

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2013

課題番号：22540262

研究課題名(和文)弱束縛原子核における対相関と対移行反応

研究課題名(英文)Pairing correlation and pair transfer reactions of weakly bound nuclei

研究代表者

萩野 浩一 (Hagino, Kouichi)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20335293

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、弱く束縛している中性子過剰核における核子間対相関の解明であった。これに関し、主として以下の研究成果を得た。1) ドリップ線を越えた非束縛原子核の2陽子放出崩壊及び2中性子放出崩壊は対相関を強く反映し、従って、放出2核子の角度相関等から双核子相関の情報を得ることができることを指摘した、2) 中高エネルギーにおける不安定核の反応断面積の偶奇性が対相関に密接に関連する反ハロー効果の現れであることを明らかにした、3) クーロン障壁近傍のエネルギーにおける重イオン核融合反応に対して多核子移行反応を考慮した新たなモデルを構築した。

研究成果の概要(英文)：It was an aim of this study to clarify the pairing correlation between nucleons in weakly-bound neutron-rich nuclei. The main achievements include: i) I have pointed out that a two-nucleon emission decay of unbound nuclei outside the drip lines strongly reflect the pairing correlation, and thus the dinucleon correlation can be probed by studying the angular correlation of the emitted two nucleons, ii) I have shown that an odd-even staggering of reaction cross sections of neutron-rich nuclei is intimately related to the pairing anti-halo effect, and iii) I have developed a novel model for heavy-ion fusion reactions at energies around the Coulomb barrier, which takes into account the effects of multi-nucleon transfer processes.

研究分野：物理学

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 ダイニュートロン相関 2核子放出崩壊 反応断面積 重イオン反応 対移行反応 中性子ハロー

## 1. 研究開始当初の背景

陽子の数に比べて中性子の数が著しく多い中性子過剰核では、パウリ原理のために中性子の束縛エネルギーが必然的に小さくなる。研究開始までに我が国の理化学研究所(理研)をはじめとして、世界中のいくつかの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、安定原子核には見られない様々な性質が明らかになりつつあった。特に、理化学研究所にお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)がいよいよ本格稼働を開始し、研究開始時に新しい実験データが出始めつつあった。これは、原子核物理学における新たなパラダイムの幕開けと呼ぶのにふさわしいものであり、中性子過剰核の物理を通じて弱束縛量子系の物理が飛躍的に進展することが期待されていた。

## 2. 研究の目的

中性子過剰核では、その弱束縛性のために対相関相互作用の効果が強く現れ、中性子過剰核の表面付近で二つの中性子が空間的に局在化する相関、すなわち双中性子(ダイニュートロン)相関が強められる可能性が指摘されている。この強い双中性子相関を実験的に探るための方法として、2つの中性子が入射核から標的核へ(または標的核から入射核へ)移行する対移行反応の機構を解明する。このためには、中性子過剰核の中でのクーパー対の振る舞いを明らかにする必要がある、これまでに理論的に示唆されている表面对凝縮の機構を様々なアプローチから更に深く研究する。これには陽子過剰核における双陽子相関の解明も含まれる。また、中性子過剰核のクーロン分解や、対移行反応の影響を考慮した核融合反応の計算など、中性子過剰核の反応に関する関連課題にも取り組む。

## 3. 研究の方法

対相関が重要となる2中性子ハロー核などの中性子過剰核に対する最も単純なモデルである三体模型に基づく時間依存シュレーディンガー方程式を解き、対移行反応や非束縛核の2核子放出崩壊のダイナミクスを解明するとともに、これらの過程に対する対相関の効果を明らかにした。また、結合チャンネル法を用いて対移行反応を考慮した重イオン核融合反応の計算を行った。中間エネルギー及び高エネルギーにおける中性子過剰核の反応に対

してはグラウバー模型を用いて対相関の効果を明らかにした。

## 4. 研究成果

(1) 軽い中性子過剰核の記述によく用いられている3体模型に対する1次元模型を構築した。この模型を用いて中性子過剰核の基底状態における双中性子相関をわかりやすい形で表現した。また、この模型を核力分解反応に適用し、分解反応に対する双中性子相関の果たす役割を明らかにした。この模型は、簡便な計算で中性子過剰核の3体ダイナミクスの本質を引き出すもので、中性子過剰核の構造と反応に対するより深い理解を得ることができる。

