

量子コンピュータの動向

伊藤公平

慶應義塾大学 理工学部

慶應義塾大学量子コンピューティングセンター

文科省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)

量子情報処理分野プログラムディレクタ(PD)

JSTさきがけ「量子の状態制御と機能化」領域総括

2019年9月11日

文部科学省

HPCI計画推進委員会

発表資料

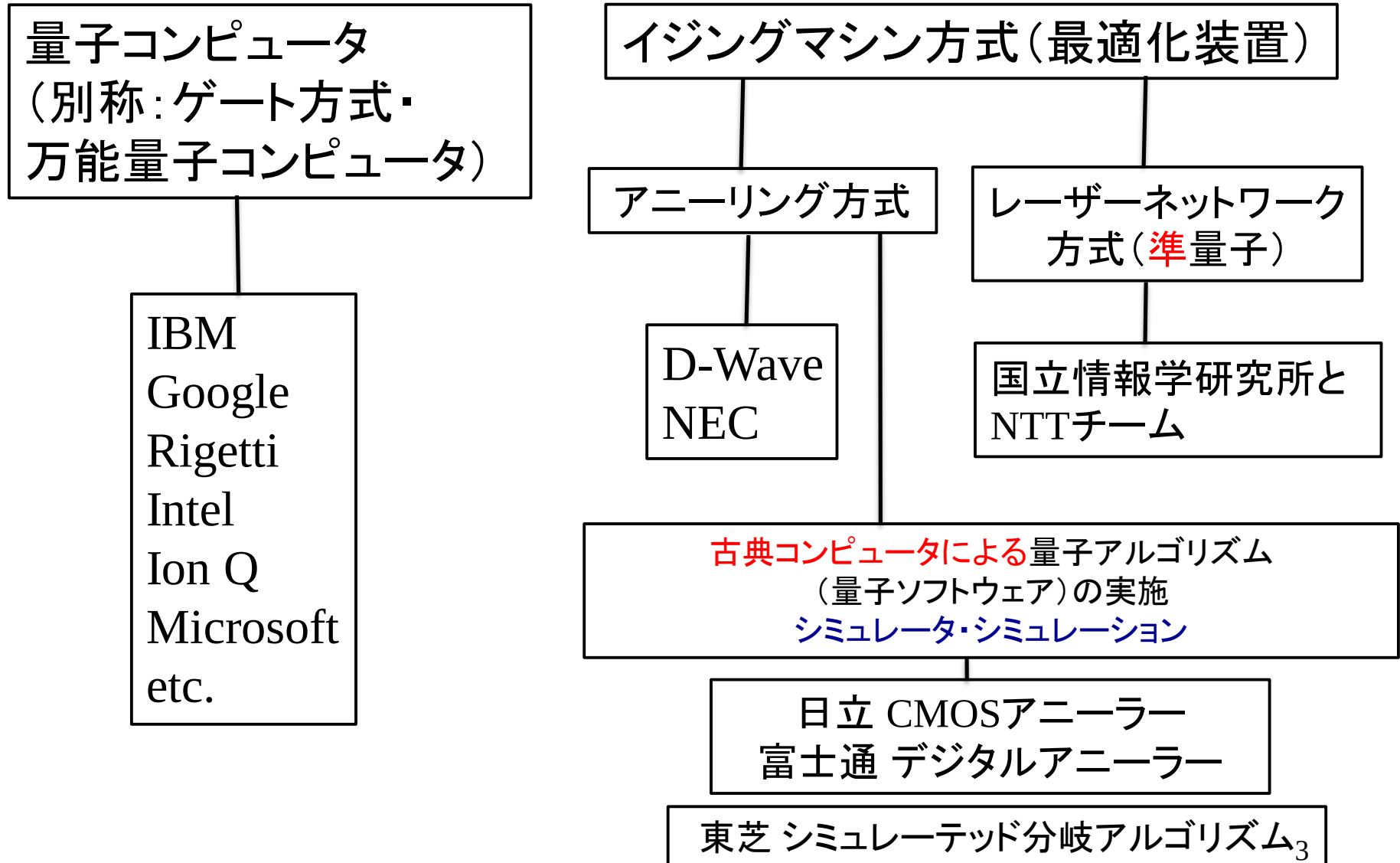
量子コンピュータ等の量子科学技術分野における海外政府の取組

これまでの常識を凌駕し、社会に変革をもたらす重要な技術として、研究開発投資額を増加。

	政府による位置づけ	取組状況
 アメリカ	アメリカの科学的リーダーシップや国家安全保障、経済的競争性を構成する重要な技術として投資優先事項 (国家科学技術会議WG報告 '16/7)	・国防省やNSF等より毎年200百万ドル(約218億円)オーダーの投資 ・2019年より5年間で13億ドル(約1,400億円)規模の投資を連邦議会で議論中
 EU	長期にわたる富の創出と安全保障に貢献する競争力の高い産業を創出 (Quantum Manifesto, '16/5)	・2019年から10億ユーロ(約1250億円)規模プロジェクト「Quantum Technology Flagship」を開始(10年計画)
 イギリス	新たに勃興してくる数十億ポンド規模の量子技術市場において、イギリスが世界でリード (量子技術に関するアドバイザリーボードレポート、'15/3)	・量子技術に関する大型プロジェクト「the UK National Quantum Technologies Programme」を2014年2月より総額270百万ポンド(約456億円)で実施(5年計画)
 中国	量子通信と量子コンピュータを重大科学技術プロジェクトとして位置づけ (科学技術イノベーション第13次五カ年計画(2016年))	・「量子情報科学国家実験室」を安徽省合肥市に建設中。2020年完成予定。約70億元(約1,200億円)

