

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H02197

研究課題名(和文) 二重ガモフ・テラー応答研究の開拓

研究課題名(英文) Pioneering study of double Gamow-Teller responses

研究代表者

上坂 友洋 (Uesaka, Tomohiro)

国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・主任研究員

研究者番号：60322020

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 39,090,000円

研究成果の概要(和文)：二重ベータ崩壊と深く関連する、原子核の二重ガモフ・テラー遷移を研究する手法を新たに確立した。この新たな手法は二重荷電交換($^{12}\text{C}, ^{12}\text{Be}$)反応を用いるもので、核反応を用いることにより、原子核種についても終状態についても極めて限定されていた二重ベータ崩壊の限界を大きく突破し、全ての安定原子核の幅広い励起エネルギーにおける二重ガモフ・テラー遷移に適用することを可能とする。この手法を用い、カルシウム48原子核(^{48}Ca)とカドミウム116原子核(^{116}Cd)原子核における二重ガモフ・テラー巨大共鳴を探索する実験を理化学研究所RIビームファクトリー施設において実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙開闢以来の時間より長い寿命を持つ二重ベータ崩壊は、原子核の崩壊モードの中で最も研究が進んでいないものである。特に未発見のニュートリノ放出を伴わない二重ベータ崩壊は物理分野で強い注目を集めている。本研究は、これらの二重ベータ崩壊の主要な素過程である二重ガモフ・テラー遷移について、核反応を用いた研究の道を拓くものである。今回確立した方法により、世界で初めて二重ガモフ・テラー遷移の包括的な研究が可能となる。

研究成果の概要(英文)：A novel method to investigate double Gamow-Teller transitions in nuclei has been established. The double Gamow-Teller transitions are closely related to nuclear matrix elements of double beta decays. The method is based on a double charge exchange ($^{12}\text{C}, ^{12}\text{Be}$) reaction with which one can extend studies of double Gamow-Teller transitions to a wide range of excitation energies in almost all the stable nuclei, while it is severely limited to a few low-lying states in ~ 10 double beta decay nuclei. By applying the method, we have carried out an experiment to search for double Gamow-Teller giant resonances in ^{48}Ca and ^{116}Cd nuclei at the RI Beam Factory

研究分野：原子核物理学

キーワード：二重ガモフ・テラー共鳴 二重ベータ崩壊 荷電交換反応 RIビームファクトリー 分散整合イオン光学

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。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

原子核のスピンとアイソスピンが共に変化するガモフ・テラー遷移の研究は、ベータ崩壊実験によりその端緒が開かれ、のちに核内のパイ中間子自由度との関連や、宇宙で元素合成に関わるニュートリノ反応や電子捕獲反応への関連など、常に原子核物理学の中心研究テーマであった。ベータ崩壊などに関与する低励起離散的状態への遷移、励起エネルギー10-20 MeVに現れる集団運動状態 (ガモフ・テラー巨大共鳴) など広い励起エネルギーに渡るガモフ・テラー遷移を総称して、原子核の「ガモフ・テラー応答」と呼ぶ。

2つのガモフ・テラー遷移が連続して起こる二重ガモフ・テラー遷移で、現在唯一実験データが存在するのが二重ベータ()崩壊である。数千種に及ぶ安定・不安定同位体の中で崩壊をするものは ^{48}Ca , ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{96}Zr , ^{100}Mo , ^{116}Cd , ^{128}Te , ^{130}Te , ^{136}Xe , ^{150}Nd 等 のわずか10種類余りしか知られていない。現在強い注目を集めているのが、未だ実験では確認されていない、ニュートリノ放出を伴わない 崩壊(0)である。0 崩壊は、ニュートリノのマヨラナ性(粒子・反粒子の同一性)の直接的証拠となるため、ニュートリノ物理の次のマイル・ストーンと考えられており、日本でのKamland-ZENやCANDLES計画を始めとして全世界で大型実験による探索が続けられている。0 崩壊の寿命からニュートリノの性質を導出するためには核行列要素の大きさが必要となるため、現在核行列要素の理論研究が精力的に行われている。しかしながら、我々の二重ガモフ・テラー応答に関する理解は、10種類余りの数少ない同位体に対する、ごく限られた2 崩壊寿命のデータにのみ依拠しており、その信頼性について評価することすら難しい。

2. 研究の目的

本研究では、申請者の着想による重イオン二重荷電交換(^{12}C , ^{12}Be)反応を用いた実験を、理化学研究所 RI ビームファクトリー施設で実施し、 核に対して広い励起エネルギー範囲に渡り二重ガモフ・テラー応答を得る。 崩壊による研究が孫核の限られた低励起状態への遷移に限られ、かつ和則値の0.01-0.1%程度しか尽くさないのと対照的に、本研究は広い励起エネルギーに渡る和則強度のほぼ全てを明らかにすることができる。

原子核反応を用いることにより2 崩壊に課せられた核種・エネルギーの制限から開放され、広い励起エネルギー範囲に渡る二重ガモフ・テラー応答を実験的に決め得ることが、この研究が持つポテンシャルである。特に原子核内の多数の核子がコヒーレントに寄与する二重ガモフ・テラー巨大共鳴が発見できれば、二重ガモフ・テラー応答の研究のマイル・ストーンとなる。二重ガモフ・テラー巨大共鳴の存在は、1989年にAuerbachらにより理論的に予言されているが、現在まで発見はなされていない。

3. 研究の方法

本研究では、二重ガモフ・テラー応答の研究に重イオン二重荷電交換(^{12}C , ^{12}Be)反応を用いる。

この反応は、

- ・ スピン反転状態(二重ガモフ・テラー状態がその例)を励起する断面積が大きい。
- ・ 終状態の $^{12}\text{Be}(0^+_2)$ が 330 ns という長い寿命を持つため、遅延ガンマ線をタグすることで反応チャンネルを不定性なく同定することができる。

という他の二重荷電交換反応にはない際立った特長を持っている。

本申請により、理化学研究所 RI ビームファクトリー施設(以下、RIBF)で同実験を遂行するセットアップを確立し、RIBF で得られる高いビーム強度、高いガンマ線検出効率、低バックグラウンドを実現する。

この実験の特色は、下記にまとめられる。

- ・ RI ビームファクトリーで得られる最大 1 pμA の大強度 ^{12}C ビームを用いる。
- ・ 通常二次ビームの分離生成に用いる BigRIPS をスペクトロメータとして用いるとともに、分散整合イオン光学を採用する。この手法は、パイ中間子原子生成実験で既に用いられているが、今回の実験のために、新しい検出器を導入し、分解能向上を実現する。
- ・ 放射核が生成されない物質を ^{12}Be のストッパーとして用いることにより低バックグラウンドを実現し、更にガンマ線検出器アレイ DALI2 により高効率で遅延ガンマ線を検出する。

上記手法に基づく実験計画を RI ビームファクトリー実験課題採択委員会に申請し、高い評価(A)で採択された。またこの実験計画が契機となり、二重ガモフ・テラー巨大共鳴と二重崩壊核行列要素に関する理論研究も進展した[N. Shimizu et al., Phys. Rev. Lett. 120, 142502 (2018)]。

4. 研究成果

本研究では、通常不安定核ビームの生成分離装置である RI ビームファクトリー-BigRIPS をスペクトロメータとして用いる。この手法は、これまでパイ中間子原子生成実験で用いられてきたが、二重荷電交換反応を用いる本研究に適用するためには、新しい焦点面検出器の導入、イオン光学調整法の高度化などの新規開発が必要であった。

(1) 新しい焦点面検出器の導入

過去の実験で用いられた検出器セットアップでは、焦点面検出器を大気圧稼働させるために必要な真空封じ膜や検出器ウィンドウ等の物質による多重散乱がエネルギー分解能を悪化させていた。そこで、本計画では、低圧動作型多芯線型ドリフトチェンバー(LP-MWDC)を製作し、これを焦点面検出器として用いることにより分解能向上を図った。

過去の開発[H. Miya et al., NIM B 317, 701 (2013)]で培った技術やノウハウを活かし、LP-MWDC の基本設計と製作を行った。本 LP-MWDC は、10MHz に及ぶ高いトライトン(^3H)バックグラウンド下で、高効率かつ高精度で ^{12}Be の飛跡を決定しなければならない。シミュレーションを用いてトラッキング効率、ミス・トラック率を評価し、その結果高い冗長性を有する X-X'-X''-U-U'-U''-V-V'-V'' (1/3 セルずらし) 構造が実験の要請を実現するために必要であるという結果を得た。この基本方針に従い、有感面積 240mm(H) × 144mm(V) の LP-MWDC を作成し、東北大学ラジオアイソトープセンターと筑波大学タンデム加速器センターの陽子ビームを用いた性能評価を経た上で、RIBF 実験に導入した。

RIBF 実験では、4 ページの図中 F5 と書かれている焦点面に LP-MWDC2 台を導入した。カウンターガスとしては、イソブタンガスを用い、30kPa の低圧で動作させた。ワイヤにかかる電圧を調整 (1200–1500V) することで核子当たり 250MeV のエネルギーを持つ Z=1–6 のイオン種に対して、約 150 μm() の位置分解能が実現できることが確認された。この性能は本研究課題遂行に十分なものである。

(2) イオン光学調整法の高度化

本実験では、加速器から供給されるビームが持つエネルギー広がりを越える高いエネルギー分解能を実現するため、ビームラインと BigRIPS の分散整合を実現する必要がある。

分散整合輸送を効率的に実現するには、各焦点面におけるビーム粒子の軌道を正確に知る必要がある [H. Takeda et al., NIM B 463, 515 (2020), S. Michimasa et al., NIM B 317, 305 (2013), T. Uesaka et al., PTEP 2012, 03C007 (2012)]。しかし、今回用いる一次ビームライン内には検出器を置くことが構造上難しいため、新しい方法を開発した。

その新しい方法は、検出器を設置できる BigRIPS 中の焦点面(4 ページ図中の F3, F5, F7)で得られたビーム軌道を、精密イオン光学計算により得られた輸送行列を用いて一次ビームラインまでトレースバックし、これにより得られたビーム軌道を用いて調整する手法である。高い信頼性をもってトレースバックするには、精密イオン光学計算を実データにより較正する必要がある。今回は、そのために較正データも取得した。この方法では、色無し(achromatic)焦点面と分散(dispersive)焦点面でのビーム軌道が必要となるが、BigRIPS の色なし焦点面 F3 と F7、分散焦点面 F5 を用いることでこれを実現した。

本課題の実験遂行に先立ち、 ^{12}C ビームを用いたイオン光学輸送調整を実施し、散乱標的を設置する BigRIPS F0 標的位置で縦横の二重収束と分散整合に必要な 3.4m の分散実現に成功した。これにより本課題で必要なエネルギー分解能実現を達成した。

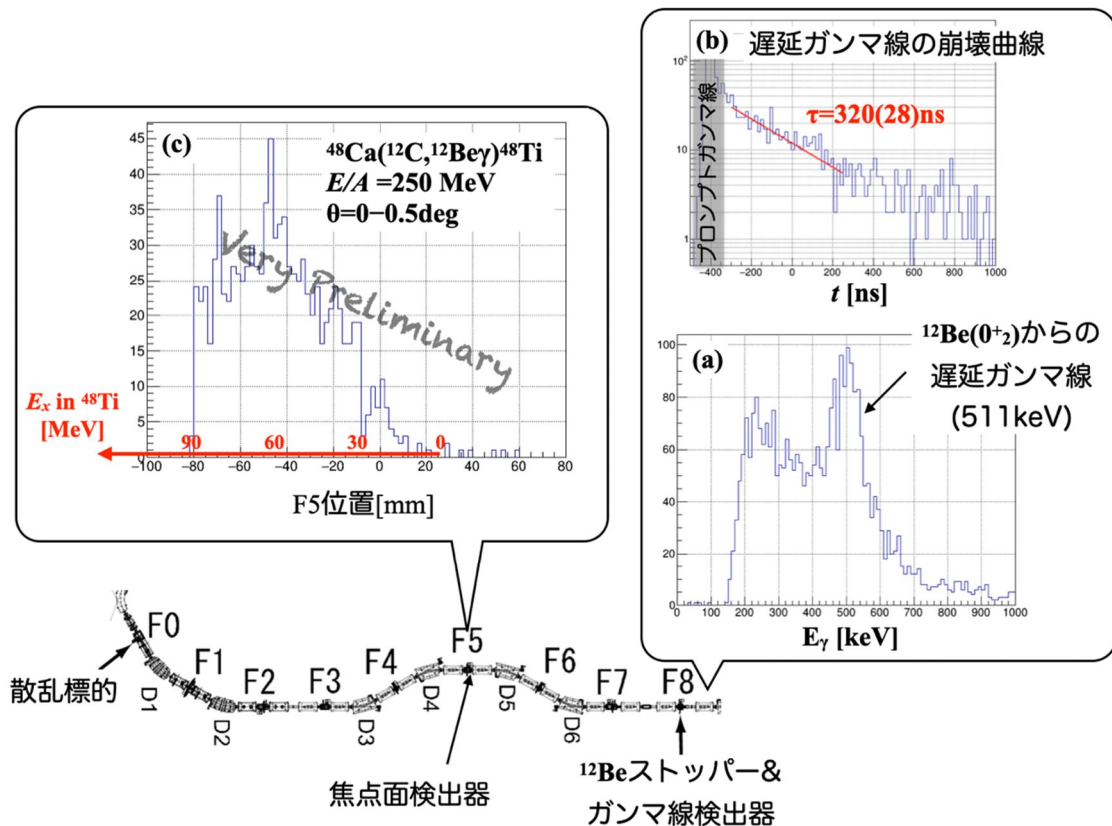
(3) 二重荷電交換反応実験の実施

当初 2019 年に実施する予定であった本実験であるが、2 つの外的要因によりその実施が 2021 年までずれ込むこととなった。1 つ目の理由が ^{48}Ca 箔が世界的に市場から姿を消したことである。 ^{48}Ca 標的に対する実験は本研究の中心課題の一つである。しかしながら 2018 年頃より ^{48}Ca 箔が市場から全く姿を消してしまい手に入れることができなくなってしまった。この事態は現在まで変わっていない。最終的には大阪大学核物理研究センターの協力のもと、同センターが所有している ^{48}Ca 箔を使わせていただき、実験実施する運びとなった。 ^{48}Ca 箔輸送時・設置時には、酸化等による ^{48}Ca 箔の劣化を防ぐためグラフェン膜で封じ込める機構を導入した。2 つ目の理由が、2020 年 1 月以来のコロナ蔓延である。コロナ蔓延により RIBF 運転計画に大きな変更が生じた。以上の困難を乗り越えて、2021 年前期に本実験が実施されることとなった。

実験は核子当り 250MeV の ^{12}C ビームを ^{48}Ca , ^{116}Cd の標的に照射し、反応で生成した ^{12}Be を BigRIPS(F0-F5)をスペクトロメータとして用いて分析することにより実施した。本課題で作成した LP-MWDC を F5 焦点面に設置し、 ^{12}Be のエネルギーを決定した。 ^{12}Be は F8 焦点面まで輸送され、ベリリウムで作成されたストッパー中で停止する。ベリリウム・ストッパーは NaI (TI)シンチレータにより構成されるガンマ線検出器アレイ DALI2 により囲まれており、 $^{12}\text{Be}(0^+_{2})$ の同定に必要な遅延ガンマ線検出を行った。

重イオン荷電交換反応は大変魅力的な実験手法である一方、幾つかの困難さを伴う。その一つは高い分解能が要求されることであるが、本研究では BigRIPS をスペクトロメータとして用いる手法と分散整合輸送を組み合わせることでこの困難を解決した。もう一つが終状態の同定である。重イオン荷電交換反応で終状態を同定するのは多くの場合難しいが、本研究では $^{12}\text{Be}(0^+_{2})$ 状態が、330ns と長い寿命を持つアイソマー状態であることを活用し、この状態からの遅延ガンマ線を検出することにより終状態を同定する。次ページの図(a)が遅延ガンマ線のエネルギースペクトルである。 $^{12}\text{Be}(0^+_{2})$ 状態の e^+e^- 崩壊に起因するガンマ線エネルギー511keV に明確なピークが観測された。 ^{12}Be 検出とガンマ線検出の時間差をプロットしたのが図(b)であり。イオン到着

直後のプロンプトガンマ線を除いたスペクトルは寿命 $320 \pm 28 \text{ ns}$ に対応する崩壊曲線を示している。これは $^{12}\text{Be}(0^+_{2})$ 状態の既知の寿命 $331 \pm 12 \text{ ns}$ と一致しており、間違いなく $^{12}\text{Be}(0^+_{2})$ が終状態として同定されていることを示している。



図：実験セットアップと本実験課題で得られたスペクトル

遅延ガンマ線が検出された条件を課した上で得られた励起エネルギースペクトルが図(c)である。この図では、二重ガモフテラー共鳴が最も顕著に見えると期待される最前方 $\theta = 0 - 0.5$ 度限定したスペクトルが示されている。横軸として分散焦点面である F5 の位置が用いられているが、F5 位置と励起エネルギーには $x_{F5}[\text{mm}] \sim -0.84 \text{ MeV}$ の関係があるため、図中赤字で示す励起エネルギースペクトルに変換できる。励起エネルギーの原点と位置をエネルギーに変換するパラメータは今後の詳細解析を経て最終決定するものである。まだ予備的な結果であるが、図中 0mm の位置に観測された構造は、二重ガモフテラー巨大共鳴の候補と考えられる。

本研究により、BigRIPS を用いた二重ガモフテラー遷移の実験研究手法を確立することができた。本課題の研究期間には ^{48}Ca と ^{116}Cd のデータ取得を行ったが、今後本セットアップを活用し他の β 崩壊核やその他の原子核に対する二重ガモフテラー遷移研究を進展させていく。また、遅延ガンマ線検出以外の部分は、パイ中間子原子分光実験にそのまま用いることのできるものであり、この手法によるカイラル対称性の部分的回復に関する研究発展につながると期待される。実際 2021 年前期に行った実験では、本課題に引き続き錫同位体に対する $(d, ^3\text{He})$ 反応を用いたパイ中間子原子分光実験を実施した。

以上、本課題では、 ^{48}Ca と ^{116}Cd に対する二重ガモフテラー遷移の研究を実施した。本課題で確立した実験手法により、今後多くの原子核に対する二重ガモフテラー遷移の研究とパイ中間子原子分光研究が進展すると期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takeda H., Tanaka Y.K., Suzuki H., Ahn D.S., Franczak B., Fukuda N., Geissel H., Haettner E., Inabe N., Itahashi K., Komatsubara T., Kubo T., Kusaka K., Matsumoto S.Y., Murai D., Nishi T., Ohtake M., Scheidenberger C., Shimizu Y., Sumikama T., Ueno H., Uesaka T., Yanagisawa Y., Yoshida K.	4. 巻 463
2. 論文標題 New ion-optical operating modes of the BigRIPS and ZeroDegree spectrometer for the production and separation of high-quality rare isotopes beams and high-resolution spectrometer experiments	5. 発行年 2020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 515-521
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2019.03.016	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 T. Nishi, K. Itahashi et al.	4. 巻 120
2. 論文標題 Spectroscopy of Pionic Atoms in $^{122}\text{Sn}(\text{d}, ^3\text{He})$ Reaction and Angular Dependence of the Formation Cross Sections	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 152505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.120.152505	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10件（うち招待講演 8件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Tomohiro Uesaka
2. 発表標題 Nuclear Double Gamow-Teller Responses -- little known aspects of nuclear structure --
3. 学会等名 6th Symposium on Neutrinos and Dark Matter in Nuclear Physics 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomohiro Uesaka
2. 発表標題 Congelation of correlated nucleons in nuclei
3. 学会等名 20th Northeastern Asian Symposium-2018 on Nuclear Physics in the 21st Century (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomohiro Uesaka
2. 発表標題 30-year Perspective of Experimental Nuclear Physics at RIBF/RCNP
3. 学会等名 International Symposium on the paths of nuclear physics from 1950 's towards 2020 's (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomohiro Uesaka
2. 発表標題 Various aspects of nuclear matter studied with direct reactions
3. 学会等名 International Workshop on New Aspects of Hadron and Nuclear/Astro Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shota Y Matsumoto
2. 発表標題 Development of dispersion matching optics of primary beam for SRC-BigRIPS system at RIBF
3. 学会等名 Fifth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomohiro Uesaka
2. 発表標題 Reaction studies of Double Gamow-Teller transitions in $\beta\beta$ -decay nuclei
3. 学会等名 11th MEDEX (Matrix Elements for the Double beta decay EXperiments) meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tomohiro Uesaka
2. 発表標題 Towards Discovery of Double Gamow-Teller Giant Resonances
3. 学会等名 International Symposium on Physics of Unstable Nuclei 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tomohiro Uesaka
2. 発表標題 Looking through Double Charge Exchange Reactions
3. 学会等名 ISOLDE Workshop and Users meeting 2016 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 阪上朱音, Ahn Deuk Soon, 板橋健太, 日下健祐, 清水陽平, 炭竈聡之, 鈴木宏, 竹田浩之, 上坂友洋, 西隆博, 馬場秀忠, 福田直樹, 福西暢尚, 稲辺尚人, 矢向謙太郎, 柳澤善行, 吉田光一, 松本翔汰, 関屋涼平, Geissel Hans, 田中良樹
2. 発表標題 BigRIPSにおける二重ガモフ・テラー巨大共鳴探索実験のための光学系の開発
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本翔汰, 阪上朱音, 関屋涼平, 辻峻太郎, 板橋健太, 上坂友洋, 西隆博, 銭廣十三, 矢向謙太郎, 森口哲朗
2. 発表標題 高精度パイ中間子原子分光・二重ガモフ テラー巨大共鳴探索実験のための新規MMDCの開発
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021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
研究 分担者	板橋 健太 (Itahashi Kenta) (30322093)	国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・専任研究員 (82401)	
研究 分担者	矢向 謙太郎 (Yako Kentaro) (50361572)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授 (12601)	

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