

# 液体 Ar 光検出器の高感度化

～TPB 蒸着技術の最適化と TSV-MPPC Array の実装～

早稲田大学 先進理工学研究科 物理学及応用物理学専攻  
寄田浩平研究室 青山一天

## 1 研究背景

暗黒物質は天文学的観測によって存在が強く示唆されているが未だに直接的な発見には至っておらず、その探索は現代物理学の最重要課題の一つである。暗黒物質の候補はいくつかあるが、特に Weakly Interactive Massive Particle (WIMP) は有力候補の 1 つであり、多種多様な標的媒質/手法を用いて多くのグループが探索を行っている。液体 Ar(以下, LAr) を標的に用いる実験に注目すると、DarkSide-50 が S2-Only 解析で  $10 \sim 100 \text{ GeV}/c^2$ ,  $\sim 10^{-40} \text{ cm}^2$  の領域 (いわゆる DAMA 領域) は棄却しているが [1], 背景事象が 0 の環境での探索は行えていない。そのため、DarkSide 実験の検証を行い、かつ、発見が可能な 0BG 手法で直接探索をするという意味でも、LAr を用いて DAMA 領域の検証を行うことは重要だと考えている。

そこで、早稲田大学寄田研究室の ANKOK 実験グループは WIMP の発見を目指し、西早稲田キャンパスの半地下にテストスタンドを構築し実験を進めている。ANKOK 実験の物理目標は図 1.1 に示す領域である。この領域を探索する場合、比較的質量が大きい  $100 \text{ GeV}/c^2$  の WIMP と比較して Ar 原子核と WIMP の反跳エネルギーが小さいため、エネルギー閾値を下げることで検出の鍵となる。

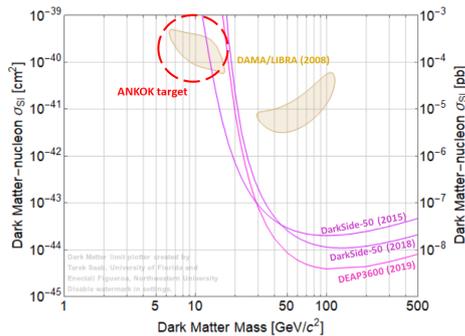


図 1.1: ANKOK 実験の物理目標

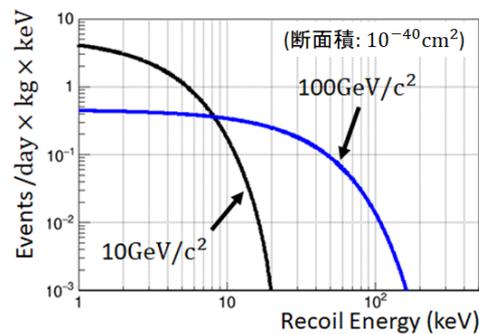


図 1.2: Ar-WIMP 反跳エネルギー

現状、ANKOK 実験では放射性  $\beta$  線源の  $^{39}\text{Ar}$  がエネルギー閾値を下げられない主要因になっており、 $^{39}\text{Ar}$  は内部背景事象であるため解析的に除去する必要がある。ANKOK 実験では Ar と検出器への入射粒子の散乱を LAr 光を見ることで検出している。LAr 光は  $^{39}\text{Ar}$  イベントと WIMP-Ar 原子核反跳イベントで蛍光波形が異なるため波形弁別 (PSD) をすることができる。検出光量が多いほど PSD 能力は高くなるため、光収集効率を改善することにより WIMP 探索感度が向上する。

## 2 LAr 検出器の光収集効率

LAr の蛍光波長は真空紫外光の 128 nm と短く、LAr の極低温環境下 (87 K) で検出器を運用するため、LAr 光の検出は困難である。LAr 温度で駆動可能な PMT では、直接 LAr 光に感度を持つタイプよりも、可視光に感度を持つタイプの方が光検出効率が高い。そのため、光収集効率に着目する場合には、波長変換材を用いて LAr 光を可視光に変換した方が有利であり、LAr 光を利用する多くの実験では波長変換材の TPB を用いる手法が採用されている。ANKOK 実験でも TPB を用いており、薄膜形成手法の真空蒸着法により検出器内壁全体に塗布し、その変換光 (420 nm) を検出している。この手法では、「波長変換効率」と「検出器窓面に塗布した TPB の可視光透過率」の積を最大

