

論文審査の結果の要旨

氏名 山本 啓介

本論文は周期ポテンシャル中のボーズ原子系が示す超流動固体状態に関するものであり、特に、粒子間斥力が有限であるソフトコアの場合を、従来よく議論されてきた粒子間斥力が無限大であるハードコアの場合と比較して、その定性的な差異について検討している。具体的には、著者は、ソフトコアのモデルに関して数値シミュレーションを行って、超流動性と自発的な空間並進対称性の破れとが共存する場合があること、すなわち、超流動固体状態が存在することを示した。更に、平均専有数が0.5よりもわずかに少ない場合にも、この固体超流動状態が存在することを示す結果を得た。また、この状態が、単純な空孔の凝縮によるものとは解釈できないことを論じている。

本論文は7章からなる。第1章では、この論文で示される物理的内容が、固体ヘリウム4や最近実験的に実現されるようになった人工的な光格子系の実験と密接な関係をもっていること、さらに、この論文で直接的に解析の対象となっているボーズハバード模型がこれらの物理系を統一的に説明するモデルであることが論じられている。とくに、ハードコアを扱った先行研究の事例が紹介され、ハードコア模型では幾何学的フラストレーションがあるときのみ超流動固体状態の実現例が報告されており、そうでない場合には超流動固体状態の実現例がないことが述べられている。第2章では、超流動固体状態の特徴づけについて述べたあと、ソフトコアボーズハバード模型に対する2006年のLuとYuによる平均場近似の計算結果など先行研究の結果が紹介されている。このなかで、本論文に特に関係する内容として、平均専有数が0.5以上の超流動固体相から0.5以下の超流動固体相の間に転移はなく、連続的につながっていることが紹介されている。

第3章からが著者らによるオリジナルな部分である。第3章の主な内容は、確率的級数展開法に基づく量子モンテカルロ法による3次元系の数値計算結果である。具体的には、絶対零度における、密度、静的構造因子、凝縮体密度、などの物理量が化学ポテンシャルおよびホッピング定数の関数として計算されている。これらの計算結果によって、静的構造因子と凝縮体密度がともに0でない値を持つような条件が存在すること、つまり超流動固体状態が存在することが示されている。更にその条件が絶対零度相図の形で提示されている。特に、超流動固体相は平均専有数が0.5以下の領域にまで広がっていることが特徴である。これは先行研究である平均場理論からは予想されていたが、実際に有限次元系の近似を用いない計算によって確認されたのは、本研究が最初である。第4章では、第3章と同じく量子モンテカルロ法による計算結果が主な内容であるが、第3章とは異なり、ここでは有限温度における特性、とくに温度-ホッピング定数相図が中心である。高温の無秩序相から温度を下げていったときに、最初に凝縮体密度が有限になる超流動転移温度と、最初に静的構造因子が有限になる結晶化転移温度がホッピング定数の関数として、互

いに1点で交わる2本の曲線になる様子が平均場近似とシミュレーションの両方の仕方で示されている。第5章は第3, 4章とは異なり, 1次元系の数値的厳密対角化の手法で得られる準粒子の分散関係に基づくダイナミクスに関する議論が中心である。ここでは常流動状態, 超流動状態, および超流動固体状態の3つが動的応答関数の周波数依存性にどのように反映されるかを論じている。第6章は第3, 4章で得られた平均専有数が0.5以下の超流動固体相の物理的解釈に関するものである。第4章では平均場理論を用いた解析結果の紹介もしているが, この中で粒子間斥力相互作用を大きくしていくと, 相図中の超流動固体相の領域が縮小していき, 相互作用無限大のハードコア極限で超流動固体相が消失することが平均場近似の範囲内で示されている。第6章では, この第4章で紹介された先行研究の結果に基づいて, 0.5以下の平均専有数で実現されている超流動固体が, 単純に空孔が凝縮したものとは解釈できないことを論じている。

本論文の成果中, 特に重要な部分は光格子系などのボーズ原子系を記述するソフトコアボーズハバード模型について, 相図などの基本的な物性を明らかにし, 特に専有数0.5以下の **under-doped** 領域での超流動固体相の存在を立証したところである。この成果は, 超流動固体相の物理的描像の理解にとって有用な知見であり, 今後の極低温ボーズ原子系の研究に影響を持つものと評価できる。また, 数学的に同様の構造をもつ, 低温領域での $S = 1$ 以上のスピンをもった磁性体などにおいて, 本論文で得られた結果が再現される可能性なども期待できる。

本論文は宮下精二氏, 藤堂眞治氏との共同研究であるが, 論文提出者が主体となって数値的解析を行い, さらにその結果を考察したものであり, 論文提出者の寄与が十分なものであると判断する。

以上によって, 博士(理学)の学位を授与できると認める。