

論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博 士 (理 学)	氏名	下 地 寛 武
学位授与の要件	学位規則第4条第①・2項該当		
論文題目			
<p>Chiral Symmetry Breaking in Four-fermion Interaction Model with Thermal and Finite-size Effects</p> <p>(有限温度・有限サイズ効果を伴う4体フェルミ相互作用モデルにおけるカイラル対称性の破れ)</p>			
論文審査担当者			
主 査	教 授	稲垣 知宏 (情報メディア教育研究センター)	
審査委員	教 授	志垣 賢太	
審査委員	教 授	野中 千穂	
〔論文審査の要旨〕			
<p>理論物理学の基本的な概念に対称性とその自発的破れがある。フェルミ粒子の右巻き、左巻きの変換の下での理論の不変性であるカイラル対称性は、フェルミ粒子が質量を持つことで破れる。物質の大部分の質量はカイラル対称性の自発的破れによって与えられていると考えられており、この破れた対称性が、高温、高密度では、回復すると予想される。このことから、極限状況でのカイラル対称性の破れを明らかにすることは、宇宙初期における質量生成機構とそれに伴う相転移現象の解明につながる可能性を持つ研究課題であり、これまでに多くの研究が行われてきた。</p> <p>本論文は、系の温度とサイズが持つカイラル対称性の破れへの影響と、カイラル対称性の破れと温度、サイズの効果に関連した物理現象を明らかにすることを目的としている。カイラル対称性を破るような強いフェルミ粒子間の相互作用を持つ単純なモデルに4体フェルミ相互作用モデルがある。このモデルでは、相互作用の強さを表す結合定数が唯一のパラメータとなっている。温度やサイズといった環境の影響を考えない場合、この結合定数が臨界値より大きいときカイラル対称性が破れる。2次元では結合定数の臨界値は0で、4体フェルミ相互作用によりカイラル対称性は破れてしまう。4次元では、結合定数が質量の負の次元を持ち、くりこみ不可能となるので、理論は正則化の手法に依存する。3次元でも、結合定数は負の質量次元を持つが、$1/N$展開の意味でくりこみ可能になることが知られている。本論文では、2次元と3次元の4体フェルミ相互作用モデルを取り上げることで、正則化依存性なしに、カイラル対称性の破れの相構造を明らかにし、温度、サイズの効果に関連した物理現象として粒子数、圧力等の熱力学的量と安定な系のサイズについて議論している。</p> <p>本論文は5章から構成される。第1章では、ゲージ理論である量子色力学における相互作用が引き起こすカイラル対称性の破れと、予想されている有限温度、密度相構造、符号問題による第一原理計算の困難さ、相構造の解明に利用される有効モデルが紹介され、有限サイズ効果に注目して、これまでの研究成果が一覧されている。第2章では、任意次元の</p>			

Nambu-Jona-Lasinio 模型とその有効ポテンシャルの 4 次元での正則化パラメータ依存性、Gross-Neveu 模型の臨界結合定数とくりこみ群によるスケール変化、カイラル対称性を破る質量パラメータの効果、温度、化学ポテンシャルといった熱的效果の導入方法について概観している。第 3 章では、カイラル対称性の破れに対する有限サイズ効果に注目する。カイラル対称性の破れ自体は時間にも空間にもよらず一様で一定であるという仮定の下で、2 次元、3 次元の Gross-Neveu 模型の有効ポテンシャルを $1/N$ 展開の最初のオーダーで計算し、サイズと境界条件に関するカイラル対称性の相構造を明らかにしている。また、これまでの有効ポテンシャルによる解析では見落とされていたゼロ点エネルギーの変化を考慮して、カシミア効果を解析し、サイズを小さくしていった時に空間に働く力が引力から斥力に変化することで系のサイズがある大きさに留まること、つまり系のサイズが安定になるようなことは起きないことを発見している。第 4 章では、サイズと境界条件の効果に加え、温度、化学ポテンシャルの効果を検討し、カイラル対称性の相構造を詳細に分析している。ここで用いられた、有効ポテンシャルが最小になる基底状態だけでなく、有効ポテンシャルの全ての極値に着目した相構造の解析は、従来の研究には見られない新規性を持った解析手法である。また、熱力学ポテンシャルの詳細な解析により、温度、化学ポテンシャルの効果により、サイズを小さくしていった時に空間に働く力が引力から斥力に変化する場合が生じることを明らかにしている。

本論文で用いられた、ゼロ点エネルギー変化の寄与、有効ポテンシャルの新しい分析は、対称性の破れに関するさまざまな理論へ適用可能であり、今後、周辺領域への波及効果が期待される。また、本研究が予想した安定なサイズについては、今後の技術の進歩により、実験的な観測が可能になることが期待される。

以上、審査の結果、本論文の著者は博士（理学）の学位を授与される十分な資格があるものと認める。

公表論文

1. “Precise Phase Structure in Four-fermion Interaction Model on Torus”,
Tomohiro Inagaki, Yamato Matsuo and Hiromu Shimoji,
Progress of Theoretical and Experimental Physics 2022 (2022) 1, 013B09.

参考論文

1. “Four-fermion Interaction Model on $M^{D-1} \otimes S^1$ ”,
Tomohiro Inagaki, Yamato Matsuo and Hiromu Shimoji,
Symmetry 11 (2019) 4, 451.