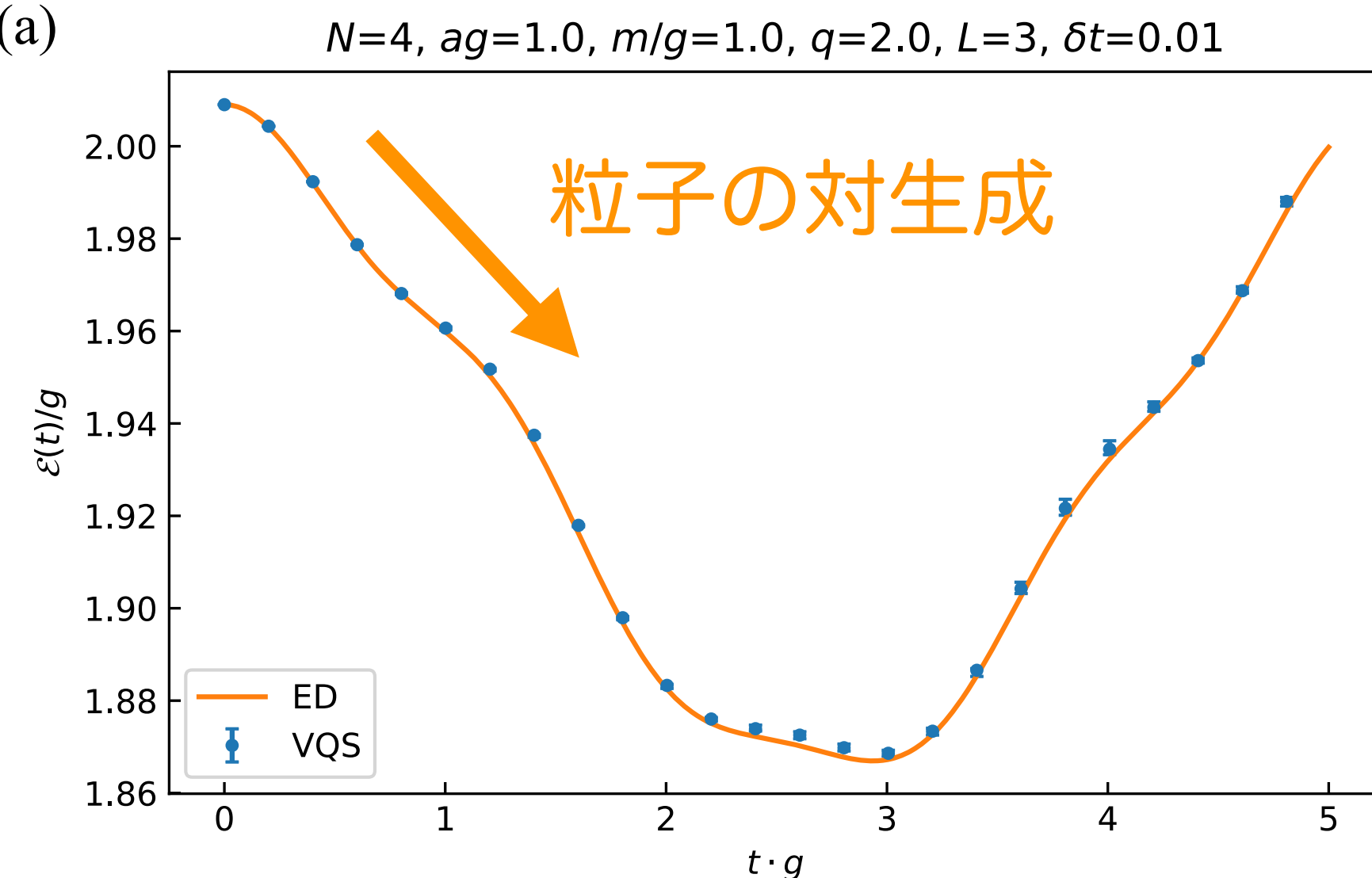


$$M_{ij} = \text{Re} \frac{\partial \langle \psi(\theta) | \partial | \psi(\theta) \rangle}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \quad (a)$$

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

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

次のステップ：より大きな系・複雑な系へのダイナミクスシミュレーションの拡張

# 量子シミュレーションの研究目標

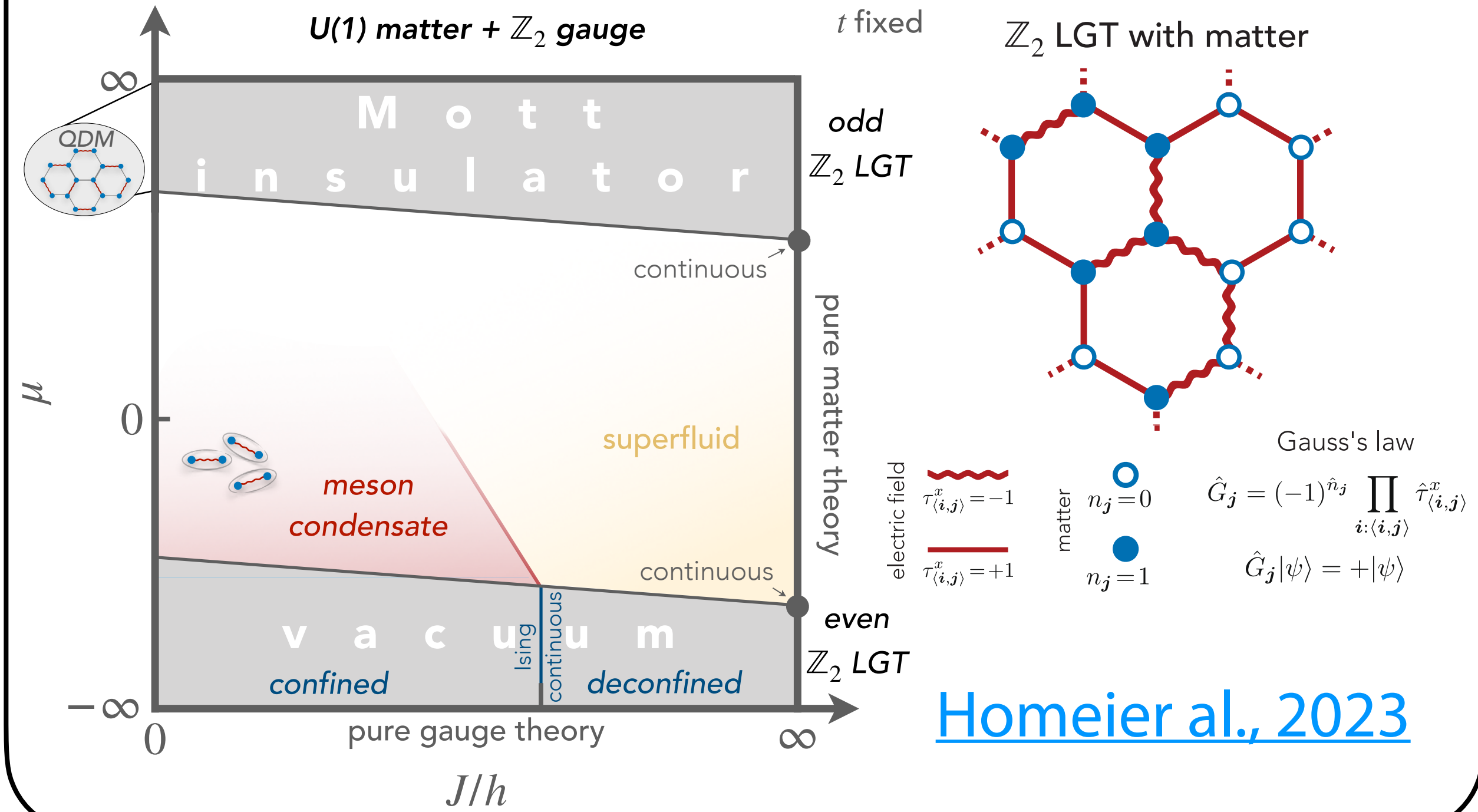
より複雑・より非自明な場の量子論のシミュレーション、創発現象の解明

- ▶ 2次元格子ゲージ理論のシミュレーション
- ▶ 有限温度・有限密度系（非ゼロ化学ポテンシャル）での量子シミュレーション
- ▶ 相転移現象のシミュレーション

