

# 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

官民研究開発投資拡大プログラム (PRISM)

「量子技術領域」

令和 4 年度成果

令和 5 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

施策開始時点: 令和4年6月

## 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4年度予算: 126百万円)
- 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

■ **【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

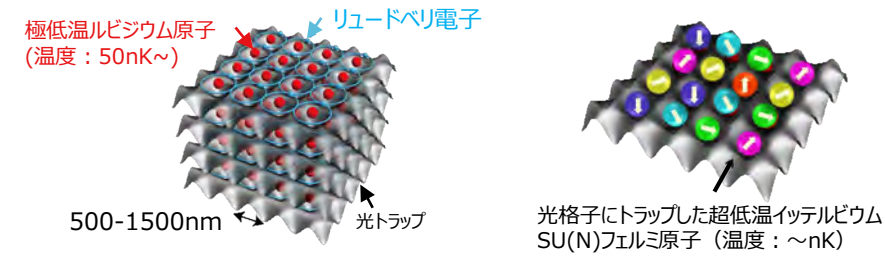
(出口戦略) 装置小型化では、真空容器、光学機器のメーカーの参入、高安定レーザー光源の開発では、光学機器メーカーの参入が期待される。また、実問題のシミュレーションが可能になれば、磁性・超伝導材料開発、触媒化学への貢献、量子コンピュータとして物流/配送の組合せ最適化問題の解決など、産学の幅広い利用が実現。

## 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  
126,000千円

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

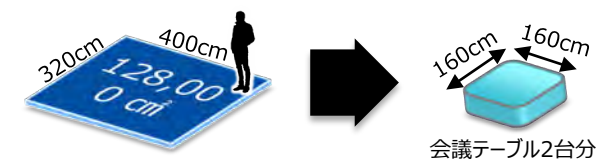
【PRISM】

- 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】 施策開始時点：令和4年6月

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

施策完了時点：令和5年3月

○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】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>小型真空容器の開発。ガラス製小型真空容器および小型真空ポンプを導入し高いアクセス性を維持しつつ全体をコンパクト化。</li> <li>小型真空容器周辺の光ファイバー接続ポート光学系を開発。</li> <li>全光ファイバー型小型レーザー光源の開発と原子気体を用いた運用試験。</li> </ul> <p>【高機能ハバード量子シミュレータ】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>真空装置の小型化の設計と試作、光源系のファイバー化の検討・整備・高度化</li> <li>リユードベリ状態がトラップ可能なイッテルビウム原子のリユードベリ光トラップアレー、等での小型化のメリットを評価・検討</li> </ul>	<p>【超高速量子シミュレータ】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>全光ファイバー型超高速光スイッチング技術を開発</li> <li>原子気体を用いた運用試験を実施。超高速励起に成功</li> <li>小型真空容器周辺へ接続可能な統合型光ファイバー出力レーザーを導入</li> <li>ファイバー出力レーザーを用いた冷却原子ビーム生成に成功</li> </ul> <p>【高機能ハバード量子シミュレータ】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>従来の装置面積を大幅に縮小する小型化縦型真空装置の設計の完了と装置組み立ての開始</li> <li>光源系のファイバー化の整備・高度化を実現</li> <li>空間光変調器を用いたイッテルビウム原子の光トラップアレーの稠密化・小型化を評価・検討し、実験で実現</li> </ul>
②安定化	<p>【超高速量子シミュレータ】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>低ノイズパルスレーザー光源から可視光への波長変換が可能な、量子シミュレータ駆動用のパルスレーザーを開発。</li> <li>量子シミュレータ駆動用パルスレーザーを用いて、量子状態操作の実証実験を行う。操作精度を評価・検証。</li> </ul> <p>【高機能ハバード量子シミュレータ】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>残留磁場等の不安定要因を解析し、その制御システムを検討・整備</li> <li>複数のイッテルビウム原子冷却・プローブ・駆動用レーザー光源の超長時間の周波数安定化技術の開発</li> </ul>	<p>【超高速量子シミュレータ】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>量子シミュレータ駆動用パルスレーザー開発</li> <li>低ノイズパルスレーザー光源から可視光への波長変換に成功</li> <li>連続波レーザーの注入によるバンド幅の狭窄化に成功</li> </ul> <p>【高機能ハバード量子シミュレータ】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>高感度3次元磁場センサーを用いた磁場の不安定要因を解析し、測定結果を活用したフィードフォワードシステムを整備</li> <li>超安定化されたイッテルビウム原子の時計遷移レーザーの安定度を、波長の異なる複数の他の狭線幅遷移のレーザーにも適用可能な、超安定位相ロックシステムの開発に成功</li> </ul>
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】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>実験装置の自動制御化、高精度原子画像解析法の開発</li> <li>クラウドサービス化に向けた高機能ハバード量子シミュレータグループ内でのリモート運用試験の実施</li> </ul>	<p>【高機能ハバード量子シミュレータ】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>自動制御化実験装置を開発し、超低温フェルミ粒子の高精度原子画像解析に成功し、量子統計性に基づく原子数揺らぎの抑制に成功</li> <li>最先端研究テーマの光格子中の1次元ボース気体の非エルゴード的なダイナミクスを、近畿大グループが京都大グループの量子シミュレータのリモート利用に成功</li> </ul>