化することにより検出光量が向上する。本研究では、再現性のある TPB 塗布が行える真空蒸着装置を構築し、TPB 蒸着量を最適化した。

一方で、光検出デバイスの感度は高いほど収集効率が改善する。現状用いている PMT の光検出効率は 30%程度だが、半導体検出器の MPPC (Hamamatsu) の可視光に対して感度が高いタイプは 60%以上の検出効率を持つ。しかし、MPPC に置き換える場合にはチャンネル数の増大や低温耐性などの課題があるために簡単ではない。そこで本研究では、MPPC のチャンネル接続回路基板の製作や低温耐性試験など、MPPC を LAr 検出器へ実装するための R&D も行った。

本論文では、大光量化による LAr 検出器の高感度化に主眼を置き行った「TPB 蒸着技術の最適化」と「TSV-MPPC Array の実装」について報告する。

### 3 TPB 蒸着技術の最適化

波長変換材の TPB は真空蒸着法で検出器内壁全体に塗布をする。そのため、図 3.1 に示すような真空蒸着装置を自作した。真空蒸着装置は、真空容器、排気系、るつぼ、蒸着基板を保持する治具、DC 電圧源、各種モニター系で構成している。この装置では、DC 電圧・るつぼ温度・内圧をモニターし、蒸着プロセスのコントロールを電圧のみで行うことにより再現性を確保している。また、水晶振動子 (QCM センサー) を用いて蒸着量も測定しており、これにより再現性を保証する。使用する TPB 量と蒸着量には線形の関係があり、蒸着量に付いてもコントロールできる (図 3.1 の右図)。

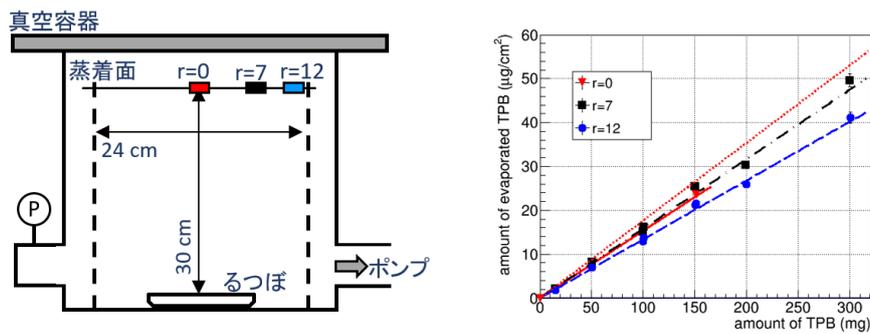


図 3.1: TPB 真空蒸着装置概略図と蒸着量測定結果

次に、TPB 蒸着量と可視光透過率または波長変換効率の関係を評価し、検出器への TPB 蒸着量を決定した。波長変換効率測定ではガス Ar 蛍光を、可視光透過率測定では青色 LED 光を光源として用いた。蒸着量を変えたアクリル円板を複数枚準備し測定を行い、図 3.2 のような結果が得られた。波長変換効率 (青プロット) は TPB 蒸着量が増えると増加し、 $25 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  付近で飽和した。一方で、可視光透過率 (赤プロット) は TPB が多くなるに伴い低下した。この測定結果より約  $30 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  の TPB を蒸着することに決めた。

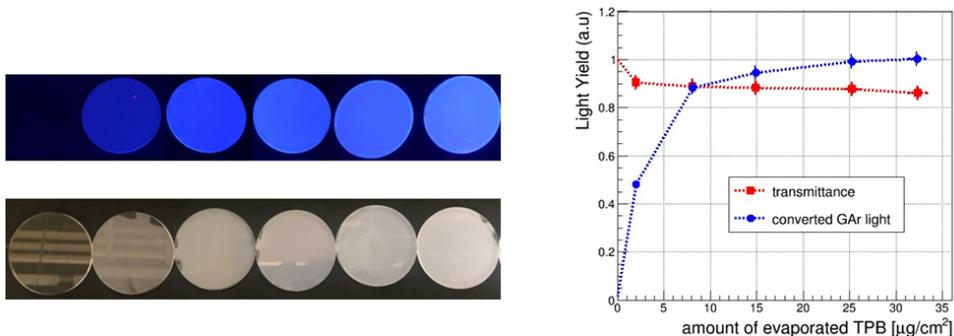


図 3.2: 波長変換効率・可視光透過率の測定結果

## 4 PMT を用いた大光量検出器の構築

次に、1相型 LAr 検出器を構築し、波長変換材 TPB を用いた場合の最大検出光量を確認する。筐体はテフロン (PTFE) で作り、有感領域は直径 6.4 cm、高さ 5 cm の約 160 cm<sup>3</sup> (LAr:約 225 g) の円筒型にした。また、TPB は PMT 窓面には約 30  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、透過率が関係ない検出器側面の反射材には 40  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  を蒸着した。光検出デバイスには QE $\sim$ 30% の PMT (R11065) を 2 本用いている。

検出光量は放射性  $\gamma$  線を照射し、その全吸収ピークから算出した。測定結果を、横軸に  $\gamma$  線のエネルギー、縦軸に検出光量をとった図 4.1 に示す (赤プロット)。TPB 蒸着量の最適化により、他実験の光量 (図 4.1 中の黒点線) よりも大きい、 $11.6 \pm 0.4 \text{ p.e./keVee}$  という世界最大光量を得ることができた。また、LAr の発光量 40 photon/keVee と PMT の QE $\sim$ 30% より、この検出器は PMT の QE 限界に到達していると考えている。

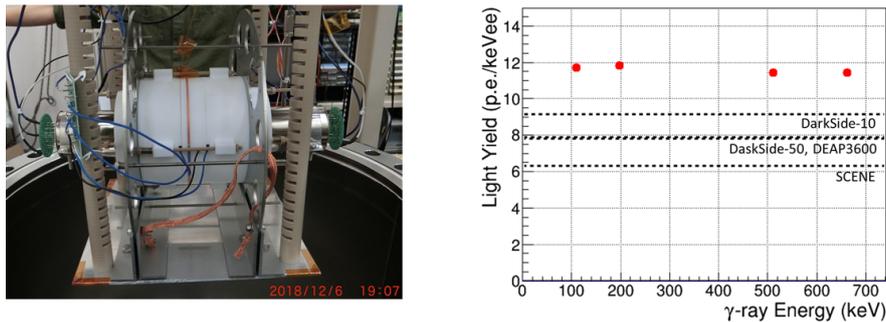


図 4.1: 1 相型 LAr 検出器と光量測定結果

## 5 TSV-MPPC Array の実装

TPB 蒸着技術最適化の結果、検出光量は主に PMT の検出効率にリミットされる状況まで光収集効率を改善することができた。そこで、PMT よりも光子検出効率が高い MPPC を導入し、さらなる検出光量の向上を目指す。MPPC には、光検出効率が最大で 65% になる MPPC 素子を 4 $\times$ 4 個 Array 化したタイプ (S13361-60\*\*AE-04) を使用した。ANKOK 実験では、FADC (SIS3316; 16ch, 250 MHz sampling) を用いて波形データを取得しているが、検出器を構成する 100ch 以上の MPPC 出力を個別に読み出すのは、FADC のチャンネル数から見ても現実的ではない。そこで、MPPC への電圧印加および信号読み出しのチャンネル数を削減できる回路を実装した。製作した基板を図 5.1 に示す。1 枚の基板に

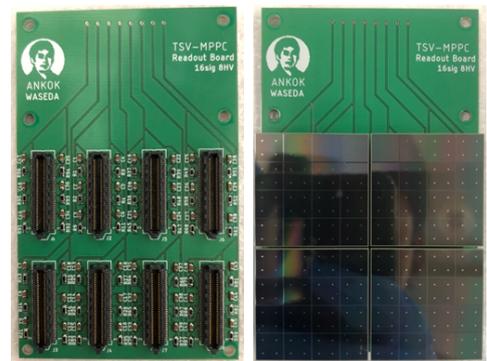


図 5.1: MPPC 読み出し基板

4 枚の Array を実装でき、合計で 64 個の MPPC を駆動できる。接続回路には MEGII 実験で考案されたハイブリット接続 [2] を用いており、4 つの MPPC を 1 信号線で読み出せるようにした。

TSV-MPPC および読み出し基板の低温耐性を液体窒素で確認した後、簡易的な検出器を構築して LAr 試験を行った。光検出デバイスには 8 枚の TSV-MPPC Array を使用しており、向かい合う 2 面に 4 枚ずつ、つまり 2 枚の読み出し基板を配置している。今回の Run は R&D のための実験であったため、MPPC は S13361-6050AE と S13361-6075AE のピクセルピッチが異なる 2 種類を、それぞれの面に分けてアッセンブリした。受光面にはそれぞれ約 30  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  の TPB を、側面の反射材には MPPC よりも多い約 40  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  の TPB を蒸着した。また、検出器直上に放射線源として <sup>241</sup>Am (59.5 keV  $\gamma$  線) を配置している。その結果、図 5.2 に示すように、<sup>241</sup>Am の  $\gamma$  線全吸収ピークを確

認することができた。また、このピークから光量を算出し、 $26.1 \pm 5.2$  p.e./keVee という、従来の実験の 2 倍以上の大光量を検出することに成功した。

