修士論文

Ar 蛍光 128nm に直接感度を持つ新型 VUV-MPPC の性能評価

早稲田大学大学院 先進理工学研究科 物理学及応用物理学専攻 修士2年 寄田研究室 学籍番号:5314A004-4

五十嵐 貴弘

2016年2月25日

目次

1		序論	7
	1.1	暗黒物質とは	7
	1.2	暗黒物質探索の現状..............................	8
	1.3	ANKOK 実験	8
	1.3.1	1 アルゴンの特徴	9
	1.3.2	2 アルゴン蛍光の特徴	9
	1.3.3	3 気液 2 相型アルゴン光検出器	10
2		MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) について	13
	2.1	MPPC の構造・動作原理	13
	2.2	MPPC の基礎特性	15
	2.3	MPPC の種類	16
	2.4	VUV MPPC	19
3		VUV MPPC 低温基礎特性試験	22
	3.1	試験に用いた VUV MPPC	22
	3.2	セットアップ・測定方法............................	23
	3.3	ゲイン測定	26
	3.3.1	1 個体比較 (ゲイン)	27
	3.3.2	2 $V_{bd} \cdot C_{pix}$ 測定	28
	3.4	CTAP 率測定	30
	3.4.1	1 個体比較 (CTAP 率)	34
	3.4.2	2 N_{pix} の算出	34
	3.5	可視光に対する PDE 測定..............................	35
	3.6	ダークノイズレート測定............................	36
	3.6.1	1 ダークノイズレート悪化の原因追究	37
4		VUV MPPC 液体アルゴン試験	40
	4.1	液体アルゴン試験に用いた VUV MPPC	40
	4.2	セットアップ・測定方法.............................	40

	4.3	液体アルゴン蛍光の波形	41
	4.4	PDE 測定	42
	4.4.	1 PDE 結果・個体比較	46
5		液体アルゴン用 PMT の性能評価	48
	5.1	光電子増倍管 (PMT)	49
	5.2	液体アルゴン用 PMT:R11065	51
	5.3	常温、低温試験セットアップ	53
	5.4	ゲイン測定	54
	5.5	AP 波形測定	58
6		まとめ・今後の展望	59
7		謝辞	60

表目次

アルゴンと他の希ガスとの比較	9
Ar の同位体	9
販売されてきた MPPC	16
Newest の構成及び特性 (1.3mm × 1.3mm)	17
Newest の構成及び特性 (3mm × 3mm)	17
Newest の構成及び特性 (6mm × 6mm)	18
第 2 世代の構成 (3mm × 3mm)	19
VUV MPPC 特性 (@ 25 ℃)	21
VUV MPPC 情報	22
試験に使用した VUV MPPC	23
VUV MPPC で取得したデータ点@低温基礎特性試験	25
VUV MPPC で取得したデータ点@低温基礎特性試験	26
データ取得の閾値	41
VUV MPPC の積分範囲	43
データからの V _{bd} の見積もりによる系統誤差	47
温度の不定性による系統誤差	47
常温・低温試験を行った R11065	53
	アルゴンと他の希ガスとの比較 Ar の同位体 販売されてきた MPPC Newest の構成及び特性 (1.3mm × 1.3mm) Newest の構成及び特性 (3mm × 3mm) Newest の構成及び特性 (6mm × 6mm) Newest の構成 (3mm × 3mm) Newest の構成 (25 $^{\circ}$) VUV MPPC 特性 (@ 25 $^{\circ}$) VUV MPPC 情報 試験に使用した VUV MPPC VUV MPPC で取得したデータ点@低温基礎特性試験 ジUV MPPC で取得したデータ点@低温基礎特性試験 データ取得の閾値 VUV MPPC の積分範囲 データからの V_{bd} の見積もりによる系統誤差 温度の不定性による系統誤差 常温・低温試験を行った R11065

図目次

1.1	暗黒物質探索の現状.............................	8
1.2	アルゴン蛍光の発光波長分布 [1],[2],[3]	10
1.3	気液2相型アルゴン光検出器	11
1.4	(左) アルゴン蛍光波形 (右)S1 と S2 の光量比の概念	11
2.1	(左) APD の構造 (右) APD の動作 (ガイガーモード)	14
2.2	(左)MPPC 等価回路図 (右)MPPC による検出光子数分布	14
2.3	(左) セラミック型 (Newest) (右) 表面実装型 (Newest)	16
2.4	Newest の各オーバー電圧 (V_o) における特性 (左からピクセルピッチが	
	$25\mu m, 50\mu m, 75\mu m)$	18
2.5	第 2 世代の各 <i>V_o</i> における特性 (左から増倍率、PDE、CT 率)	19

2.6	VUV MPPC \mathcal{O} PDE \ldots
2.7	VUV MPPC の構造
2.8	VUV MPPC の動作回路
3.1	低温基礎試験セットアップ...........................
3.2	VUV2 ①低温基礎試験温度コントロールプロット
3.3	VUV3(50UM) 低温基礎試験温度コントロールプロット
3.4	VUV3(100UM) 低温基礎試験温度コントロールプロット
3.5	(左)VUV2 ①の平均波形 (中)VUV3-50U の平均波形 (右)VUV3-
	100U の平均波形
3.6	(左)VUV2 ①の電荷分布 (中)VUV3-50U の電荷分布 (右)VUV3-
	100U の電荷分布
3.7	VUV2 ①のゲイン
3.8	VUV3-50U のゲイン
3.9	VUV3-100U のゲイン
3.10	VUV MPPC 基礎特性 個体比較
3.11	$(左)V_{bd}$ の温度依存 $(右)C_{pix}$ の温度依存 $\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots$
3.12	(左)VUV2 ①の電荷分布 (中)VUV3-50U の電荷分布 (右)VUV3-
	100U の電荷分布
3.13	VUV2 ①の CTAP 率 \dots
3.14	VUV3-50U の CTAP 率
3.15	VUV3-100U の CTAP 率
3.16	(左)VUV2 ①のピーク値分布 (中)VUV3-50U のピーク値分布
	(右)VUV3-100U のピーク値分布
3.17	(左)VUV2 ①の CTAP 比較 (中)VUV3-50U の CTAP 比較
	(右)VUV3-100U の CTAP 比較
3.18	VUV MPPC 基礎特性 個体比較
3.19	$V_o vs N_{pix}$ の比較
3.20	各 VUV MPPC の相対 PDE
3.21	VUV2①の Dark Rate 温度依存
3.22	VUV3 の Dark Rate 悪化
3.23	(左)VUV3 の Dark Rate@保存環境 (右)VUV3 の Dark Rate@a 線源
4.1	液体アルゴン蛍光直接検出試験セットアップ

4.2	(左)VUV2 ②の 1 イベント (中)VUV3-50U の 1 イベント	
	(右)VUV3-100U の 1 イベント	42
4.3	(左)VUV2 ②の平均波形 (中)VUV3-50U の平均波形 (右)VUV3-	
	100U の平均波形	42
4.4	VUV MPPC の total 電荷分布@ Vo=3V	43
4.5	(左)VUV2 50U 印可電圧 vs 電荷 (液体アルゴン試験) (右) 液体アル	
	ゴン試験と低温基礎試験の電荷比較.............	44
4.6	(左)VUV3 50U SPP 電荷分布 (右)VUV3 100U SPP 電荷分布	45
4.7	(左)VUV3 50U SPP vs V (右)VUV3 100U SPP vs V	45
4.8	(左)VUV3 50U ピーク分布 (右)VUV3 100U ピーク分布	46
4.9	(左)VUV3 50U Peak vs V (右)VUV3 100U Peak vs V	46
4.10	VUV MPPC PDE@128nm	48
5.1	PMT の構造	49
5.2	PMT 窓材の透過率	50
5.3	(左)R11065 の写真 (右)R11065 の QE	51
5.4	R11065 用デバイダー回路	52
5.5	液体 Xe 用 PMT(R11410) の AP 波形	52
5.6	常温・低温試験セットアップ	53
5.7	J06 低温試験温度コントロールプロット............	54
5.8	J07 低温試験温度コントロールプロット............	54
5.9	データ取得時のゲート幅	55
5.10	J06 ADC 分布@常温 (アンプ無し)	56
5.11	J06 ADC 分布@常温 (アンプ有り)	56
5.12	J06 ゲイン測定結果 (左:常温、右:-190 ℃)	57
5.13	J07 ゲイン測定結果 (左:常温、右:-190 ℃)	57
5.14	(左)J06 AP 波形 (右)J07 AP 波形	58

概要

本研究室ではアルゴンを用いた気液2相型光検出器による低質量領域の暗黒物質の直接探 索を目標に研究開発を進めている (ANKOK 実験)。これまで液体アルゴン温度下 (-186

℃)で動作可能かつアルゴン蛍光 (128nm) に直接感度を持つ光検出器がなかったため、 波長変換剤を用いて可視光に変換して検出を行ていたが、この手法だと光量の減少や発光

位置情報の悪化といったデメリットがある。これらを解消する光検出器の候補として VUV-MPPC(Vacuum Ultra Violet Multi-Pixel Photon Counter)がある。これは浜松 ホトニクス社と共同で開発を行っている新型の MPPC である。市販の MPPC は 300~ 900nm に感度を持つがアルゴン蛍光には直接感度を持たないのに対し、VUV-MPPC は 表面保護樹脂を無くすなどの工夫により、アルゴン蛍光に直接感度を持つよう開発された

ものである。これまで開発された VUV-MPPC は複数あり、本研究では VUV2、 VUV3-50U、VUV3-100U と呼んでいる個体について、低温における基礎特性及び液体 アルゴン蛍光に対する検出感度 (PDE) を測定することで、ANKOK 実験で用いるために VUV-MPPC の性能を評価することを目的としている。

低温基礎特性試験からは VUV3 において V_o が 2V 以下であれば、CrossTalk、After Pulse の影響を受けることなく PMT と同等のゲイン (~10⁶) まで上げることができると 分かった。液体アルゴン試験では、VUV2、VUV3 ともに液体アルゴン蛍光の直接検出に 成功した。また、液体アルゴン蛍光に対する PDE として最大 12 %を得ることができた。 これらの結果から VUV MPPC は ANKOK 実験にとって非常に有用な光検出器である ことが分かった。

