

令和 6 年 9 月 4 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K03683

研究課題名（和文）ハイブリッド技術を用いた高性能光検出器の新展開

研究課題名（英文）New experimental challenge of high resolution photon detector using hybrid technology

研究代表者

足立 一郎（Adachi, Ichiro）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：00249898

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題は、先行研究で新しく開発したハイブリッド技術を用いた光検出器を、マルチアノード化をすすめ、イメージング能力を持つセンサーへと高度化するものである。さらに、磁場中での使用の可能性及び異なるフォトカソードの採用についてあらたな指針を示し、進展させることが重要項目である。プロトタイプ4台を用いて光検出システムとして一体化し、読み出し電子回路と接続し、シリカエアロゲルをチェレンコフ輻射体として光検出システムの上流部に設置し、宇宙線を用いて発生したデータを収集した。このデータからシングルフォトン検出効率を含む詳細な性能を検証した。磁場シールドについては、シミュレーションに磁場を入れ影響を調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年において光検出器の開発は、素粒子物理学だけでなく宇宙からのシャワーの研究やPETなど医療関係において重要となってきた。その中で、安全な電圧で使用できることは専門でなくても使用できる可能性を広げるものである。また、より微弱な信号をとらえることは、今までにない精度のよい測定に貢献できるものである。それらに加え、光検出の位置情報を得ることは、光量に加え新しい測定を得ることで、正確な解析を進めること可能となる。本研究はこのような点を追求し、新しい光検出器の開発をさらに進展させるものである。

研究成果の概要（英文）：This project aims to further improve new photon detector using hybrid technology, which was developed in the research program previously approved. Here, an improvement includes photon imaging capability by adopting multiple anodes as a signal extraction and check new photocathode material to increase quantum efficiency. In addition, this research program examines possible usage of this photon detector inside the magnetic field by introducing the shield cage. It is also important for this study is to show new directions for the photon detectors. The 4 prototype detectors organized the photon detection system with readout electronics, where silica aerogel layer was used as a Cherenkov radiator. In this setup, the performance was tested with cosmic rays and detailed studies have been done, The magnetic shield cage was studied with improved computer simulation software.

研究分野：高エネルギー物理学

キーワード：光検出器 シングルフォトン チェレンコフ光

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年の素粒子原子核実験では、シングルフォトンレベルの微弱な信号を検出することによって、粒子識別や粒子飛跡再構成を行うことが当たり前となってきている。申請者は、BelleII 実験で使用するチェレンコフ光を用いた粒子識別装置の光センサーの開発を行ってきた。そのセンサーは、72mm×72mm の比較的大きな口径をもつ真空管中にピクセル化（ピクセルサイズは5mm×5mm）されたアバランシェ・フォトディテクタ（APD）を配置したハイブリッド型マルチアノードアバランシェ光検出器（HAPD）である。これは、真空管部に高電圧を印加することで、大きな打ち込み増幅を得ることができ、さらに、電場で加速された光電子が、逆バイアスが印加された APD に入射し、その空乏層中でアバランシェ増幅される。これらの二つの増幅過程によって大きな信号を得ることができ、この HAPD はシングルフォトンについて検出可能で、光電子の位置情報も得ることができる。しかし、APD の製造に非常に費用がかかり、コストの面では大きな負担となった。また、十分な打ち込み増幅を得るためには、7~8kV という高い電圧を真空管に印加せねばならない。これは実用にあたって、ノイズ源となる可能性が高く、また多くの HAPD を実装する際には、絶縁などの面で潜在的な問題となる。これらを解決するため、HAPD 程度の大口徑をもち、高電圧が不要でシングルフォトンに感度がある光センサーとしてハイブリッド型 SiPMT を提案し、科研費にて、その研究開発を行ってきた。これは真空管内にセンサーとして APD ではなく MPPC を置く。MPPC は、50~70V 程度のバイアス電圧をかけるだけでシングルフォトンを検出できる高いゲインを持つ。MPPC だけでは、大面積をカバーすることは困難であるが、ハイブリッド技術を活用し真空管の中に設置すれば、感度面積は大きくでき、光電子が MPPC に入射できる程度の電場をかけるだけで良い。MPPC ではなく、ダイノードを設置することも可能ではあるが、構造の単純さや物質量の少なさから MPPC がより有利である。また、既存の MPPC を使用すればコストについても低減できる可能性がある。このような研究背景のもとに本課題を提案し、研究開始に至った。

