

令和2年度 修士学位論文

MEG II 実験液体キセノン検出器用 VUV-MPPC の 光子検出効率に関する研究

(Research on photon detection efficiency of VUV-MPPC
in MEG II liquid xenon detector)

東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻
素粒子物理国際研究センター 大谷研究室

35-196043

島田 耕平

2021 年 1 月

目次

第 1 章	序論	1
1.1	素粒子標準模型	1
1.2	フレーバー保存の破れと新物理	2
1.3	液体キセノンガンマ線検出器	2
第 2 章	ミューオンの物理	4
2.1	標準模型におけるミューオン	4
2.1.1	物理的性質	4
2.1.2	ラグランジアン	5
2.1.3	崩壊モード	5
2.2	標準模型を超えたモデル	7
2.2.1	ニュートリノ振動	7
2.2.2	超対称性の破れ	8
2.3	MEG II 実験における物理	8
2.3.1	信号事象	8
2.3.2	バックグラウンド	9
2.3.3	まとめ	9
第 3 章	MEG II 実験	10
3.1	MEG 実験	10
3.1.1	概要	10
3.1.2	ビームライン	10
3.1.3	静止ターゲット	12
3.1.4	COBRA 磁石	12
3.1.5	ドリフトチェンバー	12
3.1.6	タイミングカウンター	13
3.1.7	液体キセノンガンマ線検出器	13
3.1.8	DAQ	14
3.1.9	結果とその意義	15
3.2	MEG II 実験へのアップグレード	15
3.2.1	概要	15
3.2.2	ドリフトチェンバー (CDCH)	15
3.2.3	陽電子タイミングカウンター (pTC)	16
3.2.4	輻射崩壊同定用検出器 (RDC)	16
3.2.5	DAQ	17
3.2.6	期待される性能と到達感度予想	17

第 4 章	液体キセノンガンマ線検出器 (LXe)	20
4.1	アップグレードの概要	20
4.1.1	問題点	20
4.1.2	MPPC の導入	20
4.1.3	PMT 配置の変更	22
4.2	VUV-MPPC	22
4.2.1	光検出の原理	23
4.2.2	MPPC の特徴	25
4.2.3	VUV-MPPC の開発	26
第 5 章	VUV-MPPC の PDE 減少	29
5.1	本研究の概要	29
5.2	実機で観測された PDE 減少	29
5.2.1	PDE の定義	29
5.2.2	LXe の PDE ヒストリー	30
5.2.3	実機の環境	32
5.3	先行研究	32
5.3.1	表面損傷の原理	33
5.3.2	アニーリング	35
5.3.3	放射線照射済み MPPC に対する PDE 測定	36
第 6 章	PDE 減少に関するラボ測定	39
6.1	概要	39
6.2	常温照射試験	41
6.2.1	重水素ランプを用いた照射試験 [38]	41
6.2.2	UV 光を用いた長期間の常温照射試験 [39]	44
6.3	低温照射試験	46
6.3.1	UV 光を用いた電圧ゼロでの感度減少測定	46
6.3.2	UV 光を用いた PDE 減少の温度依存性調査	47
6.3.3	低温での VUV 光照射試験	54
6.3.4	液体キセノン中でのアルファ線源を用いた PDE 測定	62
6.4	ラボ測定のまとめ	63
第 7 章	結論と今後の展望	66
7.1	結論	66
7.2	今後の課題・展望	66
	参考文献	67
	付録	72

概 要

MEG II 実験では前身となる MEG 実験に比べて、1 桁上の感度で $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊を探索することを目指しており、そのために全ての検出器の分解能を 2 倍改善することを目指している。液体キセノンガンマ線検出器は、信号事象のガンマ線が液体キセノンに入射した際に発生するシンチレーション光を光センサーを用いて検出する。MEG II 実験へのアップグレードにおいて、新型の光センサーである Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) が開発・導入され、エネルギーと位置に対する分解能の向上がビーム試験により実証された。一方で、大強度ミューオンビームを用いたコミッショニングにおいて、MPPC の光子検出効率 (Photon detection efficiency, PDE) が減少するという問題が発生した。観測された PDE 減少速度は、最悪の場合、60 日程度のビームタイムで検出器が運転できなくなってしまうほど大きかった。そこで我々は現在、「PDE 減少速度の推移」「PDE の回復方法」「PDE 減少の原因」について調査している。本稿ではこのうち PDE 減少の原因について調査した結果を報告する。

PDE 減少の原因として液体キセノンシンチレーション光である真空紫外光 (Vacuum Ultra Violet, VUV) が MPPC に表面損傷を起こすという仮説が立てられた。さらに表面損傷は低温で加速すると推測されている。これらを確認するため、光源を用いたラボでの測定が行われてきた。まず、VUV 光を用いた常温での照射試験により MPPC の PDE 減少が観測された。しかし、その減少速度は実機で観測されたものに比べて遅かった。これには、温度が影響していると考えられ、MPPC を液体キセノン温度まで冷却するセットアップを作成した。これにより、低温環境下で実機と同程度の照射量に相当する VUV 光を MPPC に照射し、PDE の変化を測定した。その結果、実機で観測されたような PDE 減少は再現されなかった。つまり、実機の PDE 減少の主要な原因の候補から VUV 光による表面損傷の可能性を排除できたと考えられる。

第1章 序論

1.1 素粒子標準模型

自然を支配する4つの力のうち重力を除いた3つの力、すなわち、「強い力」「弱い力」「電磁気力」は性質がかなり異なるにも関わらずゲージ原理によって統一的に説明される。ゲージ原理というのはゲージ対称性¹を理論に課す際に必然的に導入されるゲージ場が相互作用を媒介するというものである。

素粒子標準模型 (Standard Model) はもともと、弱い力と電磁気力を統一的に記述する電弱統一理論として提唱された。このゲージ変換は $SU(2) \times U(1)$ に属するもので、特に電弱対称性と呼ばれる。また、強い力は量子色力学により記述され、そのゲージ対称性は $SU(3)$ で表される。以上の $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ ゲージ理論が素粒子標準模型と呼ばれ、多くの実験事実を精度良く説明できる²。

しかし、標準模型には以下のように多くの基本的な問題点がある。

- 統一理論になっていない
上記のゲージ群は直積の形になっており、それら群の取り扱いが独立になっている。このため、それぞれの相互作用の強さを表すゲージ結合定数が完全に独立となる。
- 重力相互作用が含まれない
重力もゲージ原理によって説明可能だが、くりこみ不可能という問題がある。これを克服した理論として「超弦理論」などが提唱されている。
- 電荷の量子化
クォークやレプトンと電子の電荷の比は整数に量子化されている。しかし、標準模型ではフェルミオンの電荷を決めるパラメータが任意であり電荷の量子化を説明できない。
- 階層性問題
標準模型は低エネルギーにおける近似的な理論であり、より高エネルギーの世界では何らかの Beyond the Standard Model 理論 (BSM 理論) に置き換えられると考えられている。この BSM 理論として例えば重力を含む理論を考える場合、標準模型の限界 (カットオフ) は Planck 質量程度になると考えられ、 17 桁程度のエネルギーギャップが存在することになる。これをどう説明するかというのが階層性問題であり、その解決のために「超対称性理論」などが議論されている。
- 予言不可能なパラメータ
湯川相互作用や Higgs 自己相互作用、フェルミオンの質量や混合、また CP 位相などはゲージ不変性と独立なため理論によって予言することができない。
- カラーの閉じ込め
クォークにはカラーと呼ばれる自由度があるが、色のある状態は不安定なためバリオンやメソンなどの複合粒子と

¹ゲージ変換に対して式が不変の場合、ゲージ対称性があるという。ゲージ変換は局所的な位相変換のことであり、例えば Dirac 方程式 $[i\gamma^\mu \partial_\mu - m]\psi(x) = 0$ において $U(1)$ ゲージ変換は $\psi'(x) = e^{-iq\theta(x)}\psi(x)$ と表される。この時、 $\partial_\mu \rightarrow \partial_\mu + iqA_\mu(x)$ などと置けば Dirac 方程式を不変に保つことができる。この時導入された A_μ をゲージ場という。ただし、 $U(N)$ はユニタリ群。

² $SU(N)$ は行列式が 1 のユニタリ群を表し、例えば強い力を媒介するゲージ場は $SU(3)$ 群に属する。

して存在する。この閉じ込めは「格子ゲージ理論」によって数値的に確かめられているが解析的には示されておらず重要な未解決問題である。

- ニュートリノ振動

標準模型ではニュートリノの質量はゼロとされていたが、1998 年にニュートリノ振動が観測されたことにより質量が導入された。これにより、未だ観測されていない右巻きニュートリノの存在が強く示唆された。2020 年現在、BSM 理論の必要性を明確に示した唯一の観測例である。

- 暗黒物質と暗黒エネルギー

標準模型によって説明できるのは宇宙全体のエネルギーのうち 5% に過ぎず、残りの 95% が暗黒物質や暗黒エネルギーによるものだと考えられている。この問題は BSM 理論で説明できる可能性がある。

1.2 フレーバー保存の破れと新物理

標準模型における素粒子は力の起源となるスピン 1 のボソンと物質の起源となるスピン 1/2 のフェルミオンに分けられる³。また、フェルミオンには 3 つの世代構造が存在し、それらの様子を図 1.1 に示す。⁴フェルミオンはさらにクォークとレプトンに分類される。クォークは u, d, c, s, t, b の 6 種類あり、世代間の混合が存在する。これは標準模型が提唱された当初から議論され、理論にも混合角が導入されている。レプトンについても 6 種類あり、これはさらに電磁気電荷を持たないニュートリノ ν_e, ν_μ, ν_τ と電磁気電荷を持つ荷電レプトン e, μ, τ に分けられる。

標準模型ではレプトンの各世代に割り当てるフレーバー量子数は保存量である。しかし、ニュートリノ振動が観測されたことによりニュートリノセクターにおいてフレーバー量子数が破れていることが示された。これは荷電レプトンにおけるフレーバー保存の破れ、すなわち、Charged Lepton Flavor

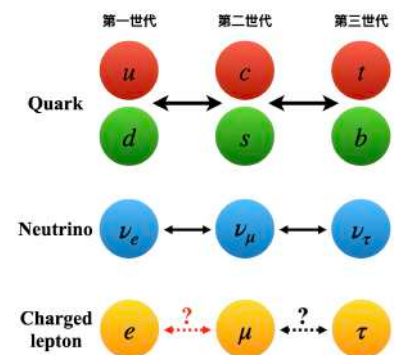


図 1.1: フェルミオンには 3 つの世代がありクォークとニュートリノについては世代間混合が確認されている。

Violation (CLFV) が存在することを示唆しており、それを探索するための実験が世界で進められている。CLFV の 1 つである $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊は上で述べたように標準模型では起こりえない。ニュートリノ振動を考慮するとその崩壊分岐比は $\mathcal{O}(10^{-54})$ であるが実験で検証できるものではない。しかし、様々な BSM 理論において $\mathcal{O}(10^{-11}) \sim \mathcal{O}(10^{-15})$ 程度の分岐比が予想されており実験で観測できる可能性がある。そして、この崩壊が観測されたとすれば標準模型の寄与を排除できるため明確な新物理の証拠となる。これまでに行われた $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験の中ではスイスの Paul Scherrer Institut (PSI) で行われた MEG 実験が最も厳しい制限を付けており、その崩壊分岐比に $Br(\mu \rightarrow e\gamma) < 4.2 \times 10^{-13} (90\% \text{C.L.})$ という上限をつけた。我々は現在、MEG 実験のアップグレード実験である MEG II 実験の実現に向けて準備を進めている。MEG II 実験では 1 桁高い感度を達成するために全ての検出器の性能を大幅に改善することを目指している。

1.3 液体キセノンガンマ線検出器

液体キセノンガンマ線検出器 (Liquid Xenon photon detector, LXe) は $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊によって生成されたガンマ線が液体キセノンに入射した際に生じるシンチレーション光を光センサーで検出することにより、そのエネルギー・位置・時間を測定する。MEG 実験においては 846 本の光電子増倍管 (Photomultiplier Tube, PMT) を用いてシンチレーション光

³質量の起源となる Higgs 粒子はスピン 0、重力の起源となる重力子はスピン 2 と考えられる。

⁴世代の分類は、例えば弱い相互作用によるベータ崩壊 $d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$ において対で現れるものを 2 重項として導入したものである。これは量子力学において、互いに遷移する上向きスピンと下向きスピンを Pauli スピノルとして表したのと同様である。

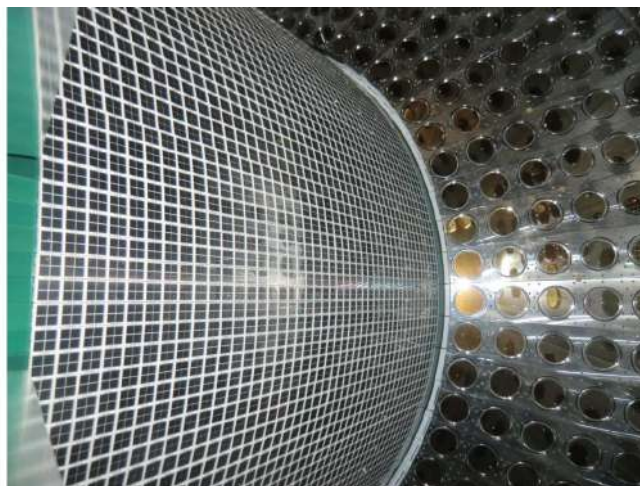


図 1.2: LXe 内部の様子。写真左側に見えるのが MPPC でガンマ線はこの裏側から入射する。右側に見える円形の光センサーが PMT であり MEG 実験で使用したものを MEG II 実験でも用いる。詳しくは第 4 章で記述する。写真は文献 [1] より引用。

を捉えた。MEG 実験のアップグレード実験である MEG II 実験ではエネルギーと位置の分解能を 2 倍改善することを目指し、直径 46 mm の PMT の一部を 12 mm 角の Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) に置き換えている。その写真を図 1.2 に示す。MEG II 実験は 2017 年からコミッショニングを開始しているが、現在ビーム使用環境において MPPC の光子検出効率 (Photon detection efficiency, PDE) が減少し続けるという問題が発生している。本稿ではこの PDE 減少の原因調査のために行った研究について報告する。

第2章 ミューオンの物理

MEG II 実験の説明に入る準備として本章で実験の物理的背景を議論する。まず 2.1 節において標準模型におけるミューオンの概要を述べる。そして 2.2 節で $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊を実現する新物理の紹介をし、最後に 2.3 節で MEG II 実験の実験的背景を説明する。

2.1 標準模型におけるミューオン

2.1.1 物理的性質

陽子などの宇宙線が地球の大気に衝突した際に生成されるパイ中間子は (2.1) 式のような崩壊によりミューオンを生成する。

$$\pi \longrightarrow \mu + \nu_\mu \quad (2.1)$$

このような二次宇宙線であるミューオンは 1936 年、Anderson と Neddermeyer によって初めて発見された [2]。当初は Yukawa によって予言された中間子だと思われたが、後に質量以外が電子と同じ性質を持つ粒子だとわかった。ミューオンの発見はフェルミオンの世代構造を示す最初の例になると同時に素粒子の規則性が整理される契機となった点で重要な出来事である。また、現代においてもミューオンは素粒子物理学だけではなく、原子核物理や地球物理学など広い分野で研究されており、様々な応用が期待されている。

第二世代の荷電レプトンであるミューオンは質量が電子の約 200 倍、タウ粒子の約 17 分の 1 である。ミューオンの主な性質について表 2.1 にまとめた。

表 2.1: ミューオンの諸性質 [4]

Property	PDG Average ¹
Mass	105.7 MeV
Mean Lifetime	2.197×10^{-6} s
Anom. Magnetic Moment	1.166×10^{-3}
Elec. Dipole Moment	$< 1.8 \times 10^{-19} e$ cm

¹PDG は Particle Data Group の略。表は PDG の平均値を載せている。また、有効数字 5 桁以上で記述されていたものは簡単のため有効数字 4 桁で記した。

2.1.2 ラグランジアン

ここで標準模型におけるミューオンのラグランジアンを以下に示しておく。

$$\begin{aligned}
\mathcal{L}_\mu &= e\bar{\mu}\gamma^\lambda\mu A_\lambda \\
&- \frac{g_2}{\sqrt{2}}(\bar{\nu}_\mu\gamma^\lambda P_L\mu W_\lambda^+ + \bar{\mu}\gamma^\lambda P_L\nu_\mu W_\lambda^-) \\
&- \frac{\sqrt{g_1^2 + g_2^2}}{2}\bar{\mu}\gamma^\lambda(-P_L + 2\sin^2\theta_W)\mu Z_\lambda \\
&- \frac{\sqrt{2}m_\mu}{v}\bar{\mu}\mu H
\end{aligned} \tag{2.2}$$

(2.2) 式において e は素電荷、 g_1, g_2 は $U(1), SU(2)$ の結合定数を表している。また、 A, W, Z はそれぞれ光子、 W ボソン、 Z ボソンを表しており第 1 章で述べたゲージ場である。 H は Higgs ボソンを表す。これは質量項 (場の 2 次の項) がゲージ対称性を保つために導入されたボソンであり実際に 2012 年 CERN の Large Hadron Collider (LHC) で発見された。また、 P_L は射影演算子、 θ_W は Weinberg 角であり $\sin^2\theta_W = g_1^2 g_2^2 / \sqrt{g_1^2 + g_2^2} \simeq 0.23$ を満たす。

2.1.3 崩壊モード

ミューオンは電子に比べて非常に重く、すぐに電子へと崩壊する。その際、標準模型においてはニュートリノを伴って崩壊し、荷電レプトンフレーバーは厳密に保存する。この崩壊モードについて表 2.2 にまとめる。

表 2.2: ミューオンの崩壊モード [4]

Mode	Branching ratio
$\mu^- \rightarrow e^- \nu_\mu \bar{\nu}_e$	~ 1
$\mu^- \rightarrow e^- \nu_\mu \bar{\nu}_e \gamma$	$(1.4 \pm 0.4) \times 10^{-2}$
$\mu^- \rightarrow e^- \nu_\mu \bar{\nu}_e e^+ e^-$	$(3.4 \pm 0.4) \times 10^{-5}$

ミューオンはほとんどがニュートリノと反ニュートリノを伴う三体崩壊を起こす。これは特に Michel 崩壊と呼ばれ、低エネルギーでは微分断面積を以下のように導出できる。まず、 W ボソンのラグランジアンの相互作用項を書き出すと以下の通りである。

$$\mathcal{L}_W = -W_\lambda^+ J_+^\lambda - W_\lambda^- J_-^\lambda + M_W^2 W_\lambda^+ W_\lambda^- \tag{2.3}$$

ここで、 J は荷電カレントを表しており、以下のように表される。

$$J_+^\lambda = \frac{g_2}{\sqrt{2}}[\bar{u}^j\gamma^\lambda P_L d^j + \bar{\nu}^j\gamma^\lambda P_L e^j], \quad J_-^\lambda = (J_+^\lambda)^\dagger \tag{2.4}$$

但し、 u, d, ν, e はそれぞれアップタイプクォーク、ダウンタイプクォーク、ニュートリノ、荷電レプトンを表し j は世代の添字である。これより、Euler-Lagrange 方程式

$$\frac{\partial \mathcal{L}_W}{\partial W_\lambda^\pm} = -J_\pm^\lambda + M_W^2 W^\mp{}^\lambda = 0 \tag{2.5}$$

の解を (2.3) 式に代入し (2.4) 式を用いれば

$$\mathcal{L}_{\text{Michel}} = -\frac{g_2^2}{8M_W^2}[\bar{\nu}_\mu\gamma^\lambda(1-\gamma_5)\mu\bar{e}\gamma_\lambda(1-\gamma_5)\nu_e + \bar{\nu}_e\gamma^\lambda(1-\gamma_5)e\bar{\mu}\gamma_\lambda(1-\gamma_5)\nu_\mu] \tag{2.6}$$

を得る。但し、ミューオンに関する項以外は省略している。また、射影演算子

$$P_L = \frac{1}{2}(1 - \gamma_5) \quad (2.7)$$

を用いた。(2.6) 式は Fermi の 4 点相互作用の形と一致している。よって、Fermi 定数は以下のように表せる。

$$G_F = \frac{g_2^2}{4\sqrt{2}M_W^2} = 1.17 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2} \quad (2.8)$$

これより、Michel 崩壊の微分崩壊幅は以下のように表せる。

$$\frac{d^2\Gamma(\mu^\pm \rightarrow e^\pm \nu \bar{\nu})}{dx d\cos\theta_e} = \frac{m_\mu^5 G_F^2}{192\pi^3} x^2 [(3 - 2x) \mp P_\mu \cos\theta_e (1 - 2x)], \quad x = \frac{2m_\mu E_e}{m_\mu^2 + m_e^2} \quad (2.9)$$

P_μ はミューオンの偏極を表し、 θ_e は P_μ と電子の運動量ベクトルのなす角を表す。また、Feynman 図とエネルギースペクトラムを図 2.1 と図 2.2 に示す。Michel 崩壊は $\mu \rightarrow e\gamma$ 信号の背景事象の源となる。

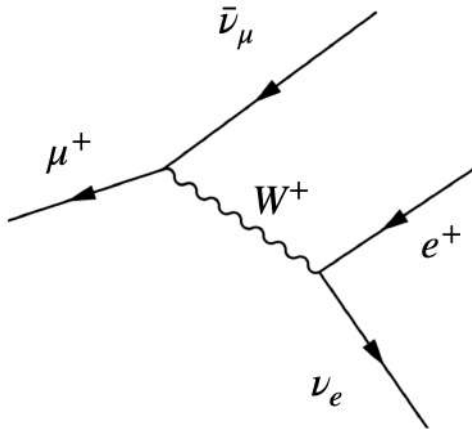


図 2.1: Michel 崩壊の Feynman 図

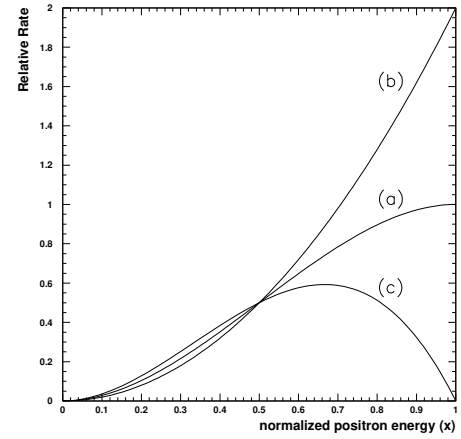


図 2.2: $P_\mu = 1$ の場合の Michel 崩壊における電子のエネルギースペクトラム。(a),(b),(c) はそれぞれ $\cos\theta_e = 0, 1, -1$ に対応する。[5]

次に、表 2.2 の 2 行目で表される、 $e, \nu, \bar{\nu}$ に加えて光子を放出するような崩壊はミューオン輻射崩壊 (Radiative Muon Decay, RMD) と呼ばれる。この微分崩壊幅は以下のように表される²[5]。

$$\frac{d^2B(\mu^\pm \rightarrow e^\pm \nu \bar{\nu} \gamma)}{dy d\cos\theta_\gamma} = \frac{1}{y} [J_+(y)(1 \pm P_\mu \cos\theta_\mu) + J_-(y)(1 \mp P_\mu \cos\theta_\gamma)], \quad y = \frac{2E_\gamma}{m_\mu} \quad (2.10)$$

ここで RMD の Feynman 図と確率分布をそれぞれ図 2.3 と図 2.4 に示す。

²ここで、 $J(y)$ は参考文献 [5],(51) 式の記号をそのまま用いており上述の荷電カレントとは別である。

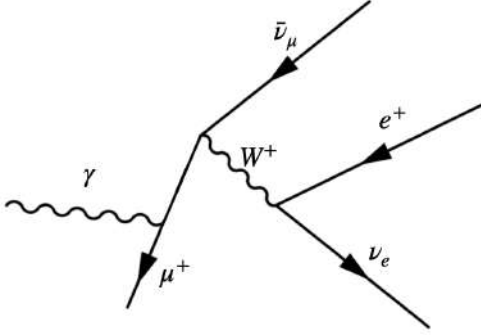


図 2.3: ミューオンが光子を放出する場合の RMD の Feynman 図。電子や W ボソンが光子を放出するダイアグラムも書けるが、 W ボソンが光子を放出する確率は無視できるほど小さい。

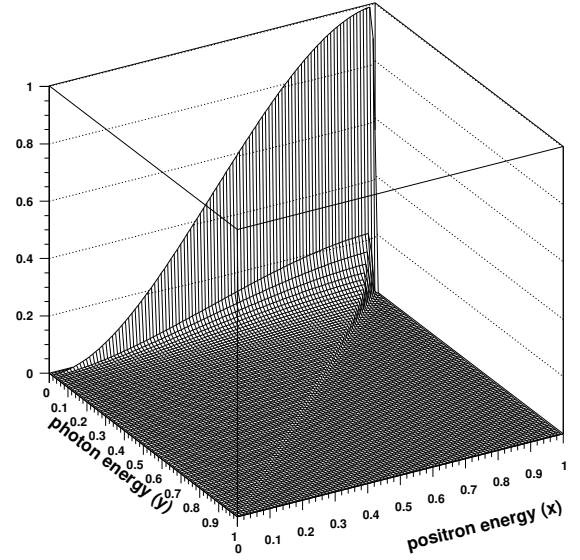


図 2.4: ミューオンに偏極がない場合の RMD 確率分布。 $x = 2E_e/m_\mu$ と $y = 2E_\gamma/m_\mu$ に対する依存性を示している。 $x \sim 1, y \sim 0$ を満たす事象が高頻度で生じることがわかる。[5]

2.2 標準模型を超えたモデル

これまで、標準模型におけるミューオンの性質や相互作用について見てきた。ここでは BSM 理論での $\mu \rightarrow e\gamma$ について議論する。

2.2.1 ニュートリノ振動

ニュートリノ振動とはニュートリノの弱固有状態がある時間経過した後、別の弱固有状態に移る現象である。これはニュートリノの弱固有基底においてはその質量項に混合が生じる、つまり、質量行列に非対角成分が存在することが原因である。

標準模型においてはフレーバー量子数は保存するため $\mu \rightarrow e\gamma$ は禁止されているが、ニュートリノ振動を考慮すると図 2.5 のダイアグラムで表される過程を通して崩壊分岐比を計算することができ、ニュートリノが Dirac 型粒子の場合は以下のように表される。ただし、[5] の (86) 式を参照。

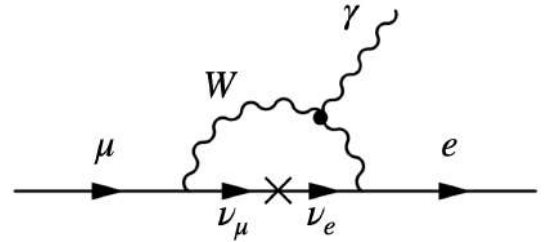


図 2.5: ニュートリノ振動を介した $\mu \rightarrow e\gamma$ のダイアグラム

$$B(\mu \rightarrow e\gamma) = \frac{3\alpha}{32\pi} \sum_i \left| U_{\mu i}^* U_{ei} \frac{\Delta m_{\nu_i}^2}{M_W^2} \right|^2 \sim 10^{-54} \quad (2.11)$$

ここで U は Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (PMNS) 行列を表し、 $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$ はニュートリノの質量固有状態の質量二乗差である。(2.11) 式は $\Delta m_{\nu_i}^2/M_W^2$ のファクターにより大きく抑制されており実験で検出することは不可能である。ニュートリノが Majorana 型の場合はこのファクターが $\mathcal{O}(m_i/M_R)$ に置き変わるが、それでも崩壊分岐比は $\sim 10^{-40}$ で検出可能な値ではない。ただし、 M_R は右巻きニュートリノの Majorana 質量。

2.2.2 超対称性の破れ

超対称性 (Supersymmetry, SUSY) とはスピン 1/2 だけ違うボソンとフェルミオンの間の変換に対する対称性である。この超対称理論においても CLFV の可能性が以下のように示唆される。まず、レプトンの超対称パートナーであるスレプトンのセクターにおいて超対称性が弱く破れる質量項は以下のように表される。

$$\mathcal{L}_{soft} = -(m_E)_{ij}^2 \tilde{e}_{Ri}^* \tilde{e}_{Rj} - (m_L)_{ij}^2 \tilde{l}_{Li}^* \tilde{l}_{Lj} - [m_0 (A_e)_{ij} H \tilde{e}_{Ri}^* \tilde{l}_{Lj} + h.c.] \quad (2.12)$$

ここでレプトン l に対してスレプトンを $\tilde{l}$ としている。また、 m_E, m_L はそれぞれ右巻きスレプトン $\tilde{e}_R$ と左巻きスレプトン $\tilde{l}_L$

の質量行列、 m_0 は超対称性の破れのパラメタ、 A は無次元のスカラー行列、 H は Higgs 場である。もしレプトンの質量行列が対角化されていてもこのスレプトンの質量行列に非ゼロの非対角成分があれば、図 2.6 のダイアグラムで表されるように未発見の重い粒子 $\tilde{\chi}^0$ を仮定することで $\mu \rightarrow e\gamma$ が起こり得る [5]。この崩壊分岐比は以下のように表される。ただし、[7] の (6.4.1) 式を参照。

$$B(\mu \rightarrow e\gamma) \sim \left(\frac{|m_{\tilde{\mu}_R \tilde{e}_R}^2|}{m_{\tilde{l}_R}^2} \right)^2 \left(\frac{100 \text{ GeV}}{m_{\tilde{l}_R}} \right)^4 \times 10^{-6} \quad (2.13)$$

パラメタの値にも依存するが、この崩壊分岐比は観測可能な値である。

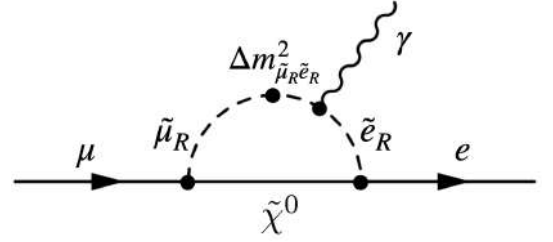


図 2.6: スレプトンの混合を介した $\mu \rightarrow e\gamma$ のダイアグラム

2.3 MEG II 実験における物理

2.3.1 信号事象

ここで、MEG II 実験が発見を目指している信号事象の特徴を述べる。信号事象は図 2.7 に示すように μ^+ 静止系での二体崩壊である³。この崩壊の特徴は以下の三点にまとめられる。

- γ と e^+ が逆向きに放出される
- γ と e^+ が同時に生成される
- γ と e^+ は同じエネルギー $m_\mu/2$ を持つ



図 2.7: MEG II 実験の信号事象

但し、 m_μ はミューオンの静止質量であり、表 2.1 に示すとおり

105.7MeV である。この信号事象の数を N_{sig} とすると以下のように表される [1]。

$$N_{sig} = R_{\mu^+} \times T \times \Omega \times B \times \epsilon_\gamma \times \epsilon_{e^+} \times \epsilon_s \quad (2.14)$$

但し、 R_{μ^+} はビームレート、 T は測定時間、 Ω は検出器の立体角、 B は信号事象の崩壊分岐比、 $\epsilon_\gamma, \epsilon_{e^+}, \epsilon_s$ は γ, e^+ 、そしてセレクションの検出効率である。

³ μ^- を用いるとミューオニック原子が生成されるという問題があるため、実験では μ^+ が用いられる [1]

2.3.2 バックグラウンド

MEG II 実験には物理的背景事象と偶発的背景事象の二つのバックグラウンドがある。まず、偶発的背景事象は図 2.1 で示した Michel 崩壊により発生した e^+ と、他の起源により発生した γ が偶発的にコインシデンスを起こし、信号事象に似ることである。この γ の起源として図 2.3 で示した RMD や陽電子が物質中の電子と e^-e^+ 対消滅を起こす事象 (Annihilation In Flight, AIF と呼ばれる) がある。一方、物理的背景事象というのは RMD である。これはニュートリノが持ち去るエネルギーが小さい時、 μ^+, γ, e^+ が信号事象とよく似た様子になるためである。

物理的背景事象は e^+ と γ のエネルギーと放出角を十分な精度で測定できれば信号事象と区別することが可能であり、MEG II 実験の背景事象は偶発的背景事象が支配的である。この偶発的背景事象の数を N_{acc} とすると以下のように表される [1]。

$$N_{acc} \propto R_{\mu^+}^2 \times \Delta E_\gamma^2 \times \Delta p_{e^+} \times \Delta \Theta_{e^+\gamma}^2 \times \Delta t_{e^+\gamma} \times T \quad (2.15)$$

但し、 ΔE_γ は γ のエネルギー分解能、 Δp_{e^+} は e^+ の運動量分解能、 $\Delta \Theta_{e^+\gamma}$ は角度分解能、 $\Delta t_{e^+\gamma}$ は時間分解能を表す。(2.14) 式と (2.15) 式を比較すると N_{sig} は R_{μ^+} に比例するのに対して N_{acc} は $R_{\mu^+}^2$ に比例する。そのため、一定の崩壊数 $R_{\mu^+} \times T$ に対してバックグラウンドレートをなるべく抑えられるよう、ビームは直流を使用するのが良いことがわかる。

2.3.3 まとめ

以上の議論から MEG II 実験における $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索においてセットアップに求められるものは、大強度の直流 μ^+ ビームと、エネルギー・角度・時間に対する十分な分解能と検出効率をもった検出器であることがわかる。

前身である MEG 実験では検出器性能の制限により、ビームは最大強度では用いられなかったが、MEG II 実験では $7 \times 10^7 \mu^+/s$ という世界最大強度でデータを取得し MEG 実験より 1 桁上の感度で探索することを目指している。ここで、CLFV 探索の歴史を図 2.8 に示す。[1] $\mu \rightarrow e\gamma$ 以外にも $\mu N \rightarrow eN$ や $\mu \rightarrow 3e$ という過程の発見を目指した実験がある。

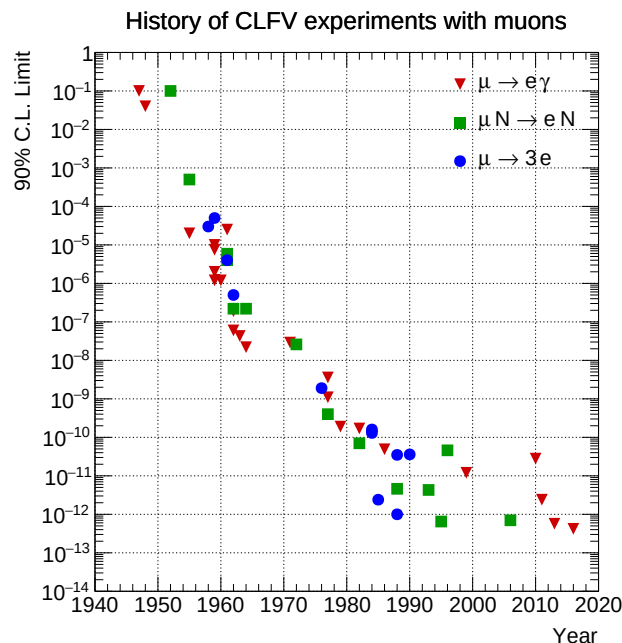


図 2.8: CLFV 探索の歴史。図にはミューオン崩壊によって引き起こされる可能性のある 3 つの代表的な CLFV 反応に対する分岐比上限値が示されている。様々な BSM 理論において $\mu \rightarrow e\gamma$ の崩壊分岐比は $\mathcal{O}(10^{-11}) \sim \mathcal{O}(10^{-15})$ と予言されており、実験での発見の期待が高まっている。 [1]

第3章 MEG II実験

本章で実験セットアップの概要を述べる。まず、3.1 章で MEG 実験の概要と最終結果を紹介し 3.2 章でそのアップグレード実験である MEG II 実験の概要をまとめる。なお、液体キセノンガンマ線検出器のアップグレードに関しては本論文の主要テーマであるため次章で詳しく議論する。

3.1 MEG 実験

3.1.1 概要

図 3.1 に MEG 実験検出器の全体像を示す。大強度のミュオンビームを静止ターゲットによって静止させ、ミュオンの静止系で二体崩壊した陽電子とガンマ線を検出するというのが MEG 実験のセットアップである。この時、陽電子は COBRA¹電磁石による磁場により螺旋軌道を描きながらドリフトチェンバーによって軌跡を捉えられる。そしてタイミングカウンターでのヒット時間が測定される。一方、ガンマ線は液体キセノン検出器内に進入し、シンチレーション光を発する。そのシンチレーション光を光センサーで検出することでガンマ線のエネルギー、時間、位置を測定する。以下ではこれら検出器の詳細を説明する。

