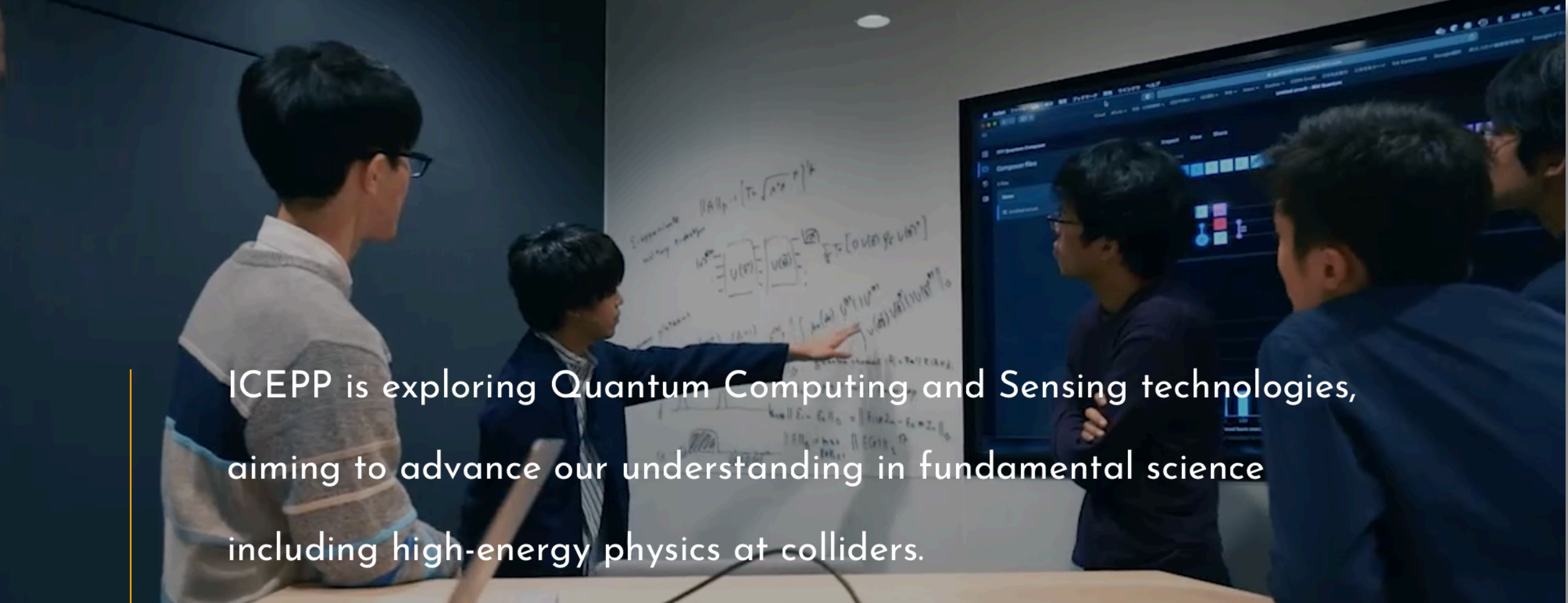


素粒子物理と量子コンピューティング

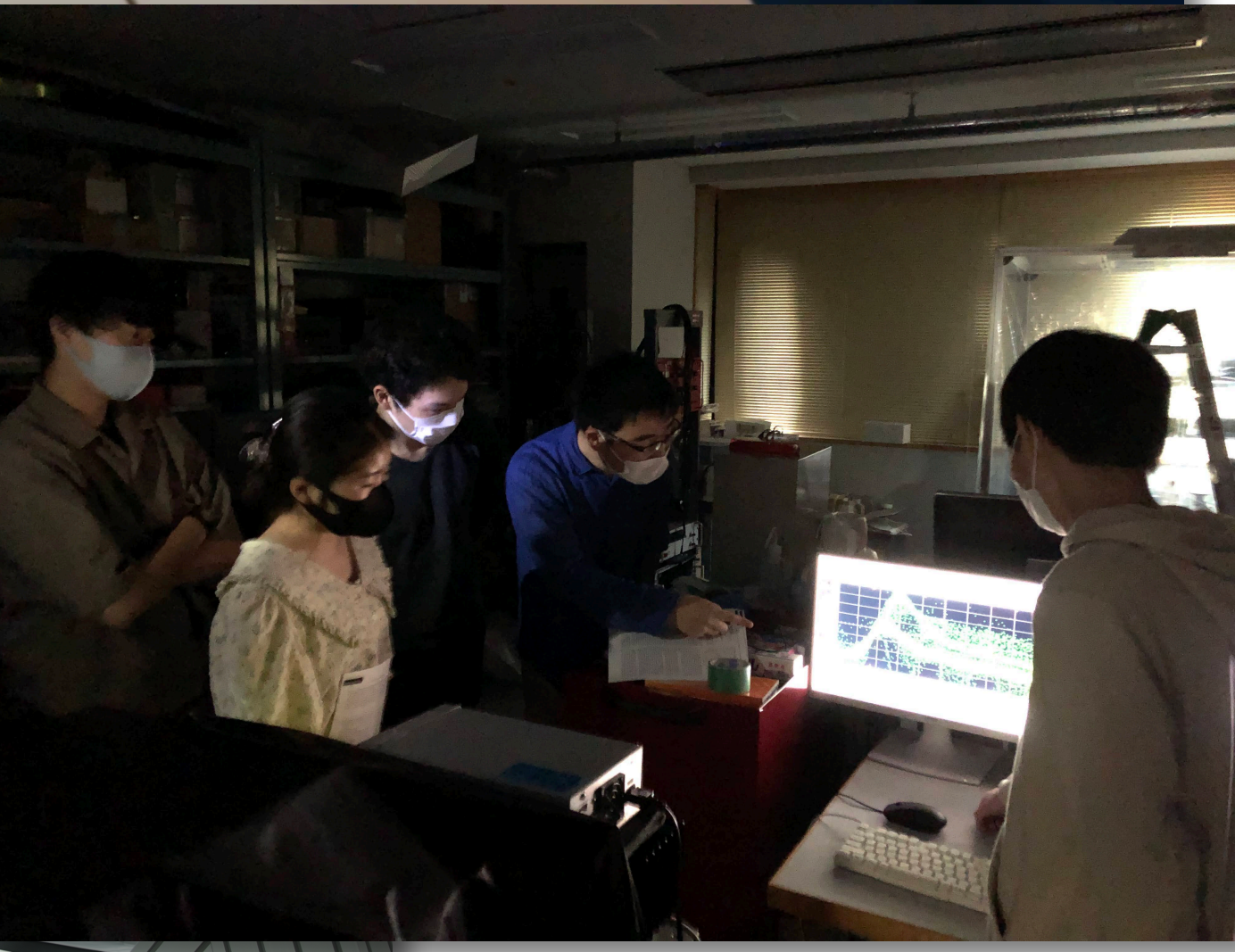
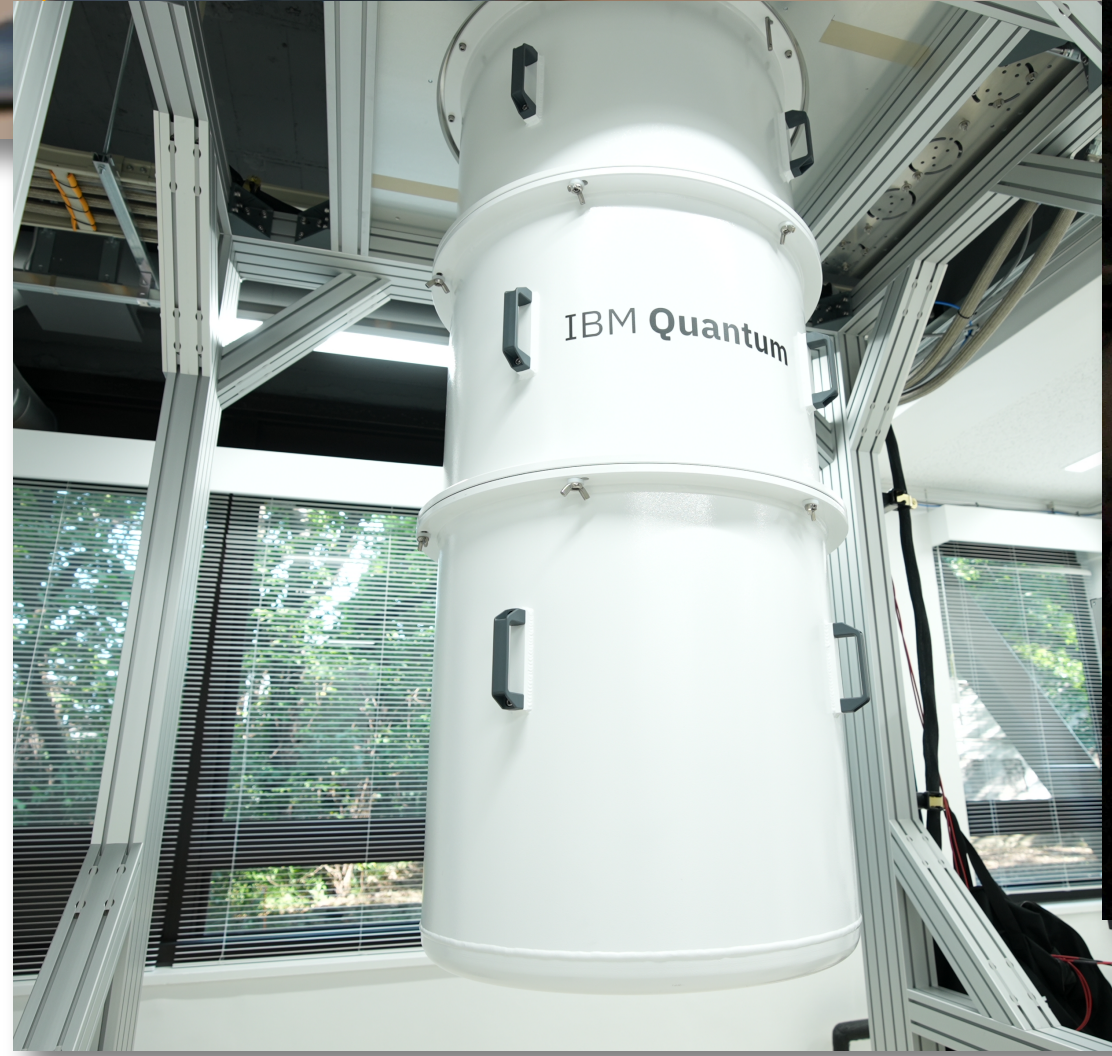
quantum-icepp.jp

素粒子物理国際研究センター
寺師 弘二

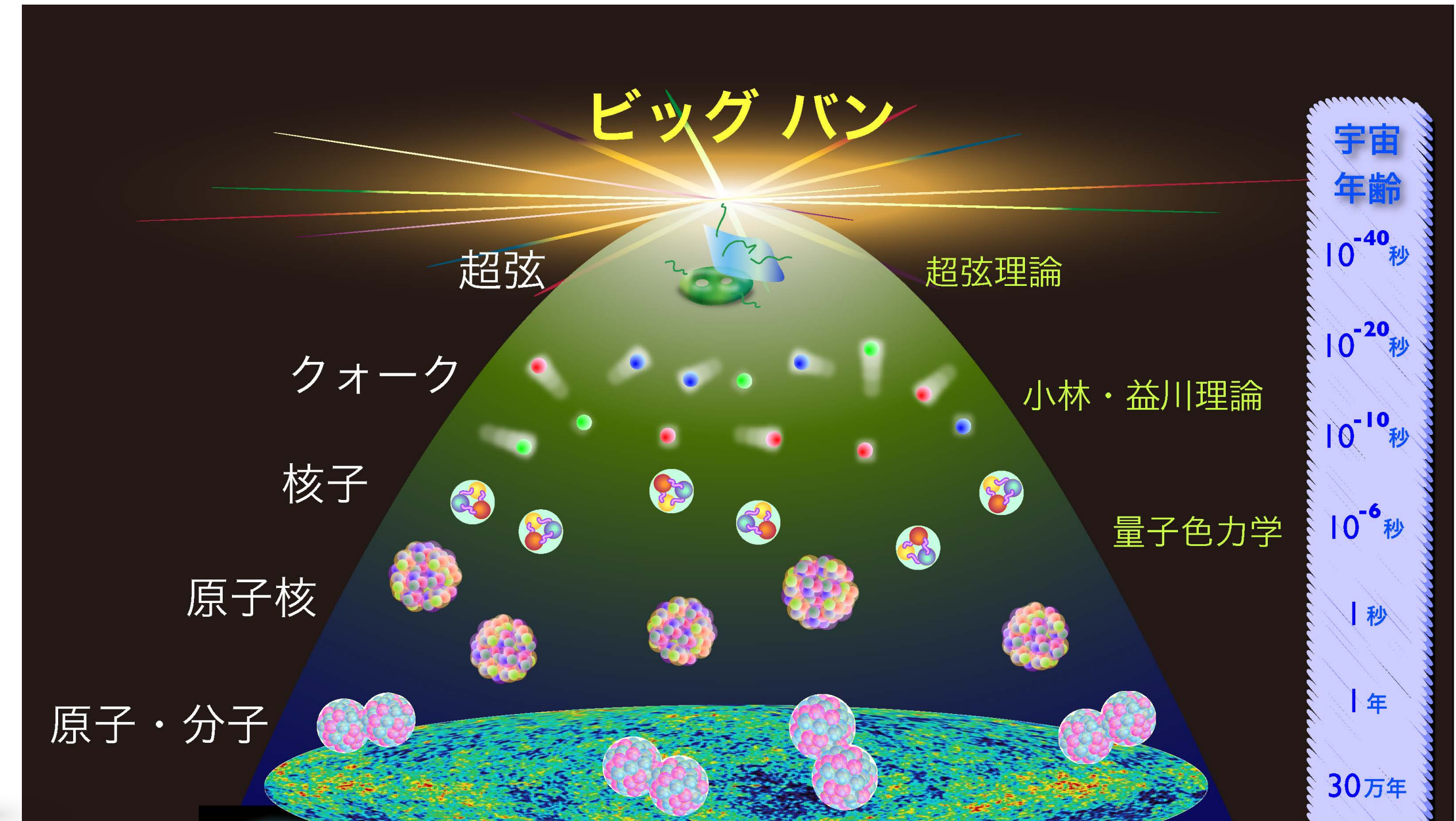
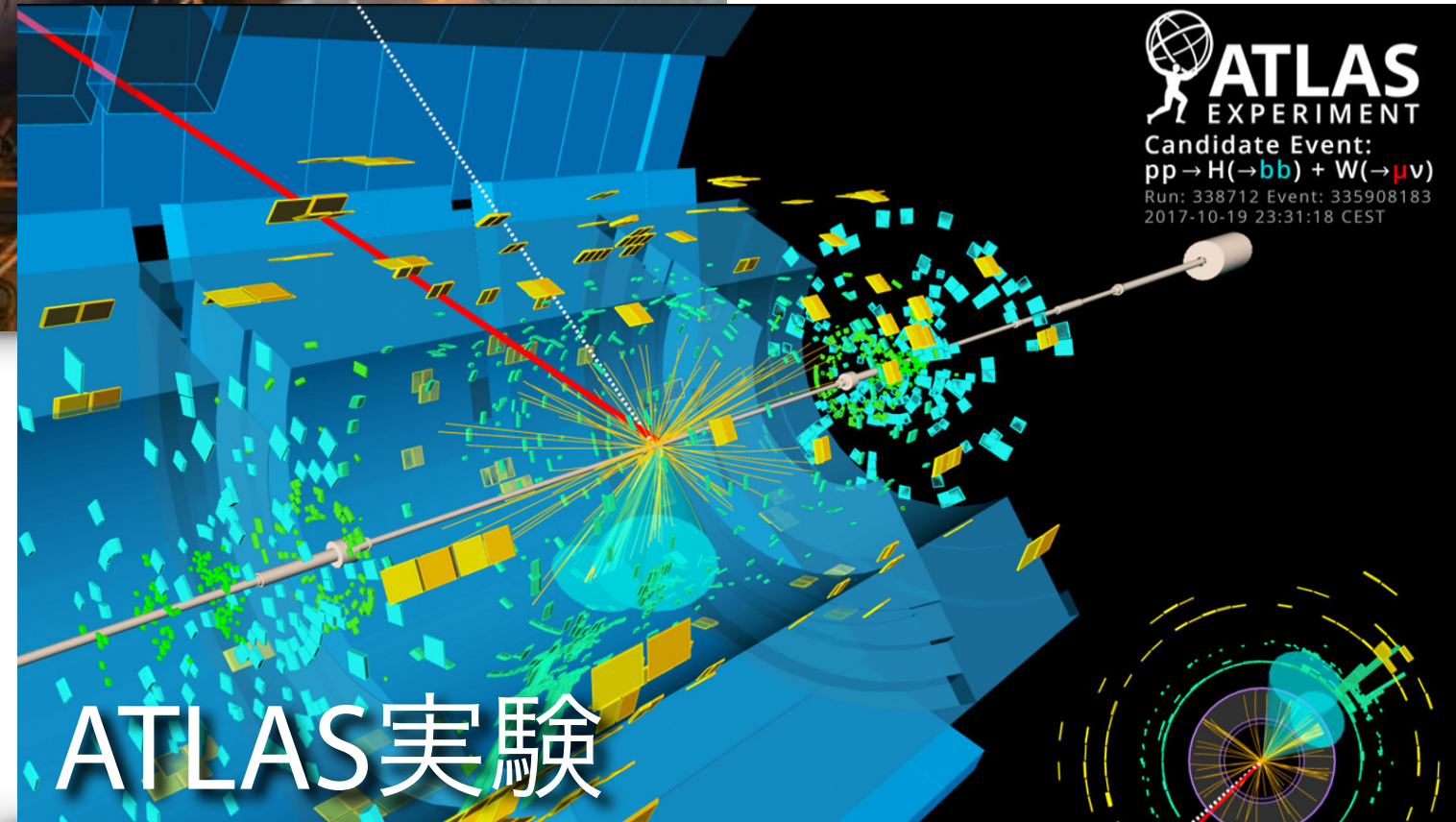
ATLAS実験 学部生向け特別セミナー
2022年5月30日



ICEPP is exploring Quantum Computing and Sensing technologies, aiming to advance our understanding in fundamental science including high-energy physics at colliders.



