

令和3年度 修士論文

MEG II 実験液体キセノン γ 線検出器の、大強度ミュオンビーム環境下での VUV-MPPC の光子検出効率の減少、及び検出器の安定性に関する研究

(Research on decrease of photon detection efficiency of VUV-MPPC in MEG II liquid xenon detector and on stable operation of the 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
森研究室

35206107

吉田 圭佑

2022 年 1 月 28 日

概要

MEG II 実験は、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊を世界最高感度で探索し発見することを目指す実験である。前身の MEG 実験から感度を一桁上げるため、全ての検出器の分解能を 2 倍改善することを目標としている。MEG II 実験液体キセノン γ 線検出器では浜松ホトニクス社と新たに開発した光センサーである Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) が導入され、 γ 線のエネルギー、位置の分解能が向上したことがビーム試験で実証された。一方でビーム運転時に MPPC の光子検出効率 (Photon Detection Efficiency, PDE) の低下が確認されている。我々は「PDE 減少の推移」、「減少した PDE の回復方法」、「PDE 減少の原因」を調査しており、本稿では PDE 減少の原因と PDE 減少の推移について調査した結果を報告する。また宇宙線による液体キセノン γ 線検出器のモニターを行った結果についても報告する。PDE 減少の原因としては表面損傷が仮説として立てられ、真空紫外光と γ 線が候補に挙がり、本研究では γ 線について調査を行った。MPPC を常温と低温に保ち、放射線源を照射する実験を行ったが、PDE 減少は確認されなかった。よって PDE 減少の原因は γ 線による表面損傷でない可能性が出てきた。また PDE 減少の推移の調査では、検出器内の MPPC を様々な条件で分けその推移を比較したが、今まで疑っていた PDE 減少の位置依存性以外の結果が得られたため、PDE 減少は真空紫外光や γ 線によって引き起こされたものではない可能性があるという結果となった。宇宙線を用いた検出器のモニターは非常に重要な研究である。他の検出器のモニターに用いられるソースは、ミューオンビーム運転時に同時に設置できない一方、宇宙線はビーム運転による干渉を受けないためである。本研究によりビーム運転時であっても宇宙線データの取得が可能であることが分かり、他のモニターソースと比較しながら宇宙線による検出器のモニターを行うことで、検出器の安定性を常時モニターできるという結果を得た。

目次

第 1 章	序章	3
第 I 部	MEG II 実験の概要	5
第 2 章	MEG II 実験	6
2.1	標準理論と新物理、CLFV 過程	6
2.2	$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊とその探索	8
2.3	MEG 実験	9
2.4	MEG II 実験	10
第 3 章	液体キセノン検出器	16
3.1	アップグレードの概要	16
3.2	真空紫外光に感度のある MPPC の液体キセノン検出器への導入	16
第 II 部	VUV-MPPC の大強度ビーム環境下での光子検出効率の低下の原因 調査に関する研究	23
第 4 章	VUV-MPPC の光子検出効率の低下	24
4.1	PDE のミューオンビーム運転時の減少	24
4.2	減少原因の候補とこれまでの調査	28
第 5 章	放射線源を用いた PDE 減少の実験室での調査	32
5.1	概要	32
5.2	常温の MPPC への照射実験	34
5.3	低温の MPPC への照射実験	38
5.4	結論と今後の展望	41

第 III 部	液体キセノン γ 線検出器の安定性に関する研究	42
第 6 章	α 線による PDE のモニター	43
6.1	概要	43
6.2	MPPC の PDE 測定方法	44
6.3	MPPC の PDE 減少速度の比較	45
6.4	PDE 減少についての考察	50
第 7 章	宇宙線データの解析	52
7.1	宇宙線による液体キセノン γ 線検出器のモニター	52
7.2	ミューオンビーム運転中の液体キセノン検出器における宇宙線のデータの取得	55
7.3	結論	58
付録 A	VUV 光の VUV-MPPC への照射実験の結果	60
付録 B	ME _x 2G 反応探索	63
参考文献		64

