

令和元年5月16日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06957

研究課題名(和文) 高感度な線直線偏光度測定系の開発：核データとしてのスピン・パリティ決定のために

研究課題名(英文) Development of gamma-ray linear polarization measurement system in order to determine spins and parities of nuclear excited levels

研究代表者

小島 康明 (Kojima, Yasuaki)

名古屋大学・アイソトープ総合センター・准教授

研究者番号：80314730

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：短寿命不安定原子核の励起準位のスピンおよびパリティを実験的に決定するために、線直線偏光度測定に着目し、高感度な測定系の開発を行い、実際に不安定核に適用した。研究の前半では、もっとも高感度な測定を実現する検出器選択および配置の検討した。基礎実験の結果、相対効率が60%のゲルマニウム検出器およびクローバー測定器を線源から距離10cmの位置に設置するときに最高の感度が得られることを明らかにした。その後、測定系を京都大学研究用原子炉のオンライン同位体分離装置に持ち込み、そこで生成させたLa-146(半減期6秒)から放出されるγ線を計測し、直線偏光を特徴づける非対称性が観測されることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大型のクローバー検出器等を使い、その配置を最適化することで、短寿命の不安定原子核から放出されるγ線に対して直線偏光度の測定が可能であることを実証した。このことにより、不安定核の原子核構造を議論する際に不可欠な励起準位のスピン・パリティを実験的に決定できる。

研究成果の概要(英文)：The aim of this research is determination of spins and parities of excited levels in short-lived beta-decaying nuclei by means of gamma-ray linear polarization measurements. In the first stage, we searched the optimum geometrical condition using standard radioactive sources of Co-60, Cs-134 and Eu-152. The best sensitivity was obtained when detectors were placed at 10cm from the source position. Next, we performed an on-line experiment for La-146 (half-life of 6 s) at KUR-ISOL (Kyoto University Reactor, Isotope Separator On-Line). In this experiment, we observed asymmetry of Compton scattering events. This means that gamma-ray linear polarization was found for short-lived nuclei.

研究分野：応用原子核物理学

キーワード：崩壊核分光 直線偏光 不安定核

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

²³⁵Uの核分裂で生成される質量数 150 近傍の中性子過剰希土類核は、その形状が球形から回転楕円体に変化する遷移領域に位置するため、原子核物理学の観点で興味深い研究対象である。このため、理論・実験の両面から様々な研究がなされているが、未だに十分に解明されたとは言えない。例えば、お互いに矛盾するデータが報告されているケースや、励起準位のエネルギーは分かっているものの、そのスピンやパリティなどの詳細な性質が分かっていない核種が多数存在するというのが実情である。

このような状況において、申請者が所属する研究グループでは、放射線計測技術の高度化を図りつつ、崩壊データを詳細に測定する研究に取り組んできた。特に最近では、1 台の測定器としては世界最大の立体角を有する貫通孔付きクローバー型検出器（4 つの大型ゲルマニウム結晶を一つのハウジング内に配置した測定器）を用いて、いままで測定されていなかった高エネルギー（3MeV 程度、またはそれ以上）の励起準位の測定などを行い、成果を上げてきた。しかしながら、これまでの方法で決定できるのは、励起準位および γ 線のエネルギー、 γ 線および β 線の強度のみであり、励起準位のスピン・パリティあるいは γ 線の多重極度を定めることはできない状況だった。これらの情報は内部転換電子の放出率などに関わるため、核データとして重要であるだけでなく、原子核の量子状態を鋭敏に反映するため、核構造を詳細に議論するためにも不可欠である。したがって、それらの実験的な決定が望まれている。

2. 研究の目的

原子核の励起準位のスピン・パリティならびに γ 線の多重極度を実験的に決めるための測定系を開発し、実際に測定することを目的とする。これらの物理量を決める手法にはいくつかあるが、本研究では γ 線のコンプトン散乱に注目する。すなわち、コンプトン散乱光子の角度分布（非対称性）が γ 線の直線偏光度に依存し、かつ、直線偏光度が γ 線の多重極度などに関係することを扱う。

直線偏光自体は古くから知られている現象であり、いわゆるインビーム実験ではこれを利用した多重極度の測定がしばしば行われている。しかしながら、この手法を崩壊に伴って放出される γ 線に適用した例は、テスト実験を除くと、ほとんどない。なぜなら、後者の実験では原子核が無偏極であるため、コンプトン散乱の非対称度を測定するための測定器（以下、「偏光度測定器」と呼ぶ）に加え、別の測定器（以下、「ゲート用測定器」）でも γ 線を測定し、角相関の原理で偏極を引き起こす必要があり、結果として十分な統計精度を得づらからである。本研究では、(1) 高感度なクローバー測定器を偏光度測定器として使うことで、検出効率を高める。さらに、(2) 偏光度測定器およびゲート用測定器の配置（幾何条件）を最適化することで、総合的な感度を最大限に高め、無偏極核に対して直線偏光度測定が可能であることを実証することを目指す。まずは多重極度などがよく分かっている核種を使って、測定系の基礎特性を調べる実験を行うが、最終的には、京都大学研究用原子炉に付置されたオンライン同位体分離装置に測定器を持ち込み、実験データが不足している短半減期（数秒～1 分程度）の中性子過剰核に対して γ 線の多重極度などを定めることを目標とする。

