

令和 4 年 5 月 18 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03883

研究課題名(和文)原子核内の直鎖クラスター配位状態の検証

研究課題名(英文)Confirmation of the linear cluster chain state in atomic nucleus

研究代表者

山口 英斉 (Yamaguchi, Hidetoshi)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・講師

研究者番号：30376529

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)： ^{14}C 原子核の直鎖クラスター状態探索のため、2020年度にイタリアINFN-LNS研究所において $^{10}\text{Be}+$ 共鳴散乱実験がスケジュールされていたが、コロナ禍のために中止となった。一方で鏡像核である 140 核の共鳴状態を $^{10}\text{C}+$ 共鳴散乱を通して調べる実験を、ベルギーとの共同研究の形で実施した。研究期間中にデータ解析がほぼ完了し、共鳴状態が多数観測された。更に、 ^{14}C 核と類似した直鎖クラスター状態の候補と考えられる幾つかの状態が発見されるという、興味深い結果が得られた。この結果は近い将来に論文として出版する予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

直鎖クラスター状態は原子核の特殊な形態の1つとして1950年代から予言されたものであるが、未だに確実な証拠が得られていない。研究代表者は2017年の論文で初めて直鎖クラスター状態の存在を示唆する強い証拠を提示したが、本研究で別の原子核における新たな実験的証拠をつかむことに成功した。この結果は今後の原子核クラスター研究に大きなインパクトを与えることが期待される。更に、原子核は形状を持つことが確認された物質のうち最も小さいものであり、本研究は、その原子核の形状を直鎖状に配位させる技術的な一歩という意味でも興味深い。

研究成果の概要(英文)：A $^{10}\text{Be}+\alpha$ resonant scattering experiment to search linear chain cluster state in the ^{14}C nucleus was scheduled at INFN-LNS, Italy in 2020, however, postponed due to the COVID-19 pandemic.

On the other hand, we carried out a $^{10}\text{C}+\alpha$ resonant scattering experiment to study the resonance states in the mirror nucleus 140 , in collaboration with a Belgian group. The data analysis has been almost completed, where we observed many resonance states. A particularly interesting result was that we found several candidates of the linear-chain cluster states, similar to the ones in ^{14}C . We are planning to publish the result as a paper in the near future.

研究分野：実験核物理

キーワード：原子核クラスター 直鎖状態 不安定核 共鳴散乱 炭素-14 酸素-14

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

原子核内に 粒子(ヘリウム原子核に相当)のクラスターが形成され、そのクラスターが直鎖状配列を取り得るという理論的予測は、古くは1950年代から存在した。研究代表者は、2017年の論文 (H. Yamaguchi et al., Phys. Lett. B 766 11-16 (2017)) で、理論的な予測とよく一致する直鎖配列状態の証拠を炭素-14(^{14}C)原子核に初めて見出したことを発表し、大きな反響を得た。しかし、データの質が不十分であることもあり、万人を納得させる強い証拠であるとは未だ認められていない。本研究により、直鎖配列クラスター構造の更なる実験的証拠を得て、その存在を明らかにすることを目指した。

2. 研究の目的

研究の目的としていたのは以下の3つである。

1. ^{14}C の直鎖状態の存在の精密検証。
2. ^{14}C に予言された高励起状態(γ -バンド)直鎖状態の探索。
3. 他の類似核、特に鏡像核 ^{14}O や中性子過剰の ^{16}C に同様の直鎖状態は存在するかの検証。

コロナ禍により、予定された加速器実験が遂行できない状態に陥ったが、上記の目的は、限られた範囲内では達成することができた。

3. 研究の方法

共鳴の探索は、原子核の 共鳴散乱を測定することにより行った。実験のセットアップは、これまでに研究代表者が開発していたもの(図1)を基本とし、シリコン検出器系の増強を加えたものであった。その特長として、検出器をヘリウムガス中に置くことにより、信頼性の高いデータ取得が可能であることが挙げられる。

本研究期間内に、このセットアップを用い、 $^{10}\text{C}+$ 共鳴散乱実験を遂行した。 ^{10}C は短寿命不安定核であり、東京大学原子核科学研究センター(CNS)のCRIB 装置により、生成・最適化を行った。実験は東京大学その他、ベルギーのブリュッセル自由大学、大阪大学、京都大学の共同研究の形態で遂行した。

