

量子分野の技術的動向について

中村 泰信

理化学研究所量子コンピュータ研究センター

量子分野の歴史的経緯

- 量子力学 1900年頃～
- 前期量子論 プランク・アインシュタイン・ボーアなど
- 量子力学の誕生 1925～ ハイゼンベルグ・シュレディンガー・パウリ・ディラックなど
 - 国際量子科学技術年 UNESCO 2025
- 原子・分子・固体物理・素粒子・核物理・量子電磁力学・量子光学・量子化学など
- 固体物理 ⇒ 超伝導・磁性・半導体・誘電体・量子多体系・量子トポロジカル物性など
- トランジスタ・レーザ ⇒ 半導体集積回路・光通信技術
 - ⇒ インターネット・モバイル機器・HPC・AI
- 核エネルギー・太陽電池・電池
- 化学工学・材料工学 創薬・医療
- 計測・分析・評価技術
- 1990年代～
- 量子情報・量子計算・量子通信・量子計測・量子標準・量子生命・量子宇宙・量子材料など
- 量子情報科学創成に誘発された「第2次量子革命」の重要性
 - 量子力学を新たな切り口で語り直す量子情報という共通言語により、細分化されていた異なる分野間のコミュニケーションを可能にすることで、新しい概念の生成と共有を加速し、集合知を生み出している。

量子コンピュータ研究の歴史的経緯

- 1980年代～ ファインマン・ドイチュなど量子シミュレーション・量子計算黎明期
- 1994年 ショアのアルゴリズム
- 1995年～ 量子誤り訂正理論
- 1995年頃～ 量子ビット制御実験 核スピン・光・イオン・原子
- 2000年頃～ 固体素子上の量子ビット 超伝導・半導体・色中心
- 2000年～2015年頃 模索期間 基礎理論および技術の蓄積
- 2010年頃～ D-Waveの量子アニーリングが注目を集める
- 2015年頃～ Google・IBMなど参入 量子コンピュータ実現を目指した研究が本格化
 - 量子スタートアップ企業の急増・民間資金の流入
 - 量子クラウドサービスの始まり
 - NISQ・量子-古典ハイブリッド計算への関心 HPC業界も参入 Q-LEAP開始
- 2020年頃～ 誤り耐性量子計算への関心の高まり Moonshotプロジェクト目標6開始
 - 超伝導・イオントラップ量子コンピュータの小規模デモンストレーション
 - 中性原子方式の急成長
 - 光量子コンピュータのプロトタイプ実現

量子コンピュータ研究の技術的動向

- 2025時点の動向と重要課題
 - 量子コンピュータハードウェア性能の向上
 - イオントラップ・超伝導・中性原子が数十~数百量子ビットの集積システムで高い忠実度99~99.9%実現 実用へ向けては99.99%以上を目指す必要あり？
 - 論理量子ビットが実現
 - 論理量子ビットエラー率の一層の抑制・論理量子ビット集積化が必要
 - 誤り耐性量子計算（FTQC）に向けた理論の進展
 - オーバーヘッドの低減へ向けた取り組みの加速
 - NISQおよび量子-古典ハイブリッド計算
 - スケーリングに課題があるものの、量子優位性可能性実証の試み
 - 量子アルゴリズム・アプリケーション探索継続中 量子化学計算などに初期の期待
 - 半導体・フォトニクス・光電融合などの最先端技術の、量子技術への適用の試みが、産業界を中心に加速。産官学連携の重要ポイント
 - 10万~100万物理量子ビット（1000~1万論理量子ビット）を目指す研究開発プロジェクトが立ち上がりつつある
 - いずれの物理プラットフォームも大規模量子コンピュータ実現に向けたスケールアップの方法を模索中。周辺技術の確立も含めた大規模な研究開発が必要
 - 冷却原子などを用いた量子シミュレーション
 - 量子多体系の物理の理解に向けて進展

量子通信研究の技術的動向

- 量子鍵配布 1980年代～ ブラザール・ベネット・エックハートなど
- その後、様々な方式の提案と実証。物理的安全性証明も進む。
- 遠距離化・広帯域化継続中 実用に向けたシステム安全性・利便性検証と向上
- 衛星通信技術との融合
- 耐量子暗号技術との住み分け・融合

- 量子中継技術はまだ発展途上
 - 量子通信技術の遠距離化を目指して、様々な物理系を用いた中継技術の試み
 - 量子もつれ光子伝送・量子テレポーテーション・量子蒸留が要素技術
 - 高効率化・広帯域化が課題

