

学位審査報告書

（ふりがな） 氏 名	さくみち なおゆき 作道 直幸
学位（専攻分野）	博 士 （ 理 学 ）
学位記番号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 年 月 日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	理学研究科 物理学・宇宙物理学 専攻
（学位論文題目） リー・ヤンの量子クラスター展開法を用いた冷却原子気体の研究	
論文調査委員	（主査） 川上 則雄 教授 高橋 義朗 教授 前野 悦輝 教授

理 学 研 究 科

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	作道 直幸
論文題目	リー・ヤンの量子クラスター展開法を用いた冷却原子気体の研究		
(論文内容の要旨)			
<p>本研究は、リー・ヤンの量子クラスター展開法を用いて冷却原子気体の超流動転移を判定する一般的な方法を提案し、これを定式化した結果をまとめたものである。</p> <p>極低温に冷却された二成分冷却フェルミ気体は、フェッシュバハ共鳴を用いて S 波散乱長を変調することで、クーパー対を組む BCS 超流動状態から分子ボソンの BEC (ボース・アインシュタイン凝縮) 状態まで連続的に変化させることができる。これら冷却原子系の実験結果を解析する理論的なアプローチの一つとして、クラスター展開法が注目されている。クラスター展開法の利点は、二体問題を S 波散乱の範囲で厳密に扱うことができる点にある。そのため、希薄性と量子性を持った気体に有効であると考えられるが、そのような系が冷却原子気体の登場により現実のものとなった。近年の先行研究により、低次の展開係数が数値的に求められている。しかし、低次の展開は高温領域の実験を再現するものの、超流動転移の生じる極低温を扱うためには、高次の項を取り入れることが不可欠となる。</p> <p>以上を踏まえて、本研究ではクラスター展開の高次の項を系統的に扱うことで超流動転移点を決定する新たな方法を提案している。この目的のためリー・ヤンの量子クラスター展開法を用いている。この方法は、ボース系やフェルミ系の大分配関数を、ボルツマン統計で定義された同じ系のクラスター関数で系統的に展開する方法である。リー・ヤンの方法を用いて超流動転移点を決定する試みは以前にもなされているが、BEC 極限のみで計算できる特殊な方法しか知られていなかった。本研究ではリー・ヤンの方法で超流動転移点を決定するために、「還元密度行列の非対角長距離秩序 (ODLRO) の発現」を用いて超流動転移を一般的に判定できる方法を提案している。</p> <p>リー・ヤンの方法はもともと大分配関数の展開係数を求める方法であったが、本研究で多粒子還元密度行列を系統的に計算できるように拡張がなされ、さらに並進不変性を持たないトラップ系や、多成分系、ボース・フェルミ混合系にも応用できるように一般化されている。この定式化を用いることでボース系やフェルミ系の ODLRO の発現の有無をリー・ヤンの方法で調べられることが、本研究で初めて指摘されている。得られた ODLRO の判定条件は、収束する無限和で表される。無限和の計算は一般には難しいが、一成分剛体球ボース系の場合について先行研究の結果と一致することが確かめられている。相転移が起こるような極低温では、展開パラメータ (フガシティ) の値が大きくなる。そのような場合に、リー・ヤンの量子クラスター展開が正しい結果を与えるのかどうかは自明ではない。本研究では、中性原子が有限の斥力芯を持つことに注目し、パラメータが大きい場合にも解析接続の意味でリー・ヤンの量子クラスター展開が数学的に正当化できることが示されている。</p> <p>また、リー・ヤンの量子クラスター展開で生じる各項の物理的な意味も詳しく議論されている。特に、BEC 極限で梯子形のリー・ヤンのグラフの無限和が二原子分子の理想ボース気体の BEC 転移温度を与える理由が明らかにされている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

近年、冷却原子ガスの研究が急速に進展している。冷却ボース気体において極低温で超流動転移が観測され、また冷却フェルミ気体においてもフェッシュバハ共鳴を用いることで、クーパ対を組むBCS超流動から分子ボソンのBECまで広いパラメタ領域で超流動が実現されている。このような背景の下、本研究はリー・ヤンの量子クラスター展開法を用いて冷却原子気体の超流動転移を判定する一般的方法を提案している。

本研究で用いられているクラスター展開法は、希薄性と量子性を持った気体に有効であるので、これを冷却原子気体の応用することは自然な流れである。リー・ヤンの量子クラスター展開法は、ボースおよびフェルミ量子系の大分配関数を、ボルツマン統計で定義された同じ系のクラスター関数で展開する方法である。この方法は、有限温度の量子多体系の解析によく用いられる温度グリーン関数法とは全く別の展開法であり、冷却原子系の解析に対して互いに相補的な役割を果たすものである。リー・ヤンの方法を用いて超流動転移点を決定する試みは以前にもなされていたが、BEC極限のみで有効となる特殊な方法しか知られていなかった。また、温度グリーン関数法による超流動転移点の決定方法であるサウレスの判定条件は松原周波数での相関関数の表示を必要とするが、リー・ヤンの方法には松原周波数が現れないためサウレスの方法を適用することはできない。

以上の困難を克服し、リー・ヤンの方法で超流動転移点を決定するため、作道氏は還元密度行列の非対角長距離秩序(ODLRO)の発現により超流動転移を判定する方法を提案している。これを定式化するため、多粒子還元密度行列が系統的に計算できるようにリー・ヤンの方法を拡張し、さらに並進不変性を持たない系や、多成分系、ボース・フェルミ混合系でも使えるように一般化している。この拡張により、ボース系やフェルミ系のODLROの発現の有無を調べることを可能としている。得られた方法を一成分剛体球ボース系に適用することで、先行研究の結果を再現することを確認している。相転移が起こる極低温では、展開パラメータ(フガシティ)の値が大きくなるが、フガシティが大きい場合にも、解析接続を用いることでリー・ヤンの量子クラスター展開を数学的に正当化している。また、リー・ヤンの量子クラスター展開の各項の物理的に明快な意味づけも行っている。

このように、本研究はリー・ヤンのクラスター展開法に基づき冷却原子の超流動転移の発現条件を明らかにしたものである。この成果は冷却原子系のみならず、量子多体系に広く適用できる基礎的な研究として高く評価される。博士論文公聴会においても、作道氏は丁寧に準備された分かりやすい発表を行い、また基礎的および専門的な質問にも明快に答えるなど、高い学識を有していることが確認された。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成24年1月12日、論文内容とそれに関連した口頭試問を行った。その結果合格と認めた。

要旨公開可能日： 年 月 日以降