実験で得られた散乱粒子のエネルギースペクトル(図2)をR-matrix理論の手法で解析し、多数の共鳴のパラメータを決定した。

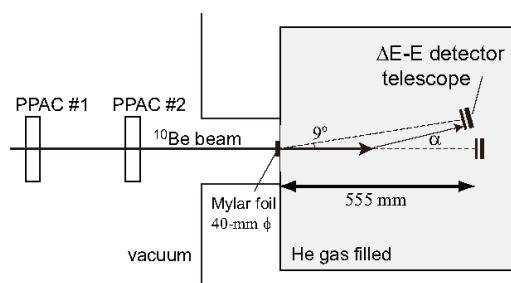


図 1: 共鳴散乱実験のセットアップ
(Yamaguchi et al., (2017))

$^{10}\text{C}+\alpha$ 共鳴散乱スペクトル

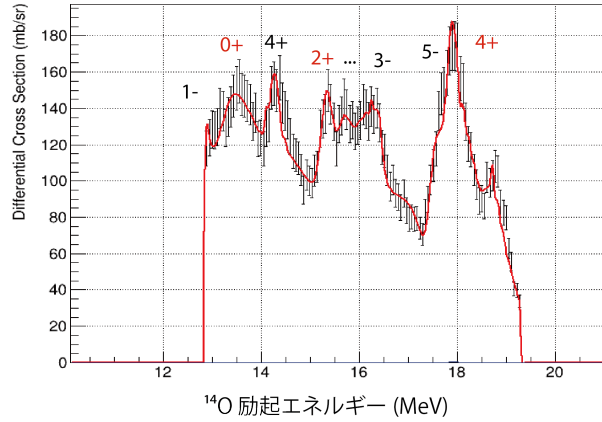


図 2: $^{10}\text{C}+$ 共鳴散乱実験で得られたエネルギースペクトル。多数の共鳴構造が観測された。

4 . 研究成果

上述の手法で、 ^{14}O 核の共鳴状態を $^{10}\text{C}+$ 共鳴散乱測定を、国際共同実験として実施した。研究期間中にデータ解析がほぼ完了し、共鳴状態が多数観測された。特に、図 2 で赤字で示されているように、 0^+ 、 2^+ 、 4^+ と、鏡像原子核 ^{14}C における直鎖状態とされた共鳴と類似の共鳴が観測されたことは大きな発見であり、非常に興味深い。この結果は近い将来に論文として出版する予定である。

