

平成21年12月30日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2006年度～2008年度  
 課題番号：18540269  
 研究課題名（和文）パリティ電荷射影を伴う相対論的カイラル平均場モデルによる原子核の研究  
 研究課題名（英文）Relativistic chiral mean field model with parity and charge projection for nuclear structure  
 研究代表者  
 土岐 博 （TOKI HIROSHI）  
 大阪大学・核物理研究センター・教授  
 研究者番号：70163962

## 研究成果の概要：

南部理論ではカイラル対称性が自発的に破れ、核子に質量が生じ、擬スカラー粒子であるパイオンが出現する。パイオンが引き起こすテンサー力の取り扱い法は非常に難しいがこの研究課題ではそれを相対論的カイラル平均場（RCMF）モデルとして確立した。RCMFモデルではパイオン相関を2粒子2空孔励起の変分関数で表現し、核子対が短距離で大きな存在確率を持つことを変分関数の中に取り込むことが重要であることを示した。成果としてパイオンが大半の引力を与えることを示し、さらには基底状態の波動関数には非常に大きな運動量成分があることを示した。今後の原子核物理の発展の基礎を与えた。

## 交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,300,000	0	1,300,000
2007年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	630,000	4,030,000

研究分野：理数系科学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：相対論的平均場・パイ中間子・カイラル対称性

## 1. 研究開始当初の背景

原子核物理ではパイ中間子の効果を陽に取り込む研究はこれまで無かった。一方で、質量が10までの軽い核では少数多体系の枠組みでの厳密計算が可能で、3体力を導入することでそれらの原子核の質量や波動関数を計算することができるようになった。パイ中間子の重要性がそれらの少数系の計算

で指摘された。それを受けて原子核に非相対論的な方法でシェルモデルの枠組みを使い、テンサー力を取り込む方法を開発した。しかし、相対論的に記述する方法は無く、我々はまずは射影の方法で計算する方法を開発する必要があった。さらには、無限系でのパイ中間子の役割を取り扱う方法も同時に開発する動機も存在していた。

## 2. 研究の目的

軽い核では相互作用を扱うのに最も便利な相対座標を使って厳密計算を行っていた。この方法では重い原子核に計算を拡張することは困難である。重い核でパイ中間子の効果を計算するためにはシェルモデルの方法を使うことが要請される。したがって、シェルモデルの枠組みで原子核を記述する方法を開発し、実際に計算することにより、パイ中間子の役割を示すことである。さらにはパイ中間子の役割を定量的に示すことも研究目的である。

原子核多体系を定量的に記述するには相対論的枠組みを使うことが重要である。特にカイラル対称性のラグランジアンは相対論的に記述されており、パイ中間子を扱うことができる相対論的多対理論を構築することが重要である。パイ中間子が作り出す核子間の強いテンサー力をテンサー最適化の方法で定式化し、実際に計算してパイオンの重要性を指摘することを目的とする。

## 3. 研究の方法

最初に相対論的に原子核を記述する方法を開発する。その方法を相対論的カイラル平均場 (RCMF) モデルとよぶことにする。その基本は平均場近似に  $2p-2h$  の波動関数を付け加えることにより、テンサー力の効果を最も効果的に取り込むことである。

原子核の基底状態を RMF のものと  $2p-2h$  状態の一次結合で表現する。その上でそれらの係数と RMF の単粒子状態の波動関数で変分を行う。この方程式はブリュックナーハートレーフォック (BHF) の拡張した形式を持っており、BHF モデルの基礎づけを行うことができた。

