

名古屋大学工学研究科 エネルギー理工学専攻
エネルギー量子工学講座（協力講座）

応用核物理学グループ

柴田理尋(教授)、小島康明(准教授)
博士前期課程4名、学部2名(2020年度の実績)

研究分野と研究方針

【概要】

応用核物理学グループは、核エネルギーの源である不安定原子核(放射能)が持つ多様性の解明とその応用へ向けた高品質な核データの測定を目的として研究活動を行っている。京大原子炉、原子力機構タンデム加速器のオンライン同位体分離装置(ISOL)で得られる短半減期の原子核の崩壊に伴う放射線を計測し、精度の良い崩壊核データを決定する。特に、単一の検出器としては最高の検出効率を有する4結晶全立体角型クローバー検出器を用いて、核分裂収率の極めて少ない質量数150程度の核に着目し、 γ 線測定や核異性体探索を行うとともに、Si(Li)検出器を用いた内部転換電子の測定を通して、高精度な崩壊核データを決定している。また、半減期が数秒の崩壊 γ 線が報告されていない核種の同定を目指して、クローバー検出器と組み合わせて用いる検出器を開発するなど、検出器の高度化を図っている。収率が少ないことによる解析の不確定さを検証し、信頼度の高い核データ決定を目指している。一方、Ge検出器の近距離での測定、高バックグラウンド条件下、体積試料に含まれる微弱な環境中の放射能測定に対して、GEANT、PHITS等のモンテカルロ計算を併用して、検出効率の簡便な決定法や適切な解析法の開発に取り組んでいる。

【キーワード】

崩壊核データ、不安定核、核分裂生成物、重元素、加速器、研究用原子炉、オンライン同位体分離装置(ISOL)、Ge検出器、クローバー検出器、シンチレーション検出器、 α, β, γ 、内部転換電子、ピーク効率、全効率、モンテカルロシミュレーション、GEANT4、PHIT、核構造、核異性体、環境放射能、体積試料、低レベル放射能、コインシデンスサムの補正、

【主な研究と内容】

(A) 核分裂生成物の崩壊核データ測定

質量数150近傍の領域は、球形から回転楕円体へと変形する遷移領域であり、その崩壊データは、崩壊熱評価としても、また、核構造上も興味深い領域である。特に長い寿命を持つ核異性体の存在は中性子束密度の高い環境では(n, γ)反応を引き起こし、核分裂生成物の収率に影響する。また、長寿命の核異性体は、核構造の研究にも重要である。 γ 線測定および内部転換電子の測定によって核異性体を探索するとともに、遷移の多重極度、スピン・パリティなどの性質を決定し、詳細な崩壊核データを決定する。

(B) 重元素の崩壊核データ測定

アクチノイド元素の中には、長寿命核廃棄物として今後の処理・処分の課題となっているものや、重元素合成過程の中で重要な役割を果たしているものがある。この領域は研究対象とする核種を得ることが難しいために、ほとんど研究が進んでいない。それらを解明するには、信頼できる核反応や核構造の核データを取得することが必要である。重元素を対象として取り扱える原子力研究開発機構のタンデム加速器施設で、Am や Bk、さらに原子番号の大きい Lr などを対象に、 α 線の崩壊核分光や核分裂片の測定を行い核構造及び核分裂収率の測定に取り組む。

(C) 低収率短半減期核種の γ 線放出率決定における問題点の検証

核構造を議論する場合には、 γ 線放出率、励起準位からの γ 遷移確率(分岐比)および励起準位への β 遷移強度が重要である。上述したような収率の小さい短半減期核種の場合は、検出効率を上げるために線源と検出器の立体角を大きくする必要があり、 γ - γ 同時計数関係の決定とそれに基づいて補正した γ 線放出率が重要である。崩壊図式が十分詳しく決められない場合に、崩壊図式の未成度がコインシデンスサム補正に与える影響について検討する必要がある。また、高速データ収集系の高計数率条件下でのパイルアップの問題などを検討する。

(D) モンテカルロシミュレーションを併用した検出器の検出効率決定法の研究

γ 線と物質の相互作用の確率に基づくモンテカルロ計算を行い、より効率的な実験体系の考案、解析方法の妥当性の検証、適当な放射線源が存在しない場合など実験が不可能な領域の補完手法としてモンテカルロシミュレーションを併用する方法に取り組む。

2020 年度の研究・教育の概要

【核分裂生成物の崩壊核データ測定】

質量数 150 以上の半減期が短い中性子過剰核の崩壊核データは ^{235}U の核分裂収率が小さいため詳しく調べられていない。京大原子炉に附置したオンライン同位体分離装置(KUR-ISOL)は、目的とする核種を高強度で分離することができる数少ない装置である。昨年度、崩壊図式の作成に向けて、 $^{153,154}\text{Pr}$ を測定した。今年度は、 ^{153}Pr については、さらに統計量を増やす測定を行うとともに、高速データ収集系で核異性体の探索を行った。さらに収率の小さい ^{154}Pr について、S/N を向上させるために、クローバー検出器の貫通孔に取り付ける β - γ 同時計数測定用の β 線検出器を開発した。貫通孔は極めて狭い(15mm)ため、 β 線検出器はプラスチックシンチレーターと MPPC モジュール(浜松ホトニクス製)を使用した。2本の半円柱シンチレーターで線源搬送用のマイラーテープを挟む構造とした。 ^{154}Eu を用いたオフライン測定及び崩壊図式が良く決められている核分裂生成物(^{94}Rb 、 $^{94,95}\text{Sr}$ 、 ^{94}Y 、 ^{146}La)をオンラインで測定した結果、 β 線に対する効率はおよそ $20\% \times 2$ 本であり、 β - γ 同時計数スペクトル中には原子炉室内のバックグラウンドである $^{40}\text{Ar}(n,\gamma)^{41}\text{Ar}$ の 1294keV の崩壊 γ 線と Ge の中性子捕獲 γ 線が見られなかったことから、 β 線検出器が有効に機能したことが判った。 ^{154}Pr については、過去の実験に対して数十倍の統計精度が得られた。