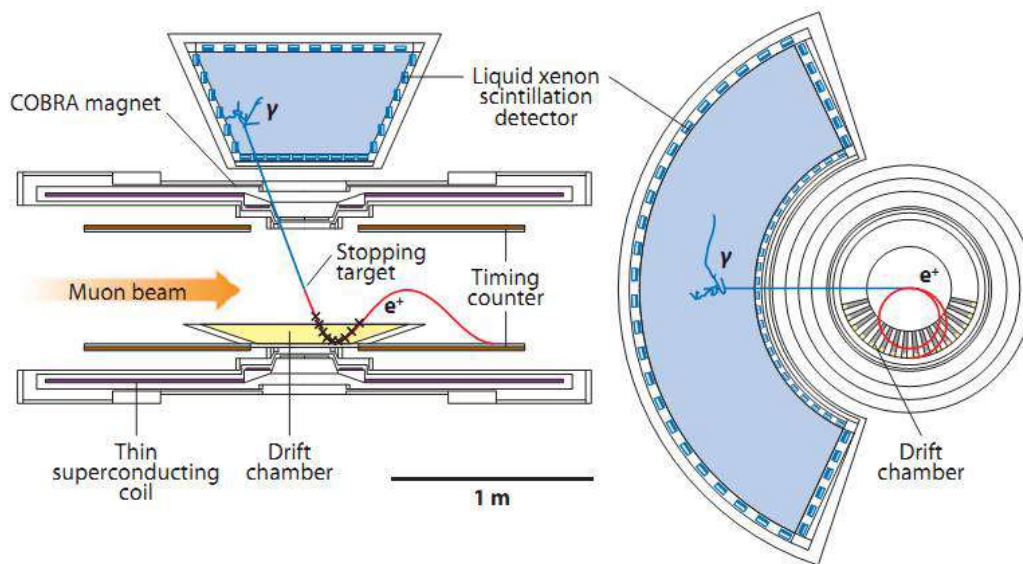


図 3.1: MEG 実験セットアップ [1]

3.1.2 ビームライン

PSI で用いられるミュオンビームは以下のようにして生成され MEG 実験静止ターゲットに打ち込まれる。

¹後で述べるが、これは COntant Bending RAdias の略。

図 3.2 左に示した Cockcroft-Walton 型加速器によって加速された陽子は Injector II と呼ばれる小型のサイクロトロンによって 72 MeV まで加速される。その後、図 3.2 右に示した大型のサイクロトロンによって 590 MeV まで加速される。これは 2.4 mA 運転時には 1.4 MW に相当する。



図 3.2: Cockcroft-Walton 型加速器 (左) と直径 15 m 程の大型サイクロトロン (右)。[9]

このようにして加速された陽子は厚さ 4 cm のグラファイトターゲットに入射する。こうして π^+ が生成され $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ という崩壊を経てミュオンが生成される。これらのうちグラファイトターゲット表面でパイオンが静止して生成されたミュオンは運動量が揃っており、表面ミュオンと呼ばれる。この表面ミュオンは図 3.3 に示された $\pi E5$ ビームラインを通り MEG 実験検出器まで輸送される。このラインは Separator と Triplet I, II、Beam Transport Solenoid (BTS) などによって構成されている。Separator は陽電子やパイオンといった不純物を取り除く。また、BTS によってビームが絞られ、この収束部に置かれた 300 μm の Mylar がビームを減速する。これは、MEG 検出器の静止ターゲットでの静止効率を上げ、なるべく薄いターゲットを使うことが目的である。

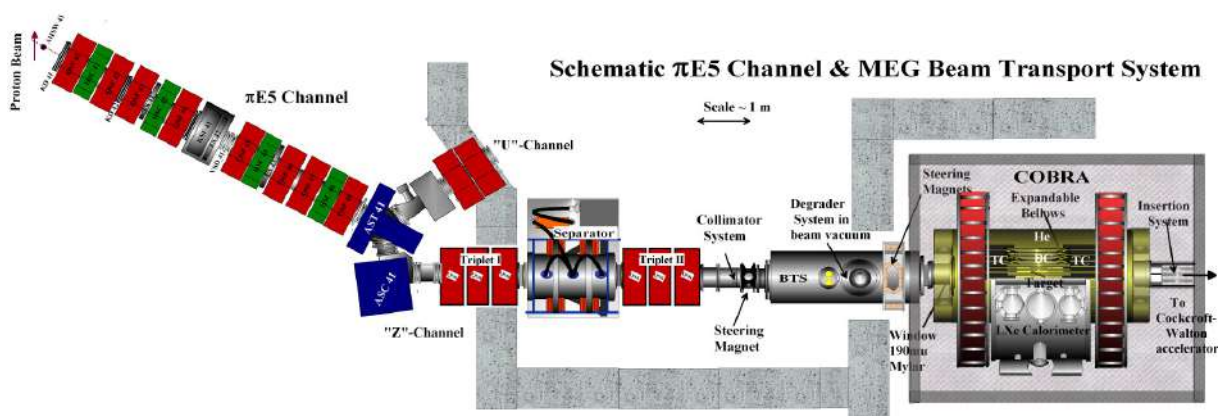


図 3.3: PSI における MEG 実験周辺のビームライン。図において中央部の Separator より右側の実験エリアが $\pi E5$ エリアと呼ばれる。[1]

3.1.3 静止ターゲット

上述のシステムによって輸送されてきたミュオンビームは静止ターゲットに打ち込まれ静止する。この静止ターゲットの写真を図 3.4 に示す。静止ターゲットはポリエチレン、ポリエステルで構成されており厚さは $205\text{ }\mu\text{m}$ 、密度は 0.895 g/cm^3 である。ターゲットの法線ベクトルはビームラインに対して 70 度傾けてインストールされた。これはミュオンが静止ターゲットを進む距離を大きくすることでミュオンの静止効率を上げるとともに検出器方向の距離を短くすることで多重散乱の影響を抑制するためである。また、2.3.2 節で説明した AIF によるバックグラウンドガンマ線の発生を最小にする効果もある。

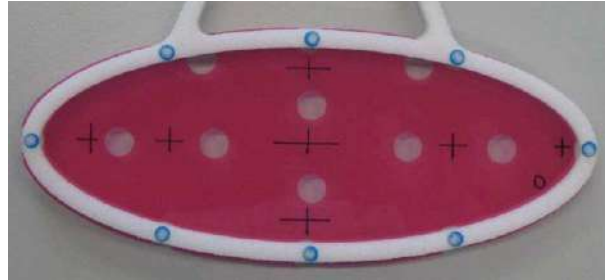


図 3.4: インストールされる前の静止ターゲット。楕円形であり長半径が 10 cm 、短半径が 4 cm である。[12]

3.1.4 COBRA 磁石

COBRA 磁石は図 3.3 にある通り MEG 実験の陽電子検出器を覆うように設置されており、中心で 1.27 T 、端で 0.49 T の勾配磁場を作り出す超伝導電磁石である。静止ターゲットで生成された一定の運動量をもつ陽電子がその放出角度によらず同一の射影軌道半径を持つ螺旋軌道を描くように設計されている。これが COBRA (COnstant Bending RADias) という名前の語源である。ここで、COBRA 磁石が陽電子を掃き出すイメージを図 3.5 に示す。図の (a) には放出角によらず陽電子が一定の半径を描く様子が示されており、(b) にはビーム方向に対して垂直に打ち出された陽電子が素早くドリフトチェンバーから吐き出される様子が示されている。信号事象の陽電子はドリフトチェンバーに当たる一方で、大部分の Michel 陽電子はドリフトチェンバーに当たらない。このようにレートを抑えて信号事象のエネルギーを持った陽電子を検出器に導くことができる。COBRA の勾配磁場などの詳細は [11] にある。

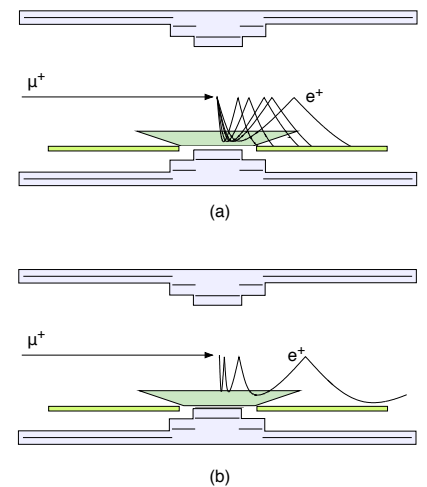


図 3.5: COBRA 電磁石のイメージ [12]

3.1.5 ドリフトチェンバー

ドリフトチェンバーは陽電子の飛跡を再構成するための検出器である。COBRA 内部にインストールされた写真を図 3.6 に示す。写真のようにドリフトチェンバーは 16 のモジュールから構成されており各モジュールは 2 層構造でビーム軸方向にワイヤーが張られている。この方向にバーニャパッドと呼ばれるストリップを設置することで陽電子のビーム方向 (z 軸方向) 位置を測定する。また、多重散乱を防ぐ目的で物質量を下げるためにガスはヘリウムとエタンが $1:1$ の割合で用いられている。

3.1.6 タイミングカウンター

ドリフトチェンバーを通過した陽電子のヒット時間を測定するのがタイミングカウンターである。図 3.7 に MEG で用いられたタイミングカウンターのデザインを示す。図のように 15 本のシンチレーションバーが並べられておりその両端には光電子増倍管 (Photo Multipulier Tube, PMT) が設置されている。この両端で信号が検出される時間差によってヒット位置のビーム軸座標がわかる。

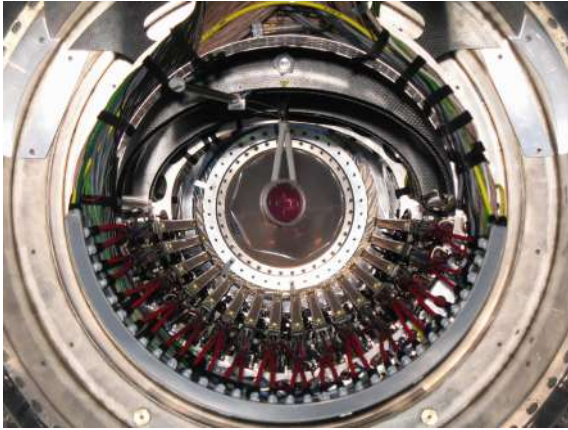


図 3.6: ドリフトチェンバー [12]

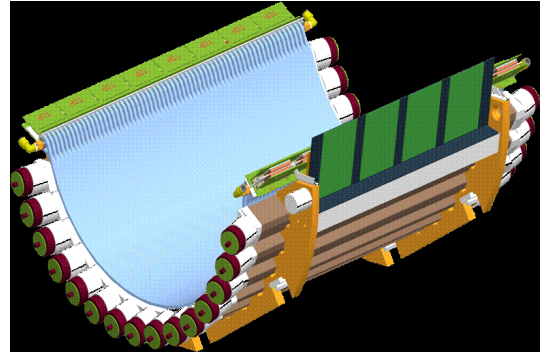


図 3.7: タイミングカウンター [12]

3.1.7 液体キセノンガンマ線検出器

ガンマ線のエネルギー、位置、時間を再構成する検出器が液体キセノンガンマ線検出器 (Liquid Xenon photon detector, LXe) である。図 3.8 にこの検出器の概略を示す。液化時には 900 L の液体キセノンが封入されておりガンマ線が入射した際に発生するシンチレーション光を検出する。

液体キセノンをシンチレーターとして用いることには以下のような利点がある。

- 高密度による高い阻止能力
- 大きい発光量
- 応答の速さ
- 液体であることによる均質性

一方、以下のような欠点が存在する。

- 短波長の光は物質に吸収されやすいが、液体キセノンシンチレーション光のピークは真空紫外光 ($\lambda = 175 \text{ nm}$) であるため、光センサーの有感領域までシンチレーション光が減衰しないような工夫が必要であること
- シンチレーション光の減衰を防ぐため高い純度を維持する必要があること
- 凝固や気化を防ぐために 160 K~165 K 程度の低温に保つ必要があること
- 高価であること

以上のような特徴を持つ液体キセノンに対してシンチレーション光を検出するための PMT (型番:R9869) が浜松ホトニクスと共同で開発された。この PMT の窓は石英窓であり波長 175 nm の光に対して 80%程度の透過率、液体キセノン温度での動作が可能という特徴を持つ。また、量子効率 (Quantum Efficiency, QE) は 15%程度であった。合計で 846

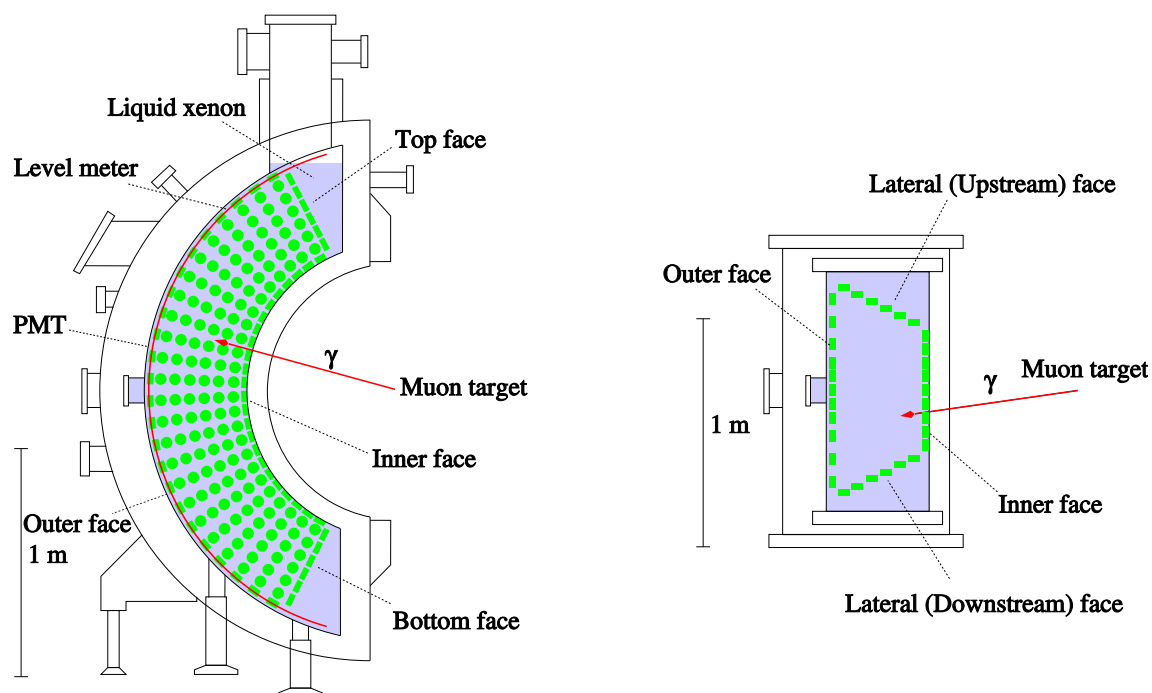


図 3.8: LXe のイメージ図 [12]

個の PMT が検出器の内壁に設置され、信号線はフィードスルーと呼ばれる構造を介して冷凍機の外側へ繋がっている。ここで、MEG 実験での LXe 内部の写真を図 3.9 に示す。



図 3.9: MEG 実験における LXe 内部の様子 [12]

3.1.8 DAQ

MEG 実験では、信号読み出しのために全ての検出器において Domino Ring Sampler 4(DRS4) と呼ばれる高速波形デジタイザーが用いられた。図 3.10 に示された DRS4 チップが合計で 3000 チャンネル使用され、検出器信号波形が保存された。これにより、データが記録された後でもオフラインで解析方法に応じながら波形解析のパラメータを最適化することが可能である。ここで、図 3.11 に 4 チャンネルの DRS4 評価ボードを示す。また、サンプリング周波数はタイミングカウンターと液体キセノンガンマ線検出器で 1.6 GHz、ドリフトチェンバーで 0.8 GHz であった。

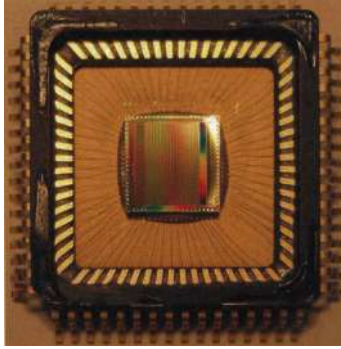


図 3.10: DRS4 チップの写真 [14]



図 3.11: DRS4 評価ボードの写真 [13]

3.1.9 結果とその意義

MEG 実験は 2009 年から 2013 年にかけてデータを取得し、2016 年には全てのデータを用いた探索結果を報告した。このデータの中には $\mu \rightarrow e\gamma$ 事象の有意な兆候は発見されなかったが、崩壊分岐比に対して 4.2×10^{-13} (90% C.L.) という厳しい上限を与えた。これは、従来の上限 (MEGA 実験による) に比べて 30 倍程度厳しいものであった。この MEG 実験の結果によって様々な理論に制約がかけられることになった。さらにこの上限は様々な新物理で予想されている崩壊頻度 $\mathcal{O}(10^{-11}) \sim \mathcal{O}(10^{-15})$ に到達しており、アップグレード実験である MEG II 実験が開始されれば、いつ信号事象が発見されても不思議ではない。以下では MEG から MEG II へ向けたアップグレードについて概要を述べていく。

3.2 MEG II 実験へのアップグレード

3.2.1 概要

MEG II 実験では、MEG 実験に比べて 10 倍の感度向上を目指している。MEG 実験では測定器の性能による制限からミューオンビームレートを $3 \times 10^7 \mu^+/s$ まで落としてデータ取得をしたが、10 倍の探索感度を達成するために検出器の性能を改善し、ビームレートを $7 \times 10^7 \mu^+/s$ まで強化し運転する予定である。(2.15) 式で示すように、背景事象数はレートの二乗に比例する。よって、感度を 1 桁上げるためには 1 桁多いミューオン静止崩壊を観測するだけでは不十分である。検出器の分解能を向上させる必要があり、MEG II 実験では全ての検出器の分解能を 2 倍改善することを目指している。以下で各々の検出器のアップグレード内容について述べる。また、MEG II 実験のセットアップ全体のイメージを図 3.12 に示す。

3.2.2 ドリフトチェンバー (CDCH)

図 3.6 で示すような陽電子飛跡再構成のためのドリフトチェンバーは、図 3.13 のような全長 193 cm の一体型円筒形ドリフトチェンバー (Cylindrical Drift Chamber, CDCH) に置き換えられた。ガスも $\text{He} : \text{C}_4\text{H}_{10}$ (イソブタン) = 9 : 1 の混合ガスに変更され、陽電子がタイミングカウンターに入るまでに通過する物質量は $2.0 \times 10^{-3} X_0 \rightarrow 1.6 \times 10^{-3} X_0$ へと減少する。これによって、多重散乱やエネルギー損失が抑えられる。全長が長くなったため、陽電子がタイミングカウンターにヒットする直前までトラックすることが可能になった。これによって CDCH とタイミングカウンターの時間に対する不定性が減り検出効率の向上が期待できる²。ビームレートの増加と合わせると統計は 5 倍程度になると予想されている。

²他にも、邪魔な構造体なくなったことにより検出効率の制限がなくなったことや、一体型になったためヒット数が増え、角度や運動量に対する分解能が向上したというのも重要な改善点である。

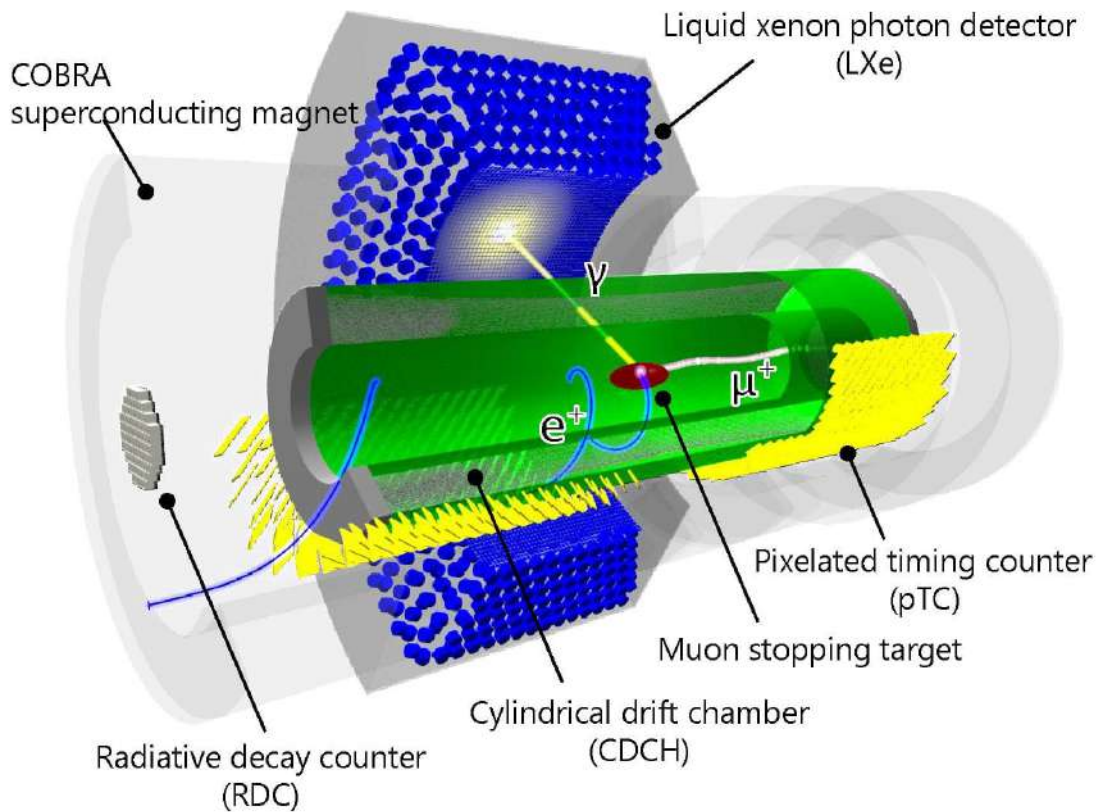


図 3.12: MEG II 実験のセットアップ [1]

3.2.3 陽電子タイミングカウンター (pTC)

MEG II 実験における陽電子タイミングカウンター (Pixelated timing counter, pTC) は上流側と下流側にそれぞれ 256 個ずつ細分化されたシンチレーションカウンターが用いられる。図 3.14 に単一のカウンター (サイズが 2 種類) を示す。また 256 個のカウンターを設置する際のレイアウトを図 3.15 に示す。信号事象の陽電子は、平均して 9 個のカウンターにヒットするような設計がなされており、複数のカウンターで同時に測定することにより、35 ps 程度の時間分解能を達成できる。また、この細分化によって信号事象と背景事象の陽電子が同じカウンターにヒットするパイルアップの確率を下げる事ができる。シンチレーション光の読み出しは MEG 実験で用いられた PMT に代わって Silicon Photo Multiplier (SiPM) が使用されている。

3.2.4 輻射崩壊同定用検出器 (RDC)

2.3.2 節で述べたように、偶発的背景事象を作り出す背景ガンマ線の起源は RMD と AIF である。MEG II 実験ではこのうち、RMD からのガンマ線を同定し、背景事象を低減するために新しく輻射崩壊同定用検出器 (Radiative Decay Counter, RDC) が導入される。エネルギーの高いガンマ線 (およそ 48 MeV 以上) を伴う RMD 由来の陽電子は 3 MeV 程度であり Michel 由来の陽電子に比べて低エネルギーである。よって COBRA 磁場による螺旋軌道の半径は小さくビーム軸近くを運動する。そのためビーム軸近くに検出器を置くことで RMD 由来の陽電子と同定できる。その様子を図 3.16 に示す。この下流側 RDC はプラスチックシンチレーター 12 本と LYSO 結晶 76 個を用いて構成されている。その様子を図 3.17 に示す。プラスチックシンチレーターが時間を測定し LYSO がエネルギーを測定する。

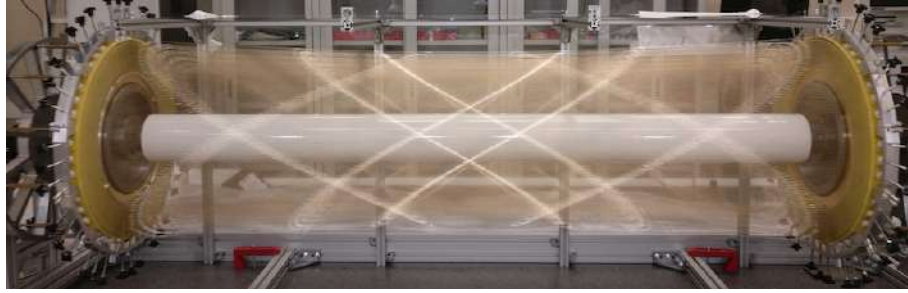


図 3.13: CDCH の写真。[1]

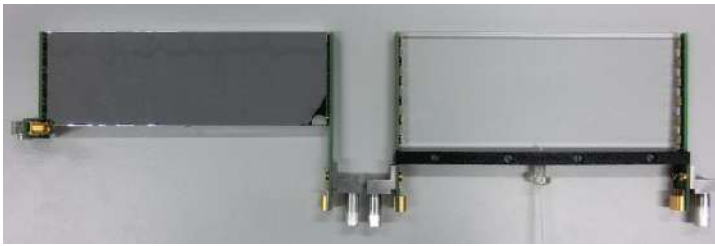


図 3.14: pTC のカウンターの写真。左側は $40 \times 120 \times 5 \text{ mm}^3$ の大きさでリフレクター及び遮光シートが巻かれている。右側は $50 \times 120 \times 5 \text{ mm}^3$ の大きさでリフレクターと遮光シートが巻かれる前の状態。両端に接続された SiPM によって信号を読み出す。[1]

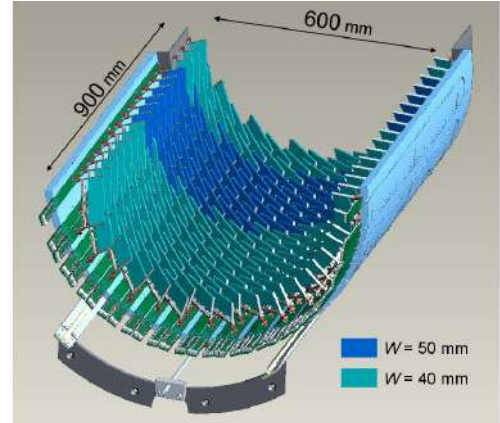


図 3.15: pTC の下流側のデザイン [1]

一方、上流側にも RDC の導入が計画されている。上流側は $10^8 \mu^+/\text{s}$ という高レートのミュオンが通過するため、低物質質量かつ高計数下でも動作可能な検出器が必要である³。現在、Resistive Plate Chamber (RPC) を用いたガス検出器の研究が進められており、2020 年末のコミッショニングにおいて初めてビームラインでのテストが実施された。

3.2.5 DAQ

MEG II 実験では検出器の性能改善に伴いチャンネル数が約 3 倍に増大する。これに対応するため WaveDREAM と呼ばれる DAQ ボードが開発された。WaveDREAM には DRS4 チップやアンプが搭載されており、HV の供給、信号増幅、トリガー、波形取得などの機能が全て一つのボードで実行できる。図 3.18 に MEG 実験の時の DAQ 概略図と比較しながら WaveDREAM の様子を表した。また、図 3.19 に WaveDREAM クレートの写真を示す。1 クレートあたり 16 個の WaveDREAM が設置が可能で、他にも Crate Management Board (CMB)、Trigger Concentrator Board (TCB)、ancillary board が設置される。CMB はクレートの制御とモニター、TCB はオンラインでのトリガー処理、ancillary board は TDAQ⁴ ボードに超低ジッターのクロック信号の供給を可能にする。

3.2.6 期待される性能と到達感度予想

以上のアップグレードによって期待されている検出器の性能を表 3.1 にまとめた。分解能についてはおよそ 2 倍改善されているのがわかる。また、検出効率には特に陽電子に関して大幅に改善していることがわかる。

³ $1 \times 10^8 \mu^+/\text{s}$ 程度のミュオンが通過し、標的に静止するのが $7 \times 10^7 \mu^+/\text{s}$ 程度である。

⁴ トリガー・データ取得システム (Trigger and data-acquisition system, TDAQ)

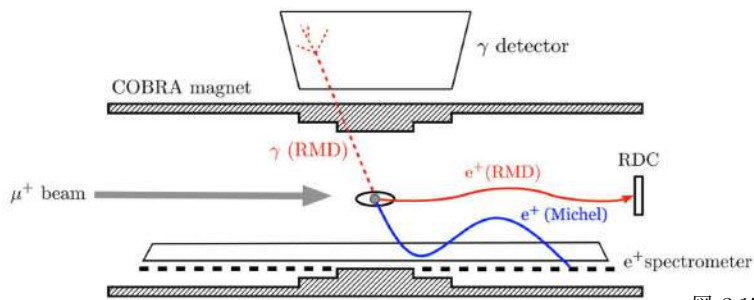


図 3.16: RDC によって RMD 由来の陽電子を同定する様子 [1]

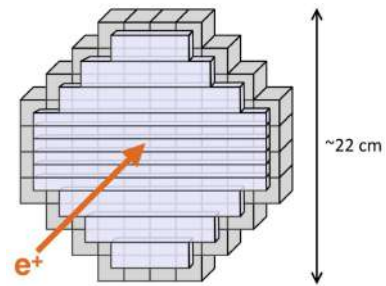


図 3.17: RDC のイメージ図。陽電子入射側 (写真手前側) にあるプラスチックシンチレーターでヒット時間を測定する。奥の立方体が LYSO 結晶でエネルギーを測定する。 [1]

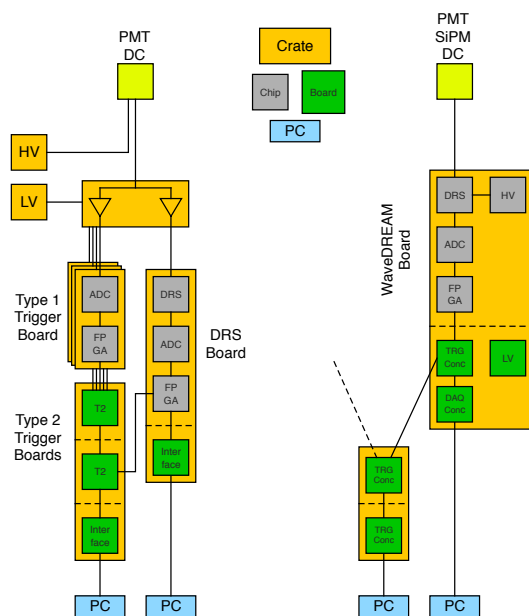


図 3.18: DAQ の仕組み。左が MEG 実験で右が MEG II 実験を表している。 [1]



図 3.19: WaveDREAM のクレート。緑色の 7 個の WDB が挿入されている。最大で 16 個の WDB が設置可能。また、赤いボードが ancillary ボード、青いボードが TCB、右側に見えるのが CMB である。 [1]

図 3.20 にはデータ取得期間と予想される到達感度の関係を示す。1 年間に 20 週間の DAQ が確保できれば物理ラン開始後 3 年間で 6×10^{-14} の崩壊分岐比感度に到達すると見積もられている。今まではエレクトロニクス数が足りておらず、一部のチャンネルを用いてコミショニングが行われてきた。しかし、2021 年には全数が揃い、フルエレクトロニクスを用いたエンジニアリングランが予定されている。ここで大きな問題が発生しなければ、いよいよ物理ランが開始される。

表 3.1: MEG II 実験において期待される検出器の分解能 (Gaussian σ) と検出効率 [1]

Resolution	MEG	MEG II
E_{e^+} (keV)	380	90-130
θ_{e^+} (mrad)	9.4	5.3
ϕ_{e^+} (mrad)	8.7	3.7
z_{e^+}/y_{e^+} (mm,core)	2.4/1.2	1.6/0.7
E_γ (%)	1.7-2.4	1.0-1.1
γ position (mm)	5-6	2.2-5
$t_{e^+\gamma}$ (ps)	122	84
Efficiency(%)		
Trigger	99	99
γ	63	69
e^+	30	70

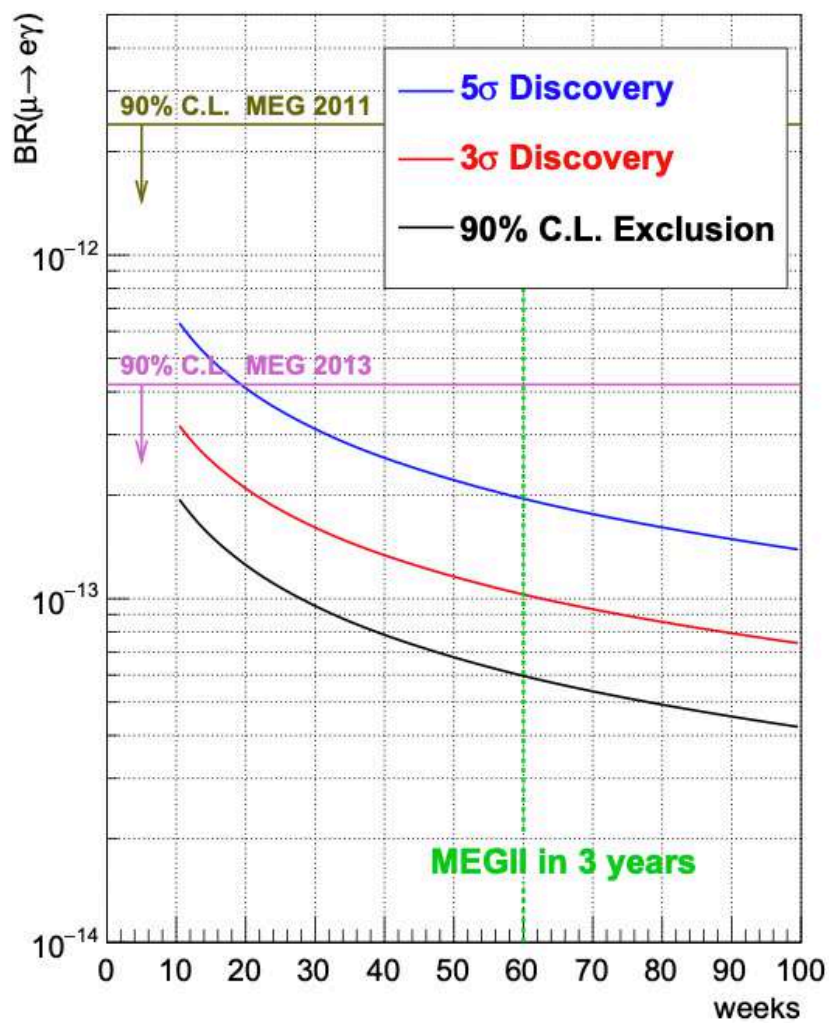


図 3.20: MEG II 実験における到達感度予想 [1]

第4章 液体キセノンガンマ線検出器 (LXe)

本稿の主題である VUV-MPPC は、MEG II 実験において液体キセノンガンマ線検出器内に新しく設置された光検出器である。本章では前半で検出器のアップグレードの概要について述べ、後半では VUV-MPPC の詳細について述べる。

4.1 アップグレードの概要

LXe のアップグレードにおいては新しい光センサーの導入と検出器デザインの変更が施された。ここで LXe における (u, v, w) 座標と各面の名称を定義しておく。MEG 実験時の LXe のデザインを用いて図 4.1 と図 4.2 に示す。

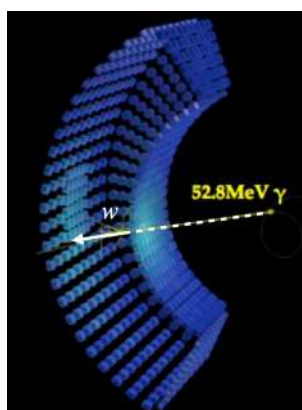


図 4.1: LXe 内へ信号事象のガンマ線が入射する様子と実際の内部の写真。 w 軸は光検出器の表面をゼロ点とした深さ方向の座標である。[1] の図をもとに作成。

