課題６　量子計算シミュレーターの高速化･高機能化

伊藤伸泰　吉岡直樹　青木尚登　柚木清司　白川知功　Rongyang Sun
RIKEN Center for Computational Science

Collaboration with Anastasiia Butko(LBNL), Thom Popovici(LBNL), Artur Garcia Saez(BSC)

RIKEN-braket: A open-source quantum computer simulator for parallel computer coded with C++
https://github.com/jhpc-quantum/RIKEN-braket

RQS-SVG: RIKEN Quantum Simulator using State-Vector and GPU cluster
https://github.com/naoto-aoki-fy/rqs-svg

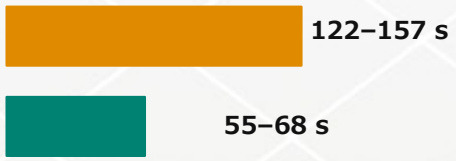
◎RIKEN-braket の進展：C-3PQ アルゴリズムと大規模ゲート融合による高速化

・大規模並列状態ベクトルシミュレーションの通信コストを削減するために量子回路を分割するアルゴリズム C-3PQの提案
・大規模な gate fusion を必要とする量子回路を、RIKEN-braket で実行可能にする

D. Popovici, H. Lee, N. Yoshioka, M. Ben, N. Ito, K. Klymko, D.Camps, A. Butko, ICS2026(Belfast), arXiv: 2509. 14098

性能改善のイメージ

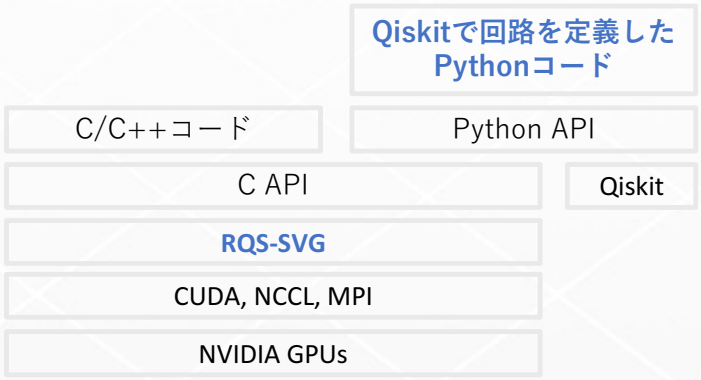
代表例：大きな fusion block を含む N=30–33 のQFTを実行



到達点　大規模 fused gate を含む回路について、unfused 実行との差を小さく抑えつつ、C-3PQ で分割された量子回路のシミュレーションに向けた実行基盤を整備。

