

ニュートリノ観測のための水中チェレンコフ光検出技術

相原 博 昭

New Photosensor for a Water Cherenkov Neutrino Detector

Hiroaki AIHARA

A new photosensor based on a combination of a traditional photomultiplier tube technology and an advanced semiconductor technology has been developed. A hybrid avalanche photodiode is a vacuum tube containing a photocathode and an avalanche photodiode. This device offers excellent solutions for applications where a single photon sensitivity, a fast signal response with small transit time spread and a wide area photocathode coverage are required. In particular, it is a viable alternative to a photomultiplier tube for detection of neutrino-induced Cherenkov light in the next generation large water Cherenkov detector.

Key words: hybrid avalanche photodiode, Cherenkov light, neutrino

1. ニュートリノとその検出

物質の最小構成要素である素粒子は、陽子や中性子を構成するクォークと、電子の仲間のレプトンに分類される。そのレプトンのうちの電荷をもたない素粒子が、中性微子ニュートリノである。ニュートリノはパウリが1930年に原子核のベータ崩壊から放出される電子の連続スペクトルを説明するために導入した粒子であるが、電荷をもたないために電磁相互作用はせず、また、陽子と中性子を束縛して原子核を作る核力を感じることもない。その結果、弱い相互作用という、粒子を束縛するためでなく粒子を崩壊させるための力のみに関係する。しかも、10年ほど前までは質量をもたない粒子であると思われていたこともあり、存在価値の不明な不思議な素粒子であった。

ところが、1987年に超新星爆発から発生したニュートリノが神岡鉱山地下に設置された実験装置カミオカンデで検出され、可視光や電波でなくニュートリノをプローブとする天文学、ニュートリノ天文学が幕開けた。さらに1998年には、カミオカンデの後継機スーパーカミオカンデが、「ニュートリノ振動」という量子力学現象の発見に成功した。あるニュートリノが時間の経過とともに他の種類のニュートリノに変わったり元に戻ったりするこの現象は、ニュートリノの質量がゼロでなく異なる2つの有限の

値をもつことに起因する、量子力学の典型的二準位系の現象であり、ニュートリノに質量があることが証明されたのである。そして、ニュートリノに質量があることこそが、宇宙進化の過程において、反物質が消滅して物質だけの世界が残った理由であるとする「レプトジェネシス理論」、つまりニュートリノの存在こそが宇宙が現在の姿である理由であるというとんでもない理論までが出現してきた。その結果、ニュートリノは今や素粒子物理の中心的存在であり、それを検出する実験装置のある神岡は、ニュートリノ研究のメッカとなっている。

この一連の展開の要にあり、かつ、レプトジェネシス理論がフィクションなのか、(いずれノーベル賞が与えられるような)基礎物理理論なのかを実証する鍵は、ニュートリノという不思議な粒子を「見る」ことができる検出器である。ニュートリノは物質とほとんど相互作用せず、光や電磁波も放出しないので、標的として大量の物質(例えば水)を置き、ここでまれに起こる $\nu(\text{ニュートリノ})+n(\text{中性子})\rightarrow e/\mu(\text{電子またはミュオン})+p(\text{陽子})$ 反応で生成された二次粒子である電子あるいはミュオンが水中で生成するチェレンコフ光を検出する。チェレンコフ光は、物質中を飛行する荷電粒子の速さがその物質中での光速(c/n , n は屈折率)を超えるとときにリング状に発生する、

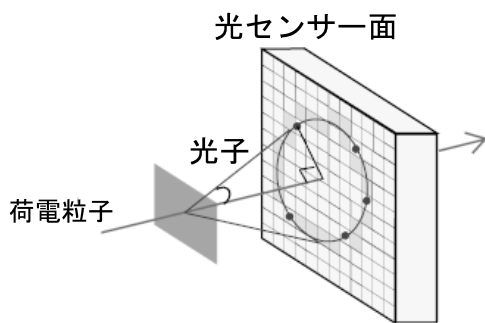


図1 チェレンコフ光の作る光リングの概念図。

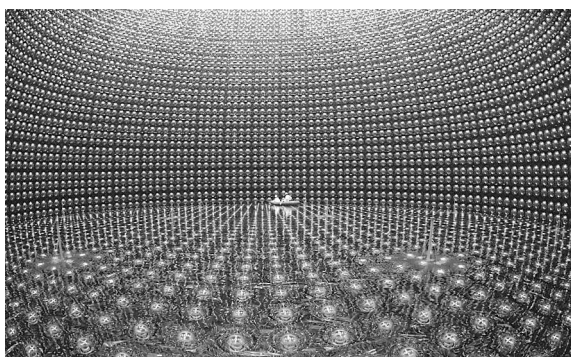


図2 スーパーカミオカンデの内部。直径40 m、高さ40 mの円筒状水タンクの内側に、11,000本の口径20インチPMTを敷き詰めてある。

波長 400 nm 程度の光である (図1 参照)。このチェレンコフ光を、光電子増倍管 (PMT) を使って測定する。ただし、その光は弱く光子数は少ない。図2は、5万トンの純水を標的とするスーパーカミオカンデの内部を示している。内部表面を埋め尽くしているのは、20インチという大きな口径をもった PMT であり、その総本数は約 11,000 である。