➡ モンテカルロ法に対する優位性の実証

➡ 将来的に、3次元非可換ゲージ理論 (QCD) へと拡張したい

## ハニカム格子上的2d $\mathbb{Z}_2$ 格子ゲージ理論



物性物理の手法を  
取り入れた素粒子  
物理の量子研究

- ▶ 状態準備等の量子アルゴリズム（テンソルネットワークなど）
- ▶ 開放量子系のダイナミクスシミュレーション
- ▶ 非ユニタリー・非エルミート物理

# 誤り耐性のある量子コンピュータの研究

より大きく複雑な問題への応用には、誤り耐性量子コンピュータ (FTQC) の実現が必須

現在のエラー訂正技術は、エラー検知のための信号処理とエラーから回復するための操作の決定に多くの古典計算処理が必要

▶ 問題が持つ物理的な対称性に基づいたエラー検知・訂正手法の研究

- i) 量子アルゴリズムにおける対称性・保存量の表現
- ii) 対称性を用いたエラー訂正手法の開発

▶ ジョセフソン接合を用いた小型高周波素子の開発と読み出し信号の多重化

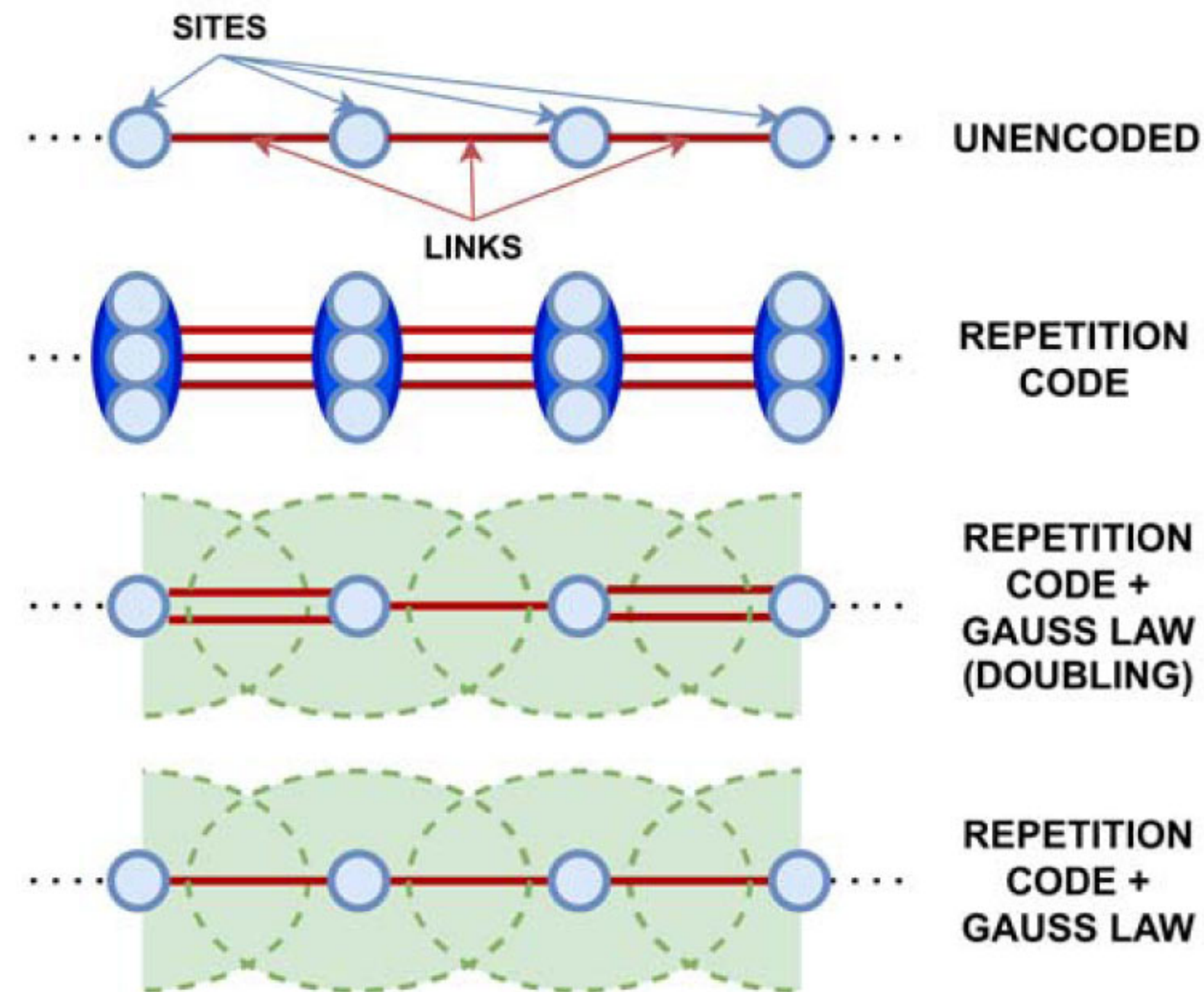
➡ スケーラブルなエラー訂正の基礎技術を開発する

# 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](#)

# 量子コンピュータの進展

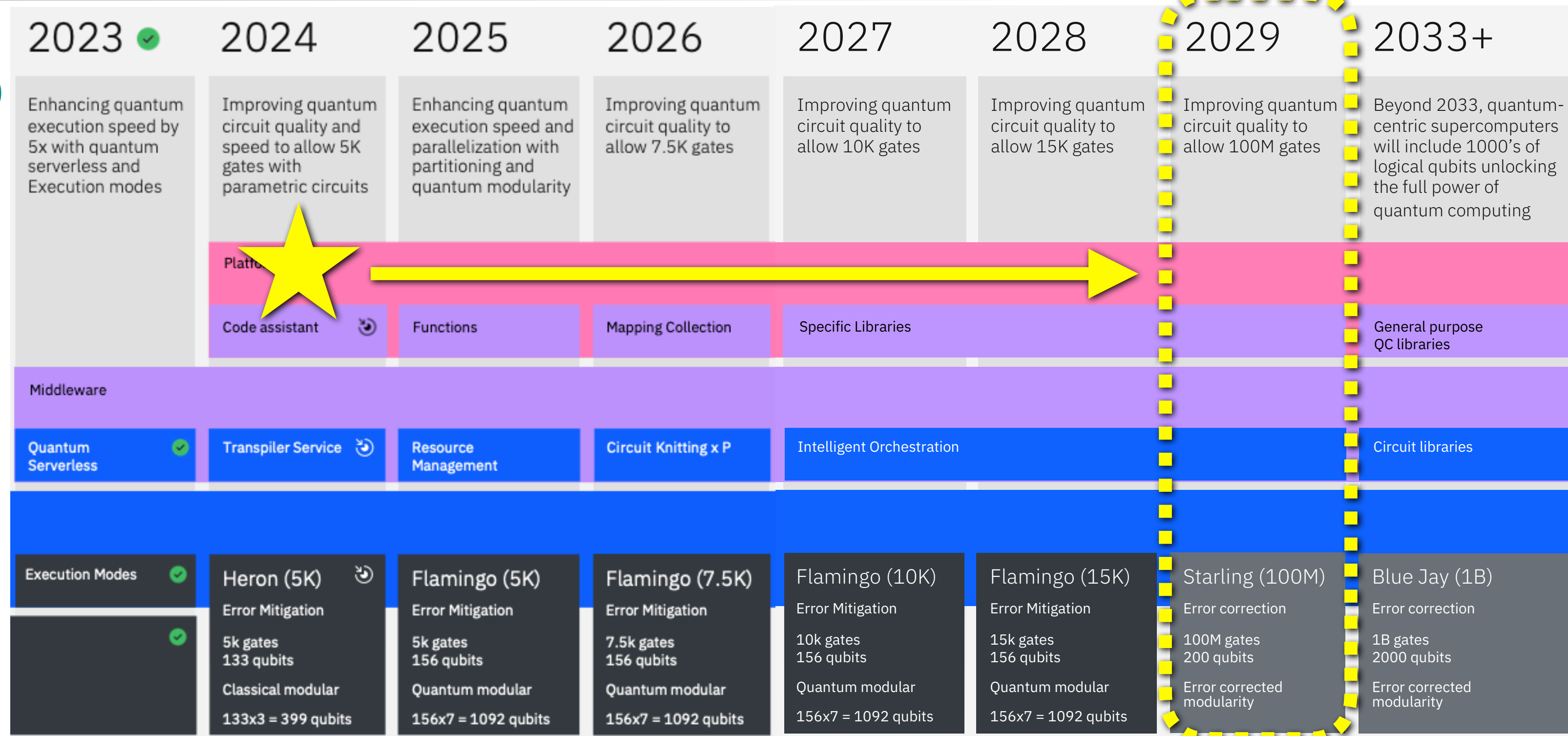
# IBMのロードマップ

今後5年で10万量子ビットの世界が視界に入ってくる

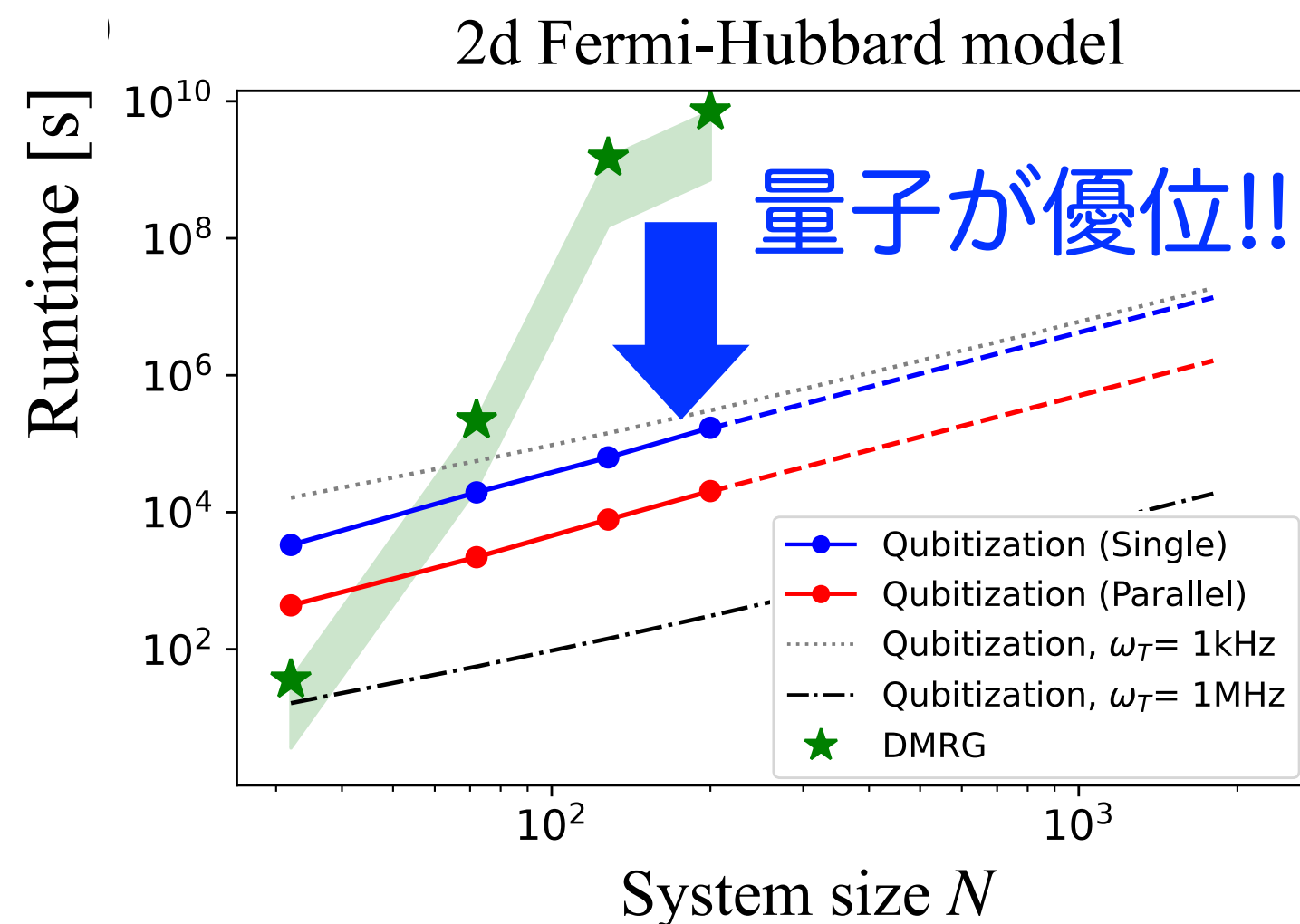
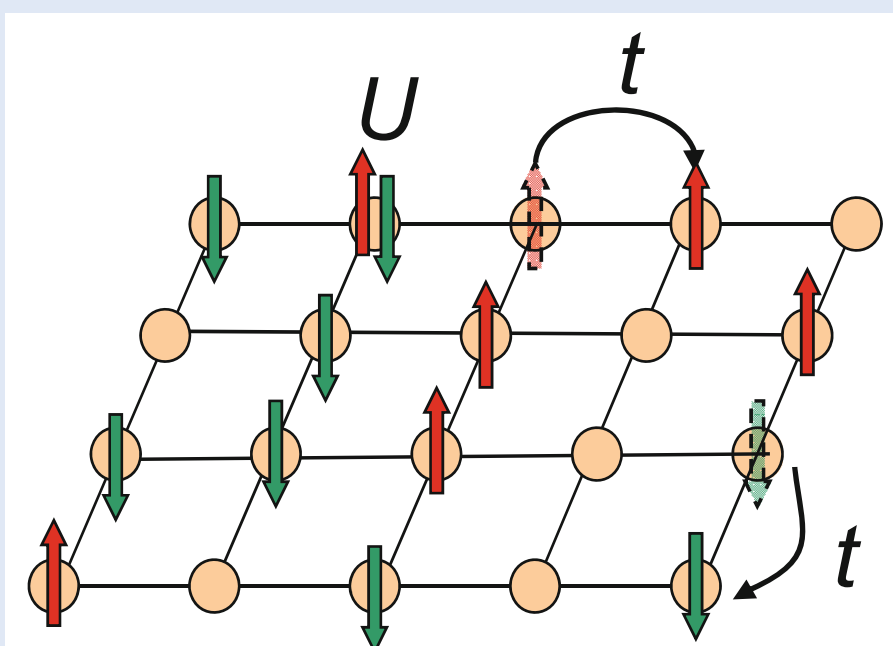
エラー訂正可能な200論理量子ビット (~2029年)

➡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...

