

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007 ~ 2009

課題番号：19740115

研究課題名 (和文) 弱く束縛された原子核の構造と反応機構の解明

研究課題名 (英文) Structure and reaction dynamics of weakly-bound nuclei

研究代表者 萩野 浩一

(HAGINO KOUICHI)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：20335293

研究成果の概要 (和文)：

ボロミアン原子核  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^6\text{He}$ , 及び中性子過剰原子核  ${}^8\text{He}$  の基底状態の解析を通じ、中性子過剰核の表面付近に空間的にコンパクトな中性子対が凝縮しているという描像を得た。また、このような強い双中性子相関が中性子過剰核で発達するためには、対相関相互作用による異なるパリティ状態の混合が本質的な役割を果たしていることを指摘した。

研究成果の概要 (英文)：

We investigated the ground state properties of Borromean nuclei  ${}^6\text{Li}$  and  ${}^6\text{He}$ , as well as heavier neutron-rich nuclei  ${}^8\text{He}$ , and obtained a picture that spatially compact dineutrons condensate on the surface of neutron-rich nuclei. We also pointed out that the mixing of single-particle states of opposite parity due to the pairing correlation plays an essential role in order for the strong dineutron correlation to be developed in neutron-rich nuclei.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,000,000	0	1,000,000
2008 年度	700,000	210,000	910,000
2009 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	420,000	2,820,000

研究分野：数物系科学

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：中性子過剰核、対相関、双中性子相関、双極子励起、核融合反応、平均場理論、核分裂障壁、r-プロセス元素合成

## 1. 研究開始当初の背景

陽子の数に比べて中性子の数が極めて多い中性子過剰核は、その弱い束縛性によって構造が特徴づけられている。近年、我が国の理化学研究所を筆頭に、世界中の様々な研究所でそのような中性子過剰核が人工的に作られるようになり、ハロー (暈) のような薄い中性子密度の広がり、新しい殻構造の出現、

低い励起エネルギーに現れる双極子励起モードの存在、強く相関したクーパー対の凝縮、など驚くべき性質が次々に明らかになってきた。研究を開始した直前の 2007 年の初頭に、理化学研究所に於いて世界最強強度で中性子過剰核を発生できる RI ビーム・ファクトリー (RIBF) が始動し、中性子過剰核の物理を通じて弱束縛量子系の物理が今後飛躍的に進展しようとしていた。

## 2. 研究の目的

本研究の大きな目的は、RIBFの稼動により大きな発展が望まれている弱く束縛された中性子過剰核の構造を研究し、その原子核反応への影響を明らかにすることである。従来の原子核物理学では、原子核構造論と原子核反応論はほぼ独立に発展してきた。例えば、原子核構造論では、連続状態（散乱状態）は適当な基底で波動関数を展開することによって、離散化して取り扱われることがしばしばであった。一方、原子核反応論では、原子核構造に関しては簡単な模型を用いることによって、反応のダイナミクスに主に着目した研究がよく行われてきた。しかしながら、中性子過剰核のような弱束縛系の記述のためには、構造論と反応論を統一的に取り扱うアプローチが必要となってくる。その典型的な例が、 $^{11}\text{Li}$  や  $^6\text{He}$  核に代表されるボロミアン核とよばれる原子核である。これらは、原子核を芯核に中性子が2つ結合した三体系として近似した時 ( $^{11}\text{Li} = ^9\text{Li} + n + n$ ,  $^6\text{He} = ^4\text{He} + n + n$ )、どの二体部分系 ( $^{10}\text{Li} = ^9\text{Li} + n$ ,  $2n = n + n$ ,  $^5\text{He} = ^4\text{He} + n$ ) も束縛せず、三体系となることによって初めて束縛する原子核である。このような原子核の構造の記述のためには、散乱状態としての二体部分系の情報が必要であり、必然的に構造と反応が結合することになる。また、そのように記述された原子核の構造の特徴を実験的に引き出すためには、構造計算によって得られた波動関数をインプットとし、なおかつ系の弱束縛性を考慮した原子核反応理論を整備することが必要不可欠である。

芯核に1つの中性子が弱く束縛した原子核（1中性子ハロー核）の構造と反応は、これまでの研究により大分明らかになってきた。そのような原子核の構造は、基本的には波動関数の遠方での指数関数的な減衰の振る舞いに支配され、またそのような原子核を用いた核反応に対しても、グラウバー近似やアイコンナル近似に基づいた方法が発展している。また、最近では、1中性子ハロー核に対する低エネルギー核融合反応に関しても理解が進んできている。

