

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01903

研究課題名(和文)新しい中性子捕獲反応決定法で切り拓く元素合成過程の研究

研究課題名(英文) Nucleo-synthesis study explored via a novel method to determine the neutron capture reaction cross section

研究代表者

今井 伸明 (IMAI, NOBUAKI)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授

研究者番号：80373273

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、r過程元素分布で第2ピーク構造をなす質量数130近傍に位置する ^{130}Sn の中性子捕獲反応率を、新たに開発した間接的決定法を用いて評価することを目指し、理化学研究所RIBF内に設置したOED0装置で $^{130}\text{Sn}(d,p)$ 反応を逆運動学で測定した。研究にあたって、重心系のエネルギー分解能を500 keVから150 keVまで改善する反跳粒子検出器を開発し、九州大学のタンデム加速器施設でコミッション実験を行った。RIBFでは、核分裂により ^{130}Sn ビームを生成するためビームを識別することが不可欠である。本申請では1MHz近くの重イオンを識別する新たなSR-PPACを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鉄よりも重い元素の起源天体は現代物理の大きな問題の一つである。r過程と呼ばれる、爆発的燃焼仮定では、中性子過剰な原子核での中性子捕獲反応と崩壊でウランを超えた超重元素領域まで元素合成が進むと考えられている。宇宙でのr過程由来元素量は観測で分かっているため、本研究で決定される中性子捕獲反応率を用いて、r過程時の中性子密度や温度の情報を導出し、元素の起源天体の条件により制限をかけることを可能にする。同手法は、放射性核廃棄物の核変換率の決定にも貢献することができる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we conducted an experiment to evaluate the neutron capture rate of ^{130}Sn which is located around the second peak in the r-process abundance. We have improved the energy resolution of the recoil detector for the experiment to from 500 keV to 150 keV. Also we developed the beam-line detectors to measure the heavy ion beams of close to 1 MHz beam intensity.

研究分野：原子核実験、宇宙核物理

キーワード：中性子捕獲反応 r過程元素合成 放射性同位体ビーム シリコン半導体検出器 CsI(Tl)荷電粒子検出器

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

鉄よりも重い重元素の半分は、r 過程と呼ばれる爆発的燃焼条件で、数秒の間に水素からウランを超え、超重元素まで中性子捕獲反応と崩壊で生成されたと考えられている。r 過程の起源天体の解明は 21 世期の物理学の解決すべき謎の一つである。重力波が発見された中性子星連星合体直後、重元素と考えられる光が観測され、r 過程に関するより詳細な微視的な条件が求められている。特に r 過程原子核に対する中性子捕獲反応率は、原子核、および中性子ともに短寿命であるため直接測定することができず、理論模型があるもののそのばらつきは 1 桁から 3 桁まで大きく広がっていた。

2. 研究の目的

本研究では、r 過程元素分布で第 2 ピークを形成する質量数 130 近傍の中性子捕獲反応断面積を評価することを目指した。スズ同位体の中性子捕獲反応率は中性子数が 80 を超えると下がり始め 82 を超えると、二桁下がると言われている。その断面積の変化は理論模型のベンチマークとして最適である。

3. 研究の方法

短寿命核への中性子捕獲反応は、両方が有限の寿命をもつため直接的には測定できない。中性子捕獲反応の式を分解すると、一番の大きな不定性は閾値近傍の非常に高密度な量子状態からの線放出確率の予言にあるが分かる。そこで、核子移行反応で目的とする中性子捕獲反応生成物をつくり、非束縛状態からの線放出確率を決定することにした。従来は非束縛状態からの線を測定することで、そのチャンネルを同定していたが、非束縛状態からの線放出は脱励起経路もわかっていないため、理論に大きく依存する。また一般に線検出器の検出効率は低く、非常に高統計を必要とする。他方で、線を放出するということは、原子核が中性子も陽子も放出しないということである。我々は、 ^{130}Sn と重陽子との核子移行反応を、 ^{130}Sn をビームとする逆運動学として用いるため、反応後の重イオンを直接同定することができる。反応でできた励起エネルギーを反跳陽子の運動量から導出すると同時に、重イオンの識別から線放出を決定する。

4. 研究成果

本研究での開発要素は、反跳粒子検出器の高度化と、ビームライン検出器の高度化である。

2020 年度には両面ストリップ型検出器と CsI(Tl) からなる反跳粒子検出器の読み出し系を整備し、コミッショニング実験を九州大学タンデム加速器から供給される重陽子ビームを炭素標的に照射して行った。デッドタイムの評価は本番実験に不可欠である。重陽子ビームの強度を変えて、事象数毎のデッドタイムを測定し、数 100Hz までは 0% に近いデッドタイムで測定できることが分かった。ビームライン検出器は、従来の遅延読み出しを変えて、個別の電極での電荷情報を Time over Threshold 法で読み出し、位置分解能をあげるとともに、ビーム強度耐性をあげた。量研機構 HIMAC で試験を行い、位置分解能を評価した。