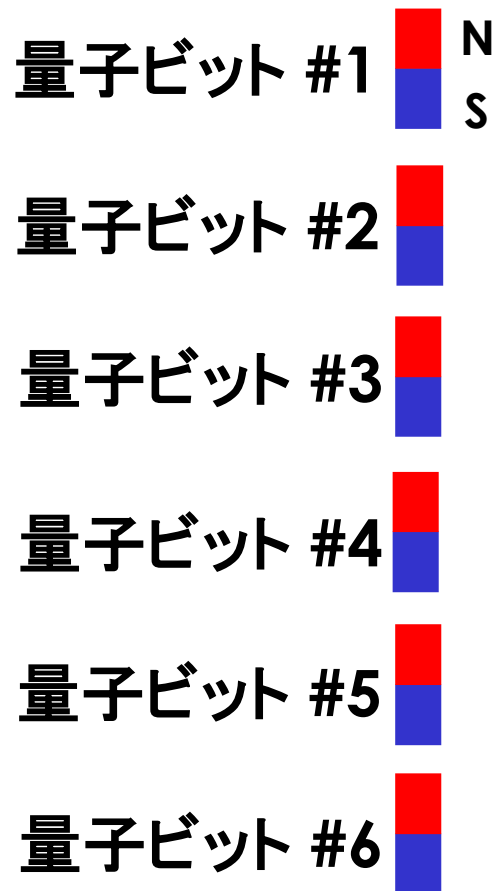
注)為替レートは、発表時の当該月の我が国財務大臣が公示する基準外国為替相場及び裁定外国為替相場をもとに算定

量子コンピュータの種類



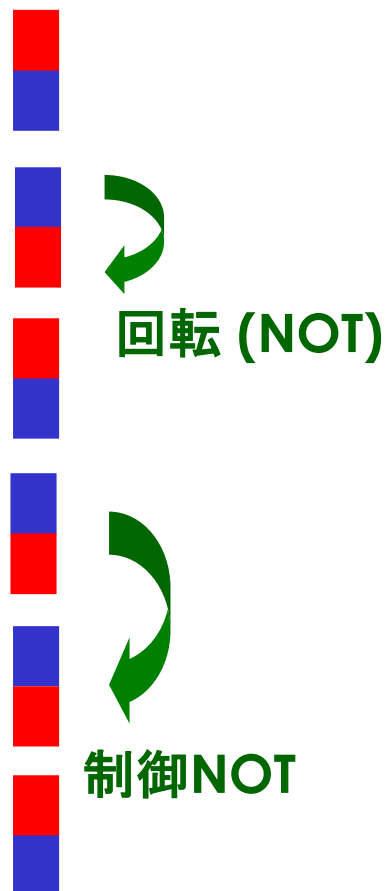
ゲート式量子コンピューティング

1. 初期化



量子ビット数

2. 演算



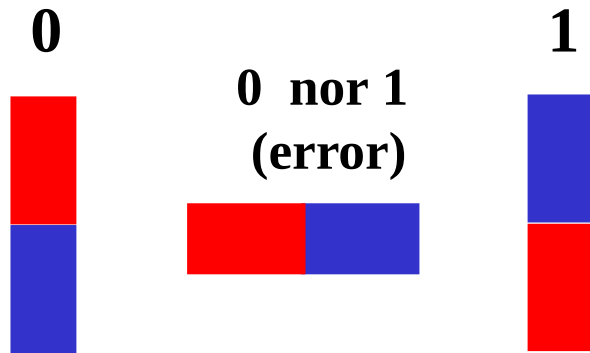
演算回数、演算速度など

3. 読み出し

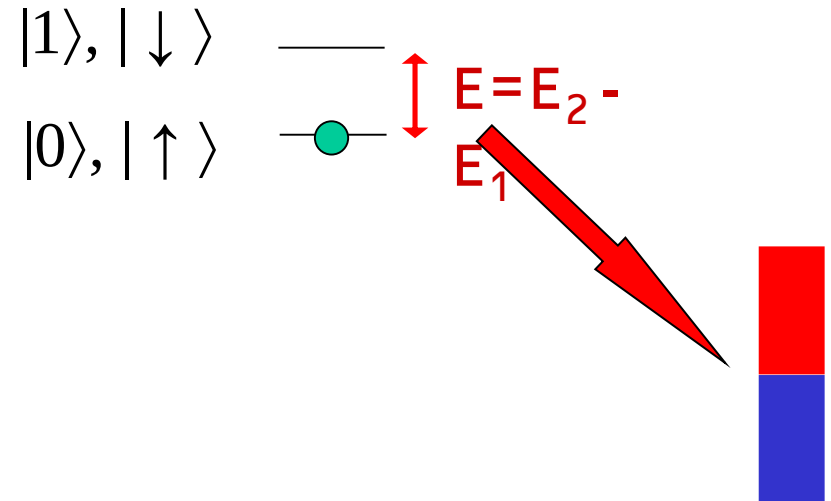


古典ビット vs. 量子ビット (qubit)

古典ビット



量子ビット (qubit)



qubit

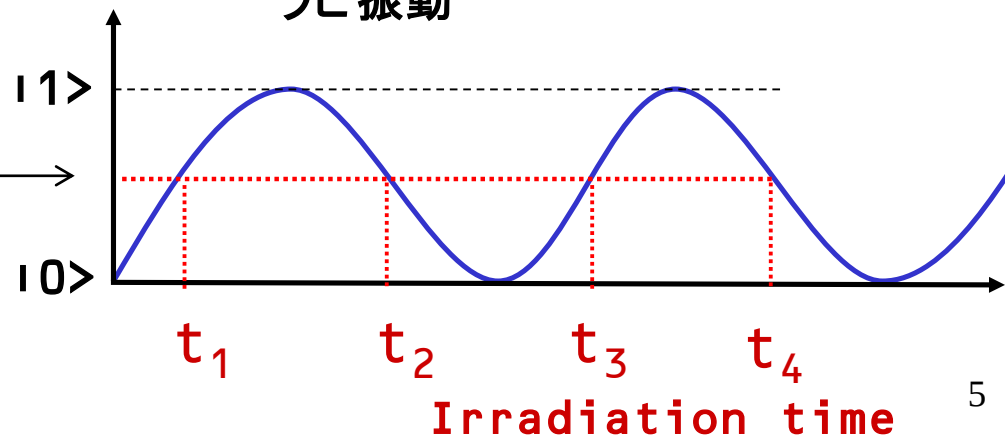


$$\psi = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |1\rangle)$$

0 and 1 (not error)

50% $|0\rangle$ and 50% $|1\rangle$

ラビ振動



超並列計算(量子並列性)



0	0	0
0	0	1
0	1	0
0	1	1
1	0	0
1	0	1
1	1	0
1	1	1

2進数

0
1
2
3
4
5
6
7

10進数

2^n 通りの数が一
気に処理できる

200量子ビット
→ $2^{200} = 1.6 \times 10^{60}$
宇宙の原子数！

量子シミュレータ・量子コンピュータ開発最前線

1. 量子現象を用いない現在のコンピュータで、量子アニーリングを効率的に実行する〔イジングマシン〕

富士通、日立、東芝、国立情報学研究所(NII)-NTT

2. 量子現象を用いて量子アニーリングを実行する
〔イジングマシンであり量子シミュレータ〕

カナダ D-Wave社、国立情報学研究所(NII)-NTT

3. 量子ゲート式 量子コンピュータ 〔すべての量子ソフトウェアが実行できる汎用量子コンピュータ〕

米国 IBM, Google, Intel, Microsoft, Ion Q , Rigetti等

量子ソフトウェア開発ベンチャーも多数設立

量子ソフトウェア企業



1QBit



AppliedQubit



HQS
|Ketita>



rahko
quantum machine learning



MDR



XOFIA $\langle \Phi |$ Quantum.Phi

$\langle q|b \rangle$ quantum benchmark



IBM Q Network Hub @ Keio Univ.

- 2018年5月17日慶應義塾大学理工学部矢上キャンパス(日吉)に設置
- 世界最先端の米IBM Watson Research Centerの量子コンピュータをクラウド経由で利用(アジア唯一の拠点)
- JSR、三菱UFJ銀行、みずほFG、三菱ケミカルが初期メンバー
- 今のコンピュータでできないことを量子コンピュータで補うためのソフトウェア開発
- AIや並列計算機との接続
- 産業&学術
- 他大学の学生や教員も無料で参加可能(慶應の職位を付与)