### 2. 研究の目的

申請者は、H29 年度まで基盤 C にてハイブリッド技術を用いたシングルフォトン検出可能である新たな光検出器を開発に成功した。この検出器は、真空管の中にマルチ・ピクセル・フォトンカウンター（MPPC）を置き、ハイブリッド化することで、高電圧なしで動作可能で、大口徑の感度領域を持ち、安価に製造できる可能性がある。本研究は、この成功を受け、この光センサーを更に進化させることを目的とする。具体的には、(1)マルチアノード化を行い、光電子の入射位置情報を得ることでイメージング可能とする、(2)フォトカソードと MPPC の最適化を行い、感度のある波長領域を選択可能にでき、用途にあった波長を使用できる装置とする、(3)この光センサーは磁場中では使用できないが、磁場シールドを設計し、磁場中での性能を評価し、運用可能性を追求する。以上のことを柱とし、衝突実験等で光イメージングデバイスとして高性能をもった検出器を目指すものである。

### 3. 研究の方法

研究の初年度には、マルチアノード化について、シミュレーションによってプロトタイプのパラメーターを求めた。まず、シミュレーションプログラムはすでにある既存のプロトタイプの結果をより正確に再現させることで、コード内部変数の精度向上を行った。その後、このシミュレーションコードを用いて、2x2 の MPPC のアレイを組んだ場合、光電子が効率よくこれらのアレイに入射できるように電極を設計、同時に電極電位を下げても、光電子収集が可能になるように、電位差も変化させて、最適化した。電極の電位差など手持ちのプロトタイプで試験できたものについては予備テストを実施し、これらの試験に用いるデータ収集システム構築は連携研究者の協力を得て完成させた。

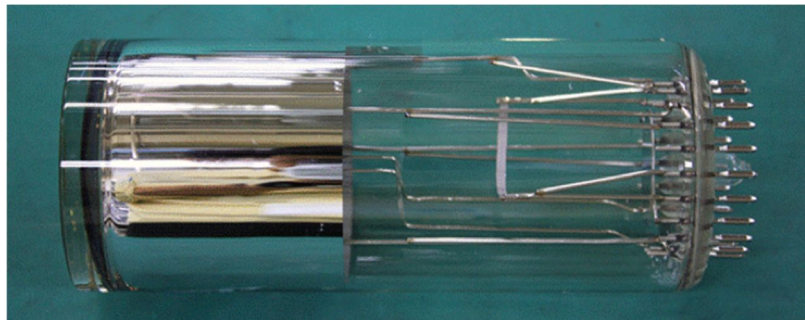
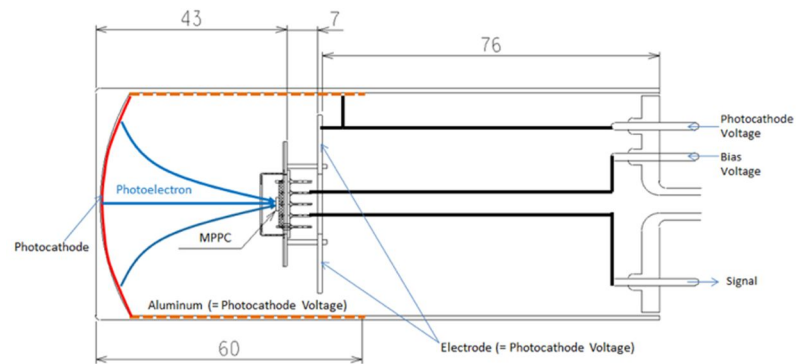
このような最適化の後、2x2 の MPPC を設置したプロトタイプの製造を行った。このプロトタイプに、ビームスポット直径 1 mm 程度に絞ったレーザー光を打ち込み、MPPC のどこに信号が現れるかスキャンし、シミュレーションのマッピングと比較し、適切に動作するかを調べた。その後、製造したプロトタイプの試験結果をフィードバックし、新たなサンプルの製造を行った。波長の感度の異なるフォトカソードの物質については、製造会社及び専門家と議論し、その可能性について調べ、MPPC においても表面膜の厚みなど波長について効果を持ちそうな構造因子について議論した上でサンプルを製造し、他センサーと比較することで評価を実施した。また、磁場中の特性については、シールドを設計・作成し、現在の手持ちのプロトタイプを使用して、試験を行った。

