

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. スピノール BEC におけるスピン波乱流の順カスケードと逆カスケード (1)

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、スピン 1 の強磁性スピノール BEC のスピン波が作る乱流を考える。この系はスピン 1 のスピノール Gross-Pitaevskii (GP) 方程式で記述される。通常の弱波動乱流理論を適用することにより、大スケールから小スケールへエネルギーが流れる順カスケードと、逆向きに流れる逆カスケードが起こり得て、それぞれスピン相関関数に $k^{-7/3}$ と $k^{-5/3}$ のべき乗則が現れることを解析的に示した。次にスピノール GP 方程式の数値計算を行った。図 1 は逆カスケードが起こる場合で、微細構造から大規模構造が生じていることがわかる。図 1 は順カスケードが起こる場合で、大規模構造から微細構造が生じている。いずれの場合も、解析的に求められたべき乗則を数値計算でも確認した。この現象は実験でも観測できると期待される。

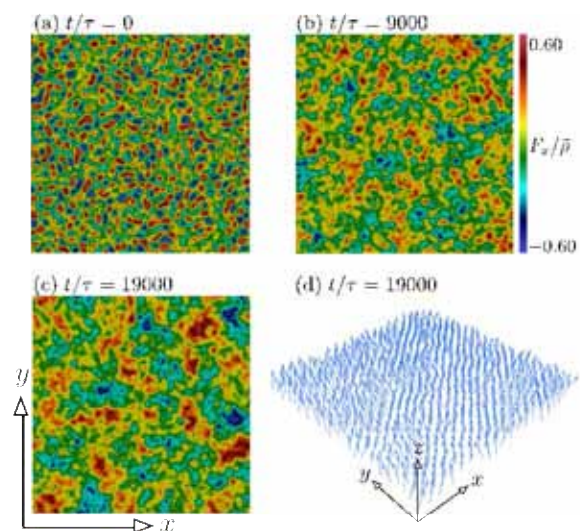


図 1: スピノール BEC におけるスピン波乱流の逆カスケードの時間発展。微細構造から大規模構造が生じている。

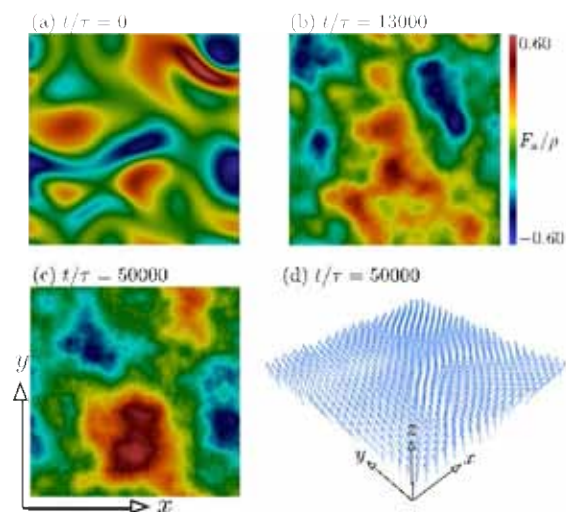


図 2: スピノール BEC におけるスピン波乱流の順カスケード時間発展。大規模構造から微細構造が生じている。

2. 正方格子状に置かれた長距離相互作用をもつ BEC の基底状態 (2)

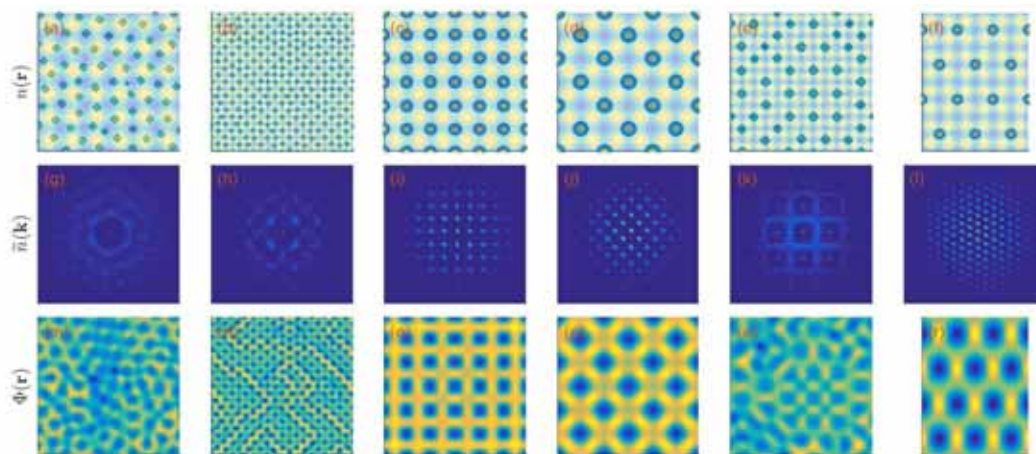


図 3 : リドベルグ型長距離相互作用をもつボース気体の基底状態。

原子気体 BEC は、多種多様な空間構造の宝庫でもある。正方格子状におかれ、リドベルグ型の長距離相互作用 $U(r) = \alpha/(r^6 + r_0^6)$ を持つ BEC の基底状態を、GP モデルで調べた。図 3 に示すように、格子ポテンシャルと相互作用の競合により、単結晶、多結晶、アモルファス、スーパーガラスなど多彩な状態が現れる。詳細は、文献(2)を参照されたい。

3. 超流動 ^4He における 2 流体結合のダイナミクスと量子乱流 (4)

超流動 ^4He の物理において、系が超流体と常流体から成るといふ 2 流体モデルは、重要な役割を果たしてきたが、これまで両者の運動を結合して解かれたことはほとんど無い。しかし、近年、優れた可視化実験が現れ、量子渦が作る量子乱流の発展に伴い、状流動流れが、ポアズイユ層流から、tail-flattened 層流、乱流へと変化する興味深い現象が観測された(3)。これを理解するために、実験と同様、正方形管内で 2 流体の結合ダイナミクスを調べた(4)。量子渦は渦糸モデルで、常流体はナビエ・ストークス方程式で記述し、両者を相互摩擦で結合する。図 4 に典型的な結果を示す。2 流体が結合した、独特の時空振動が現れることがわかった。この研究は、現在進行中である。

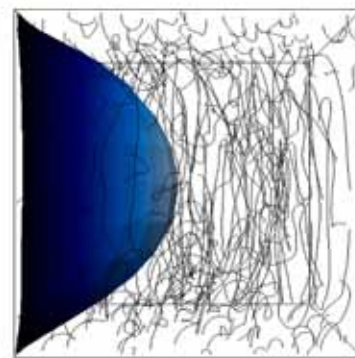


図 4 超流動 ^4He の熱対向流の 2 流体結合の数値計算結果。常流体流れのプロファイルと量子渦の分布を表す。

参考文献:

- (1) K. Fujimoto, M. Tsubota, *Phys. Rev. A* **93**, 033620 (2016).
- (2) C.-H. Hsueh, W.-C. Wu, M. Tsubota, *Phys. Rev. A* **95**, 013631 (2017).
- (3) A. Marakov *et al.*, *Phys. Rev. B* **91**, 094503 (2015).
- (4) S. Yui, M. Tsubota, H. Kobayashi (unpublished)