

超高速・高機能な冷却原子型 量子シミュレータ・コンピュータの高度化

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)

官民研究開発投資拡大プログラム (PRISM)

「量子技術領域」

令和3年度成果

令和4年3月
文部科学省

資料1 「超高速・高機能な冷却原子型量子シミュレータ・コンピュータの高度化」の概要

アドオン額: 140,000千円(文部科学省)

元施策・有/PRISM事業・継続予定

課題と目標

- (課題) 量子コンピュータによる社会課題の解決への関心が高まっており、量子シミュレータの社会実装を早期に行う必要。
- (目標) 装置の小型化、レーザーの安定化、リモート・クラウド化の技術を開発、さらに用途もシミュレータから量子コンピュータに拡大し、社会課題解決に応用することを目指す。

「超高速・高機能な冷却原子型量子シミュレータ・コンピュータの高度化」の概要

- 元施策: 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) (令和3年度予算: 1,232百万円)
- PRISMで実施する理由: 元施策での進捗状況が顕著であり、量子シミュレータを量子コンピュータまで拡大し、社会実装した際の民間研究開発投資効果やその後の研究への波及効果が高いため、PRISMで実施。
- テーマの全体像: 量子シミュレータを小型化・安定化・クラウド化して共用、それを応用した量子コンピュータ開発・社会実装

■ **【小型化】装置の小型化 (5分の1に)**
→ デスクサイズを実現・ノイズ耐性の向上

導入のハードルを下げる (自社運用化)

■ **【安定化】高出力レーザー安定化技術の開発**
→ 計算精度の向上、長時間安定化、自動調整機構の構築

メンテナンスフリーに

■ **【リモート・クラウド化】**
リモート・クラウド化技術の開発・適用問題の拡大
→ クラウド化実現、自社運用化の促進

ユーザー拡大

量子シミュレータ装置製造・販売
冷却原子量子シミュレータ (理科学メーカー)

ソフトウェア開発
量子アプリケーション開発 (スタートアップ企業)

学術・産業利用

- 電子の挙動の解明 (電子材料メーカー)
- 化学反応プロセス解明 (製薬会社)
- 分子物性の予測 (材料製造会社)
- 輸送経路の最適化 (物流/配送会社)
- 最適な信号操作による渋滞緩和 (交通)

出口戦略

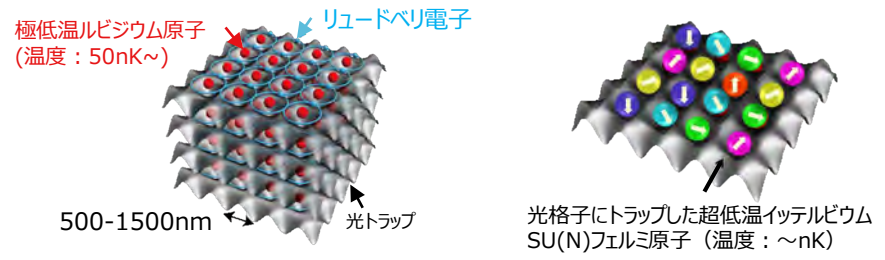
(出口戦略) 装置小型化では、真空容器、光学機器のメーカーの参入、高安定レーザー光源の開発では、光学機器メーカーの参入が期待される。また、実問題のシミュレーションが可能になれば、磁性・超伝導材料開発、触媒化学への貢献、量子コンピュータとして物流/配送の組合せ最適化問題の解決など、産学の幅広い利用が実現。

民間研究開発投資誘発効果等

- 民間投資誘発効果: 量子シミュレータを社会実装することにより、量子コンピュータ関係投資を誘発(100億円以上/~2030年)
- 民間からの貢献額: 毎年43百万円/年相当

アドオン（文科省）：140,000千円
元施策名：
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
1,232,000千円

Q-LEAP量子情報処理技術領域「基礎基盤研究課題」において、超伝導、磁性、化学反応などの多くの重要な現象のメカニズム解明を目指し、長距離相互作用を利用して動的な非平衡ダイナミクスをシミュレートする「**超高速量子シミュレータ**」や基底状態の短距離相互作用を利用して静的な平衡状態をシミュレートする「**高機能ハバード量子シミュレータ**」を開発中。



