

シミズ ケイタ

氏 名 清水 啓太

学位の種類 博士(工学)

学位記番号 博第1171号

学位授与の日付 2020年3月31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 極低温原子系の動的相転移現象に関する理論的研究
(Theoretical study on dynamical phase transitions in ultra-cold atomic systems)

論文審査委員 主査 教授 一瀬 郁夫
教授 渡邊 威
准教授 在田 謙一郎

論文内容の要旨

近年、科学技術の目覚ましい発展は、物理学の研究においても大きな変革を生み出している。特にレーザー技術の進歩は、それまで実現不可能であった量子物理系を構築することを可能とした。その代表例の一つに「極低温原子系」が挙げられる。レーザーを用いた冷却技術の発展により、「極低温原子系」は量子多体系の研究において非常に重要な役割を担っている。量子多体系は相互作用の複雑さ等から扱いが非常に困難であるため、その研究においては、物理系をモデル化しシンプルなものへと置き換えることが有効である。「極低温原子系」は現実の物質をモデル化したものであり、パラメータ制御の容易さや不純物の無い系のため、「量子シミュレータ」と呼ばれている。さらに、レーザーを用いた「光学格子」と呼ばれる量子シミュレータも制御性の高さや実験で実現可能となった点から、理論・実験両側面での研究が活発に行われており一大分野を築いている。

古典系(温度パラメータ)における2次相転移を有限速度で横切る(クエンチ)ときの系の振る舞いは、非常に興味深い問題である。この問題は、宇宙論の観点からKibbleによって最初に指摘された。Kibbleは、相転移クエンチによって対称性の破れた局所領域が形成され、その結果、トポロジカル欠陥が生成されることを予想した。その後、Zurekにより同様な現象が超流動ヘリウムの様な凝縮系でも起こることが予想された。上記の機構は、Kibble-Zurek機構(KZM)

と呼ばれ、理論・実験において多くの研究が行われてきた。KZM では、2 次相転移をクエンチした時の相関長やトポロジカル欠陥の形成について普遍的なスケーリング則を予想している。古典系の場合は、KZM を支持する多くの理論・実験研究から KZM の正当性が認められている。しかしながら、絶対零度下での量子系における量子相転移に関しては、理論・実験研究の不足により KZM の正当性は、未解決な問題である。そこで、本博士論文では光学格子中の極低温原子系を用いて動的量子相転移を起こした場合の系の振る舞いについて研究を行う。モデルには、光学格子中の極低温原子系（ボース粒子系）の振る舞いを記述する 2 次元 Bose-Hubbard(BH) モデルと最近接(NN)相互作用を含んだ 2 次元拡張 BH(EBH)モデルを用いる。特にクエンチが線形クエンチの場合の非平衡現象に着目し、2次元系において有効な時間依存 Gutzwiller(t-GW)法を用いて研究を行う。この t-GW 法は、近似を用いていながら実験結果を良く記述することが知られている。この手法は、1次元系において非常に強力な時間依存密度行列繰り込み群等の手法が適用できない 2次元系を扱える点が優れている。我々は、2次元 BH モデル、2次元 EBH モデルにおける KZM の適用可能性や 1次相転移に対するスケーリング則の有無について系の振る舞いの詳細を追いつつ、調べていく。また、実験のセットアップや結果の解釈・予測についての提案も行い、現実の物理現象に対して新たな知見を与えることも目的としている。

