

トラップされたボソン・フェルミオン 凝縮系の静的性質

都立大理 宮川 貴彦 (共同研究者：藪博之、鈴木徹)

アルカリ原子のボーズアインシュタイン凝縮 (B E 凝縮) の成功以来多くの実験やその計画が行われている。極低温の系を取り扱える技術を持ったことは様々な系の量子力学的性質を明らかにする可能性が得られたことを意味している。

B E 凝縮はもちろんボソンに特質な現象であるが、殻効果や超流動現象などフェルミオンの量子縮退性についても大いに関心をもたれており、理論的予測や実験的検討がなされている。

今回我々が注目したのは統計性の異なる粒子が混合している系での量子縮退現象である [1]。異種粒子からの影響を受けることによって同種粒子系で保っていた性質がどのような変化を受けるかを理解することは非常に興味深い問題である。

ボソンとフェルミオンが共存する量子縮退系としては ^3He - ^4He 混合液体が代表的である。原子核物理の分野では統一模型の奇核子と偶核コアとの相関や、 π 及び K 凝縮などの中間子-核子系などで研究が行われて来た。

極低温のアルカリ原子系の特徴は、粒子間相互作用が弱く散乱実験から得られる散乱長によりそれが一意的に決定されてしまうことである。また粒子密度が小さいため平均粒子間隔が散乱長に比較して大きい。そのためこの系では原子をその取り扱いが簡単な希薄気体として記述される。これより相互作用の詳細によらない混合凝縮系の一般的性質を研究することができる。これらのことを背景にして本研究では次のような結果を得た。

・ボソン・フェルミオン凝縮系の静的性質を記述する基礎方程式の導出

粒子は希薄気体として扱うことができるので粒子間相互作用を局所型相互作用で置き換えた。またこのときアルカリ原子は磁気トラップにより偏極されながら閉じ込められている。

ボソンは絶対零度で全粒子が B E 凝縮を起こしている。そこで秩序変数を導入しそれが従う Gross-Pitaevski 方程式によりボソン系を記述した。

フェルミオンは偏極の効果でパウリ排他律より同種粒子間の散乱が無視されるとした。さらにこの排他律から粒子数が増大するにつれフェルミオンは高エネルギー状態に多くの粒子が分布する。そのため半古典近似を適用した。

- ・ボソン・フェルミオン結合を任意に取った場合の量子縮退現象の変化($N_B \gg N_F$)

この定式化を元に混合凝縮系の基底状態の性質を数値計算を用いて調べた。

異種粒子間結合が斥力の場合 B E 凝縮体にフェルミオンによる影響は現れない。フェルミオンはポテンシャル中心に多数存在する B E 凝縮体の効果で中心密度が減り全体として外側に広げられた分布をするようになる。またボソン-フェルミオン結合がボソン-ボソン結合よりも強くなるとフェルミオン分布のピークは凝縮体表面に移り、それが十分強くなると凝縮体の周りに核構造を形成する。

また異種粒子結合が引力的に働く場合、それが強ければ B E 凝縮体にもフェルミオンによる変化が現れる。このときボソン、フェルミオンともに分布はポテンシャル中心に引き寄せられ基底エネルギーは大きな変化とともに小さくなる。

- ・ボソン・フェルミオン凝縮系が期待される K アイソトープの考察（異種粒子効果を調べるための実験予測）

この元素は自然界に 2 つのボソン (^{39}K , ^{41}K) と 1 つのフェルミオン (^{40}K) が存在し、最近では磁気トラップの成功が報告されるなど最もボソン・フェルミオン凝縮系の実現が期待されている系である。また K_2 分子の散乱実験の解析結果 [2] として ^{39}K - ^{40}K 間は斥力、 ^{41}K - ^{40}K 間は引力結合であると予測されている。

^{39}K - ^{40}K 混合系と ^{41}K - ^{40}K 混合系の 2 つを取り扱い、その粒子数依存性や調和振動子ポテンシャルの角振動数依存性などを調べた。そしてこれらの系では、フェルミオンの (B E 凝縮体による) 変化を見るためには $N_B \gg N_F$ の環境をつくることで、ボソンの (フェルミオンによる) 変化を見るためには強くトラップされたフェルミオンとの混合系をつくることでそれが達成されることがわかった。

今後の課題としては先ずこの有限混合凝縮系の集団励起現象を調査する。その後混合系でのフェルミオン超流動状態の可能性を議論し、更に様々な外部変数を変化させた場合における巨視的量子縮退状態の形成崩壊課程について粒子統計性と絡めて研究していく予定である。

参考文献

- [1] K. Molmer ; Phys. Rev. Lett. **80**, 1804 (1998)
- [2] R.Cote and A.Dalgarno ; Phys. Rev. A **57**, R4118 (1998)