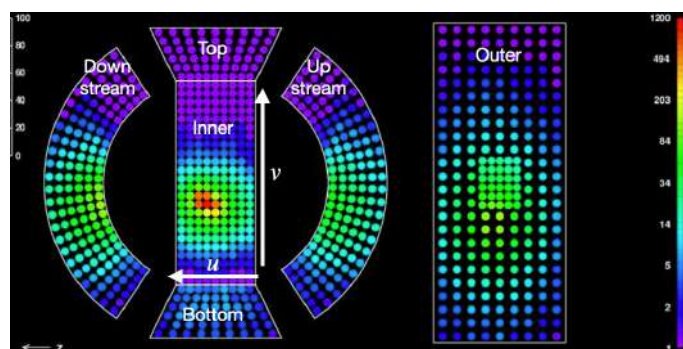


図 4.2: LXe において信号が読み出される様子 (MC)。各面の名称と u, v 軸方向を明示した。[1] の図をもとに作成。

4.1.1 問題点

MEG 実験において、ガンマ線の位置・エネルギー分解能を制限していた主な要因は PMT の大きさと形状である。MEG 実験においてはガンマ線の入射面に 216 個の PMT が敷き詰められていたが、一つの PMT の外径は 57 mm で光電面 (有感領域) は直径 46 mm であった。最近接 PMT の中心間距離は 62 mm であったため、センサー間には間隙が存在する。このため、入射面の近くでシンチレーション光を発生させるような浅いイベントに対しては、PMT の真上で起こったものと間隙部分で起こったものとで収集光量に非一様性が生じてしまう。その様子を図 4.3 に示す。

また、MEG 実験では、Upstream 面、Downstream 面の PMT の光電面が u 方向、つまりビーム軸方向に対して垂直に置かれていたため PMT による影が存在し、これも光量収集のばらつきの原因になっていた。

4.1.2 MPPC の導入

上で述べた光量収集の非一様性の問題は、光センサーを PMT から Multi Pixel Photon Counter (MPPC) に変更することで改善することが期待できる。MPPC の詳細については本章の後半で述べる。LXe で用いられる MPPC は図 4.4

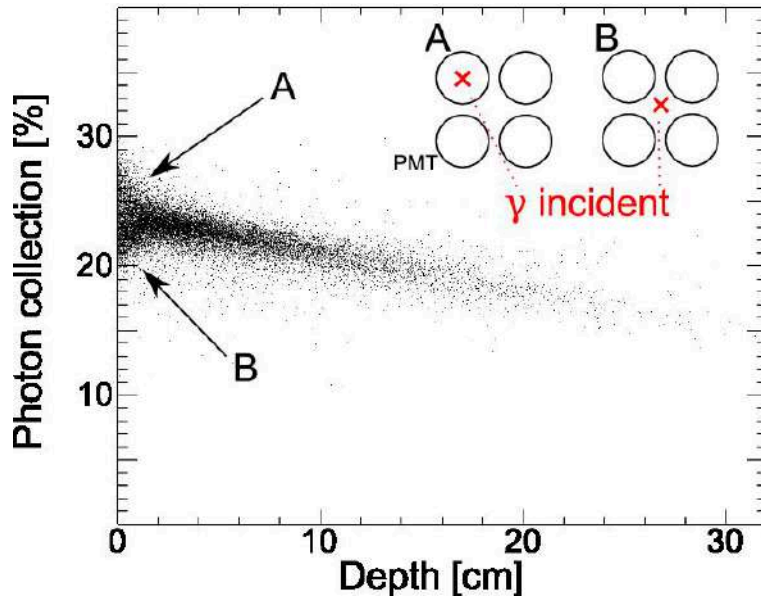


図 4.3: MEG 実験 LXe におけるシンチレーション光収集効率の深さ依存性 [1]

に示すように外形 15 mm 角のため PMT に比べて密に敷き詰めることができる。その様子を図 4.5 に示す。Inner 面の PMT のみが MPPC に置き換えられている。MPPC を使う場合は PMT に比べてチャンネル数が大幅に増えるため読み出しエレクトロニクスが増えることと信号線による熱流入が増えることに注意しなければならない。実際 Inner 面のチャンネル数だけでも 4092 になり、MEG 実験での 216 チャンネルに比べて大幅に増大する。

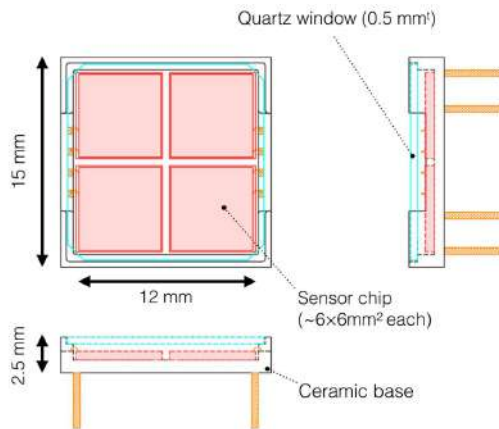
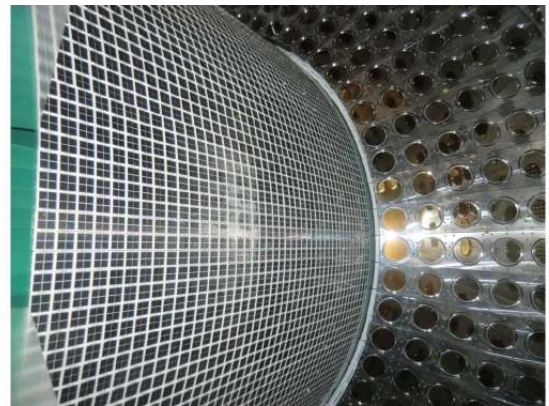
図 4.4: MPPC のデザイン。6 mm 角のセンサーが 4 チップあり有感領域は 144 mm² である。 [1]

図 4.5: MEG II 実験における LXe 内部の写真。 [1]

これによって、より高精細かつ一様な読み出しが可能になった。MEG 実験と比較したガンマ線事象の読み出しの様子を図 4.6 に示す。MEG II 実験ではパイルアップイベントの識別能力が向上することも期待できる。

高精細な MPPC の導入によって位置分解能が改善される様子を図 4.7 と図 4.8 に示す。それぞれ、 u, v 軸方向の位置分解能をガンマ線が初めてキセノンと相互作用をした深さ (w) に対してプロットしており、赤いプロットが MEG 実験、青いプロットが MEG II 実験を表している。 u 軸方向と v 軸方向のどちらも浅い場所でのイベントに対する分解能が MEG 実験に比べて改善していることがわかる。

また、一様な読み出しによってエネルギー分解能の改善も期待できる。図 4.9 と図 4.10 は深いイベント ($w > 2$ cm) に対して MEG 実験と MEG II 実験での分解能を比較しており、図 4.11 と図 4.12 は同様に浅いイベント ($w < 2$ cm) 同士

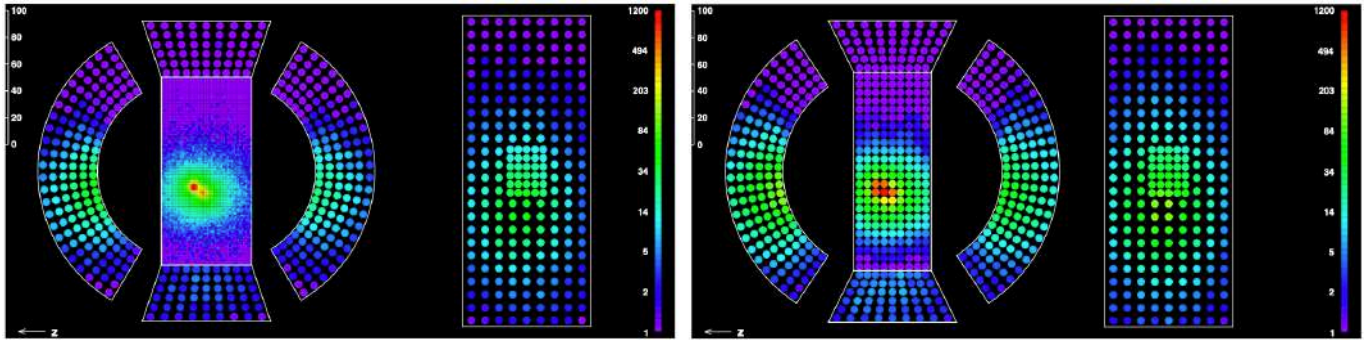


図 4.6: 左が Inner 面に MPPC を導入した場合のシンチレーション光の分布で右は Inner 面が PMT である場合の光量分布である。なお、同じ MC イベントを用いている。 [1]

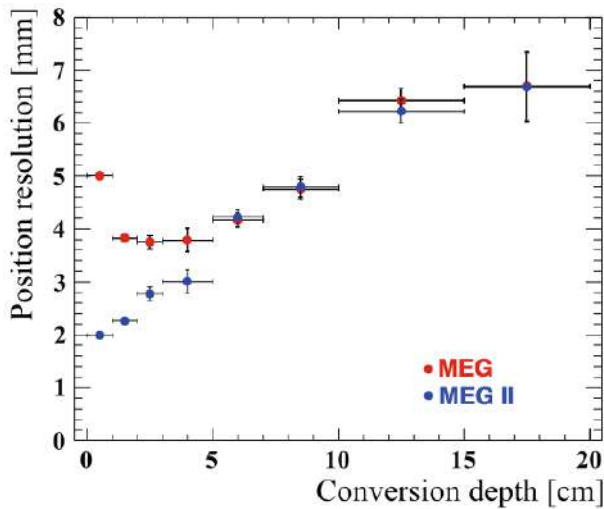


図 4.7: u 軸方向の位置分解能 (MC) [1]

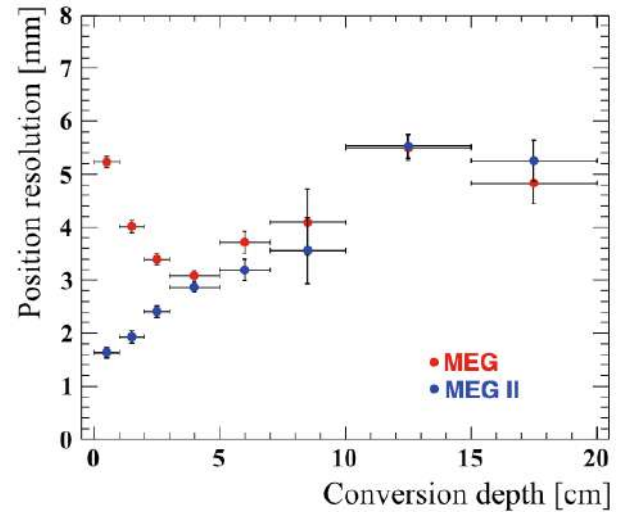


図 4.8: v 軸方向の位置分解能 (MC) [1]

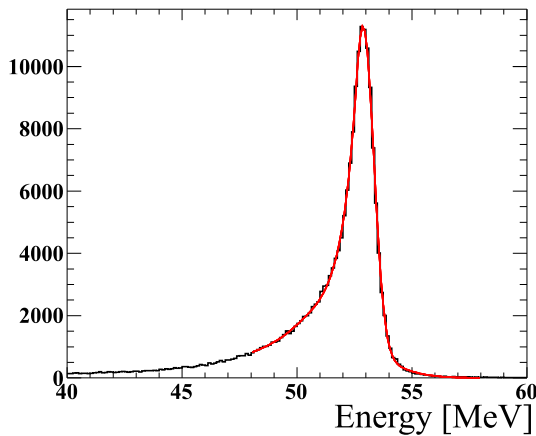
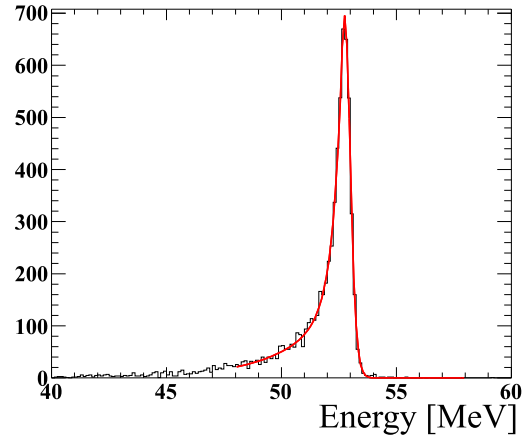
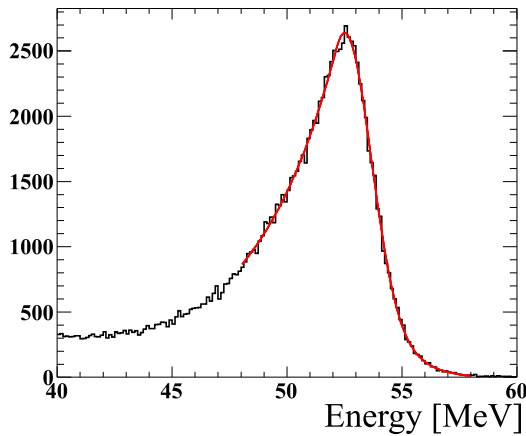
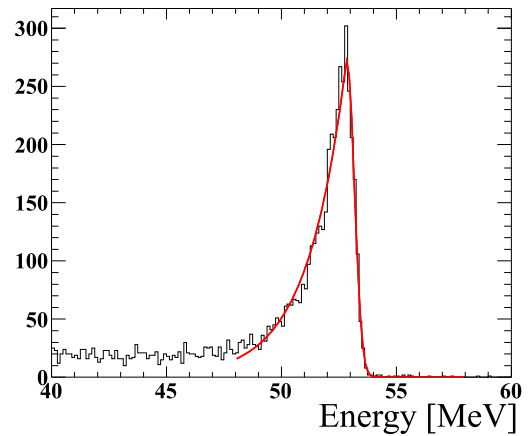
を比較している。これらは単色の信号ガンマ線に対する MC シミュレーションの結果である。Inner 面の光センサーを PMT から MPPC に変えたことでエネルギー分解能が良くなっている。

4.1.3 PMT 配置の変更

検出器のデザイン変化の様子を図 4.13 に示す。MEG 実験の液体キセノン検出器の課題の一つは、Upstream 面、Downstream 面での PMT の影であった。これを改善するために各々の PMT の光電面が同一平面上に並ぶようなデザインに変更された。さらに、Upstream 面と Downstream 面の角度が調整され、ガンマ線の入射面が広がっている。この調整によって、液体キセノンのある領域がビーム軸方向に 20% 程度増えており、ガンマ線が液体キセノンと相互作用した後の電磁シャワーが検出器外部に漏れる確率が減る。

4.2 VUV-MPPC

MEG II 実験では Inner 面の PMT が Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) に置き換えられた。この MPPC の原理について、特に本稿の主題である光子検出の仕組みに着目しながら説明する。

図 4.9: MRG 実験における深いイベント ($w > 2$ cm) に対するエネルギー分布 (MC) [1]図 4.10: MEG II における深いイベント ($w > 2$ cm) に対するエネルギー分布 (MC) [1]図 4.11: MEG 実験における浅いイベント ($w < 2$ cm) に対するエネルギー分布 (MC) [1]図 4.12: MEG II における浅いイベント ($w < 2$ cm) に対するエネルギー分布 (MC) [1]

4.2.1 光検出の原理

MPPC は浜松ホトニクス社製の Silicon Photo-Multiplier (SiPM) である。SiPM はガイガーモードのアバランシェフォトダイオード (Avalanche PhotoDiode, APD) をマルチピクセル化したもので高いフォトンカウンティング能力を持った半導体光検出器である。半導体の PN 接合による光起電力を利用して光子を検出する素子をフォトダイオードと呼ぶが、APD はガイガーモードと呼ばれる状態で運転する点で普通のフォトダイオードと異なる。以下、順にこの説明をする。

まず、PN 型フォトダイオードが光を検出する原理は大まかに以下のとおりである。図 4.14 に示すように P 型半導体と N 型半導体が接合されると、N 型半導体内の電子は易動度が相対的に高く P 型半導体内へ移動し、接合面付近の正孔 (ホール) と結合することで電荷を打ち消し合う。するとこの領域付近は電氣的に中性な空乏層と呼ばれる領域になる。ここで、電子が移動したことにより N 型半導体は正に帯電し、逆に P 型半導体は負に帯電する。よって空乏層には内部電場が発生する。空乏層へ光が入射すると電子・正孔ペアが生成され、その内部電場によりドリフトしそれぞれの電極まで到達することで信号として検出される¹。

¹この構造は太陽電池と同様のものである。

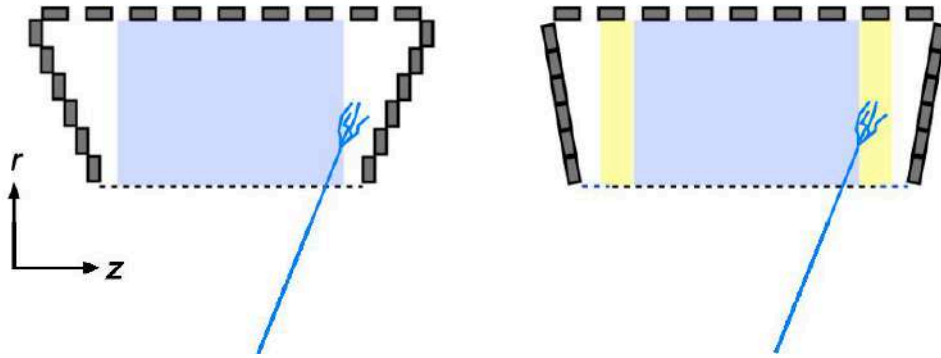


図 4.13: PMT デザイン変更のイメージ。MEG 実験では光電面がビーム軸に対して垂直であったが、MEG II 実験では PMT の各光電面が平行になった。[1]

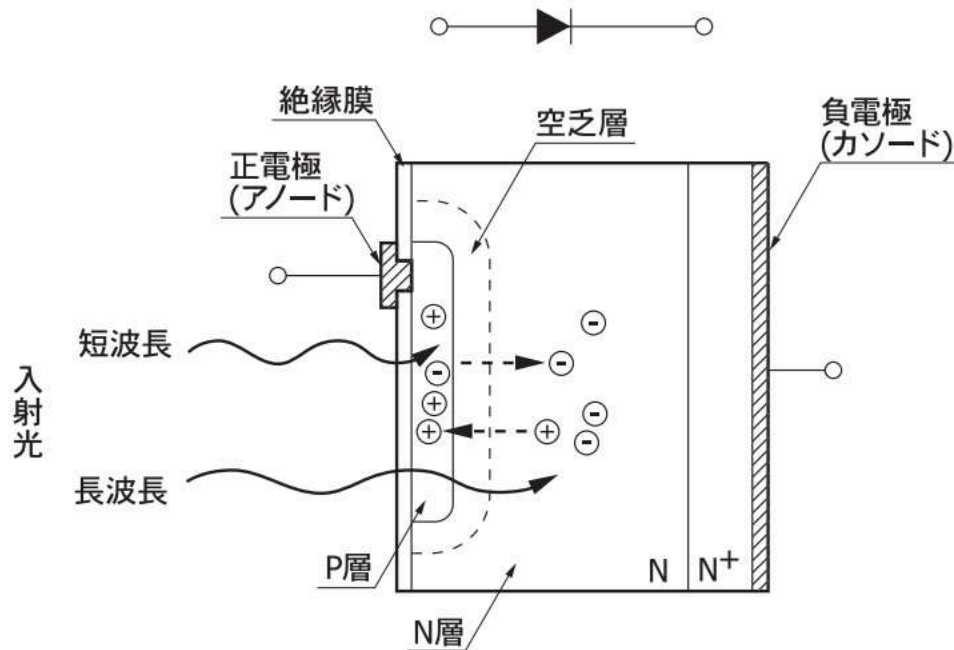


図 4.14: PN 接合型半導体のイメージ [10]

APD では電極間に強力な電場がかけられる。これにより、光入射で生成された電子・正孔対はさらに加速され結晶中の格子と衝突することで新たな電子・正孔対を発生させる。これが繰り返されることで最初に生成された電子・正孔対は指数関数的に増幅することになる。これはアバランシェ増幅 (なだれ増幅) と呼ばれる。さらに強力な電場がかけられ、ブレイクダウン電圧と呼ばれる閾値を超えると、ガイガー放電と呼ばれる入射光子数によらないような放電を起こす。この状態をガイガーモードと呼ぶ。ガイガーモードの APD は高い増倍率を有し、1 光子の検出も可能である。

ガイガーモードの APD をマルチピクセル化し並列読み出しするのが SiPM である。ガイガーモードの各 APD セルは上述したように入射光子数によらず同じ高さの波形を出力する。SiPM が検出する信号は各ピクセルの出力した重ね合わせになるため、原理的には入射光子数と信号の波形は 1 対 1 に対応する。よって、各 APD セルの出力波形の高さ、すなわち 1 光子の波高がわかれば SiPM の信号からフォトンカウンティングが可能になる。そのイメージを図 4.15 に示す。

各々の APD セルにはクエンチング抵抗と呼ばれる素子が直列に接続されている。この抵抗によって電圧降下が引き起こされると放電が止まり電圧が回復する。そして次に入射する光子を検出することができる。

以上が SiPM による光検出の概要である。MPPC は浜松ホトニクス社が開発した SiPM の製品名であり、様々な優れ

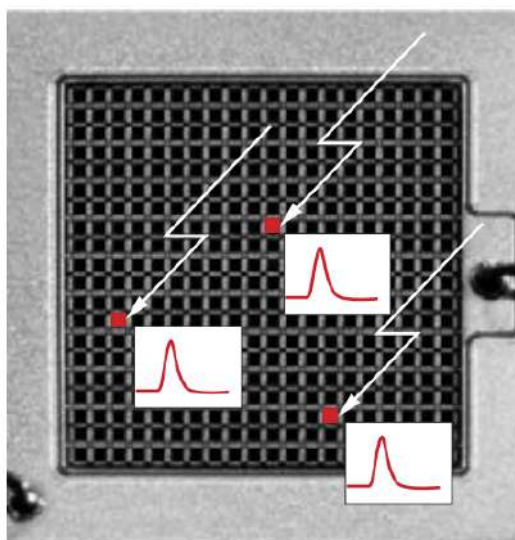


図 4.15: SiPM によるフォトンカウンティングのイメージ [10]

た特徴を持つ。その反面、注意しなければならない点もある。次節では MPPC の一般的な特徴を説明する。

4.2.2 MPPC の特徴

MPPC は PMT に比べて有利な点がいくつかある。それを表 4.1 にまとめた。ただし PMT と MPPC には様々な種類があるが、ここでの具体的な数値は LXe で用いられているものを記述した。

表 4.1: PMT と MPPC の特徴

PMT	MPPC
大きい (ϕ 5.7 cm)	小さい (15 mm 角)
高増倍率 ($10^6 \sim 10^7$)	高増倍率 ($10^5 \sim 10^6$)
高い動作電圧が必要 (~ 1000 V)	低い動作電圧で可動 (~ 50 V)
磁場に有感	磁場に感度無し

また、MPPC には測定において留意しなければならない性質もあり、それを以下にまとめる。

ダークノイズ

熱励起やトンネル効果によって空乏層に電子・正孔対が生成されると、それが 1 p.e. の信号として検出されることがある。これをダークノイズと呼ぶ。低温になればこの数は少なくなり LXe の温度 165 K 程度では影響が小さいことがわかっている。その様子を図 4.16 に示す。

サチュレーション

前節で述べたように MPPC は各ピクセルに光子が入射した際の信号波形の和を出力する。この時に 1 つのピクセルに複数の光子が同時に入射した場合²、そのピクセルが出力する波形は 1 個入射した場合と同じである。すなわち、MPPC の APD セルの個数よりも多い光子が同時にやってくる場合、MPPC の出力する波高は実際よりも少ない光子数に対応する。これを MPPC のサチュレーションと呼ぶ。このサチュレーションによって MPPC の入射光子数と検出光電子数の線形性が失われていく様子を図 4.17 に示す。

²正確には 1 つの光子が入射し、信号が立ち下がる前に他の光子が入射した場合。

アフターパルス

アバランシェ増幅の際にキャリアが結晶中の欠陥や不純物に一定時間捉えられられた後に解放されると本来の信号より遅れてパルスが観測される。これをアフターパルスと呼ぶ。バイアス電圧とブレイクダウン電圧の差 (オーバー電圧) が大きいと、アバランシェの確率が高くなりアフターパルスが発生する確率も高くなる。

クロストーク

アバランシェ増幅の際に発生した光子が他のピクセルに入射し電子・正孔対を生成してしまうことがある。これをクロストークという。これもオーバー電圧が高ければアバランシェ確率も高くなりそれだけ発生頻度が上昇する。

放射線損傷

一般的に SiPM に対する放射線の影響は広く知られている。電子線などの荷電粒子やガンマ線が引き起こすような「電離過程による損傷」と、中性子や陽子、その他の重粒子が引き起こす「非電離過程による損傷」がある。前者は絶縁膜中で正孔が捕獲され電氣的な性質が変化したときに、Si と絶縁膜の境界面で新しい準位が生成されることで引き起こされる。これは表面損傷とも呼ばれ、本研究との関わりが深いので 5.3.1 節で詳述する。一方後者は Si 原子核と放射線が散乱を起こしたときに格子欠損が生成されることが原因である。これはバルク損傷とも呼ばれる。両者ともに熱励起の確率を高めるため、ダークノイズ増加の原因となる [16]。さらにブレイクダウン電圧や増倍率、PDE などに影響を与える可能性もある。

温度依存性

MPPC のブレイクダウン電圧は温度変化に敏感であり、それゆえ増倍率も温度依存性が大きい。ブレイクダウン電圧の温度係数はおよそ $50 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ である [44]。

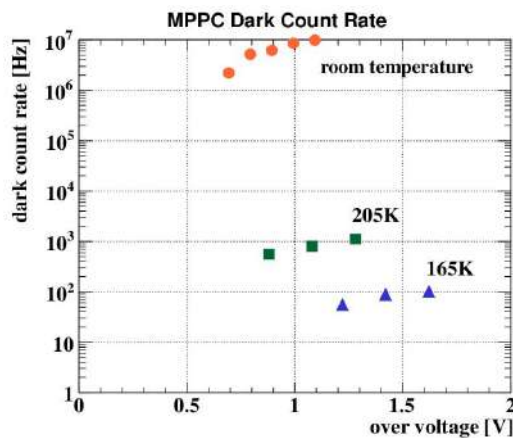


図 4.16: MPPC ダークノイズレートの温度依存性 [1]

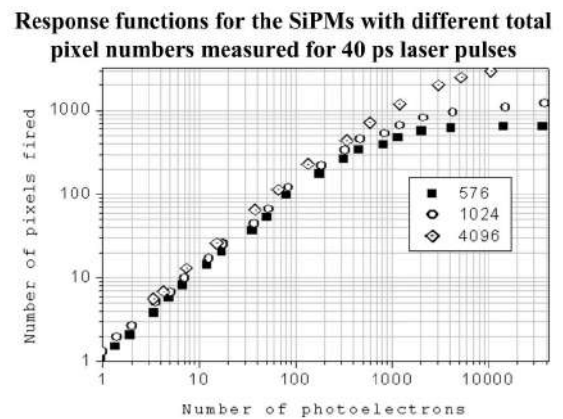


図 4.17: MPPC のサチュレーションによって出力の線形性が失われる様子。縦軸が検出光電子数で横軸が実際に入射した光子数。[15]

4.2.3 VUV-MPPC の開発

4.1.1 節で述べたような MEG 実験における浅いイベントでの収集光量のばらつきを改善するために、液体キセノンのシンチレーション光である真空紫外光 (Vacuum Ultra Violet, VUV) に感度のある MPPC が浜松ホトニクス社と共同で開発された [8]。LXe で使用するために必要とされる性能は以下の通りである。

- VUV ($\sim 175 \text{ nm}$) に対する十分な感度

- 液体キセノン温度 (~ 165 K) で動作可能
- 1つの素子で $\sim 10 \times 10 \text{ mm}^2$ の面積を占めること
- 波形の時定数が十分短いこと

1点目のVUVに対する感度は一般的なMPPCにはない。これはシリコン結晶やMPPCの保護層であるエポキシ樹脂内のVUV減衰長が極めて短く、有感領域に到達できないことが原因である。これを解決するため、保護膜を取り除いたほか、アバランシェ層手前のコンタクトレイヤーを薄くするなどの改良を行った。その結果、液体キセノンシンチレーション光に対する十分な光子検出効率 (Photon Detection Efficiency, PDE) を有することが確認された。図 4.18 にラポ測定におけるMPPCのPDEの測定結果を示す。

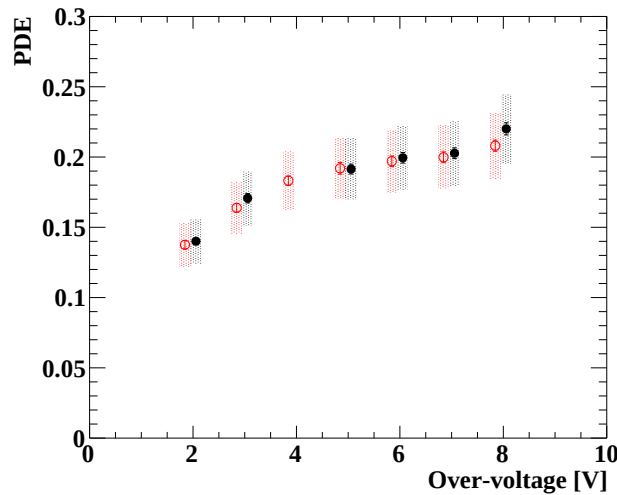


図 4.18: PDE のオーバー電圧依存性。15% 以上の PDE が確認された。異なる色は二つの素子を表す。 [8]

3点目の要請は信号線数の増加による液体キセノンへの熱流入の増加を最小限に抑えるためである。チャンネル数が膨大になるとともに信号線による熱流入が増え液体キセノンの状態を制御することが難しくなってしまう。

4点目の要請は時間分解能が低下することを防ぐためとパイルアップ耐性のために重要である。面積を大きくするためにピクセル数を増やせば、それらは並列接続されるため、全体の静電容量が大きくなり、波形の時定数が大きくなってしまう。実際に開発されたVUV-MPPCの1光電子に対する波形の例は図 4.19 のようになった。このとき、信号としては直列かつ、電圧としては並列に接続するような「ハイブリッド接続」によって、十分に短い時定数 (~ 40 ns) が確認された。ハイブリッド接続のイメージを図 4.20 に示す。

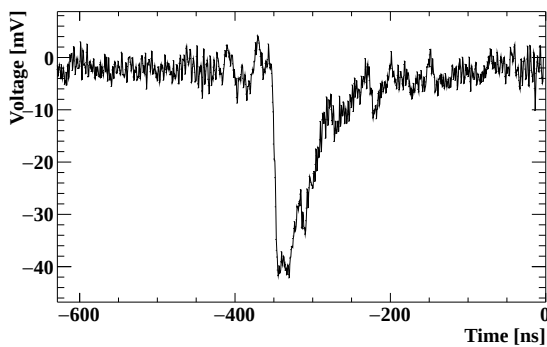


図 4.19: 1 光電子に対する MPPC の波形 [8]

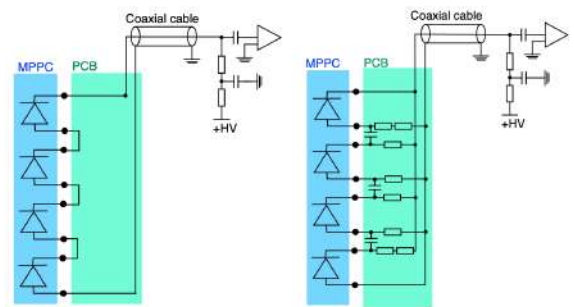


図 4.20: ハイブリッド接続のイメージ [28]

これらの条件を満たして開発された VUV-MPPC の写真を図 4.21 に示す。1つのパッケージに 4 チップが搭載されており、1 チップあたり 6 mm 角である。また、4 チップは独立に読み出しが可能である。1つのピクセルは 50 μm 角のため 1 チップあたり 14400 個のピクセルが並列接続されている。表面の保護窓は、保護膜を取り除いた代わりに表面を保護する目的で導入したものである。石英で屈折率が液体キセノンに近い値を持っており³反射などによる減衰を防いでいる。また、採用されている石英ガラスの液体キセノンシンチレーション光に対する透過率は、ほぼ 100%である。

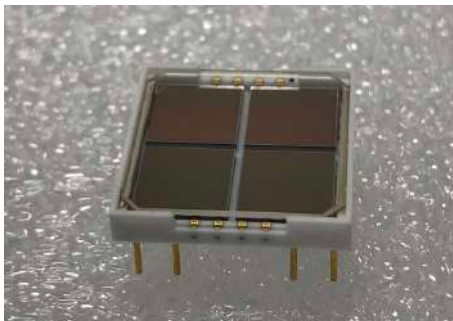


図 4.21: 開発された VUV-MPPC (S10943-4372)

³屈折率は液体キセノンが 1.64 でクォーツが 1.60。

第5章 VUV-MPPCのPDE減少

本章は今回行った研究の目的や関連する研究の紹介をして第6章への導入とする。

5.1 本研究の概要

MEG II 実験は 2017 年に検出器を立ち上げ、大強度ミューオンビームを用いたコミッショニングを毎年行なってきた。その中で LXe に用いられている MPPC の光子検出効率 (Photon Detection Efficiency, PDE) が減少していくという問題が発生している。PDE の減少量とミューオンビームの照射量には明らかな相関が確認されており、3 年程度の物理ランの期間にも減少が続くと考えられる。したがって実際の物理ラン中のキャリブレーションは必須であり、さらに PDE 減少がどこまで進むのかを知ることや、減少の速度を理解することが重要である。そのための研究が計画、実行されており、具体的に我々は「PDE を回復させる手段」、「PDE 減少の原因」そして、「PDE 減少速度の推移」に対する調査を進めている。一つ目の課題に関してはアニーリングと呼ばれる解決方法が提示されており、その成果が実際に確認された。アニーリングとは熱処理によって素子の性質を回復させるもので、詳しくは 5.3.2 節で紹介する。一方、二つ目が本稿の主題であり現在液体キセノンのシンチレーション光である真空紫外光 (Vacuum Ultra Violet, VUV) が関与していると推測されているため、その効果を確かめるための測定を行った。本章ではまず前半で LXe で実際に起こっている PDE 減少を説明し、次いで後半では本研究と関連する先行研究を紹介する。また、三つ目の減少速度の推移に関しては実験計画を議論する上で重要な情報のため調査中である。例えば、PDE 減少速度が徐々に小さくなり、ある程度減少した時点で飽和を起こす場合と、減少速度が緩まらずにいつか PDE がゼロになる場合とでは、物理ラン中に必要とされるアニーリングの回数が異なる。

また、光子数の単位を [photon]、検出光電子数の単位を [photo electron, p.e.] で表す。

5.2 実機で観測された PDE 減少

5.2.1 PDE の定義

MPPC の PDE は以下のように定義される。

$$PDE = \frac{N_{phe}}{N_{pho}} \quad (5.1)$$

ただし、 N_{phe} は検出された光電子数、 N_{pho} は実際に MPPC の受光面に入射した光子数である。

まず、 N_{phe} は信号波形の信号電荷を 1 光電子あたりの積分電荷で割ることで得られる。しかし、それをそのまま検出光電子数と考えることはできない。4.2.2 節で述べたように MPPC にはクロストークやアフターパルスが発生する可能性があるため、 N_{phe} は過大評価されてしまう。その増加率を ECF とおけば検出光電子数は

$$N_{phe} = \frac{Q_{signal}}{Q_{1pe} \times ECF} \quad (5.2)$$

と表す方が正しい。ここで Q_{signal} , Q_{1pe} はシグナルと 1 p.e. 相当の信号電荷を表し、 ECF というのは Excess Charge Factor の略である。

