

Title	人工ゲージ場中のボース・アインシュタイン凝縮体における多体効果の理論的研究
Sub Title	Theoretical study of many-body effects in Bose-Einstein condensates in synthetic gauge fields
Author	古川, 俊輔(Furukawa, Shunsuke)
Publisher	慶應義塾大学
Publication year	2020
Jtitle	学事振興資金研究成果実績報告書 (2019.)
JaLC DOI	
Abstract	<p>真空中にトラップされた冷却原子気体は、様々なパラメータを制御することのできる究極の人工量子物質であり、量子多体現象の本質を理想的な環境下で調べることであり得る系である。特に近年、電氣的に中性な原子気体に対して、電磁場と同等の効果を光学的に誘起する人工ゲージ場技術の発展が目覚ましい。磁場中の第二種超伝導体と同様に、人工磁場中のボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)においては量子化渦の格子が形成される。本研究では、二成分BECに平行ないし反平行に人工磁場を印加した系を考え、集団励起および量子揺らぎの効果を理論的に解析した。平均場解析のもとでは平行・反平行磁場中の系は同一の多彩な渦格子相図を示すことが知られていたが、量子揺らぎの効果を取り入れることで、相境界が特に平行磁場の場合に大きく変更されることを明らかにした。集団励起に関しては、平行・反平行磁場の場合の低エネルギー励起が、繰り込まれた相互作用を用いてリスケールすることで合致するという興味深い関係式を見出した。また、成分間の量子的絡み合いを評価し、成分間斥力(引力)のもとでは平行(反平行)磁場の場合において二成分がより強く絡み合っていることを示した。これは、より強磁場の量子ホール領域において我々が以前見出した結果と定性的に合致する。人工ゲージ場中のボース気体と類似した状況は、磁性体においても現れる。その例として、銅鉍物ボルボサイトに着目した。この物質は、異方的籠目格子上で強磁性・反強磁性相互作用が競合するフラストレート磁性体であり、多彩な磁場誘起現象が実験的に観測されている。我々は、1/3磁化プラトー相からのスピン波展開を行うことで、この物質の磁性をマグノン気体描像から理論的に解析した。Dzyaloshinskii-Moriya相互作用の効果を取り入れることで、マグノンのBloch状態がベリー曲率を獲得すること、その結果として熱伝導が曲げられる熱ホール効果が起きることを示した。</p> <p>Laser-cooled atomic gasses trapped in vacuum are ideal synthetic quantum matter with a variety of tunable parameters, which allows us to explore essential features of quantum many-body phenomena. In recent years, in particular, techniques for inducing synthetic gauge fields in neutral atoms by using lasers have rapidly been developed; such techniques can mimic the effects of electromagnetic fields for charged particles. In a way similar to superconductors in type-II superconductors, a Bose-Einstein condensates (BEC) in a synthetic magnetic field exhibits a lattice of quantized vortices. In the present project, we have considered a system of two-component BECs in mutually parallel or antiparallel synthetic magnetic fields, and theoretically analyzed collective modes and effects of quantum fluctuations. Within the mean-field theory, the systems in parallel and antiparallel fields are known to exhibit the same phase diagram that consists of a variety of vortex lattices. By taking account of quantum fluctuations, we have shown that the phase boundaries shift appreciably, particularly for parallel fields. We have also shown that the low-energy spectra for parallel and antiparallel fields are related to each other by suitable rescaling using renormalized coupling constants. By calculating the intercomponent entanglement entropy, we have found that for an intercomponent repulsion (attraction), the two components are more strongly entangled in the case of parallel (antiparallel) fields. This result is in qualitative agreement with our previous results in the quantum Hall regime for high magnetic fields. A situation analogous to Bose gases in synthetic gauge fields is also found in magnetic materials. We have studied the natural mineral volborthite as an example. Volborthite is an example of a highly frustrated quantum magnet with competing ferromagnetic and antiferromagnetic interactions, and a rich variety of field-induced phenomena have been observed experimentally. We have performed a spin-wave analysis starting from the 1/3-plateau phase, and analyzed the magnetic properties on the basis of a magnon Bose gas picture. By taking account of the effects of Dzyaloshinskii-Moriya interactions, we have shown that the magnon Bloch states acquire a finite Berry curvature, giving rise to a thermal Hall effect, i.e., bending of a thermal current.</p>
Notes	
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=2019000007-20190239

研究代表者	所属	理工学部	職名	専任講師	補助額	1,000（特A）千円
	氏名	古川 俊輔	氏名（英語）	Shunsuke Furukawa		
研究課題（日本語）						
人工ゲージ場中のボース・アインシュタイン凝縮体における多体効果の理論的研究						
研究課題（英訳）						
Theoretical study of many-body effects in Bose-Einstein condensates in synthetic gauge fields						
1. 研究成果実績の概要						
