

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 7 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2015

課題番号：24654066

研究課題名(和文)不安定核の共鳴状態測定のための不安定核停止標的システムの開発

研究課題名(英文)Development of a target system of stopped unstable nuclei for studies of resonance states in unstable nuclei

研究代表者

民井 淳(TAMII, Atsushi)

大阪大学・核物理研究センター・准教授

研究者番号：20302804

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文):自然界に存在しない不安定な原子核の励起状態の構造や、宇宙核物理に関わる低エネルギー核反応を調べる実験を可能にする不安定核停止標的の開発を行い、その実現性を実証した。

大阪大学ヴァンデグラフ加速器を用い、安定核である重陽子を金属薄膜の直径1mmに埋め込んだ標的を製作した。重陽子をさらに照射することで重陽子・重陽子融合核反応の測定に成功し、局所埋め込み標的による散乱実験の実現を実証した。

続いてリチウム標的への陽子ビーム照射により、不安定核であるベリリウム7を局所的に生成した標的を製作した。重陽子ビーム照射により放出される陽子を検出し、局所不安定核停止標的を用いた初の核反応測定に成功した。

研究成果の概要(英文):We have developed a system of stopped unstable nucleus target for studies of excited states of unstable nuclei and low-energy nuclear reactions that are relevant to nuclear astrophysics. We have successfully demonstrated the achievability of those measurements.

Implanted stable nucleus targets were produced by bombarding a deuteron beam on metallic foils in 1 mm diameter. By irradiating a higher energy deuteron beam on the target, deuteron-deuteron fusion reaction has been successfully detected.

Next unstable beryllium nuclei were produced by bombarding a proton beam on lithium target in 1 mm diameter. By irradiating a deuteron beam on the target, outgoing protons produced by the nuclear reaction with an beryllium nucleus and a deuteron has been successfully identified. This is the first successful measurement of nuclear reactions with stopped unstable nucleus target in a small area.

研究分野：実験核物理

キーワード：不安定核停止標的 ビッグバン元素合成 不安定核構造

1. 研究開始当初の背景

不安定核の構造を研究する手段として、不安定核をビームとして作り、標的核との散乱を測定する手法が開発されたことにより、不安定核の構造研究は飛躍的にシンポした。しかし、不安定核の共鳴状態の構造を調べる遷移強度の高分解能測定や、宇宙核反応に関わる低エネルギーでの反応測定は従来の測定手法が苦手とする領域であり、新しい技術革新が必要である。

2. 研究の目的

不安定核の構造を調べる新たな手法として、不安定核をホスト標的の小さい領域に埋め込んだ停止標的を作り、これに別の軽イオンビームを照射することで不安定核と軽イオンの散乱を測定することを可能にする技術を開発する。

3. 研究の方法

不安定核を局所的に埋め込んだ不安定核停止標的による散乱実験を実現するため、下記の手順により、技術開発を順次進める。

(1)高位置精度標的制御システムの開発

(2)安定核インプラント標的の作製の技術開発と散乱実験の実証

(3)不安定核停止標的の作製の技術開発と散乱実験の実証

(4)不安定核インプラント標的を用いた散乱実験の実施に向けた準備。

4. 研究成果

(1) 真空槽内で、100 μm 以下の位置精度にて、標的位置をXYZの3軸方向に位置調整可能な標的駆動システムを製作した。

(2)安定核インプラント標的による散乱実験の実証試験を行った。

大阪大学ヴァンデグラーフ加速器を用いて、重水素(d)ビームをエネルギー1 MeVまで加速し、直径1 mmの円形の穴が開いた板を通すことで整形(コリメート)した後、標的に埋め込んだ(インプラント)。標的として厚さ20-30 μm の金、銀、銅の薄膜を用いた。インプラント量は 1.1×10^{16} 原子核、シミュレーション計算によるインプラント深さは5-6 μm 、インプラント位置の埋め込み時の散乱による広がり、深さ方向・垂直方向ともに1 μm 以下である。

