

素粒子実験で用いる受光素子の微弱光検出能力の限界

図師 太一* 吉田 拓生*

Limits of the Abilities for Feeble Light Detection of the Photosensors Used in Elementary Particle Experiments

Taichi ZUSHI* and Takuo YOSHIDA*

(Received October 2, 2017)

Some of particle detectors used in elementary particle experiments detect particles by sensing feeble light such as scintillation light generated by charged particles passing through matter. We carried out the experiments to evaluate the abilities for feeble light detection of some semiconductor photosensors including avalanche photodiodes and multi-pixel photon counters (MPPCs) selected as photosensor candidates for the particle detectors. As a result, we found that the MPPC was the most sensitive. In particular, the MPPC cooled down to -40°C could detect with almost 100% efficiency quite feeble light pulses which contained only 7 photons on average.

Key Words : High Energy Physics, Elementary Particle, Photosensor, PMT, APD, MPPC

1. はじめに

素粒子物理学の実験を行うための測定装置には、高エネルギー粒子ビームの衝突反応によって生成される種々の娘粒子の飛跡を検出したり、運動量やエネルギーなどを測定したり、粒子の種類を同定したりするための様々な素粒子検出器が組み込まれている。このような素粒子検出器の中には、荷電粒子が物質を通過するとき生じるシンチレーション光やチェレンコフ光のような微弱な光信号を捉えることによって粒子を検出するものがある。例えば、ホドスコープやTOFカウンター、シンチレーションファイバー荷電粒子飛跡検出器、カロリメーター、チェレンコフカウンターなどである^[1]。このような素粒子検出器では、より微弱な光信号を確実に検出し、その光量をより正確に測定することが、検出効率や測定精度の向上につながる。

従来、素粒子を検出するためのこのような微弱な光信号は、光電子増倍管 (PMT) などの電子管式受

光素子を用いて計測するのが通例となってきたが、本研究の目的は、そのような受光素子の代わりに半導体受光素子の一種であるアバランシェフォトダイオード (APD) やマルチピクセル・フォトンカウンター (MPPC) を用いて、光電子増倍管(PMT)などでは検出効率が著しく低下するような極めて微弱な光信号を確実に検出し、その光量をより正確に測定する方法を確立することである。特に、本研究では、平均光子数 10 個以下の極めて微弱な光パルスを上記の半導体受光素子で検出する実験を行い、どのくらい微弱な光信号まで 100%に近い検出効率で検出でき、その光量を精度よく測定することができるか、その能力の限界を系統的に調べた。

2. 研究の方法

2.1 微弱パルス光源の開発

本研究では、光パルス中の平均光子数を 0~数十個の範囲の任意の値に設定することができる微弱パルス光源が必要となる。しかも、その光パルスの時間幅は、実際の素粒子検出器の光信号に合わせて、数十 ns 以下であることが望ましい。そこで、発光ダイオード (LED) に時間幅 30ns 程度の高速度パルス電圧を印加する方式の微弱パルス光源を開発した。パ

* 大学院工学研究科 物理工学専攻

* Applied Physics Course, Graduate School of Engineering

ルス当たりの平均光子数は、LED に印加するパルス電圧の大きさと LED の光を減光するための ND フィルターによって調節することができるようにした。

このパルス光源で受光素子の性能評価を行う際には、想定する素粒子検出器の発光スペクトルや受光素子で高い量子効率を得られる波長領域に合致する色の LED を選択する必要がある。本研究では、カナダ Lumileds 社製の 3 種類の LED (型式: HPWN-MB00, HPWN-MC00, HPWN-MG00) を必要に応じて使い分けることにした。各 LED に対して実測した発光スペクトルを図 1 に示す。それぞれ青、青緑、緑の LED であるが、これらはそれぞれ青色プラスチックシンチレーター (発光波長 400~500nm, ピーク波長 430nm 付近), 青色シンチレーティングタイルの発光を外に引き出すための波長変換材 Y-11 入り光ファイバー (発光波長 480~550nm, ピーク波長 500nm 付近), 蛍光材として 3HF を使用したプラスチックシンチレーター (発光波長 500~600nm, ピーク波長 530nm 付近) の発光スペクトルに近い LED として選択した。

受光素子の性能評価を行う際には、光源から受光素子まで外径 0.75mm の透明プラスチック光ファイバーで光パルスを伝送した。

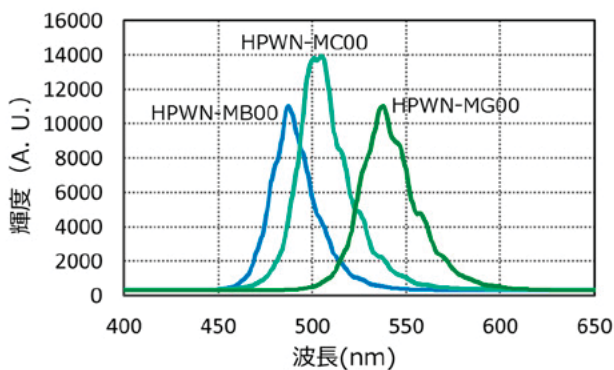


図 1 光源として用いた LED の発光スペクトル

2.2 素粒子検出器の受光素子に関する考察

一般に、微弱な光信号を検出する装置は、最初に受光面のところで光電効果によって光子を電子 (光電子) に変換し、その光電子を増倍させ、電気信号として取り出す仕組みになっている。入射する光信号が、例えば光子の数でせいぜい数個程度しかないほど微弱である場合、最初に光子を電子に変換する際の効率 (量子効率) が、受光素子を選択する上で本質的に重要なパラメーターとなる。もし量子効率が低く、光電子がひとつも得られなければ、そのあとの光電子増倍率がいくら大きくても信号は出てこないからである。光電子増倍管は、光電子増倍率が

極めて大きく (100 万倍程度), ノイズも小さいという長所があるものの、量子効率がせいぜい 25% 程度しかないため、100% 近い効率で光信号を検出するためには、信号毎の入射光子数が平均値のまわりにポアソン分布することを考慮すると、信号当たり平均十数個以上の光子が必要となる。そこで、本研究では、光電子増倍管の代わりに、APD や MPPC など、70~95% に亘る高い量子効率を持つ半導体受光素子に着目し、微弱光検出能力の向上を図る。

2.3 APD の選択

半導体受光素子の一種である APD は、通常のフォトダイオードと違って、入射光によってたたき出された光電子を素子内で増倍させることができ、このため、入射光が微弱でも大きな電気信号を出力することができる。APD には、暗電流によるショット雑音や光電子増倍率の揺らぎに起因する過剰雑音などの影響で微弱光の検出効率が低下するという欠点があるが、この内、ショット雑音は APD を冷却することによって低減させることができる。

本研究では、素粒子検出器に適していると考えられる以下の 2 種類の APD を選択した。

▶ 浜松ホトニクス社製 APD S8664-55

これは、欧州 CERN の無機結晶 PbWO_4 を用いた電磁カロリメーターのために開発された APD である^[2]。青色から赤色にわたる広い範囲の波長域で 80% 以上の量子効率を持つ。逆バイアス電圧をかけたときに pn 接合面付近にできる空乏層が厚いため、受光面の面積が $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ と大きい割には静電容量が小さく (80pF), ノイズを比較的強く抑えることができる。通常のシンチレーションカウンターやカロリメーターなど、受光面の大きい APD を必要とする検出器に適している。

▶ 浜松ホトニクス社製 APD S5343mod

これはシンチレーティングファイバー (Sci-Fi) 荷電粒子飛跡検出器用に開発された特注の APD で、受光面は直径 1mm の円形である^{[3],[4]}。量子効率は、3HF 型 Sci-Fi の発光波長域 (500~600nm, 緑色) で 94% に達する。波長 450nm 付近 (青色) でも 80% 以上の量子効率を持つ。