本博士論文は以下の様に構成されている。第 1 章は、極低温原子系について冷却手法や測定方法の基礎事項をまとめている。第 2 章は、光学格子や BH モデル、GW 法、t-GW 法の詳細について説明をしている。第 3 章は、相転移と本博士論文で中心となる KZM の理論を古典系・量子系の両側面から紹介し、KZM の実証実験について触れる。第 4 章は、Mott 絶縁体(MI)相-超流動(SF)相間の 2 次相転移クエンチについて、2次元 BH モデルを用いて調べる。まず、KZM 実証実験の結果との比較を行い、数値計算手法の有効性を示す。さらに、我々のシミュレーション結果と KZ 予想のズレの原因について言及する。また、適切な KZ プロトコルでのスケーリング則やクエンチ後の系の振る舞いについても調べる。最後に、実験のセットアップについて提案を行っている。第 5 章は、弱い NN 斥力相互作用を持つ 2次元 EBH モデルにおいて出現する Density-wave(DW)相-SF 相間の 1 次量子相転移クエンチについて調べる。一般的に、1次相転移ではスケーリング則が成り立たないと信じられているが、EBH モデルの 1 次量子相転移ではスケーリング則の存在を示唆する結果を得た。また、初期状態のわずかな違いにより、結果が大きく異なることが分かった。ある初期状態では、古典的なガラス転移に類似した現象を観測し、別の初期状態では、ドメインウォールで囲まれたドメインの形成を観測した。第 6 章では、強い NN 斥力相互作用を持つ 2次元 EBH モデルにおいて出現する DW 相-Supersolid(SS)相-SF 相間の 2 つの 2 次量子相転移クエンチした時の系のダイナミクスを調べる。相関長やトポロジカル欠陥密度を計算し、スケーリング則が成り立つかを調べた結果、1 つの 2 次量子相転移の場合とは異なる結果を得た。さらに、collapse-revival 現象も観測され、ドメインウォールとトポロジカル欠陥との関係についても調べる。第 7 章では、全体のまとめと総括を行う。

論文審査結果の要旨

清水啓太の博士論文は、近年、物理学において理論および実験の両面から多くの注目を浴び、また成果を出し続けている極低温原子系に関する理論的研究である。従来の物理学の進歩はまず初めにそれまでの知識では理解が難しい現象が見つかり、その現象を示す物質や系を記述すると期待されるモデルを構築した後に、理論的にそのモデルを調べるという手順で進められてきた。極低温原子系はレーザー技術の進歩により、原子を絶対ゼロ度付近まで冷却し更に不純物が無く、また原子間相互作用等系のパラメータについて高い制御性を持つ系である。この事実を用いて、提唱された量子多体系のモデルに対して疑似的な系を冷却原子にて構築し実験により直接ターゲットとなる系を調べることが出来るようになった。これを量子シミュレーションと呼ぶ。理論的な研究は、どのような現象が量子シミュレーションできるか、またそこで出現する可能性のある興味深い現象を理論的考察や古典計算機（現在の計算機を意味する）により、提唱することに力点を置く。

清水啓太の博士論文は、系が相転移を起こすときに、その転移を誘起する外部パラメータの変化がゆっくりではあるが有限速度で変化する状況にて、特徴的に起こる現象に関する内容である。この問題は宇宙論的観点からKibbleによって考察され、その後、物性物理学の分野においても同様の現象が送りうることでZureckにより指摘された。宇宙の相転移を再現することは出来ないが、物性現象、例えば超流動現象は良く知られており、実験による詳細な観測が可能である。これまでは有限温度における相転移（超流動や磁性の転移）について観測されてきた。この、有限温度転移に関して、Zurekはその特徴的な物理量、例えば相関長の発展等に関して、特徴的なスケーリング則が成り立つことを予言したが、極低温原子系の実験でそのスケーリング則は確認されつつあるのが現状である。（Kibble-Zurek スケーリング、以下 KZ スケーリング。）

一方、系のパラメータの変化に起因する量子相転移に関する研究も始まった。その、先駆的実験は2015年にBraun達によってなされたが、彼らの実験はモット状態から超流動状態への転移を観測したが、得られた結果ではスケーリング則は成り立つが、KS スケーリングの予言とは矛盾するというものであった。清水啓太の博士論文では、この実験の状況を正確に再現する設定で、対応する転移について主に数値実験的手法により調べ、その有限時間での相転移現象を詳しく調べた。その結果、転移の全貌が明らかとなり、Braun達の実験がKZスケーリングと矛盾する原因を明らかにした。清水啓太は上記の知見をもとに、更に計算手法を改善し、量子一次相転移に関する研究、および複数回転移を起こす物理系について調べ、興味深い現象が起こる可能性を示唆した。

以上の内容を勘案して、清水啓太の博士論文は、博士号取得に十分な内容であると判断する。発表された学術論文は共著であるが、得られた成果は重要であり、また清水啓太はこの研究において問題設定、計算手法の開発と実装等、中心的な役割を果たしている。