様　式　C－19、F－19、Z－19　(共通)

科研費
KAKENHI

# 科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 26 年　 5 月 30 日現在

機関番号：１２６０８
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2012～2013
課題番号：２４７４０１５４

研究課題名（和文）中性子過剰酸素同位体の質量測定

研究課題名（英文）mass measurements of neutron-rich oxygen isotopes

研究代表者
近藤　洋介（Kondo, Yosuke）

東京工業大学・理工学研究科・助教

研究者番号：００４５５３４６

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　2,800,000円、（間接経費）　840,000円

研究成果の概要（和文）：酸素・フッ素同位体にみられる中性子束縛限界異常のメカニズム解明をめざし、非束縛酸素同位体25O、26Oの質量測定実験を行った。実験は理化学研究所RIBFの多種粒子測定装置SAMURAIを用いて行い、過去の先行実験に比べて高統計のデータを取得することに成功した。先行実験で観測されている基底準位に加え、新たに26Oの励起準位に対応する共鳴ピークを観測した。

研究成果の概要（英文）：Aiming at clarifying mechanism of neutron drip line anomaly at oxygen and fluorine isotopes, mass measurements of unbound oxygen isotopes 25O and 26O were performed by using SAMURAI at RIBF. Thanks to higher statistics than previous experimental studies, a resonance peak of an excited state of 26O has been observed for the first time together with known ground state.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：非束縛核　不変質量法

**１．研究開始当初の背景**
酸素・フッ素同位体では中性子束縛限界（ドリップライン）が急激に変化することが知られている。このドリップライン異常がなぜ現れるのか、まだその原因は解明されていない。近年の理論研究によれば、三体力が重要な役割を果たすということが示唆されており、特にドリップラインを越えた非束縛酸素同位体において三体力の寄与が大きいという計算結果が得られている。一方、非束縛準位の測定が難しいことや非常に中性子過剰な原子核の生成が困難であるため、非束縛酸素同位体に関する実験データは不足している。そのため理論を検証することができないのが現状である。

**２．研究の目的**
中性子過剰な非束縛酸素同位体の質量測定を行い、酸素・フッ素同位体の中性子ドリップライン異常の発現メカニズムの解明を目指す。

**３．研究の方法**
中性子ドリップライン異常を解明するためには三体力についての知見が重要であると考えられるが、理論研究によれば、三体力の寄与は中性子ドリップライン（中性子数１６）を超えた非束縛酸素同位体で大きくなるとされている。そこで実験データが不足している中性子数ドリップラインより外側に位置する非束縛酸素同位体の質量測定を行い、理論の検証を行う。

非束縛酸素同位体の質量測定には、理化学研究所の RIBF にある多種粒子測定装置 SAMURAI を用いて行なう。RIBF から供給される高強度の不安定核ビームから陽子をはぎ取る反応により非束縛酸素同位体を生成する。非束縛状態の崩壊で放出される $^{24}$O および中性子を SAMURAI によって同時検出し、不変質量法により、非束縛状態の同定および質量の決定を行う。

**４．研究成果**
平成 24 年度に理化学研究所 RIBF の多種粒子測定装置 SAMURAI を用い、第一段階として非束縛酸素同位体 $^{25}$O、$^{26}$O の質量測定実験を行った。核子あたり 210MeV の不安定核ビーム $^{27}$F または $^{26}$F の一陽子分離反応により、非束縛核 $^{26}$O、$^{25}$O を生成した。これらの崩壊で放出される $^{24}$O と中性子の運動量を SAMURAI により分析し、不変質量法により崩壊エネルギースペクトルを得た。図１は本研究で観測された $^{24}$O と中性子の崩壊エネルギー分布で、$^{25}$O の基底状態に対応する共鳴ピークを観測することに成功した。過去に行われた $^{25}$O の質量測定実験と比較して、約 50 倍の統計量を得ることができた。非常に高統計のデータを得ることができたため、2 中性子崩壊のチャネルについても調べることができ、それにより $^{25}$O の励起状態についても同定することができる。これまで $^{25}$O の励起準位については全く実験情報がないが、現在までの解析により、$^{25}$O の励起状態に対応すると考えられるピークが複数観測されている。

