

論文の内容の要旨

論文題目 極低温フェルミオン原子 ${}^6\text{Li}$ における s 波及び p 波対形成

氏 名 稲田 安寿

近年、レーザー冷却等の手法を用いて原子集団を冷却することにより、量子縮退状態の中性原子気体を得る技術が確立された。これにより、新しい観点からの物性研究が可能となり、注目を集めている。極低温原子系の特徴は、系の性質を支配するほとんどすべてのパラメーターを変えられることにある。特に、フェッシュバハ共鳴により原子間の相互作用を引力から斥力に自在に変えることができることが、極低温原子系の特徴である。このような極低温原子系のパラメーター制御技術を用いることで、固体の電子系、液体 He 系とは異なったアプローチで量子凝縮系の理論の構築、検証が可能となった。

中でも極低温フェルミオン原子系は、電子系との類似性から固体物理学で未解明の超流動や磁性といった強相関物理の解明につながる研究が可能な系である。これまでに、s 波の相互作用を共鳴的に増強することで、これまで未踏のパラメーター領域であった BCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer)–BEC (ボース・アインシュタイン凝縮)クロスオーバー領域における超流動状態が実験的に確認された。現在もこの超流動相の研究が精力的に進められており、電子系の超伝導との関連も議論されるようになってきている。

また最近では、光格子中の原子、低次元系、長距離で異方的な相互作用を持つ原子や分子、有限の角運動量をもった分子状態等も研究されるなど、極低温原子気体を用いた新たな量子多体系を構築しようという試みもなされている。

本研究では、極低温フェルミオン原子 ${}^6\text{Li}$ を用いて超流動状態を実現し、その性質を調べることを目的とした。そのために本研究では原子をトラップするための超高真空装置を立ち上げ、原子の冷却・トラップを行い、量子縮退したフェルミオン原子 ${}^6\text{Li}$ 原子気体を得た。さらに、フェッシュバハ共鳴を用いることで原子間相互作用を変化させ、縮退原子気体の様々な性質を調べられるようになった。この系において s 波超流動相 (BCS–BEC クロスオーバー) の探索および、p 波の超流動相実現を目指す研究を行った。

s 波のフェッシュバハ共鳴を誘起するような磁場を印加することにより、斥力相互作用下では二つのフェルミオンからなる分子の BEC、引力相互作用下では多体効果による形成されるフェルミオン対の凝縮相が実現できる。この2つの相は、相互作用が発散する領域をまたいで繋がっており、そこでは状態はスムーズに変化することから、この領域は BCS–BEC クロスオーバー相と呼ばれる。本研究ではクロスオーバー領域の超流動転移点の決定方法を確立し、その状態量の測定を行った。強く相互作用する極低温原子系では、

原子の密度分布は相互作用によって決まるので、密度分布からの温度の測定や凝縮状態の検出が困難である。そこで本研究では以下のような方法で、BCS-BEC クロスオーバー領域における超流動転移点の同定を行った。超流動転移点を捉えるために急峻に磁場を変化させ、フェルミオン対を強く束縛した分子状態に射影するという手法を適用した。磁場を急峻に変化させた後の分子の重心運動量分布を観測すると、運動量がゼロの状態にある分子がマクロに存在することが確認できた。このとき、磁場を変化させる速度は系の時間発展を特徴付ける速度に比べて十分急峻であるため、系が熱緩和することで運動量がゼロの分子が生成されたとは考えにくい。この現象の機構は完全には解明されていないが、定性的にはフェルミオン対の波動関数は強く束縛された分子の波動関数と有限の重なりを持つことから、磁場掃引によりフェルミオン対が分子に射影されたと理解することができる。つまり、磁場掃引後に重心運動量がゼロの状態の分子がマクロな量存在したということは、重心運動量がゼロのフェルミオン対がマクロに存在する超流動状態であった証拠であると解釈できる。本研究ではこの手法に加えて、ブラッグ散乱という運動量空間上の分光手法を用いることで運動量がゼロの成分の分子をより高感度に検出し、超流動転移点の決定を行った。一方、超流動転移点における温度測定は（１）BEC 領域（斥力相互作用）、（２）ユニタリー極限（散乱長が発散）、（３）BCS 領域（引力相互作用）において、それぞれ別の方法で温度測定を試みた。（１）の領域では、強く相互作用する分子に対して、急峻に磁場を変化させることで、系を弱く相互作用する分子状態に射影し、射影後の分子の運動量分布から、初期の分子の温度を決定した。（２）の領域では、相互作用が発散する領域（ユニタリー極限）においてビリアル定理を使って系のエネルギーを測定し、そこから温度を求めた。（３）の領域では、原子集団のエントロピーの測定を行い、それから温度を求めた。

（１）の領域において、転移温度は弱く相互作用するボソンモデルによる理論で予測される転移温度と一致した。（１）の方法をユニタリー極限にも適応したところ（２）の方法による温度測定と一致した。なお、（２）の方法による結果は、他グループの異なるアプローチによる実験結果とも一致していることが確認された。さらに、（３）の領域の転移温度は本研究において初めて測定に成功し、理論予測との比較を行った。

本研究ではさらに、極低温原子系における p 波超流動の実現可能性を調べる実験を行った。p 波超流動状態はエネルギーギャップは異方性を持ち、多様な物質相を示すことから、非常に興味深い研究対象である。極低温原子系において、p 波超流動状態の実現可能性を調べるためには、まず p 波フェルミオン対の安定性や熱緩和時間などを知る必要がある。本研究では、 ${}^6\text{Li}$ 原子の p 波分子に着目し研究を行った。s 波分子の場合には、フェッシュバッハ共鳴近傍で分子のサイズは大きいため、サイズの小さい分子状態への緩和ロスレートは小さい。これに加えて、分子間の弾性散乱レートは増強されるため熱緩和時間は短い。それゆえ、s 波の分子は冷却が効率的にでき、安定な BEC が得られている。一方、p 波の分子は p 波散乱における遠心力ポテンシャルにより、フェッシュバッハ共鳴近傍でも分子のサイズが小さい。また、p 波分子間の散乱レートもフェッシュバッハ共鳴近傍で

増強されるかどうか知られていない。それゆえ、p波分子のBEC状態が安定に存在するかどうかは自明ではない。そこで本研究ではまず、 ${}^6\text{Li}$ の縮退フェルミ原子ガスからp波フェッシュバッハ分子の生成と検出を目指した。p波分子は、光トラップされた縮退フェルミ原子に対して、安定化した磁場を掃引しp波フェッシュバッハ共鳴を交差することで生成した。分子を原子から生成する効率は最大15%程度であったため、分子の直接的観測のためには残った原子をトラップから取り除く必要があった。そこで、分子生成直後に、原子のみに共鳴する光を入射して原子を取り除くことで、トラップ中に分子のみが存在する状態を実現した。そして、トラップ中の保持時間に対する分子のロス測定を行うことにより、分子間の非弾性散乱レートを抽出した。また、トラップ中に原子と分子が共存する状態におけるロスの測定結果から、原子-分子間の非弾性散乱レートを求めた。さらに、生成された分子の熱緩和の次定数から、弾性散乱レートを見積もった。これらの測定結果により、弾性散乱レートに対する非弾性散乱レートの比は2程度と見積もられ、更なる分子の冷却は困難であることが分かった。また、我々の現在の実験条件では、p波分子の位相空間密度は 4×10^3 であり、分子のBEC実現には、分子数を増やす、あるいはより低温の分子を生成するなどの条件が必要で、更なる実験的工夫が必要であることが見いだされた。

上記のように、本研究では極低温フェルミオン原子 ${}^6\text{Li}$ を使って、s波及びp波のフェルミオン対について研究を行った。s波のフェルミオン対においては、BCS-BECクロスオーバー領域における超流動相の転移温度測定を行った。また、p波分子に対して寿命測定と熱緩和時間測定を行い、超流動状態の実現可能性について議論を行った。これらの成果は、超流動状態に新たな知見を与えると共に、極低温原子系の物性研究における基礎を確立するものである。