一方、 N_{pho} は例えば、アルファ線源を点光源とした液体キセノンのシンチレーション光に対する議論の場合、以下のように推定できる。まず点光源から MPPC の受光面を見込む立体角を Ω とし、アルファ線のエネルギーを E_α と表す。さらに、液体キセノン中でシンチレーション光 (1 光子) を発生させるために必要な平均エネルギー W とすれば

$$N_{pho} = \frac{E_\alpha}{W} \times \frac{\Omega}{4\pi} \quad (5.3)$$

と計算できる。

ここで、アルファ線源を用いた際のシンチレーション光に対する信号電荷のヒストグラムの例を図 5.1 に示す。後述するが、液体キセノン中のアルファ線源はワイヤーに固定されている。そして、アルファ線が液体キセノンに放出されるまでに、金メッキでできた保護膜を通過するため、アルファ線の放出角によってエネルギーデポジションが変わる。よって、放出角度によってアルファ線のエネルギーがばらつくため、低エネルギー側にテールがある。さらに、ワイヤーに関して光センサーと反対側にアルファ線が放出された場合、ワイヤーによる影の影響で検出光量が小さくなることも大きな影響を与える。また同じ MPPC で LED を微弱に発光させた時の積分電荷の様子を図 5.2 に示す。この微弱光の光量分布をもとに ECF は以下の手順で測定することができる。まず、クロストークやアフターパルスなどが起こらずに ECF が 1 のとき、検出光電子数の確率分布は Poisson 分布に従う。よって、検出光電子数が n であるような確率は

$$P(X = n) = \frac{\lambda^n e^{-\lambda}}{n!} \quad (5.4)$$

と表せる。ただし Poisson 分布の平均、つまり真の光量平均を λ とおいた。0 p.e. のイベント数は ECF に影響されないため、 λ は $\sum P(X = n) = 1$ を利用し、

$$\frac{P(X = 0)}{\sum P(X = n)} = e^{-\lambda} \quad (5.5)$$

から算出できる。ただし、(5.5) 式の左辺は図 5.2 の全イベント数に対する 0 p.e. のイベント数の割合である。一方、0 p.e.(ベDESTAL) と 1 p.e. の差はゲインと呼ばれ、この光量分布の平均値をゲインで割ったものが検出光電子数の平均に相当する。その値を μ とおけば、それは ECF を含んでいるため

$$ECF = \frac{\mu}{\lambda} \quad (5.6)$$

のように求めることができる。図 5.1 のピークの値が変動した時はそれが PDE の変化によるものか ECF の変化によるものなのかは注意しなければならない¹。

5.2.2 LXe の PDE ヒストリー

LXe 内には VUV-PDE のキャリブレーションのためアルファ線源が設置されている。図 5.3 に表されるように、検出器内にはタングステンで作られたワイヤーが張られており一本のワイヤーに 5 個の ^{241}Am 線源が設置されている。 ^{241}Am 線源は 200 Bq 程度の放射能を持ち、5.5 MeV 程度のエネルギーを持ったアルファ線が放出されている。液体キセノン中では飛程はおおよそ 50 μm 程度で線源の大きさも小さいため実質的に点光源と見なすことができる。このアルファ線源が設置されたワイヤーは 5 本あり合計 25 個の点光源が用いられている。その様子を図 5.4 に示す。

ここで、実機の PDE を算出する際、MC シミュレーションでは発光量に最大値を仮定している²。実際は液体キセノンの純度に依存する発光量などを考慮しなければならずその補正ファクターを F として

$$PDE^{data} = PDE^{MC} \times \frac{N_{phe}^{data}}{N_{phe}^{MC}} \times F \quad (5.7)$$

¹シンチレーション光の減衰長などが変わるため、液体キセノン純度の変化などにも注意が必要である。

²MEG II 実験では MEG 実験の時の光量を最大と仮定している。

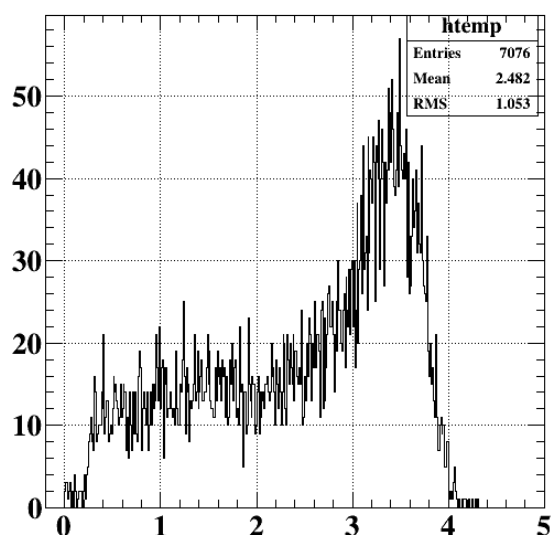


図 5.1: ^{241}Am 由来のアルファ線によって発生したシンチレーション光の信号電荷。シンチレーション光を発生させるアルファ線エネルギーにはばらつきがあるため図のように光量が低い方にテールがある。また、このデータは実機ではなくラボ測定のものである。

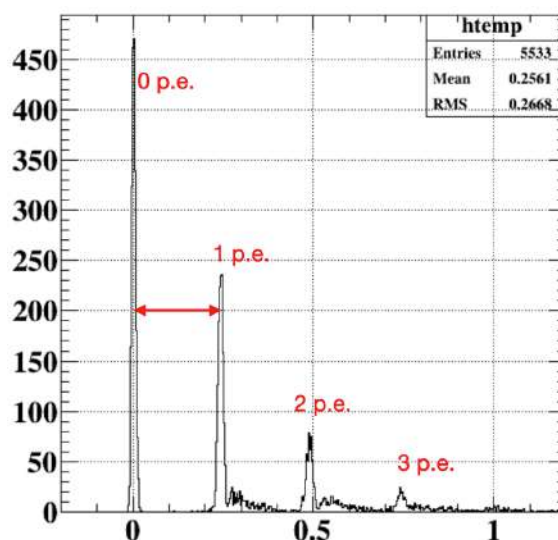


図 5.2: LED を微弱に発光させた時の光量分布。赤い矢印の大きさがゲインである。(これは Q_{1pe} に相当するため本来は素電荷で割った値が増倍率だが慣習的にそのままゲインと呼んでいる。) しかしこの光量分布の平均は ECF を含めているので実際より大きい値になっている。これも実機ではなくラボ測定のものである。

と表現する。実機の MPPC の VUV-PDE はこのようにして計算されておりキャリブレーションに用いられている。

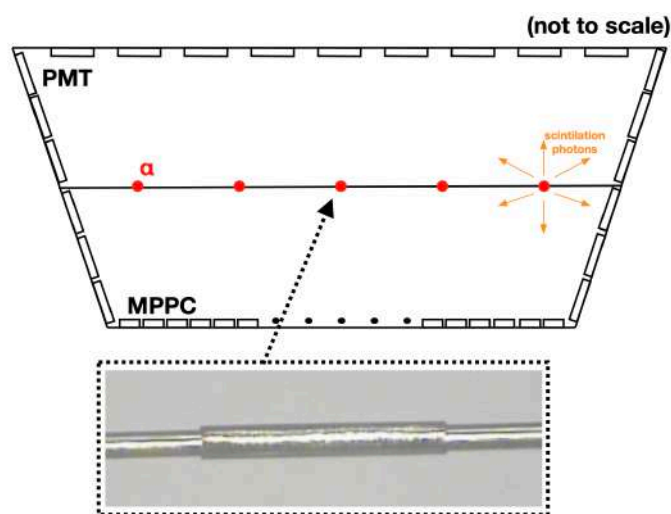


図 5.3: LXe 内に設置されているアルファ線源

さて、2017 年から始まったコミッショニングにおいて VUV-PDE の減少が確認されてきた。2020 年初めにおいて MPPC の PDE はおよそ 8% であり、図 4.18 で示すようなラボ測定での 15% 以上という値に比べて半分程度に減少してしまっている³。MEG II 強度 ($7 \times 10^7 \mu\text{s}$) を用いた 2019 年のビームタイムでは 1 時間あたり $\sim 0.06\%$ という減少速度が報告された。MEG II 実験の運転が 360 日を予定しているのに対して、最悪の場合、60 日で検出器の運転が不可能になるまで PDE が減少してしまうため、これは深刻な問題である。また、VUV 応答が減少しているのに対して、同レベルの可視光応答の減少は観測されなかった。2019 年における PDE 減少の様子を図 5.5 に示す。ただし、LXe 内部には青色 LED が設置されており、可視光応答はこの 460 nm 程度の光に対する値である。

³実際は 2017 年の始めからラボでの測定値に比べて低い値であった。測定環境の違いによる系統誤差の可能性もあるが、まだ原因を理解できていない。

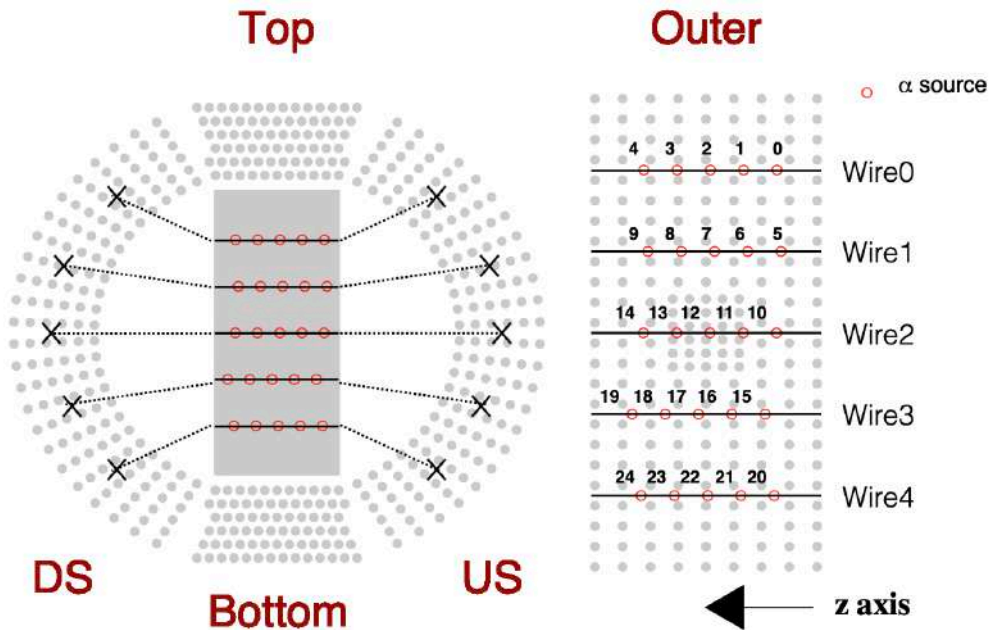


図 5.4: LXe 内部にアルファ線源が設置されているイメージ。5 本のワイヤーが Upstream 面と Downstream 面に固定されており、各ワイヤーには 5 個のアルファ線源がある。合計 25 個が検出器内に設置されている。[25]

5.2.3 実機の環境

PDE 減少の原因を議論する前に LXe 内の MPPC が置かれている環境について整理しておく。

低温

ビームタイム中は検出器内が液体キセノンで満たされているため、MPPC は常に低温で動作している。液体キセノンの温度は ~ 165 K である。

電離放射線⁴

MEG II 実験の検出器は大強度ミューオンビームを用いているため、RMD や AIF を起源としたガンマ線の照射が起きる。LXe の MPPC には MEG II 実験期間に最大で 0.6 Gy 程度照射されると見積もられている。[1]

中性子

加速器由来の中性子による照射も起きている。ビームエリアの実測値から MEG II 実験での合計の粒子フルーエンスが最大で 1.6×10^8 n/cm² 程度になると予想されている。[1]

VUV 光

液体キセノンのシンチレーション光は 175 nm にピークを持った VUV 光であり、2019 年のコミッショニングでは合計 $6.6\text{--}8.4 \times 10^{12}$ photon が各 MPPC (12×12 mm²) に照射されたと考えられている。ここでシンチレーション光の波長スペクトルを図 5.6 に示す。

5.3 先行研究

VUV-PDE 減少に関わる先行研究を紹介する。

⁴放射線の中で電離を引き起こすほどエネルギーが高いものを電離放射線と呼ぶ。一方、電離を引き起こすほどのエネルギーを持たないものを非電離放射線と呼ぶ。

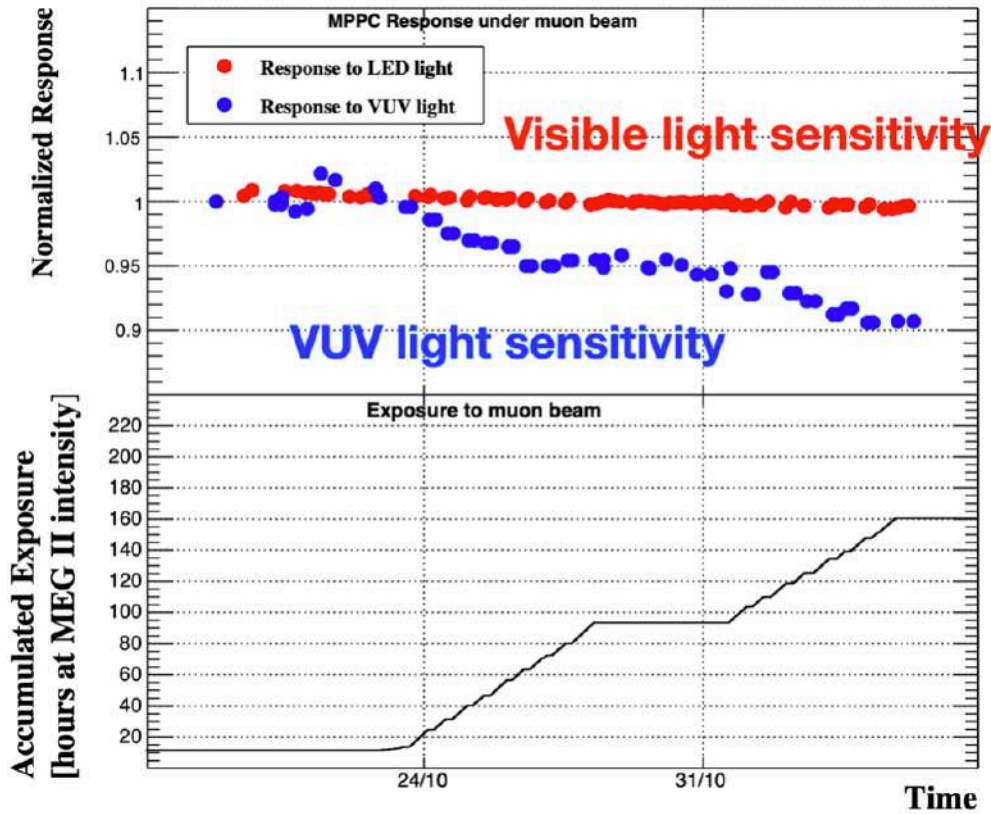


図 5.5: 2019 年における LXe 内 MPPC の PDE ヒストリー。ただし、全読み出し MPPC の平均である。上が PDE のプロットを表し、下は累積のビーム照射量。[25]

5.3.1 表面損傷の原理

4.2.2 節で述べたとおり、SiPM に対する放射線損傷は表面損傷とバルク損傷に大別できるが、表面損傷は LXe で確認されている VUV-PDE 減少に深く関連している可能性があると思われた。この表面損傷の仕組みは以下のように理解できる [18] - [22]。

照射フォトンのエネルギーが 300 keV 以下の場合、これはバルク損傷には寄与せず表面損傷のみ引き起こす。例えば波長 10 nm の X 線の場合、エネルギーはおおよそ 126 eV。波長 175 nm の VUV はさらにエネルギーが低いため、ほとんどが表面損傷に寄与すると考えられる。保護層 (例えば SiO_2 層) にフォトンが入射すると、エネルギーをデポジットして電子・正孔対 (electron-hole pair, e-h) を生成する。電離密度や電場に依存するが、e-h の一部はすぐに再結合し残った e-h はキャリアとして拡散したり電場によりドリフトされ保護層内部を移動する。このとき、電子の移動度は $\mu_e \sim 20 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 程度だが、正孔の移動度は $\mu_h \sim 5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ と小さいため、電子が保護層の外部に容易に脱出する一方で正孔は内部に留まる。このときの正孔の移動はホッピング伝導と呼ばれ保護層の深部やシリコン境界面のダングリングボンド⁵によりトラップされる。ここで、正孔が境界面にトラップされるまでの一連のイメージを図 5.7 に示す。すると境界面付近に正に帯電した準位が作り出され、結果として表面電流が発生しダークカレントの増加などを起こす⁶。また、この正電荷によってキャリア電子が再結合したり、内部電場が弱められたりすると空乏層内で生成された e-h もアバランシェ領域まで到達できない確率が増加し検出効率の低下の原因となり得る。一方、可視光は深部まで到達するのでこの影響は受けにくい。この様子を図 5.8 に示す。

実際、 SiO_2 を窓に使用した APD にガンマ線を照射し短波長領域における量子効率 (Quantum Efficiency, QE) の低

⁵ 結晶の表面や格子欠陥近傍では原子の共有結合が切れておりその結果として不対電子で占められた結合の手が存在する。この結合手をダングリングボンドと呼ぶ。

⁶ バルク損傷もダークカレント増加を引き起こす。

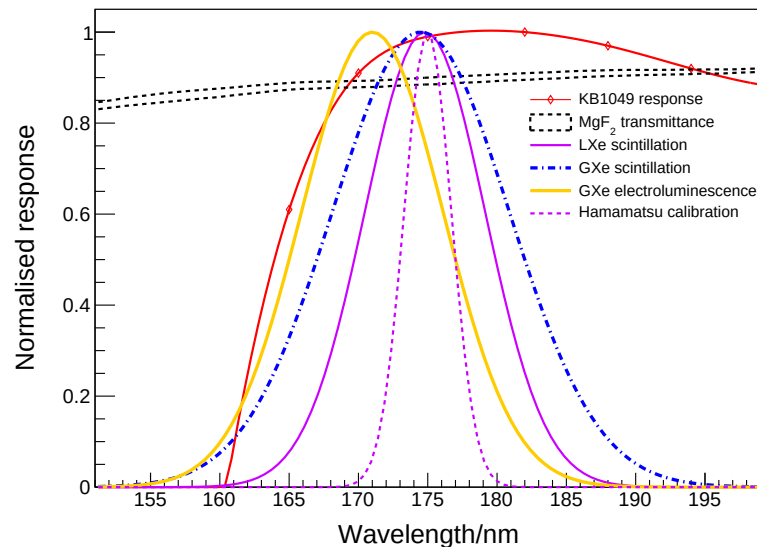


図 5.6: キセノンシンチレーション光のスペクトル。紫が液体キセノンのスペクトルで青は気体キセノンのスペクトルである。また、縦軸は規格化されている。[17]

下が確認された。この実験では Si_3N_4 を窓に用いた光センサーにも 55 kGy のガンマ線を照射しており、QE の減少が確認されたが、二ヶ月後に再度 QE を測定した結果、常温でのアニーリングによって回復している ([24] の Fig. 1 を参照)。 SiO_2 層を用いた素子の方がわずかに回復した一方、 Si_3N_4 層を用いた素子では完全にアニーリングされたと報告している。

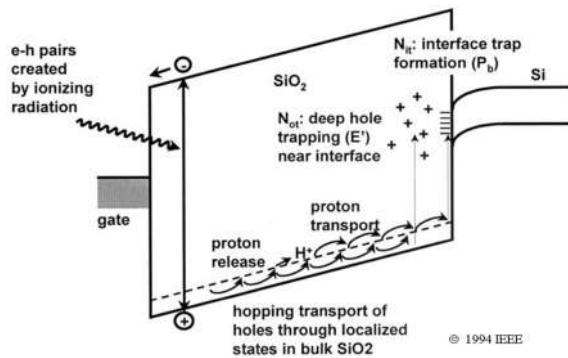


図 5.7: 放射線によって生成された正孔が境界面でトラップされるまでの流れ。[22]

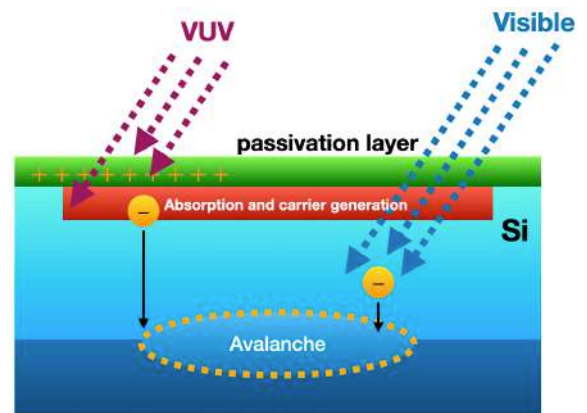


図 5.8: 表面損傷のイメージ。境界面に正電荷が溜まると、付近の内部電場が弱まり、表面近くで生成された電子はアバランシェ領域まで到達できない確率が高くなる。

正孔の易動度は低温において減少すると考えられ、さらに、シリコン境界面でのトラップも起きやすくなることが予想される。

以上の議論から LXe における MPPC の VUV-PDE 減少の原因が VUV による表面損傷であり、さらに低温であることがその減少速度を早めているという仮説が立てられた。

5.3.2 アニールング

上述の表面損傷はアニールングと呼ばれる手法によって改善する可能性がある⁷。実際に LXe で用いられている MPPC に対してアニールングを実施した結果、PDE の回復が観測されている。ここではその概要を紹介する。

一般的にアニールングとは素子などを加熱した後に冷やすような熱処理のことをいう。この操作によって組織内のひずみや欠陥が取り除かれるときは性能の改善が期待できる。また、この過程で起こる性質の変化を利用した研究もいくつかある。ここでは VUV-MPPC 本体の温度を上昇させ表面損傷を回復させる操作のことをアニールングと定義する⁸。

VUV-MPPC においても上述の表面損傷が起こっている可能性がある。つまり、シリコンと表面の保護層の境界面で正孔がトラップされている可能性がある。これをアニールングによって取り除こうとする計画が立てられており、ラボでの測定の後に実機の数個の MPPC に対してアニールングが行われた。加熱方法として、ラボでの試験の際は室内照明のもと、MPPC に逆バイアスをかけ電流が流れた際に発生するジュール熱を利用した⁹。また、実機の場合は室内照明の代わりに LED を用いた。

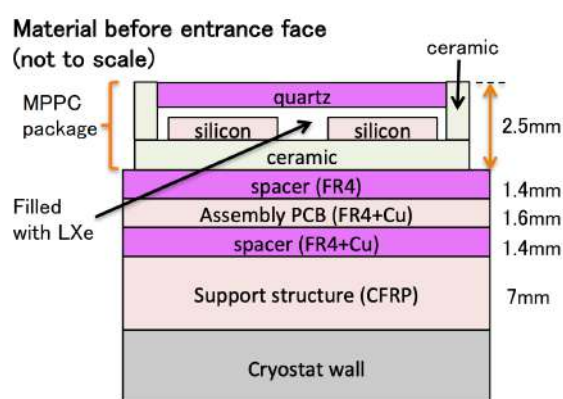


図 5.9: MPPC 周辺の構造 [28]

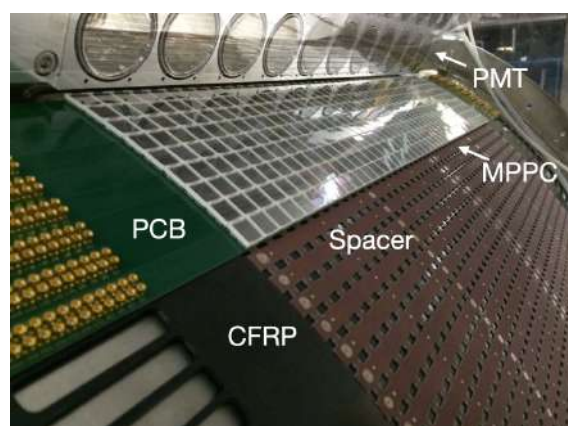


図 5.10: MPPC 周辺構造の写真

表 5.1: MPPC 周辺構造の許容温度上限

名称	上限温度 [°C]
MPPC	100
CFRP	45
PCB	120
Glue	65

この時、VUV-MPPC だけでなくその周辺の構造も加熱されるためそれぞれの許容温度範囲に注意しなければならない。ここで VUV-MPPC を LXe 内で固定している支持構造の様子を図 5.9 と図 5.10 に示す。図のように MPPC は PCB 上に設置されスペーサーを介して Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) 上に固定されている。これらの許容温度の上限は表 5.1 のようになっている。中でも CFRP の制限が厳しく、近くにある PCB の温度が 45 °C を超えないようなバイアス電圧が調べられた。その結果 70 V 程度以下にする必要があることが分かった。実際に室内照明のもとオーバー電圧 12–22 V でいくつかの素子を加熱したところ、MPPC 温度は 62 °C 程度になり、60 時間の加熱後にダークカレントが 15 % 程度減少した。また、加熱前後で ECF やゲインが測定されたが変化は観測されなかった。こうしてラボ測定

⁷ アニールングは表面損傷だけではなくバルク損傷にも効果があると考えられている。

⁸ 他の分野では量子アニールングや DNA アニールングなども議論されている。

⁹ この他にも乾燥ガスや冷却用の液体窒素配管に温水を流すことで加熱する方法も検討されている。

によりアニーリングの試験を行った後、実際に LXe 内の 7 つの MPPC に対してアニーリングが行われ VUV 光と可視光に対する PDE の回復が観測された。その結果を表 5.2 と図 5.11 に示す。

表 5.2: アニーリング結果。アニーリング実施前後の PDE をそれぞれ PDE_b , PDE_a とした。 [29]

MPPC	Current/mA	Time/hours	$PDE_b/\%$	$PDE_a/\%$	PDE_a/PDE_b
1	20	22	-	-	-
2	19-20	23	9.12	12.7	1.39
3	17-19	23	8.03	9.56	1.19
4	19	23	8.44	9.78	1.16
5	19-24	38	8.37	13.3	1.59
6	20-24	38	9.18	14.7	1.60
7	21-24	38	7.21	13.4	1.86

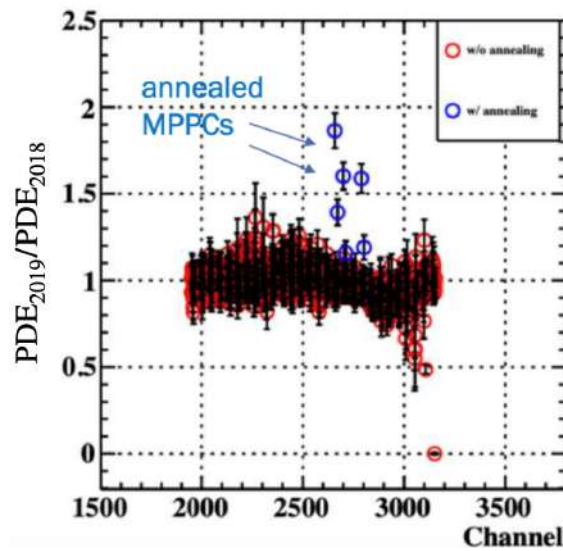


図 5.11: アニーリング結果。赤いプロットがアニーリングをしていない MPPC で青いプロットがアニーリングを実施した MPPC を表す。 [29]

5.3.3 放射線照射済み MPPC に対する PDE 測定

PDE 減少問題が判明するより前の 2015 年に、別の目的でガンマ線と中性子線による大強度照射試験を行った VUV-MPPC について、VUV 光に対する PDE が調べられた。実機用素子の量産前だったので、プロトタイプ版の MPPC を使っており、この素子の型番は S10943-3186(X) である。ガンマ線源は高崎量子応用研究所の食品照射棟にある ^{60}Co 線源 (16 TBq) であり中性子線源としてはベリリウムターゲットに神戸大学タンデム加速器によって加速されたデューテロン (d^+) を当てる反応が用いられた [30] [31]。それぞれ反応式は以下の通りである [32]。



ここで、測定に使用した MPPC の個数はガンマ線に照射されたものが 4 チップ、中性子に照射されたものが 5 チップである。また、比較用の照射されていない 2 チップも合わせると合計 11 チップの MPPC の PDE が調べられた。上述の

線源が MPPC に与えた照射量を表 5.3 にまとめた。照射量には MEG II 実験で予想される照射量も載せている。

表 5.3: MPPC への照射量と MEG II 実験で予想される照射量。[32]

Radiation type	Dose level	MEG II expected level
γ	$1.4 \times 10^3, 4.1 \times 10^3$ Gy	0.6 Gy
n	$4.8 \times 10^9 - 2.0 \times 10^{12}/\text{cm}^2$	$1.6 \times 10^8/\text{cm}^2$

ここで PDE を測定するセットアップについて説明する。PSI には、パルスチューブ型の冷凍機 (Iwatani PDC08) を用いて液体キセノンの温度を 165 K 程度に保ちラボ測定に使用できる試験用クライオスタットがある。この時、液体キセノンは操作パネルに設置されたゲッター (SAES Pure Gas, Inc. MonoTorr PS3-MT3-R-2) によって純化される。これらの様子を図 5.12 と図 5.13 に示す。



図 5.12: 液体キセノンを溜める真空容器の写真。図の赤丸部分には断熱材が巻かれている。その内部に真空容器が設置されており液体キセノンが満たされる。この周りにさらに外真空容器が装着される。



図 5.13: 液体キセノンの操作パネル。下部に見える青い円筒状のものがゲッターである。

放射線損傷測定のために真空容器内部に設置されたセットアップの様子を図 5.14、図 5.15 に示す。実機と同様にワイヤーにアルファ線源 (^{241}Am) が固定されており液体キセノンが発するシンチレーション光を測定する。(5.2) 式、(5.3) 式を用いて N_{phe}, N_{pho} が計算され (5.1) 式により PDE が求められた。ただし、 N_{pho} の計算において $\Omega/4\pi$ は 0.4% という値が用いられた。

こうしてガンマ線と中性子線による照射を受けた MPPC の PDE の絶対値が測定された。結果としては図 5.16 に示されているように、照射サンプルと非照射サンプルで PDE に有意な違いは観測されなかった。図では無彩色のプロットが照射されていない MPPC の PDE で、色のついたプロットが照射された MPPC を表している。照射サンプルの PDE が非照射サンプルに比べて低くなるという傾向はない。ただし、これらの素子が照射されてから PDE 測定をするまでに数年が経過しているため、その間に常温でのアニーリングが起きていたという可能性が考えられる。そのため、線源で照射をした直後に PDE 測定をし、さらに低温と常温での照射結果を比較するという計画が立てられている。この測定に関しては後述する。

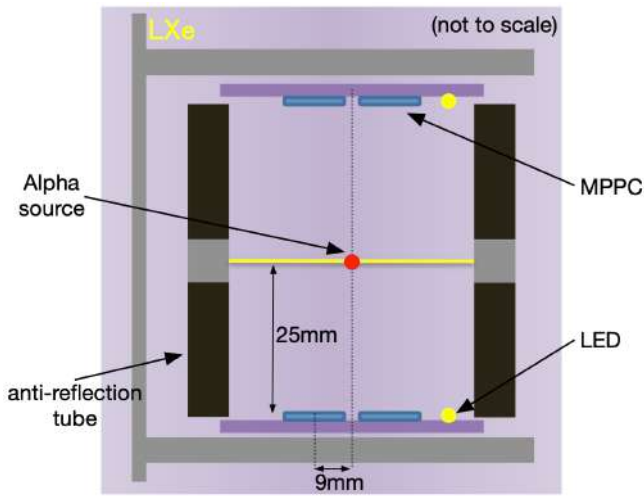


図 5.14: アルファ線源によるシンチレーション光を測定するセットアップ。反射があると N_{pho} の計算にずれが生じるため反射防止材が設置されており、較正用に LED も設置されている。[28]

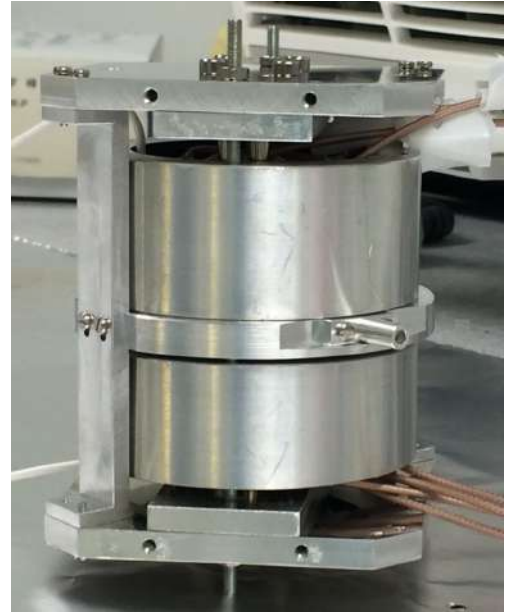


図 5.15: セットアップの実際の写真。[28]

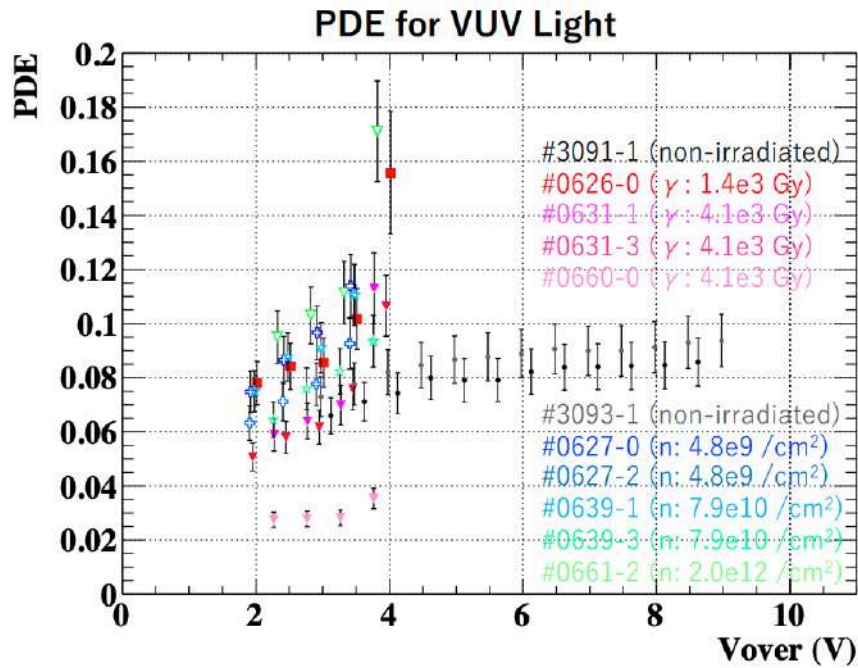


図 5.16: ガンマ線と中性子を照射した MPPC の液体キセノン中での PDE 測定結果。これらの無彩色のプロットが照射されていない MPPC の PDE である。もし放射線による PDE 減少があれば有彩色のプロットが無彩色のプロットより下に分布するはずだがそれは#0660-0 以外で観測されなかった。#0660-0 では、素子の表面に放射線以外の何らかのダメージがあったと考えられている。また、オーバー電圧 4 V 付近に外れ値が二つあるが、これは電圧が大きいことによるノイズの増加が原因と考えられている。[33]

第6章 PDE減少に関するラボ測定

6.1 概要

前章で実機の MPPC の VUV-PDE 減少が深刻な問題であることを説明した。この原因としてまず、電離放射線による損傷の可能性を疑った。それを調べるため、ガンマ線と中性子線による照射を受けた素子の PDE が測定された。しかし有意な減少は確認されなかった。そのため、次に我々が疑ったものが VUV 光による表面損傷である。2019 年のコミッショニングでは実機の MPPC¹に対して液体キセノンのシンチレーション光である 175 nm の光子が合計 $4.6\text{--}5.8\times 10^{10}$ photon/mm² 照射されたと見積もられている。この量の VUV 光が実機の PDE に大きな影響を与えているかどうか、また、特に低温環境が PDE 減少に関連しているかどうかを確認する事が本研究の目的である。ここで、重要な測定条件は以下の 4 点にまとめられる。

1. 温度

正孔の易動度は低温で小さくなるため、表面損傷は低温において加速すると考えられる。

2. 照射時の波長

波長の短い光ほど素子の浅い部分で吸収されるため、表面損傷を引き起こしやすいと考えられる。

3. PDE 測定時の波長

表面損傷が起こったとき、短波長側の光ほど MPPC の表面近くで止まるため、トラップされた正孔の影響を受けやすく、検出効率の低下が顕著になると考えられる。

4. PDE の指標

PDE の変化を電流モニターと信号電荷モニターによって行った。光を照射した際の電流値は電子・正孔対の生成効率と相関を持つため、PDE 変化の指標とすることができる。ただし、電圧を印加しなかったため、生成された電子は表面損傷の影響を受けやすくなると考えられる。一方、信号電荷によるモニターは電圧を印加するため、より実機の MPPC に近い状態で PDE モニターができる。

