

平成 21 年 5 月 25 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18740133

研究課題名 (和文) 現代的核力に基づく原子核殻構造と不安定核構造

研究課題名 (英文) Structures of nuclear shells and unstable nuclei based on modern nuclear forces

研究代表者

藤井 新一郎 (FUJII SHINICHIRO)

九州大学・高等教育開発推進センター・助教

研究者番号：90401166

研究成果の概要：

自由空間における核子-核子散乱データを高精度で再現するように作られた種々の現代的核力から出発して、原子核構造において基本的な性質である殻構造、及び自然界には安定には存在しない不安定核の構造を微視的に記述する方法の開発、及び実際の大規模数値計算を行った。本研究により C、O、Ca、Ni 等の原子核における基本的な構造が *ab initio* な計算により記述され、その微視的立場からの理解が深まった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	700,000	0	700,000
2007年度	500,000	0	500,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	1,700,000	150,000	1,850,000

研究分野：理論核物理

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：現実的核力、有効相互作用、unitary-model-operator approach、殻模型、第一原理計算、多体問題

1. 研究開始当初の背景

ノーベル物理学賞受賞者である Mayer と Jensen によって今から 50 年以上前に明らかにされた魔法数が、近年の様々な研究によって中性子過剰な不安定核では異なる可能性が議論されていた。研究代表者は魔法数 (殻構造) 等の原子核における最も基本的な性質を自由空間における核力から出発した計算により記述し、その微視的立場からの理解を深めたいと考えていた。また、近年の実験技術の進歩により自然界には安定には存在し

ない不安定核の生成が広い質量数領域に亘って可能となってきたが、それらの一部の不安定核構造に対しては従来の各種模型に基づく理論計算がうまくいかないことがあることが、次第に多く指摘されるようになってきた。研究代表者は殻構造に加え不安定核構造についても第一原理的な計算を行い、原子核構造のより微視的かつ統一的な理解に向けた研究を推進したいと考えた。

2. 研究の目的

自由空間における核子-核子散乱実験データを高精度で再現するように作られた、いわゆる現代的核力から出発して殻構造や不安定核構造についての第一原理的な計算を実行し、その微視的立場からの理解を深めることを目的とした。具体的な研究対象としては以下のものを想定した。

- (1) *sd*殻から *pf*殻領域における原子核の殻構造とそれを求める際に必要となる基底状態エネルギー
- (2) *p*殻から *sd*殻領域における不安定核の複雑な構造

3. 研究の方法

*p*殻核以上の領域に対する第一原理的計算を実行するためには、計算で考慮する模型空間を制限しなければならないため、その模型空間内で機能する有効相互作用を現代的核力から微視的に導出する必要がある。この種の微視的有効相互作用を求めるために、ある種のユニタリー変換の方法を用いた。このユニタリー変換を基に構築された多体理論である unitary-model-operator approach (UMOA) によって殻構造の第一原理的計算を実行した。一方で、不安定核構造における複雑な状態に対しては UMOA の適用は困難であった。そのため、微視的有効相互作用を用いた大規模殻模型計算の方法を新たに考案した。

4. 研究成果

典型的な二重閉殻核である ^{16}O 近傍核の殻構造については UMOA 計算により現代的核力からかなり良く記述されることが分かっていた。本研究では、まず中性子過剰な F 同位体についての殻構造の計算を行った。Nijm I ポテンシャルを用いた場合の計算結果が図 1 に示されている。 $N = Z$ 近傍核である ^{17}F と中性子過剰核である ^{23}F において 1 粒子準位構造 (殻構造) の変化が見事に記述されていることが分かる。

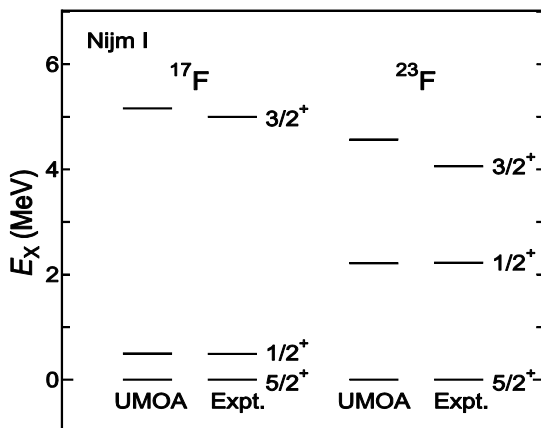


図 1 : ^{17}F と ^{23}F における殻構造

さらに重い原子核に対する UMOA 計算として、 ^{40}Ca や ^{56}Ni の基底状態エネルギーの計算を行った。現在この領域の第一原理的計算が可能なのは本研究と Oak Ridge National Laboratory (ORNL) の研究グループによる結合クラスター計算のみである。図 2 に CD Bonn ポテンシャルを用いた時の計算結果が示されている。