その一方で、ボロミアン核、あるいは芯核により多数の中性子が結合した中性子過剰核の反応機構は、未だによく理解されていないことが多い。このような中性子過剰核では、強い二中性子対相関が理論的に予言されており、その二中性子相関を原子核反応を介在にしてどのように引き出すかを検討することが急務になっている。また、RIBFプロジェクトでは質量数の比較的大きい中性子過剰

核の生成が計画されており、そのような重い中性子過剰核の構造と反応の解明も最重要課題の一つである。

本研究では特に、芯核に多数の中性子が結合した中性子過剰核の反応機構を解明することを目指す。この目的のためには、そのような中性子過剰核の構造の理解が必要不可欠であり、系の弱束縛性に立脚した構造計算も行う。

## 3. 研究の方法

対相関相互作用を考慮した平均場近似 (Hartree-Fock-Bogoliubov 法) や芯核+2中性子を仮定した3体模型を用いて、芯核に複数個の中性子が付け加わった原子核の基底状態の記述を行う。さらに、同じ模型を用いて励起状態の記述を行い、中性子過剰核のクーロン分解反応や核融合反応の計算を行う。クーロン分解反応では、分解の確率や分解で放出される2中性子のエネルギー分布などの解析を行い、基底状態の性質との関連を調べる。

## 4. 研究成果

対相互作用を考慮した平均場近似を用いて、芯核  $^4\text{He}$  に4つの殻外中性子が結合した  $^8\text{He}$  の構造を明らかにした。すなわち、4つの外殻中性子のうち、スピン上向き・下向きをもつ双中性子対が強い対相関相互作用のため空間的にコンパクトな配位をとり、そのような双中性子対2つが比較的自由に運動をしているという描像を得た。これは、重い中性子過剰核において、双中性子対が核表面付近に凝縮しているということを示唆する。また、 $^8\text{He}$  をこえてより重い中性子過剰核の構造を系統的に記述するために、中性子と陽子の密度分布の差が関与するアイソ・ベクトル成分を持つ対相関相互作用を提唱した。その対相関相互作用を無限中性子物質に適用し、中性子物質におけるBCS-BECクロス・オーバー現象を議論した。

芯核に2つの殻外中性子が結合したボロミアン核に関しては、3体模型を用いて基底状態及び双極子励起に対する詳細な計算を行った。まず、 $^{11}\text{Li}$  核における双中性子相関に関し、局所対エネルギーが極小となる位置で中性子クーパー対のサイズが最小になることを明らかにした。また、強い双中性子相関が中性子過剰核で発達するためには、対相関相互作用による異なるパリティ状態の混合が本質的な役割を果たしていることを指摘した。更には、 $^{11}\text{Li}$  及び  $^6\text{He}$  原子核のクーロン励起に対する3体模型計算を行い、2体部

