

冷却原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体 における乱流の理論的研究

(Theoretical study of turbulence
in cold atomic Bose-Einstein condensates)

理学研究科 数物系専攻

平成27年度

藤本和也

【論文内容の要約】

本論文では、冷却原子気体Bose-Einstein凝縮体(BEC)における量子乱流の理論研究を報告する。量子乱流研究はもともと超流動ヘリウムを舞台として行われてきた。しかし、近年、新しい量子流体である冷却原子気体BECにおいても乱流研究が行われるようになり、超流動ヘリウムにはない新しいタイプの量子乱流が実現している。本論文の研究は、この冷却原子気体BECにおいて新奇な乱流現象を開拓し、その性質を明らかにすることを目的として行われた。研究内容とその結果の概要を以下に示す。

(i) スピン自由度を持つスピノール冷却原子気体BECにおける強い乱流

冷却原子気体BECでは光学ポテンシャルを用いることで、スピン自由度を持つスピノールBECが実現する。本研究は、この系の強い乱流を研究対象としており、そこではスピン渦やスピンドメイン壁のようなスピンの強く振じれた構造が存在している。この乱流では、速度場だけではなくスピン密度ベクトルも空間的に乱れるため、この乱流をスピン乱流と呼ぶ。本論文では、基礎方程式としてスピン1スピノールGP方程式を用いて、解析・数値的にスピン乱流の性質を調べた。その結果、乱流状態において種々の物理量の相関関数に特徴的なべき乗則が現れることを示し、さらにスピン振幅が大きい乱流と小さい乱流で明確な違いがあることを見出した。

前者のスピン振幅が大きい強磁性スピン乱流は、印加磁場なしの強磁性相互作用する系において実現する。本研究は、このスピン乱流においてスピン密度ベクトルの相関関数に $-7/3$ 乗則が現れることを明らかにした。一方、後者のスピン振幅が小さいスピン乱流は、反強磁性相互作用する系、もしくは磁場を印加した強磁性相互作用する系において実現する。この微小スピン振幅を持つスピン乱流では、強磁性スピン乱流とは異なり、スピン相関関数に低波数領域で -1 乗則、高波数領域で $-7/3$ 乗則が現れうることが見出された。ただし、反強磁性相互作用する系では、 -1 乗則を数値計算で明確に確認することはできなかった。

また、速度場の相関関数は強磁性スピン乱流において調べられ、 $-5/3$ 乗則が現れることが示された。このべき指数は古典乱流のKolmogorov則と同じであるが、べき乗則が生じる機構は異なっており、スピン密度ベクトルの空間分布が重要な役割を果たしていることを明らかにした。

(ii) 冷却原子気体BECにおける弱い乱流

本研究は、研究(i)とは対照的に非線形性が弱い乱流を研究対象としている。この乱流では、系の波動(素励起)が弱く相互作用する状況が実現しており、弱波動乱流となっている。本論文では、この弱波動乱流をスピン自由度を持たない1成分BECとスピン1強磁性スピノールBECにおいて調べた。

1成分BECの弱波動乱流では、1成分GP方程式と弱波動乱流理論を用いて、その性質を解析・数値的に研究した。この乱流はBogoliubov波が支配的な乱流となるので、本論文ではBogoliubov波乱流と呼ぶ。本研究はこの乱流においてBogoliubov波の波数分布、波動関数の相関関数、密度分布の相関関数に特徴的なべき乗則が現れることを明らかにし、密度分布のべき乗則の実験観測の可能性を議論した。

一方、スピン1強磁性スピノールBECの弱波動乱流では、スピン波が支配的なスピン波乱流が実現する。本研究は、スピン1スピノールGP方程式と弱波動乱流理論を用いて、その性質を実験観測量であるスピン密度ベクトルと関連づけて調べた。その結果、スピン密度ベクトルの横方向の相関関数に特徴的なべき乗則が2つ現れうることを解析的に見出した。1つはダイレクトカスケードに対応する $-7/3$ 乗則であり、もう1つはインバースカスケードに対応する $-5/3$ 乗則である。数値計算では、これらのべき乗則を確認する計算を行い、解析計算と無矛盾な結果を得た。