なぜ量子コンピュータを考えるのか？



素粒子・宇宙（基礎物理）への量子コンピューティングの応用

- ▶ 素粒子と量子には、潜在的に親和性がある
- ▶ ビッグデータを使うので、計算機科学はとても大事



量子情報による素粒子・宇宙の研究

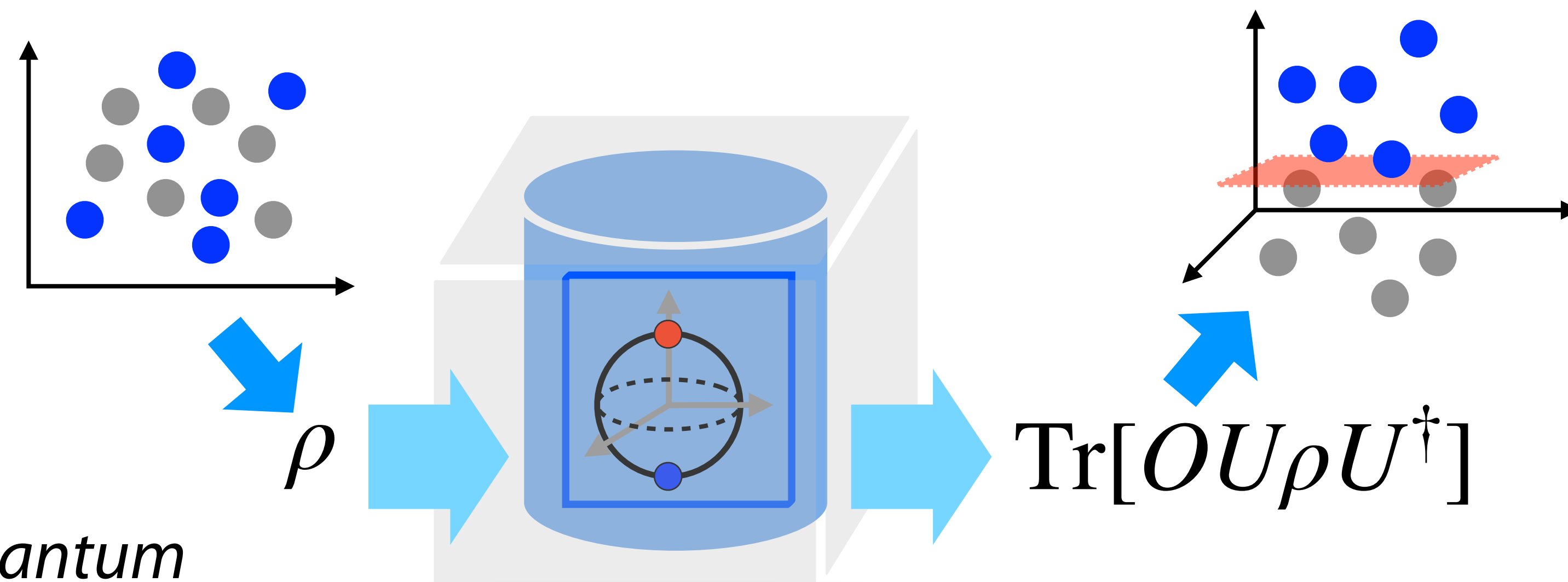
なぜ量子コンピュータを考えるのか？



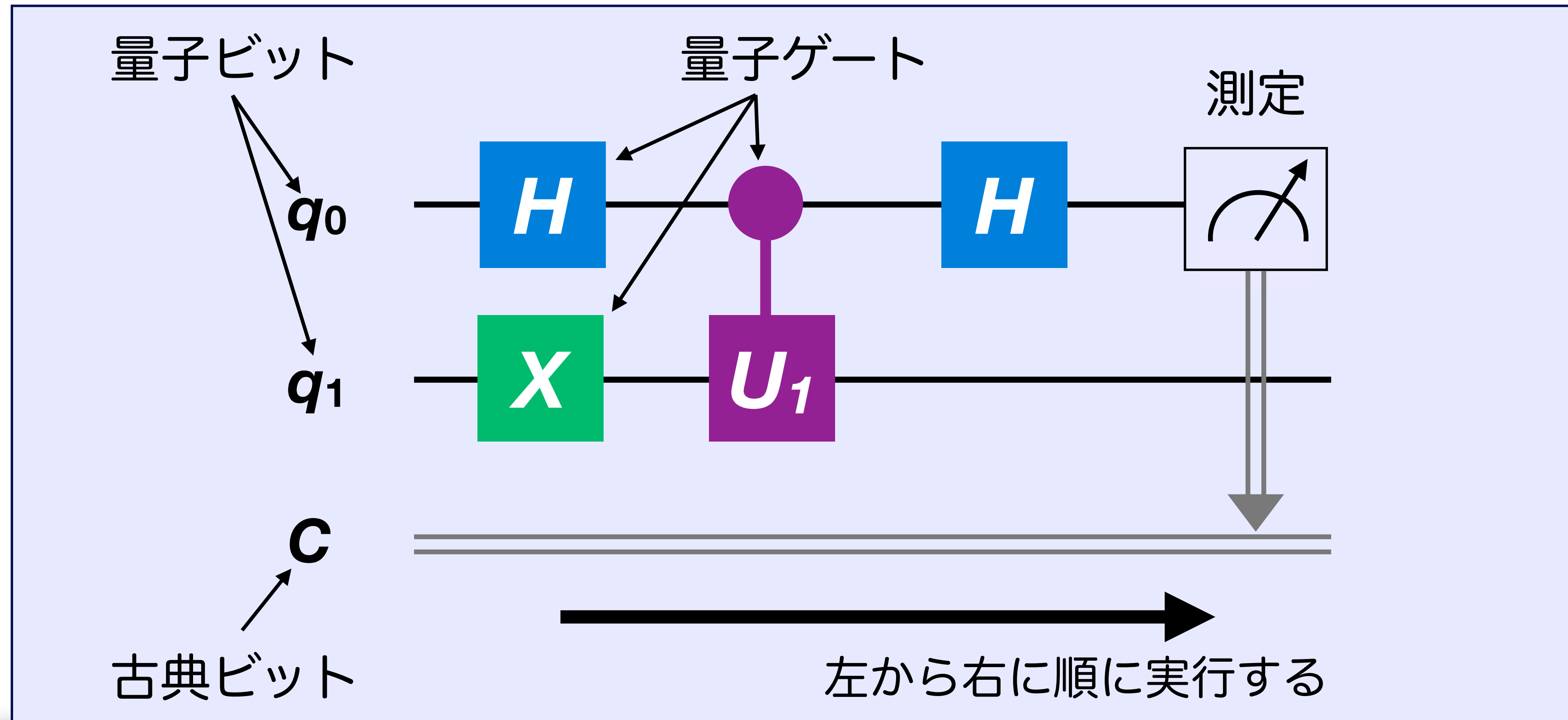
量子コンピューティングの進展は目覚ましい

- ▶ NISQを活用できる可能性が高まっている
- ▶ 特に「量子機械学習」が大きく進化してきた

NISQ = *Noisy Intermediate Scale Quantum*



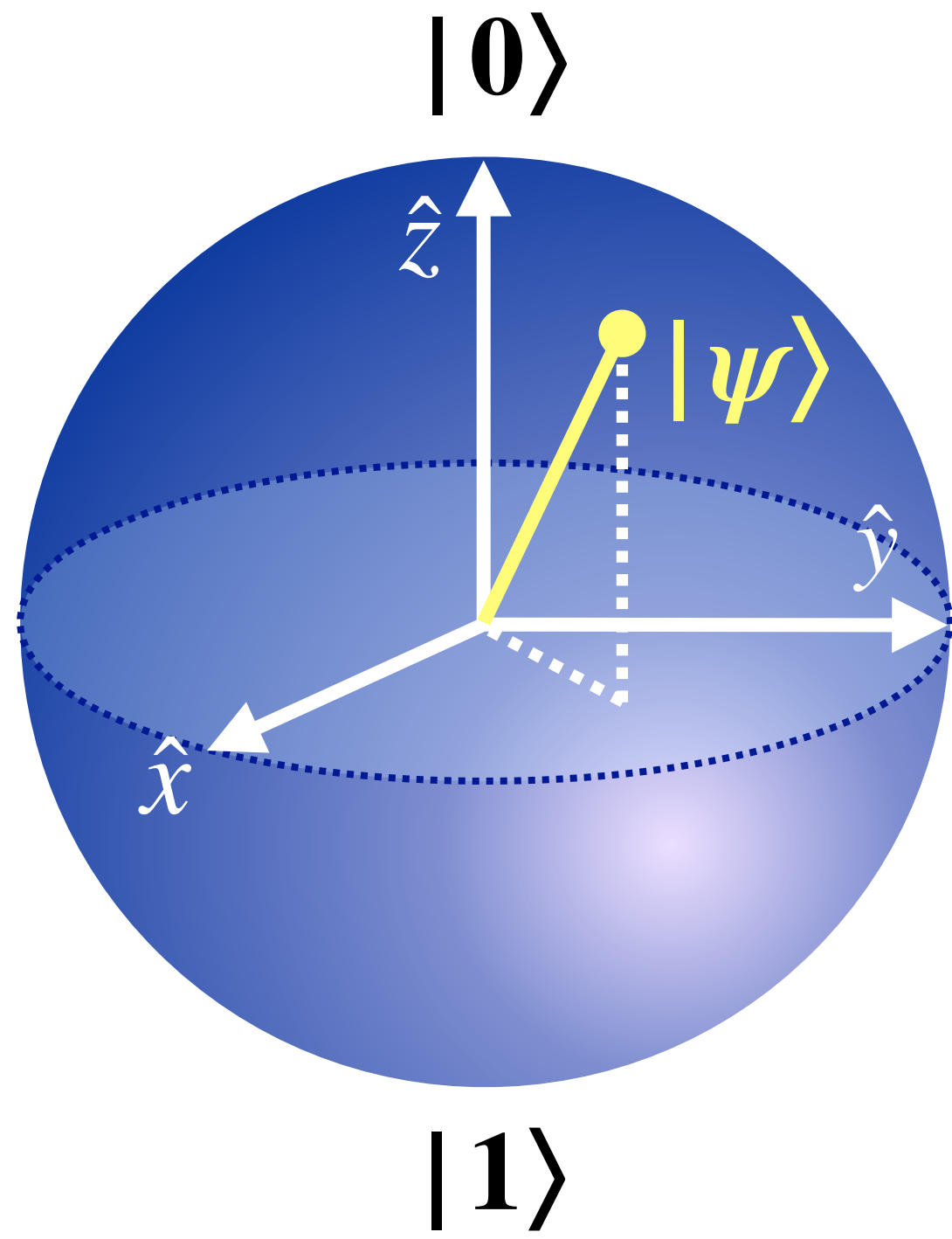
量子回路モデルの量子コンピュータ



- ▶ 量子ゲート (=ユニタリー演算) を組み合わせて「量子回路」を作る
- ▶ 回路からの出力状態を測定し、結果を得る (→ 得られるのは古典ビット列)
- ▶ 原理的にはユニバーサルな計算が可能

量子ビット

量子ビット = 状態操作が可能な2準位系の「モノ」



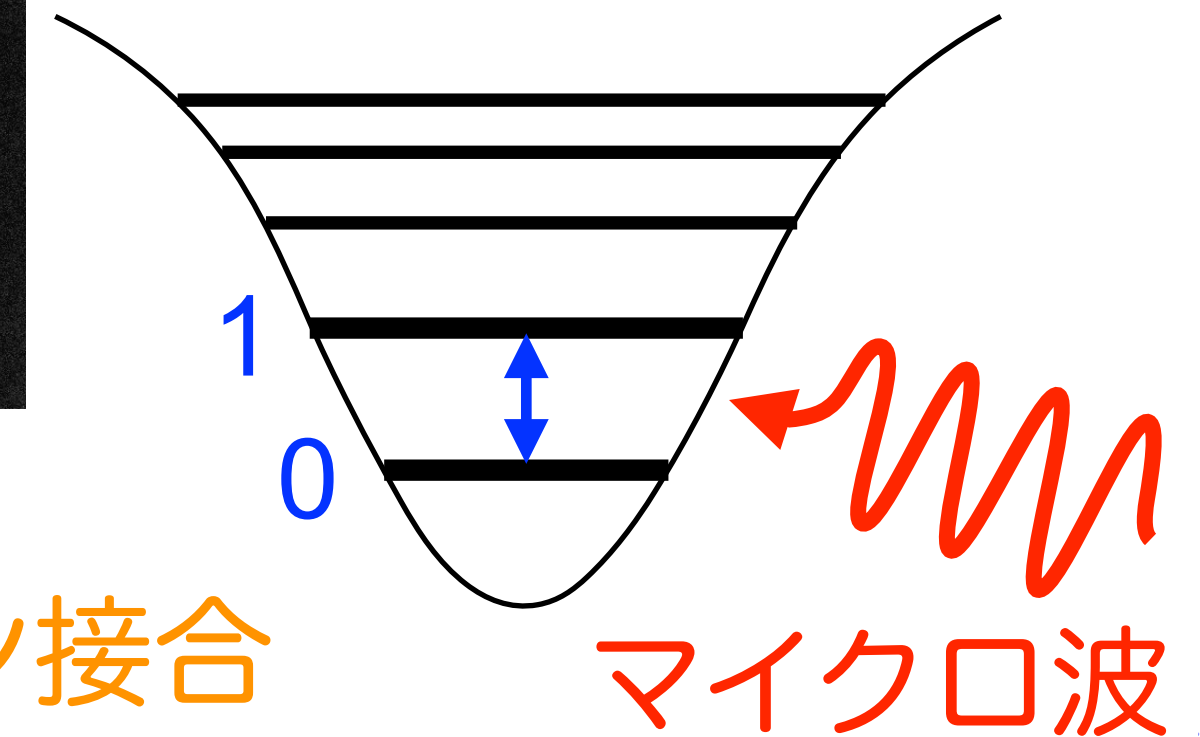
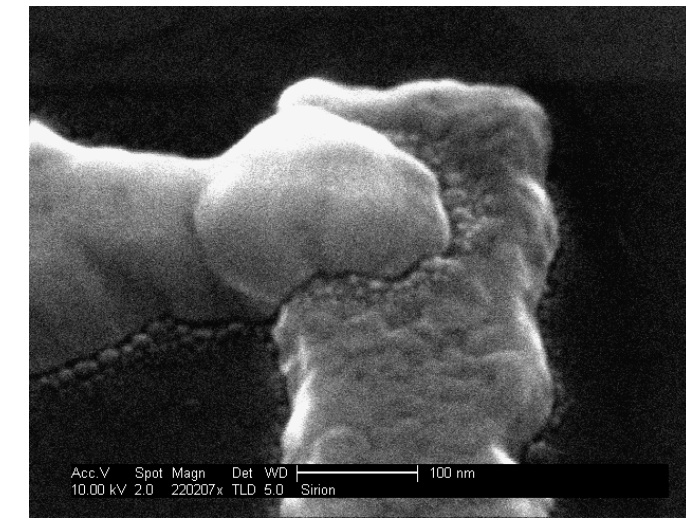
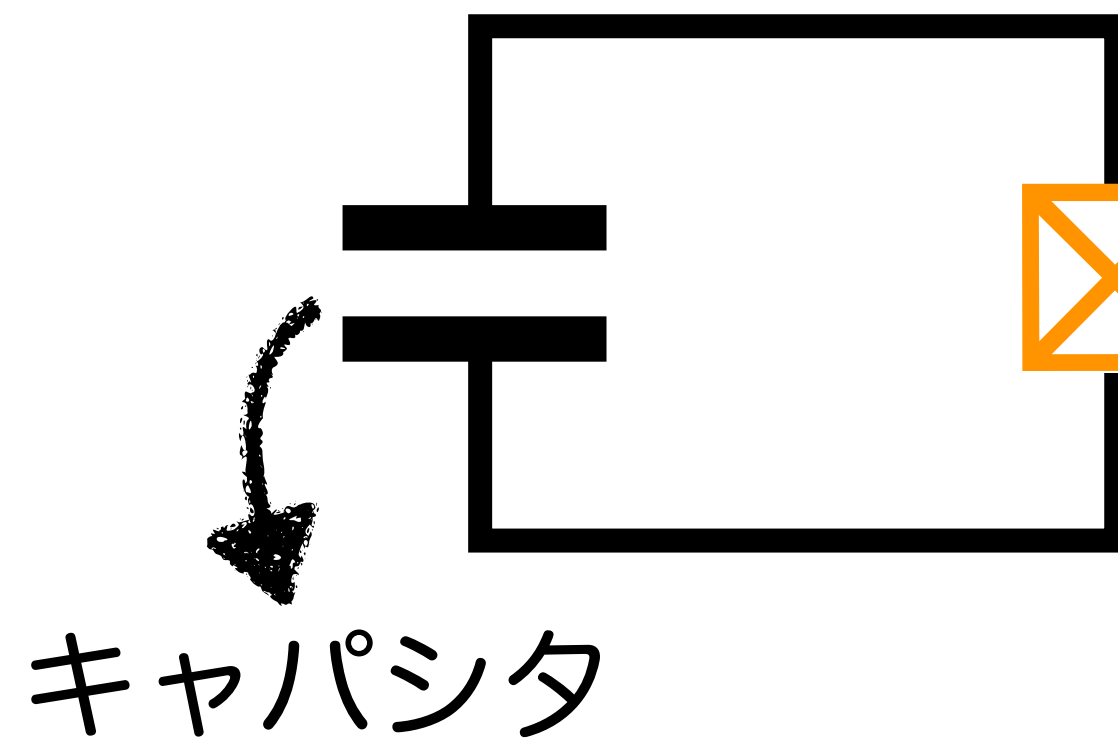
$|0\rangle$ と $|1\rangle$ の任意の重ね合わせ状態を表現可能

