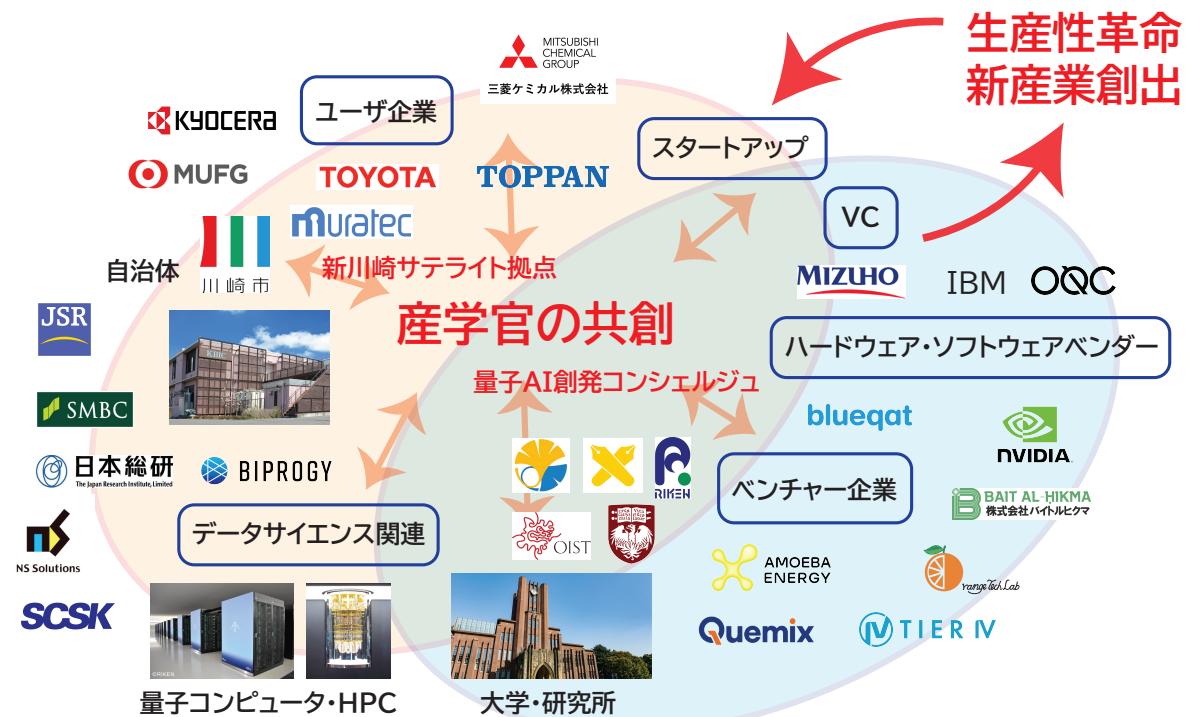


JST共創の場形成支援プログラム(COI-NEXT) 政策重点分野(量子技術)