上記の研究以外に、 ^{14}C 原子核の直鎖クラスター状態探索のため、2020 年度にイタリア INFN-LNS 研究所において $^{10}\text{Be}+$ 共鳴散乱実験がスケジュールされていたが、コロナ禍のために延期となった。しかし、先行して行ったテスト実験の結果を詳細に解析し、直鎖状態の証拠を見出すための検討を進めている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 18件／うち国際共著 18件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hayakawa S., La Cognata M., Lamia L., Yamaguchi H., Kahl D., Abe K., Shimizu H., Yang L., Beliuskina et al.,	4. 巻 915
2. 論文標題 Constraining the Primordial Lithium Abundance: New Cross Section Measurement of the $7\text{Be} + n$ Reactions Updates the Total 7Be Destruction Rate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L13 (14p)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac061f	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 Palmerini S., La Cognata M., Hammache F., Acosta L., Alba R., Burjan V., Chevez E., Cherubini S., Cvetinovic A., D'Agata G., de Sereville N., et al.	4. 巻 136
2. 論文標題 The $27\text{Al}(p, \gamma)24\text{Mg}$ reaction at astrophysical energies studied by means of the Trojan Horse Method applied to the $2\text{H}(27\text{Al}, \gamma)24\text{Mg}n$ reaction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The European Physical Journal Plus	6. 最初と最後の頁 898 (12p)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjp/s13360-021-01872-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Hu J., Yamaguchi H., Lam Y.H., Heger A., Kahl D., Jacobs A.M., Johnston Z., Xu S.W., Zhang N. et al.	4. 巻 127
2. 論文標題 Advancement of Photospheric Radius Expansion and Clocked Type-I X-Ray Burst Models with the New $22\text{Mg}(p, \gamma)25\text{Al}$ Reaction Rate Determined at the Gamow Energy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 172701 (7p)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.127.172701	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 Yao Xingqun, Kusakabe Motohiko, Kajino Toshitaka, Cherubini Silvio, Hayakawa Seiya, Yamaguchi Hidetoshi	4. 巻 260
2. 論文標題 Supernova Nucleosynthesis, Radioactive Nuclear Reactions and Neutrino-Mass Hierarchy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 01007 (4p)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202226001007	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 Yamaguchi H., Hayakawa S., Ma N.R., Shimizu H., Okawa K., Yang L., Kahl D., La Cognata M., Lamia L., Abe K., Beliuskina O., Cha S.M., Chae K.Y., et al.	4. 巻 260
2. 論文標題 Experimental studies on astrophysical reactions at the low-energy RI beam separator CRIB	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 03003 (4p)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202226003003	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 Hu J., Yamaguchi H., Lam Y.H., Heger A., Kahl D., Jacobs A.M., Johnston Z., Xu S.W., Zhang N.T., Ma S.B., Ru L.H., Liu E.Q., et al.	4. 巻 260
2. 論文標題 First measurement of $^{25}\text{Al}+p$ resonant scattering relevant to the astrophysical reaction $^{22}\text{Mg}(p, ^{25}\text{Al})$	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 05001 (4p)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202226005001	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 Yamaguchi H., Hayakawa S., Yang L., Shimizu H., Kahl D., Suhara T., Iwasa N., Cha S. M., Kwag M. S., Lee J. H., Lee E. J., Chae K. Y., Kim A., Kim D. H., Wakabayashi Y., Imai N., Kitamura N., Lee P., Moon J. Y., Lee K. B., Akers C., Duy N. N., Khiem L. H., Lee C. S.	4. 巻 32
2. 論文標題 Studies on Nuclear Astrophysics and Nuclear Clustering with Low-energy RI Beams at CRIB	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 010055 (6p)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.32.010055	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 Inoue Azusa, Tamii Atsushi, Chan Phaikyng, Hayakawa Seiya, Kobayashi Nobuyuki, Maeda Yukie, Nonaka Kotaro, Shima Tatsushi, Shimizu Hideki, Tran Dinh Trong, Wang Xuan, Yamaguchi Hidetoshi, Yang Lei, Yang Zaihong	4. 巻 1643
2. 論文標題 Study of the contribution of the $^7\text{Be}(d, p)$ reaction to the ^7Li problem in the Big-Bang Nucleosynthesis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012049 ~ 012049
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1643/1/012049	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 Yamaguchi H., Hayakawa S., Ma N.R., Shimizu H., Yang L., Kahl D., Abe K., Suhara T., Iwasa N., Kim A., et al.	4. 巻 1643
2. 論文標題 Experiments on astrophysical reactions with low-energy unstable nuclei beams at CRIB	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012069 ~ 012069
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1643/1/012069	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 Mazzocco M, Keeley N, Boiano A, Boiano C, Commara M La, Lagni A, Manea C, Parascandolo C, Pierroutsakou D, Signorini C, Strano E, Torresi D, Yamaguchi H, et al.	4. 巻 1643
2. 論文標題 Direct processes for the systems $7\text{Be}, 8\text{B} + 208\text{Pb}$ at Coulomb barrier energies	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012096 ~ 012096
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1643/1/012096	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 L., Lin C.J., Yamaguchi H., Lei Jin, Wen P.W., Mazzocco M., Ma N.R., Sun L.J., Wang D.X., Zhang G.X., Abe K., Cha S.M., et al.	4. 巻 813
2. 論文標題 Insight into the reaction dynamics of proton drip-line nuclear system $17\text{F}+58\text{Ni}$ at near-barrier energies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136045 ~ 136045
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2020.136045	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 Ma N. R., Yang L., Lin C. J., Yamaguchi H., Wang D. X., Sun L. J., Mazzocco M., Jia H. M., Hayakawa S., Kahl D., Cha S. M., Zhang G. X., Yang F., Yang Y. Y., Signorini C. et al.	4. 巻 55