(2) この1次元3体模型を陽子過剰核に適用し、2陽子トンネル崩壊の解析を行い、2陽子がポテンシャル障壁をトンネルする際に系がどのように時間発展をするのかを明らかにした。

(3) 陽子過剰核  $^{17}\text{Ne}$  に対し、 $150 + p + p$  構造を仮定した3体模型計算を行い、基底状態及び励起状態における2陽子間に働く対相関の役割を明らかにした。2陽子間に働くクーロン力は核力に比べて弱く、2陽子間にも中性子過剰核で見られる核子間の空間的相関、すなわち双陽子相関が存在することを明らかにした。

(4)  $^6\text{Be}$  核の2陽子放出崩壊現象を3体模型を用いて解析した。その際、崩壊の様子を直感的に理解することができる時間依存アプローチを開発した。崩壊のQ値(崩壊前後の原子核の質量差)と崩壊幅を同時に再現するためには双陽子相関が重要な役割を果たしていることを指摘した。また、二陽子の密度分布の時間発展を見ることにより、崩壊過程のダイナミクスを明らかにした。その結果、少なくとも崩壊過程の初期においては、初期状態にあった双陽子相関がそのまま保たれて2つの陽子が同じ方向に放出され、その後に終状態相互作用により2陽子が離れていく、という描像を得た。

(5) 最近ミシガン州立大学で実験的に

観測された 260 核からの 2 中性子放出崩壊に関する実験データを 3 体模型を用いて解析した。崩壊スペクトルに対する対相関及びそれに起因する 2 中性子相関の重要性を明らかにするとともに、2 中性子相関のために 2 中性子が反対方向に放出される成分が増幅することを指摘した。

(6) 核子移行過程の確率をクーロン障壁の位置で見積もることにより、核子移行過程に伴うクーロン障壁の動的な変化を取り入れて重イオン核融合反応の断面積を計算する方法を開発した。この方法を  $40\text{Ca}+96\text{Zr}$  反応及び  $32\text{S}+96\text{Zr}$  反応に適用し、現象論的なパラメータを一つのみ導入することにより、クーロン障壁近傍のエネルギーでの重イオン核融合反応断面積の再現に成功するとともに、これらの反応系において多核子移行過程が重要な役割を果たしていることを明らかにした。

(7) 中性子過剰核の反応断面積(相互作用断面積)はしばしば、偶数の質量数を持つ原子核の断面積に比べて奇数の質量数を持つ原子核の断面積が大きくなるという偶奇効果を示す。この偶奇効果と対相関の関係を調べ、奇核における反応断面積の増大が原子核のハロー構造によること、及び、対相関により偶核の断面積が抑制されることを指摘した。更に、偶奇パラメータを導入し、このパラメータと中性子分離エネルギーとの間の相関を論じた。

(8) 中性子過剰核  $31\text{Ne}$  の構造を粒子回転子模型を用いて解析し、芯核  $30\text{Ne}$  の回転の効果を議論した。特に  $31\text{Ne}$  核のクーロン分解反応の解析を行い、分解反応断面積の実験データから示唆される  $31\text{Ne}$  核の構造を同定した。また、グラウバー理論を用いて  $31\text{Ne}$  核の反応断面積の計算を行い、反応断面積に対する変形の効果を議論した。この計算により、クーロン分解反応の解析で決定された配位は反応断面積に関しても実験データとコンシステントであることを明らかにした。

(9)  $11\text{B}$  核における  $11\text{Li}$  核のアイソバリッククアナログ状態に対する実験データを 3 体模型を用いて解析した。計算されたクーロン変位エネルギーは実験データをよく再現し、 $11\text{Li}$