# 量子ソフトウェアとHPC・シミュレーション技術の 共創によるサステイナブルAI研究拠点

藤堂眞治 東京大学大学院理学系研究科

<https://sqai.jp/>  
concierge@sqai.jp



# 古典AIからサステイナブルAIへ

---

- AIの「スケーラビリティ」

- 従来の機械学習: 精度を上げるにはより大量の学習データと複雑な学習モデルが必要
- ムーアの法則の終焉: HPC技術における微細化・高速化の限界

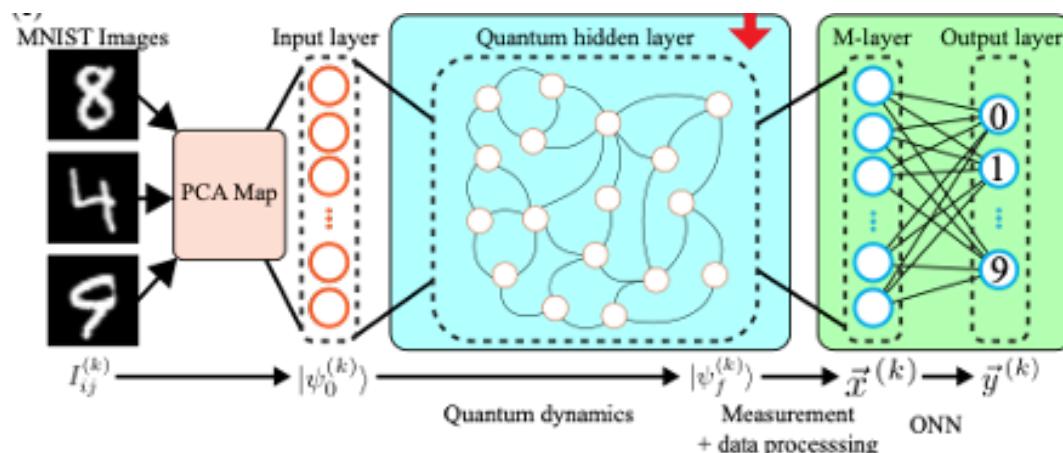
- 量子AIの可能性・将来性

- 近年の量子デバイス技術の進展
- 少数データ、少数パラメータによる高度な量子機械学習
- 古典計算が難しい量子多体問題の量子シミュレーション

# 量子機械学習

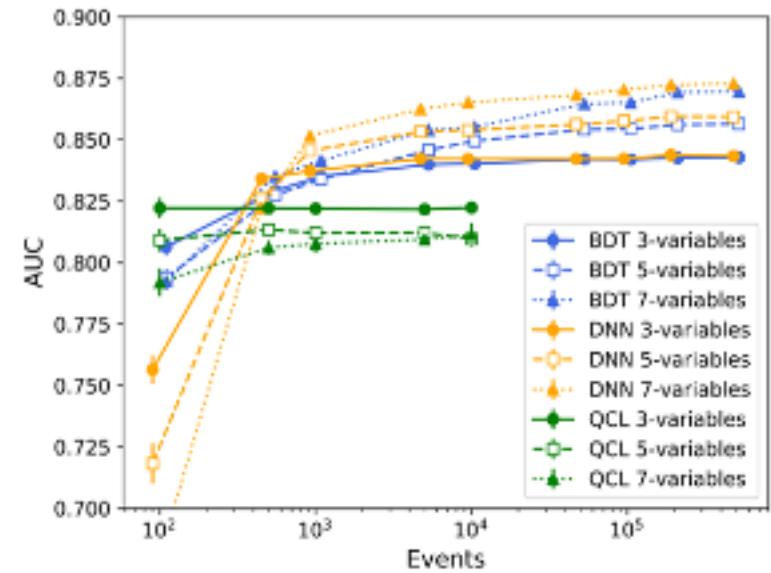
- 量子コンピュータの莫大な表現空間を利用
  - 低い訓練コストで高い汎化性能

量子極限リザバー計算



Sakurai et al (2021)

高エネルギー物理学におけるイベント分類

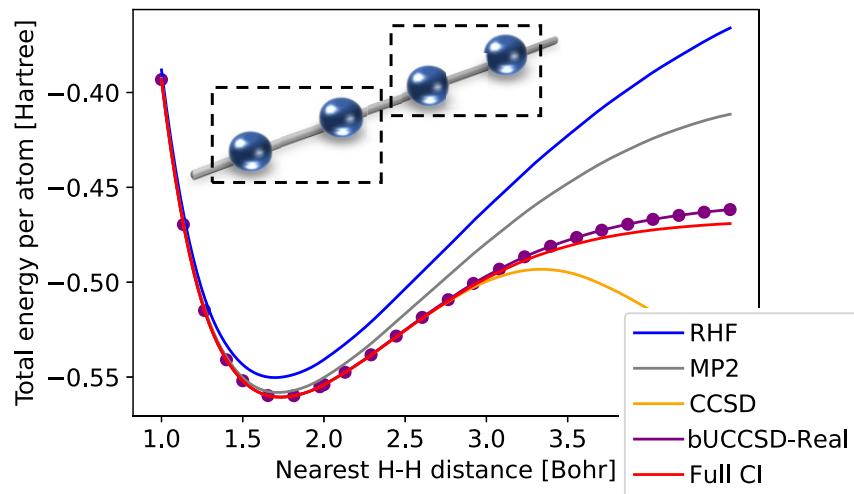


Terashi et al (2021)