次に、表面損傷を調べるために行われたラボでの照射試験を以下にまとめる。前の二つが常温での照射試験で、後の四つが低温での照射試験である。ただし、低温照射の節でも比較のため、同じセットアップで常温照射を行ったものがある。

- 重水素ランプを用いた照射試験

光源を用いて 175 nm 単色の光を MPPC に照射する測定が行われた。照射は常温で行われた。

- UV 光を用いた長期間の常温照射試験

UV 窓材を使用したキセノンフラッシュランプによって 185–1000 nm の光を長期間にわたって照射する測定が行われた。照射は常温で行われた。

¹以下、特に断らない限り一つのパッケージに搭載された 4 チップを合わせて MPPC と表記する。

- UV 光を用いた電圧ゼロでの感度減少測定

UV 窓のキセノンフラッシュランプを用いて 185–1000 nm の光を MPPC に照射し、PDE 減少に対する温度の効果を確かめる実験が行われた。照射は 296 K と 240 K で行われた。なお、この測定ではセットアップの断熱性に問題があり MPPC を液体キセノンの温度まで冷却することができなかった。

- UV 光を用いた PDE 減少の温度依存性調査

UV 窓のキセノンフラッシュランプを用いて 185–1000 nm の光を MPPC に照射した。照射は 300 K と 160 K で行われ、PDE 減少に対する温度の効果が確かめられた。

- 低温での VUV 光照射試験

VUV 光に対する透過率が高い MgF_2 窓材を使用したキセノンフラッシュランプを用いて 160–400 nm 程度の光を MPPC に照射した。この測定は 170 K で行われた。

- 液体キセノン中でのアルファ線源を用いた PDE 測定

液体キセノンシンチレーション光 ($\lambda=175$ nm) によって照射が行われた。照射は 165 K で行われた。この測定における MPPC の環境が実機の状態に最も近い。

また、各測定結果は 2019 年における実機の照射量と PDE 減少率

$$N_{2019} = 4.6 - 5.8 \times 10^{10} \text{ photon/mm}^2 (\lambda = 175 \text{ nm}) \quad (6.1)$$

$$R_{2019} = 9\% (\lambda = 175 \text{ nm}) \quad (6.2)$$

と比較する形で説明する。ここで、照射量はある波長の光子数で表す。感度減少率は電流の場合も信号電荷の場合も R で表す。測定結果の詳しい説明に入る前に、各測定で用いられた光源の簡単な説明を以下に列挙した。

重水素ランプ

浜松ホトニクス社によって 175 nm の光が MPPC の感度に与える影響が調べられた。この時の光源は重水素ランプ (D_2 ランプ) で回折格子によって真空紫外領域の光が取り出された。

アルファ線源による液体キセノンシンチレーション光

第 5 章で説明したようなアルファ線源を用いて測定を行った。つまり、液体キセノン中のアルファ線が発生した液体キセノンシンチレーション光を、照射と PDE 測定の両方に用いることで、実機の PDE 減少が再現されるかどうかを確かめた。この測定では実機の VUV 光と同じ波長領域に対する PDE を測定できる。

UV 窓を用いたキセノンフラッシュランプ

アルファ線源を用いて照射する場合は実機レベルの照射量に到達するまでに長時間を要する。例えば、2019 年の総照射量に到達するにはおよそ 1 ヶ月かかる。測定時間を短縮するために図 6.1 に示すような浜松ホトニクス社製キセノンフラッシュランプが使用された。安定して大光量の照射が可能でありフィルターなどを用いても数時間で実機レベルの照射量に達する。しかし、最初に用いた 5 W モジュールには UV 窓材が使用されていたため、185 nm–1000 nm の光しか照射できない。このランプの、200 nm–800 nm の波長領域の発光スペクトルを図 6.2 に示す。UV 窓材を使用したランプを用いる場合、液体キセノンシンチレーション光の中心波長である 175 nm の光はほとんど照射されていないと考えられる。5.3.1 節で述べたように波長が異なれば SiPM に与える表面損傷の度合いが異なる可能性がある。照射や PDE 測定で用いる光の波長は実機の波長とは異なるが、MPPC を液体キセノン温度まで冷却するセットアップを初めて作成できた時に所有していたのは、この光源のみであり、PDE 減少に与える低温の効果を調べるために用いた。また、可視光との比較で波長依存性も調べることができる。ここで、



図 6.1: 5 W キセノンフラッシュランプモジュール (L9456-03)。[34]

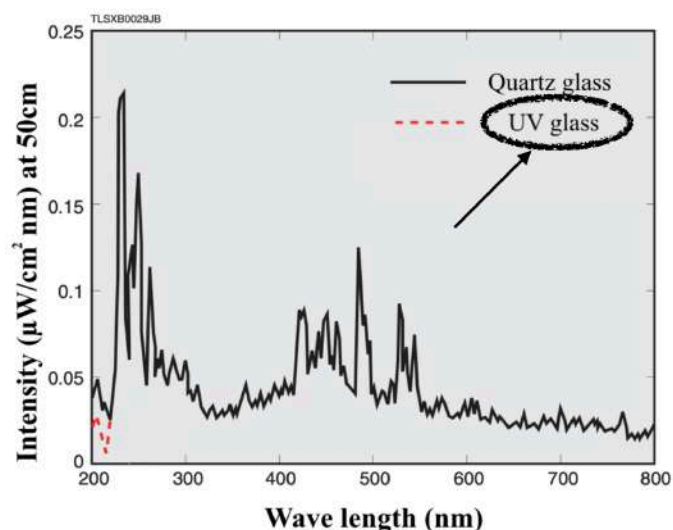


図 6.2: 5 W モジュールの発光スペクトル。測定では UV 窓を用いた。[34]

185 nm–200 nm の光は VUV 光に含まれるが、簡単のため、本章では UV 窓を用いたランプから出てくる光のうち短波長のもの (185 nm–400 nm 程度の領域) は UV 光と呼ぶことにする。

MgF₂ 窓を用いたキセノンフラッシュランプ

図 6.3 に示すような MgF₂ 窓材を用いた 2 W モジュールによる照射もおこなった。MgF₂ 窓は UV 窓に比べて短波長の透過率が高い。このランプを照射光源に使用することで実機の照射量に数時間で到達するとともに、上の UV 窓を用いた場合の 175 nm の光が少ないという欠点を補うことができた。図 6.4 に 2 W モジュールの発光スペクトルを示す。また、図 6.5 と図 6.6 に 20 W モジュールとその発光スペクトルを示す。図 6.7 には 200 nm より短波長の領域の発光スペクトルを示す (ただし、20 W モジュールのもの)。後述するが、この 20 W モジュールは PDE 測定に使用した。

6.2 常温照射試験

6.2.1 重水素ランプを用いた照射試験 [38]

浜松ホトニクス社によって VUV 光を MPPC (S13370-6050CN) に照射する試験が行われ、VUV 光による感度減少が観測された。

セットアップ

VUV 光を MPPC に照射する試験が常温で行われた。重水素ランプと真空紫外分光器を用いて 175 nm 単色の光を取り出し、直径 1 mm にコリメートして窒素雰囲気中で照射している。この時の照射レートは 2.8×10^{10} photon/sec であった。バイアス電圧ゼロでのセンサーカレントにより VUV 光感度の変化がモニターされた。



図 6.3: 2 W キセノンフラッシュランプモジュール (L13651-01-3)。[35]

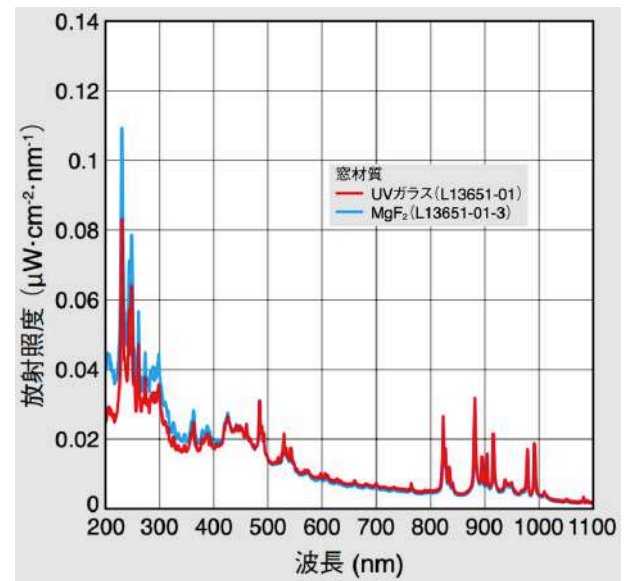


図 6.4: 2 W モジュールの発光スペクトル。測定では MgF_2 窓を用いた。[35]



図 6.5: 20 W キセノンフラッシュランプモジュール (L12745-01-3)。[35]

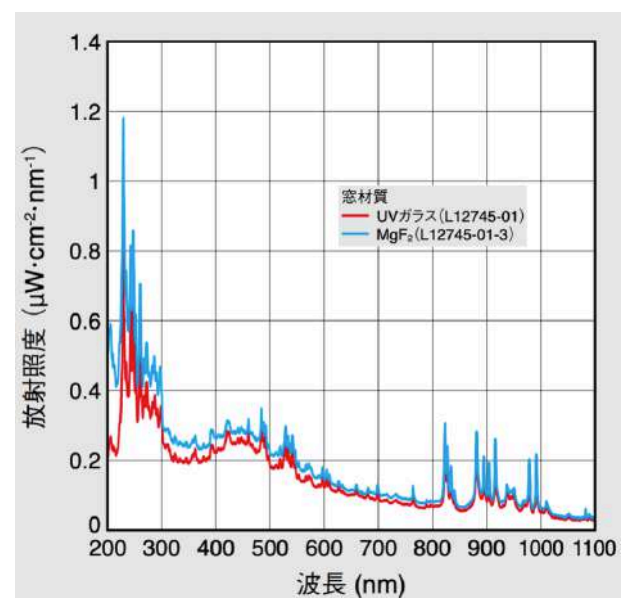


図 6.6: 20 W モジュールの発光スペクトル。測定では MgF_2 窓を用いた。[35]

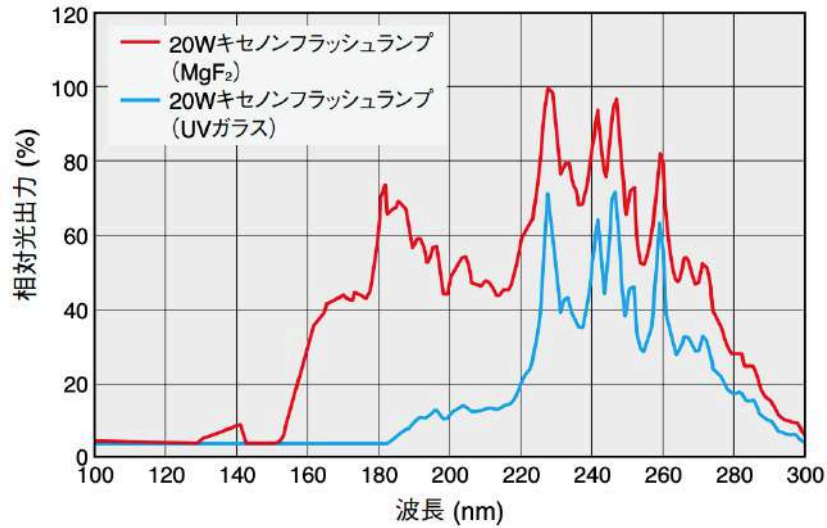


図 6.7: 20 W モジュールの短波長領域での発光スペクトル。測定は窒素雰囲気中で行われた。[35]

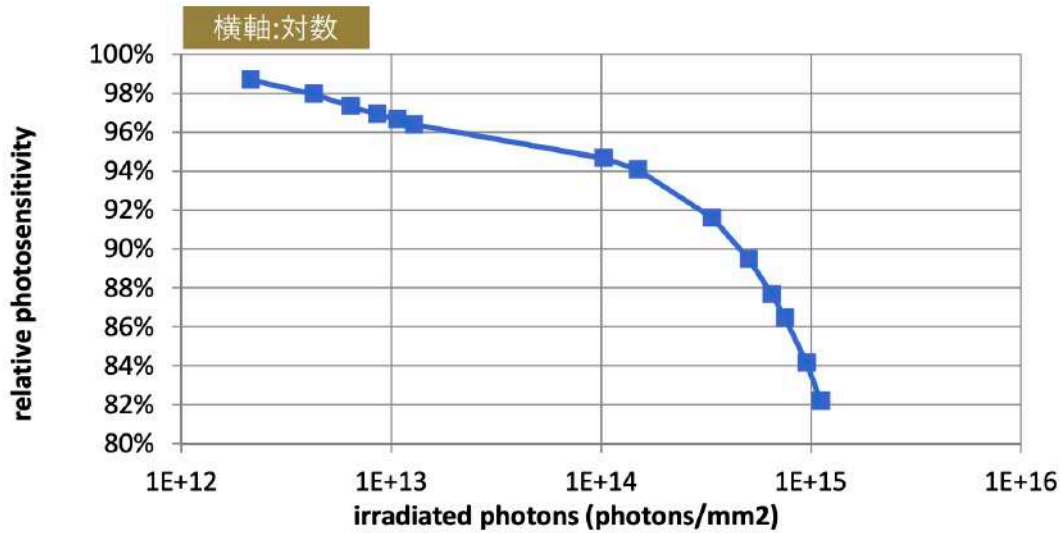


図 6.8: VUV 光照射におけるカレントの減少 [38]

結果

図 6.8 に示すようにカレントの減少が観測された。カレントは電子・正孔対の生成効率と相関しているため、この結果によって VUV 光照射が MPPC の検出効率の減少を引き起こすことが示唆された。ただし、MPPC に電圧を印加していないため、LXe の MPPC の PDE 減少と直接対応づけられない可能性がある。MPPC に電圧が印加されていない状態では、アバランシェ増幅は起こらず、内部電場も小さい。そのため、表面損傷によって蓄積された正電荷によるキャリア電子の再結合が、電圧が印加されている状態よりも促進される可能性がある。ただし、どの程度感度減少が起きやすくなるか、定量的な理解はできていない。

最終的に $1.3 \times 10^{15} \text{ photon/mm}^2$ 程度の照射で感度は 20% 程度減少した。また、照射光量 $1 \times 10^{14} \text{ photon/mm}^2$ 時の測定結果を以下にまとめる。

$$N = 1.0 \times 10^{14} \text{ photon/mm}^2 (\lambda = 175 \text{ nm}) = N_{2019} \times 1.9 \times 10^3 \quad (6.3)$$

$$R = 5\% (\lambda = 175 \text{ nm}) < R_{2019} \quad (6.4)$$

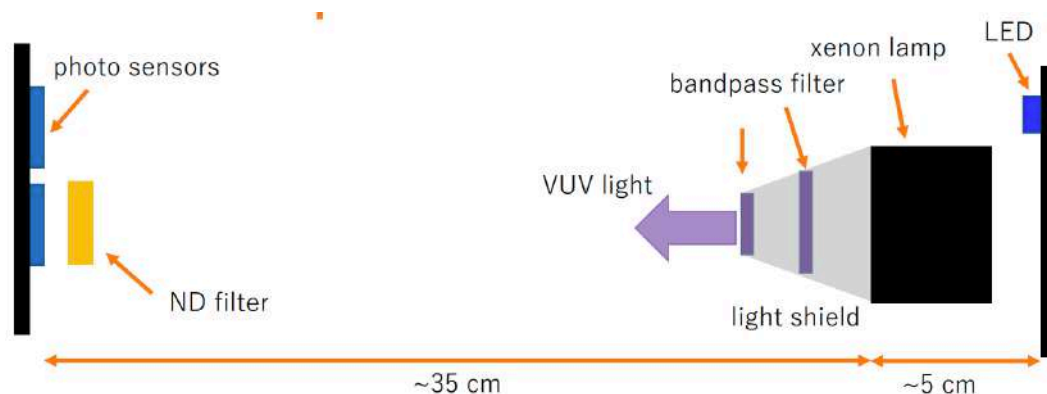


図 6.9: UV 光を用いた長期間照射における PDE 測定のセットアップ。フィルターを通った光は VUV 光 (~ 195 nm) が主成分であるが本文ではこれを UV 光と呼ぶことに注意 (6.1 節)。ND フィルターの 190 nm に対する透過率は 3.3% 程度である。[39]

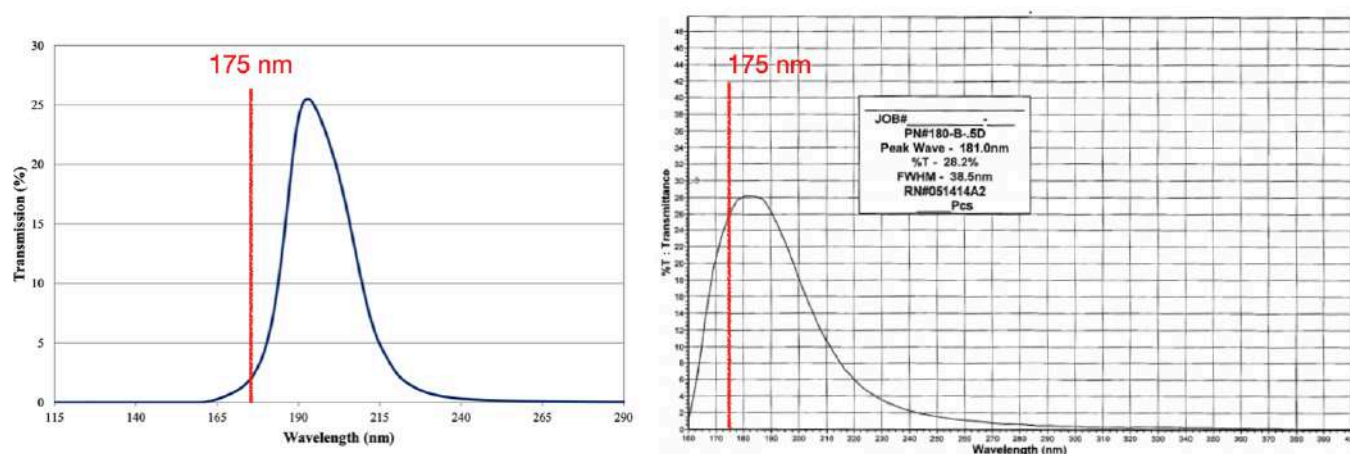


図 6.10: バンドパスフィルターの分光曲線。左が Edmund optics のもので右が Acton Research のものである。また、液体キセノンシンチレーション光の中心波長である 175 nm を赤で示す。[36][37]

6.2.2 UV 光を用いた長期間の常温照射試験 [39]

6.2.1 節での測定では VUV 光に対する感度低下が確認されたが、電圧ゼロの電流値読み出しなので実機の PDE 減少を再現できていない可能性がある。本節では、UV 窓材を用いた 5 W のキセノンフラッシュランプ (以下 5 W モジュールと表記する) によって信号電荷をモニターした常温での照射試験の説明をする。

セットアップ

5 W モジュールを用いて長期間の常温照射を実施し、PDE 減少の様子が調べられた。まず PDE 測定のセットアップを図 6.9 に示す。図において、2 枚あるバンドパスフィルターのうち大きい方 (xenon lamp に近い方) は Edmund optics 社製真空紫外用バンドパスフィルター (#33-022) で、小さい方は Acton Research Corporation の PN180-B-5D である。それぞれの分光曲線を図 6.10 に示した。MPPC がサチュレーションを起こさないように、ND フィルターとバンドパスフィルターで光量が絞られ、この状態で信号電荷が記録された。照射時のセットアップは図 6.11 と図 6.12 に示す。この測定では LXe に使われている MPPC の他に、VUV に感度のない MPPC (S13350-3050PE) もテストをしており、それぞれ VUV-MPPC と standard MPPC と表記する。

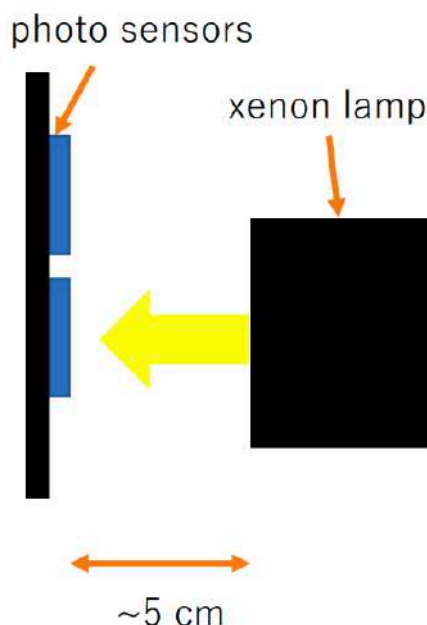


図 6.11: UV 光を用いた長期間測定における照射時のセットアップ。 [39]

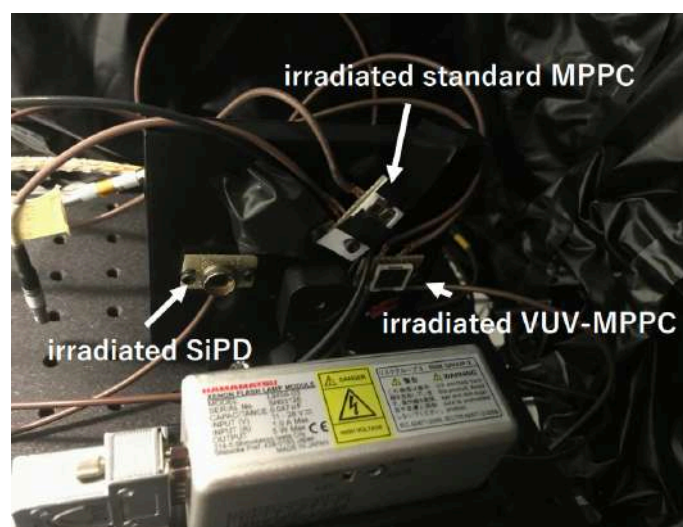


図 6.12: UV 光を用いた長期間測定における照射時のセットアップ [39]

表 6.1: UV 光を用いた長期間の照射試験の結果

	VUV-MPPC	standard MPPC	LXe 2019
Total dose level [photon/mm ²]	3.1×10^{16} (UV)	1.9×10^{15} (UV)	5.2×10^{10} (VUV)
PDE decrease [%]	65(UV), 75(NUV)	30(UV), 20(NUV)	9(VUV)

結果

VUV-MPPC、standard MPPC 共に UV 光による長期間の常温照射によって UV 光に対する PDE の減少が観測された。共に表面損傷が起きていると考えられる。その様子を図 6.13 と図 6.14 に示す。前者は UV 光に対する PDE 減少を表しており、後者は近紫外光 (Near ultraviolet, NUV) に対する PDE 減少を表している。ここでいう NUV は LED(波長 380 nm) の光を指す。また、600 時間照射後の PDE 減少と総照射量を表 6.1 にまとめた。ただし、実機の照射量は推定された値の上限と下限で平均を取っている。

VUV-MPPC の照射結果から、UV 光に対する PDE の減少が 35%程度で飽和していることがわかる。5 章で説明したように、線形で減少していき最終的に PDE がゼロになる場合と、減少速度が飽和する場合とでは物理ラン開始後に必要とされるキャリブレーションやアニーリングの回数が異なるため、この観測事実は重要である。しかし、VUV-MPPC の UV 光に対する PDE 減少速度は実機の VUV 光に対する PDE 減少速度に比べて 1000 倍以上も遅いことが分かった。その理由はまだ理解できていないが、波長や温度が関係していると考えられた。プロットにおいて途中、12 日間照射が中断されたがこの前後で VUV-MPPC の PDE が回復している。これは室温でのアニーリングが起きたためだと考えられる。"non-irradiated standard MPPC" の UV-PDE が徐々に減少しているが、照射光源の光が漏れ出ており、低レートで照射されていたと考えられる。また、"non-irradiated VUV-MPPC" の PDE は徐々に増加しているように見えるが、PDE を測定するたびに MPPC 表面で UV 洗浄²が起きていた可能性がある。

²UV 光により有機物などの汚れが分解されると同時に酸素分子も分解され酸素原子になる。酸素原子は酸素分子と結合しオゾンになるが、このオゾンに UV 光が照射されると励起状態の酸素が生成される。励起状態の酸素が有機物の分解で生成された炭素などと結合すると二酸化炭素などの揮発性物質になり除去される。このような仕組みで汚れが除去されていくことを UV 洗浄と呼ぶ。

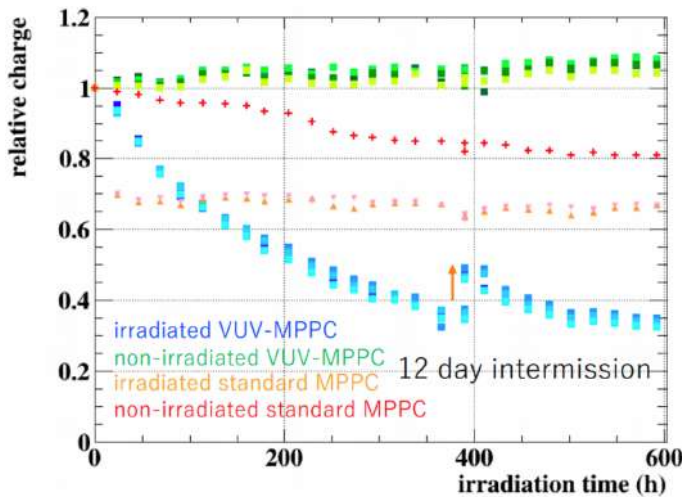


図 6.13: 600 時間の UV 光照射における UV-PDE ヒストリー。照射開始前の信号電荷を 1 としている。[39]

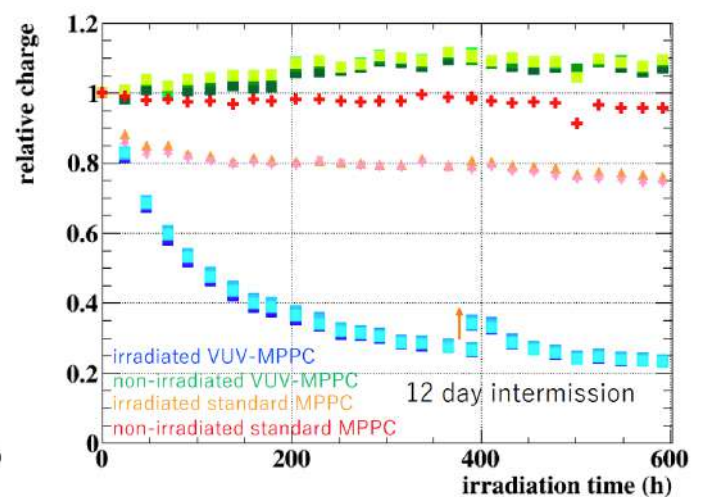


図 6.14: 600 時間の UV 光照射における NUV-PDE ヒストリー。照射開始前の信号電荷を 1 としている。[39]

ここで、24 時間照射時での測定結果を以下にまとめる。

$$N = 3.1 \times 10^{16} \text{ photon/mm}^2 (185 \text{ nm} \lesssim \lambda \lesssim 400 \text{ nm}) = N_{2019} \times 2.4 \times 10^4 \quad (6.5)$$

$$R = 6\% (185 \text{ nm} \lesssim \lambda \lesssim 400 \text{ nm}) < R_{2019} \quad (6.6)$$

6.3 低温照射試験

6.3.1 UV 光を用いた電圧ゼロでの感度減少測定

6.2.2 節の測定では PDE 減少が観測されたが、減少速度が実機に比べて非常に遅かった。つまり、表面損傷の進み方に温度依存性がある可能性を示唆している³。それを確かめるために低温と常温でのカレント減少を比較する測定を行った。

セットアップ

UV 窓の 5 W キセノンフラッシュランプを用いてカレント減少速度の温度依存性を確かめた。セットアップの様子を図 6.15 と図 6.16 に示す。この測定では MPPC を真空容器の内部に固定し、冷凍機のコールドヘッドに接続された平編み線を用いて冷却した。MPPC や温度計などは真空中に置かれた。5 W モジュールは真空容器の外側に固定されており、石英窓を通して MPPC に照射する。ランプ窓と MPPC の間の距離は 5 cm 程度であった。この石英窓の 175 nm に対する透過率は 70% 程度であるが、キセノンランプは UV 窓材を使用しているため照射された光は 185 nm より長波長のものである。この測定は常温と低温の比較が目的のため、照射光量の絶対値は算出しなかったが、電圧を印加しない状態でランプを照射したところカレントの絶対値が $2.3 \mu\text{A}$ であり、これは 6.2.2 節の測定の照射時のカレントに比べて 4 分の 1 程度の値であった。つまり、照射レートも 4 分の 1 程度であると考えられる。また、照射時に MPPC に電圧は印加しなかった。

³もちろん波長依存性も関係していると考えられる。

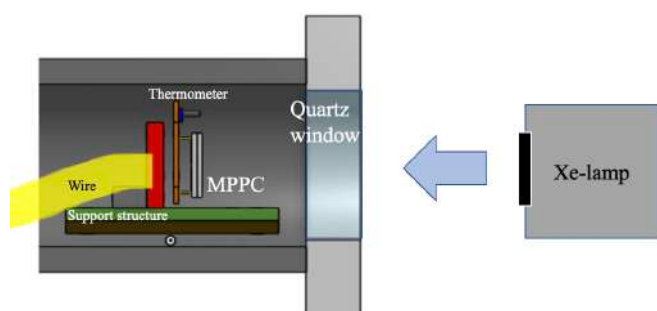


図 6.15: 5 W モジュールによるカレント減少測定のセットアップ。黄色部分の Wire が平編み線を表している。また Support structure の赤と緑の部分はアルミで、茶色の部分は断熱性に優れた G10 である。



図 6.16: ランプ側からみたセットアップの写真。照射するときはこの周りをブラックシートで覆い、外部からの光を遮る。

結果

まず、このセットアップは信号線などの断熱性に問題があり MPPC の温度は 240 K までしか冷えなかった。常温と低温でのカレント減少の結果を図 6.17 に示す。上記のようにカレントの値から照射レートを推定すると、3 時間の照射で 1.6×10^{14} photon/mm² となり、実機の総照射量 (5.2×10^{10} photon/mm²) より数桁多い。PDE 減少は観測されたが、予想に反し、常温に比べて低温の方が減少速度が遅いという結果となった。UV 窓を通過する波長は 185 nm 以上なので液体キセノンシンチレーション光程度の波長の光は照射されておらず、低温照射の MPPC 温度は 240 K 程度で実機の 165 K と大きく異なる。したがって、実機の PDE 減少を調べることは難しく、セットアップの改良が必要となった。

6.3.2 UV 光を用いた PDE 減少の温度依存性調査

6.3.1 節の測定では印加電圧ゼロの状態でのカレントモニターであり、低温も液体キセノン温度まで到達しなかった。そのため、実機の PDE 減少に対する温度依存性を再現できなかった可能性がある。本節では、5 W モジュールを用いた照射を低温と常温で行い、PDE 減少量を比較した実験の説明をする。

セットアップ

5 W モジュールを用いて低温と常温それぞれで MPPC に照射し、PDE 減少に違いが現れるかを調べた。この測定の手順は以下の通りである。

1. UV 光と可視光に対するシグナルの信号電荷を測定した。
2. 5 W モジュールを使用し、常温・低温それぞれで MPPC に 24 時間照射を行った。このとき電圧は印加しておらず、雰囲気は窒素で満たした。
3. 再度 MPPC の UV 光と可視光に対するパルスシグナルの信号電荷を測定した。
4. PDE の減少を常温と低温で比較した。

この実験では照射レートを増やすためにフィルターをつけずに照射した。フィルター無しの場合、MPPC はサチュレーションを起こすため PDE をモニターしながら照射することができない。そのため、PDE 測定と照射は別々に行った。

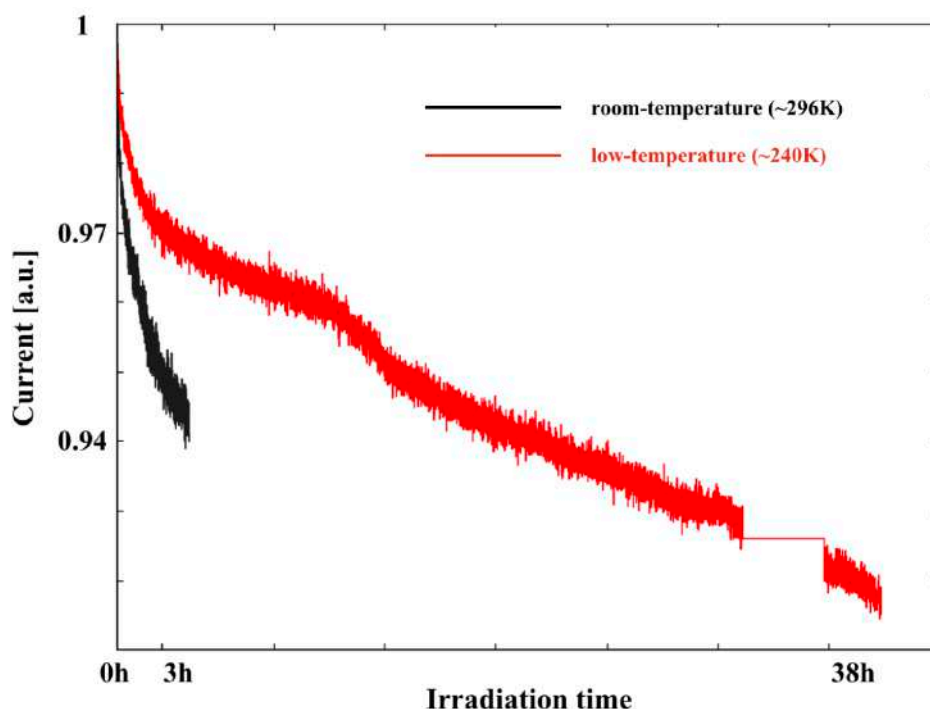


図 6.17: カレント減少の温度依存性

PDE 測定時のセットアップの様子を図 6.18 と図 6.19 に示す。この測定ではオシロスコープでシグナル波形を積分し、その電荷を PDE の指標とした。PDE の変化は照射前後の比で表されるため 5.2.1 節で述べたような ECF などは考慮しなくて良い。5 W モジュールの波長領域はおよそ 185–1000 nm であるため、バンドパスフィルター 2 枚を用いて UV 光を取り出した。フィルターは Edmund optics 社の深紫外用バンドパスフィルター (#33-022) と Acton Research Corporation の PN180-B-.5D であり、それぞれの分光曲線は図 6.10 に示したものである。ここで、分光曲線を見ると 250 nm 程度の光の透過率はほぼゼロだが、250 nm 程度の短波長の光に感度の低い MPPC (S13360-3050CS) においてシグナルが検出されてしまった。この状態で MPPC の前に 400 nm 以下の光をカットするような UV カットフィルタ (EMVL-UV270) を設置したところ、シグナルは消えた (カレント比で 3% となった) ため、検出されていた光は 400 nm より短波長のものである。この UV カットフィルタの分光曲線は図 6.20 に示す。ランプの強度が大きくバンドパスフィルター 2 枚では完全にカットできなかったため、250–400 nm の光が検出されていたと考えられる。つまり、この測定における UV 光の波長領域は 185–400 nm 程度であった。また、直径 1 mm のコリメーターがあるのは MPPC がサチュレーションを起こさないように光量を絞るためである。可視光源には青色 LED を用いておりその波長は 450 nm 程度である。

続いて低温照射時のセットアップを図 6.21 と図 6.22 に示す。パルスチューブ型の冷凍機 (Aisin TAC 101J) によって MPPC は液体キセノン程度の温度まで冷やされる⁴。ランプと MPPC の間にフィルターはなく、3 cm 程度の距離から直接照射した。この状態で照射を開始すると、UV 光だけでも、その照射量は少なく見積もって 2019 年の各 MPPC に対する VUV 光総照射量に 10 秒程度で到達する。4 チップある MPPC のうち 2 チップはカレントが読みだされ、ランプの光が安定して MPPC に照射されているかモニターされた。セットアップ全体は断熱のためにデューワーで覆われ、内部は窒素ガスで満たされている。これは MPPC に霜がつくのを防ぐためである⁵。温度に関しては、冷凍機・MPPC・5 W モジュールに取り付けた温度センサー (Pt100) によりモニターした。読み出しは GRAPHTEC の GL820 を用いた。