に対して行った 3 体模型の妥当性が確認された。

(10) 陽子-中性子対相関に関連し、 $pf$  殻領域における  $N=Z$  核におけるアイソスカラー ( $T=0$ ) 対相関とアイソベクター ( $T=1$ ) 対相関の競合を議論した。 $p$  軌道の核子に比べ、 $f$  軌道の核子はスピン軌道相互作用のために  $T=0$  対相関が弱くなることを指摘した。また、これに関連し、 $19\text{F}$  核の構造を 3 体模型を用いて記述し、励起状態から基底状態への電磁遷移確率がラムダ粒子の混入によりどのような影響を受けるのか議論した。 $6\text{Li}$  核でみられた事実と同様に、ラムダ粒子の混入により電磁遷移確率が小さくなるとともに、励起エネルギーも減少することを明らかにした。

(11) 核物質における対相関の果たす役割を議論した。対相関力の密度依存性のため、通常核密度付近では非圧縮率への影響は小さいが、低密度領域における核物質の状態方程式に大きな影響を与えることを明らかにした。

この他に、関連課題として、重イオン反応における非集団励起の効果、原子核の形状に対するハイペロンの不純物効果、原子核に対する相対論的アプローチにおける変分原理の適用法、ラムダ・ハイパー核に対する新しい相対論的模型の構築、中性子星の新しい観測データを用いた中性子星の構造の解析、極低エネルギーにおける核融合断面積の抑制現象の解析、原子核の基底状態に対するグローバルな計算に適した対相関力の構築、に関する研究も行った。

## 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 49 件)

1. K. Hagino and H. Sagawa, "Correlated two-neutron emission in the decay of unbound nucleus 260", *Phys. Rev. C* 89 (2014) 014331/1-6. 査読有  
DOI:10.1103/PhysRevC.89.014331

2. S. Yusa, K. Hagino, and N. Rowley, "Quasi-elastic scattering in the  $20\text{Ne}+90,92\text{Zr}$  reactions: role of non-collective excitations", *Phys. Rev. C* 88 (2013) 054621/1-7. 査読有  
DOI:10.1103/PhysRevC.88.054621

3. T. Akaishi and K. Hagino, “Reaction cross sections of hypernuclei and the shrinkage effect”, Phys. Rev. C88 (2013) 047603/1-3. 査読有  
DOI:10.1103/PhysRevC.88.047603
4. Y. Tanimura, K. Hagino, and P. Ring, “Application of the inverse Hamiltonian method to Hartree-Fock-Bogoliubov calculations”, Phys. Rev. C88 (2013) 017301/1-4. 査読有  
DOI:10.1103/PhysRevC.88.017301
5. H. Sagawa, Y. Tanimura, and K. Hagino, “Competition between T=1 and T=0 pairing in pf-shell nuclei with N=Z”, Phys. Rev. C87 (2013) 034310/1-5. 査読有  
DOI:10.1103/PhysRevC.87.034310
6. R.J. Charity, L.G. Sobotka, K. Hagino 他 18 名, “Double isobaric analog of 11Li in 11B”, Phys. Rev. C86 (2012) 041307(R)/1-5. 査読有  
DOI:10.1103/PhysRevC.86.041307
7. Y. Urata, K. Hagino, and H. Sagawa, “Reaction cross sections of the deformed halo nucleus 31Ne”, Phys. Rev. C86 (2012) 044613/1-7. 査読有  
DOI:10.1103/PhysRevC.86.044613
8. T. Maruyama, T. Oishi, K. Hagino, and H. Sagawa, “Time-dependent approach to many-particle tunneling in one-dimension”, Phys. Rev. C86 (2012) 044301/1-8. 査読有  
DOI:10.1103/PhysRevC.86.044301
9. K. Hagino and H. Sagawa, “Odd-even staggering of reaction cross sections for 22,23,240 isotopes”, Phys. Rev. C85 (2012) 037604/1-2. 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevC.85.037604
10. K. Hagino and H. Sagawa, “Pairing correlations and odd-even staggering in reaction cross sections of weakly bound nuclei”, Phys. Rev. C85 (2012) 014303/1-8. 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevC.85.014303
11. T. Oishi, K. Hagino, and H. Sagawa, “Effect of proton-proton Coulomb repulsion on soft dipole excitations of light proton-rich nuclei”, Phys. Rev. C 84 (2011) 057301/1-3. 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevC.84.057301
12. K. Hagino and H. Sagawa, “Evidence

for pairing anti-halo effect in odd-even staggering in reaction cross sections of weakly bound nuclei”, Phys. Rev. C84 (2011) 011303(R)/1-4. 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevC.84.011303

