

これまでの研究成果

2011 年 4 月 1 日

塚本 光昭

これまで、量子モンテカルロ法を用いた数値計算手法の開発、及びその手法を用いたボース粒子系、量子スピンの研究を行ってきた。それぞれの概要は以下の通りである。

(1) ボース粒子系

低温において、液体 ^4He やアルカリ原子気体等に現れる超流動性について調べるため、多体ボース粒子系を良く記述するモデルであるボース・ハバードモデルを用いて以下の 2 つの点について調べた。

● 2次元コスタリッツ・サウレス転移とランダムポテンシャル

2次元のボース粒子系においては、低温でコスタリッツ・サウレス (KT) 転移を起こし、超流動相が現れることが知られている。我々は化学ポテンシャルが一様ランダムである場合に、この KT 転移及び超流動性がどのように影響を受けるかという点についてボース・ハバードモデルを用いて数値的に調べた。これは、近年実験的に可能になってきた、2次元格子状に作られた光学ポテンシャル中へ原子気体を閉じ込める実験を念頭においている。その結果、ランダムポテンシャル中でも KT 転移が起き超流動性が現れること、また、ポテンシャルのランダムネスを強くしたときに、絶対零度で量子相転移を起こし超流動相が消え、ボースグラス (BG) 相と呼ばれる相が現れることを確認した。さらにこの量子相転移の臨界的性質を明らかにするため、臨界指数 ν を精度よく計算した。

● 準 1次元ナノ多孔体中の ^4He の超流動

理論的には、1次元のボース粒子系では有限温度で超流動相は現れないことが知られている。しかし、1次元的な細長い管状の構造を持つ多孔体 FSM 中に ^4He を閉じ込め、低温でその物性を調べる実験を行った結果、孔径を小さくして 1次元性を強くした場合でも、超流動性が現れるという結果が得られている。我々はこの実験結果を解析するため、多孔体が ^4He 原子に及ぼすポテンシャルを考慮した、より現実に近い準 1次元系を考えて数値計算を行った。その結果、 ^4He 原子は多孔体からの吸着ポテンシャルにより、管内の壁面に沿った方向に相関が発達して超流動性が現れる、という結果を得た。

(2) 量子スピン系

● スピン 1 を持つ Ni 系化合物の量子臨界現象

Ni 系化合物である $\text{NiCl}_2\text{-4SC}(\text{NH}_2)_2$ という物質は、結晶場と平行に磁場をかけて温度を下げていくと、ある温度 T_c で相転移して 3次元的な磁気秩序を持つことが実験によって調べられている。この磁場誘起の相転移はマグノンのボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC) として理解できるため、 $\text{NiCl}_2\text{-4SC}(\text{NH}_2)_2$ は最近実験的に盛んに調べられている。この系は Ni の持つスピン 1 が磁性を担っており、ハイゼンベルクモデルに異方性のある結晶場項 $D \sum_i (S_i^z)^2$ が加わったモデルで記述されると考えられる。我々は量子モンテカルロ法でスピン 1 の系を効率よく計算する方法を開発し、それを用いてこの数値計算を行い、実験と比較して $\text{NiCl}_2\text{-4SC}(\text{NH}_2)_2$ の交換相互作用 J や異方性 D の大きさを求めた。またそれらの値を用いて温度磁場相図や磁化曲線を計算し、実験で得られているものと定量的に一致した結果を得た (研究業績リスト [4,5])。モデル計算と実験結果が一致したことで、 $\text{NiCl}_2\text{-4SC}(\text{NH}_2)_2$ においてマグノンの BEC が起きていることが確認できた。さらに、実験的な観測はまだ行われていないが、この物質に圧力を加えたときに起こる量子相転移についても調べ、臨界指数に \log 補正の効果が現れることを示した。