

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：82645

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18772

研究課題名（和文）精密光学測定との融合による超高速応答性をもったガンマ線検出方法の開拓

研究課題名（英文）Development of a novel ultra-fast gamma-ray detection method based on electro-optic effects

研究代表者

国分 紀秀（KOKUBUN, Motohide）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：50334248

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本提案ではフェムト秒オーダーに至る超高速応答性をもった革新的なガンマ線検出器の実現に向けた先駆的探索として、ガンマ線による内部電離を電気光学効果を介して屈折率の微小な変化として検出する原理実証実験を行った。大きな電気光学係数を持つ素材で製作した素子に反射防止コーティングと電極形成を施した素子を製作し、可視光帯域のプロープレーザーを通した状態で、光検出器において透過光レーザーの強度や偏光面などの時間変化を放射線と同時に検出する測定系を構築し、放射線検出の実証実験を実施することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ガンマ線と物質の反応を、電気光学効果を介した光学特性の変化として検出するアイデアは近年になって “Rad-Optics” として提唱され、原理的には極めて有望であるが、まだ海外でも原理実証段階にあるため本研究は先駆性の観点で学術的意義を有する。また将来的には陽電子断層法の画像分解能に劇的な向上をもたらす医療応用の観点からの社会的意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：In this research, a proof-of-concept experiment on a novel ultra fast gamma-ray detection method based on electro-optic effects has been conducted. A probe laser through a device of an electro-optic material is monitored to detect a small temporal change of its light yeild caused by inernal ionizatinos by gamma-ray photons.

研究分野：人工衛星を用いた高エネルギー宇宙物理学

キーワード：ガンマ線検出器 電気光学効果 陽電子断層法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ガンマ線は、素粒子・原子核実験や放射線物理学などの基礎科学において極めて普遍的で重要な測定プローブであり、同時に、陽電子断層法 (PET) に代表されるような医学的診断や非破壊検査など産業応用にも幅広く使われている。ガンマ線計測上の基本性能のうち、時間分解能の向上は、素粒子・原子核実験における粒子弁別性や運動量の精密計測に繋がり、PET においては放射線の奥行き方向の位置分解能の向上に直結する重要な性能である。しかし、シンチレーターや半導体を用いた従来の放射線計測技術では、検出原理自体が内包する時間ゆらぎによって性能限界が 10 ピコ秒程度に律速されたまま、さらなる性能向上が見込めるようなブレークスルーは長い間起きておらず、その打破には検出原理そのものを含めた開発アプローチが必要となっている。一方でガンマ線光子が物質と反応した直後のプロセスは、一次電子の電離とそれに続く非弾性の電子-電子散乱による二次の電荷キャリアの生成であり、こうした過程自体はフェムト秒オーダーで完結している。従って、後段のプロセスであるキャリアの熱化やフォノン生成を待たずに、初期過程の段階で検出することが超高速検出の実現に繋がる鍵である。ガンマ線と物質の反応を、電気光学効果を介した光学特性の変化として検出するアイディアは、近年になって Rad-Optics として国際的にも提唱されており原理的には有望視されているが、まだ海外でも原理実証段階にある。

2. 研究の目的

本研究の最終目的は、フェムト秒オーダーに至る超高速応答性をもった革新的なガンマ線検出器を実現し、ガンマ線計測を用いた基礎科学・応用分野においてブレークスルーをもたらすことである。本提案ではその先駆的探索として、ガンマ線と物質との相互作用で生じた電荷群によって内部に生成された局所的な電場変化を、電気光学効果を介した屈折率の変化として光学的に検出することで、ガンマ線帯域の計測を、フェムト秒オーダーの超短時間分解技術がすでに確立している可視光・赤外線帯域での計測へと転写することを目指した原理実証実験を行う。電気光学効果は、一般的には物質に対して電場をかけるとその強さに応じた複屈折率の変化を示す現象である。誘電体の等方性結晶においては電場に比例した変化となるため、一次の電気光学効果(ポッケルス効果)として知られ、高速光シャッターなどで応用されている。仮にガンマ線が電圧を印加された電気光学素子の内部で反応したとすると、生成された 2 次電子群によって内部電場が局所的に変化し、複屈折率も変動を示すことが予想される。そこで、あらかじめ偏光レーザーをプローブとして素子に入射させ、透過光をフォトダイオードなどの光検出器でモニターして、透過光の強度・位置・偏光などの変化を検出できる測定系を構築し、さらに放射線検出器との同時計数をとることで、ガンマ線との反応に対応した素子内部の複屈折率変動を検出することを試みる。

3. 研究の方法

本研究は原理実証を目指すものであり、測定系の構築を行うにあたっては、電気光学素子の選定に始まり、測定に用いる光学系や放射線測定系との同期性に至るまでを新規に設計して進める必要がある。そこで以下の各項目について個別の検討を実施し、必要に応じて測定系の再構築を行う前提で進めることとした。

(1) 電気光学素子の選定

実験の要となるのは、ガンマ線が反応したことを電気光学効果を介して検出する素子の素材である。この選定にあたって考慮すべき条件としては、以下のような項目が列挙され、全ての条件に対して最適となるものを選定する必要がある。電気光学係数が大きいこと。放射線から生成された一次電子が内部での電離過程によって生成する二次電子数はせいぜい 10^5 個のオーダーであり、これに応じて形成される局所電場の大きさも極めて小さなものである。従って複屈折率の変化を可能な限り大きくするためにも大きな電気光学係数を持った素材を選定する必要がある。ガンマ線に対する検出効率が大きいこと。原理実証段階では電離放射線や模擬用レーザーを用いることができるにせよ、最終的な目的がガンマ線の高速検出である以上、その反応断面積が小さすぎると実用化に向けた困難を生じる。従って選定する結晶の元素組成比と密度によって決まる有効原子番号がなるべく大きなものを選定する必要があり、この観点からは化合物半導体を用いるよりも、重元素を含む結晶のほうが有利となる。プローブ光の波長に対して透明な物質であること。プローブレーザーが素子を透過するために、その波長はバンドギャップエネルギーに対応する波長より長い必要がある。一方で複屈折率変化を感度良く検出する観点からは波長が短いほど高感度となるため、測定光学系や光検出素子の検出効率まで含めて最適な波長選択を行う。比抵抗が大きく高電圧を印加した際のリーク電流が少ないこと。電気光学効果によって生じる複屈折率の変化は、素子の電気光学係数と電場に依存するため、高い電圧を印加するほど変化率を大きくすることができるが、この際に素子内部にリーク電流が流れると、放射線によって生成される二次電子群の影響に対するノイズ成分として寄与してしまう。従って素子はなるべく絶縁性が高いことが望ましい。反射防止コーティングや電極蒸着の工程が可能であること。プローブレーザーの入出面にはその波長に応じた反射防止コーティングを施し、またそれと直交する面には電圧を印加するための電極を蒸着などによって形成する必要がある。こうした製造工程におけるパラメータが実績として確立していることが望ましい。その他。実

験系の構築にあたっては、上記以外にも価格・入手性・ハンドリング性・長期安定性などを考慮する必要がある。

(2) 測定方法

素子の複屈折率変化を検出するための光学系としては、下図に示すように、大別すると2つの方法が考えられる。一つ目の手法では、偏光レーザーを素子に入射し、表面反射光と素子内部で折り返された光の干渉パターンをスリットを介して部分的に光検出器で受光することで、屈折率変化が生じた場合に起きる干渉パターンの変化を光量として検出する。この方法の場合、光学系としての複雑度が高いものの、微小な屈折率変化に伴う干渉パターンの位置ずれが、取り出す光量に大きく反映されるため、特に放射線イベントを時間的に積分して計測する場合には大きな利点を持つ。もう一つの手法はより簡素な光学系で構成され、いわゆる直交ニコル法のように、素子の両側に偏光子を設置することで、複屈折率変化による偏光面の回転を光量として取り出す。コンパクトな光学系を構成できるため、最終的なガンマ線との同期計測などに向けたメリットがある。

本研究では、これらの手法をそれぞれ比較検討した上で最適化して採用し、さらに新たに放射線との同期計測部分を組み込むことで原理実証実験を行う。どちらの手法でも、原理実証実験としては一定時間積分した場合の強度や集光位置の変化を評価することから始めれば十分であるが、最終的にはガンマ線光子との反応ごとのイベントを検出することが目標であり、崩壊からの対消滅ガンマ線を用いた同時計数イベントの抽出によって、さらに高感度の測定を行うことも視野に入れる。

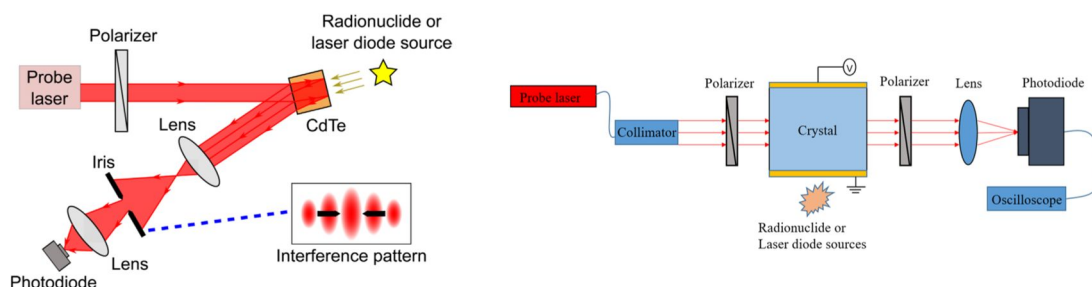


図 1 複屈折率変化を検出するための光学系の例 (左; Tao+2016, 右; Wang+2019 より)