13. Y. Urata, K. Hagino, and H. Sagawa, “Ground state properties and Coulomb dissociation of the deformed halo nucleus 31Ne”, Phys. Rev. C83 (2011) 041303(R)/1-5. 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevC.83.041303

14. K. Hagino, A. Vitturi, F. Perez-Bernal, and H. Sagawa, “Two-neutron halo nuclei in one dimension: dineutron correlation and breakup reaction”, J. of Phys. G38 (2011) 015105/1-15. 査読有  
DOI:10.1088/0954-3899/38/1/015105

15. T. Oishi, K. Hagino, and H. Sagawa, “Diproton correlation in the proton rich Borromean nucleus 17Ne”, Phys. Rev. C82 (2010) 024315/1-5. 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevC.82.024315

16. K. Hagino, H. Sagawa, and P. Schuck, “Cooper pair sizes in 11Li and in superfluid nuclei: a puzzle?”, J. of Phys. G37 (2010) 064040/1-7. 査読有  
DOI:10.1088/0954-3899/37/6/064040

他33 件

〔学会発表〕(計 29 件)

1. 萩野浩一、「260 の 2 中性子放出崩壊」日本物理学会第 69 回年次大会、2014 年 3 月 27 日、東海大学

2. K. Hagino, “Two-neutron decay of 260”, International Molecule-type workshop on new correlations in exotic nuclei and advances of theoretical models, 2014 年 3 月 10 日、京都

3. K. Hagino, “Di-neutron correlation and two-neutron decay of nuclei beyond the neutron-drip line”, HaPhy-2013-09: Rare Isotopes and Nuclear Astrophysics with related topics workshop, 2013 年 9 月 25 日、浦項、韓国

4. 萩野浩一、「Di-neutron 相関研究の現状と今後の展開」日本物理学会第 68 回年次大会、2013 年 3 月 26 日、広島大学

5. K. Hagino, “Structure and reaction of a deformed halo nucleus”, YIPQS

International Molecule on Coexistence of weak and strong binding in unstable nuclei and its dynamics, 2013年3月4日、京都大学

6. K. Hagino, "Subbarrier fusion reactions and multi-neutron transfer", Symposium Italy-Japan 2012 on Nuclear Physics, 2012年11月20日、ミラノ、イタリア

7. 萩野浩一、「反応断面積の偶奇効果と対相関」日本物理学会第67回年次大会、2012年3月25日、関西学院大学

8. 萩野浩一、「ペアリング anti-halo 効果と反応断面積の偶奇効果」日本物理学会2011年秋季大会、2011年9月18日、弘前大学

9. K. Hagino, "Dineutron correlation in Borromean nuclei", Dynamics and Correlations in Exotic Nuclei (DCEN2011), 2011年10月20日、京都大学

10. K. Hagino, "Heavy ion reactions around the Coulomb barrier: an overview", Gordon Research Conference, 2011年6月15日、Colby-Sawyer College, アメリカ

11. K. Hagino, "Two-particle correlations in continuum dipole transitions in Borromean nuclei", International EFES-IN2P3 conference "Many-body correlations from dilute to dense nuclear systems", 2011年2月15日、パリ、フランス

12. 萩野浩一、「2中性子ハロ核の構造と反応」、不安定核による核反応研究の研究会、2010年8月4日、大阪大学

他 17 件

〔図書〕(計 1 件)

1. K. Hagino, I. Tanihata, and H. Sagawa, "Exotic nuclei far from the stability line", in "100 years of subatomic physics", p. 231-274. World Scientific 社、2013年

〔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

<http://www.nucl.phys.tohoku.ac.jp/~hagino>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

萩野 浩一 (Kouichi Hagino)

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

佐川 弘幸 (Hiroyuki Sagawa )

会津大学・コンピューター理工学部・教授

研究者番号：50178589