

論文審査の結果の要旨

氏名 松尾 衛

本論文は4章と補遺A、Bからなる。

第1章は、イントロダクションであり、研究の背景と目的について述べられている。宇宙初期に実現されていたとされるクォーク・グルオンプラズマを生成し、その性質を探ろうとする実験がアメリカブルックヘブン国立研究所のRHICと呼ばれる重イオン衝突型加速器を用いて行われている。強い相互作用の基礎理論である量子色力学(QCD)においては、低温では閉じこめ、カイラル対称性が自発的に破れた相が実現するが、高温では非閉じこめ、カイラル対称性が回復した相が実現すると考えられている。本研究の目的は、高エネルギー重イオン衝突実験における終状態の非平衡動力学を平衡状態におけるカイラル相転移との関係を明らかにしながら記述することにある。

第2章では、まず、1成分実スカラー ϕ^4 模型を用いて、論文提出者らの定式化の概要を説明した後に、平衡状態における相転移を調べている。論文提出者らは、量子中間子場を古典的な平均場(カイラル凝縮体)と量子ゆらぎ(中間子励起)に分離する。量子ゆらぎに対しては、生成消滅演算子を導入し、生成消滅演算子の2次形式の期待値で与えられるWigner関数を定義する。Wigner関数は、 $\langle a^\dagger a \rangle$ だけでなく $\langle a^\dagger a^\dagger \rangle \langle a a \rangle$ の形の2次形式も同時に考慮して、2行2列の行列として一般化された形で導入する。そして、平均場とWigner関数によって記述される量子ゆらぎの従う方程式を求める。平均場が記述するカイラル凝縮体に対しては非線形Klein-Gordon方程式が、Wigner関数が記述する中間子励起に対しては量子Vlasov方程式が導出される。物性物理においてBose-Einstein凝縮(BEC)を量子運動論の立場から論ずる研究がなされているが、その定式化に論文提出者らの定式化は類似したものになっている。得られたカイラル凝縮体に対する非線形Klein-Gordon方程式と、中間子励起に対する量子Vlasov方程式からなる方程式系を平衡状態に適用すると、平衡系における通常の定式化でのHartree近似の枠内でよく知られたギャップ方程式となる。このとき、カイラル相転移の次数は、平衡系における平均場近似の結果と同じく、1次となる。

第3章では、論文提出者らの定式化を $O(N)$ 線形シグマ模型に拡張し、平衡状態における相転移及び系の集団運動の量子論的性質を調べている。定式化の拡張は、ほとんど自明であり、カイラル相転移の次数は、第2章における1成分スカラー模型の場合と同様に、1次となる。一般に連続対称性が自発的に破れた系ではGoldstoneの定理の帰結として質量ゼロのモードが現れる。しかし、本論文で用いられた平均場近似の枠内では、ギャップ方程式を解いて得られる中間子の質量はゼロにはならずGoldstoneの定理が破れているよう

に見える。論文提出者らは、系の集団運動の分散関係から、ゴールドストーンモードが音波モードとして回復されることを示した。さらに論文提出者らは音波モードの速度を計算し、温度がゼロの極限では光速に一致し、相転移近傍ではゼロに近づくことを示した。

第4章では、これまでの内容のまとめと将来への展望が述べられている。現在の定式化を非平衡状態に適用することが重要な課題である。

補遺 A、B では、煩雑になるのを避けるために本文中では省略した式の導出等を、それぞれ、1成分実スカラー ϕ^4 模型、 $O(N)$ 線形シグマ模型の場合に陽に与えている。

論文提出者らによる定式化は、カイラル相転移の問題において、古典的な平均場とそのまわりの量子ゆらぎを平衡系においても非平衡系においても矛盾なく同時に記述することが可能な点で新しく、重イオン衝突実験における終状態の理論的理解のために重要であると思われる。この定式化を用いて本論文で論文提出者が示したことは、他の定式化を用いて既に知られていることではあるが、定式化の正しさをチェックするためには必要である。今後の非平衡状態への適用が重要な課題である。

なお、本論文第2章及び第3章は、松井哲男との共同研究であるが、論文提出者が主体となって分析及び検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

従って、博士（理学）の学位を授与できると認める。