さらにこの方程式を数値的に解くコードの開発を行う。最初に He4 でその良さを示し、次には C12 と O16 の計算を行う。

## 4. 研究成果

非常に大きな研究成果を得ることができた。それらを箇条書きにする。

1. 南部理論であるカイラル対称性を持つラグランジアンを原子核の多対理論計算に直接使う方法を開発した。この方法により、原子核におけるカイラル対称性の役割、特にその自発的破れの部分的回復の度合いの議論を可能にした。
2. 相対論的カイラル平均場(RCMF)モデルを開発した。RCMF モデルはパイオンの作り出す強いテンサー力を  $2p-2h$  の枠組みで変分的に取り扱う。従って、テンサー力の影響を陽に取り込んだ平均場理論を構築したことになる。この方法は原子核でのブリュックナー計算の基礎付けとなる。

3. RCMF モデルの方程式は美しい形を持っている。本格的な数値計算を始めるにあたってパイオンの効果が最大限に出るように定式化を行わずに He4 の計算を行った。強いテンサー相関を含むシェルモデル的な波動関数を得ることができた。さらに非相対論での計算結果との比較を行い、その良さを示すことができた。
4. その上でヘリウム、炭素、酸素の計算を行っている。炭素などのマジック数をもつ原子核の束縛エネルギーが大きくなることを示した。さらには O16 のように LS 閉殻ではパイオンの引力の効果が弱められることも示すことができた。
5. これらの一連の数値計算のなかで、Li11 のハロー構造にテンサー力が重要な役割を示すことができた。

今後の課題としては次のものがあげられる。早急に明らかにしていく必要があるものである。

1. 軽い原子核の少数多体系計算では3体力の重要性が指摘されている。RCMF 理論においては相対論的に扱っているため反粒子の効果は自然に取り込まれている。一方で、デルタ粒子の効果を自然に取り込むことも  $2p-2h$  の波動関数をデルタにまで拡張することで可能である。デルタを含む RCMF モデルの構築をする必要がある。
2. 現在は C12 や O16 などの比較的軽い原子核の数値計算を行っている。これをもっと重い Ca40 や Ni56 の原子核に広げる必要がある。そのためには数値計算の速度を上げる必要がある。
3. 実験との対応がこれまではできていない。高い運動量成分を持ち込むことにより、新たな物理量が出現する。実験研究でこれらの方向が打ち出されてきている。早急に物理量の計算の定式化を行う必要がある。

## 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 29 件)

1) *Ogawa Y, Toki H, Tamenaga S, Haga A*, Prog. Theor. Phys. 122 477-498 (2009)

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

3) *Ramos A, Magas VK, Oset E, Toki H*, Nucl. Phys. A804 219-230 (2008)