<p>真空中にトラップされた冷却原子気体は、様々なパラメータを制御することのできる究極の人工量子物質であり、量子多体現象の本質を理想的な環境下で調べることのできる系である。特に近年、電気的に中性な原子気体に対して、電磁場と同等の効果を光学的に誘起する人工ゲージ場技術の発展が目覚ましい。磁場中の第二種超伝導体と同様に、人工磁場中のボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)においては量子化渦の格子が形成される。本研究では、二成分 BEC に平行ないし反平行に人工磁場を印加した系を考え、集団励起および量子揺らぎの効果を理論的に解析した。平均場解析のもとでは平行・反平行磁場中の系は同一の多彩な渦格子相図を示すことが知られていたが、量子揺らぎの効果をとり入れることで、相境界が特に平行磁場の場合に大きく変更されることを明らかにした。集団励起に関しては、平行・反平行磁場の場合の低エネルギー励起が、繰り込まれた相互作用を用いてリスケールすることで合致するという興味深い関係性を見出した。また、成分間の量子的絡み合いを評価し、成分間斥力(引力)のもとでは平行(反平行)磁場の場において二成分がより強く絡み合っていることを示した。これは、より強磁場の量子ホール領域において我々が以前見出した結果と定性的に合致する。人工ゲージ場中のボース気体と類似した状況は、磁性体においても現れる。その例として、銅鋳物ボルボサイトに着目した。この物質は、異方的籠目格子上で強磁性・反強磁性相互作用が競合するフラストレート磁性体であり、多彩な磁場誘起現象が実験的に観測されている。我々は、1/3 磁化プラトー相からのスピン波展開を行うことで、この物質の磁性をマグノン気体描像から理論的に解析した。Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用の効果を取り入れることで、マグノンの Bloch 状態がベリー曲率を獲得すること、その結果として熱伝導が曲げられる熱ホール効果が起きることを示した。</p>						
2. 研究成果実績の概要（英訳）						
<p>Laser-cooled atomic gasses trapped in vacuum are ideal synthetic quantum matter with a variety of tunable parameters, which allows us to explore essential features of quantum many-body phenomena. In recent years, in particular, techniques for inducing synthetic gauge fields in neutral atoms by using lasers have rapidly been developed; such techniques can mimic the effects of electromagnetic fields for charged particles. In a way similar to superconductors in type-II superconductors, a Bose-Einstein condensates (BEC) in a synthetic magnetic field exhibits a lattice of quantized vortices. In the present project, we have considered a system of two-component BECs in mutually parallel or antiparallel synthetic magnetic fields, and theoretically analyzed collective modes and effects of quantum fluctuations. Within the mean-field theory, the systems in parallel and antiparallel fields are known to exhibit the same phase diagram that consists of a variety of vortex lattices. By taking account of quantum fluctuations, we have shown that the phase boundaries shift appreciably, particularly for parallel fields. We have also shown that the low-energy spectra for parallel and antiparallel fields are related to each other by suitable rescaling using renormalized coupling constants. By calculating the intercomponent entanglement entropy, we have found that for an intercomponent repulsion (attraction), the two components are more strongly entangled in the case of parallel (antiparallel) fields. This result is in qualitative agreement with our previous results in the quantum Hall regime for high magnetic fields. A situation analogous to Bose gases in synthetic gauge fields is also found in magnetic materials. We have studied the natural mineral volborthite as an example. Volborthite is an example of a highly frustrated quantum magnet with competing ferromagnetic and antiferromagnetic interactions, and a rich variety of field-induced phenomena have been observed experimentally. We have performed a spin-wave analysis starting from the 1/3-plateau phase, and analyzed the magnetic properties on the basis of a magnon Bose gas picture. By taking account of the effects of Dzyaloshinskii-Moriya interactions, we have shown that the magnon Bloch states acquire a finite Berry curvature, giving rise to a thermal Hall effect, i.e., bending of a thermal current.</p>						
3. 本研究課題に関する発表						
発表者氏名 (著者・講演者)	発表課題名 (著書名・演題)	発表学術誌名 (著書発行所・講演学会)	学術誌発行年月 (著書発行年月・講演年月)			
Furukawa S, Momoi T	Effects of Dzyaloshinskii-Moriya interactions in volborthite: Magnetic orders and thermal Hall effect	Journal of the Physical Society of Japan 89, 034711 (2020)	2020 年 2 月			
Yoshino T, Furukawa S, Ueda M	Quantum fluctuations of vortex lattices in binary Bose-Einstein condensates: Phase diagrams and intercomponent entanglement	4th Kyoto-Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases	2019 年 9 月			
Yoshino T, Furukawa S, Ueda M	Quantum fluctuations of vortex lattices in binary Bose-Einstein condensates: Phase diagrams and intercomponent entanglement	International Conference on Topological Materials Science 2019	2019 年 12 月			
古川俊輔	多成分ボース気体の量子ホール物理: 対称性による保護と富化	Bose-Einstein 凝縮体の数学的側面	2020 年 2 月			