

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400268

研究課題名(和文)核子多体論に基づく r 過过程中性子捕獲反応理論の構築

研究課題名(英文)r-process neutron capture theory based on nuclear many-body methods

研究代表者

松尾 正之(Matsuo, Masayuki)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：70212214

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究において、座標表示ハートレー・フォック・ボゴリューボフ理論(HFB理論)と連続状態準粒子乱雑位相近似(連続状態QRPA理論)に基づいて、r過程元素合成の基礎プロセスである中性子直接捕獲反応の理論を構築した。この理論の特徴は、中性子の超流動性(対相関)と低エネルギー集団励起モードがこの反応過程に及ぼす影響を記述することが出来る点にある。この研究ではまた、直接捕獲反応の始状態である中性子の低エネルギー散乱状態に対する対相関効果を詳細に分析し、対相関が準粒子共鳴の幅を減少させたり、S波に共鳴的な振る舞いを引き起こすなど特徴的な振る舞いをもたらすことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have constructed a many-body theory of direct neutron capture reaction relevant for the r-process nucleosynthesis on the basis of the coordinate-space Hartree-Fock-Bogoliubov theory and the continuum quasiparticle random phase approximation. A notable feature is that the theory can describe impact of the neutron superfluidity (the pair correlation) and low-lying collective excitations on the capture cross sections. We have studied also pairing effects on neutron low-energy scattering state, which is an initial state of the capture reaction. It is found that the neutron pair correlation reduces the width of the quasiparticle resonance in certain conditions, and also that it brings about unusual resonance-like behaviors in the s-wave neutron.

研究分野：原子核理論

キーワード：中性子捕獲反応 中性子過剰核 対相関 連続状態QRPA理論 準粒子共鳴

1. 研究開始当初の背景

中性子過剰な不安定原子核の研究は、現代原子核物理学の中心課題の一つである。中性子過剰とともに中性子の分離エネルギーは減少し、核物質の飽和性が部分的に破れ、新奇な核子多体現象が現れる。中性子過剰核はまた、自然界における重元素生成の起源とされる r 過程元素合成反応 (高速中性子捕獲反応) の舞台でもある。中性子過剰核における多体現象が r 過程元素合成において果たす役割を解明することは重要な課題となっている。

本研究の開始時点までに、研究代表者は、近年進展が著しい核子密度汎関数理論に依拠し、中性子過剰核における多体相関、特に対相関と集団励起相関を解明する研究を進めてきた。座標表示ハートレー・フォック・ポゴリューボフ理論 (HFB 理論) によって、中性子過剰系での中性子超流動と弱束縛性に付随する対相関の空間構造の分析が可能になったこと。また、連続状態準粒子乱雑位相近似 (連続状態 QRPA 理論) により、中性子の分離・放出プロセスを伴う集団励起の記述も可能となった。研究代表者は、これらの成果をもとに、上記の多体相関と r 過程中性子捕獲反応を関連付けて研究を進める状況を準備していた。

2. 研究の目的

本研究の目標は、中性子過剰核に特徴的な中性子超流動や集団励起モードの記述で力を発揮してきた座標表示 HFB 理論と連続状態 QRPA 理論をさらに発展させ、 r 過程重元素合成の基本構成反応である中性子直接捕獲反応を記述する核子多体理論を構築することを目指すものである。またこの目標へのアプローチを補強するため、弱束縛性に由来する中性子対相関の空間構造や、直接捕獲反応の始状態に対応する非束縛中性子に対する対相関効果、また、中性子過剰核におけるソフト双極励起や四重極励起の研究を進めることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究は、核子密度汎関数理論 (座標表示 HFB 理論と連続状態 QRPA 理論) の近年の展開を基盤にして、 r 過程元素合成反応、特に中性子直接捕獲反応の微視的理論を開拓するものである。理論的枠組みを構築するだけでなく、この反応に影響を与えられ、対相関と集団励起モード、非束縛状態の分析を同じ理論を用いて分析することも目的としていることから、以下の3点から研究を進めた。

(1) 中性子直接捕獲 QRPA 理論の構築

連続状態 QRPA 理論が、非束縛連続状態 (中性子の分離・放出) を含む終状態を記述することに着目し、Zangwill-Soven に倣って終状態分解を定式化する。この手法により、中性子直接捕獲反応断面積を計算可能にする連

続状態 QRPA 理論を構築する。反応計算では核外遠方の漸近領域まで 1 中性子波動関数を求め、また、 r 過程で必要となる keV オーダーの低エネルギー散乱状態を記述できる計算コードに拡張する。

(2) 中性子の低エネルギー散乱状態に対する対相関効果の研究

r 過程元素合成に關与する中性子過剰核の中性子分離エネルギーは 2 ~ 3 MeV 以下であることから、低エネルギーの相関である対相関と双極型/四重極型集団励起モードが大きく影響すると想定される。中性子捕獲反応の始状態である中性子の低エネルギー散乱状態に対しては、大きな対相関効果が想定される。座標表示 HFB 理論で散乱状態を記述し、散乱の位相差、弾性散乱断面積を計算する。この計算結果を、単一共鳴公式や低エネルギー公式によるフィッティング、散乱行列の極の同定など、いくつかの手法で分析することにより、対相関効果の研究を進めた。

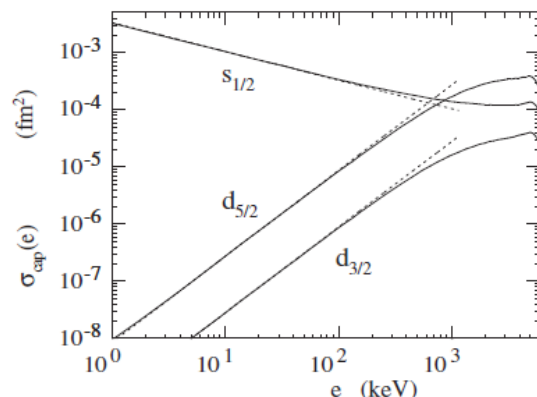
(3) 中性子過剰原子核の対相関・超流動と集団励起モードの研究

密接に關係する中性子対相関と双極型/四重極型集団励起モードの中性子過剰核での特質を解明する。対相関については、座標表示 HFB 理論で記述するとともに、中性子ドリップライン近傍での振る舞い、特に、対波動関数が中性子フェルミエネルギーがゼロに近づいていく場合の性質に着目する。また、四重極モードについては、QRPA 理論の拡張理論である局所 QRPA 理論を用いて、励起モードの構造を分析する。

4. 研究成果

(1) 中性子直接捕獲 QRPA 理論の構築

連続状態 QRPA 理論における終状態分解の定式化に成功し、全光吸収断面積だけでなく、終状態である 2 準粒子状態毎に定義された部分光吸収断面積の計算手法を確立した。さらに、 r 過程で關与する keV オーダーの低エネルギー散乱状態を記述できるよう連続状態 QRPA 理論の修正定式化を行い、あわせて数値計算コードを拡張した。これにより、keV-MeV レンジの非常に広いダイナミックレンジにわたり、中性子捕獲を記述できる QRPA を構築に成功した。中性子過剰 Sn 原子核を対象にした数値計算結果を示して、1) 低エ



エネルギーで満たすべきスケーリング則を保証していること、2)対相関が大きな影響を与えることを明らかにした。下図は ^{141}Sn に対する中性子捕獲断面積を中性子の入射エネルギーの関数として示したもので、直線性がスケーリング則を表す。QRPA理論によって中性子直接捕獲反応を計算した最初の研究であり、その意義は大きい。一方、中性子吸収後に 2^+ 状態などの励起状態に遷移する場合は記述する課題が残されているが、その理論拡張に必要な示唆を得ることもできたのは重要な成果であった。以上の成果は論文[1,6]として発表した。