常温照射は基本的には同一のセットアップで、冷凍機をオフの状態で行った。その際、ランプが加熱し過ぎないようにランプに金属を巻き付けたほか、窒素の流量を増やすことで放熱した。

⁴MPPC を冷やす仕組みについて、詳しくは付録に記述した。

⁵窒素に対する VUV 光の吸収断面積は小さいため、VUV 光の吸収を防ぐ効果もある。しかし、185 nm 以上の光は大気中 (酸素濃度 20.9%) でも 3 cm 程度ならばほとんど吸収されない。酸素濃度と VUV 光の吸収に関しては MgF_2 窓を用いた照射試験でも議論する。

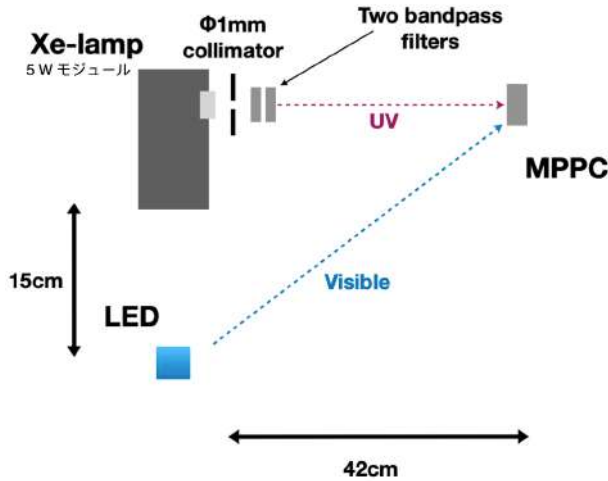


図 6.18: UV 光を用いて低温と常温の表面損傷を調査する実験における PDE 測定のセットアップ

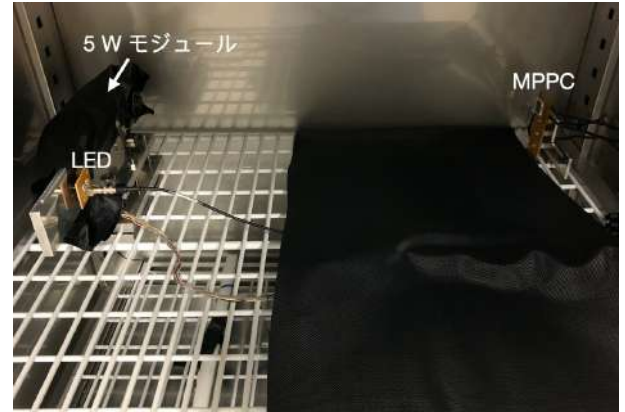


図 6.19: 実際の写真

ここで、UV 光照射量の概算方法を説明する。図 6.18 のセットアップで照射光量を概算する場合、実際の照射時の照射光量を推定するために距離などを補正しなければならず、照射量に不定性が生じる。したがって、少なくとも、この照射試験を実機の MPPC における VUV 光照射量より高い照射量で行うために、光量概算の下限値が実機の照射量を上回るように設定した。図 6.18 において UV 光の信号波高を 1 光電子あたりのシグナルハイトで割ると 2160 であった。つまり、MPPC の PDE を 20% と仮定すれば⁶1 パルスあたり最大で

$$2160 \text{ p.e./chip} \times \frac{1}{0.2 \text{ p.e./photon}} = 1.1 \times 10^4 \text{ photon/chip}$$

の UV 光が MPPC に照射されている。1 パルスあたりの照射光量は信号電荷で議論した方が正しいが、この測定ではシグナルの立ち下がり時に MPPC に届く光子は含めず、波高に相当する光量を 1 パルスあたりの照射光量とした。つまり、照射光量は実際より少なく見積もっている。図 6.21 に示すとおり照射時にはフィルターなどを外し、3 cm の距離で照射する。したがって、照射光量を算出するために以下のような補正項を考慮する必要がある。

- 2 枚のバンドパスフィルターを外した効果。分光曲線のピークの値を採用し、25%とする。
- コリメーターを外した効果。ランプ発光部分は直径 3 mm 程度であり、光量はこれらの面積比に比例するとした。
- MPPC とランプ窓までの距離が 42 cm から 3 cm になった効果。光量は立体角に依存するとした。

また、照射は 500 Hz で行ったため、照射レートの概算値は以下のように計算される。

$$\begin{aligned} N_{pho,UV} &= 1.1 \times 10^4 \text{ photon/chip/pulse} \times \frac{1}{36 \text{ mm}^2/\text{chip}} \times \frac{1}{0.25^2} \times 500 \text{ pulse/sec} \times \left(\frac{3 \text{ mm}}{1 \text{ mm}}\right)^2 \times \left(\frac{42 \text{ cm}}{3 \text{ cm}}\right)^2 \\ &= 4.3 \times 10^9 \text{ photon/mm}^2/\text{sec} \end{aligned} \quad (6.7)$$

一方、2019 年の LXe の MPPC の VUV 光照射量は

$$N_{pho,2019} = 4.6 - 5.8 \times 10^{10} \text{ photon/mm}^2 \quad (6.8)$$

であったので、この加速試験ではおよそ 10 秒で実機の照射レベルに到達することがわかる。

⁶この測定は一度もテストされていない MPPC を用いた。よって、図 4.18 に示した VUV 光に対する PDE の測定値 (15%以上) を参考に 20% と仮定した。

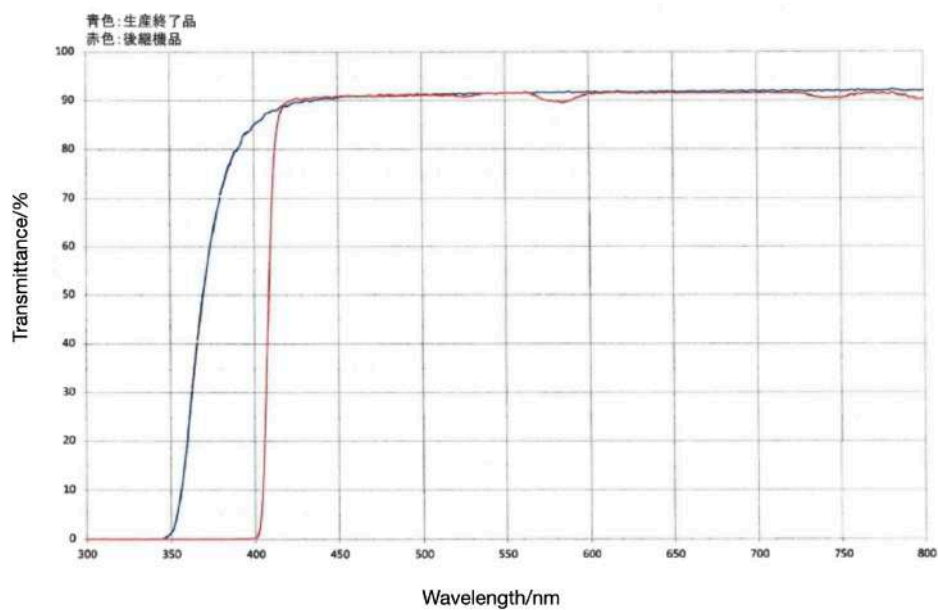


図 6.20: UV カットフィルタ (EMVL-UV270) の分光曲線。赤いグラフが今回用いたものに該当する。[40]

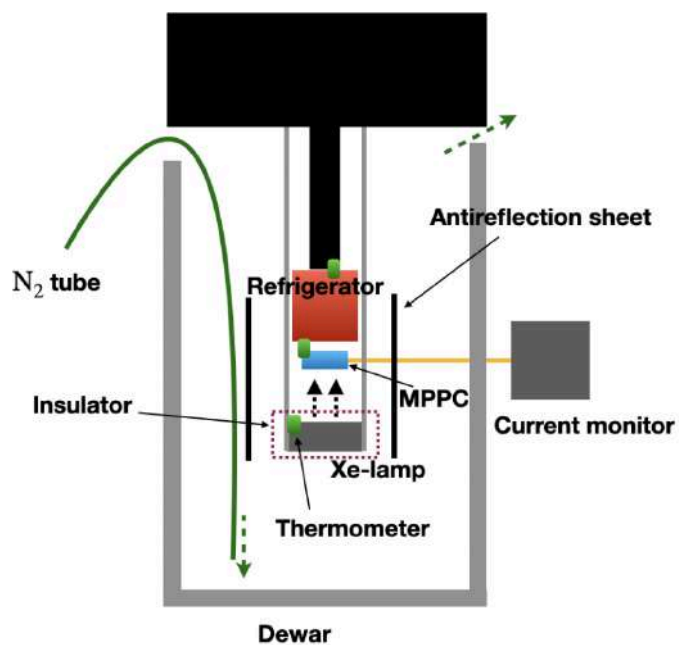


図 6.21: UV 光を用いて低温と常温の表面損傷を調査する実験における照射時のセットアップ

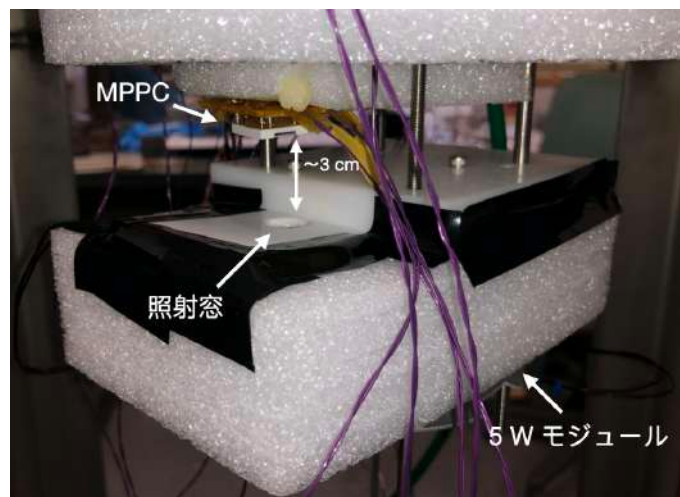


図 6.22: 実際の写真。ランプの発熱によって窒素ガスが温められないように 5 W モジュールの周りは断熱材で覆われている。

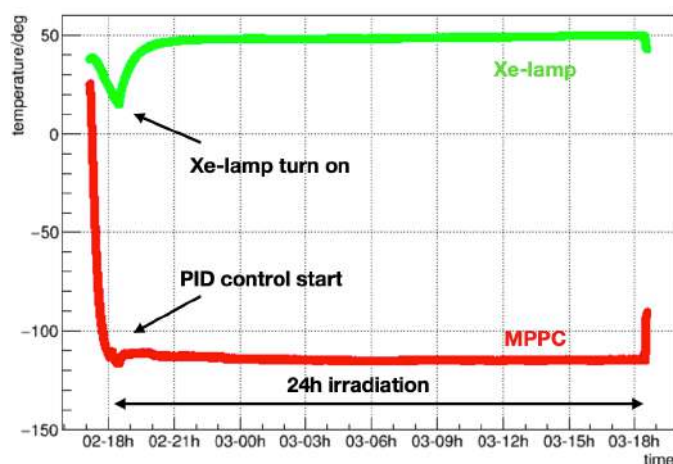


図 6.23: 低温 24 時間照射時の 5 W モジュールと MPPC の温度。24 時間安定であったことがわかる。

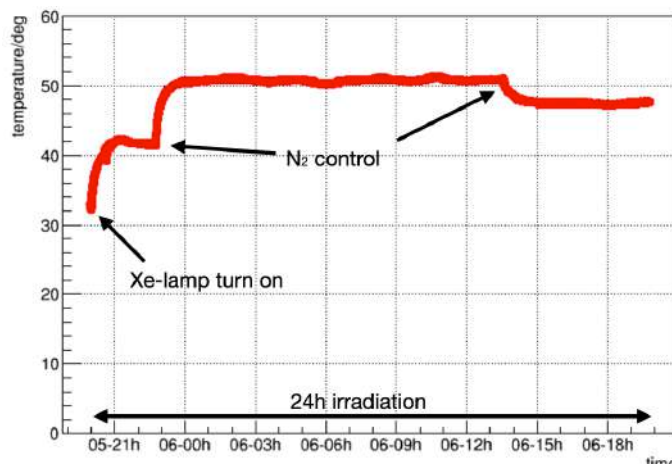


図 6.24: 常温 24 時間照射時の 5 W モジュールの温度。照射途中に窒素残量と温度上限を考慮し窒素の量を 2 度変更している。

結果

まず、照射中の系の温度は図 6.23、図 6.24 のようになった。5 W モジュールの動作保証範囲は 0°C から 50°C であるため、特にその上限を超えないように温度をコントロールした。冷凍機はヒーターで温度制御を行った⁷。PDE 測定と照射では同じ光源を用いたため照射の前後で光学系が完全に再現できない可能性がある。光学系の変化の影響を排除するためにレファレンスとして非照射サンプルの PDE 測定も行った。

この測定の 2 時間低温照射の結果と 24 時間照射の結果をそれぞれ表 6.2 と表 6.3 にまとめた。最終的な減少量はラボでの低温照射の方が大きい。2 時間の低温照射では PDE 減少が確認されず⁸、24 時間の照射で初めて PDE 減少が確認された。2 時間の低温照射における UV 光の総照射量は実機の 2019 年における総照射量より数桁大きい。この測定での UV 光に対する PDE 減少速度は実機の VUV 光に対する PDE 減少速度に比べて小さいと言える。表の各数値は照射後の検出 UV 光量を照射前の検出 UV 光量で割った値であり、1 行目から順に非照射サンプル (レファレンス)・照射サンプル・照射サンプルを非照射サンプルで規格化した値を示している。

24 時間照射の PDE 減少と実機の PDE 減少を照射量とともに、表 6.4 にまとめた。この表においても、2019 年ランの実機照射量は推定された値の平均を用いた。PDE 減少は 4 チップの減少率の平均を示しておりレファレンスの値で規格化している。また、各チップの PDE 減少率とレファレンスの変化率のプロットを図 6.25 に示す。この図では、可視光に対する PDE 減少率も図示した。可視光より UV 光に対する PDE 減少率の方が大きく、また、低温の方が減少が大きいことがわかる。これは低温において表面損傷が促進されることを示唆している。

また、照射量の概算は (6.7) 式で示したが、シグナルのピークに相当する光子数だけをカウントしているため、実際より少なく見積もっている⁹。そのため、6.3.2 節でまとめた光量概算の不定性を考慮しても、実機より 4 桁ほど多い照射量に達しているのは確かである。ここで、今回の測定系において典型的なキセノンランプのパルスと 1 p.e. の波形を図 6.26 と図 6.27 に示す。1 p.e. の波形の時定数は 100 ns 程度で、キセノンランプ波形の時定数は 10 μs 程度であるから、シグナルの立ち下がりにも多くの光子が MPPC に照射されている¹⁰。

⁷ 現在温度と目標温度の差を比例動作 (P)・積分動作 (I)・微分動作 (D) の 3 項目に分けて温度制御を行う PID 制御を実施した。

⁸ 概算では 10 秒で実機照射レベルに到達するので、不定性を考えても 2 時間程度の低温照射で何らかの PDE 減少が見えるだろうと当初は予想していた。しかし、2 時間では PDE 減少が観測されなかった。そこで、24 時間の常温照射で減少を観測していた 6.2.2 節の実験を参考に 24 時間の照射を行ったところ PDE 減少が観測された。

⁹ 本測定では精度よく照射量を求めるよりも、実機より多くの光子を照射していることを主張したため、このような概算を行った。

¹⁰ 大雑把に考えて、 $10 \mu\text{s} / 100 \text{ ns} \div 2 = 50$ 倍程度の光子が実際には照射されていると推測できる。ただし、 $\div 2$ は時定数 10 μs の信号波形を三角形と近似したことを表す。

表 6.2: UV 光を用いた 2 時間低温照射の結果

	chip 1	chip 2	chip 3	chip 4
Reference	1.06	1.05	1.05	1.06
Irradiated	1.07	1.06	1.05	1.06
Normalized	1.02	1.01	1.00	1.00

表 6.3: UV 光を用いた常温と低温での 24 時間照射の結果

Room-temp	chip 1	chip 2	chip 3	chip 4	Low-temp	chip 1	chip 2	chip 3	chip 4
Reference	1.02	1.04	1.05	1.02		0.97	0.99	0.97	0.98
Irradiated	0.93	0.92	0.93	0.92		0.79	0.86	0.86	0.82
Normalized	0.91	0.88	0.89	0.90		0.81	0.87	0.89	0.84

表 6.4: UV 光を用いた 24 時間照射実験の結果

	Xe-lamp Room-temp	Xe-lamp Low-temp	LXe 2019
Total dose level [photon/mm ²]	$1.3 \times 10^{15}(\text{UV})$	$1.3 \times 10^{15}(\text{UV})$	$5.3 \times 10^{10}(\text{VUV})$
PDE decrease [%]	7.5(UV)	14.8(UV)	9(VUV)

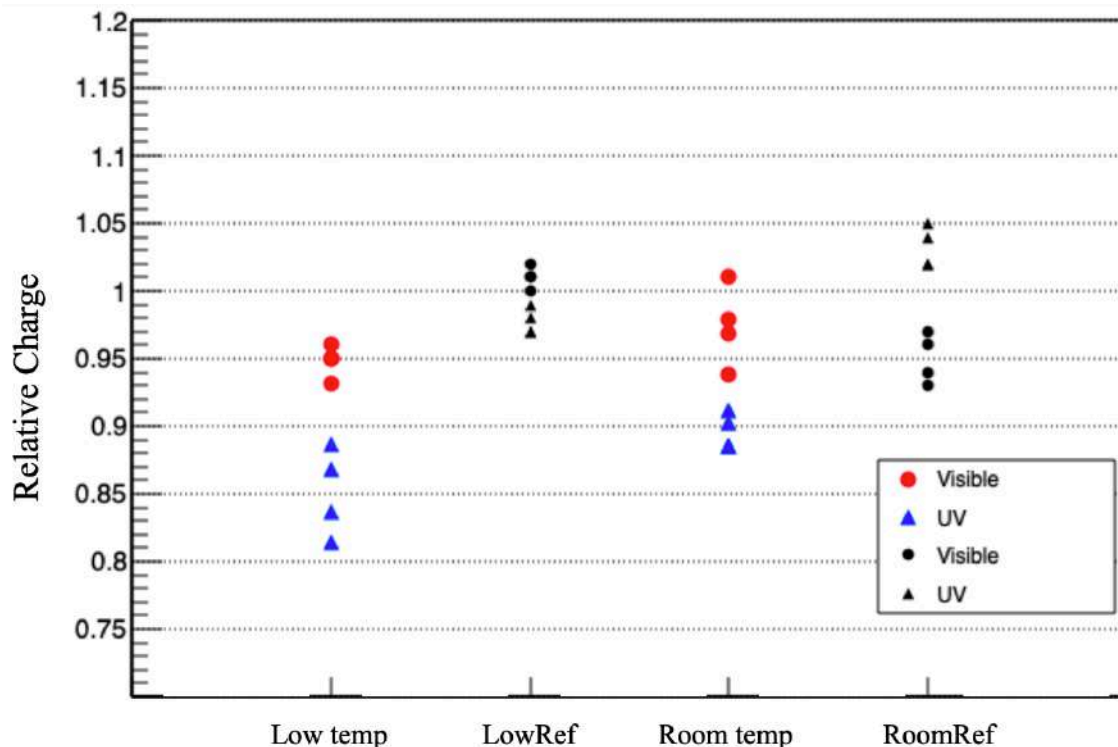


図 6.25: 24 時間の照射による PDE 減少。照射後のシグナルの信号電荷を照射前の積分電荷で割り、さらにレファレンスの値で規格化した。赤いプロットは可視光、青いプロットは UV 光、黒丸・黒三角形は可視光と UV 光に対するレファレンスの変化率である。低温のほうが減少が大きいことがわかる。

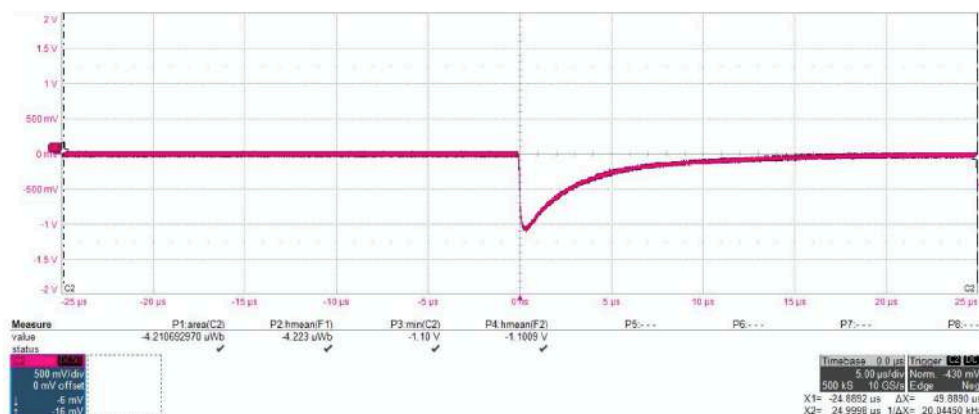


図 6.26: キセノンランプの波形。この図は 20 W モジュールの波形であるが、5 W モジュールと 2 W モジュールも波形の時定数は同程度で $\sim 10 \mu\text{s}$ である。

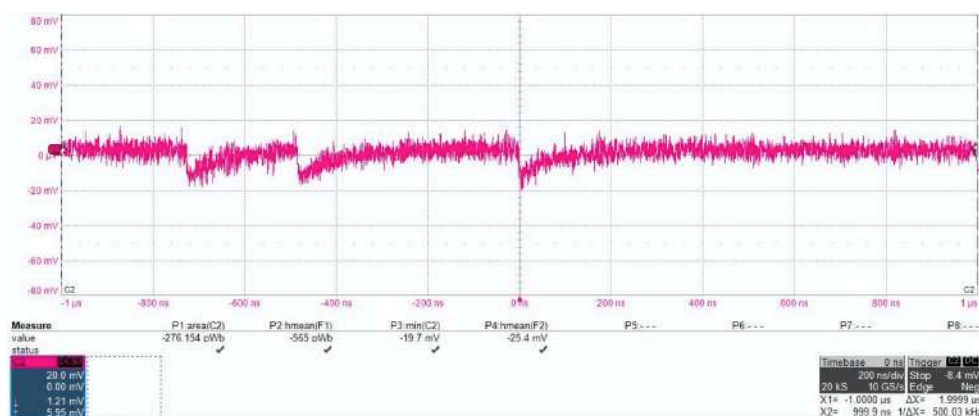


図 6.27: 1 光電子の波形 (ブレイクダウンした MPPC のダークノイズ)。時定数は $\sim 100 \text{ ns}$ 程度。

最後に、24 時間照射後の測定結果を以下にまとめる。

$$N = 1.3 \times 10^{15} \text{ photon/mm}^2 (185 \text{ nm} \lesssim \lambda \lesssim 400 \text{ nm}) = N_{2019} \times 2.5 \times 10^4 \quad (6.9)$$

$$R = 15\% (185 \text{ nm} \lesssim \lambda \lesssim 400 \text{ nm}) \sim R_{2019} \quad (6.10)$$

$$R = 10\% (185 \text{ nm} \lesssim \lambda \lesssim 400 \text{ nm}) > R_{2019} \quad (6.11)$$

6.3.3 低温での VUV 光照射試験

6.3.2 節の測定においては低温の方が PDE 減少の速度が大きかったものの、実機の減少速度よりは遅かった。これは表面損傷の波長依存性によるものである可能性があり、MgF₂ 窓を用いた 2 W のキセノンフラッシュランプによる低温照射試験が行われた。また、VUV 光は大気中では吸収されてしまうため、測定系を窒素で満たす必要があった。

セットアップ

MgF₂ 窓材が使用された 2 W のキセノンフラッシュランプ (図 6.3、以下 2 W モジュール) を用いて照射試験を行った。また、この測定における PDE 測定用の光源は、MgF₂ 窓材の 20 W キセノンフラッシュランプ (図 6.5、以下 20 W モジュール) である。図 6.7 に示すように、MgF₂ は 175 nm 程度の光に対する透過率が UV ガラスに比べて高いため、実機の MPPC と同様の VUV 光の効果を再現できることが期待される。この測定は液体キセノン温度で行っており、照射時のセットアップは図 6.21 に示すものとほとんど同じだが、2 W モジュールと MPPC の間にバンドパスフィルターと ND フィルターが設置されている点異なる。バンドパスフィルターは図 6.10 の右に示す Acton Research のフィルターである。このフィルターにより、実機の MPPC には当たっていない可視光の影響を抑えることができる。また、この実験では照射光量の概算における不定性を減らすために、2 W モジュールを照射時と同じ状態にして 1 パルスあたりの光量を測定した¹¹。その際、MPPC がサチュレーションを起こさないように ND フィルターを 2 枚設置した。フィルターの透過率を補正しなくても済むように、フィルターを外さずに照射を行った。2 枚の ND フィルターの仕様は図 6.28 と図 6.29 に示している。ここで、照射時の MPPC 周辺の写真を図 6.30、図 6.31 に示す。ランプの動作保証温度は 0 °C 以上であるため、モジュールの温度が下がり過ぎないように断熱材で覆っている。また、PDE 測定時のセットアップを図 6.32 と図 6.33 に示す。

この実験では短波長の光に対する酸素と窒素の吸収断面積の違いを利用して VUV 光に対する PDE を測定した。真空紫外領域における酸素分子と窒素分子の吸収断面積のデータを図 6.34 から図 6.37 に示す。これらは、光に対する気体分子の吸収断面積の測定結果をまとめたサイト [42] から引用した。図を見ると、100 nm より短波長側の吸収断面積に 1 桁程度変わるような大きな差異はないが、長波長側では酸素の吸収断面積の方が窒素の吸収断面積より数桁大きい。窒素の 175 nm 周辺のデータはないが 150 nm の点では 4 桁ほど窒素の方が吸収断面積が小さく、175 nm でも大きな差異が存在すると予想される。後述するが、実際に本測定では酸素によって 160 nm < λ < 185 nm 程度の光が吸収されると推定されている。PDE 測定時には、20 W モジュールのシグナルをモニターしながら窒素を流入させ、酸素濃度が低くなるに従って増える信号電荷¹²を VUV 光量とした。酸素濃度は酸素濃度計 (OM-25MP20) を用いて測定した。照射された MPPC と照射されていない MPPC の PDE は同時に測定した。図ではそれぞれ Irradiated と Reference と表記している。

ここで、VUV 光照射量の概算方法を説明する。照射光量を調べるために図 6.31 の状態に図 6.10(左) のバンドパスフィルターを一枚追加した。この状態で窒素を充填していくと、酸素による VUV 光の吸収が減るため検出光電子数が増加す

¹¹6.3.2 での照射量概算の際に述べたように、照射時と別のセットアップでランプの照射量を測定すると、距離などを補正する必要があり、不定性
の原因となる。本測定では、VUV 光の照射量を精度よく求めるために、照射時と同じ状態で照射量を測定し、補正項が増えないようにした。

¹²つまり、酸素濃度 20.9% の時と酸素濃度 0.0% の時の信号電荷の差

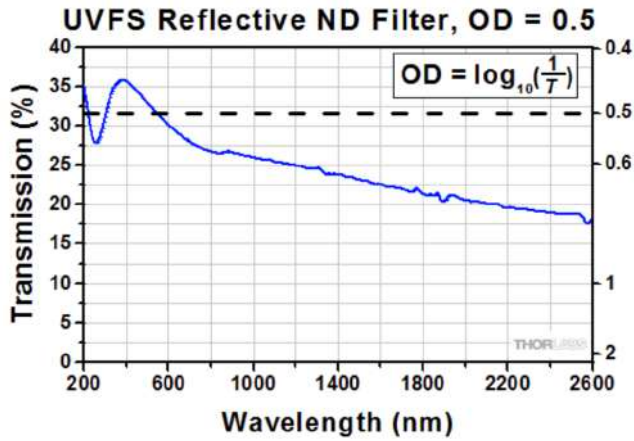


図 6.28: 2 W モジュールを用いた低温照射で使用された OD=0.5 の ND フィルター (NDUV05B) [41]

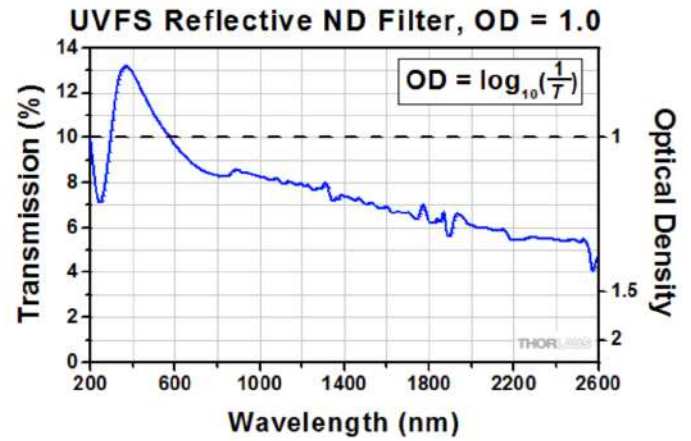


図 6.29: 2 W モジュールを用いた低温照射で使用された OD=1.0 の ND フィルター (NDUV05B) [41]

る。その様子を図 6.38 に示す¹³。窒素パージの前後の信号電荷 (図の黒丸部分) でそれぞれ平均をとると差は $0.25 \mu\text{V} \cdot \text{s}$ であった。1 光電子の積分電荷は $6.7 \text{ pV} \cdot \text{s}$ であったので、PDE を 20% とすれば、1 パルスあたり

$$\frac{0.25 \mu\text{Vs}/\text{chip}}{6.7 \text{ pVs}/\text{p.e.}} \times \frac{1}{0.2 \text{ p.e.}/\text{photon}} = 1.9 \times 10^5 \text{ photon}/\text{chip}$$

の VUV 光が MPPC に照射されている。照射の際のランプの発光周波数は 90 Hz であった。照射の際に BP フィルターを外したが、このフィルターの VUV 光に対する透過率は 21% であった¹⁴。よって、このセットアップで 1Ch=4chip に照射される VUV 光の照射レートは以下のように計算される。

$$\begin{aligned} N_{pho,VUV} &= 1.9 \times 10^5 \text{ photon}/\text{chip}/\text{pulse} \times \frac{1}{36 \text{ mm}^2/\text{chip}} \times \frac{1}{21\%} \times 90 \text{ pulse}/\text{sec} \\ &= 2.3 \times 10^6 \text{ photon}/\text{mm}^2/\text{sec} \end{aligned} \quad (6.12)$$

ここで、2019 年の LXe の MPPC に照射された VUV 光量を再掲する。

$$N_{pho,2019} = 4.6 - 5.8 \times 10^{10} \text{ photon}/\text{mm}^2 \quad (6.13)$$

結果

まず照射時の MPPC と 2 W モジュールの温度ヒストリーを図 6.39 に示す。この低温照射試験においてもランプが動作保証温度の 0 度を下回り過ぎないように、PID 制御による温度コントロールを行った。合計で 21 時間照射を行ったため、(6.12) 式より、この VUV 光の総照射量は

$$N_{pho,VUV} \times 7.6 \times 10^4 \text{ sec} = 1.7_{-0.3}^{+1.8} \times 10^{11} \text{ photon}/\text{mm}^2 \quad (6.14)$$

¹³1 光電子の値で規格化などはしておらず、オシロスコープで波形を積分した絶対値を表している。単位は電圧と時間の積 ($\text{V} \cdot \text{s}$) である。

¹⁴この透過率は実際に測定した値である。このバンドパスフィルターがある状態と無い状態で窒素パージを行い、図 6.38 のようなプロットを作成した。フィルターが無い状態に比べてフィルターがある状態では光量の増え分が 4 チップそれぞれで 21%、20%、16%、26% となった。これらを平均して 21% とした。

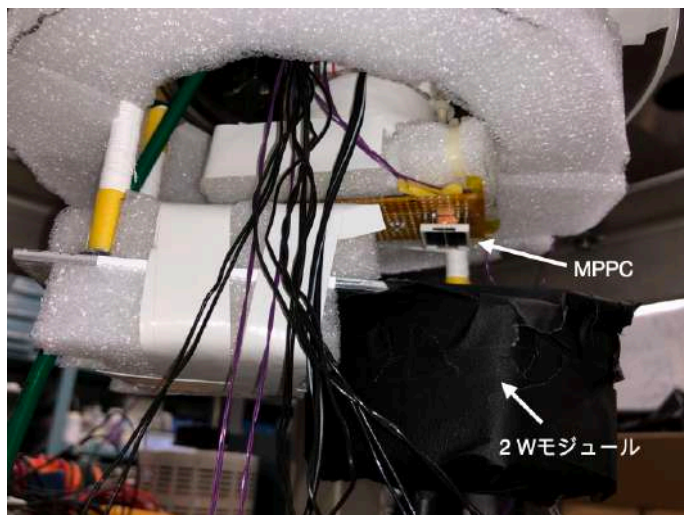


図 6.30: VUV 光を用いた表面損傷調査実験の照射時のセットアップ。

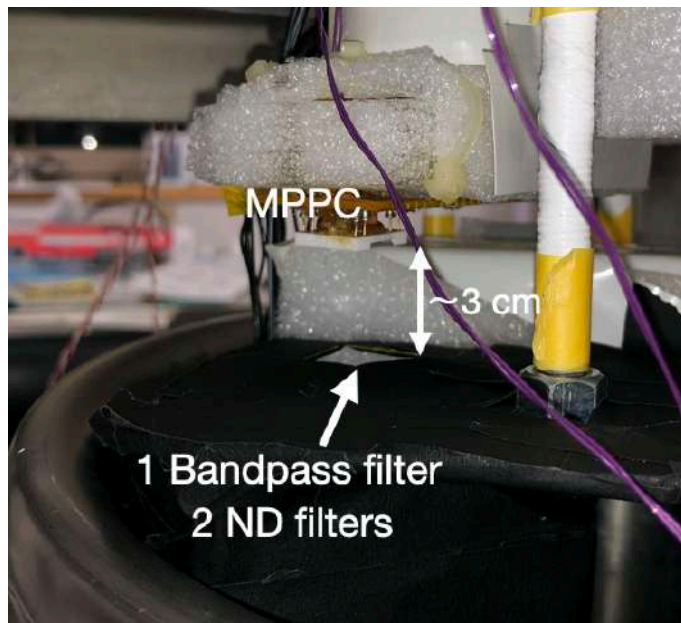


図 6.31: VUV 光を用いた表面損傷調査実験の照射時のセットアップ。

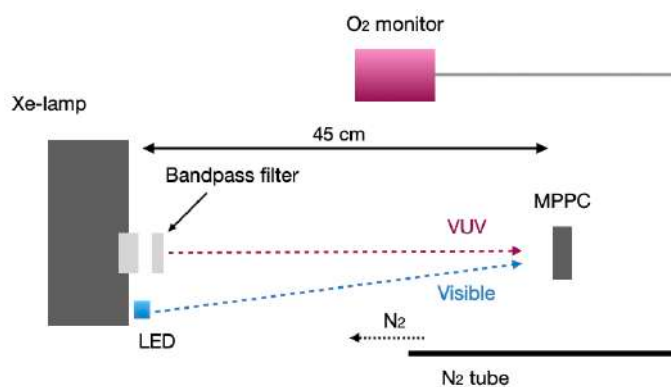


図 6.32: VUV 光を用いた表面損傷調査実験の PDE 測定時のセットアップ。

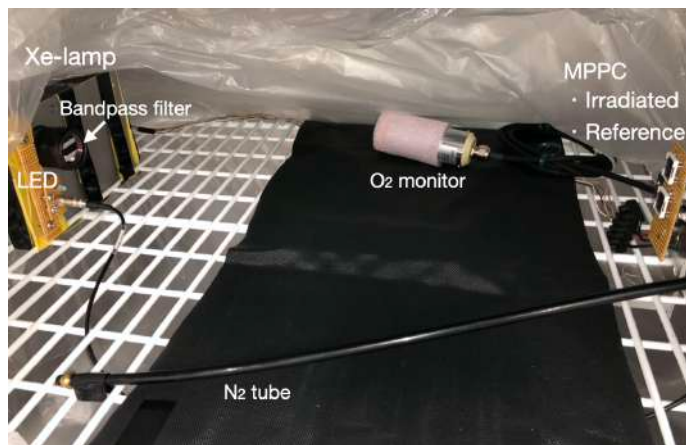


図 6.33: PDE 測定時のセットアップ。窒素パージの効率を上げるためにビニール袋で覆った。実際に測定を始めるときは口を閉じるため中を確認することはできない。全体は恒温槽に設置されている。

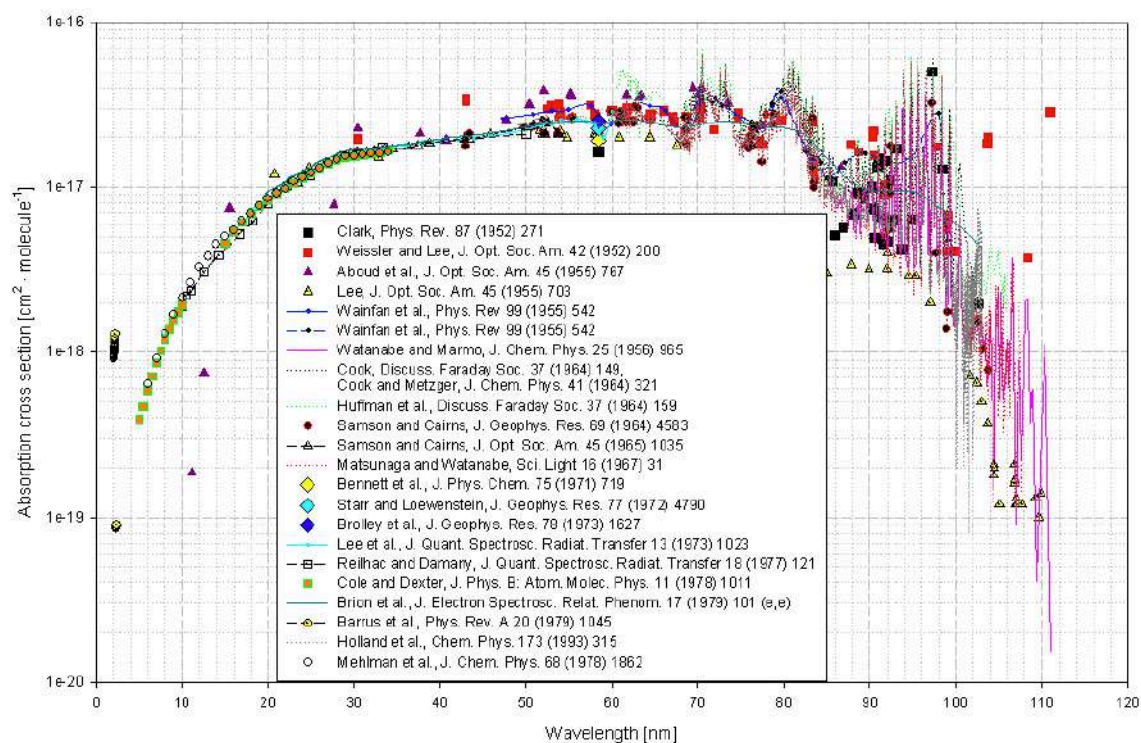


図 6.34: $\lambda=2\text{--}110\text{ nm}$ 程度の光に対する O_2 の吸収断面積。 [42]

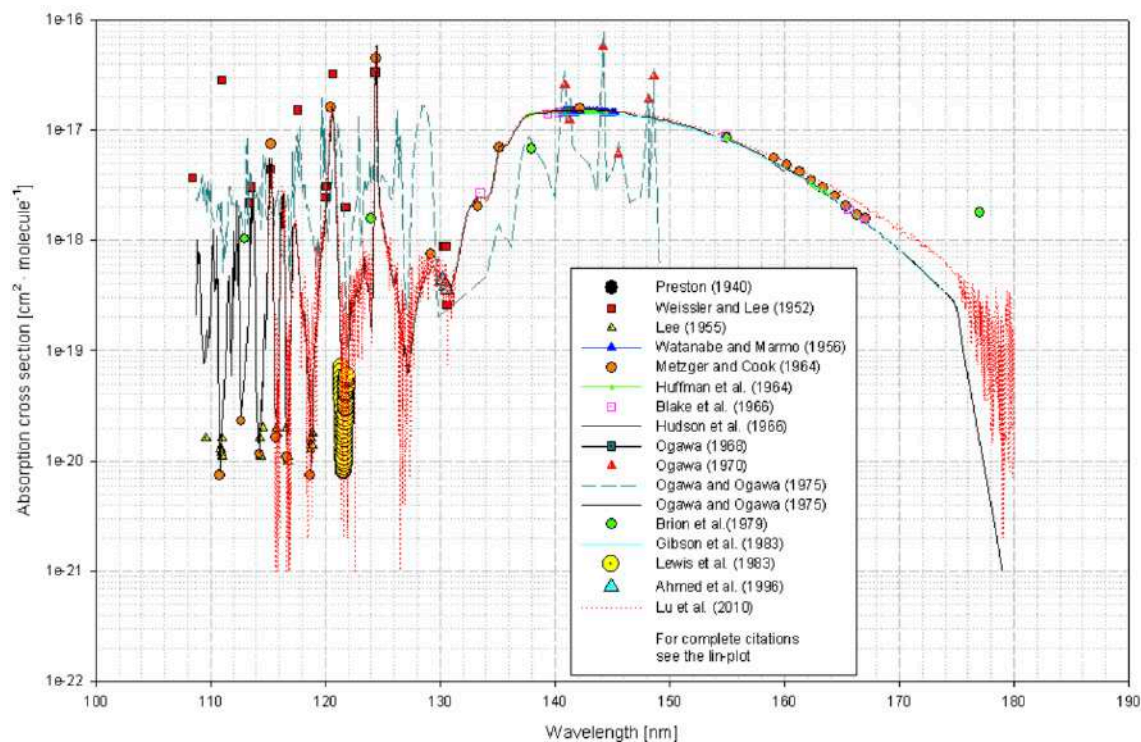


図 6.35: $\lambda=110\text{--}180\text{ nm}$ 程度の光に対する O_2 の吸収断面積。160 nm 付近のばらつきが小さいので PDE 測定時の下限の波長の推定にはこのプロットを参考にする。 [42]

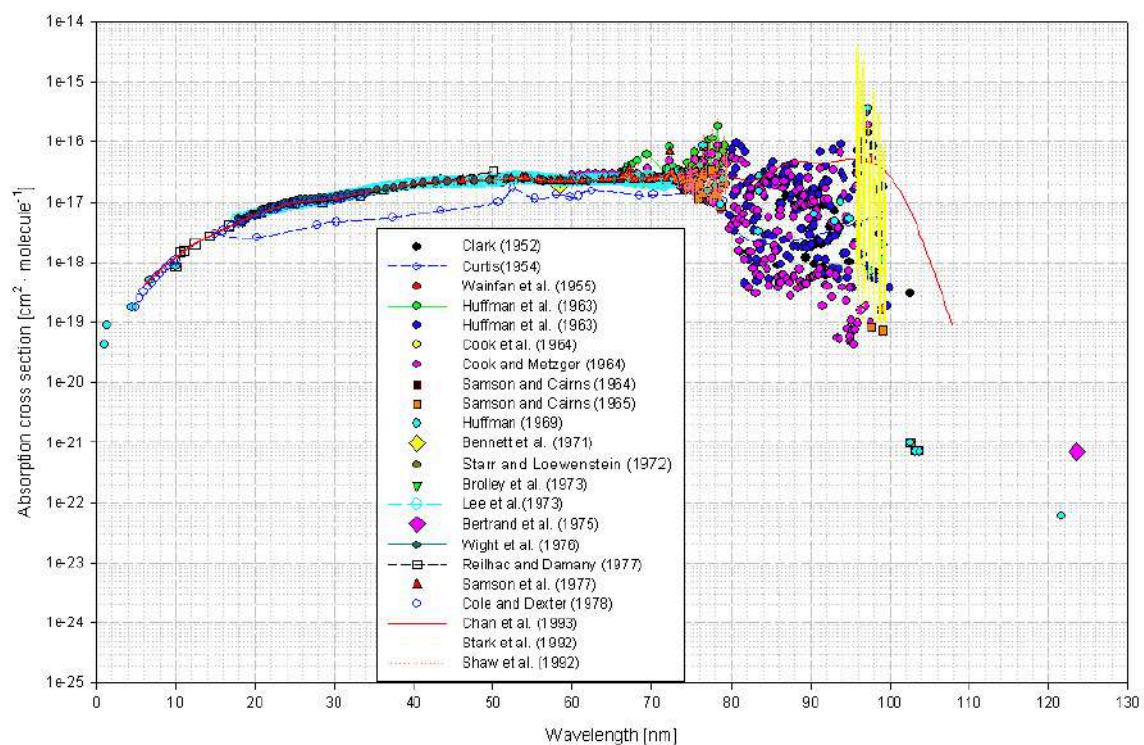


図 6.36: $\lambda=1\text{--}120\text{ nm}$ 程度の光に対する N_2 の吸収断面積。 $\sim 100\text{ nm}$ より長波長側で断面積が急激に減少している。[42]

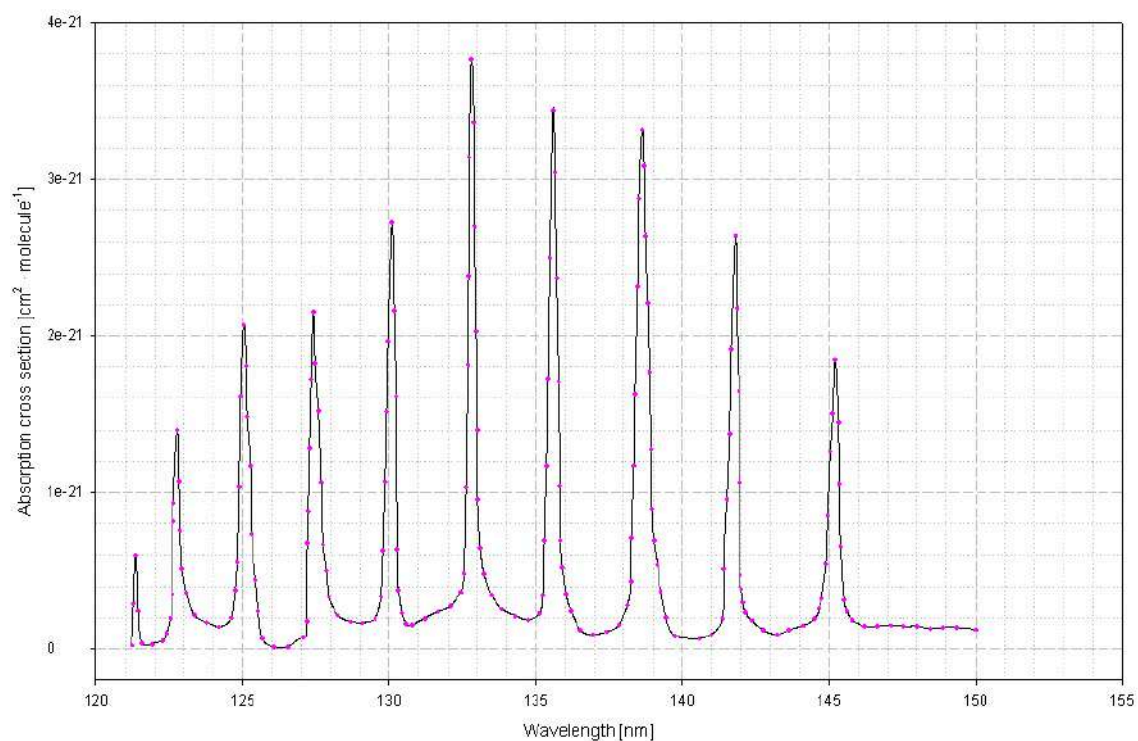


図 6.37: $\lambda=120\text{--}150\text{ nm}$ 程度の光に対する N_2 の吸収断面積。[42] この波長領域は Lyman-Brige-Hopfield band と呼ばれる窒素分子特有の吸収帯で、ピークがあることが知られている。例えば、cite42などを参照。

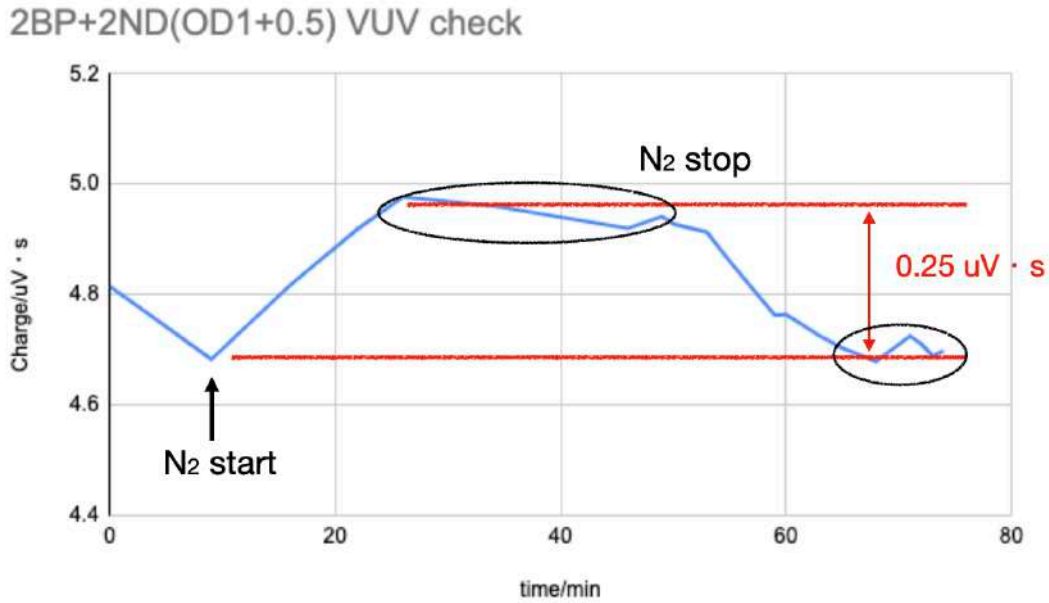


図 6.38: VUV 光による低温照射時の照射レート測定。ランプを ON にしてから最初の数分は不安定なため、10 min 以前で大きく減少しているように見える。ランプが安定してから窒素パージを始めたが、安定になっている状態のデータを取得していなかった。

表 6.5: VUV 光を用いた低温 24 時間照射実験の結果

	chip 1	chip 2	chip 3	chip 4
Reference	1.06	1.07	1.11	1.08
Irradiated	1.16	1.17	1.17	1.15

である。ただし、MPPC の PDE は 10% から 25% まで変化し得るとしてエラーをつけた。(6.14) 式の値は $N_{pho,2019}$ の 3 倍程度である。PDE 測定時の生データを図 6.40 と図 6.41 に示す。黒点・青点はそれぞれ、照射サンプル・非照射サンプルの信号電荷で合計 8 チップ分が表示されている。赤点は酸素濃度のヒストリーを表す。酸素濃度の低下とともに短波長光の減衰が小さくなり検出光電子数が増加していることがわかる。今回用いた酸素濃度計の分解能は 0.1% であるが、濃度計の表示が 0.0% になってからも検出光電子数は増加しているため 0.01% 程度の変化でも VUV 光の吸収に差が出ることがわかる。

この VUV 光量の照射前後の変化を表 6.5 にまとめた。この表の値は 4 チップ各々において、低温照射前の検出 VUV 光量に対する照射後の検出 VUV 光量の比を表している。この表を見ると照射の前後で PDE が減少していないことがわかる。つまり、本測定では実機の MPPC に照射された VUV 光の 3 倍の量を照射したが、VUV に対する PDE の減少は観測されなかった。むしろ、4 チップとも VUV 光照射によって VUV 光に対する PDE が増加しており、4 チップ平均して 8% の上昇が観測された¹⁵。これは 6.2.2 節で述べた UV 洗浄と同様の現象が起きていた可能性がある。

測定結果を以下のように表す。

$$N = 1.7 \times 10^{11} \text{ photon/mm}^2 (160 \text{ nm} \lesssim \lambda \lesssim 185 \text{ nm}) = N_{2019} \times 3.3 \quad (6.15)$$

$$R : \text{ not decreased } (160 \text{ nm} \lesssim \lambda \lesssim 185 \text{ nm}) \quad (6.16)$$

¹⁵ 照射サンプルと非照射サンプルは別の位置に置いてあるため、各チップ毎に規格化することはできない。表における照射サンプルの値の平均を非照射サンプルの値の平均で割った値が 1.08 であったため 8% の上昇とみなした。また、非照射サンプルの PDE が 4 チップとも上昇しているが、照射前に PDE 測定を行った時よりも窒素濃度が高くなったと考えられる。

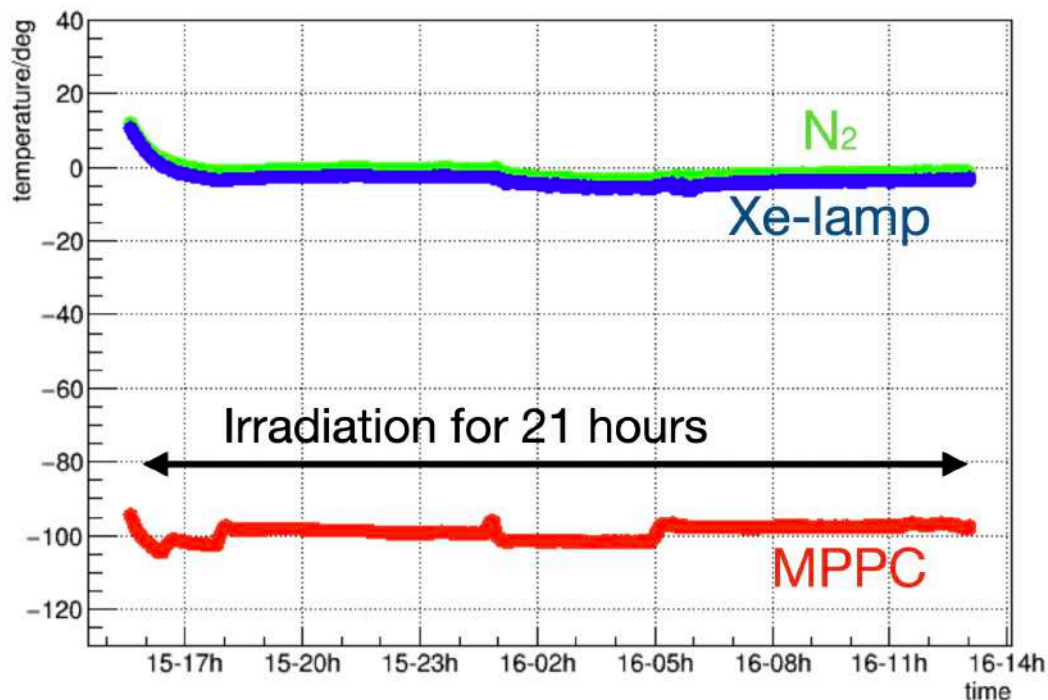


図 6.39: VUV 光による低温照射時のセットアップの温度ヒストリー。窒素残量とランプ温度保持の関係で途中で 4 回窒素流量を変更した。そのため MPPC 温度に不連続な点がある。

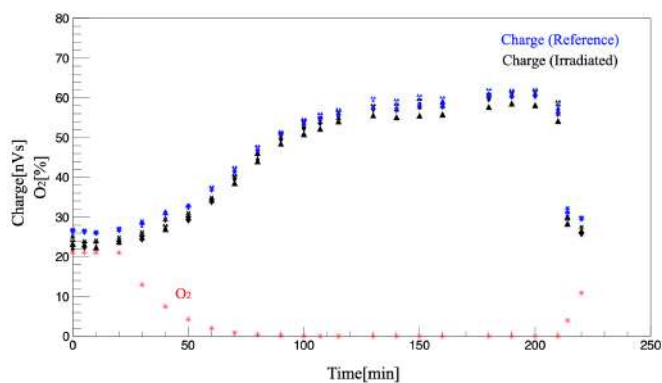


図 6.40: 低温において VUV 光を照射する前の PDE 測定結果。酸素濃度計の表示が 0.1% から 0.0% に変わったのは 107 min の点であり、後述の波長分布測定の議論ではこの瞬間の濃度を 0.04% とする。

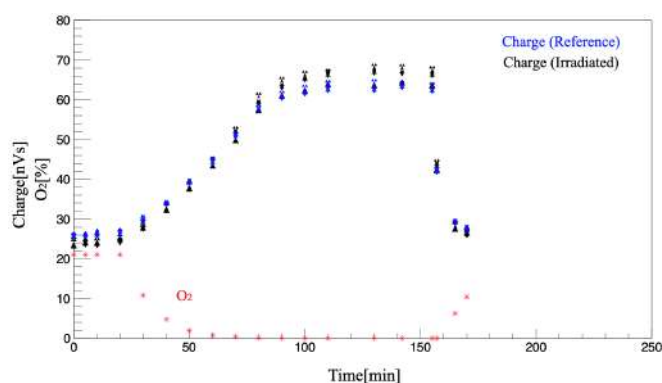


図 6.41: 低温において VUV 光を照射した後の PDE 測定結果。酸素濃度計の表示が 0.1% から 0.0% に変わったのは 90 min の点である。

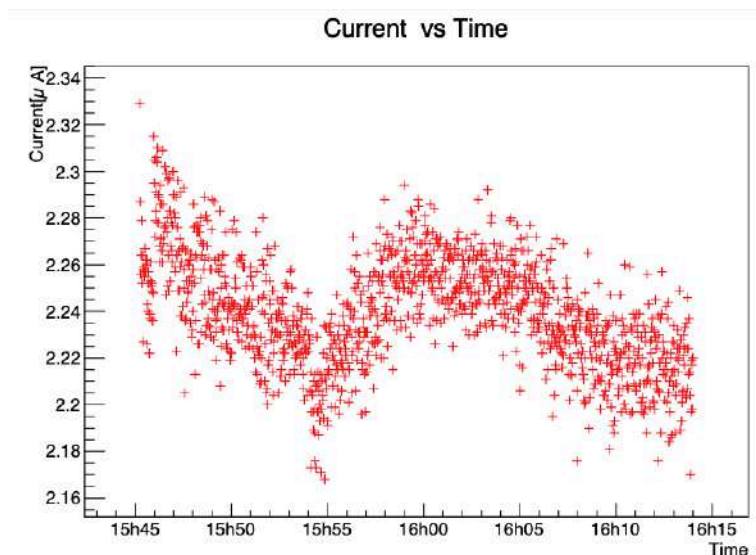


図 6.42: UV 窓のキセノンランプを用いた窒素パージ中のカレントモニター。15h55 で窒素パージを始め、光量増加が飽和してから窒素を止めた。もともとカレントの減少が見えているのはランプをオンにしてから安定しなかったことが原因だと考えられる。

PDE 測定において窒素パージをして増えた光量を VUV 光量と定義しているが、この VUV 光の波長は以下の議論から $160 \text{ nm} < \lambda < 185 \text{ nm}$ であると推定されている。

上限の波長

MgF₂ 窓のキセノンランプを用いた測定だけではなく、図 6.18 と図 6.19 で示したセットアップにおいても窒素パージを行った。この時は信号波高が 1.43 V から 0.02 V 程度増加した。また、その際のカレントヒストリーを図 6.42 に示す。絶対値は $2.20 \mu\text{A}$ から $2.25 \mu\text{A}$ 程度まで増加した。増加量が小さい理由は UV 窓材を用いていたため、もともと酸素に吸収されていた VUV 光が少ないことが原因だと考えられる。実際、図 6.7 より、UV 窓の 20 W モジュールからは 185 nm 以上はほとんど出ていないことがわかる。これらの測定事実から 185 nm 以上の波長を持つ光は窒素パージをせずとも MPPC まで届いていると考えられ、窒素パージによって増えた光量は 185 nm 以下の波長を持つと推定される。

下限の波長

酸素中の VUV 光の平均自由行程を L_O とする。 L_O がランプ窓と MPPC 間の距離である 45 cm に到達するかどうかを考察する。まず、酸素分子数密度を $n(\text{O}_2)$ 、波長 λ の光の酸素に対する吸収断面積を $Ab(\lambda)$ とすると、平均自由行程は

$$L_O = \frac{1}{n(\text{O}_2) \times Ab(\lambda)} \quad (6.17)$$

と表せる。ここで、酸素数密度は測定時の気圧 $\sim 1000 \text{ hPa}$ と温度 293 K 、また酸素濃度計の値から概算できる。一方、VUV 光に対する酸素の吸収断面積の測定結果をまとめた図 6.35 を参考にして、 $Ab(160 \text{ nm}) = 5 \times 10^{-18} \text{ cm}^2/\text{molecule}$ とする。これらの値から、いくつかの酸素濃度の値と平均自由行程を書き出すと表 6.6 のようになる。酸素濃度計の分解能は 0.1% であるが、0.1% から 0.0% に変わった瞬間を 0.04% と考える。ここで、図 6.40 と図 6.41 を見ると酸素濃度 0.04% の時点で VUV 光量の増加はほとんど飽和しているが、表 6.6 に示すとおり 160 nm の光は 2 cm 程度しか進まないと予想される。つまり、窒素パージで増えた光量には 160 nm より短波長の光は含まれないと推定される。以上の考察から本測定では、LXe の MPPC と同程度の波長領域 (図 5.6 を参照) に対する PDE を観測していると考えられる。

表 6.6: 各酸素濃度に対する 160 nm の光の平均自由行程の概算値

	20.9%	10%	0.1%	0.04%	0.01%
L_O [cm]	0.04	0.08	0.8	2	8

また、照射セットアップにおいてランプ窓から MPPC までの距離が 3 cm であるため、表 6.6 から、窒素雰囲気中で照射の際に $\lambda \gtrsim 160$ nm 程度の光が MPPC に照射されていることが推測できる。照射はバンドパスフィルターを設置して行ったが、6.3.2 節の議論から、長波長側は 400 nm 程度まで MPPC に当たっていると考えられる。

6.3.4 液体キセノン中でのアルファ線源を用いた PDE 測定

液体キセノンのシンチレーション光を MPPC に照射する試験も行われた。液体キセノン中にアルファ線が入射した際に発生するシンチレーション光を用いた。アルファ線源は ^{241}Am である。

セットアップ

図 5.12 に示した真空容器と液体キセノンを用いて、シンチレーション光を MPPC に照射する実験が行われた。単位時間あたりの照射量は小さく、実機と同程度の照射量に達するまで 1ヶ月程度かかる。しかし、照射する光は実機で照射されている VUV 光と同じ波長領域を持っており、かつ温度が同じため実機との比較がしやすい。この時のセットアップを図 6.43 と図 6.44 に示す。線源に近いところに MPPC1、遠いところに MPPC2 を設置し、MPPC1 内の 2 チップ (ch0 と ch1) と MPPC2 内の 2 チップ (ch2 と ch3) を用いてシグナルの信号電荷をモニターした。キャリブレーションのために青色 LED も設置したが、光を拡散させ均等に MPPC に当てるため LED の前にテフロンを固定した。PDE 減少が観測された時、それがシンチレーション光の照射によるものなら近い方の 2 チップの減少量が大きくなるはずである。また、例えば純度が低下して検出光電子数が低下した場合は、4 チップとも PDE が減少するように見えるので、純度の低下を判別できる。同時に大光量の LED からの可視光に対する積分電荷もモニターした。大光量なので精度良く可視光に対する PDE などの変化が分かるが、これは ECF やゲインの変化を含むため、キャリブレーション用に微弱光を用いたゲインおよび ECF の測定も行った (5.2.1 節を参照)。

結果

VUV 光と大光量の可視光に対する信号電荷のヒストリーを図 6.45 と図 6.46 に示す。この結果は ch0 のものである。この照射試験において PDE 減少は観測されなかった。この測定期間に実験施設の停電操作が行われ、その区間のデータは取得されていない。停電の前後において VUV 光に対する応答が大きく変わっているが、これは実験装置の電源が一度切れたことでエレクトロニクスに何らかの変化が生じたためだと考えられる。その後に 2 度目のジャンプがあり、これも原因不明であった。2 度目のジャンプのあとに 168 時間ほど安定してデータが取得できたので、この部分について議論する。まず、2019 年のコミッショニングにおけるビームタイム中の VUV 光総照射量は $4.6 - 5.8 \times 10^{10}$ photon/mm² である。2019 年において実機の MPPC の PDE 減少量は 9%程度であったが、今回のセットアップでは照射レートが 9.7×10^7 photon/h/mm² であるため¹⁶、実機と同じように減少すると仮定すれば 168 時間で少なくとも 2%程度の減少が期待される。しかし、そのような減少は確認されなかった。可視光の PDE も大きな変化はなく、この 168 時間にお

¹⁶図 5.1 に示すようなアルファ線源に対するイベントの信号電荷平均をゲインで割って推定した。これは測定開始時の値であるから、例えば停電時などに液体キセノンの純度が変化していれば照射レートの推定値も変化している可能性がある。

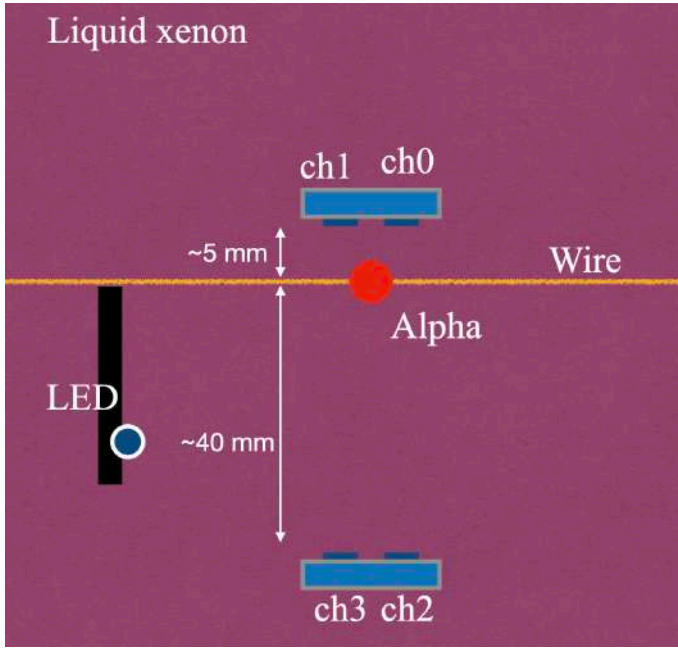


図 6.43: シンチレーション光照射測定のセットアップのイメージ。PDE 減少が観測された場合に、その原因の候補から純度の低下を排除するために距離の異なる MPPC の PDE をモニターした。

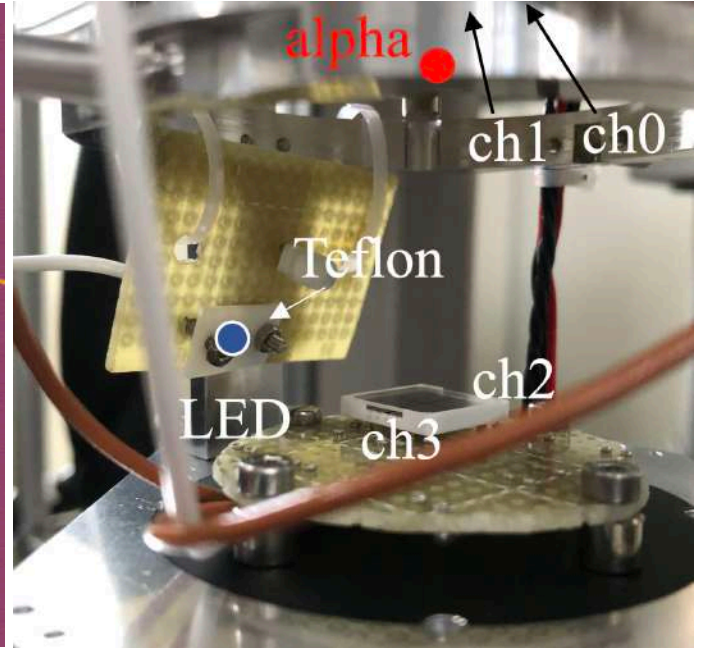


図 6.44: セットアップの写真。全体が液体キセノンの中に固定される。LED 光を一様に照射するするためテフロンが設置されている。

る変化は 1%未満であった。また、他の 3 つの素子に関しても VUV 光に対する PDE 減少は観測されず、停電期間における大きな減少が見られた¹⁷。

168 時間照射の測定結果を以下に表す。

$$N = 1.6 \times 10^{10} \text{ photon/mm}^2 (\lambda = 175 \text{ nm}) = N_{2019} \times 0.31 \quad (6.18)$$

$$R : \text{not decreased } (\lambda = 175 \text{ nm}) \quad (6.19)$$

6.4 ラボ測定のまとめ

実機に使用されている MPPC に対して「VUV 光が表面損傷を与える可能性」と「表面損傷に対して低温環境が与える影響」について調査する実験が行われてきた。これらの測定結果を図 6.47 と表 6.7 にまとめる。ただし、前者では比較のために適当な時点での照射結果を示している一方、後者では最終的な照射結果を表している。また、UV 光を用いた電圧ゼロでの感度減少測定は低温が液体キセノン温度に到達しておらず、比較が難しいためこれらの図表には載せていない。表 6.7 では、実際に MPPC に照射された全ての光の波長領域が照射量概算をした光の波長領域と異なる場合、照射量の値に (UV) などと記載した。

まず、重水素ランプを用いた常温での VUV 光照射試験によってカレント減少が観測されたが、減少速度は実機に比べると 1000 倍以上遅かった (6.2.1 節)。($N_{VUV} \gg N_{2019,VUV}$)

一方で、UV 窓のキセノンフラッシュランプを用いて、185 nm 以上の光の照射によりカレントをモニターしたところ、296 K に比べて 240 K の方が減少が遅くなった。この測定では、MPPC 温度が液体キセノン温度まで到達せず、照射波

¹⁷ただし、停電後の 2 度目のジャンプは ch2 と ch3 に関しては起こらなかった。この原因は分かっていない。

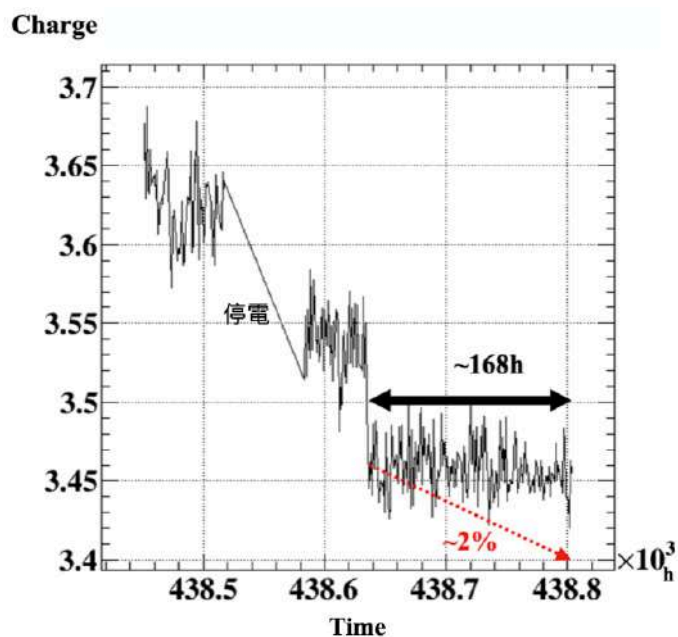


図 6.45: アルファ線によるシンチレーション光に対する信号電荷のヒストリー。実験施設の計画停電が行われた期間のデータはない。停電中に PDE が減少しているように見えるがこれは電源が落ちたことによって測定系に何らかの変化が起きたためだと考えられる。その後 2 度目のジャンプがあり、これも原因は不明である。安定してデータが取得できたのは 168 時間程度であった。

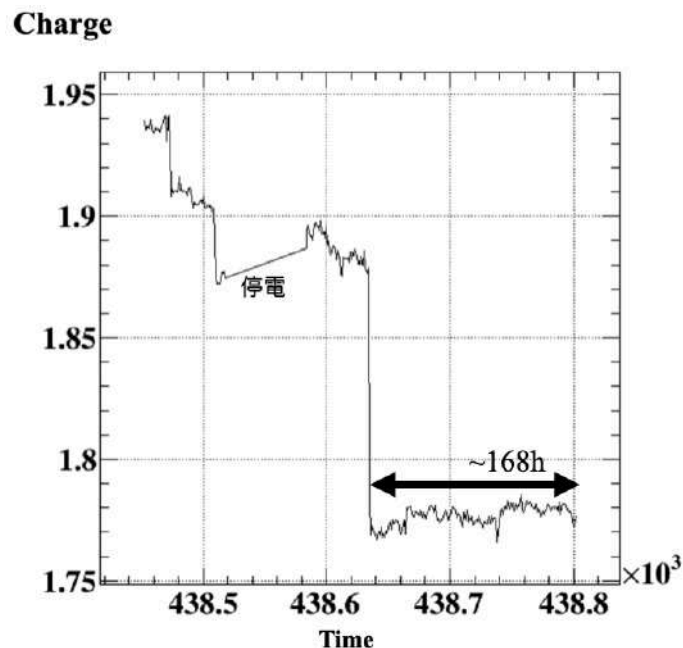


図 6.46: シンチレーション光照射中の大光量 LED に対する応答の変化。シンチレーション光に対する PDE ヒストリーと同様に安定してデータ取得できたのは 168 時間程度であり、この間は値の変化は大きくても 1% 程度である。

Room-temp

- ・ Irradiation test using D2 lamp
- ・ Current measurement
- ・ $N_{VUV} = N_{2019,VUV} \times 1.9 \times 10^3$
- ・ $R_{VUV} = 5\%$
- ・ $VUV \rightarrow \lambda = 175\text{ nm}$
- ・ Long-term UV irradiation
- ・ Signal charge measurement
- ・ $N_{UV} = N_{2019,VUV} \times 2.4 \times 10^4$
- ・ $R_{UV} \simeq 6\%$
- ・ $UV \rightarrow 185\text{ nm} \lesssim \lambda \lesssim 400\text{ nm}$

LXe detector (165 K)

- ・ $N_{2019,VUV}$
- ・ $R_{VUV} = 9\%$
- ・ $VUV \rightarrow \lambda = 175\text{ nm}$

Low-temp (~ 165 K)

- | | | |
|---|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ・ UV irradiation at low-temp ・ Signal charge measurement ・ $N_{UV} = N_{2019,VUV} \times 2.5 \times 10^4$ ・ $R_{UV} = 15\%$ ・ $UV \rightarrow 185\text{ nm} \lesssim \lambda \lesssim 400\text{ nm}$ | <ul style="list-style-type: none"> ・ VUV irradiation at low-temp ・ Signal charge measurement ・ $N_{VUV} = N_{2019,VUV} \times 3.3$ ・ $R_{VUV} = -$ ・ $VUV \rightarrow 160\text{ nm} \lesssim \lambda \lesssim 185\text{ nm}$ | <ul style="list-style-type: none"> ・ Irradiation by scintillation light ・ Signal charge measurement ・ $N_{VUV} = N_{2019,VUV} \times 0.31$ ・ $R_{VUV} = -$ ・ $VUV \rightarrow \lambda = 175\text{ nm}$ |
|---|--|--|

図 6.47: 測定結果の概要。常温と低温の照射に分けて説明してきた。この図では比較がしやすいように適当な照射量での結果を示している。

表 6.7: 各照射試験の最終的な感度減少率

	照射波長 [nm]	照射量 [photon/mm ²]	感度測定波長 [nm]	感度減少率	測定方法
実機 (2019)	175	5.2×10^{10}	175	9%	低温での信号電荷
6.2.1 節	175	1.0×10^{15}	175	20%	常温での電流値
6.2.2 節	185–1000	3.1×10^{16} (UV)	185–400	65%	常温での信号電荷
6.3.2 節	185–1000	1.3×10^{15} (UV)	185–400	7.5%	常温での信号電荷
				14.8%	低温での信号電荷
6.3.3 節	160–400	1.7×10^{11} (VUV)	160–185	—	低温での信号電荷
6.3.4 節	175	1.6×10^{10}	175	—	低温での信号電荷

長も異なる (6.3.1 節)。カレントモニターを行う実験では感度の減少を観測することができたが、電圧は印加されておらず、温度も液体キセノン温度ではなかったため、実機の PDE 減少を検討するためには情報が不十分であった。

次に UV 窓のキセノンフラッシュランプを用いた常温照射試験を説明した。この測定では、実機の MPPC に照射された VUV 光に比べて数桁多い UV 光が照射された結果、PDE 減少が観測された。しかし、実機に比べると減少速度は 1000 倍以上遅かった (6.2.2 節)。この原因として、温度の差が影響していると考えられた。MPPC の温度を液体キセノン温度まで冷却するセットアップを作成し、低温と常温での比較実験を行った。ここでも UV 光は実機の VUV 光より数桁多く MPPC に照射され PDE 減少が観測された。さらに低温において減少速度の増加が観測された。しかし、低温においても実機に比べると減少速度は遅かった (6.3.2 節)。これらの実験では信号電荷を測定している。カレントモニターを行った測定と合わせると、VUV 光や UV 光による表面損傷の存在を強く示唆している。 $(N_{UV} \gg N_{2019,VUV})$

低温においても減少速度が小さいのは、波長が関係しているためであると推測された。そこで、VUV 光による照射試験も議論した。まず、 MgF_2 窓を使用したキセノンフラッシュランプによって、照射量と波長を実機に合わせて行った測定を説明した。この測定では、窒素を用いた VUV 光感度の測定が行われた。MPPC を液体キセノン温度まで冷却し、実機の照射量の 3 倍程度の VUV 光を照射したが PDE 減少は観測されなかった (6.3.3 節)。さらに、液体キセノン中にアルファ線源を固定し、実機と同じ波長を持った光で照射する実験も行われた。この測定では実機と同レベルの照射量には到達しなかったが、予想されるような PDE の減少は観測されなかった。 (6.3.4 節)。これらの結果は、VUV 光の表面損傷が実機の PDE 減少の主な原因とはならないことを示している。 $(N_{VUV} \sim N_{2019,VUV})$

第7章 結論と今後の展望

7.1 結論

MEG II 実験に関して各検出器のアップグレード内容を簡単に述べたが、本稿では特に液体キセノンガンマ線検出器について着目した。このアップグレードにおいて VUV 光に感度のある MPPC が開発・導入された。しかし、大強度ミュオンビームを用いたコミッションングにおいて、MPPC の PDE 減少が観測され、その減少速度は無視できるものではなかった。その原因の候補として挙げられたのが、VUV 光による表面損傷である。表面損傷とは、短波長の光子などが SiPM の保護層で電子・正孔対を生成した際に、正孔のみが保護層やシリコンとの境界面に捕捉されるような状態になることを言う。蓄積した正孔により、光センサーの内部電場が弱められると、アバランシェ領域まで到達できる電子が少なくなり、結果として検出効率の低下を引き起こしているという仮説が考えられる。特に、低温では正孔の易動度が小さくなり、表面損傷が発生しやすくなると推測された。

これを確かめるために光源を用いたラボでの照射試験が行われてきた。最初に紹介したのが常温での VUV 光照射によるカレントモニターである。この測定で VUV 光による MPPC の感度減少が観測されたが、信号電荷を測定していないことと常温で照射したという点が実機と異なる。PDE 減少の原因が VUV 光による表面損傷であるという予想のもと、測定セットアップの改良をおこなってきた。そして、VUV 光や UV 光による PDE 減少を確認し、さらに低温の効果も観測した。しかし、MgF₂ 窓のキセノンランプを用いた低温照射試験や、液体キセノン中でのアルファ線源によるシンチレーション光照射試験では実機の PDE 減少は再現されなかった。以上の結果より、実機の PDE 減少の主要な原因の候補から VUV 光による表面損傷を排除できたと考えられる。

7.2 今後の課題・展望

MPPC の PDE 減少の原因を調査する研究に関して現在計画されている測定は主に二つある。一つ目は線源による照射である。5.3.3 節で述べたような放射線の照射試験では PDE への影響は観測されなかったが、照射してから PDE 測定が行われるまでに数年経過しており、この間にアニーリングされていた可能性がある。そのため、電離放射線が PDE 減少に影響を与える可能性が完全に否定されたとは言い難い。低温環境で線源照射を行い、アニーリングが起こる前に PDE をモニターできるようなセットアップの作成が進められている。

もう一つ計画されている実験は、実機の照射レベルより数桁大きい照射量の VUV 光を MPPC に当てる実験である。本稿で紹介した中には 175 nm 付近の光を実機より数桁大きいレベルで当てた試験はない。今回行った VUV 光量の概算に想定外のミスが起こっており、照射量を過大評価してしまっていた場合¹、実機の PDE 減少の原因から VUV 光による表面損傷を除外することはできない。MgF₂ 窓を用いたキセノンフラッシュランプを使って常温で長期間照射する実験が予定されている。また、172 nm の単色光を 6×10^{15} photon/sec (at 5 cm) 程度の大光量で照射できるエキシマランプ (SUS03、ウシオ電気社製) を使った照射試験も考えられている。

これらの測定によって、VUV-MPPC の PDE 減少問題に対する原因の解明と解決に向けた研究を進めていく。

¹例えば、低温照射の際に MPPC の表面に霜がついており 175 nm 程度の波長を持った光が全て吸収されていた場合。他にも、今回の測定において酸素による VUV 光の吸収断面積が想定よりも大きかった場合など。

謝辞

はじめに、MEG 実験に参加する機会を与えてくださった指導教員の大谷航准教授と森俊則教授に感謝致します。海外で研究に参加するという貴重な経験のほか、修士課程 2 年間に於いて様々な学びを得ることができました。

キセノグループの皆様にはミーティングなどで大変お世話になりました。岩本敏幸助教には研究だけではなく、スイスでの活動についても多くのアドバイスを頂きました。家城佳特任研究員には実験の基礎に関する多くの指導を頂いたほか、発表スライドなどに多くのコメントを下さいました。恩田理奈氏には入学直後、筆者の浅学によりご迷惑をお掛けしましたが多くの丁寧なアドバイスを頂きました。小川真治氏と小林暁氏には東京での照射試験に参加して頂き、有益な議論を行うことができました。吉田圭佑氏には測定のお力添えを頂きました。

内山雄祐特任助教には発表練習などで多くの指摘を頂きました。劉靈輝氏と辻直希氏には測定室の使用にあたって様々なアドバイスを頂きました。中尾光孝氏、宇佐見正志氏、大矢淳史氏、豊田和輝氏、野内康介氏、池田史氏、村田樹氏とは研究生活で楽しい時間を共有させて頂きました。特に、同期の米本拓氏、増田隆之介氏、山本健介氏とは良い関係を築くことができたことに感謝しております。

秘書の皆様には出張手続きや物品購入などで大変お世話になりました。最後に申し分のない学習環境を提供して下さった家族に感謝を申し上げます。

関連図書

- [1] A. M. Baldini *et al.* [MEGII], Eur. Phys. J. C **78**, no.5, 380 (2018) doi:10.1140/epjc/s10052-018-5845-6 [arXiv:1801.04688 [physics.ins-det]].<https://link.springer.com/article/10.1140/epjc/s10052-018-5845-6>
- [2] C. D. Anderson and S. H. Neddermeyer, Phys. Rev. **50**, 263-271 (1936) doi:10.1103/PhysRev.50.263
- [3] T. P. Gorringe and D. W. Hertzog, Prog. Part. Nucl. Phys. **84**, 73-123 (2015) doi:10.1016/j.pnpnp.2015.06.001 [arXiv:1506.01465 [hep-ex]].<https://inspirehep.net/literature/1374622>
- [4] P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020).<https://academic.oup.com/ptep/article/2020/8/083C01/5891211>
- [5] Y. Kuno and Y. Okada, Rev. Mod. Phys. **73**, 151-202 (2001) doi:10.1103/RevModPhys.73.151 [arXiv:hep-ph/9909265 [hep-ph]].<https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.73.151>
- [6] A. Scaffidi, K. Freese, J. Li, C. Savage, M. White and A. G. Williams, Phys. Rev. D **93**, no.11, 115024 (2016) doi:10.1103/PhysRevD.93.115024 [arXiv:1604.00744 [hep-ph]].<https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.93.115024>
- [7] doi:10.1142/9789812839657_0001 [arXiv:hep-ph/9709356 [hep-ph]].<https://inspirehep.net/literature/448462>
- [8] K. Ieki, T. Iwamoto, D. Kaneko, S. Kobayashi, N. Matsuzawa, T. Mori, S. Ogawa, R. Onda, W. Ootani and R. Sawada, *et al.* Nucl. Instrum. Meth. A **925**, 148-155 (2019) doi:10.1016/j.nima.2019.02.010 [arXiv:1809.08701 [physics.ins-det]].<https://arxiv.org/abs/1809.08701>
- [9] The homepage of Paul Scheller Institute, <https://www.psi.ch/en/media/the-psi-proton-accelerator>
- [10] Hamamatsu Photonics, handbook, https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/02_handbook.pdf
- [11] W. Ootani, W. Odashima, S. Kimura, T. Kobayashi, Y. Makida, T. Mitsuhashi, S. Mizumaki, R. Ruber and A. Yamamoto, IEEE Trans. Appl. Supercond. **14**, no.2, 568-571 (2004) doi:10.1109/TASC.2004.829721.https://www.researchgate.net/publication/3312586_Development_of_a_Thin-Wall_Superconducting_Magnet_for_the_Positron_Spectrometer_in_the_MEG_Experiment
- [12] J. Adam, X. Bai, A. M. Baldini, E. Baracchini, C. Bemporad, G. Boca, P. W. Cattaneo, G. Cavoto, F. Cei and C. Cerri, *et al.* Eur. Phys. J. C **73**, no.4, 2365 (2013) doi:10.1140/epjc/s10052-013-2365-2 [arXiv:1303.2348 [physics.ins-det]].<https://link.springer.com/article/10.1140/epjc/s10052-013-2365-2>
- [13] S. Ritt, R. Dinapoli and U. Hartmann, Nucl. Instrum. Meth. A **623**, 486-488 (2010) doi:10.1016/j.nima.2010.03.045, <https://inspirehep.net/literature/876873>

- [14] S. Ritt, "Design and performance of the 6 GHz waveform digitizing chip DRS4," *2008 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, Dresden, Germany, 2008, pp. 1512-1515, doi: 10.1109/NSSMIC.2008.4774700.<https://ieeexplore.ieee.org/document/4774700>
- [15] V. Andreev et al., A high granularity scintillator hadronic- calorimeter with SiPM readout for a linear collider detector. *Nucl. Instrum. Methods A* **540**, 368–380 (2005).<https://inspirehep.net/literature/664244>
- [16] 松村徹, 日本物理学会 2008 年秋季大会 (山形大学),http://www.nda.ac.jp/cc/radiation/presen/JPS200809_toru.pdf
- [17] B. López Paredes, H. M. Araújo, F. Froberg, N. Marangou, I. Olcina, T. J. Sumner, R. Taylor, A. Tomás and A. Vacheret, *Astropart. Phys.* **102**, 56-66 (2018) doi:10.1016/j.astropartphys.2018.04.006, <https://arxiv.org/abs/1801.01597>
- [18] E.H. Snow, A.S. Grove, D.J. Fitzgerald, Effects of ionizing radiation on oxidized, silicon surfaces and planar devices, *Proc. IEEE* **55** (7) (1967) 1168–1185.<https://ieeexplore.ieee.org/document/1447706>
- [19] E. Garutti and Y. Musienko, *Nucl. Instrum. Meth. A* **926**, 69-84 (2019) doi:10.1016/j.nima.2018.10.191 [arXiv:1809.06361 [physics.ins-det]].<https://inspirehep.net/literature/1694163>
- [20] Omeime Xerviar Esebamen, Effect of UV radiation surface damage on silicon position sensitive photodetector, *Optik*, Volume 127, Issue 2, 2016, Pages 599-602, ISSN 0030-4026, <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.09.074>.
- [21] Erika Gautti, Radiation damage on silicon photo-multipliers, <https://www.desy.de/~garutti/LECTURES/SiPM-RadDamage.pdf>
- [22] H. J. Barnaby, "Total-Ionizing-Dose Effects in Modern CMOS Technologies," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 53, no. 6, pp. 3103-3121, Dec. 2006, doi: 10.1109/TNS.2006.885952. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4033191>
- [23] V.F. Gantmakher, *Electron and Disorder in Solids*, Chapter4, <https://oxford.universitypressscholarship.com/view/10.1093/acprof:oso/9780198567561.001.0001/acprof-9780198567561-chapter-4>
- [24] T. Kirn, D. Schmitz, J. Schwenke, T. Flugel, D. Renker and H. P. Wirtz, *Nucl. Instrum. Meth. A* **387**, 202-204 (1997) doi:10.1016/S0168-9002(96)00990-4,<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900296009904?via%3Dihub>
- [25] 小林暁、「MEG II 実験液体キセノンガンマ線検出器における MPPC の大強度ミューオンビーム環境下での光子検出効率低下率測定」、日本物理学会 2020 年春季大会
- [26] G. Lindström, M. Moll, E. Fretwurst, Radiation hardness of silicon detectors – a challenge from high-energy physics, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Volume 426, Issue 1, 1999, Pages 1-15, ISSN 0168-9002,[https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)01462-4](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)01462-4)
- [27] M. Moll, E. Fretwurst, G. Lindström, Leakage current of hadron irradiated silicon detectors – material dependence, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and*

Associated Equipment, Volume 426, Issue 1, 1999, Pages 87-93, ISSN 0168-9002,[https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)01475-2](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)01475-2)

- [28] 小川真治、「MEG II 実験のための真空紫外光に感度のある大型 MPPC を用いた高精細読出し液体キセノンガンマ線検出器の開発」、修士論文、東京大学 (2016)
- [29] 家城佳、「MEG II 実験液体キセノン検出器用 MPPC のアニーリング」、日本物理学会 2020 年春季大会
- [30] 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構ホームページ <https://www.qst.go.jp/site/taka/>
- [31] 神戸大学大学院海事科学研究科・海事科学部ホームページ <http://www.maritime.kobe-u.ac.jp/study/tandem.html>
- [32] 柴田直哉、「ILC 測定器用ハドロンカロリメータにおけるシンチレータセルユニットの研究開発」、修士論文、東京大学 (2016)
- [33] 恩田理奈、「MEG II 実験液体キセノン検出器の VUV 有感 MPPC への放射線損傷による影響の評価」、日本物理学会 2019 年秋季大会
- [34] 浜松ホトニクス、キセノンフラッシュランプカタログ、(2019 年 7 月現在)
- [35] 浜松ホトニクス、キセノンフラッシュランプカタログ、(2020 年 10 月現在)、https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/Xe-F_TLS1022J.pdf
- [36] Edmund optics homepage,<https://www.edmundoptics.jp/>
- [37] TELEDYNE ACTON OPICS homepage,<http://www.actonoptics.com/products/filters-narrowband>
- [38] 浜松ホトニクス 個体事業部 個体第 2 製造部 第 30 部門、VUV-MPPC 真空紫外光連続照射試験 (2019.11.15)
- [39] 恩田理奈、「MEG II 実験液体キセノン検出器の VUV 有感 MPPC への放射線損傷による影響の評価」、日本物理学会 2020 年春季大会
- [40] MiSUMi-VONA,<https://jp.misumi-ec.com/vona2/detail/110400041610/?KWSearch=uv%20%e3%82%ab%e3%83%83%e3%83%88&searchFlow=results2products>
- [41] THORLABS,https://www.thorlabs.co.jp/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6106
- [42] The MPI-Mainz UV/VIS Spectral Atlas of Gaseous Molecules of Atmospheric Interest,http://satellite.mpic.de/spectral_atlas/
- [43] 広瀬賢一、菅原寛、松野博光、五十嵐龍志、平成 9 年度照明学会第 30 回全国大会.https://www.jstage.jst.go.jp/article/jieij1980/81/Appendix/81_Appendix_244/_pdf
- [44] A. Nepomuk Otte, D. Garcia, T. Nguyen and D. Purushotham, Nucl. Instrum. Meth. A **846**, 106-125 (2017) doi:10.1016/j.nima.2016.09.053 [arXiv:1606.05186 [physics.ins-det]].

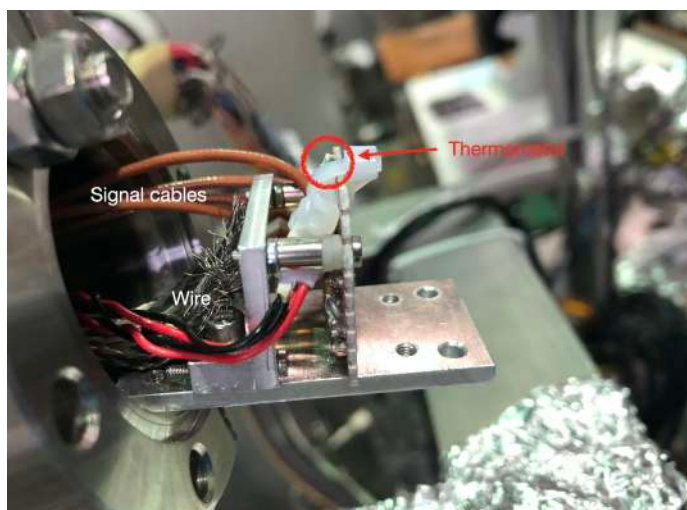


図 7.1: 真空での低温照射セットアップ。この状態では温度計の値は 260 K 程度までしか下がらなかった。

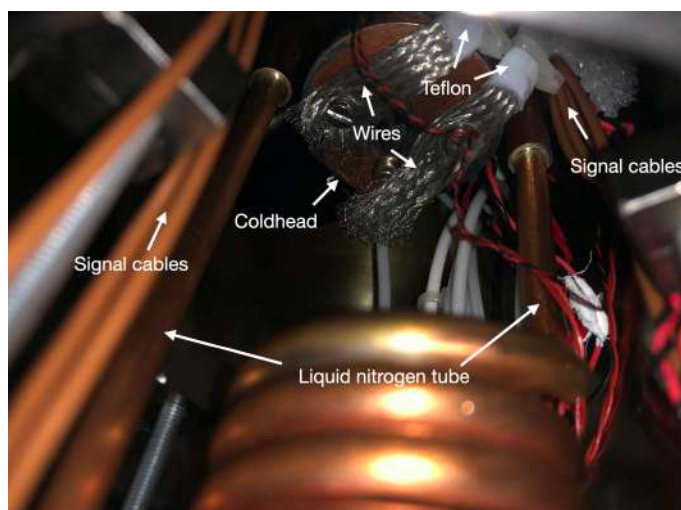


図 7.2: コールドヘッド周辺の様子。赤と黒のツイストケーブルは温度計のに繋がっている。

付録 冷凍機の断熱における工夫

本研究の低温照射試験を行う際に、断熱性のあるセットアップを作るための様々な工夫がなされた。この付録でそれらの紹介をする。ただし、一般的にセットアップの改良は複数箇所を同時に試すため、断熱性が改善されたとしても、どの改善点がクリティカルに効いているかは定かではない。また、定量的な議論ではない点に注意されたい。

真空での断熱

6.3.1 節では真空中で MPPC の温度を下げようとした。結果的にこのセットアップは MPPC の温度を液体キセノンの温度まで下げることは出来なかったが、セットアップの改良によって、ある程度の断熱性の改善を見ることができた。まず、図 7.1 が最初に冷凍試験を行ったセットアップの様子である。図 7.2 のようにコールドヘッドから平編み線 (図では Wire と表記) を通して MPPC の周辺まで低温を伝える。ただし、コールドヘッドとはパルスチューブ型の冷凍機において最も冷やされる部分の名称である。この時の温度計の値では 260 K 程度までしか下がらなかった。平編み線や信号線などが室温に近い温度を持った真空容器に当たっているのが原因であると考えられる。また、温度計は基盤に縛り付けられているだけで MPPC の温度を測定できているかわからない点も問題である。これはグリースなどによって MPPC に直接接触させる方が良い。ケーブルが太いのも問題である。特に温度計用の赤・黒のツイストケーブルは温度計まで直接熱を伝えるため、細いものが好ましい。図 7.4 に示されるように平編み線の数を増やし、それらを断熱材で巻いたところ 240 K 程度まで下がった。真空引きして冷凍機をオンにすると、コールドヘッドの温度は 30 K 程度まで下がっていたため、断熱性に改良を加えれば MPPC 温度を液体キセノン温度 (165 K) まで下げることは不可能ではないと予想できる。具体的な改善の候補としては、平編み線を純粋な銅素材のものに変えること。直接 MPPC にまで接続されている信号線はコールドヘッドに固定することなどが挙げられる。図 7.3 に示されるように信号線を真空容器内部の構造体に固定しているため、その構造体の熱が信号線を通して流入してしまう。これは窒素ガス中では散熱するためあまり問題にはならないが、真空中では大きな熱流入になる。

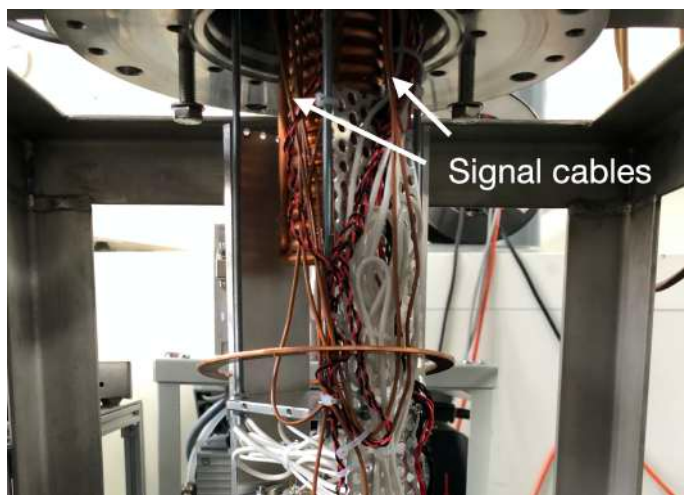


図 7.3: 信号線などが固定されている様子。

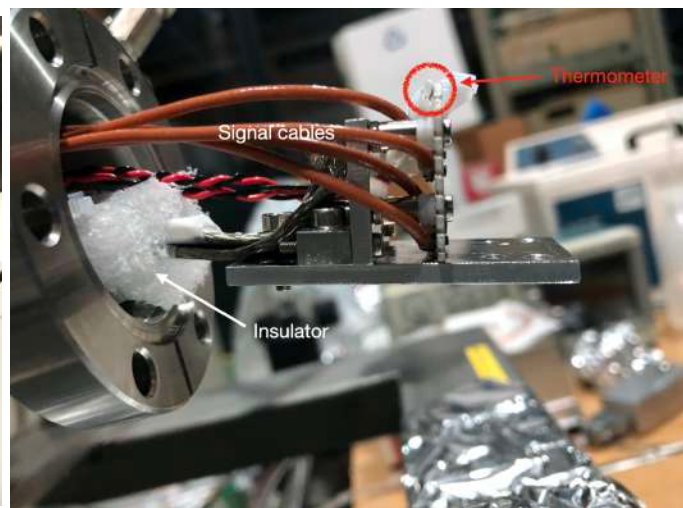


図 7.4: 平編み線を 2 本に増やして、断熱材を増やした。

窒素ガス中での断熱

6.3.2 節と 6.3.3 節では窒素雰囲気中で MPPC の温度を下げようとした。このセットアップでは最終的に液体キセノン温度に到達できたが、当初は断熱性に問題があり、MPPC の温度は 220 K 程度までしか下がらなかった。その時のセットアップの写真が図 7.5 である。コールドヘッドの低温がフィンを通して銅で作られたサポートストラクチャーまで伝わり MPPC を冷やす。この状態でコールドヘッドの温度は 150 K 程度まで冷えていた²。MPPC の温度が下がらなかったのは効率良く低温を伝えることができていなかったためである。また、温度計もサポートストラクチャーに押し付けられているだけなので、正確な温度測定ができていなかったことも考えられる。これを改善するために図 7.6 のように、各接続部分³にグリースを塗った。また、太い信号線を使うと MPPC の低温がケーブルに逃げやすくなり、結果として窒素雰囲気中に低温が奪われてしまう。そのため、信号線は細いもの (図の紫色のケーブル) に変えた。これらの工夫により MPPC の温度は 190 K 程度まで下がった。さらに、図 7.7 と図 7.8 に示すように、コールドヘッドやフィンなどの低温部分の周りをテフロンテープと発泡スチロールで巻くことによってさらに MPPC の温度は下がった。この改良により MPPC の温度は大体液体キセノン温度まで下がった。

さらに、温度計のケーブルを他のケーブルから分離することは重要であった。図 7.9 のような状態だと他のケーブルから温度計に熱が流入し、測定値が実際の MPPC の温度より高くなってしまいう危険がある。そのため、図 7.10 のように温度計のケーブルだけ分離し、さらに温度計のケーブルが窒素雰囲気中に存在する部分を大きくして外部の熱を直接温度計まで届けない工夫が必要である。実際、この図に示すセットアップの例では温度測定値において 20 K 以上の改善が見られた。

² 真空での断熱に比べて温度が高いのは窒素によって低温が奪われたことが理由である。

³ 「コールドヘッドとフィンの間」、「フィンとサポートストラクチャーの間」、「サポートストラクチャーと MPPC の間」の計三箇所。そして、温度計はグリースを介して直接 MPPC に接触させた。

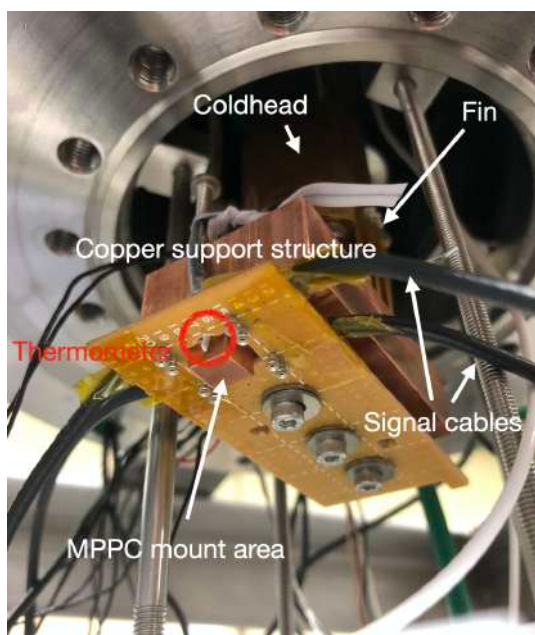


図 7.5: 220 K 程度までしか下がらなかった。

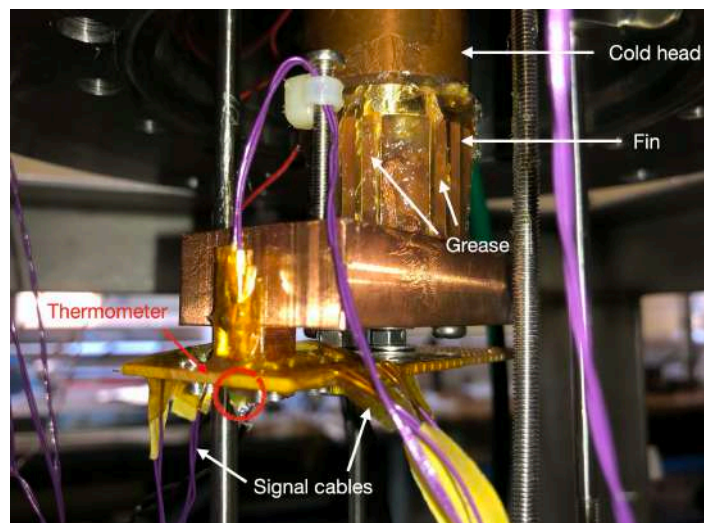


図 7.6: セットアップの改善

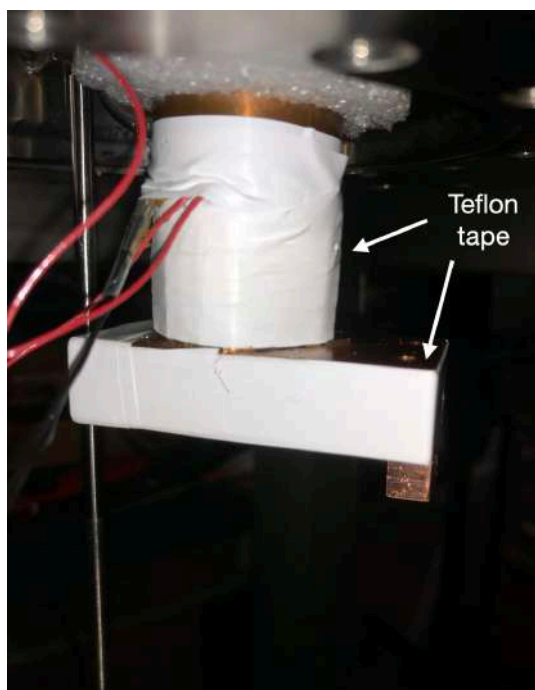


図 7.7: サポートストラクチャーにテフロンテープを巻いた。

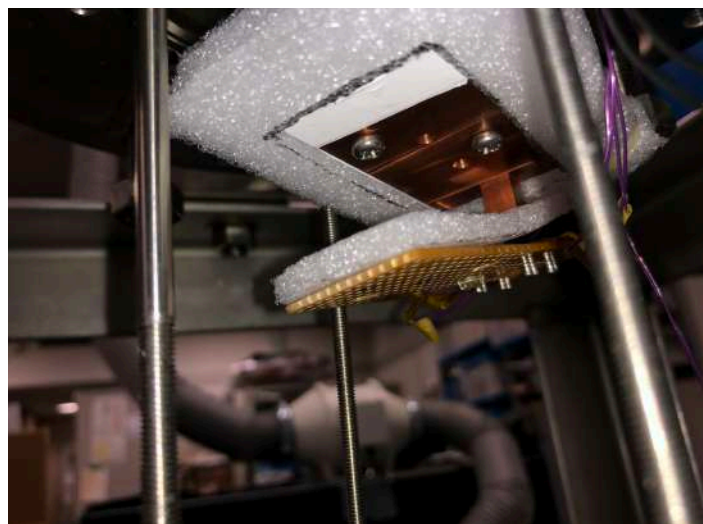


図 7.8: 低温部分の周りに発泡スチロールを巻いた。



図 7.9: 温度計のケーブルは他のケーブルなどに接触している。

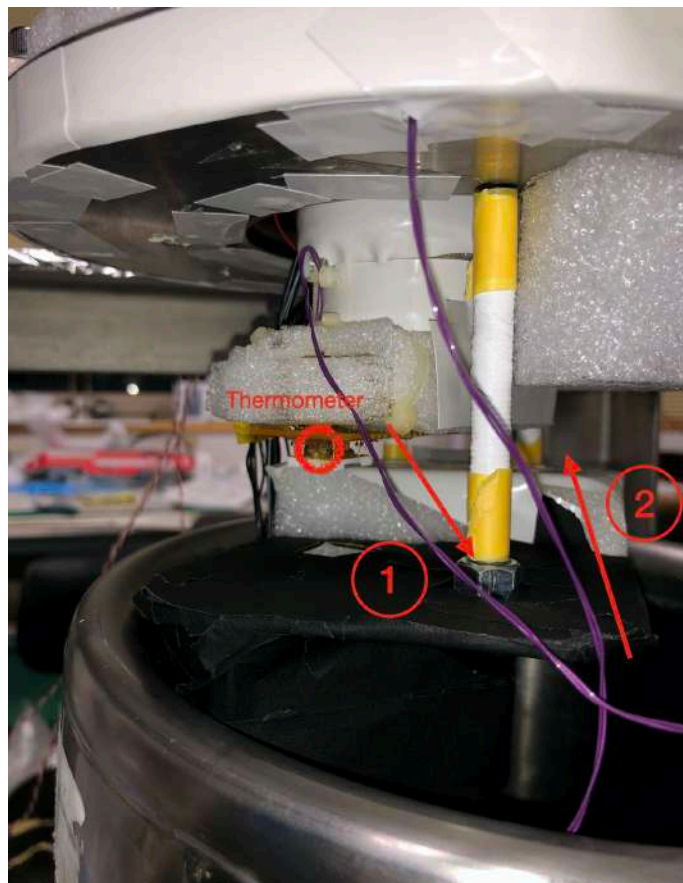


図 7.10: 温度計のケーブルを他のケーブルから分離した。