

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月20日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540267

研究課題名（和文） 原子核におけるパイ中間子の重要性とテンサー最適化シェルモデルによる定量的記述

研究課題名（英文） Importance of pion in nuclear structure and quantitative description of nuclei in the tensor-optimized shell-model

研究代表者

土岐 博 (TOKI HIROSHI)

大阪大学・名誉教授

研究者番号：70163962

研究成果の概要（和文）：パイ中間子（湯川粒子）の原子核での役割の重要性を指摘し、その理論的取扱い方法を確立した。パイ中間子は強いテンソル力を持ち、テンサー最適化シェルモデルでの定量的記述を追求する中で、原子核の標準理論であるブリュックナー理論を超える拡張されたブリュックナー理論を発見した。現在はその理論的枠組みで原子核の計算を行っている。

研究成果の概要（英文）：We point out the importance of pion (Yukawa particle) in nuclear structure and establish a theoretical method to treat the pion in nucleus. Pion exchange interaction contains a strong tensor interaction and we used the tensor optimized shell model for its quantitative description. We arrived at a new theory, which includes the standard Brueckner theory. We are calculating finite nuclei in the new framework.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：パイ中間子、テンソル力、テンサー最適化シェルモデル、核物質の状態方程式、拡張されたブリュックナー理論、2粒子2空孔励起状態、強相関係の多体理論

## 1. 研究開始当初の背景

原子核物理ではパイ中間子は非常に重要な役割を果たしていることが少数多体系の計算で明らかになっていた。しかし、重い核ではパイ中間子の扱い方法が確立しておらず、現象論的なシェルモデルでの記述方法しか無かった。

他方では、様々な実験データではこれまで

のシェルモデルでは説明出来ない多くの現象も存在していた。特に、高い運動量が伴う現象では理論的な解釈が出来ていなくてそのまま放置されていたデータも多くある。この現状を打破することが可能なモデルであるテンサー最適化シェルモデルが我々のグループで提唱されていた。

(1) この科研費でのプロジェクトの始まる

前にシェルモデルではどのようにすればテンソル力が扱えるかが提案された。その方法をテンサー最適化シェルモデルという。

(2) 一方では、ハートレーフォックの方法でのパイ中間子の扱いは角運動量が0の場合のみで確立されていた。

(3) 核物質の状態方程式(EOS)の理論計算により、相対論的な取扱いは非常に重要であり、EOSは密度に大きく依存する、非常に大きな斥力の効果をうみだすことが分かっていた。

(4) さらに格子 QCD 理論でもかなり現象論的な核力と近い核力を導出することが可能になってきていた。

## 2. 研究の目的

軽い核ではパイ中間子の重要性が分かっていたので、重い核で一般的に使われているハートレーフォック法にうまく取り込むことが研究の大方針としてあった。

(1) ハートレーフォック法を拡張して、テンサー最適化シェルモデルの教える2粒子2空孔(2p2h)状態を変分空間に入れて定式化を行う。

(2) その定式化を行い、実際に数値計算を行い、パイ中間子の重要性を示すことを目的とした。

(3) テンサー最適化シェルモデルが定量的にどれくらいの良さであるかを少数多体系の方法で調べることも重要である。その計算を通して、TOSM 近似の良さを定量的に調べることも課題とした。

## 3. 研究の方法

ハートレーフォック法はテンソル力を扱えない。しかもテンソル力はシェルモデル的な状態から高い運動量状態へ転移する時に大きな引力的な効果を生み出す。従って、ハートレーフォック状態(HF)を用意して、テンソル演算子が有限の行列要素を作る2粒子2空孔状態(2p2h)の全てを変分空間に取り込む。

(1) HF 状態と 2p2h 状態の間の行列要素を計算する。

(2) 2p2h 状態間の行列要素の計算を行う。この行列要素には pp 間、hh 間、さらには ph 間の相互作用が含まれる。

(3) これらの行列要素の全てを知った上でどれだけの状態間の混合が起こるかを計算する。

(4) その結果を HF 方程式に入れることで強いテンソル相関を含む効果を取り込んだ HF 計算を行う。

(5) 少数多体系の方法で TOSM 法ではどれくらいの良さでテンソル力を扱うことができるかを計算する。さらにはどのようにすれば TOSM 近似を改善出来るかも調べる。

## 4. 研究成果

新しく得られた理論を拡張されたブリュックナーハートレーフォック理論(EBHF)と呼ぶ。

(1) この EBHF 理論の適応範囲は原子核物理に限られず、他の多体系にも適応出来る。従って、EBHF 理論の定式化の詳細を書いた論文を発表した。この理論体系は有限核、無限核物質さらにはハイパー原子核で現在適応されている。

(2) EBHF 理論は BHF 理論を内包する。従って、BHF 理論を EBHF 理論の近似としてとらえることが可能である。その結果 BHF 理論は多くの欠陥を持っていることが明らかになった。

(3) まずは無限系での計算を行う。BHF 理論では高い運動量成分を陽に含まない。その結果、波動関数の高い運動量成分がもたらす運動エネルギーの寄与は取り込まれていない。そのことで、核物質のエネルギー(状態方程式)は少し大きな束縛エネルギーを持つようになっていた。そのことを数値計算で示した。

(4) この成果を論文として投稿した。さらには高運動量成分を計算することができたので、中性子星の冷却現象にも適応することが可能であることを指摘した。

(5) 有限の原子核の計算のプログラムを作成中である。現在はそれぞれの行列要素を計算した段階である。

(6) その影響を HF 方程式に取り込むプログラムを作成中である。

(7) 最初は C12 と O16 の計算を目指している。シェルモデルのマジック数や強いスピン軌道力の効果がパイオンによりもたらせることを示すことができるようにプログラムを整備している。

(8) テンサー最適化シェルモデル(TOSM)の計算結果は非常に良いものの正確に計算した場合に較べてほぼ10%位テンソル力の効果を過小評価している。その原因を確かめるために少数多体系の方法での計算を行った。

(9) TOSM 的な波動関数を少数多体系の方法に取り込み、2p2h 配位でどこまでテンソル力の効果を取り込むことができるかを定量化した。その成果を論文として発表した。

(10) TOSM 計算を Li や He アイソトープの構造の計算に適応した。原子核の励起スペクトルにテンソル力が重要な効果を持つことを示した。

(11) TOSM 法をハイパー核に適応すべくシェルモデルコードを拡張した。計算結果を得ることができるようになった。

(12) パイ中間子の原子核での効果を実験でクリアーに見るには安定に運転出来る加

速器の開発は不可避である。この科研費期間にはマクスウェル方程式から電磁波の放射吸収を伴う交流理論を導出した。そのことにより、どのようにすれば加速器の電磁ノイズを削減出来るかを明らかにした。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 16 件)

①H. Toki and K. Sato, J. Phys. Soc. Jan. 81 (2012) 014201

Multiconductor transmission-line theory with electromagnetic radiation (査読有)

②H. Shen, H. Toki, K. Oyamatsu and K. Sumiyoshi, Astro phys. J. Supplement 197 (2011) 20

Relativistic Equation of State for Core-Collapse Supernova Simulations(査読有)

③T. Myo, A. Umeya, H. Toki and K. Ikeda, Phys. Rev. C84 034315, 2011

Role of the tensor interaction in He isotopes with a tensor-optimized shell model(査読有)

④Y. Ogawa and H. Toki, Nucl. Phys. A860, 22-40, 2011

Relativistic chiral mean field model for finite nuclei(査読有)

⑤ Y. Ogawa and H. Toki, Annals of Physics 326, 2039-2052, 2011

Extended Brueckner-Hartree-Fock theory with pionic correlation in finite nuclei(査読有)

⑥K. Horii, M. Takashina, T. Furumoto, Y. Sakuragi, H. Toki, Phys. Rev. C81, 061602, 2010

Elastic scattering of B-8 from C-12 with internal three-cluster structure of B-8(査読有)

⑦H. Chen, A. Hosaka, H. Toki, S. Zhu, Phys. Rev. D81, 114034, 2010

Light Scalar Meson sigma (600) in QCD Sum Rule with Continuum(査読有)

⑧ H. Chen, V. Dmitrasinovic, H. Toki, Phys. Rev. D82, 034011, 2010

Pseudoscalar Mesons in the SU(3) Linear Sigma Model with Gaussian Functional Approximation(査読有)

⑨H. Chen, V. Dmitrasinovic, H. Toki, Phys. Rev. D82, 034011, 2010

Pseudoscalar Mesons in the SU(3) Linear Sigma Model with Gaussian Functional Approximation(査読有)

⑩W. Wen, J. Hu, H. Toki and H. Shen, Prog. Theor. Phys. 123, 811-823, 2010

Role of Form Factor in Relativistic Hartree-Fock Approach for Finite Nuclei(査読有)

⑪J. Hu, H. Toki, W. Wen and H. Shen, Eur. Phys. J. A 43, 323, 2010

The role of the form factor and short-rang correlation in the relativistic Hartree-Fock model for nuclear matter(査読有)

⑫Hu J., Toki H., Wen W., Shen H., Phys. Lett. B687, 271-274, 2010

Relativistic Hartree-Fock Model with Bare Nucleon-Nucleon Interaction for Neutron Rich Matter (査読有)

⑬ Sun B., Toki H., Meng J., Phys. Lett. B683, 134-139, 2010

Relativistic Description of BCS-BEC crossover in Nuclear Matter(査読有)

⑭Myo T., Toki H., Ikeda K., Prog. Theor. Phys. 121, 511-531, 2009

Tensor Optimized Shell Model with Bare Nucleon-Nucleon Interaction for 4He(査読有)

⑮Toki H., and Sato K., J. Phys. Soc. Japan. 78, 094201 (8 pages), 2009

Three-Conductor Transmission-Line Theory and Origin of Electromagnetic Radiation and Noise(査読有)

⑯J. Hu, Y. Ogawa, H. Toki, A. Hosaka and H. Shen, Phys. Rev. C79 024305 (2009)

Extended relativistic chiral mean field model for nuclear matter (査読有)

[学会発表] (計 8 件)

①土岐博 佐藤健次、日本物理学会大会 (2012, 3. 27)

アンテナ過程を含む多導体伝送線路理論と電磁ノイズの削減

②H. Toki, International Symposium in Beihang (2011. 11. 3)

Tensor interaction in Exptended Brueckner-Hartree-Fock theory

③H. Toki, International Conference in Erice (2011. 9. 19)

The importance of pion and extended Brueckner-Hartree-Fock theory

④土岐博、若手夏の学校での講演 (2011. 8. 16)

場の理論と実験から学ぶパイ中間子が織りなす原子核物理

⑤H. Toki and K. Sato, International Conference on hadron in Osaka (2009. 11. 16)

New multiconductor transmission-line theory and the mechanism of noise generation

⑥土岐博、日本物理学会大会(2010. 9. 13)  
パイ中間子が織りなす核子多体系の物理

⑦土岐博、日本物理学会大会(2010.9.11)  
強いテンソル力による原子核での高運動量  
成分と核反応実験

⑧H. Toki, International Conference in  
Valencia (2010.6.22)  
Pion and relativistic chiral mean field  
model for finite nuclei

[その他]

ホームページ等

[www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~toki](http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~toki)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

土岐 博 (大阪大学・名誉教授)

研究者番号：70163962

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：