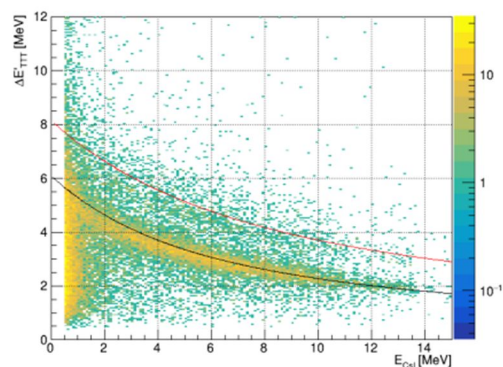


図 1 反跳粒子検出器 TiNA2 での両面ストリップシリコン半導体検出器と CsI(Tl) の相関図。黒線が陽子で、赤線が重陽子。

これらの開発実験の後に、2022 年春には、 ^{130}Sn ビームを用いて ^{130}Sn の中性子捕獲反応率測定実験を理化学研究所の不安定核ビーム施設 RIBF で行った。RIBF で供給される ^{130}Sn ビームを、東大 CNS が管理・運用する、不安定核ビーム低速化・収束装置 OEDO を用いて 20MeV/nucleon まで減速し、重陽子標的に照射した。反跳陽子を反跳粒子検出器群 TiNA2 で検出し、同時に反応生成物を、SHARAQ 磁気スペクトロメーターを用いて同定した。

同時に ^{130}Te 、 ^{124}Sn の実験も行い、系統誤差を評価するようにした。国内では、東大 CNS ほか、理研、東北大、九州大が共同研究機関として参加し、海外からはイタリア、フランス、ドイツ、中国、韓国から参加があった。更に、2022 年には同手法を用いてもう一つのニュートリノが絡む元素合成プロセス $^{56}\text{Ni}(\nu, p)$ 反応の代理反応と、 ^{51}Ca 核構造研究を行った。現在、各データ解析が進行中である。

最終年度の 2 月には、東京大学小柴ホールにて、 r 過程に関する中性子捕獲反応、ベータ崩壊の核物理研究と、中性子連星合体後に観測されたキロノヴァを始めとする宇宙観測、理論の研究を合わせた研究会を開催し、最新の研究について議論をした。

