

2023 年度年次報告書

複雑な流動・輸送現象の解明・予測・制御に向けた新しい流体科学

2023 年度採択研究代表者

都築 怜理

東京大学 先端科学技術研究センター

講師

実用のための量子流体シミュレーション技術の開拓

研究成果の概要

液体ヘリウム4は極低温下において量子効果が巨視的スケールで観測される代表であり、その挙動は二流体モデルにより現象論的に記述されるといわれている。しかしながら、回転に起因する渦格子などの巨視的量子現象の多くは再現に至っていない。自転角運動量保存型の二流体モデルはこれを打破する手法として期待されている。本課題では当該モデルの高精度化と大規模計算による実証を達成し、量子効果を捉えつつ噴水効果など数メートル規模の量子流体の挙動を再現できる実用的なシミュレーション技術の構築を目指している。2023 年度は、液体ヘリウムの回転問題で有効であった SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法の量子力学領域における有効性を示すため、回転 BEC 系の量子渦格子形成の SPH 計算を実現した。SPH 法はこれまで流体計算モデルとして開発されてきたが、差分法的一种とも捉えることができ、多粒子系の離散形式で系を記述できる。我々の二流体モデルも SPH 法を用いている。二流体モデルは非粘性流体(オイラー)方程式と非圧縮性ナビエーストックス方程式からなるが、一定条件下でのオイラー方程式と量子流体方程式 (GP 方程式) の等価性についてはすでに SPH 形式で理論的に示している。そこで、三次元 GP 方程式の計算における SPH 法の有効性が示されれば、三次元問題での古典と量子の接続性を SPH 法の枠組みで議論できるようになる。調和ポテンシャル下で水平方向に回転が与えられた Bose-Einstein (BE) 凝縮体の挙動を SPH により再現できた。高精度差分法による先行研究の計算結果と比較して、渦格子の形成に見られる典型的な挙動を再現できることがわかった。今回は 900 万個程度の粒子解像度のため再現に至らなかった渦格子の形成時間についても、大規模計算を活用して高解像度化を進めることで高精度差分法の解に近づくと考えられる。以上の成果は査読付専門誌である Journal of Physics Communications に掲載された。

【代表的な原著論文情報】

- 1) Satori Tsuzuki, Eri Itoh, Katsuhiko Nishinari, "Three-dimensional analysis of vortex-lattice formation in rotating Bose-Einstein condensates using smoothed-particle hydrodynamics," J. Phys. Commun. 7 121001(2023)