1 序論

1.1 暗黒物質とは

暗黒物質とは、光学的には観測されないが質量をもつ粒子である。暗黒物質の存在を最 初に予言をしたのは、1933年のフリッツ・ツヴィッキーである。かみのけ座銀河内の銀 河が大きな速度分散をもっており重力だけで説明できない観測結果から暗黒物質の存在が 予言された。銀河の回転速度はケプラーの法則から式 1.1 で表わされる。

$$\frac{v(r)^2}{r} = \frac{GM(r)}{r^2}$$
(1.1)

Gは万有引力定数、rは銀河中心からの距離、M(r)は半径r内に含まれる全質量である。 ここで、観測された表面輝度より銀河の中心に推定される物質の質量が集中し、遠方では $M(r) \simeq \text{const}$ 、式 1.2 となる。

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}} \simeq const$$
 (1.2)

式 1.2 から質量分布 *M*(*r*) は *r* に比例していることが分かる。これは、銀河内には観 測することができない物質が存在していると思われる。また、その総重量が銀河質量のス ケールに匹敵することを示唆している。さらに、重力レンズなどの観測によって暗黒物質 の存在は明らかである。

暗黒物質の候補は電磁相互作用と強い相互作用をせず質量をもつ物質があげられる。また、WMAP による宇宙背景放射の観測結果からある程度の暗黒物質の宇宙物質重量比も 判明している。暗黒物質として有力な候補の一つは標準理論を越えたモデルで予言される 粒子の WIMP (Weakly Interacting Massive Particles) である。暗黒物質の探索には複 数種類があり、以下のものがある。

・加速器検出:加速器を用いて暗黒物質を生成し、missing mass を発見することに より暗黒物質探索を行っている。現在、LEP/TEVATRON では発見されなかったので CERN の LHC 実験が期待されている。

・間接検出:間接検出として、スーパーカミオカンデ実験などの地下検出器を用いた実験や Pamera、Fermi などの衛星を用いた実験がある。これらの実験は地球や太陽に貯蔵 された WIMP の対消滅による生成物の高エネルギーニュートリノを検出している。

・直接検出:直接探索は WIMP と標的原子核との弾性散乱、非弾性散乱を用いて検出 を行っている。検出器としては、シンチレーション検出器、イオン化検出器などがある。 本研究室では WIMP をターゲットとした暗黒物質の直接探索を行っている。次に、 WIMP をターゲットとした暗黒物質の直接探索の現状について説明する。

1.2 暗黒物質探索の現状

現在、暗黒物質の直接探索は図 1.1 のようになっている。横軸が WIMP の質量、縦軸 が反応断面積となっている。図 1.1 の曲線はそれより上の領域での存在を棄却する実験グ



図 1.1 暗黒物質探索の現状

ループ、線で囲まれているのはその領域内に存在すると主張する実験グループを表してい る。WIMP の質量が 10GeV/c² 付近では、存在を主張する実験グループと棄却する実験 グループが入り混じった、混沌とした状況となっている。

1.3 ANKOK 実験

WIMP をターゲットとした暗黒物質の直接探索では 10GeV/c² 付近に対してアルゴ ンを用いた実験はまだ感度を持っていない。本研究室では Ar を用いた気液 2 相型光検 出器でこの領域を探索することを目標とし、検出器の設計・開発を行っている。これを ANKOK 実験と呼んでいる。

1.3.1 アルゴンの特徴

アルゴンは、原子番号 18 の希ガス元素で不活性ガスとして知られている。地球の大気 中で3番目に多く含まれる気体で、0.94 %の割合で存在している。他の希ガスと比べる と存在量が多いため安価で手に入れやすい気体である。また、複数の同位体が存在してい る。表 1.1 はアルゴンと他の希ガスを比較したもの、表 1.2 はアルゴンの同位体について まとめたものである。

原子	He	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn
原子番号	2	10	18	36	54	86
原子量 (g/mol)	4.002	20.18	39.95	88.80	131.29	222.02
密度 (g/L)	0.1786	0.9002	1.784	3.749	5.894	9.73
融点 (℃)	-272.20	-248.59	-189.35	-157.36	-111.7	-96.07
沸点 (℃)	-268.93	-246.08	-185.85	-153.22	-108.12	-79.1

表 1.1 アルゴンと他の希ガスとの比較

表 1.2 Ar の同位体

同位体	天然存在比	半減期	崩壊	崩壊エネルギー	崩壊
			モード	(MeV)	生成物
³⁶ Ar	0.337 %		安定		
³⁷ Ar	人工放射性物質	$35 \mathrm{~day}$	З	0.813	³⁷ Cl
³⁸ Ar	0.063 %	安定			
³⁹ Ar	放射性同位体	269 year	β -	0.565	³⁹ K
⁴⁰ Ar	99.600 %	安定			
⁴¹ Ar	人工放射性物質	109.34 min	β -	2.49	$^{41}\mathrm{K}$
$^{42}\mathrm{Ar}$	人工放射性物質	32.9 year	β -	0.600	$^{42}\mathrm{K}$

1.3.2 アルゴン蛍光の特徴

アルゴン蛍光の発光機構は励起と再結合の二つに分けられる。以下の式はそれぞれの発 光を機構を表したものである。 ・励起光の発光機構

$$Ar^* + Ar \to Ar_2^* \tag{1.3}$$

$$Ar_2^* \to 2Ar + h\nu \tag{1.4}$$

・再結合光の発光機構

$$Ar^+ + Ar \to Ar_2^+ \tag{1.5}$$

$$Ar_2^+ + e^- \to Ar^{**} + Ar \tag{1.6}$$

$$Ar + Ar^{**} \rightarrow Ar^* + heat \tag{1.7}$$

$$Ar + Ar^* \to Ar_2^* \tag{1.8}$$

$$Ar_2^* \to 2Ar + h\nu \tag{1.9}$$

アルゴン蛍光は Ar_2^* の励起状態の違い (singlet state、triplet states) によって早い成分 (fast) と遅い成分 (slow) の 2 成分が存在する。また、発光波長分布は図 1.2 のようになっている。



図 1.2 アルゴン蛍光の発光波長分布 [1],[2],[3]

1.3.3 気液2相型アルゴン光検出器

本研究室で設計・開発を行っている気液2相型アルゴン光検出器について説明する。図 1.3 は気液2相型アルゴン光検出器の反応の概念図である。粒子が検出器内部に入射し、 アルゴンと相互作用すると液体アルゴンの励起による1次シンチレーション光(S1)とイ オン化による電離電子が発生する。また、電離電子をドリフト電場により気相までドリフ トさせ、気相で取りだし電場によってさらに加速させるとガスアルゴンを励起させ 2 次シ ンチレーション光 (S2) が発生する。検出器の上下部に光検出器 (PMT) が設置しており、 上下の PMT で S1、S2 信号を検出している。この検出器は S1 信号 (図 1.4 左) を用いた 波形分別や S1 と S2 の光量比 (図 1.4 右) が原子核反跳事象 (暗黒物質、中性子) と電子反 跳事象 (β 、 γ) で異なることを用いることで β や γ の背景事象を除去できる特徴がある。 また、S2 を用いることで S1 の発光位置の分解能を向上することが出来る



図 1.3 気液 2 相型アルゴン光検出器



図 1.4 (左) アルゴン蛍光波形 (右)S1 と S2 の光量比の概念

これまで液体アルゴン温度 (-186 ℃) でアルゴン蛍光 (128nm) を直接検出できる光検 出器が存在しなかった。ANOK 実験では波長変換剤をもちいてアルゴン蛍光を可視光 (420nm) に変換することで検出してきた。しかし、波長変換剤を用いてアルゴン蛍光を 間接的に検出しているため、検出光量の低下、発光の位置情報が悪くなってしまうといっ たデメリットがある。これを解決できる光検出器の候補として MPPC が挙げられる。次 章以降では、MPPC の動作原理・開発中の新型 MPPC などについて説明していく。

2 MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) について

MPPC とは浜松ホトニクス社が開発している小型の半導体光検出器で、ガイガーモー ドで動作するピクセル化した複数の APD から構成されている。主な特徴として、小型 (~mm サイズ)、数十 V で光電子増倍管と同等の Gain(~10⁶)、フォトンカウンティング に優れていることがある。また近年、液体アルゴン温度で動作しアルゴン蛍光を直接検出 できる MPPC(VUV MPPC と呼ぶ)が開発されてきている。本章では MPPC の動作原 理、基礎特性、種類、VUV MPPC について説明する。次章以降では、VUV MPPC の 基礎特性試験及び液体アルゴン直接検出試験について述べる。

2.1 MPPC の構造・動作原理

いる。

まずは、MPPC を構成している APD(アバランシェフォトダイオード) について説明 する。APD とは、逆電圧を印加しガイガーモードで動作させるフォトダイオードである。 構造は図 2.1 の左のようになっており、逆電圧を印加することにより内部で高電場領域 (アバランシェ層) を形成している。APD に光子が入射したとき、電子-正孔対が発生す る。内部で形成されている電場によって電子は N 側、正孔は P 側にドリフトしていく。 この時、電子はアバランシェ層で雪崩増幅を起こし信号として出力される。この時の増倍 率は、印可電圧を上げていくごとに上昇していき、最初は入射した光子数に対し出力され る信号は比例する。しかしある印可電圧を超えた時、アバランシェ層で放電現象が発生 し、入射した光子数に依らず一定量の信号を出力する。この電圧値をブレイクダウン電圧 (*V*_{bd}) と呼び、*V*_{bd} 以上で動作させることをガイガーモードと呼ぶ。この時、APD から出 力される信号量 *Q*_{pix} は、式 2.1 のように印可電圧に比例している (図 2.1 の右)。 *V*:印可電圧、*C*_{pix}:1ピクセルのキャパシタンス、*V*_{bd}:ブレイクダウン電圧を表して

$$Q_{pix} = C_{pix} \times (V - V_{bd}) \tag{2.1}$$

MPPC はガイガーモードの APD とクエンチング抵抗を直列に繋げたものを1つのピク セルとしており、複数のピクセルからなっている。あるピクセルに光子が入射し、雪崩増 幅で増幅された電子が流れた時、クエンチング抵抗によって電圧降下が起き、電子の増幅 が収まるようになっている。MPPC の等価回路は図 2.2 の左のようになっており、1つ のピクセルが光子を検出した時、出力される信号量は式 2.1 に従い一定量の信号量を出力 される。つまり、MPPC に N 個の光子が入射した時、MPPC から出力される信号量は