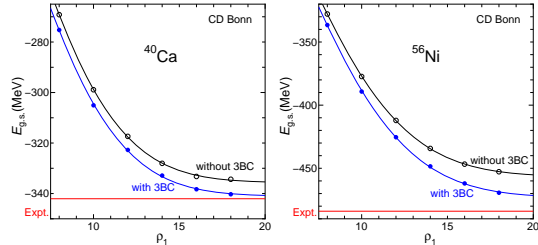


図 2 : ^{40}Ca 及び ^{56}Ni における基底状態エネルギーの模型空間の大きさに対する依存性

ここで、横軸の p_1 は模型空間の大きさを表す量である。また、図中の 3BC は多体相関としての 3 対クラスターの効果を表す。 ^{40}Ca 、 ^{56}Ni ともに十分に広い模型空間で 3 対クラスターを考慮した計算を行えばかなり実験値と近い値が得られることが分かった。残りの実験値との不一致は現在の計算では考慮されていない 3 体力に起因するものが大部分を占めていると考えられる。また、他の相互作用として N^3LO ポテンシャルを用いた場合、ORNL の研究グループの計算結果と矛盾しない結果が得られることも分かった。

次に、CD Bonn ポテンシャルを使った大規模殻模型計算により得られた結果を以下に示す。図 3 は中性子過剰不安定核である ^{16}C の低励起エネルギー準位を表している。

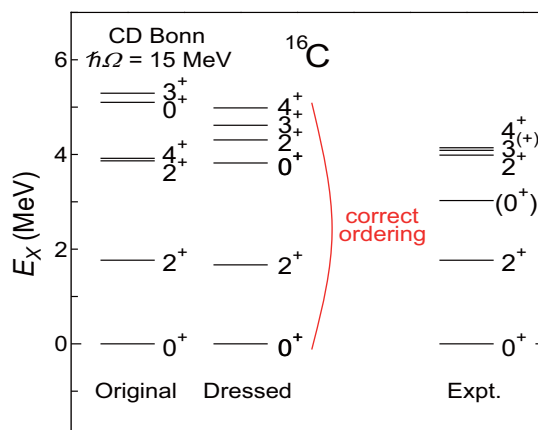


図 3 : ^{16}C における低励起エネルギー準位

ここで、Original と表記された計算結果は有効多体力の効果を取り込んでいないものであり、Dressed と表記された計算結果には有効多体力の効果の一部が中性子 1 体エネルギーに繰りこまれている。 ^{16}C の場合、

Original の計算でもかなり実験値との良い一致が得られているが、Dressed の計算によってさらに計算結果が改善されていることが分かる。この計算結果は従来の現象論的補正が加えられている理論計算結果と比べても遜色のないものとなっており、本研究で新たに開発された大規模殻模型計算の方法が不安定核構造の計算にも有用であることが確かめられた。

