

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23340068

研究課題名(和文)新しいアクティブ標的を用いた中性子過剰不安定核におけるクラスター相関の研究

研究課題名(英文)Cluster correlation in unstable neutron-rich nuclei probed by a new active target system

研究代表者

川畑 貴裕 (KAWABATA, Takahiro)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80359645

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,800,000円

研究成果の概要(和文)：不安定核実験の新しい可能性を拓く質量欠損分光法を確立するために、マイクロピクセルチェンバーを用いたアクティブ標的を開発し、加速器からのビームを用いて現実的条件下における性能試験を実施した。 $4\text{He}+4\text{He}$ の弾性散乱事象における入射・散乱・反跳の各粒子の飛跡を3次元的に決定することに成功し、アクティブ標的が初期の性能を持つことを示した。2015年度中に不安定核ビームを用いた初めての実験を実施する予定である。

研究成果の概要(英文)：An active target system with a micro pixel chamber was developed and a performance test was carried out using an accelerated beam. Three-dimensional trajectories of incident, scattered and recoil particles in the $4\text{He} + 4\text{He}$ elastic scattering were successfully measured. The first measurement using a radioactive beam will be done in FY2015 to clarify cluster correlations in neutron-rich nuclei.

研究分野：原子核物理学(実験)

 キーワード：アクティブ標的 アルファ非弾性散乱 クラスター構造 マイクロピクセルチェンバー 中性子過剰核
MAIKO

1. 研究開始当初の背景

クラスター相関は自然界の様々な階層において観測される普遍的な現象であり、その階層におけるダイナミクスを理解する上で非常に重要な物理現象である。

原子核における最も重要なクラスター相関は、核内において陽子2個と中性子2個が強く相関して発現するアルファクラスター相関である。このため、 ^{12}C や ^{16}O といった陽子数と中性子数の等しい $A = 4n$ 核については、国内外のグループによって精力的な研究がなされており、 n 個の粒子が互いに弱く相互作用しながら比較的自由に運動している n クラスター状態の構造が明らかになりつつある。しかし、 $A = 4n$ 核に中性子を付加した中性子過剰核における n クラスター構造の変化についての研究は、いまだ緒についたばかりであり、現在のクラスター核物理における重要な課題である。

近年、理化学研究所の RI ビームファクトリー施設の稼働により、安定線から遠く離れた中性子過剰不安定核に対する実験が可能となる一方で、原子核構造に関する理論計算も格段に進歩し、平均場やクラスター構造を予め仮定せずに核子レベルから平均場の様相やクラスター相関を導き出す計算が可能となってきている。まさに、原子核におけるクラスター相関の機構を理解する絶好の機会が到来しつつある。そこで申請者らは、中性子過剰不安定核のクラスター構造を系統的に研究して原子核におけるクラスター相関の機構を明らかにすることを着想するに至った。

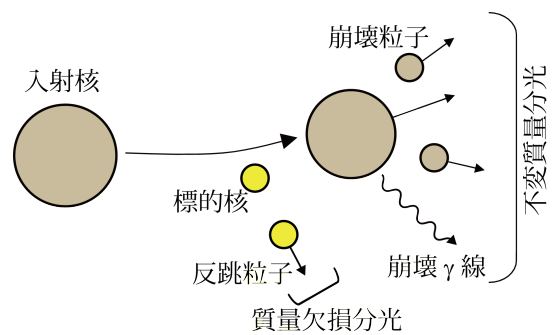
2. 研究の目的

本研究では、マイクロピクセルチェンバー (μ -PIC) を用いて新型アクティブ標的を開発し、不安定核実験の新しい可能性を拓く質量欠損分光法の確立を目指す。そして、アルファ非弾性散乱の手法を用いて中性子過剰の不安定原子核におけるクラスター状態を系統的に探索し、原子核におけるクラスター相関の機構を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