2. 論文標題 MITA: A Multilayer Ionization-chamber Telescope Array for low-energy reactions with exotic nuclei	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The European Physical Journal A	6. 最初と最後の頁 87 (11p)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epja/i2019-12765-7	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 Mazzocco M., Keeley N., Boiano A., Boiano C., La Commara M., Manea C., Parascandolo C., Pierrotsakou D., Signorini C., Strano E., Torresi D., Yamaguchi H., Kahl D. et al.	4. 巻 100
2. 論文標題 Elastic scattering for the B8 and Be7+Pb208 systems at near-Coulomb barrier energies	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 024602 (13p)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.100.024602	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 Hayakawa S., Abe K., Beliuskina O., Cha S. M., Chae K. Y., Cherubini S., Figuera P., Ge Z., Gulino M., Hu J., Inoue A., Iwasa N., Kahl D., Kim A., Kim D. H., Kiss G. G. et al.	4. 巻 1
2. 論文標題 Cross Section Measurements of the $7\text{Be}(n,p)7\text{Li}$ and the $7\text{Be}(n, \gamma)4\text{He}$ Reactions Covering the Big-Bang Nucleosynthesis Energy Range by the Trojan Horse Method at CRIB	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclei in the Cosmos XV	6. 最初と最後の頁 33 ~ 37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-13876-9_6	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 Yamaguchi H., CRIB Collaboration, Hayakawa S., Yang L., Shimizu H., Kahl D.	4. 巻 1
2. 論文標題 Study on Explosive Nucleosynthesis with Low-Energy RI Beams at CRIB	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclei in the Cosmos XV	6. 最初と最後の頁 265 ~ 268
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-13876-9_44	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 Lamia L., Spitaleri C., Mazzocco M., Hayakawa S., Bertulani C. A., Boiano A., Boiano C., Brogini Carlo, Caciolli Antonio, Depalo Rosanna, Galtarossa F., Guardo G. L., Gulino M., et al.	4. 巻 1
2. 論文標題 The Cosmologically Relevant $7\text{Be}(n, \gamma)4\text{He}$ Reaction in View of the Recent THM Investigations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclei in the Cosmos XV	6. 最初と最後の頁 53 ~ 56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-13876-9_9	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 Shimizu H., Kahl D., Yamaguchi H., Abe K., Beliuskina O., Cha S. M., Chae K. Y., Chen A. A., Ge Z., Hayakawa S., Imai N., Iwasa N., Kim A., Kim D. H., Kim M. J., Kubono S., Kawag M. S., Liang J., Moon J. Y., Nishimura S., Oka S., Park S. Y., Psaltis A., Teranishi T., Ueno Y., Yang L.	4. 巻 31
2. 論文標題 Study on $^{26}\text{Mg}(\alpha, p)$ Reaction at the SNe Temperature	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 011073 (5p)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.31.011073	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 Hayakawa S., La Cognata M., Lamia L., Shimizu H., Yang L., Yamaguchi H., Abe K., Beliuskina O., Cha S. M., Chae K. Y., Cherubini S., Figuera P., Ge Z., Gulino M., Hu J., Inoue A. et al.	4. 巻 31
2. 論文標題 Experimental Study on the $^7\text{Be}(n,p)^7\text{Li}$ and the $^7\text{Be}(n, \alpha)^4\text{He}$ Reactions for Cosmological Lithium Problem	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 011036 (4p)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.31.011036	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10件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 H. Yamaguchi
2. 発表標題 Experimental studies on astrophysical reactions at the low-energy RI beam separator CRIB
3. 学会等名 The 16th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC-XVI) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Yamaguchi
2. 発表標題 Cluster states and astrophysical (α, p) reactions
3. 学会等名 RCNP Workshop, "Cluster phenomena in knockout and astrophysical reactions" (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Yamaguchi
2. 発表標題 Activities at the low-energy RI beam separator CRIB
3. 学会等名 RIBF Users Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Yamaguchi
2. 発表標題 Overview of alpha resonant scattering experiments at CRIB
3. 学会等名 International mini-workshop on "Physics in resonant reaction induced by low-energy RI beam" (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Yamaguchi
2. 発表標題 Studying Astrophysical reactions and Nuclear Clusters with with low-energy RI beams
3. 学会等名 2019 KPS Spring Meeting, Pioneering session: Low energy nuclear science for astrophysics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Yamaguchi
2. 発表標題 Experiments on astrophysical reactions with low-energy unstable nuclei beams at CRIB
3. 学会等名 The 27th International Nuclear Physics Conference (INPC 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Yamaguchi
2. 発表標題 Nuclear Astrophysics with low-energy RI beam
3. 学会等名 Nuclear physics School for Young Scientists (NUSYS-2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Yamaguchi
2. 発表標題 Activities at the low-energy RI beam separator CRIB
3. 学会等名 RIBF Users Meeting 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Yamaguchi
2. 発表標題 Nuclear Astrophysics Projects at CNS, the University of Tokyo
3. 学会等名 International workshop on Origin of Elements and Cosmic Evolution: From Big-Bang to Supernovae and Mergers (OECE) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Yamaguchi
2. 発表標題 Active target for the TTIK method
3. 学会等名 Workshop on RI-beam Spectroscopy by Innovative Gaseous Active Targets (国際学会)
4. 発表年 2019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
研究 分担 者	早川 勢也 (Hayakawa Seiya) (00747743)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・特任助教 (12601)	

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
---------	---------