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

超伝導量子ビット

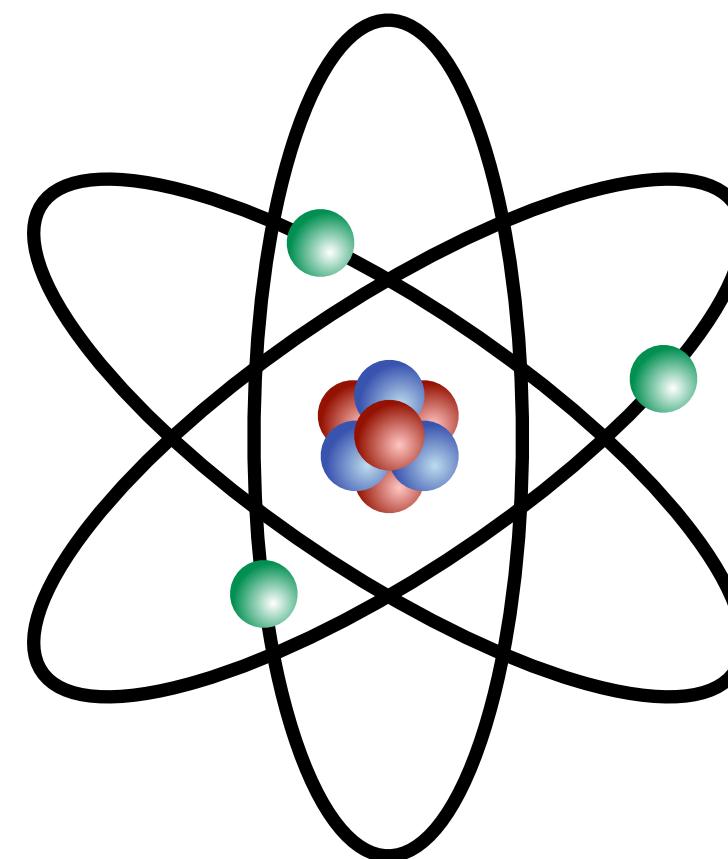
“人工”原子

大きさ $\sim 10^{-3}$ m

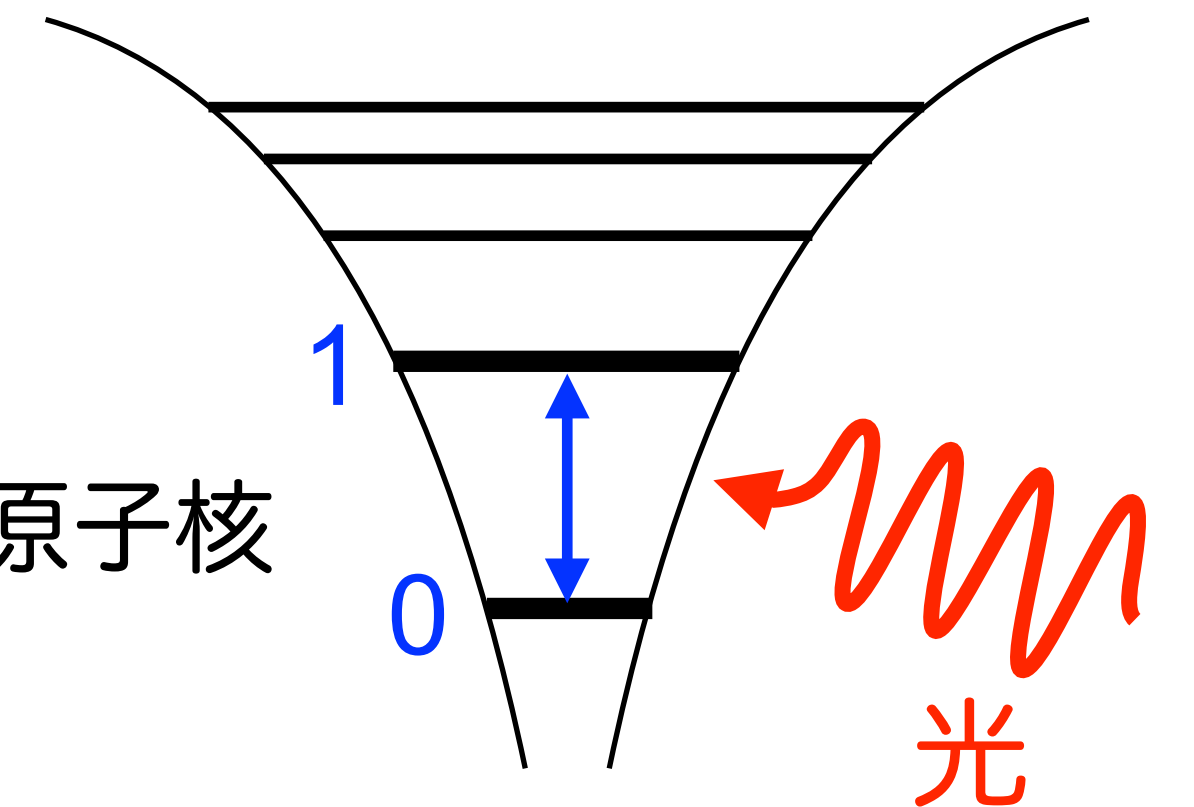


原子

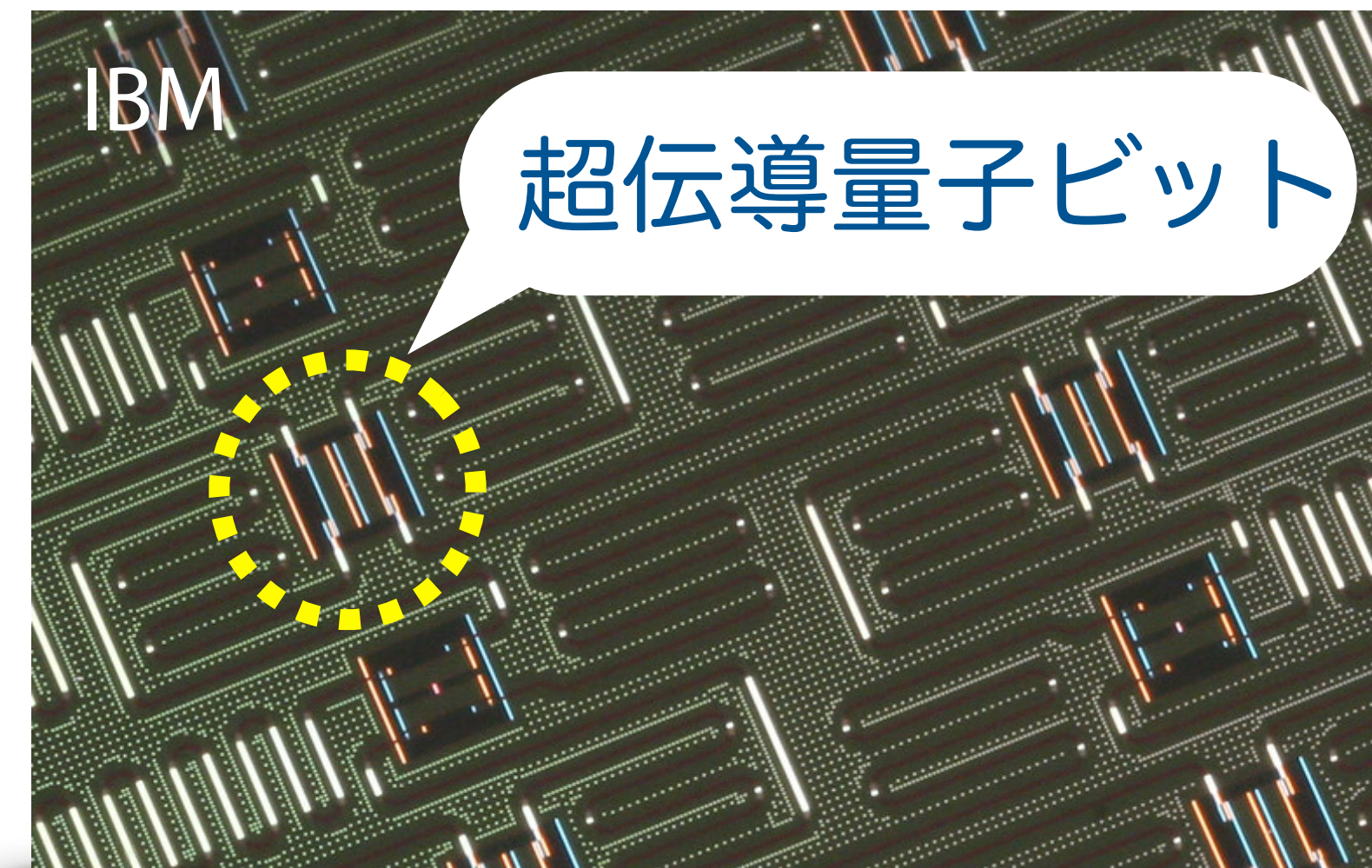
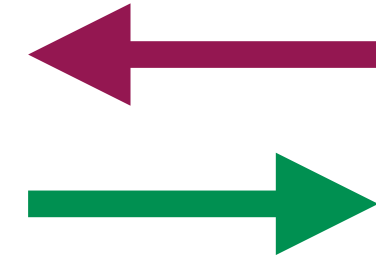
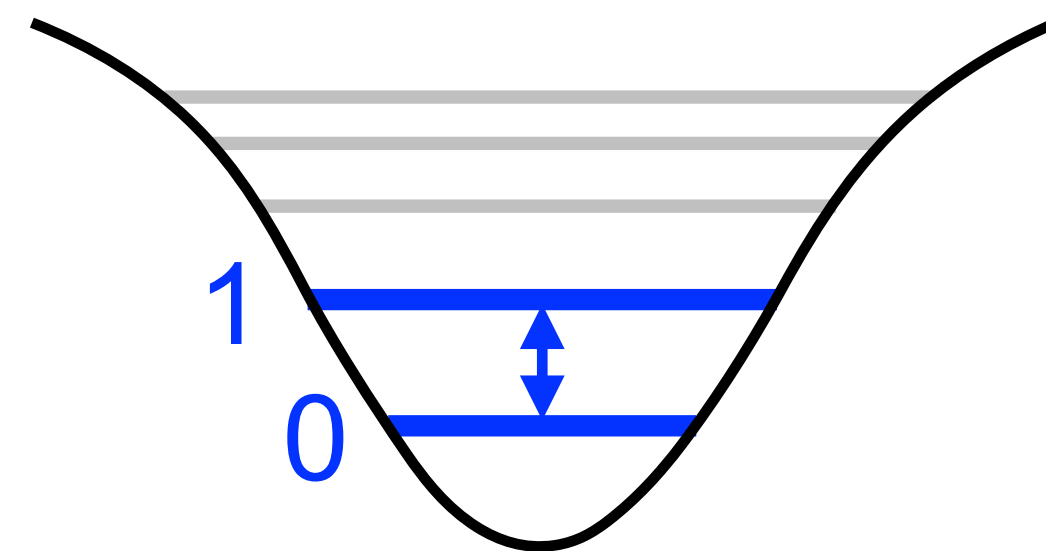
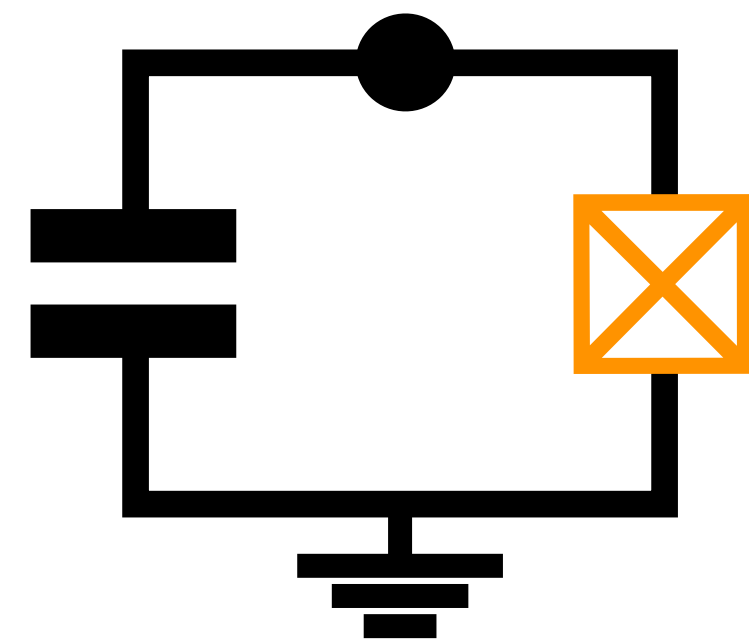
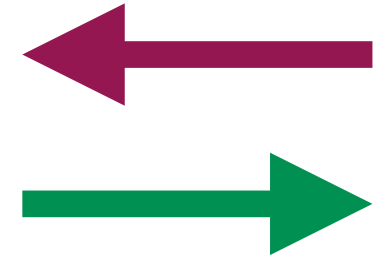
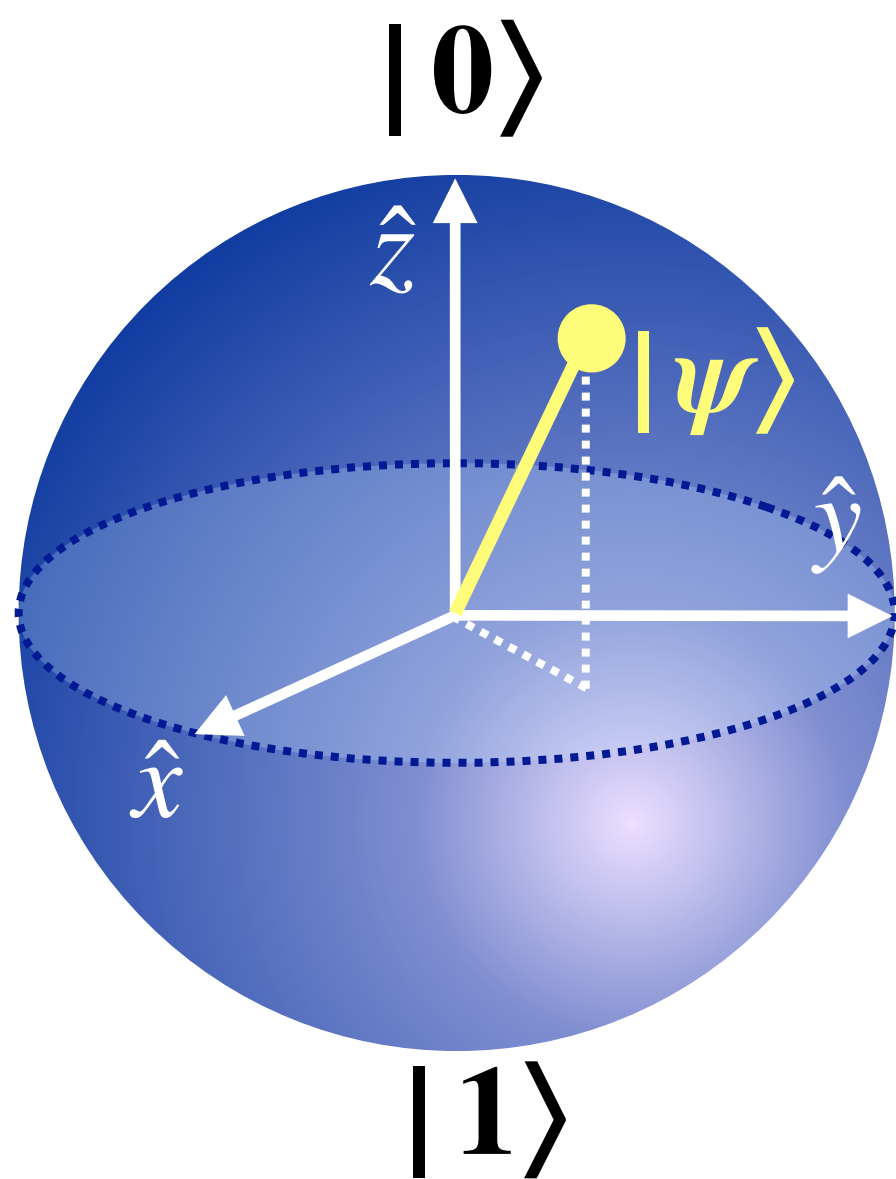
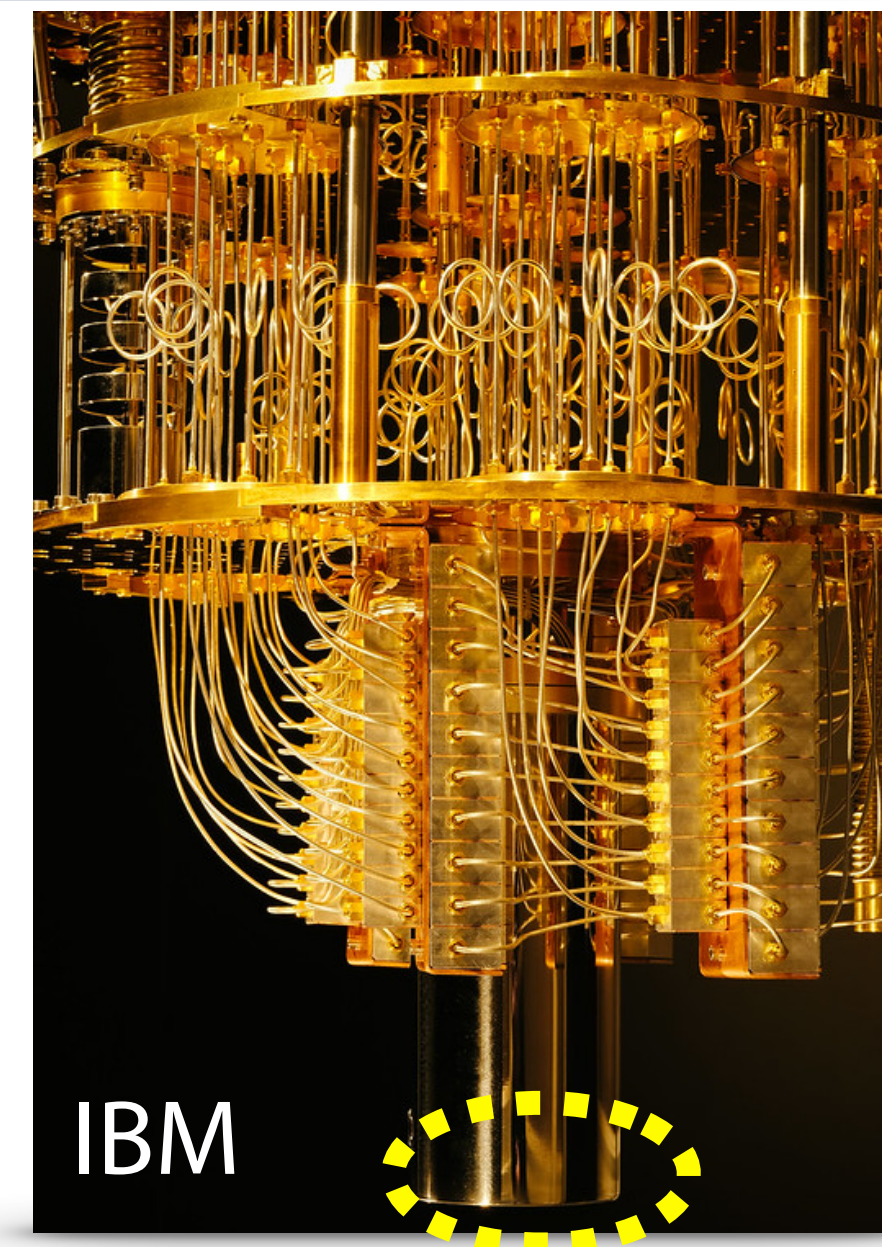
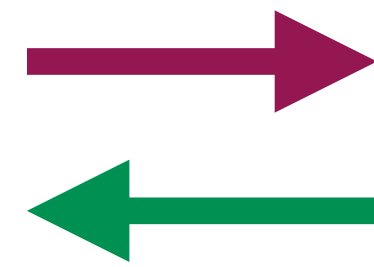
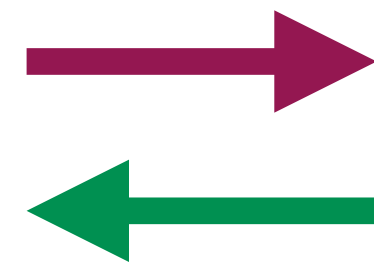
大きさ $\sim 10^{-10}$ m



- 陽子
 - 中性子
 - 電子
- } 原子核



量子コンピュータはどう動くのか？

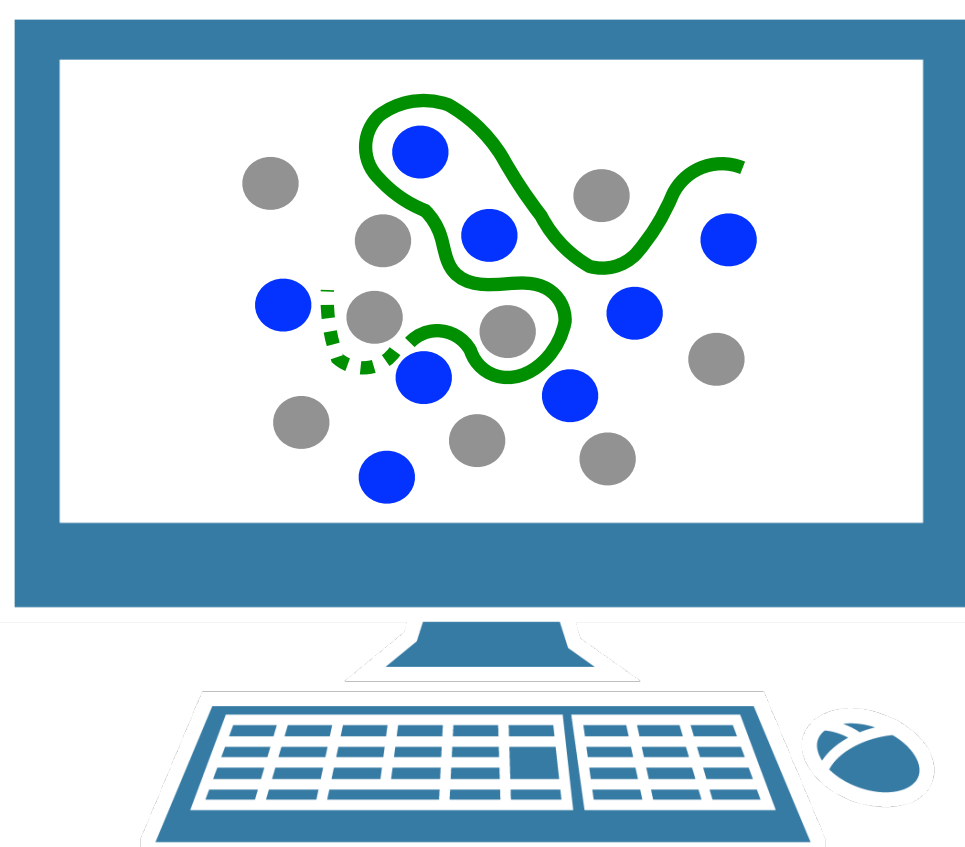


素粒子物理への応用

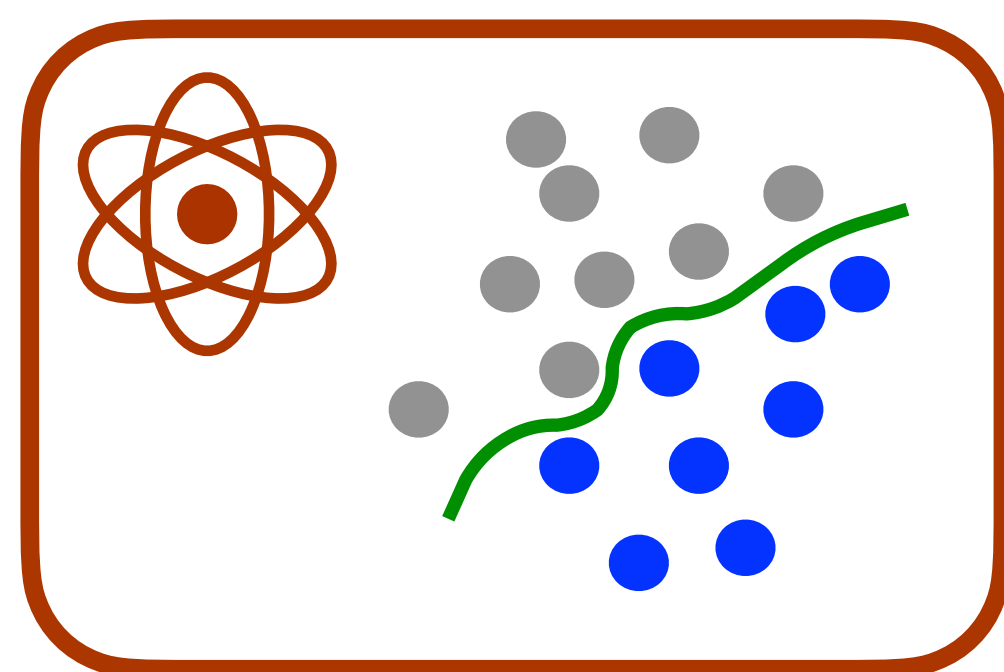
2つの例を考えてみたい

データから新現象（例えば超対称性粒子の生成）を見つけ出す

古典機械学習



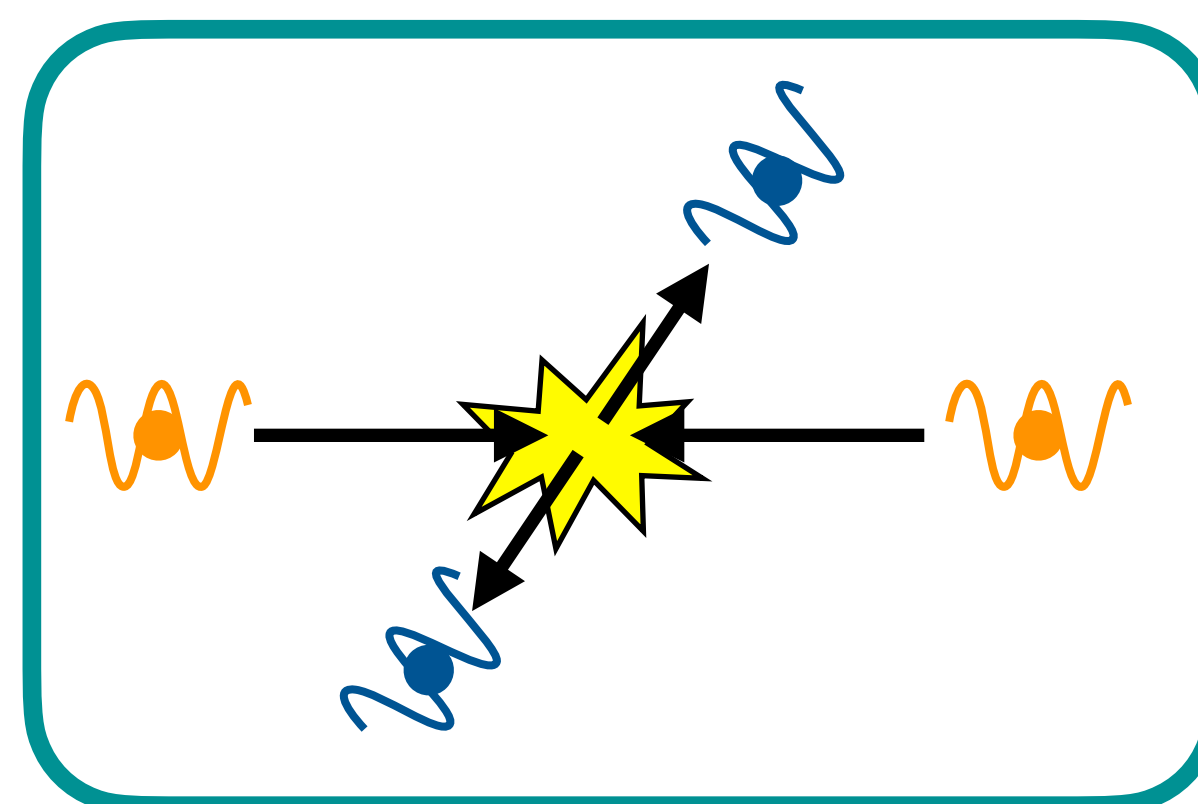
量子機械学習



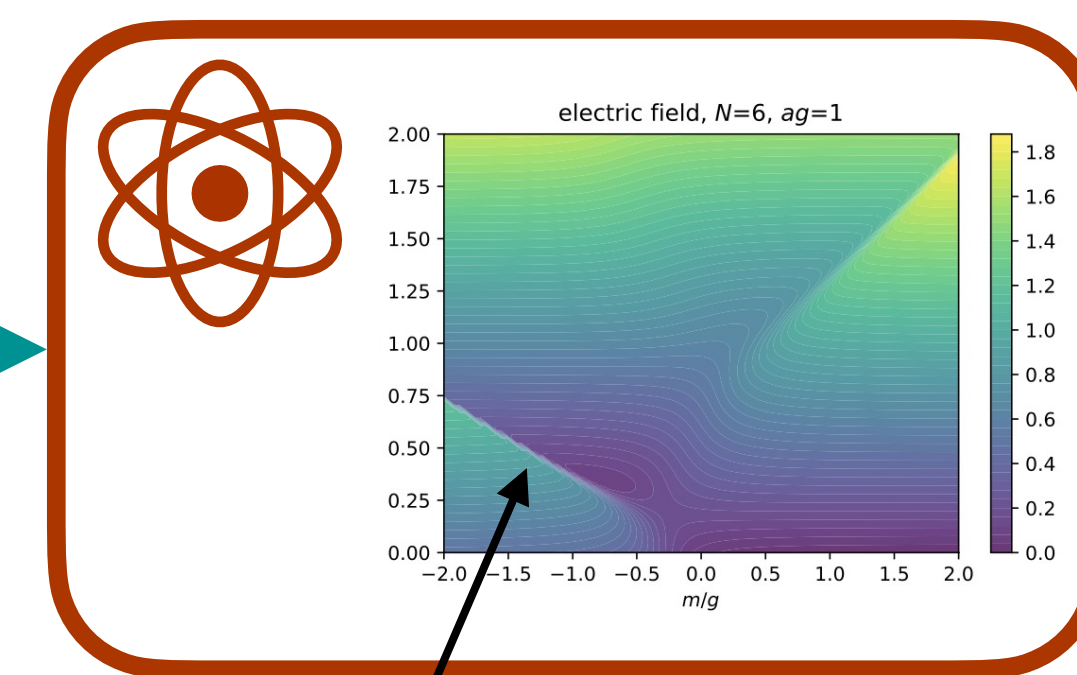
- 新粒子を含む事象
- 背景雑音の事象

場の量子論の物理的性質を機械学習で引き出す

量子ダイナミクスシミュレーション



量子機械学習



例えば相転移の検出

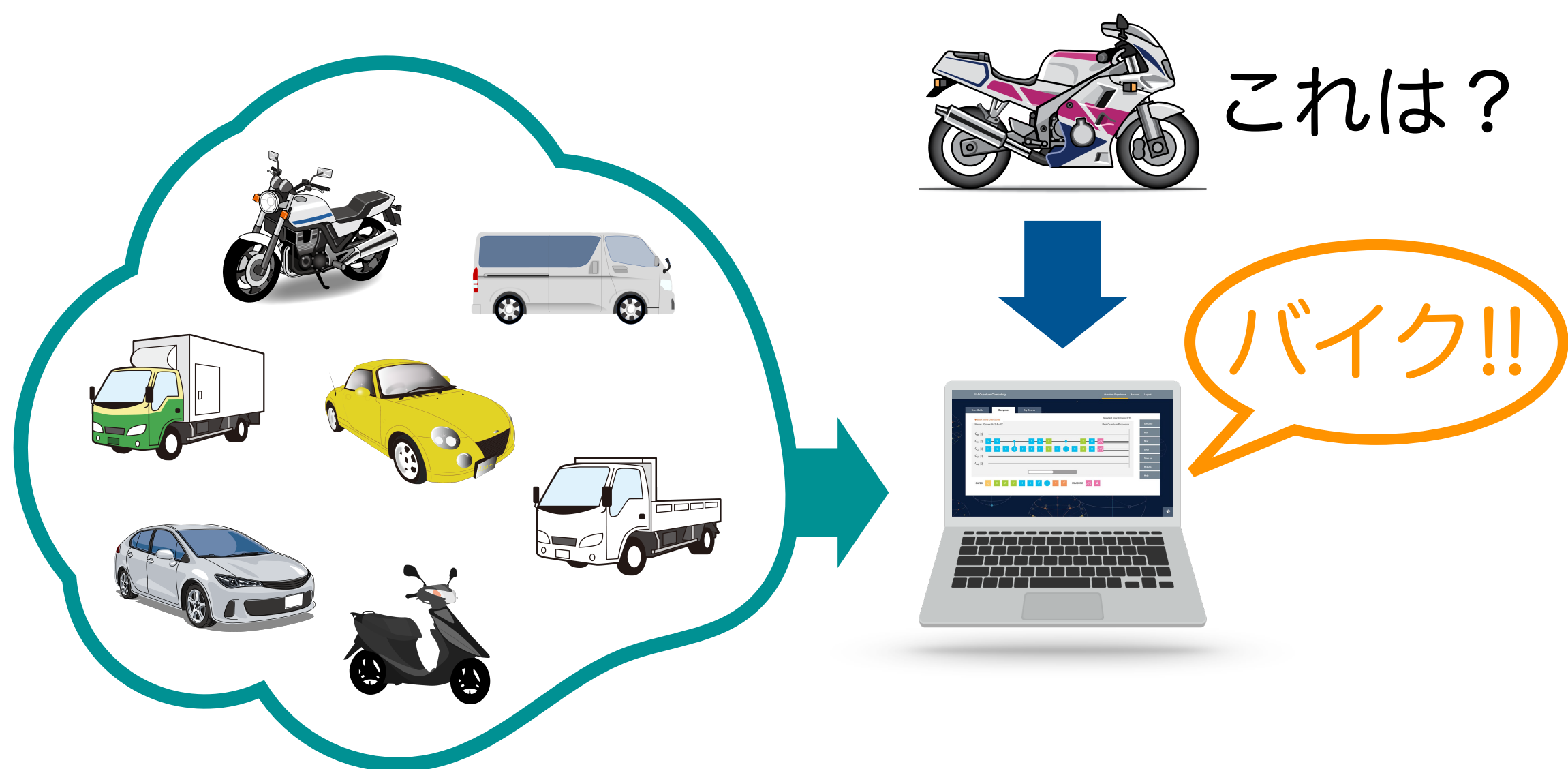
キーワード = 機械学習

機械学習とは

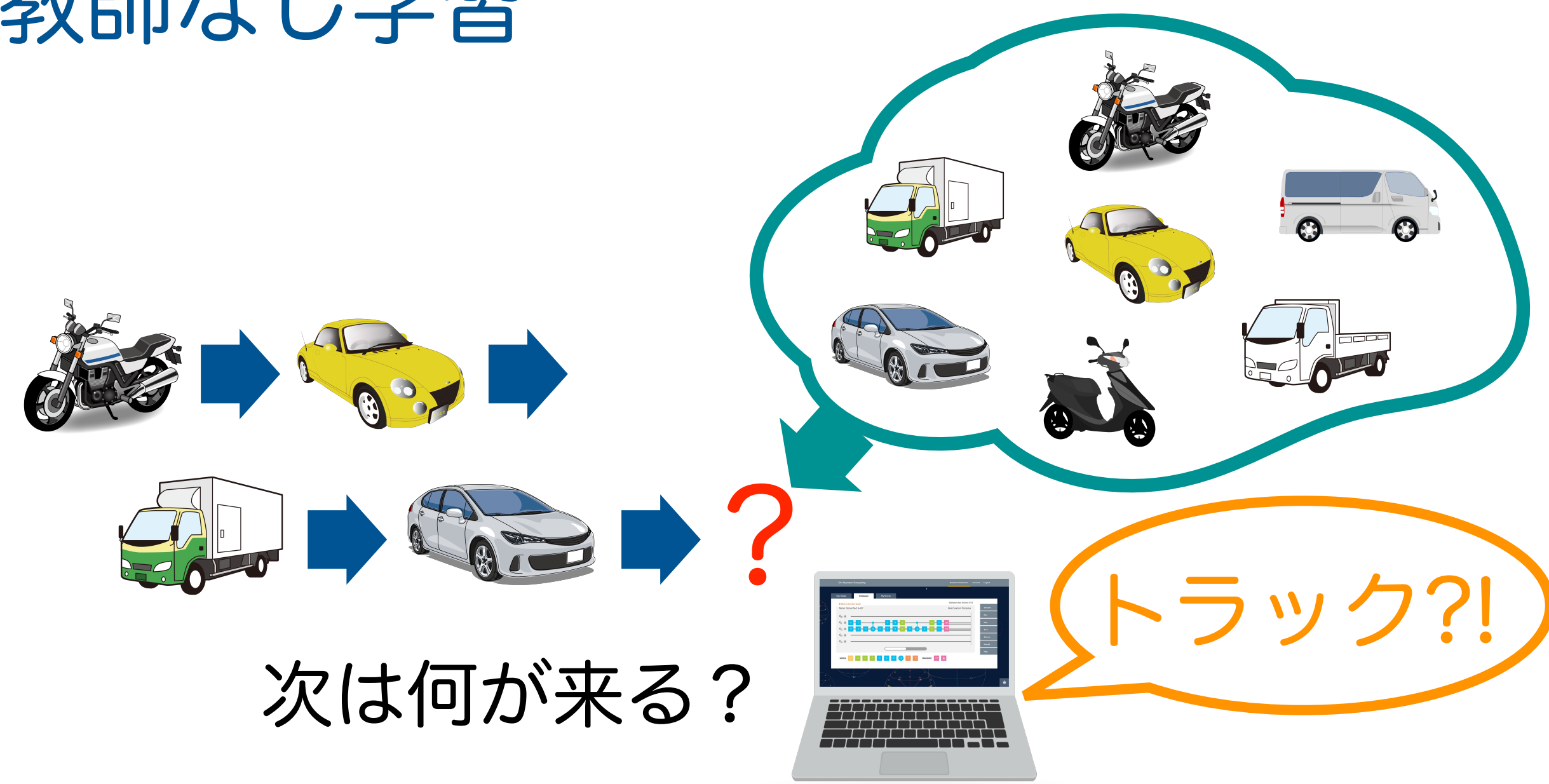
機械学習 = 「与えられたデータを学習し、予測を返す機械」

主に3つのタイプの機械学習が知られているが、
教師あり学習と教師なし学習を考えてみる

教師あり学習



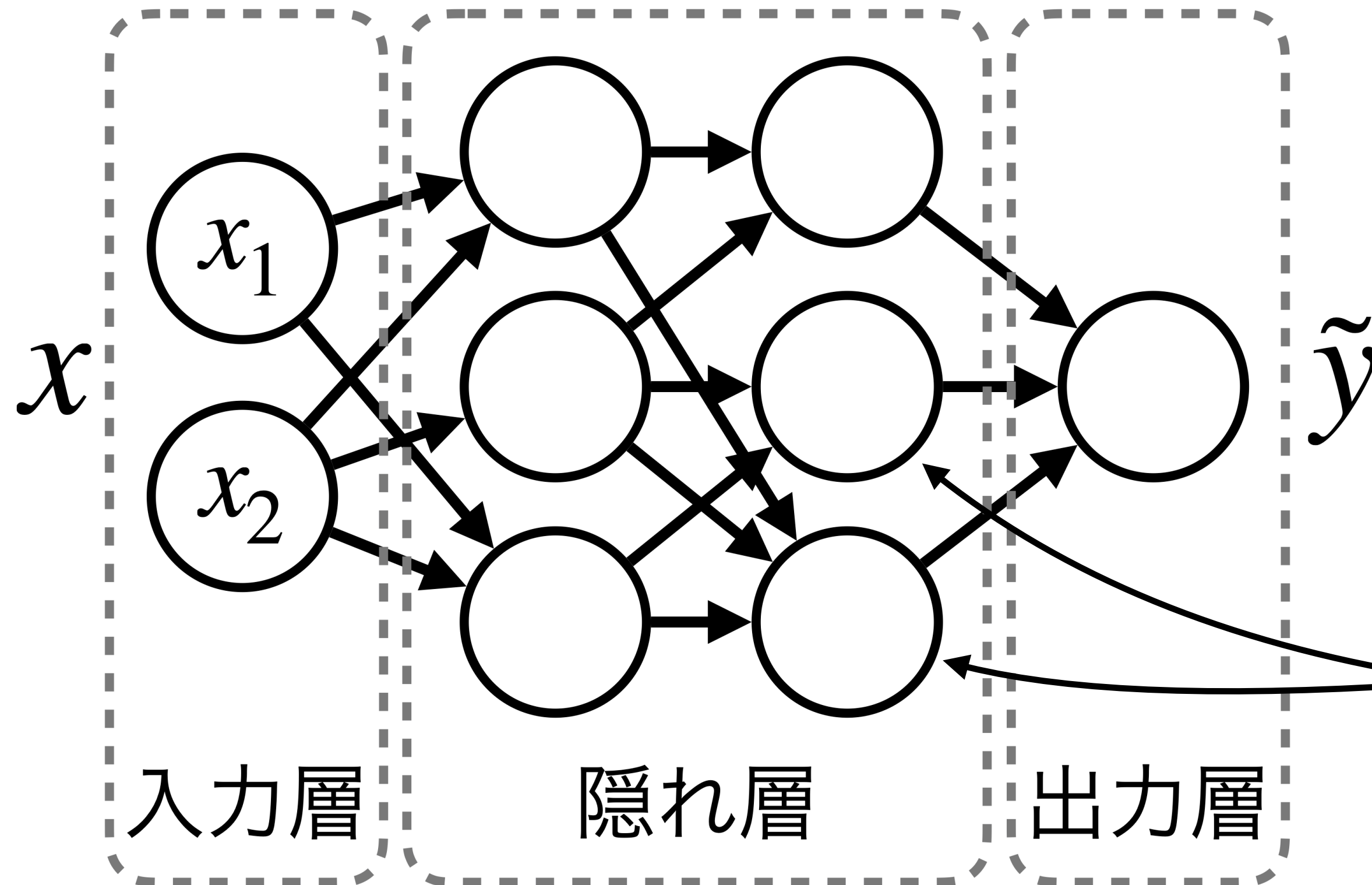
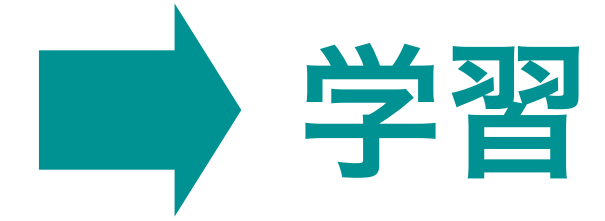
教師なし学習



機械学習とは

変数 x と y がデータとして与えられた \rightarrow 変数 $\{x, y\}$ 間の関係を求めたい

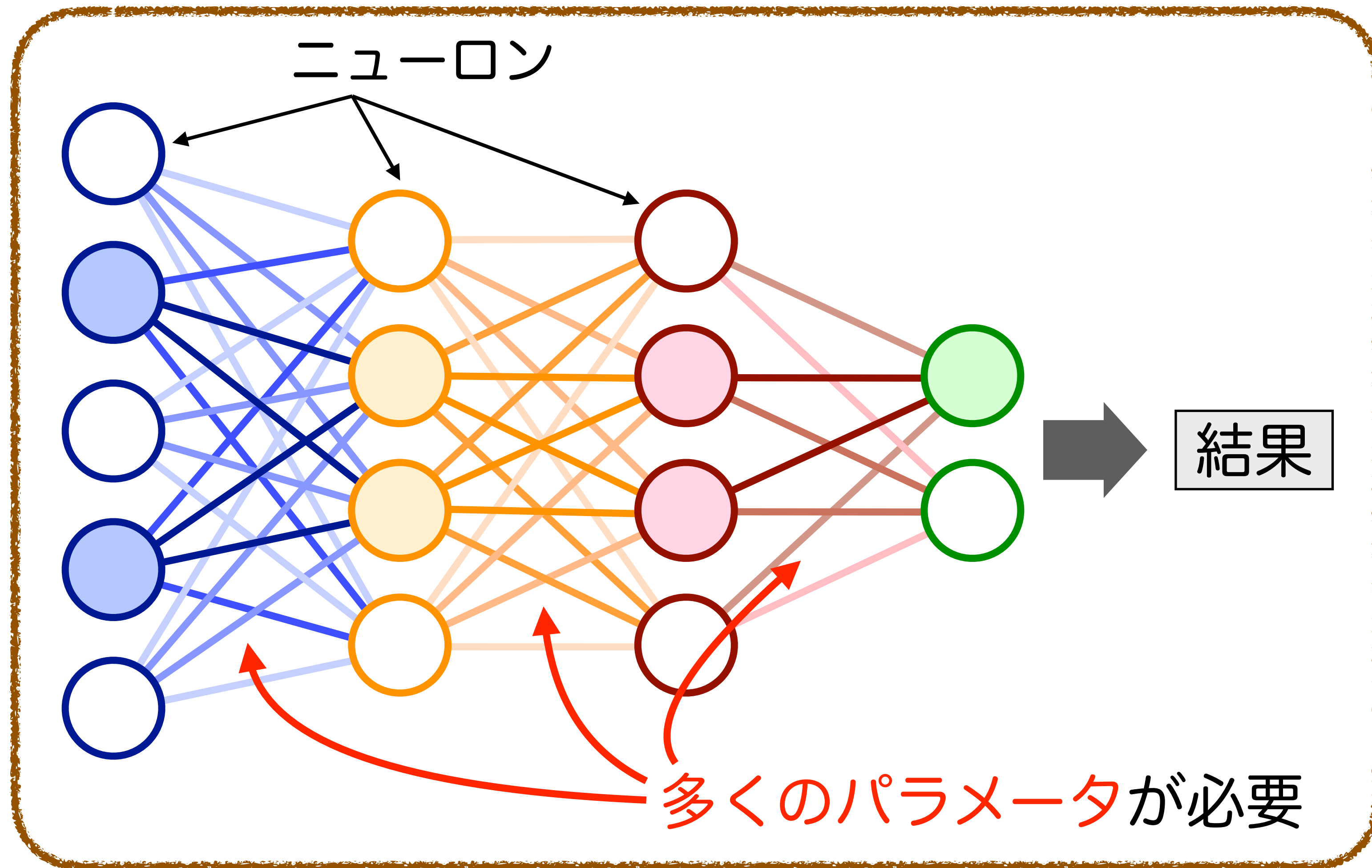
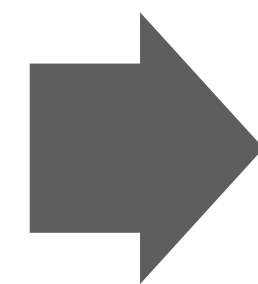
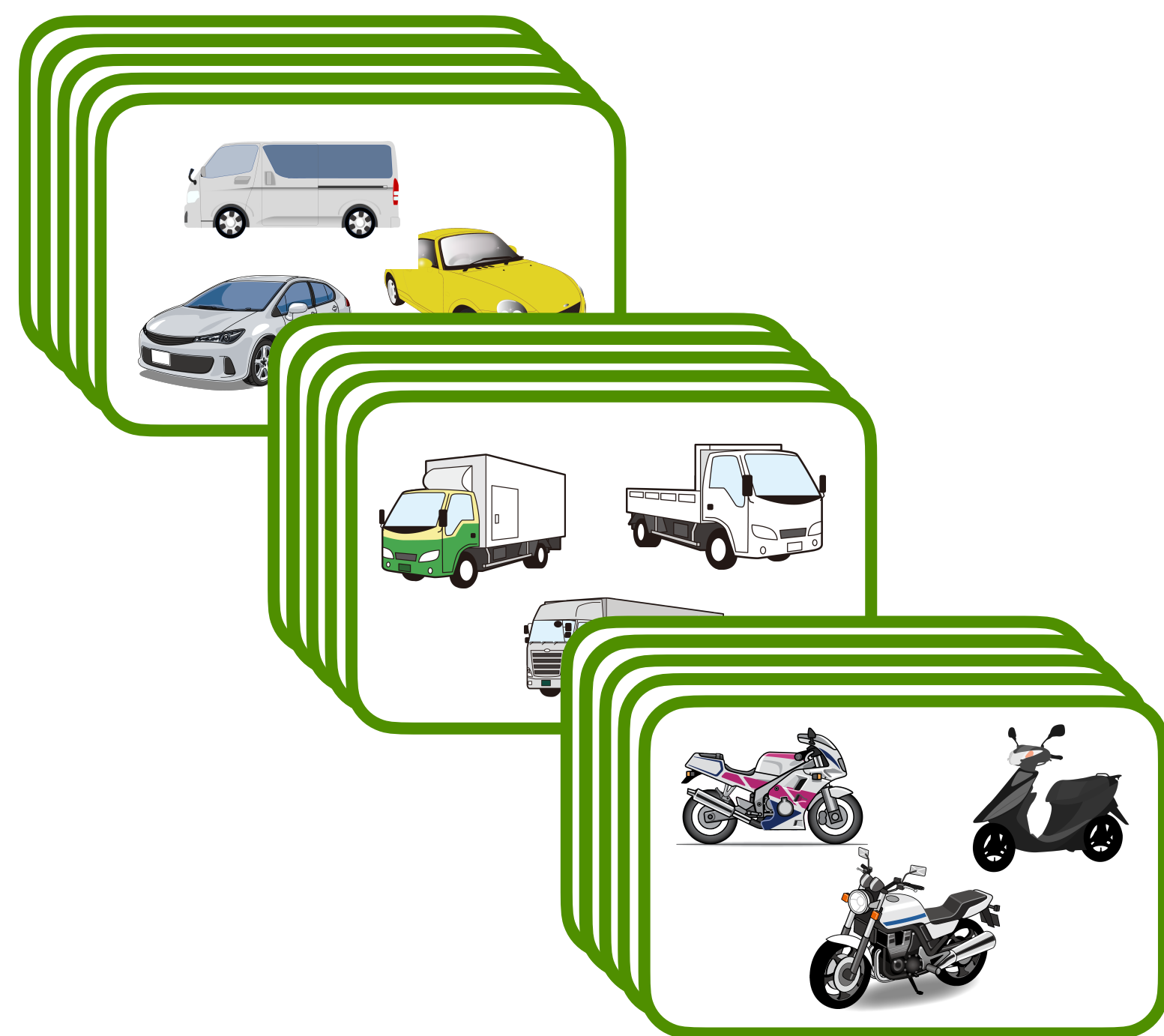
- ▶ ある関数 $f(x_i, w)$ を考える (w =パラメータ)
- ▶ 関数の出力 $\tilde{y}_i = f(x_i)$ が $\tilde{y}_i \simeq y$ となる関数とパラメータを決定する



ニューラルネットワーク
 \rightarrow 関数を近似する方法の一つ

“ニューロン” = 計算ユニット

深層ニューラルネットワーク

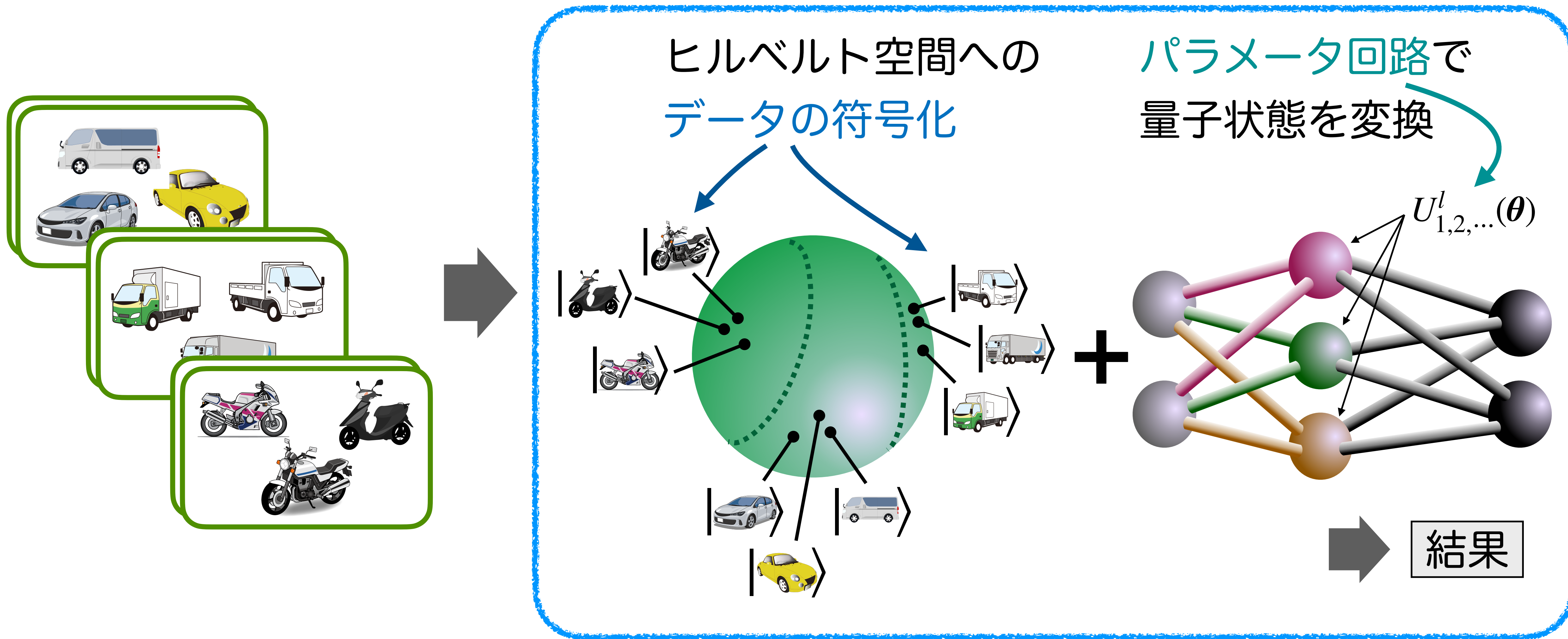


大量のデータが必要

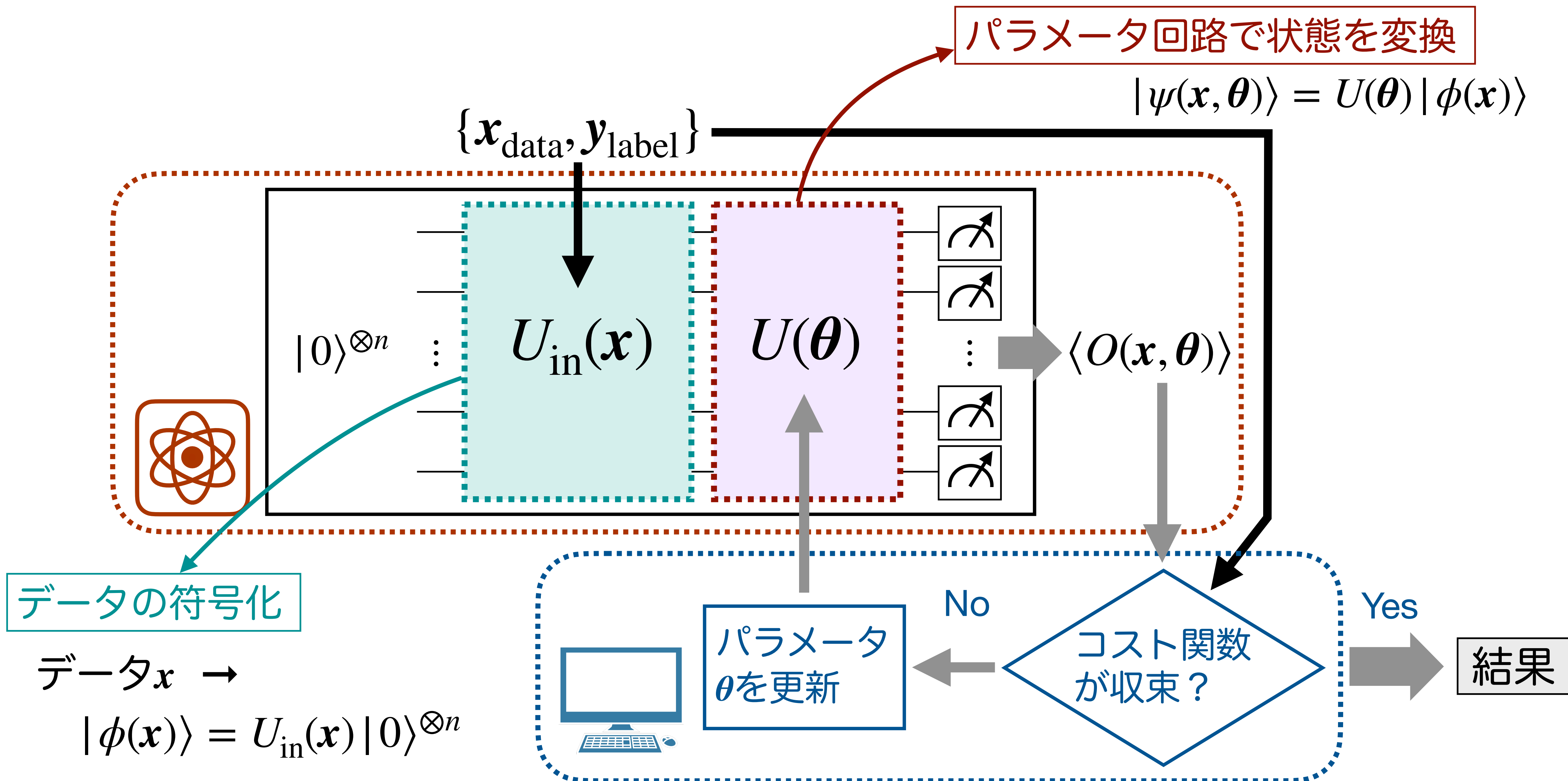
多くのパラメータが必要

量子コンピュータ + AI = 量子AI

量子ニューラルネットワーク



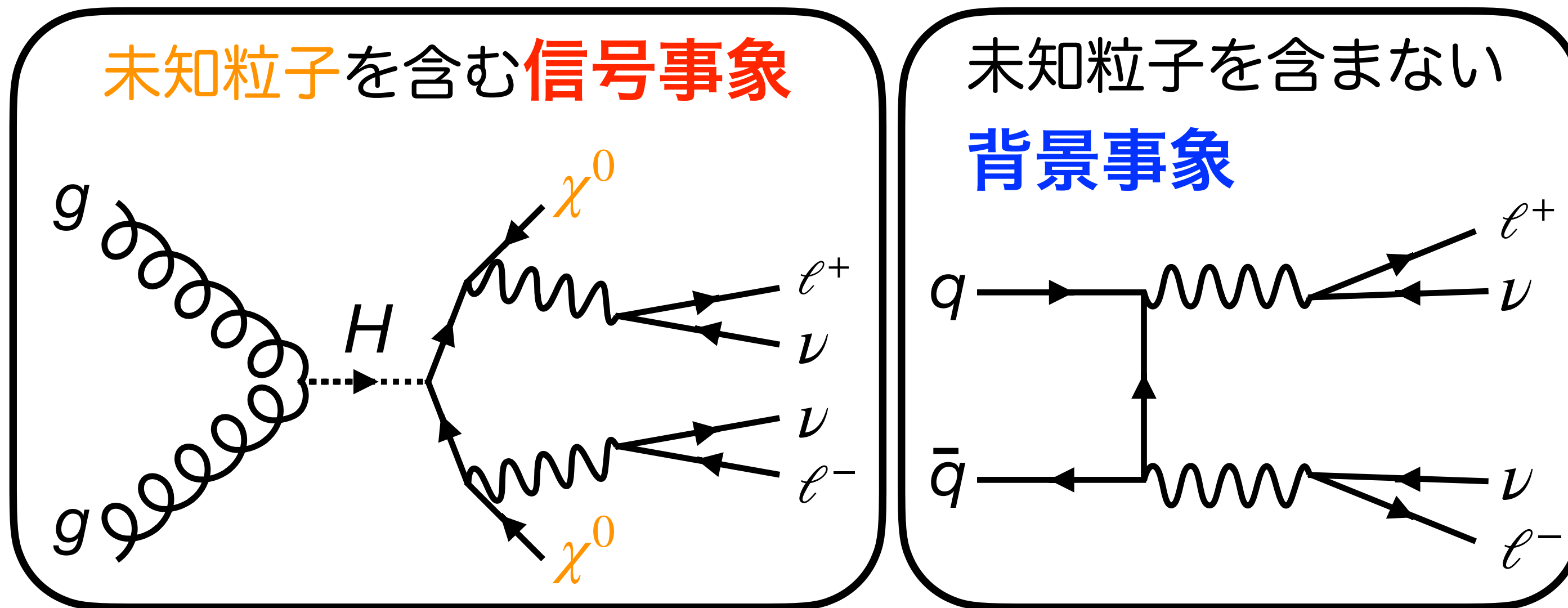
量子機械学習



素粒子物理への応用 (1)

超対称性粒子の信号を含む事象を選別する

[Comput. Softw. Big Sci. 5, 2 \(2021\)](#)

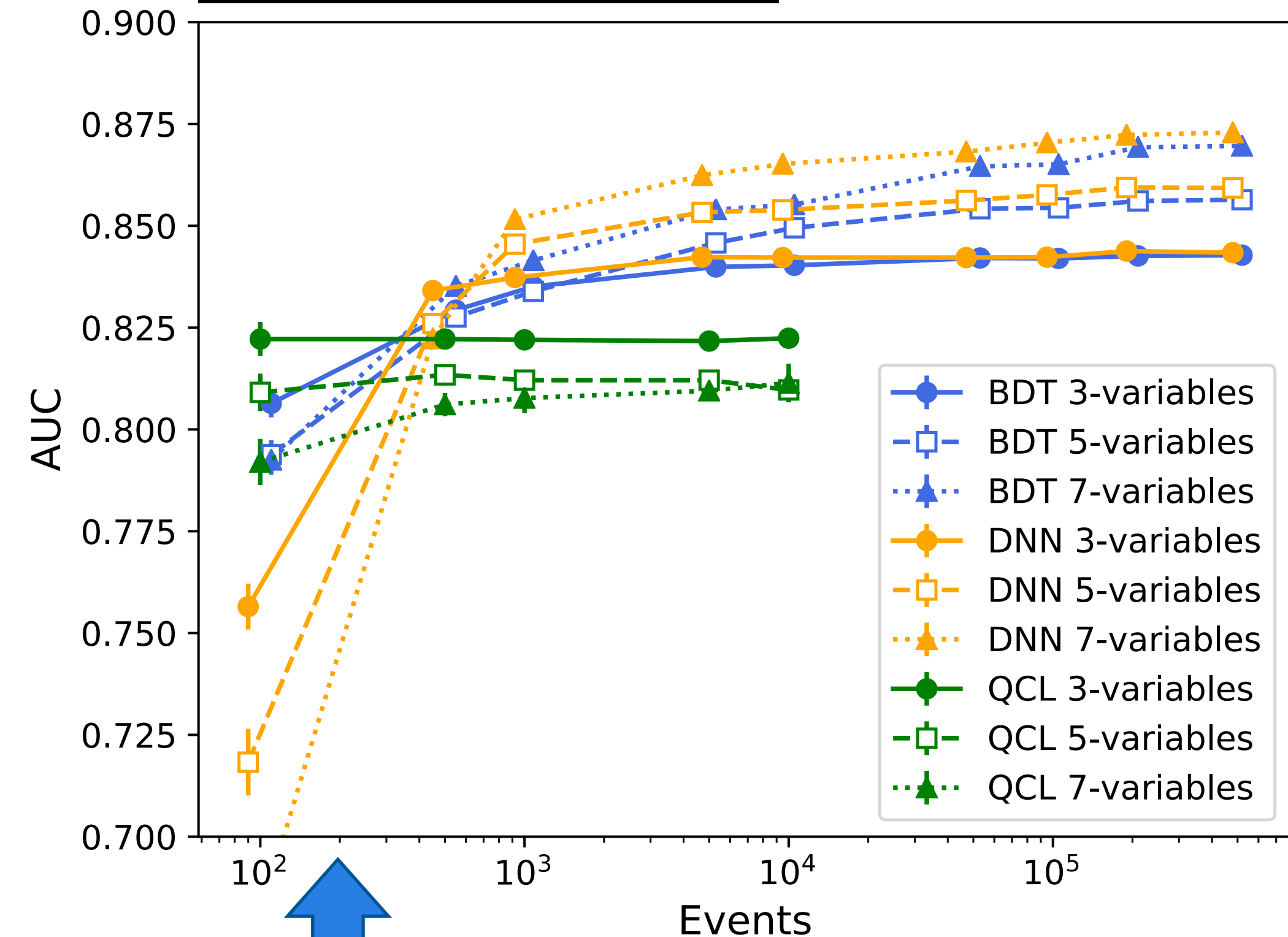


古典機械学習との比較

- ▶ **BDT** : Gradient boost, 1-3 max depth, 10-1000 #trees
- ▶ **DNN** : Dense, 2-6 hidden layers, 16-256 nodes, RELU, Adam, $\epsilon_{\text{learning}}=0.001$

- ▶ 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
- ▶ 少ないパラメータでも効率の良い学習ができる可能性

シミュレータの結果



少量データの領域

素粒子物理への応用 (2)

教師なし学習を使った探索は、幅広い新現象の探索に有効

異常検知

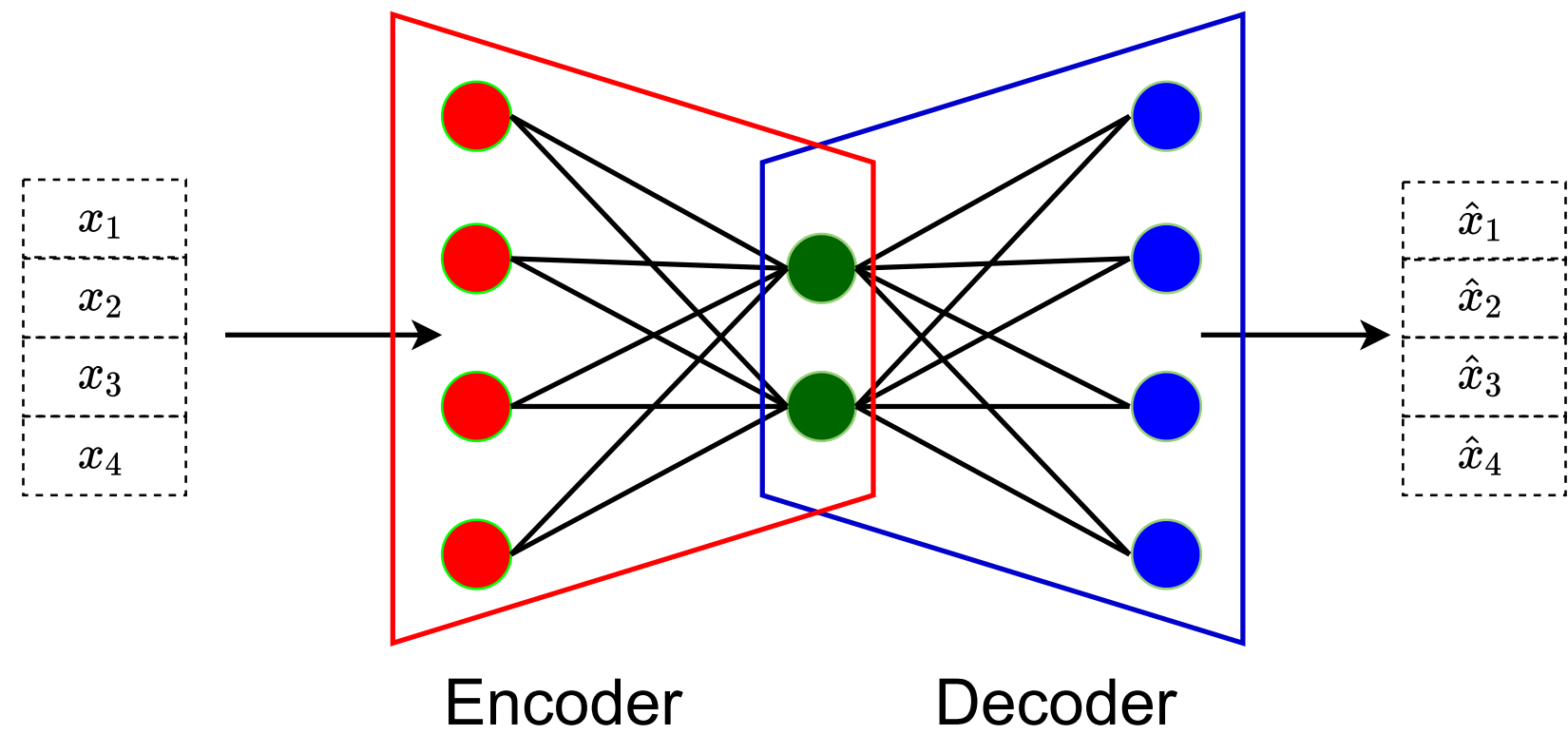
訓練

- ▶ エンコーダ：入力データ(背景事象)を潜在空間へ
- ▶ デコーダ：潜在空間から入力データを再構成

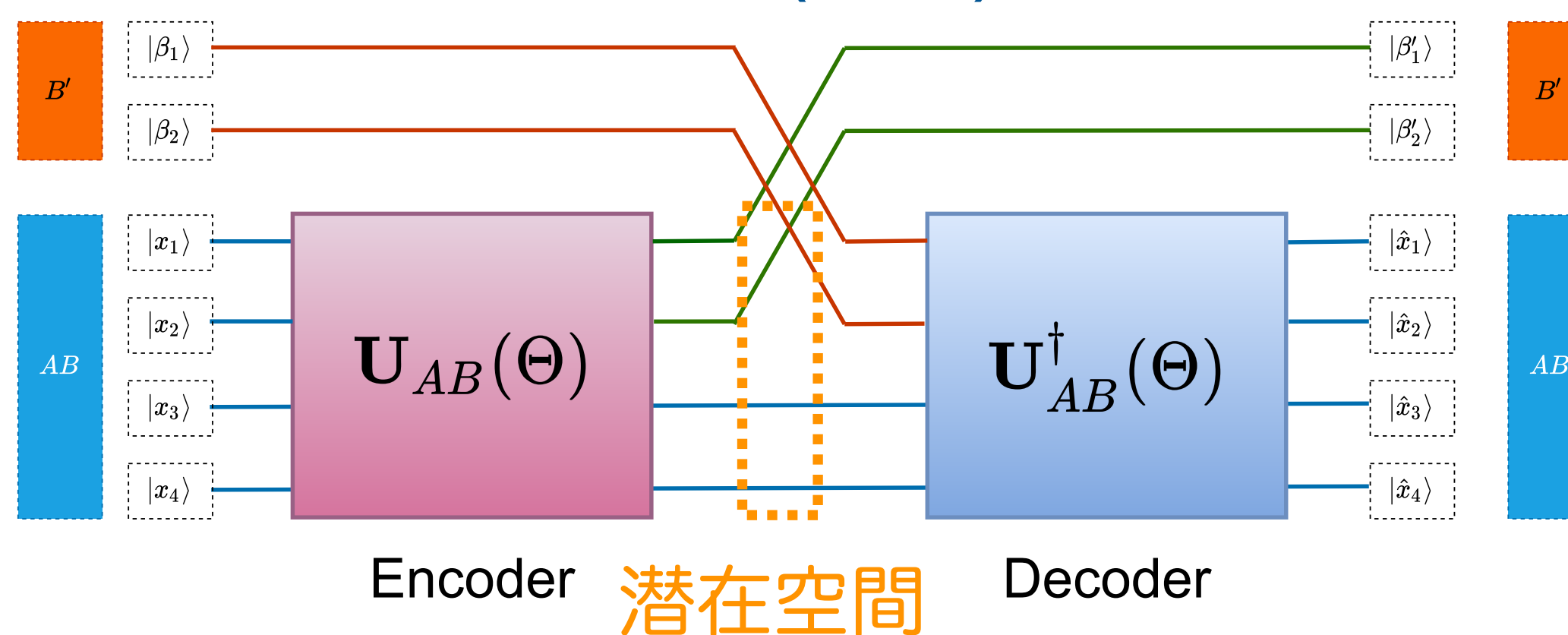
推論

信号事象に対しては、再構成エラーが生じる

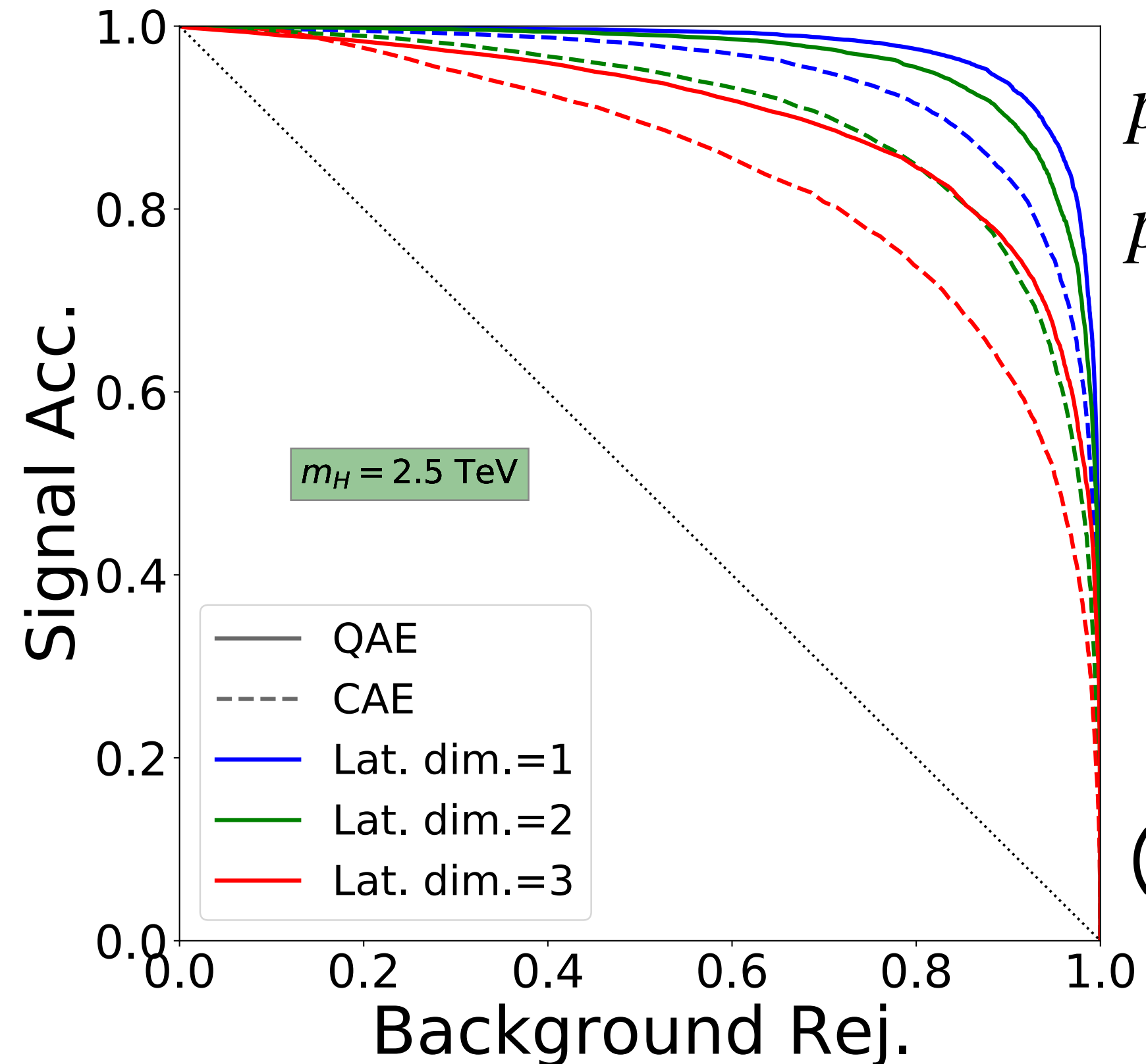
古典オートエンコーダ (CAE)



量子オートエンコーダ (QAE)



V. S. Ngairangbam et al. (2021)



$pp \rightarrow t\bar{t}$ を学習

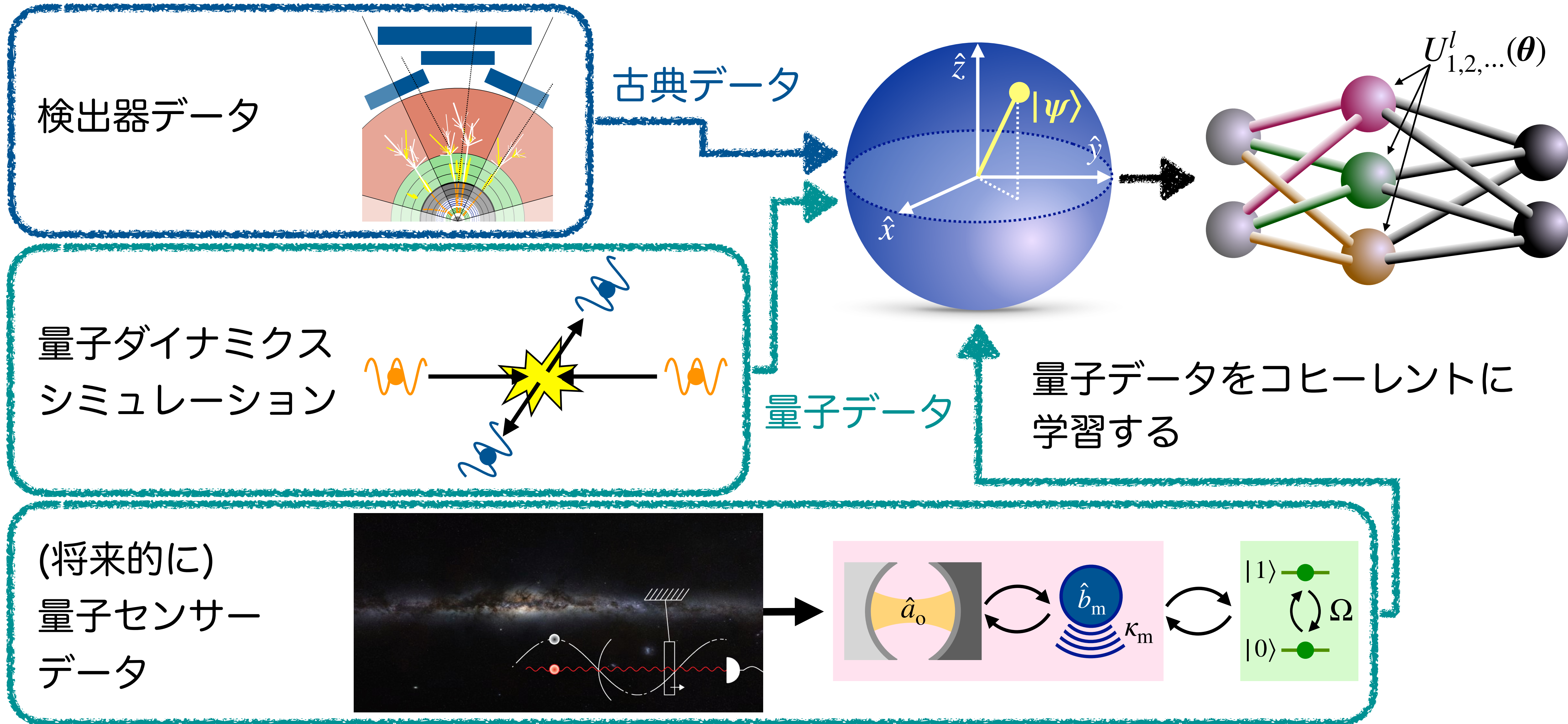
$pp \rightarrow H \rightarrow t\bar{t}$ を探索

同じ入力データを使った時のCAEとQAEの比較

(特徴量4つ, 10k事象)

素粒子物理への応用 (3)

通常の古典計算に対して、NISQが優位になる可能性 → 量子データの学習

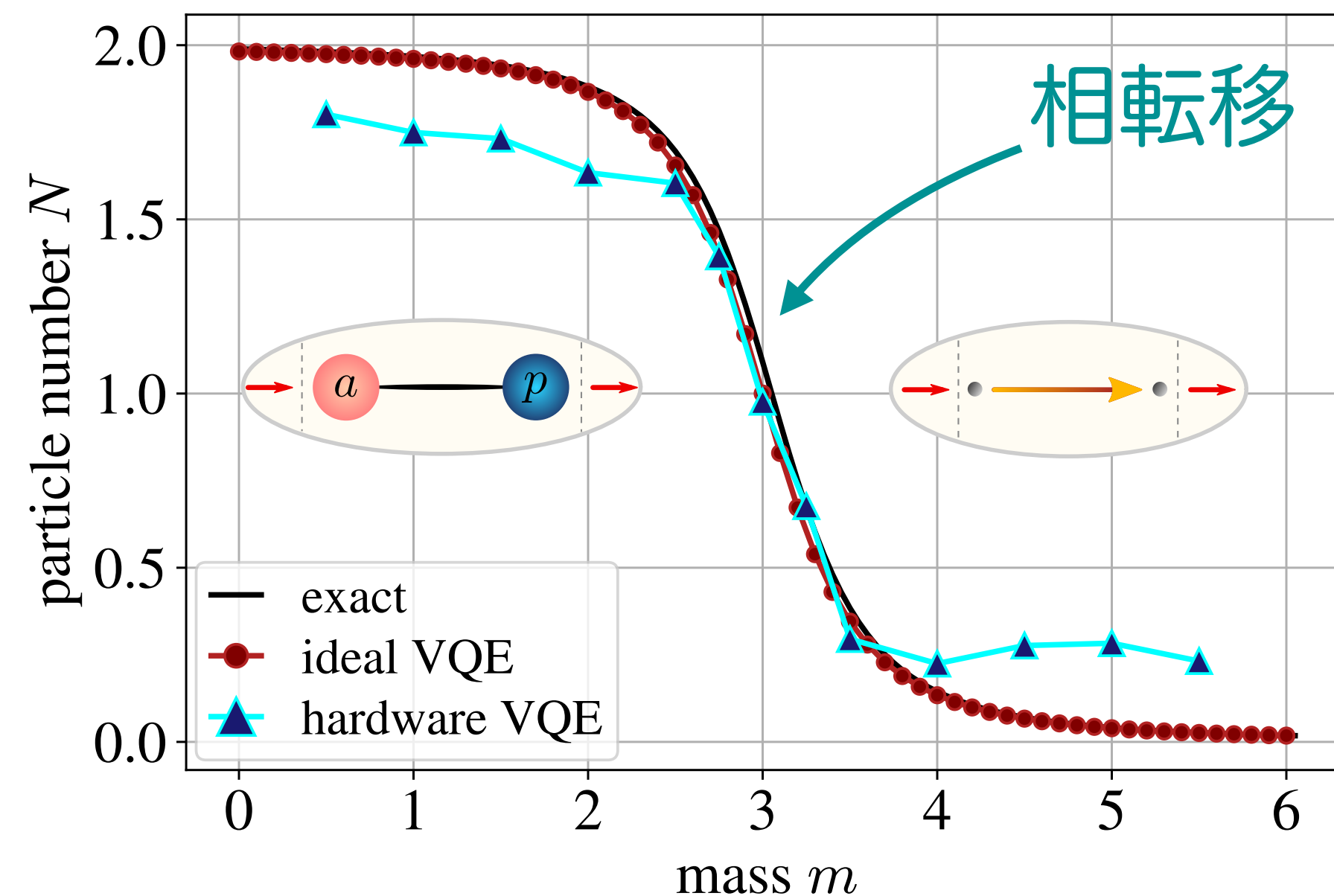


場の量子論（1次元QED模型）の物理的性質を機械学習で引き出す

G. Mazzola et al. (2021)

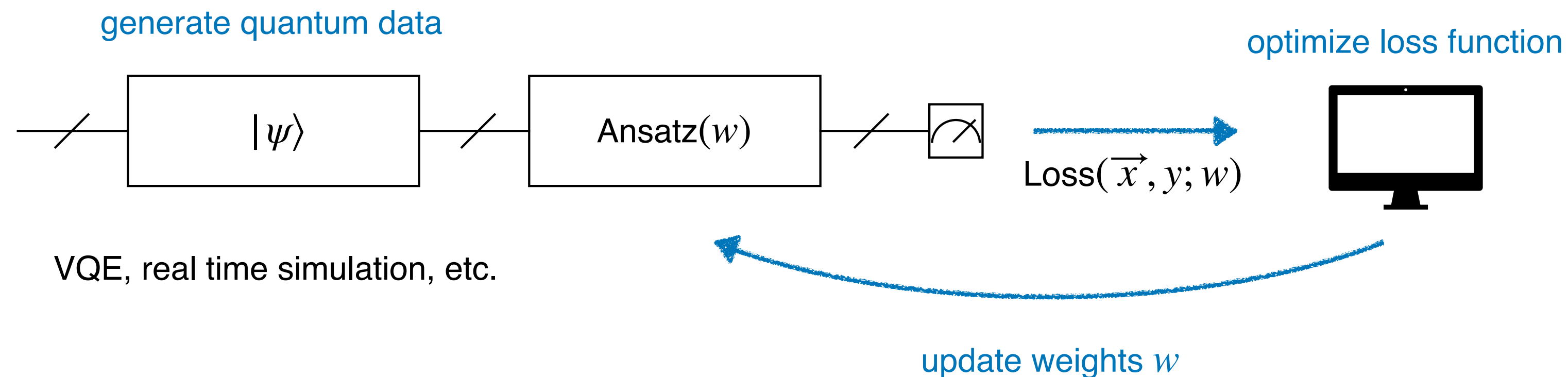
トポロジカル項による相転移を識別できるか？

- ▶ フェルミオン場の量子状態 $\{|\psi^{(i)}\rangle\}$ をデータとして準備
 - ▶ 量子AIを使って、その状態が属する相を見つける
- ➔ 古典計算に対する計算量/精度の優位性？



ハミルトニアン

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



量子AIを実現するには

アルゴリズムとともに、実行するハードウェアとその実装技術の進展も重要

ソフトウェアの研究

量子アルゴリズム

量子機械学習、量子ダイナミクス
シミュレーション

量子ソフトウェア

量子プログラミング、回路最適化、
コンパイラ

ハードウェア制御技術

量子ビット制御・読み出し技術、
マイクロ波パルス、エラー緩和

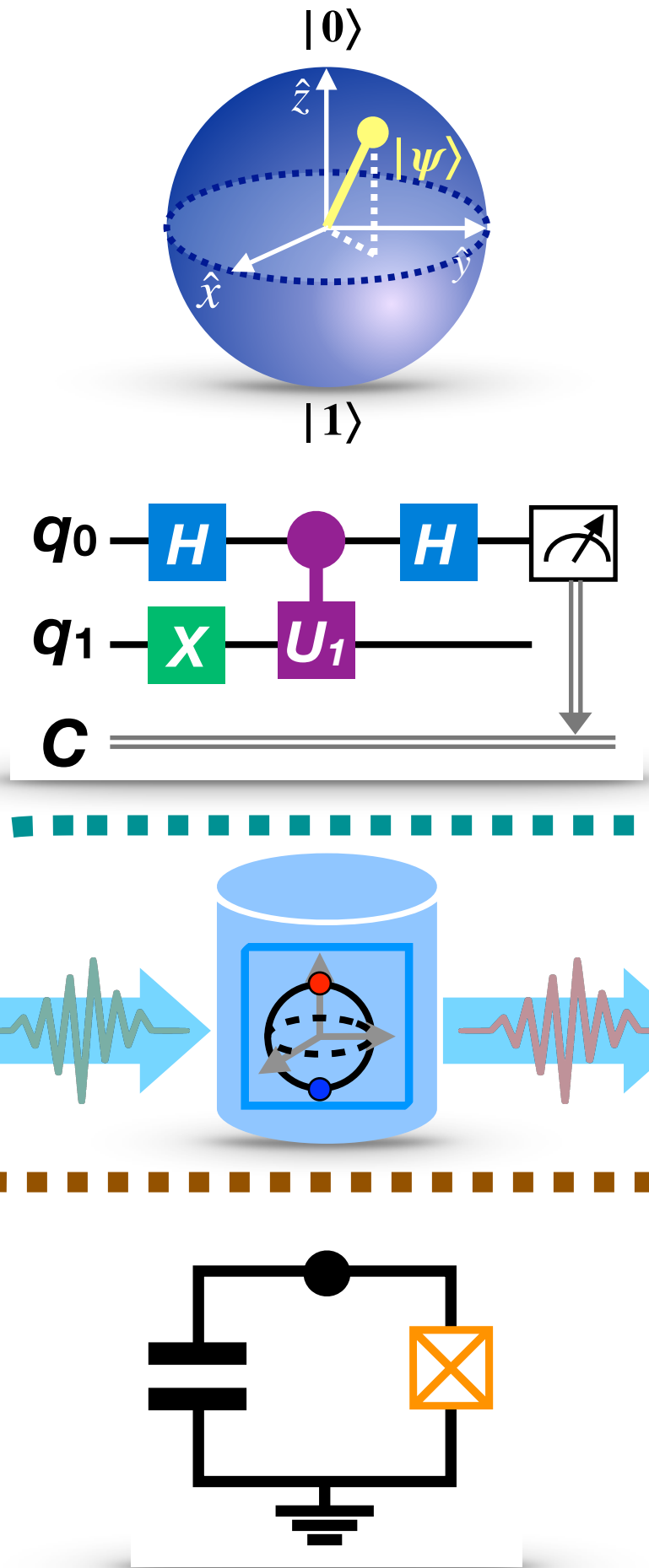
量子ビット技術

超伝導量子ビット、回路QED、
ノイズ/デコヒーレンス

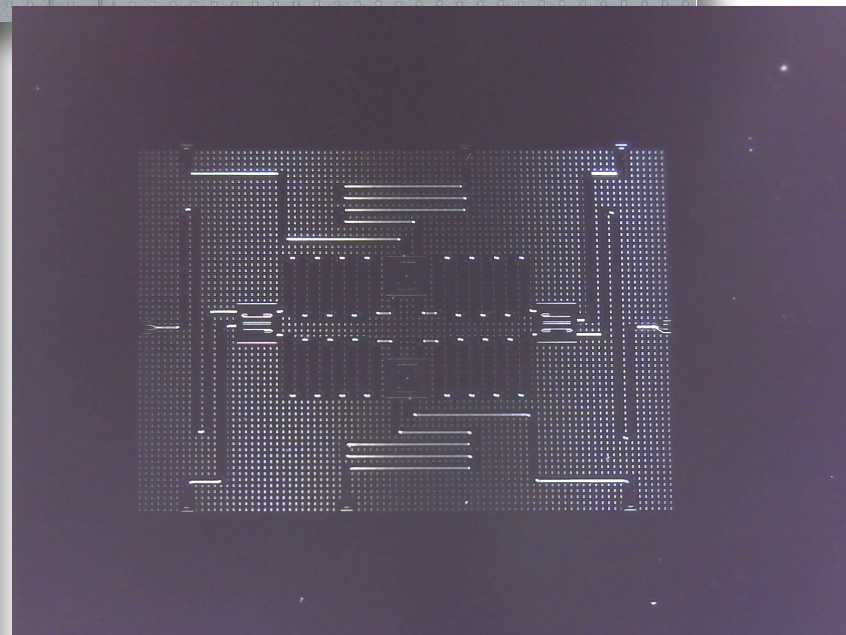
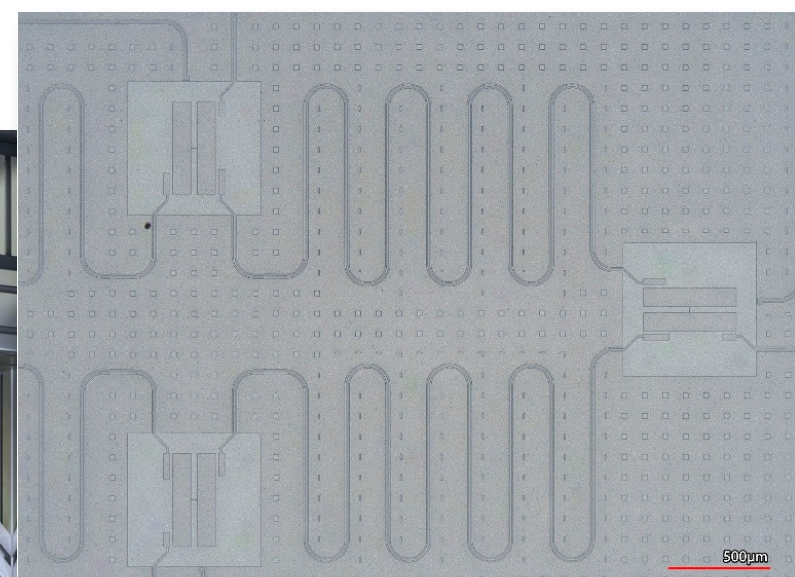
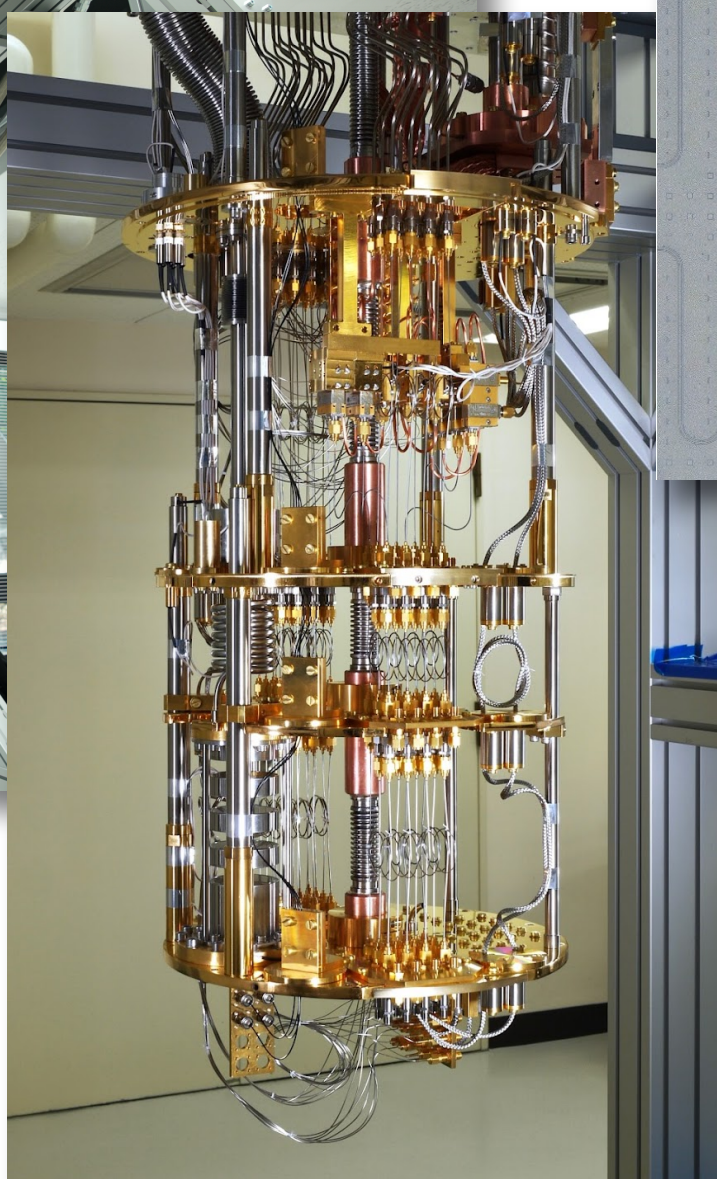
ハードウェアの研究

全ての階層で、研究に取り組んでいます

興味ある方はご連絡を!



次世代の超伝導量子ビットとマイクロ波パルス実装技術の開発



東京大学

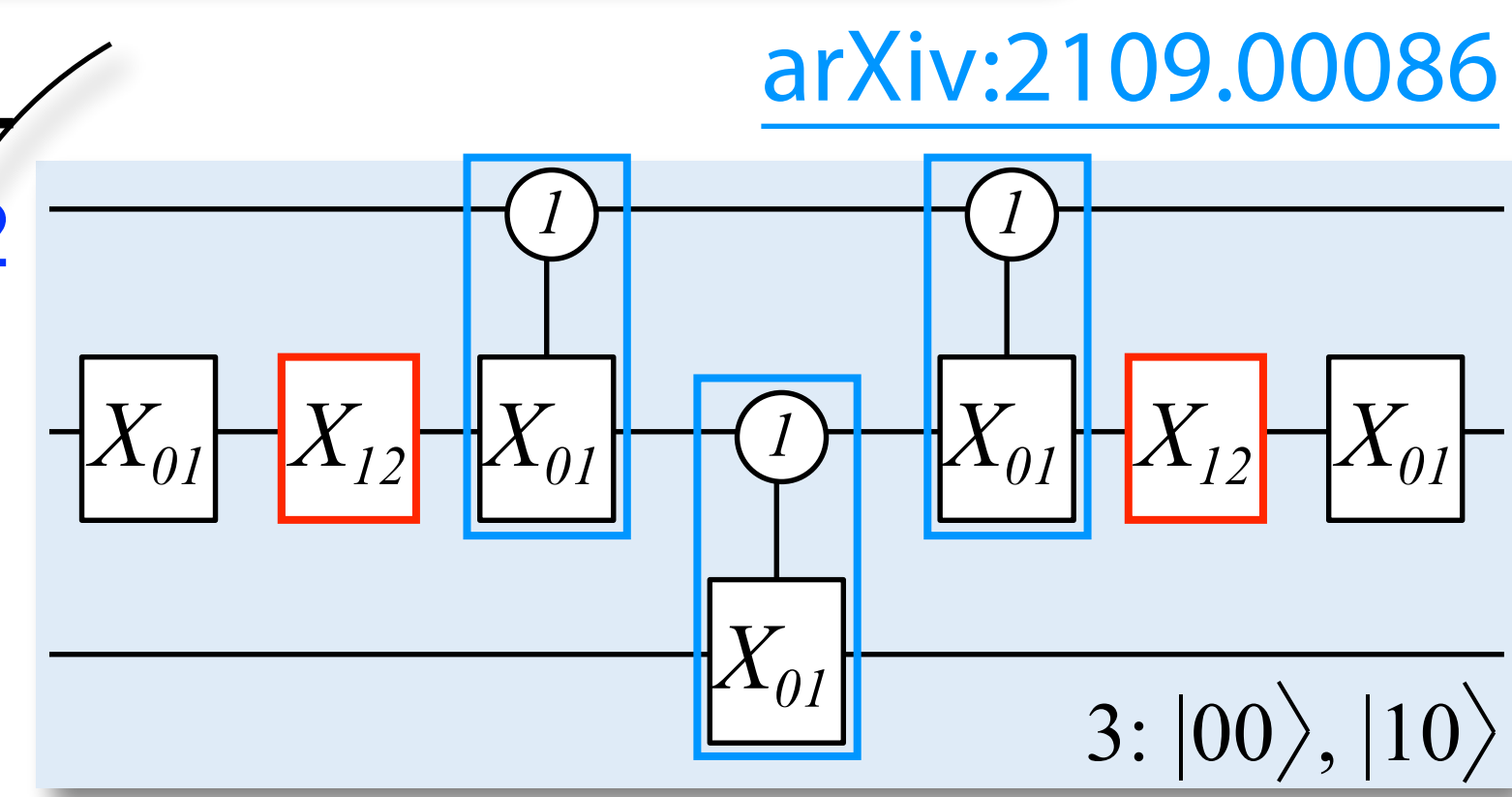
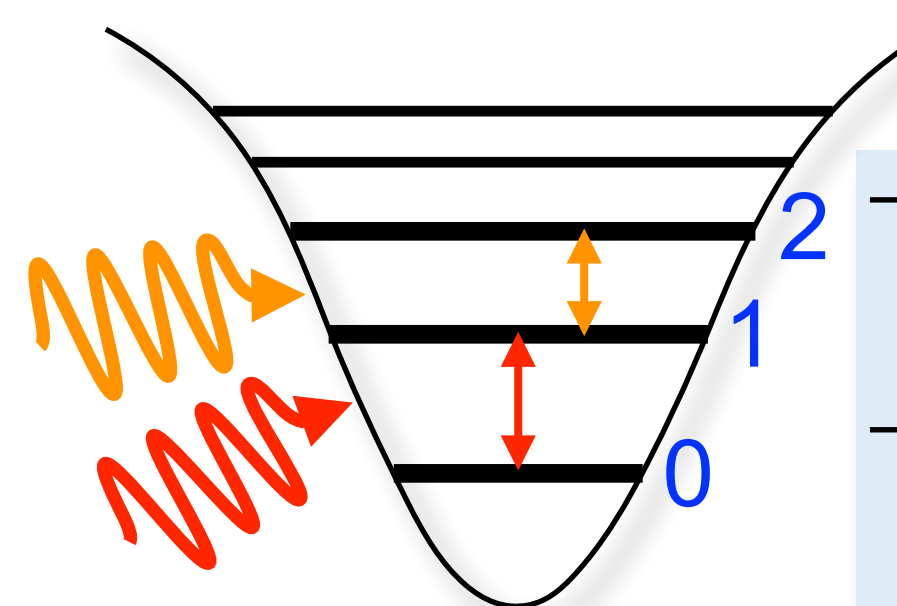
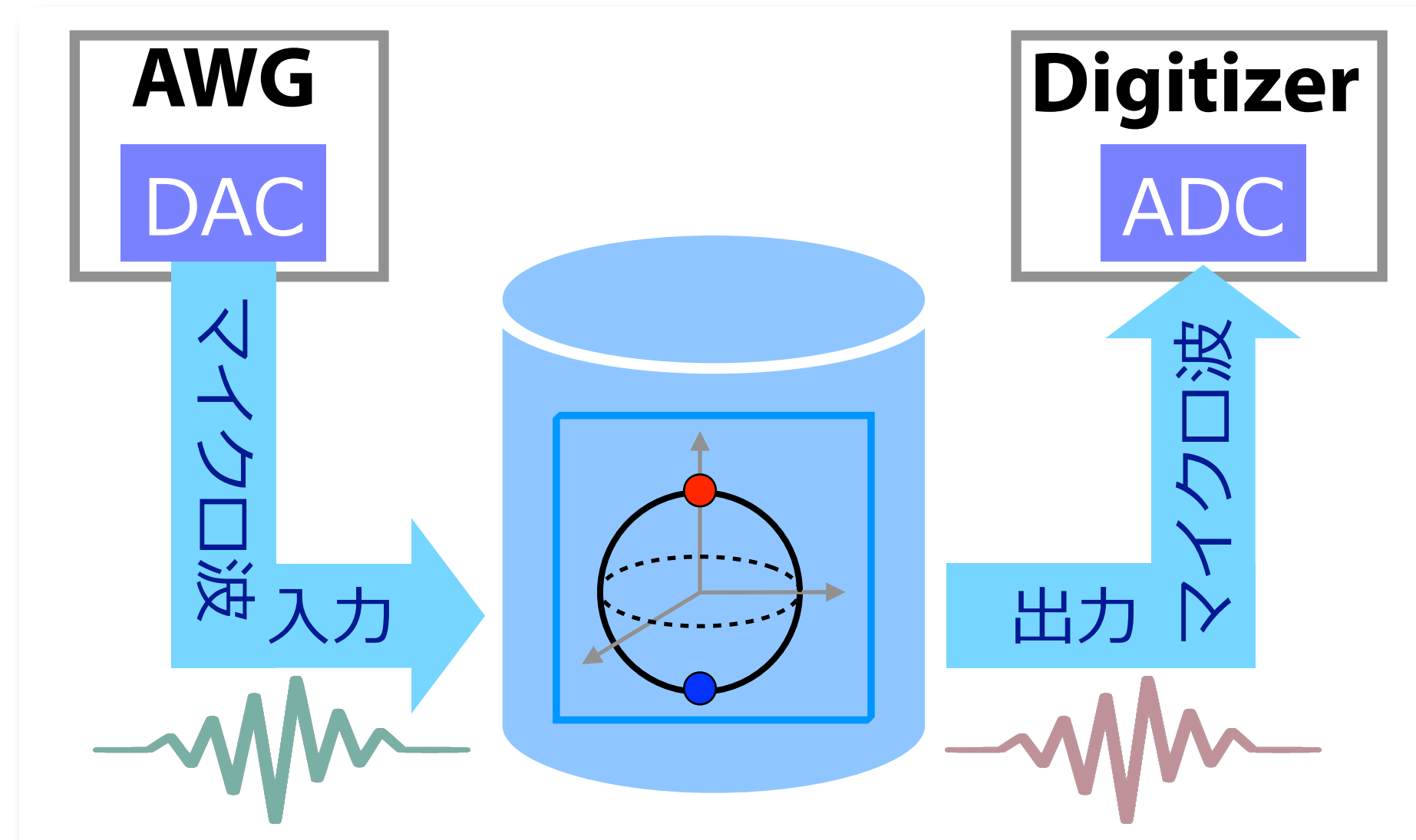
浅野キャンパス