# 量子シミュレーション

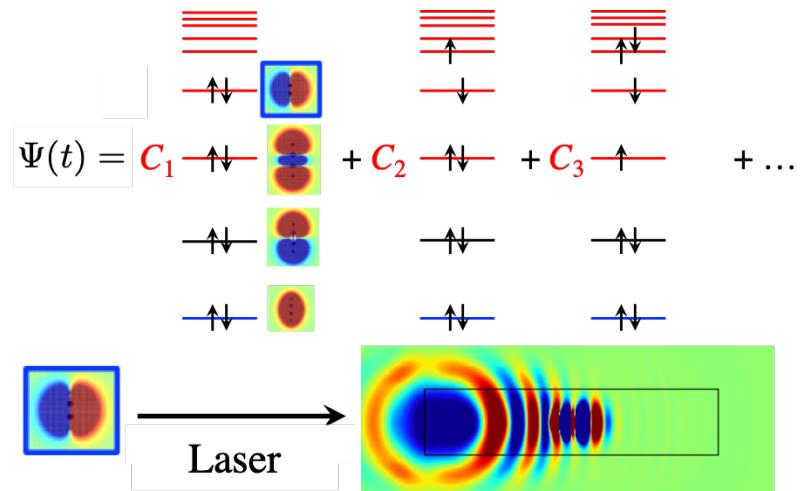
- 量子多体系シミュレーション
  - 分子・固体・原子核のシミュレーション

周期系に対する変分量子シミュレーション



Yoshioka et al (2022)

実時間ダイナミクスシミュレーション

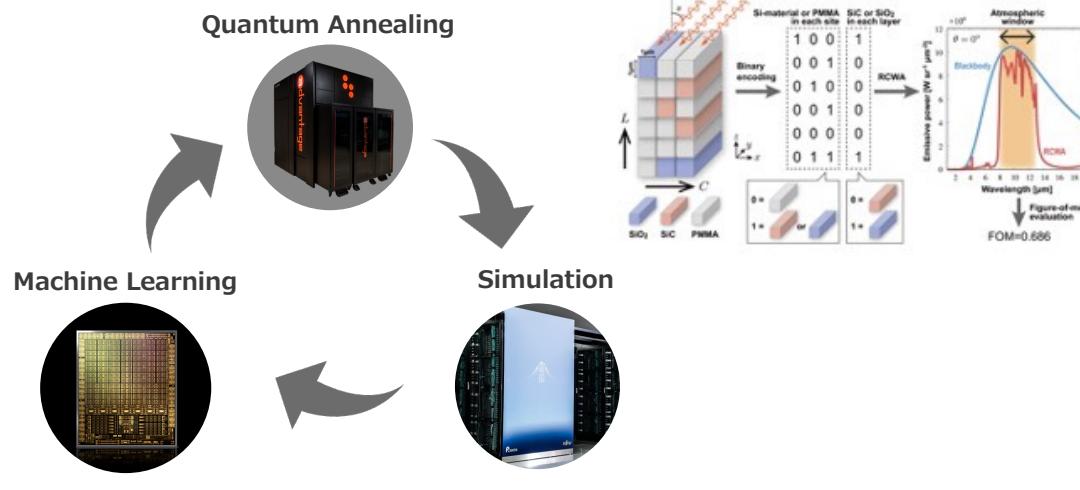


Sato et al (2021)

# 量子最適化

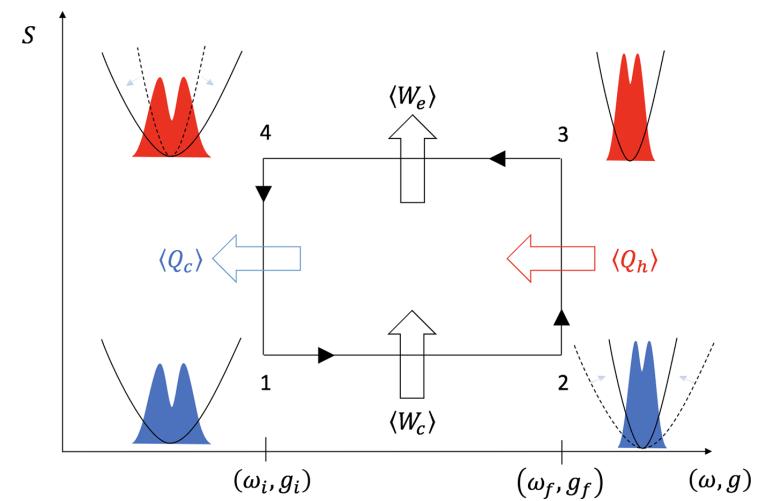
- ・様々な量子オプティマイザーによる最適化
  - ・問題分割技術、統計力学的解析

ブラックボックス最適化による物質設計



Kitai et al (2020)

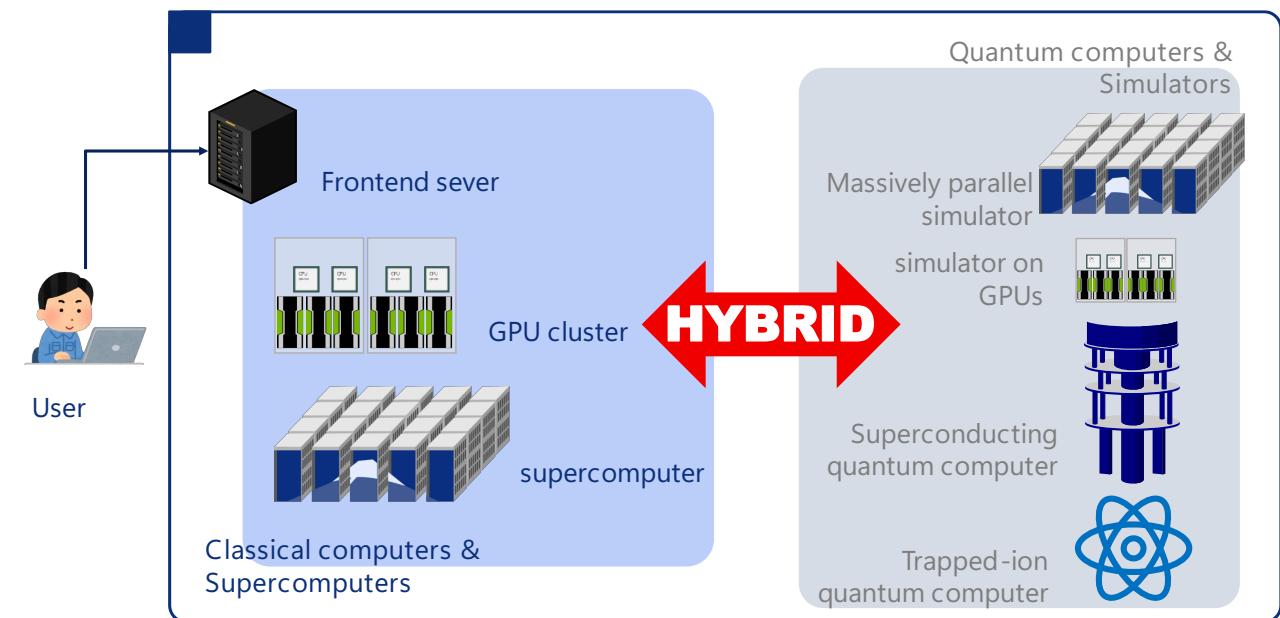
量子オットー熱機関



Boubakour et al (2023)

# 量子コンピュータとHPC

- ・シームレスに使える統合環境
  - Supercomputer + GPU + FPGA + QC + …
- ・量子計算におけるHPCの重要性
  - 量子回路シミュレーション
  - 量子誤り訂正・誤り抑制
  - 量子コンパイラ・量子回路最適化
  - 初期量子状態の準備
  - 量子コンピュータ間の通信