図 2.1 (左) APD の構造 (右) APD の動作 (ガイガーモード)

N × Q_{pix} のように検出光子数に比例するため MPPC で光子を検出した時、図 2.2 の右の ような分布を得ることができ、検出光子数を数えることが出来る。ただし、検出できる光 子数はピクセル数によって上限が決まる。



図 2.2 (左)MPPC 等価回路図 (右)MPPC による検出光子数分布

2.2 MPPC の基礎特性

MPPC には様々な特性がある。その特性について説明する。

・ダークノイズ

MPPC に電圧を印加しているとき、光子が入射しなくても信号が出力されることがある。 これをダークノイズと呼ぶ。ダークノイズは共有電子が熱的に励起しシリコンのバンド ギャップ (1.1eV) を超えた時、電子-正孔対を生成することで発生する。他の要因として トンネル効果によるものがある。トンネル効果によって電子が価電子帯から伝導体へ超え ることによって電子-正孔対を生成しダークノイズを出力してしまう。MPPC のダークノ イズは常温で~数百 kHz 程度存在する。

・クロストーク (CT)

MPPC に光子が入射し電子による雪崩増幅が起きるとき、増幅中に 2 次光子が放出され ることがある。この 2 次光子が別のピクセルに吸収され電子-正孔対を作り雪崩増幅を起 こしてしまう。つまり光子が 1 つ入射した時、出力される信号量が光子 2 つ分になってし まうことがある。これをクロストークと呼ぶ。

・アフターパルス (AP)

MPPC のシリコン結晶内には共有結合が作られていない格子 (欠陥格子) が存在する。 MPPC に光子が入射し、雪崩増幅によって電子-正孔対が多数生成されたとき、キャリア の一部が欠陥格子に束縛されることがある。欠陥格子から束縛されたキャリアが放出され た時、このキャリアによる雪崩増幅を起こし、最初に出力される信号とは別の信号として 遅れて出力される。これをアフターパルスと呼ぶ。アフターパルスはクロストークとは異 なり同一のピクセル内で発生する。

・検出効率 (PDE)

PDE とは発生光子数に対し検出器が検出できる光子数の割合のことである。MPPC にお ける PDE は次の要素によって決まる。各波長における吸収長、開口率、キャリアのドリ フト速度、各ピクセルの電場分布、イオン化係数である。また PDE は式 4.1 のように表 される。

$$PDE = 量子効率 × 開口率 × アバランシェ確率$$
 (2.2)

2.3 MPPC の種類

これまで浜松ホトニクス社が販売してきた MPPC は表 2.1 のようになっている。第1 世代から第2世代ではクエンチ抵抗をメタルに変えることで、温度変化によるに MPPC 信号の時定数の変化が抑えられている。第2世代までは窓材がケースと異なり材質の熱収 縮率が異なったため、低温にした時に破損してしまう。Latest、Newest では、CT 抑制を 溝を掘るものからシールドに変えられており、窓材がシリコン樹脂のものとなっている。 窓材がケースと同じ素材のものとなっているため、低温にした時破損せずに動作させるこ とが可能であると思われる。また Latest から Newest では開口率の改善が施されている。

表 2.1 販売されてきた MPPC

通称	型番	クエンチ抵抗	AP 抑制	CT 抑制	窓材	開口率 (%)
						ピクセルピッチ=50μm
第1世代	S10362-*	ポリシリコン	×	×	エポキシ樹脂	61.5
第2世代	S12572-*	メタル	\bigcirc	×	エポキシ樹脂	62
Latest	S13081-*	メタル	\bigcirc	シールド	シリコン樹脂	61
Newest	S13360-*	メタル	\bigcirc	シールド	シリコン樹脂	74

MPPC の構成にもさまざまな種類がある。MPPC の実装方法としてセラミック型と表 面実装型の2種類があり、有効受光面のサイズは1.3mm×1.3mm、3mm×3mm、6mm
× 6mm など様々な大きさがある。図 2.3 はセラミック型と表面実装型の 3mm×3mm、 75μm ピッチの MPPC の写真である。



図 2.3 (左) セラミック型 (Newest) (右) 表面実装型 (Newest)

また種類によって、特性が異なっている。表 2.2、表 2.3、表 2.4、図 2.4 は 2015 年に 新しく販売された Newest の構成及びその特性である [11]。前の世代 (Latest) と異なる 点は開口率を上げたことによる検出効率の向上である。(3mm × 3mm、50µm ピッチの もので開口率が 61 %から 74 %に上昇)。Newest の各特性についてみてみると受光面の サイズ、ピクセル数、ピクセルピッチによって MPPC の開口率やダークノイズレート端 子間容量が異なっている。感度波長域及び Vbd はサイズに依らず同じとなっている。

	, 13117 (T	.011111	1.011111)
項目			
ピクセルピッチ (μm)	25	50	75
ピクセル数	2668	667	285
開口率 (%)	47	74	82
感度波長 (nm)	$270 \sim$	900(320	$) \sim 900)$
ダークノイズ (kHz)	70	90	90
端子間容量 (pF)		60	
$V_{bd}(\mathrm{V})$		53+/-	5

表 2.2 Newest の構成及び特性 (1.3mm × 1.3mm)

表 2.3 Newest の構成及び特性 (3mm × 3mm)

項目			
ピクセルピッチ (μm)	25	50	75
ピクセル数	14400	3600	1600
開口率 (%)	47	74	82
感度波長 (nm)	2°	$70 \sim 900$)
ダークノイズ (kHz)	400	500	500
端子間容量 (pF)		320	
$V_{bd}({ m V})$	į	53 + / -5	

項目			
ピクセルピッチ (μm)	25	50	75
ピクセル数	57600	14400	6400
開口率 (%)	47	74	82
感度波長 (nm)	2	$270 \sim 900$	
ダークノイズ (kHz)	1600	2000	1000
端子間容量 (pF)		1280	
$V_{bd}(V)$		53 + / -5	

表 2.4 Newest の構成及び特性 (6mm× 6mm)



図 2.4 Newest の各オーバー電圧 (V_o) における特性 (左からピクセルピッチが 25μ m, 50μ m, 75μ m)

ANKOK 実験が所持している MPPC は 3mm × 3mm の第 2 世代である。この世代の 構成及び特性は表 2.5、図 2.5 のようになっている [12]。第 1 世代と異なる点は、Low AP 及びクエンチ抵抗の変更 (ポリシリコン抵抗→金属抵抗) である。クエンチ抵抗を金属抵 抗に変えたことによって MPPC の時定数が温度に依存しなくなった [13]。 我々が所持しているものから最新の MPPC の感度波長を見て分かるように、アルゴン蛍 光に直接感度を持っていないことが分かる。しかし最初にも述べたように近年アルゴン 蛍光に直接感度を持つ MPPC が開発されてきており、そのサンプルを浜松ホトニクス 社から提供していただき、共同で開発を行っている。次に現在開発を行っている新型の

MPPC の種類及び特性について説明していく。

項目			
ピクセルピッチ (μm)	25	50	100
ピクセル数	14400	3600	900
開口率 (%)	65	62	78
感度波長 (nm)	32	20~900	
ダークノイズ (kHz)		1000	
端子間容量 (pF)		320	
$V_{bd}(\mathrm{V})$	65	5+/-10	

表 2.5 第 2 世代の構成 (3mm × 3mm)



図 2.5 第2世代の各 Vo における特性 (左から増倍率、PDE、CT 率)

2.4 VUV MPPC

現在、浜松ホトニクスと共同でアルゴン蛍光に直接感度を持つ MPPC の開発が行なっ ており ANKOK 実験で試験・評価を行っている MPPC を VUV MPPC と呼んでいる。 この MPPC は表面の保護樹脂を無くすなどの工夫によりアルゴン蛍光に直接感度を持た せたものである。また表面保護樹脂がないため低温で壊れずに安定に動作することが出来 るため、ANKOK 実験で利用できる可能性を秘めている。VUV MPPC の構造は図 2.7 のようになっている。また動作させるためには、図 2.8 の回路を用いる。これは可視光に 感度を持つ MPPC を動作させるための回路と同じものとなっている。

これまでに、浜松ホトニクスと共同で開発を行ってきた VUV MPPC の基礎特性は表 2.6 のようになっており、それぞれの個体で行ってきた試験は表 2.7 である。初期の UV



PDE

HAMAMATSU

図 2.6 VUV MPPC の PDE



図 2.7 VUV MPPC の構造



図 2.8 VUV MPPC の動作回路

MPPC はアルゴン蛍光に直接感度をもっていなかったが、VUV2 からアルゴン蛍光に直接感度を持っている。また VUV2 から VUV3 では V_{bd} が約 10V 下げられている。主に行った試験は低温に於ける基礎特性試験と液体アルゴンを用いたアルゴン蛍光の直接検出 試験である。本論文では、VUV2 及び VUV3 で行った低温基礎試験、液体アルゴン試験 について説明し、その結果及び ANKOK 実験に対する有用性について報告する。

	シリアル No	呼称	$V_{bd}(\mathbf{V})$	gain	Dark Rate(kHz)
S12754 SAMPLE	A0021	UV MPPC	66.64	1.25×10^6	1700
	A0022	_	66.96	1.25×10^6	2120
3X3MM-50UM VUV2	A0010	VUV2 (1)	66.50	1.25×10^6	572.0
	A0011	VUV2 $\textcircled{2}$	66.77	1.25×10^6	701.0
	A0020	VUV2 α	66.77	1.25×10^6	1196
	A0031	_	67.20	1.25×10^6	610.8
	A0032	VUV2 μ	67.07	1.25×10^6	776.4
	A0033	_	66.91	1.25×10^6	572.5
	A0034	_	66.94	1.25×10^6	605.3
3X3MM-50UM VUV3	A0011	VUV3-50U	54.87	2.00×10^6	674.0
	A0012	—	54.87	2.00×10^6	655.0
3X3MM-100UM VUV3	A0003	VUV3-100U	53.78	5.50×10^6	553.0
	A0004	_	53.90	5.50×10^6	473.0

