

# 一般化流体力学 ——可積分系のダイナミクスを記述する新しい流体力学



吉村 賢人

オックスフォード大学  
takato.yoshimura@physics.ox.ac.uk

流体力学ほど様々な状況に適應できる物理理論も珍しいであろう。もともと流体力学は、水のような文字通り流体の動きを記述するための理論としておよそ200年ほど前に提唱されたが、現在では多体物理系が、粒子間距離のようなマイクロなスケールと比較して大きなスケールで変化している場合のダイナミクスを有効的に記述できる道具として認識されている。このような驚くべき普遍性は、多くの物理系の**熱化**の機構が同じであることと密接に関わっている。

流体力学とは一言で言ってしまうと、系が上記の条件を満たしながら発展している場合、系は局所的に熱平衡状態にあるとみなせる(右図参照)、と主張する理論である。熱平衡状態は系の保存量に対応した数個のパラメータで特徴付けられるので、それらが局所的に変化するとみなすと、連続方程式がそれらのパラメータについて書き下せるわけである。もちろん、系のそれぞれの性質は方程式の構造に反映されなければならない。例えば異なる2つのパラメータがどのように関係しているか、などといった情報(状態方程式とも呼ばれる)を与えることにより実現される。散逸の効果も取り込むと式はより複雑になるが、多体系の非自明なダイナミクスがいくつかの微分方程式で記述されてしまうという事実には変わりない。このような驚くべき普遍性により、流体力学は単純にマイクロな性質が異なるというだけでなく、スケールさえも全く異なる(例えばグラフェン内の電子輸送と銀河形成のプロセスが同様の微分方程式で記述できるとは、驚くべき事実である)ような物理系のダイナミクスを統一的に記述する道具として活躍してきた。

ただ、ここまで読んで、思慮深い読者の

方は次のような疑問に至ったのではないだろうか: 流体力学の普遍性が熱化の機構のそれによって担保されていることはわかった。では、熱化がもし通常と異なる、あるいはそもそも熱化が起きないような系では、流体力学はどう書き換えられるのだろうか? このような問題は20年ほど前まではほとんど問われることはなかった。そもそもそのような系が知られていなかったもので、考える動機がなかったのである。

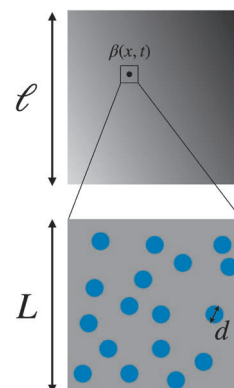
ところが、1次元に近い状態にトラップされた冷却原子系において、熱化がどうも観測できない(原子系の非自明なダイナミクスが極めて長いタイムスケールで続く)という画期的な実験が2006年になされて以降、平衡化はするものの熱化しない物理系の非平衡ダイナミクスに注目が集まるようになった。このような不思議な物理は系の可積分性ゆえであるということは理論的にすぐに明らかにされたものの、可積分性が系の非一様なダイナミクスにどのような影響をもたらすかについての統一的な理解は、一般化流体力学(可積分系に拡張した流体力学)の誕生を待つ必要があった。

一般化流体力学は2016年に創始されて以降、様々な方向に発展し、様々な実験結果を正しく予測することが確認されてきた。この理論の驚くべきところは、可積分系のダイナミクスを普遍的に記述する道具を与えるだけでなく、今まで発見されてこなかった興味深い現象を予測できる点にある。本解説では、この新しい流体力学理論がどのように創始され、多体系輸送一般に関わるどのような数多くの新しい知見をもたらしてきたかを概観したい。

## 用語解説

**熱化:**  
孤立した多体粒子系は、長時間待てば初期状態によらずギブス集団により記述される熱平衡状態にやがて落ち着くことが知られている。このような過程は熱化と呼ばれている。一方、可積分系では系の保存量がたくさんあることにより、ギブス集団ではなく一般化ギブス集団によって特徴づけられる平衡状態に落ち着くことが知られている。熱化と区別するためこのような過程は通常“平衡化”と呼ばれる。

**可積分系:**  
混乱を避けるため、本稿では可積分系といった場合、保存量(例えばエネルギーや粒子数)が系のサイズに比例した数だけ存在する多体系を意味する。量子可積分系は冷却原子系を用いて実現できることから、このような系の非平衡物理が理論および実験の両面からここ最近盛んに研究されている。



局所平衡状態において、密度が変化するスケール $l$ 、局所的に平衡状態とみなせるスケール $L$ 、そして粒子間距離 $d$ のようなマイクロなスケールの間で $d \ll L \ll l$ が成り立つ。