

情報担体とその集積のための材料・デバイス・システム
2022 年度採択研究代表者

2022 年度
年次報告書

湯川 英美

東京理科大学 理学部第一部
嘱託助教

スピントロニクスへの量子流体力学的アプローチ

研究成果の概要

本研究計画では、スピントロニクスデバイスなどの内部自由度をもつ多体系への応用を念頭に、非線形・非摂動的な量子効果を取り扱うことができる量子流体力学方程式を導出することである。また、導出した方程式を用いて、強い量子効果に由来する新奇現象を予測し、スピントロニクスデバイスの制御性を向上させることを目的としている。

2022年度後期の研究計画では、さきがけ特定調査の期間に導出に成功した量子流体力学方程式を自己無撞着な形式に表すことを目標とした。具体的には、方程式にあらわれる化学圧力に相当する項を、チャージの密度やカレント・磁化ベクトル・磁気四重極子といった測定可能な量で近似的に表すことである。

この目標に関し、単一モード近似の範囲では化学圧力の項を無視できることを示すことができた。しかし、スキルミオン構造などシングルモードで記述できないスピンの空間変調構造が存在する場合に関しては、計画を達成することができなかった。化学圧力の項の近似する手法に関しては、2023年度も引き続き検討を行う。

他方、強い量子効果に由来する新奇現象として、スピンの自由度とチャージカレントの運動量が量子的にもつれる現象が存在し、この現象が本研究で導出した量子流体力学方程式によって分析可能であることを示した。ヘリカルスピнкаレントと名付けたこの量子状態は、式の上では

$$\sum_n c_n (|k, \uparrow\rangle^{\otimes n} + e^{i\varphi} |\varphi\rangle - k, \downarrow\rangle^{\otimes n})$$

と表すことができる。この量子状態では、系にはチャージカレントが流れず、 k に比例した有限の大きさのスピнкаレントが流れる。本研究ではまた、実験上この量子状態を生成する方法を考案した。それにはまず、スピン間の相互作用が存在するシステムで、反強磁性的な状態を作る。そして、アップとダウンの2種類のスピン状態それぞれに対して、2回のラマン過程によって互いに逆方向の運動量を与えると、系の量子状態がヘリカルスピнкаレント状態となる。この研究成果を American Physical Society March Meeting 2023 にて口頭発表した¹⁾。

また本研究では、スピン自由度のあるシステムで渦度と磁化・磁気多極子の空間変調が満たす方程式である Mermin-Ho 方程式を、一般のスピン自由度に拡張することに成功した。この研究成果は、Journal of the Physical Society of Japan に原著論文として掲載された²⁾。

【代表的な原著論文情報】

1) Emi Yukawa, “Quantum hydrodynamics of spin-current squeezing in spinor Bose-Einstein condensates,” APS March Meeting 2023, Las Vegas, Nevada, March 5-10, 2023 (Abstract: N65.00011).

2) Emi Yukawa, “su(N) Mermin-Ho relation,” Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 92, No. 4, 044601 (2023) [5 pages].