

LaBr₃ シンチレータを用いた励起準位の寿命測定

Lifetime measurement of excited levels using LaBr₃ scintillator

名大院工¹、名大アイソトープ総合センター²

大野臣悟¹、小島康明²、柴田理尋²

S. Ohno¹, Y. Kojima², and M. Shibata²

¹Graduate School of Engineering, Nagoya University

²Radioisotope Research Center, Nagoya University

1.はじめに

原子核の励起準位の寿命を測定する方法として β - γ 遅延同時計数法がある。この方法では、測定したい励起準位に崩壊する際に放出される β 線と、そこから放出される γ 線をそれぞれ測定し、検出器の応答時間の差より寿命測定を行う。

LaBr₃ 検出器は数百 keV の γ 線を測定する際、エネルギー分解能はシンチレータでは最もよく (¹³⁷Cs の 662 keV で約 3%)、シンチレーション光の減衰時間も 16 ns と短いため広く使用されている。しかし、低エネルギーの γ 線(もしくは X 線)を測定した場合の寿命測定に使用された例は少ない。最近、¹⁵²Sm の 121 keV ($T_{1/2}=1.4$ ns)の準位について 40 keV の KX 線を測定し、時間特性を求めた例[1]と ¹⁰⁹Pd の 291.4 keV ($T_{1/2}=136.5$ ps)の準位について 178 keV の γ 線を測定した例[2]が報告されている。当研究室の先行研究においても、¹²⁵Te の X 線と γ 線 35keV の励起準位の半減期を 1.453(11) ns と定めた例[3]がある。LaBr₃ 検出器で 100 keV 以下の γ 線を測定し、サブナノ秒の半減期を測定した例はほとんどない。そこで、この領域での寿命測定を行うことを本研究での目的とした。本研究では 80 keV の γ 線を放出し、その準位の半減期が 0.454(40) ns [4]という準位をもつ ¹³¹Xe(¹³¹I の β -崩壊の娘核種)を対象とし、80、341 及び 364 keV の 3 つの励起準位の寿命測定を行った。

2.実験

2.1. 測定核種

本実験では ¹³¹Xe の前述した 3 つの励起準位の半減期を測定した。評価値は 80 keV の準位について 0.454 (40) ns [4]である。これは 2 つの報告値 0.496(21) ns [5]と 0.416(20) ns [6]の加重平均であるが、これら 2 つは不確かさを超えて異なっている。341 及び 364 keV の準位の報告値も同様に異なっている[6-8]。過去の研究では、プラスチックシンチレータで γ 線を測定し、半減期を決めている。プラスチックシンチレータではエネルギー分解能が悪く、 γ 線のエネルギー弁別が正しく行えていない可能性があるため、これがばらつきの一因と考えられる。

本実験では ¹³¹I の β -崩壊に伴う β 線と γ 線を、それぞれプラスチックシンチレータと LaBr₃ 検出器で測定し、その時間差を測定した。さらに、 γ 線弁別用の Ge 検出器を追加した β - γ - γ 遅延同時計数法によってエネルギー弁別性を向上させて寿命測定を行った。

2.2. 測定系

プラスチックシンチレータ(PilotU, 1 mm³, 50.8 mm^φ, 光電子増倍管 PMT: 浜松ホトニクス 2431-51)、LaBr₃ 検出器(1.5 inch³, 1.5 inch^φ, PMT: 浜松ホトニクス R9420-100)、38%同軸型 Ge 検出器の 3 台の検出器を三角形に配置し、中心に ¹³¹I 線源を設置した。線源と検出器の距離はそれぞれ 1 cm、2 cm、2 cm とした。LaBr₃ 検出器とプラスチックシンチレータの信号をそれぞれコンスタントフラクシオンディスクリミネーター (CFD、C Canberra 2126)で波形処理し、時間差波高変換器(TAC、ORTEC 567)を用いて時間分布曲線を得た。それを Ge 検出器を含む 3 つのエネルギー信号とともに、タイムスタンプ付きのリストデータとして収集した。この時 TAC のスタート信号をプラスチックシンチレータ、ストップ信号を LaBr₃ 検出器とした。プラスチックシンチレータ側の CFD は 30 cm の遅延ケーブルを、LaBr₃ 側には 130 cm のものを接続して、即時曲線の時間分解能が最適となるようワークを調節した。¹³⁷Cs の内部転換電子を用いて、プラスチックシンチレータのエネルギー較正を行った。

2.3. 時間特性

前述の調整後 ¹³⁴Cs を測定し、コンプトン連続部分にゲートをかけ、即時曲線の時間分解能と重心位置のエネルギー依存性を Fig.1 のように得た。

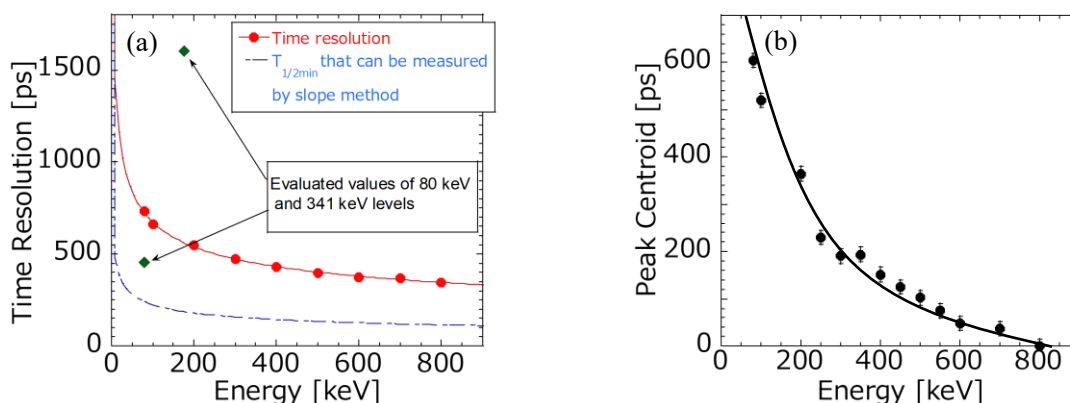


Fig.1 (a) Energy dependence of time resolution and (b) energy dependence of peak centroid.

The peak centroids are the values relative to that for 800 keV.

スロープ法では経験的に時間分解能の 1/3 までの半減期を求められるので、測定対象の半減期に対して十分な時間分解能であることを確認した。重心位置のエネルギー依存性が滑らかであることも確認した。

2.4. ¹³¹I の測定

テフロンシートに ¹³¹I($T_{1/2}=8.02$ d)の液体線源(NaI 水溶液)を垂らし、乾燥後に、ポリエチレン袋に封入したものを ¹³¹I 線源とした。測定開始時に 50 kBq となるように調製し、8 日ごとに新たな線源に交換して約 30 日間測定した。LaBr₃ 検出器及び Ge 検出器で測定したエネルギースペクトルを Fig.2 に示す。

2.5. ^{131}Xe の励起準位の寿命測定

2.5.1. 80 keV の準位

^{131}I の崩壊図式の一部を Fig.3 に示す。
80 keV の準位から放出される 80 keV の γ 線を LaBr_3 検出器で測定し、この準位とカスケード関係にある 284 keV の γ 線を Ge 検出器で、その準位へ遷移する β 線をプラスチックシンチレータで測定し、 β - γ - γ 遅延同時計数を行った。その結果、Fig.4 の黒線の時間分布曲線が得られた。黒丸の部分(2070~2160 ch)を最小二乗法でフィッティングし、半減期を 0.468(15) ns と決定した。

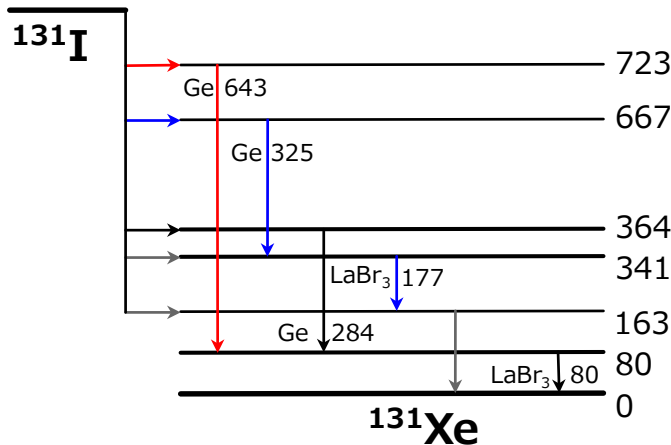


Fig.3 A part of decay scheme of ^{131}I .

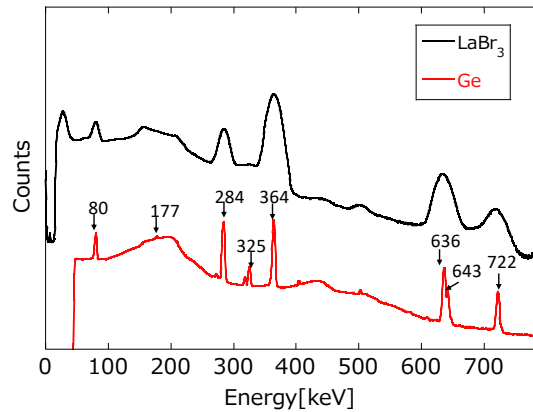


Fig.2 Energy spectra of ^{131}I measured with LaBr_3 (black) and Ge detectors (red).

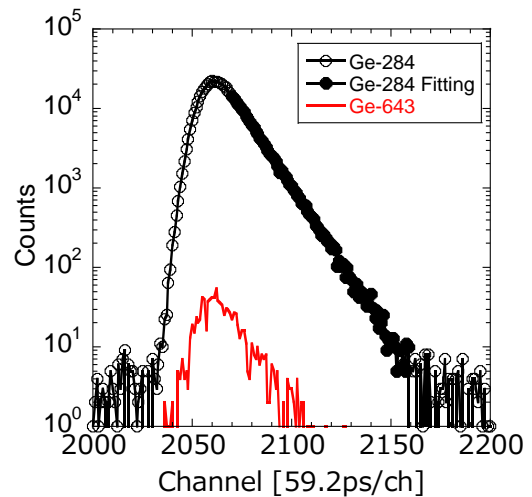


Fig.4 Time distribution curves of the 80keV level gated by 284keV γ -ray (black) and 643keV γ -ray (red).

2.5.2. 364 keV の準位

この準位の半減期を求めるにあたり、重心法を利用した。3重遅延同時計数法によって得られる時間分布曲線の重心位置は、経由する2つの準位の半減期の和を反映している。そこで、Fig.3のように80 keV の γ 線を LaBr_3 検出器で、それとカスケード関係にある 643 keV の γ 線を Ge 検出器で測定し、723 keV の準位に遷移する β 線をプラスチックシンチレータで測定した。なお、723 keV の準位には寿命がないと報告されている[9]。これで得た時間分布曲線(Fig.4の赤線)と2.5.1節で得た時間分布曲線(Fig.4の黒線)の2つの時間分布曲線の重心位置の差をとると、80 keV の準位の半減期は相殺され、364 keV の準位の半減期が得られる。この重心位置の差より、この準位の半減期を 50ps 程度と決定した。

2.5.3. 341 keV の準位

この準位の半減期を測定するには、この準位から放出される 177 keV の γ 線を LaBr₃ 検出器で測定する必要がある。しかし Fig.2 に示すように、LaBr₃ 検出器のエネルギースペクトル上には 177 keV の γ 線ピークは確認できなかった。そこで 177 keV の γ 線とカスケード関係にある 325 keV の γ 線(Fig.3 参照)に Ge 検出器でゲートをかかけた LaBr₃ のスペクトルを得たところ、Fig.5 の赤線のように 177 keV の γ 線ピークが確認できた。これをもとに適切に LaBr₃ のゲート範囲を定め、 β - γ - γ 遅延同時計数法によって Fig.6 の時間分布曲線を得て、スロープ法より半減期 2.12(6) ns と決定した。

3.結果と考察

得られた実験データとこれまでの報告値及び評価値を比較したものを Fig.7 に示す。

Fig.7 (a)より、本研究で得られた 80 keV の準位の半減期は 2 つの報告値の間で、評価値を支持する結果となった。1962 年と 1981 年の測定では、プラスチックシンチレータ 2 台を用いて寿命測定をしている。この結果に対して今回の測定はエネルギー弁別が優れた条件で測定を行っているので、その点で信頼性の高い結果を得ることができた。

Fig.7 (b)より、364 keV の準位について、不確かさは大きいですが、その範囲でこれまでの報告値、評価値と矛盾のない結果(50 ps 程度)を得た。

Fig.7 (c)より、341 keV の準位については 1973 年の結果を支持する結果となった。1973 年の測定は 177 keV の γ 線を Ge 検出器を用いて測定しており、1981 年の測定はプラスチックシンチレータを用いている。エネルギー分解能が高い Ge 検出器での測定の結果を支持していることから、エネルギーの弁別が重要であると考えられる。

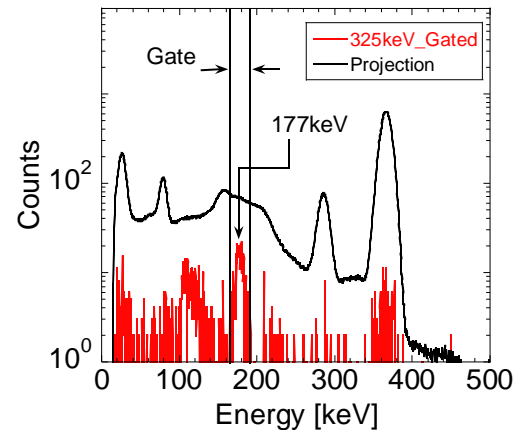


Fig.5 Energy spectra of LaBr₃. Black spectrum is the projection with the plastic scintillator. Red spectrum is additionally gated by 325 keV γ -ray measured with Ge detector.

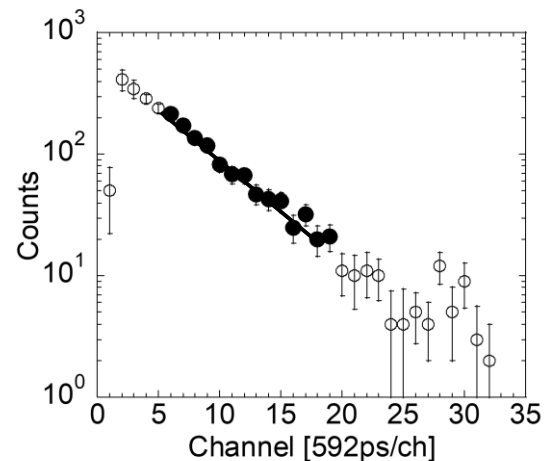


Fig.6 Time distribution curve of the 341 keV level.

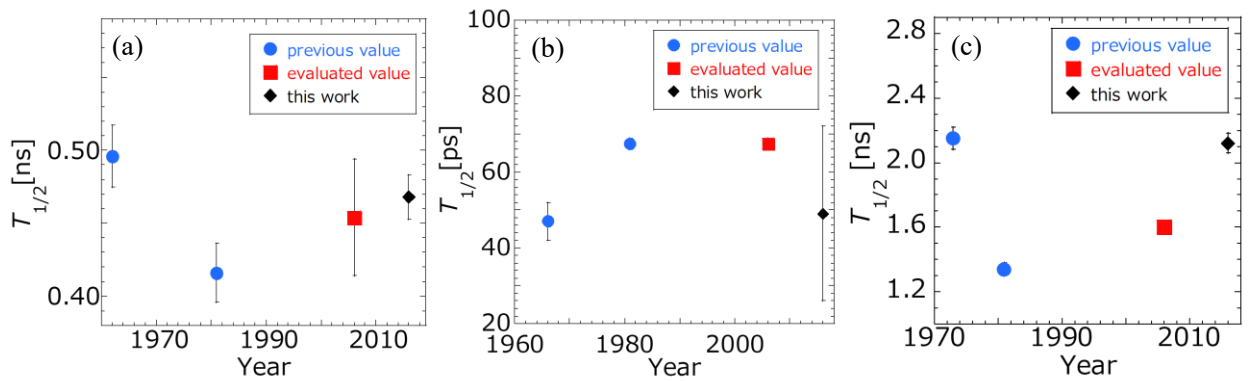


Fig.7 Comparison of previous value, evaluated value and this work about (a) the 80 keV level, (b) the 364 keV level and (c) the 341 keV level.

4.まとめ

本実験において、 ^{131}Xe についてエネルギーを弁別し、80 keV 及び 341 keV の準位について信頼性の高い半減期を決定した。80 keV 及び 364 keV の準位について、LaBr₃ 検出器で 80 keV の γ 線を測定することでサブナノ秒(0.468(15) ns)の半減期をスロープ法で、50 ps 程度の半減期を重心法で決定することができた。LaBr₃ 検出器を用いて 100 keV 以下の低エネルギー領域の γ 線を測定することで、サブナノ秒の半減期を測定可能であることがわかった。

参考文献

- [1] J. -M. Régis et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A823, 72 (2016).
- [2] B. Bucher et al., Phys. Rev. C92, 064312 (2015).
- [3] H. Kamada et al., KURRI-EKR-18 (2016).
- [4] National Nuclear Data Center, ENSDF Web site.
- [5] R. S. Weaver, Can. J. Phys. 40, 1684 (1962).
- [6] S. C. Pancholi et al., Phys. Rev. C 24, 2337 (1981).
- [7] S. Gorodetzky et al., Nucl. Phys. 85, 529 (1966).
- [8] H. Engel et al., Z. Phys. 261, 343 (1973).
- [9] D. C. Palmer et al., J. Phys. G: Nucl. Phys. Vol.4, 1143 (1978).