インプラント標的に、2 MeVに加速した重水素ビームを照射し、インプラントした重陽子核との核反応 $d+d \rightarrow p+t$ を陽子(p)を検出することで測定する実証実験を行った(t は3重水素核)。照射ビーム強度は 3×10^{12} イオン毎秒、

照射面積はインプラントと同じくコリメートにより直径1mmの円形、シミュレーションによる散乱点での重陽子エネルギーは1.3 MeVである。散乱陽子の検出には、表面障壁型シリコン検出器を用いた。シリコン検出器の位置は散乱角0°方向で距離63 mm、検出器の前に直径10 mmの円形のコリメータを設置した。

目的とする $d+d \rightarrow p+t$ 反応の放出陽子の測定に成功した。図1に陽子のエネルギースペクトルを示す。赤がインプラントした標的による散乱測定、青がインプラントを行っていない標的によるバックグラウンド測定である。計算により予想される4.3 MeVのエネルギーに、同反応の陽子が明確に検出され、局所インプラント標的による散乱実験が可能であることを実証した。局所領域にインプラントした原子核とビームとの原子核反応測定としては、世界初の測定例である。検出量は散乱断面積の文献値を用いた計算値との比較で、50%程度の精度で一致している。

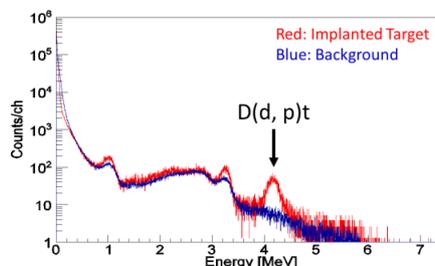


図1: 銀標的にインプラントした重陽子(D)に重陽子(d)を照射した反応から0度方向に出射した陽子(p)エネルギーの測定スペクトル。

低エネルギー側のバックグラウンドは、表面に付着した炭素、窒素、酸素による散乱であることを同定している。いくつかのピークはバックグラウンド測定時よりも増えており、真空槽内の残留ガスに起因する炭素、酸素などの原子が反応測定中にビームにより吸着が進んでいることが見て取れる。3.3 MeVは炭素12、1.1 MeVは酸素16の付着が原因である。温度上昇をモニタしながら、種々の標的に重水素の埋め込みを行った。散乱実験の結果から、埋め込まれた原子核の熱による拡散は1 mmのスケールでは有意に行っていないことが判明した。また、埋め込み量が一定量を超えると標的が破断することが分かった、これらは以後の測定開発における重要な基礎情報となった。

(三浦正季修士論文、大阪大学理学系研究科、2015年2月)

(3)不安定核停止標的を用いたビームとの散乱実験実証に向けた第一段階として、標的にビームを照射して局所的に不安定核を生成する、アクティベートド標的法と名付ける方法にて実証試験を行った。

大阪大学ヴァンデグラーフ加速器を用い、エネルギー2.6 MeVに加速した陽子ビームを直径1 mmにコリメートした後、リチウム標

的に照射した。リチウム標的にはリチウム7が92.5%含まれており、これと陽子との核反応によりベリリウム7核を生成した(アクティベートターゲット)。ベリリウム7核は不安定核の1種で自然界には存在しない。半減期は53日である。生成したベリリウム7核は元のリチウム7核の位置に留まり核反応ではほぼ動かない(1 μ mよりは十分小さい)。

生成したベリリウム7核の量は 9×10^{12} 個であった。この値は自発的に進む電子捕獲崩壊で放出されるガンマ線(477 keV、放出率10.44%)を臭化ランタン(LaBr₃)結晶シンチレーション検出器を用いることで測定した。

続いて生成したベリリウム7標的に 2 MeV の重陽子ビームを照射し、 $d+{}^7\text{Be} \rightarrow p+{}^8\text{Be}$ 反応により放出される陽子を検出する不安定核原子核反応測定を行った。検出は3枚のシリコン検出器を重ねた三重同時計測により行い、設置角度は45°を中心とする31-59°とした。シリコン検出器の前に低エネルギー荷電粒子を止めるための銅製の吸収板(アブソーバー)を設置した(図2)。

