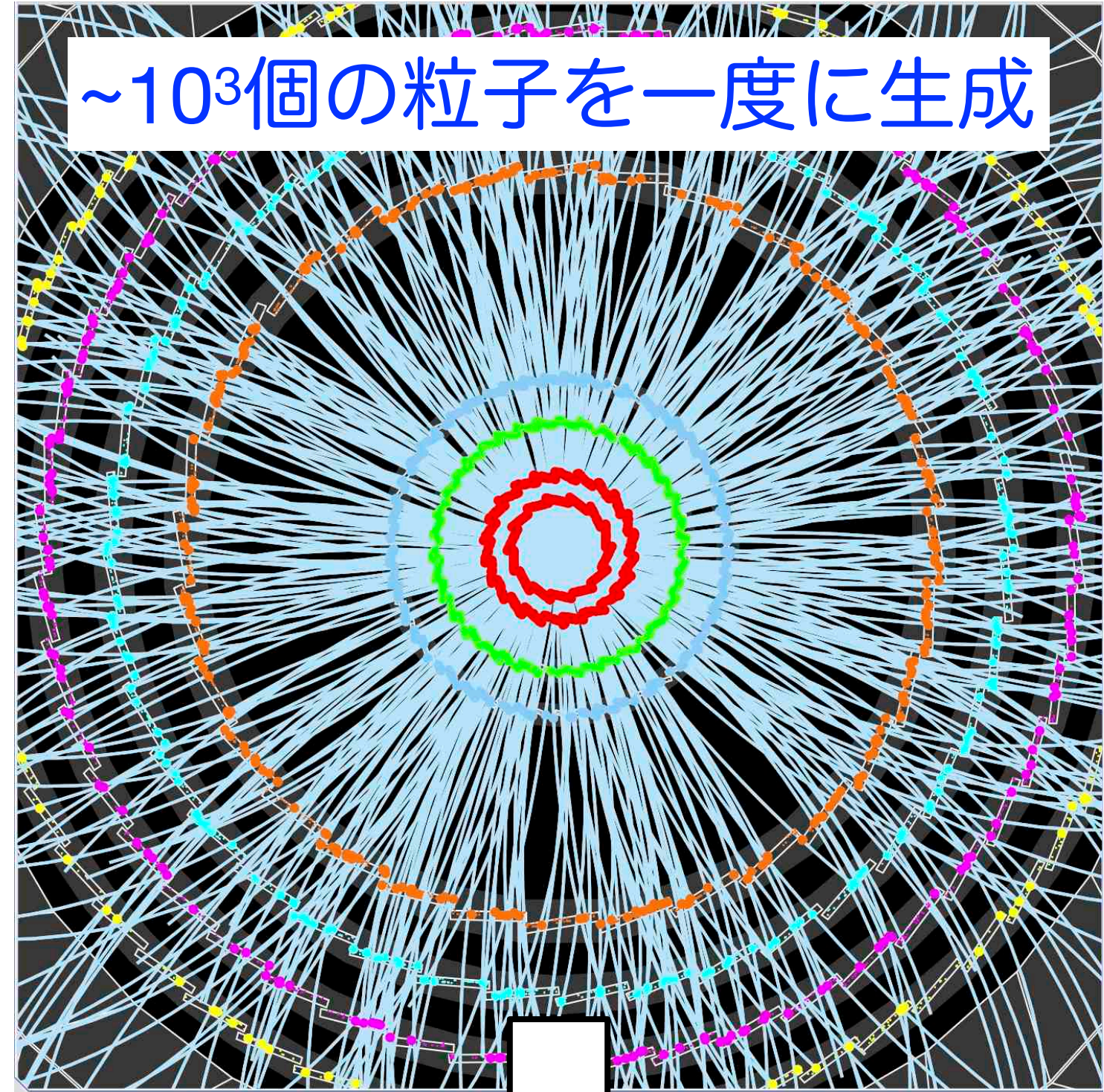
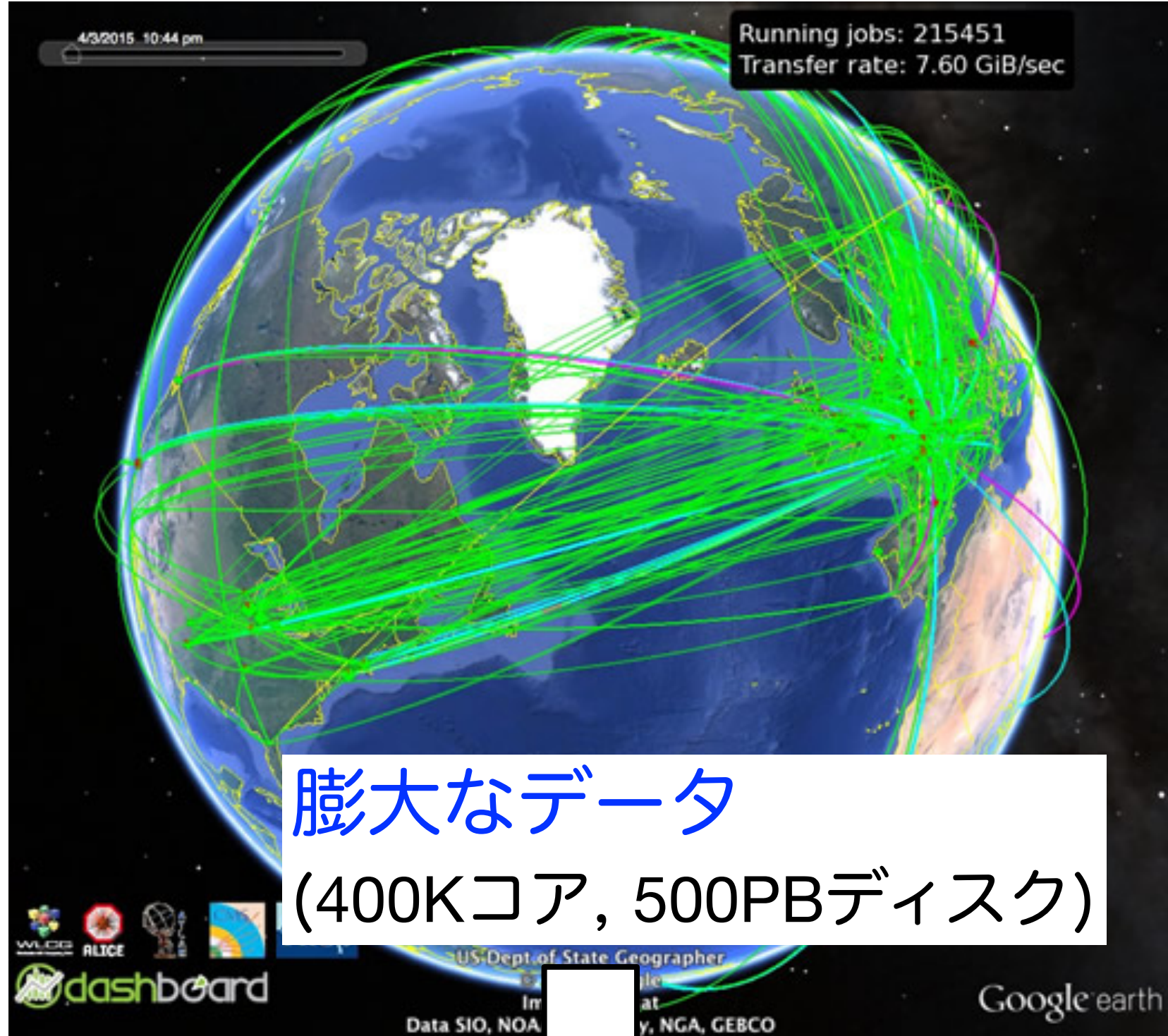
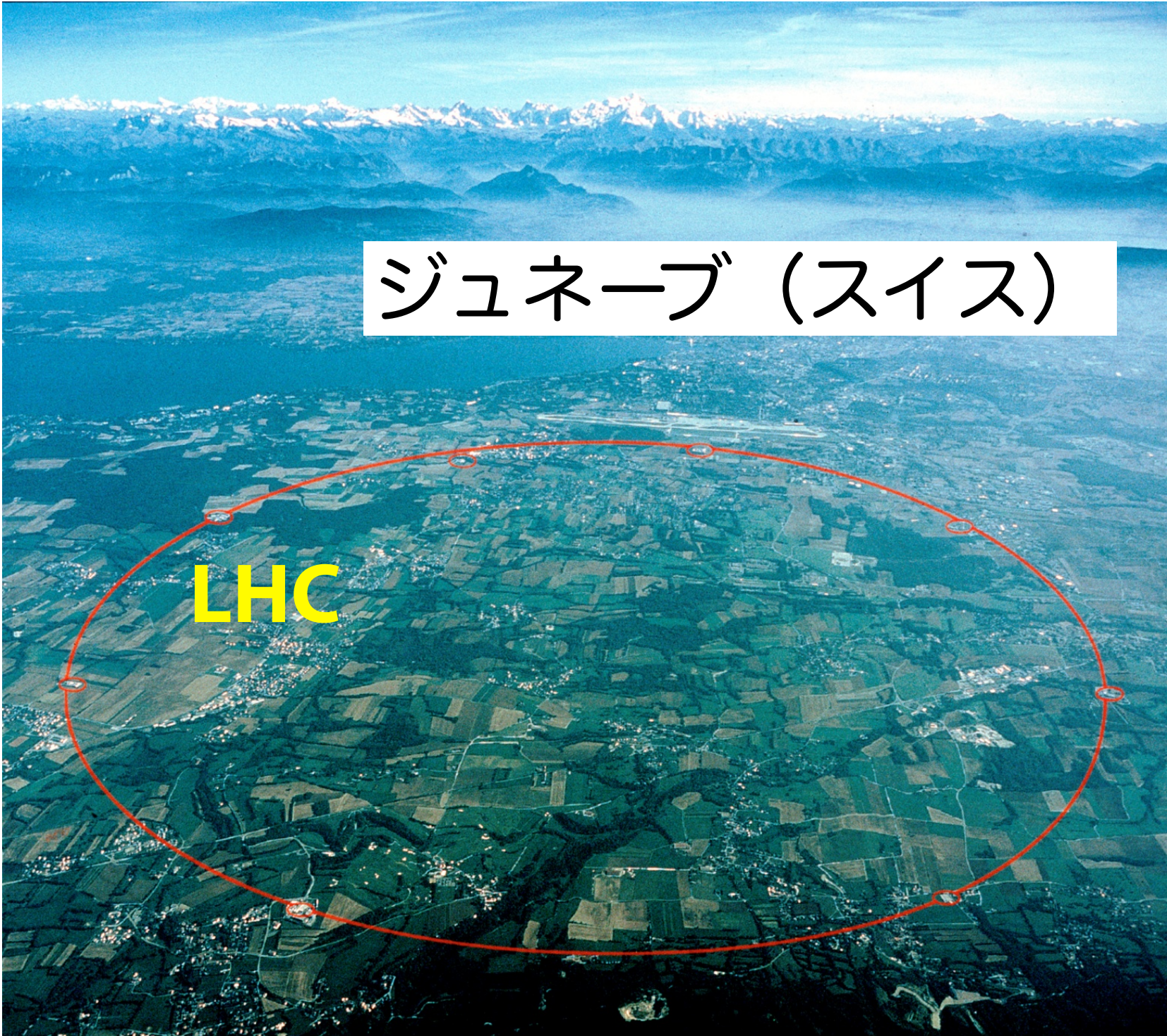


量子コンピュータ（ソフト）の研究テーマ

<https://quantum-icepp.jp>

量子AIをキーワードに

なぜ量子コンピュータを考えるの？



次の2-30年に渡って、さらにデータが増える ~100倍!!

~10倍!

計算爆発に備えるには？ → 量子コンピュータとAI(機械学習)を考えてみよう!!

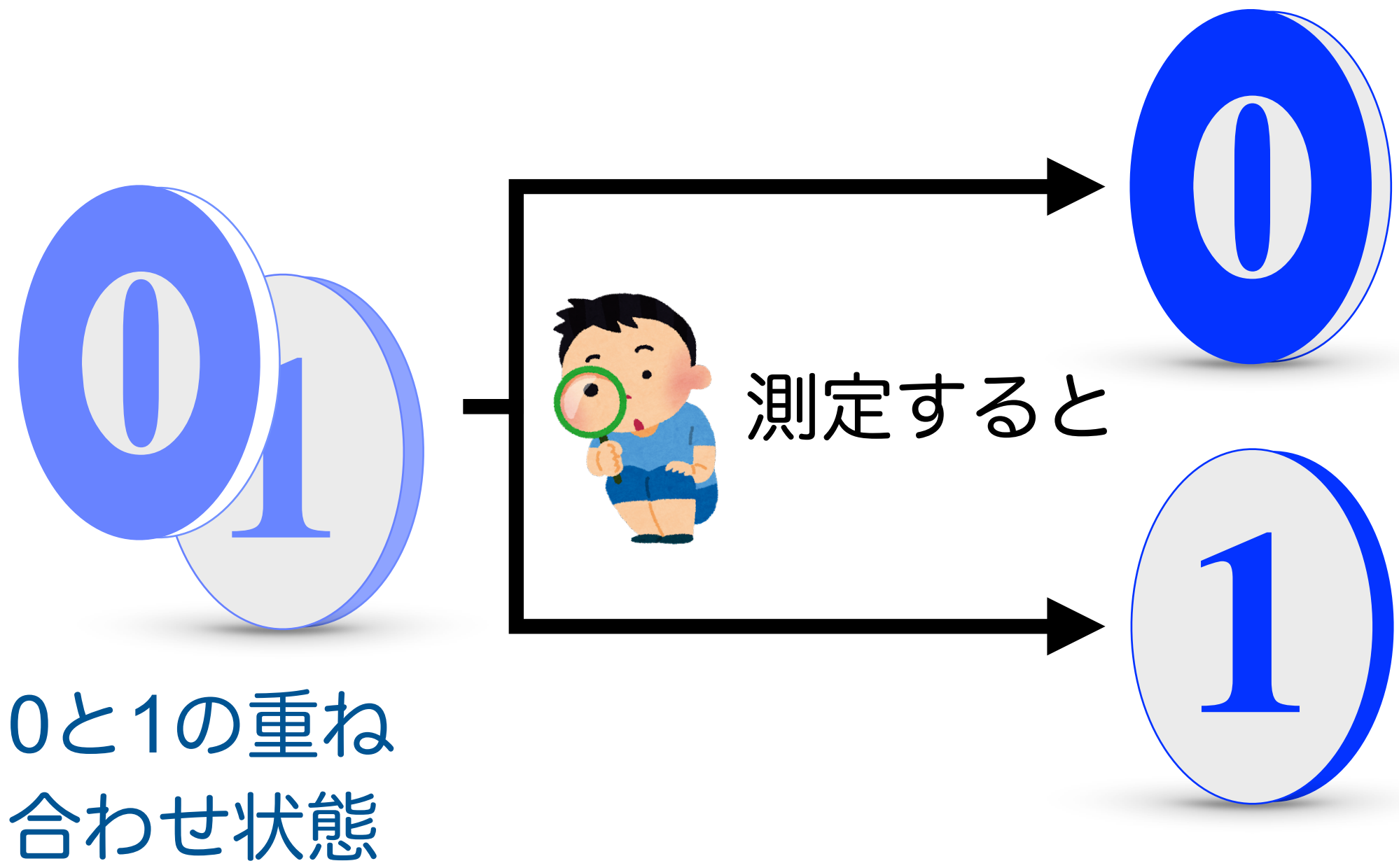
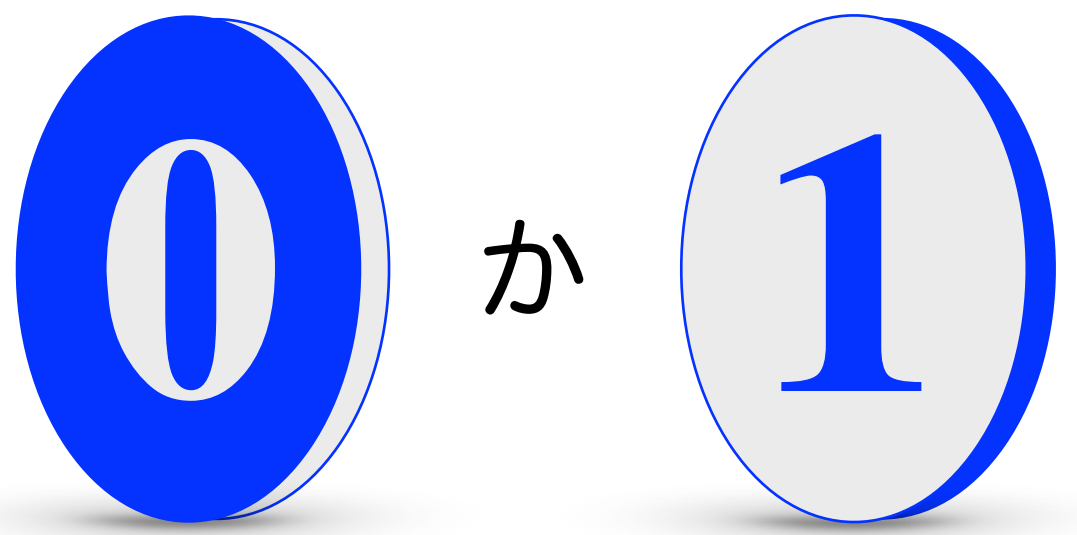
素粒子物理は微小な粒子(=量子)を扱っているわけだし、量子コンピュータとも親和性がある(はず)

量子コンピュータとは？

➡ 「量子」の性質を持つ2準位系 (=量子ビット) を使う計算機

通常のコンピュータ： **古典ビット**

量子コンピュータ： **量子ビット**

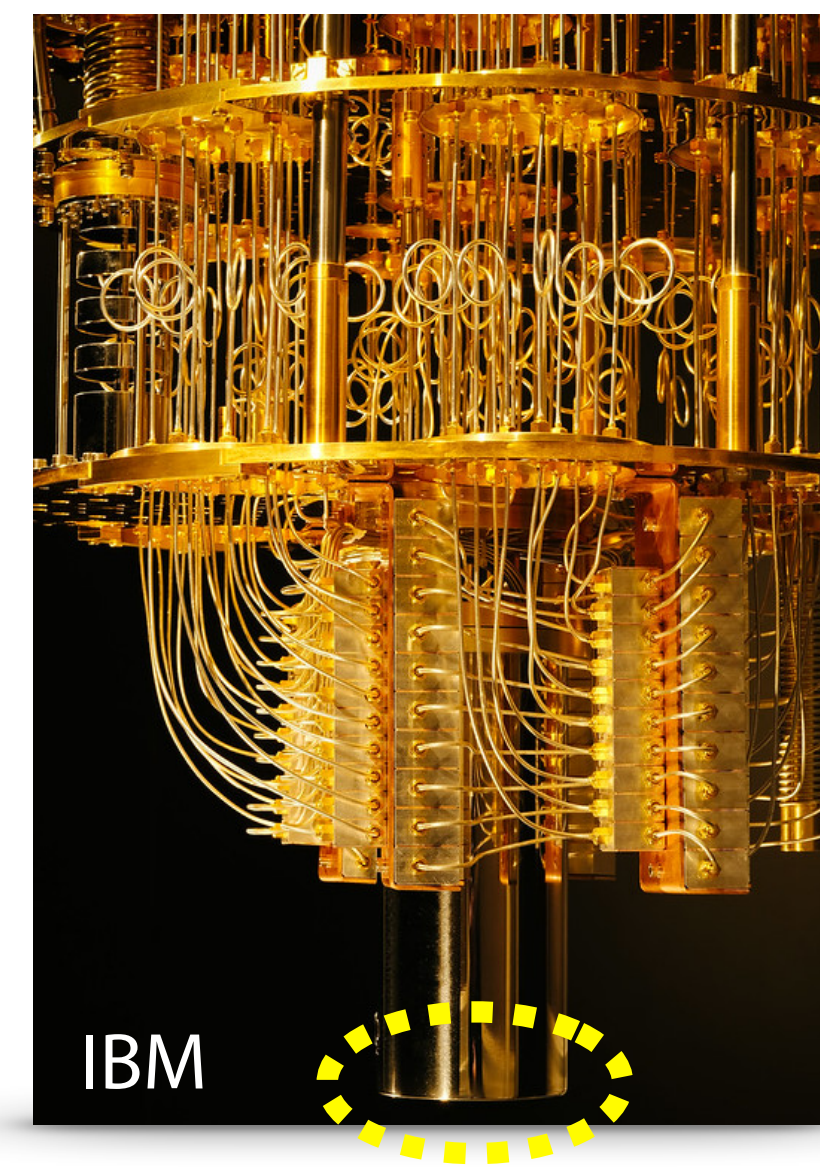
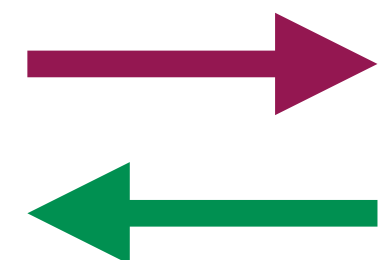
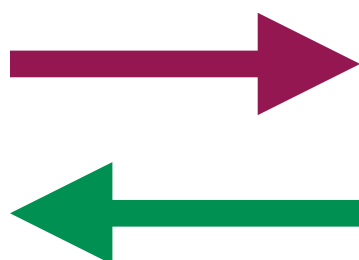


