

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 20日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22740135

研究課題名（和文） 酸素・ネオン同位体の分子構造の性質・発現機構の解明と元素合成過程への応用

研究課題名（英文） Properties and mechanism of molecule-like states in oxygen and neon isotopes, and application to the nucleosynthesis

研究代表者

木村 真明 (KIMURA MASAOKI)

北海道大学・理学研究院・准教授

研究者番号：50402813

研究成果の概要（和文）： ^{21}Ne に対して、クラスターモデルによる解析を行い、励起状態に複数の分子軌道状態が存在する事を示した。さらに、中性子過剰領域では分子軌道状態の励起エネルギーが、魔法数の破れに伴って極端に小さくなる事を示した。また、中性子過剰 $N=28$ 同位体の解析を行い、魔法数の破れに伴って、変形共存現象が起こる事を示した。

研究成果の概要（英文）：Based on the analysis by a cluster model, we have shown the existence of multiple molecular-orbit states in ^{21}Ne . We also predicted that the excitation energies of the molecular-orbit states will be greatly reduced in the vicinity of the neutron-dripline. It was also found the multiple shape coexistence in the vicinity of the neutron-rich $N=28$ nuclei.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：原子核理論

科研費の分科・細目：数物系科学，素粒子・原子核・宇宙物理学

キーワード：原子核構造、不安定核、クラスター、元素合成

1. 研究開始当初の背景

- (1) 研究代表者は、ネオン同位体において、分子軌道構造を持つ励起状態の存在を理論的に予言していたが、それに対応すると考えられる実験データが、酸素およびネオン同位体において得られた
- (2) そこで、より詳細な理論解析を行う事で、その構造だけでなく発現機構まで含めて明らかにする必要があった。
- (3) また、こうした分子軌道状態は、天体の元素合成過程に対して大きな影響をもつ可能性がある。そこで、構造だけでな

く、反応計算も実行する事によって、天体核反応の反応率を評価することができるようになった。

- (4) 更に、分子軌道状態に関連して、より中性子数の多いネオン同位体などでどのように殻構造が変化するのかという問題が存在している。そこで、中性子過剰な同位体に対してもその低励起スペクトルを理論的に明らかにする必要があった。

2. 研究の目的

- (1) 酸素・ネオン同位体で発見された分子軌道状態の定量的理解、全容解明
 酸素・ネオン同位体において、報告された分子軌道構造を持つ状態に対して、理論的記述を行い、その励起エネルギー、構造を求める事で、詳細を明らかにし、更に発現機構を解明する。さらに、より中性子数の多いネオン同位体に対しても、反対称化分子軌道力学による解析を行う。
- (2) 酸素・ネオンの分子軌道状態が関与する核反応の記述と反応率の評価
 これらの同位体を持つ、分子軌道構造は天体核反応において、その反応率に大きな影響を及ぼす可能性がある。構造計算によって得られた精密な波動関数を元に、その反応率を評価する事で、精度のよい反応率を与える。

3. 研究の方法

- (1) 分子軌道構造の持つ性質を明らかにするために、反対称化分子軌道力学を用いて、これらの同位体の励起スペクトルおよび、励起状態の波動関数を導出する。また、分子軌道状態に関連する問題として、中性子過剰なネオン・マグネシウム同位体の低励起スペクトルを系統的に求める事で、中性子過剰領域における殻構造の変化を明らかにする
- (2) クラスタモデル(直交条件モデル)を用い、複素回転座標法と組み合わせる事で、酸素・ネオン同位体の高励起状態に存在する分子軌道状態に対し、精密な波動関数を導出する。さらに、その波動関数を元に、反応率を導出する事で、精度のよい反応率を決定する。

4. 研究成果

- (1) ^{21}Ne に対する分子軌道状態の精密な解析。
 直交条件モデルを用いる事で、 ^{21}Ne の励起状態の構造を解析した。その結果、従来の理論結果とは異なり、複数の分子軌道状態が存在する事が明らかになった。量子数 $K=3/2$ を持つ正負パリティの2つの回転帯に加えて、クラスタ構造が非常に発達した $K=1/2$ の負パリティの回転帯が存在する事を示した。これらの回転帯は、分子軌道構造を持つために、そのクーロン置換エネルギーが非常に大きくなる事が予測される。そのため対応する ^{21}Na のスペクトルを導出し、理論・実験のクーロン置換エネルギーを比較したところ、見事に実験と一致し、発達したクラスタ状態である事を示した。

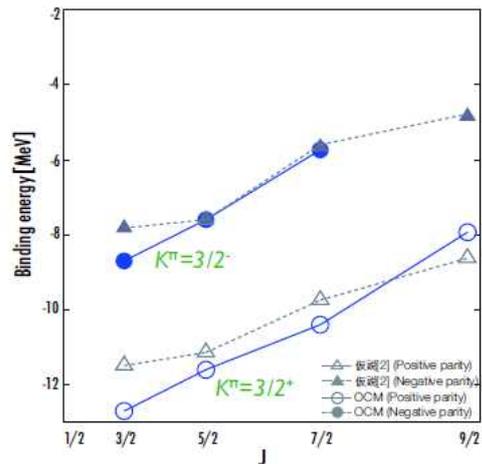
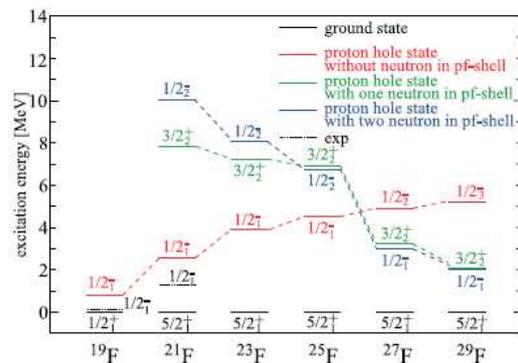
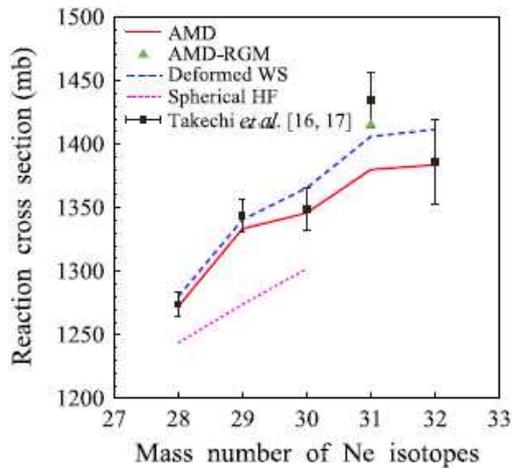


Fig. 4.5 ^{21}Ne の回転バンド $K^\pi = 3/2^\pm$ 。

- (2) 中性子過剰領域における、分子軌道状態の変化
 中性子過剰領域では、殻構造が変化するために、分子軌道状態が持つ励起エネルギーに大きな変化が現れる可能性がある。そこで、最も観測に有利だと考えられるフッ素同位体に関して反対称化分子軌道力学による解析を行った。その結果、中性子数が 20 に近い不安定各領域では、分子軌道状態のエネルギーが極端に下がる事を予言した。

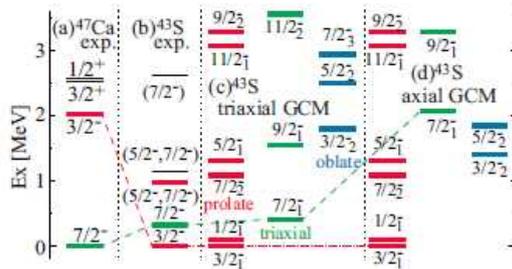


- (3) ネオン同位体における反応断面積の評価
 反対称化分子軌道力学によって、ネオン同位体に対しその安定同位体から、中性子ドリップラインに至るまでの基底状態の波動関数を導出した。九州大学在籍の研究者と協同し、その波動関数から反応断面積の評価を行った。その結果、中性子過剰領域で見られる反応断面積の増加は、中性子魔法数 $N=20$ の消失に伴う大きな核変形に起因する事を示した。さらに、 ^{31}Ne で観測された極端に大きな反応断面積は、大きく変形したコア核に、中性子が非常に弱く束縛したハロー構造によるものである事を示した。



(4) N=28 魔法数の消失と変形共存

課題を更に発展させ、中性子数 28 近辺の不安定核に対して、その低励起スペクトルの解析を行った。具体的な対象として ^{43}S のスペクトルを求め、その結果 N=28 の魔法数が消滅する事で、基底状態が変形する事、さらに変形共存現象が発生し、極めて低エネルギーに異なった 3 つの変形状態が存在する事を示した。



