

A02 量子凝縮系およびソフトマターにおける自己組織化現象に対する流れの影響の解明

お茶の水女子大学基幹研究院自然科学系 工藤和恵
名古屋大学工学研究科 川口由紀

ボース・アインシュタイン凝縮体は量子凝縮系の一つであるが、それにはスピン自由度を持つものがある。そのなかで強磁性相にあるもの（強磁性 BEC）では、従来の強磁性体に現れるのと同様な磁区パターンが観察されることがある。磁区パターン形成は、スピンによる自己組織化現象であるとも言える。強磁性 BEC には超流動的な流れが存在し、この流れの存在が、磁区パターンのダイナミクスに影響を与える。これは、従来の強磁性体とは決定的に異なる点である。たとえば強磁性体の場合は、常磁性相から強磁性相へクエンチすると、磁化の秩序構造が発生し、その特徴的なサイズが時間とともに増大する。そのドメイン成長の後期には、多くの場合、時間のべき乗に比例した成長則がみられる。強磁性 BEC においても、同様のドメイン成長がみられる。強磁性 BEC で磁気異方性がイジング模型的(easy-axis)な場合は、古典 2 成分流体の非常に粘性の小さい場合の成長則と一致する [1]。ところで、BEC の基礎方程式である Gross-Pitaevskii (GP) 方程式からいくつかの仮定と近似を用いて導出した流体方程式では、超流動的な流れが存在しない状況を数値的につくり出すことができる。流体方程式を用いて超流動的な流れが存在しない場合ドメイン成長を調べると、流れが存在する場合よりも成長が遅くなる。

磁気異方性が XY 模型的(easy-plane)な場合は、スピン渦の構造と超流動的な流れが密接に関係しており、状況は複雑である。渦の構造と渦の周りの流れの組み合わせが多数あるうえに、それらが時間変化するからである。本研究では、磁気異方性が XY 模型的な場合にも、イジング模型的な場合のように普遍的なドメイン成長則があるのかどうか、またあるとすればどのような条件でそれが成り立つのかを明らかにするために研究を進めた。

強磁性 BEC では、スピン自由度と質量流（超流動的な流れ）の相互作用によって、渦がいくつかの種類に分類される。たとえば、スピン渦の巻数も質量流の循環も ± 1 の場合は渦芯でも磁化が残る。このような渦を Mermin-Ho 渦 (MHV) と呼ぶ。MHV はスピン渦の構造だけ見れば従来の強磁性体と同様である。しかし、質量流の循環も考慮すると、(循環, 巻数) = (+, +), (-, -), (+, -), (-, +) の 4 種類の渦に分類され、循環も巻数も互いに異なる渦同士が対消滅できる (図 1)。つまり、対消滅できる渦のグループが 2 つ存在することになる。

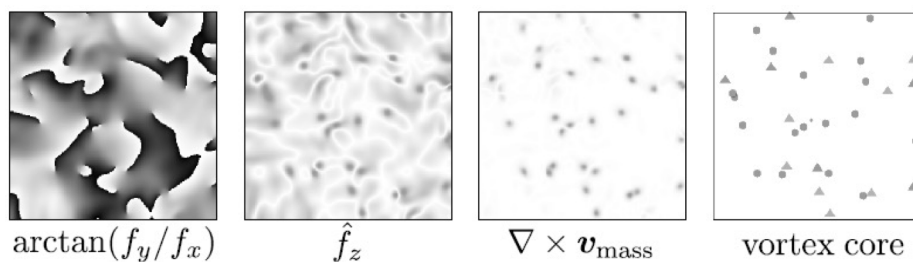


図 1. 横磁化, 縦磁化, 質量流の渦度, 渦芯の位置. ●印の渦同士, ▲印の渦同士が対消滅する。

磁気異方性が XY 模型的な場合の磁区パターンの様子は、一見して古典 XY 模型での磁区パターンの様子と同じように見える。しかし、GP 方程式および流体方程式による数値シミュレーションの結果から、ドメイン成長則は、古典 XY 模型のものとは異なることが示された [2]。また、流体方程式を用いた、質量流が存在しない場合の数値シミュレーションでは、古典 XY 模型の場合と同じドメイン成長則に従うことが確認された。イジング模型の場合と同様に、ドメイン成長の速さは、質量流が存在する場合と比べて存在しない場合のほうが非常に遅い。逆に言えば、強磁性 BEC では超流動的な流れによってドメイン成長が促進される。超流動的な流れのもう一つの効果は、対消滅できる渦のグループが 2 つできることである。異なる 2 つのグループが同じ空間に存在することで、従来の成長則が適用できなくなる。異なるグループに属する渦とは対消滅できないという仮定の下で成長則を補正すると、数値シミュレーション結果が、補正された成長則に従う [2]。

本研究課題のもう一つの柱であるソフトマターの系における自己組織化現象に関しては、高分子溶液である塗料を乾燥させた場合の不均質な塗膜の形成に注目して研究を進めた。予備的な実験として身近な塗料（マニキュア）の液滴を、プラスチック基板およびガラス基板上に落として、その乾燥パターンを観察した。ガラス基板上の液滴には表面の形状に変化がほとんどなかったのに対して、プラスチック基板上の液滴には、表面にシワができていたのが観察された。この現象を再現するための簡潔な数理モデルを考案し、数値シミュレーションでシワの発生を再現した。（ただし、この実験でプラスチック基板上の液滴にシワができたのは、基板が溶けた結果であることが、研究期間後に明らかになった。）

本研究では、高分子液滴の乾燥シミュレーションの研究[3]を参考にして、数理モデルを考案した。液滴表面に現れるパターンは、液滴表面の擾乱が成長することによって起こる。流れの効果が大きければ、その擾乱を抑制するように溶液が流れることでシワの発生が防げるだろう。反対に、流れの効果が効きにくければ、その擾乱が成長してシワが発生することになると考えられる。実際に、実験で使ったガラス基板とプラスチック基板の濡れ性を調べたところ、ガラス基板は非常に濡れやすく、プラスチック基板は濡れにくい性質を持っていた。すなわち、溶液の流れの効果は、ガラス基板では効きやすく、プラスチック基板では効きにくいと推測された。本研究で考案した数理モデルでは、移流項の係数に基板表面の性質を反映させることができる。数値シミュレーションでは、その係数を変化させることでシワの発生の有無を制御できることを示した。

参考文献：

- (1) K. Kudo and Y. Kawaguchi, Phys. Rev. A **88**, 013630 (2013).
- (2) K. Kudo and Y. Kawaguchi, Phys. Rev. A **91**, 053609 (2015).
- (3) M. Kobayashi, M. Makino, T. Okuzono, and M. Doi, J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 044802 (2010)