$\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊の発見を目指す。

探索感度の向上のため、液体キセノン γ 線検出器では新たに浜松ホトニクス社製の光センサーである Muti-Pixel Photon Counter (MPPC) を導入した。しかしこの光子検出効率 (Photon Detection Efficiency, PDE) のビーム運転時の減少が確認されている。本研究ではこの PDE 減少の原因調査 (5 章) と PDE 減少の推移 (6 章) について調査した結果を報告する。また、液体キセノン検出器の安定運用の研究として宇宙線によるモニター (7 章) を行った結果について報告する。

第 I 部

MEG II 実験の概要

第 2 章

MEG II 実験

2.1 標準理論と新物理、CLFV 過程

素粒子における標準理論は、電弱相互作用 (電磁気力と弱い相互作用) の統一についての説明で非常に成功した理論である。しかし未解決な問題も多く、例えば電弱相互作用と強い相互作用の統一はできておらず、重力に関しては取り扱うこともできていない。

その中で標準理論に変わる新たな理論が多く提唱されている。有力な候補として、超対称大統一理論がある。O (1TeV) の超対称性粒子を仮定すると、電弱相互作用と強い相互作用の結合定数が 10^{16} GeV で非常に一致する。また重力と統一的に扱うものとして、超ひも理論も考えられている。

このような標準理論を超えた物理を探索する方法として、荷電レプトンフレーバー (ファミリー)*1 非保存過程 (Charged Lepton Flavour Violation, CLFV) 探索がある。標準理論において、物質を構成する素粒子はそれぞれ 6 種類のクォークとレプトン (それぞれ 3 種類の荷電レプトンと中性レプトン (ニュートリノ)) に分けられる (図 1.1)。レプトンには 3 つのフレーバーが存在し、レプトンフレーバー数は反応において保存量であると考えられてきた。しかしニュートリノ振動という中性レプトンのフレーバー数を保存しない過程の観測により、レプトンフレーバー数は保存量ではないことが分かった。これにより、荷電レプトンのフレーバー数非保存の反応が存在すると考えられるようになった。

標準理論にニュートリノ振動を考慮した場合の CLFV 反応の崩壊分岐比は非常に小さく、例えば $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊では、

$$Br(\mu \rightarrow e\gamma) = \frac{3\alpha}{32\pi} \left| \sum_{i=2,3} U_{\mu i}^* U_{ei} \frac{\Delta m_{i1}^2}{M_W^2} \right|^2 \simeq 10^{-54} \quad (2.1)$$

となる。ここで、U は Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (PMNS) 行列、 Δm_{ij}^2 はニュートリノの質量固有状態の質量二乗差である。よって、現在の素粒子実験の測定器の技術で測定できる値

*1 近年ではフレーバーが使用されることが殆どだが、ファミリーでも正しい。フレーバーはクォークモデルが提唱された当初、アップ、ダウン、ストレンジの区別のために用いられていた量子数である。しかしチャーム、ボトム、トップが発見されて以降、量子数ではなくクォーク、レプトンの種類を区別するために用いられるようになった。

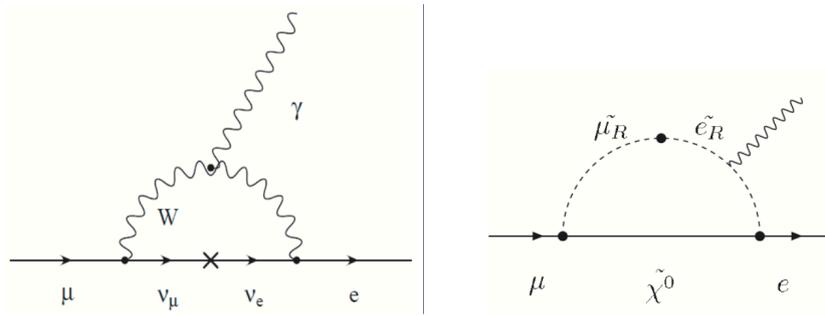


図 2.1 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊のダイアグラム。左は標準理論 + ニュートリノ振動、右は標準理論を超える物理でのもの。[13]

