

アクティブ XY モデルにおけるトポロジカル欠陥の効果

井上 駿, 湯川 諭

大阪大学大学院 理学研究科 宇宙地球科学専攻

要旨

本研究では格子点上に固定された古典的な XY モデルと自由空間を動き回れる Vicsek モデルとの中間的モデルとしてスピンの向きに自らを駆動して格子点を動き回れるようにした「アクティブ XY モデル」について考える。古典 XY モデルではスピンの向きがトポロジカル欠陥を示すが、本研究ではアクティブ XY モデルを用いてトポロジカル欠陥と自己駆動力との関係性について調べる。その結果、自己駆動力を大きくすると粒子は +1 渦欠陥に凝集し、-1 渦欠陥は系に存在しにくいことが明らかとなった。

Effect of Topological Defects in Active-XY Model

Shun Inoue, Satoshi Yukawa

Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University

Abstract

In this study, we introduce the active-XY model which is an intermediate model between the classical XY model with spins fixed on lattice points and the Vicsek model with spins traversing freely through space. This model allows spins to self-propel and navigate across lattice points according to their orientations. While the classical XY model is known for the emergence of topological defects, our research investigates the relations between topological defects and the self-propulsion mechanisms within the framework of the active-XY model. Our results show that as self-propulsion intensifies, particles increasingly aggregate at +1 vortex defects, while -1 vortex defects become less common in the system.

1 はじめに

自らを駆動する要素の集団はアクティブマターと呼ばれ、多様な協同現象を示す。近年では細胞集団がトポロジカル欠陥に集積する例 [1] など、アクティブマターの協同現象にはトポロジカル欠陥が重要な役割を果たしていることがわかっている。

本研究では格子点上に固定された古典的な XY モデル [2] と自由空間を動き回れる Vicsek モデル [3] の中間モデルとしてスピンの向きに自らを駆動して格子点を動き回れるようにしたアクティブ XY モ

デルについて考える。古典 XY モデルではトポロジカル欠陥が現れるが、Vicsek モデルではトポロジカル欠陥が与える影響が明らかではない。以上を踏まえ、アクティブ XY モデルでは排他性を仮定し、自己駆動力とトポロジカル欠陥の関係性を調べる。

2 アクティブ XY モデル

スピン系のモデルとして知られる古典 XY モデルをアクティブ系に拡張する事を考える。周囲と向きを揃える相互作用を反映したアクティブマターモデルとしては Vicsek モデルが有名であるが、古典 XY

モデルも同様の相互作用を持つ。

古典 XY モデルから更にスピンの格子点上を移動できるようにした単純なモデルを構築し、これをアクティブ XY モデルと呼ぶ。このモデルでは、粒子は各格子点上に存在し、前後左右 4 方向へと移動ができる。自己駆動力に対応する変数を ϵ とし、その移動レートは自己駆動力 ϵ によって変化する (図 1)。さらに、斥力相互作用に対応する排他性を仮定し、複数の粒子が同一格子点上を占有できないとする。系の格子点の数 m と粒子数 n を用いて密度 $\rho = n/m$ と定義し、密度変化についても考える。以下では、トポロジカル欠陥の効果が現れやすい温度として $T = 0.25$ と固定する。

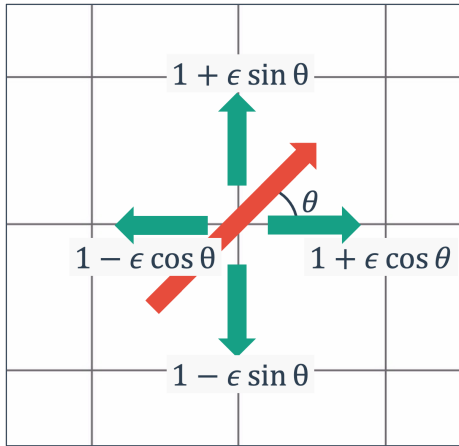


図 1: 粒子の移動レート

3 結果と考察

シミュレーションのスナップショットを図 2 にまとめる。自己駆動力 ϵ が大きくなると相分離が起こる。また、密度 ρ が大きければより小さな ϵ においても相分離する。相分離を引き起こすのは自己駆動力 ϵ と排他性の効果により、+1 渦欠陥が発生するとその欠陥部分に粒子が集積するためだと考えられる。 ρ と ϵ が大きければ大きいほど、より大きなクラスターサイズに成長することが確認できる。

系に出現する渦度の合計 N と自己駆動力 ϵ の関係について定量化したものが図 3 である。自己駆動力 ϵ を大きくするにつれて +1 渦欠陥と -1 渦欠陥

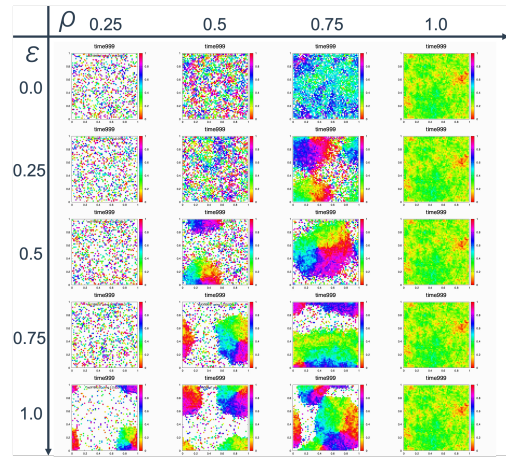


図 2: ρ と ϵ を変化させた際のシミュレーションのスナップショット。 ϵ を大きくすると相分離する。

の対称性が崩れ、+1 渦欠陥が残りやすいことが定量的にも確認できた。

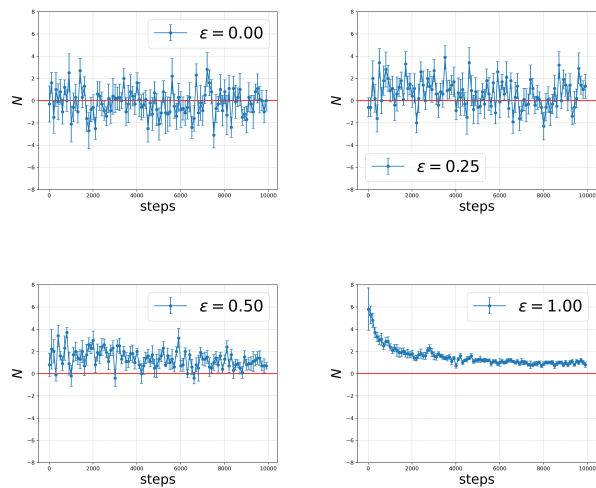


図 3: 自己駆動力 ϵ と渦度 N の関係 ($\rho = 0.5$)

参考文献

- [1] K. Kawaguchi et al., Nature **545**, 327-331(2017).
- [2] H. E. Stanley, Phys. Rev. Lett. **20**, 589(1968).
- [3] T. Vicsek et al., Phys. Rev. Lett. **75**, 1226(1995).