重ね合わせを使うことで、量子ビットの数に対して、指数関数的に扱える状態が増える

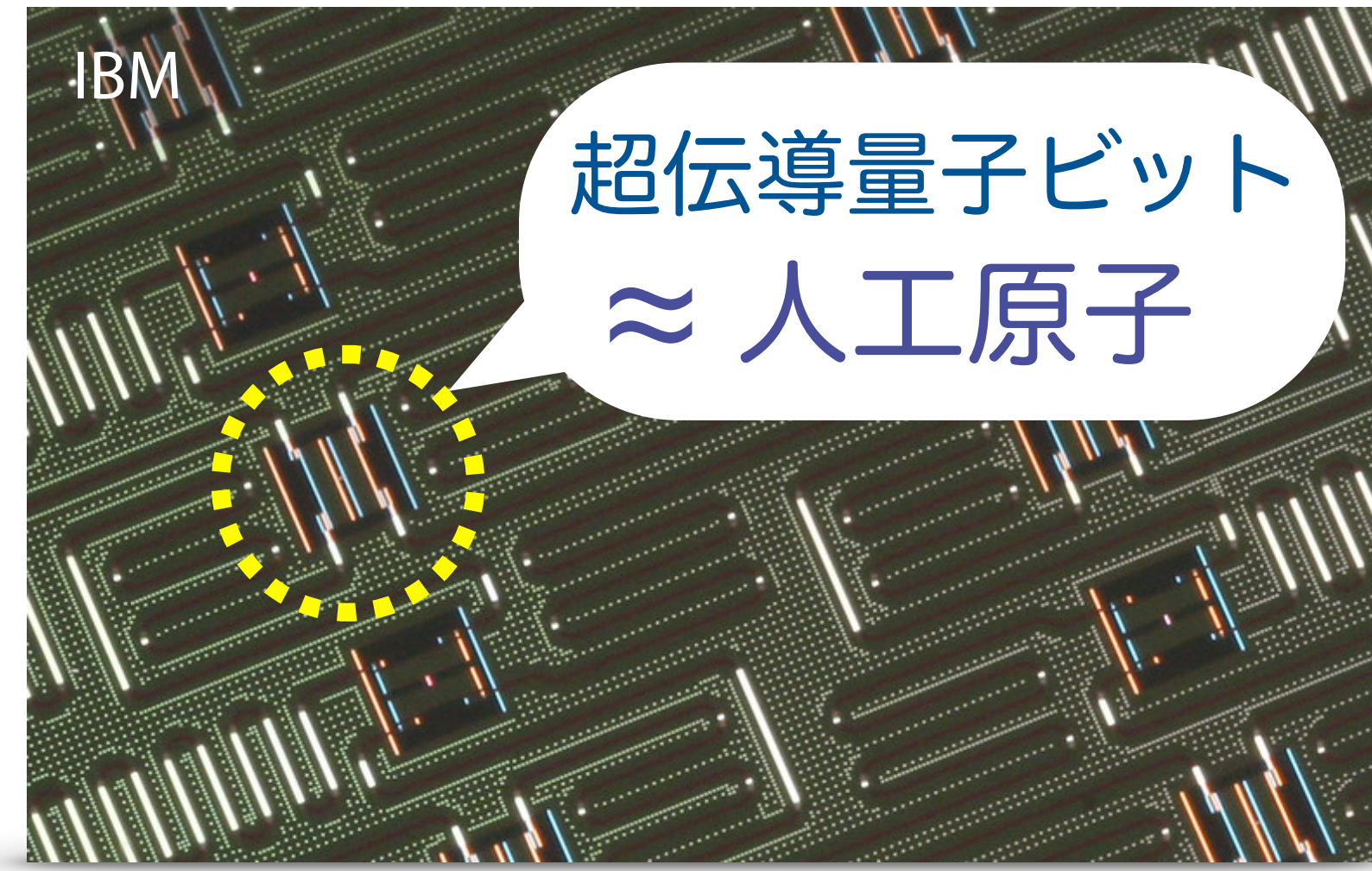
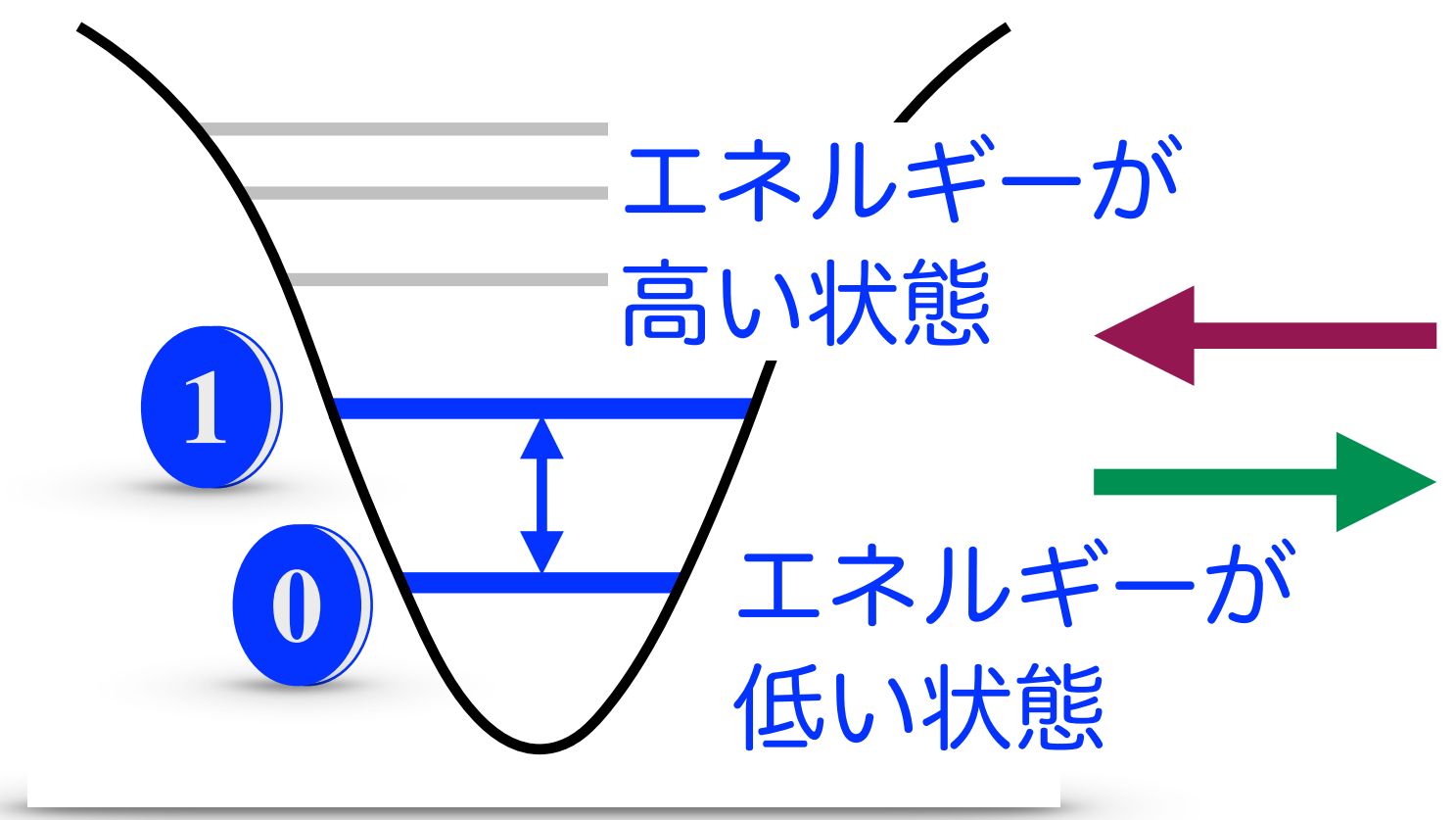
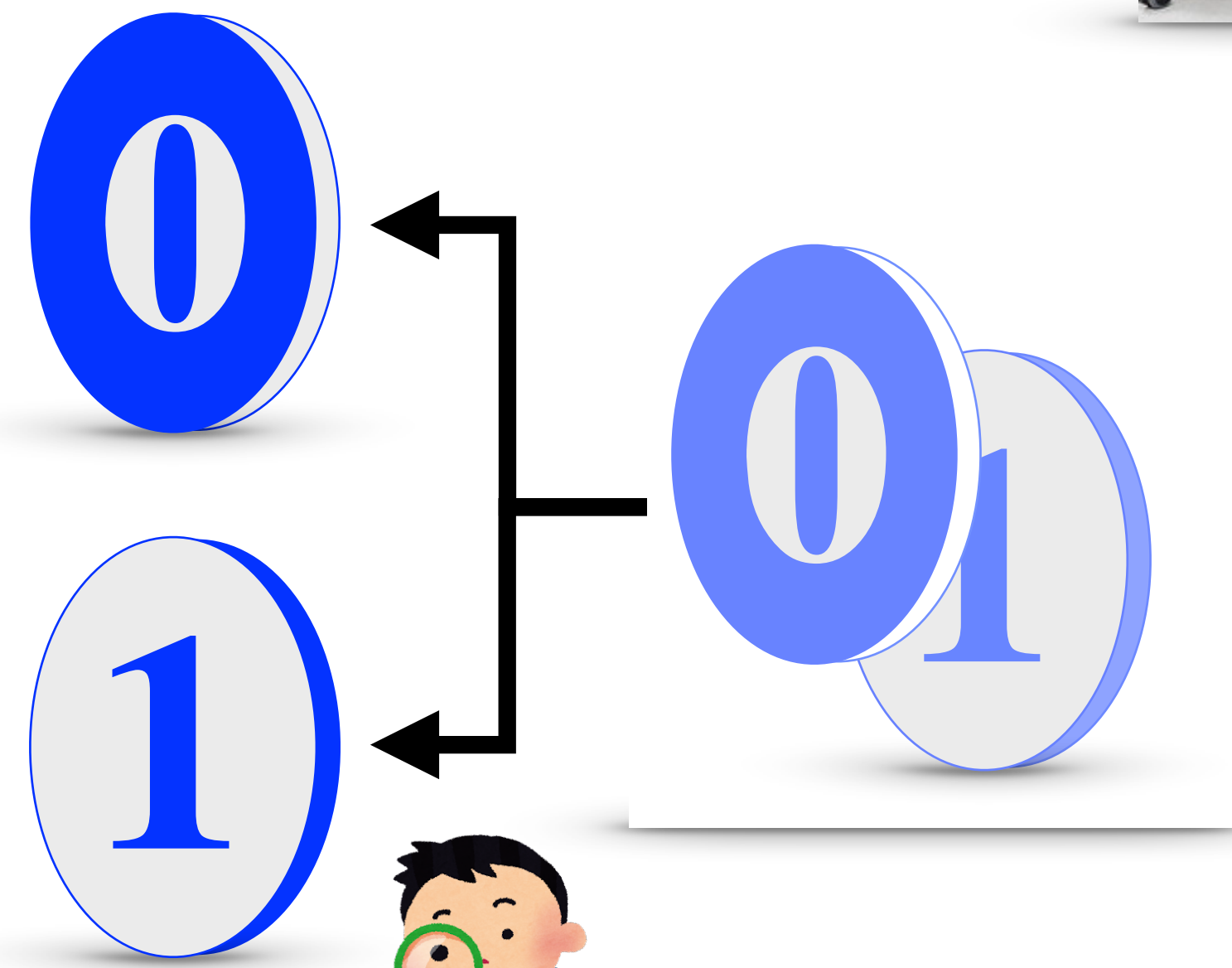
- 10量子ビット → 1000個の状態
- 50量子ビット → 1000兆個の状態
- 300量子ビット → 宇宙にある全ての原子の数だけの状態

量子コンピュータはどう動くの？

SFの世界ではなく現実に存在します



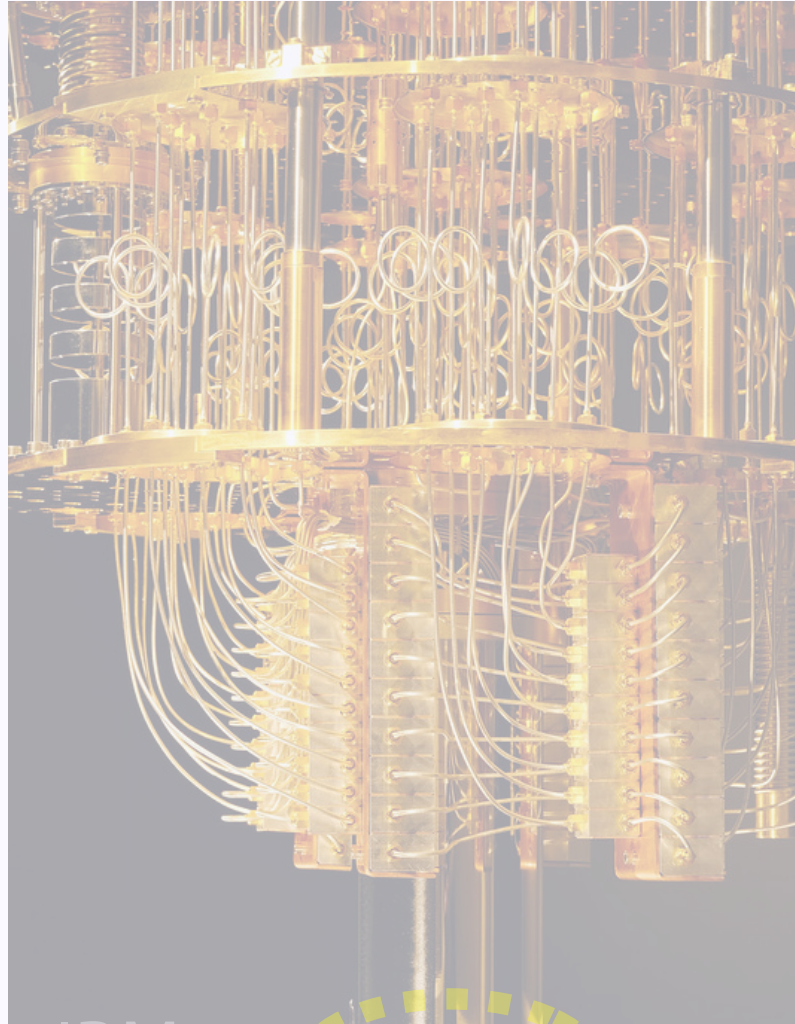
プログラムを量子コンピュータに送り、電気信号として量子ビットで処理する (→ 向き)



量子ビットを測定した結果が逆向きに戻ってくる (← 向き)

量子コンピュータはどう動くの？

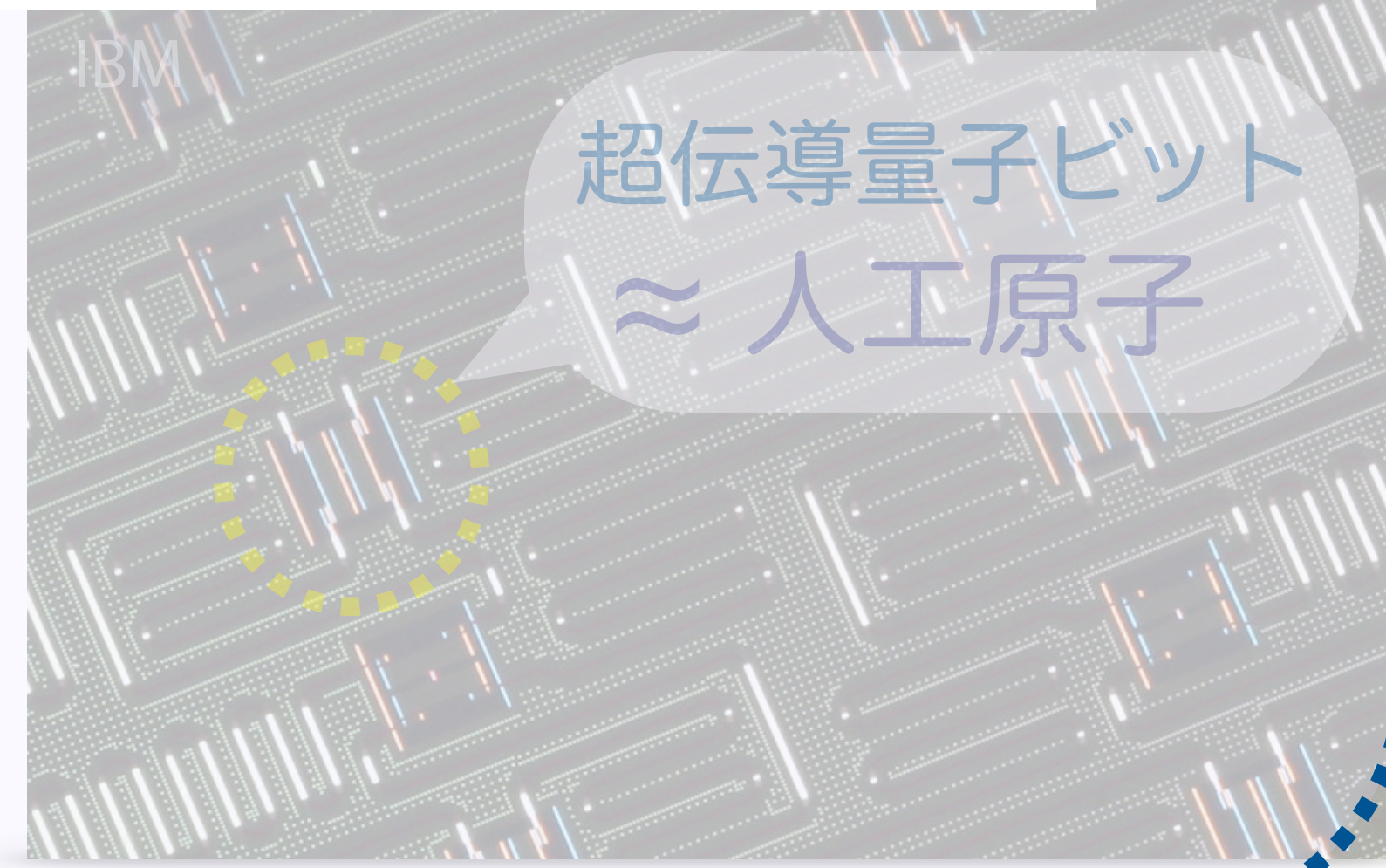
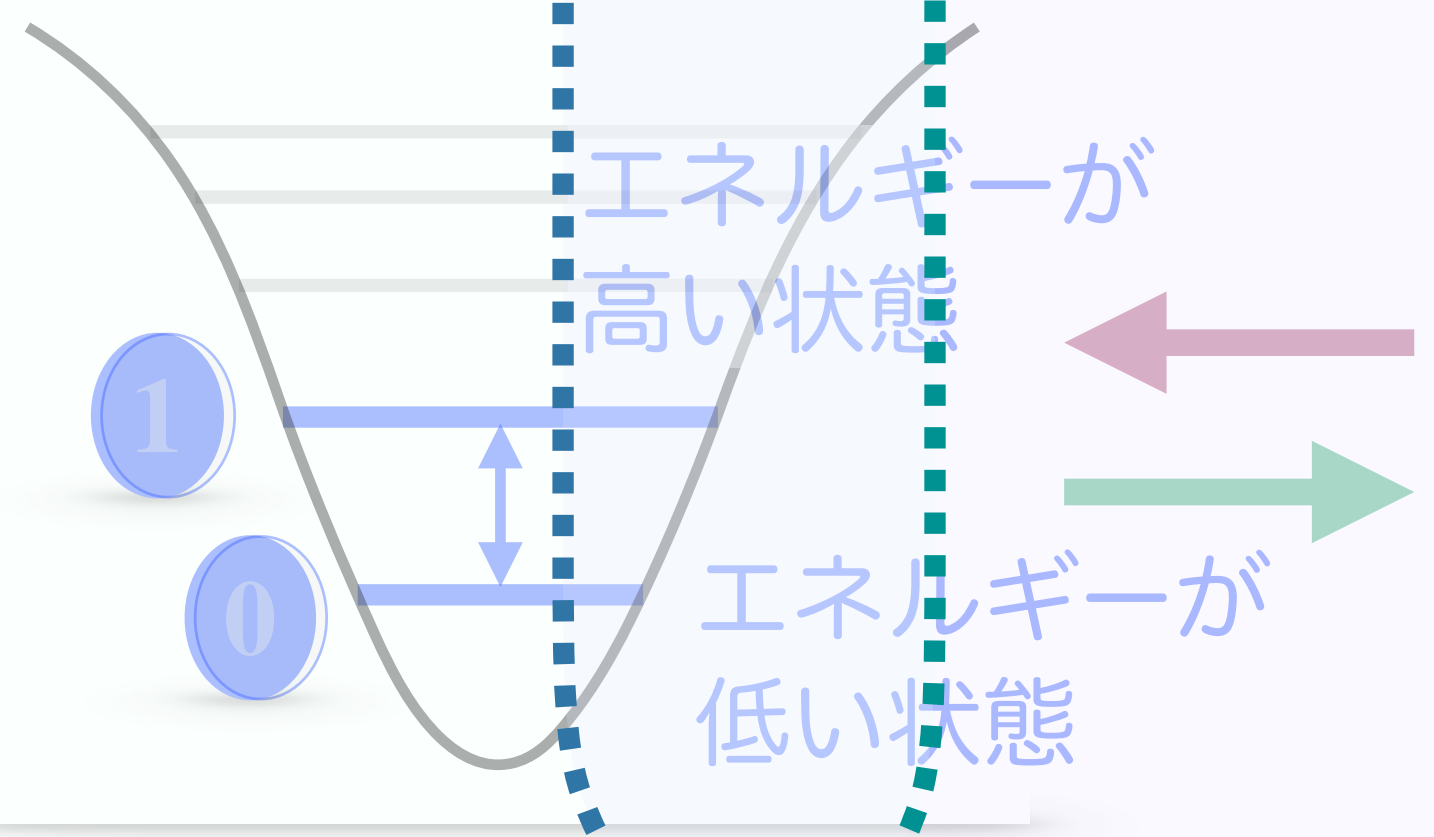
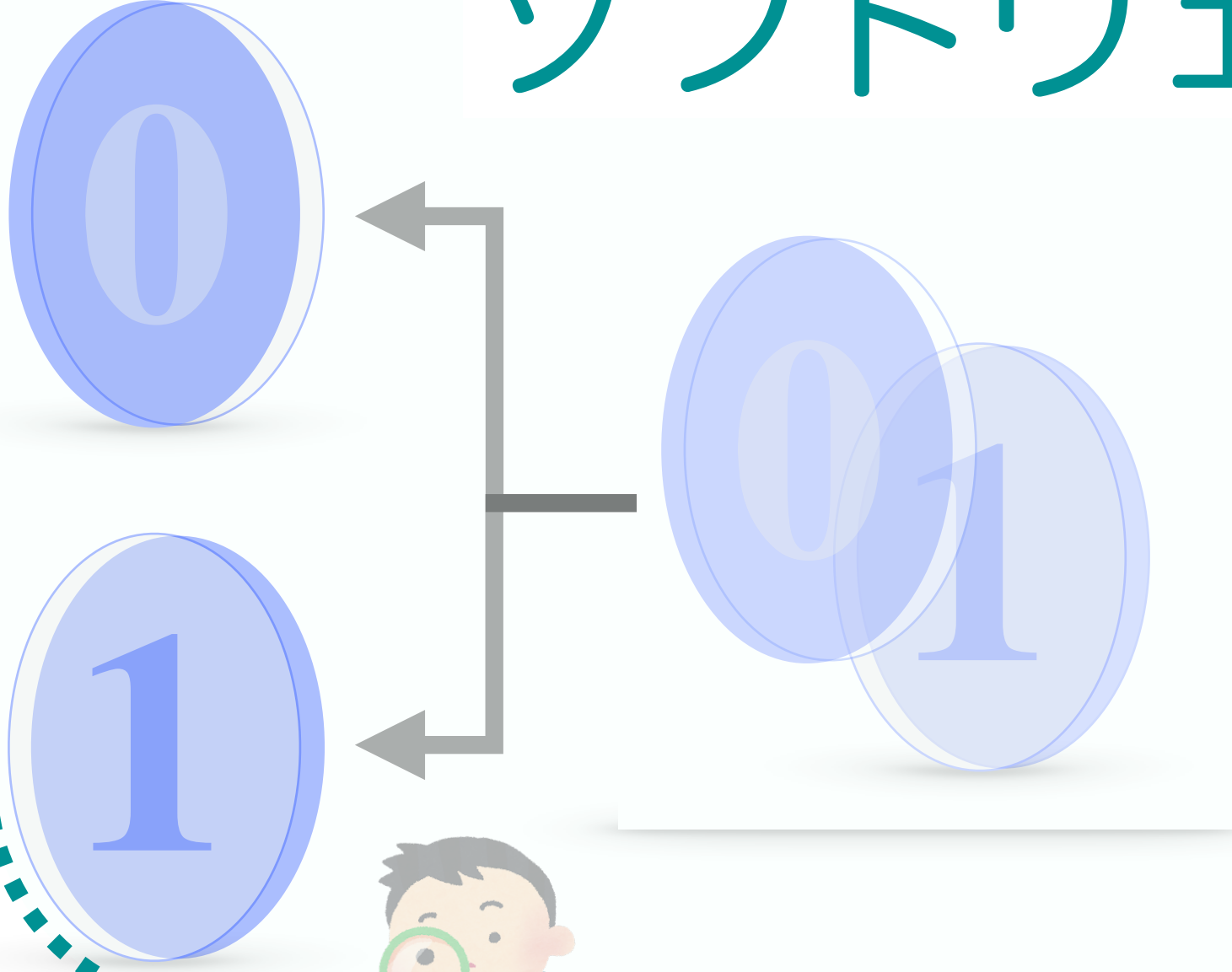
SFの世界ではなく現実に存在します



プログラムを量子コンピュータに送り、電気信号として量子ビットで処理する (→ 向き)

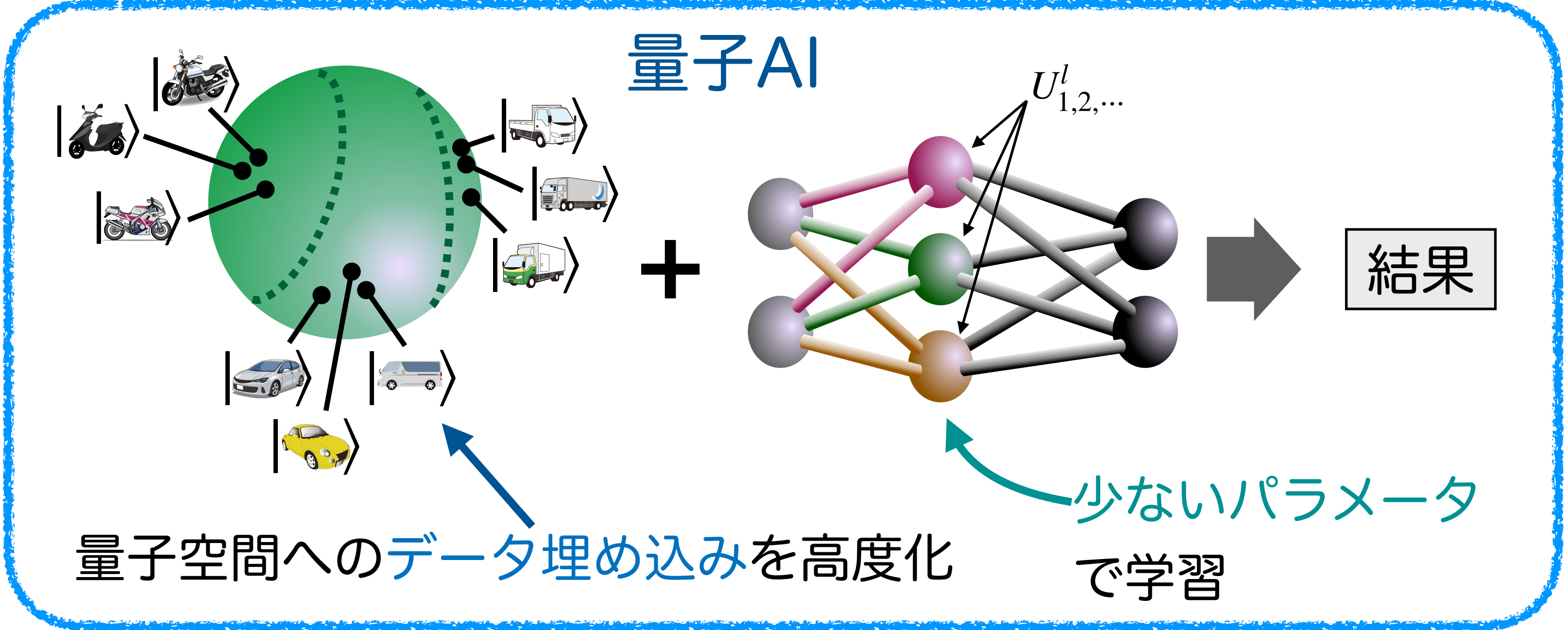
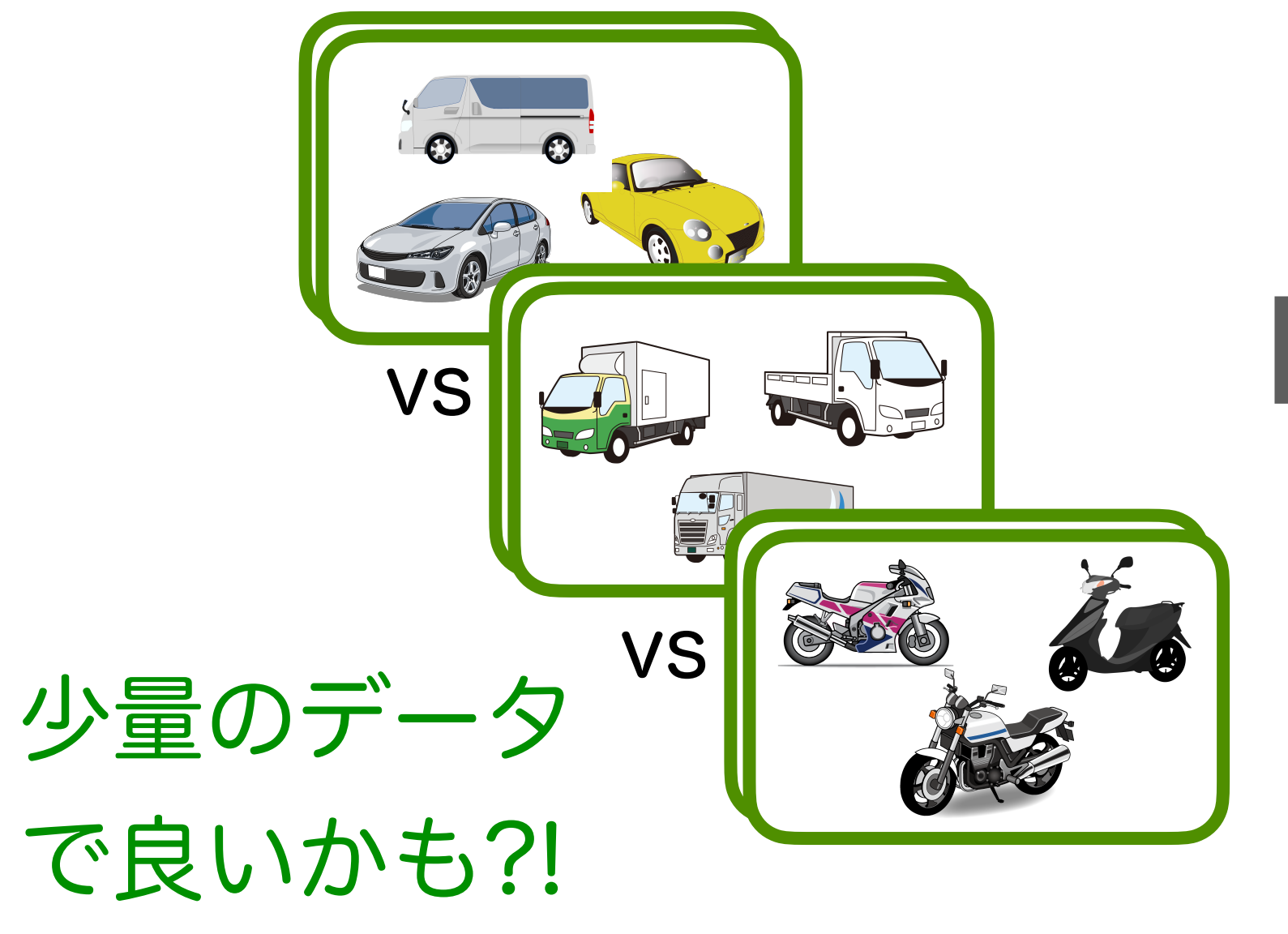
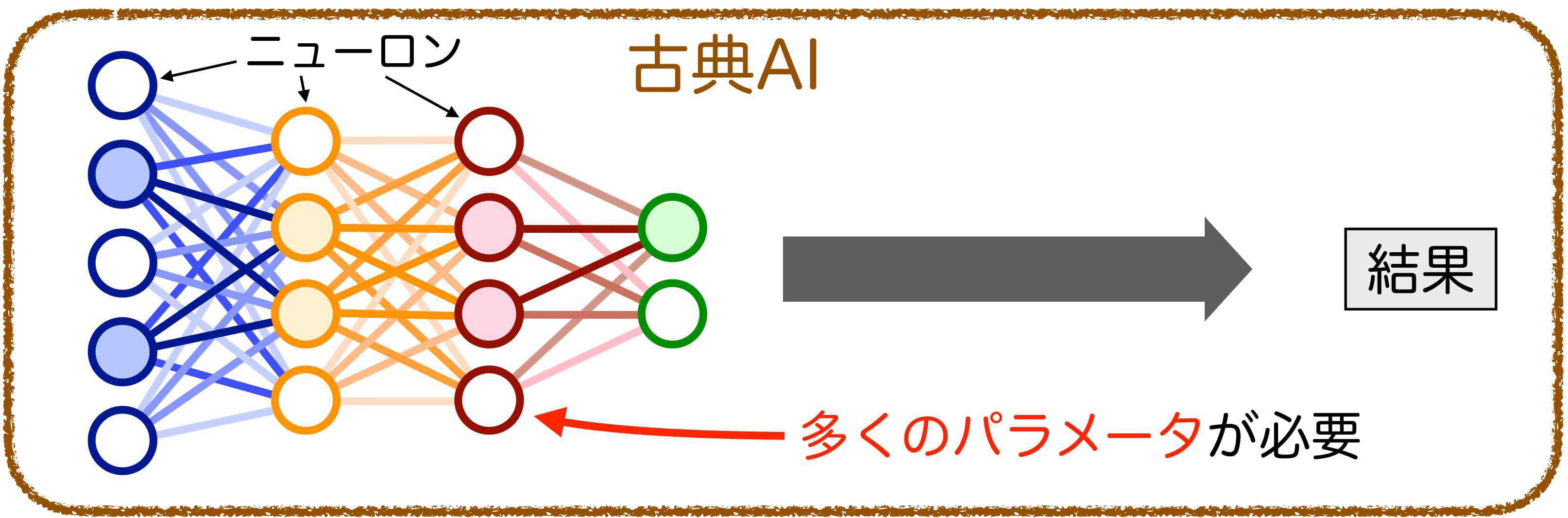
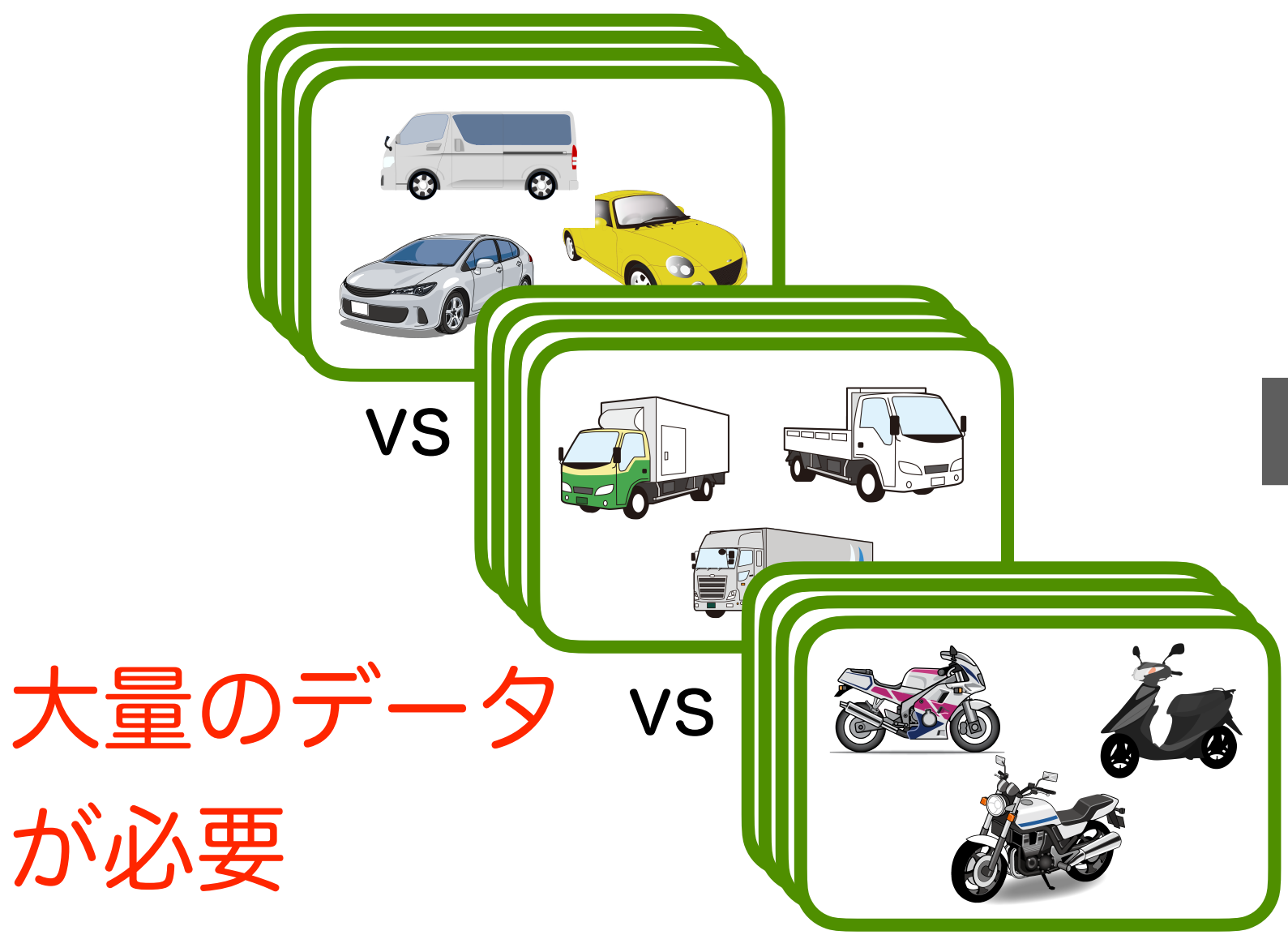
ソフトウェアの話

ハードウェアの話



量子ビットを測定した結果が逆向きに戻ってくる (← 向き)

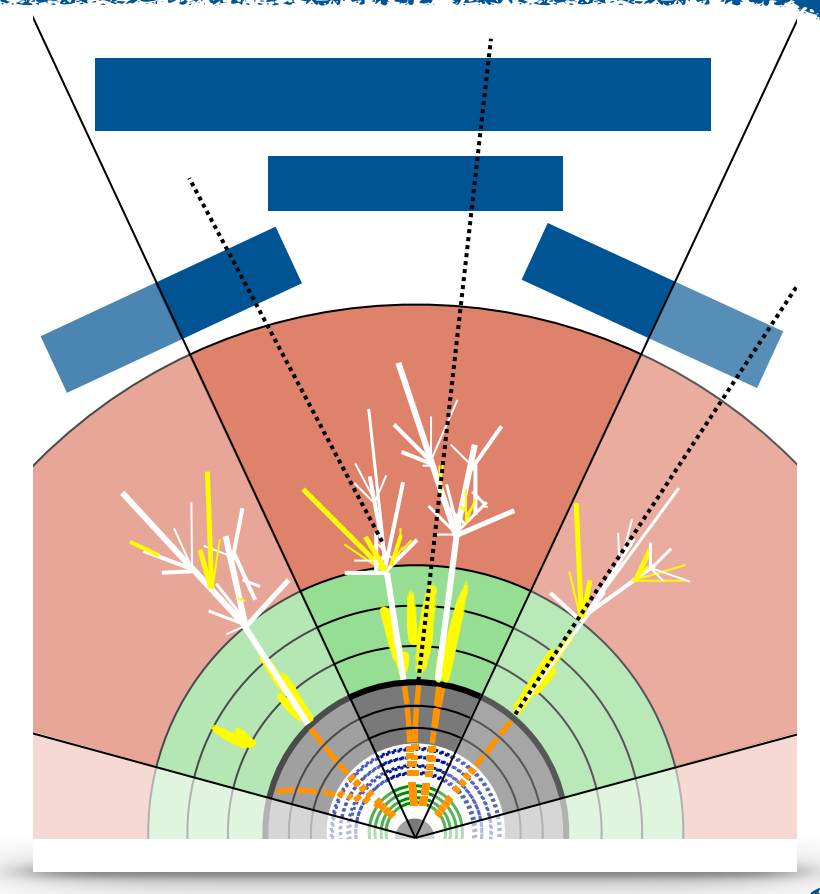
量子コンピュータ + AI = 量子AI



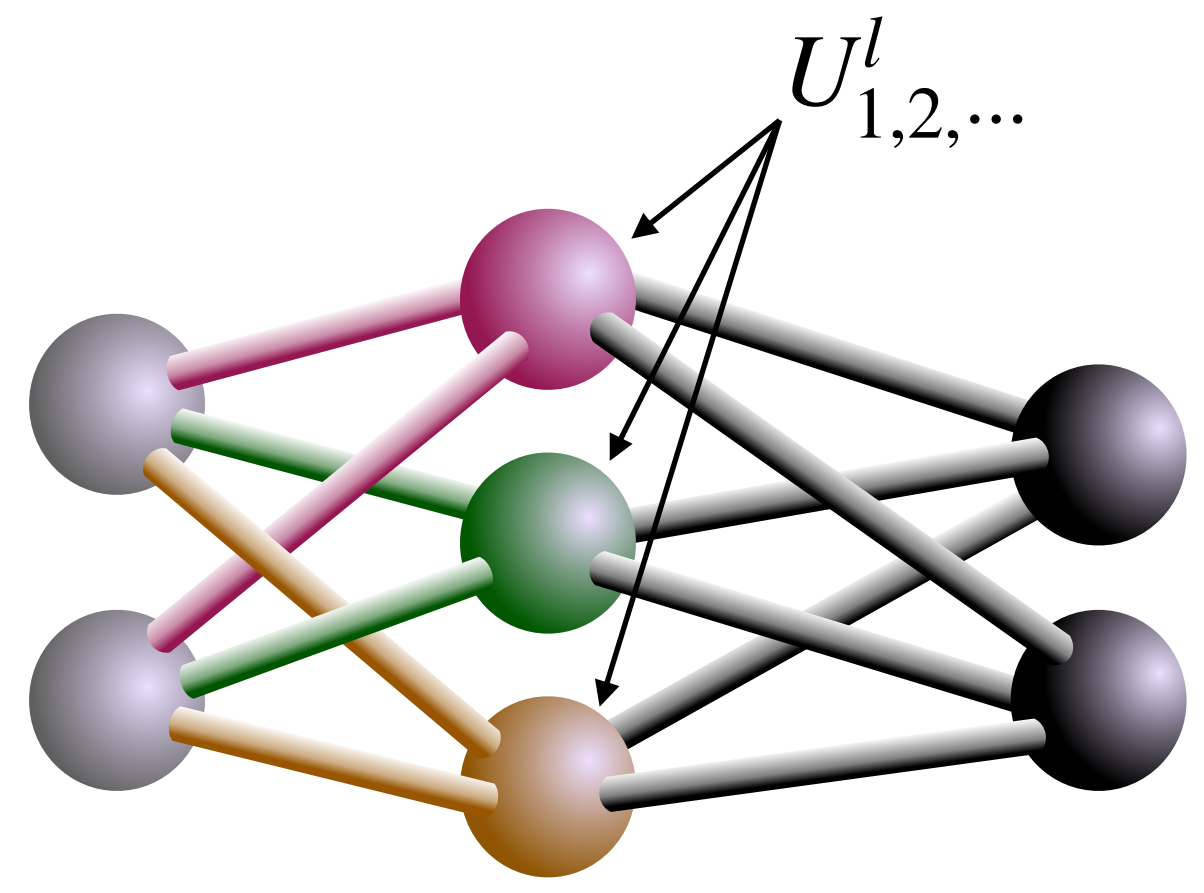
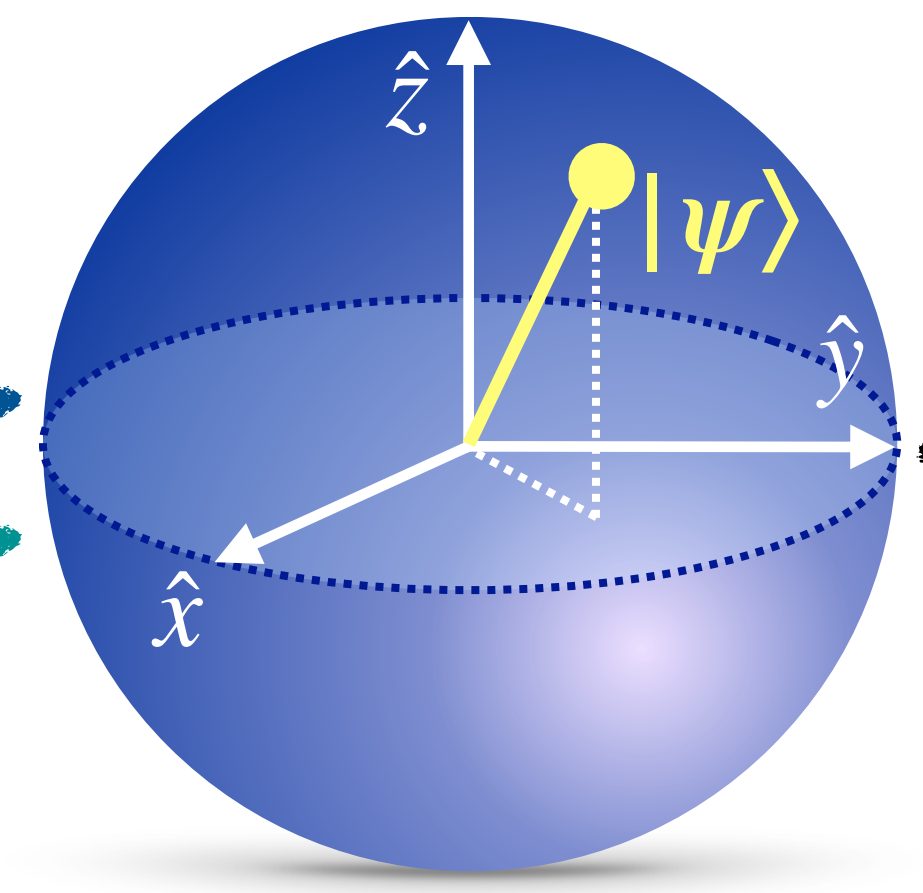
量子コンピュータ+AI = 量子AI

古典データだけでなく、量子データをコヒーレントに学習することも可能

検出器データ

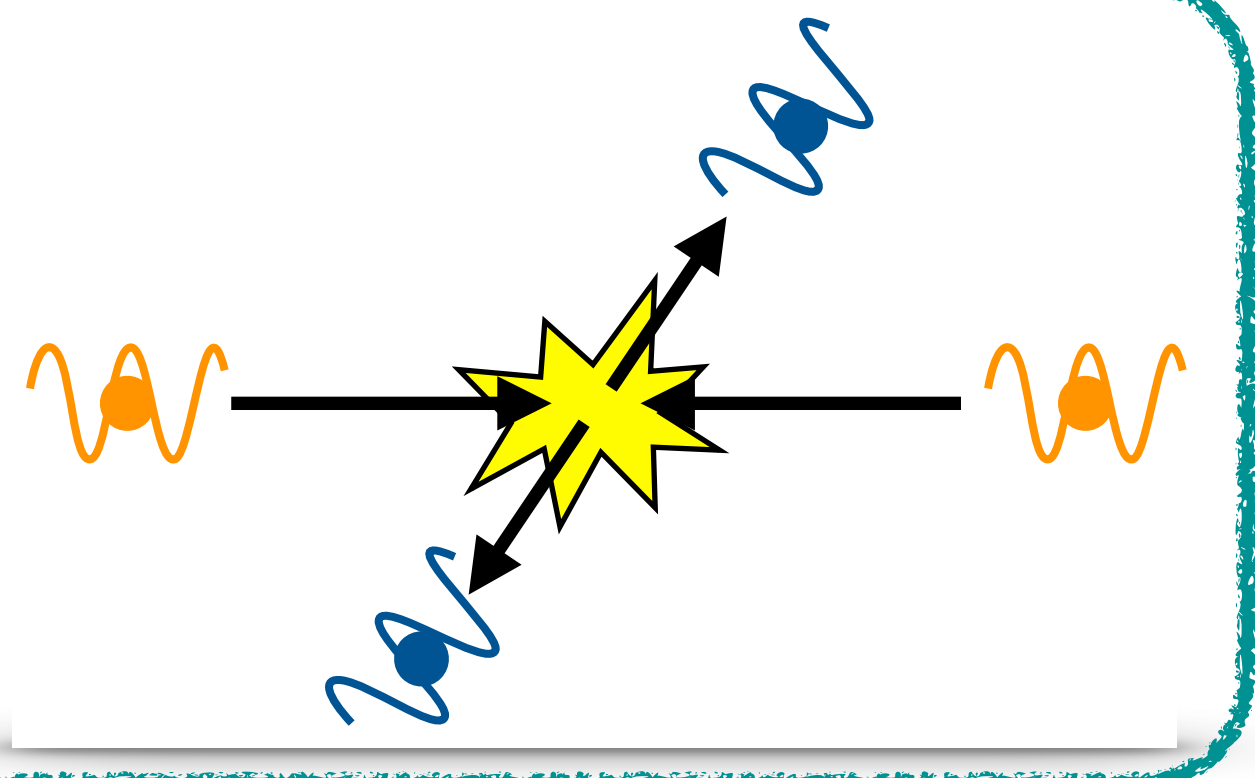


古典データ



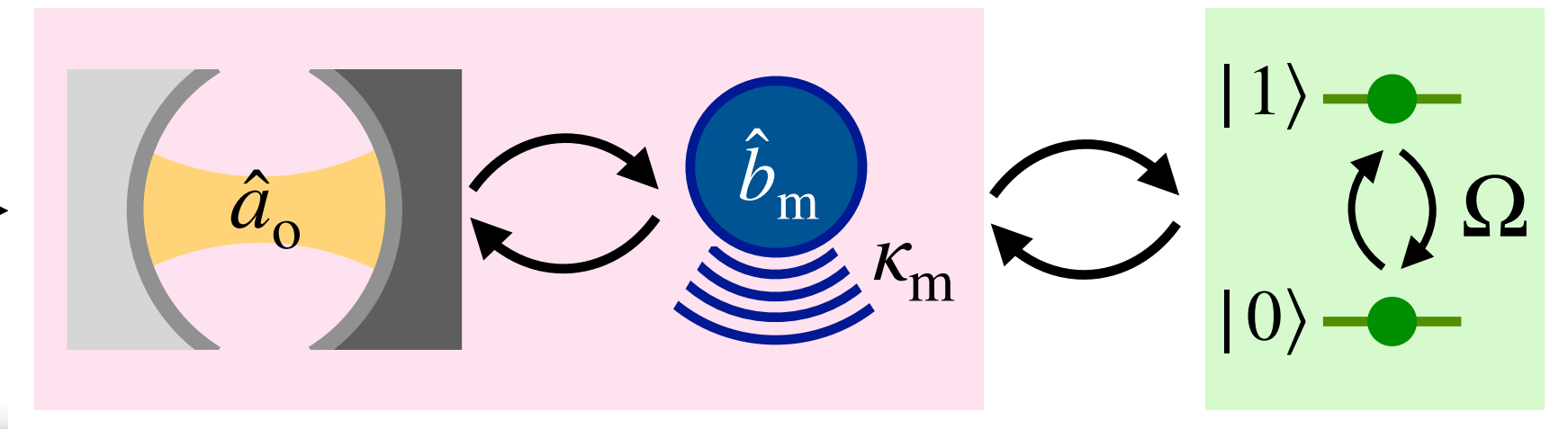
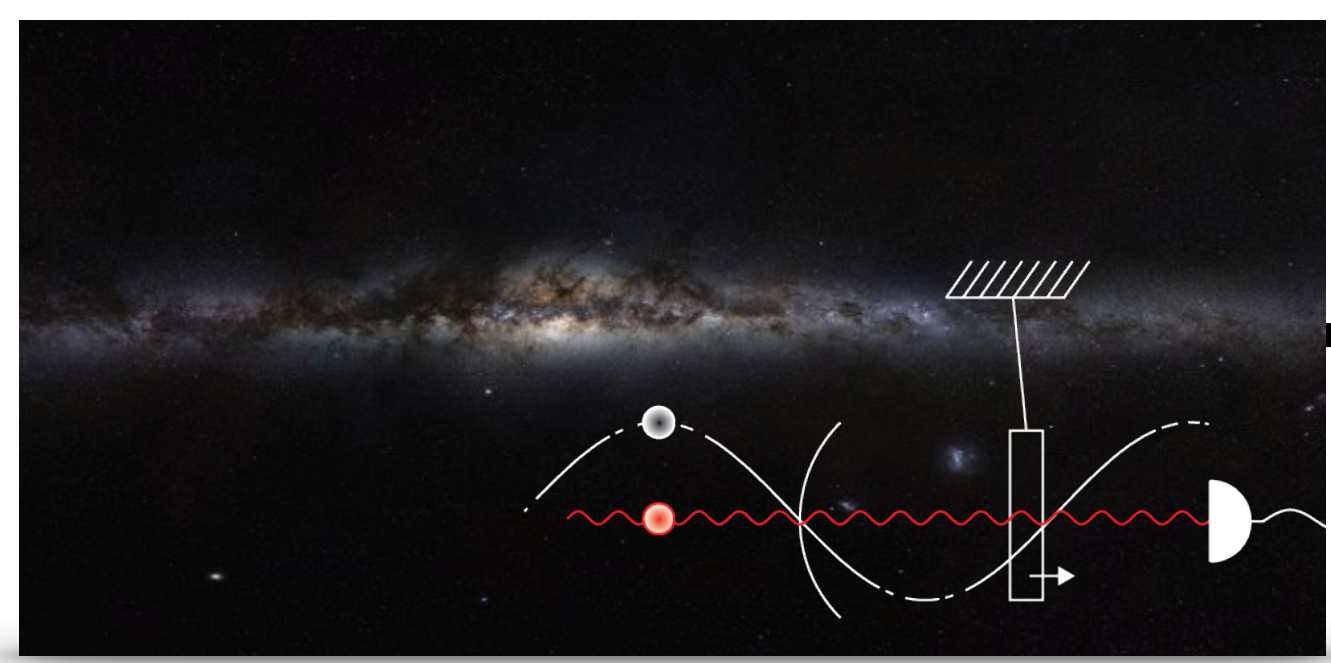
結果

