

論文審査の結果の要旨

氏名：前田 賢志

本論文は英文で書かれ、本文6章 (section) と5つの補章 (appendix) から構成されている。第1章は序論で、この研究のテーマである磁気双極フェルミ気体に関する実験的背景と理論的問題の設定、それに対するこの論文で展開する中性子星物質中での中間子凝縮、特に ρ 中間子凝縮との類似性が概説され、その類似性に基づく基底状態の記述の概観、そして論文の構成と残りの各章の簡単な要約が述べられている。第2章は高密度核物質中で発現の可能性が調べられてきた中間子凝縮で開発された理論形式をつかって磁気双極子型相互作用をする低温の原子多体系を記述する方法が詳しくレビューされている。この章は3節に分かれ、第1節では本研究の基本的フォーマリズムについての説明があり、ゲージ場 (磁場) による相互作用の記述と2体ポテンシャルによる記述の等価性の証明、第2節では π 中間子凝縮の記述でつかわれた「自己無撞着バンド理論」による弱凝縮状態と強凝縮状態の記述、第3節ではやはり π 中間子凝縮で発展された臨界点近傍における秩序変数によるギンツブルグ・ランダウ展開がフェルミ面の変形の効果をつり入れて計算されている。第3章はこの学位論文のコアを成す章で、2成分双極フェルミ気体の相構造において、AFSC (Antiferrosmectic-C) 相と呼ばれる新しいタイプの相の発現の可能性が論じられている。この章は2節に分かれ、第1節では AFSC 相の1次元的に局在化した結晶構造を記述する変分波動関数を用いた AFSC 相の基底状態エネルギーの計算が行われ、第2節ではその結果を用いて、常磁性フェルミ気体や歪んだフェルミ面をもつ強磁性の FN (Ferro-Nematic) 相との比較が行われ、双極フェルミ気体の相図の全容が論じられている。第4章では、前章で展開した理論計算をより現実的な2成分双極フェルミ気体の場合に一般化する方法と計算の道筋が説明されている。最後の第5章は、この論文のまとめと主要な結論に当てられ、補章では本文中で省略された計算の詳細が記載されている。

序論で述べられているように、この研究の主題は、1970年代後半に核物理で展開された高密度中性子星物質中での中間子凝縮との類似性を使って、最近のレーザー技術を用いて作られた極低温・低密度の磁気双極モーメントを持った原子・分子のフェルミ気体の相図を調べようというものである。特に、著者達が注目したのは磁気双極子間の相互作用が ρ 中間子交換による核力と同じスピン依存性を持つテンソル型の2体相互作用をもたらす点である。 ρ 中間子凝縮はこのテンソル力の1次の効果を平均場として取り込んだ相として、核子のスピンの層状に反強磁性的に配列した EALS (Extended-Alternating-Layer-Spin) 構造をもつことが国広によって変分計算で示されている。この核子構造は、もともと π 中間子凝縮相の記述に玉垣・高塚等によって考案された ALS (Alternating-Layer-Spin) 構造を、

ρ 中間子交換のテンソル力と π 中間子交換のテンソル力との違いを考慮して変形したものであるが、1次元的に局在化した結晶構造を記述する変分波動関数を用いる点では同じである。1次元的な局在化は凝縮が十分進行した場合に実現することが、松井等によってブロッホ状態を使って π 中間子状態を記述する自己無撞着バンド理論によって明らかにされており、 π 中間子凝縮ではまだ局在化の起こっていない臨界点近傍で秩序変数を使って展開するギンツブルグ・ランダウ理論による記述も松井等によってされている。この論文では第2章でこれらの先行研究を詳しく紹介している。

本題である双極フェルミ気体についてはイリノイ大学の Lev 教授のグループの実験があり、その理論では、Ferro-Nematic 相と呼ばれる新しい相の存在が Fradkin 等のイリノイ大学グループによって指摘されていた。この相はフェルミ面の楕円形への変形を伴った強磁性スピン相であり、スピン交換相互作用の効果で発現する相である。著者等は、磁気双極子間の相互作用のテンソル力の引力的効果を1次の効果として取り込める、 ρ 中間子凝縮を伴った核子の EALS 構造に類似した AFSC 相の発現可能性を検討した。この相は1次元的に局在化した結晶構造をもって、スピンの層上で層面に平行に配列し、その向きが隣り合う層で交互に向きを変える反強磁性相であるが、その名前は液晶の命名法を用いている。著者達は、 ρ 中間子凝縮相の記述にもちいられた変分波動関数と同じものを持ちいて、基底状態のエネルギーを計算し、それを他の相と比較して相構造を決めている。その際、特徴的な相互作用を2つに分類し、テンソル型の双極相互作用と、スピン交換力に効く接触型の相互作用の強さを用いて、それぞれの相互作用の強さを変えることにより、どのような相が安定になるかを調べている。

著者達の計算結果によると、相互作用が弱い場合は通常の常磁性相が、接触型の相互作用が強くなると FN 相が安定に、テンソル型の双極相互作用が強いと、接触型相互作用の強さの如何に関わらず、著者等の提案した AFSC 相が安定となると結論している。ただ、この計算では局在化した変分波動関数を用いて基底状態エネルギーを評価しており、局在化のまだ起こっていない相転移点近傍についてはまだ今後の研究に残された課題としている。また、テンソル型の双極相互作用を強くしていくと、いずれ負の非圧縮率を持つ不安定領域が現れ、この領域はこの研究の手法では扱えない対象となっている。実験はまだ始まったばかりで、今後の実験結果が注目される。

この論文でまとめられている研究は米国イリノイ大学の Gordon Baym 教授と東京大学で指導教員であった初田教授との共同研究に基づいているが、本人の寄与が十分あり、博士号を授与するのに十分な内容であると審査員一致で判定した。