

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340065

研究課題名(和文)光増幅原理に基づく新型大面積光検出器の開発研究

研究課題名(英文)Development of a new large area photodetector with optical amplification

研究代表者

飯嶋 徹(Iijima, Toru)

名古屋大学・現象解析研究センター・教授

研究者番号：80270396

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円、(間接経費) 3,960,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、「光増幅」と呼ぶ原理を用いた新しい大口径光センサーの開発を行った。この原理では、通常の光電子増倍管(PMT)で使われるダイノードの代わりにシンチレーターを設置し、光電子の打ち込みによって得られるシンチレーション発光を真空管の外に設置した半導体素子で検出するため、安価な半導体の使用と真空管と能動素子を構造上分離した特徴により、次期ニュートリノ水チェレンコフ実験に必要とされる10万本オーダーでのセンサー製作を比較的安価に行える可能性がある。このアイデアにもとづいて、8インチ径の試作管を製作し、約3の光増幅ゲインと半値幅1.1 nsの時間分解能を得た。

研究成果の概要(英文)：We have developed a new large area photodetector with concept of optical amplification. A photodetector based on this concept has advantage in its fast response and simplicity in the structure, which potentially provides a cost-effective ways to instrument large volumes with  $O(10^5)$  photodetectors in the next generation neutrino experiments. Some 8-inch prototype photodetectors have been produced and tested. Typical photo-gain factors of about 3 and time evolution of 1.1ns (FWHM) have been obtained.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子実験 放射線検出器 光検出器 シンチレータ

## 1. 研究開始当初の背景

陽子崩壊はバリオン数保存則を破る崩壊であり、これを探索することは、標準理論を超える物理、とりわけ陽子崩壊を予言する大統一理論の検証につながる素粒子物理学上の重要な研究である。陽子崩壊探索には、水チェレンコフ装置が有用であり、これまでにスーパーカミオカンデ実験などで探索が行われてきたが、未だその兆候は得られていない。一方、ニュートリノについては、フレーバー混合(ニュートリノ振動)があることが確定し、最後の混合角とされる $\theta_{13}$ の決定を目指してJ-PARCのT2K実験や原子炉を使った実験などが進行中である。次のステップとしては、この $\theta_{13}$ の測定結果に基づいて、ニュートリノのCP非保存を測定する実験をデザインし遂行することが重要課題であるが、ここでも大型水チェレンコフ検出器が必須の実験手段となる。こうした陽子崩壊やニュートリノCP非保存を発見し測定することは、ビッグバン後に反物質が消えて物質優勢の宇宙が形成された謎に迫る、宇宙論とも関連した重要性をもつ。次世代の大型水チェレンコフ検出器としては、現在のスーパーカミオカンデの10倍程度の規模が必要であり、そのためには、安価で大型かつ低ノイズの光センサーを開発することが学術的にも重要である。2010年前半に $\theta_{13}$ の最初の結果が得られると予想されており(現在既に結果が得られている)次世代大型水チェレンコフ検出器に使用できる大型光センサーを確立することは緊急の開発研究課題と考えられた。

## 2. 研究の目的

以上をサイエンス上の動機とし、本研究では、「光増幅」と呼ぶ原理を用いた新しい光センサーの開発を行った。その概念を図1に示す。受光部は、神岡実験で使用された光電子増倍管と同じく、光電面を蒸着した大型のガラス真空管であるが、光電子の軌道収束部分にはダイノードの代わりにシンチレーターを設置し、光電子の打ち込みによって得られるシンチレーション発光を真空管の外に設置した半導体素子で検出する。そして、この半導体素子として、急激な開発が進んでいるガイガーモードで動作するアバランシェ・フォトダイオード(G-APD)を利用する。このアイデアでは、ダイノードの代わりに安価な半導体を用いるため、価格は真空管バルブの値段でほぼ決まる。さらに、真空管と能動素子を構造上分離することによって、製作歩留まりを大幅に向上できる。よって、センサー全体の価格は、従来神岡実験で使用されていた