3. 研究の方法

(原理)

測定概念図を図 1 に示す。挿入図のような崩壊をする核種を想定し、図で γ_2 と示した γ 線の直線偏光度をクローバー検出器で測定する場合を考える。 γ - γ 角相関の理論によると、 γ_1 をゲート用測定器で検出し、それと同時に放出された γ_2 を偏光度測定器で測定すれば、 γ_2 の偏光が観測される。偏光の程度はゲート用測定器と偏光度測定器のなす角度に依存し、 90° のときに偏光度が最大に、 180° のときに偏光度が 0 になる。一方、コンプトン散乱の理論によると、 γ_2 が偏極しているとき、 γ_2 がコンプトン散乱した後の散乱光子の角度分布が非対称になることが知られている。ゲート用測定器を 90° 方向に設置したとき、 γ_1 と γ_2 が作る平面に対して平行な方向にコンプトン散乱するイベント数を N_{\parallel} 、垂直な方向に散乱するイベント数を N_{\perp} とすると、非対称度 A は $A = (aN_{\perp} - N_{\parallel}) / (aN_{\perp} + N_{\parallel})$ と書ける。ここで、 a は偏光度測定器の結晶間の検出効率を補正する係数であり、ゲート用測定器を 180° 方向に置いたときの N_{\parallel} および N_{\perp} の計数比から求めることができる： $a = N_{\parallel} / N_{\perp}$ 。非対称度は γ 線の直線偏光度 P に関係することが分かっており、 $P = A/Q$ である。ここで、 Q は偏光度測定の感度であり、 γ 線エネルギーに依存するという報告例が多い。

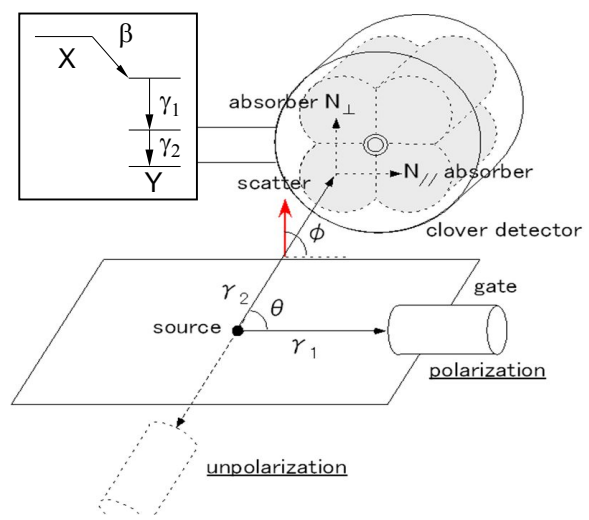


図 1 直線偏光度測定概念図。挿入図に示す崩壊図式を持つ核種を測定することを想定している。

実験的には、直線偏光度 P が分かっている γ 線の非対称度 A を測定して Q を決める。その後、直線偏光度が不明の γ 線を測定して、非対称度を決めた後、先の実験で決めた Q で補正して直線偏光度 P を得ることになる。直線偏光度 P は、 γ 線の様々な多重極度に対して理論計算されているため、これから多重極度が決まる。多重極度が決まれば、 γ 遷移の選択則から励起準位のスピンのおよびパリティを推定できる。

(測定系)

ゲート用測定器を含めて合計 6 つのゲルマニウム結晶からの信号を高速に処理し、その検出時刻とエネルギー（パルス波高）を検出事象ごとに保存するために、VME 規格のデジタルシグナルプロセッサ式のデータ収集系を使用した。得られた大量のデータから、注目している γ 線の情報のみを抽出するプログラムを開発し、オフラインでデータ解析する体制を整えた。

(測定の最適条件)

