

氏 名	アオキ ケンジ 青木 健児
所 属	理工学研究科 物理学専攻
学 位 の 種 類	博士（理学）
学 位 記 番 号	理工博 第 288 号
学位授与の日付	平成 31 年 3 月 25 日
課程・論文の別	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題名	In-medium modification of Nambu-Goldstone boson properties induced by wavefunction renormalization under partial restoration of chiral symmetry 媒質中におけるカイラル対称性の部分的回復のもとでの波動関数くりこみによる南部・ゴールドストーンボソンの性質の変化（英文）
論文審査委員	主査 教 授 安田 修 委員 教 授 政井 邦昭 委員 准教授 セルゲイ ケトフ 委員 客員教授 慈道 大介

### 【論文の内容の要旨】

自然界の基本的な相互作用の一つである強い相互作用は量子色力学（Quantum Chromodynamics: QCD）で記述される。QCD の結合定数はエネルギー領域に依存して変化するため、異なるエネルギー領域では異なる性質を示す。高エネルギーにおいてクォークとグルーオンが基本的な自由度であり、摂動計算が可能であるほど結合定数は小さい。他方、低エネルギーでは摂動計算が不可能なほど結合定数は大きくなる。この時「カラーの閉じ込め」や「カイラル対称性の自発的破れ」といった非摂動的な効果により実験で観測されるハドロンの性質が規定される。従って、観測されるハドロンの性質を QCD の基本的な自由度であるクォーク・グルーオンから理解するためには「カラーの閉じ込め」や「カイラル対称性の自発的破れ」の理解が不可欠である。本論文ではカイラル対称性が自発的に破れる機構を現象論的に明らかにするために原子核中のハドロンの性質を研究する。

カイラル対称性の自発的破れは QCD 真空の相転移現象であるので高エネルギー・高密度の極限的な環境において、ひとたび破れた QCD 真空の対称性が回復すると考えられている。また、そのような極限的な状況に至らずとも、原子核のような有限核子密度の環境において QCD 真空のカイラル対称性は部分的（不完全）に回復すると予想される。カイラル対称性の部分的回復に伴い原子核中のハドロンの性質は変化する。特にカイラル対称性の回復に敏感なプローブとして南部・ゴールドストーンボソン(NG ボソン)の原子核中の性質が研

究されている。その際、NG ボソン-原子核束縛系（中間子原子）や NG ボソン-原子核散乱のような実験的に測定できる系が用いられる。

カイラル対称性の部分的回復に付随する NG ボソンの性質の変化を与える補正として波動関数くりこみが重要だと考えられている。波動関数くりこみが、カイラル対称性の部分的回復のような、真空の変化に関係する補正だとすれば、波動関数くりこみにより原子核中の NG ボソンの性質を統一的に理解できる可能性がある。例えば、原子核中の  $\pi$  中間子は波動関数くりこみの観点から研究されている。真空中における  $\pi$  中間-核子相互作用が原子核中において斥力的に増大する実験事実は"missing repulsion"として問題になっていた。先行研究では、 $\pi$  中間子-原子核相互作用を記述する光学ポテンシャルの S 波相互作用項が調べられた。そして、波動関数くりこみにより"missing repulsion"が解消されると明らかになり、波動関数くりこみの重要性が知られるようになった。また、 $\pi$  中間子原子と  $\pi$  中間子-原子核弾性散乱を実験的に測定し、理論的な考察を加えることでカイラル対称性が 30% 程度回復することを示唆する研究成果が得られている。

本論文では NG ボソンの一種である(1) $\pi$  中間子と(2)K 中間子の原子核中における振る舞いを波動関数くりこみの観点から考察する。ハドロン多体系を研究するので、NG ボソンをはじめとするハドロンが理論の基本的な自由度となるカイラル摂動論に基礎を置く。

(1) $\pi$  中間子-原子核相互作用の P 波相互作用項に対する波動関数くりこみの影響を取り入れた新しい光学ポテンシャルを構築する。そして、光学ポテンシャルの S 波相互作用項で重要な役割を果たした波動関数くりこみが P 波相互作用項に対してどのような役割を果たすか明らかにする。線形密度近似で自己エネルギーを構成し、波動関数くりこみを計算した。その結果、P 波相互作用項に対する波動関数くりこみは、相互作用を数十%増大させることが明らかになった。しかしながら、波動関数くりこみを取り入れることで、実験事実を再現する現象論的なポテンシャルとの差異が大きくなってしまう。この事実は、波動関数くりこみに加えて、その他の媒質効果を取り入れることにより、更に現実的な光学ポテンシャルを構築する必要性を示唆する。

(2)  $\pi$  中間子と同様に、原子核中の K 中間子-核子相互作用は真空中と比べて斥力的に 14-34%程度増大することが実験データの解析から知られている。この相互作用の増大を波動関数くりこみの観点から調べることは、系統性の観点から重要である。特に  $\pi$  中間子の場合には含まれなかったストレンジネス  $S=+1$  の効果を明らかにできる可能性がある。そのために原子核中の K 中間子に対する波動関数くりこみの影響を研究した。核子のフェルミ運動を考慮した自己エネルギーから波動関数くりこみを計算した結果、原子核中の K 中間子-核子相互作用は真空中と比べて数%増大することが明らかになった。この結果は波動関数くりこみが原子核中における K 中間子-核子相互作用の増大の一部を説明することを意味する。より現実的な原子核中の K 中間子の性質を記述するためには更に密度の高次の影響

を系統的に研究する必要がある。

原子核中における  $\pi$  中間子と  $K$  中間子の研究を通して、波動関数くりこみは媒質効果として重要な役割を果たすことを示す結果が得られた。また、波動関数くりこみだけではなく、その他の媒質効果を取り入れることは正しく現象を記述するために重要だと明らかになった。そのため、今後は媒質効果を系統的に取り入れる枠組みである媒質中のカイラル摂動論を用いた、より詳細な研究が必要になる。本論文は、そのような詳細な研究に至るための最初のステップとして位置づけることができるだろう。