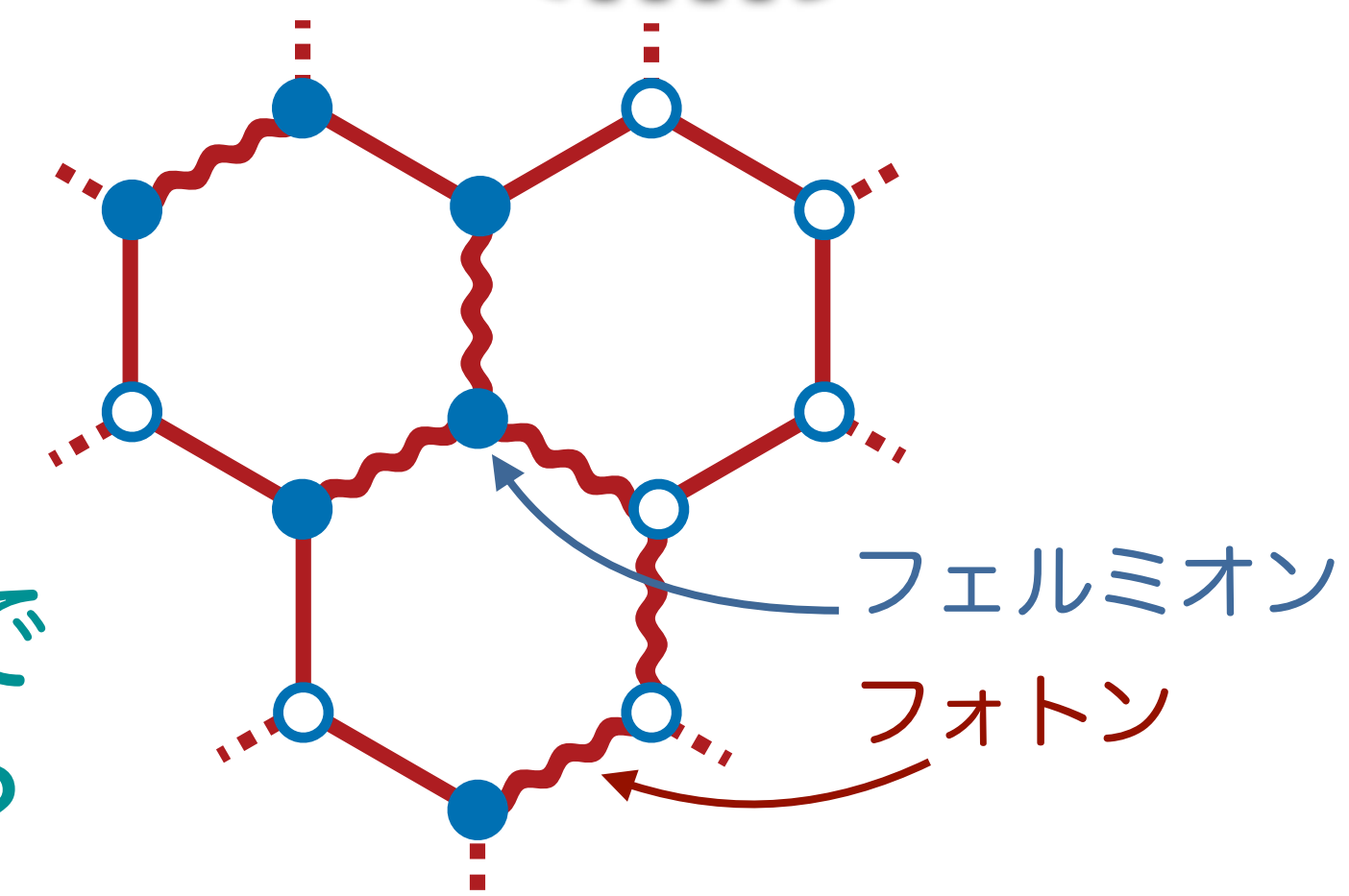


## 2次元スピン模型



1 month  
1 day  
1 hour

素粒子物理でできないか?

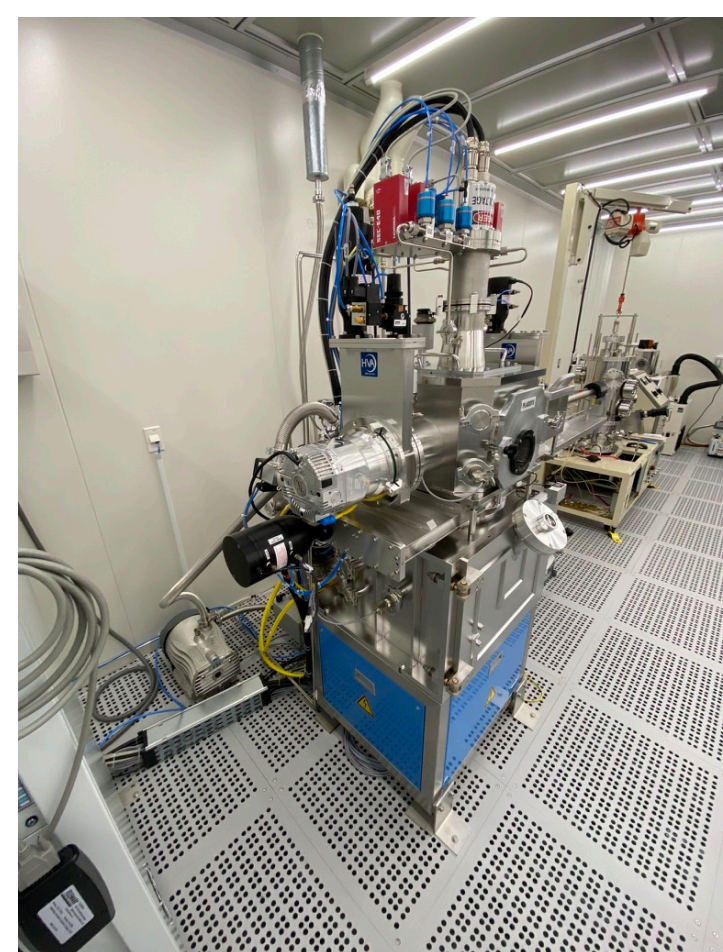
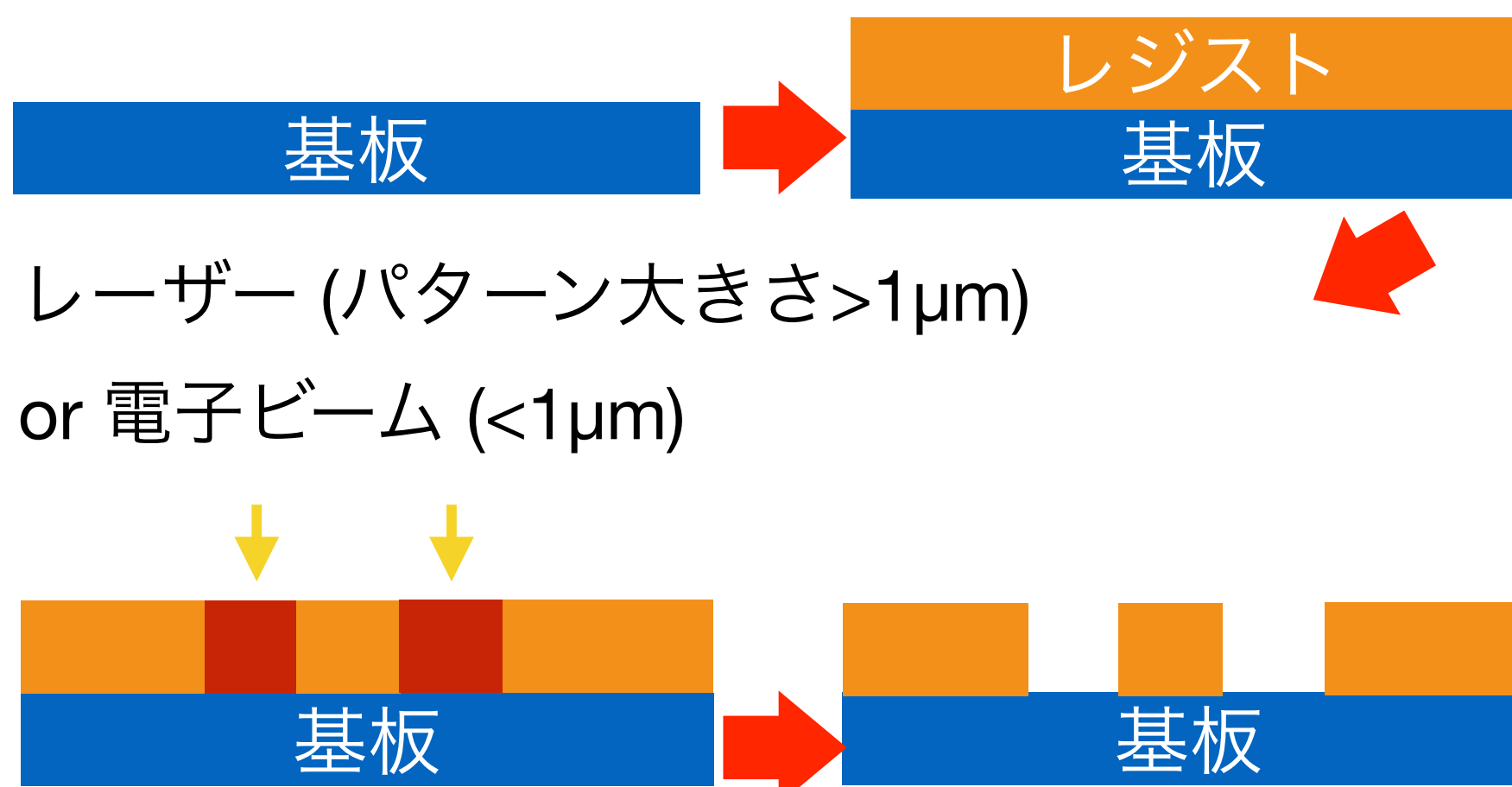
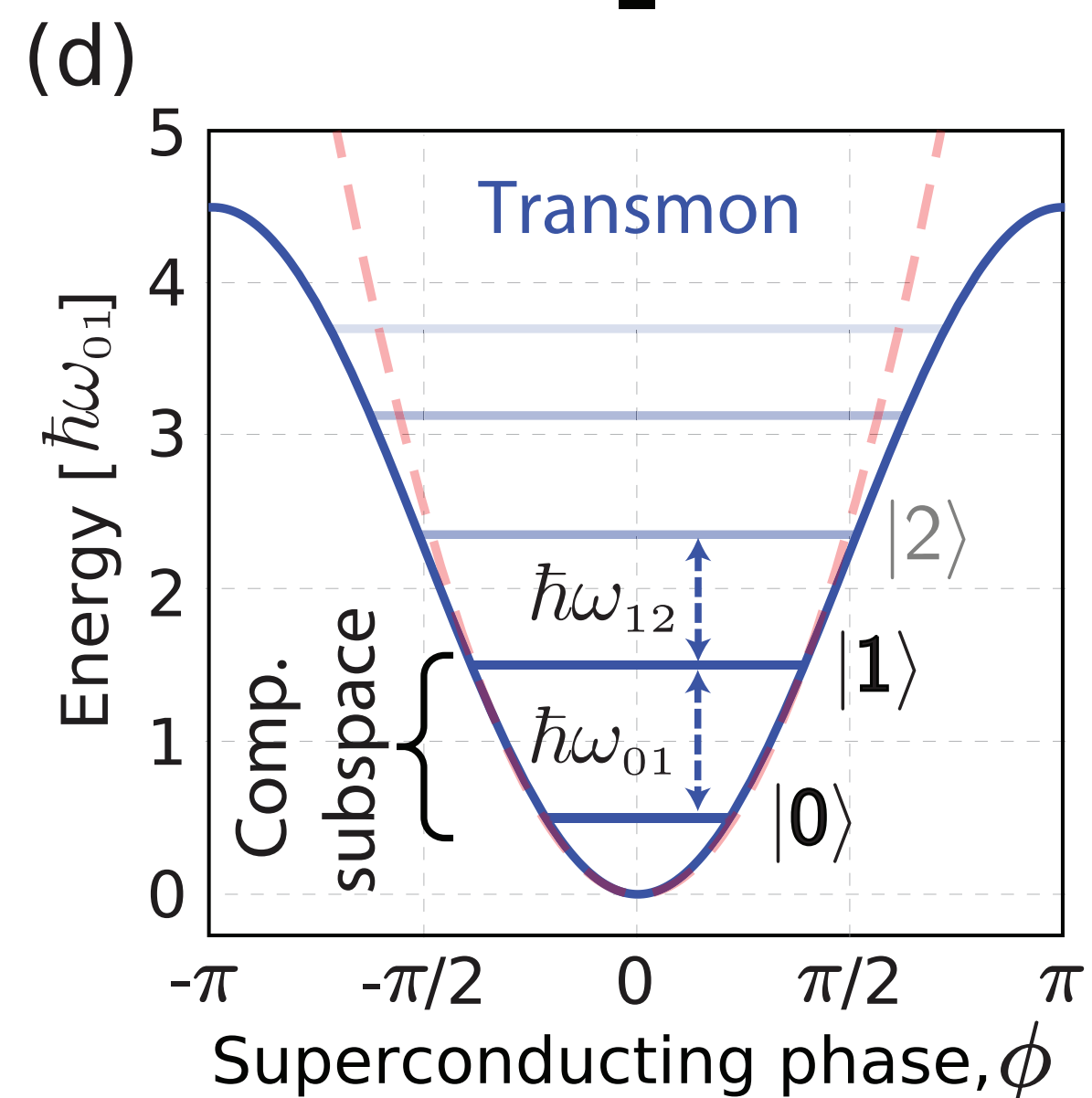
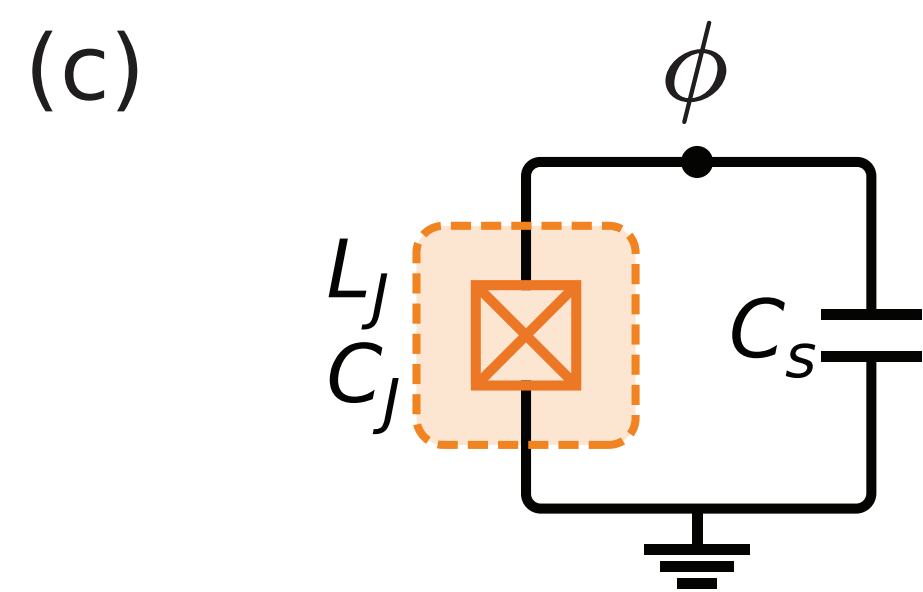