2.4 MPPC の選択

MPPC も APD と同様に半導体受光素子の一種であるが、1つの MPPC 素子の中に小さい APD ピクセルが密に集積されており、その APD ピクセルをガイガーモードで動作させるため、通常の APD よりも大きな信号が得られる。また、ガイガーモードで動

作させることにより、1つのピクセルに何個光子が入射しても同じ大きさの信号が出て来るが、入射光が微弱で、1つのピクセルに複数の光子が入射する確率が極めて低い場合には、信号を出しているピクセルの数が、検出した光子の数、すなわち光電子数となる。1つのMPPCからは全てのAPDピクセルの出力を加算した信号が出力されるので、その波高から信号を出したピクセルの数が分かる。しかし、MPPCも半導体受光素子であるが故に、ノイズの発生頻度(ダークカウント)が高いという欠点を持つ。本研究では、MPPCに対してもAPDと同様、冷却することによってノイズを極力低減させる。

本研究では、浜松ホトニクス社製のMPPC S10362-11-100Cを選択した。このMPPCでは、1mm×1mmの受光面の中に100 μ m×100 μ mのAPDピクセルが100個集積されている。通常、MPPCの表面は保護用の透明の樹脂で覆われていて、その樹脂の表面での反射によって入射光が数%ほど失われるが、本研究では、この樹脂の無いMPPCを特別に作製してもらった。その影響もあって、量子効率は、青色プラスチックシンチレーターの発光波長域(400~500nm)で70~75%に達する。なお、MPPCでは隣接するピクセルの境界付近に若干の不感領域ができるため、(ピクセル当たりの量子効率)×(受光面全体に占める有感領域の割合)をMPPCの量子効率と定義する。

2.5 受光素子の微弱光検出能力評価実験

本研究では、上述の微弱パルス光源を用いて、選択したAPDやMPPCの微弱光検出能力の限界を探る実験を行い、これまで一般的に用いられてきた光電子増倍管による結果と比較した。APDやMPPCは冷却する必要があるため、真空容器の中に設置し、ペルチエ素子を用いて-40 $^{\circ}$ Cまで冷却できるようにした。光パルス伝送用の透明の光ファイバーは、真空容器の亚克力窓に開けた小穴を通して容器内に挿入し、挿入後、真空漏れを防ぐために小穴の隙間を接着剤で塞いだ。

3. 実験結果

3.1 PMTによる微弱パルス光源のテスト

はじめに、光電子増倍管(PMT, 浜松ホトニクスH6520)を用いて、本研究の中で開発した微弱パルス光源の発光量を測定し、本研究で必要とする微弱な光パルスが得られることを確認した。図2は、発光ピーク波長500nmのLED(HPWN-MC00)を用いたときの結果である。横軸は、PMTに入射した光パル

スとその受光面からたたき出すパルス当たりの平均光電子数で、この値をPMTの量子効率(500nmの光に対して0.2)で割れば、パルス当たりの平均入射光子数が得られる。また、縦軸は、この光源の光パルスをPMTで検出したときの検出効率を測定した結果であるが、この検出効率は、光電子数にポアソン分布を仮定したときの予測値(図中の曲線)と一致している。

