

R008-21

C 会場 : 11/27 AM2 (11:05-12:35)

12:05~12:20:00

Koopman-von Neumann 線形化を用いた非線形電磁流体力学のための量子アルゴリズム

#樋口 颯人^{1,2)}, 伊藤 優輝³⁾, 坂本 一樹³⁾, 藤井 啓祐^{3,4)}, ピダーセン 珠杏⁴⁾, 吉川 顕正²⁾

(¹ キュナシス, (² 九州大学, (³ 大阪大学, (⁴ 理化学研究所

A quantum algorithm for nonlinear electromagnetic fluid dynamics using Koopman-von Neumann Linearization

#Hayato Higuchi^{1,2)}, Yuki Ito³⁾, Kazuki Sakamoto³⁾, Keisuke Fujii^{3,4)}, Juan Pedersen⁴⁾, Akimasa YOSHIKAWA²⁾

(¹QunaSys Inc., (²Kyushu University, (³The university of Osaka, (⁴RIKEN

To predict and simulate plasma phenomena, large-scale computational resources have been utilized to develop high-precision, high resolution plasma simulations. However, multi-scale plasma simulations require computational resources that grow as high-order polynomials with the number of spatial grid points, posing a major challenge for large-scale modeling. In this study, we propose a quantum algorithm for simulating the nonlinear electromagnetic fluid dynamics that govern space plasmas. By applying Koopman-von Neumann (KvN) linearization, we map the nonlinear electromagnetic fluid system to a Schrödinger equation and evolve it in time through Hamiltonian simulation based on quantum singular value transformation (QSVT). This approach significantly reduces the computational complexity compared with classical finite volume schemes, achieving more efficient scaling with respect to the number of spatial grid points. Furthermore, numerical experiments quantify the combined errors arising from discretization, KvN linearization, and QSVT-based Hamiltonian simulation. As a practical demonstration, the method successfully reproduces the early growth stage of the Kelvin-Helmholtz instability, demonstrating its capability to capture nonlinear dynamics. These findings suggest that quantum computing can provide a promising pathway to overcome the computational barriers inherent in traditional multi-scale plasma modeling.

プラズマ現象を予測・シミュレーションするために、大規模な計算資源が用いられ、高精度かつ高分解能のプラズマシミュレーションが開発されてきました。しかし、マルチスケールなプラズマシミュレーションは、空間格子数に対して高次の多項式的に計算資源が増大するため、大規模モデリングにおいて大きな課題となっています。本研究では、宇宙プラズマを支配する非線形電磁流体力学系をシミュレートするための量子アルゴリズムを提案します。Koopman - von Neumann (KvN) 線形化を適用することで、非線形電磁流体力学系をシュレディンガー方程式に写像し、量子特異値変換 (QSVT) によるハミルトニアンシミュレーションで時間発展を行います。本手法により、古典的な有限体積法に基づくスキームの計算複雑性を大幅に削減し、格子点数に対する効率的なスケーリングを実現します。さらに数値実験により、離散化、KvN 線形化、および QSVT-ハミルトニアンシミュレーションに由来する誤差の複合的な挙動を定量化しました。実際的な実証例として、本手法はケルビン-ヘルムホルツ不安定性の初期成長過程を再現し、非線形ダイナミクスを扱う能力を示しました。これらの結果は、量子計算が従来のマルチスケールなプラズマモデリングにおける計算障壁を克服する有望な手段となり得ることを示唆しています。