

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 9 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2016

課題番号：25707022

研究課題名(和文)超音速ガスジェットレーザー分光法を用いた新しい電磁モーメント測定手法の確立

研究課題名(英文) Establishment of new measurement method for nuclear electromagnetic moment with supersonic gas-jet laser spectroscopy

研究代表者

園田 哲 (Sonoda, Tetsu)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・仁科センター研究員

研究者番号：60525583

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：理化学研究所仁科加速器研究センターにある超伝導RIビーム分離生成装置BigRIPS第2焦点面スリット部分で除去されるRIビームを収集して低速RIビームを生成する世界に前例のない装置(パラサイトレーザーイオン源:PALIS)を考案し完成させた。この装置は共鳴イオン化によって低速RIビームを生成することと超音速ガスジェットレーザー分光法を用いた電磁モーメント測定実験を行う両面を備える。これまで当PALIS装置を用いた実験がBigRIPSメイン実験と干渉なく共存できることを証明した。これによりBigRIPSが生成する世界最高強度のRIビームを使って広範囲な電磁モーメント測定に着手する体制を確立した。

研究成果の概要(英文)：Parasitic laser ion source (PALIS) was proposed and installed in front of the slit at the second focal plane (F2) in RIKEN-RIBF fragment separator (BigRIPS). Unused RI-beams which are originally removed at the slits are collected and extracted as a low-energy RI-beams. The utilization of unused RI-beams is a new concept in the fragment separator facilities world wide. This system enable to perform both experimental styles: the production of low-energy RI-beam and also the measurement of nuclear electromagnetic moment by supersonic gas-jet laser spectroscopy. So far we confirmed the feasibility of PALIS experiment by the result which there was no interference to BigRIPS main beam experiment. By using wide variety rare RI-beams provided by BigRIPS, the PALIS system paves the way for the systematic study of wide variety nuclear electromagnetic moment s.

研究分野：原子核物理実験

 キーワード：超音速ガスジェット レーザー分光 ガスキャッチャー フラグメントセパレータ 低速RIビーム
核モーメント レーザー共鳴イオン化 パラサイト実験

1. 研究開始当初の背景

(1)原子核の電磁モーメント測定は、これまで主に NMR法やレーザー分光法により行われてきた。一方、測定対象となる原子核の量や寿命、測定感度といった制限からこれまで測定された原子核の数は、実験的に確認されている原子核(約3150種)のうちの約3割に満たない。このような状況のなか、より高感度で極微量しか生成されない原子核にたいしても電磁モーメント測定を実行できる手段が求められていた。

(2)RIビームの生成手段は、In-Flight法およびISOL法と2つに分けることができる。ISOL法は、大強度RIビームを生成できる利点がある反面、不揮発性元素や極めて短寿命のRIビーム生成がイオン源の特性からそもそも不可能な欠点を持つ。これに対してIn-Flight法は元素の種類や寿命といった制限にかかわらず広域なRIビームを生成できる。他方In-flight法で生成されるRIビームは、高速なRIビームのため低速RIビームをプローブにした電磁モーメント測定のような精密測定実験にはそのまま適用できない。そこでIn-flight法で生成される高速RIビームを低速RIビームへ変換するシステムが求められていた。

(3)理化学研究所仁科加速器センターの超伝導RIビーム分離生成装置 BigRIPS は、世界最高強度のレベルでRIビームを生成する。加速器を伴う実験は、電力使用料だけでもたいへん高価なものになるためビームを利用する実験時間は非常に制限される。このような状況では、BigRIPS稼働中にひとつのテーマの実験のみ行うより複数の実験を同時に進行できる体制を実現できれば極めて効率的である。

2. 研究の目的

理化学研究所仁科加速器センターの超伝導RIビーム分離生成装置 BigRIPS にパラサイトレーザーイオン源(PALIS)を構築する。そこで超音速ガスジェットとレーザー共鳴イオン化法を組み合わせた新しいレーザー核分光手法を確立してこれまで困難であった短寿命かつ極微量にしか生成されない原子核の電磁モーメントを測定し、広範囲な核モデルの検証を行うことを目的とする。