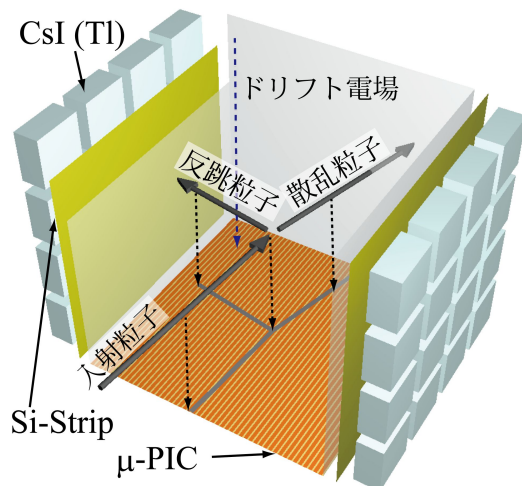
クラスター状態を探索するために前方角度におけるアルファ非弾性散乱が有効な手法であることは、申請者らの安定核についての実験によって確立されているが、これを不安定核に適用することは容易ではない。一般に不安定核を標的にすることはできないので、右上図に示すように測定は逆運動学条件下において行わなければならない。

非弾性散乱によって励起した不安定核は直ちに粒子や γ 線を放出して脱励起するが、不安定核の励起エネルギーを知るためには全ての崩壊粒子・ γ 線のエネルギーと運動量を測定して全体の不変質量を決定する必要がある。崩壊粒子の多重度が高い場合や、



検出効率の低い中性子や γ 線が複数放出される場合には、測定が極めて難しくなる。あらゆる崩壊チャンネルについてバイアスのない励起エネルギースペクトルを測定するには、不安定核からの崩壊粒子ではなく、不安定核から反跳を受けた標的粒子を測定する質量欠損分光法を実施しなければならない。しかし、前方角度におけるアルファ非弾性散乱の場合、反跳粒子のエネルギーが極めて低いため、反跳粒子が標的物質中から脱出することができず、これを測定することは難しい。そこで、本研究では、新たに開発するアクティブ標的を用いて低エネルギー反跳粒子を測定し質量欠損分光法による中性子過剰不安定核のアルファ非弾性散乱の精密測定を行う。

アクティブ標的の概略を下図に示す。アクティブ標的では、不安定核ビームを検出器に直接入射し、検出器ガスを標的とする不安定核ビームの散乱を測定する。検出器の内部で散乱が起こるため、不安定核から反跳される低エネルギー粒子であってもその飛跡とエネルギーを決定し、質量欠損分光法に基づいて不安定核の励起エネルギースペクトルを得ることができる。

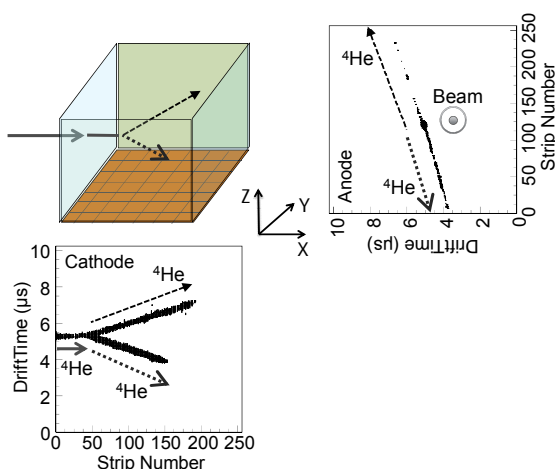


アクティブ標的に入射した不安定核と反跳粒子によって生じた電子・イオン対は垂直方向に印加されたドリフト電場の中を移動し、電子は底面の μ -PIC の表面でガス増幅される。 μ -PIC ではピクセルが $400 \mu\text{m}$ 間隔に配置されており、同時に信号を検知したピクセル間で加重平均を取れば $100 \mu\text{m}$ 以下の高い位置分解能を実現することが可能である。

さらにアクティブ標的の開発と並行してアクティブ標的の周囲で反跳粒子のエネルギーを計測する Si-CsI (TI) 検出器群の整備を行う。透過型 Si 検出器と CsI (TI) 検出器を組み合わせることで、アクティブ標的の有感領域を貫通してきた粒子のエネルギーを測定すると同時に粒子種別を弁別する。アクティブ標的と Si-CsI (TI) 検出器群の整備完了後、加速器からのビームを用いて現実的な条件下におけるアクティブ標的の性能評価試験を行う。性能試験後はデータ解析ソフトウェアの開発を行う。実際の性能試験において得られた実験データを参考に、モンテカルロシミュレーションによってダミーデータを生成し、これを解析することによって、解析アルゴリズムの性能を評価する。アクティブ標的が所期の性能を実現した後は、直ちに、中性子過剰不安定核ビームを用いたアルファ非弾性散乱の測定に着手し、中性子過剰核におけるアルファクラスター構造を明らかにする。

4. 研究成果

アクティブ標的の性能評価試験において取得された散乱イベントの一例を下図に示す。



アクティブ標的に入射した粒子は ${}^4\text{He}$ を主な成分とする検出器ガスと散乱する。散乱粒子と反跳粒子の飛跡に沿って生じた電子・イオン対は垂直方向に印加されたドリフト電場の中を移動し、電子は底面の μ -PIC の表面でガス増幅される。増幅された信号は μ -PIC の Cathode と Anode から読みだされ、それぞれが x, y 方向の位置情報を与える。信号の時間情報はドリフト時間を、すなわち z 方向の位置情報を与えるので、ドリフト時間とストリップ番号の相関をプロットすれば、粒子の 3 次元飛跡について xz 平面と yz 平面に対する射影像を得ることができる。ここでは、左から入射した ${}^4\text{He}$ ビームがアクティブ標的の検出ガス中の粒子によって散乱された飛跡を決定することに成功している。散乱後の 2 粒子の飛跡の成す角度が 90 度であることから、観測されたイベントが散

乱角度 45.8 度の ${}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ の弾性散乱事象であったことが同定され、アクティブ標的が所期の性能を持つことが示された。この開発の成果は、2014 年 5 月に開催された原子核におけるクラスター構造に関する国際会議 SOTANCP3 にて口頭発表された。現在、Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 誌に投稿するための論文を執筆中である。

本研究を通じて 3 名の大学院生が修士論文を執筆した。3 名のうち 1 名は、2015 年度中にこのアクティブ標的を用いて Be 同位体のアルファ非弾性散乱を系統的に測定し、中性子過剰不安定核におけるクラスター相関についての博士論文を執筆する予定である。

また、申請者らの開発したアクティブ標的は光核反応の測定においても極めて有効である。アクティブ標的が低エネルギー放出粒子に対して全立体角を覆う検出器である利点を活かせば、粒子崩壊閾値近傍での光核反応を高い効率で測定できる。2014 年 12 月にはニュースバル放射光施設から供給される $E = 20\text{--}34$ MeV の逆コンプトン線を用いて、 ${}^4\text{He}$ の光核分解反応の測定を行った。 ${}^4\text{He}$ の巨大双極子共鳴は宇宙核反応との関連において非常に重要な共鳴状態であるが、近年、そのピークの有無を巡って活発な議論がなされており、アクティブ標的を用いて信頼性の高いデータを供給することができれば、一連の議論に結論を与えると期待される。

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 1 件)

Development of MAIKo: the active target with μ -PIC for RI beam experiments
T. Furuno, T. Kawabata, S. Adachi, Y. Ayyad, T. Baba, T. Hashimoto, Y. Ishii, S. Kabuki, H. Kubo, Y. Matsuda, Y. Matsuoka, T. Mizumoto, M. Murata, H. J. Ong, T. Sawano, A. Takada, J. Tanaka, I. Tanihata, T. Tanimori, M. Tsumura and H. D. Watanabe
doi:10.1088/1742-6596/569/1/012042
J. Phys.:Conf. Ser. 569, 012042 (2014).
(査読有)

[学会発表](計 13 件)

T. Furuno
Development of MAIKo: the active target with μ -PIC for RI beam experiments
3rd International Workshop on State of the Art in Nuclear Cluster Physics (SOTANCP3), Yokohama, May 26–30, 2014.