2次元格子ゲージ理論 14

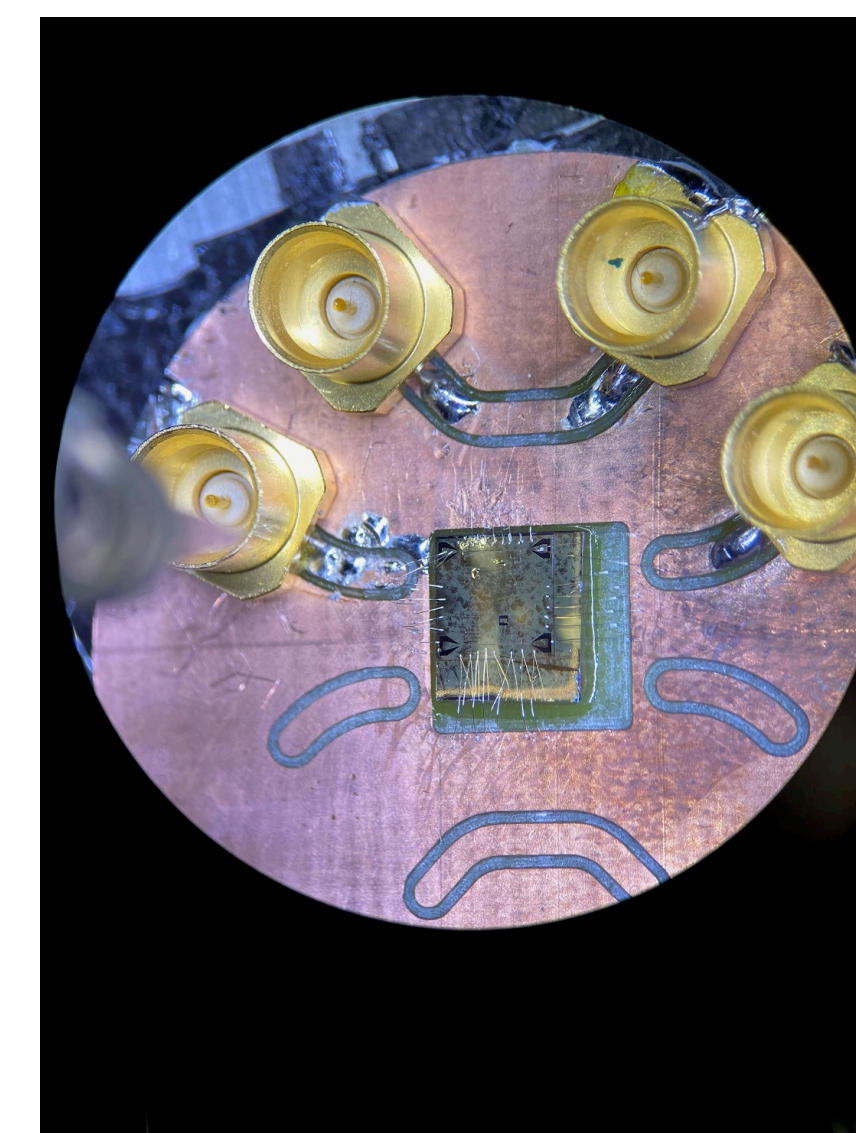
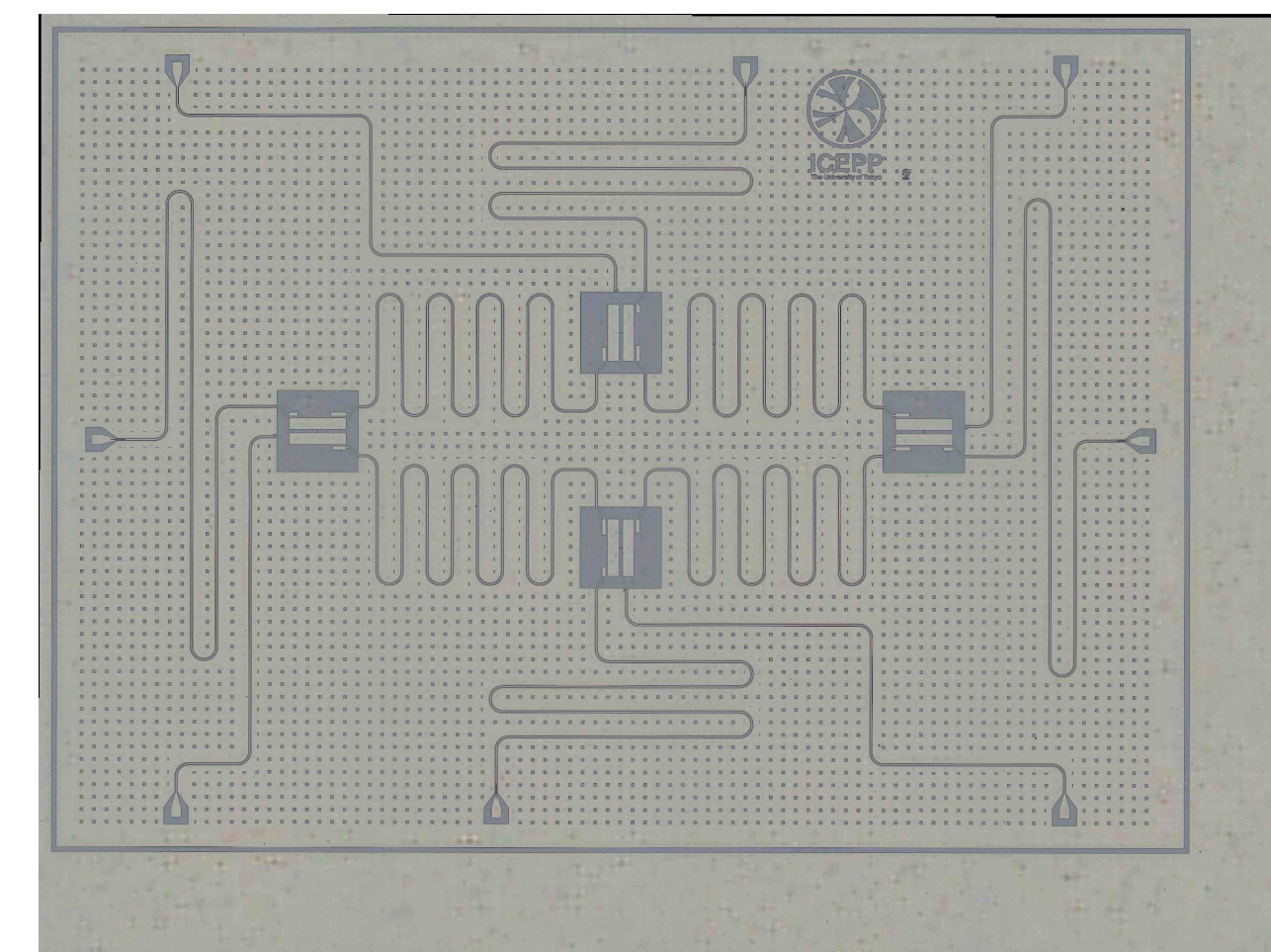
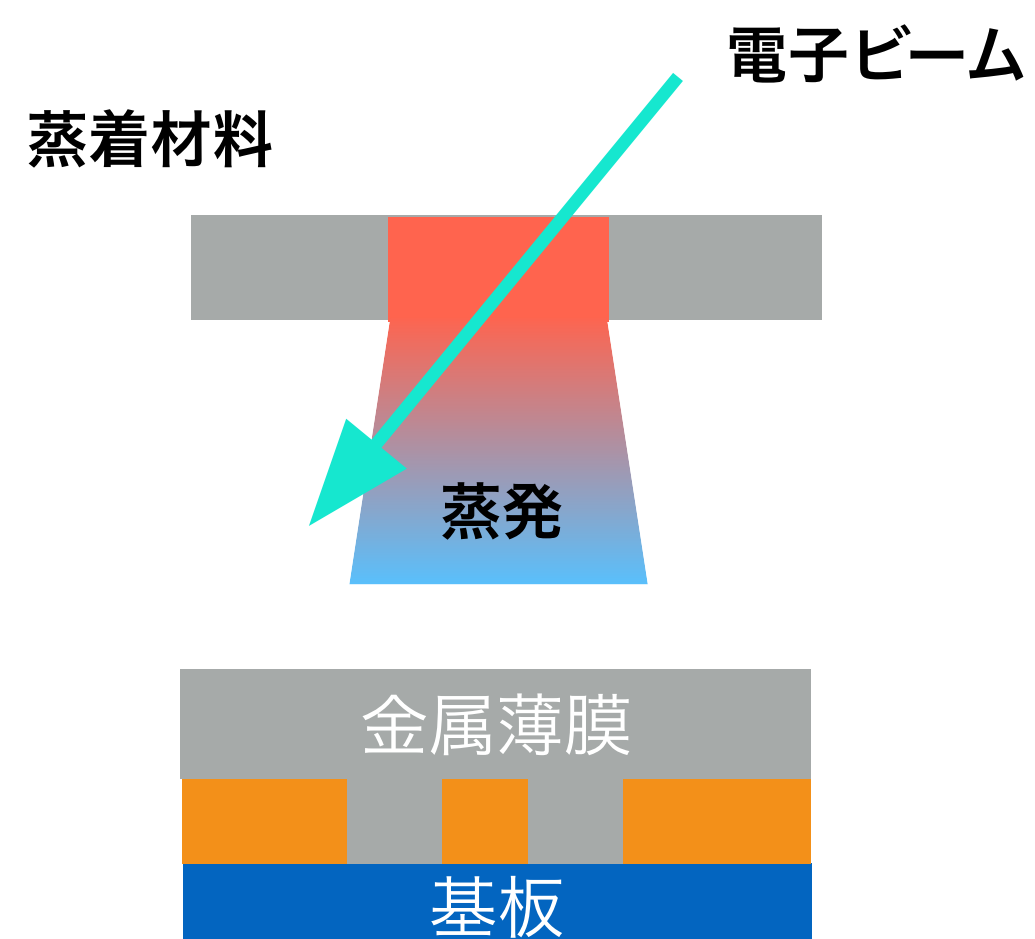
# 超伝導量子デバイスの研究

## 量子デバイス・回路製作技術の開発

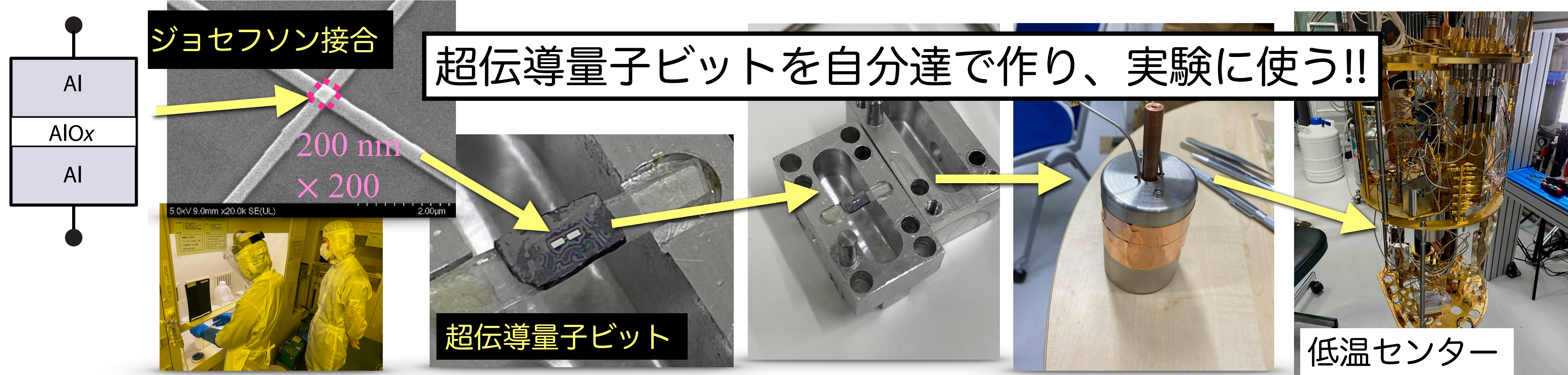
### 超伝導量子ビットの製作



Plassys MEB550S @OIST

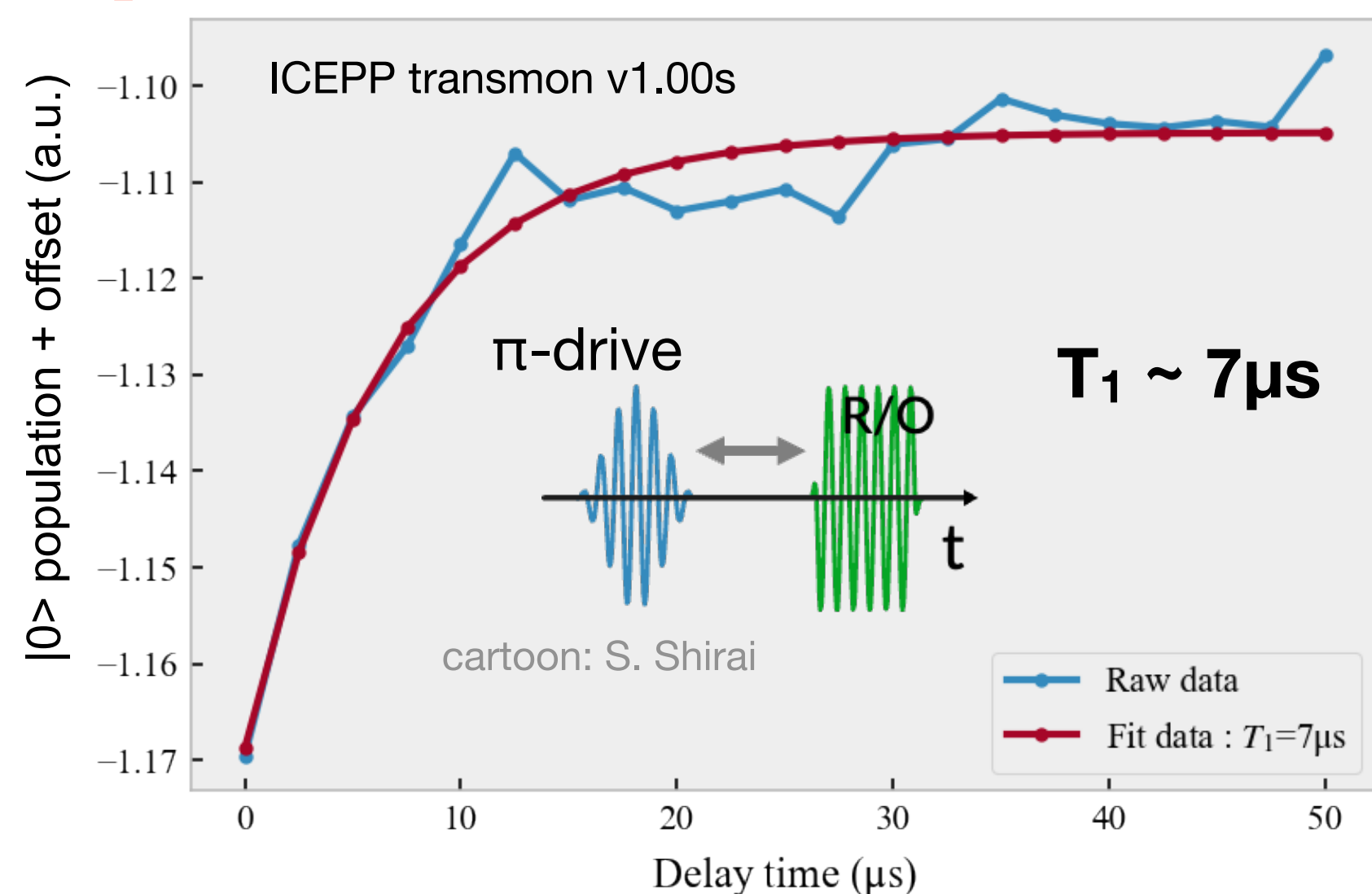


# 超伝導量子デバイスの研究



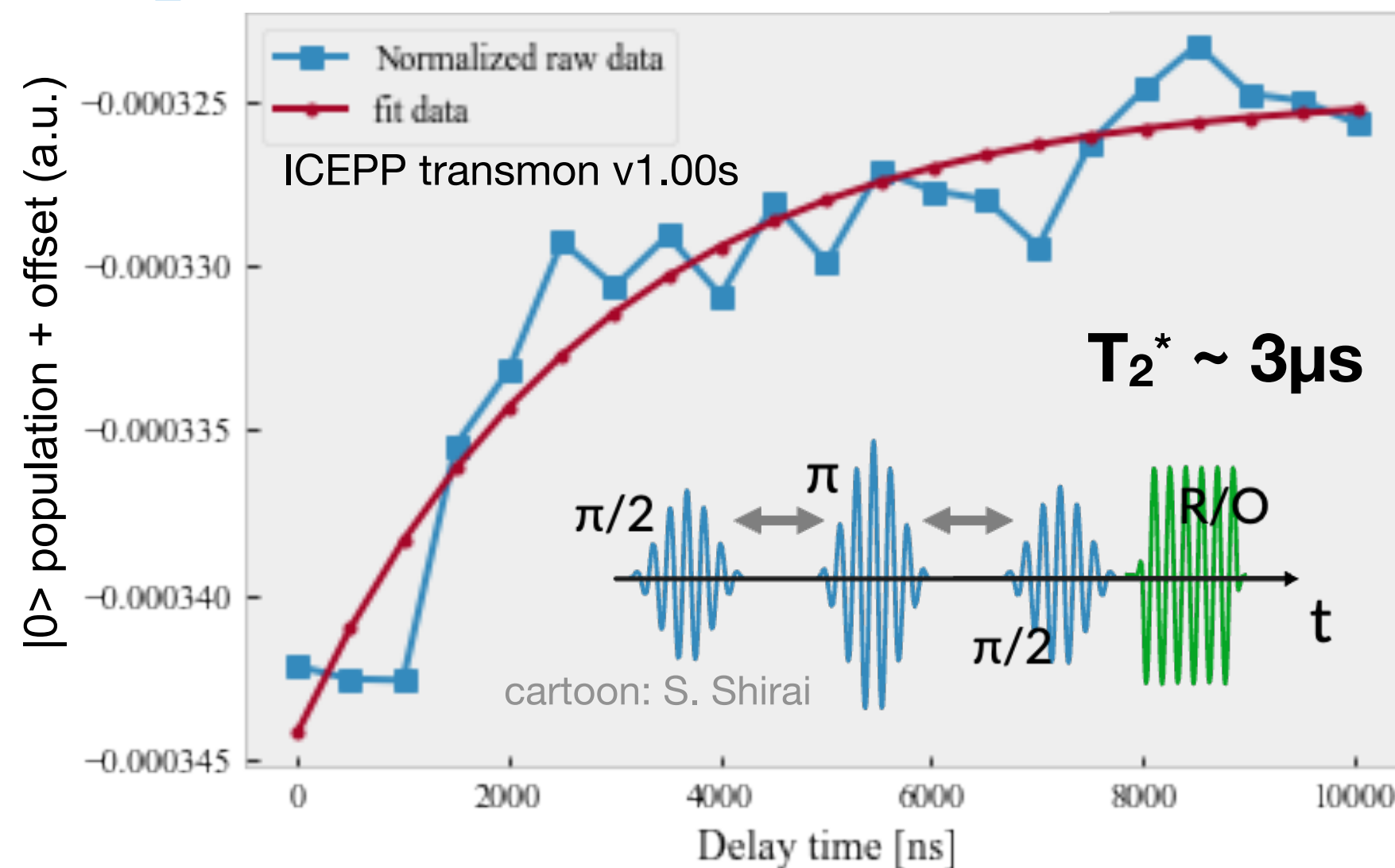
## 量子ビットの特性測定

$T_1$ : 縦緩和 ( $|1\rangle \rightarrow |0\rangle$ への脱励起)



自然放出、  
宇宙線による  
準粒子生成  
など

$T_2$ : 横緩和 ( $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の相対位相が崩れる)



電荷ノイズ、  
宇宙線による  
準粒子生成  
など

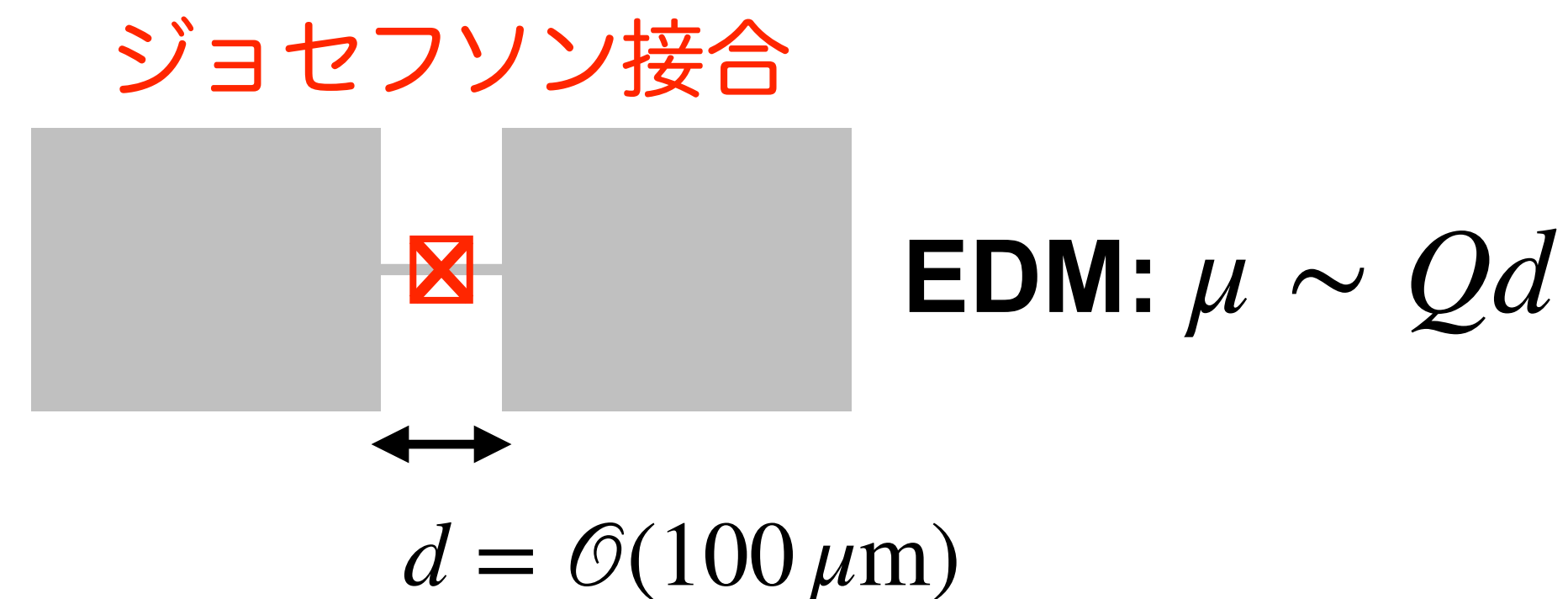


# 量子ハード技術・物理への応用

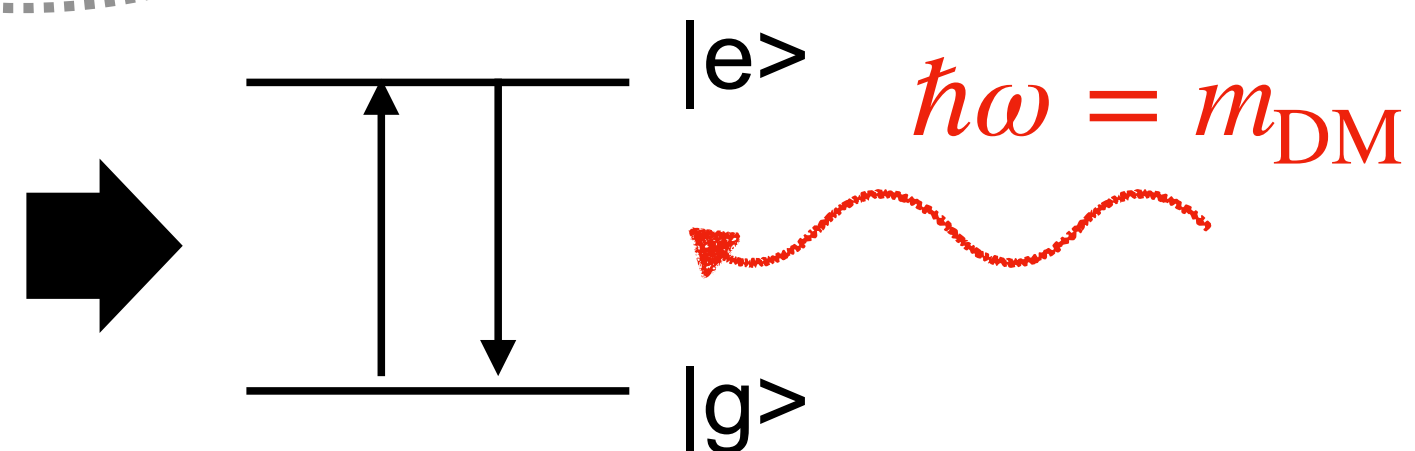
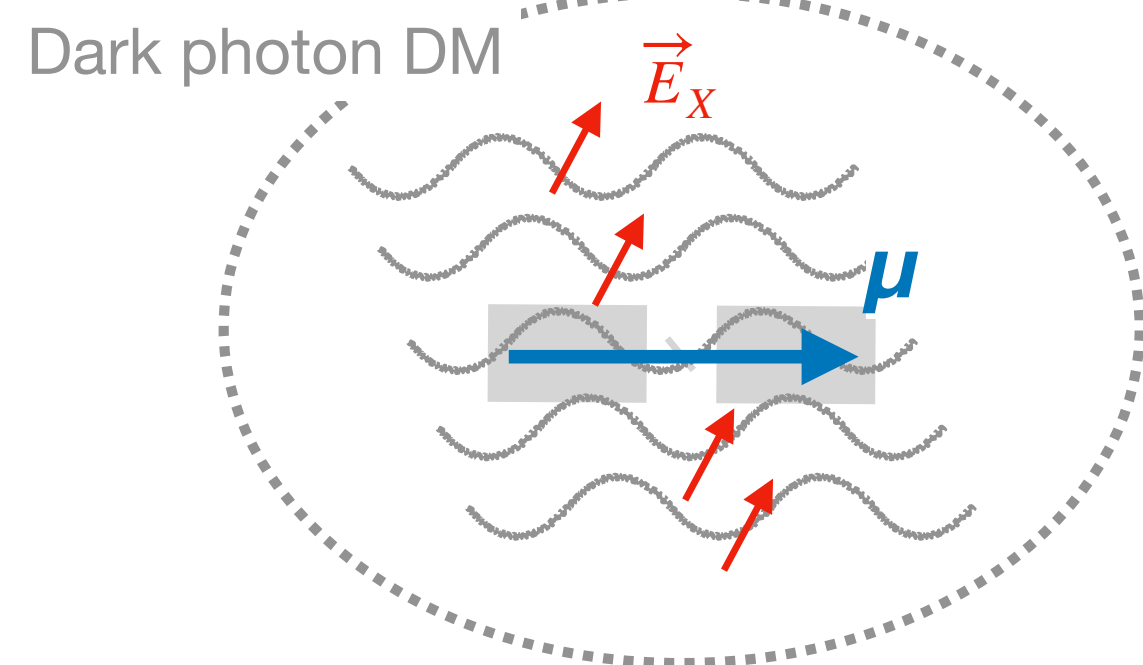
## 超伝導量子ビットを使った波状暗黒物質（アクシオン, 暗黒光子）の探索

### 超伝導量子ビットは電場測定に適したセンサー

- ▶ フォトンと強く結合：原子の $\mathcal{O}(10^6)$ 倍の強さ
- ▶ 低いエネルギー閾値  $\mathcal{O}(\mu\text{eV})$  を持つ
- ▶  $\mathcal{O}(100 \mu\text{s})$  のコヒーレンス時間内での状態操作が可能