4. 研究成果

本研究の結果、放射線を模擬した短波長レーザーの照射を用いた場合に、素子内部に生成される局所的な電場分布が電気光学効果を通じてプローブレーザーの変化として検出されることを確認し、原理実証を行うことができた。これを踏まえて、宇宙線粒子の透過と同期したイベント毎の検出も試みたが、現在のセットアップの感度範囲内では確認できなかった。そこで今後に向けてさらに高感度化を目指した測定系の設計を進めた。

(1) 電気光学素子の選定

本研究では候補物質として、テルル化カドミウム(CdTe)半導体、ビスマスシリコンオキシド($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$;BSO)などを比較検討し、BSOを採用することとした。この物質は $3(\text{pm}/\text{V})$ 程度の大きな電気光学定数を持ち、原子番号の大きなビスマスを多く含むためガンマ線に対する阻止能も高い。また絶縁体に近くバンドギャップエネルギーが $2.5\text{-}3\text{eV}$ 程度あるため高電圧を印加する観点でも、またプローブレーザーの波長選択可能帯域という意味でも有利である。また標準的な電気光学素子としても用いられていることから、反射防止コーティングや電極形成などの製造上も大きな困難がないと予想された。ただし、光学活性であることから透過時には偏光面の回転に注意が必要となるなどいくつか実験上の複雑度が高くなる要素がある。今回は光学軸に沿って 5mm 角にカットした結晶を用いて、下図に示すような素子を製作して使用した。プローブレーザーの入射/透過面には使用する波長帯 ($500\text{-}800\text{nm}$) に対する反射防止コーティングを施し、それと直交する面に電極を蒸着形成した上でワイヤーと導電性エポキシにて接続した状態で、各所が動かないようにジグ上にポッティング固定した。

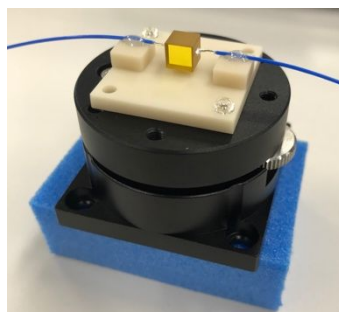


図 2 作成した BSO 素子の外観

(2) 測定系の構築と測定結果

プローブレーザーとしては波長 633nm の He-Ne レーザーおよび 600-800nm 範囲の半導体レーザー数種類を用い、光学系のコンフィグレーションとしては、二重の偏光素子で挟んだ直交ニコル系を始めとする複数のパターンにおいて、実際に放射線検出が可能であるかどうかを検証した。構築した光学系の一部を下図に示す。この状態で、まず十分に放射線強度が高い状態を模擬するため、素子に対して励起用の短波長レーザーを連続照射した場合に、透過光の検出光量に有意な変化が確認され、原理実証を行うことができた。さらにこの状態で、素子に印加する電圧を変化させて最も感度が高くなる最適値を確認した。

次に放射線との反応毎の検出を目指して、まずは宇宙線のような荷電粒子が素子内を通過する際に生じる、ガンマ線より大きな信号を同時計数法によって素子外部からトリガーできるように放射線検出部を測定系に追加した。素子の上部にプラスチックシンチレーターと光電子増倍管を設置し、その読み出し信号をオシロスコプのトリガーとして用いることで、透過光の微小な時間変化を測定したが、現状のセットアップの範囲内では有意な同期信号の確認にまでは至らなかった。測定系の感度を決めている主要なノイズ成分を個別に確認したところ、主にプローブレーザー自身による光電離信号が支配的であるという結果を得ることができた。これにより、今後さらなる高感度化を行うための指針としては、光電離信号成分を低減するために、プローブレーザーの波長と素子表面の反射防止コーティングを $1\mu\text{m}$ 以上の赤外線帯域用に変更すること、また、光検出器側の信号増幅・低雑音化を改良することでプローブレーザーの光量を可能な限り下げること、などの知見を得ることができ、今後の実用化を目指した開発に繋げることが出来た。



図 3 プローブレーザーおよび測定光学系

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|