

平成20年度工学部予算重点配分研究テーマに係る研究報告書

研究課題 「ボース凝縮体の研究」(H20年継続)

プロジェクトグループ名称 超低温実験懇談会

研究代表者；菊池 彦光 (教授・物理工学専攻)

分担者 ；熊倉 光孝 (准教授・物理工学専攻)，高木 丈夫 (教授・物理工学専攻)，光藤 誠太郎 (教授・遠赤外領域開発研究センター)，藤井 裕 (准教授・遠赤外領域開発研究センター)

・配分額 ■■■■■円

研究成果の概要

研究の背景と目的

物性物理学の研究では数 K 以下における低温測定とそれができる低温環境の整備が必須である。ある種の物質系では温度を下げるとボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) とよばれる量子的な相転移が生じる。この現象はボソンとよばれる素励起が存在する場合には普遍的に存在するもので、現在最も活発に研究されている研究課題である。福井大学においては低温研究に不可欠な液体ヘリウム液化装置が更新され本学における低温物理研究の基盤が形成されつつある。本研究プロジェクトの目的は、福井大学における低温物理学の研究体制を確立することである。具体的には、磁性、レーザー分光、量子液体 (液体ヘリウム) といった低温物理学の多彩な分野において現れる BEC 及び BEC が関連する現象について多角的な研究を行い、相互に議論を行いながら、究極的には新しい現象を見いだす事を目標としている。

研究成果

昨年に引き続き、磁性、レーザー分光、量子液体の各研究グループ内で研究活動を行いながら、低温物理学に関する有機的な研究体制確立を目指してグループ間で不断の連絡をとりあった。磁性グループでは2009年2月に、量子効果が顕著に働く磁性体 (量子スピン系) に関する研究会を福井大学において行い国内の有力な研究者が参加して活発な議論を行った。以下に各グループの研究成果についてまとめる。

・磁性 (菊池、光藤、藤井)

量子効果が顕著にはたらく幾何学的フラストレートしたかごめ格子反強磁性体 $Zn_xCu_{4-x}(OH)_6Cl_2$ に対する核磁気共鳴実験をおこない、亜鉛量 x が0から1へと増加すると共に系の基底状態が秩序状態 (マグノン凝縮相) から非秩序状態へと系統的に変化する事を明らかにした。更に磁場中での中性子実験によって $x=1$ のパイロクア型磁性体の中間秩序相の励起構造を明らかにした。

・レーザー分光 (熊倉)

希薄原子気体のボース凝縮に関する研究では、今年度、基底状態 $5s\ ^2S_{1/2}(F=2, m_F=2)$ の ^{87}Rb 原子について、ボース凝縮体を生成することに成功した。これまでレーザー冷却により磁気トラップに約 1 mK の原子気体を捕獲することができていたが、トラップ寿命が未だ短く、凝縮体の生成には不十分なものであった。

そこで、トラップから原子を飛散させる迷光の処理や、加熱を引き起こす磁場変動の低減化などを進め、トラップ特性の改善を行った。また、レーザー冷却条件の最適化なども同時に行い、効率的な蒸発冷却に必要な原子個数（約 2×10^8 個）と温度（ $660 \mu\text{K}$ 程度）を実現した。凝縮体の生成は、この磁気トラップ（最低磁場 1.9 G 、トラップ周波数：動径方向 $2\pi \times 18.2 \text{ Hz}$ 、軸方向 $2\pi \times 157 \text{ Hz}$ ）に閉じ込めた原子気体に対し、ラジオ波（RF）を照射することによって行った（RF 蒸発冷却）。始めに周波数 25 MHz の RF を照射し、高いエネルギーを持つ原子のみを選択的にトラップから蒸発させた。その後、RF 周波数を低周波側に約 4 分かけて連続掃引し、よりエネルギーの低い原子を徐々にトラップから蒸発させ、原子気体全体の冷却を進めた。その結果、 1.4 MHz の RF 周波数で原子気体は約 680 nK にまで冷却され、最終的に 1.355 MHz においてボース凝縮体への相転移が確認された。得られた凝縮体の原子数は 1.8×10^5 個程度、化学ポテンシャルは約 76 nK であった。今後、蒸発冷却の最適化などを進めて原子数を増大し、量子渦ダイナミクスの観測や原子波回路の実現など、凝縮体を利用した新しい研究テーマを展開していく計画である。

・量子液体（高木）

グラファイト上にヘリウム粒子を吸着させると、第1層目は固相となり第2層目は、第1層目に対して4対7の数密度において固相の整合層をなす。この相は4/7相と呼ばれるが、この相に空孔を付加（第2層目粒子数を減らす）すると融解し、二次元的な超流動状態が発現することが予想されている。そこで、この4/7相を経路積分法により第一原理から計算を行い検証した。計算に際しては、第1層目をヘリウム4粒子で最大密度 12.0 個/(nm平方)に設定し、第2層目はヘリウム3粒子とした。これは、第2層目の粒子交換頻度の計算を最終目的とし、その磁性を調べるためである。付加した空孔密度に対してBinderパラメータを計算して、系の固液転移を判定した。二次元においてBinderパラメータは、その値が $2/3$ のとき完全結晶であり、 $1/3$ のとき液体となる。計算結果は、空孔濃度がゼロの場合も系はサイズ依存性をもち、準長距離秩序状態であることが理解できる。また、空孔密度が2%から3%の間で、系の融解が認められた。これに伴い、第2層目がヘリウム3の系では、磁性および有効質量が大幅に変化することが予想され、実験事実とも整合した。今後、第2層目をヘリウム4とし同様な固液転移を確かめ、超流動の発現を検討する予定である。

主要な研究論文

- 1) "¹H-NMR study of $S = 1/2$ frustrated antiferromagnet $\text{Zn}_x\text{Cu}_{4-x}(\text{OH})_6\text{Cl}_2$ varying from kagomé ($x = 1$) to pyrochlore ($x = 0$)", [H. Kikuchi](#), Y. Kubo, [Y. Fujii](#), J. Phys.: Conf. Series **145** (2009) 012009 (4 pages).
- 2) "External Magnetic Field Effects on a Distorted Kagome Antiferromagnet", J.-H. Kim, S. Ji, S.-H. Lee, B. Lake, T. Yildirim, H. Nojiri, [H. Kikuchi](#), K. Habicht, Y. Qiu, K. Kiefer, Phys. Rev. Lett. **101**, 107201(4 pages) (2008).
- 3) "¹H-NMR study of the idle-spin magnet $\text{Cu}_3(\text{OH})_4\text{SO}_4$ ", Y. Fujii, Y. Azuma, [H. Kikuchi](#), Y. Yamamoto, J. Phys.: Conf. Series **145** 012061 (4 pages) (2009).
- 4) "Quantum Fluid Dynamics of Rotating Superfluid ^3He in Aerogel", T. Kunimatsu, K. Izumina, A. Matsubara, M. Kubota, [T. Takagi](#), Y. Bunkov, T. Mizusaki, J. Low Temp. Phys. **150** 435-444 (2008).
- 5) "Spin Wave and Vortex Excitations of Superfluid ^3He -A in Parallel-Plate Geometry", M. Yamashita, K. Izumina, A. Matsubara, Y. Sasaki, O. Ishikawa, [T. Takagi](#), M. Kubota, T. Mizusaki, Phys. Rev. Lett. **101**, 025302 (2008).