元施策（Q-LEAP）目標では、冷却原子型量子シミュレータ（超高速量子・高機能ハバード）の実現まで

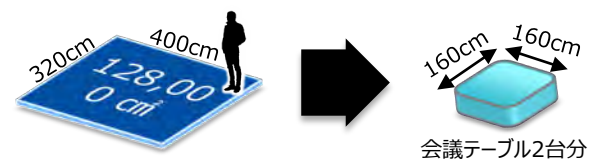
【PRISM】

- 量子シミュレータ装置の**小型化**、レーザーの**安定化**、**リモート・クラウド化**の技術開発を行う。
 - さらに用途もシミュレータから量子コンピュータに拡大し、**社会課題解決**に応用することを目指す。
- **PRISM導入により「社会実装」を加速**

【開発のイメージ】

量子シミュレータを小型化・安定化・クラウド化して共用、それを応用した量子コンピュータを開発し、社会実装

- **【小型化】** 装置の小型化（5分の1に）
 → デスクサイズを実現・ノイズ耐性の向上



導入のハードルを下げる（自社運用化）

- **【安定化】** 高出力レーザー安定化技術の開発
 → 計算精度の向上、長時間安定化、自動調整機構の構築
 メンテナンスフリーに



- **【リモート・クラウド化】**
 リモート・クラウド化技術の開発・適用問題の拡大
 → クラウド化実現、自社運用化の促進

ユーザー拡大



量子シミュレータ装置製造・販売 学術・産業利用

冷却原子量子シミュレータ
 （理科学メーカー）
ソフトウェア開発
 量子アプリケーション開発
 （スタートアップ企業）

- 電子の挙動の解明（電子材料メーカー）
- 化学反応プロセス解明（製薬会社）
- 分子物性の予測（材料製造会社）
- 輸送経路の最適化（物流/配送会社）
- 最適な信号操作による渋滞緩和（交通）

資料3 「超高速・高機能な冷却原子型量子シミュレータ・コンピュータの高度化」の目標達成状況

○施策全体の目標 ……Q-LEAP量子情報処理技術領域「基礎基盤研究課題」において、超伝導、磁性、化学反応などの多くの重要な現象のメカニズム解明を目指し、長距離相互作用を利用して動的な非平衡ダイナミクスをシミュレートする「超高速量子シミュレータ」や基底状態の短距離相互作用を利用して静的な平衡状態をシミュレートする「高機能ハバード量子シミュレータ」を開発中。

PRISMでは、**装置の小型化、レーザーの安定化、リモート・クラウド化の技術を開発**、さらに用途もシミュレータから量子コンピュータに拡大し、**社会課題解決に応用することを目指す**。

事業名等 (※個別に目標を設定している場合)	当年度目標	目標の達成状況
①小型化	<p>【超高速量子シミュレータ】 外部環境ノイズの影響、小型化による性能向上に関して定量的予測を実施し、小型真空容器及び小型レーザーシステムの光学的・機械的設計および開発を実施</p>	<p>【超高速量子シミュレータ】</p> <ul style="list-style-type: none"> 原子冷却用レーザー光学系の小型化に成功。従来の光学系と比較し、10分の1のサイズ縮小。既に6ヶ月間メンテナンスフリー運転中。 量子状態準備・冷却・操作に必要な全レーザーを統合した、全光ファイバー型小型原子冷却レーザー光源の設計が完了。従来と比較し、サイズを6分の1に縮小した設計。 <p>→ 当初の計画通り進行中。</p>
②安定化	<p>【超高速量子シミュレータ】 従来製品を超えた安定性を持つパルス生成の基礎的な技術開発（パルス繰り返し周波数、パルス時間幅を制御する新規手法の開発を含む）を実施</p> <p>【高機能ハバード量子シミュレータ】 レーザー発振、光学素子、光学輸送系等における不安定要因の解析</p>	<p>【超高速量子シミュレータ】</p> <ul style="list-style-type: none"> シミュレータ駆動パルスレーザーの強度ノイズ定量評価を行い、ノイズ源を特定。 分子研・Spring-8の平等グループと共同で、強度ノイズの低い新規パルスレーザー光源開発に着手。 従来型パルスレーザー光源と比較し強度ノイズを4分の1に低減することに成功。 <p>【高機能ハバード量子シミュレータ】</p> <ul style="list-style-type: none"> 狭線幅光源の高出力化として、レーザー冷却用光源(1111nm)の約2倍の高出力化に成功。 狭線幅光源の超高安定化として、原子制御・プローブ用光源の数Hz以下の線幅狭窄化に成功。 狭線幅光源の超高安定化として、原子制御・プローブ用光源のGPS同期による超長期絶対周波数安定化に成功。 <p>→ 当初の計画通り進行中。</p>
③リモート・クラウド化	<p>【高機能ハバード量子シミュレータ】 実験装置の自動制御化、高精度原子画像解析法の開発</p>	<p>【高機能ハバード量子シミュレータ】</p> <ul style="list-style-type: none"> 高精度原子画像解析法の開発として、各種の不安定要因の解析を行い、明瞭なノイズ相関信号を検出可能な高精度原子画像解析に成功。 リモート実験の準備として、高機能ハバードグループ内リモート実験のテーマを選定し、その実証実験のためのオンサイト側での観測手法の確立。 <p>→ 当初の計画通り進行中。</p>

