

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、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、平衡状態もしくはそこから弱励起状態を舞台に行われてきた。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. 非一様量子乱流と対数型速度分布則 (1,2)

超流動 ^4He 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、常流動の速度場を空間的に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

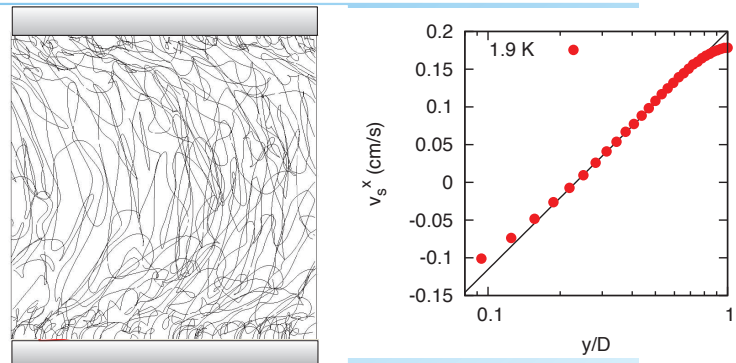


図 1： 平行平板中の非一様量子乱流の量子渦糸の構造 (左) と、超流動速度場が示す対数型速度分布 (右)。

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** 流という特殊な層流を経て、乱流に移ることが観測された(3)。

我々は、実験と同じ正方形管で、常流動流れを層流ポアズイユ流、および層流 **tail-flattened** 流として、量子渦のダイナミクスの数値計算を行った(1)。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。

このような乱流現象を調べるときに、統計則に着目することは極めて重要である。古典乱流の代表的な統計則と言え、バルクのボルモゴロフの $-5/3$ 則と、固体壁近傍の壁法則(対数型速度分布)である。対数型速度分布とは、乱流境界層において、壁からの距離 y に対して平均した流速 v が、普遍則

$$\frac{v}{v^*} = \frac{1}{b} \log \left(\frac{yv^*}{\nu} \right)$$

に従うというものである。ここで、 v^* は摩擦速度と呼ばれる特徴的速度、 ν は動粘性係数で、 $b=0.417$ はカルマン定数と呼ばれる普遍定数である。このような普遍則が量子乱流で成り立つかどうか、関心事である。我々は平行平板でポアズイユ型の常流動を流し、その状況での量子乱流の統計的定常状態を求めた(2)。ついで、量子渦が作る超流動速度場を求め、その平均をとり、 y 依存性を求めた。その結果、図1右に示すように、対数型速度分布を得た。これは量子乱流で初めて確認された壁法則である。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。

2. Bose-Einstein 凝縮体中の Bogoliubov 波乱流 (4)

近年、原子気体 BEC を舞台に、量子乱流の研究が行われている。量子乱流と言えば、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る。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。

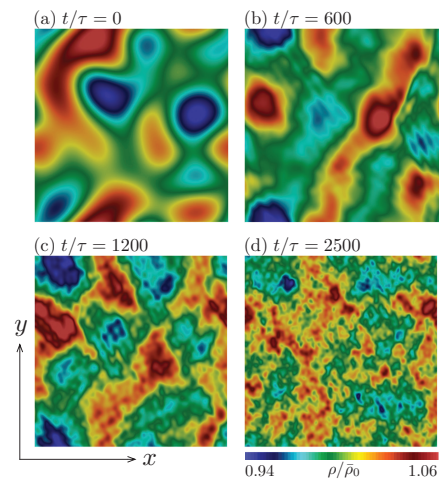


図2 : Bogoliubov 波乱流における密度揺らぎの時間発展。

参考文献:

- (1) S. Yui, M. Tsubota, *Phys. Rev. B* **91**, 184504 (2015).
- (2) S. Yui, K. Fujimoto, M. Tsubota, *Phys. Rev. B* **92**, 224513 (2015).
- (3) A. Marakov et al., *Phys. Rev. B* **91**, 094503 (2015).
- (4) K. Fujimoto, M. Tsubota, *Phys. Rev. A* **91**, 053620 (2015).