宇宙進化におけるニュートリノの役割を解明するには、スーパーカミオカンデをもってしても不十分であり、次世代機として、約 20 倍の規模をもつハイパーカミオカンデが検討されている。ハイパーカミオカンデで必要とされる PMT の数は 20 万本にもものぼる。この PMT に取って代わる、よりすぐれた性能と低価格性をあわせもつ光センサーとして開発されたのが、ハイブリッドアバランシェフォトダイオード (HAPD) である (ちなみに、20インチPMTの単価は約 15 万円である)。

2. HAPD の仕組みと動作原理

HAPD は、PMT の光電子増倍機構であるダイノードをアバランシェフォトダイオード (APD) で置き換えた光センサーである¹⁾。PMT 同様、光子をアルカリ金属を蒸着した光電カソード面で光電子に変換し、その光電子を (ダイ

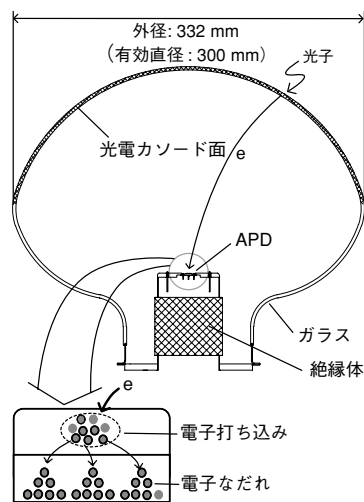


図3 大口径HAPDの構造と動作原理。

ノードではなく) APD に打ち込むことによって二次電子を発生し信号を増幅する。PMT 技術と半導体技術を融合させたハイブリッド技術による光センサーといえる。光電子は、光電カソード面と APD 間の電位差によって生じる電場によって加速され、運動エネルギーを得る。この光電子が APD に飛び込み、シリコン分子をイオン化することにより、多数の電子・ホール対を生成する。さらに、これらの二次電子が p-n 接合部の高電場領域において電子なだれ (アバランシェ) を起こし、電子数のさらなる増倍が起こる。図3に、東京大学と浜松ホトニクス社が共同で開発した口径 13 インチ HAPD の構造を示す²⁾。使用されている APD の口径は 5 mm である。この HAPD は水中で使用されるので、光電カソード面は接地されており、APD は最大 +20 kV の電位に置かれるよう設計されている。APD の表面には不感層があり、そこでの光電子のエネルギー損失は二次電子生成に寄与しない。この APD の場合、不感部分で失われるエネルギーは約 4 keV である。したがって、加速された光電子が APD に入射して発生する電子・ホール対の数は、シリコンのイオン化エネルギーが約 3.6 eV であるので、 $(20000 - 4000)/3.6 \approx 4400$ 程度となる。この初段増倍率は、PMT の初段ダイノードで得られる増倍率 2~5 より格段に大きく、その結果 HAPD は PMT よりもすぐれた S/N 比 (signal-to-noise ratio) を得ることができる。これらの電子は p-n 接合部に向かってドリフトし、電子なだれによりさらに 1 個あたり約 50 個の電子を発生する。この 2 段階の増倍過程を経て、約 2.2×10^5 の増倍率が得られる。

図4に APD の構造を示す。光電子は p-n 接合の反対側 (これを裏面という) から入射する。p-n 接合部分は電子入射面と反対側の表面から 10 μm 程度の深さに形成されて

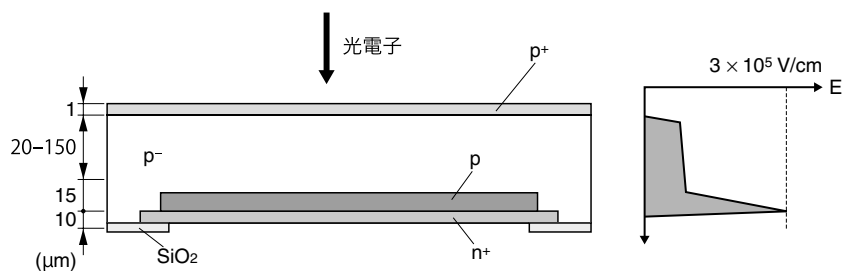


図4 裏面入射型 APD の構造と構造内電場分布.

