

機関番号：15401

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21740185

研究課題名（和文） 変形した中性子過剰希土類核に予想される核構造変化のサブナノ秒寿命測定による解明

研究課題名（英文） Investigation of nuclear structure change expected for neutron-rich deformed nuclei by means of lifetime measurements in sub-nanosecond region

研究代表者

小島 康明 (KOJIMA YASUAKI)

広島大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：80314730

研究成果の概要（和文）：

LaBr₃および薄いプラスチックシンチレータを用いた寿命測定系を開発した。この時間分解能は100keV程度のγ線に対しておよそ600psであり、ナノ秒からサブナノ秒の寿命測定に適用できる。京都大学オンライン同位体分離器と組み合わせた実験を行い、本測定法で得られた⁹³Srおよび¹⁴⁸Ceの励起準位寿命は、評価値と一致することを確認した。さらに、¹⁴⁸Prの励起準位寿命の測定を行い、98.2keV準位の寿命が8.5(5)nsであることを初めて明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

We have developed a spectrometer consisting of a LaBr₃ and a thin plastic scintillator, aiming for use to measure level lifetimes. The spectrometer showed a good time resolution of 600ps for γ rays with energies around 100keV. This means that the spectrometer is sufficiently capable of measuring lifetimes in a time range down to sub-nanosecond. Level lifetimes observed for mass-separated ⁹³Sr and ¹⁴⁸Ce agreed with the well-evaluated previous values. The lifetime of 8.5(5)ns for the 98.2keV level in ¹⁴⁸Pr was successfully obtained for the first time.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：応用原子核物理学

科研費の分科・細目：物理学，素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：実験核物理，寿命測定，遅延同時計数，ランタンプロマイドシンチレータ

1. 研究開始当初の背景

ウランの核分裂で生成される質量数150近傍の中性子過剰核は、球形核から変形核への遷移領域に当たるため、核物理学上、興味深い研究対象である。そのため、多くの実験がなされているが、未だに十分に解明されたとは言えない。例えば、申請者らのグループが測定したβ線最大エネルギーから2中性子分

離エネルギーを評価したところ、¹⁴⁷⁻¹⁵⁰Laで評価値が実験値からずれていることが分かった。これらの評価値は系統性などの物理モデルに基づいた値であるため、そこからのずれは既存の核モデルでは考慮されていない現象の存在を強く示唆している。この核構造変化が具体的に何であるかを見いだすことは、核物理学に新たな展開を引き起こすことに

つながる可能性を秘めている。

2. 研究の目的

原子核構造を詳しく調べるには γ 線分光が適し、特に励起準位の寿命測定が必要である。なぜなら、準位寿命から、核構造を包括的に反映している換算転移確率（または核行列）を実験的に決めることができるからである。そこで本研究は、

- (1) 励起準位寿命測定系の開発
- (2) 質量数 150 近傍の中性子過剰核の励起準位寿命

を行うことを目的とした。(1)の寿命測定は、 β 崩壊する核種の測定に適している β - γ 遅延同時計数法で行うが、 γ 線測定器としては、最近開発されたばかりの LaBr_3 シンチレーション検出器を用いる。この測定器のエネルギー分解能は、シンチレータの中で最良であるため、複雑な γ 線スペクトルが予想される核分裂生成物の測定に適する。また、時間特性（出力波形の減衰時間）も16nsと短く、ナノ秒以下の領域での寿命測定を行えると考えられる。

3. 研究の方法

研究は、測定装置の開発と、核分裂生成物に対するオンライン計測の2段階に分けて行った。以下に各実験の手法を順番に述べる。

(1) LaBr_3 への印加電圧の決定

本研究で使用した LaBr_3 測定器は、キャンベラ社の製品であり、1.5インチ×1.5インチの結晶を持つ。この測定器への印加電圧のメーカ提供値は600-800Vであったため、その範囲内での最適な印加電圧を

- ① エネルギー分解能
- ② パルス波高

の二つの観点から検討した。このための測定には、 ^{152}Eu 、 ^{60}Co 、 ^{241}Am 等の標準 γ 線源を使用した。

(2) 測定系の時間分解能の測定

寿命測定は β - γ 遅延同時計数法で行う。 β 線測定器としてはプラスチックシンチレータ(pilot-U, 1mm厚)を高速タイミング用の光電子増倍管に接続した物を使用した。 γ 線測定器は、上で述べた LaBr_3 である。