量子ダイナミクスシミュレーション

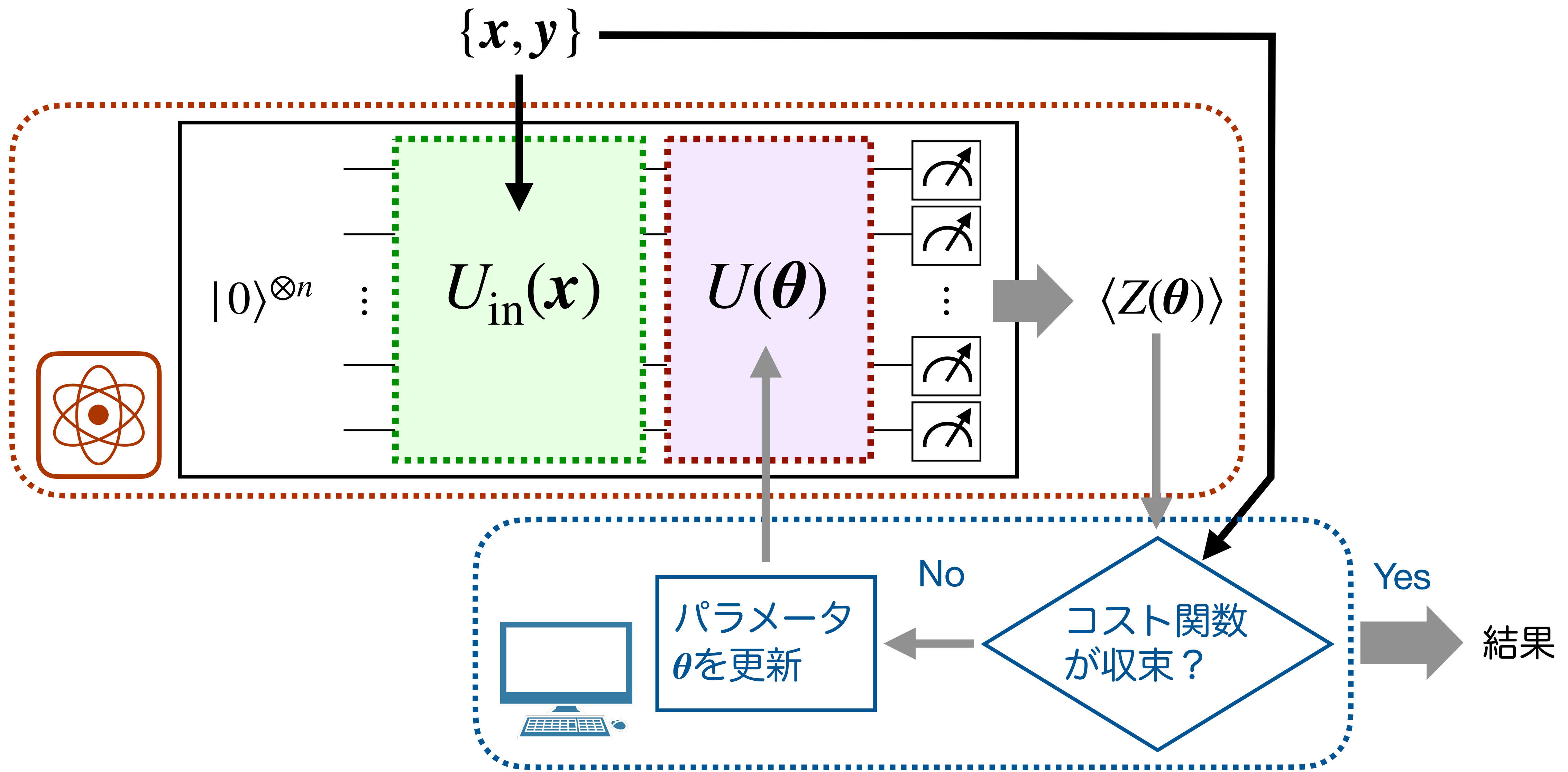


量子データ

(将来的に) 量子センサーデータ



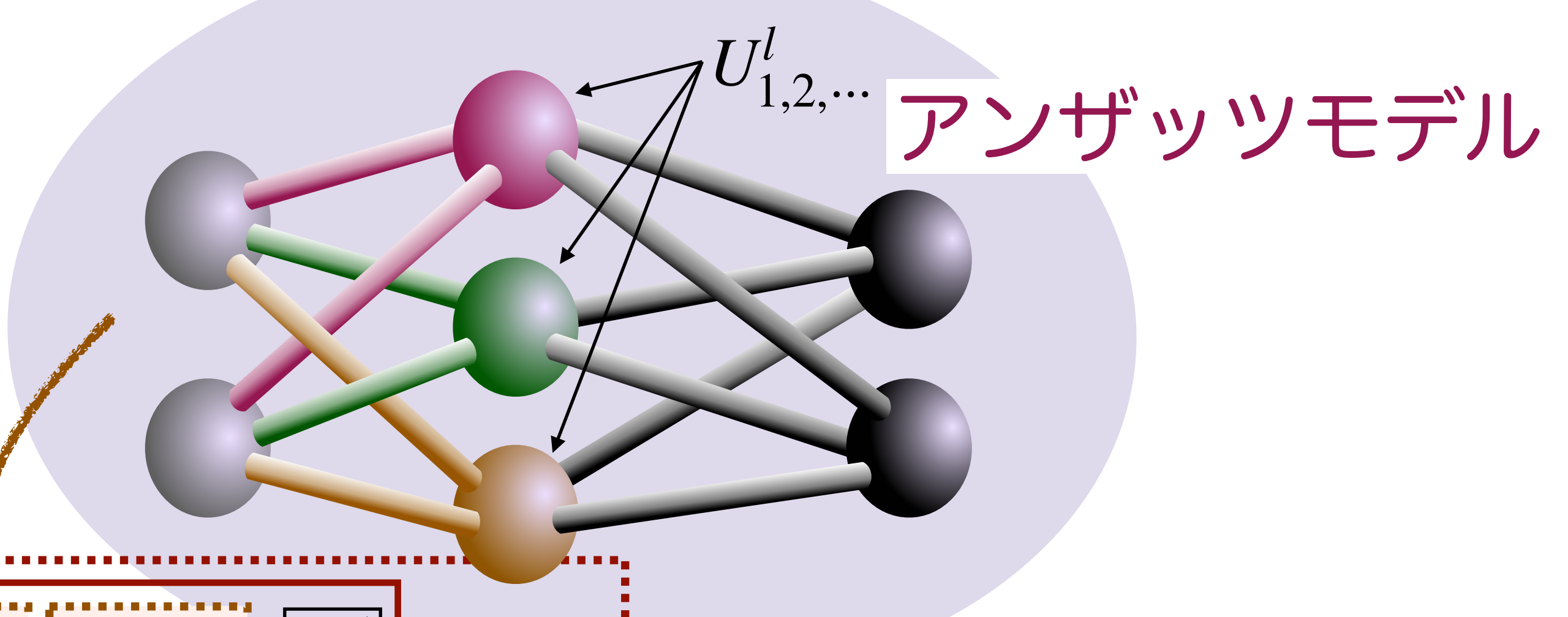
量子AIのエンジン = 量子機械学習



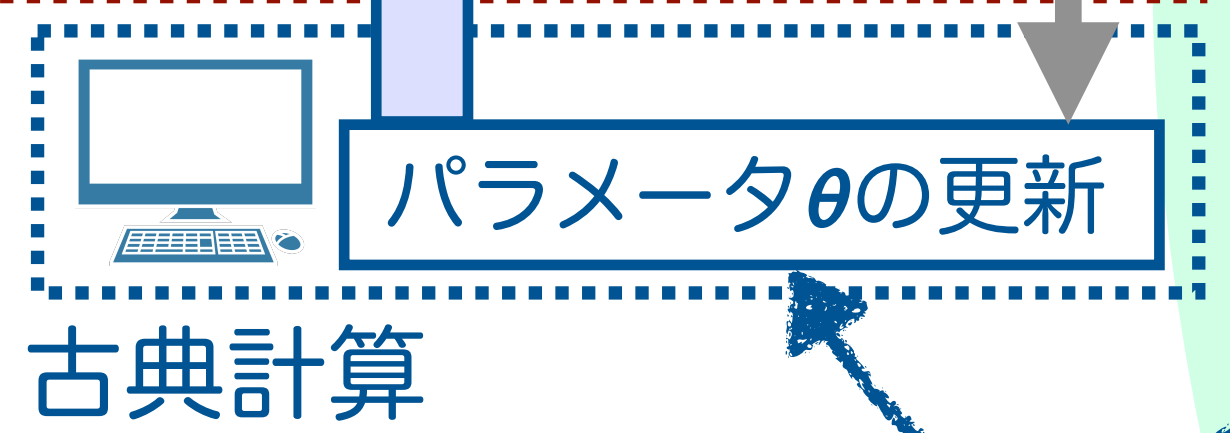
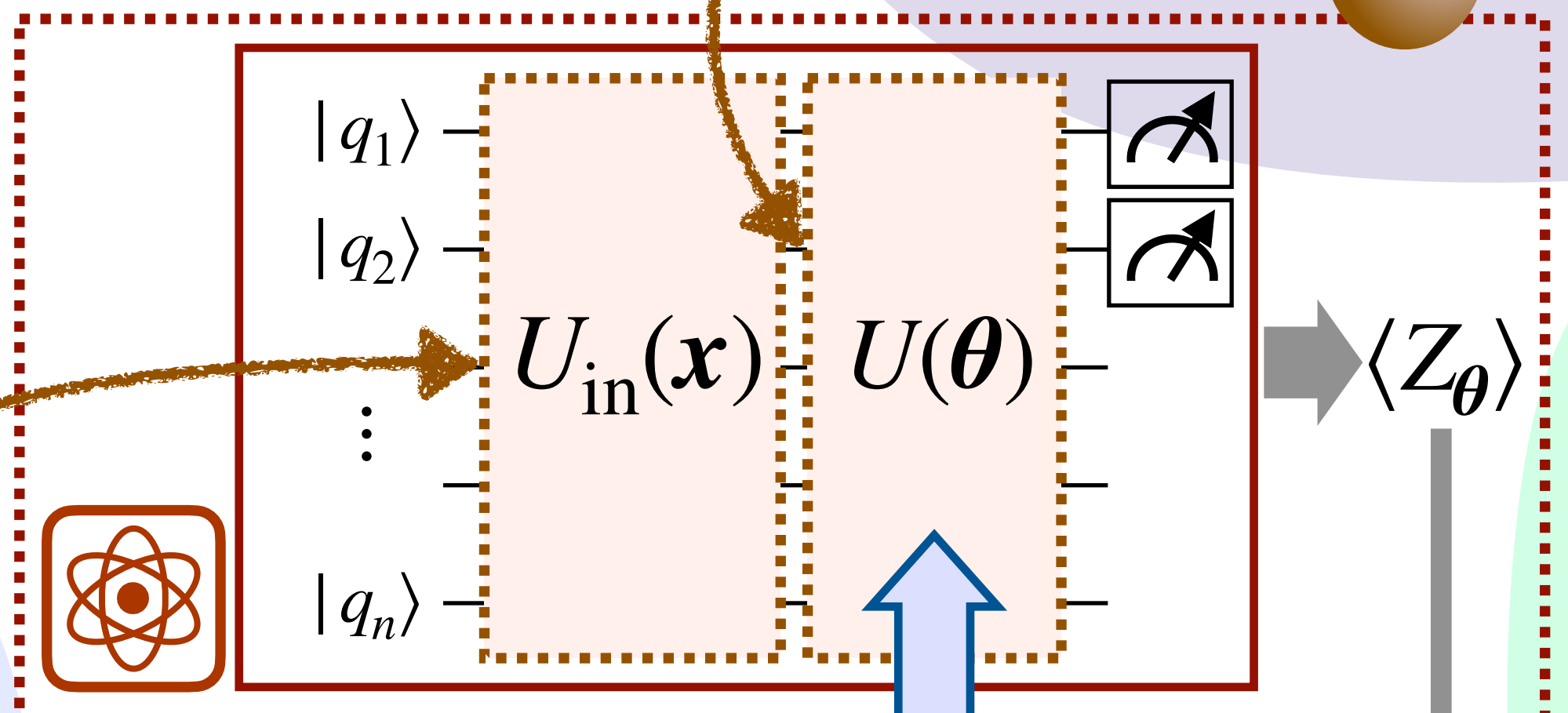
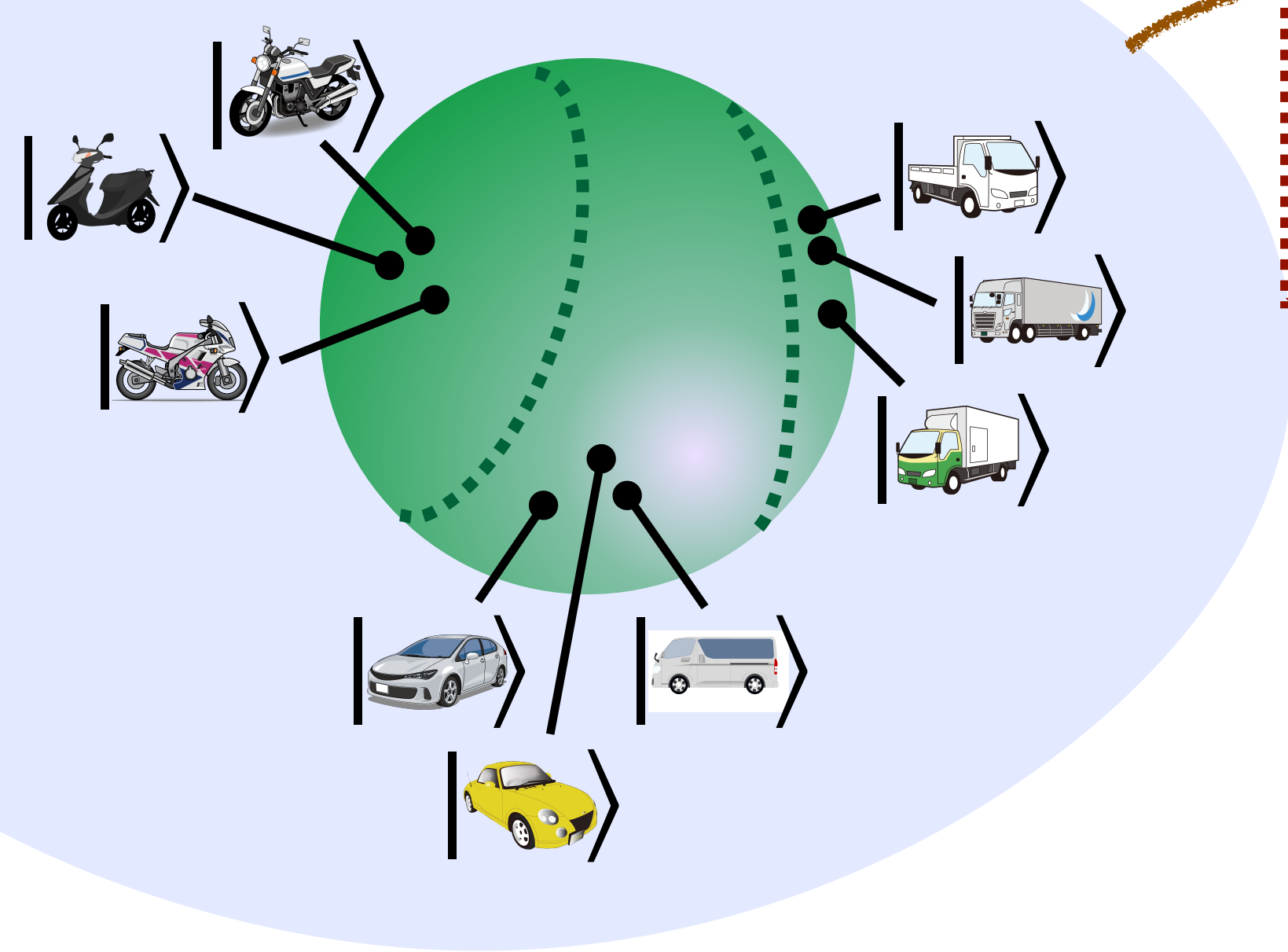
量子機械学習

量子機械学習アルゴリズムを高度に!

- ▶ 解きたい問題に適した量子回路モデルとは?
- ▶ 学習に適した量子状態へのデータの埋め込みとは?
- ▶ 効率の良い学習を実現するには?



