

学位申請論文公開講演会

日時：2025 年 1 月 27 日(月) 15:00~

申請者：黒田 裕太 (R 研)

場所：理学館 506 号室 (原則として対面でおこないます)

題目：Anomalous fluctuations and crystallization in active matter
(アクティブマターにおける異常揺らぎと結晶化)

主論文の要旨

鳥の群れやバクテリアコロニーに代表されるように、生物集団は非自明な巨視的な協同現象を示すことがある。このような自発的に運動する構成要素の集団はアクティブマターと呼ばれ、近年の統計物理学の重要な研究対象となっている。

アクティブマターの特徴の一つに、揺らぎの異常性がある。通常の系では、揺らぎの相関は、臨界点を除き示量的か示強的であるが、アクティブマターでは、協同揺らぎの発達のためにこの原理が破綻する。本研究の目的は、特に密度揺らぎに注目し、単純な粒子モデルに対して理論解析と数値計算を行うことにより、アクティブマターの異常揺らぎの機構、そして、その揺らぎが巨視的な性質へ及ぼす影響を理解することである。

多くのアクティブマターでは、Giant Number Fluctuations (GNF) と呼ばれる異常な密度揺らぎの発達が観測される。これまで GNF は秩序が十分に発達した状態で議論されてきたが、いくつかの実験では無秩序相でも存在することが示唆されている。本研究ではまず GNF の本質を理解するために、空間的に一様かつ無秩序な流体の状態を実現できる最も単純な粒子モデルである Active Brownian Particles (ABP) を用い、数値計算により密度揺らぎの振る舞いを精査した。その結果、無秩序相でも有限の長さスケールでは GNF が生じること、そして、その特徴的な長さのスケールは、空間的に発達した速度場の相関の長さに対応することが示された。

続いて Chiral ABP という、カイラリティをもつ ABP の解析を行った。揺らぎが発達する GNF とは逆に、カイラリティをもつアクティブマターでは、揺らぎが抑制されることが知られている。これは Hyperuniformity (HU) と呼ばれる。これまで報告された HU のミクロな機構を理解するために、Chiral ABP に対して流体方程式を導出し、2 次元系流体相における密度揺らぎの理論解析を行った。その結果、数値計算で観測される HU が定性的に再現された。また 3 次元系にも解析を拡張し、一方向に螺旋運動をする系では密度揺らぎの相関関数に異方的なパターンが現れ、特異的な振る舞いを示すことが明らかとなった。

さらに、高密度な 2 次元 Chiral ABP における流体-固体転移の解析を行った。まず、数値計算により実際に流体-固体転移が生じることを示し、相図を完成させた。さらにこの固体状態は長距離の並進秩序を伴い、安定な結晶状態にあることを明らかにした。この結果は、熱平衡系では Mermin-Wagner 定理により安定な 2 次元結晶が存在できないという事実とは対照的である。また、対応する線形弾性理論を構築し、それを解析することで、理論的にも長距離の並進秩序の存在すること、また、その機構が HU と関連することを示した。

以上、本研究では、アクティブマターの単純なモデルの理論解析と数値計算により、密度揺らぎの異常な発達と異常な抑制の機構を明らかにするとともに、それが結晶化という巨視的な性質に大きな影響を及ぼすことを示した。