

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03599

研究課題名（和文）双腕スペクトロメータで探る核の励起状態

研究課題名（英文）Study of excited nuclear states by using double arm spectrometers

研究代表者

小林 信之（Nobuyuki, Kobayashi）

大阪大学・核物理研究センター・准教授

研究者番号：80750778

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、研究代表者が考案した手法により、原子核の励起状態の半径を測定することとする。本手法は核の励起状態に直接反応の手法を適用するものであり、これまで不可能とされてきた“原子核反応を用いた励起状態の構造研究”を可能にするものである。本研究の成果として、従来考えられていた双腕スペクトロメータのイオン光学のセットアップを改良するアイデアを得られた。さらに、この実証試験のためのビームタイムを米国Facility for Rare Isotope Beams (FRIB) において提案し、114時間のビームタイムが承認された。これにより、今後この研究をより広い領域に拡張できる可能性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、前人未踏の学術領域である「核図表のZ-N-Ex空間上の各領域にどのような構造が現れるか？また、その出現メカニズムは何か？」ということを実験的に直接反応を用いて研究を行うことである。これまで、基底状態（Z-N平面）において盛んに研究されてきた特異構造“ハロー構造”を持つ状態がZ-N-Ex空間上でどのように分布し、どのようなメカニズムで出現するのかという未解決問題が存在していた。本研究でこの領域に踏み込むことが可能になったことを定量的に示すことができた。これは、今後の実験におけるパラダイムシフトを起こす可能性を秘めた重要な成果である。

研究成果の概要（英文）：This research aims to measure the radius of the excited states of nuclei using newly developed method by us. This method applies a direct reaction method to the excited states of nuclei, which enable us to "study the structure of an excited state using nuclear reactions." This has been considered impossible until now.

As a result of this research, we obtained an idea to improve the ion optical setup of a double-arm spectrometer that was previously considered. Furthermore, the beam time for this demonstration experiment was proposed to the Facility for Rare Isotope Beams (FRIB) in US, and a beam time of 114 hours was approved. This indicates the possibility of expanding this research to a wider area in the future.

研究分野：原子核物理

キーワード：原子核物理実験 ハロー核 励起状態 中性子過剰核

1. 研究開始当初の背景

原子核物理学の最も重要な研究課題の一つとして、原子核という系自身が本質的に多様な性質を丁寧に調べ、そのメカニズムを明らかにすることである。原子核は最も軽い陽子から元素番号 118 番の超重核まで存在し、およそ 3000 種の同位体核種が見つかり、原子核の性質は静的(核構造)なものとの動的(核反応)なものに分けられるが、これらの2つの研究を通して原子核という系の本質が見えてくる。核種は陽子数 Z と中性子数 N の組み合わせで表されるが、各原子核は 1 つの基底状態と複数の励起状態を持ち、各状態は励起エネルギー E_x で識別される。言い換えると、原子核は Z, N , 及び E_x の 3 つの自由度を持ち、原子核の各状態は図 1 のように、 $Z-N-E_x$ 空間上の 1 点で与えられる。

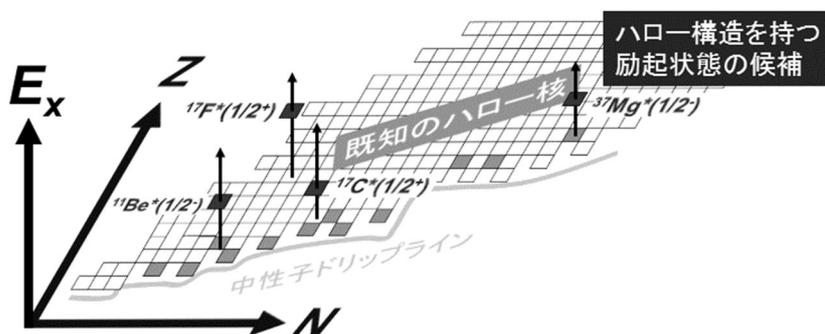


図 1 : 陽子数 Z 、中性子数 N 、励起エネルギー E_x を用いて表した 3 次元核図表。各四角のパネルが原子核の 1 つの状態を表す。ここでは、励起状態に表れるハロー構造の候補として $^{11}\text{B}(1/2^-)$, $^{17}\text{F}(1/2^+)$, $^{17}\text{C}(1/2^+)$, $^{37}\text{Mg}(1/2^-)$ を描いた。

このように、各状態は Z, N , 及び E_x によって一意に特徴づけられるが、興味深い事に、 Z, N , または E_x を少し変えると、原子核の性質(変形度、反応性、スピンパリティなど)はしばしば劇的に変化する。特に核の変形度の変化は量子相転移と呼ばれ (T. Togashi *et al.*, PRL **117** (2016) 172502)、 $Z - N - E_x$ 空間上の特定の領域に、同一のメカニズムによって生じたと思われる変形相が現れることが知られている。このような相構造を作り出すのは、原子核がフェルミ粒子である核子からなる孤立した有限量子多体系であり、核全体の性質が少数の核子によって決められていることに起因する。