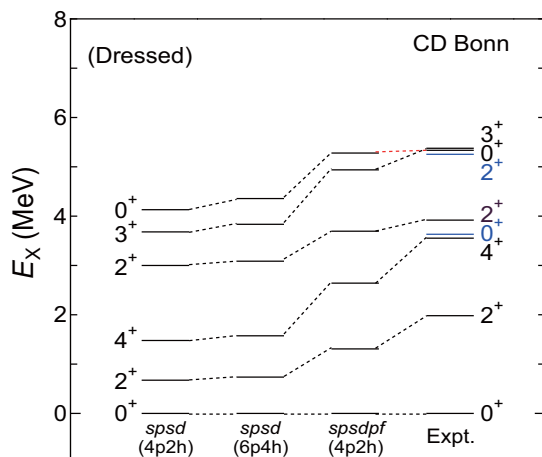


図4: ^{18}O における低励起エネルギー準位

図4は大規模殻模型計算の方法をより重い原子核である ^{18}O に適用した時の低励起エネルギー準位の計算結果をDressedの場合について示している。ここで、*spsd*、*spsdpf*はそれぞれ模型空間内に $0s$ 軌道から $1s0d$ 軌道まで、 $0s$ 軌道から $1p0f$ 軌道までの1粒子軌道が含まれていることを表している。また、 $4p2h$ 、 $6p4h$ はそれぞれ ^{16}O の最低次配位からの4粒子2空孔、6粒子4空孔までの励起を考慮していることを示す。図4からは*spsd*模型空間での計算の場合、相対的な準位間隔に対しては $6p4h$ の配位の効果は小さいことが分かる。また模型空間に $1p0f$ 軌道を含めることによって全体としてエネルギー準位間隔が広がり、実験値との比較的良好一致が得られていることが分かる。

ここで注目すべきことは実験値で青色で示された第二 0^+ 、第三 2^+ 状態に対応する計算結果が得られていないことである。特に第二 0^+ 状態については、従来の伝統的な殻模型計算では良く再現されていたのであるが、本計算による第二 0^+ 状態は実験値の第三 0^+ 状態に対応するエネルギー領域に表れている。実験値の第二 0^+ 状態についてはどのような構造をもった状態なのか昔から多くの論争があり、本研究による計算結果はその状態が単純な殻模型的配位では記述できない複雑な状態を持っていることを示唆している。最終的な結論を得るためには模型空間をさらに広げたより大規模な数値計算が必要と思

われる。

以上の成果をまとめると、殻構造のような比較的単純な構造に対してはUMOA計算により ^{56}Ni などの比較的重い領域の原子核まで十分に広い模型空間を考慮した第一原理的計算が可能となった。より複雑な構造に対しては*sd*殻核における質量数が20程度の原子核までであれば大規模殻模型計算によりかなり現実的かつ微視的な計算が可能となったといえるであろう。

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5件)

- ① S. Fujii and B. R. Barrett, Ab initio shell-model calculation for ^{18}O in a restricted no-core model space, arXiv [nucl-th], 0902.2169, 1-4, (2009), 査読無
- ② 藤井新一郎, 原子核構造の第一原理計算の現状と今後の展望, 原子核研究, 第52巻2号, 54-63, (2008), 査読無
- ③ S. Fujii, T. Mizusaki, and T. Otsuka, Dependence of the $B(E2; 2_1^+ \rightarrow 0_1^+)$ in ^{16}C and ^{18}C on the Neutron Effective charge, CNS-REP, 76, 87-88, (2007), 査読有
- ④ S. Fujii, T. Mizusaki, T. Otsuka, T. Sebe, and A. Arima, Microscopic shell-model description of the exotic nucleus ^{16}C , Phys. Lett. B, 650, 9-14, (2007), 査読有
- ⑤ S. Fujii, T. Mizusaki, T. Otsuka, T. Sebe, and A. Arima, Shell-model description of ^{16}C with the Idaho N^3LO NN potential, Journal of Physics: Conference Series, 49, 7-12, (2006), 査読無

[学会発表] (計20件)

- ① 藤井新一郎, 制限された模型空間でのNCSM計算による中性子過剰炭素同位体の系統的研究II, 日本物理学会第64回年次大会, 2009年3月28日, 立教大学
- ② S. Fujii, Structure of neutron-rich carbon and oxygen isotopes in a restricted no-core shell-model space, First EMMI-EFES Workshop on Neutron-Rich Exotic Nuclei (EENEN 09), Feb. 10, 2009, GSI, Darmstadt, Germany
- ③ 藤井新一郎, 有効核力の構築, ワークショップ「計算科学による素粒子・原子核・宇宙の融合」, 2008年12月2日, 筑波大学
- ④ 藤井新一郎, 制限された模型空間での