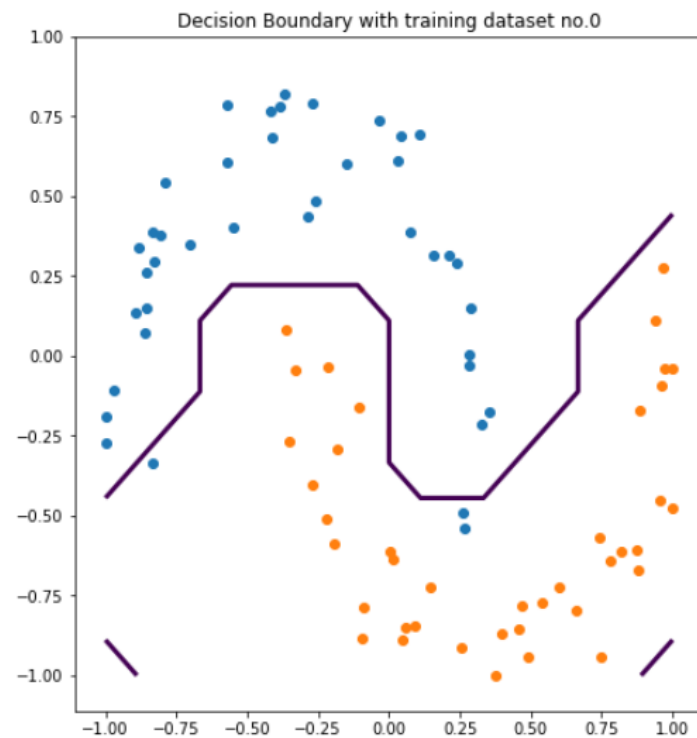
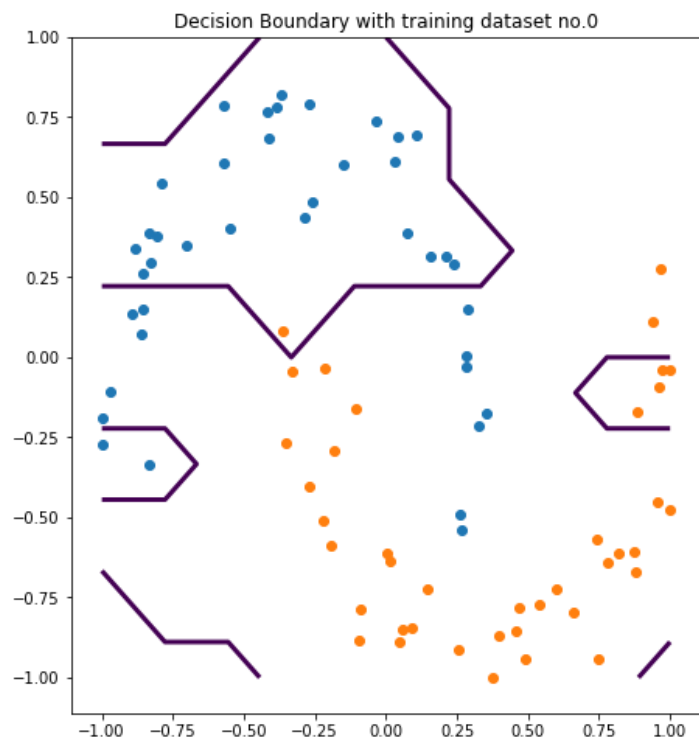


量子AIチーム:量子サポートベクターマシン

慶應義塾 + 三菱ケミカル + みずほ + MUFG + IBM

既存手法：予測精度 = **0.81**