(2) 中性子の低エネルギー散乱状態に対する対相関効果の研究

r過程中性子捕獲反応を記述し理解する上で、反応の始状態である中性子の低エネルギー散乱状態の性質を明らかにすることは重要である。対相関によって生じる共鳴状態(準粒子共鳴)に着目し、その影響を中性子捕獲との関わりが密接なs波とp波について詳細に分析した。p波では、ドリップライン近傍核における準粒子共鳴を分析対象とし、具体的には $^{45}\text{Si}+n$ 系を例にとった。研究の結果、対相関が準粒子共鳴の共鳴幅を「減少」させるといふ、新たな効果を見出した。従前の研究では知られていなかったこの性質は、一粒子軌道がフェルミエネルギーの上にある粒子的な準粒子の場合に発生すること、その機構は、対ポテンシャルによって結合する空孔波動関数の増加により、準粒子共鳴の核内滞在確率が増加することであることを本研究で解明した。この研究成果は、論文[4]および学会発表[6-10,12,13]で発表した。s波に関しては、単純なポテンシャル散乱とは非常に異なる複雑な特徴を見出した。一般にポテンシャル散乱では、位相差と弾性散乱断面積は低エネルギー公式(散乱長と有効距離)で散乱状態を特徴づけることができる。しかし、対相関の影響のもとでは弾性散乱断面積・位相差ともに低エネルギー公式では理解できず、また、孤立した共鳴としてもとらえられない特異な振る舞いが見出された。そこで、散乱行列(S行列)を複素運動量平面で分析する手法を採用し、S行列の極とその振る舞いを分析した。この分析から、ポテンシャル散乱では通常1つの極で記述されることと大きく異なり、2つまたは3つの極が共存することによって上記の特異な振る舞いが生じることを解明した。この研究成果は学会発表[1-5]で発表した。論文は現在執筆中である。

(3) 中性子過剰原子核の対相関・超流動と集団励起モードの研究

中性子ドリップライン近傍核において出現する核外低密度領域(ハロー領域)における対相関の空間構造を座標表示HFB理論を用いて分析した。対密度の非対角要素に対応

する対波動関数に着目し、その核外遠方漸近性をHFBの理論構造から分析した。その結果、中性子分離エネルギーの減少とともに(ドリップラインに近づくとともに)遠方漸近領域でダイニュートロン相関が普遍的に優位となることを解析的に示すことができた。これは、一般的に、ドリップライン近傍核では、対相関は必ず消失することなく、また、影響範囲も核外テール領域に及ぶことを示すものとして重要な意義を持つ。この成果は論文[6]で発表した。中質量領域の中性子過剰核の多くは開殻配位であり、大きな変形揺らぎを示す。この大振幅4重極集団励起モードを記述するために開発してきた局所QRPA理論と連続状態QRPA理論を統一的な時間依存密度半関数理論の枠組みに組み込む理論整備を進めた。その成果を論文[1-3]で発表した。

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6件)

[1] T. Nakatsukasa, K. Matsuyanagi, M. Matsuo, K. Yabana
Time-dependent density-functional description of nuclear dynamics
Reviews of Modern Physics 88, 2016, 045004 (1-53), 査読有
DOI: 10.1103/RevModPhys.88.045004

[2] K. Matsuyanagi, M. Matsuo, T. Nakatsukasa, K. Yoshida, N. Hinohara, K. Sato
Microscopic derivation of the Bohr-Mottelson collective Hamiltonian and its application to quadrupole shape dynamics
Physica Scripta 91, 2016, 063014 (1-32), 査読有
Doi:10.1088/0031-8949/91/6/063014

[3] K. Matsuyanagi, M. Matsuo, T. Nakatsukasa, K. Yoshida, N. Hinohara, K. Sato,
Microscopic derivation of the quadrupole collective Hamiltonian for shape coexistence/mixing dynamics
Journal of Physics G 43, 2016, 024006 (1-20), 査読有
DOI:10.1088/0954-3899/43/2/024006

[4] Y. Kobayashi, M. Matsuo
Effects of pairing correlation on the low-lying quasiparticle resonance in neutron drip-line nuclei
Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2016, 2016, 013D01 (1-14), 査読

有

DOI:10.1093/ptep/ptv175

[5] Masayuki Matsuo

Continuum quasiparticle random-phase approximation for astrophysical direct neutron capture reactions on neutron-rich nuclei