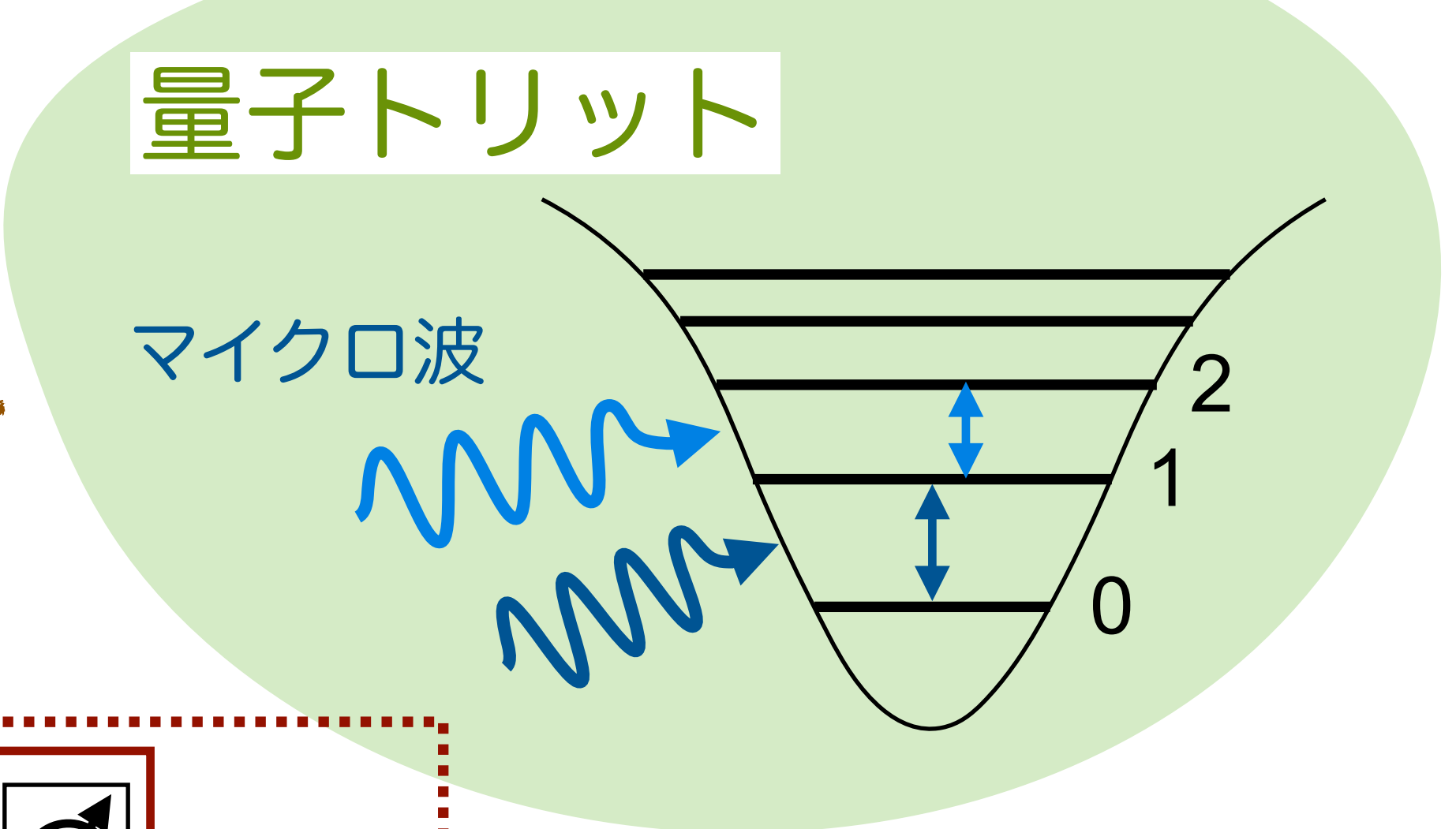
データの埋め込み



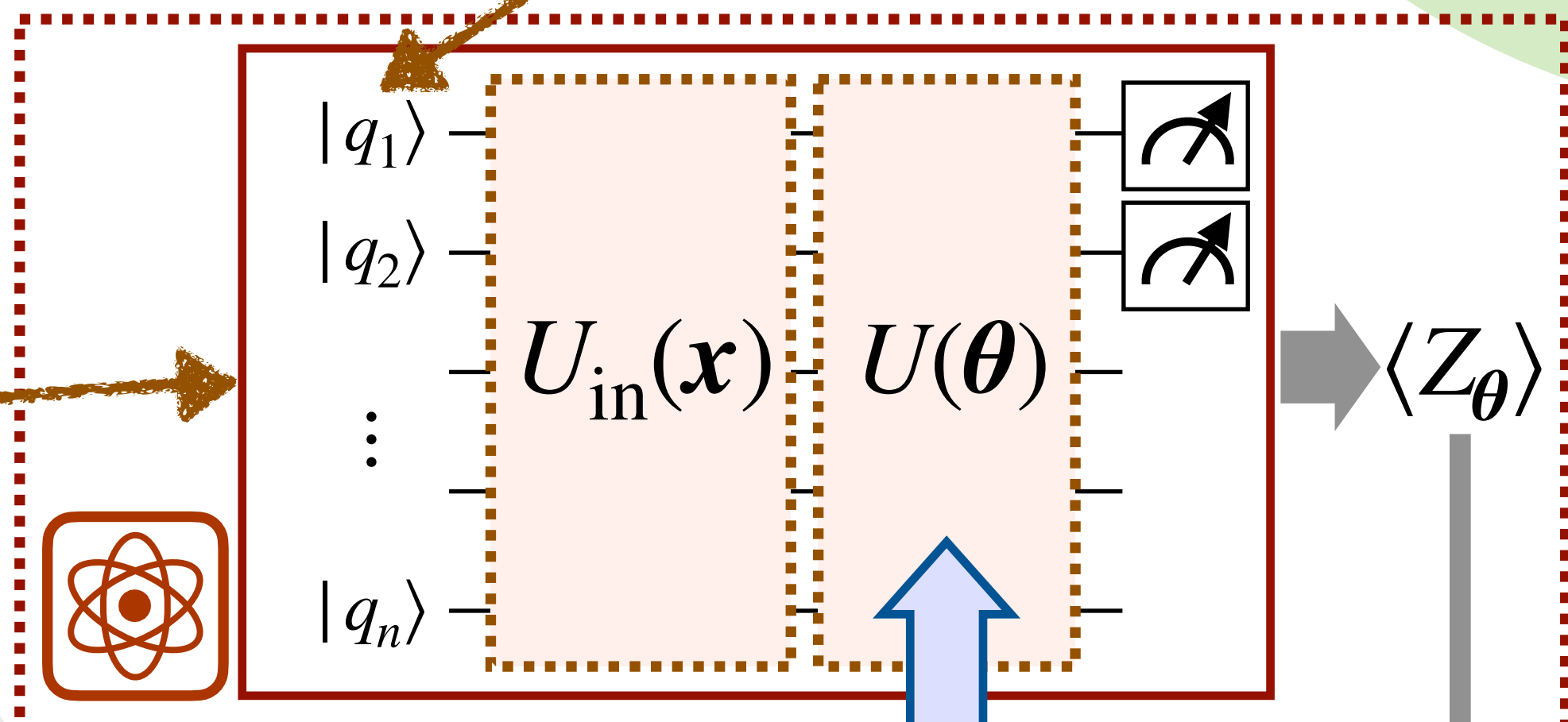
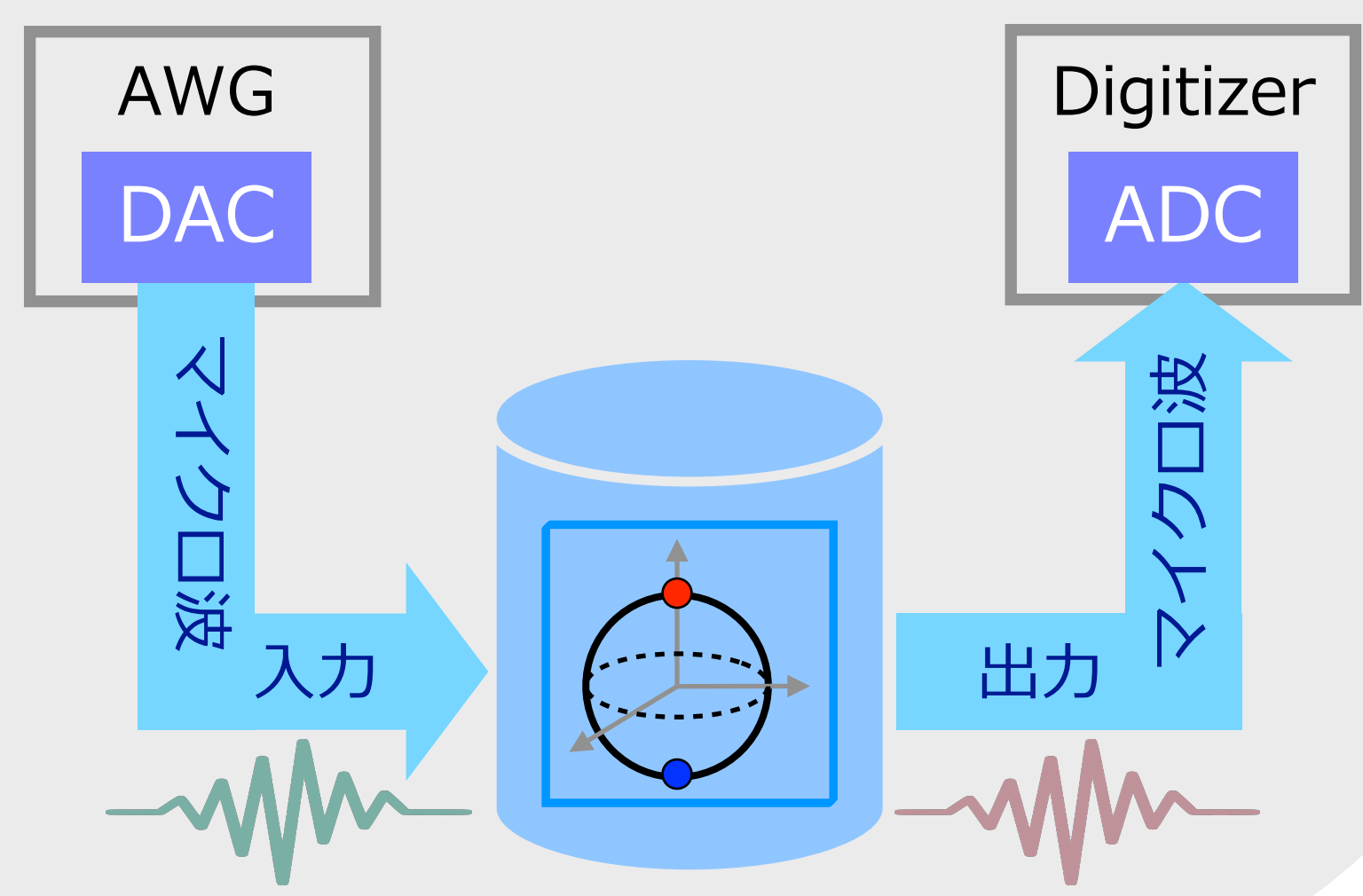
量子機械学習

量子コンピュータが動くように実装しないとダメ!

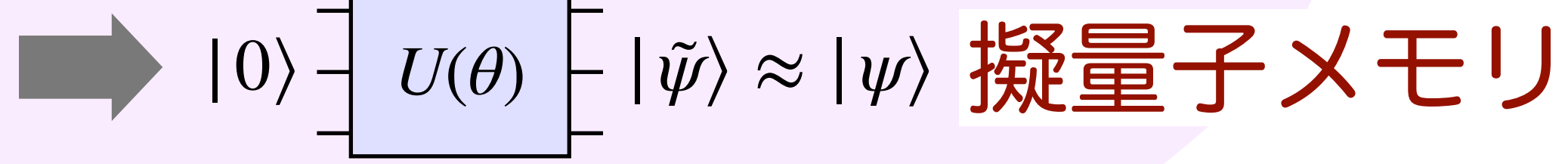
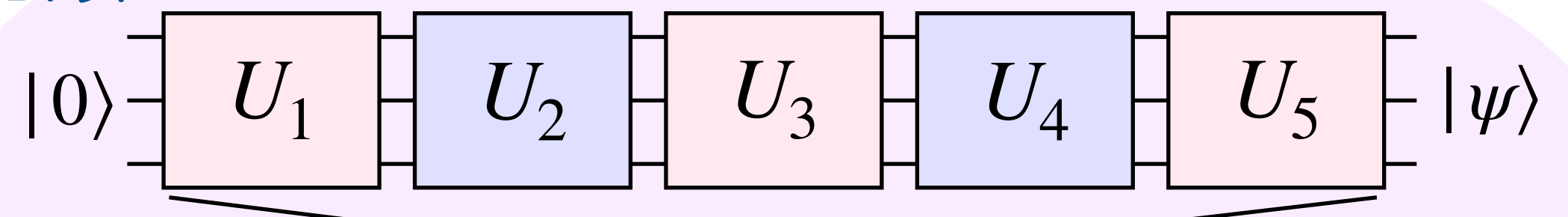
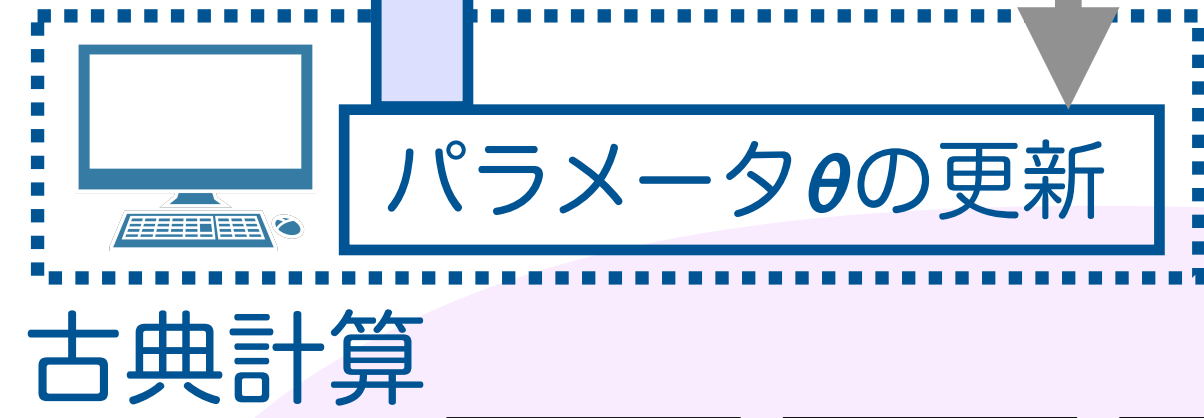
- ▶ 今の量子コンピュータで長い回路を実行するには?
- ▶ 最適な量子ゲートの実装とは?
- ▶ 量子ビットに限らなくても良いのでは?



マイクロ波パルスの制御



量子計算



バレンプラトー

Development of Quantum Learning Architecture

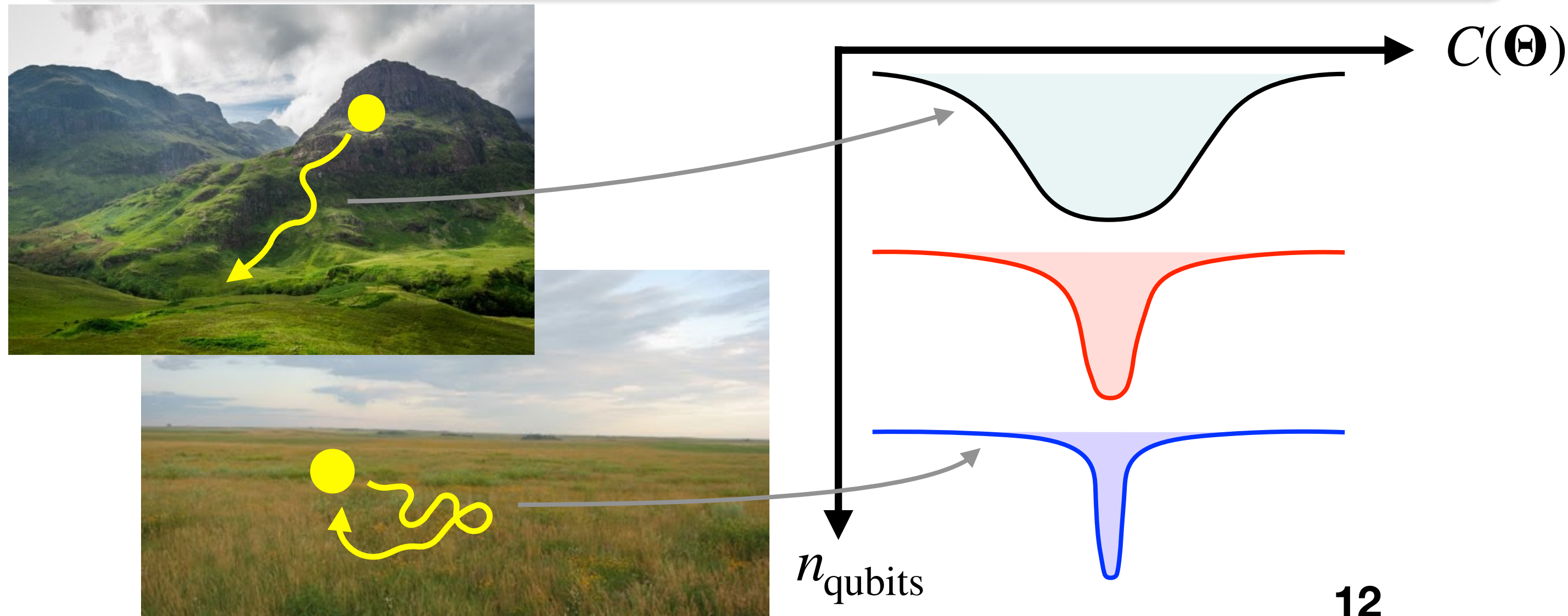
- ▶ Understanding and mitigating Barren Plateau phenomena (vanishing gradients of cost function)
- ▶ Designing problem-inspired and/or problem-agnostic ansatz with near-term devices

Definition 1 (Barren plateau)

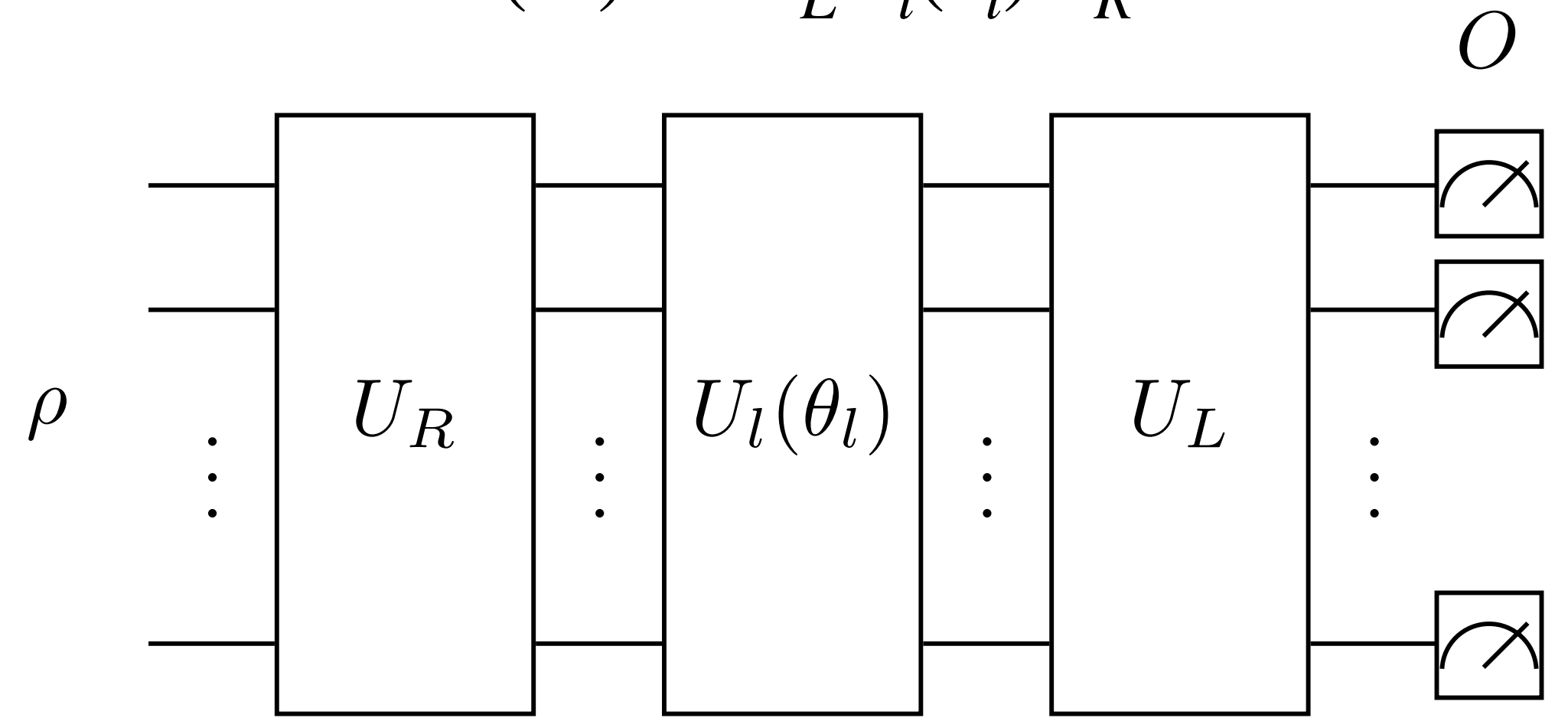
Consider the VQA cost function $C(\theta) = \langle \psi | U(\theta)^\dagger O U(\theta) | \psi \rangle$, where $|\psi\rangle \in \mathbb{C}^{2^n}$ is a n -qubit quantum state, $U(\theta)$ is unitary and O is hermitian. This cost exhibits a barren plateau if

$$E_{\theta \sim \text{uniform dist.}} \left[\frac{\partial C(\theta)}{\partial \theta_i} \right] = 0, \quad V_{\theta \sim \text{uniform dist.}} \left[\frac{\partial C(\theta)}{\partial \theta_i} \right] = O(b^{-n})$$

holds for some $\theta_i \in \theta$ and $b > 1$.



$$U(\Theta) = U_L U_l(\theta_l) U_R$$

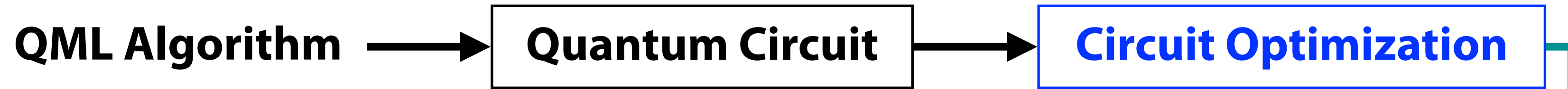


$$C(\Theta) = \text{Tr} [O U(\Theta) \rho U^\dagger(\Theta)]$$

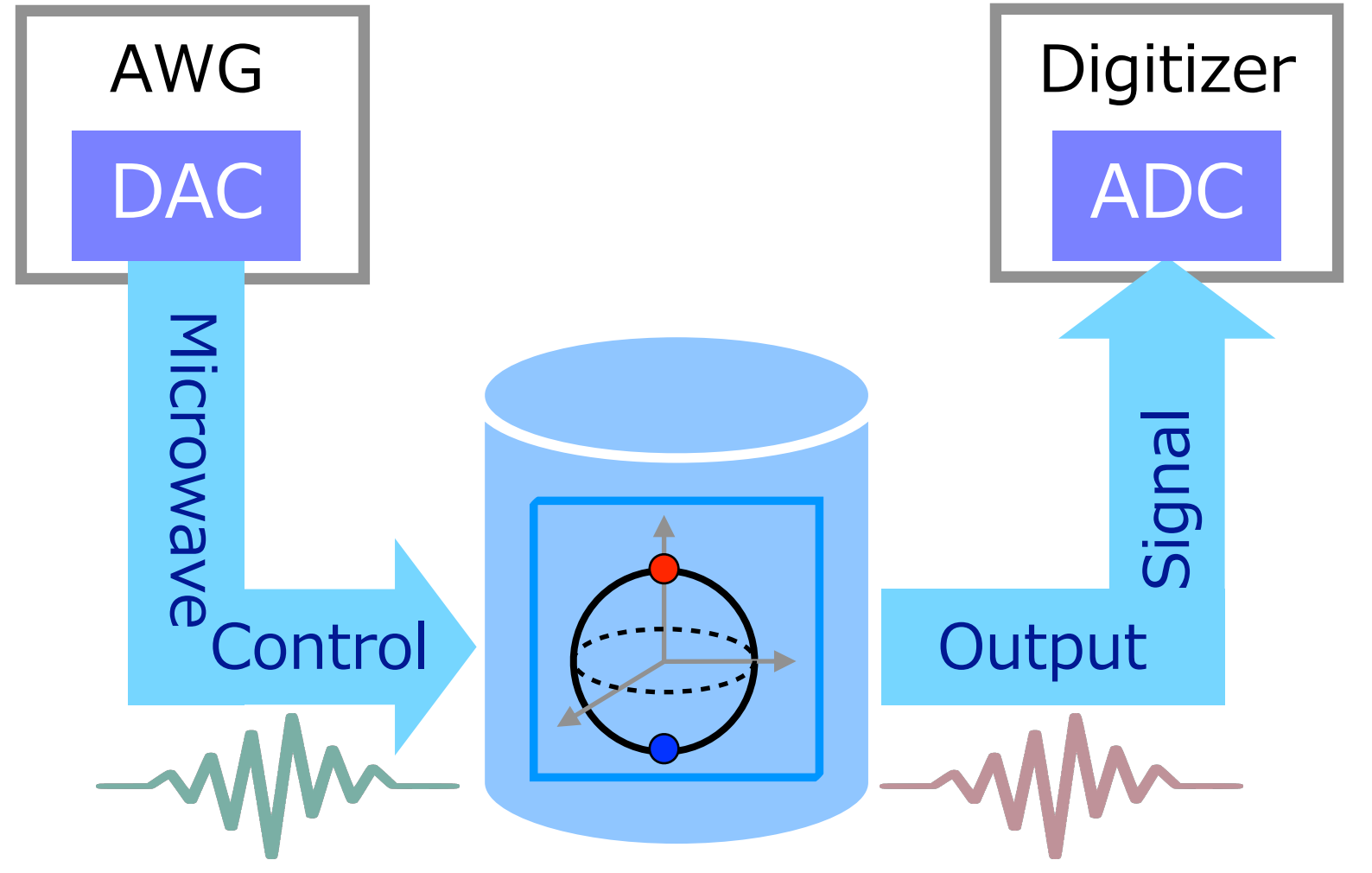
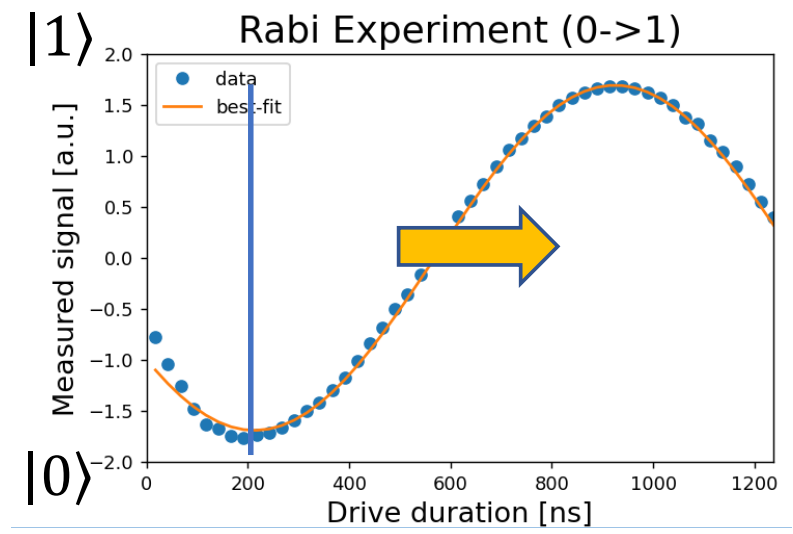
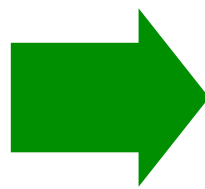
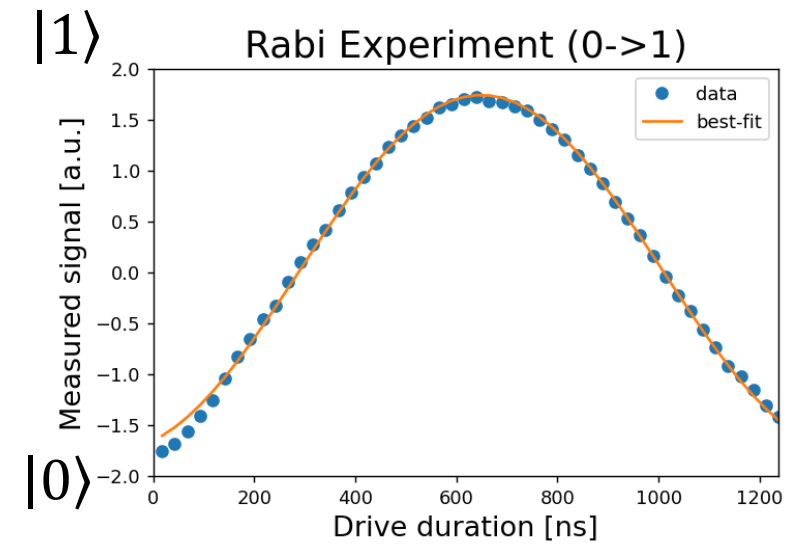
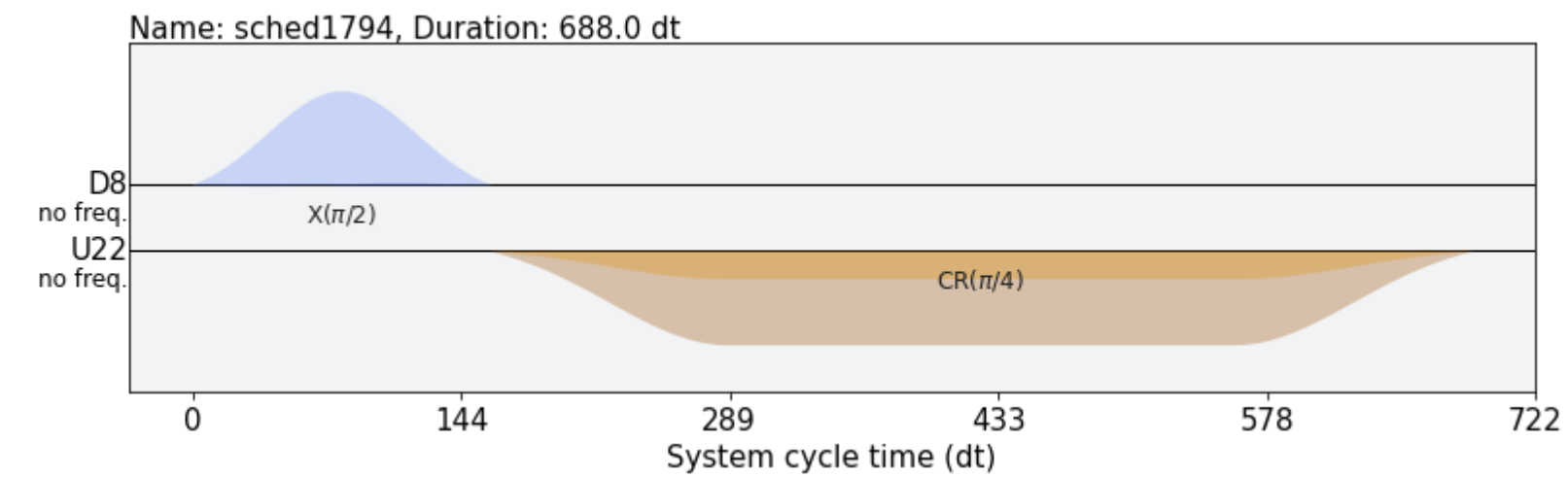
- Barren Plateau with hardware-efficient and symmetry-preserving ansatzes
- Relation between Barren Plateau and ansatz expressibility

マイクロ波パルスの制御、量子トリット

Aiming at application-specific optimization of quantum circuit and gate with microwave pulses

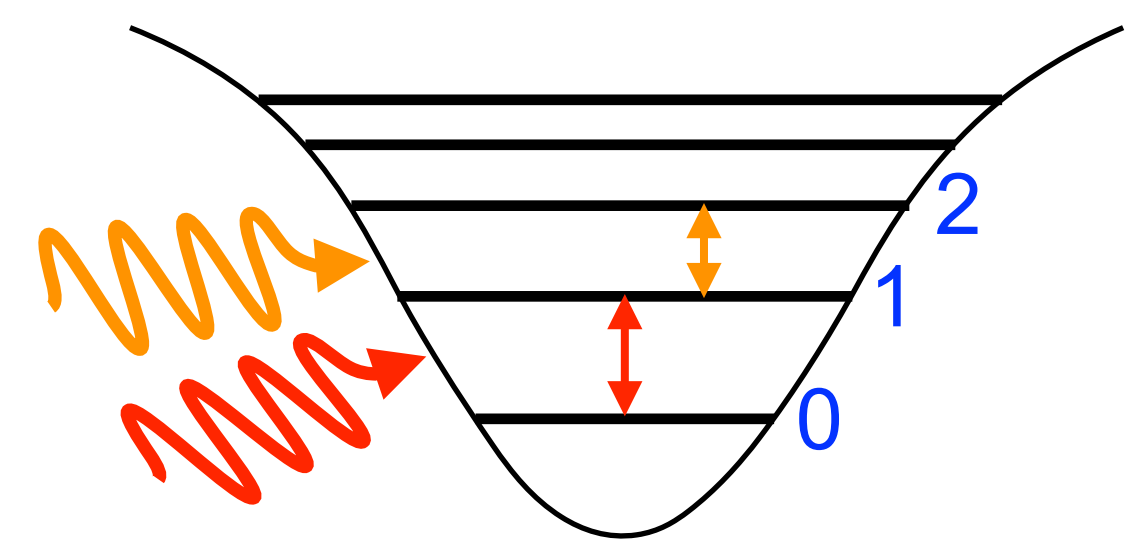


Pulse-level optimization

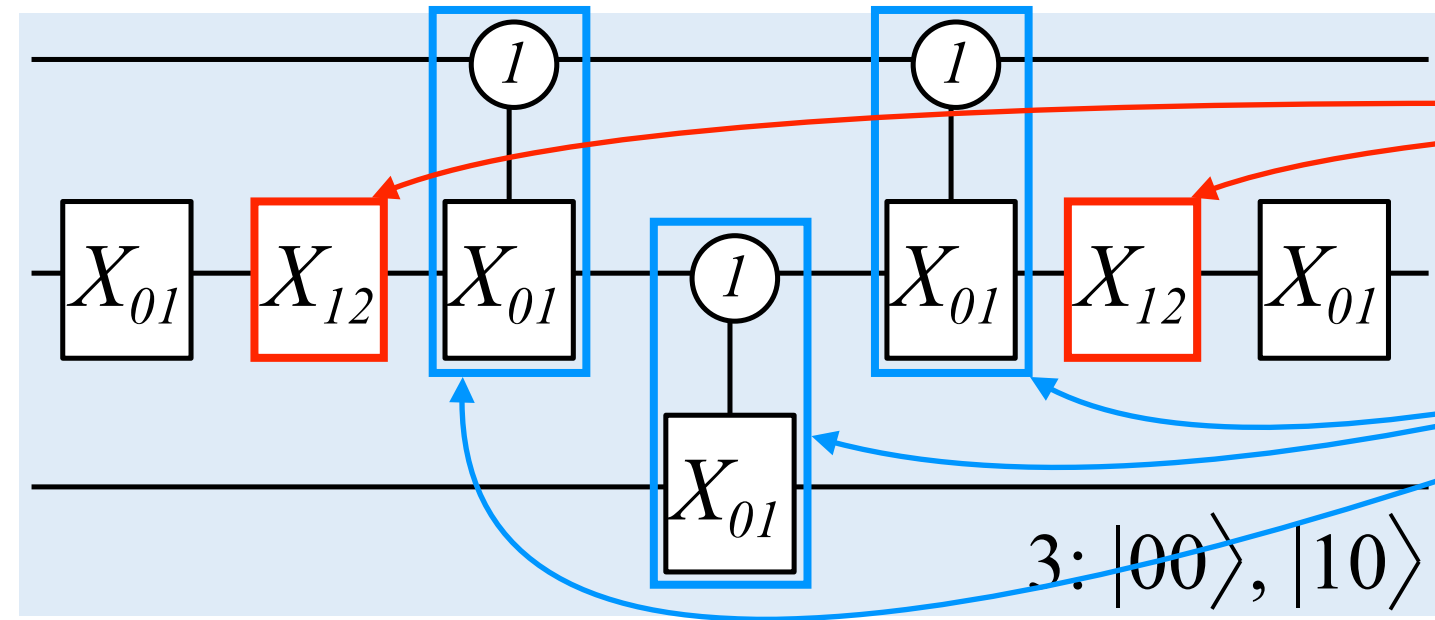


Application-specific pulse engineering

including Qutrit



Toffoli decomposition with Qutrit gates



Bit flip between $|1\rangle$ and $|2\rangle$

$$(|0\rangle\langle 0| + |2\rangle\langle 2|) \otimes I + |1\rangle\langle 1| \otimes X_{01}$$

量子機械学習

- ▶ 変分量子アルゴリズムの物理応用
 - 1) アンザツ設計、勾配消失の理解と緩和
 - 2) データエンコーディング（繰り返し入力、学習込みの入力、QRAC）
- 3) 量子データの学習：イジング模型/シュウィンガー模型 + 量子・古典ハイブリッド学習
- 4) 全量子型学習（エラー耐性量子コンピュータ）：グローバ探索 + 量子勾配計算

量子シミュレーション

- 5) 粒子数保存アンザツ + シュウィンガー模型シミュレーション (+ 擬似量子メモリ)
- 6) 場の量子論のシミュレーション

量子ソフトウェア

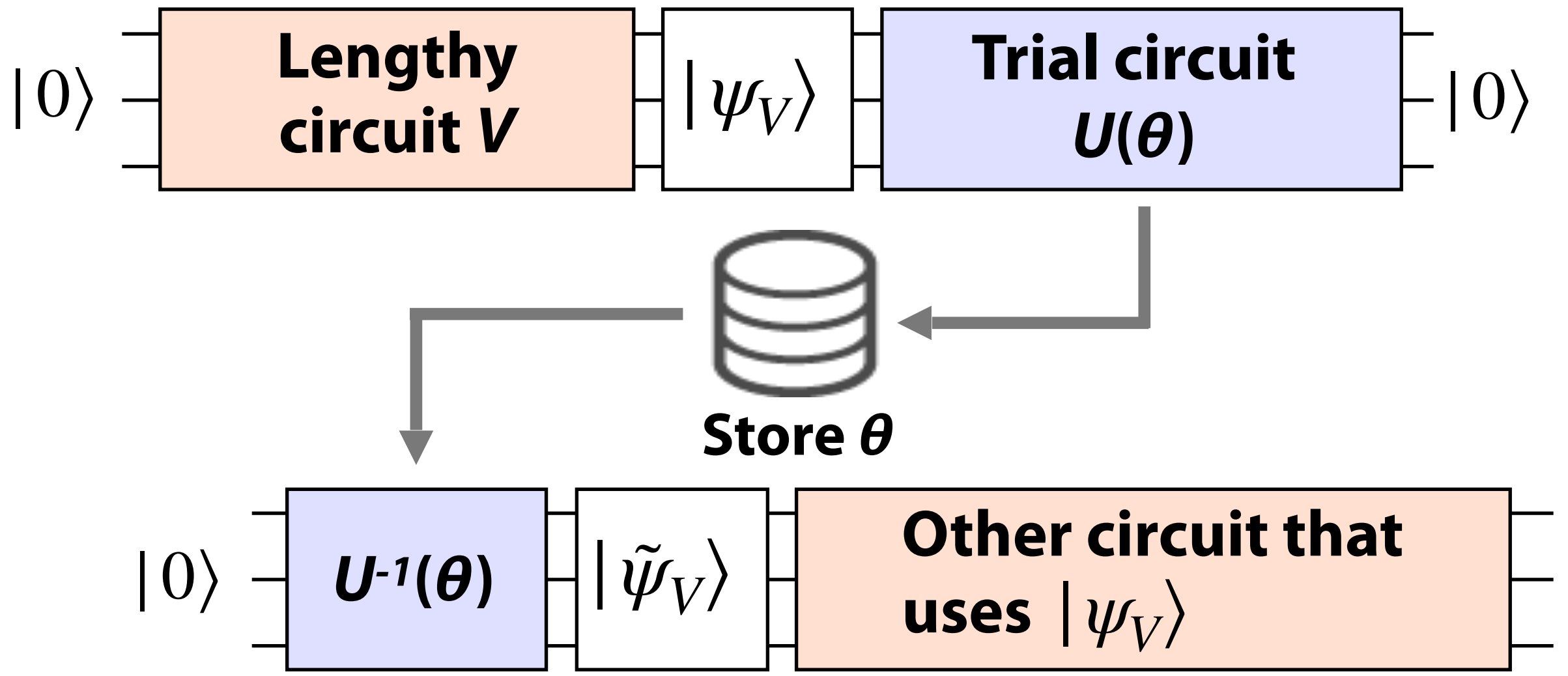
- 7) AQCEL最適化プロトコルの拡張、量子トリット実装

最適化問題への応用

- 8) 荷電粒子飛跡の再構成：量子アニーリング、量子ゲート
 - ▶ (非)線形システム制御の最適化（量子アニーリング）

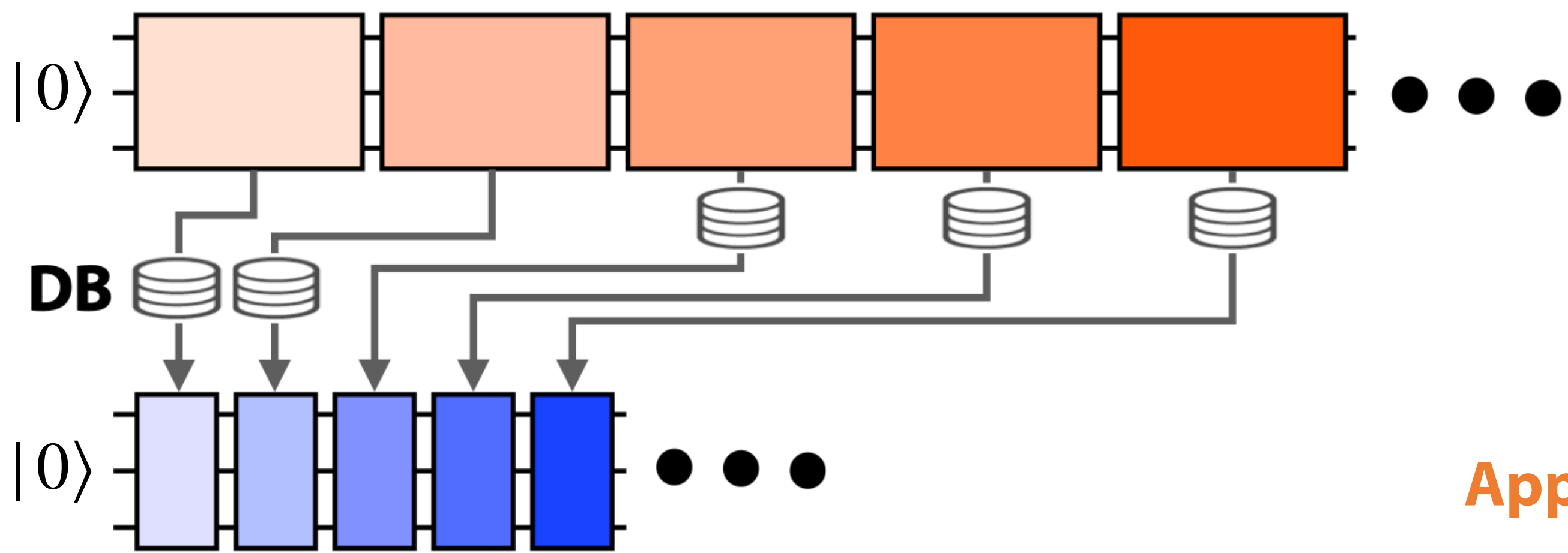
Pseudo Quantum Memory

Parametrized QML technique to approximate the **lengthy circuit V** by a shorter **efficient circuit U**



- Store parameters θ
 - Load the target state $|\tilde{\psi}_V\rangle$ at any time
- Quantum pseudo-memory**
with Stop-and-Resume capability

Feasibility to execute complex, lengthy circuit with NISQ machine by repeating the step multiple times



Potential for overcoming the limitations in NISQ circuit design

→ Under experiment with the time evolution of Ising model Hamiltonian

Applicable to a wide range of quantum algorithms

Charged Particle Tracking

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

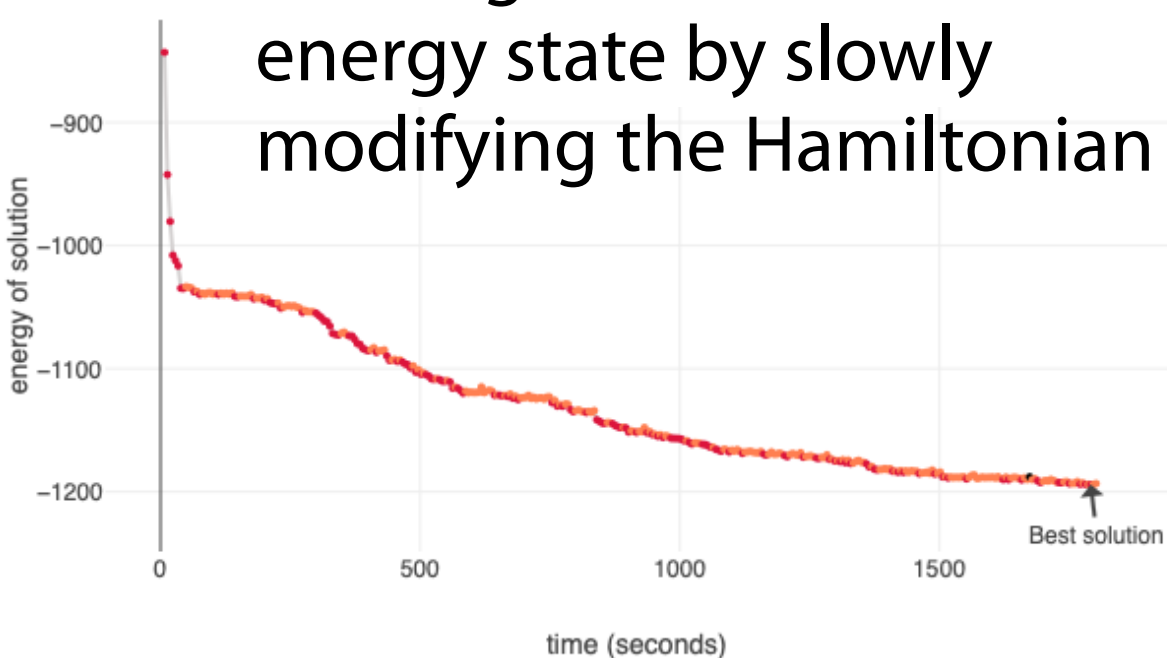
Quantum Annealing



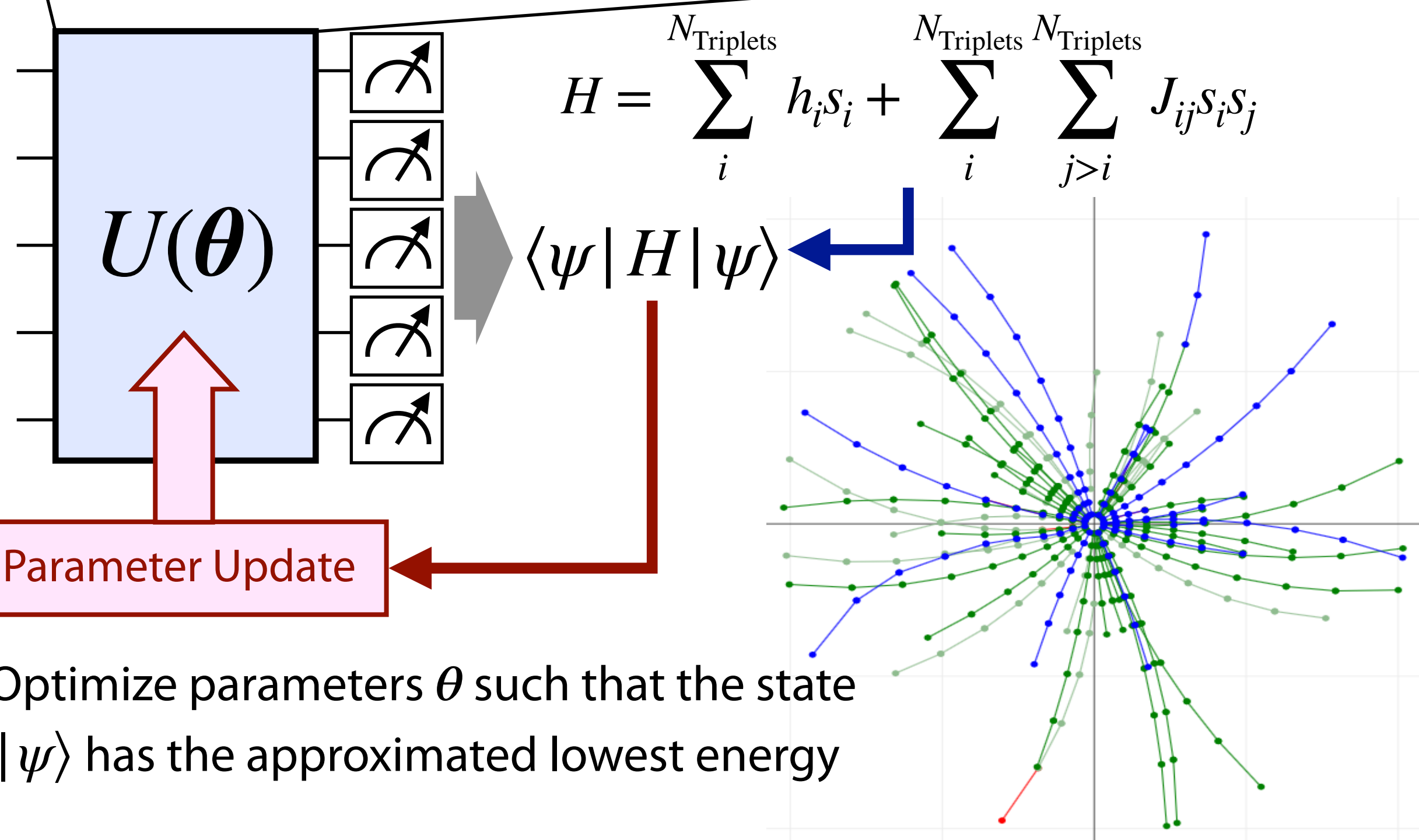
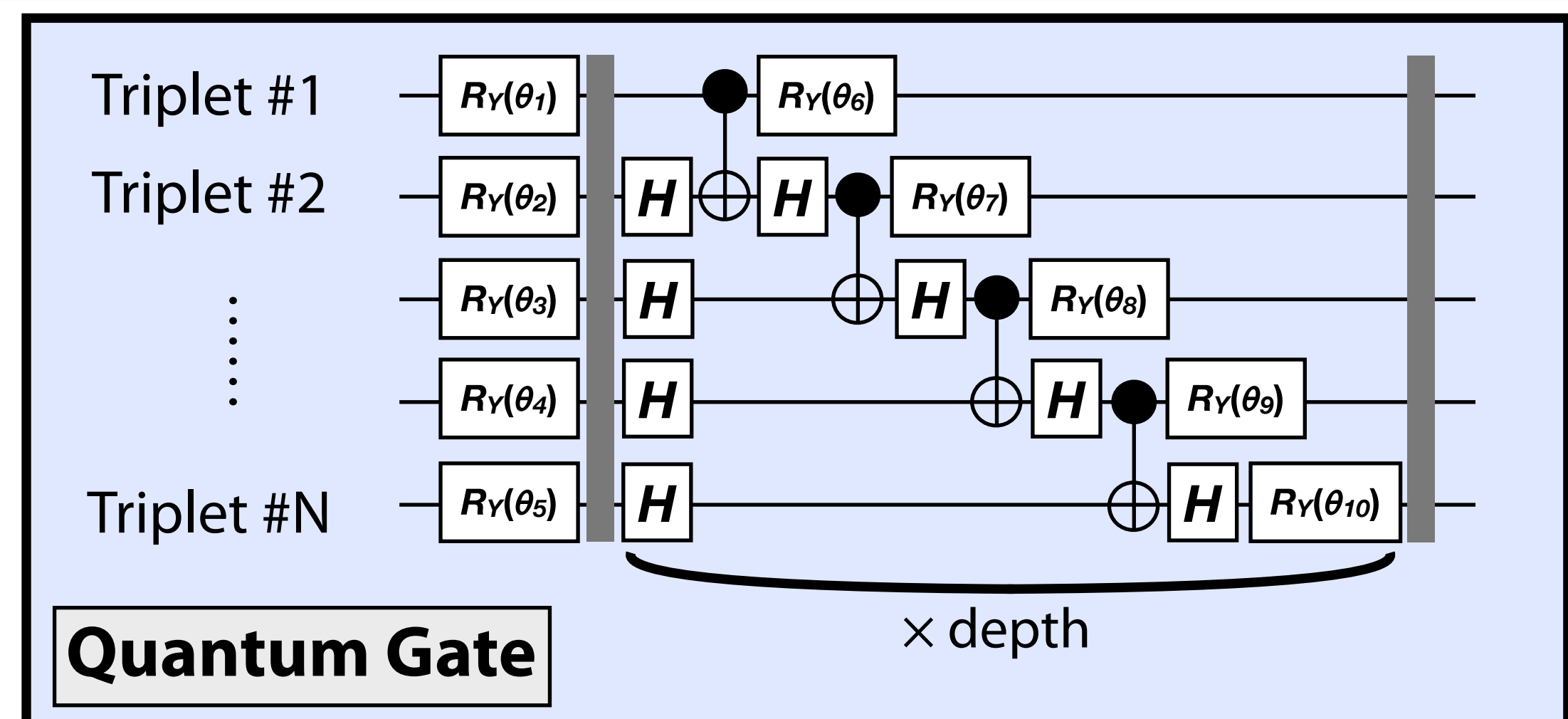
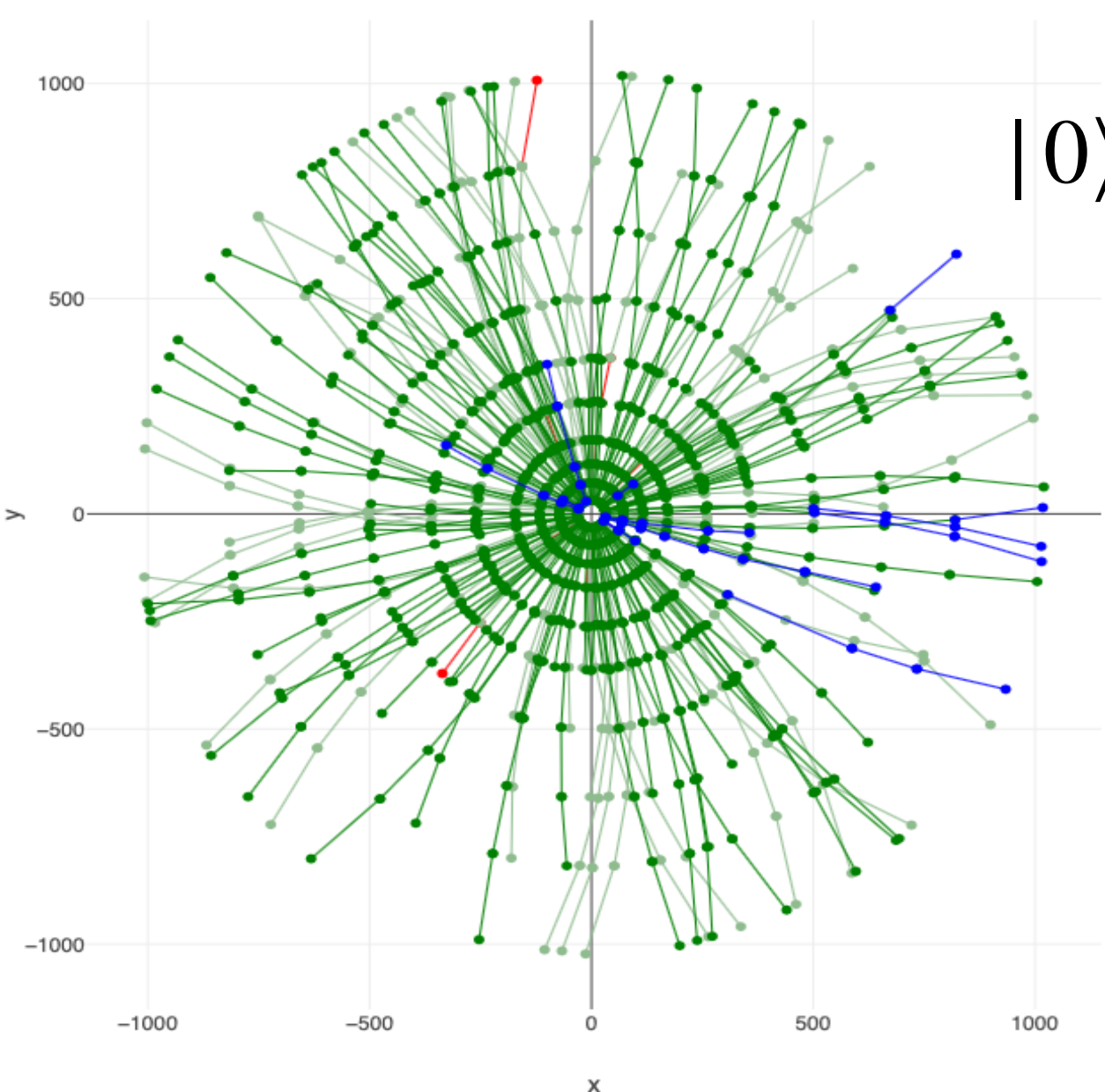
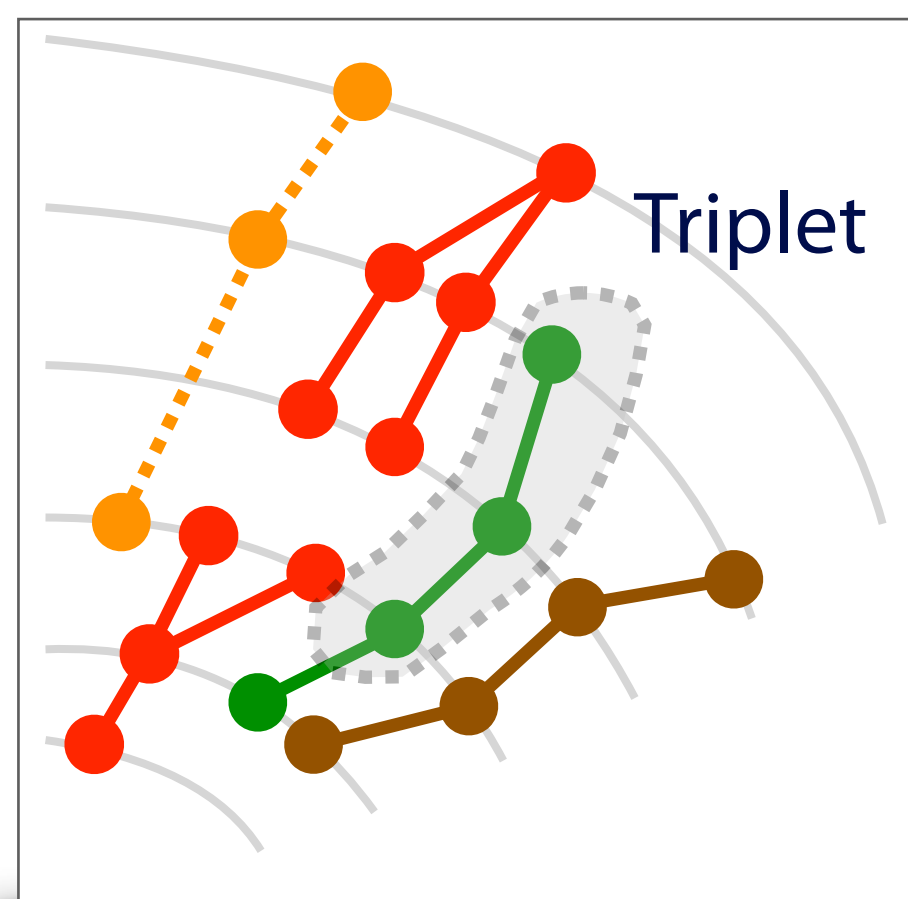
D-Wave Quantum Annealer

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

Looking for the lowest energy state by slowly modifying the Hamiltonian



>90% tracking efficiency at HL-LHC condition



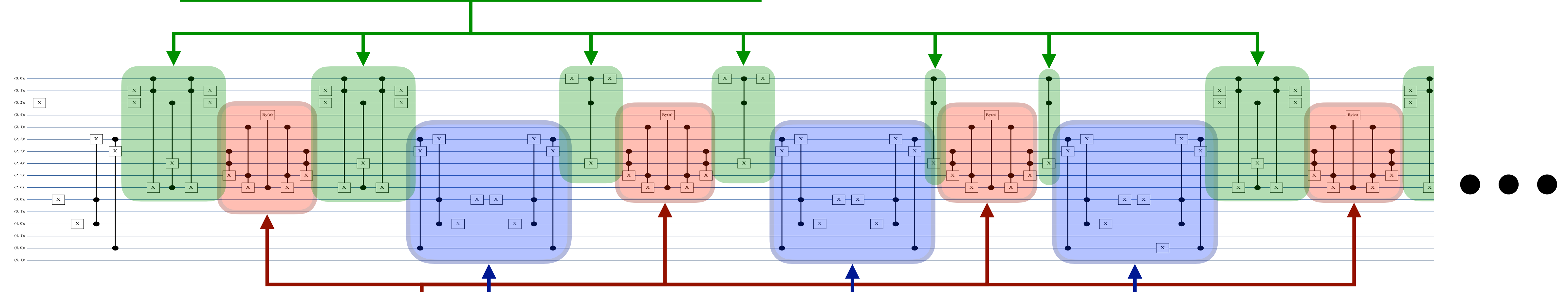
Optimize parameters θ such that the state $|\psi\rangle$ has the approximated lowest energy

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

Quantum Circuit Optimization

AQCEL optimization protocol for quantum circuit:

Removal of redundant qubit controls



Identification of repeated sets of gates

Removal of redundant gates

