

暗黒物質検出器高感度化のための ハイブリッド光センサーの開発

風 間 慎 吾*

Development of a Hybrid Photodetector for Direct Dark Matter Experiments

Shingo KAZAMA*

We proposed a novel hybrid detector for direct dark matter detection experiments, aiming to further reduce radioactive background. The hybrid detector combines PMT technology with silicon semiconductor photodetectors. The study involved measuring the light yield of phosphor for a low-energy electron, crucial for estimating its detection efficiency. Results showed a light yield of approximately 10 photons per electron for 3 keV electrons, resulting in the detection efficiency of around 34%. Additionally, we have developed a dedicated system to measure the detection efficiency for vacuum ultraviolet light using a deuterium lamp and a spectrometer. Once the prototype detector is ready, we plan to evaluate the performance of the prototype hybrid detector under low-temperature conditions, as required for experiments conducted in liquid xenon.

1. 研究の背景・目的

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。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。我々は高い発光量を持つ希ガスのキセノン(−100℃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、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、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、将来の暗黒物質探索実験において実用化させることにある。

2. 蛍光体の発光効率測定と光検出効率の推定

本研究で提案するハイブリッド光検出器は、光電子が蛍光体に入射した際に発生する波長約 420 nm 程度の光を可視光に高い感度を有する MPPC で検出する点に特徴がある。ハイブリッド光検出器の性能の鍵を握るのが蛍光体の発光効率であり、仮に低エネルギー電子に対して蛍光体の発光効率が僅かであれば光検出効率は著しく低くなり、暗黒物質探索には使用できない。そのため、本研究では蛍光体の発光効率を測定する装置を製作した上で測定を行い、その結果をもとに期待される光検出効率の評価を行った。図 2 に発光効率の測定結果を示す。特に 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 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。この測定結果をもとに、現在ハイブリッド光検出器のプロトタイプ製作を浜松ホトニクス社と共同で行っており、開発が完了次第、3. で述べる装置を用いてその光検出効率の測定を行う予定である。

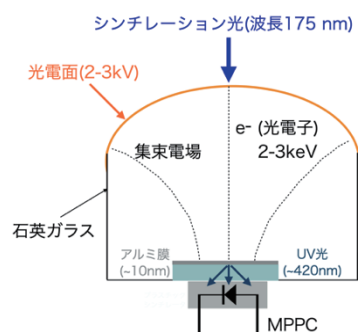


図1 ハイブリッド光検出器の概要。

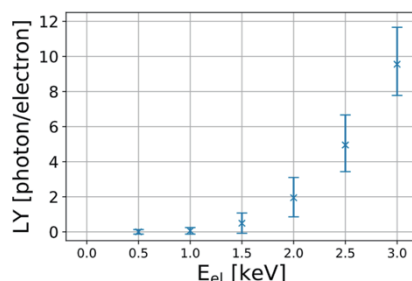


図2 蛍光体の発光効率の電子エネルギー依存性。

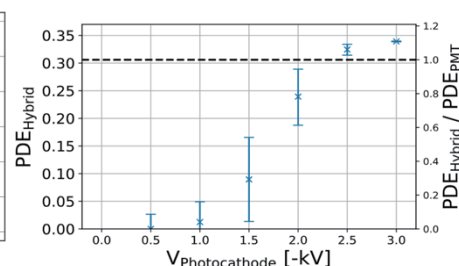


図3 光検出器効率の印加電圧依存性。

3. 光検出効率評価装置の開発

光検出効率の測定には、これまで大気中での測定が容易な紫外光 (LED) が使用されてきた。しかし、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、重水素ランプと分光器を統合したシステムを開発した。真空紫外光は大気中で減衰してしまうため、 10^{-5} Pa 程度の大気中での測定が不可欠であり、本研究では真空中での測定が可能なシステムの開発を行った (図 4)。光センサーの性能を決めるパラメータの一つにダークノイズ性能がある。ダークノイズは主に熱雑音に由来し、温度に強く依存する。暗黒物質探索は -100°C の液体キセノン中で行うため、光センサーの性能評価も低温で行う必要がある。本研究では、パルスチューブ冷凍機を導入し、低温で使用可能なシステムを実現した。現在、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っており、ハイブリッド光検出器のプロトタイプ製作が完了次第、この装置を用いて性能評価を行う予定である。

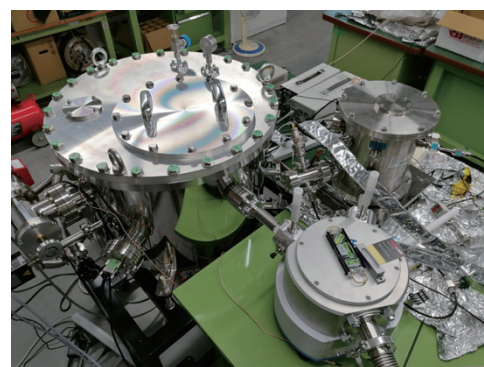


図4 真空紫外光を用いた光検出効率測定装置。

REFERENCES

- 1) 長谷川智哉, 第8回宇宙素粒子若手の会 秋の研究会.
- 2) T. Hasegawa, Nagoya Workshop on Technology and Instrumentation in Future Liquid Noble Gas Detectors.
- 3) 長谷川智哉, 日本物理学会2023年秋季大会.
- 4) T. Hasegawa, ICRC (2023).