

令和 2 年 6 月 22 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02818

研究課題名(和文)次世代ガンマ線源のための帯域可変分光器

研究課題名(英文)Variable-bandwidth monochromators for next-generation gamma-ray sources

研究代表者

羽島 良一(Hajima, Ryoichi)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 東海量子ビーム応用研究センター・上席研究員(定常)

研究者番号：30218432

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：MeVエネルギー領域の線で利用可能かつアクセプタンス(ビーム発散の受入角度)を制御できる分光結晶として、モザイク結晶、櫛歯結晶を提案し、レーザー・コンプトン散乱線施設にて、それぞれの結晶を用いた線回折実験を行った。櫛歯結晶では、櫛歯の枚数を選ぶことで、レーザー・コンプトン散乱線の発散角、スペクトル密度に適合した回折分光素子が実現できることが示唆された。また、これら結晶が、レーザー・コンプトン散乱線の輝度を診断する装置としても機能することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レーザー・コンプトン散乱は、エネルギー可変、偏極、準単色の線を発生できることから、原子核構造の解明から核物質の非破壊検知まで、広くその利用が進められている。レーザー・コンプトン散乱線は、発散角度とエネルギーに相関があるため、コリメータで準単色化できるが、単色性には限界があった。本研究では、特別な工夫を加えた結晶を用いることで、レーザー・コンプトン散乱線の分光が実用的に可能であることを示した。今後進められる、高輝度線源の開発と利用に有用な技術となる。

研究成果の概要(英文)：Laser Compton scattered gamma-ray sources, which produce energy-tunable, quasi-monoenergetic, polarized high-energy photons, are considered as a unique radiation source applicable for fundamental science and industrial applications. Gamma-ray optics device is one of the keys to the future development of high-brightness laser Compton sources. In this study, we experimentally demonstrated the diffraction of a gamma-ray beam from laser Compton scattering by mosaic and comb-like crystals both made of silicon. Since the acceptance of the comb-like crystal can be controlled by the number of combs, it will be a suitable diffraction device for laser Compton scattered gamma-ray sources, which have a divergence larger than the acceptance of the perfect crystal. We also revealed that the large-acceptance crystals can be utilized as a diagnostic tool for the measurement of gamma-ray photon distribution in the energy-angle phase space.

研究分野：加速器科学

キーワード：ガンマ線 レーザーコンプトン散乱 回折

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

光速近くまで加速した電子とレーザーの衝突散乱による高エネルギー光子ビームの発生は、レーザー・コンプトン散乱 (Laser Compton Scattering; LCS) と呼ばれる。MeV から GeV エネルギー領域の  $\gamma$  線では、LCS が唯一のエネルギー可変かつ準単色の光源であり、米国 Duke 大学の HI $\gamma$ S、兵庫県立大学の NewSUBARU、分子科学研究所の UVSOR、SPring-8 の LEPS などの施設にて、原子核物理を中心とした研究に供されている。近年、レーザーおよび電子加速器技術の進展を受けて、光源の輝度と強度を飛躍的に高めた次世代 LCS- $\gamma$  線源が提案されており、ルーマニアに ELI-NP (Extreme Light Infrastructure Nuclear Physics Pillar) が建設中である。

LCS- $\gamma$  線では、 $\gamma$  線の散乱角度とエネルギーに相関があるので、 $\gamma$  線光路上にコリメータを挿入して準単色の  $\gamma$  線が得られる。しかしながら、LCS に寄与する電子、レーザーともに完全な単色でないこと、また、LCS 発生点において電子、レーザーを収束する時にビームが非平行となるために、コリメータで得られる単色性 (エネルギー幅) には限界がある。

X 線と同様に結晶格子による  $\gamma$  線の回折および分光ができれば、LCS- $\gamma$  線の利用を高度化できる。また、LCS- $\gamma$  線の単位立体角当たりのスペクトル密度を測定することで、その輝度を求めることができる。しかし、ブラッグ条件から明らかなように、高エネルギーの  $\gamma$  線は X 線に比べて回折角度が小さく、アクセプタンス (ビーム発散の受入角度) も小さい。そのため、MeV 領域の  $\gamma$  線回折分光器は、Ge 検出器の実用化とともに研究の対象ではなくなり、現在はラウエ・ランジュバン研究所 (ILL) の原子炉ガンマ線源における二結晶分光器 (GAMS) を残すのみである。

われわれは、次世代  $\gamma$  線源におけるビーム発散角に適合した大きなアクセプタンスを持った回折結晶としてモザイク結晶を提案し、大強度 Co-60 ガンマ線源を利用した実験によりその有用性を明らかにした。しかしながら、アクセプタンス (モザイク度) は結晶中の不純物濃度で決まるので、これを精密に制御することは難しいといった問題があった。

## 2. 研究の目的

本研究では、LCS- $\gamma$  線の回折および分光に利用可能なモザイク結晶と同様の大きなアクセプタンスを持ち、さらにアクセプタンスの大きさを制御できる MeV 領域の回折素子として櫛歯型結晶を提案し、設計、製作を行う。LCS- $\gamma$  線の利用が可能な兵庫県立大学の NewSUBARU にて、製作した装置を用いた  $\gamma$  線回折分光実験を行い、その性能を評価することを目的とした。

## 3. 研究の方法

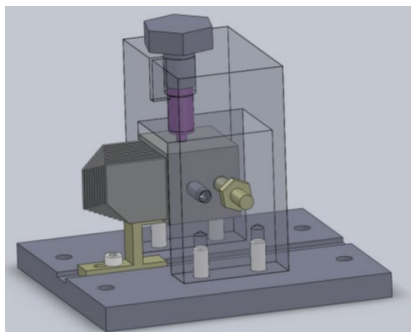


図 1: 櫛歯結晶とホルダーの構成

厚さ 20 mm のモザイク結晶と同様のアクセプタンスをもつ櫛歯結晶として、櫛歯の厚み=2mm、櫛歯の枚数=10 枚の形状を選び、その固有振動を有限要素法シミュレーションで求め、 piezo 素子で振動励起が可能であることを確認した。また、シリコン結晶の製作に先立ち、アルミ製のモックアップ結晶による振動試験を行い、目的とする振動が得られることを確認した。図 1 に製作した櫛歯結晶とホルダーの構成を示す。結晶の上面に piezo 素子を押し付け振動を励起する。各

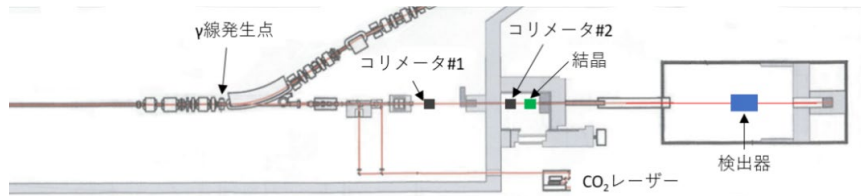


図 2: NewSUBARU の LCS- $\gamma$  線ビームライン

櫛歯の切り欠き部の大きさが異なるのは、レーザー振動計で個々の櫛歯の振動を測定するためであるが、固有振動に対する各櫛歯の振幅を変えることで、モザイク結晶と同様にアクセプタンスを拡大する効果も含めた設計である。

モザイク結晶、櫛歯結晶を用いた  $\gamma$  線回折実験を NewSUBARU のビームライン (BL-01) にて行った。実験配置を図 2 に示す。蓄積リングを周回する電子と  $\text{CO}_2$  レーザーの衝突散乱で  $\gamma$  線を発生し、コリメータでビーム径 (散乱角) を制限した後、結晶に入射した。結晶で回折した  $\gamma$  線を Ge 半導体検出器 ( $\phi 64 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ ) で測定した。電子エネルギー 974 MeV、レーザー波長  $10.6 \mu\text{m}$  であり、散乱角 180 度 (後方散乱) で発生する  $\gamma$  線のエネルギーは 1.7 MeV となる。コリメータ ( $\phi 2 \text{ mm}$ ) を通過した  $\gamma$  線のフラックスとエネルギースペクトルは、回折実験の直前に  $\text{LaBr}_3$  シンチレータ ( $\phi 89 \text{ mm} \times 102 \text{ mm}$ ) を使って測定した。

#### 4. 研究成果

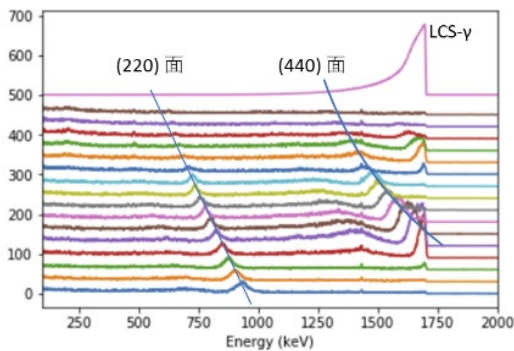
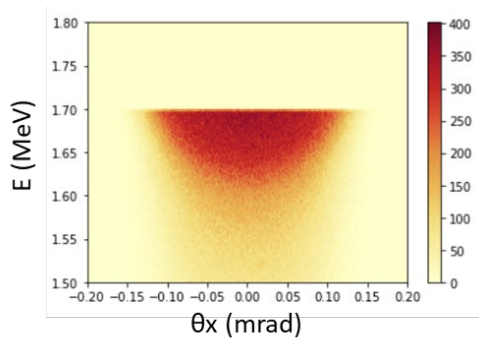


図 3: モザイク結晶による回折。結晶を回転させた時のスペクトルを重ねたもの。再上部は、LCS- $\gamma$  線のスペクトル。



図

図 4: Geant4 で得られた  $\gamma$  線の散乱角度とエネルギーの分布

シリコンモザイク結晶 (厚さ 20 mm) による回折  $\gamma$  線の測定結果を図 3 に示す。コリメータで切り出した 1.7 MeV の LCS- $\gamma$  線が (440) 面で回折するように結晶を設置した後、結晶を回転しながら Ge 検出器で回折  $\gamma$  線の測定を行った結果である。(440) 面による回折  $\gamma$  線 (1.3-1.7 MeV) の他に、低エネルギーのバックグラウンド (制動放射などによる) が (220) 面で回折している様子も観測された。LCS- $\gamma$  線の結晶による回折実験は、世界初の成果である。

次に、実験で得られた回折データの妥当性を確認するため、モンテカルロ・シミュレーションコード Geant4 に LCS- $\gamma$  線を実装し、結晶位置での  $\gamma$  線の分布を求めた。図 4 に Geant4 で計算した LCS- $\gamma$  線の散乱角度とエネルギーの二次元分布を示す。LCS- $\gamma$  線の散乱角度とエネルギーは相関を持つはずであるが、ここでは、蓄積リングの水平方向エミッタンス (38 nm) で決まるエネルギー広がり が 支配的 となっており、角度とエネルギーに明確な相

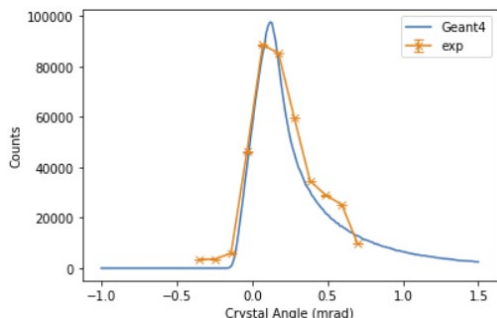


図 5: 回折  $\gamma$  線強度の実験値と計算値の比較  
(20 mm モザイク結晶)

動の有無にかかわらず同様の回折曲線が得られたことから、あらかじめ櫛歯ごとに微小な変位が存在したと考えられる。変位量は櫛歯先端で 20 nm 以下であるため、これを実測で検証することは不可能であるが、2 mm  $\times$  10 枚の櫛歯結晶にて厚さ 20 mm のモザイク結晶と同程度のアクセプタンスが得られたことから、櫛歯が非一様な変位を有しモザイク結晶と同等の効果が得られたと考えてよい。櫛歯結晶は、シリコン単結晶に櫛歯状の切込みを入れて製作したもので

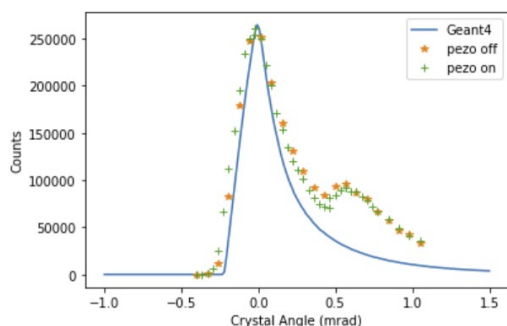


図 6: 回折  $\gamma$  線強度の実験値と計算値の比較  
(櫛歯結晶、ピエゾによる振動あり、なし)

単位時間当たりの光子数) を直接測定できる診断デバイスとして機能することは、今後、高輝度の LCS- $\gamma$  線源を開発する上で有用な知見である。

関は見られない。結晶を回転させたときの (440) 面での回折  $\gamma$  線強度について、Ge 検出器での測定値と Geant4 計算値を比較したものが図 5 である。測定値と計算値の比較から結晶アクセプタンスを評価することができ、ここでは約 0.5  $\mu$ rad となった。ただし、実験で用いた LaBr<sub>3</sub> シンチレータの検出効率の不定性に起因する誤差を含んでいる。

次に、櫛歯結晶を用いた同様の回折分光を行ったが、当初想定した櫛歯の振動による回折強度の変化は観測されなかった (図 6)。振

動の有無にかかわらず同様の回折曲線が得られたことから、あらかじめ櫛歯ごとに微小な変位が存在したと考えられる。変位量は櫛歯先端で 20 nm 以下であるため、これを実測で検証することは不可能であるが、2 mm  $\times$  10 枚の櫛歯結晶にて厚さ 20 mm のモザイク結晶と同程度のアクセプタンスが得られたことから、櫛歯が非一様な変位を有しモザイク結晶と同等の効果が得られたと考えてよい。櫛歯結晶は、シリコン単結晶に櫛歯状の切込みを入れて製作したものである。櫛歯の枚数を変えることは容易であり、透過力の強い  $\gamma$  線の回折に応用することで、アクセプタンスを制御した帯域可変分光器が実現できる。

なお、当初予期してなかった成果であるが、測定した回折分光データを角度、エネルギーの二次元平面に逆投影することで、 $\gamma$  線の角度、エネルギー分布 ( $\gamma$  線輝度と対応する) が求められることがわかった。モザイク結晶、櫛歯結晶が、LCS- $\gamma$  線の輝度 (単位面積、単位発散角、単位エネルギー幅、

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 羽島良一、早川岳人、静間俊行、沢村勝、永井良治、宮本修治、松葉俊哉	4. 巻 15
2. 論文標題 次世代ガンマ線源のための帯域可変ガンマ線分光器の開発	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 826-830
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 羽島良一、早川岳人、静間俊行、沢村勝、永井良治、宮本修治、松葉俊哉
2. 発表標題 次世代ガンマ線源のための帯域可変ガンマ線分光器の開発
3. 学会等名 第15回日本加速器学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryoichi Hajima
2. 発表標題 Accelerator-Based Gamma Sources Review and Perspectives
3. 学会等名 Nuclear Photonics 2018（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 羽島良一、早川岳人、静間俊行、宮本修治、松葉俊哉
2. 発表標題 レーザー・コンプトン散乱ガンマ線のモザイク結晶による回折実験
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 羽島良一
2. 発表標題 レーザー・コンプトン散乱ガンマ線、応用から基礎
3. 学会等名 ビーム物理研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 羽島良一
2. 発表標題 レーザー・コンプトン散乱によるガンマ線の発生と利用
3. 学会等名 QST 高崎サイエンスフェスタ 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 羽島良一、早川岳人、静間 俊行、沢村 勝、永井 良治、宮本 修治、松葉 俊哉
2. 発表標題 帯域可変ガンマ線分光器のための櫛歯結晶の設計と試作
3. 学会等名 日本原子力学会2018年春の年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 静間 俊行、Christopher Angell、羽島 良一、Bernhard Ludewgt、Brian Quiter、小泉 光生
2. 発表標題 共鳴吸収法を用いたPu-239の磁気双極子遷移強度の測定
3. 学会等名 日本原子力学会2018年春の年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryoichi Hajima
2. 発表標題 Implementation of a laser Compton scattered gamma source in Geant4
3. 学会等名 The 39th International Free Electron Laser Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	松葉 俊哉 (Matsuba Shunya)  (00635477)	公益財団法人高輝度光科学研究センター・光源基盤部門・研究員  (84502)	
研究分担者	宮本 修治 (Miyamoto Shuji)  (90135757)	兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所・特任教授  (24506)	
研究協力者	静間 俊行 (Shizuma Toshiyuki)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・量子ビーム科学部門・上席研究員  (82502)	
研究協力者	早川 岳人 (Hayakawa Takehito)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・量子ビーム科学部門・上席研究員  (82502)	