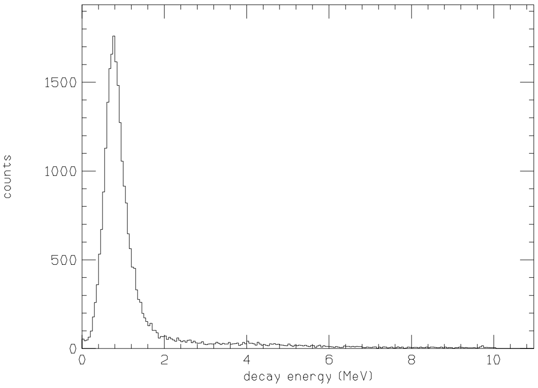


図１：$^{25}$O の崩壊エネルギースペクトル

$^{26}$O については、基底準位に対応する共鳴ピークを観測することに成功した。過去の実験と比べると、5 倍程度の統計量を得ることができた。これまでの実験では統計が非常に少なく、また共鳴ピークが中性子崩壊の閾値に非常に近いために、現在のところ基底状態のエネルギーは上限値しか決まっていない。$^{26}$O は非常に長い寿命を持つ 2 中性子放射核である可能性が指摘されており、これまでなかった新しい現象として現在非常に注目を集めている。基底状態のエネルギーはこの新しい現象を検証するうえで非常に重要である。本実験では高統計のデータを得ることができたので、基底準位の下限値を決定できる可能性がある。

また、基底準位に加え、第一励起状態に対応する共鳴ピークを初めて観測することに成功した。この励起準位はおそらく 2+準位であると考えられる。図２は N=18 の核の 2+準位の励起エネルギーと、シェルモデル計算の比較したものである。このシェルモデル計算は USDB 相互作用を用いて行ったもので、周辺の質量領域の原子核のエネルギーを非常によく再現することが知られている。$^{36}$Ar から $^{30}$Mg では実験で得られている $2^+$の励起エネルギーを非常によく再現しているのに対し、$^{28}$Ne では少しずれ始め、$^{26}$O ではずれが顕著になっている。考えられる原因として、このシェルモデル計算では pf 殻の効果が考慮されていないことが挙げられる。逆転の島と呼ばれる領域では、pf 殻が重量な寄与を果たすことが実験的に知られており、USDB 相互作用を用いた計算では基底準位のエネルギーを再現しないことがわかっている。$^{26}$O で USDB 相互作用を用いた計算が実験を再現しないのは、逆転の島と同様に pf 殻が大きく寄与している可能性がある。

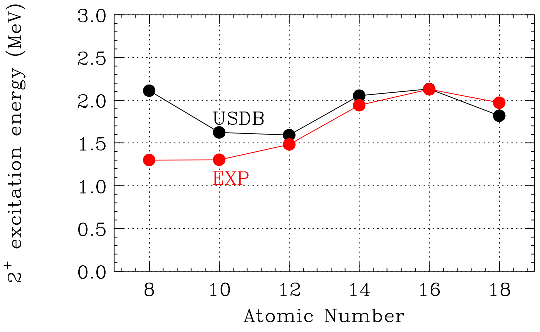


図２：N=18 核の $2^+$励起エネルギー

また、$^{26}$O のデータ解析では２中性子の同時検出が重要なポイントとなる。複数中性子の同時検出では中性子の多重散乱によるクロストークが大きなバックグラウンドとなり、このクロストークバックグラウンドをどれだけ効率よく除去できるかが鍵となる。これまでの中性子検出の経験から、ある程度解析方法は確立していたが、本研究により解析手法を改善し、より低バックグラウンドの不変質量スペクトルを得ることができた。これは将来行う $^{27}$O、$^{28}$O の質量測定実験における３または４中性子の同時検出でも非常に重要な役割を果たす。

今後の展望として、さらに中性子過剰な酸素同位体 $^{27}$O、$^{28}$O の質量測定実験を行うことを計画している。理論研究によれば、$^{27}$O、$^{28}$O での三体力の効果は $^{25}$O、$^{26}$O に比べてさらに大きくなるとされており、三体力の効果をより見えやすいのではないかという期待がある。$^{27}$O、$^{28}$O の質量実験計画は $^{25}$O、$^{26}$O と同様に高強度の不安定核ビームを供給できる RIBF で多種粒子測定装置 SAMURAI を用いて行う。この実験では３または４中性子の同時検出が必要となるため、非常に難しい実験となる。中性子の検出効率向上のために、現在ドイツの GSI で建設中の新しい中性子検出器アレイ NeuLAND を $^{25}$O、$^{26}$O の質量測定実験で用いた既存の中性子検出器アレイ NEBULA と組み合わせる予定である。この実験計画は理化学研究所 RIBF の第 12 回実験課題採択委員会で審査を受け、最も評価の高い S ランクで承認された。現在 NeuLAND はドイツ GSI において建設中で、2014 年秋に行われるテスト実験の後、日本に輸送される予定である。2014 年度中に組み立て・試験を行い、2015 年に質量測定実験を行うことを予定している。

## 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１４件）


① Shell and shape evolution at N = 28: The 40Mg ground state、H. L. Crawford, P. Fallon, A. O. Macchiavelli, Y. Kondo（19 番目）、計 36 名、Phys. Rev. C 89, 041303, (2014), DOI: 10.1103/PhysRevC.89.041303、査読有

② T. Nakamura, N. Kobayashi, Y. Kondo（3 番目）、計 27 名、Phys. Rev. Lett. 112, 142501, (2014), DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.142501、査読有

③ Structure of $^{136}$Sn and the Z=50 magicity、H. Wang, N. Aoi, S. Takeuchi, Y. Kondo(１２番目),計２７名、Prog. Theor. Exp. Phys. 2014, 023D02 (2014), 10.1093/ptep/ptu003、査読有

④ One-neutron knockout reaction of $^{17}$C on a hydrogen target at 70 MeV/nucleon, Y. Satou, J.W. Hwang, S. Kim, Y. Kondo（7 番目）、計 32 名、Phys. Lett. B 728, 462 - 466, (2014), DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2013.12.024、査読有

⑤ In-Beam γ-Ray Spectroscopy of $^{34,36,38}$Mg: Merging the N=20 and N=28 Shell Quenching, P. Doornenbal, H. Scheit, S. Takeuchi, Y. Kondo（15 番目）、計 23 名 Phys. Rev. Lett. 111, 212502, (2013), DOI:10.1103/PhysRevLett.111.212502、査読有

⑥ Collectivity evolution in the neutron-rich Pd isotopes toward the N=82 shell closure, H. Wang, N. Aoi, S. Takeuchi, Y. Kondo（13 番目）、計 32 名, Phys. Rev. C 88, 054318, (2013), DOI:10.1103/PhysRevC.88.054318、査読有

⑦ Collectivity of neutron-rich Ti isotopes, H. Suzuki, N. Aoi, E. Takeshita, Y. Kondo（16 番目）,計 37 名, Phys. Rev. C 88, 024326, (2013), DOI:10.1103/PhysRevC.88.024326、査読有

⑧ Shallow and diffuse spin-orbit potential for proton elastic scattering from neutron-rich helium isotopes at 71 MeV/nucleon, S. Sakaguchi, T. Uesaka, N. Aoi, Y. Kondo（9 番目）,計 19 名, Phys. Rev. C 87, 021601, (2013), DOI:10.1103/PhysRevC.87.021601、査読有

