

S001-37

A 会場 : 11/5 PM2 (15:45-18:15)

16:40~16:55

#樋口 颯人¹⁾, 吉川 顕正²⁾

(¹⁾ 九大, (²⁾ 九大/理学研究院

Development of Quantum Algorithm for Clarifying Auroral Electron Acceleration Mechanism by Collisional Boltzmann-Maxwell Equation

#Hayato Higuchi¹⁾, Akimasa Yoshikawa²⁾

(¹⁾ Kyudai, (²⁾ Kyushu Univ.

The magnetosphere-ionosphere coupling system, where auroras are generated, is characterized by the coupling of high magnetic field weak ionized gas system and collisionless plasma system through magnetic field lines, and the plasma density gradient, etc. occurs on a much smaller scale than in MHD, requiring first principles equations that can be applied to multiple scales. In the space plasma physics research field, including auroral electron acceleration mechanism research, studies using kinetic equations such as the Vlasov equation (collisionless Boltzmann equation), which follows the motion of 3-D plasma particles with a 6-D state distribution function (e.g. [Shi. R. et al., 2018]), have become popular owing to advances in computer technology. To reproduce the auroral electron acceleration mechanism in a magnetosphere-ionosphere coupling system, collisional interactions between particles as well as three-dimensional wave-particle interactions are essential. However, high-order numerical calculations of the collisional Boltzmann equation, first principles method for describing them, are not realistic even with state-of-the-art supercomputers due to the huge computational cost.

Recently, advancements in quantum computer research have shown that quantum algorithms can provide exponential speedups compared to classical algorithms (e.g., P. W. Shor, 1994). For the solution of advection-diffusion equations, the superiority of quantum algorithms for Navier-Stokes equations has also been demonstrated (Budinski Lj., 2021). It shows that by using a high-dimensional solution space treated as a quantum state, speedups can be expected and multiple types of simulations can be performed without the need for additional quantum gates. At the same time, however, it also shows that the algorithm can only handle relatively simple collisionless and uniform force field categories. We have developed a quantum algorithm for the collisional Boltzmann-Maxwell equation and applied it to the magnetosphere-ionosphere coupling system, thus unraveling all aspects of the auroral electron acceleration mechanism. In this presentation, We integrate the Splitting algorithm (C.Z. Cheng and G. Knorr, 1976] of the classical Vlasov solution based on the framework of the quantum algorithm for the Navier-Stokes equations (Budinski Lj., 2021) and optimize the collisionality term to obtain the collisional An attempt to construct a quantum algorithm for the Boltzmann-Maxwell equations is discussed.

オーロラが発生する磁気圏-電離圏結合系は、強磁場弱電離気体系と無衝突プラズマ系が磁力線を通じて結合している領域であり、プラズマ密度勾配等が MHD よりも遥かに小さいスケールで生じているため、マルチスケールに対応可能な第一原理的方程式を要求する。オーロラ電子加速機構研究を含めた宇宙プラズマ物理分野では、計算機の発達に伴い 3 次元プラズマ粒子の運動を 6 次元状態分布関数で追う Vlasov 方程式 (無衝突 Boltzmann 方程式) などの運動論的方程式を用いる研究 (e.g., Shi. R. et al., 2018) が主流となりつつある。磁気圏-電離圏結合系のオーロラ電子加速機構を再現するには、3 次元波動粒子相互作用に加えて粒子間の衝突作用も不可欠である。しかし、それらを第一原理的に記述する衝突性 Boltzmann 方程式の高次数値計算には莫大な計算負荷がかかるため、現代のスーパーコンピュータを持ってしても現実的ではない。

近年、量子コンピュータ研究の進歩により、量子アルゴリズムは古典的アルゴリズムと比べて指数関数的な高速化をもたらす事が示された (e.g., P. W. Shor, 1994)。移流-拡散方程式の解法についても、ナビエ-ストークス方程式の量子アルゴリズムの優位性が明らかにされている (Budinski Lj., 2021)。これによると、高次元の解空間を量子状態として扱うことで高速化が期待でき、量子ゲートを追加することなく複数種のシミュレーションが可能となる。しかしながら、同時に比較的単純な無衝突かつ均一力場の範疇でしか扱えないアルゴリズムであることも示されている。我々は、衝突性 Boltzmann-Maxwell 方程式の量子アルゴリズムを開発し、磁気圏-電離圏結合系に適用することで、オーロラ電子加速機構の全容解明を目指した研究を進めている。本講演では、「ナビエ-ストークス方程式の量子アルゴリズム (Budinski Lj., 2021) の枠組みを基に古典的 Vlasov 解法の Splitting アルゴリズム (C.Z. Cheng and G. Knorr, 1976] を融合し、衝突項を最適化することで、衝突性 Boltzmann-Maxwell 方程式の量子アルゴリズムを構築する試みについて議論する。