20インチ光電子増倍管を大きく下回ると考えた。

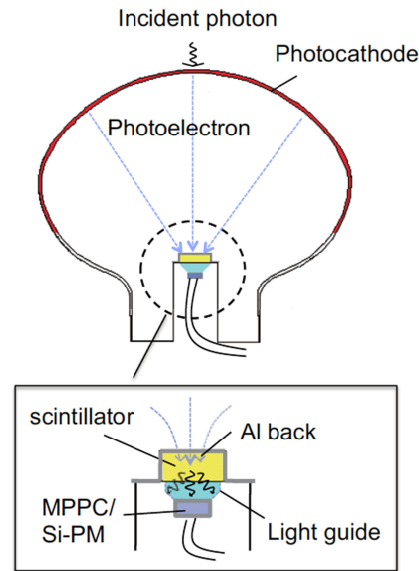


図1：光増幅型PMTの概念図

## 3. 研究の方法

本研究では、光増幅型PMTの開発研究を以下のように進めた。

具体的な開発要素としては、

- 高性能シンチレーター物質の選定
  - 小型試験管による原理想験
  - 大型電子管のデザイン
  - 大型電子管の試作と性能試験
- がある。光増幅型PMTの性能を決めるポイントとしては、
- 光増幅ゲイン: 入射したシングルフォトンに対して1段目の光電管の出力で得られるフォトン数
  - 時間分解能: 主としてシンチレータ物質の発光寿命と読み出しに使用する光センサーの時間分解能で決まる。
- があげられる。

平成23年度においては、

- 1) 小型試験管による原理検証: PIC (Proximity Image Converter) と呼ばれる小型試験管を用いた光増幅原理の原理検証を行い、J9758 と呼ばれる高速発光体を用いた場合には、12KV程度の加速電圧で、2.5程度の光増幅ゲインと500ps(FWHM)の時間分解能が得られることを確かめた。
- 2) 大型検出器の試作と動作確認: 口径8イ

ンチの光増強管の試作を行い、動作可能な2本のサンプルが得られた。この大型管の試験を行うテストベンチを構築し、性能評価を行った。その結果、約3の光増幅ゲインと、1ns以下の時間分解能を得た。

平成24-25年度においては、

3) 口径8インチの大型光増強管の試作と性能評価をさらに進め、光検出効率や時間分解能の光入射位置に対する依存性や検出器の時間応答に関する理解を深めた。

#### 4. 研究成果

以下に、本研究によって得られた成果をまとめる

##### 【8インチ光電管の試作】

図2に8インチ光電管試作機を示す。製作は浜松ホトニクスに依頼した。光電管の外径は203mm、光電面の有効径は180mmである。光電面はバイアルカリ光電面であり、波長400nmで20%の量子効率を得られている。光電子は最大12kVの電圧でシンチレータに打ち込まれる。シンチレータとしては、J9758と呼ばれる高速発光体を使用した。この発光体の発光寿命は500ps(90% 10%)である。シンチレータから出た光は光電管外部に取り付けられた1インチの光電子増倍管(H6533)で読み取る。

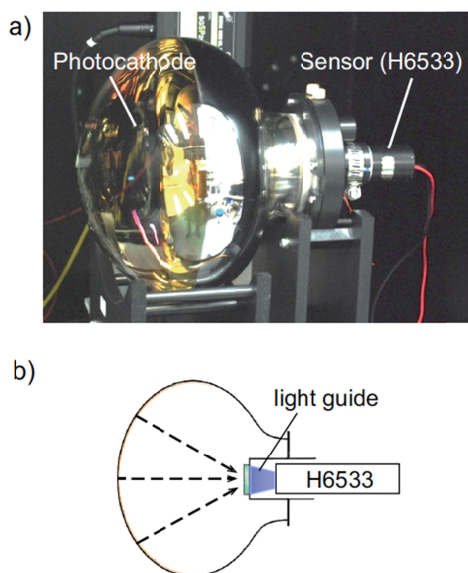


図2：8インチ光増幅型センサーの試作機

##### 【光増幅ゲイン】

図3に得られた光増幅ゲイン(G)を示す。最大電圧12kVで約3の光増幅ゲインが得られた。約10kVあたりで光増幅ゲインの飽和傾向が見られるが、これは蛍光体の厚さが不十分で、10kV 12kVのエネルギーで入射した光電子が蛍光体中で完全に止まらないためと考えられる。また、図4は光増幅ゲインの入射位置依存性を示す。ドーナツ状にゲインの高い領域が見られるが、これはこの領域では(光電効果を起こさずに)透過した入射フォトンが光電面の裏側鏡面で反射して光電面に当たることにより見かけの量子効率が高くなるためである。