PALIS装置は BigRIPS の分離過程で除去されるRIビームを収集して低速RIビームを生成するものである。これにより BigRIPS稼働中はいつでも実験可能となる言わば“メイン実験との共存型”を実現する。PALISの低速RIビーム生成過程においてまさに共鳴イオン化レーザーイオン化法を採用するため超音速ガスジェットレーザー分光法を実行できる体制になる。

3. 研究の方法

BigRIPSのように年間運転スケジュールが組まれている現行稼働装置に新規のPALIS装置

を組み込むことは、限られた期間の中での開発となり当初の計画から遅れが生じた。最終的に下記のステップを持って本研究の目標を達成する道りとした。

(1)PALIS装置の設計および製作。

・PALIS装置は BigRIPS 第2焦点面箱へ導入することになった。すべて遠隔操作可能なシステムとして構築する。

(2)ガス循環・純化装置の製作。

・PALIS装置のなかで高速RIビームを減速・停止するため使用されるガスセルはアルゴンガスを利用する。実験中の BigRIPS 第2焦点面付近の放射線量は高く放射化したアルゴンガスが大気へ流出することを避けるため密封型の循環型ガス導入装置を必要とした。これに加えRIイオンがガス中に含まれる不純物(水、酸素、窒素など)と結合することによる引出効率低下を防ぐため超高純度ガスを必要とした。

(3)長距離レーザー飛行調整システムの開発。

・BigRIPS 本体室は実験中の放射線量が高いため人の立ち入りはできない。一方PALIS装置で必要とするレーザー光源は実験中調整が必須なため BigRIPS 本体室外部に設置されなくてはならない。この結果レーザー光源から PALIS 装置までの距離は約70mとなり、この間レーザービームを飛行させ最終的に1-2mmのスポットへ照射する遠隔操作可能な光学システムを構築しなくてはならない。

(4)メイン実験と共存成立の検証実験。

・PALIS装置は BigRIPS のメイン実験と共存して低速RIビームを生成することを目的としている。実際に BigRIPS稼働中メイン実験に何も干渉なく PALIS 装置を稼働できるか検証する必要があるが生じた。

(5)オフライン実験によるレーザー分光予備実験および高分解能レーザー分光を実現させるための狭線幅レーザー装置開発。

(6)低速RIビームの生成と超音速ガスジェットレーザー分光法の実演。

・オンライン実験にて BigRIPS で生成されるRIビームをPALIS装置へ導入して引出効率や分光精度を評価する。

(7)超音速ガスジェットレーザー分光による広範囲な原子核の電磁モーメント測定。

4. 研究成果

これまで上記研究方法のステップのうち(1)~(5)まで達成できており今後(6),(7)を達成させる。(1)-(5)の具体的成果を下記に述べる。

(1)Fragment Separatorを所有する、または現在建設中の世界主要な研究施設は、FRIB(米国)、GSI(ドイツ)、GANIL(フランス)など挙げられるが本研究の中で製作したパラサイト型レーザーイオン源はこれまで前例のないシステムである。本手法が成立することを示すことそれ自体が、世界に率先して開発した装置の見本として重要な意味を持つ。図1はPALIS装置の概要である。全体が

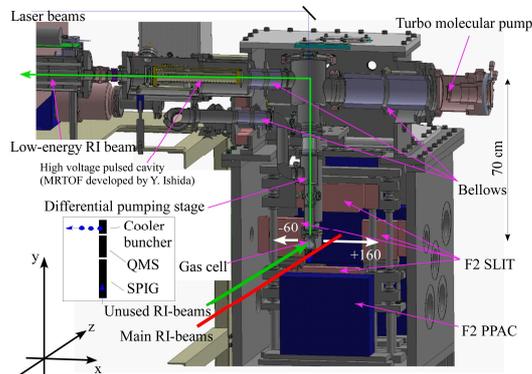


図1: BigRIPS-F2にあるPALIS装置

BigRIPS 第2焦点面箱天板と一体になる形で製作した。BigRIPS メインビーム近傍に存在しスリットにて除去されるRIビーム(依然多数の稀少RIビームを含む)をスリット前面に配置されたガスセルへ導入し減速停止させる。ガス流で高真空へ輸送させる過程でレーザーによる共鳴イオン化を行い、1価の低速イオンビームとして引き出す。ガスセルに停止したRIは超音速ガスジェットの形でガスセル出口から噴出される。ここでレーザーイオン化と同時に分光実験も可能となる。高速RIビームを高効率で停止させるためガスセルは1気圧のアルゴンガスで満たし毎分約20Lの流量で出口孔からガスセル外へ放出させる。他方、引出方向70cm上流位置では 10^{-3} Paの真空度を達成している。これは本研究者らが開発した多段式差動排気手法により極めてコンパクトな形状で 10^8 Paの圧力差を実現したものである(参A)。ガスセルおよびビーム引出機構は、BigRIPS メインビームを介して左右移動可能であり引出対象のRIを選択して位置を決定する。真空系、駆動系、ビーム引出系すべて遠隔操作システムとして構築した。(雑誌論文 ~ にて発表)

(2)PALIS ガスセルへ導入するバッファーガス導入システムを密封型の循環システムとして製作した(図2)。約95%のガス回収率と1ppbレベルの不純物濃度まで抑制できる性能を

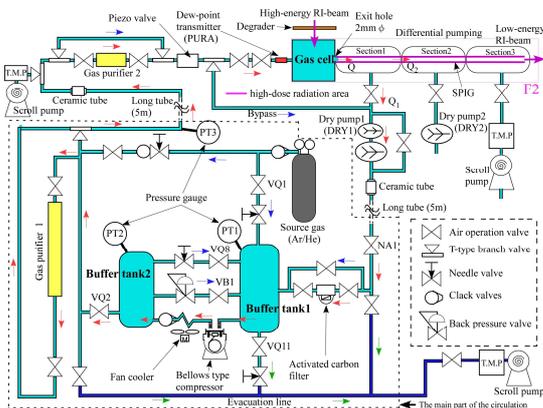


図2: ガス循環・純化装置

達成した。(雑誌論文 にて発表)

(3)約70mの距離を2本のレーザービームを飛行させ最終的に2mmのレーザーイオン化領域へ導く完全遠隔操作可能な光学システムを開発した。図3は飛行距離に対するレ

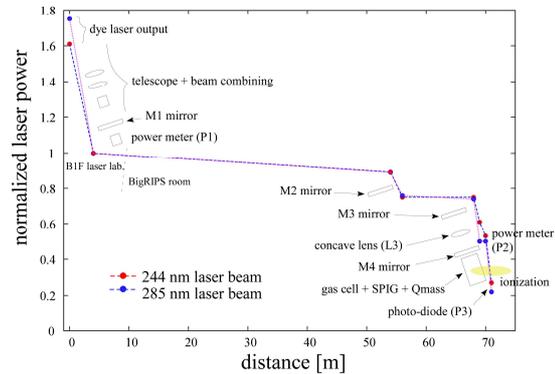


図3: 70mレーザービーム輸送効率

レーザービームパワーを表す。光源から出力したレーザービームはビーム成形され、その後約70mの飛行を経てPALIS装置へ導かれる。紫外域波長のレーザービームにおいて輸送効率約50%を達成した。またオフライン実験にて実際に共鳴イオン化できることを確かめた。(雑誌論文 にて発表)

(4)BigRIPS ビームを使用してPALIS装置のオンラインコミッションング実験を行った。図4はBigRIPS メインビーム通過中に

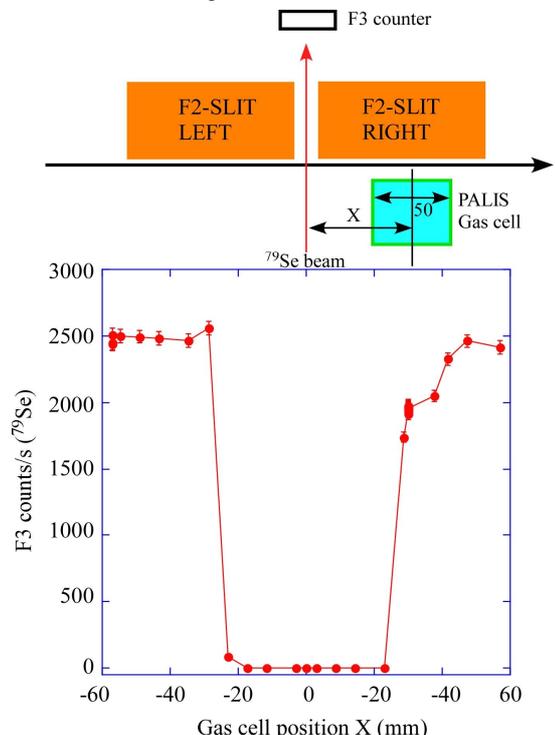


図4: メイン実験共存成立の検証実験

PALISガスセルを移動させてガスセルによるメインビームへの干渉範囲を確認した結果である。ガスセルがメインビームから+20mm以上離れていれば干渉ないことを確認した。またBigRIPS 検出器へのレーザービーム照射による影響は無視できるレベルであることを確認した。(雑誌論文 にて発表)

(5)BigRIPS第2焦点面箱にPALIS装置を装着した状態でオフライン実験を行った。ガスセル中に置かれた銅フィラメントを抵抗加熱により蒸発させ銅原子のレーザー分光を実演した(図5)。銅の超微細構造分離が

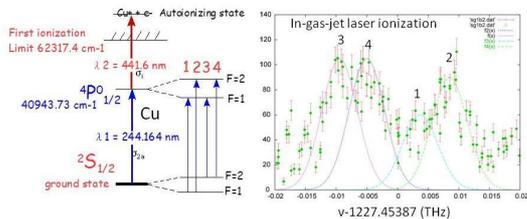


図 5: 超音速ガスジェット分光の実演(オフライン実験)

確認できた。今後引出およびイオン化効率の最適化を行いオンライン実験にて不安定原子核のレーザー分光実験を実演する計画である。また注入同期型チタンサファイアレーザーの開発を名古屋大学と共同で行った。線幅約 20MHz のパルスレーザー出力を達成し安定ジルコニウムの真空中におけるレーザーイオン化分光実験を行った。これによりアイソトープシフトによる同位体分離可能とする結果となった。(雑誌論文にて発表)

<参考文献 A >

T. Sonoda etc., "Development of a resonant laser ionization gas cell for high-energy, short-lived nuclei", Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B295(2013)1-10.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 11 件)

T. Sonoda, H. Iimura, M. Reponen, etc., "70 m laser beam transport for RIBF-PALIS experiment", Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A, (2017)提出済, 査読中.

T. Sonoda, O. Tsubota, etc., "A gas circulation and purification system for gas-cell-based low-energy RI-beam production", Rev. Sci. Instrum., 87, 065104 (2016), 査読有.

<http://dx.doi.org/10.1063/1.4953111>

T. Sonoda, M. Wada, etc., "The first on-line commissioning study on parasitic production of low-energy RI-beam system(PALIS) at BigRIPS", RIKEN Acc. Prog. Rep. Vol49(2015)16, 査読有.

M. Reponen, T. Sonoda, M. Wada, etc., "An injection-locked Titanium:Sapphire laser for high-resolution in-jet resonance ionization spectroscopy at PALIS", RIKEN Acc. Prog. Rep. Vol49(2015)190, 査読有.

T. Sonoda, M. Wada, etc., "Parasitic production of low-energy RI-beam at RIKEN BigRIPS", JPS Conf. Proc., 6.030122 (2015) 査読有.

<http://dx.doi.org/10.7566/JSPSC.6.030122>

2

T. Sonoda, M. Wada, etc., "The off-line adjustment of the parasitic production of low-energy RI-beam system for installation in BigRIPS", RIKEN Acc. Prog. Rep. Vol48(2014)225, 査読有.