- 量子ネットワークのその他応用
 - 秘匿型量子計算・分散型量子コンピュータ・分散型量子センシングの検討進行

- 量子インターネット 方式・応用について上記以外にも模索段階

量子センシング研究の技術的動向

- 核スピン共鳴・電子スピン共鳴 量子センシングの先駆け 1940年代～
 - 医療・創薬・物理・化学応用
 - 量子情報科学により進化 単一スピンの制御・観測実現・動的核偏極技術向上など
- 光計測技術・原子計測技術・ダイヤモンドNVセンター制御計測技術など
 - 量子コヒーレンス・量子もつれを活かした、感度および空間・時間分解能向上
 - 科学技術および産業技術へ応用分野拡大中 LiDAR・材料・医療・生体など
 - 原子を用いた量子ジャイロスコープ・加速度計・重力計 慣性航法
- 量子オプトエレクトロメカニクス
 - 大きな質量を持つ粒子の重ね合わせ
 - 重力と量子力学の関係の追究
- 光周波数コムや非線形量子光学素子など、レーザー技術・フォトニクス技術の進展
- 量子光学技術・超伝導回路マイクロ波量子光学技術の進展
 - 光・マイクロ波領域それぞれにおける単一光子生成・検出、量子雑音限界増幅、スクイーズド状態・非ガウス状態生成など
 - 非古典光を用いた重力波干渉計の感度向上など

量子標準研究の技術的動向

- 光格子時計・イオントラップ時計・原子核時計
 - 一般相対論の効果を可視化する究極の時間・周波数標準へ
 - 一層の高精度化を目指した研究の進展
- SI単位系への貢献
- 小型化・可搬化による応用の広がり 測地・測位 金融・セキュリティ
- 基礎科学への貢献、特に素粒子物理標準模型・相対論的量子物理の検証への期待

- 電圧標準・抵抗標準・電流標準
 - 超伝導回路・半導体回路を用いた量子標準技術
 - 前者2つは実用化済み 後者は研究開発途上

まとめ

- 20世紀以来の量子技術 人類の文明史に残る発展 しかしまだ量子の可能性を使いこなさきれていない。
- 21世紀における、量子情報科学に立脚した新量子技術⇒飛躍的発展のポテンシャル⇒世界各国が重点領域化
- 量子コンピュータを筆頭に広範な応用可能領域・比類なき性能への期待

- 量子技術は科学と産業が極めて近接している領域
 - 将来の大きなポテンシャルを見据えた研究開発を、冷静着実に積み重ねていくことが重要
 - アカデミアから産業界まで、オープンな環境のもと、一体となって研究開発を進めることは大いに有効
 - ユースケース創出・市場化に向けた取り組みとともに、科学技術の成熟度を高めて、真に有用なものとするために、基礎からの研究による技術の向上が重要

- 長期的な視野で、次期基本計画の先も見据えた計画が必要
 - 長期的なターゲットにチームで挑戦できる研究開発機関・環境の確保が重要
 - 幅広い分野の研究者・技術者の連携を可能にする、拠点ネットワークの形成が重要
- 知識と技術と人材を囲い込もうとする巨大テック企業や国家機関に対し、コミュニティの総合力で分野の発展に貢献するためにも、オープンな研究開発と国際連携が重要

- 人材育成
 - 量子技術研究開発が急速に拡大する中で、必要となる人材が多様化し、全体に不足。安定的な人材雇用および育成に重点的に充てられる、継続的な研究開発予算が必要
 - 若年層・一般層の関心を集めることに始まり、研究開発人材・エンジニアリング人材・分野融合人材まで、大学・研究機関・企業において、幅広い層に対する一貫通貫した育成が必要
 - 少子高齢化・人口減少のなかで、国際連携が不可欠

所感

- 基礎科学のさらなる発展への貢献にも期待
 - 量子力学と相対性理論との統一・量子重力・量子宇宙論
 - 量子基礎論・情報科学・計算科学・熱統計力学・非平衡系の物理
- 量子とAI
 - 量子技術のためのAI 他の分野同様、量子技術研究開発の進展におけるAIの寄与は非常に重要
それを使いこなすための人材育成も重要
 - AIのための量子技術 未知数の部分もあるが、AIの学習やそれを用いた最適化技術の向上に期待
- 国境を越えた協力
 - 地政学的制約による研究開発推進の著しい阻害を解決する必要あり
 - 科学交流・対話による真実と信頼の共有 **Truth・Trust・Respect**は日本社会の最重要資源
- 文明を破壊するのはとても簡単
 - 戦争 有史以来 核兵器 1945年～
 - 自然破壊・気候変動
- 人々の幸福のために文明を維持・発展させるには、全人類の弛みない協調と努力が必要