# 共創の場形成支援プログラム（量子技術分野）

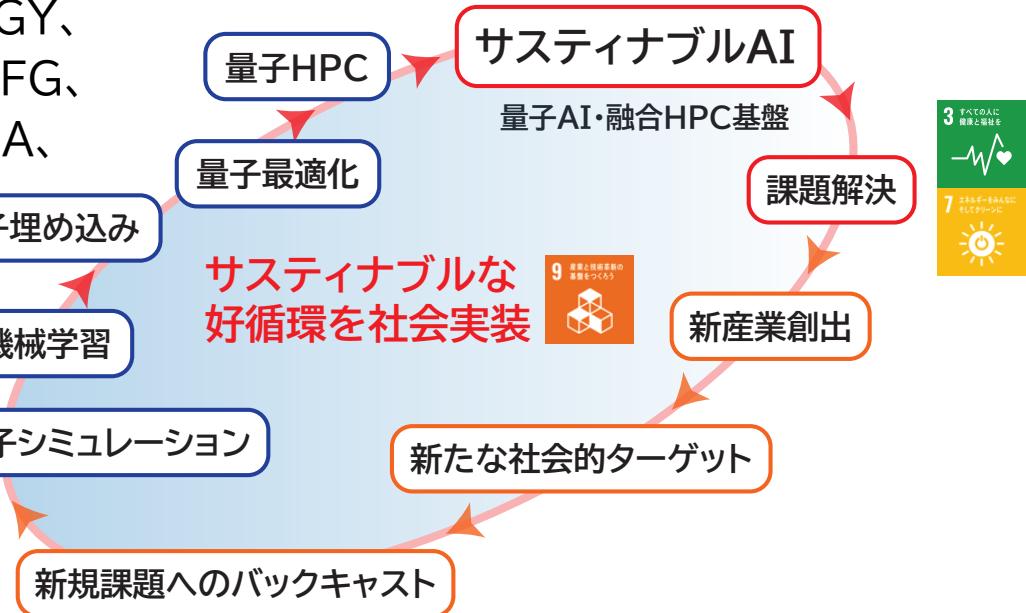
- **SQAI: サステイナブル量子AI研究拠点**

- 2022年10月から2032年3月まで10年間
- 量子コンピュータとHPCを統合した持続可能な量子AI基盤の創出

- 参画機関・参画企業

- 東京大学、慶應大学、理研、OIST、シカゴ大、川崎市、Amoeba Energy、SCSK、Quemix、京セラ、JSR、TIER IV、TOPPAN、トヨタ、NSSOL、IBM、SMFG、日本総研、バイトルヒクマ、BIPROGY、blueqat、みずほR&T、三菱ケミカル、MUFG、村田機械、オレンジテクラボ、OQC、NVIDIA、qBraid、富士フィルム、博報堂DY、三井化学、アズラボ、デロイト、デンソー、J-Power、三菱電機、PSNRD、長大

- 39機関（2024年9月現在）



# 量子コンピュータとHPCの統合による量子AI基盤

## ・「サステイナブルAI」とは

- ・少数データ、少数パラメータでも高い性能を示す量子機械学習と量子シミュレーションや量子計測データを組み合わせた量子AI技術
- ・従来のAI技術と比較して、計算量や消費電力を圧倒的に削減
- ・エネルギーの不安なしに社会のいたるところで存分に活用

## ・拠点ビジョン ⇒ 3つのターゲット ⇒ 5つの研究開発課題

ビジョン



量子ソフトウェアとHPC・シミュレーション技術の共創によるサステイナブルAIが拓く未来

- ・エネルギーの不安なしに情報技術を存分に活用できる社会
- ・携帯端末にいたるまで量子技術が普及し数千万人の人々がその恩恵を受けられる社会
- ・量子AIに支えられた生産性革命や新産業創出が持続する社会