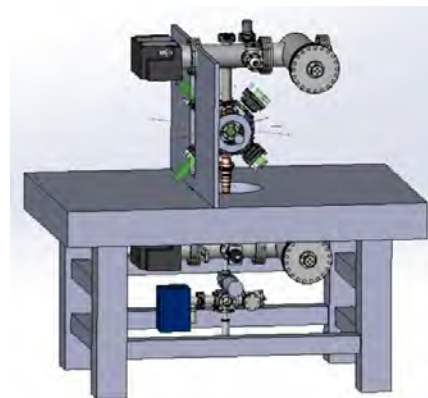
## ① 小型化

## 【超高速量子シミュレータ】

- 光ファイバー光学系を用いた小型化
  - 全光ファイバー型超高速光スイッチング技術を開発（図左）
    - 原子気体を用いた運用試験を実施。超高速励起に成功。
  - 小型真空容器周辺へ接続可能な統合型光ファイバー出力レーザーを導入。
    - ファイバー出力レーザーを用いた冷却原子ビームの生成に成功

## 【高機能ハバード量子シミュレータ】

- Yb量子シミュレータ装置の小型化の設計と試作
  - 従来の装置面積を大幅に縮小する小型化真空装置の設計完了（図右）と装置組み立ての開始
  - 光源系のファイバー化の整備・高度化を実現
- Yb原子トラップアレー装置の稠密化・小型化の評価
  - 空間光変調器を用いたイッテルビウム原子の光トラップアレーの稠密化・小型化を評価・検討し、実験で実現



↑小型化真空装置 3D CAD

## ② 安定化

## 【超高速量子シミュレータ】

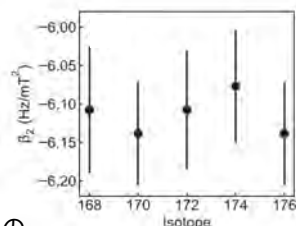
- 量子シミュレータ駆動用パルスレーザー開発
  - 低ノイズパルスレーザー光源から可視光への波長変換に成功
  - 連続波レーザーの注入によりバンド幅を狭窄化することに成功



波長変換により生成された可視光レーザーパルス

## 【高機能ハバード量子シミュレータ】

- 磁場等の制御システムを検討・整備
  - 高感度3次元磁場センサーを用いた磁場の不安定要因を解析し、測定結果を活用したフィードフォワードシステムを整備
  - インターリーブ測定による長期ドリフトの影響の抑制に成功（右図）
- 狭線幅光源の超高安定化
  - 超安定化されたイッテルビウム原子の時計遷移レーザーの安定度を、波長の異なる複数の他の狭線幅遷移のレーザーにも適用可能な、超安定相ロックシステムの開発に成功
  - ファイバ光コムの量産に着手し、京都大学への実装を準備
- 狭線幅光源の高出力化
  - 高出力化したレーザー冷却用光源(1111nm)を京都大へ実装、冷却用光源として長期動作。



測定された磁場安定度

## ③ リモート化・クラウド化

## 【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
  - 超低温フェルミ粒子の高精度原子画像解析に成功し、量子統計性に基づく原子数揺らぎの抑制に成功
- リモート実験の実施

高機能ハバードグループ内リモート実験のテーマ「光格子中の1次元ボース気体の非エルゴード的なダイナミクス」を調べるために、近畿大グループが京都大グループの量子シミュレータをリモート利用に成功



レーザーの強度、システムの安定性に関する課題をあぶりだすことに成功。解決案を策定し、今後のリモート実験で検証。

# 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

施策完了時点：令和5年3月

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： 43百万円/年	①民間からのマッチングファンド獲得： 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。
- 装置のハード開発に関わるサプライヤー企業や、各種社会実問題対応に携わるユーザー企業の参画が見込まれる。

当年度当初見込み	当年度実績
<p><b>量子コンピュータ・ベンダー企業との協業</b> 令和4年度は、複数の量子コンピュータ・ベンダー企業と将来的な協業に向けた協議を進める。</p>	<p>(株)日立製作所は、令和4年度、大森をプロジェクトマネージャーとして新たに始まった、内閣府ムーンショットプロジェクトに課題推進者として参画し、これによって、令和5年度より超高速量子コンピュータの共同開発がスタートすることが決定した。</p>
<p><b>量子コンピュータ・サプライヤー企業との協業</b> 令和4年度は、量子コンピュータ・サプライヤー企業と共同で光学系開発を進める。</p>	<p>浜松ホトニクス社と協業して、超高速量子シミュレータ・量子コンピュータに向けた光学系開発を進めた。</p>
<p><b>量子コンピュータ・ユーザー企業との協業</b> 令和4年度は、量子コンピュータ・ユーザー企業と将来的な協業に向けた協議を進める。</p>	<p>量子コンピュータ・ユーザー企業と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進めた。</p>