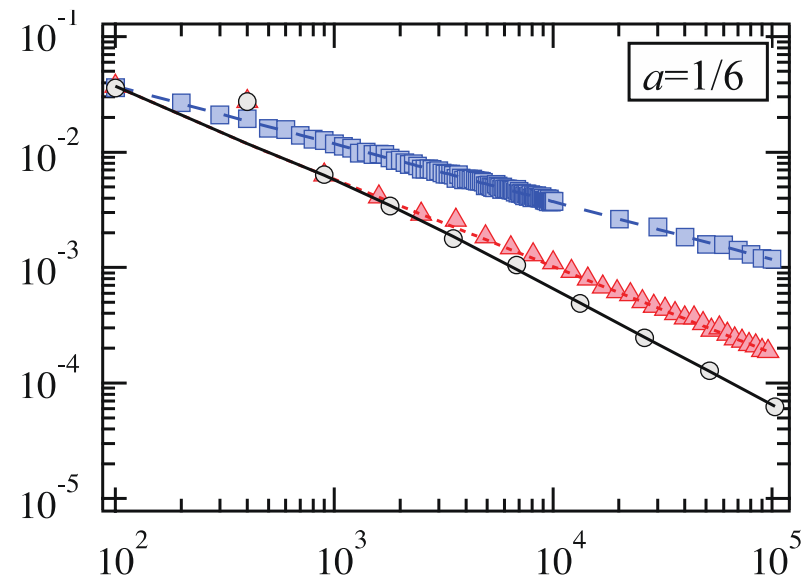
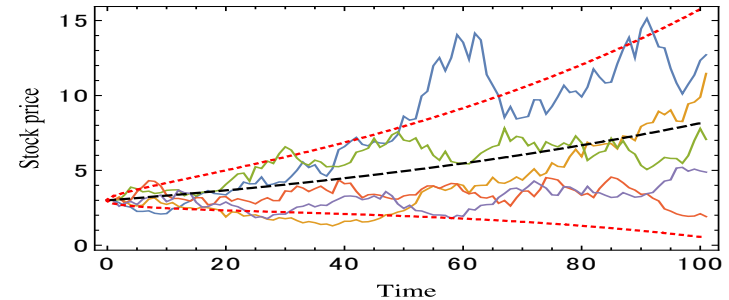
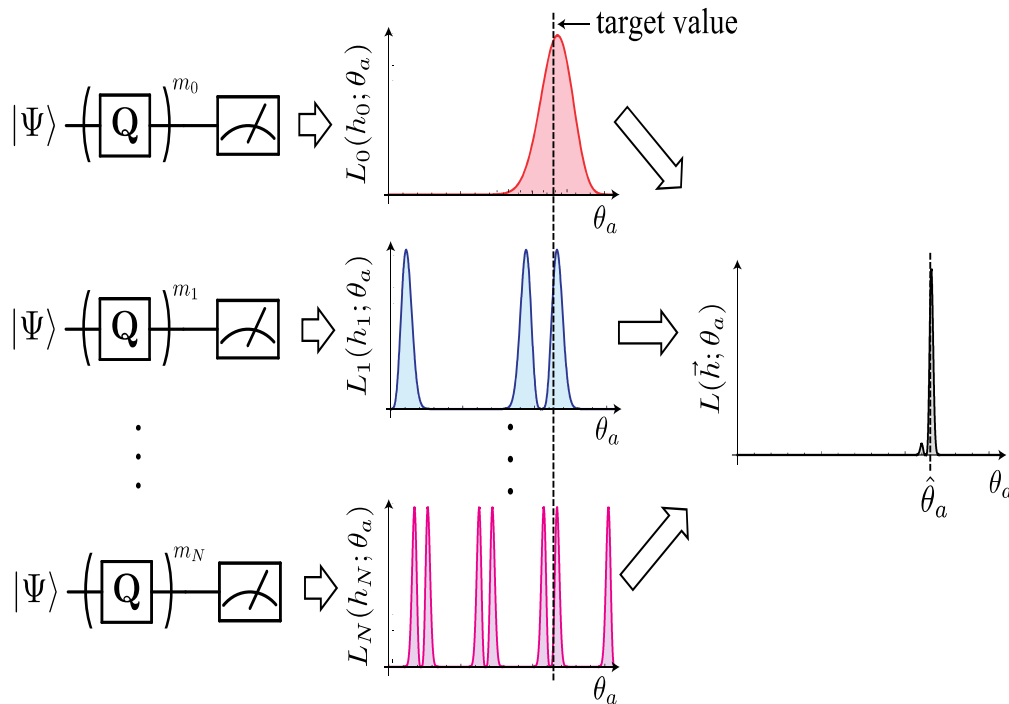
提案手法：予測精度 = **0.99**



IBM Q **実機**を用いて高精度データ分類に成功！

量子金融チーム:高速モンテカルロ計算

慶應義塾 + みずほ + MUFG + IBM



基礎理論構築 & IBM Q シミュレータ・実機による検証

量子金融チーム(暗号): ショアアルゴリズムの実装

慶應義塾 + 東京大学 + MUFG + みずほ

ショアアルゴリズム – 素因数分解を現実的な時間で解いてしまう。
RSA暗号方式に大きな影響。

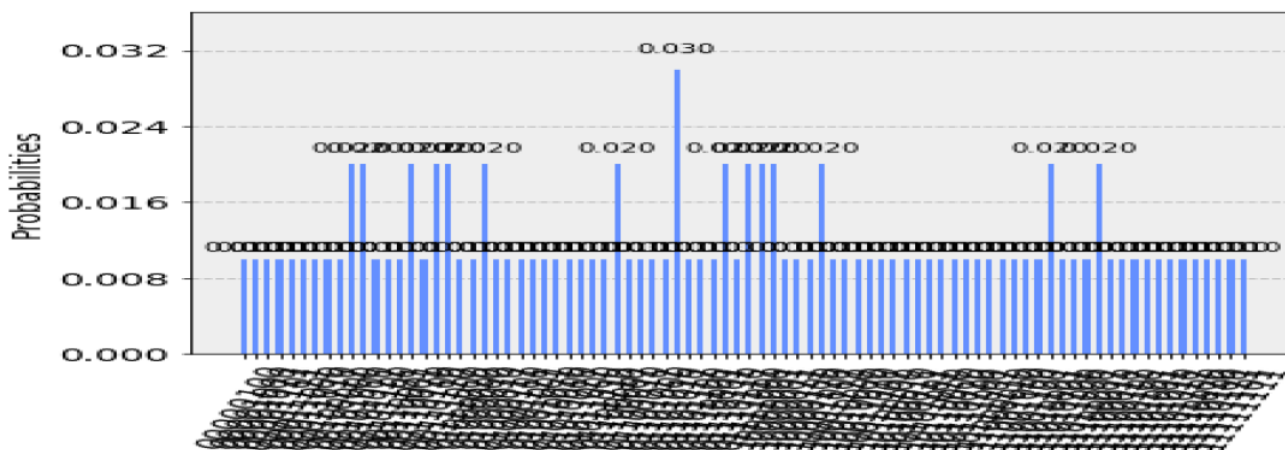
IBM20Qでの動作結果

- ・ゲート数：63
- ・回路の深さ：17



- ・ゲート数：331
- ・回路の深さ：109

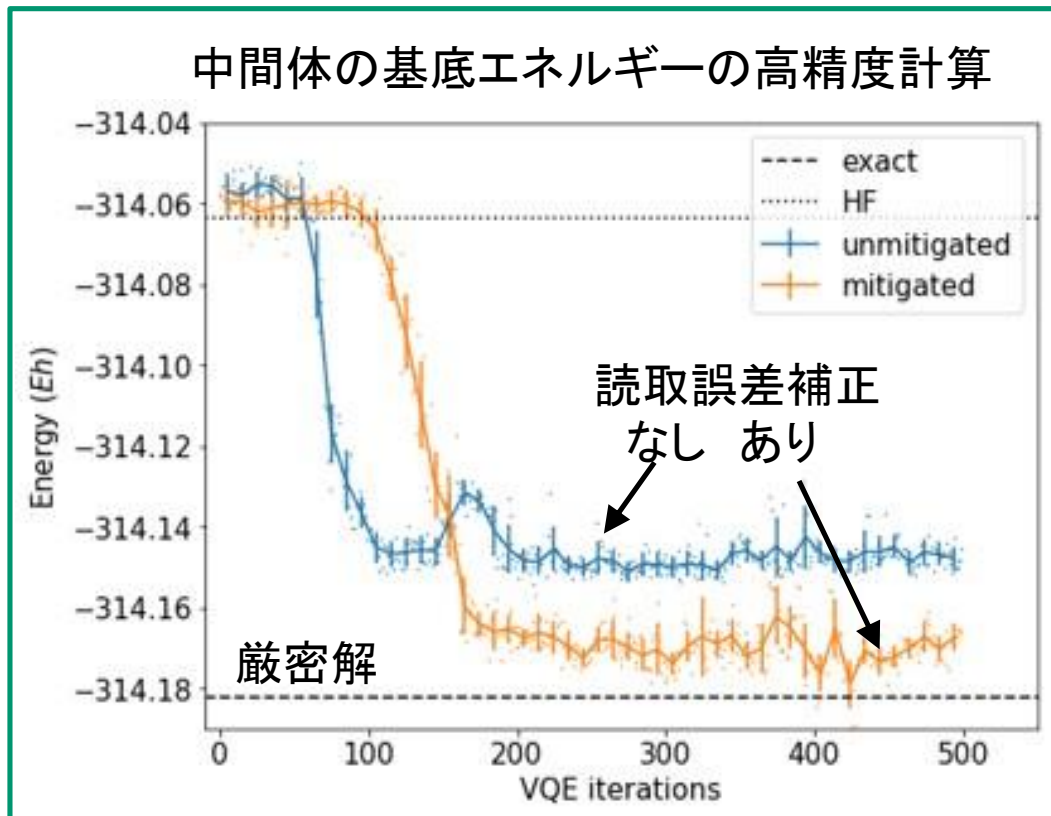
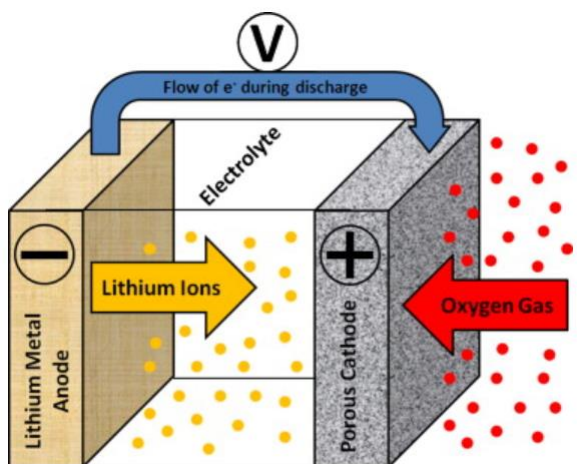
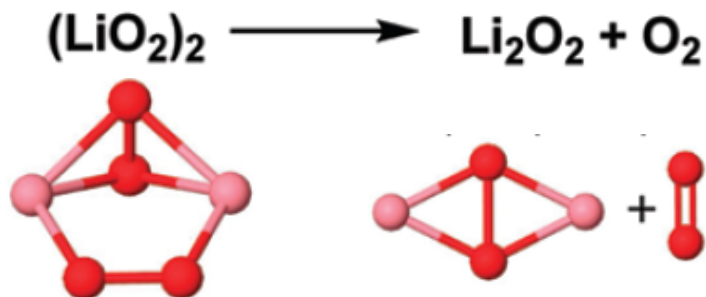
実機実装



IBM Q 実機を用いて ショアアルゴリズムの実装に挑戦！

量子化学チーム:リチウム空気電池の反応解析

慶應義塾 + 三菱ケミカル + IBM



IBM Q **実機**を用いてリチウム空気電池の化学反応計算に成功！

「学術・経済活動の発展」と「安心・安全社会の維持」のためには計算機（ハードウェア）とその活用方法（ソフトウェア）の最前線を走ることが必須

1. （～2023年）従来の計算性能の発展（ムーアの法則）を維持するために、現在のコンピュータの苦手な部分を補完する量子コンピュータ・量子ソフトウェアの開発
2. （～2028年）従来の計算性能を飛躍的に超越する量子シミュレータ・量子コンピュータ・量子ソフトウェアの開発（quantum leap, 量子飛躍）
 - ・分子シミュレーション・化学反応シミュレーションに基づく創薬・化学製品開発や医学の発展
 - ・金融工学（キャッシュレス社会、ブロックチェーン技術等）
 - ・サイバーセキュリティ分野（含む、暗号）での覇権確保

文科省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP) 量子情報処理(主に量子シミュレータ・量子コンピュータ)

PD 伊藤公平 (慶應義塾大学/JSTさきがけ研究総括)

量子コンピュータに関連する市場規模は2024年までに約1.2兆円になると予測されており、近年、材料科学や創薬、AI、最適化問題などへの適用を視野に、海外IT大手を中心に大規模な投資による研究開発が進行中である。本プログラムでは、社会・経済に大きなインパクトを与え得る汎用量子コンピュータの将来的な開発を念頭に、中期的な出口目標や社会実装を明確に定めた研究開発を実施する。

Flagship 1課題 + 基礎基盤 6課題

Flagship 超伝導量子コンピュータ

【Flagshipプロジェクト】「量子情報処理(主に量子シミュレータ・量子コンピュータ)」の採択課題

採択課題 超伝導量子コンピュータの研究開発

研究代表者 理化学研究所・創発物性科学研究センター 中村 泰信チームリーダー

(共同研究機関) 東京大学、産業技術総合研究所

その他参画機関(東芝、MDR、NEC、NTT、QunaSysなど)

概要 超伝導量子ビットを用いた、古典計算機の限界を超える計算を可能にする量子計算プラットフォーム拠点を構築
3次元パッケージング技術を提案し、**100量子ビット以上を実装**
量子コンピュータ上で優位性を示す**アプリケーションの開拓**、**クラウドサービス**による利用者への提供

研究開発目標

- ・3次元パッケージングによる**100量子ビット以上の実装**
- ・**クラウドサービス**による**アプリケーション**の利用者への提供

マイルストーン

- ・5年後：**50量子ビット実装**、**高忠実度^{*1}な制御および観測**を実現
50量子ビットシステムの**クラウドサービス**を開始
- ・10年後：**100量子ビット実装**、**高忠実度^{*2}な制御および観測**を実現
100量子ビットシステムの**クラウドサービス**を開始、**実利用**に向けた応用

*1 1量子ビットゲート>99.9%、2量子ビットゲート>99%、読み出し>99%

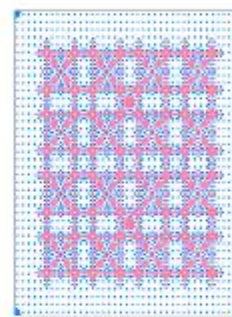
*2 1量子ビットゲート>99.95%、2量子ビットゲート>99.9%、読み出し>99.9%

出口戦略

- ・クラウドシステムの構築運用：**連携企業と協働**
- ・ハードウェア技術：**コンソーシアム**の設置、**連携企業の開拓**により
産学共同で開発・実用化を目指す

研究基盤の強化・次世代人材の育成

- ・**次世代のリーダー候補**となる若手研究者を**PI**として採用
- ・博士課程学生を**研究員等**として雇用
- ・欧州や北米などの研究グループと連携、**国際的な人事交流**
- ・研究開発**コンソーシアム**の設立
- ・研究者・学生のキャリアパス確保の支援



20 mm X 20 mm

量子ビット集積チップ (イメージ)



超伝導量子ビット集積回路の性能向上

基礎基盤研究（ハードウェア）

Flagshipに相補的かつ相乗的な効果が期待される研究課題

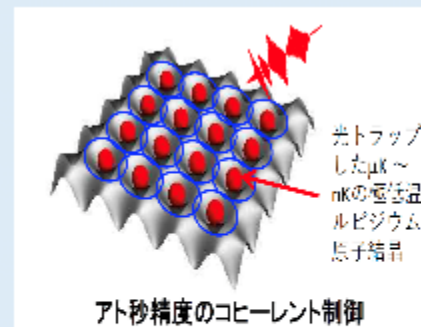
採択課題 アト秒ナノメートル領域の時空間光制御に基づく冷却原子量子シミュレータの開発と量子計算への応用

