

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究 (C)  
 研究期間：2006～2009  
 課題番号：18540290  
 研究課題名（和文）原子核の新しい殻構造とスピン依存型遷移の理論的研究

研究課題名（英文）Theoretical studies on new shell structure of nuclei  
 and spin dependent transitions

研究代表者

鈴木 俊夫 (SUZUKI TOSHIO)  
 日本大学・文理学部・教授  
 研究者番号：70139070

研究成果の概要（和文）：

$\pi$  中間子交換によるテンソル力の効果を有効に取り入れた核内有効相互作用を構築することによって、原子核の新しい殻構造、すなわち崩壊線近傍における魔法数の変化等の殻進化や中性子過剰核の特異な電磁遷移現象を説明することに成功した。新しい殻模型相互作用は、スピン依存型遷移の強度分布を変化させる。スピン自由度の励起を伴うニュートリノ - 原子核反応等に適用し、超新星爆発時にニュートリノ過程が元素合成 (Li, B 等の軽元素や Mn 等の合成) に与える影響を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

New shell model interactions which properly take into account important roles of the tensor force induced mainly by pion-exchanges are constructed. They can explain well new phenomena of exotic shell structure of nuclei, that is, shell evolutions such as changes of magic numbers toward drip lines and exotic electromagnetic transitions in neutron-rich nuclei. Strength distributions of spin dependent transitions are found to be modified by the new interactions. They are applied to neutrino-nucleus reactions in stars, and effects on nucleosynthesis (synthesis of Li, B and Mn etc.) during supernova explosions are examined.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	600,000	0	600,000
2007年度	900,000	270,000	1,170,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	2,600,000	600,000	3,200,000

研究分野：原子核理論

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：殻模型、ガモフ・テラー遷移、磁気双極子遷移、テンソル力、三体力、  
 ニュートリノ - 原子核反応、元素合成、電子捕獲反応

## 1. 研究開始当初の背景

最近の理化学研究所を含む内外での不安定核ビーム実験の進展に伴って蓄積された豊富な実験データの解析によって、安定核領域から離れてドリップ線近傍領域に近づくと、殻構造の変化が現れ新しい魔法数が出現することが明らかになってきた。その殻構造の変化と新魔法数の出現には、核力のスピン・アイソスピン依存項、特にテンソル力が重要な役割を果たしていることがわかってきた [Otsuka, Suzuki et al., Phys. Rev. Lett. 95, 232502 (2005)]。また、モンテカルロ手法等の発展により大規模な殻模型計算が可能となり、sd 殻、pf 殻でより精密な新しい相互作用が得られ、実験との整合性も著しく改善されるようになった。

このような実験と理論の目覚ましい発展の状況の下、申請者は、核力のスピン・アイソスピン部分を増大させることでこれまでの p 殻核の殻構造ハミルトニアンを改良し、原子核のスピン依存型遷移やモーメントがどのような影響を受けるかを研究してきた [Suzuki, Fujimoto, Otsuka, Phys. Rev. C67, 044302 (2003)]。その結果、安定核領域においても  $p_{1/2}$  -  $p_{3/2}$  軌道間の混合が従来の相互作用の場合より弱まり、ガモフ・テラー遷移の減少効果が小さくなって実験との整合性が改善される場合が多くあることを示した。また、新しい相互作用（今後、SFO と引用する）を用いることによって、p 殻核の磁気モーメントの実験値との一致が系統的に著しく改善されることを明らかにした。一方、これらのスピン・アイソスピン力の改良は、主として相互作用のテンソル力成分の変化に対応していることを示した。新しい相互作用では、テンソル力によるモノポール成分が  $j_{>}=0+1/2$  -  $j_{<}=0-1/2$  軌道間では引力、 $j_{>} - j_{>}$ 、 $j_{<} - j_{<}$  軌道間では斥力になるというテンソル力本来の性質を保持していることを明らかにした。