最終的には複数サンプルで、宇宙線またはビームを用いてチェレンコフ検出器としての試験を実施した。セットアップなどは連携研究者とともにいった。ハイブリッド型 SiPMT に加えてリファレンスとして BelleII 実験で使用する HAPD を並べ、センサー部を構成し、シリカエアロゲルから発生するチェレンコフ光をセンサー部で検出することによりテストした。チェレンコフリングがいかにイメージングできるかを検出効率として求め、性能が既知の HAPD と比較し、

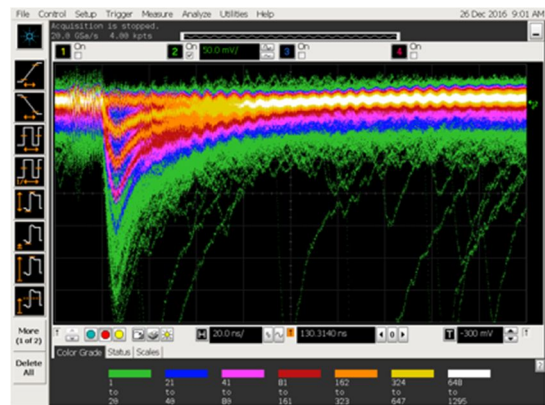
ハイブリッド型 SiPMT の性能を正確に求めることを行った。これらの結果をまとめ、シミュレーションとも比較することによって本研究の総合試験とした。

#### 4. 研究成果

課題について、真空管内に MPPC を複数台設置したプロトタイプ製造を開始した。第 1 号試作機の性能評価を行い、計算機シミュレーションと比較することで、製造する上でのパラメータの最適化等を実施した。プロトタイプの概略構造図と写真を右に示す。その下の信号は、405nm の光をプロトタイプに照射したおきにオシロスコープで観測したものである(真空管の電極は 1.5kV、MPPC バイアスは 55V を印加)。これをもとにプロトタイプ 2 号機から 4 号機までを順次製造し、個々の性能を検証した。4 台の性能を比較することで、制作によるばらつき及びその原因となる要因について考察し、今後の同種の検出器製造に貢献できる資料



とした。一方で、4 台の性能特性をシミュレーションプログラムのデータとして用いることで、計算機による評価の精度向上を行い、より正確な性能評価ができるコードとして構築した。総合試験として、プロトタイプ 1 号機から 4 号機を光検出システムとして一体化し、読み出し電子回路と接続し、セットアップを組み上げた。シリカエアロゲルをチェレンコフ輻射体として光検出システムの上流部に設置し、宇宙線を用いて発生したデータを収集した。このデータからチェレンコフリングを検出し、その信号を解析することで、シングルフォトン検出効率を含む詳細な性能を将来の使用目的に近い状態で検証した。結果として、シングルフォトンの検出効率としては実機とした十分使用できるものである



ことが確認できた。さらにチェレンコフ光のイメージングに関して、再構成されたチェレンコフ角分布から、光の位置精度を向上させることで、より精度よく行うことが確認できた。また、プロトタイプの性能試験の結果を再現するための計算機シミュレーションプログラムは、量子効率分布やゲインのばらつきなどを取り入れることで、その予測性能について大きく改善することができた。これは、今後の同様な光検出器の研究開発において、同プログラムを用いることで、より効率的に実施でき、経費削減かつ時間短縮に寄与すると考える。

磁場シールドの効果については、上記したシミュレーションプログラムに磁場の効果をいれることで、その影響を詳細に調べ、データとしてまとめた。今回、プロトタイプをシールドとともに実際に磁場の中に設置し、その性能については実施できなかったが、今後の展開の中で、試験できるものである。

今回、コロナの影響によって研究機関が延長された。この時間を用いて、上記で記述した研究を継続することに加えて、イタリア・ナポリ大学やスロベニア・ジョセフシュテファン研究所の専門家と光検出性能について、リモートで議論し、光検出のメカニズムについての理解を深め、実験結果詳細について検討できたと考える。これらの点においても、今後につながる成果が得られたとすることができる。

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
研究協力者	西田 昌平  (Nishida Shohei)  (20370075)	高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授   (82118)	
研究協力者	角野 秀一  (Kakuko Hidekazu)  (70376698)	東京都立大学・理工学研究科・教授   (22604)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関