(5) ^{33}Mg の基底状態

^{33}Mg の基底状態のパリティに関して、相矛盾する実験結果が報告されている。β崩壊による実験では、正パリティであるとの報告がなされ、一方磁気モーメントの測定からは負パリティである事が報告されている。 ^{33}Mg のパリティがどちらであるかは、N=20 魔法数の消失とそれに伴う核変形の大きさに密接に関係しているため、重要な問題である。そこで、反対称化分子動力学を用いる事で、 ^{33}Mg の基底状態のパリティを決定した。その結果、パリティは負であり、磁気モーメントの測定結果を極めてよく再現する事が明らかとなった。また、励起状態に表れるスペクトルも、基底状態が負パリティである事に矛盾せず、正パリティであるとした根拠のいくつかは否定される事になった。

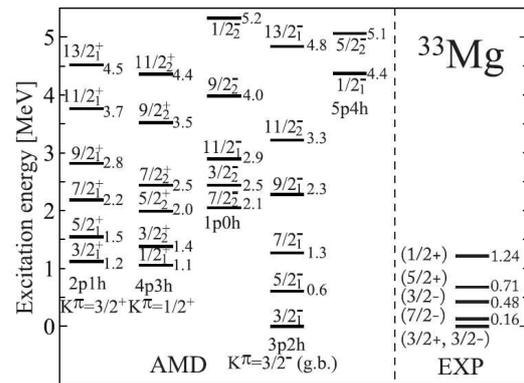


FIG. 3: Calculated spectrum of ^{33}Mg compared with the tentative assignments suggested in Refs. [13, 15]. *mpnh* configurations shown below each bands mean the dominant particle configuration. Numbers show excitation energies in MeV.

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 22 件)

- ① “Prolate, oblate, and triaxial shape coexistence, and the lost magicity of N=28 in ^{43}S ”, M. Kimura, Y. Taniguchi, Y. Kanada-Enyo, H. Horiuchi, K. Ikeda, Physical Review C 87, 011301 (2013), 1-4. 査読有
- ② “Deformation of Ne isotopes in the region of the island of inversion”, T. Sumi, K. Minomo, S. Tagami, M. Kimura, T. Matsumoto, K. Ogata, Y. R. Shimizu, M. Yahiro, Phys. Rev. C 85, 064613 (2012), 1-14. 査読有
- ③ “Excitation and Structure Change of ^{24}Mg . I - Triaxial Deformed Mean Field in Low-Lying States -”, M. Kimura, R. Yoshida, M. Isaka, Progress of Theoretical Physics 127, (2012), 287-299. 査読有
- ④ “Determination of the Structure of ^{31}Ne by a Fully Microscopic Framework”, K. Minomo, T. Sumi, M. Kimura, K. Ogata, Y. R. Shimizu, M. Yahiro, Physical Review Letters 108, 052503 (2012), 1-4. 査読有
- ⑤ “Molecule-like structure with covalent neutrons of F isotopes toward the neutron drip line”, M. Kimura, N. Furutachi, Physical Review C 83, 044304 (2011). 1-7. 査読有
- ⑥ “Bent three- α linear-chain structure of ^{13}C ”, N. Furutachi, M. Kimura, Physical Review C 83, 021303 (2011). 1-5 査読有

〔学会発表〕(計 25 件)

- ① M.Kimura, “Clustering aspects in highly excited states and neutro-rich nuclei”, 10th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics, 2012.9.25, Koelcsey Convention Centre (Hungary).
- ② M.Kimura, “Collective motions and exotic deformations in neutron-rich nuclei”, The 8th China-Japan Joint Nuclear Physics Symposium, 2012.8.17, Beijing International convention center (China).
- ③ M.Kimura, “Shape coexistence in neutron-rich N=20 and 28 isotopes studied by anti-symmetrized molecular dynamics”, Physical Society of Korea, Japan-Korea Joint Symposium, 2011.10.22, Busan Exhibition and Convention center (Korea).
- ④ M.Kimura, “Landscape of the island of inversion studied by AMD”, “Many body correlations from dilute to dense nuclear matter”, 2011.2.15, Institute Henri Poincare (France).
- ⑤ M.Kimura, “Clustering aspects of highly excited and neutron-rich nuclei”, YKIS2011, Frontier Issues in Physics of Exotic Nuclei”, 2010.10.12, Kyoto University, Japan.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 真明 (KIMURA MASA AKI)
北海道大学・大学院理学研究院・准教授
研究者番号: 50402813

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし