

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2019

課題番号：16K13723

研究課題名（和文）偏光を制御した可干渉性ガンマ線パルスの生成

研究課題名（英文）Generation of polarized gamma-ray pulses using radioactive gamma-ray sources

研究代表者

瀬戸 誠（SETO, Makoto）

京都大学・複合原子力科学研究所・教授

研究者番号：40243109

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000 円

研究成果の概要（和文）：原子核準位を分裂させた放射性同位体ガンマ線源から原子核位置における磁場などを利用した偏光ガンマ線を生成し、その偏光状態・波形制御などの測定を実現することを目的とし、外部からの磁場などのパラメータと放射されるガンマ線の相関測定を可能とする高速MCS（Multi-Channel Scaler）システムを用いた時間分解スペクトル測定系を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

放射性同位体から放出されるカスケードガンマ線の相関時間スペクトルを測定後にソフトウェアによる処理で構成することが可能になった。特に、このシステムではマルチ入力でリストモードでの記録が可能であるため、複雑な多モードの線についてもそのエネルギーを同定することでそれらの相関を同時に測定することが可能となる。さらに、それらに加えて外部からの磁場・電流印加、トランスデューサーの速度変化などの情報との相関も測定するといった自由度の高いガンマ線領域の量子光学測定が可能となったものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：To realize the measurement of the polarization and the waveform of a gamma ray generated from a radioactive isotope gamma ray source with split nuclear levels due to a magnetic field at the nuclear position, we have constructed a time-resolved spectrum measurement system using a MCS (multi-channel scaler) system that enables correlation measurement between the external parameters and the emitted gamma rays.

研究分野：量子ビーム

キーワード：可干渉ガンマ線 相関時間スペクトル 偏光制御

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

放射性同位体から放出される γ 線はメスバウアー効果などを利用した物性研究に利用されているが、 γ 線放射・吸収の基礎過程に注目した研究も行われてきた。 γ 線は可視光と比較して、高空間分解能、光学的厚みのある物体に対する高い透過性、波長の短さかに起因した高集積度などといった性質を有しており、量子情報や通信といった分野での展開も期待されている。特にメスバウアー効果によって吸収・放出される無反跳 γ 線においては $E/E \sim 10^{-13}$ にも及ぶ高いエネルギー分解能を有する場合があることから、その利用は極めて有望視されている。実際、近年の X 線・ガンマ線の基礎過程に関する研究の進展は著しく、米国の LCLS や日本の SACLA などの硬 X 線領域のレーザーの実現、放射光やガンマ線を用いた電磁誘導透過現象についての実験研究 [1, 2]、コヒーレントなガンマ線の波形制御についての研究 [3]などが行われている。

国内においても、これまで放射光核共鳴非弾性散乱法の開発研究 [4, 5]や放射光核共鳴吸収分光法の開発研究[6]などといった原子核の共鳴現象を用いた開発研究が行われてきた。また、研究用原子炉および電子線形加速器を用いたメスバウアー分光用ガンマ線源の開発とそれを用いた原子核共鳴励起の基礎および応用に関する研究も多数実施されてきた。このような研究の進展および経緯のもとに、原子核共鳴励起過程の有するポテンシャルをさらに有効に活用して研究を進展させていくためには、高度なガンマ線生成法およびその検出法に関する研究を推進していく必要があるものと考えられた。

2. 研究の目的

磁場等を利用した超微細相互作用により、原子核準位を分裂させたガンマ線源から偏光を制御したガンマ線の生成を行い、位置制御を行った同種の共鳴原子核を含んだ共鳴透過体を透過させることにより、透過ガンマ線の偏光、寿命（遅延時間）、波形（幅）の制御およびコヒーレントパルス列生成といったガンマ線の生成に関する実験研究およびその測定方法の確立を行うことを目的とし、パルス波形制御のフィールドとなる原子核のカスケード崩壊を利用した時間スペクトル測定系の開発研究を行った。