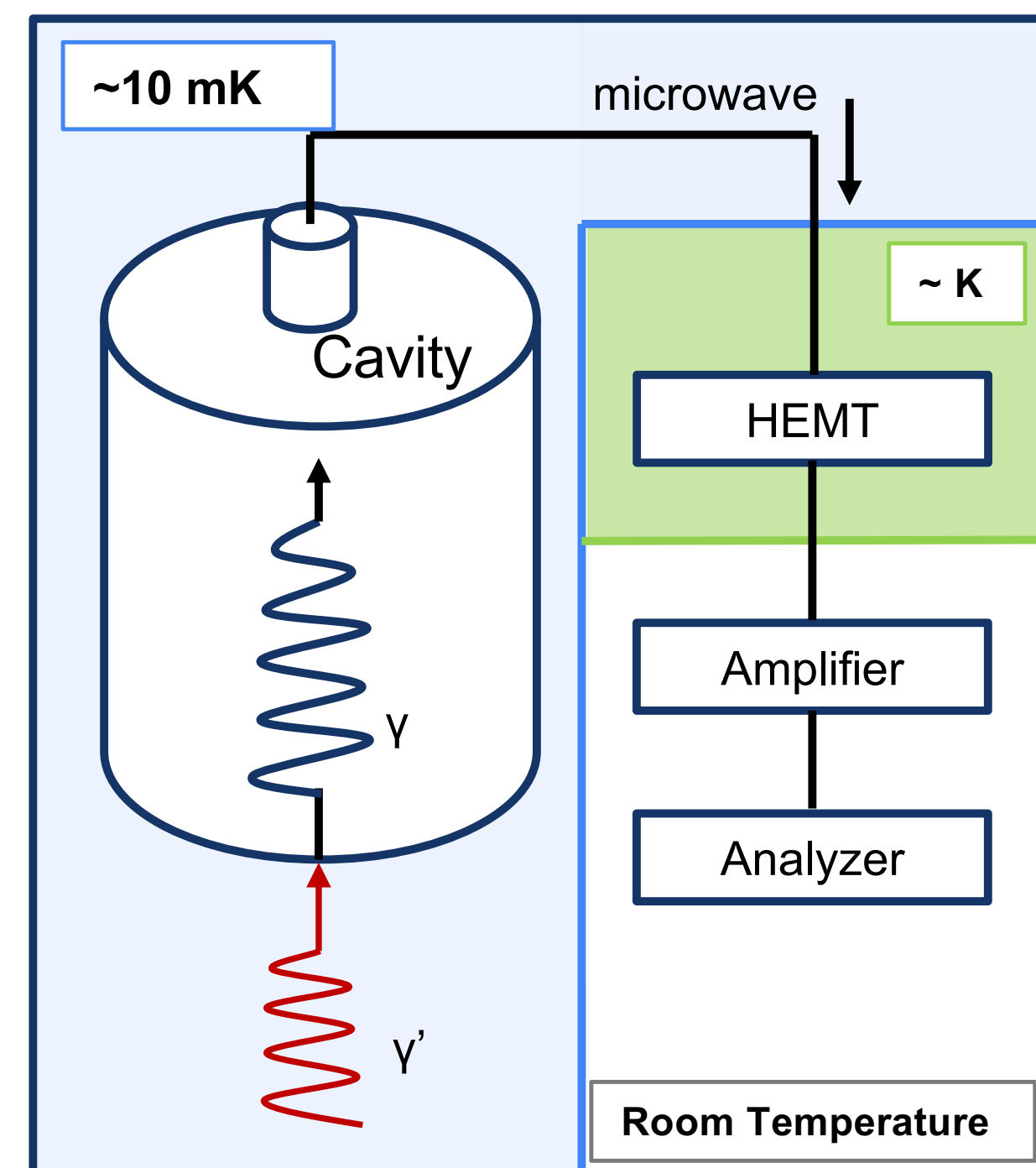


### 超伝導量子ビットの直接励起による探索



### キャビティ内の電磁場モード測定による探索

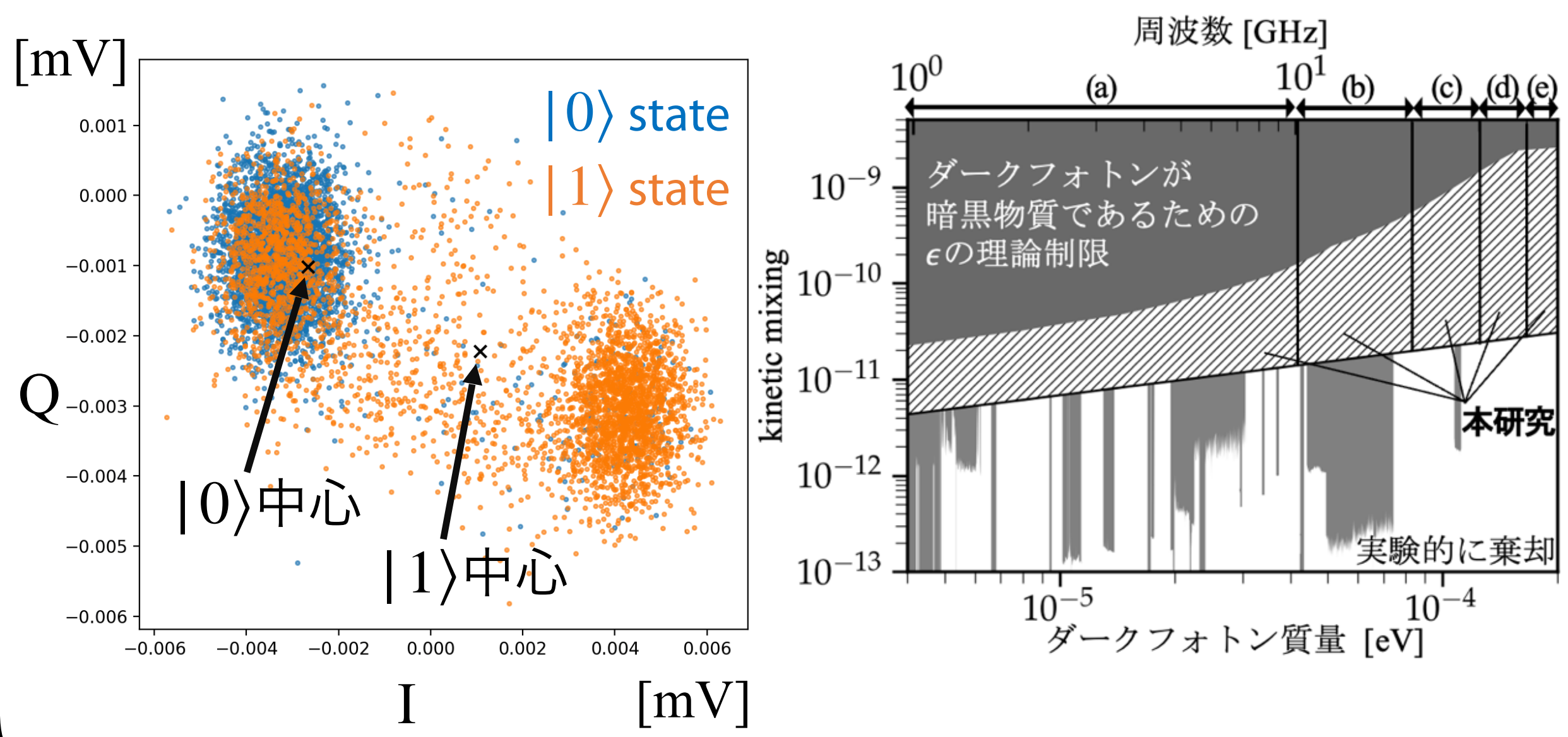
#### ハロースコープ実験



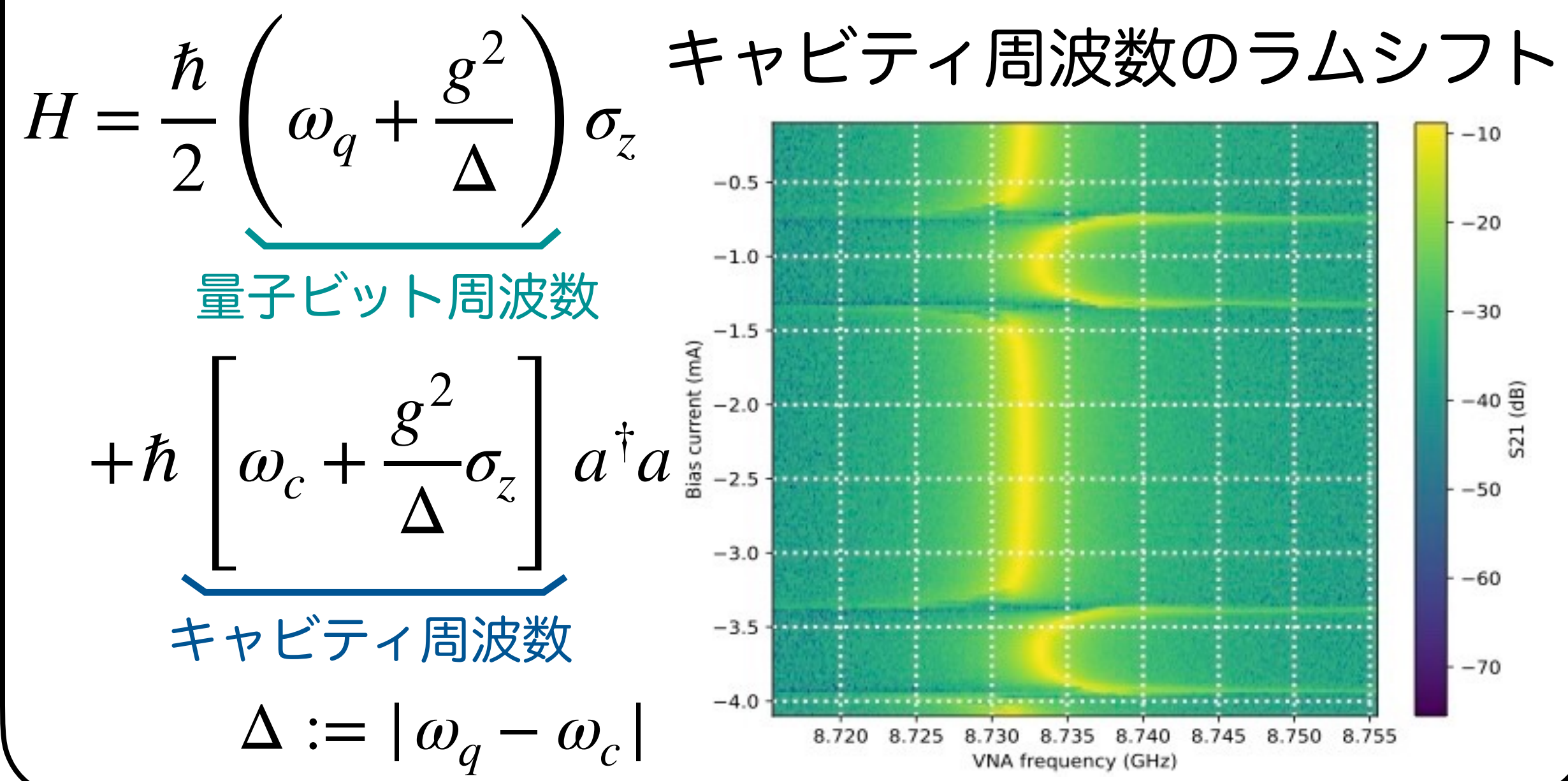
# 量子ハード技術・物理への応用

## 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

### 超伝導量子ビットの直接励起による探索



### キャビティ内の電磁場モード測定による探索



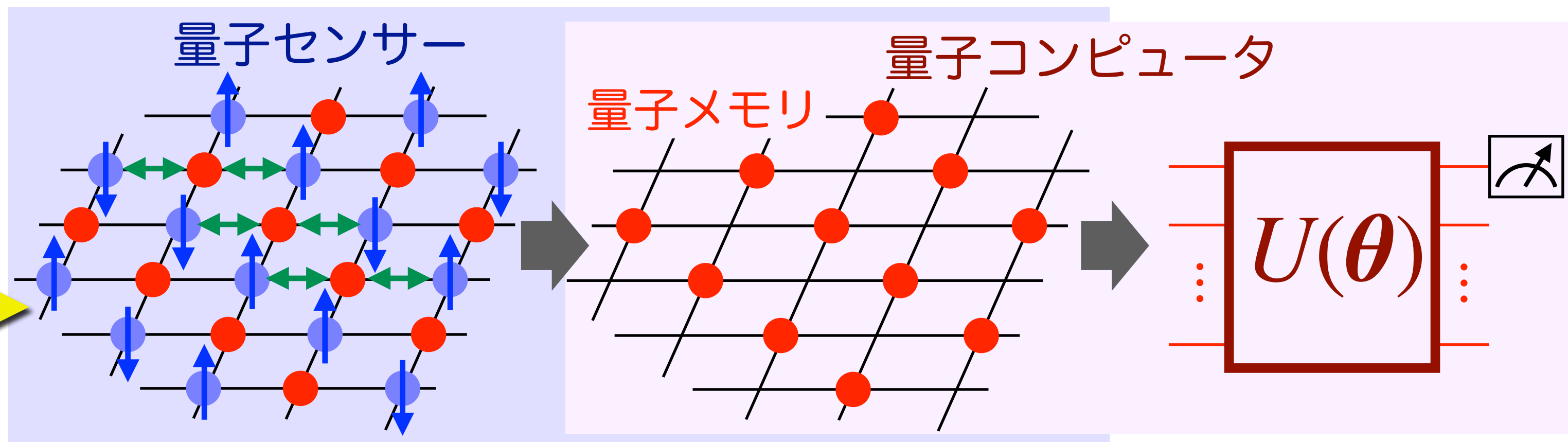
- ▶ コヒーレンス時間の向上、キャビティのクオリティ（Q値）の向上
- ▶  $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ 遷移の高周波数化 → 高質量領域での探索