ターゲット

サステイナブル量子機械学習手法の創出

量子AIにむけた多体問題量子シミュレーション手法の革新

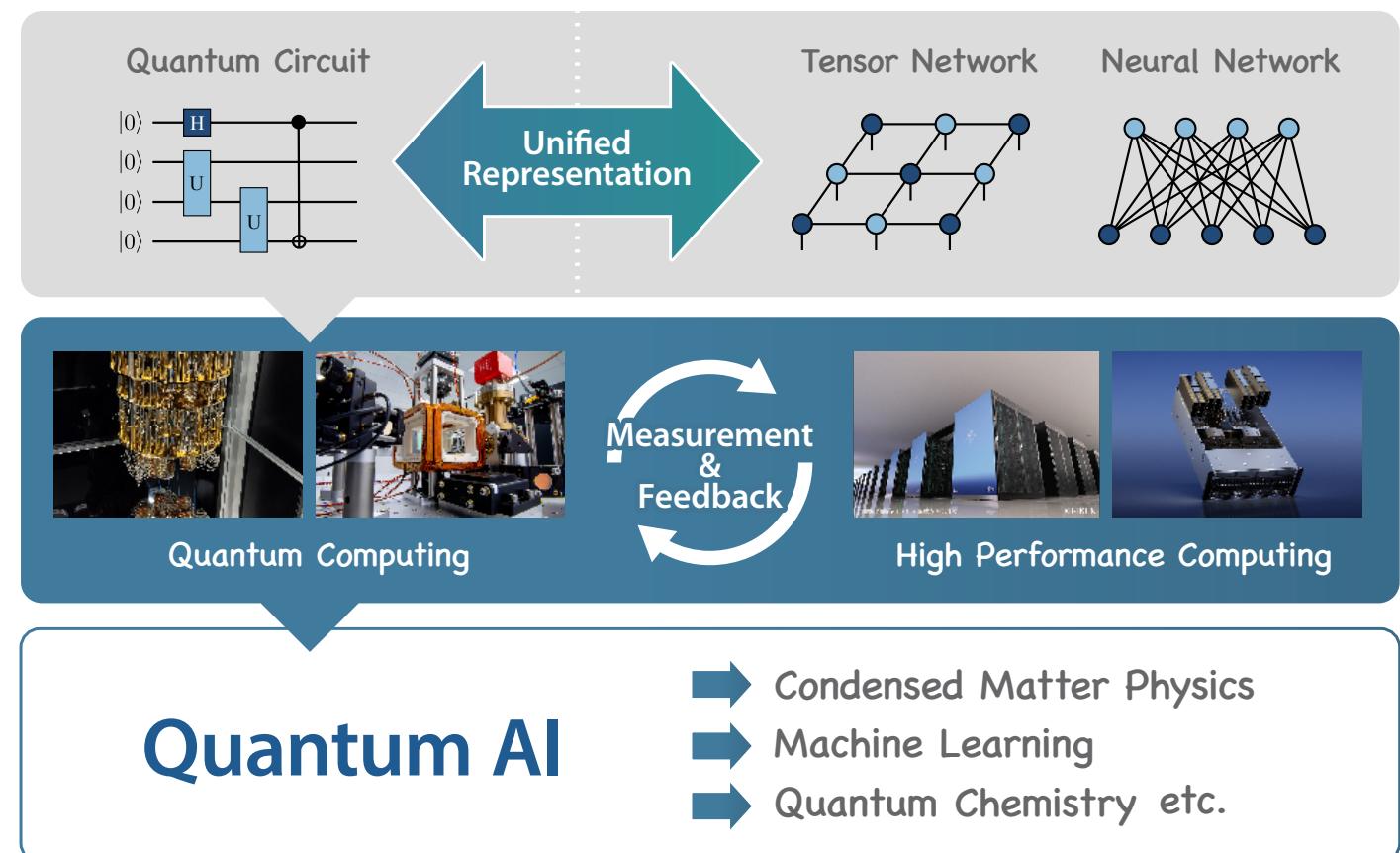
量子HPC基盤の構築と展開

研究開発課題

1. 量子機械学習による高汎化技術と最適化の統合（量子機械学習）
2. 物質・材料科学のための多体問題量子シミュレーション手法開発（量子シミュレーション）
3. 量子埋め込みに基づく量子古典融合アルゴリズム開発（量子埋め込み）
4. 量子機械学習/量子シミュレーションの高度化のための最適化技術開発（量子最適化）
5. CPU～GPU～QPUの統合による量子HPC基盤構築（量子HPC）

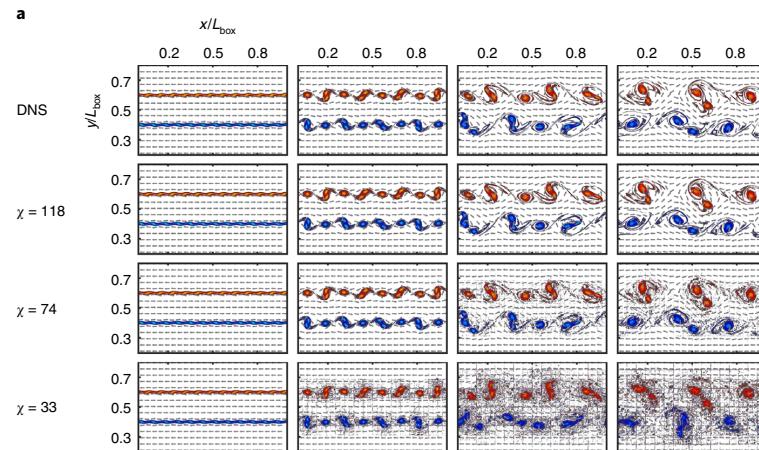
# 量子埋め込み: 量子回路 $\Leftrightarrow$ 古典コンピュータ

- ・古典コンピュータの持っている 情報をどのように量子コンピュータに「埋め込む」のか
- ・量子コンピュータからの出力をどのように古典コンピュータに「埋め込む」のか
- ・新しい「データ構造」
  - ・テンソルネットワーク, ボルツマンマシン, …

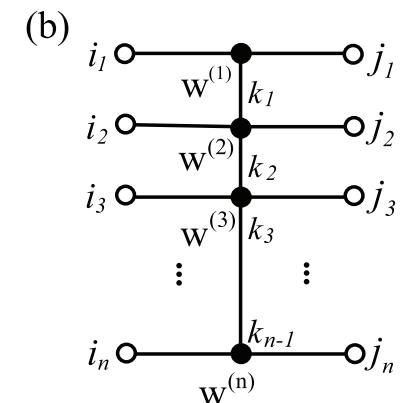
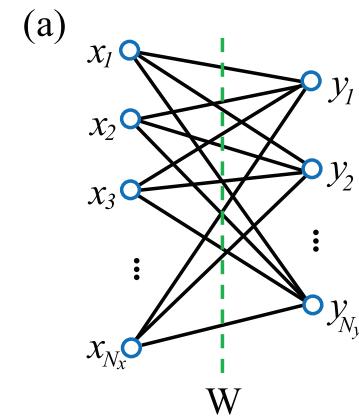
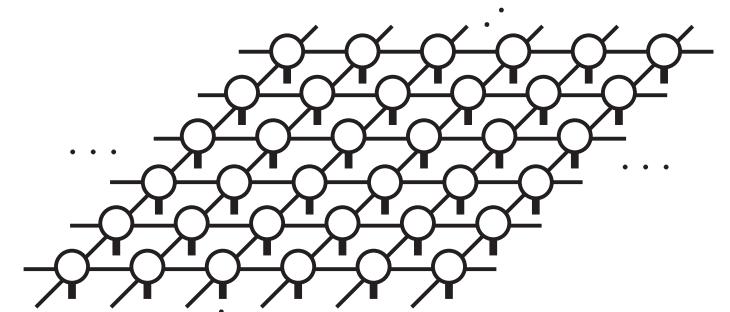


# テンソルネットワーク表現

- 量子多体系の量子状態
  - MPS, Tree TN, MERA, PEPS
- 統計力学模型の分配関数
  - テンソル繰り込み群
- テンソルネットワークによる機械学習
  - ニューラルネットワーク・生成モデルの圧縮
- 階層構造の情報圧縮
  - 同次多項式表現
  - 偏微分方程式のTNシミュレーション



Gourianov et al (2022)

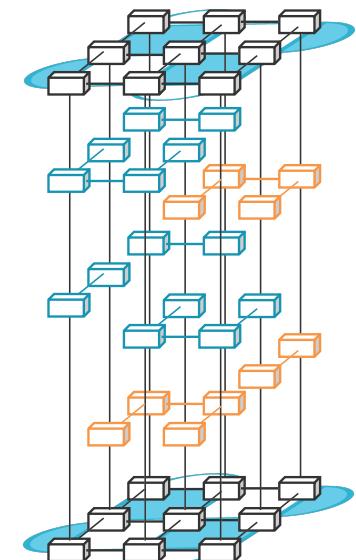


Gao et al (2020)

# 量子埋め込み: 量子回路→テンソルネットワーク

- 量子回路からテンソルネットワークへの変換は容易

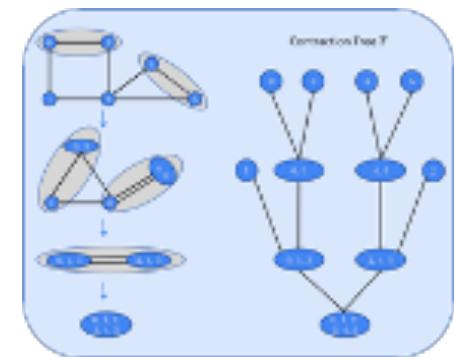
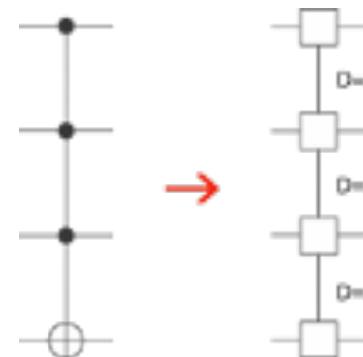
- 高性能なテンソルネットワークシミュレーター
  - テンソルネットワーク縮約順序の最適化
  - MCMCサンプリングとの組み合わせ
- 量子誤り訂正
  - TNデコーダーとベイズ推定によるノイズモデル予測
  - マルチコントロールゲートのテンソルネットワークと分解
    - 系統的な分解法の提案、Tゲート数の最適化



Kobori, ST (2024)

- 「量子状態」からTNへの変換は非自明

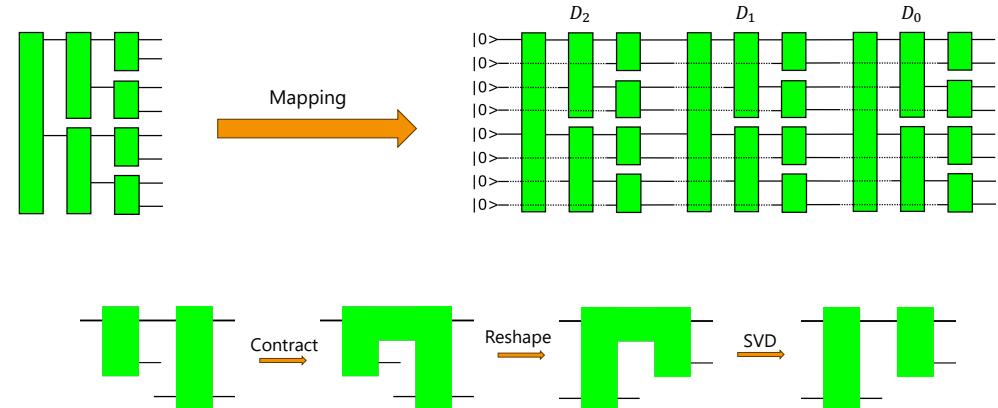
- TNトモグラフィー
- 量子メモリ、量子長距離通信



# 量子埋め込み: テンソルネットワーク→量子回路

- TNから量子回路への変換は非自明

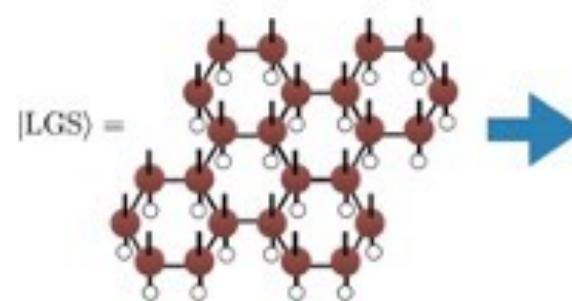
- 行列積状態から量子回路
  - テンソルネット量子状態の準備
  - ツリーテンソルネットワークへの一般化
- TN量子シミュレーション
  - TNの実時間・虚時間発展の埋め込み
- 量子-量子インターフェース



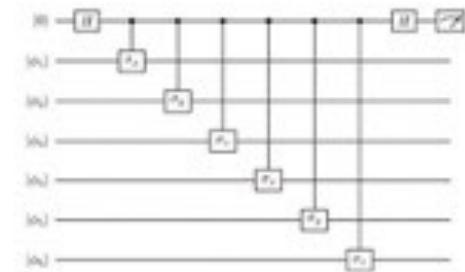
Sugawara et al.

Non-trivial tensor network state

$$|LGS\rangle = \hat{Q}_{LG} \prod_i \otimes |111\rangle_i$$



Corresponding quantum circuit



Okubo (2024)

# 共創の場形成支援プログラム（量子技術分野）

## ・SQAI: サステイナブル量子AI研究拠点

- ・量子コンピュータとHPCを統合した持続可能な量子AI基盤の創出
- ・5つの研究開発課題
  - ・量子機械学習、量子シミュレーション、量子埋め込み、量子最適化、量子HPC

## ・参画機関・参画企業

- ・東京大学、慶應大学、理研、OIST、シカゴ大、川崎市、Amoeba Energy、SCSK、Quemix、京セラ、JSR、TIER IV、TOPPAN、トヨタ、NSSOL、IBM、SMFG、日本総研、バイトルヒクマ、BIPROGY、blueqat、みずほR&T、三菱ケミカル、MUFG、村田機械、オレンジテクラボ、OQC、NVIDIA、qBraid、富士フィルム、博報堂DY、三井化学、アズラボ、デロイト、デンソー、J-Power、三菱電機、PSNRD、長大

- ・39機関（2024年9月現在）