表 2.6 VUV MPPC 特性 (@ 25 ℃)

型番	シリアル No	呼称	納品日	使用状況
S12754 SAMPLE	A0021	UV MPPC	2013/11/20	低温基礎試験, LAr 試験
	A0022	_	2013/11/20	未使用 (防湿庫で保存中)
3X3MM-50UM VUV2	A0010	VUV2 (1)	2014/5/19	低温基礎試験, LAr 試験
	A0011	VUV2 $\textcircled{2}$	2014/5/19	LAr 試験 (α 線源有) →破損
	A0020	VUV2 α	2014/12/10	LAr 試験 (α 線源有)
	A0031	—	2014/12/10	未使用 (防湿庫で保存中)
	A0032	VUV2 μ	2014/12/10	LAr 試験
	A0033	—	2014/12/10	未使用 (防湿庫で保存中)
	A0034	—	2014/12/10	未使用 (防湿庫で保存中)
3X3MM-50UM VUV3	A0011	VUV3-50U	2015/4/3	低温基礎試験、LAr 試験 (α 線源有)
	A0012	—	2015/4/3	常温 Dark Rate 測定
3X3MM-100UM VUV3	A0003	VUV3-100U	2015/4/3	低温基礎試験、LAr 試験 (α 線源有)
	A0004	_	2015/4/3	常温 Dark Rate 測定

表 2.7 VUV MPPC 情報

3 VUV MPPC 低温基礎特性試験

前章でも述べたように、VUV MPPC は開発中の検出器である。このサンプルを用 いた低温基礎特性試験による評価は行われていないため、性能評価をすることによって ANKOK 実験及び浜松ホトニクス社にとって重要な情報を得ることが出来る。この章で は、VUV MPPC の基礎特性の評価として、ゲイン、AP 率、CT 率、ダークレートの測 定方法及びその結果について述べる。また、温度依存性及び個体比較についても述べてい く。

3.1 試験に用いた VUV MPPC

今回、低温基礎特性試験で用いた VUV MPPC は表 3.1 の 3 つである。これらは受光 面のサイズが 3mm × 3mm のセラミック型のもので、クエンチング抵抗やワイヤーボン ディング部分は市販の MPPC の構造と同様のものである。紫外光に感度を持たせるため の構造として、ピクセルから数ミクロン程度の不感領域があるため開口率が低くなってい る。VUV3-50U と VUV3-100U では VUV2①とは異なりクロストークの抑制が施されて いる。

	シリアル No	呼称	ピクセルピッチ (μm)	ピクセル数	開口率 (%)
3X3MM-50UM VUV2	A0010	VUV2 1	50	3600	~ 40
3X3MM-50UM VUV3	A0011	VUV3-50U	50	3600	~ 40
3X3MM-100UM VUV3	A0003	VUV3-100U	100	900	~ 60

表 3.1 試験に使用した VUV MPPC

3.2 セットアップ・測定方法

低温基礎特性試験のセットアップは図 3.1 のようになっており、主に配管系、温度コン トロール、測定回路の 3 つに分かれており、それぞれが重要な役割を持っている。



図 3.1 低温基礎試験セットアップ

まずは、配管系について説明する。配管系は密閉容器に窒素ガスを充填する配管とガス を密閉容器からガスを放出する配管からなっている。これらの配管は VUV MPPC を冷 やしていく過程では窒素ガスを封入し内圧が負圧にならないようにし、常温に戻す過程 で、陽圧にならないようにガスを放出するためにある。また、窒素ガスを封入する理由は 他にもある。それは、容器内部で空気に含まれる水分が凍結することを防ぐためである。 もし、水分が凍結してしまった場合、VUV MPPC が破損してしまう恐れがある。これを 防ぐために窒素ガスを封入する。 次に、温度コントロールの方法について説明する。VUV MPPC は密閉容器を液体窒素 が入ったオープンバスの中に沈めていくことで徐々に冷やしていく。VUV MPPC の温 度は容器の中にある白金抵抗で常にモニターできるようになっており、VUV MPPC の 真横と容器の底に設置されている。また、容器を冷やしていくときや温めていくときに温 度を調節できるようにリフターを用いており、密閉容器とオープンバスに入っている液体 窒素との距離が調整でき、温度コントロールが出来るようになっている。図 3.2 、図 3.3、 図 3.4 は VUV2①、VUV3-50U、100U の測定を行った時に取得した温度コントロールの プロットである。データを取得する温度では MPPC 付近の温度が一定となるように密閉 容器と液体窒素の距離を調節している。



図 3.2 VUV2 ①低温基礎試験温度コントロールプロット



図 3.3 VUV3(50UM) 低温基礎試験温度コントロールプロット



図 3.4 VUV3(100UM) 低温基礎試験温度コントロールプロット

最後に測定回路について説明する。VUV MPPC には動作及び信号を出力させるために 浜松ホトニクス製の駆動回路 (C12332) が繋がっている。この駆動回路は、印可電圧を 40V~90V で調整でき、内蔵されているアンプで MPPC の信号を約 10 倍に増幅するも のである。光源は LED(415nm)を使用し、LED ドライバー、ファンクションジェネレー タ、直流電源を用いて光らせており、光ファイバーを通して容器内部に光を入れている。 また、LED の目の前に PMT(H1161)を設置しており、LED 光の安定性をモニターでき るようにしている。データ取得はファンクションジェネレータとディスクリミネータを用 いて LED が光ったタイミングをトリガーとして、FADC で行っている。今回の低温基 礎特定試験で取得したデータ点は表 3.2 のようになっている。この時に取得した波形の 例として、図 3.5 がある。これは-190 ℃の時に V_o が約 2.5V の時に取得した VUV2 ①、 VUV3-50U、VUV3-100U の平均波形である。(V_o は、印可電圧と V_{bd} の差)。

呼称	データ取得した温度 (℃)			
VUV2 1	20, -20, -50, -80, -101, -132, -157, -183, -189			
VUV3-50U	23, -4, -55, -98, -155, -186, -195			
VUV3-100U	-3, -51, -100, -150, -196			

表 3.2 VUV MPPC で取得したデータ点@低温基礎特性試験

3 VUV MPPC 低温基礎特性試験



図 3.5 (左)VUV2 ①の平均波形 (中)VUV3-50Uの平均波形 (右)VUV3-100Uの平均波形

3.3 ゲイン測定

ゲイン測定について説明する。MPPC のゲインはガイガーモードで動作する APD の ピクセルによる増倍率で決まり、式 3.1 のように表せ、0p.e. の電荷と 1p.e. の電荷の差か ら算出できる。ここで、 g_{MPPC} は MPPC のゲイン、 Q_{pix} は1ピクセルが出力する電荷、 e は素電荷、 $Q_{1p.e.}$ は1光子検出した時の電荷、 Q_{ped} はペデスタルの電荷を表している。

$$g_{MPPC} = \frac{Q_{pix}}{e} = \frac{Q_{1p.e.} - Q_{ped}}{e}$$
(3.1)

MPPC のゲインは FADC で取得した VUV MPPC の信号波形を積分することで電荷分 布を作成し、電荷分布の 0p.e.、1p.e.、2p.e. の山に対しガウス分布で Fit をすることで 求めることが出来る。0p.e.、1p.e.、2p.e. の電荷は Fit 結果の mean としており、誤差は mean error を付けている。

電荷分布を作成するときの積分範囲は表 3.3 で、1 イベント毎に電荷を求め、ヒストグラ ムに詰めている。図 3.6 は、-190 ℃の時に V_o が約 2.5V の時に取得した各 VUV MPPC の電荷分布である。それぞれの分布で、0p.e.、1p.e.、2p.e. のピークが出来ていることが 確認できる。 同様のことを各 VUV MPPC の各印可電圧、各温度に対し行い得られた結

表 3.3 VUV MPPC で取得したデータ点@低温基礎特性試験

呼称	積分範囲 (ns)
VUV2 (1)	$-20 \sim 120$
VUV3-50U	$-20 \sim 120$
VUV3-100U	$-20 \sim 500$

果が図 3.7、図 3.8、図 3.9 である。それぞれ、常温から-190 ℃までの印可電圧 vs ゲイン



図 3.6 (左)VUV2 ①の電荷分布 (中)VUV3-50U の電荷分布 (右)VUV3-100U の電荷分布

の結果を比較したプロットである。それぞれの結果を見てみると、各 VUV-MPPC のゲ インが印可電圧に比例しており、温度の低下とともにゲインが左にシフトしていくのが分 かる。これは、MPPC で用いている APD の V_{bd} が温度の低下とともに下がっていく特 性を持つため、それが MPPC でも起こったと考えられる。また各 VUV-MPPC のゲイ ンが 10⁶ 以上を得ることできており、ANKOK 実験で用いている光検出器のゲインと同 等のものとなっている。



図 3.7 VUV2 ①のゲイン

3.3.1 個体比較 (ゲイン)

-190 °Cにおける各 VUV MPPC のゲインを比較した結果が図 3.10 である。ピクセルサ イズが同じ VUV2 ①と VUV3-50U では同等のゲインが得られ、ピクセルサイズが 50 μ m から 100 μ m ではゲインが約 4 倍となっているのが分かる。これはピクセルサイズから予 想される通りの結果となっており、次に述べる C_{pix} の結果でもピクセルサイズが 50 μ m



図 3.8 VUV3-50Uのゲイン



図 3.9 VUV3-100U のゲイン

から 100µm で 4 倍になると思われる。

3.3.2 Vbd · Cpix 測定

 $V_{bd} \cdot C_{pix}$ の求め方について説明する。式 2.1、と式 3.1 から MPPC のゲインは式 3.2 のように表すことができ、MPPC のゲインは印可電圧に対し比例で、x 切片が V_{bd} 、傾き が C_{pix} となっていることが分かる。

$$G_{MPPC} = \frac{C_{pix}}{e} \times (V - V_{bd}) \tag{3.2}$$

先程得られた各 VUV-MPPC のゲインの結果から VUV-MPPC の V_{bd} と C_{pix} を傾きと x 切片それぞれからを求めることができる。図 3.11 が得られた V_{bd} 及び C_{pix} の結果であ



図 3.10 VUV MPPC 基礎特性 個体比較

る。各 VUV MPPC 毎に温度比較をするとどの VUV MPPC の V_{bd} は 常温から-190 °Cに なったとき約 10V 下がっており、 C_{pix} は変化が見られなかった。また、各 VUV MPPC の結果を比較していくとピクセルサイズが同じ VUV2①と VUV3-50U では VUV3-50U の方が V_{bd} が約 10V 下がっているのが分かる。 C_{pix} は同等の値が得られた。次にピクセ ルサイズが異なる VUV3-50U と VUV3-100U の比較をする。こちらでは、 V_{bd} に違いは 見られなかったが、 C_{pix} の値が約 4 倍になる結果が得られた。これは、先ほどゲインの 結果の時に予測した通りの結果を得ることが出来た。



図 3.11 (左)Vbd の温度依存 (右)Cpix の温度依存

3.4 CTAP 率測定

CTAP 率測定について説明する。CTAP 率は、式 3.3 のように求める。そのためには、 期待される 1p.e. の事象数と観測される 1p.e. の事象数を求める必要がある。

$$CTAP = 1 - \frac{観測される 1p.e. \, の事象数}{期待される 1p.e. \, の事象数}$$
(3.3)

期待される 1p.e. の事象数は平均光量 μ の時、MPPC が Np.e. 検出する確率 P(N) は式 3.4 のようになる。

$$P(N) = \frac{\mu^N e^{-\mu}}{N!}$$
(3.4)

平均光量が μ のとき 0p.e. 検出する確率 P(0) は式 3.5 のようになる。つまり、0 p.e. の 事象数は全事象数 N_{all} と式 3.5 を用いて式 3.6 のとなり μ を式 3.10 のように求めるこ とが出来る。

$$P(0) = e^{-\mu} (3.5)$$

$$N_{0p.e} = N_{all} \times e^{-\mu} \tag{3.6}$$

また MPPC が 1p.e. を検出する確率は式 3.7 のようになる。つまり事象数は式 3.8 のようになる。 式 3.6 と 式 3.8 から期待される 1p.e. の事象数は式 3.9 ように表すことが出来る。

$$P(1) = \mu e^{-\mu} \tag{3.7}$$

$$N_{1p.e} = N_{all} \times \mu e^{-\mu} \tag{3.8}$$

$$N_{1p.e} = \mu \times N_{0p.e} \tag{3.9}$$

この時 µ の算出は式 3.6 より、式 3.6 となることから求めている。

$$\mu = \log \frac{N_{all}}{N_{0p.e.}} \tag{3.10}$$

MPPC の CTAP 率はゲインと同様に電荷分布に対し、ガウス分布で Fit することで 求めることが出来るが、ゲインの時と電荷分布を求めるときの積分範囲が異なっている。 CTAP 率を求めるときの積分範囲は各 VUV MPPC 共通で-20~600ns となっている。図 3.12 が-190 ℃の時に V_o が約 2.5V の時に取得した各 VUV MPPC の電荷分布である。 得られた分布の 0p.e.、1p.e. の山に対し Fit を行うことで、期待される 1p.e. の事象数、 観測される 1p.e. の事象数を求められ、CTAP 率を求めることが出来る。



図 3.12 (左)VUV2 ①の電荷分布 (中)VUV3-50U の電荷分布 (右)VUV3-100U の電荷分布

図 3.13、図 3.14、図 3.15 が各 VUV MPPC の CTAP 率の温度比較をした結果であ る。どの個体も低温になる程 CTAP 率が高くなる傾向が見られた。特に VUV3-50U で は-155 ℃から-190 ℃の V_o ~3V 以降で CTAP 率の顕著な増加が見られ、 V_o =5V で比較 すると CTAP 率が約 3 倍に増加している。 この増加はラッチングと呼ばれる現象が原因 であると考えられる。ラッチングとは MPPC へ印加する V_o が多い時、クエンチ出来ず にカレントが流れたままになる現象である。常温の MPPC では電圧を印加した時、カレ ントによってクエンチ抵抗が温まり V_{bd} が増加するが、低温時ではカレントによるクエン チ抵抗の温度上昇が起こらず V_{bd} が上昇しないため常温の時より V_o が相対的に高くなる ため、ラッチングによって CTAP 率が上昇していると考えている。

また、AP は主信号から遅れて出力されるのに対し CT は主信号と同じタイミングで出 力されてくる事を利用することで CT 率のみを求めることが出来る。CT 率は取得した MPPC 波形の波高からピーク値分布を求め、CTAP 率と同じ手法を用いることで求める ことが出来る。図 3.16 は-190 ℃の時に *V*_o が約 2.5V の時に取得した各 VUV MPPC の ピーク値分布である。電荷分布と同じように 0p.e.、1p.e.、2p.e. の山に分かれていること が確認できる。

-190 ℃において CTAP 率 (黄緑) と CT 率のみ (赤)、ゲインを求めた時の積分範囲で 求めた CTAP 率 (青) を比較したものが図 3.17 である。CTAP 率を求めた時の積分範 囲 (-20ns~600ns) による CTAP 率とゲインを求めた時の積分範囲 (-20ns~120ns) によ



図 3.13 VUV2 ①の CTAP 率



図 3.14 VUV3-50Uの CTAP 率

る CTAP 率では大きな違いは見られなかったが、CT 率のみと比較すると VUV2 ①では CTAP 率のほとんどが CT 率に支配されており、VUV3 では CTAP 率に対して CT 率は かなり低くなっているのが分かる。これは VUV2 では CT 抑制がなく、VUV3 では CT 抑制が施されているためその効果が顕著に現れていると考えられる。



図 3.15 VUV3-100Uの CTAP 率



図 3.16 (左)VUV2 ①のピーク値分布 (右)VUV3-100Uのピーク値分布

(中)VUV3-50U のピーク値分布



図 3.17 (左)VUV2 ①の CTAP 比較 (中)VUV3-50U の CTAP 比較 (右)VUV3-100U の CTAP 比較

3.4.1 個体比較 (CTAP 率)

-190 °Cにおける各 VUV MPPC の CTAP 率を比較した結果が図 3.18 である。VUV2 では V_o が 1V から急激に CTAP 率が増加しているのに対し、VUV3 では V_o が~2V ま で CTAP 率がほぼ 0 となっており VUV2 と比べるとかなり CTAP 率が抑えられてい るのが分かる。こちらでも、VUV3 の CT 抑制による効果が確認でき、 V_o ~2V までは MPPC が光子を検出した時、CT、AP の効果はほとんど見られないと思われる。



図 3.18 VUV MPPC 基礎特性 個体比較

3.4.2 N_{pix}の算出

 N_{pix} とは1光子入射した時に鳴るピクセル数のことである。APやCTによって検出 光子数が増加することによって N_{pix} が増加してしまう。そのため、入射光子数を正確に 求めることが難しくなってしまう可能性があり、次章で液体アルゴン蛍光に対する PDE を正確に算出する際、重要なパラメーターとなる。 N_{pix} は式 3.11で求めることが出来、 N_p は検出光子数、Qは平均電荷、 μ は平均光量、gはゲイン、eは素電荷を表している。

$$N_{pix} = \frac{N_p}{\mu} = \frac{Q}{\mu \times g \times e} \tag{3.11}$$

 N_{pix} は CTAP 率を求めるときに用いた電荷分布 (図 3.12)の平均値を平均電荷とし、 測定の結果から得られたゲインの値を用いて算出している。図 3.19 は-190 $^{\circ}$ で得られた 結果である。VUV2 ① では $V_o=1$ V から急激に N_{pix} が増加しているのに対し、VUV3-



図 3.19 V_o vs N_{pix} の比較

50U、VUV3-100U では $V_o \sim 2V$ まで N_{pix} が~1 個で抑えられている。これは先程も述 べたように VUV3 では CT 抑制が施されているため、CT 率が低くなることで N_{pix} の 増加を抑えているからだと思われる。CTAP 率の結果 (図 3.18) を見てみると、確かに VUV3 では $V_o \sim 2V$ までは CTAP 率がほぼ 0 になっていることが確認できる。また、こ の結果から VUV3 では V_o が約 2V まで N_{pix} が~1 個となっているため、入射光子数を 正確に求めることが出来るゲインとして液体アルゴン用 PMT と同等値 (ゲイン: 10⁶) ま で上げられることが確認でき、ANKOK 実験で利用できることが期待できる。

3.5 可視光に対する PDE 測定

PDE は MPPC で検出される光子数を MPPC に入射してくる光子数で割ることで求めることが出来る。しかし、低温基礎特性試験では用いている LED による入射光子数は正

確に求めることが出来ない。そこで、各 VUV MPPC の *V*_o=3V における検出光子数を 1 に規格化することで相対的な PDE を求めた。図 3.20 が相対 PDE の結果である。結果 を見ると *V*_o が上がるにつれて相対 PDE が上がることが確認できる。これは PDE の要 素の一つであるアバランシェ確率が電圧に依存しているためであると思われる。またこの 結果は Newest などの可視光に感度を持つ MPPC の PDE と同じ傾向となっている。



図 3.20 各 VUV MPPC の相対 PDE

3.6 ダークノイズレート測定

ダークノイズレートの測定について説明する。ダークノイズレートは観測された 1p.e. 以上の事象数 N を測定した時間 t で割ることで求めることができる。ここで誤差は \sqrt{N}/t としている。図 3.21 は VUV2 ①のダークノイズレートの結果である。低温にな るにつれてダークノイズレートが下がっているのが分かる。これは、温度が下がるにつれ てダークノイズの原因である共有電子の熱的励起抑えられているからであると思われる。 今回の測定ではライトリークによりダークノイズレートの下限が 1Hz で決まってしまっ たが、今後の測定ではライトリークがない環境下で測定しダークノイズレートを正確に求 める必要がある。



図 3.21 VUV2(1)の Dark Rate 温度依存

次に VUV3-50U、VUV3-100U のダークノイズレートについてである。こちらの測定 では光漏れが VUV2 ①の測定時よりあったためダークノイズレートの測定することが出 来なかった。また低温試験の後、常温でのダークレートが徐々に増加する問題があったた め、この原因について追及していく。

3.6.1 ダークノイズレート悪化の原因追究

VUV3-50U、VUV3-100U のダークノイズレートは低温試験の後、図 3.22 のように 徐々に増加する問題が起きた。低温試験後から VUV3-50U、100U の常温でのダークノ イズレートが増え始め、α線源と一緒に固定した直後から一気に増えているのが見て分か る。

このダークノイズレートの上昇の原因を特定するために以下2つの検証を行った。

① 保存環境による悪化

VUV MPPC は使用していないときは密閉容器 (タッパー)の中に窒素を封入し、防湿庫 で保存している。この保存環境によりダークノイズレートの変化を確認するため、月に1 度ダークノイズレートの測定を行い、保存環境によってダークノイズレートが悪化するの か確認した。使用した VUV MPPC は液体アルゴン試験に使用していない VUV3-50U、 100U を用いた。



図 3.22 VUV3 の Dark Rate 悪化

α による悪化

液体アルゴン試験を行うとき、VUV MPPC の目の前に設置してある α 線源による悪化 を調べた。2 つの VUV2 を使用し、片方には α 線源有 (VUV2 α)、もう片方には α 線源 無 (VUV2 μ)のセットアップを作成し、ダークノイズレートの測定を行った。

図 3.23 は以上 2 つの結果である。図 3.23(左) は横軸が測定を行った日付、縦軸がダー クノイズレート、図 3.23(右) は横軸が VUV MPPC に入射した α 線の量、縦軸がダーク ノイズレートを表している。

それぞれの結果を見てみると、① では VUV MPPC のダークノイズレートの変化はエ ラーの範囲内で抑えられているのが確認できる。しかし、② の結果を見てみると α 線源 が付いていない VUV MPPC のダークノイズレートの変化はエラーの範囲内で抑えられ ているのに対し α 線源 が付いている VUV MPPC のダークノイズレートがエラーで説 明できないほど悪化しているのが見て分かる。VUV MPPC をセットし、真空引きを開 始した 10/20 の午後 11 時から液体アルゴンを充填する前日に測定を行った 10/24 の午 後 2 時までで、VUV2 α のダークノイズレートはスペック値の 1MHz から約 4MH z ま で上昇している。使用している α 線源は 2mm 角の ²⁴¹ Am から 40Hz で α 線を放射して いる。VUV2 α への α 線の被爆量は、真空引き開始からの時間× α 線のレート (40Hz) × VUV MPPC への入射確率 (1.4 %) を受光面の面積 (3mm × 3mm) で求めることができ る。上記の時間での VUV2 α の被爆量を計算すると 1948800(N/cm²) となり、この時の



図 3.23 (左)VUV3 の Dark Rate@保存環境 (右)VUV3 の Dark Rate@a 線源

VUV2αのダークノイズレートの上昇量は 3MHz である。つまり VUV MPPC に α 線が 1 個入射した時、ダークノイズレートが O~1Hz で増加していることが分かる。 この結果から α 線が VUV MPPC に入射したとき結晶格子に欠損を作り、その欠損に よりダークノイズレートが増加した可能性があると考えられる。将来 VUV-MPPC を ANKOK 実験で利用するとき、利用法の 1 つとして S2 光を検出することで検出器に x-y 方向の位置分解能を持たせることがある。しかし VUV-MPPC が α 線だけでなく電子に よる欠損もある場合、放射耐性の問題は今後解決すべき重要な課題の 1 つになる。

4 VUV MPPC 液体アルゴン試験

これまで、液体アルゴン蛍光を直接検出できる検出器はなかった。しかし、VUV MPPC を用いることによって直接検出できるようになった。しかし、ANKOK 実験で利用する ためには VUV MPPC が液体アルゴン蛍光に対してどの程度感度を持っているのかが重 要となってくる。この章では、VUV MPPC で検出した液体アルゴン蛍光の波形確認、 液体アルゴン蛍光に対する PDE の測定方法及び結果について述べる。また、VUV2 と VUV3 の個体比較についても述べていく。

4.1 液体アルゴン試験に用いた VUV MPPC

液体アルゴン試験で用いた VUV MPPC は低温試験で用いたもの (表 3.1) と同じであ る。しかし、こちらで使用している VUV2 は低温試験とは異なる個体で、VUV2 ②を使 用している。これは VUV2 ②が液体アルゴン試験後に破損してしまい、低温基礎特性試 験を行うことが出来なかったからである。

4.2 セットアップ・測定方法

液体アルゴン試験のセットアップは図 4.1 のようになっており、配管系と測定回路系の 2 つからなっている。

まずは、配管系について説明する。配管系は真空引きの配管、液体アルゴンを充填する 配管、容器内のガスを循環させる配管からなっている。容器内に含まれる不純を取り除く ために真空ポンプで真空引きを行い、液体フィルターを通すことで高純度の液体アルゴン を充填している。また、実験中にマイクロトールを通してガスアルゴンを循環させること で、酸素・水を取り除き液体アルゴンの純度を保持している。

次に測定回路について説明する。基本的には低温基礎特性試験の時と同様だが、光源が異 なっている。α線源を VUV MPPC の目の前 1cm のところに配置することで、液体アル ゴン蛍光の点光源となっている。この VUV MPPC とα線源を一体化させた箱をα Box と呼んでいる。

データ取得は FADC を用いており、VUV MPPC のセルフトリガーで行っている。この時の閾値は表 4.1 のようになっている。以降では、検出したアルゴン蛍光の波形及びアル



図 4.1 液体アルゴン蛍光直接検出試験セットアップ

ゴン蛍光に対する PDE 測定について説明していく。

呼称	閾値 (mV)
VUV2 $②$	34
VUV3-50U	40
VUV3-100U	10

4.3 液体アルゴン蛍光の波形

取得した液体アルゴン蛍光の波形について説明していく。図 4.2 は各 VUV MPPC で 取得した1イベントの波形である。これの平均を取ったものが図 4.3 となる。アルゴン蛍 光遅い成分の slow がいるのが見て分かる。また、各 VUV MPPC で取得した波形の slow の時定数は約 1.5µs とアルゴン蛍光の slow の時定数を得ることができ、各 VUV-MPPC で液体アルゴン蛍光を直接検出できていることが分かる。



図 4.2 (左)VUV2 ②の 1 イベント (中)VUV3-50U の 1 イベント (右)VUV3-100U の 1 イベント



図 4.3 (左)VUV2 ②の平均波形 (中)VUV3-50Uの平均波形 (右)VUV3-100Uの平均波形

4.4 PDE 測定

PDE 測定について説明する。液体アルゴン蛍光に対する MPPC の PDE は式 4.1 の ように、入射光子数と検出光子数の比で求めることが出来る。

$$PDE = \frac{\& \text{\phi} \text{\phi} \text{\phi} \text{\phi} \text{\phi} \phi}{\phi \text{\phi} \phi \phi \phi} \tag{4.1}$$

まずは、入射光子数の求め方について説明する。入射光子数は、式 4.2 のように表される。

 α 線源のエネルギーが 5.486 MeV、Ar の α 線源に対する W 値が 27.5 eV であるので、 発生光子数は 19949photon となる。MPPC に入射する確率は点光源から 3mm 角の正方 形を見込む立体角を考え、 4π で割ることにより入射確率は式 4.3 のように計算でき、約 0.7 %と求めることが出来る。これらから、入射光子数はおよそ 1400photon と見積もる ことが出来る。

入射確率 =
$$\frac{4 \arcsin(\sin\alpha\sin\beta)}{4\pi} = 0.007005$$
 (4.3)

検出光子数は、FADC で取得した VUV MPPC の液体アルゴン蛍光の信号を積分する ことで得られる電荷分布から平均電荷を求め、ゲインで割ることで算出できる。電荷分布 は得られた図 4.2 の波形に対し、表 4.2 の積分範囲でイベント毎に電荷を求め、ヒストグ ラムに詰めて作成する。図 4.4 は、*V*_o が 3V の時に取得した各 VUV MPPC の total の 電荷分布である。

名称	fast Range	slow Range	total Range
VUV22	-60ns \sim 200ns	$200 \mathrm{ns} \sim 10 \mu \mathrm{s}$	-60ns $\sim 10 \mu s$
VUV 350 U	-60ns \sim 300ns	$300 \mathrm{ns} \sim 10 \mu \mathrm{s}$	-60ns $\sim 10 \mu s$
VUV3 100U	-60ns \sim 500ns	$500 \mathrm{ns} \sim 10 \mu \mathrm{s}$	-60ns $\sim 10 \mu s$

表 4.2 VUV MPPC の積分範囲



図 4.4 VUV MPPC の total 電荷分布@ Vo=3V

ゲインは液体アルゴン試験中に低温基礎特性試験のような測定はできなかったため様々 な方法で算出した。算出方法については以下のようになっている。 ① 低温基礎試験結果

1 つ目の方法は低温基礎試験の結果を用いる方法である。これによる *V_{bd}* やゲインの結果 は前章で記述してあるため割愛する。

② 検出した電荷を低温基礎試験結果と比較する方法

2 つ目の方法は VUV MPPC が液体アルゴン蛍光を検出した時の電荷を用いる方法であ る。図 4.5 (左) は VUV2 50U を用いて液体アルゴン試験を行ったときに得られた、横軸 が印可電圧、縦軸が電荷のプロットである。液体アルゴン試験と低温試験を行ったときの 印加電圧 vs 電荷の結果を比較したものが図 4.5 (右) である。液体アルゴン試験の結果と 低温基礎試験の結果の V_o =~1.5V 付近の電荷が同じになるように Scale し比較すること で、 V_{bd} を決定している。



図 4.5 (左)VUV2 50U 印可電圧 vs 電荷 (液体アルゴン試験) (右) 液体アルゴン試験と低温基礎試験の電荷比較

③ slow 領域の 1p.e. の信号を利用する方法

3 つ目の方法は slow 領域の 1p.e.(SPP) の信号を利用する方法である。slow 領域の SPP を探し出し、電荷分布を作成することで印可電圧に対するゲインを算出した。図 4.6 は VUV3 50U、VUV3 100U に $V_o \sim 3V$ 印加した時に得られた SPP 電荷分布である。これ を、各印加電圧に対して行うことで、図 4.7 が得られ、 V_{bd} を求めることが出来る。



図 4.7 (左)VUV3 50U SPP vs V (右)VUV3 100U SPP vs V

④ slow 領域のピーク値を利用する方法

4 つ目の方法は slow 領域のピーク値を利用する方法である。trigger のタイミングから 3 μ s 以降の領域内のピーク値をイベント毎に行いヒストグラムに詰める。図 4.8 は VUV3 50U、VUV3 100U に V_o ~3V 印加した時に得られた slow 領域のピーク値のヒストグラ ムである。1p.e. のピーク値と 2p.e. のピーク値の差からゲインを求めることが出来るた め、同様のことを他の印加電圧で行うことによって図 4.9 が得られ、 V_{bd} を求めることが 出来る。



図 4.9 (左)VUV3 50U Peak vs V (右)VUV3 100U Peak vs V

4.4.1 PDE 結果・個体比較

各 VUV MPPC の結果について述べていく。VUV2 ②と VUV3-50U、100U で用いた PDE の算出方法は異なっている。VUV2 ②では上記の②の方法を用いて得られた結果を V_{bd} の中心値としており 53.256V が得られた。誤差は、MEG 実験 (参照 [6])の大量個別 試験結果から V_{bd} に +/-0.2V で付けている。

VUV3-50U、100U では上記の①、③、④ の方法を用いている。Vbd は③ の方法で得ら

れた結果を中心値としており、誤差は③と④の方法によるデータからの V_{bd} の見積もりに よる系統誤差 (表 4.3) と①と③の方法による温度不定性による系統誤差 (表 4.4) を考慮 し、それぞれの差分平均から V_{bd} に +0.17V、-0.21V の誤差を付けている。

	VUV3 50U	VUV3 100U		
3	41.91V	42.02V		
(4)	42.02V	$42.24\mathrm{V}$		
差分	+0.11V	+0.22V		
差分平均	+0.17V			

表 4.3 データからの Vbd の見積もりによる系統誤差

表 4.4 温度の不定性による系統誤差

	VUV3 50U	VUV3 100U		
1	$41.55\mathrm{V}$	$41.97\mathrm{V}$		
3	41.91V	42.02V		
差分	-0.36V	-0.05V		
差分平均	-0.21V			

図 4.10 は VUV2 ②、VUV3-50U、VUV3-100U の PDE 結果である。VUV2 ②と VUV3 50U では誤差の範囲内で PDE がおおよそ同じくらいであることが分かる。また VUV3-50U と 100U を比較すると、VUV3-100U の PDE が VUV3-50U の約 1.5 倍に なっていることが分かる。これは開口率が VUV3-50U で約 40 %、VUV3-100U で約 60 %となっており、50U から 100U で約 1.5 倍になっているためであると思われる。 今回の測定で最大の PDE として VUV3-100U の約 12 %を得ることが出来た。ANKOK 実験の目標値として PED : ~20 %を考えており、今回の結果はこれに近づく結果と なった。今後も浜松ホトニクス社と共同で開発を行い、ANKOK 実験にとって有用な VUV-MPPC の開発を進めていく。



⊠ 4.10 VUV MPPC PDE@128nm

5 液体アルゴン用 PMT の性能評価

最後に、現在 ANKOK 実験が用いている光検出器の性能評価について述べる。これま で ANKOK 実験が用いてきた光検出器は液体アルゴン温度下で動作する光電子増倍管 (PMT: Photomultiplier Tube) である。VUV-MPPC とは異なり、アルゴン蛍光に直接 感度を持っていないため波長変換剤を用いて可視光に変換することでアルゴン蛍光を検出 している。この章では PMT の構造・動作原理及び液体アルゴン用 PMT の常温・低温試 験について述べていく。

5.1 光電子増倍管 (PMT)

PMT とは 1936 年にウラジミール・ツヴォルキンによって発明され、ゲインが~10⁶ あ り、1 個の光子から検出できる光検出器である。PMT の構造は図 5.1 のようになってお り、光子の検出過程は以下の通りである。

(1) 入射光が PMT のガラス窓を透過する。

(2)入射光が光電面に当たることで光電面の電子を励起させ、光電子を放出する。

(3) 光電子が集束電極により第1ダイノードに収束され、2次電子増幅された後に2次電子が放出される。

(4) 次のダイノードで再び2次電子放出が起こり、引き続く各ダイノードで2次電子放出が起こる。

(5) 最終ダイノードから放出された 2 次電子はアノードから取りだされ、電気信号として 出力される。



図 5.1 PMT の構造

PMT が N 個の光子を検出し電気信号を出力するときの電荷量 Q は式 5.1 のように表 される。QE は量子効率 (Quantum Efficiency)、e は素電荷、g は PMT のゲインを表し ている。PMT の QE は入射光子数 N_{in} と検出光子数 N_{pe} から式 5.2 で求めることが出 来る。

$$Q = N \times QE \times e \times g \tag{5.1}$$

$$QE = \frac{N_{in}}{N_{pe}} \tag{5.2}$$

また、QE は PMT の窓材の光子の透過率 T と光電面感度 η の積で決まる。窓材の透過 率は物質によって透過する波長が異なっており、図 5.2 のようになっている。また光電面 感度 η は式 5.3 で与えられており、R は光の反射率、 P_{ν} は光電面に入射し吸収された光 子による電子の励起率、k は光子の全吸収率、L は励起電子の平均自由工程、 P_s は表面に 到達した電子が真空中に取り出される確率を表している。



図 5.2 PMT 窓材の透過率

$$\eta = (1 - R)\frac{P_{\nu}}{k}\frac{1}{1 + 1/kL}P_s \tag{5.3}$$

次に PMT のゲインについて説明する。PMT のゲインは入射した光子が光電面で光電 子を叩き出し、その光電子が各ダイノードで増幅されアノードから取り出される時の増幅 率のことである。等分割デバイダーを用いたと仮定した時、各ダイノード間にかかる電圧 は Vdy = V/(n+1) のようになる。また各ダイノードから1 個の光電子によって放出さ れる 2 次電子数 δ は式 5.4 のように表される。1 個の光電子に対して、ゲインが g、ダイ ノードが n 段、PMT への印可電圧を V、ダイノード間の電圧を V_{dy} を表しており、a、kは PMT の構造や材質によって決まる定数で k は 0.7~0.8 である。

$$\delta = aV_{dy}^k = a(\frac{V}{n+1})^k \tag{5.4}$$

PMT のゲインは格段の積となるため式 5.4 を用いて、式 5.5 のように表すことが出来る。

$$g = (\delta)^n = a^n (\frac{V}{n+1})^{kn}$$
(5.5)

5.2 液体アルゴン用 PMT: R11065

ANKOK 実験で用いている PMT について説明する。図 5.3(左)の R11065 は液体アル ゴンを用いた暗黒物質探索用に開発された PMT である。PMT のサイズは 3 インチで、 特徴として高 QE、低 BG、液体アルゴン温度 (-186 °C) で使用可能がある。図 5.3(右)の ように、160nm~700nm に感度を持っており、可視光 (420nm) に対する QE は 25 %であ る。しかし近年のものは 30~37 %の QE を持っている。PMT 内部の構造は Box & Line 型の 12 段で、フォトカソード及びダイノード表面は K-Cs-Sb のバイアルカリ となって いる。ゲインは 1700V で~10⁶ あり、陽・陰電圧のどちらでも動作可能である。しかし 陰電圧印加時は PMT の筐体と光電面が導通しているため、周りの金属から絶縁して使用 する必要がある。ANKOK 実験でこの PMT を動作させるとき図 5.4 のデバイダー回路 (参照 [16]) を用いている。この PMT のデメリットの 1 つとして、数 μ s 後に AP が存在



図 5.3 (左)R11065 の写真 (右)R11065 の QE

することがある。これは MPPC の AP とは異なり、イオンフィードバックによるものだ と考えられている。図 5.5 は液体キセノン用に開発された PMT(R11410) の波形である。 主信号から数 µs 後に AP が確認できる。MPPC の AP と同様に、1 光子入射した時に検 出される光子数が AP によって増えてしまうため検出効率が多めに見積もられてしまう。 また液体アルゴン蛍光を検出するとき、Fast 成分による AP が Slow 成分に含まれること により PSD による分離能力が悪化する可能性もある。



図 5.4 R11065 用デバイダー回路



図 5.5 液体 Xe 用 PMT(R11410) の AP 波形

5.3 常温、低温試験セットアップ

R11065の常温・低温試験のセットアップについて説明する。セットアップは第3章で 説明した VUV-MPPC の低温基礎特性試験のセットアップとほぼ同じで図 5.6 のように なっている。容器の中に R11065 が設置してあり、図 5.4 のデバイダーを用いて陽電圧印 加している。光源の LED は LED ドライバーと直流電源とファンクションジェネレータ を用いて 1kHz で光らせ、光ファイバーを用いて容器内部に光を入れている。データ取得 はゲイン測定で ADC、AP の波形データ取得で FADC を用いて行った。

今回試験を行った R11065 は表 5.1 の 2 本となっており、データ取得は常温と-190 ℃の



図 5.6 常温・低温試験セットアップ

2 点で行った。R11065 が入った容器を冷やしていった時の温度コントロールプロットは 図 5.7、図 5.8 である。

表 5.1 常温・低温試験を行った R11065

型番	シリアル No	呼称	陰極感度	陽極感度	陽極	陰極	量子効率
			$(\mu A/lm)$	(A/lm)	暗電流 (nA)	青感度指数	@420nm(%)
R11065MOD	BA0176	J06	145.0	690.0	4.50	12.40	31.23
	BA0177	J07	141.0	602.0	3.30	12.20	30.82



図 5.7 J06 低温試験温度コントロールプロット



図 5.8 J07 低温試験温度コントロールプロット

5.4 ゲイン測定

J06、J07 のゲイン測定は ADC を用いて行った。データは常温と-190 ℃の 2 点で行い、 それぞれの点でアンプ (C5499、増倍率:~63 倍) 有り無しで行った。データ取得すると きのゲート幅は図 5.9 で行った。黄色が R11065 の信号、青が Gate 幅、黄緑は LED ド ライバーの出力である。

ゲインの求め方について説明する。PMT から叩き出される光電子数がポアソン分布、 1個の光電子の増幅率がガウス分布に従うとと仮定した時、信号電荷 q の分布関数は式



図 5.9 データ取得時のゲート幅

5.7 のようになると考えられる。。それぞれ、 $P_{\mu}(n)$ はポアソン分布 (期待値: μ) で N 個 の光電子が検出される確率、 $G(neg + p_{ped}, \sigma_n; q)$ はガウス分布を表しており、中心値が $neg + p_{ped}$ 、分散が σ_n で電荷量 q の事象が起こる確立である。また、 q_{ped} はペデスタル、 n は増幅されてきた光電子数、e は素電荷、g はゲインを表している。分散は式 5.8 で定 義しており、ペデスタルの分散 (σ_{ped})と光電子増幅率の分散 (σ_{spp})の統計和である。(参 照: [15])

ゲインは ADC で取得できるヒストグラムに対し、式 5.7 で Fit を行うことで求めること が出来る。

$$f(q) = \sum_{n=0}^{3} P_{\mu}(n) \times G(neg + q_{ped}, \sigma_n; q)$$
(5.6)

$$=\sum_{n=0}^{3}\frac{\mu^{n}e^{-\mu}}{n!}\times\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{n}^{2}}}e^{-(q-neg-q_{ped})^{2}/2\sigma_{n}^{2}}$$
(5.7)

$$\sigma_n^2 = \sigma_{ped}^2 + n\sigma_{spp}^2 \tag{5.8}$$

常温・低温試験を行った結果、図 5.10、図 5.11 の ADC 分布を得ることが出来た。黒 線がデータ、赤線が式 5.7 による Fit の結果である。アンプ無しの ADC 分布を見てみる と Fit 結果が得られた分布よく再現できていることが確認できる。アンプ有りの ADC 分 はペデスタルと 1p.e. の間に別の成分が見れるが、おおよそ再現できているのが分かる。



図 5.10 J06 ADC 分布@常温 (アンプ無し)



図 5.11 J06 ADC 分布@常温 (アンプ有り)

J06、J07 のゲインの結果として図 5.12、5.13 が得られた。それぞれ赤がアンプ無し、 青がアンプ有りである。誤差は ADC 分布を Fit した時の誤差と測定の再現性 (1 %) の独 立和を付けている。アンプの増倍率については測定ごとに変動することが分かっているた め、各測定ごとに較正を行っている。今回のアンプの増減率はそれぞれ、J06(常温):65 倍、J06(-190 °C):68 倍、J07(常温):65.5 倍、J07(-190 °C):72 倍となっている。また、 任意の HV 値でのゲインを算出するため、得られたゲインの結果に対して式 5.9 で Fit を 行っている。*g* はゲイン、V は電圧である。

 $a - n_0 (V - n_1)^{p_2}$

$$g = p_0(v - p_1)$$
 (0.5)



図 5.12 J06 ゲイン測定結果 (左:常温、右:-190 ℃)



図 5.13 J07 ゲイン測定結果 (左:常温、右:-190 ℃)

(5.9)

AP 波形測定 5.5

J06、J07のAP波形測定は低温試験前の常温、-190℃、低温試験後の常温の3点で 行った。動作電圧はゲイン測定から得られた 5.0 × 10⁶ のゲインで行った。印可電圧は J06 が 1707V、J07 が 1750V である。図 5.14 が得られた AP の波形で、主信号の波高が 1となるよう規格化して比較をしている。それぞれの AP 波形を見ると、J06、J07 とも に AP が複数存在しており、主信号の 0.1、0.2 %程度の大きさとなっている。各 PMT の AP を見ていくと J06 では低温試験前にいた 0.9µs の成分が-190 ℃、低温試験後の常温で 消えているのが分かる。J07 は J06 で見られた 1µs の成分が見られない。また、-190 ℃ で 0.9µs の成分が消えているのが確認できる。

AP は PMT にエアリークが存在する場合、年月が経つごとに増加していく。今後、J06 と J07 の AP が年月が経つことにより増加していくの定期的に調べていく必要がある。



図 5.14 (左)J06 AP 波形 (右)J07 AP 波形

6 まとめ・今後の展望

本研究では、新型の VUV-MPPC の性能評価を行い ANKOK 実験に対する有用性を確認した。

低温基礎特性試験では、各 VUV-MPPC のゲイン、CTAP 率、*N_{pix}、ダークノ*イズレートの測定を行った。入射光子数を正確に見積もることが出来るゲインとして VUV3 では 10⁶ まで上げられることが分かった。これは液体アルゴン用 PMT と同等のゲインでANKOK 実験にとって非常に有用な結果を得ることが出来た。しかし、今後の課題として、ダークノイズレートを正確に測定することと、VUV-MPPC の放射耐性が残った。まずは、VUV-MPPC の電子に対する耐性がどの程度あるのか確認することが重要であると思われる。

液体アルゴン試験では各 VUV-MPPC の液体アルゴン蛍光に対する PDE の測定を行った。最大の PDE として VUV3-100U の約 12 %を得ることができ、これは ANKOK 実験の目標値である PDE : ~20 %に近づく結果となった。今後も浜松ホトニクス社と共同で開発を行い、より高い PDE を持つ VUV-MPPC の開発を進めていく。

また MPPC を気液 2 相型光検出器の気相側面に配置することにより、x-y 方向の位置分 解能が向上することが分かっており [17]、今回の結果から VUV-MPPC が ANKOK 実験 にとって有用な光検出器である可能性が高いことが分かった。そのため本検出器に x-y 方 向位置分解能を実装させるために VUV-MPPC による発光位置の同定方法を確立させる ことも重要となってくる。

液体アルゴン用 PMT の性能評価では、ゲイン及び AP 波形の測定を行った。低温で動作 することを確認しゲインが ~10⁶ あることが確認できた。また AP 波形として主信号の 0.1、0.2 %と非常に小さいことが確認できたが、PMT にエアリークが存在した場合徐々 に AP の成分が増加していくため、今後は定期的に AP 波形の測定を行い、PMT に不良 がないか確認していくことが重要である。

7 謝辞

本研究をするにあたり、最初にきっかけを与えてくださった寄田浩平准教授に深く感謝 いたします。寄田先生には研究の手法だけでなく、物理に対する心構えについて教えて頂 きました。また、ANKOK グループをまとめる田中雅士次席研究員には研究で困ったと きに正しい指針を導いていただり解析の初歩を懇切丁寧に教えて頂きました。招聘研究員 の蛯名幸二氏にはシステムについて教えて頂いたり、趣味の話を聞いて頂いたりしまし た。秘書の坂本さんには事務の面で大変お世話になりました。

研究を進めるにあたって同じ ANKOK グループの後輩である中、鈴木、木村、横山には 大変助けて頂きました。また先輩である鷲見さんには解析についてや実験方針の相談など 様々な面で助けていただきました。学部の時から3年間、周りの人に支えられたからこそ やってくることができました。ここで、改めて深く感謝いたします。

最後に、いつも私のことを支えてくれた家族に心から感謝いたします

参考文献

- M. M. Fraga, S. T. G. Fetal, F. A. F. Fragaa, E. Antunes, J. Gonqalvesb, C.C. Buenob, R. Ferreira Marques and A. J. P. L. Policarpo · "Study of Scintillation Light from Microstructure Based Detectors" · (2000)
- [2] G Klein and M J Carvalho · "Argon luminescence bands between 1600 and 2900
 " · J. Phys. B: At. Mol. Phys. 14 (1981)
- [3] T. Heindl, T. Dandl, A. Fedenev, M. Hofmann, R. Krcken, L. Oberauer, W. Potzel, J. Wieser, A. Ulrich · "Table-top setup for investigating the scintillation properties" · JINST 6 P02011 (2011) of liquid argon
- [4] 浜松ホトニクス 光半導体素子ハンドブック・浜松ホトニクス 固体事業部
- [5] 音野瑛俊、「ガイガーモードで駆動するピクセル化された新形半導体光検出器の基礎 特性に関する研究」、修士論文 (2007 年度)
- [6] Mass test of MPPC with a prototype of MEG II liquid xenon detector · 家城 佳, 他 MEG-II collaboration
- [7] 中川崇之、「シンチレータと光半導体素子 MPPC を用いた携帯型放射線スペクトロ メータの実用化」、修士論文 (2013 年度、広島大学)
- [8] 信原岳、「新型光検出器 MPPC の開発」、修士論文 (2005 年度、京都大学)
- [9] 立元琢土、「COMET 実験のための MPPC 読み出し電磁カロリメータの開発」、修 士論文 (2009 年度、広島大学)
- [10] 生出秀行、「半導体光検出器 PPD の基本特性の解明と,実践的開発に向けた研究」、 修士論文 (2008 年度、東京大学)
- [11] S13360 シリーズカタログ・浜松ホトニクス 固体事業部
- [12] S12572 シリーズカタログ・浜松ホトニクス 固体事業部
- [13] 木村公彦、「MPPC を利用したアルゴン発光成分の定量的評価と暗黒物質探索への 応用」、卒業論文 (2013 年度、早稲田大学)
- [14] Performance of VUV-sensitive MPPC for Liquid Argon Scintillation Light · T.Igarashi, S.Naka, M.Tanaka, T.Washimi, K.Yorita
- [15] 鷲見貴生、「ANKOK 実験における大光量 2 相型プロトタイプ検出器の開発と性能評価」、修士論文 (2014 年度、早稲田大学)
- [16] 川村将城、「ANKOK 実験のための地上環境中性子束の測定と評価」、修士論文 (2014 年度、早稲田大学)

[17] 五十嵐貴弘 他、「アルゴン蛍光の赤外成分の詳細研究」、日本物理学会 第69回年 次大会 29pTE-05