

量子乱流

(大阪市大院理) 坪田 誠

【はじめに】

約 500 年前のルネッサンス期、レオナルド・ダ・ヴィンチは乱流のスケッチを描き(図 1)、「乱流は単なる乱れた状態ではなく、渦から成る構造を持つ」(もう一つのダ・ヴィンチ・コード: Another Da Vinci code)という重要なメッセージを残した。それ以降、乱流は基礎科学から応用科学に至る広範な分野で膨大な研究が行われて来た。しかし、乱流は非常に複雑で、強い非線形性を持つ非平衡の動的現象であり、十分な解明がなされたとは言えない。「もう一つのダ・ヴィンチ・コード」が乱流を解く鍵を与えるかも知れないが、通常流体では渦は安定でなく、その同定すら容易でない。ところが、近年、「もう一つのダ・ヴィンチ・コード」は、超流動ヘリウムや中性原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)といった極低温の量子流体が作る量子乱流(Quantum turbulence)のなかにこそ具現化していることが明らかになって来た。本講演では、このような最新の量子流体力学研究について紹介する(1, 2)。



図1 ダ・ヴィンチによる乱流のスケッチ。

【量子渦と量子乱流】

低温で BEC を起こした量子凝縮相では、巨視的波動関数(秩序変数) $\Psi = \sqrt{n_0} \exp(i\theta)$ が出現する(ここで n_0 は凝縮体密度)。超流動速度場は、位相 θ をポテンシャルとして $v_s = (\hbar/m)\nabla\theta$ と表されるため(m はボース粒子の質量)、その循環は $\kappa = h/m$ を単位として量子化される。このように量子化された循環を持つ渦を量子渦と言う。量子渦は安定な位相欠陥であり、通常の古典流体中の渦が不安定で、生成消滅を繰り返すこととは対照的である。そして、量子渦が作る乱流を量子乱流という。量子乱流は、その構成要素が明確な量子渦であるため、要素還元的な見方を導入することができ、古典乱流よりも簡単な乱流の雛形を提供できると期待されている。

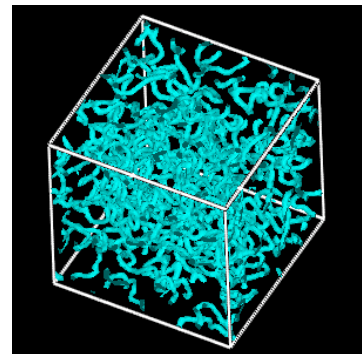


図2 量子渦が作る量子乱流。

超流動ヘリウムの量子乱流(超流動乱流)は約 50 年前に発見された。しかし、上記のような古典乱流との対比が意識され始めたのは、1990 年代の後半からである。一方、中性原子気体 BEC は 1995 年に実現し、物性物理学の世界に新風を吹き込んだ。この系では最先端の光学技術を用いて、凝縮体を制御し可視化することができる。それは量子渦格子形成のダイナミクスを明らかにし、今や量子乱流の研究にも踏み出そうとしている。

【回転する BEC における量子渦格子形成】

1995 年の原子気体 BEC の実現後、この系が超流動性を示すか否かに関心が集まった。超流動性の証拠を得るべく、BEC を回転させる実験が行われ量子渦格子が観測された。我々は、巨視的波動関数が従う Gross-Pitaevskii(GP)方程式(非線形シュレディンガー方程式)の解析を行い、回転の開始から BEC が不安定になり量子渦格子形成に至るまでのダイナミクスを初

めて明らかにした(図 3)(3)。実験結果との一致は極めて良い。

【量子乱流とコルモゴロフ則】

量子乱流と古典乱流の対比を考える上で、ポイントの一つは、コルモゴロフ則(K41)が量子乱流で確認されるかということであろう。我々は、GP 方程式より量子乱流を作り、コルモゴロフ則を初めて確認した(4)。その低波数から高波数へのエネルギー輸送は、量子渦のリチャードソン・カスケードによって担われる（古典乱流の場合、このカスケードは概念的なものに過ぎず、確認されたことは無い）。

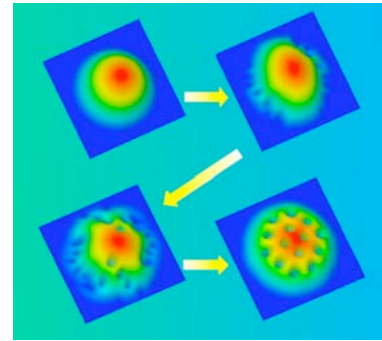


図3 回転する BEC における量子渦格子形成。

【振動物体が作る量子乱流遷移】

ここ数年、超流動ヘリウム中の振動物体が作る量子乱流遷移が世界の複数のグループにより観測されている。大阪市大のグループでは、振動細線による乱流遷移を観測し、量子渦糸の数値計算と良い一致を得た(図 4)(5)。



図4 振動球が作る量子乱流。

【原子気体 BEC の量子乱流】

原子気体 BEC で量子乱流が実現すれば、究極の制御可能な乱流を手に入れることができるだろう。我々は、2軸歳差回転を BEC に加えることにより、量子乱流を実現できること、およびその乱流がコルモゴロフ則を満たすことを示した(図 5)(6)。この系は、乱流遷移を調べる格好の舞台を提供する。

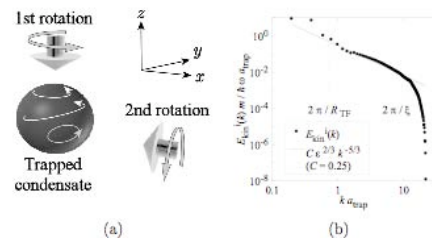


図5 原子気体 BEC に対する 2 軸歳差回転(a)と量子乱流のコルモゴロフ則。

【まとめ】

量子乱流の研究は、現在、低温物理学における最も重要なブランチの一つとなっており、世界中で活発な研究が行われている。量子乱流の研究は、500 年におよぶ自然界の大きな謎「乱流」の理解にブレークスルーを与えることができるだろう。

【参考文献】

- (1) 坪田誠／西森拓、量子渦のダイナミクス／砂丘と風紋の動力学、培風館、2008.
- (2) MT, J. Phys. Soc. Jpn. 77, 111006 (2008).
- (3) MT, K. Kasamatsu, M. Ueda, Phys. Rev. A 65, 023603(2002); K. Kasamatsu, MT, M. Ueda, Phys. Rev. A 67, 033610(2003).
- (4) M. Kobayashi, MT, Phys. Rev. Lett. 94, 065302(2005); J. Phys. Soc. Jpn. 74, 3248(2005).
- (5) R. Hänninen, MT, W. F. Vinen, Phys. Rev. B75, 064502 (2007); R. Goto, S. Fujiyama, H. Yano, Y. Nago, N. Hashimoto, K. Obara, O. Ishikawa, MT, T. Hata, Phys. Rev. Lett.100, 045301(2008); S. Fujiyama, MT, Phys. Rev. B79, 094513(2009).
- (6) M. Kobayashi, MT, Phys. Rev. A76, 045603(2007).