## 2. 研究の目的

本研究課題の目的は、殻構造の変化がスピン依存型遷移に及ぼす影響をより一般的に核領域を拡げて調べると共に、スピン・アイ

ソスピン依存型核力の重要性を一層明らかにすることである。特に次の点に着目する。

(1) 殻構造の変化がより顕著に現れるドリップ線近傍核でのスピン依存型遷移の研究を行う。中性子過剰核のガモフ・テラー遷移、磁気モーメントおよびスピン双極子遷移における殻構造の変化による強度の増減や分散の特徴を明らかにする。また、スキーン、ハローの効果がこれらの遷移、特にスピン双極子遷移にどのように現れるかを明らかにする。

(2) 改良された殻模型ハミルトニアンを用いた核構造に基づいて、スピン依存型遷移によって引き起こされるニュートリノ - 原子核反応の研究を行う。反応断面積が従来の結果と比べてどの程度変化するかを明らかにするとともに、超新星爆発時の星の中で元素合成に対する影響を調べる。特に超新星爆発時の星の中で軽元素合成ネットワークに重要な役割を担っていると考えられる  $^{12}\text{C}$  や  $^4\text{He}$  等を標的とした反応に着目する。また超新星爆発時に大量に生成されると期待される星のコアを形成する Fe, Ni 等 fp 殻核を標的とする反応にも研究を拡張し、重元素合成に及ぼす影響を探る。

(3) スピン・アイソスピン依存型の核力、特にテンソル力と 2 体のスピン軌道力が殻構造の変化に果たす役割を系統的に明らかにする。また、モノポール項に対するテンソル力、 $\pi$  中間子の重要な役割を明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1) 軽い中性子過剰核、特に炭素同位体での殻構造の変化とそのスピン依存型遷移に及ぼす影響を研究するため、SFO 相互作用を、p-sd 殻間は  $\pi + \rho$  中間子交換のテンソル力を、sd 殻ではモノポール項の補正を加えて改良する。有効一粒子エネルギーの同位体依存性の特徴を調べながら、 $^{16-19}\text{C}$  での準位と電磁遷移の特異性を研究する。

(2) 改良された殻模型ハミルトニアン SFO (p 殻)、および GXPF1 (fp 殻)に基づいて、DAR (decay-at-rest) ニュートリノおよび超新星ニュートリノによるニュートリノ - 原子核反応断面積を計算する。ガンマ線、粒子

放出チャネルへの分岐比をハウザー・フェッ  
シュバッハ統計理論を用いて計算し、各チャ  
ネルごとの荷電交換および中性カレント反  
応断面積を求める。超新星爆発時の星の中で  
元素合成に対するニュートリノ過程の効果  
を、天文分野の専門家の助けを得ながら元素  
合成ネットワークコードを用いて計算する。

(3) テンソル力による有効一粒子エネルギー  
の崩壊線近傍までの変化を種々の殻で計  
算し、実験との整合性を調べる。また、 $\pi + \rho$   
中間子交換のテンソル力と簡単な中心力  
で、モノポール項の一般的な性質と整合性  
のある普遍的な核内核力を構築する。

#### 4. 研究成果

(1) ① 中性子炭素過剰核の電磁遷移の特異  
性、特に  $^{17}\text{C}$  における磁気双極子遷移の減少  
の異常性と  $^{16,18}\text{C}$  における電気四重極遷移の  
特異性が、テンソル力成分とアイソスピン  
 $T=1$  のモノポール項を改良したハミルトニ  
アンによって殻構造の変化をうまく取り入  
れることで説明できることがわかった。

②  $^{19}\text{C}$  のエネルギー準位とガモフ・テラー遷  
移の研究から、 $^{19}\text{C}$  のハローの性質を特定し、  
一中性子分離エネルギーの値を導き出すこ  
とができた。

(2) ① 新しい殻模型ハミルトニアンを用い  
て、超新星ニュートリノ、加速器ニュートリ  
ノによるニュートリノ-原子核反応の研究  
を行った。特に  $^4\text{He}$ ,  $^{12}\text{C}$  からの荷電変換反応、  
中性カレント反応の断面積を求め、それら  
が従来の結果に比べて増大すること、この増  
大は超新星爆発時の元素合成、特に、軽核  
 $^7\text{Li}$ ,  $^{11}\text{B}$  の合成率の増大をもたらすことを示  
した。また、ニュートリノ振動の生成率への  
影響を調べ、生成率の比  $^7\text{Li}/^{11}\text{B}$  が混合角  $\theta_{13}$   
の値を決める一つの方法である事を再確認  
した。

② 一方、fp 殻における新しい殻模型ハミ  
ルトニアンを用いて、 $^{56}\text{Ni}$  からのガモフ・テ  
ラー遷移、ニュートリノ-原子核反応の研究  
を行い、陽子放出断面積が従来のハミルト  
ニアンの結果より増大し、Mn 元素合成率も増  
大することを示した。ガモフ・テラー遷移強  
度の分布・分散の違いが、元素合成ニュ  
ートリノ過程に及ぼす影響の重要性を示  
した。

(3) 核力のテンソル成分の改良が、崩壊  
線近傍での殻構造の進化・変化に重要な役  
割を

果たしていることを明らかにした。特に、  
 $^{47}\text{Ar}$  での  $N=28$  shell-gap の減少、K 同位体  
での  $N=20\sim 28$  の殻の進化・変化 ( $d_{5/2} - d_{3/2}$   
gap の変化) が、テンソル力の効果で説明  
できることを示した。さらに、二体のスピ  
ン・軌道力も特に p-s 軌道間で重要であり、  
殻構造の進化に重要な役割を担っているこ  
とを示した。

(4) 高温、高密度の星内部での電子捕獲反  
応の研究を行った。新しい殻模型ハミルト  
ニアン GXPF1 によるガモフ・テラー遷移強  
度分布を用いて、Ni、Fe 同位体からの電子  
捕獲反応率を評価し、高温 ( $T_9 > 5$ ) では従  
来の KB3G に比べ概ね捕獲率が 30%ほど減  
少し、低温 ( $T_9 < 2$ ) では低励起エネルギー  
状態での遷移分布に敏感に依存すること  
を見出した。特に、 $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{60}\text{Ni}$  では低温  
で捕獲率が増大する。

(5) 中性子数  $N=126$  の r-過程での滞留核  
のベータ崩壊を殻模型を用いて研究した。  
ガモフ・テラー遷移および第一禁止遷移  
からの寄与を共に評価して、アイソト  
ーンの寿命を求めた。第一禁止遷移が  
寿命を著しく減少させることを示した。  
また、この短寿命が r-過程での元素  
合成、特に質量数  $A=195$  付近の第三  
ピーク核の合成に及ぼす影響を調べた。

(6) ① デルタ粒子の励起に起因する三  
体力を評価し、殻模型有効相互作用の  
アイソスピン  $T=1$  のチャンネルでの 2  
体力のモノポール項およびマルチポ  
ール項への寄与を sd 殻核、fp 殻核  
において求めた。この三体力は中性子  
過剰核では斥力として働き、酸素同  
位体、カルシウム同位体の基底状態  
のエネルギーの振舞いを良く説明す  
ることができる。特に、酸素では  $^{24}\text{O}$   
が崩壊線の境界の核になることを示  
すことができた。

② また、モノポール項の性質に基づ  
き、ベアなテンソル力の性質をその  
まま保った普遍的な核内有効相互作  
用を構築した。この相互作用を用い  
て、崩壊線近傍での魔法数の変化  
等の殻進化、すなわち有効一粒子エ  
ネルギーの変化を多くの核領域で記  
述することに成功した。

