

物性研究所短期研究会

「量子乱流と古典乱流の邂逅」の報告

日時：2016年1月5日(火)～7日(木)

場所：物性研究所本館6階 大講義室(A632)

研究会提案代表者：坪田誠（大阪市大）

共同提案者：後藤俊幸（名工大）、斎藤弘樹（電通大）、竹内一将（東工大）

辻義之（名大）、福本康秀（九大）、矢野英雄（大阪市大）、山下穰（物性研）

量子凝縮した流体で生じる乱流—量子乱流—は、低温物理学における重要テーマとして、現在活発に研究が行われている。量子乱流の大きな特徴は、循環が量子化された量子渦が、その物理を担うという点にある。量子乱流は、約半世紀前に超流動ヘリウムを舞台にして研究が始められたが、近年、原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)でも実現し、ますます興味深い展開を見せている。乱流と言えば、(古典)流体力学の乱流が本家であるが、これまで物性物理学と流体力学の研究者の接点や交流は、ほぼ皆無であった。本研究会は、低温物性物理学の研究者と、(古典)流体力学そして数理学の研究者が、乱流現象に対する現状認識を披露し合い、それぞれの最新の研究成果を発表し、研究協力を試みることを目的として実施された。このような趣旨の研究会は世界的にも類例が無く、日本国内では初めてである。

三日間にわたり 28 件の口頭発表と 7 件のポスター発表が行われた。現在の量子乱流および古典乱流の第一線の研究者が集結し、非常に実のある発表と議論が行われた。

参加者は、初日 52 名(学内 5 名、学外 47 名)、二日目 45 名(学内 9 名、学外 36 名)、三日目 38 名(学内 6 名、学外 32 名)であった。特に、御年 90 歳を超える異友正先生が参加され、発表をされるとともに活発に質問され、そのご健在ぶりが印象的であった。なお、本研究会の開催にあたり、物性研の山下穰氏、菱沼有美さんには、大変お世話になった。厚く感謝申し上げる。

初日のセッション 1 では、古典乱流、量子乱流、数理学の立場から現状の外観が報告された。後藤(俊)氏は、乱流の間欠性について論じた。乱流の統計則といえ、エネルギースペクトルに対するコルモゴロフの $-5/3$ 則が有名だが、波数全領域にわたるスペクトルはそれほど単純ではない。ナビエ・ストークス方程式の直接計算(DNS)の結果を参照しながら、揺らぎの特性が論じられた。坪田は、超流動ヘリウムおよび原子気体 BEC の量子乱流の研究動向をレビューした。坂上氏は、オイラー方程式の弱解に関するオンサーガー予想と関連する数学研究を論じた。

セッション 2 では、原子気体 BEC の研究が報告された。斎藤氏は、グロス・ピタエフスキー(GP)方程式の数値解析により、障害物後方のカルマン渦の放出、2 成分 BEC のレーリー・テイラー不安定性やケルビン・ヘルムホルツ不安定性について論じた。平野氏は、2 成分 BEC におけるドメイン構造の形成などの非平衡ダイナミクスの実験結果について報告した。井上氏は、BEC での量子渦の観測実験について報告した。川口氏は、スピノール・ダイポール BEC におけるスピンホール効果の理論研究について論じた。

この後、懇親会が行われ、和やかな雰囲気の中に活発な学術交流が行われた。

二日目のセッション 3 は、超流動ヘリウムの実験研究である。矢野氏は、近年精力的に行われている大阪市大の振動物体を用いた量子乱流研究についてレビューした。辻氏は、固体水素微粒子を用いた量子乱流の可視化実験について報告した。辻氏は古典乱流分野の研究者だが、超流動ヘリウムの研究に参入されてきたことは非常に喜ばしいことである。村川

氏は、ナノポアアレイ中の超流動流れと散逸についての実験を報告した。近年、このようなナノストラクチャー中の超流動の研究は注目を集めており、国内ではその先駆けとなる研究と期待される。

セッション 4 は古典乱流である。乱流統計理論では多点速度相関の完結性が重要な未解決問題だが、巽氏は「交際速度独立性」による完結仮説を論じた。石原氏は、これまでも世界最大規模の DNS の計算を行ってきたが、最大格子点数 12288³ でレイノルズ数 10⁵ の世界記録を更新した DNS の計算が報告され、乱流の間欠性に踏み込んだ議論が行われた。小林(宏)氏は、楕円形パーガーズ渦周りの大スケールと小スケール間のエネルギー輸送を論じた。

セッション 5 でも古典乱流の最新成果が報告された。小松氏は、分子動力学によるコルモゴロフ則の出現を示した。テラー・グリーン型の配置から初めて分子の運動を追い、流体成分のエネルギー Spektral がコルモゴロフ則と矛盾しない結果が得られることを示した。木村氏と八柳氏は 2 次元乱流について報告した。2 次元乱流では、エネルギーに加えてエンストロフィーが保存量となるため、エンストロフィーの順方向カスケードと、エネルギーの逆カスケードを起こることが知られている。木村氏は楕円渦の軸対称化過程における逆カスケードを議論した。八柳氏は、2 次元点渦系の自己組織化(大規模構造形成)について報告した。後藤(晋)氏は 3 次元乱流のリチャードソン・カスケードが、実空間ではどのような渦の運動として見えるかに注目し、あるスケールの渦が、渦度場のストレッチにより、自分の周りに垂直方向に細かい渦を作り、この過程が自己相似的に続くという興味深いシナリオを提出した。