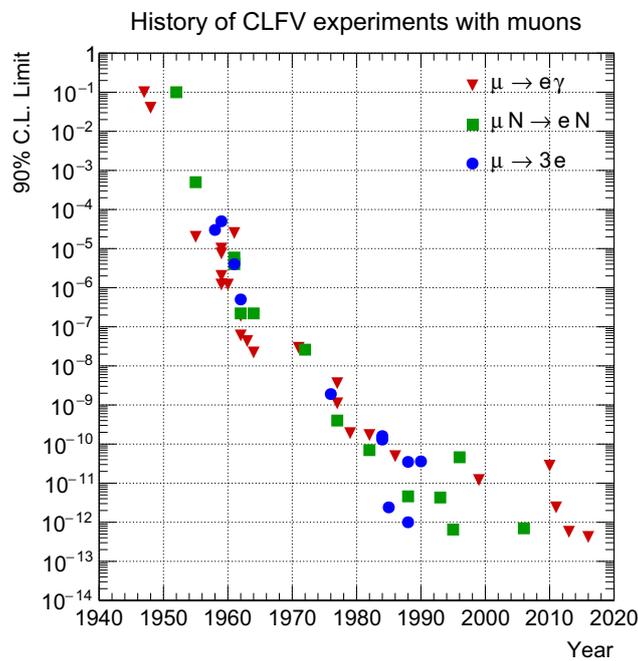


図 2.2 レプトンフレーバー非保存過程の探索の現状。[19]

ではない。

一方、標準理論を超える物理である超対称大統一理論において、例えば $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊 (図 2.1) では、重い新粒子を仮想粒子として介すことで、 10^{-12} – 10^{-14} という観測可能な崩壊分岐比で CLFV 反応が起こることを予言している [2],[3],[4],[5],[6],[7],[8],[9]。CLFV 反応の探索は今日まで様々な過程について行われ、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊については MEG 実験が $\text{Br}(\mu \rightarrow e\gamma) \leq 4.2 \times 10^{-13}$ (90% C.L.) [10]、 $\mu \rightarrow e$ 転換については SINDRUM-II 実験が $\text{Br}(\mu N \rightarrow e N) \leq 7.0 \times 10^{-13}$ (90% C.L.) [11]、 $\mu \rightarrow 3e$ 崩壊については SINDRUM 実験が $\text{Br}(\mu \rightarrow 3e) \leq 1 \times 10^{-12}$ [12] という制限を得ている (図 2.2)。

2.2 $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊とその探索

$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊は、上で述べた CLFV 反応の一つであり、未だこの反応は観測されていない。この反応は二体崩壊であり、放出される陽電子 e^+ と γ 線の大きな特徴は、

- 陽電子、 γ 線のエネルギーは共に 52.8 MeV(=ミューオンの静止質量の半分)。
- 陽電子、 γ 線はそれぞれ反対方向に同時に放出される。

である。従って、 180° で放出される 52.8 MeV の γ 線と陽電子を信号事象として同定することができる。

ミューオンではなく反ミューオンを用いる ($\mu^- \rightarrow e^- \gamma$ 崩壊を探索しない) 理由は、ミューオンが停止するターゲット内において原子核に捕らえられミューオニック原子を生成してしまうためである。

反ミューオンを用いる $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊探索における主な背景事象は 2 種類存在する。1 つ目は $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \gamma$ 崩壊 (Radiative Muon Decay (RMD)) である。RMD は以下に述べる偶発的背景事象数に比べて主要ではなく、また二体崩壊ではないため陽電子、 γ 線のエネルギーと放出角度を十分な精度で測定できれば信号事象との区別が可能である。これに対し、2 つ目として陽電子と γ 線が異なる起源でありながら、同時に検出されることで偶然信号事象のように検出されてしまうような偶発的背景事象があり、こちらの方が信号探索の背景事象として支配的となる。偶発的背景事象を引き起こすエネルギー 52.8 MeV 付近の陽電子は、ミューオンの Michel 崩壊 $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$ に由来する。エネルギー 52.8 MeV 付近の γ 線については、RMD に起因するものの他に、陽電子と物質中の電子が対消滅をする際に発生する γ 線が原因となる Annihilation In Flight (AIF) という事象もある (図 2.3)。