計測には通常のNIMモジュールを使用した。すなわち、各測定器からのアノード信号をコンスタントフラクションディスクリミネータ(CFD)に接続し、タイミング信号を取り出した。それを時間波高変換器(TAC)に入力し(β 線をスタート側、 γ 線をストップ側)、その出力をマルチチャンネルアナライザーでデジタル化し、リスト形式でデータ収集した。CFDの遅延ケーブルの長さは、プラスチックシンチレータに対しては25cm、 LaBr_3 に

対しては3mとした。これは各測定器からのアノードパルスの立ち下がり時間の約80%に相当する。測定系全体の時間較正は、時間校正器を用いて行った。その精度はおよそ20psである。

時間分解能は、即発時間スペクトルから求めるが、その測定には ^{60}Co および ^{134}Cs の β 線源を使用した。 ^{60}Co は極めて単純な崩壊パターンを示すことで知られる。すなわち、2506keV(寿命0.43ps)準位に β 崩壊した後、1173および1332keVの γ 線を放出して基底状態に遷移する。このときに経由する1333-keV準位の寿命も1.0psと極めて短いので、即発スペクトルを得るのに適している。一方、 ^{134}Cs は ^{134}Ba に β 崩壊した後、数本の γ 線を放出して基底状態に遷移する。このうち、1634keV準位は112psのやや長い寿命を持つが、予想される時間分解能(数百ps)に比べればかなり短い。さらに、この準位への β 遷移強度は2.5%であることから、この寿命の影響は無視できると考えられる。この2核種の測定から、500-1300keVの γ 線に対する時間分解能を実測した。

より低エネルギー(100-500keV)での時間分解能を測定するために、 ^{93}Rb および ^{148}Ce を用いた実験を行った。これらの核種はウランの核分裂生成物を質量分離して得た。質量分離については、(4)で詳細に述べる。

さらに、100keV以下での時間分解能を見積もるために、X線コンバータ法を利用した。これはコンバータ(金属片など)を γ 線源近くに置くことで、 γ 線が金属を励起し、その後X線が放出されることを利用した手法である。コンバータとして、酸化テルビウム、酸化イッテルビウム、タングステンおよび鉛を使用した。

(3) 測定系の安定性の測定

シンチレーション検出器の発光量には温度依存性があり、また、計測モジュールも室温によって出力が変化することが知られている。本研究で行うオンライン実験((4)および(5)で述べる)では、数十時間の長時間測定を行うことになるため、測定系全体の安定性を把握しておくことは重要である。そこで、最も良い時間分解能を示した ^{60}Co の1332keV γ 線の即発時間スペクトルを2時間ごとに長時間測定し、時間特性の安定性を

- ① 時間分解能(半値幅)
- ② 即発ピークの重心位置

の観点から調べた。室温との相関を調べるために、測定器周辺の室温も計測した。

(4) 既知の寿命を持つ核種を用いての寿命測定

(1)~(3)で開発した測定系を、京都大学原子炉実験所の実験用原子炉に付置さ

れたオンライン同位体分離器 (KUR-ISOL) に接続し, ^{93}Sr および ^{148}Ce の励起準位の寿命測定を行った. ^{93}Sr の 213keV 準位は 6.6(4)ns, ^{148}Ce の 159keV 準位は 1.46(9)ns の既知の寿命を持つ. この実験は, 本測定系を用いて系統誤差無しに寿命測定を行えることを実証することが目的である.

^{93}Sr および ^{148}Ce の親核種である ^{93}Rb および ^{148}La は, ^{235}U の核分裂生成物を質量分離することで得た. 質量分離された不安定核は, テープ装置を用いて周期的に測定器前に輸送した. 不純物がないことを確認するため, ならびに LaBr_3 のエネルギー分解能を補い, 興味ある γ 遷移のみを取り出すために, Ge 検出器でも同時に計測した. 実験時の様子を図 1 に示す.

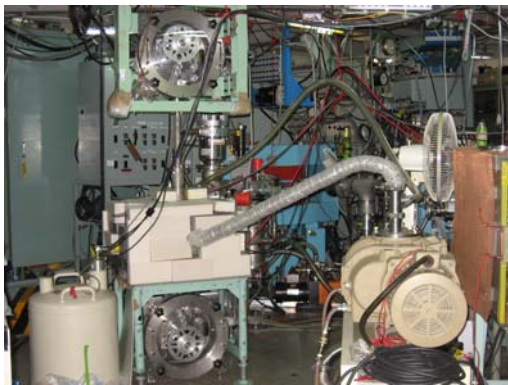


図 1 KUR-ISOL での寿命測定のセットアップ写真.

(5) ^{148}Pr の励起準位寿命測定

KUR-ISOL で ^{148}Pr の励起準位の寿命測定を行った. これまでこの核種に対しては寿命測定が行われていない. 得られるデータは, 質量数 150 近傍の中性子過剰核の核構造を調べる上で, 貴重なデータとなる. 収量が少ないため, 約 50 時間の連続測定を行った.

4. 研究成果

前節で述べた (1) ~ (5) に対する結果を以下に述べる.

(1) LaBr_3 への印加電圧の決定

図 2 に印加電圧 800V での LaBr_3 のエネルギー分解能を示す. 662keV での分解能は 2.4% であった. 他の電圧でも同様な実験を行ったが, 分解能の変化は観測されなかった. 一方, 測定器のアノード端子からの出力波形は, 印加電圧に依存し大きく変化した. よく知られているように, 印加電圧が低いと波高は小さくなるが, 本測定器に 600-700V の印加電圧をかけた場合, 後段のタイミングモジュール

のディスクリレベルを超えられないほど低かった. このため, 印加電圧は 800V にすることとした.

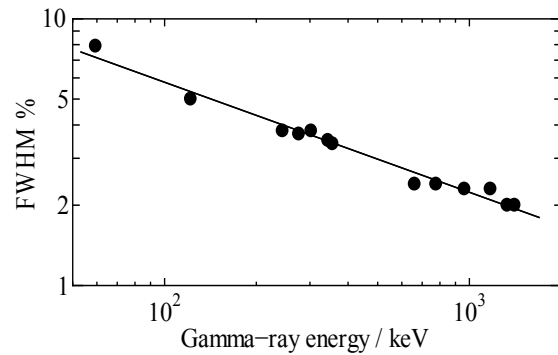


図 2 LaBr_3 測定器の γ 線に対するエネルギー分解能.

(2) 測定系の時間分解能の測定

CFD のウォーク調整などを十分に行い, 最良の時間分解能を得られる条件で得た典型的な即発時間スペクトルを図 3 の挿入図に示す. このピークの半値幅を時間分解能の指標として, γ 線エネルギーとの関係を示したものが図 3 である. 100~1300keV まで滑らかなエネルギー依存性を示していることが分かる. 98keV での時間分解能は 601(7)ps, 1332keV では 375(6)ps である. これは BaF_2 シンチレータを使用したときの時間分解能には劣るが, Ge 検出器と比べると一桁程度優れる. 寿命を崩壊曲線の傾きから求める場合, 一般に, 時間分解能の 1/3 程度の寿命まで決定できると言われている. このことから, 本測定装置をサブナノ秒領域での寿命測定に適用できることが分かった.

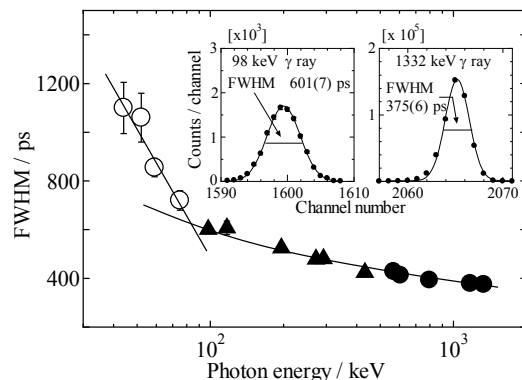


図 3 時間分解能の γ 線エネルギー依存性. 黒丸は標準線源, 三角は質量分離した核分裂生成物, 白丸は X 線を用いて得たものである. また, 挿入図は典型的な時間スペクトルである.

また、図3は100keV以下で時間分解能が急激に悪化することを示しているが、これはこの領域の測定をX線を用いて行った影響が現れていると考えている。つまり、X線は軌道電子の遷移に伴い放出されるが、原子軌道の寿命はナノ秒程度であるため、即発ピークが広がりを持っているためだと思われる。図3に示した100keV以下のプロット点は時間分解能の上限値と解釈できる。

(3) 測定系の安定性の測定

図4に、室温、時間分解能および即発ピークの重心位置の時間変化を示す。この実験を行った120時間のほとんどの時間帯で室温は $24.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$ であった。このときの時間分解能の変動の最大値は $\pm 15\text{ps}$ 、重心位置の変動は $\pm 30\text{ps}$ だった。この値は、時間分解能 385ps に比べて十分に小さい。よって、室温の変動が 1°C 程度であれば、測定系の安定性は十分に優れ、測定への影響は無いと判断した。

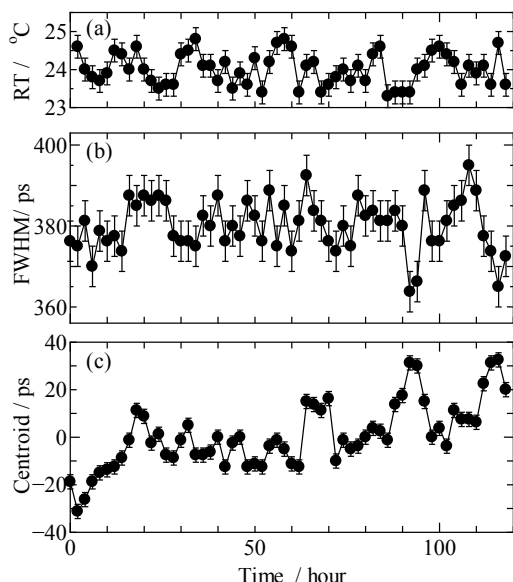


図4 (a) 室温, (b) ^{60}Co の 1332keV γ 線の即発ピークの時間分解能, (c) その重心位置の変動。

(4) 既知の寿命を持つ核種を用いての寿命測定

図5および6に得られた時間スペクトルを示す。この時間スペクトルを得るにあたり、 LaBr_3 測定器ゲートのみでゲートをかけた。両スペクトルともスロープが明瞭に見える。この傾きを指数関数でフィッティングすることにより、 ^{148}Ce の 158keV 準位の寿命を $1.49(8)\text{ns}$ 、 ^{93}Sr の 213keV 準位の寿命を $6.48(10)\text{ns}$ と決めた。これらの値は評価値と一致している。このことから、本測定器は寿

命決定に使えることを確認できた。

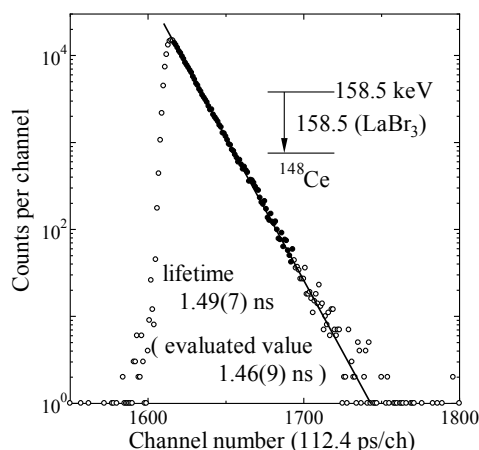


図5 ^{148}Ce の 159keV 準位の崩壊曲線。

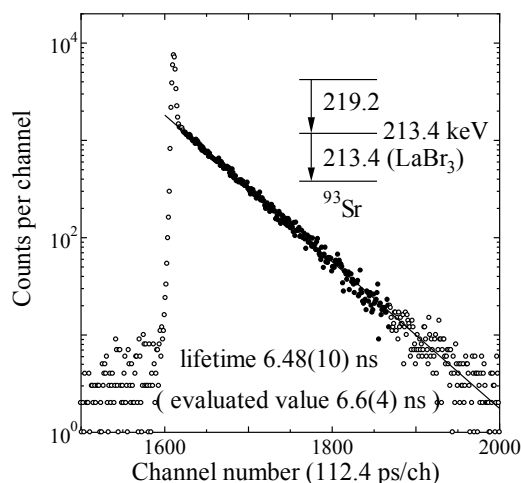


図6 ^{93}Sr の 213keV 準位の崩壊曲線。

(5) ^{148}Pr の励起準位寿命測定

98keV の励起準位のみ長い(サブナノ秒以上)の寿命が観測された。図7にその崩壊曲線を示す。これは LaBr_3 測定器で 98.2keV γ 線を、Ge 検出器で 98.0keV γ 線にゲートをかけて得られたものである。スロープのフィッティングから、寿命 $8.56(67)\text{ns}$ が得られた。同様に、Ge 検出器で 191.6keV γ 線にゲートをかけたスペクトルからも寿命 $8.46(74)\text{ns}$ を得た。両者は良く一致している。これらの平均値 $8.5(5)\text{ns}$ を 98.2keV 準位の寿命とした。これは実験的に初めて得られた値である。

98.2keV は基底状態に直接遷移する多重極度 E2 の γ 線があるだけなので、これから換算転移確率 $B(E2)$ が $222(13)\text{W.u.}$ と得られた。この値はこの周辺核の $B(E2)$ とオーダーとしては一致しており、集団運動に伴う遷移だと

考えられる。なお、この準位のスピンの実験的に決まっていないため、これ以上の詳細な議論は、さらに γ 線分光実験が必要である。

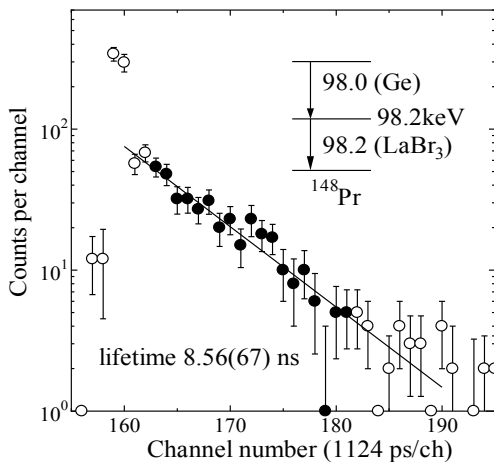


図7 ^{148}Pr の 98keV 準位の崩壊曲線.

以上を簡潔にまとめると、以下のようになる。本研究は LaBr_3 および薄いプラスチックシンチレータを用いた寿命測定系を開発した。100keV の γ 線に対する時間分解能は約600psであり、サブナノ秒の寿命測定に十分適用できる性能を持つことを明らかにした。京大原子炉のオンライン同位体分離器を用いた寿命測定実験を行い、 ^{148}Pr の 98keV 準位寿命を初めて測定することに成功した。

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2件)

1. M. Asai, K. Tsukada, H. Haba, Y. Ishii, T. Ichikawa, A. Toyoshima, T. Ishii, Y. Nagame, I. Nishinaka, Y. Kojima and K. Sueki, Neutron one-quasiparticle states in $^{251}\text{Fm}_{151}$ populated via the alpha decay of ^{255}No , Physical Review C 83, 査読あり 2011, 014315(1-12).
2. Y. Kojima and K. Shizuma, Property Measurements on a LaBr_3 Scintillator as a Fast γ -ray Detector, KURRI Progress Report, 査読無し, 2010, 124-124. 巻なし.

[学会発表] (計2件)

1. 日隈聖也, 小島康明, 遠藤暁, 静間清. コバルト 60 ガンマ線照射による Sr-87 の核異性体励起, 日本原子力学会中国・四国

支部 第4回研究発表会, 2010年9月24日, 広島商工会議所(広島市)

2. 村高礼典, 小島康明, 遠藤暁, 静間清, $^{115\text{m}}\text{In}$ の光共鳴励起を利用した ^{60}Co γ 線照射室の線量分布, 日本原子力学会中国・四国支部 第3回研究発表会, 2009年9月11日, 中国電力(株) 島根支社(松江市)

[その他]

ホームページ等

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/qa/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小島 康明 (KOJIMA YASUAKI)
 広島大学・大学院工学研究院・助教
 研究者番号: 80314730

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: