

	クノ ヨシヒト	
氏名	久野 義人	
学位の種類	博士（工学）	
学位記番号	博第1018号	
学位授与の日付	平成28年3月23日	
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当	課程博士
学位論文題目	光格子上の冷却原子系による量子シミュレーションの研究 (Study on quantum simulation of cold atom systems in an optical lattice)	
論文審査委員	主査	教授 一瀬 郁夫 教授 高橋 聡 准教授 在田 謙一郎 教授 松居 哲生 (近畿大学)

論文内容の要旨

近年、極低温原子系の物理は目覚ましい成果を挙げてきている。特に光格子上極低温原子系はその物理系の制御性の高さから実験、理論の両面から非常に多くの研究が特に21世紀に入り目覚ましい勢いで進んでいる。そして多くの成果が出てきている。

その進展は実験技術の技術進歩を求める研究から、光格子原子系のもつ物性的な側面の研究、光格子系の原子系を用いた素粒子物理学における種々の理論モデルのシミュレータの構築の研究、さらには量子コンピュータの実現に直結する量子コンピューティング等の応用的側面の研究などを含む幅広い一大分野が光格子原子系という土台を中心に形成されつつある。

本博士論文ではそのような情勢にのり、光格子原子系上での物理について著者の携わった研究をまとめたものである。前半部は実験的側面を含めたその物理系に必要な理論的事項についての内容を記述した。また全体を通して光格子上原子系の物性的側面についての内容を多く含んでいる。さらには光格子上の物理系をより一般的な物理系、つまりは量子シミュレーションとしてとらえ、これまでの様々な理論的に深く研究されてきた物理モデルを光格子上で再構成しその物理を探求することに研究の力点をおいた内容となっている。

本博士論文は以下のような内容で構成される。

II 章は極低温原子系かつ光格子について理論的な基礎事項をまとめた。特に光格子の構成法やその上で構築される最も基本的な Bose-Hubbard モデル等について述べた。更には後の章の内容に関わってくる光格子上の人工磁場生成等の最新のトピックについても記述した。

III 章は極低温原子系の物理から離れて格子ゲージ理論の内容を中心とした純粋に場の理論的に側面について著者の研究に関連のあるトピックをまとめた。量子電磁気学の基本的な U(1)ゲージ理論のモデルに始まり、それより U(1)格子ゲージ理論さらには物質場の閉じ込め問題等の内容を簡潔に説明する。これらの理論は V 章の内容と密接に関わりを持つ。

IV 章では光格子上 2 成分 Bose 原子系についてランダム Rabi 振動の効果に生じる新奇秩序状態について述べる。それは 2 成分 Boson の量子位相差の特異な秩序状態である。我々は場の理論モデルに Monte-Carlo 法を有効に使った解析を行った結果などを説明する。

V 章では光格子上 2 成分 Bose 原子系において超流動状態と固体状態の共存状態である超固体相を調べる。超固体は古くからその存在が超流動ヘリウム等の物理系において発現の有無が論争になっているものである。我々は特に原子がもつ dipole 相互作用の効果により誘発する超固体相についての拡張 Monte-Carlo 法と平均場近似理論を用いて検証し、新奇な超固体状態の発現についての結果を示す。

VI 章では、ごく最近になって研究が始まった光格子上極低温原子系での格子ゲージ理論シミュレータに、特に U(1)ゲージヒッグスモデルに対応する冷却原子量子シミュレータの構築について理論的提案を述べる。長距離相互作用する Bose-Hubbard モデルの低エネルギー有効理論は U(1)ゲージヒッグスモデルに対応する。そこで必要になる原子系の相互作用の相互作用チューニングについて説明する。さらに、U(1)ゲージヒッグスモデルのもつ状態相において static チャージ間の閉じ込め電束についての Gross-Pitaevskii 方程式を用いたダイナミクスの解析についての結果を述べる。

VII, VIII 章では光格子上 Bose 原子系での人工磁場による研究についての内容を述べる。特に外的なレーザーによって人工的に誘起されるゲージ場が寄与する量子 vortex が織りなす新奇状態相について述べる。その新奇な量子 vortex 状態は特定の磁場の大きさで誘起される vortex 固体状態である。さらにその状態相での on-site 斥力の効果による vortex 液体状態について説明する。また現在進行中の内容ではあるが光格子上原子系で近年構築可能になった Haldane モデルに準じたモデル、Haldane-Bose-Hubbard モデルに関する拡張 Monte-Carlo 法を用いた基底状態相構造について現時点での結果を記述する。

論文審査結果の要旨

1995年の極低温原子系のBEC実現以降、極低温原子系の物理は実験・理論とも目覚ましい成果を挙げてきており、物理学の一分野を築くに至った。特に光格子上極低温原子系は、その物理系の制御性の高さから、21世紀に入り実験、理論の両面から非常に多くの研究が成され、現在も目覚ましい進展を遂げている。その進展は実験技術の技術進歩を求める研究から、光格子原子系のもつ物性的な側面の研究、光格子系の原子系を用いた素粒子物理学における種々の理論モデルのシミュレーター構築の提案、さらには量子コンピュータの実現に直結する量子コンピューティング等の応用的側面の研究などを含む幅広い一大分野が光格子原子系という土台を中心に形成されつつある。久野義人氏が提出した博士論文はそのような情勢にのり、光格子原子系上での物理について、氏の得た研究成果をまとめたものである。

提出された博士論文の前半部は実験的側面を含めたその物理系の説明と、理論的事項についての内容を記述した。また全体を通して光格子上原子系の物性的側面についての説明を多く含んでいる。さらには光格子上の物理系をより一般的な物理系の量子シミュレーターとしてとらえ、これまで理論的に深く研究されてきた種々の物理モデルを光格子上で再構成し、その物理を探求することの研究の意義について力点を置いた内容となっている。

本博士論文は以下のように構成されている。

II章は光格子上の極低温原子系について理論的な基礎事項をまとめた。特に光格子の構成法やその上で構築される最も基本的なBose-Hubbardモデル等について述べた。更には後の章の内容に関わってくる光格子上の人工磁場生成等の最新のトピックについても記述し、それらの相互関係についての概論を与えている。

III章は格子ゲージ理論の内容を中心とした純粋に場の理論的に側面について本研究に関連のあるトピックをまとめた。量子電磁気学の基本的なU(1)ゲージ理論のモデルに始まり、それよりU(1)格子ゲージ理論さらには物質場の閉じ込め問題等の内容を簡潔に説明した内容となっている。これらの理論はV章の内容と密接に関わりを持つ。

IV章では光格子上で実現される2成分Bose原子系においてランダムRabi振動の効果により生じる新奇秩序状態についての研究結果をまとめている。それは2成分Bosonの量子位相差の特異な秩序状態であり、場の理論モデルにMonte-Carlo法を有効に使った解析結果を示し、その物理的考察を与えている。

V章では光格子上2成分Bose原子系において超流動状態と固体状態の共存状態である超固体相を調べた研究について説明している。超固体は古くからその存在が超流動ヘリウム等の物理系において発現の有無が論争になっているものである。久野氏の研究では、特に原子がもつdipole相互作用の効果により誘発する超固体相について、拡張Monte-Carlo法と平均場近似理論を用いて検証し、新奇な超固体状態の発現についての結果が得られた。この章では、その内容について説明を行っている。

VI章では、光格子上極低温原子系での格子ゲージ理論シミュレーター、特にU(1)ゲージ・ヒッグスモデルに対応する冷却原子量子シミュレーターの構築について理論的提案が述べられている。長距離相互作用するBose-Hubbardモデルの低エネルギー有効理論はU(1)ゲージ・ヒッグスモデルに対応することが、一瀬、松居達の先行研究で示されている。この章では、その実現に必要な原子系の相互作用の相互作用チューニングについて、氏の提案を説明し、さらに、U(1)ゲージ・ヒッグスモデルのもつ状態相においてstaticチャージ間の閉じ込め電束についてのGross-Pitaevskii方程式を用いたダイナミクスの解析についての結果が述べられている。

VII章およびVIII章では人工ゲージ場中の光格子上Bose原子系の研究についての内容が述べられている。特に外的なレーザーによって人工的に誘起されるゲージ場が寄与する量子vortexが織りなす新奇状態相について、久野氏が得た研究結果が述べられている。その新奇な量子vortex状態は特定の磁場の大きさで誘起されるvortex固体状態であることが説明されている。さらにその状態相でのon-site斥力の効果によるvortex液体状態について考察されている。また現在進行中の内容ではあるが、光格子上原子系で近年構築可能になったHaldaneモデルに準じたモデル、Haldane-Bose-Hubbardモデルに対して拡張Monte-Carlo法を用いて得られた基底状態の相構造についての結果が説明されている。

以上の研究成果はPhys.Rev., New J.Phys.等の著名な学術雑誌に掲載され、また共同研究において久野氏の寄与は本質的に重要なものであり、提出された博士論文は久野氏の博士号取得に十分なものであると判断する。