《様式Ｂ》

研究テーマ「宇宙暗黒物質検出器高感度化のためのハイブリッド光検出器の開発」

研究責任者　所属機関名　東海国立大学機構名古屋大学
官職又は役職　准教授
氏　　名　風間慎吾　メールアドレス　kazama@isee.nagoya-u.ac.jp

共同研究者　所属機関名　東海国立大学機構名古屋大学
官職又は役職　特任助教
氏　　名　小林雅俊
所属機関名　浜松ホトニクス株式会社
官職又は役職　電子管事業部　第１製造部　第１開発グループ・主任部員
氏　　名　深澤　宏仁

（令和 4 年度募集）第 35 回　助成研究　完了報告書

上記様式記載後

１．実施内容および成果ならびに今後予想される効果の概要

本研究で提案したハイブリッド光検出器(PAD/PPAD)は、電子増幅部にシリコン半導体光検出器(MPPC)を用いるため、PMT より優れたエネルギー分解能（1 光子カウンティング)と時間分解能(～1 ナノ秒)を実現することが可能である。PMT とは異なり電子増倍部に複雑な電極が存在せず、二次電子の軌道長のばらつきがないため、光子が光電面に到達してからパルス信号となるまでの時間のバラツキは原理的に存在しない。その結果、大きな光電面を持つ検出器でも優れた時間分解能が期待できる。さらには、PMT と比べて非常に少ない部品数で製作することができるため、低価格で高性能な光検出器を量産することも可能となる。この様に、ハイブリッド光検出器は、超小型から大口径までの汎用・応用性の高い光検出器であり、環境分析(例: 湖沼の微生物・昆虫の生物発光のモニター)など、微少な光を広大な領域にわたって検出する必要のある分野において、既存の PMT に取って代わる将来の光検出器となることが期待できる。特に以下に述べる PPAD に関してはこれまでにない新しい概念に基づく光センサーであるため、浜松ホトニクス社で特許化を予定している。

また、以下に詳細を述べるように、これまでの研究で PAD/PPAD ともにそのプロトタイプの制作が完了した段階にある。今後本研究で開発した性能評価システム(低温・真空紫外光を用いたシステム)を用いて真空紫外光に対する光検出効率の性能評価を行い、既存の PMT と比較を行う。仮にその性能が PMT と同程度であれば、将来の暗黒物質探索実験において実用化するべく、量産を行うことが期待される。

２．実施内容および成果の説明

暗黒物質の存在は、宇宙の進化や天体観測により疑いがない事実と捉えられているが、その性質は現在も未知のままである。プランク衛星などの宇宙背景放射の観測結果によると、宇宙全体の物質のうち暗黒物質が 80%以上を占めることが判明しており、現在世界中の研究者が様々な手法でその正体の解明に取り組んでいる。

暗黒物質の有力な探索手法の一つに、直接探索と呼ばれる手法がある。暗黒物質が稀な確率で身の回りの物質と相互作用をした際に生成される光を捉える手法である。我々の研究グループでは、高い発光量を持つ希ガスのキセノン(-100°Cの液体キセノン)を標的に用い、世界最高感度での暗黒物質探索を推進してきた。しかしながら、その探索は容易ではない。なぜなら、暗黒物質との相互作用で生成される光は極めて微弱であるため、1 光子に対して高い検出感度を持つ光センサーを実現し、その検出を行う必要があるためである。また暗黒物質とキセノンの相互作用頻度は極めて稀であるため(年に一度あるかないか)、偽の暗黒物質信号となる放射性物質を極限まで低減する必要もある。

微弱な光を測定する光センサーとしてこれまで多くの実験で用いられてきたのが、光電子増倍管(PMT)である。PMT はキセノンの発光(波長 175 nm の真空紫外光)に対して高い量子効率(約 30%)を誇り、我々はこれまで浜松ホトニクスと共同で開発した真空紫外光に感度のある PMT を用いて、世界最高感度での暗黒物質探索を推進してきた。しかしその一方で、PMT の電子増幅部や陽極に含まれる放射性同位体(ウラン・トリウムなど)が、暗黒物質の発見感度を制限し始めていることも判明し、暗黒物質探索の確かな発見とその正体の解明のためには、PMT に代わる新たな極低放射能光検出器の開発が急務となっている。

本研究の目的は、この新しい光検出器として”PMT で培われた光電管の技術”と”シリコン半導体光検出器(MPPC)による電子増幅の技術”をハイブリッドに用いた新しい光検出器(ハイブリッド光検出器, 図 1)の開発を世界に先駆けて行い、その性能評価を行なった。特に本研究では図 1 に示すように、光電子を直接 MPPC で検出するセンサー(PAD)と光電子を高速蛍光体により UV 光に変換し、これを検出するセンサー(PPAD)の検討と開発を行なった。

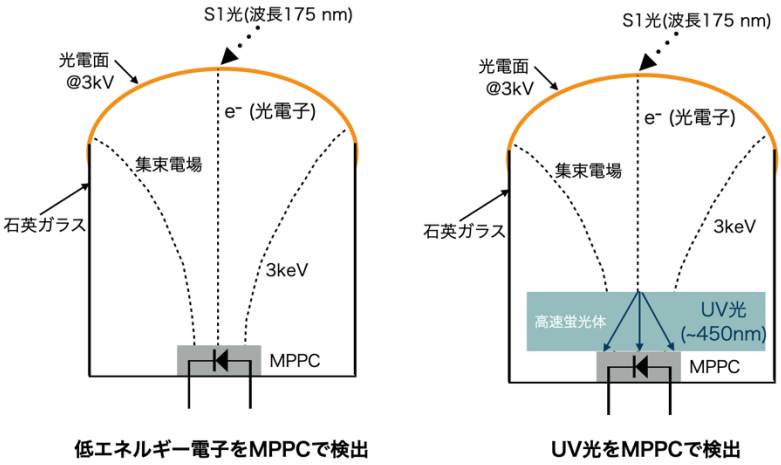

図 1: ハリブリッド光検出器の概略: (左) 直接低エネルギー電子を MPPC で検出するセンサー(PAD)。(右)電子が高速蛍光体と相互作用し、発生した UV 光を MPPC で検出するセンサー(PPAD)

PAD に関しては、以前の研究から光検出器効率の悪化は、光電子の MPPC への集束効率が悪いことに起因していることが判明しており、本研究では用いる MPPC のサイズを 3mm 角から 6mm 角へ変更を行うとともに、集束電極の構造を最適化し、印加可能電圧を 1.5 kV から 3 kV まで改善させることに成功した。この結果、シミュレーションによると光検出器効率として 80%以上を達成可能な見込みであり、PMT と同程度の光検出効率を達成することが見込まれている。現在までに試作品の制作が完了した段階であり、今後その性能評価を以下に述べる性能評価システムを用いて行う予定である。

PPAD に関しては、まず用いる蛍光体の発光効率の測定を行なった。測定装置を自作し、測定を行なった結果、3 keV の電子に対する発光効率として約 10 photon/electron という値が得られた。この発光効率を用いることで、光電面への印加電圧が-3 kV の際の新型ハイブリッド光検出器の光検出効率を推定した結果、34%という高い値を得ることに成功した。これは直接探索実験に用いられる光電子増倍管(PMT)の光検出効率の約 1.1 倍であり、光検出器の性能として PMT を上回ることが期待される。また半導体ゲルマニウム検出器を用いてこの蛍光体の放射能の測定を行った結果、暗黒物質探索において十分に低い値であることも確認ができた。これらの結果をもとに PPAD の試作器の開発を行い、LED 由来の 1 光子に対する性能評価を行なった。図 2 は 1 光子由来の波形の積分分布を表しており、印加電圧を上げることで、観測信号量が増加しているのがわかる。これは印加電圧を上げることで光電子が持つ運動エネルギーが増え、蛍光体中で発生する UV 光が増えたことに起因しているものと考えられる。PMT などこれまでの光センサーでは、1 光子と 1 光電子に 1 対 1 の対応関係があったが、PPAD で

は 1 光子に対応する光電子数が 1 よりも大きくなることが判明した。今後、光検出効率などその詳細な性能評価を後述するシステムを用いて進めていく予定である。

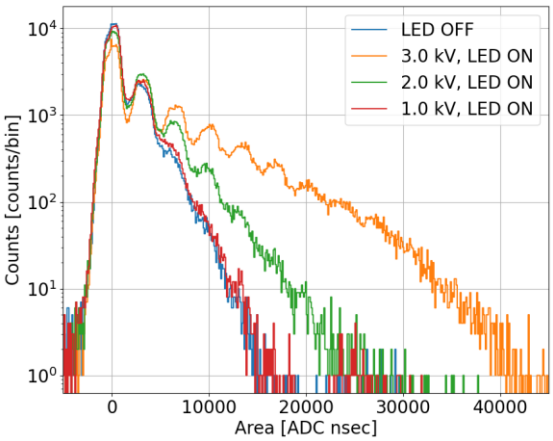

図 2: PPAD に対する青色 LED 由来の 1 光子の性能評価結果。図は 1 光子由来の波形の積分分布を表し、MPPC の 1 光電子ピークも期待通り見られる。印加電圧を上げることで、観測信号量が増加しているのがわかる。

開発したハイブリッド光検出器の性能評価には、暗黒物質との衝突の際に生成された光と同じ波長の 175 nm の真空紫外光を用いる必要があり、本研究では重水素ランプと真空紫外分光器を統合したシステムを開発した。特にパルスチューブ冷凍機を導入し、低温(-100 度)・高真空中で使用可能なシステムを実現した。システムの開発後は、性能がよく理解されている真空紫外光用の MPPC を用いて光検出効率の測定を行い、過去の文献と無矛盾な測定結果を得ることに成功した。今後このシステムを用いてハイブリッド光検出器(PAD/PPAD)の光検出効率の性能評価を行い、PMT と性能の比較を行う予定である。

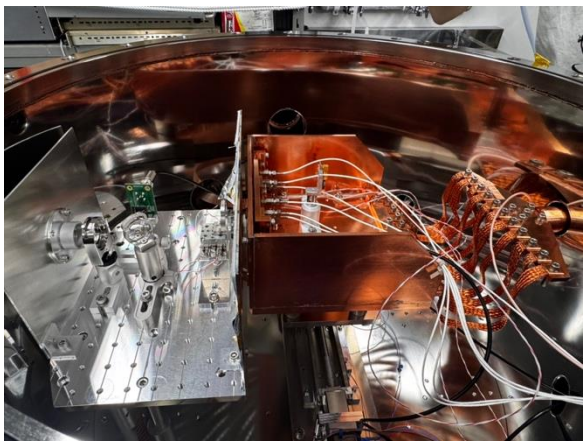

図 3: 本研究で開発した光検出器の性能評価システム。液体キセノン温度(-100 度)の真空中において、液体キセノンの発光波長(175 nm)の光に対する性能評価を行うことが可能である。