① 小型化

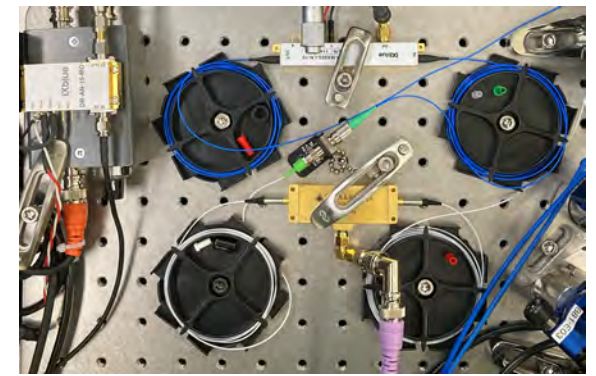
【超高速量子シミュレータ】

➢ 原子冷却用レーザー光学系の小型化 【バージョン1, 実装完了】

- 原子の運動を量子基底状態にまで冷却するための光ファイバー型光学系を新たに開発。
- ミラー・レンズを用いる従来型の光学系に比べて**10分の1までサイズ縮小**。
- 構築した光学系は既に原子冷却実験にて使用。
- 現在まで**6ヶ月間メンテナンスフリー**で運用することに成功し、十分な安定性も確認。

【バージョン2, 開発中】

- 量子状態準備・冷却・操作に必要な**全レーザーを統合した小型レーザー光源**の設計が完了。
- 2m×3m程度の光学定盤上に大量の光学部品を設置する従来手法に対し、**全光ファイバー型統合光源は1m×1m以内に全てが収まる設計**。



光ファイバー型光学系【バージョン1】

② 安定化

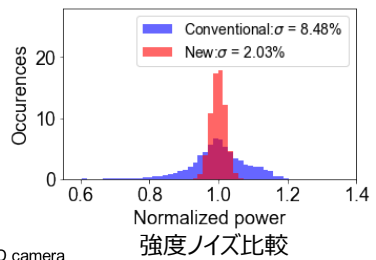
【超高速量子シミュレータ】

➢ シミュレータ駆動パルスレーザーの強度ノイズ定量評価

- パルスレーザー光強度ノイズおよび量子状態制御精度に及ぼす影響を定量評価し、**ノイズ源を特定**。

➢ 新規パルスレーザー光源開発

- 分子研・Spring-8の平等グループと共同で、**強度ノイズの低い新規光源開発**に着手。
- 現時点で従来型パルスレーザー光源と比較し**強度ノイズを4分の1に低減**することに成功。