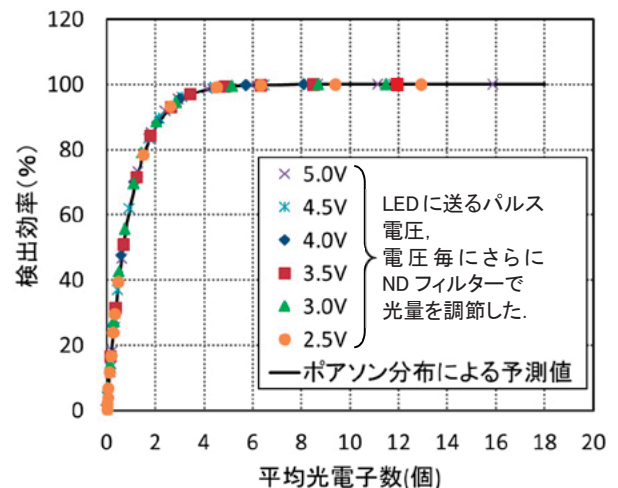


図2 PMTによる微弱パルス光源のテスト結果

図2の結果から、この光源には次のような特性があることが分かる。

- ▶ パルス当たりの平均光子数を0~数十個の範囲の任意の値に設定することができる。
- ▶ パルス毎の光子数が、理論どおり、設定した平均値のまわりにポアソン分布する。

本研究では97%以上の検出効率があれば「100%近い検出効率」が得られたものとみなすことにして、そのために必要な平均光電子数を求めることにすると、図2の測定結果から、このPMTでは平均光電子数が3.5個あればその要件を満たすことが分かる。このPMTの量子効率は、波長400nm付近で最も大きい23%、波長500nmで12%、530nm付近で8%であることから、それぞれの波長領域で平均光電子数が3.5個となるためには、平均入射光子数が15.2個、29.2個、43.8個必要となる。なお、PMTの検出効率には温度依存性はほとんどないことが知られているので、本研究では、PMTは常に室温中に置いた。

3.2 APDの微弱光検出能力

APD S8664-55とS5343modの検出効率の測定結果をそれぞれ図3、図4に示す。光源のLEDには、APDが最も高い量子効率を示す波長領域に合わせて、

HPWN-MG00 を選択した。横軸は、APD に入射した光パルスがたたき出すパルス当たりの平均光電子数で、測定した APD の出力信号から求めた。温度毎の測定点をつなぐ曲線は、ポアソン分布による予測値ではなく、単なるスプライン曲線である。

APD で微弱な光信号を検出する場合、暗電流によるショット雑音の影響で、信号とノイズを区別するためのしきい値を高く設定する必要があることと、光電子増倍率や入射光の波長に応じて増加する過剰雑音の影響で、出力信号の大きさの揺らぎがポアソン分布から予測される揺らぎの 1.5~2.5 倍に拡大されることなどから、100% 近い検出効率を得るために必要となる平均光電子数は、PMT など、そのような雑音のほとんどない受光素子を用いたときよりも大きくなる。しかし、APD を冷却することにより、ショット雑音の原因となる暗電流が減り、微弱光検出能力を向上させることができる。また、暗電流は APD の受光面の面積に比例して大きくなることから、受光面の大きい S8664-55 よりも、受光面の小さい S5343mod の方が有利である。