Physical Review C 91, 2015, 034604 (1-11), 査読有

DOI:10.1103/PhysRevC.91.034604

[6] Y. Zhang, M. Matsuo, and J. Meng

Asymptotic form of neutron Cooper pairs in weakly bound nuclei

Physical Review C 90, 2014, 34313 (1-5), 査読有

DOI:10.1103/PhysRevC.90.034313

〔学会発表〕(計 13 件)

[1] 小林良彦、松尾正之

低エネルギー S 波散乱が受ける対相関効果の S 行列による分析

日本物理学会第 7 2 回年次大会, 2017 年 03 月 17 日, 大阪大学豊中キャンパス (大阪府・豊中市)

[2] Y. Kobayashi, M. Matsuo

Effects of pairing correlation on low-energy p- and s-wave scattering in neutron-rich nuclei

ECT* Workshop "Physics beyond the limits of stability: exploring the continuum", 2016 年 10 月 20 日, European Center for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas, Trento (Italy)

[3] 小林良彦、松尾正之

中性子過剰核における S 波散乱が受ける対相関効果

日本物理学会 2016 年秋季大, 2016 年 09 月 21 日, 宮崎大学 (宮崎県・宮崎市)

[4] Y. Kobayashi, M. Matsuo

Effects of pairing correlation on the low-lying quasiparticle resonance in neutron drip-line nuclei

International Nuclear Physics Conference 2016, 2016年09月13日, Adelaide Convention Center, Adelaide (Australia)

[5] Y. Kobayashi, M. Matsuo

Effects of pairing correlation on p-wave resonance and s-wave scattering in neutron-rich nuclei

RIBF Users Meeting 2016, 2016 年 09 月 08 日, RIKEN Nishina Center (埼玉県・和光市)

[6] Y. Kobayashi, M. Matsuo

Single-neutron resonance and pairing correlation in neutron-rich nuclei

Resonance and non-Hermitian Quantum Mechanics 2016, 2016年08月04日, Research Center for Nuclear Physics, Osaka University (大阪府・茨木市)

[7] Y. Kobayashi, M. Matsuo

Pairing correlation effects on width of quasiparticle resonance in neutron dripline nuclei

NIC-XIV School, 2016 年 06 月 15 日, Niigata University (新潟県・新潟市)

[8] 小林良彦、松尾正之

中性子ドリップライン原子核における準粒子共鳴幅と対相関効果のメカニズム

日本物理学会第 70 回大会, 2015 年 03 月 05 日 早稲田大学 (東京都・新宿区)

[9] Yoshihiko Kobayashi, Masayuki Matsuo

Pairing correlation effects on low-energy quasi-particle resonance in neutron drip-line nuclei

The International Symposium on Physics of Unstable Nuclei 2014, 2014 年 11 月 07 日, ホーチミン (ベトナム)

[10] Yoshihiko Kobayashi, Masayuki Matsuo

Pairing correlation effects on low-energy quasi-particle resonance in neutron drip-line nuclei

The International Workshop on Nuclear Science and Simulation in fundamental and applied researches, 2014年11月01日, ホーチミン (ベトナム)

[11] Masayuki Matsuo

Density functional theory of direct neutron capture cross section for the r-process nucleosynthesis

4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, 2014年10月10日, Hilton Waikoloa Village, Waikoloa, Hawaii (米国)

[12] Yoshihiko Kobayashi, Masayuki Matsuo

Quasi-particle resonance near threshold in neutron drip-line nuclei

The International Collaborations in Nuclear Theory Workshop "Physics of exotic nuclei: Theoretical advances and challenges", 2014年06月13日, 理化学研究所 (埼玉県・和光市)

[13] Yoshihiko Kobayashi, Masayuki Matsuo

Quasi-particle resonance near threshold in neutron drip-line nuclei

The 2nd Conference on "Advances in
Radioactive Isotope Science", 2014 年 06
月 05 日, 東京大学(東京都・文京区)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松尾 正之 (Matsuo, Masayuki)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号 : 70212214

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者

Zhang Ying (Zhang, Ying)

天津大学(中国)・助教