また、 ^{130}Sn の前に行った ^{79}Se の中性子捕獲反応率についての実験研究を論文にまとめ、現在投稿中である。

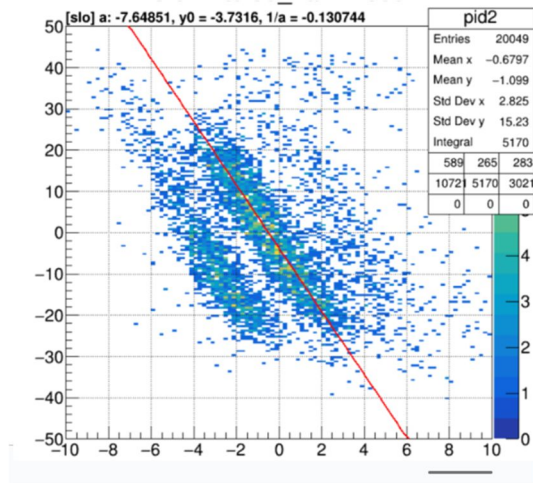


図 2 開発したビームライン検出器での 2 次ビーム識別の様子。赤線がひかれているのが ^{130}Sn ビーム。

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 12件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kitamura N, et al.,	4. 巻 105
2. 論文標題 In-beam γ -ray spectroscopy of Mg32 via direct reactions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 34318
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.105.034318	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 Michimasa S., et al.,	4. 巻 540
2. 論文標題 OEDO-SHARAQ system: Multifaceted performances in low-energy RI production and high-resolution spectroscopy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 194 ~ 198
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2023.04.017	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 N. Kitamura, N. Imai et al.,	4. 巻 330
2. 論文標題 Production of Hf-178(m2) and a simple chemical separation method for Hf recovery	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JOURNAL OF RADIOANALYTICAL AND NUCLEAR CHEMISTRY	6. 最初と最後の頁 721-725
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10967-021-08032-z	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 -
1. 著者名 Fernandez, A et al.,	4. 巻 823
2. 論文標題 Mirror energy differences above the 0f(7/2) shell: First gamma-ray spectroscopy of the T-z = -2 nucleus Zn-56	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 PHYSICS LETTERS B	6. 最初と最後の頁 136784
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136784	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 Harding, RD et al.,	4. 巻 104
2. 論文標題 Laser-assisted nuclear decay spectroscopy of Au-176,Au-177,Au-179	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 24326
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.104.024326	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 N. Kitamura et al.,	4. 巻 105
2. 論文標題 In-beam γ -ray spectroscopy of ^{32}Mg via direct reactions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 34318
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.105.034318	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 A.E.Barzakh et al.,	4. 巻 101
2. 論文標題 Hyperfine anomaly in gold and magnetic moments of $I = 11/2^-$ gold isomers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 34308
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.101.034308	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 A.E.Barzakh, et al.,	4. 巻 101
2. 論文標題 Shape coexistence in ^{187}Au studied by laser spectroscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 64321
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.101.064321	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 J.G.Cubiss et al.,	4. 巻 101
2. 論文標題 Laser-assisted decay spectroscopy and mass spectrometry of ^{178}Au	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 44332
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.102.044332	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 V.Vaquero et al.,	4. 巻 124
2. 論文標題 Fragmentation of Single-Particle Strength around the Doubly Magic Nucleus ^{132}Sn and the Position of the $0f_{5/2}$ Proton-Hole State in ^{131}In	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys.Rev.Lett.	6. 最初と最後の頁 22501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevlett.124.022501	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 N. Kitamura et al.,	4. 巻 102
2. 論文標題 Structure of ^{30}Mg explored via in-beam γ -ray spectroscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 54318
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.102.054318	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., Pierroutsakou D., Signorini C., Strano E., Torresi D., Yamaguchi H., Kahl D., Acosta L., Di Meo P., Fernandez-Garcia J. P., Glodariu T., Grebosz J., Guglielmetti A., Hirayama Y., Imai N., 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,
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 A.E.Barzakh, et al.,	4. 巻 99
2. 論文標題 Inverse odd-even staggering in nuclear charge radii and possible octupole collectivity in 217, 218, 219At revealed by in-source laser spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 54317
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.99.054317	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14件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 N. Imai
2. 発表標題 The decelerating and focusing device OEDO in RIBF and the nuclear astrophysics program with the surrogate nuclear reaction
3. 学会等名 seminar at CIAE (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 N. Imai
2. 発表標題 "OEDO, the deceleration and focusing element at RIBF, and the physics program using OEDO
3. 学会等名 seminar at IMP (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 今井伸明
2. 発表標題 代理反応法を用いた不安定核中性子捕獲反応の研究
3. 学会等名 中性子捕獲 で迫る宇宙の元素合成
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Hanai, et al.,
2. 発表標題 Development of a fast response PPAC for high-intensity heavy-ion beams
3. 学会等名 19 th International Conference on Electromagnetic Isotopes Separators and Related Topics (EMIS22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 角田理恵子 et al.,
2. 発表標題 ジルコニウム同位体の励起状態と組んだアイソパリックアナログ共鳴の観測
3. 学会等名 物理学会 第77回年次大会 (2022年)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Chillery et al.,
2. 発表標題 Measurement of Deuteron-Induced Pre-equilibrium Reactions on ^{93}Zr at 30 MeV/u for the Treatment of Radioactive Waste
3. 学会等名 物理学会 第77回年次大会 (2022年)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 J.T. Li et al.,
2. 発表標題 New project to explore neutron-deficient actinide nuclei
3. 学会等名 物理学会 第77回年次大会 (2022年)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 花井周太郎
2. 発表標題 高速応答を活かした大強度ビームのための重イオン飛跡検出器
3. 学会等名 KEK研究会「放射線検出器とその応用」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今井伸明
2. 発表標題 不安定核の中性子捕獲反応率測定プロジェクト
3. 学会等名 r-process研究会「星野錬金術から銀河考古学へ」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 花井周太郎
2. 発表標題 「分割電極型PPAC(SR-PPAC)における位置較正手法の開発」
3. 学会等名 日本物理学会 2020年 秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堂園昌伯
2. 発表標題 Proton induced reactions on ^{107}Pd at around 30 MeV/nucleon: First result using sloweddown RI beams at OEDO
3. 学会等名 INPC2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今井伸明
2. 発表標題 Controlling the motions of two kinds of fermions in a nucleus, a new energy degraded RI beam line OEDO
3. 学会等名 Frontier Session of KPS meeting, (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今井伸明
2. 発表標題 r-process核の中性子捕獲反応実験について
3. 学会等名 基研研究会 原子核物理で紡ぐr-process (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今井伸明
2. 発表標題 Evaluation of the neutron capture reaction on ^{79}Se via a surrogate reaction of $d(^{79}\text{Se}, p)$ reaction at OEDO
3. 学会等名 The 15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies, (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>SAKURA project portal https://sites.google.com/cns.s.u-tokyo.ac.jp/cnsdonuts/home/Research/SAKURA/sakura2020 SAKURA project https://sites.google.com/cns.s.u-tokyo.ac.jp/cnsdonuts/home/Research/SAKURA?authuser=0</p>
--

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	大田 晋輔 (Ota Shinsuke) (60548840)	大阪大学・核物理研究センター・准教授 (14401)	

	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
研究協力者	花井 周太郎 (Hanai Shutaro)		
研究協力者	鈴木 大介 (Suzuki Daisuke)		
研究協力者	萩野内 大雅 (Haginouchi Taiga)		
研究協力者	李 嘉泰 (Li Jiatai)		

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			
ドイツ	GS1			
イタリア	INFN			
韓国	CENS, IBS	SKKU		

共同研究相手国	相手方研究機関			
中国	IMP			
フランス	IJC lab			