分系の共鳴状態の違いのため2つの原子核で放出2中性子のエネルギー分布及び角度分布が大きく異なることを明らかにした。

この他に、関連した課題として、中性子過剰ハイパー核の崩壊率の計算、安定な弱束縛核の融合反応の計算、中性子過剰核の核分裂及びベータ崩壊の計算も行った。

これらの研究成果は合計40本(いずれも査読あり)の論文として学術誌に発表した。

#### 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40件)

1. H.-J. Schulze, Myaing Thi Win, K. Hagino and H. Sagawa, "Hyperons as a probe of nuclear deformation", Prog. Theor. Phys. 123(2010)569-580. 査読有
2. K. Hagino, H. Sagawa, T. Nakamura, and S. Shimoura, "Two-particle correlations in continuum dipole transitions in Borromean nuclei", Phys. Rev. C80(2009)031301(R)/1-4. 査読有
3. T. Ichikawa, K. Hagino, and A. Iwamoto, "Signature of smooth transition from diabatic to adiabatic states in heavy-ion fusion reactions at deep subbarrier energies", Phys. Rev. Lett. 103(2009)202701/1-4. 査読有
4. F. Minato, S. Chiba, and K. Hagino, "Fission of heavy Lambda hypernuclei with the Skyrme-Hartree-Fock approach", Nucl. Phys. A831(2009)150-162. 査読有
5. F. Minato and K. Hagino, "beta-decay half-lives at finite temperatures for N=82 isotones", Phys. Rev. C80(2009)065808/1-7. 査読有
6. K. Hagino, N. Takahashi, and H. Sagawa, "Strong dineutron correlation in  $^8\text{He}$  and  $^{18}\text{C}$ ", Phys. Rev. C77(2008)054317/1-9. 査読有
7. F. Minato and K. Hagino, "Fission barriers in the neutron-proton isospin plane for heavy neutron-rich nuclei", Phys. Rev. C77(2008)044308/1-5. 査読有
8. J. Margueron, H. Sagawa, and K. Hagino, "Effective pairing interactions with isospin density dependence", Phys. Rev. C77(2008)054309/1-10. 査読有
9. K. Hagino, N. Takahashi, and H. Sagawa, "Strong dineutron correlation in  $^8\text{He}$  and  $^{18}\text{C}$ ", Phys. Rev. C77(2008)054317/1-9. 査読有
10. Y. Zhang, H. Sagawa, D. Yoshino, K. Hagino and J. Meng, "Shape evolution of C isotopes in (beta, gamma) deformation plane", Prog. Theor. Phys. 120(2008)129-142. 査読有
11. Myaing Thi Win and K. Hagino, "Deformation of Lambda-hypernuclei", Phys. Rev. C78(2008)054311/1-5. 査読有
12. Muhammad Zamrun F., K. Hagino, S. Mitsuoka, H. Ikezoe, "Coupled-channels analyses for large-angle quasi-elastic scattering in massive systems", Phys. Rev. C77(2008)034604/1-11. 査読有
13. T. Ichikawa, K. Hagino, and A. Iwamoto, "Systematics of threshold incident energy for deep sub-barrier Fusion", Phys. Rev. C75(2007)064612/1-4. 査読有
14. H. Esbensen, K. Hagino, P. Mueller, and H. Sagawa, "Charge radius and dipole response of  $^7\text{Li}$ ", Phys. Rev. C76(2007)024302/1-6. 査読有
15. K. Hagino and Y. Watanabe, "Potential inversion with subbarrier fusion data reexamined", Phys. Rev. C76(2007)024612/1-9. 査読有
16. K. Hagino and H. Sagawa, "Dipole excitation and geometry of Borromean nuclei", Phys. Rev. C76(2007)074302/1-4. 査読有
17. J. Margueron, H. Sagawa, and K. Hagino, "BCS-BEC crossover of neutron pairs in symmetric and asymmetric nuclear matters", Phys. Rev. C76(2007)064316/1-11. 査読有

その他 23 件。

[学会発表] (計 14 件)

1. 萩野浩一, “Dineutron correlation in the ground state and E1 excitations of Borromean nuclei”, International Symposium Forefronts of researches in exotic nuclear structure(Niigata2010), 2010年3月2日, 新潟県十日町市
2. 萩野浩一, “Two-particle correlations in continuum dipole transitions in Borromean nuclei”, 第3回日米物理学会合同核物理分科会、2009年10月17日、ハワイ、アメリカ
3. 萩野浩一, ” Di-neutron correlation in light neutron-rich nuclei”, Franco-Japanese Symosium on New Paradigms in Nuclear Physics, 2008年10月1日、パリ、フランス
4. K. Hagino, “Fusion at deep subbarrier energies: potential inversion revisited”, International Conference on New Aspects of Heavy Ion Collisions Near the Coulomb Barrier (FUSION08), 2008年9月22日、シカゴ、アメリカ
5. 萩野浩一, 「 $^8\text{He}$ ,  $^{18}\text{C}$  のダイニュートロン構造」、RIBF ミニワークショップ「ダイニュートロン相関をみる」、2008年9月3日、理化学研究所
6. K. Hagino, “Di-neutron correlation in light neutron-rich nuclei”, Workshop on Correlations in Nuclei: From Di-nucleons to Clusters, 2007年11月26日, ワシントン大学、アメリカ
7. K. Hagino, “Pairing correlation in neutron-rich nuclei “, First FIDIPRO-JSPS workshop on energy density functionals in nuclei, 2007年10月25日, ユバスキュラ大学、フィンランド
8. 萩野浩一, 「重イオン核融合反応に対するポテンシャル・インヴァージョン法」、日本物理学会第62回年次大会、平成19年9月24日、北海道大学

その他 6 件。

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者  
萩野浩一 (HAGINO KOUICHI)  
東北大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：20335293

(2) 研究分担者  
( )

研究者番号：

(3) 連携研究者  
( )

研究者番号：