⑨ Observation of New Isotope $^{131}$Ag via the Two-Step Fragmentation Technique, H. Wang, N. Aoi, S. Takeuchi, Y. Kondo（12 番目）, 計 15 名, Chin. Phys. Lett. 30, 042501, (2013),10.1088/0256-307X/30/4/042501、査読有

⑩ Well Developed Deformation in $^{42}$Si, S. Takeuchi, M. Matsushita, N. Aoi, Y. Kondo(25 番目),計 43 名, Phys. Rev. Lett. 109, 182501, (2012), DOI:10.1103/PhysRevLett.109.182501、査読有

⑪ Hindered Proton Collectivity in ${}_{16}^{28}S_{12}$: Possible Magic Number at Z=16, Y. Togano, Y. Yamada, N. Iwasa, Y. Kondo（17 番目）, 計 37 名, Phys. Rev. Lett. 108, 222501, (2012), DOI:10.1103/PhysRevLett.108.222501、査読有
⑫ N=16 Spherical Shell Closure in ${}^{24}O$, K. Tshoo, Y. Satou, H. Bhang, Y. Kondo（6 番目）,計 35 名, Phys. Rev. Lett. 109, 022501, (2012), DOI:10.1103/PhysRevLett.109.022501、査読有
⑬ One- and two-neutron removal reactions from the most neutron-rich carbon isotopes、N. Kobayashi, T. Nakamura, J.A. Tostevin, Y. Kondo（4 番目）,計 26 名, Phys. Rev. C 86, 054604, (2012), DOI:10.1103/PhysRevC.86.054604、査読有
⑭ Observation of new microsecond isomers among fission products from in-flight fission of 345 MeV/nucleon ${}^{238}U$、D. Kameda, T. Kubo, T. Ohnishi, Y. Kondo（35 番目）,計 60 名, Phys. Rev. C 86, 054319, (2012), DOI:10.1103/PhysRevC.86.054319、査読有

〔学会発表〕（計 9件）
① Y. Kondo 、Experimental study of neutron-rich nuclei near and beyond drip line with SAMURAI at RIBF、3rd International Workshop on "State of the Art in Nuclear Cluster Physics",28, May, 2014, Yokohama Media Buisiness Center, Kanagawa, Japan
② Y. Kondo、Experimental study of ${}^{26}O$、International Molecule-type Workshop on New correlations in exotic nuclei and advances of theoretical models, 14, March, 2014, YITP, Kyoto, Japan
③ Y. Kondo、Invariant mass spectroscopy of unbound oxygen isotopes using SAMURAI、LIA Symposium 2013, October 1, 2013, CNRS auditorium, Paris, France
④ 近藤洋介、中性子ドリップライン領域での分解反応実験、日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 28 日, 広島大学東広島キャンパス
⑤ Y.Kondo、Overview of the SAMURAI Dayone experiments、SUNFLOWER - In-beam gamma and MINOS (RIBF-ULIC-miniWS-023), February 20, 2013, RIKEN, Japan
⑥ Y.Kondo、Study of neutron-rich nuclei near the drip line using SAMURAI、COllective Motions in nuclei under EXtreme conditions (COMEX4), October 24, 2012, Shonan Village Center, Japan
⑦ Y.Kondo 、 Experimental study of unstable nuclei near the neutron drip line 、 International Symposium on Perspective in Isospin Physics ~Role of non-central interactions in structure and dynamics of unstable nuclei~, August 27, 2012, RIKEN, Japan
⑧ 近藤洋介,${}^{25}O$,${}^{26}O$ の非束縛準位の探索、日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学湘南キャンパス, 2014 年 3 月 28 日
⑨ 近藤洋介、中性子過剰な酸素同位体の質量測定、第二回中性子星核物質研究会, 12 月 28 日、 2013, 理化学研究所

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕
○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

６．研究組織
(1)研究代表者
近藤　洋介　（KONDO, Yosuke）
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号：00455346

(2)研究分担者
（　　）

研究者番号：

(3)連携研究者
（　　）

研究者番号：