RQS-SVG：CUDA GPU向けシミュレータ

レイヤー構成



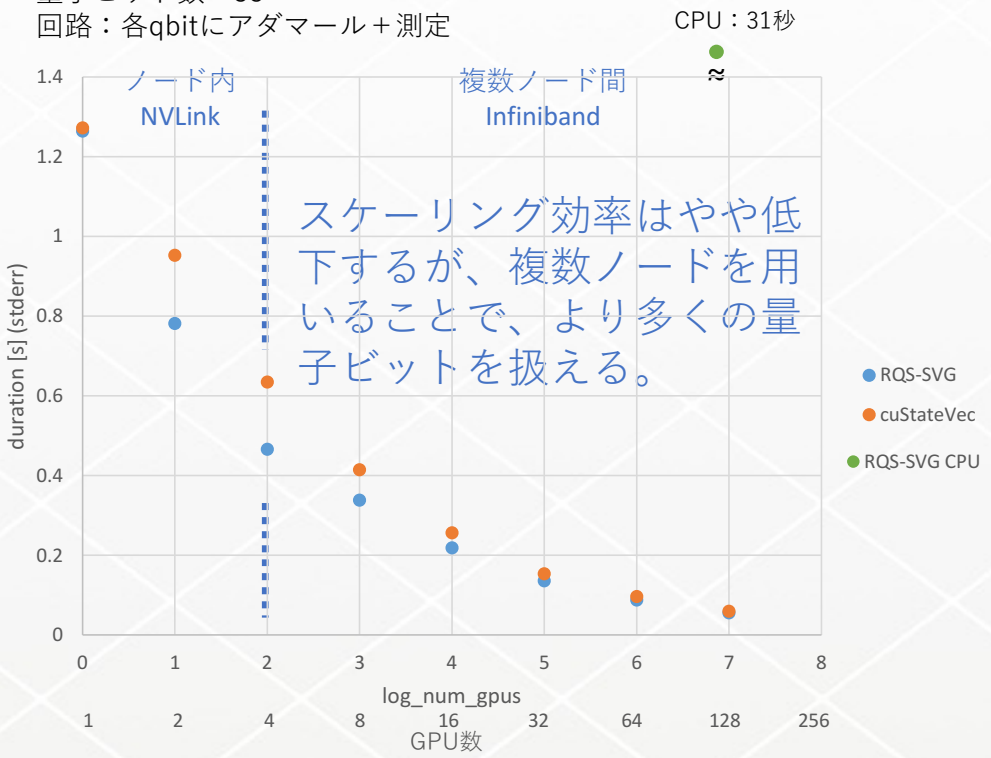
Qiskitで定義した量子回路を直接実行可能。

検証	最大8,330ゲートのランダム回路について、出力状態ベクトルをQiskitの出力と比較。
計画	（未実装）ゲート融合、回路分割、変分アルゴリズム（VQEなど）への対応、メモリ共有と量子ビット置換の併用

jhpc-quantum/rqs-svg

性能評価

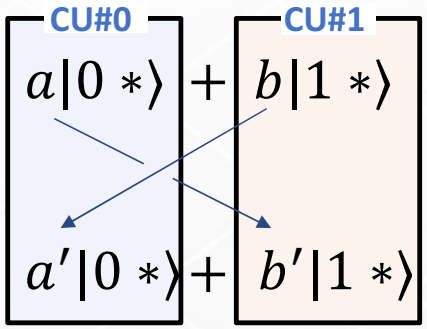
計算機：理研 roquo GB200 NVL4
量子ビット数：33
回路：各qbitにアダマール＋測定



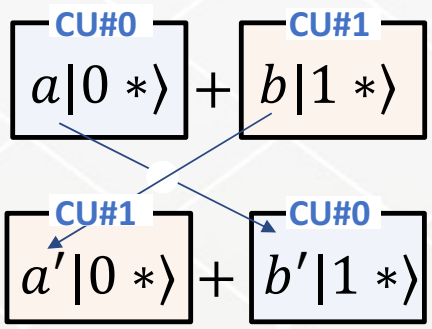
特許：プロセス番号の置換

例：Xゲート

従来手法



提案手法



CU：計算ユニット

モノミアル行列

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad Y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$$

$$Z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$\mathrm{Phase}(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\theta} \end{pmatrix}$$

$$R_z(\theta) = \begin{pmatrix} e^{-i\theta/2} & 0 \\ 0 & e^{i\theta/2} \end{pmatrix}$$

