

R008-04

C会場：9/25 PM1 (13:45-15:30)

14:30~14:45

## 量子コンピュータシミュレータ Qiskit を用いた無衝突プラズマ 6次元 Boltzmann-Maxwell 系のセルフコンシステントな量子計算アルゴリズムの開発

#樋口 颯人<sup>1)</sup>, ピダーセン 珠杏<sup>2)</sup>, 吉川 顕正<sup>3)</sup>

<sup>(1)</sup> 九大/理学府, <sup>(2)</sup> 東大/総合文化研究科, <sup>(3)</sup> 九大/理学研究院

## Self-Consistent Quantum Calculations of the 6D Boltzmann-Maxwell System in Collisionless Plasmas Using Quantum Computer

#Hayato Higuchi<sup>1)</sup>, Juan(& William) Pedersen<sup>2)</sup>, Akimasa Yoshikawa<sup>3)</sup>

<sup>(1)</sup> Graduate School of Sciences, Kyushu University, <sup>(2)</sup> Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo, <sup>(3)</sup> Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University

The space plasma environment, extending from the Sun to the magnetosphere-ionosphere-atmosphere, includes regions of frozen conditions, zones of anomalous resistance caused by electromagnetic turbulence, interconnected regions characterized by weakly ionized gas systems in strong magnetic fields, coupled neutral-atmosphere chemical processes, and pure neutral-atmosphere collision systems. Owing to their complex interactions, an inclusive understanding and forecasting of the space environment remains an elusive goal, even with the advancements in high-performance instrumentation and in-situ observation of satellites. Therefore, it is imperative to develop space plasma simulations capable of providing comprehensive insights, ranging from local spatial domains to the global schematic.

Historically, the development of space plasma simulations has been constrained by computational time, memory capacity, and data storage limitations, resolving complex phenomena with restricted physics at local space scales.

In recent years, advances in quantum computing, both software and hardware, have demonstrated numerous advantages of quantum algorithms, such as those represented by (e.g. Shor [1994]). Following Google's achievement of quantum supremacy in 2019 (Arute et al., [2019]), the pragmatic implementation of quantum computing in plasma simulation, weather forecasting, fluid simulation, and various fields is attracting interest. Among them, the quantum lattice Boltzmann method is constructed by considering the streaming operation as Quantum Walk(Aharonov et al., [1993])(Succi et al., [2015]). Then Todorova et al. developed a quantum algorithm for the collisionless Boltzmann equation using the discrete velocity method, describing propagation in discrete real space and discrete velocity space with quantum walks (Todorova and Steijl, [2020]).

We have improved the quantum algorithms presented at JpGU2023(Higuchi, et al.,[2023]) and developed a quantum algorithm for the 6D Boltzmann-Maxwell equations for collisionless plasmas without the uniform velocity condition and the vacuum condition in Maxwell's equations. By implementing a quantum algorithm that computes the velocity moment into (Higuchi, et al.,[2023]), the collisionless Boltzmann-Maxwell system becomes self-consistent as a simulator. Thus, our simulator obtains MHD quantities based on the Boltzmann equation. In other words, it can be called a quantum algorithm for the MHD equation using the Boltzmann method. Furthermore, although there was a measurement problem of the 6D distribution function on the side (Higuchi, et al.,[2023]), this problem was solved by obtaining 3D MHD quantities.

In this presentation, we will explain the above quantum algorithm, compare quantum numerical results to classical results, and discussed with those, with a view to the future.

太陽から磁気圏、イオン圏、大気圏に至る宇宙プラズマ環境は、フローズイン状態、電磁乱流による抵抗異常、強磁場弱電離気体系、中性大気ケミカル結合系、純粋な中性大気衝突系などの相互接続領域を含んでいる。これらの複雑な相互作用により、宇宙環境の包括的な理解と予測は、高性能な計測機器や人工衛星によるその場観測が進歩した現在でも、遙か遠い将来的な目標とされる。そのため、局所的な空間領域からグローバルな領域に至るまで、包括的な洞察を提供することができる宇宙プラズマシミュレーションの開発が不可欠となる。これまで、宇宙プラズマシミュレーションの開発は、計算時間、メモリ容量、データストレージの制約を受け、局所的な空間スケールで制限された物理を持つ複雑な現象を解明できなかった。

近年、ソフトウェア・ハードウェアを問わず、量子コンピューティングの進歩により、(e.g. Shor [1994]) に代表される量子アルゴリズムには数多くのメリットがあることが証明されている。2019年にGoogleが量子優位性を達成したことを受け (Arute et al., [2019])、プラズマシミュレーション、天気予報、流体シミュレーション、様々な分野での量子コンピューティングの実用化が注目されている。その中でも、ストリーミング操作を量子ウォークと考え、量子格子ボルツマン法が構築された (Aharonov et al., [1993])(Succi et al., [2015])。そして Todorova らは、量子ウォークで離散実空間と離散速度空間の伝播を記述する、離散速度法を用いた無衝突ボルツマン方程式の量子アルゴリズムを開発した (Todorova and Steijl, [2020])。

我々は、JpGU2023 で発表した (Higuchi, et al.,[2023]) を改良し、速度の一様条件、Maxwell 方程式の真空条件なしの無衝突プラズマの 6次元 Boltzmann-Maxwell 方程式の量子アルゴリズムを開発した。(Higuchi, et al.,[2023]) に速度モーメントを計算する量子アルゴリズムを実装し、無衝突 Boltzmann-Maxwell 系はシミュレータとしてセルフコンシステントになる。これにより、本シミュレータは Boltzmann 方程式に基づいた MHD 量を得る。つまり、それはボルツマン法を用いた MHD 方程式の量子アルゴリズムと呼ぶこともできる。また、(Higuchi, et al.,[2023]) では 6次元分布関数

の測定問題があったが、3次元 MHD 量を得ることでそれは解決された。

本発表では上記の量子アルゴリズムを解説し、得られた量子数値結果を元に、古典アルゴリズムによる数値計算との比較・考察を行い、今後の展望を踏まえて話す予定である。