セッション 6 では、福本氏が渦に励起されるケルビン波の不安定性について議論し、小林(未)氏はスピノール BEC を舞台に、位相欠陥とその非可換性が発達乱流にどのように影響するかについて報告した。

その後、ポスターセッションが行われた。発表件数は 7 つと少なかったが、主に大学院生が自分たちの最新の研究成果を報告し、活発な議論が行われた。

三日目のセッション 7 は、臨界現象として乱流遷移を理解する試みが主題であった。竹内氏は液晶乱流を舞台に、その乱流遷移が Directed Percolation (DP) と呼ばれる非平衡臨界現象の普遍的クラスになることを議論した。高橋氏は、GP 方程式の量子乱流が、やはり DP クラスの普遍性を示すことを論じた。佐野氏は、水の管内乱流の遷移が、DP クラスに従うという最新の結果について報告した。

セッション 8 では、まず吉田氏が GP 方程式の量子乱流のエネルギー Spektral と「完結性」について議論した。乱流といえば渦が作る乱流に目を向けがちだが、渦ではなく波動がつくる乱流もある。藤本氏は、強磁性スピノール BEC におけるスピン波の乱流を議論し、順方向カスケードと逆カスケードが、特徴的な相関関数のべき乗則をともなって起こることを示した。森下氏は、He 単原子層薄膜の実験結果を報告し、⁴He 原子が domain wall を形成しその中を流動することと、その臨界速度を論じた。

セッション 9 では、深井氏は、液晶電気乱流におけるふたつの時空カオス状態 DSM1 と DSM2 (DSM=Dynamic Scattering Mode) の界面ゆらぎが、KPZ (Kardar-Parisi-Zhang) 普遍的クラスに従うという実験結果を議論した。木下氏は、アンチドット型と呼ばれる光学ポテンシャル中の原子気体 BEC の流れに関する実験を報告し、臨界速度を示唆する結果を議論した。

そのあと、参加者全員による Free Discussions 「量子乱流は古典乱流に、古典乱流は量子乱流に何を学ぶか？」を行った。これは本研究会の目玉ともいえるべき企画である。あらかじめ世話人が用意したアジェンダを受付で全参加者に配布した。非常に活発な議論が行われた。議論された主な内容は以下のとおり。

1. 乱流とは何か？定義は何か？何を解明したら、乱流がわかったと言えるのか？

<会場から出た意見> ・速度場が乱れているからと言って、乱流とは言えない。例えば、コルモゴロフ則のような普遍的な統計則が成り立つことが必要。

- ・ 乱流では小スケールから大スケールまで、幅広くエネルギーが分布している。
- ・ 乱流遷移に着目することが重要。 ・統計則は定常状態で議論しなければならない。

2. 量子乱流の可視化では、何に注目すれば良いか？

3. 「量子渦が乱流の構成要素である」という視点は意味があるか？ 等々

プログラム

2016年1月5日

13:00-13:10 はじめに (所長、提案代表者)

セッション1 (座長: 木村芳文)

13:10-13:50 後藤俊幸 (名工大) 乱流の間欠性 -特異性、次元、スケーリング-
13:50-14:30 坪田誠 (大阪市大) 量子乱流研究の発展
14:30-15:00 坂上貴之 (京大) 非粘性・非圧縮流れの散逸的弱解と流体乱流

休憩

セッション2 (座長: 小林未知数)

15:30-16:00 斎藤弘樹 (電通大) 量子流体における流体不安定性
16:00-16:30 平野琢也 (学習院大) 多成分冷却原子気体における非平衡ダイナミクス
16:30-17:00 井上慎 (大阪市大) 2原子種 BEC とスピン自由度のある BEC
17:00-17:30 川口由紀 (名大) スピノール・ダイポール BEC におけるスピホール効果

懇親会

1月6日

セッション3 (座長: 森下 将史)

9:00-9:30 矢野英雄 (大阪市大) 振動物体が生成する超流動乱流
9:30-10:00 辻義之 (名大) 量子乱流中の微細粒子の運動について
10:00-10:20 村川智 (東大) ナノポアアレイ中の超流動ヘリウム4の流れとその散逸

休憩

セッション4 (座長: 福本康秀)

10:50-11:10 巽友正 (京大) **Exact statistical formalism of classical fluid turbulence and some prospect of quantum fluid turbulence**
11:10-11:40 石原卓 (名大) カノニカルな古典乱流の大規模直接数値シミュレーション
11:40-12:00 小林宏充 (慶大) 古典乱流中に見られる楕円形バーガーズ渦周りのスケール間エネルギー輸送の解析

昼食

セッション5 (座長: 辻義之)

13:00-13:40 小松輝久 (理研) **A glimpse of turbulence from the molecular scale**
13:40-14:10 木村芳文 (名大) 2次元渦運動と点渦の統計力学
14:10-14:40 八柳祐一 (静大) 2次元点渦系での自己組織化を実現するドリフト項
14:40-15:10 後藤晋 (阪大) 乱流中の渦の階層とエネルギーカスケード

休憩

セッション6 (座長: 斎藤弘樹)

15:40-16:10 福本康秀 (九大) ケルヴィン波のエネルギー・擬運動量・ストークスドリフトと渦流の3次元不安定性
16:10-16:30 小林未知数 (京大) 量子流体におけるトポロジカル欠陥の非可換性および量子乱流への影響