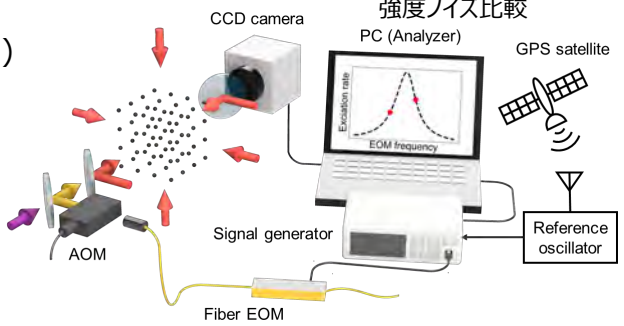
【高機能ハバード量子シミュレータ】

➢ 狭線幅光源の高出力化

- レーザー冷却用光源(1111nm)の**約2倍の高出力化に成功**。

➢ 狭線幅光源の超高安定化

- 原子制御・プローブ用光源の**数Hz以下の線幅狭窄化に成功**。
- 原子制御・プローブ用光源の**GPS同期による超長期絶対周波数安定化に成功**。



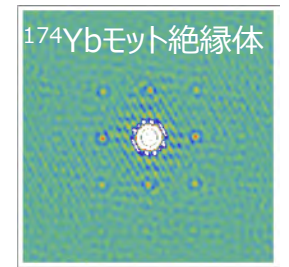
GPS同期超高安定光源による原子励起システム

③ リモート・クラウド化

【高機能ハバード量子シミュレータ】

➢ 高精度原子画像解析法の開発

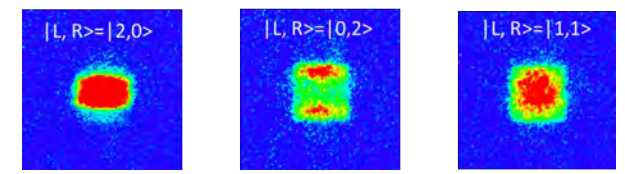
- 各種の不安定要因の解析を行い、**明瞭なノイズ相関信号を検出可能な高精度原子画像解析に成功**。



ノイズ相関信号

➢ リモート実験の準備

- 高機能ハバードグループ内リモート実験のテーマを選定し、その**実証実験のためのオンサイト側での観測手法の確立**。



リモート量子クエンチ実験のための原子分布の観測手法の確立

資料5 「超高速・高機能な冷却原子型量子シミュレータ・コンピュータの高度化」の民間からの貢献及び出口の実績

○民間からの貢献額：7年で3億100万円相当
 光学機器メーカー等：43,000千円/年

当年度当初見込み	当年度実績
① 民間からのマッチングファンド獲得見込み： 光学機器メーカー等：43百万円/年	① 民間からのマッチングファンド獲得実績： 光学機器メーカー等：43百万円/年

○出口戦略：

- 本PRISM研究で開発される基盤技術を活かした超高速量子シミュレータ・コンピュータができれば量子コンピュータ開発に携わるベンダー企業の参画が見込まれる。装置の小型化のための光学系コンパクト化において光学機器メーカーが貢献する。ユーザー企業として、物流・交通最適化等の社会実問題対応に携わる量子ITコンサルタント企業の参画が見込まれる。
- 本PRISM研究で開発される基盤技術を活かした高機能ハバード量子シミュレータができれば電子機器メーカーがベンダー企業として参画することが見込まれる。

当年度当初見込み	当年度実績
量子コンピュータ・ベンダー企業との協業 上記量子コンピュータ・ベンダー企業と将来的な協業に向けた協議をスタートさせる。	上記量子コンピュータ・ベンダー企業と超高速量子シミュレータ・量子コンピュータの開発状況と本PRISMプロジェクトにおける開発計画を共有し、実機開発と社会実装における将来的な協業について、現場統括レベルも含めて協議を開始した。
量子コンピュータ・サプライヤー企業との協業 令和3年度は、上記光学機器メーカーと共同で光学系開発を進める。	上記光学機器メーカーと緊密に協業して、超高速量子シミュレータ・量子コンピュータの光学系開発を進めた。また超高速量子シミュレータ・量子コンピュータ開発に関する積極的な知財獲得戦略を展開した。
量子コンピュータ・ユーザー企業との協業 令和3年度は、上記量子ITコンサルタント企業と将来的な協業に向けた協議をスタートさせる。	上記量子ITコンサルタント企業と超高速量子シミュレータ・量子コンピュータの将来的な社会実装における協業について具体的な協議を開始した。