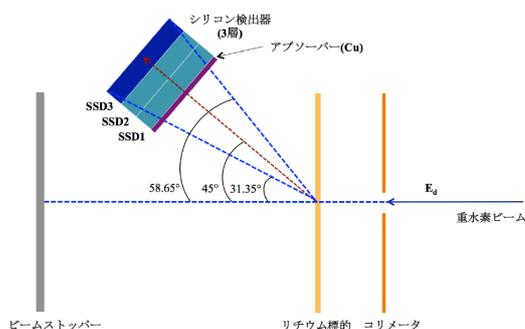


図2: アクティベートターゲット法による $d+{}^7\text{Be} \rightarrow p+{}^8\text{Be}$ 反応の測定セットアップ。シリコン検出器3枚によるトリプルコインシデンスにより放出陽子を検出した。

シリコン検出器間のエネルギー相関により、目的とする反応の陽子イベントを同定した。図3の右下がりの斜め方向に集中しているイベントが正しい陽子イベントで、少ないバックグラウンド中で精度よく測定されることが分かる。

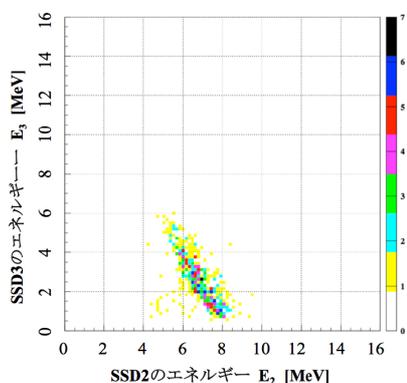


図3: $d+{}^7\text{Be} \rightarrow p+{}^8\text{Be}$ 反応による放出陽子の測定。シリコン検出器2枚目(横軸)と3枚目(縦軸)のエネルギー相関と検出全エネルギーから、同反応による放出陽子であることが同定される。

測定された反応は、標的中でエネルギーを失って減速しつつある重陽子とベリリウム7との反応から来ており、広がったエネルギー範囲内での散乱の集積となっている。これを検出した陽子エネルギーを用いることで分離し、ビームエネルギーに依存する散乱断面積を導出した(厚い標的法)。測定した散乱角が1点であるため、解析では等方的角分布を仮定している。得られた散乱断面積を図4に示す。赤と青の丸が2種類のアブソーバー厚さを使用した今回の結果、黄色の菱形が物理化学分離した精製ベリリウム7標的を用いた文献値(Kavanagh et al., Nucl. Phys. 18, 492 (1960))、紫の三角がベリリウム7ビームを用いた測定文献値(Angulo et al., Astrophys. J. 630, L105(2005))である。

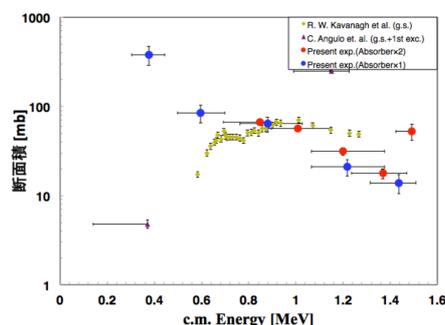


図4: $d+{}^7\text{Be} \rightarrow p+{}^8\text{Be}$ 反応の断面積測定結果(赤・青の丸)。

局所不安定核停止標的による散乱実験を実証できたことが大きな成果である。検出器の角度を変えることで角分布を測定すること、ビームエネルギーを段階的に下げていくことで低エネルギーのデータを得ることなどの方法により、エネルギー分解能と散乱断面積の測定精度をさらに向上することができ、宇宙核物理を始めとする不安定核の原子核反応研究に適用できることを示した大きな一歩となった。

(井上梓修士論文、大阪大学理学系研究科、2016年2月)

(4) これまでに開発した手法を展開することにより、宇宙誕生時の元素合成(ビッグバン元素合成)におけるリチウム7生成問題の解決をめざした $d+{}^7\text{Be} \rightarrow p+{}^8\text{Be}$ 反応測定の実験準備を進めている。