- NCSM計算による中性子過剰炭素同位体の系統的な研究, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 21 日, 山形大学
- ⑤ 藤井新一郎, 核子数 10 を超える原子核構造の現実的核力に基づく微視的記述, 九大原子核理論セミナー, 2008 年 5 月 16 日, 九州大学
- ⑥ 藤井新一郎, Bruce R. Barrett, 制限された模型空間での NCSM 計算による中性子過剰炭素同位体の系統的な研究, 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008 年 3 月 23 日, 近畿大学
- ⑦ S. Fujii, Structure of sd and pf shell nuclei with microscopic effective interactions, The 2nd LACM-EFES-JUSTIPEN Workshop, Jan. 23, 2008, ORNL, Knoxville, USA
- ⑧ S. Fujii, Microscopic nuclear structure calculations with unitarily transformed effective interactions, Institute for Nuclear Theory (INT) 2007 Program on Nuclear Many-Body Approaches for the 21st Century, Sep. 27, 2007, Univ. of Washington, Seattle, USA
- ⑨ 藤井新一郎, 岡本良治, 鈴木賢二, UMOA 計算による中性子過剰酸素及びフッ素同位体の構造, 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007 年 9 月 22 日, 北海道大学
- ⑩ S. Fujii, Microscopic approaches to the nuclear structure with unitarily transformed interaction, JUSTIPEN-EFES Workshop on Shell Structure of Exotic Nuclei, Jun. 23, 2007, RIKEN, Wako
- ⑪ S. Fujii, T. Mizusaki, T. Otsuka, T. Sebe, A. Arima, Microscopic shell-model description of neutron-rich carbon isotopes, International Workshop on Nuclear Structure: New Pictures in the Extended Isospin Space, Jun. 12, 2007, Kyoto Univ., Kyoto
- ⑫ S. Fujii, T. Mizusaki, T. Otsuka, T. Sebe, A. Arima, Microscopic shell-model calculations for nuclei around ^{16}C in the $sp\text{sd}pf$ space, JUSTIPEN Workshop on Ab Initio Calculations for Many-Body Systems and Many-Body Forces, Apr. 12, 2007, RIKEN, Wako
- ⑬ 藤井新一郎, 水崎高浩, 大塚孝治, ^{16}C 近傍核の殻模型計算における有効電荷, 日本物理学会 2007 年春季大会, 2007 年 3 月 25 日, 首都大学東京
- ⑭ S. Fujii, T. Mizusaki, T. Otsuka, T. Sebe, A. Arima, Microscopic shell-model calculations for neutron-rich carbon isotopes in the $sp\text{sd}pf$ space, International Workshop, Joint JUSTIPEN-LACM Meeting, Mar. 5, 2007, ORNL, Knoxville, USA
- ⑮ 藤井新一郎, 水崎高浩, 大塚孝治, 瀬部孝, 有馬朗人, ^{16}C 近傍核の殻模型計算と有効電荷, 基研研究会「有効相互作用の理論と核模型」, 2007 年 2 月 6 日, 京都大学
- ⑯ S. Fujii, T. Mizusaki, T. Otsuka, T. Sebe, A. Arima, Microscopic shell-model description of neutron-rich carbon isotopes, 2nd German-Japanese Workshop on Nuclear Structure and Astrophysics, Oct. 4, 2006, RIKEN, Wako
- ⑰ 藤井新一郎, 水崎高浩, 大塚孝治, 瀬部孝, 有馬朗人, 現代的核力から出発した大規模殻模型計算による中性子過剰炭素同位体の構造, 日本物理学会 2006 年秋季大会, 2006 年 9 月 22 日, 奈良女子大学
- ⑱ 藤井新一郎, 水崎高浩, 大塚孝治, 瀬部孝, 有馬朗人, 現代的核力から出発した大規模殻模型計算による ^{16}C の構造, KEK 原子核研究会「現代の原子核物理 — 多様化し進化する原子核の描像 —」, 2006 年 8 月 2 日, 高エネルギー加速器研究機構
- ⑲ S. Fujii, T. Mizusaki, T. Otsuka, T. Sebe, A. Arima, A new microscopic shell-model approach to neutron-rich carbon isotopes, International Conference on Nuclear Structure '06 (NS06), Jul. 25, 2006, ORNL, Knoxville, USA
- ⑳ S. Fujii, Microscopic approaches to exotic nuclei with the bare nuclear force, Opening Ceremony of Japan-US Theory Institute for Physics with Exotic Nuclei (JUSTIPEN), Jul 11, 2006, RIKEN, Wako

[その他]

ホームページ等

<http://hyoka.ofc.kyushu-u.ac.jp/search/details/K003221/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤井 新一郎 (FUJII SHINICHIRO)
九州大学・高等教育開発推進センター・助教
研究者番号: 90401166