

論文審査の結果の要旨

氏名 吉野 匠

本論文は人工ゲージ場の下での 2 成分ボース・アインシュタイン凝縮体の基底状態と励起状態に関する理論的研究をまとめたものである。

本論文は 6 章から構成されている。

第 1 章は緒論である。ここでは冷却原子系のボース・アインシュタイン凝縮体とその渦糸格子状態、エンタングルメントエントロピーとエンタングルメントスペクトルについて簡潔に述べられた後、本研究の目的と本論文の構成について述べられている。

第 2 章は 2 成分ボース・アインシュタイン凝縮体と人工ゲージ場に関する概説である。まず 2 つの成分に同じ人工磁場（以下平行磁場と記す）が印加された系の基底状態相図について、平均場近似と最低ランダウレベル近似を用いて得られた先行研究の結果が示されている。続いて 2 成分に反平行かつ大きさが同じ人工磁場（以下反平行磁場と記す）の実験的实现方法や平均場近似での平行磁場下の基底状態と反平行磁場下のその同等性、量子ホール領域における平行磁場下の基底状態と反平行磁場下での基底状態の非等価性に関する先行研究が紹介されている。

第 3 章では 2 成分ボース・アインシュタイン凝縮体の渦糸格子の有効理論に関する成果が述べられている。渦芯の回復長が渦間距離より著しく短い場合に、渦芯付近の空間構造を粗視化し、長波長、低エネルギーにおける有効理論を得、先行研究で得られた有効理論では見落とされていた項を見出している。また、本章で導いた有効理論から励起の分散関係を導き、平行磁場下の励起の分散関係と反平行磁場下での分散関係がエネルギーをスケールすると同等になることを示している。さらに有効場の理論に基づいて、相関関数や基底状態エネルギーへの量子補正を導いている。

第 4 章では 2 成分ボース・アインシュタイン凝縮体の低エネルギースペクトルについての成果が述べられている。ここでは有効理論を介さずに、平均場近似かつ最低ランダウレベル近似の下でのボゴリューボフ理論が導かれ、平行磁場下と反平行磁場下の励起スペクトルが示されている。ここで得られた平行磁場下と反平行磁場下のエネルギースペクトルをスケールすると、波数空間の Γ 点付近において二つのスペクトルが低エネルギーで一致することが示されている。さらにその結果を用いて量子補正を取り入れた場合の基底状態の相図が、成分間相互作用と成分内相互作用の比を軸として示されている。そこでは平行磁場と反平行磁場の基底状態の同等性が破れることが示されている。

第 5 章では 2 成分ボース・アインシュタイン凝縮体の成分間エンタングルメ

ントエントロピーとエンタングルメントスペクトルに関する成果が述べられている。ここでは第 3 章で導いた有効理論の結果を用いた成分間エンタングルメントエントロピーとエンタングルメントスペクトルの計算結果と、第 4 章で導いたボゴリューボフ理論に基づいた結果が示されている。平行磁場下と反平行磁場下でのエンタングルメントエントロピーの大小関係は成分間相互作用の符号によって反転することが示されている。この結果は先行研究によって得られた量子ホール状態におけるエンタングルメントエントロピーの振る舞いと整合している。さらに系のサイズに対するエンタングルメントエントロピーの依存性が系の長さ L に比例する主要項（面積則）と、 L の対数に比例する項と高次の微小量からなることを示し、 L の対数に比例する項を対称性の破れに由来するものとしている。

第 6 章では結論と今後の展望が述べられている。

本研究の意義は、人工ゲージ場下における 2 成分ボース・アインシュタイン凝縮体の基底状態と励起状態に関する理論的知見を与えた点にある。特に平均場近似かつ最低ランダウレベル近似の下で、2 成分ボース・アインシュタイン凝縮体の渦糸格子状態における低エネルギー励起スペクトルの計算、量子補正を取り入れた基底状態相関の計算、ボゴリューボフスペクトルを用いた成分間エンタングルメントエントロピーとエンタングルメントスペクトルの計算に新規性が認められる。

本論文第 3 章と第 4 章の主要部分は古川俊輔氏、東川翔氏、上田正仁氏との共同研究によって得られたものであり 1 編の原著論文として出版済である。第 3 章と第 4 章の一部と第 5 章の成果は古川俊輔氏と上田正仁氏との共同研究によるものであり、その成果については原著論文として投稿を準備しているところである。しかし本論文の成果は論文提出者が主体となって分析及び検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって本審査委員会は博士（理学）の学位を授与できるものと認める。