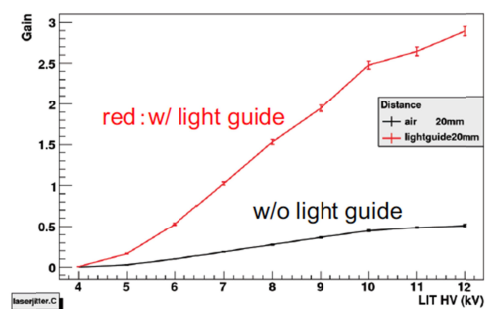


図3：光増幅ゲインの測定結果。

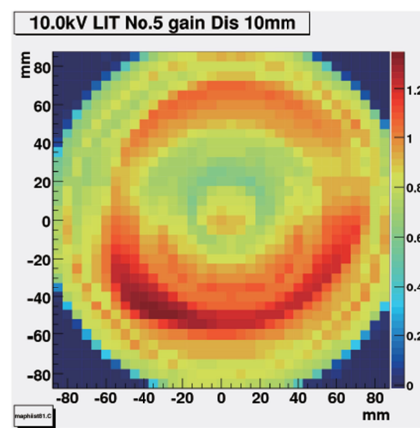


図4：光増幅ゲインの位置依存性

##### 【時間分解能】

図5に1フォトン照射に対して得られた信号の時間分布を示す。分布の半値幅(FWHM)として1.1nsの良好な時間分解能が得られている。この分布は、光電管内での光電子の時間的な広がり(transit time spread) + H6533PMTの時間分解能 $\sigma$ とシンチレータの発

光寿命を $\tau$ で表現できると考えられ、このモデルに従ったフィッティングにより  $\sigma \sim 170\text{ps}$ ,  $\tau \sim 900\text{ps}$ の結果が得られた。

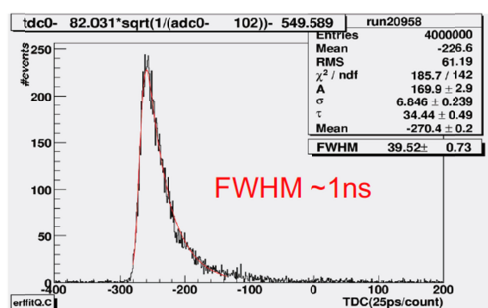


図5：シングルフォトン入射に対して得られた信号時間分布

#### 【今後の課題】

今後の課題としては、シンチレータ物質の最適化によって、光増幅率の改善を行うこと、より小型で安価な MPPC のような半導体光センサーを使った性能検証があげられる。

以上の研究成果を

- 日本物理学会 第67回年次大会(2012年3月)
  - 「Open Meeting for the Hyper-Kamiokande Project」(2012年8月)
  - 「8th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH 2013)」(2013年12月)
- において発表した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

Toru Iijima, "Status and perspectives of vacuum-based photon detectors", Nuclear Instruments and Methods A 639, 137-143, (2011)

〔学会発表〕(計3件)

鈴木 翔太、飯嶋 徹、「高速シンチレータによる光増幅原理を用いた大口径光検出器の開発」日本物理学会 第67回年次大会、2012年3月25日、関西学院大学

Toru Iijima, "Development of a Large Area Photodetector with a Fast Phosphor Anode", Open Meeting for the Hyper-Kamiokande Project, 2012年08月21日~2012年08月23日, 東京大学 Kavli IPMU

Toru Iijima, "Development of a Large Area Photodetector with a Fast Phosphor Anode", 8th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH 2013), 2013年12月02日~2013年12月06日, Hayama, Kanagawa, Japan

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/public/new\\_hadron/index.html](http://www.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/public/new_hadron/index.html)

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

飯嶋 徹 (IIJIMA, Toru)

名古屋大学・現象解析研究センター・教授  
研究者番号：80270396

(2)研究分担者

(3)連携研究者