研究代表者 自然科学研究機構分子科学研究所 大森 賢治 教授

概要 アト秒(10^{-18} 秒)精度の超高速量子シミュレータと、基底状態の短距離相互作用を厳密に制御する高機能ハバート量子シミュレータを開発

Flagshipプロジェクトとの相補的・相乗効果：

Flagshipプロジェクトとは異なる手法を発展させ、量子情報処理のプラットフォームの形成に貢献



冷却原子
量子シミュレータ

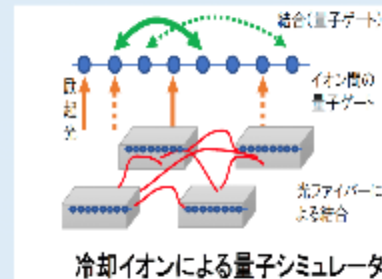
採択課題 冷却イオンによる多自由度複合量子シミュレーター

研究代表者 大阪大学基礎工学研究科 豊田 健二 助教

概要 全結合性が高いと考えられている冷却イオン方式を用いた多自由度複合量子シミュレータの開発を行い、20~100イオンでのアナログ量子シミュレーションを実施

Flagshipプロジェクトとの相補的・相乗効果：

Flagshipプロジェクトとは異なる手法を発展させ、量子情報処理のプラットフォームの形成に貢献



イオントラップ
量子シミュレータ

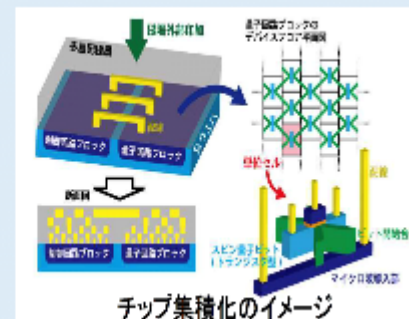
採択課題 シリコン量子ビットによる量子計算機向け大規模集積回路の実現

研究代表者 産業技術総合研究所ナノエレクトロニクス研究部門
森 貴洋 主任研究員

概要 高忠実度のシリコン量子ビットをシリコン集積回路技術を用いて集積化し、大規模集積化に適した2量子ビット結合を実現

Flagshipプロジェクトとの相補的・相乗効果：

Flagshipプロジェクトとは異なる手法を発展させ、量子情報処理のプラットフォームの形成に貢献



シリコン
誤り耐性量子コンピュータ

基礎基盤研究(アーキテクチャ・ソフト・アプリ)

Flagshipに相補的かつ相乗的な効果が期待される研究テーマ

採択課題 アーキテクチャを中心とした量子ソフトウェアの理論と実践

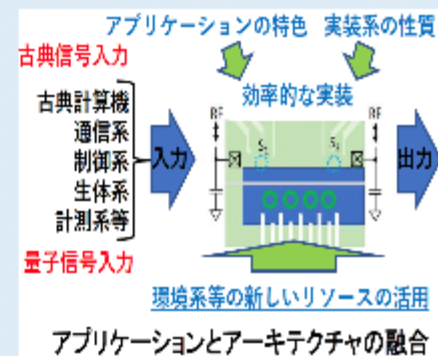
研究代表者 情報・システム研究機構国立情報学研究所

情報学プリンシプル研究系 根本 香絵 教授

概要 少数量子ビット量子情報処理に特化したアプリケーション、量子的なポテンシャルを最大限引き出す実装方法をアーキテクチャとして開発

Flagshipプロジェクトとの相補的・相乗的効果：

ゲート型量子コンピュータのポテンシャルを最大限に引き出すアーキテクチャを解明し、ゲート型量子コンピュータの社会実装を加速



アーキテクチャ
・アプリケーション

採択課題 量子コンピュータのための高速シミュレーション環境構築と量子ソフトウェア研究の展開

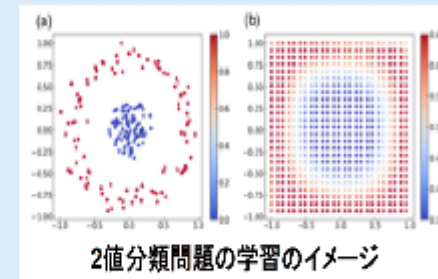
研究代表者 京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻

研究代表者 藤井 啓祐 特定准教授

概要 古典コンピュータを用いた量子コンピュータのシミュレーション環境の構築と、量子加速に基づいた機械学習・量子化学アルゴリズムの構築

Flagshipプロジェクトとの相補的・相乗的効果：

ゲート型量子コンピュータのソフトウェアを開発し、ゲート型量子コンピュータの社会実装を加速



2値分類問題の学習のイメージ

シミュレーション環境
・アプリケーション

採択課題 量子ソフトウェア

研究代表者 慶應義塾大学理工学部 山本 直樹 准教授

概要 中規模ゲート型量子コンピュータの実機 IBM Q を活用し、実社会の問題を解決するための量子アルゴリズムの理論整備および実機実装のためのソフトウェア開発を実施

Flagshipプロジェクトとの相補的・相乗的効果：

ゲート型量子コンピュータのソフトウェアを開発し、ゲート型量子コンピュータの社会実装を加速



慶應義塾大学 量子コンピューティングセンター

ソフトウェア
・アプリケーション

結論

- 量子技術が計算性能の発展の一部を担う
- 量子ハードウェア開発

小規模(～100量子ビット)量子コンピュータで現在のコンピュータを補完する素子の開発。ソフト開発と協調したハードウェアの設計・開発。(初動はQ-LEAPで対応)

続いて大規模集積化→企業が中心となる政策

- 量子ソフトウェア開発

データサイエンティスト、AI人材、高度プログラミング人材育成、HPCI人材育成と合わせた研究者育成プログラムが必要
2019年度発足 JSTさきがけ「革新的な量子情報処理基盤の創出」領域の活用等が重要