

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H04833

研究課題名（和文）三重水素標的の開発と三中性子状態の探索

研究課題名（英文）Development of tritium target and search for three-neutron states

研究代表者

三木 謙二郎 (Miki, Kenjiro)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：80727090

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 18,600,000円

研究成果の概要（和文）：中性子多体系の基礎的な理解を確立する目的で三中性子(3n)系の核分光実験を目指している。具体的には、理化学研究所RIBF施設を利用して、 $3\text{H}(t,3\text{He})3\text{n}$ 反応の測定を行う。本研究では、その測定の肝となるチタン吸蔵型三重水素標的の開発を行うとともに、実験に使用する検出器系の整備を実施した。また、三陽子(3p)系についても $3\text{He}(3\text{He},t)3\text{p}$ 反応の測定を大阪大学RCNP施設で実施し、3n系と荷電対称な3p系の知見を得るとともに、3n系実験での原子核反応確率の予測精度を向上させ、実験計画の改良に繋げた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

中性子多体系を理解することは、原子核物理学の重要課題である。特に、重元素合成サイトとして近年注目を集める中性子星の構造や、2016年に報告された四中性子共鳴状態候補について解釈を行う上でも、基礎的な実験データが必要とされてきた。本研究により三重水素標的の開発とその利用に目途が立ったことで、今後中性子多体系の中でも基礎的な三中性子系の核分光を実現し、理解を深める道筋が出来上がった。また本研究により、RIBF施設の大強度RIビームと三重水素標的を組み合わせる新たな実験の可能性が開拓された。

研究成果の概要（英文）：For understanding the neutron many-body system, we plan to perform the spectroscopy of the three-neutron (3n) system via the  $3\text{H}(t,3\text{He})3\text{n}$  reaction at the RIKEN RIBF facility. In this project, we have developed the tritiated titanium target and also the detectors which are necessary for the experiment. We have also performed the  $3\text{He}(3\text{He},t)3\text{p}$  experiment at the RCNP facility in Osaka University for the spectroscopy of three-proton (3p) system. We have obtained insights into the configuration of the 3p system, and have also made a better estimation of the reaction probability for the 3n experiment.

研究分野：実験核物理

キーワード：多中性子系 荷電交換反応 三重水素

## 1. 研究開始当初の背景

地上に存在する通常の原子核は、中性子、陽子が同程度の比率で含まれており、これらの原子核の性質は旧来から原子核実験・理論の双方の研究によって理解が深められてきた。その一方で、中性子・陽子数に不均衡のある新しい原子核についての研究が、近年の原子核物理分野では精力的に進められてきた。そしてその極限として、「中性子のみ」あるいは「陽子のみ」から構成される系が原子核を形成できるのか、という疑問が浮かび上がった。特に中性子のみからなる中性子多体系の研究は、重元素合成サイトとして注目される中性子星の構造の理解にもつながる為、重要である。また、2016年に公表された実験結果 [Phys. Rev. Lett. 116, 052501, 2016] において、四中性子共鳴状態の候補が見出されたことを契機として、中性子多体系研究の重要性が強く認識された。観測結果が最先端の理論計算では再現されず、これまでの原子核物理の基盤に再検証が求められたからである。こうした状況から、中性子多体系のさらなる新しい実験データが待ち望まれていた。

## 2. 研究の目的

中性子多体系を微視的な第一原理から理解する為には、まずは基礎的な中性子多体系である三中性子(3n)系の性質を解明することが肝要である。我々は、この3n系の生成とその励起エネルギースペクトルの取得をおこない、それらを第一原理に基づく理論計算と比較することで、3n系の原子核としての安定性や3n系内に働く相互作用を議論するとともに、四中性子共鳴で見られていた実験と理論の不一致に対して、新たな知見を与えることを目指している。本研究では、その為に必要となる標的や検出器などの装置開発を完了することを目的とした。また、3n系の実験と相補的な関係にある三陽子(3p)系についても実験を遂行し、同種三核子系についてアイソスピン依存性も含めた実験データを提示することを目指した。

## 3. 研究の方法

3n系の生成には、理化学研究所 RIBF 施設を利用する。RIBF により供給される大強度三重水素ビームを、新開発の三重水素標的に照射して  ${}^3\text{H}(t, {}^3\text{He})3n$  反応を引き起こす。これにより終状態に三中性子系を生成するとともに、その励起エネルギースペクトルを取得する。本研究では、実験を実施する上での肝となる三重水素標的の開発を重点的に行った。また、必要となる検出器の開発も随時実施した。3p系の観測では、大阪大学 RCNP 施設を利用した。3n系生成実験と荷電対称な関係にある  ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, t)3p$  反応を測定することで、3n系・3p系について同じ舞台の上で議論、比較できる実験データを提供する。

## 4. 研究成果

### 1) 三中性子系生成実験に向けた検討と開発

まず実験を実施する肝となる三重水素標的について検討を行った。標的本体の仕様として、液体型、気体型、金属吸蔵型の三種類の場合それぞれについて設計、シミュレーション、安全性評価を実施した。それらを比較した上で、金属吸蔵型の標的の開発を実施することとした。特に、水素を安定に吸蔵できるチタン吸蔵型三重水素標的の開発を、富山大学らと共同で推進した。

3n系生成実験に必要なとされるのは、サイズ 10mm x 10mm 以上、厚さ 50-100  $\mu\text{m}$  の標的である。製作の方法としては、チタンフォイルを高真空中でベーキングした後、水素ガスに曝し、自己吸収させる方法を採用した。最初に、標的製作方法の最適化を行った。ここでは、三重水素の代用として重水素を利用した。製作装置本体の改良を重ねるとともに、製作の際のチタンフォイル温度や重水素ガス圧等を変化させて標的の試作を繰り返し、最終的な重水素吸蔵量が最大化される条件を探索した。標的製作時における、温度、ガス圧、真空度の条件の記録のために、アナログ信号読み出し系の製作とコンピュータプログラムの開発を実施した。

最終的に得られた複数の試料に対して、東北大学 CYRIC および FNL 施設において陽子ビームを用いた成分分析実験を遂行した結果、重水素チタン原子数比 D/Ti=1.7 の標的が再現性良く製作できていることが確認された。

さらに、3n系生成実験での測定の分解能を向上させる目的で、標的を平坦化する製作法の探索を実施した。通常、チタンフォイルが水素を吸蔵するとチタンフォイルが膨張し、大きなたわみが発生する。我々は、チタンフォイルを、専用に設計したフレームと押さえ板の間に挟み込んだ状態にして重水素を吸蔵させることで、チタンフォイルに垂直な方向の変形を抑制し、平坦な標的が製作可能であることを実証した。

またビームラインに設置した際の三重水素管理の為に、ビームラインの随所に真空隔壁を設

置することとした。薄い金属製のウィンドウ膜を持った真空フランジを実作した上で、ヘリウムリーク検出器を用いて真空テストを実施し、真空隔壁として利用可能であることを実証した。

同時に、RIBF 実験で必要となる検出器群の開発も進めた。入射ビームの飛跡を決定するための多芯線ドリフトチェンバーの開発を行った。8面構成の検出器の製作を行い、この性能評価実験も CYRIC 施設において遂行した。飛跡検出効率 99%以上、位置分解能 200  $\mu\text{m}$  以下の性能を有することが明らかとなり、これらは 3n 系生成実験に必要とされる性能を十分に満たすことが示された。

## 2) 三陽子系の生成・分析実験の遂行

上記と並行して、3n 系の実験と相補的な関係にある 3p 系の探索実験を遂行した。大阪大学 RCNP 施設において、高精度  $^3\text{He}$  ビームを  $^3\text{He}$  標的に照射し、散乱されるトライトン粒子を高分解能磁気スペクトロメータで観測した。統計量を高める目的で、 $^3\text{He}$  標的としては 2 気圧、10 ケルビンの加圧冷却ガス標的を採用した。これにより、 $^3\text{He}(^3\text{He}, t)3p$  反応の微分断面積を励起エネルギー 20 MeV、散乱角度 6 度までの範囲で取得した。得られたスペクトルの分布について、インパルス近似に基づく原子核反応理論計算との比較を行ったところ、3p 系は陽子が自由に拡散し崩壊するのではなく互いに相互作用を及ぼし合っているという兆候が見出された。さらに、この実験で得られた知見を基に、3n 系生成実験での原子核反応確率の予測精度を向上させ、実験計画の改良に繋げた。

以上の成果により、実際に三重水素標的を実作り、またそれを用いて 3n 状態の探索実験を遂行するための基礎的環境の整備が完了した。3n 系生成実験の加速器ビームタイムについては、2017 年度の RIBF 施設の実験課題採択委員会で申請を行い、好評価を受けて採択されている。実験は 2021 年度内に実施予定である。標的開発などの実績は随時学会発表などを通して研究者間で情報共有を行い、さらなる展開についても議論を行った。この研究により、今後同種三核子系の振る舞いが明らかになるとともに、RIBF 施設の大強度 RI ビームと三重水素標的を組み合わせる新たな実験の可能性が開拓された。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Miki K., Zegers R.G.T., Austin Sam M., Bazin D., Brown B.A., Dombos A.C., Grzywacz R.K., Harakeh M.N., Kwan E., Liddick S.N., Lipschutz S., Litvinova E., Madurga M., Mustonen M.T., Ong W.J., Paulauskas S.V., Perdikakis G., Pereira J., Peters W.A., Robin C., Scott M., Spyrou A., Sullivan C., Titus R.	4. 巻 769
2. 論文標題 Isovector excitations in 100 Nb and their decays by neutron emission studied via the $^{100}\text{Mo}(t, \text{He}^3+n)$ reaction at 115 MeV/ u	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 339 ~ 344
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2017.04.004	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

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 2件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 宇津城雄大、三木謙二郎
2. 発表標題 RIBFにおける $^3\text{H}(t, ^3\text{He})^3\text{n}$ 反応測定のための三重水素標的開発(2)
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 酒井大輔、三木謙二郎
2. 発表標題 $^3\text{He}(^3\text{He}, t)^3\text{p}$ 反応による三陽子系の核分光
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenjiro Miki
2. 発表標題 Development of tritium target for the $^3\text{H}(t, ^3\text{He})^3\text{n}$ experiment at RIBF
3. 学会等名 OEDO collaboration meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 酒井大輔
2. 発表標題 三中性子状態観測の為の三重水素標的の検討
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Miki
2. 発表標題 Development of tritium target for the $3\text{H}(t,3\text{He})3n$ experiment at RIBF
3. 学会等名 Workshop on Gas-filled Detectors and Systems (GDS): Rare-gas target handling and recycling systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三木謙二郎
2. 発表標題 RIBFにおける $3\text{H}(t,3\text{He})3n$ 反応測定の為の三重水素標的開発
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宇津城雄大、三木謙二郎
2. 発表標題 三中性子共鳴探索実験の為のMWDC開発
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
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
--	---------------------------	-----------------------	----

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