図 3、図 4 に示す結果の中で最も高性能であった

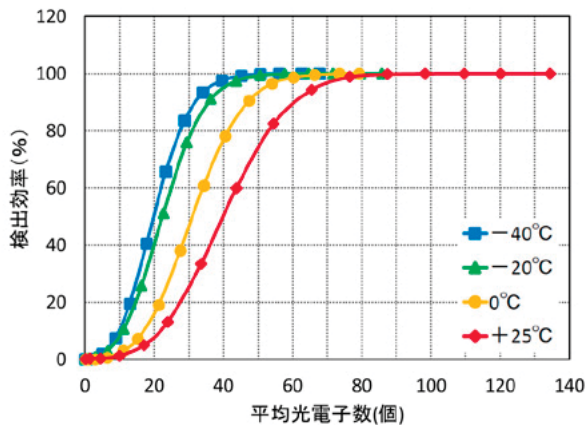


図 3 APD S8664-55 の検出効率

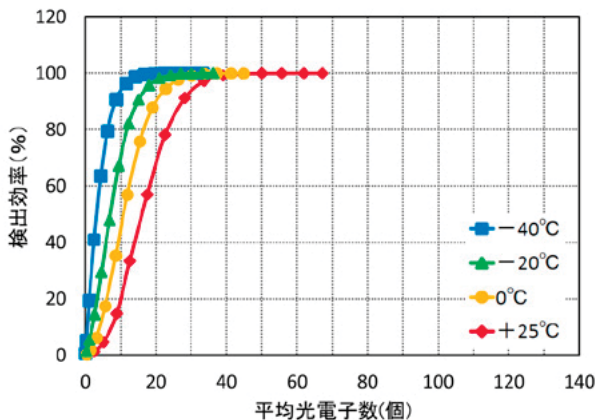


図 4 APD S5343mod の検出効率

のは、 -40°C に冷却した S5343mod で、光電子が平均 12.0 個あれば 97% 以上の検出効率を達成することができる。前述の PMT に比べると大きな値であるが、この APD の量子効率が波長 400nm 付近で 61%、波長 500nm 付近で 91%、波長 530nm 付近で最も大きい 94% であることから、それぞれの波長領域で平均光電子数が 12.0 個となるためには、平均入射光子数が 19.7 個、13.2 個、12.8 個あればよく、波長 500nm 付近の幅広い波長領域で APD の微弱光検出能力が PMT を上回ることになる。ただし、このときの APD の光電子増倍率は約 1200 倍で、APD には大きく、その過剰雑音の影響により、出力信号の大きさの揺らぎがポアソン分布から予測される揺らぎの 2.5 倍ほどに大きくなってしまい、入射した光信号毎の光子数、すなわち入射光量を測定する精度は、PMT よりも悪くなる。

3.3 MPPC の微弱光検出能力

MPPC S10362-11-100C の検出効率の測定結果を図 5 に示す。光源の LED には、MPPC が最も高い量子効率を示す波長領域に合わせて、HPWN-MB00 を選択した。横軸の平均光電子数は、信号を出すピクセル数の平均値で、測定した MPPC の出力信号から求めた。ここでも温度毎の測定点をつなぐ曲線は、単なるスプライン曲線である。

APD と同様、MPPC もノイズが多いので、信号に対するしきい値を高く設定しないとノイズと信号を区別することができないが、冷却によってノイズを低減させれば、微弱光検出能力を向上させることができる。図 5 の結果によると、この MPPC を -40°C まで冷却すれば、97% 以上の検出効率を達成するために必要となる平均光電子数を 5.2 個まで減らすことができる。この MPPC の量子効率が波長 400nm 付近で 72%、波長 450nm 付近で最も大きい 75%、波長 500nm 付近で 69%、波長 530nm 付近で 62% であるこ

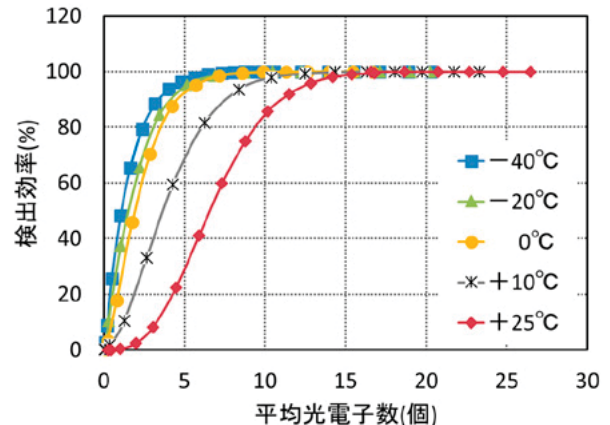


図 5 MPPC S10362-11-100C の検出効率

とから、それぞれの波長領域で平均光電子数が5.2個となるためには、平均入射光子数が7.2個、6.9個、7.5個、8.4個あればよく、波長400nmから500nm付近の幅広い波長領域でMPPCの微弱光検出能力がPMTやAPDを上回る。