近年研究が進んでいる反対称化分子動力学法を用いた理論計算や、平均場理論によると、核の励起状態には、三軸非対称変形、洋ナシ型、バナナ型変形やクラスター構造といった多様な構造が示唆され、いくつかの候補も実験的に発見されている。一方で、直接反応を用いて得られた実験的な証拠は存在しない状況である。さらに、これまで原子核物理分野において盛んに研究されてきた特異構造“ハロー構造”を持つ状態が $Z - N - E_x$ 空間上でどのように分布し、どのようなメカニズムで出現するのかという大きな研究課題が存在する。

ここで、ハロー構造とは最外殻の核子の波動関数が核の平均ポテンシャルからトンネル効果によって大きくはみ出した“ハロー(暈)”のことを指し、核の束縛エネルギーが小さい場合に生じる構造である。原子核がハロー構造を持つ場合、核半径は大きくなり、核の反応確率、すなわち断面積も大きくなる。ハロー構造はこれまで図 1 の中性子ド

リップライン近傍に見つかっており、ハロー構造をもつ最も重い核は我々の研究によって発見された ^{37}Mg (N. Kobayashi *et al.*, PRL, **112** (2016) 242501) であり、その近傍にも ^{22}C (N. Kobayashi *et al.*, PRC, **86** (2012) 054604) や ^{29}Ne (N. Kobayashi *et al.*, PRC, **93** (2016) 014613) といった核がハロー核または“適度なハロー核”として見つかっている。 ^{37}Mg と ^{29}Ne は“逆転の島”と呼ばれる魔法数を破って生じた特殊な変形相に位置する核であり、変形がハロー構造を生み出す一つの要因として考えられている。この結果から、より重い領域、さらには、励起状態において、ハロー構造が従来の予想以上に多く出現することが示唆されている。特に、励起状態におけるハロー構造の特定は原子核の相を研究する上で重要な課題であるが、これまで、実験上の困難さから不可能とされ、全く行われて来なかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は双腕スペクトロメータを用いて核の励起状態の核半径を測定するための手法を開発し、弱束縛状態に表れると予想されるハロー構造を同定するための基礎研究を行うことである。原子核の励起状態は寿命がピコ秒からナノ秒と短く、標的にすることが出来ない。そこで、本研究によって開発した独自の手法を用いることでこの問題を克服する。

双腕スペクトロメータとしては、大阪大学核物理研究センター (RCNP) のグランドライデンスペクトロメータ (GR) と大立体角スペクトロメータ (LAS) を用いる (図 2)。この規模の双腕スペクトロメータは世界的に見ても存在せず、本研究を遂行できる唯一の装置である。2 つのスペクトロメータは用途によって使い分けるために設計されたものであるが、近年では $(p, 2p)$ 反応によって放出される 2 つの陽子を同時測定したり、ビーム位置のキャリブレーションをする目的で、2 つ同時に運用することが増えてきている。

3. 研究の方法

本研究ではさまざまな反応を対象とするが、ここでは $A(B, C)D$ という反応を例にとり実験手法を述べる。RCNP のリングサイクロトロンで加速した A ビームを散乱槽中心の標的に入射させる。種々の反応によって生成される D は、同時に生成される C と入射の運動エネルギーを分け合う。2 つのスペクトロメータの磁場と標的を適切に選ぶことで、励起状態を同定し、さらには核半径を同定することが可能になる。本研究において我々が開発したこの新手法については、現在論文を執筆中である。

本研究では従来型の手法を組み合わせることで、全く新しい手法を生み出しており、この点で本研究は独自性を持つ。また、原子核の特異構造の出現メカニズムを解明するためには、各構成核子の分光学的因子を特定することが重要であるが、励起状態においては、前述の通り不可能であった。本手法により、“原子核反応を用いた励起状態の構造研究”という新しい研究分野が開拓されると期待され、本研究はこの点で創造性を持つ。

4. 研究成果

初年度は双腕スペクトロメータのイオン光学について考察を行い、実験的手法の解析を行った。この基本的なアイディアに基づき、実際に我々が保有する双腕スペクトロメータ「グランドライデン」および「口径スペクトロメータ(LAS)」における実験の詳細

設計を行なった。実験に必要な物品の購入も進めた。

2年目には、断面積等の理論計算をグラウパー模型を用いて行った。さらに、標的厚、ビームエネルギー、ビームラインの磁場、後段のスペクトロメータの磁場計算、反応の収量、系統誤差、統計誤差の見積と計算を行った。また、本研究のテスト実験に相当するビームタイムに向け、プロポーザルの作成を行なった。これと並行して、実験で用いる装置の設計を進め、作成をおこなった。