- 4) *Setsuo Tamenaga*, *Hiroshi Toki*, *Akihiro Haga*, and *Yoko Ogawa*, Nucl Phys A811 306-328 (2008)
- 5) *Myo, Takayuki, Kikuchi, Yuma, Kato, Kiyoshi, Toki, Hiroshi, Ikeda, Kiyomi*, Prog. Theor. Phys. 119, 561-581 (2008)
- 6) *Hiroshi Toki, Carmen Garcia-Recio, Juan Nieves*, Phys. Rev. D 77 034001 (2008)
- 7) *Nakagawa Y, Nakamura A, Saito T, Toki H*, Phys. Rev. D 77 034015 (2008)
- 8) *Sugimoto S, Toki H, Ikeda K*, Phys Rev C76 054310 (2007)
- 9) *Myo T, Kato K, Toki H, Ikeda K*, Phys Rev C76 024305 (2007)
- 10) *Ogawa Y, Toki H, Tamenaga S*, Phys. Rev. C 76 014305 (2007)
- 11) *Sugimoto S, Ikeda K, Toki H*, Nucl. Phys. A789 155-163 (2007)
- 12) *Scholten O, Tamenaga S, Toki H*, Phys. Rev. C75 055203 (2007)
- 13) *Haga A, Horikawa Y, Toki H*, Phys. Rev. C 75 044315 (2007)
- 14) *Ramos A, Magas VK, Oset E, Toki H*, Eur. Phys. Journ. A 31 684-686 (2007)
- 15) *Myo T, Sugimoto S, Kato K, Toki H, Ikeda K*, Prog. Theor. Phys. 117 257-274 (2007)
- 16) *Nakagawa Y, Nakamura A, Saito T, Toki H*, Phys. Rev. D 75 014508 (2007)
- 17) *Sugimoto S, Ikeda K, Toki H*, Phys. Rev. C 75 014317 (2007)
- 18) *E. Hiyama, M. Kamimura, A. Hosaka, H. Toki, M. Yahiro*, Physics Letters B 633, 237-244 (2006)
- 19) *H. Shen, F. Yang, H. Toki*, Prog. Theor. Phys, 115, 325-335 (2006)
- 20) *V. Dmitrasinovic, H. Toki*, Annals of Physics 321, 355-401 (2006)
- 21) *Y.Ogawa, H. Toki, S. Tamenaga, S. Sugimoto, K. Ikeda*, Phys. Rev. C 73, 034301 (2006)
- 22) *L.S. Geng, H. Toki, E.G. Zhao*, Journal of Physics G32, 573-582 (2006)
- 23) *L.S. Geng, J. Meng, H. Toki, W.H. Long, G. Shen*, Chin. Phys. Lett. 23, 1139-1141 (2006)
- 24) *Y. Nakagawa, A. Nakamura, T. Saito, H. Toki, D. Zwanziger*, Physical Review D 73, 094504 (2006)
- 25) *E. Hiyama, M. Kamimura, A. Hosaka, H. Toki, M. Yahiro*, Few-Body Systems 38, 91-96 (2006)
- 26) *E. Oset, H. Toki*, Physical Review C 74, 015207 (2006)
- 27) *V.K. Magas, E. Oset, A. Ramos, H. Toki*, Physical Review C 74, 025206 (2006)
- 28) *K. Sato, H. Toki*, Nucl. Instrum. & Meth. A 565, 351-357 (2006)
- 29) *J. Meng, H. Toki, S.G. Zhau, S.Q. Zhang, W.H. Long, L.S. Geng*, Progress in Particle and Nuclear Physics 57, 470-563 (2006)
- 〔国際会議など発表〕 (計 13 件)
- 1) Tensor optimized shell model and hypernuclei  
International Conference in Sendai, Japan, Dec. 17, 2008
- 2) Tensor optimized shell model and the role of pion in finite nuclei  
France-Japan Seminar in Paris, France, Sep. 30, 2008
- 3) Tensor optimized shell model and the role of pion in nuclei

International Conference in Almunecar, Spain, Sep. 27, 2008

4)SU(2)<sub>c</sub> PNJL model and hadronization at finite temperature and density  
Seminar in Granada, Spain, Sep. 22, 2008

5)Tensor optimized shell model and the role of pion in nuclei  
Seminar in Granada, Spain, Sept. 19, 2008

6)Tensor optimized shell model and role of pion in nuclear physics  
Seminar in Muenchen, Germany, August 26, 2008

7)Relativistic mean field approach for nuclei and nuclear matter with application to supernovae  
Seminar in Muenchen, Germany, Aug 11, 2008

8)Extended Chiral Mean Field Model for Finite Nuclei  
Seminar in Beijing, China, March 10, 2008

9)Relativistic Chiral Mean Field Model for Finite Nuclei  
Japan-Hungary Seminar in Hungary, Oct. 6, 2007

10)Relativistic Chiral Mean Field Model for Finite Nuclei  
Seminar in Muenchen, Germany, June 6, 2007

11)Relativistic Chiral Mean Field Model for Finite Nuclei  
Seminar at Catania, Italy, Sep. 22, 2006

12)Relativistic Chiral Mean Field Model for Finite Nuclei  
International Conference in Erice, Italy, Sep.18, 2006

13)Relativistic chiral mean field approximation with projection and the tensor correlation in <sup>4</sup>He

International Conference in Ooty, India, June 10, 2006

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

土岐 博 (TOKI HIROSHI)

大阪大学・核物理研究センター・教授

研究者番号：70163962