3. 研究の方法

本研究で目指す放射性同位体からの γ 線パルスの生成には、カスケード崩壊する線源から放出される γ 線を利用することができる。これは図 1 に示すように、原子核の第 2 励起状態などの高励起状態から第 1 励起状態などの低い励起状態へ遷移する際に放出される γ 線をトリガーとし、その後基底状態などへ遷移する際に放出される γ 線を用いるものである。このとき、原子核位置に存在する磁場などにより準位の分裂を起している場合には、偏光した γ 線を取り出すことが可能となる。

さらに、本研究では目的とする測定を実現するために、高速 MCS (Multi-Channel Scaler) システムと放射線同位体線源を用いた相関時間スペクトル測定系の構築を実施した (図 2)。カスケード崩壊する γ 線源から放出される相関した γ 線を用いて崩壊過程の時間スペクトルを測定する場合、通常は検出器の信号に対して、SCA (Single-Channel Analyzer) 等の波高弁別可能なハードウェアを用いたコインシデンスにより、目的とするエネルギーの γ 線を取り出す。ところが、検出器には相関する γ 線を含む様々な γ 線が検出されているにもかかわらず、このようなハードウェアによる測定方法では測定前に設定しておいたエネルギー範囲の γ 線しか計数できない。そのため、試料に対する外部磁場の印加やエネルギー変調をかけた場合の応答を測定する際の自由度が大幅に低下する。そこで、検出された γ 線のエネルギーと検出時刻とを共に記録しておき、測定後にソフトウェア的に時間スペクトルを再構成できる測定方法の開発に取り組んだ。

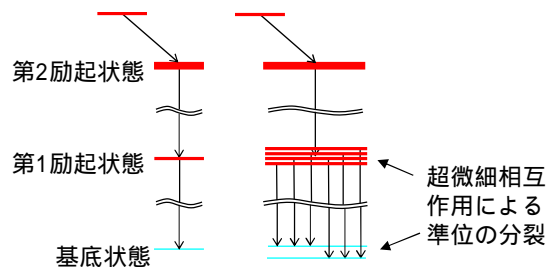


図 1. 原子核の崩壊とエネルギー準位。分裂した各準位間の遷移は固有の偏光状態を有している。

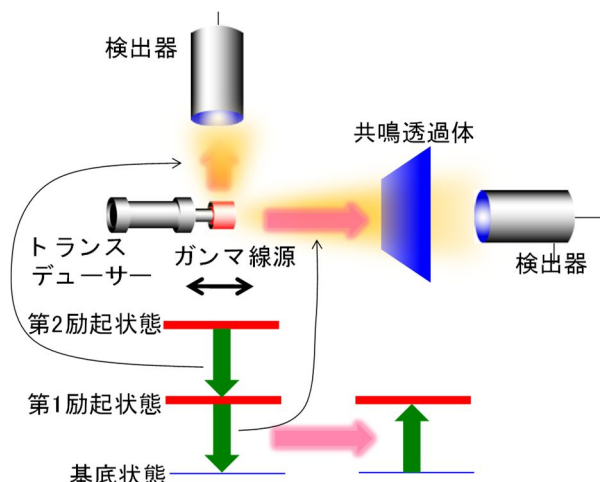


図 2. 放射線同位体線源を用いた相関時間スペクトル測定概念図。

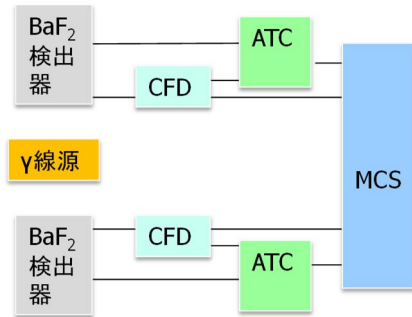


図 3. MCS、ATC および CFD (Constant Fraction Discriminator) から構成される測定系。

絶対時刻とエネルギーの情報を同時に記録するシステムとして、波高に対応した時間遅れの信号を出す ATC (Amplitude to Time Converter) [7] と、100 ps の時間分解能で信号が来た絶対時刻を記録できる高速 MCS を組み合わせた回路系を構築した (図 3)。さらに、保存したデータからそれぞれの検出器で検出された任意のエネルギーおよび時刻を抽出することのできるソフトウェアの開発を実施した。

これらを用いてカスケード崩壊線測定を行うため、図 4 に示すように ^{181}Ta の励起状態を ^{181}Hf から生成した。 ^{181}Hf については、Hf 金属箔を京都大学複合原子力科学研究所の研究用原子炉 (KUR) により中性子放射を行うことで $^{180}\text{Hf} (n, \gamma) ^{181}\text{Hf}$ 反応により生成した。なお、照射した Hf 金属箔には ^{179}Hf など含まれており、 $^{179}\text{Hf} (n, \gamma) ^{180m}\text{Hf}$ 反応により ^{180m}Hf も生成されるが、その半減期は 5.5 h であるので、その寄与が十分小さくなってから測定を実施した。

線計測には高速時間応答測定が可能な BaF_2 シンチレータ検出器を使用した。

4. 研究成果

^{181}Ta から放出される線のうち、時間スペクトル測定に必要な線のエネルギーは 133 keV と 482 keV であるが、MCA (Multi-Channel Analyzer) を用いたエネルギースペクトルを図 5 に示す。今回の測定系では、エネルギー情報については ATC により時間情報として、線のタイミング信号と共に多チャンネルの入力が可能な MCS ヘリストモードで記録する。この ATC からの時間情報を使って MCS により取得したリストモードデータから再構成したエネルギースペクトルを図 6 に示す。このエネルギー情報を基にして CFD からのデータで得られた線タイミング信号をそれぞれの準位からの線として同定することで、線の相関時間スペクトルを構成したものを図 7 に示す。この相関時間スペクトルに対して、指数関数型の崩壊時間依存性を仮定して最小二乗法によるフィットを行ったところ、半減期として 10.6 ± 0.3 ns が得られた。これは、これまでに報告されている 482 keV 準位の半減期 10.8 ± 0.1 ns [8] と誤差範囲で一致していることが確認された。

これまで、カスケード崩壊を有する放射性同位体に対する従来のタイムスペクトル測定法では、ハードウェアを用いたエネルギー弁別が必要であり、エネルギー窓内の線の情報について制限されていたが、本開発研究によって検出器に入射したすべての線の時間とエネルギー

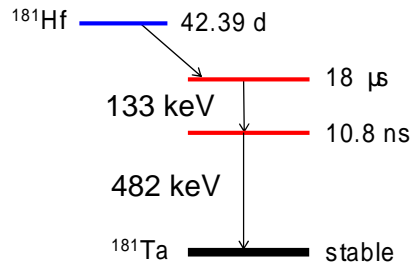


図 4. ^{181}Hf の崩壊図 [8]。ただし、ここでは本研究で必要とする γ 線を放出する準位のみを表示している。

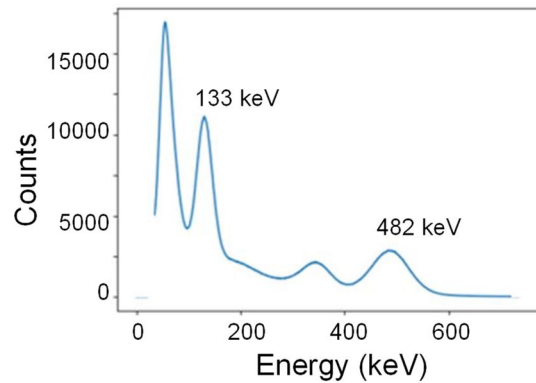


図 5. BaF_2 検出器を用いて測定したエネルギースペクトル。

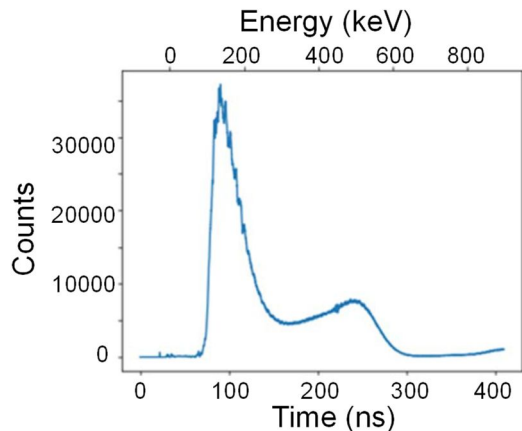


図 6. MCS により取得したリストモードデータから ATC の時間情報を使って再構成したエネルギースペクトル。

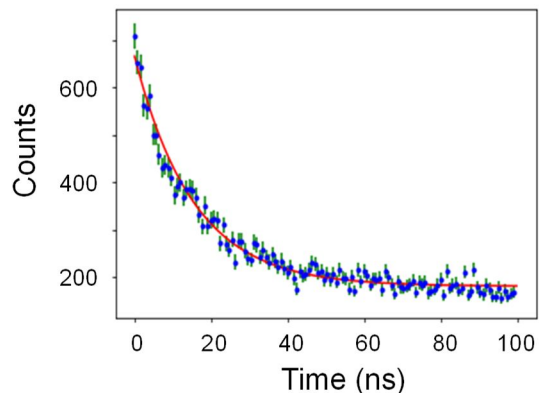


図 7. MCS により取得したリストモードデータから ATC のエネルギー情報をもとにして選別した CFD データから求めた 482 keV 線の時間スペクトル。

ギーの情報を記録し、後からソフトウェアによる処理でタイムスペクトルやエネルギースペクトルといった情報を構成することが可能になった。特に、このシステムではマルチ入力でリストモードでの記録が可能であるため、現状ではシステムとしてのエネルギー分解能が未だ充分ではないものの観測できる線は、2種類に限定されることなく複雑な多モードの線についてもそのエネルギーを同定することでそれらの相関を同時に測定することが可能となる。さらに、それらに加えて外部からの磁場・電流印加、トランスデューサーの速度変化などの情報との相関も測定するといった自由度の高い測定が可能である。

さらに、偏光制御などのための多層膜ガンマ線源についても、真空蒸着装置により作製した多層膜の研究用原子炉による中性子照射により ^{161}Dy , ^{169}Tm などといった核種を選択しての線源生成が可能であることを確認できており、これらに対して外部磁場制御や、ピエゾ駆動による位置制御などにより、偏光状態やパルス波形の制御が実現できる。これらについては、現在研究が進行中であり、装置系の開発によるエネルギー・時間分解能の向上をはかることで、さらに研究を推進していくものとする。

<引用文献>

- R. Coussement *et al.*, Phys. Rev. Lett., **89** (2002) 107601.
- R. Röhlsberger *et al.*, Nature, **482** (2012) 19.
- F. Vagizov *et al.*, Nature, **508** (2014) 80.
- M. Seto *et al.*, Phys. Rev. Lett., **74** (1995) 3828.
- M. Seto *et al.*, Phys. Rev. Lett., **91** (2003) 185505.
- M. Seto *et al.*, Phys. Rev. Lett., **102** (2009) 217602.
- T. Masuda *et al.*, Rev. Sci. Instrum., **88** (2017) 063105.
- R. B. Firestone, "Table of Isotopes Eighth Edition: 1999 Update"(1999).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tajima Hiroyuki, Kitao Shinji, Masuda Ryo, Kobayashi Yasuhiro, Masuda Takahiko, Yoshimura Koji, Seto Makoto	4. 巻 58
2. 論文標題 Development of a measurement system enabling the reconstruction of γ -ray time spectra by simultaneous recording of energy and time information	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 108001 ~ 108001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/1347-4065/ab3f19	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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 瀬戸 誠
2. 発表標題 放射光メスパワー分光法の基本原理の復習とこの1年の発展
3. 学会等名 第6回先進的放射光メスパワー分光研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 瀬戸 誠
2. 発表標題 放射光メスパワー分光法の基本原理の復習とこの1年の発展
3. 学会等名 第5回先進的放射光メスパワー分光研究会（招待講演）
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

核放射物理学研究室
http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/NRP/research/research_index.htm
核放射物理学研究室
http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/NRP/research/research_index.htm

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