本手法は非対称度 A を実験的に精度良く決めることが鍵となる。上で述べた A の定義式から推定できるように、 A は 0 前後の小さな値を取る。その正負が重要であるため、不確かさを考慮した上で、「 A は正（あるいは負）」と断定するためには、十分な統計精度を得るとともに、感度 Q ができるだけ大きい条件で測定しなければならない。ところで、線源と測定器間の距離を近づけると、検出効率が大きくなるため統計精度は上がるが、偏光度測定器とゲート用測定器が捉えた γ_1 と γ_2 がなす角度の広がり（曖昧さ）は増す。後者は角相関をばやけさせることとなるため、偏極の度合いが減少し、結果として Q が小さくなる。すなわち、統計精度と感度の間にはトレードオフの関係が存在し、測定器全体の性能を最適化する線源-測定器間距離が存在すると予想される。さらに、同様の理由で、ゲート用測定器の大きさ（立体角）についても最適値が存在すると考えられる。そこで、本研究ではゲート用測定器として相対効率が 38% および 60% のゲルマニウム検出器を使用し、それらを 5~20cm の位置に設置し、合計 4 条件で実験を行い、測定系の総合性能が最適になる幾何条件を探索した。線源には ^{60}Co 、 ^{134}Cs 、 ^{152}Eu の標準線源を使用した。いずれの核種も多重極度が E2-E2 の γ 線カスケードを持つことが知られている。測定系の総合性能は、性能指数 $F = \varepsilon Q^2$ を用いて評価した。ここで、 ε は N および N として検出される効率の平均値である。 F が最大になるとき、非対称度 A の相対誤差が最小になる。測定の様子を図 2 に示す。

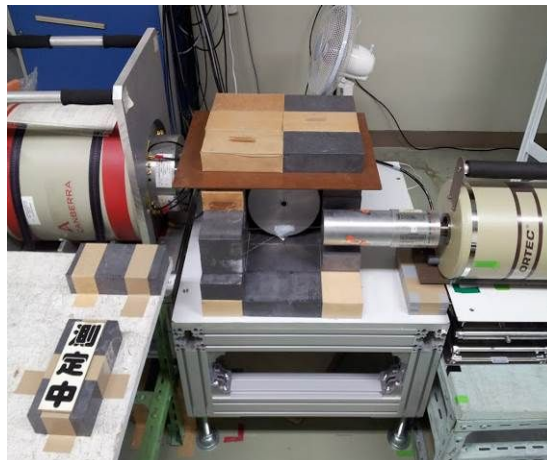


図 2 標準線源を用いた直線偏光度の測定の様子。

(短半減期核種への適用)

短半減期核種に対しても直線偏光度測定が可能であることを実証するために、 ^{235}U の核分裂で生成させた ^{146}La (α 半減期 6.3 秒) から放出される γ 線の非対称度を測定した。 ^{146}La の崩壊特性はよくわかっており、本実験では 258-410keV の E2-E2 カスケードに着目した。実験は京都大学複合原子力科学研究所の研究用原子炉に付置されたオンライン同位体分離装置 KUR-ISOL を利用して行った。すなわち、原子炉からの熱中性子で ^{235}U ターゲットを照射し、生成した核分裂生成物を表面電離型イオン源で +1 価にイオン化した。イオン化された生成物をイオン源から引き出した後、30kV の電圧で加速し、磁場内に導いて質量分離した。質量分離したビームをテープ式線源移送装置に打ち込み、13 秒間隔で測定器前まで周期的に移送し、13 時間の連続測定を行った。測定の様子を図 3 に示す。



図 3 KUR-ISOL での直線偏光度の測定の様子。遮へいをする前の写真。

なお、本研究課題申請時の計画では、多重極度が未知の核種 (^{145}Ba 、 ^{147}La など) に対しても実験を行い、新たな核データを得ることを目指していた。しかしながら、新しい法規制に対応するために、本課題の研究期間内に研究用原子炉の運転が一時停止したため、それらの測定には

至らなかった．研究期間外にはなるが，2019 年度以降に実験を継続して行う予定である．

4．研究成果

(測定最適条件)

例として， ^{60}Co の 1173keV をゲート用測定器(10cm の位置に置いた 60%Ge 測定器)で検出し，1332keV がクローバー検出器内で垂直方向にコンプトン散乱したときのデータから作成したエネルギースペクトルを図 4 に示す．同様に，水平方向にコンプトン散乱したときのスペクトルを求め，それぞれのピーク強度を比較したところ， N が N より 4.8%大きいことが分かった．検出効率で補正した後，非対称度 A を求めると， $A=0.0168(34)$ が得られた．E2-E2 カスケードの場合，直線偏光度の理論値は 0.1667 であるため，感度 Q は 0.101(20) と得られた．他のエネルギーおよび幾何条件についても同様の解析を行った結果を図 5 に示す．全ての実験条件において，非対称性が観測された．

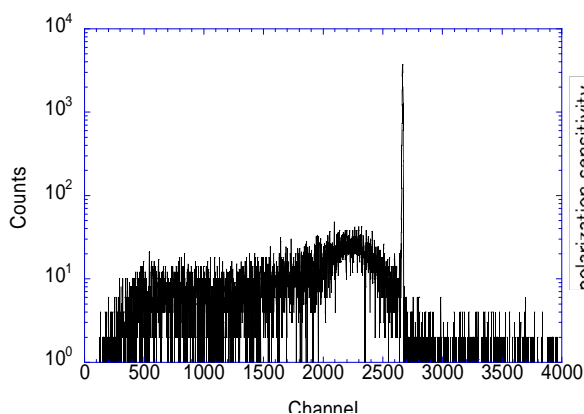


図 4 1173keV でゲートをかけたときの垂直方向アドバックスペクトルの例．

得られた感度および検出効率を用いて，性能指数 F を計算した．前節で考察したように，性能指数は線源と測定器との距離，すなわち立体角に依存すると推定できる．図 6 に，測定器の立体角の積に対して，性能指数がどのように変化するかを示す．この図から，立体角の積が 5×10^{-4} 程度，すなわち，38%または 60%Ge 測定器を距離 10cm の位置に設置したときに最良の性能が得られることが分かった．60%Ge 測定器を使ったときの方が検出効率自体は高く，良い統計精度が得られるため，60%Ge 測定器を 10cm の距離に設置するのが最適であると結論した．

(短半減期核種への適用)

前項で述べた方法と同様に， ^{146}La の崩壊に伴って放出される γ 線スペクトルを解析し，258keV および 410keV におけるコンプトン散乱の非対称度を求めた．その結果を，標準線源を使って得られた結果と比較したものを図 7 に示す．統計精度が悪いため，不確かさがやや大きいですが，両者の結果は矛盾なく一致していることが分かる．このことから，オンライン同位体分離装置を用いて生成した短半減期核種に対して， γ 線直線偏光度測定に基づく多重極度の決定を行うことができることを実証できた．

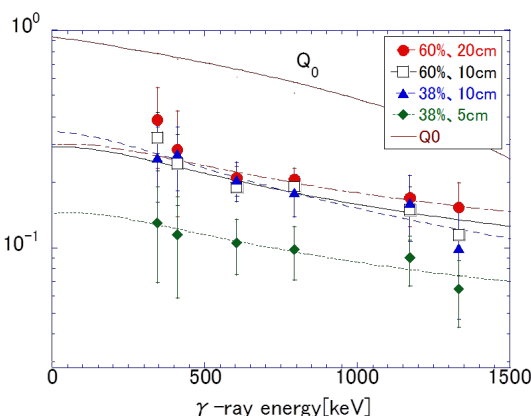


図 5 直線偏光度の測定感度のエネルギー依存性．各マークは，ゲート用測定器の相対効率および線源からの距離が異なる実験条件を意味する．

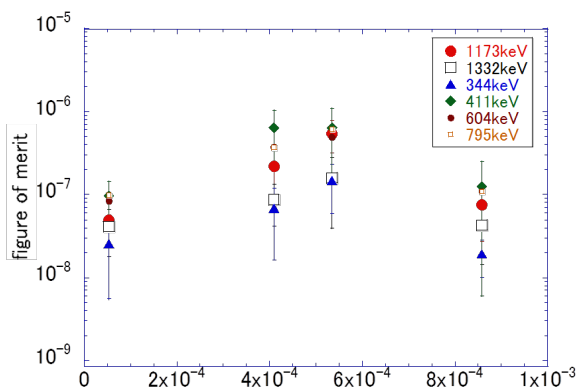


図 6 性能指数と測定器の立体角の関係．

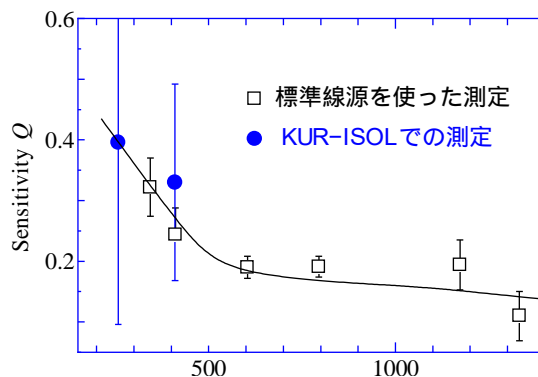


図 7 標準線源および KUR-ISOL で生成した短半減期核種を用いた直線偏光度測定の感度の比較．

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- (1) S. Ohno, Y. Kojima, H. Kamada, T. Yamashita, A. Taniguchi, M. Shibata, KURRI Prog. Rept. 2017. p.44, Compton polarimeter for b-delayed g rays using clover detector. 査読無し .

〔学会発表〕(計 0 件)

〔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

<http://anp.nucl.nagoya-u.ac.jp/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名：柴田理尋，谷口秋洋，大野臣悟，鎌田裕生，山下貴大

ローマ字氏名：Shibata Michihiro, Taniguchi Akihiro, Ohno Shingo, Kamada Hiroki, Yamashita Takahiro

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、研究者個人に帰属されます。