

## A04 量子流体力学における「ゆらぎと構造の協奏」

大阪市立大学大学院理学研究科 坪田 誠

非平衡の世界の普遍性を、低温物理学の視点から、量子流体を舞台に追求することを目標とした。歴史的には、超伝導や超流動、Bose-Einstein 凝縮 (BEC) などを対象とした低温物理学の研究の大半は、平衡状態もしくは弱い非平衡状態を舞台に行われてきた。強い非線形・非平衡物理学の観点からの研究はほとんど無い。ここでは、低温物理学における重要テーマの一つである量子乱流を、非線形・非平衡物理学の観点から、理論的および数値的に研究した(1, 2)。舞台となる系は、超流動ヘリウム、および原子気体 BEC である。主な成果を列挙する。

### 1. 超流動ヘリウムの量子流体力学と量子乱流

超流動  $^4\text{He}$  の流体力学は、超流体と常流体が混合したとする二流体モデルによって記述される。二流体モデルに最も特徴的な現象は熱対向流である。熱対向流は、半世紀以上にわたり、低温物理学の重要な研究対象である。その解明に、1980 年代頃から行われて来た渦糸モデルの数値計算は非常に重要な役割を果たして来た。しかし、極最近までの数値研究は、常流動の速度場を空間的に一様と仮定して行われていた。これは、常流動速度場に関する情報が無かったからである。しかし、最近、様々な手法による流れの可視化実験が行われるようになり、熱対向流の流速を上げると、常流動は、層流ポアズイユ流から、その外側部分が持ち上がった **tail-flattened** 流という特異な層流を経て、乱流に転移することが観測された(3)。

我々は、実験と同じ正方形管で、非一様量子乱流のダイナミクスを解明すべく、以下の研究を行った。

[1] 常流動流れを層流ポアズイユ流、および層流 **tail-flattened** 流と固定して、量子渦のダイナミクスの数値計算を行った(4)。まず、この系では、非一様性を反映して量子渦の特徴的な（一様系では見られない）時空間的振動が見いだされた。そして、管壁近傍に量子渦が集中した「超流動境界層」ともよぶべき構造を確認した。また、超流動速度場が、古典乱流の代表的な統計則である、壁法則(対数型速度分布)に従うことを示した(5)。この壁法則がなりたつためには管中央部から壁への運動量輸送が必要であることが古典乱流で知られているが、量子乱流の場合、量子渦の管中央部から壁への移動がそれを担っていると考えられる。

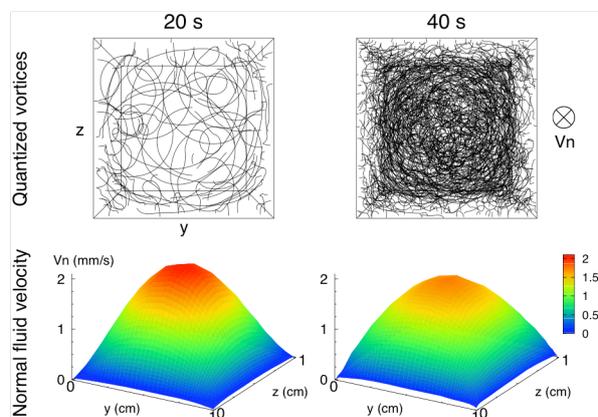


図 1: 二流体結合ダイナミクスによる熱対向流中の量子渦糸の分布(上段)と常流動速度場の変形(下段)。

[2]量子渦は渦糸モデル、常流体は Navier-Stokes 方程式で扱い、両者を相互摩擦で結合させて、超流体と常流体の連立ダイナミクスを初めて扱った(6)。図1にその典型的なダイナミクスを示す。量子渦が流れ場によって駆動・増幅され非一様な量子乱流を形成する(図1上段)。それにともない、常流動速度場は初期のポアズイユ流れから変形し、平坦化する(図1下段)。この速度場は、実験結果と完全に一致するわけではないが、その重要な特徴は捉えている。

## 2. 原子気体 Bose-Einstein 凝縮体の量子乱流

主に二つの研究を行った。

[1]スピノール BEC のスピン乱流 (7):スピノール BEC が生じるスピン乱流の研究を行い、スピン相互作用のエネルギーのスペクトルが $-7/3$  という特徴的なべき則を生むこと、乱流状態ではスピンの空間的に乱れつつも時間的に凍結するスピングラス的な挙動を示すことを過去に明らかにした。この系は、スピン自由度の他に超流動の自由度もあり、両者が結合した興味深い系である。この結合乱流について研究を行い、スピンの $-7/3$  のエネルギースペクトルと、超流動の $-5/3$  のエネルギースペクトルが共存することを見いだした。この $-5/3$  則は乱流のコルモゴロフ則を想起させるが、通常乱流のそれが Navier-Stokes 方程式の慣性項によって生じるのに対し、今の場合は超流動とスピンの結合により生じる。

[2]Bogoliubov 波乱流 (8):量子乱流と言え、量子渦が作る乱流が有名だが、その超流動速度場が作る統計則を観測するのは容易でない。ここでは、BEC の素励起である Bogoliubov 励起が作る波乱流を考えた。密度波の観測は原理的に可能なので、これにより統計則の観測が可能になると期待される。BEC の、巨視的波動関数が従う Gross-Pitaevskii (GP) 方程式に波乱流理論を適用することにより、巨視的波動関数のスペクトルに $-7/2$ 、密度分布のスペクトルに $-3/2$  のべき乗則が現れることを解析的に導き、GP 方程式の数値計算により検証した。典型的な数値計算例を図2に示す。最初の大スケールの密度の揺らぎが、小スケールの揺らぎに変化していることがわかる。これは大スケールから小スケールへのカスケードが起こっていることを意味し、この状況で $-3/2$  のスペクトルの形成を確認した。

### 参考文献:

- (1) 坪田誠・笠松健一・小林未知数・竹内宏光、量子流体力学 (丸善出版) (2018)
- (2) M. Tsubota, K. Fujimoto, S. Yui, *J. Low Temp. Phys.* 188, 119 (2017)
- (3) A. Marakovet *et al.*, *Phys. Rev. B* 91, 094503 (2015)
- (4) S. Yui, M. Tsubota, *Phys. Rev. B* 91, 184504 (2015)
- (5) S. Yui, K. Fujimoto, M. Tsubota, *Phys. Rev. B* 92, 224513 (2015)
- (6) S. Yui, M. Tsubota, H. Kobayashi, *Phys. Rev. Lett.* 120, 155301 (2018)
- (7) K. Fujimoto, M. Tsubota, *Phys. Rev. A* 90, 013629 (2014)
- (8) K. Fujimoto, M. Tsubota, *Phys. Rev. B* 91, 053620 (2015)

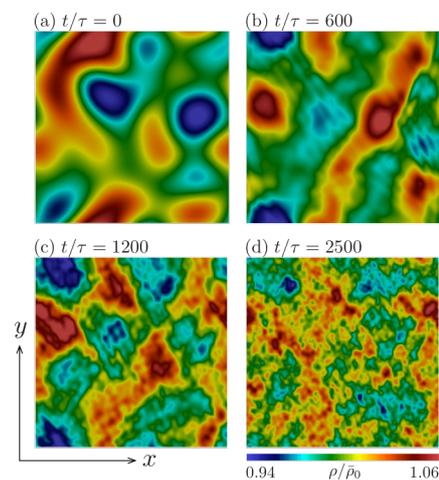


図2 : Bogoliubov 波乱流における密度揺らぎの時間発展。