【超高速量子シミュレータ】

➤ **研究代表者・大森賢治教授が紫綬褒章を受章（量子物理学研究功績）**

- 新聞（全国紙・ブロック紙・地方紙・業界紙）ウェブニュース等 報道多数（朝日新聞、読売新聞、毎日新聞、日本経済新聞、産経新聞 etc.）



➤ **超高速ゲート型量子コンピューティングを可能にする
世界最速のナノ秒・超高速2量子ビットゲートの基盤技術開発に成功**

[arXiv:2111.12314]

従来の冷却原子型を2桁以上高速化（超伝導量子ビットにも優位に競合）

➤ **ミクロンサイズの極低温・人工原子結晶を用いた全く新しい超高速量子シミュレーション**

[arXiv:2201.09590]

超高速多体ダイナミクスにおける長距離の量子相関を明瞭にシミュレート

➤ **超高速量子シミュレータ・量子コンピュータ開発に関する積極的な知財獲得戦略を展開
企業と共同**

➤ **量子波束の分散（広がり）を制御する全く新しい光技術を開発**

[Phys. Rev. Research. **3**, 043021 (2021) ; Phys. Rev. A. **104**, 033107 (2021).]

超高速量子シミュレータ：単一リユードベリ準位を波束に拡張

量子波束の分散制御は重要な基盤技術 ➡ 量子波束の分散を非共鳴/赤外/
超短パルスレーザーで精密制御

【高機能ハバード量子シミュレータ】

- **人工次元を利用した量子輸送の全く新しいスピノールアトムトロンクス技術を開発**

[Nature Communications **12**, 6724(2021)] (日刊工業新聞その他で報道)

➡ 量子シミュレーションの量子輸送研究への重要な展開

量子輸送「カレント」を磁場/レーザー/スピンで精密実時間制御
豊富なスピン自由度を活用してYジャンクション型量子輸送を実現

- **ボースハバード量子シミュレーターの100pKの超高分解能化に成功**

[arXiv:2110.13544, Phys. Rev. Xに出版予定] (すでに被引用、日本物理学会誌に解説記事執筆)

➡ 量子シミュレーションを超高感度な新粒子量子センサーへ展開

- **非平衡量子シミュレーション理論の発展**

[Phys. Rev. Research **3**:043091(2021)] (高機能ハバードグループ内共同研究による成果)

[Communications Physics **5**:65(2022)] (高機能ハバードグループ研究による成果)

➡ ボースハバード量子シミュレーション実験をベンチマーク
新たな理論計算手法の妥当性を検証

- **フェルミハバード量子シミュレーション理論の新展開**

[Phys. Rev. A **104**:043316 (2021)] (国際共同研究による成果)

➡ 量子多体問題の最高峰フェルミハバード模型に対する新しい理論

(1) PRISMにおける原子冷却用レーザー光学系の小型化によるQ-LEAP・量子シミュレータの性能向上

- 効果
 - 6ヶ月以上のメンテナンスフリー運転の実現
 - 原子の冷却・初期化の高精度化・高効率化（数原子レベルから800原子へ大幅に大規模化）

(2) PRISMにおける原子励起用レーザー安定化によるQ-LEAP・量子シミュレータの安定性向上

リユードベリ状態への励起効率 (=状態フィデリティF) は $[\text{強度ノイズ}]^2$ に比例して向上 ※ $1-F \propto (\Delta P/P)^2$

R3年度原理検証: パルスレーザー強度ノイズ1/4に低減

これまで 75% → 安定化によって 98.4% に向上する予想
($1-F = 25\%$) ($1-F = 1.6\%$)

(3) PRISMにおける量子コンピュータ機能（ゲート操作等）の開発がQ-LEAP・量子シミュレータの量子計算への応用を大幅に加速

(4) PRISMにおけるクラウド化に向けた開発がQ-LEAP・量子シミュレータの社会実装を加速

(5) 以上の波及効果が元施策に対する大手ベンダー企業の参画への関心を強く刺激し、協業に向けての具体的な交流が大きく進展