[ハードウェア・
テストセンター](#)

低温センター

ICEPP (稲田)

- ▶ Multiジョセフソン接合量子ビットの開発
- ▶ 高準位素子 (量子トリット) の研究



- ▶ トフォリゲートの量子トリット実装

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

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に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限に対応しており、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。



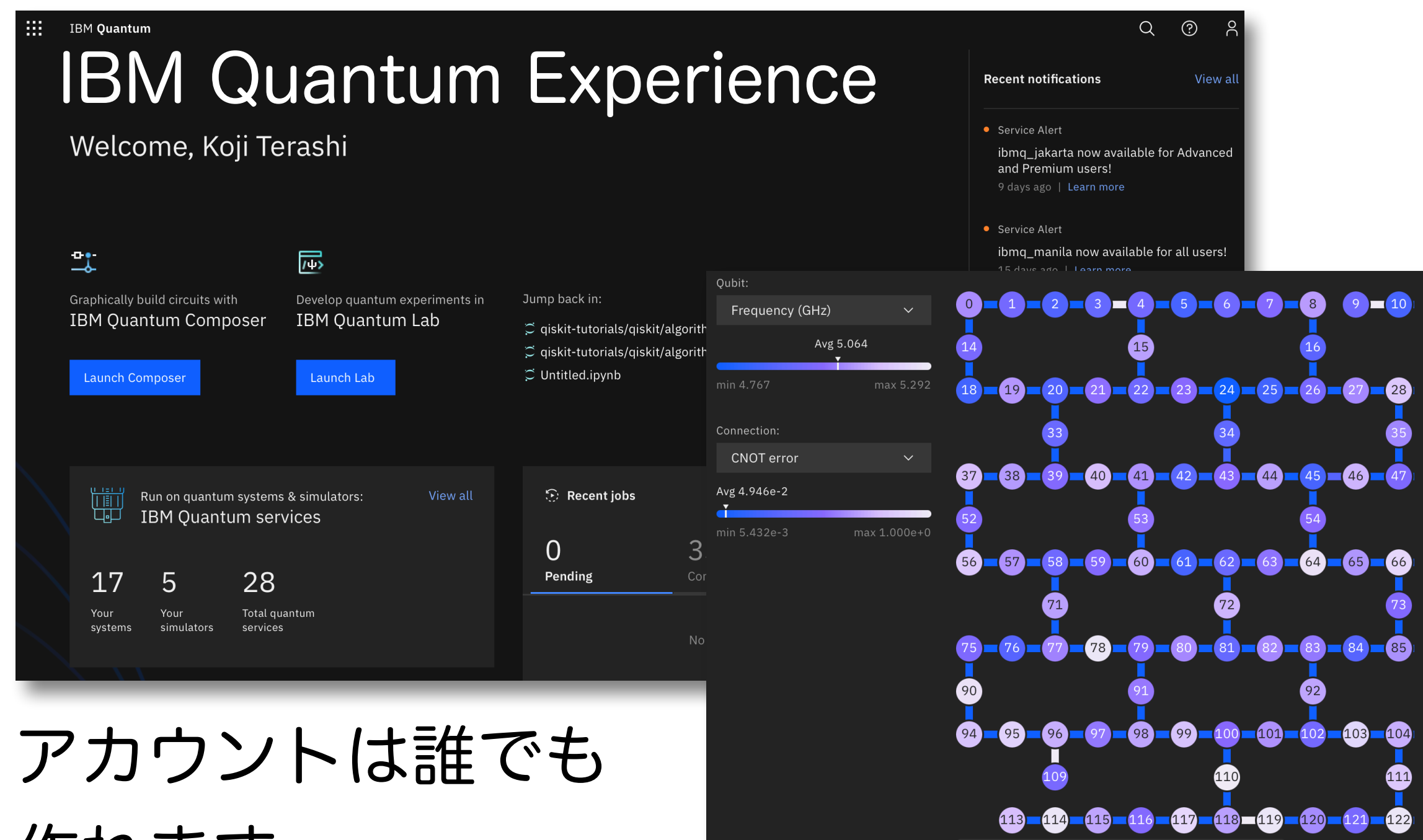
[量子コンピューティング](#)
[ワークブック](#)

理学部1号館10階

IBM量子コンピュータの実機を使った
実習を行なっています

後期学部生向け実習講座 (Sセメスター)

<https://quantum-computing.ibm.com>



IBM Quantum Experience

Welcome, Koji Terashi

Graphically build circuits with IBM Quantum Composer

Develop quantum experiments in IBM Quantum Lab

Jump back in:

- qiskit-tutorials/qiskit/algorithm
- qiskit-tutorials/qiskit/algorithm
- Untitled.ipynb

Qubit: Frequency (GHz) Avg 5.064 min 4.767 max 5.292

Connection: CNOT error Avg 4.946e-2 min 5.432e-3 max 1.000e+0

Recent jobs: 0 Pending, 3 Corrupted

Run on quantum systems & simulators: IBM Quantum services

17 Your systems, 5 Your simulators, 28 Total quantum services

Quantum circuit diagram showing 122 qubits and gates.

アカウントは誰でも
作れます

興味のある方は、ワークブックを使ってIBM実機で遊んでみてください

まとめ

ICEPPのATLAS実験グループでは、量子コンピュータの研究開発と素粒子物理への応用に取り組んでいます。

2つの応用例を紹介

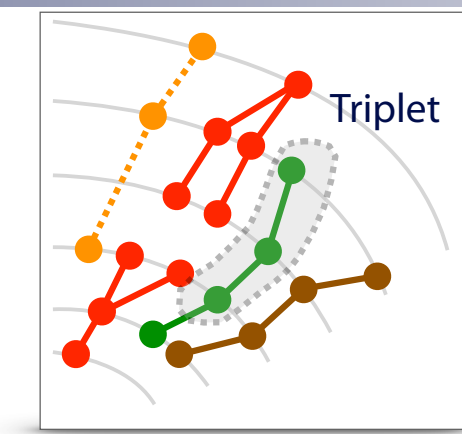
- ▶ 量子機械学習のデータ解析への応用
- ▶ 量子データ学習による量子場特性の高精度(?)計算

他にも面白いテーマはたくさんあります。


- ▶ 散乱過程の量子ダイナミクスシミュレーション
➡ 事象生成?
- ▶ 検出器データの再構成 (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

Charged Particle Tracking

Find tracks by solving an optimization problem of the "triplet" combination



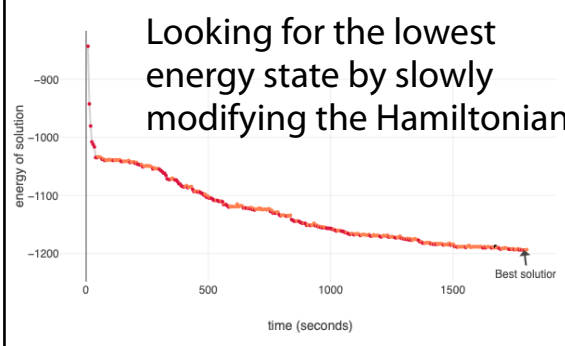
Quantum Annealing



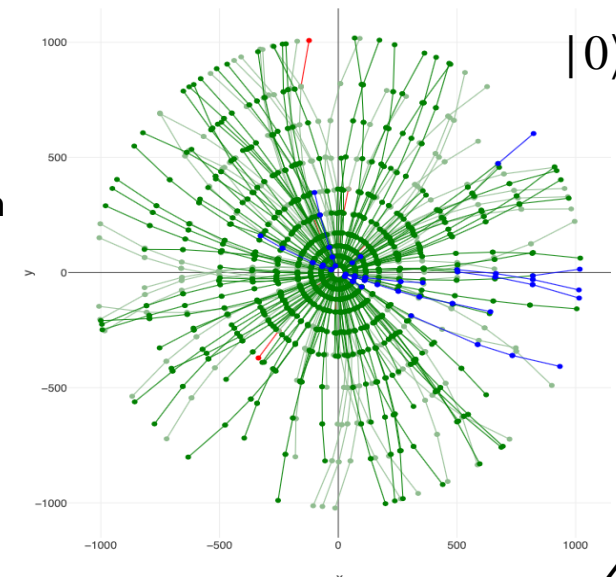
D-Wave Quantum Annealer

- ▶ 2048 superconducting qubits
- ▶ Sparse qubit connection..

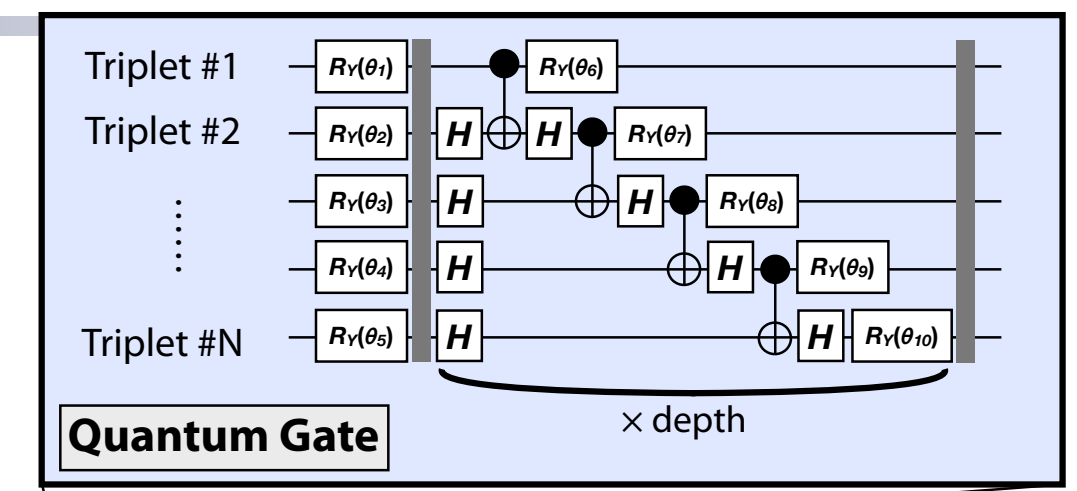
Looking for the lowest energy state by slowly modifying the Hamiltonian



>90% tracking efficiency at HL-LHC condition



Quantum Gate



Triplet #1: $Ry(\theta_1)$, $Ry(\theta_0)$

Triplet #2: $Ry(\theta_2)$, H , H , $Ry(\theta_7)$

...

Triplet #N: $Ry(\theta_N)$, H , H , $Ry(\theta_0)$

\times depth

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

$|0\rangle^{\otimes n}$ $U(\theta)$ $\langle \psi | H | \psi \rangle$

Parameter Update

Optimize parameters θ such that the state $|\psi\rangle$ has the approximated lowest energy

40 **Actively being explored for future application!**

量子情報と素粒子物理が
クロスする新しい分野です。
挑戦してみたい方、大歓迎!!

バックアップ

量子ダイナミクスシミュレーション+機械学習

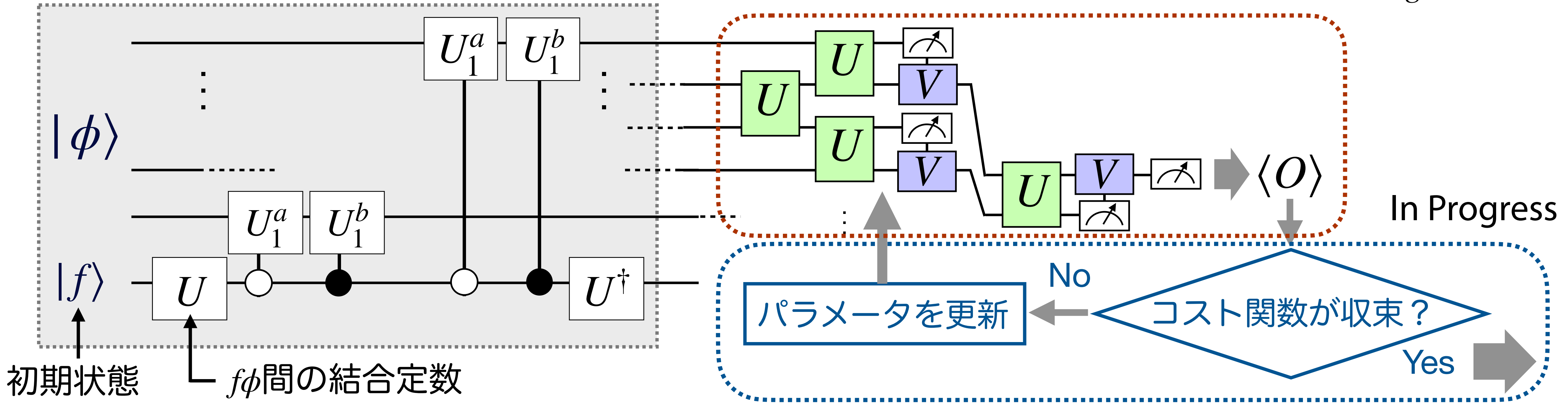
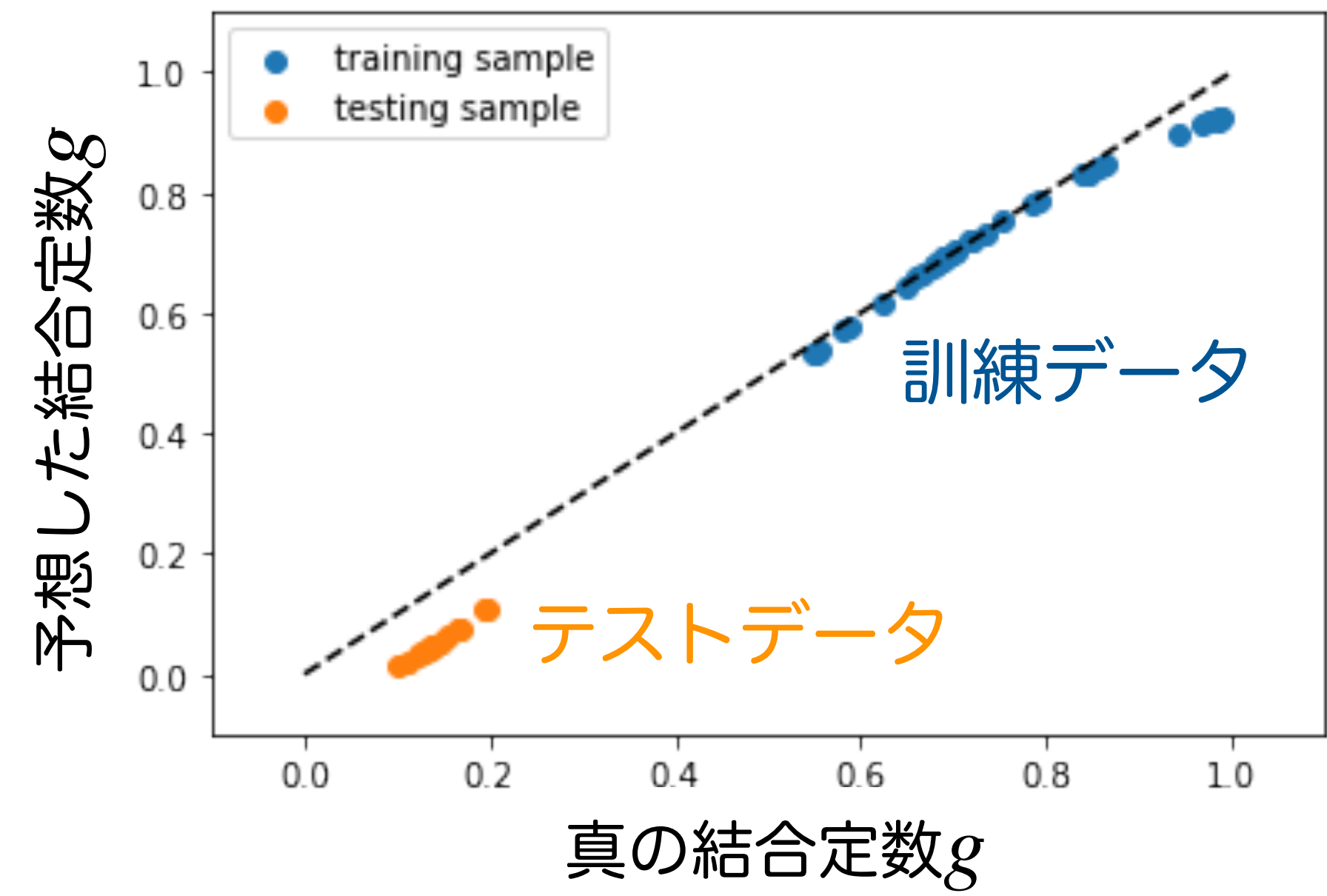
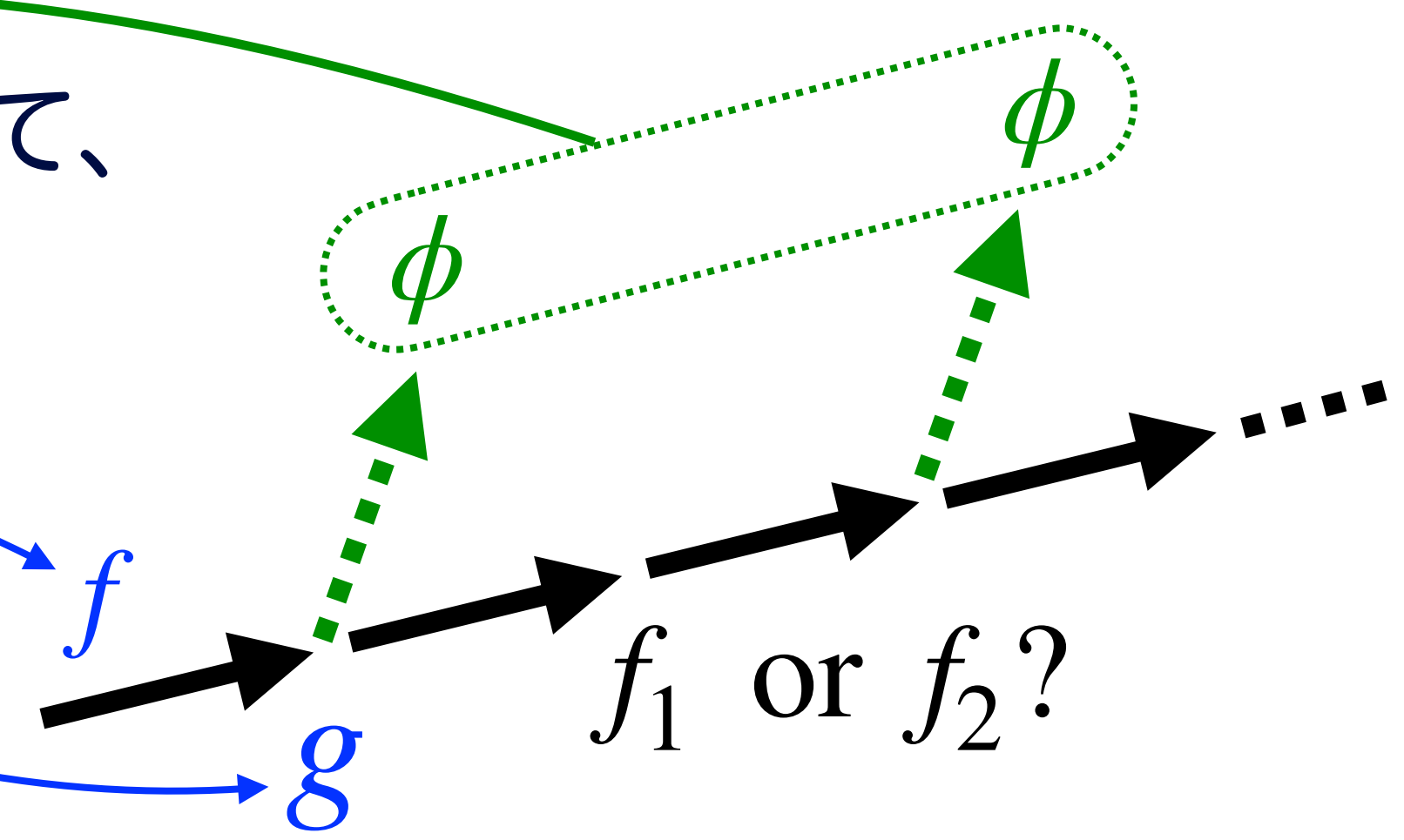
パートンシャワー → 高エネルギー物理での基礎過程の一つ