T. Furuno
Development of MAIKo: the active target with μ -PIC for RI beam experiments

Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan (HAWAII 2014), Hawaii, Oct. 7-11, 2014.

M. Murata
Development of MAIKo with GEM
Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan (HAWAII 2014), Hawaii, Oct. 7-11, 2014.

村田求基
 ^4He 光分解反応の断面積測定
日本物理学会第 70 回年次大会、早稲田大学、
2015 年 3 月 21-24 日

T. Kawabata
Alpha inelastic scattering and cluster structures in light nuclei
French-Japanese Symposium on Nuclear Structure Problems, Sep. 30-Oct. 3, 2013, CNRS, Paris, France.

古野達也
 μ -PIC を用いた不安定核実験のためのアクティブ標的の開発
日本物理学会 2013 年秋季大会、高知大学、
2013 年 9 月 20-23 日

古野達也
 μ -PIC を用いた不安定核実験のためのアクティブ標的の開発
第 10 回 MPGD 研究会、京都大学、2013 年 12 月 14 日

石井佑季
 ^4He の光分解反応の断面積測定
RCNP 研究会「核子・ハイペロン多体系におけるクラスター現象」、関東学院大学、2013 年 7 月 26 日

古野達也
 μ -PIC を用いたアクティブ標的の性能評価
日本物理学会第 69 回年次大会、東海大学、
2014 年 3 月 27-30 日

石井佑季
 ^4He の光分解反応の断面積測定 1
日本物理学会第 69 回年次大会、東海大学、
2014 年 3 月 27-30 日

村田求基
 ^4He の光分解反応の断面積測定 2
日本物理学会第 69 回年次大会、東海大学、
2014 年 3 月 27-30 日

川畑 貴裕
Cluster structures probed by inelastic scattering

日本物理学会 2012 年秋季大会、京都産業大学、2012 年 9 月 11-14 日

T. Kawabata
Search for Alpha Condensed State in ^{24}Mg
10th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics (CLUSTER12), ATOMKI, Hungary, Nov. 19-22. 2012.

〔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〕
 μ -PIC を用いた Active Target 開発及び動作特性の研究
渡邊英智・修士論文 (京都大学 2013 年 2 月)

μ -PIC を用いた不安定核実験のためのアクティブ標的の開発と性能評価
古野達也・修士論文 (京都大学 2014 年 2 月)

MAIKo アクティブ標的を用いた ^4He 光分解反応断面積の測定
村田求基・修士論文 (京都大学 2015 年 2 月)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川畑 貴裕 (KAWABATA Takahiro)
京都大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：80359645

(2) 研究分担者

谷畑 勇夫 (TANIHATA Isao)
大阪大学・核物理研究センター・特任教授
研究者番号：10089873

王 恵仁 (ONG Hooijin)

大阪大学・核物理研究センター・特任講師
研究者番号：80462670

(3) 連携研究者

谷森 達 (TANIMORI Toru)
京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：10179856

延與 佳子 (EN 'YO Yoshiko)
京都大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：40300678

伊藤 誠 (TANIMORI Toru)
関西大学・システム理工学部・准教授
研究者番号：30396600

(3)研究協力者

足立 智 (ADACHI Satoshi)
大阪大学・核物理研究センター・教務補佐員

渡邊 英智 (WATANABE Hidetomo)
京都大学・大学院理学研究科・大学院生

古野 達也 (FURUNO Tatsuya)
京都大学・大学院理学研究科・大学院生

村田 求基 (MURATA Motoki)
京都大学・大学院理学研究科・大学院生

津村 美保 (TSUMURA Miho)
京都大学・大学院理学研究科・大学院生

石井 佑季 (ISHII Yuki)
京都大学・大学院理学研究科・大学院生