T. Sonoda, etc., "PALIS laser interlock

system for human and machine protection", RIKEN Acc. Prog. Rep. Vol47(2013)211, 査読有.

H. Iimura, T. Sonoda, M. Wada, "Transportation of laser beams for PALIS", RIKEN Acc. Prog. Rep. Vol47(2013)209, 査読有.

T. Sonoda, M. Wada, etc., "New laser system installation for PALIS", RIKEN Acc. Prog. Rep. Vol47(2013)210, 査読有.

T. Sonoda, M. Wada, I. Katayama, etc., "Design work for PALIS system", RIKEN Acc. Prog. Rep. Vol47(2013)208, 査読有.

T. Sonoda, M. Wada, etc., "Development of a gas cell-based laser ion source for RIKEN PALIS", Hyperfine Interactions, 216,103(2013), 査読有.

DOI 10.1007/s10751-013-0817-6

[学会発表](計 8 件)

園田 哲, Current status of PALIS, 第 9 回停止・低速不安定核ビームを用いた核分光研究会(S S R I), 平成 29 年 1 月 6 日, 原子力研究機構(東海村、茨城県)。

園田 哲, Parasitic low-energy RI-beam production using in gas laser ionization and spectroscopy technique at RIKEN/PALIS, The 12th International Conference on Stopping and Manipulation of Ions and related topics (SMI-2016), 平成 28 年 6 月 10 日, 蘭州市(中国)。

園田 哲, RIBF におけるパラサイト低速 RI ビーム生成とガスジェットレーザー核分光の開発, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 平成 27 年 9 月 27 日, 大阪市立大学(大阪市)。

園田 哲, Development of the parasitic production of low-energy RI-beam and gas-jet nuclear laser spectroscopy, International Conference on Laser Probing (LAP2015), 平成 27 年 6 月 8 日, アメリカ合衆国。

園田 哲, Parasitic production for low-energy RI-beam at RIKEN BigRIPS, Advances in Radioactive Isotope Science (ARIS2014), 平成 26 年 6 月 5 日, 東京大学(東京都)。

園田 哲, パラサイト低速 RI ビーム生産とレーザー核分光への応用, 第 7 回停止・低速不安定核ビームを用いた核分光研究会(S S R I), 平成 26 年 3 月 3 日, 理研(和光市、埼玉県)。

園田 哲, Parasitic production of slow RI-beam from BigRIPS by laser ionization gas catcher, International Expert Meeting on In-Flight Separators and Related Issues Challenges and Solutions of the Present & Future Facilities, 平成 25 年 12 月 10 日, 理研(和光市、埼玉県)。

園田 哲, RIBF-SLOWRI 共鳴イオン化レーザーイオン源(PALIS)の開発とレーザー核分

光への応用, 日本物理学会秋季大会, 平成 25 年 9 月 20 日, 高知大学(高知市、高知県)。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

園田 哲 (SONODA, Tetsu)
理化学研究所・仁科加速器研究センター、
仁科センタ - 研究員
研究者番号: 60525583

(2) 連携協力者

・富田英生 (TOMITA Hideki)
名古屋大学工学部エネルギー量子計測工
学・准教授
研究者番号: 20432239

・飯村秀紀 (IIMURA, Hideki)
原子力研究機構・原子力科学研究部門原子力
基礎工学研究センター・研究員
研究者番号: 10343906

(2) 研究協力者

和田道治 (WADA, Mihciharu)
片山一郎 (KATAYAMA, Ichirou)
小島隆夫 (KOJIMA, Takao)
谷垣実 (Tanigaki Minoru)
新井史也 (Arai Fumiya)
新井重昭 (Arai Shigeki)
伊藤由太 (Ito Yuta)
上菘義朋 (Uwamino Yoshiaki)
田中鐘信 (Tanaka Kanenobu)
岡田邦宏 (Okada Kunihiro)
Volker Sonnenschein
Ferrer Rafael
Reponen Mikael
Rosenbusch Marco
Schury Peter
Koudriavtsev Yuri
Huyse Mark
Van Duppen Piet
BigRIPS チーム