

## VII-1. 非平衡統計物理グループ

教授  
助教

有光 敏彦 (2015年3月退職)  
吉田 恭

### 【1】非平衡統計物理

#### (1) 古典場の系の典型性 (吉田) 論文 [1], 講演 [5]

標準的な統計力学において、マクロな熱平衡状態はミクロな状態のアンサンブルで記述される。近年、典型性の概念を用いてこのアンサンブル描像の基礎付けが試みられている。アンサンブル内の殆ど全ての状態 (典型的状態と呼ばれる) において、注目すべき物理量 (状態の関数) が殆ど同じ値を持てば、アンサンブル平均または時間平均をとらずとも個々の典型的状態が熱平衡状態に対応している、という議論である。

本研究では、古典系での典型性を、特に自由度が空間座標でラベルされる古典場の系の場合で考察した。全自由度数を有限とするため、系のサイズは有限かつ空間座標は離散化されているとする。系の状態は場のフーリエ変換  $q_\ell(k)$  の値を可能な  $k, \ell$  全てについて決めることで指定され、その値の組を  $\{q\}$  と表す。ただし  $k$  は波数ベクトルで  $\ell$  は波数ベクトル以外の自由度を指定する添字である。簡単のためハミルトニアンは  $\{q\}$  の 2 次、調和振動子型で表せるものとする。このとき、状態の関数  $F(\{q\})$  が場の空間並進に対して不変であり、かついくつかの補助的条件を充たすならば、ミクロカノニカルアンサンブル内の殆ど全ての状態 (典型的状態)  $\{q\}$  について  $F(\{q\})$  がミクロカノニカル平均  $\langle F \rangle$  と等しいことが示された。

更に、上記条件を満たす状態の関数でエントロピーに対応するもの  $S(\{q\})$  を構築した。つまり、ミクロカノニカルアンサンブル内の個々の典型的状態  $\{q\}$  について  $S(\{q\})$  の値がそのミクロアンサンブル平均  $\langle S \rangle$  とほぼ一致しかつ通常のエントロピーの定義 (エネルギー値  $E$  のミクロカノニカルアンサンブルの位相空間体積の対数)  $S_{MC}(E)$  の値ともほぼ一致するような状態の関数  $S(\{q\})$  を定義した。

#### (2) 自己重力流体乱流の統計法則 (吉田) 講演 [1, 3]

宇宙空間の十分大スケールにおける質量分布の力学は、重力相互作用が支配的となり、連続体近似を行えば、自己重力流体系でモデル化される。一方で、水や空気など非圧縮性 Navier-Stokes (NS) 方程式に従う流体の乱流状態では、運動エネルギーが大きいスケールから小さいスケールに順次輸送されるエネルギーカスケード現象およびその状況下でのエネルギースペクトルの波数べき則 (Kolmogorov スペクトル) が知られている。

本研究では、自己重力流体の乱流状態でのエネルギーカスケードの可能性を考察した。そのために、NS に従う乱流においてエネルギーカスケードと Kolmogorov スペクトルを定量的に導くことに成功している Lagrange 完結近似の手法を、自己重力流体乱流に適用した。非圧縮性流体と異なり自己重力流体では、密度揺らぎが存在し、運動エネルギーの他にポテンシャルエネルギーが存在し、また運動エネルギーには揺らぎの 3 次の項が存在する。これらを適切に処理し、簡単な状況下での、エネルギーカスケードが実現した場合の密度揺らぎ相関スペクトルのべき則を求めた。

#### (3) 量子流体乱流の統計法則 (吉田) 講演 [2]

液体ヘリウムの超流動状態や Bose-Einstein 凝縮体の流動などの量子流体の運動は、適切な近似のもと Gross-Pitaevskii (GP) 方程式により支配される。量子流体は、循環が量子化された渦糸が存在するなど、Navier-Stokes 方程式に従う古典流体とは異なる性質を有する。

本研究では、GP 方程式に完結近似の解析手法を適用した。式を閉じる代表変数として GP 方程式の基本的場の量である秩序変数  $\psi$  の 2 点相関関数および応答関数を選び、その完結近似方程式を導いた。GP 方程式では運動エネルギーと相互作用エネルギーを合わせた全エネルギーおよび粒子数が保存量である。強乱流状態でその双方それぞれがカスケードする場合のエネルギースペクトルのべき則を求めた。特にエネルギーカスケードの場合エネルギースペクトルは  $k^{-2}$  則、ただし  $k$  は波数、である。この結果の数値シミュレーションによる定量的な検証などは今後の課題である。

## 【2】散逸場の量子論、量子情報物理

(1) 多分岐によるエラー耐性の高い RRDPS 量子鍵配送 (酒井 (院生), 都倉, 吉田) 講演 [4]

暗号鍵を第三者に盗聴されることなく配送することを可能にする量子鍵配送 (QKD) について、最近安全性の確保に攪乱の監視を行わない新しいプロトコル、差動位相シフト量子鍵配送 (RRDPS-QKD) が提案された。

本研究では、このプロトコルの光子パルスをもつ分岐するところを多分岐にしてエラー耐性を向上させることを検討した。また、元の 2 分岐プロトコルで光子パルスを分岐させるところで散逸が入った場合の効果を調べた。

### < 論文 >

[1] Kyo Yoshida: “Typicality and Statewise Entropy for Classical Field Systems”, *submitted*.

### < 講演 >

[1] 吉田恭, 「自己重力流体乱流のエネルギーカスケード」, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月 9 日, 中部大学春日井キャンパス, 春日井.

[2] (招待講演) Kyo Yoshida, “Spectrum in Gross-Pitaevskii turbulence”, Workshop on New Perspectives in Quantum Turbulence: experimental visualization and numerical simulation, 2014 年 12 月 11 日, 名古屋大学, 名古屋.

[3] 吉田恭, 「自己重力流体乱流のエネルギーカスケード」, 第 27 回理論懇シンポジウム, ポスター発表, 2014 年 12 月 25,26 日, 国立天文台三鷹キャンパス, 三鷹.

[4] 酒井一樹, 吉田恭, 都倉康弘, 「多分岐によるエラー耐性の高いラウンドロビン DPS-QKD」, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 21 日, 早稲田大学早稲田キャンパス, 東京.

[5] 吉田恭, 「古典場の系の典型性」, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 24 日, 早稲田大学早稲田キャンパス, 東京.

### < 社会貢献等 >

[1] 吉田 恭, 「流体力学」, 茗溪学園コア SSH AP サイエンス学習会, 2014 年 9 月 28 日, 茗溪学園, つくば.