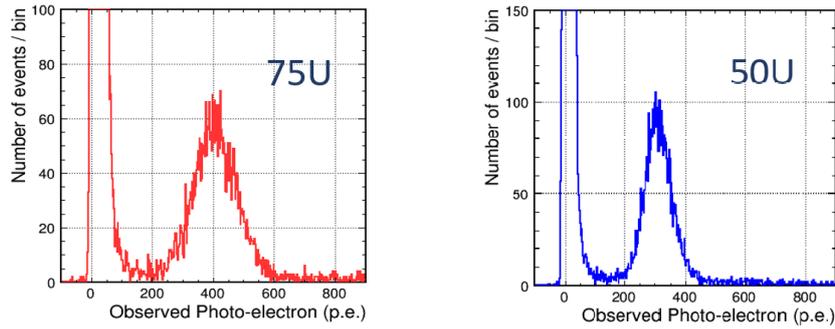


図 5.2:  $^{241}\text{Am}$  (59.5 keV  $\gamma$  線) イベント

## 6 まとめと今後の展望

本研究では、WIMP 直接探索実験の感度向上のために、検出器の大光量化による高感度化に主眼をおき、「TPB 真空蒸着技術の最適化」と「TSV-MPPC Array の実装」を行った。これにより、これまでの世界最大光量 (DarkSide-10 : 9.1 p.e./keVee) を上回る  $11.6 \pm 0.4$  p.e./keVee を達成し、さらに MPPC を導入することで  $26.1 \pm 5.2$  p.e./keVee まで検出光量を向上させることができた。

横軸に反跳エネルギーをとった図 6.1 の左図に、toyMC で見積もった、 $^{39}\text{Ar}$  (黒実線) と  $10 \text{ GeV}/c^2$ ,  $10^{-40} \text{ cm}^2$  (赤破線) を仮定した WIMP のイベント数を示す。ただし、 $^{39}\text{Ar}$  は上から順に、全イベント数, PMT の 11.5 p.e./keVee の検出器の PSD cut, MPPC の 25 p.e./keVee の検出器の PSD cut 後のイベント数に対応する。図 6.1 の左図から明らかなように、MPPC を用いることにより既存の PMT を用いた検出器よりも 10 keVnr で ER 分離能力を 100 倍程度改善できる。また、25 p.e./keVee 以上の大光量検出器では、 $^{39}\text{Ar}$  を 0 イベントまで低減可能である。

そこで、検出器サイズが  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10(\text{or}20) \text{ cm}$  の検出器 (LAr: 約 1.4(or2.8) kg) を用いて、1~2ヶ月程度の Run を行うことで  $50 \text{ kg} \times \text{days}$  の探索実験を行う。図 6.1 の右図に示すように、 $50 \text{ kg} \times \text{days}$  の実験で DAMA 領域に感度を伸ばすことができる。今後、TSV-MPPC を実装した 25 p.e./keVee 以上の大光量検出器を構築し、暗黒物質探索 Run を行う予定である。

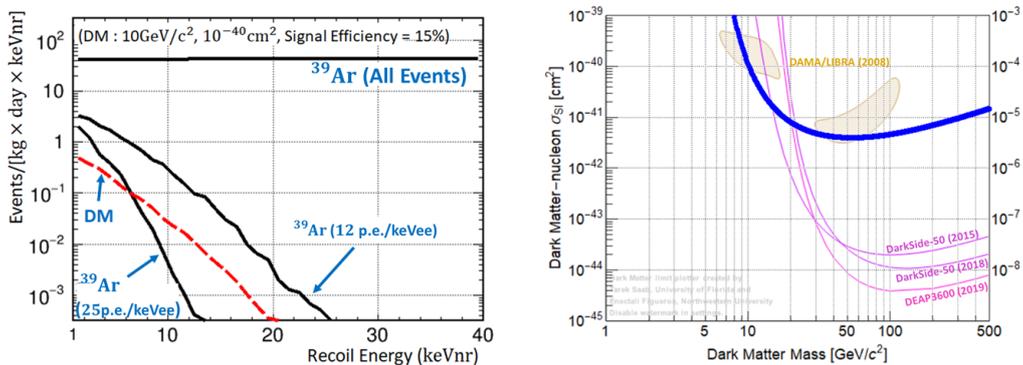


図 6.1: LAr 光の PSD 能力の見積り (左図) と予想探索感度 (右図)

- [1] The DarkSide Collaboration: P. Agnes et al., Phys. Rev. Lett. 121, 081307 (2018)
- [2] K.Ieki et al., Nucl. Instrum. Meth. A **925**, 148 (2019)