3年目には、これまで考察した双腕スペクトロメータのイオン光学について改良を行うと共に、この過程で得られた知見から、イオン光学を含めた実験セットアップの新しいアイデアを発見した。この実験セットアップでは、これまでのセットアップにおいて困難となる問題点を改良したものであり、誤差を見積もる上で優れたセットアップになっている。この成果の実証試験のためのビームタイムを米国 Facility for Rare Isotope Beams (FRIB) において提案し、114時間のビームタイムが承認された。このビームタイムはFRIBにおけるビームタイムは第2回のPACにおいて承認されたビームタイムであるが、日本の研究グループが主導する実験としては、初めて承認されたプロポーザルである。この実験のデータ解析を行い、論文としてまとめることで、今後、これまで前人未到であった学術領域に挑戦できると期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件/うち国際共著 13件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kim S., Hwang J.W., Satou Y., Orr N.A., Nakamura T., Kondo Y., Gibelin J., ... Kobayashi N.	4. 巻 836
2. 論文標題 Unbound states in ^{17}C and p -sd shell-model interactions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 137629 ~ 137629
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2022.137629	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Revel A., Wu J., Iwasaki H., Ash J., Bazin D., Brown B.A., Chen J., Elder R., Farris P., Gade A., Grindler M., Kobayashi N., et al.	4. 巻 838
2. 論文標題 Large collectivity in ^{29}Ne at the boundary of the island of inversion	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 137704 ~ 137704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2023.137704	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kim Sunji, Hwang Jongwon, Satou Yoshiteru, Orr Nigel A., Nakamura Takashi, Kondo Yosuke, Gibelin Julien, ... Nobuyuki Kobayashi	4. 巻 63
2. 論文標題 Spectroscopy of ^{17}C Above the Neutron Separation Energy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Few-Body Systems	6. 最初と最後の頁 1 ~ 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00601-022-01725-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Uthayakumar S., Bentley M. A., Simpson E. C., Haylett T., Yajzey R., Lenzi S. M., Satula W., ... N. Kobayashi	4. 巻 106
2. 論文標題 Spectroscopy of the $T = 3$ over $2A = 47$ and $A = 45$ mirror nuclei via one- and two-nucleon knockout reactions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 24327
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.106.024327	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Adachi S., Fujikawa Y., Kawabata T., Akimune H., Doi T., Furuno T., Harada T., Inaba K., Ishida S., Itoh M., Iwamoto C., Kobayashi N., Maeda Y., Matsuda Y., Murata M., Okamoto S., Sakaue A., Sekiya R., Tamii A., Tsumura M.	4. 巻 819
2. 論文標題 Candidates for the 5 condensed state in 20Ne	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136411 ~ 136411
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136411	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Crespi F.C.L., Bracco A., Lanza E.G., Tamii A., ..., Kobayashi N.	4. 巻 816
2. 論文標題 The structure of low-lying 1- states in 90,94Zr from (,) and (p,p) reactions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136210 ~ 136210
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136210	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Elder R., Iwasaki H., Ash J., Bazin D., Bender P. C., Braunroth T., Campbell C. M., Crawford H. L., Elman B., Gade A., Grindler M., Kobayashi N., et al.	4. 巻 104
2. 論文標題 Lifetime measurements probing collectivity in the ground-state band of 32Mg	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 024307-1 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.104.024307	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Morris L., Jenkins D. G., Harakeh M. N., Isaak J., Kobayashi N., Tamii A., et al.	4. 巻 104
2. 論文標題 Search for in-band transitions in the candidate superdeformed band in 28Si	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 054323-1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.104.054323	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tsumura M., Kawabata T., Takahashi Y., ..., Kobayashi N.	4. 巻 817
2. 論文標題 First experimental determination of the radiative-decay probability of the 3-1state in ^{12}C for estimating the triple alpha reaction rate in high temperature environments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136283 ~ 136283
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136283	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Watanabe A., Nakai S., Wada Y., Sekiguchi K., Deltuva A., ..., Kobayashi N.	4. 巻 103
2. 論文標題 Proton-3He elastic scattering at intermediate energies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 044001-1 ~ 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.103.044001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yang Z. H., Kubota Y., Corsi A., Yoshida K., Sun X.-X., Li J. G., Kimura M., Michel N., Ogata K., Yuan C. X., Yuan Q., ..., Kobayashi N.	4. 巻 126
2. 論文標題 Quasifree Neutron Knockout Reaction Reveals a Small s-Orbital Component in the Borromean Nucleus ^{17}B	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 082501-1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.082501	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yajzey R., Bentley M.A., Simpson E.C., Haylett T., Uthayakumaar S., ..., Konayahi N.	4. 巻 823
2. 論文標題 Spectroscopy of the T=2 mirror nuclei $^{48}\text{Fe}/^{48}\text{Ti}$ using mirrored knockout reactions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136757 ~ 136757
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136757	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Zamora J. C., Sullivan C., Zegers R. G. T., ..., Kobayashi N.	4. 巻 104
2. 論文標題 Investigation of the isoscalar response of 24Mg to 6Li scattering	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 014607-1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.104.014607	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Nobuyuki Kobayashi
2. 発表標題 PANDORA Project -- Measurements of photo-nuclear reaction cross sections at RCNP
3. 学会等名 Mean-field and Cluster Dynamics in Nuclear Systems 2022 (MCD2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林信之
2. 発表標題 数値シミュレーションを用いた Slope ADC の到達性能の研究
3. 学会等名 計測システム研究会2023@RCNP ~計測システム開発の現状と今後の展開~
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	Facility for Rare Isotope Beams			