放出された ϕ 粒子を入力として、

シャワーの性質、例えば

- f 粒子のフレーバー
- $f\phi$ 間の結合定数 g

を引き出す



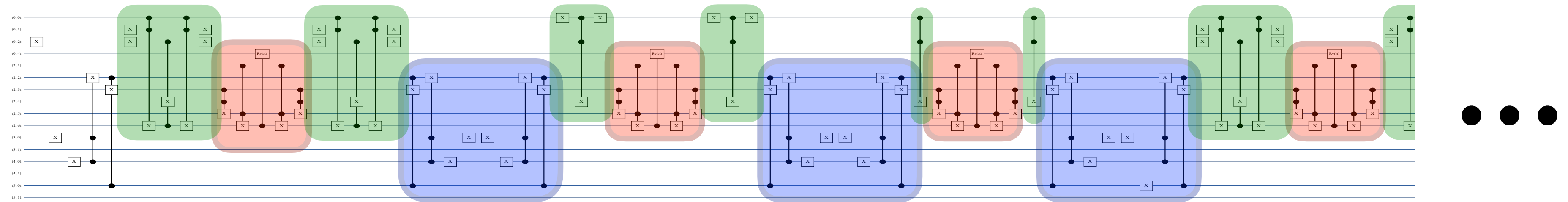
量子ソフトウェア

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)

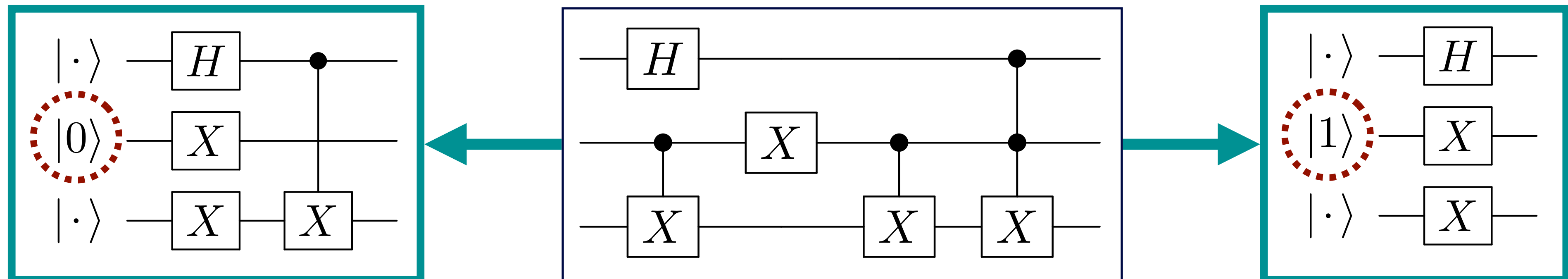


繰り返しゲートの同定

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



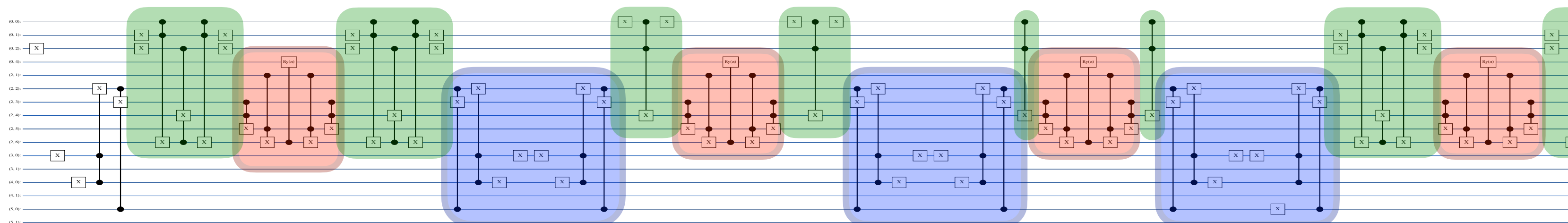
量子ソフトウェア

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

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

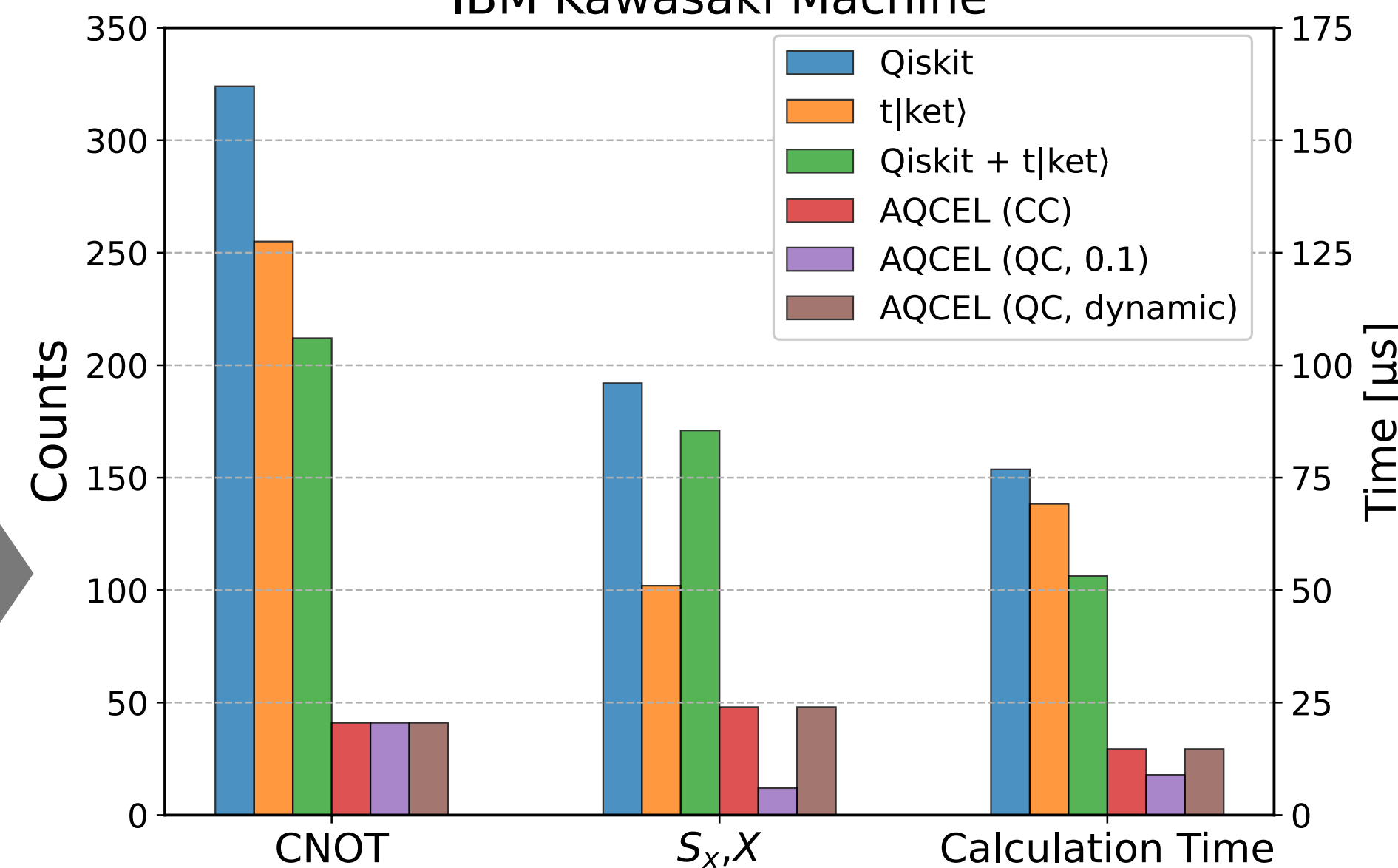
ノイズを除いた振幅

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

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



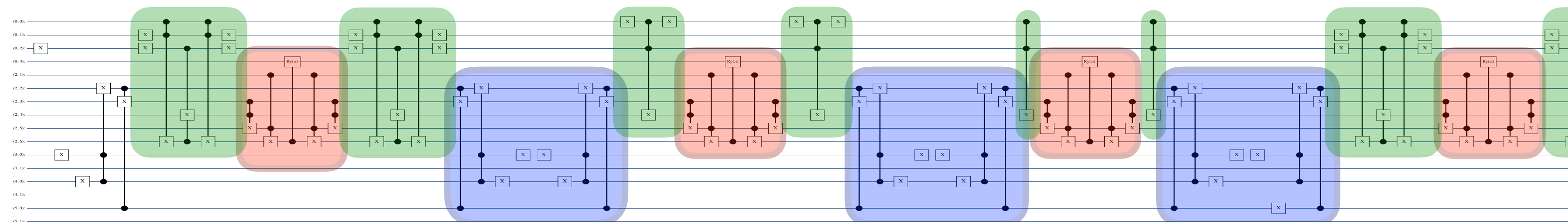
ハードウェア制御

量子アルゴリズム → 量子回路

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

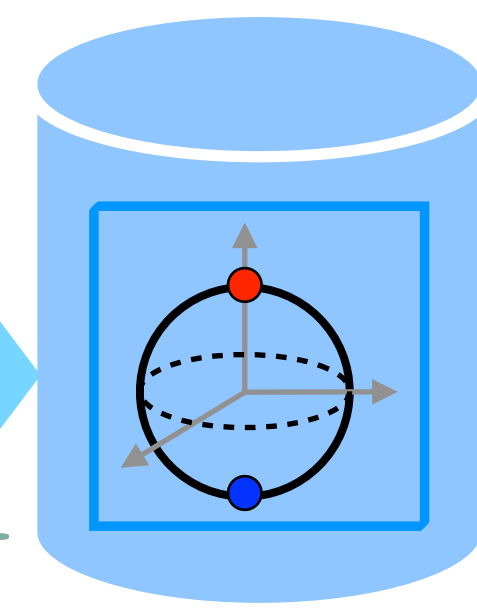
余分なゲートの削除

パルスの最適化

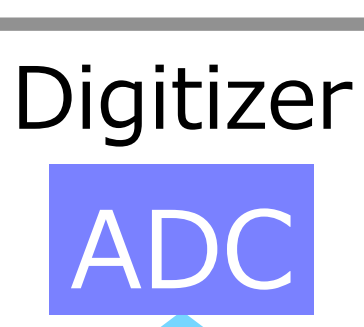
アプリケーションに適したパルス設計



Microwave Control

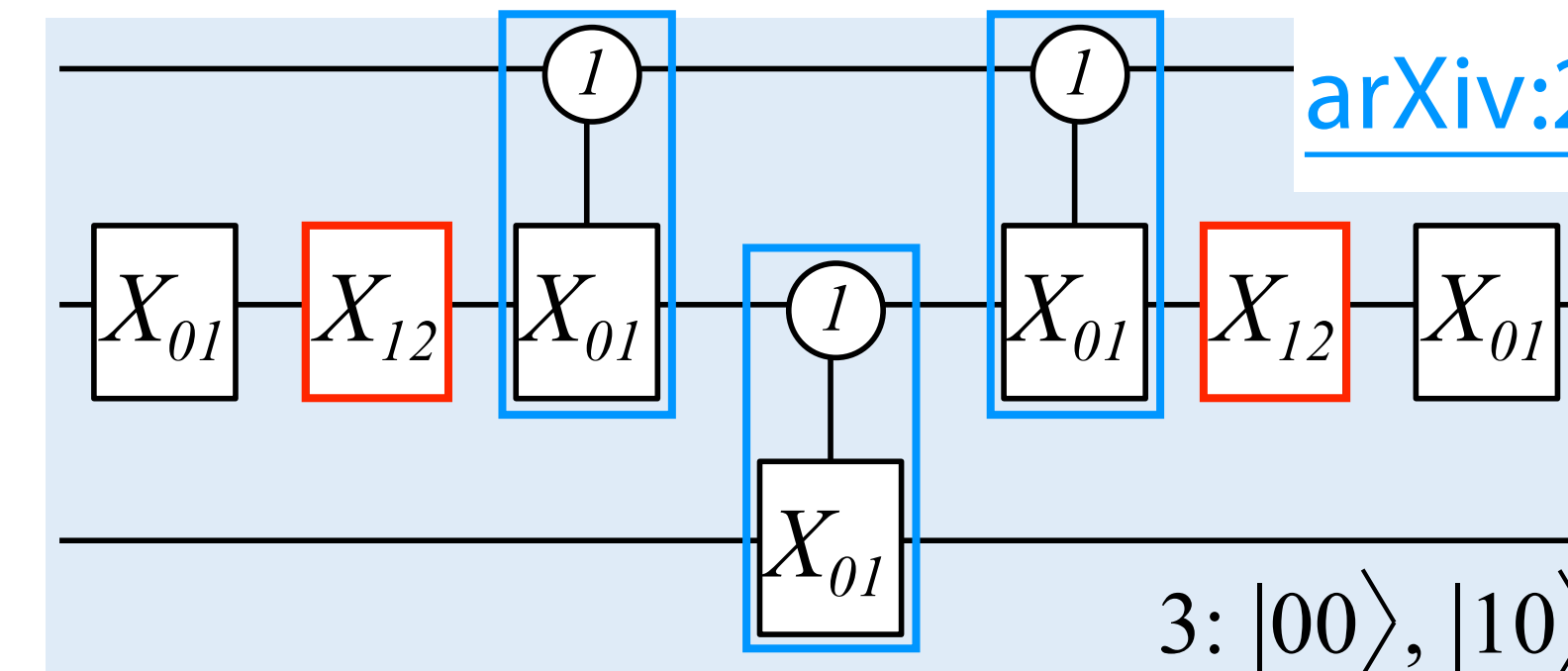


Output Signal



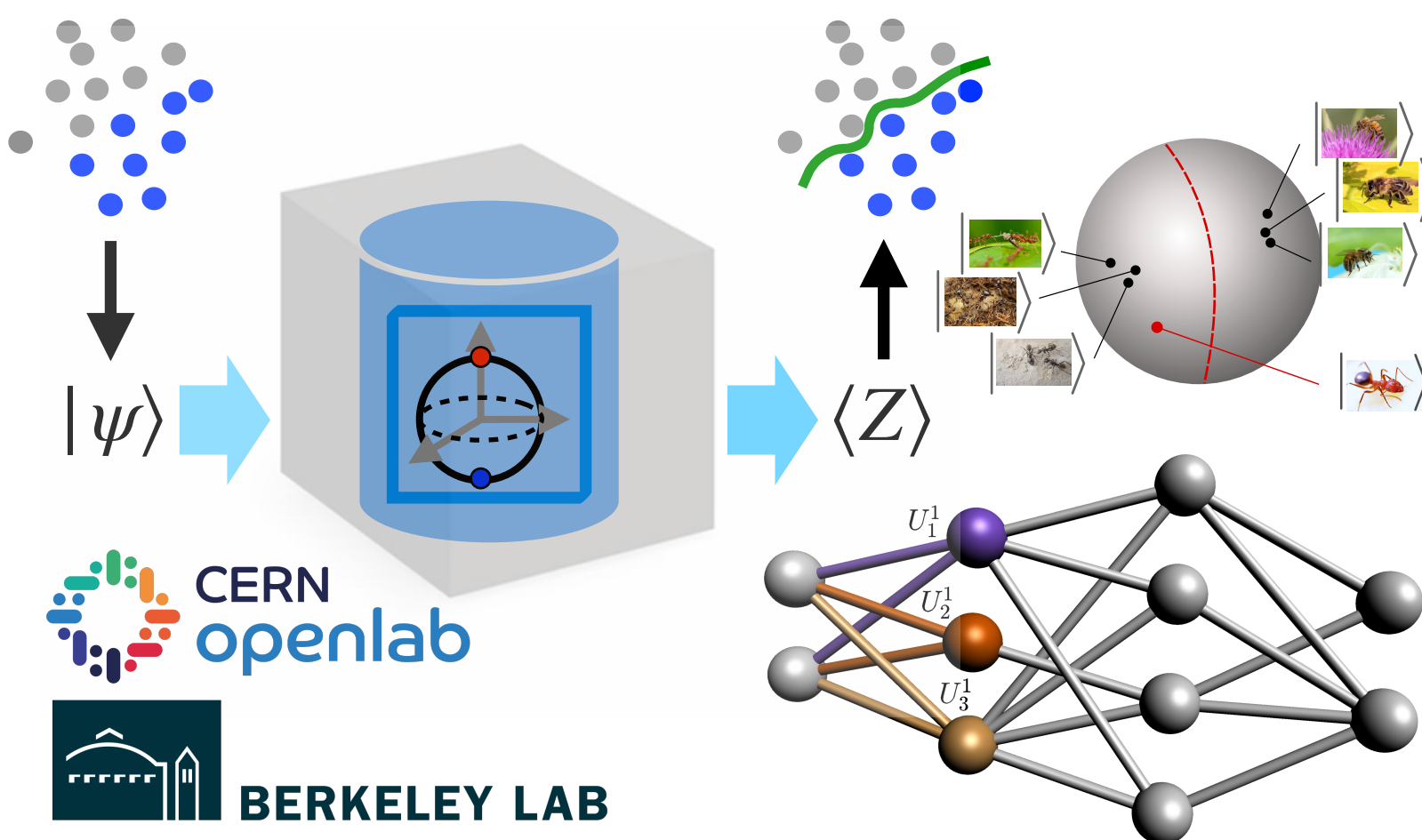
トフォリゲートの量子トリット実装

[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

量子アルゴリズム



量子機械学習アルゴリズムの開発

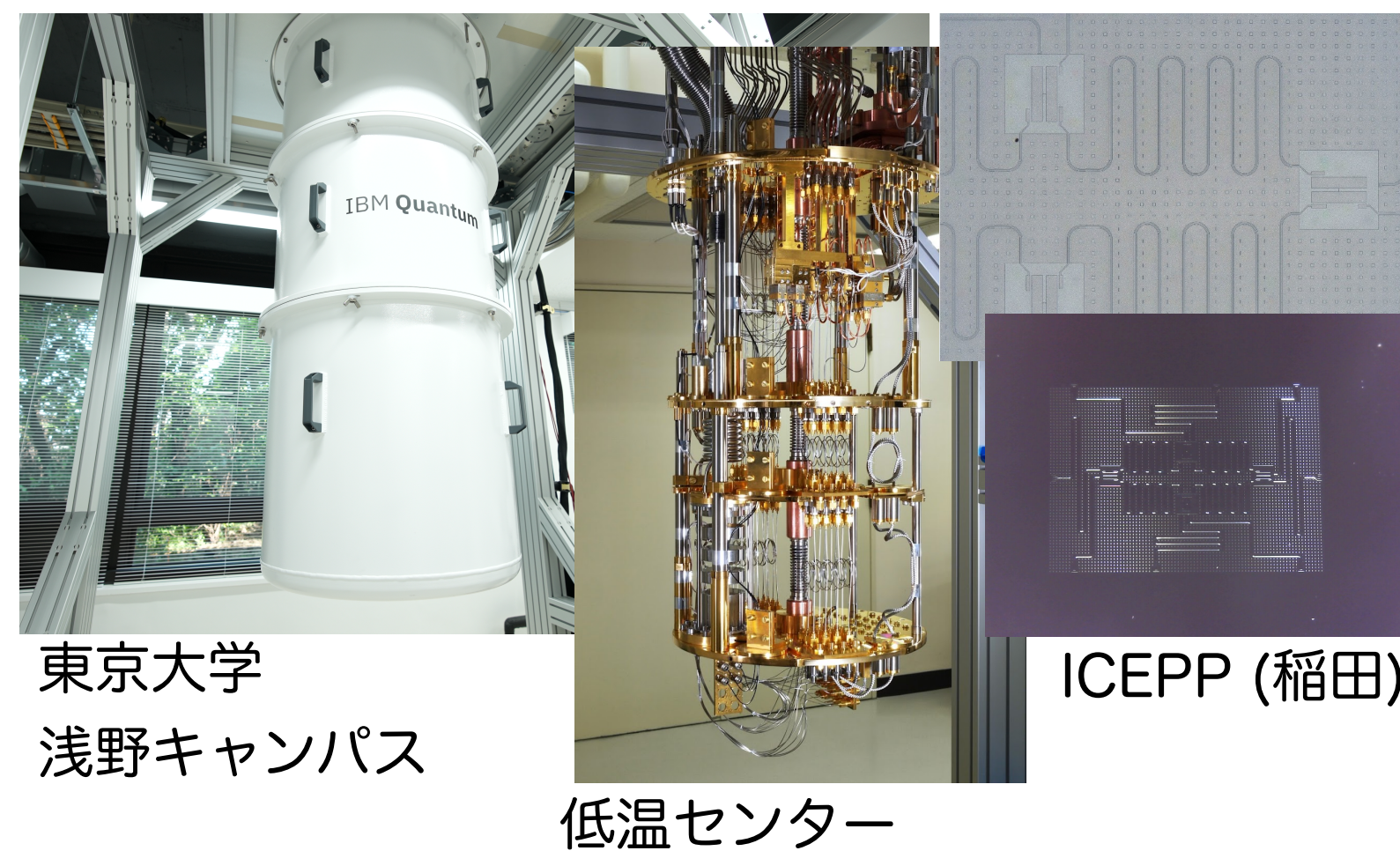
- ▶ 量子-古典ハイブリッド
- ▶ 量子データの学習

回路設計・実装の最適化

- ▶ AQCELソフトウェア
- ▶ パルス制御によるカスタムゲート
- ▶ 擬似量子メモリ

量子AIを使って古典を越える？

量子ハードウェア



東京大学
浅野キャンパス

低温センター

ICEPP (稲田)

IBM量子コンピュータ

- ▶ Multi-junction量子ビットの開発
- ▶ 高準位素子（量子トリット）の研究
→ [ハードウェア・テストセンター](#)

(将来的に)量子センサーへの展開

- ▶ 光量子系との接続
- ▶ 量子センサーを使った新物理探索

次世代の超伝導量子システムを作る

人材育成・共同研究



理学部1号館10階

量子ネイティブの育成 → [QNEC](#)

- ▶ 量子コンピューティング教材
([実習用ワークブック](#))
- ▶ 学部生・大学院生の教育

量子コンピュータの共同研究

- ▶ 学術機関・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](#)

教育も手厚い!

とても新しい分野です。挑戦してみたい方、大歓迎!!