- ▶ 10テスラ程度までの磁場耐性が目標 → アクシオン探索への応用

➡ 未踏の領域を探索可能

# いろいろな可能性

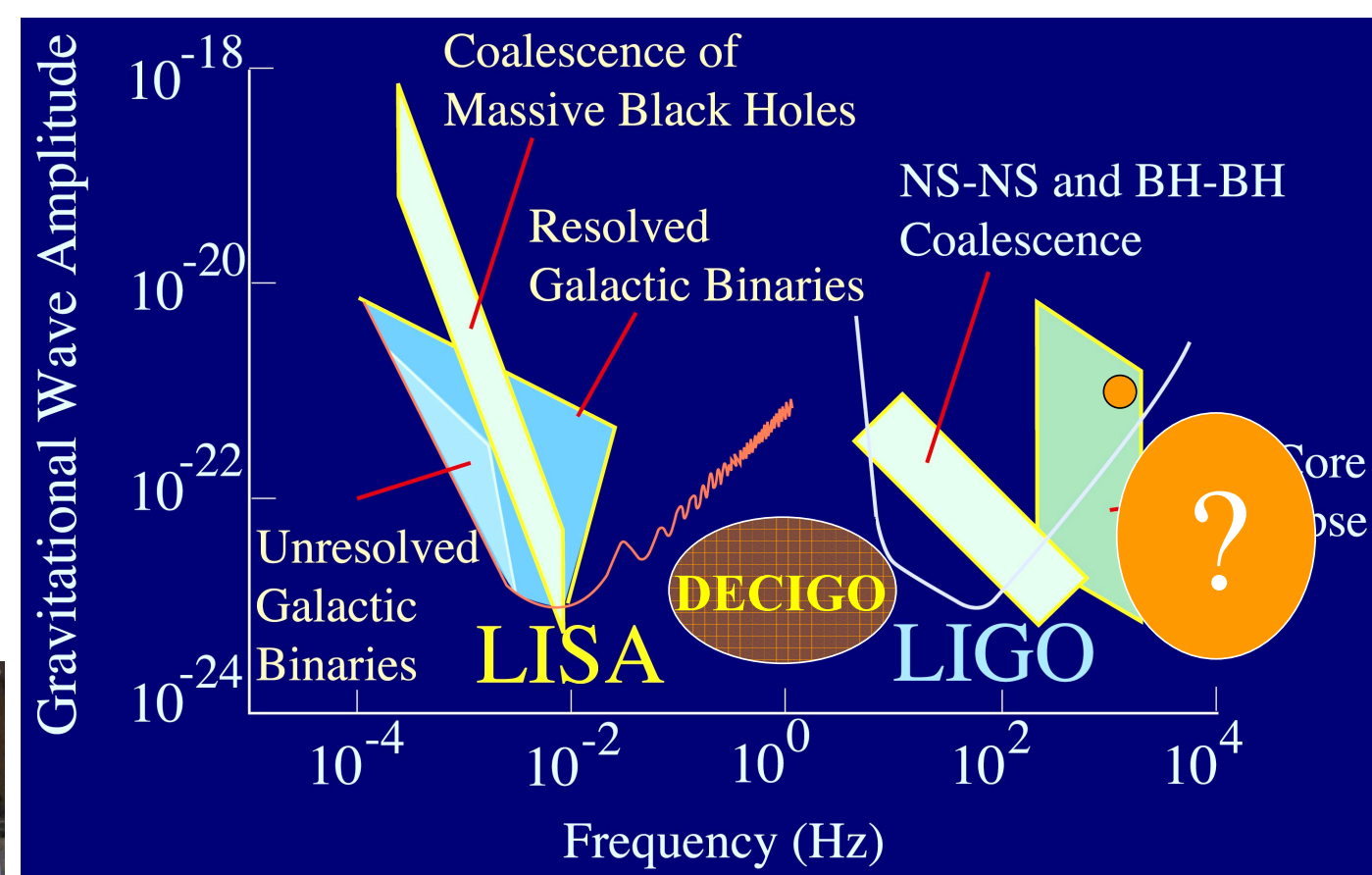
量子センサーデータへの量子計算の応用

量子センサーデータをコヒーレントに処理し、量子加速を実現する



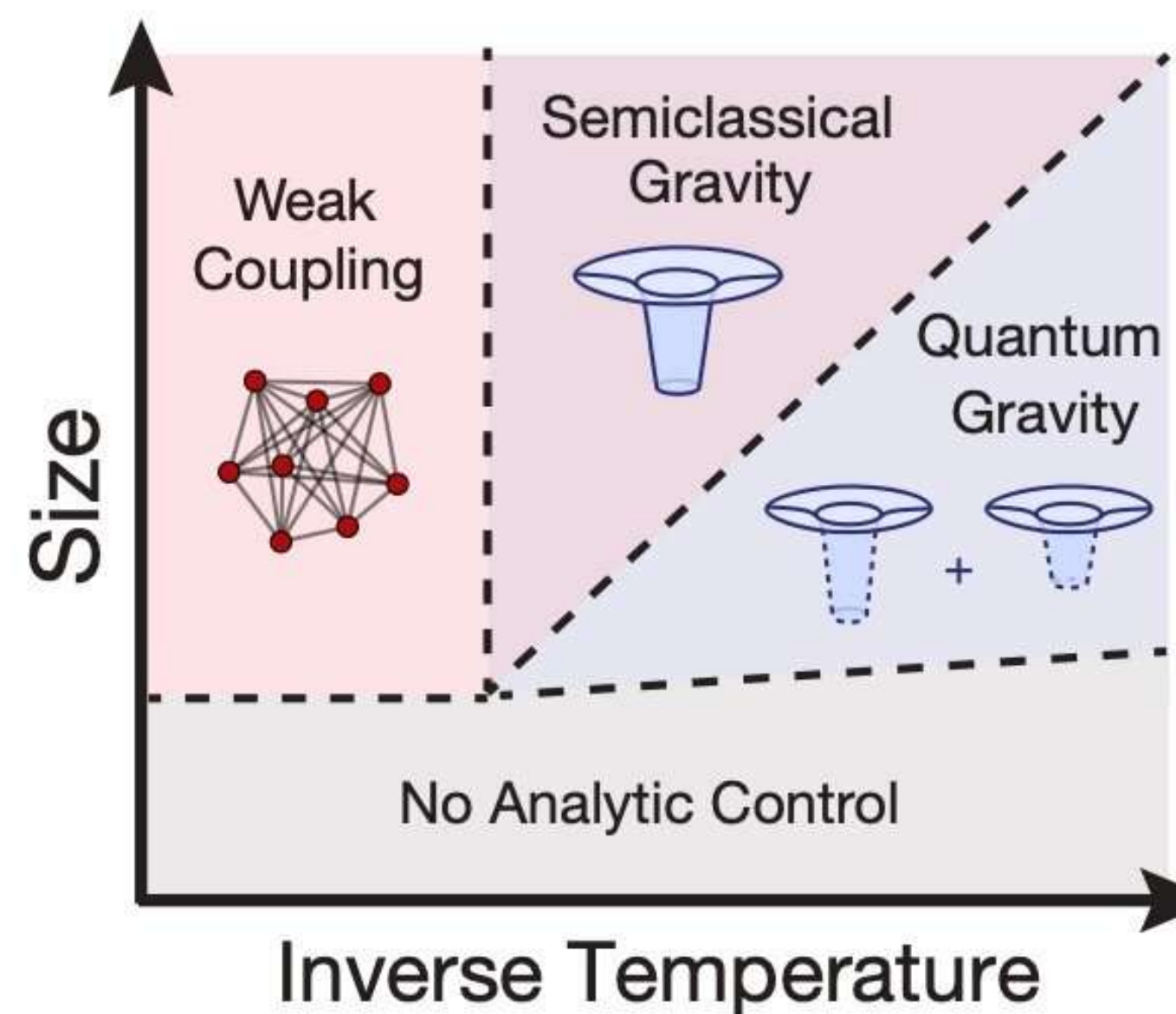
共振器ペアを使った重力波の探索

結合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



10 kHz – 10 MHz領域の重力波観測を目指す

量子重力の量子シミュレーション



Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) モデルでの量子多体シミュレーションによって、量子カオスの振る舞いを観測する

Fermilabとの共同研究

ICEPPでは、常に新しいアイデアに挑戦できます