ベリリウム7の生成とインプラントには、東京大学原子核科学研究センターのCRIB装置を使用する。加速器使用のための課題申請を2015年10月に提出し、課題採択委員会にて既に認められている。インプラント実験は2016年6月の実施を計画している。

インプラント標的を用いた $d+{}^7\text{Be} \rightarrow p+{}^8\text{Be}$ 反応測定には日本原子力開発機構の東海タンデム加速器の重陽子ビームを用いる。加速器使用のための課題申請を2015年6月に提出し、課題採択委員会にて既に認められている。同反応測定実験は2016年7月の実施を計画している。

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6件)

- ① Dipole Polarizability of ^{120}Sn and Nuclear Energy Density Functionals, T. Hashimoto, *et al.* (A. Tamii 36人中4番目), *Physical Review C* **92**, 031305-1--5 (2015), 査読あり.
- ② Nonquenched Isoscalar Spin-M1 Excitations in *sd*-Shell Nuclei, H. Matsubara *et al.* (A. Tamii 36人中2番目), *Physical Review Letters* **115**, 102501-1--6 (2015), 査読あり。大阪大学プレスリリース。
- ③ Fabrication of isotopic and natural carbon foils by thermal cracking method and some issues, Isao Sugai *et al.* (A. Tamii 4人中4番目), *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **305**, 731--736 (2015), 査読あり. Separation of Pygmy Dipole and M1 Resonances
- ④ Electric dipole response of ^{208}Pb from proton inelastic scattering: Constraints on neutron skin thickness and symmetry energy, A. Tamii *et al.* (3人中1番目), *European Physical Journal A* **50**, 28-1--6 (2014), 査読あり.
- ⑤ 民井淳、銭廣十三 (2人中1番目)、解説「中性子スキンと原子核物質の状態方程式」、日本物理学会誌69号6-14ページ2014年、査読有。
- ⑥ Pygmy dipole resonance in ^{208}Pb , I. Poltoratska, P. von Neumann-Cosel, A. Tamii, 他(37人中3番目), *Physical Review C* **85**, 41304(R)-1--5 (2012), 査読有。

〔学会発表〕 (計5件)

- ① Development of an Experimental Method Using Implanted Target: First Application to the $^7\text{Be}(d,p)$ Reaction for the Study of the Primordial ^7Li Production in the Big-Bang Nucleosynthesis, IIIrd Topical Workshop on Modern Aspects in Nuclear Structure, February 22-27, 2016, Bormio, A. Inoue, A. Tamii *et al.*
- ② Nuclear Response and Gamma Emissivity Studied by Proton Inelastic Scattering, Neutrino and Dark Matter in Nuclear Physics 2015, June 1-5, 2015, Jyväskylä, A. Tamii, 招待講演.
- ③ Electric Dipole Response of Nuclei and the Symmetry Energy of the Nuclear Equation of

State, the 12th Int. Conf. on Nucleus-Nucleus Collisions (NN2015), June 21-26, 2015, Catania, A. Tamii, 招待講演.

- ④ Excitation of E1 States in Inelastic Proton Scattering and RCNP Activities, 5th Int. Conf. on Collective Motion in Nuclei under Extreme Conditions (COMEX5), September 14-18, 2015, Krakow, A. Tamii, 招待講演.

- ⑤ Neutron Skin Thickness of ^{208}Pb and Constraints on Symmetry Energy, A. Tamii, International Nuclear Physics Conference (INPC2013), June 2-7, 2013, Firenze, 招待講演.

〔図書〕 (計0件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

民井 淳 (TAMII Atsushi)

大阪大学・核物理研究センター・准教授
研究者番号： 20302804

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

藤田佳孝 (FUJITA Yoshitaka)

大阪大学・核物理研究センター・准教授
研究者番号： 60093457

鈴木智和 (SUZUKI Tomokazu)

大阪大学・核物理研究センター・助教
研究者番号： 80506395