4. まとめと今後の課題

素粒子検出器の発光波長は、検出器の中で用いる発光体の種類によって様々であるが、2.1で述べたように、シンチレーターやその波長変換材を用いる場合は、400~600nmの範囲に収まる。また、チェレンコフ光を利用する場合には、もう少し短い波長まで検出できることが望ましい。

本研究では、着目した受光素子毎に、微弱な光信号に対して97%以上の検出効率を達成するために必要となる平均光電子数を測定したが、この平均光電子数を各受光素子の量子効率で割れば、各受光素子に入射する光信号中の平均入射光子数を求めることができる。ただし、受光素子の量子効率は入射光の波長の関数となるので、平均入射光子数も、図6に示すように、波長の関数となる。なお、本研究では、量子効率は、受光素子の製造元が提供する資料やカタログに記載されている量子効率のデータから引用した。

図6から分かるように、波長350nmから600nmに亘る領域で最も微弱光検出能力が高かったのは、MPPCである。このMPPCは、 -40°C に冷却した場合、入射する光信号中に平均7~8個の光子があれば、確実に検出することができる。また、波長の比較的長い500~600nm付近では、APD S5343mod (受

光面1mm ϕ)もMPPCに匹敵する高い検出能力を示す。しかし、受光面が大きい方のAPD S8664-55 (受光面5mm \times 5mm)は、それだけノイズも大きくなるため、 -40°C まで冷却しても、50個近い数の光子が入射しないと、十分な検出効率が得られない。一方、波長の比較的短い400~500nm付近では、光電子増倍管(PMT)と -40°C のAPD S5343modは、ほぼ同等の性能を示す。特に、受光面がExtended Green BialkaliのできたPMTは、通常のBialkaliのPMTに比べて、波長450nm以上の領域で感度が低下しにくくなっている。

以上のように、本研究で調べた受光素子の中ではMPPCが最も高感度であったが、このMPPCの受光面は1mm \times 1mmの正方形で、APD S5343modの受光面と同様に小さい。今後の課題として、もっと大きな受光面を持つMPPCについても性能評価を行う必要がある。また、本研究ではAPD、MPPCとも -40°C まで冷却したが、さらに低い温度まで冷却したときの性能評価も行いたい。

参考文献

- [1] K. Kleinknecht: Detectors for Particle Radiation (2nd Edition), Cambridge University Press, p.1 (1998).
- [2] K. Deiters, *et al.*: Nucl. Instr. and Meth. A, 453, 223 (2000).
- [3] T. Okusawa, Y. Sasayama, M. Yamasaki, T. Yoshida: Nucl. Instr. and Meth. A, 459, 440 (2001).
- [4] T. Yoshida, T. Sora: Nucl. Instr. and Meth. A, 534, 397 (2004).

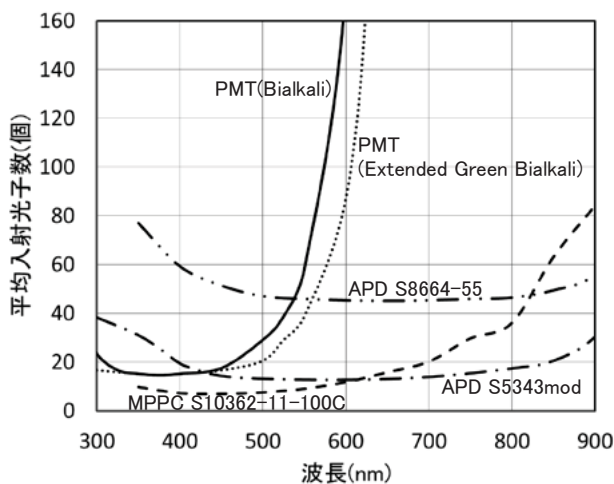


図6 各受光素子で97%以上の検出効率を達成するために必要となる平均入射光子数. APDとMPPCは -40°C , PMTは室温中で動作させた場合の結果。