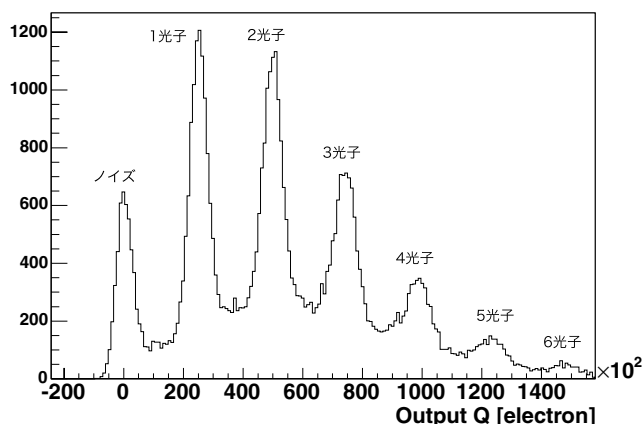


図5 HAPD によるパルスレーザー光の波高分布.

いる。光電子入射によって発生した二次電子がアバランシ領域に到達するためには、シリコン基板が完全に空乏層化している必要がある。抵抗率 $\sim 4 \text{ k}\Omega\text{cm}$ 、厚さ $100 \mu\text{m}$ のシリコン基板を完全空乏層化するには、 $300\sim 400 \text{ V}$ の逆バイアス電圧が必要であり、その結果 p-n 接合領域には最大で $3.8 \times 10^5 \text{ V/cm}$ の電場が発生し、その電場によって電子などを引き起こす。HAPD における二次電子増倍は、PMT の多段ダイノードによる増倍とは異なりシリコン内部だけで起こるので、ノイズが少なく、また信号の応答時間も短い。さらに、光子が光電カソード面に到達してから HAPD の出力信号が発生するまでの時間のばらつき (transit time spread; TTS) も、PMT に比べきわめて小さい。ただし、HAPD の増倍率 ($\sim 10^5$) は、PMT より $1\sim 2$ 桁小さいので、低ノイズプリアンプの使用が不可欠である³⁾。

3. HAPD の性能

図5は、波長 441 nm のパルスレーザーに対する HAPD 信号の波高分布で、1光子のピークがはっきりとノイズから分離されて見えており、6光子に対応するピークまでが個別に見えている⁴⁾。1光子ピークの S/N 比は約 10 である。この HAPD の 1光子信号の TTS は 190 ps (1σ 相当) で、PMT に比べ非常に小さい。表1に HAPD と PMT の性能の比較をまとめた。HAPD は波高分解能、時間分解能、集光効率で PMT よりすぐれている。その結果、HAPD は

表1 HAPD と PMT (口径 13 インチ) の性能の比較.

	HAPD	PMT
1光子波高分解能	24%	70%
1光子時間分解能 (TTS)	190 ps (σ)	1400 ps (σ)
量子効率	20~30%	20~30%
集光効率	97%	70%
増倍率	10^5	10^7

応答が早く時間分解能がよい 1光子感度のある光センサーとなる。さらに、PMT に比べ電子増倍部分の部品数が少なく量産に向いているため、大幅な低コスト化が期待されている。また、大きな光電カソード面をもった HAPD を製作可能であるため、フォトダイオードなどを使って (光電カソード面なしで) 半導体だけで受光するのに比べ、大きな感度面積を確保することができる。以上の理由で、HAPD は次世代大規模ニュートリノ検出器用の有力な光センサーである。また、HAPD の利点を生かした他のさまざまな応用も検討されている。

この開発研究は、科学技術振興機構 (JST) 産学イノベーション加速事業「先端計測分析技術・機器開発」(SENTAN) の助成を受けた。

文 献

- 1) M. Suyama: "Development of a multi-pixel photon sensor with single-photon sensitivity," 総合研究大学院大学学位論文, KEK report (2003) 2002-16.
- 2) Y. Kawai, H. Nakayama, A. Kusaka, H. Kakuno, T. Abe, M. Iwasaki, H. Aihara, M. Tanaka, M. Shiozawa, H. Kyushima and M. Suyama: "Large-aperture hybrid photo-detector," Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, **579** (2007) 42-45.
- 3) T. Abe, H. Aihara, M. Iwasaki, H. Fujimori, K. Kasimura, S. Mineo, T. Uchida, M. Tanaka, Y. Kawai, H. Kyushima, M. Suyama and M. Shiozawa: "R&D status of a large-aperture hybrid avalanche photo-detector," Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, **623** (2010) 279-281.
- 4) H. Nakayama, A. Kusaka, H. Kakuno, T. Abe, M. Iwasaki, H. Aihara, M. Shiozawa, M. Tanaka, H. Kyushima, M. Suyama and Y. Kawai: "Development of a 13-in. hybrid avalanche photo-detector (HAPD) for a next generation water Cherenkov detector," Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, **567** (2006) 172-175.

(2010年12月9日受理)