#### 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 20 件)

- ① T. Otsuka, T. Suzuki, M. Honma, Y. Utsuno, N. Tsunoda, K. Tsukiyama, M. Hjorth-Jensen, “Novel features of nuclear forces and shell evolutions in exotic nuclei”, *Physical Review Letters* **104**, 012501/1-4 (2010). 査読有
- ② T. Suzuki, M. Honma, K. Higashiyama, T. Yoshida, T. Kajino, T. Otsuka, H. Umeda, K. Nomoto “Neutrino-induced reactions on  $^{56}\text{Fe}$  and  $^{56}\text{Ni}$ , and production of  $^{55}\text{Mn}$  in population III stars”, *Physical Review C* **79**, 061603(R)/1-4 (2009). 査読有
- ③ T. Suzuki and T. Otsuka, “Exotic Electromagnetic Transitions in Neutron-rich Carbon Isotopes” *Int. Journal of Modern Physics* **E18**, 1992-1996 (2009). 査読有
- ④ T. Suzuki and T. Otsuka, “Structure of Light Neutron-rich Nuclei and Important Roles of Tensor Interaction”, *AIP Conference Proceedings* **1165**, 54-56 (2009). 査読無
- ⑤ T. Suzuki and T. Otsuka, “Exotic magnetic properties in  $^{17}\text{C}$ ”, *Physical Review C* **78**, 061301(R)/1-5 (2008). 査読有
- ⑥ T. Yoshida, T. Suzuki, S. Chiba et al., “Neutrino-nucleus reaction cross sections for light element synthesis in supernova explosions”, *The Astrophysical Journal* **686**, 448-466 (2008). 査読有
- ⑦ H. Sagawa, X.R. Zhou, T. Suzuki and N. Yoshida, “Possible shape coexistence and magnetic dipole transitions in  $^{17}\text{C}$  and  $^{21}\text{Ne}$ ”, *Physical Review C* **78**, 041304 (R)/1-5 (2008). 査読有
- ⑧ T. Suzuki, S. Chiba, T. Yoshida, K. Higashiyama, M. Honma, T. Kajino and T. Otsuka, “Neutrino-nucleus reactions based on recent advanced in shell-model calculations”, *Nuclear Physics* **A805**, 579-581 (2008). 査読有
- ⑨ S. Chiba, H. Koura, T. Hayakawa, T. Maruyama, T. Kawano and T. Kajino, “Direct and semi-direct capture in low-energy ( $n, \gamma$ ) reactions of neutron-rich tin isotopes and its implications for r-process nucleosynthesis”, *Physical Review C* **77**, 015809 (2008). 査読有
- ⑩ T. Suzuki, T. Otsuka, M. Honma and K. Higashiyama, “Spin Modes, Neutrino-induced Reactions and Nucleosynthesis in Stars”, *AIP Conference Proceedings*, **1072**, 112-117 (2008). 査読有
- ⑪ T. Otsuka, T. Suzuki and Y. Utsuno, “Exotic Nuclei and Yukawa’s Forces”, *Nuclear Physics* **A805**, 127-136 (2008). 査読有
- ⑫ T. Suzuki, S. Chiba, T. Yoshida, K. Higashiyama, M. Honma, T. Kajino and T. Otsuka, “Neutrino-nucleus reactions based on recent advances in shell-model calculations”, *Nuclear Physics* **A805**, 579-581 (2008). 査読有
- ⑬ T. Suzuki, S. Chiba, T. Yoshida, M. Honma, K. Higashiyama, H. Umeda, K. Nomoto, T. Kajino and T. Otsuka, “Neutrino-nucleus Reactions and Nucleo-synthesis”, *AIP Conference Proceedings* **1016**, 321-328 (2008). 査読有
- ⑭ T. Suzuki, S. Chiba, M. Honma, K. Higashiyama, T. Yoshida, H. Umeda, K. Nomoto, T. Kajino and T. Otsuka, “Spin-dependent Transitions in Nuclei and Neutrino-nucleus Reactions”, *AIP Conference Proceedings* **1012**, 51-55 (2008). 査読有
- ⑮ T. Suzuki, S. Chiba, T. Yoshida, K. Higashiyama, M. Honma, T. Kajino and T. Otsuka, “Advances in shell-model calculations and neutrino-induced reactions”, *Progress in Particle and Nuclear Physics*, **59**, 486-493 (2007). 査読有
- ⑯ T. Suzuki, S. Chiba, T. Yoshida, T. Kajino and T. Otsuka, “Neutrino-nucleus reactions based on new shell model Hamiltonians”, *Physical Review C* **74**, 034307/1-9 (2006). 査読有
- ⑰ T. Suzuki and M. Honma, “Gamow-Teller transitions and neutrino-nucleus reactions based on new shell-model interactions”, *Journal of Physics: Conference Series* **49**, 35-40 (2006). 査読有
- ⑱ L. Gaudefroy, ..., T. Suzuki et al.,

“Reduction of Spin-Orbit Splittings at the N=28 Shell Closure”, Physical Review Letters **97**, 092501/1-4 (2006). 査読有

⑱ A. Gade, ..., T. Suzuki et al., “Evolution of the E(1/21<sup>+</sup>)-E(3/21<sup>+</sup>) energy spacing in odd-mass K, Cl, and P isotopes”, Physical Review C **74**, 034322/1-5 (2006). 査読有

⑳ T. Suzuki, S. Chiba, T. Yoshida, T. Kajino and T. Otsuka, ‘Neutrino-nucleus Reactions Induced by Supernova Neutrinos’, AIP Conference Proceedings **847**, 479-482 (2006). 査読有

[学会発表] (計 24 件)

① 鈴木俊夫、「第三ピーク滞留核領域核のベータ崩壊モード」、日本物理学会第 65 回年会、2010 年 3 月、岡山大学

② T. Suzuki, ‘GT and FF Transitions in Astrophysical Processes’, The 4<sup>th</sup> LACM-EFES-JUSTIPEN Workshop, Mar. 2010, Oak Ridge, USA

③ T. Suzuki, ‘Half-lives of N=126 Isotones and the r-Process’, 10<sup>th</sup> International Symposium on Origin of Matter and Evolution of the Galaxies (OMEG10), Mar. 2010, RCNP, Osaka

④ T. Suzuki, ‘Nuclear Weak Processes and Nucleosynthesis in Stars’, ICOR-EFES International Symposium on New Facet of Spin-isospin Responses (SIR2010), Feb. 2010, 小柴ホール、東京大学

⑤ T. Suzuki, ‘Shell Model Study of Spin Modes in Ni and Ca Isotopes’, EFES-NSCL Workshop on Perspectives on the Modern Shell Model and Related Experimental Topics’, Feb. 2010, Michigan State University, U.S.A.

⑥ T. Suzuki, ‘Gamow-Teller Transitions in Astrophysical Processes’, EFES-JUSTIPEN workshop, Dec. 2009, RIKEN

⑦ T. Suzuki, ‘Spin Responses in Nuclei, Neutrino-induced Reactions and Nucleosynthesis in Stars’, 7<sup>th</sup> Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium, Nov. 2009, 筑波大学

⑧ T. Suzuki, ‘Neutrino-induced React-

ions on Ni and Fe Isotopes and Nucleosynthesis in Stars’, 3<sup>rd</sup> Joint Meeting of the APS-DNP and Physical Society of Japan, Oct. 2009, Hawaii, U.S.A.

⑨ T. Suzuki, ‘Neutrino-induced Reactions on Nuclei and Nucleosynthesis in Stars’, Neutrinos and Dark Matter 2009, Sept. 2009, Wisconsin University, U.S.A.

⑩ T. Suzuki, ‘Structure of Light Exotic Nuclei’, International Conference on Nuclear Structure and Related Topics, June 2009, Dubna, Russia

⑪ T. Suzuki, ‘Structure of Light Neutron-rich Nuclei and Important Roles of Tensor Interaction’, International Conference on Nuclear Structure and Dynamics, May 2009, Dubrovnik, Croatia

⑫ T. Suzuki, ‘Structure of Light Exotic Nuclei’, The 3<sup>rd</sup> LACM-EFES-JUSTIPEN Workshop, Feb. 2009, Oak Ridge, USA

⑬ T. Suzuki, ‘Exotic Electromagnetic Transitions in Neutron-Rich Carbon Isotopes’ Franco-Japanese Symposium on New Paradigms in Nuclear Physics, Sept. 2008, Paris, France

⑭ T. Suzuki, ‘Electromagnetic Properties of Neutron-Rich Li and C Isotopes’ The 5<sup>th</sup> International Conference on Exotic Nuclei and Atomic Masses (ENAM08), Sept., 2008, Ryn, Poland

⑮ T. Suzuki, ‘Spin Modes, Neutrino-induced Reactions and Nucleosynthesis in Stars’ International Conference on Nuclear Physics and Astrophysics: From Stable Beams to Exotic Nuclei, June 2008, Urgup, Turkey

⑯ T. Suzuki, ‘Nuclear Structure and Nucleosynthesis’ Theoretical Issues in Nuclear Astrophysics, April 2008, Orsay, France

⑰ 鈴木俊夫「殻模型計算におけるテンソル力」、日本物理学会年会、2008 年 3 月、近畿大学

⑱ T. Suzuki, ‘Neutrino-nucleus Reactions and Nucleosynthesis’, 10<sup>th</sup> International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG07), Dec. 2007, Sapporo,

Japan

⑱ T. Suzuki, ‘Spin structure of stable and unstable nuclei and neutrino-induced reactions’, Trento Workshop on Exotic Modes of Excitations: from Nuclear Structure to Astrophysics, Oct. 2007, Trento, Italy

⑳ T. Suzuki, ‘Nuclear Structure and Nucleo-synthesis’, Japanese-German Workshop on Nuclear Structure and Astrophysics, Sept.-Oct. 2007, Chiemsee, Germany

㉑ T. Suzuki, ‘Neutrino-nucleus reactions and nucleosynthesis’ 2<sup>nd</sup> International Conference on Frontiers in Nuclear Structure, Astrophysics and Reactions (FINUSTAR2), Sept. 2007, Agios Nikolaos, Crete, Greece

㉒ T. Suzuki, ‘Neutrino-nucleus reactions based on recent advances in shell-model calculations’, The 23<sup>rd</sup> International Nuclear Physics Conference, June 2007, Tokyo

㉓ T. Suzuki, ‘Magnetic properties of light neutron-rich nuclei and shell evolution’ International Symposium on Physics of Unstable Nuclei (ISPUN07), June 2007, Hoi-An, Vietnam

㉔ T. Suzuki, ‘Advances in shell-model calculations and neutrino-induced reactions’ International School of Nuclear Physics, 27<sup>th</sup> Course, Radioactive beams, Nuclear Dynamics and Astrophysics, Sept. 2006, Erice, Italy

[図書] (計 1 件)

① T. Suzuki and T. Otsuka, “Magnetic Properties of Light Neutron-rich Nuclei and Shell Evolution”, in “Physics of Unstable Nuclei”, eds. By D. T. Khoa et al., (World Scientific, 2007) p. 318-325.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鈴木 俊夫 (SUZUKI TOSHIO)  
日本大学・文理学部・教授  
研究者番号：70139070

### (2) 研究分担者

千葉 敏 (CHIBA SATOSHI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究主幹  
研究者番号：60354883

### (3) 連携研究者

なし