

## A04 「ゆらぎと構造の協奏」から見た量子乱流

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する。歴史的には、超伝導や超流動、ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) などを対象とした低温物理学の研究の大半は、平衡状態もしくはその近傍で行われてきた。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する。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。

本年度は、量子乱流に関して以下の研究を行った。

### 1. 超流動ヘリウム中で振動球が作る量子乱流とそこから放出される渦輪の統計則 (1)

近年、超流動ヘリウムの分野では、振動物体が作る量子乱流の研究が盛んに行われている。我々はこの問題に対し、量子渦糸モデルによる数値計算を行って来た。本年度は、大阪市大グループの実験に関連して、振動球が形成する量子乱流と、そこから放出される渦輪の統計量、特にサイズ分布と、放出方向の異方性について、調べた。残留渦を想定して一定の大きさの渦輪を種渦として与えるも、振動球による量子乱流の生成を介して渦輪はシャッフルされ、より広範なサイズ分布をとるようになる。また、固体球の振動方向に、より多数の渦輪が放出される。この結果は、実験グループの観測と異なるが、どういう物理が起こっているかに関して、重要な知見を与えることができた。

### 2. スピノール BEC におけるスピンと超流動が結合した乱流状態 (2)

我々は、原子気体 BEC の量子乱流を研究している。その中で、スピノール BEC が生じるスピン乱流(図 1)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  $-7/3$  という特徴的なベキ則を生むこと、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明らかにしてきた。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。今年度は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。その意味で、異なる自由度が作る乱流が協奏して作る「結合乱流」であると言える。二つの乱流が結合した場合に、それらは破壊的に作用し合うのか、あるいは建設的に作用するのかは、全く自明ではない。

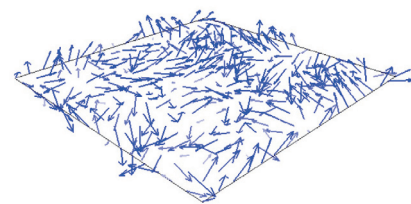


図 1: スピノール BEC におけるスピン乱流。

### 3. ポアズイユ型常流動速度場のもつ正方形管内の熱カウンター流 (3)

超流動  $^4\text{He}$  の熱カウンター流は、半世紀以上にわたり、低温物理学の重要な舞台となってきた。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、数年前までの数値研究は、常流動の速度場を一様として行われていた。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、熱カウンター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 flow** という特所な層流を経て、乱流に移ることが発見された(4)。この現象の真の理解には、超流動と常流動の結合流体力学を扱わなければならないが、それは非常に困難である。そこで、まず我々は、正方形管内の層流ポアズイユ流の常流動のもとで量子渦糸モデルの数値計算を行い、非一様な量子渦の運動を明らかにした(図2)。現在、さらにこの研究を進め、**tail-flattened flow** 型常流動の元での量子乱流の研究も行っており、近日中に論文公表する予定である。

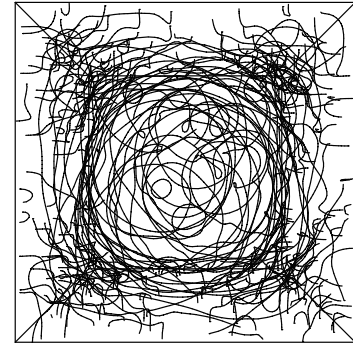


図2:ポアズイユ常流動の熱カウンター流が生む非一様量子乱流

### 4. 量子流体における非平衡臨界現象の探索

液晶の乱流転移で観測されている DP クラスの非平衡臨界現象が、量子乱流でも期待できる可能性がある。また、量子流体力学では、様々な界面成長やダイナミクスを考えることができる。それらが KPZ のような非平衡スケーリング則に従うのか否か、それに量子渦等の自由度がどう関与するかという問題も非常に興味深い。KPZ に関しては、2成分 BEC の界面が考えられる。2成分 BEC は、相互作用パラメータに依存して、2成分が混合した状態、または相分離した状態が安定となる。相分離した場合、その界面のゆらぎは KPZ 普遍性を示す可能性がある。この問題については、笹本智弘氏、竹内一将氏と議論しながら、検討を進めているところである。

#### 参考文献:

- (1) A. Nakatsuji, M. Tsubota, H. Yano, *Phys. Rev. B* **89**, 174520/1-7 (2014)
- (2) K. Fujimoto, M. Tsubota, *Phys. Rev. A* **90**, 013629/1-7 (2014)
- (3) S. Yui, M. Tsubota, *Journal of Physics: Conference Series* **568**, 012028/1-5 (2014).
- (4) A. Marakov et al., arXiv: 1412.1890