$$\mathrm{SWAP} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

など

回路分割に適用でき、制約を緩和できる

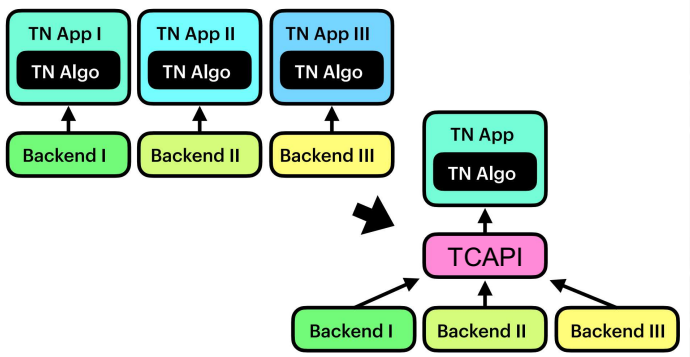
ゲートの適用可否

標的	制御	QRの要否
局所	局所	不要
	大域	不要
大域	局所	必要
	大域	不要（本手法）
混在	任意	必要
局所	混在	不要
大域	混在	必要

TNによる量子回路の並列シミュレーション

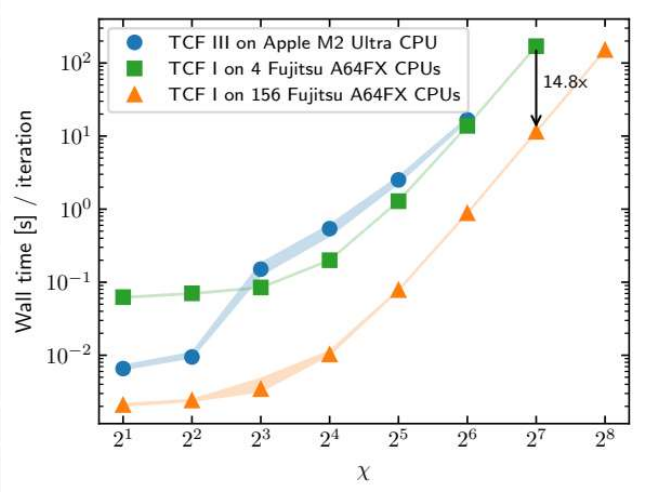
TCAPIを用いた信念伝播（BP）シミュレータの実装

移植性の高いTNアプリケーション



複数のバックエンドでコードを共通化
CPU・GPU間の移植性
ネイティブ実装に近い性能

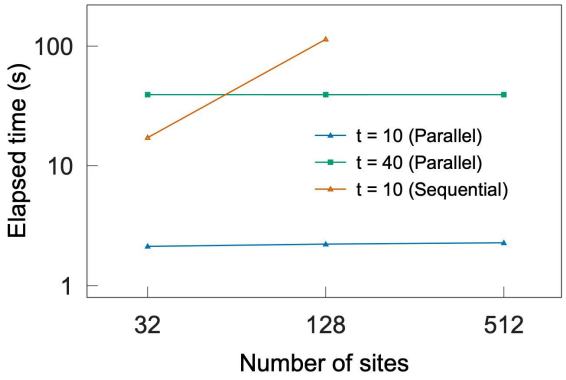
「富岳」でのBPシミュレーション



156量子ビットのheavy-hex回路
4→156ノード：14.8倍（$\chi = 128$）

R.-Y. Sun et al., arXiv:2512.23917v1, Fig. 7

BPシミュレータの弱スケーリング



並列実行時間はほぼ一定
32〜512サイト

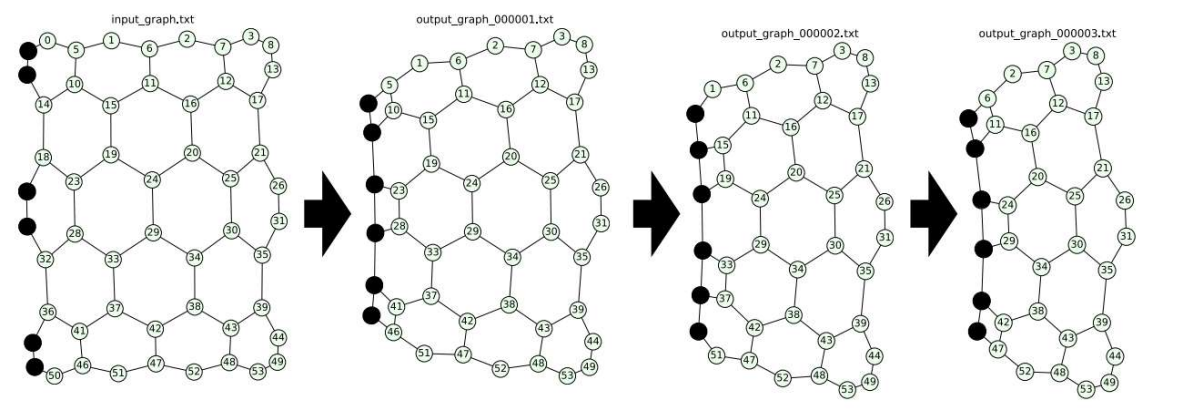
追加ベンチマーク（論文未掲載）

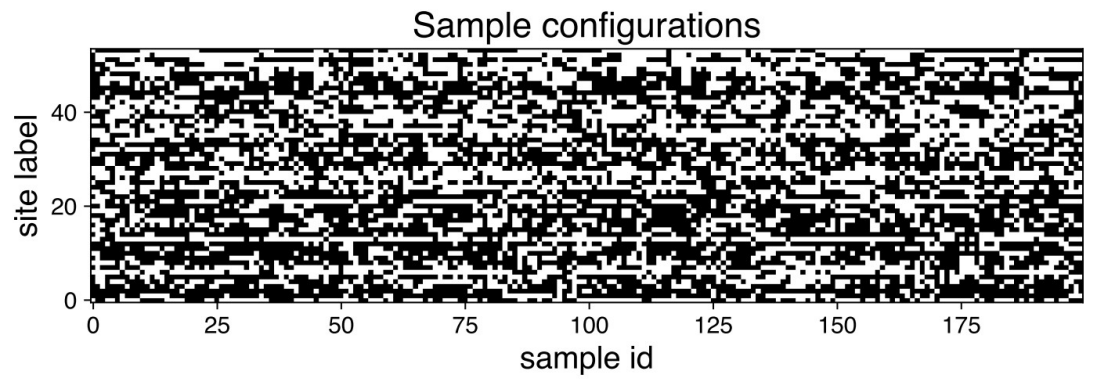
移植性と並列スケーラビリティを備えたテンソルネットワークコード

境界MPSによる量子回路サンプリング

サンプラーとして用いる量子回路の近似古典シミュレーション

一般グラフ上の境界MPS





単層ネットワークでの振幅評価

等長性の制約なし

物理インデックスをサンプルの
配置 s に固定する。

次のテンソル列を取り込み、
更新した境界MPSを圧縮する。

$\psi(s) = \langle s|\psi\rangle$

マルコフ連鎖サンプリング

近似振幅を用いて、サンプリングする
物理基底の配置を更新する。

目標分布： $P(s) \propto |\psi(s)|^2$

研究進行中