^{153}Pr については、25個の励起準位と72本の γ 線を含む3436keVまでの崩壊図式を決定した。191.7keVの励起準位の半減期を、1.1(1)nsと決定した。この値は、過去の文献値を指示する結果となった。50ns程度と予想されていた50keVの励起準位の半減期は、本データ収集系の測定限界(30ns程度)以下であることがわかった。今後、別の方法で測定する必要がある。 ^{154}Pr については、18個の励起準位と43本の γ 線を含む2940keVまでの励起準位を決定した。いずれも過去の

報告値よりも詳細な崩壊図式である。この測定をもとにさらに収率が 1/10 程度で崩壊 γ 線の報告のない ^{155}Pr について予備測定を行った。現状では、その γ 線は同定できていないが、その検出に向けて β 線検出器の改良および測定モードの設定等を検討中である。

【崩壊図式の未完成度がコインシデンスサム補正に与える影響の評価】

上記で述べたような収率の小さい短半減期核種の準位様式を決定し核構造を議論する場合には、特に、 $\log-ft$ 値を決定するための β 分岐比は核準位での γ 遷移強度の収支から決めるため、 γ - γ 同時計数関係と、それに基づいて補正した γ 線放出率が重要である。それには詳細な準位図式がわかっていることが前提であるが、収率が小さいために、測定できない γ 線や確認できない励起準位があり、詳細な準位図式を決定すること自体が困難なため、実験結果に基づいたコインシデンスサムの補正は行えない。そこで、質量数が同程度の核種であり、かつその複雑な崩壊図式がよく決まっている $^{152,154}\text{Eu}$ を用いて、その測定スペクトルに対して「 γ 線放出率 \times 検出効率」という指標を用いて、検出される γ 線の下限值を設定してコインシデンスサム補正を行い、測定から得られる γ 線放出率が評価値とどの程度一致するかを調べた。その結果、統計量が一番大きい γ 線に足して1%までの γ 線を崩壊図式に組み込んでコインシデンスサムを補正すると、5%の精度で一致することがわかった。実際には核種の崩壊図式に依存するが、収率が小さく不完全な準位図式であっても、補正前の「 γ 線相対強度 \times 検出効率」を、 γ 線放出率の不確定さを見積もる評価の指標とできると考えている。

【多 γ 線放出核種の密着測定から Ge 検出器の検出効率を決定する際の、モンテカルロシミュレーションの結晶幾何条件の最適化に関する考察】

線源と Ge 検出器が近い位置での検出効率の決定には、多 γ 線放出核種はコインシデンスサムの補正が必要になるため、通常は、単色 γ 線源を測定する。しかしながら、p 型 Ge 検出器は年数と共に、特に低エネルギーで検出効率が小さくなることが知られており、多くの研究グループにとって、高額な単色線源を複数回購入することは困難であり、また、市販されている解析プログラムも高価である。 ^{152}Eu や ^{133}Ba は標準線源として容易に入手でき、半減期も長い長期にわたって使用可能であるが、コインシデンスサムの補正が必須である。そこで、近距離での ^{133}Ba 、 ^{152}Eu の測定に、モンテカルロシミュレーション (GEANT4) を併用して、検出器の幾何学条件である結晶の表面及び側面の不感層を調整することによって検出効率を決定する簡便な方法を検討した。

近距離での測定結果に対して、コインシデンスサムの補正後の効率がエネルギーと共に滑らかになるように、不感層の値とモンテカルロ計算を繰り返した。相対効率 35%および 40%の Ge 検出器を用い、特に、結晶側面の不感層による検出効率の依存性は、簡単な数式で表せることを見だし、それを用いると幾何学条件を容易に設定できることが判った。

【その他】

以前に取り組んでいたクローバー検出器と結晶サイズの異なる 2 台の Ge 検出器とを組み合わせた γ 線の直線偏光度測定(γ 線ポラリメーター)の性能について、標準線源を用いたオフライン測定から得られた結果を発表した。

【本年度の研究発表の概要】

	国内会議発表	国際会議発表	国際会議予稿	学術論文
教員	0	0	0	1
学生	1	0	0	0

本年度の卒業論文・修士論文・博士論文のタイトル

【卒業論文】

- ・ モンテカルロシミュレーションを用いた Ge 検出器の検出効率決定のための結晶ジオメトリの最適化に関する研究
- ・ 崩壊図式の未完成度がコインシデンスサム効果の補正に与える影響の評価に関する研究

【修士論文】

- ・ 短半減期核分裂生成物の崩壊図式作成のための貫通孔型クローバー検出器用 β 線検出器の開発－ ^{154}Pr の崩壊－
- ・ 核異性体寿命測定に着目した中性子過剰核 ^{153}Pr の崩壊に関する研究