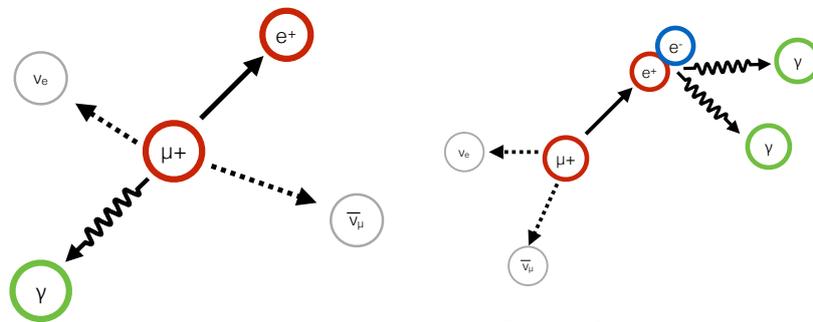


図 2.3 $\mu \rightarrow e \gamma$ 崩壊での主な背景事象の起源。左が RMD、右が AIF である。[14]

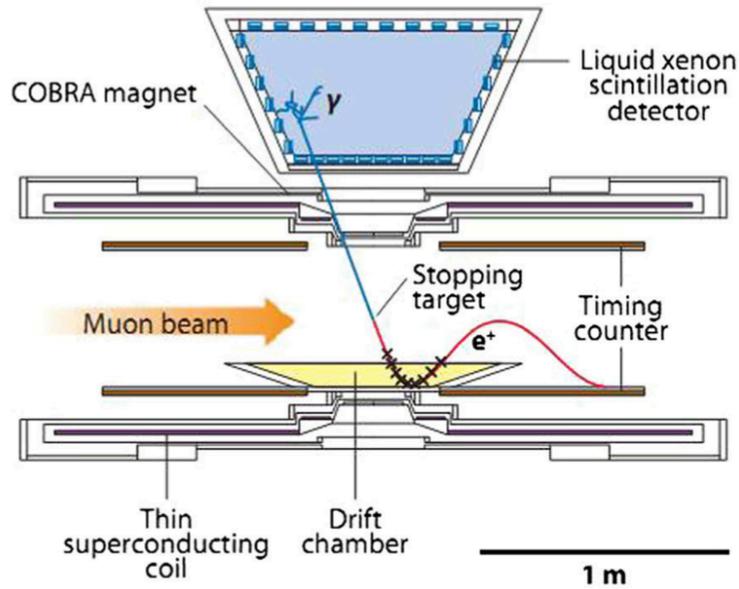


図 2.4 MEG 実験の検出器の全体 [19]。同時に反対方向に放出された γ 線と陽電子をそれぞれ液体キセノン検出器と陽電子検出器で検出する。

偶発的背景事象の数 N_{acc} は、検出器の分解能と次の関係を持っている。

$$N_{\text{acc}} \propto R_{\mu}^2 \times \Delta E_{\gamma}^2 \times \Delta P_e \times \Delta \Theta_{e\gamma}^2 \times \Delta t_{e\gamma} \times T \quad (2.2)$$

R_{μ} はミューオンビームレート、 ΔE_{γ} は γ 線のエネルギー分解能、 ΔP_e は陽電子の運動量分解能、 $\Delta \Theta_{e\gamma}$ は角度分解能、 $\Delta t_{e\gamma}$ は時間分解能、 T は測定時間である。パルスビームの場合、 R_{μ} の値が時間変動するため、瞬間的に R_{μ} が大きくなり、背景事象数が直流ビームの場合よりも多くなる。そのため $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊探索は直流ミューオンビームの使用が望ましい。

以上から、 $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊探索のための検出器は次の性質があることが重要である。

- 大強度ミューオンビームと、そのビームレートを活かせる性能のある検出器。
- 信号に対し偶発的背景事象を十分抑えられるエネルギー、反応位置、時間分解能のある検出器。

2.3 MEG 実験

MEG 実験 (図 2.4) は 2009 年から 2013 年にかけてスイス Paul Sherrer Institute (PSI) にて行われた。陽電子の検出は超伝導磁石、ドリフトチェンバー、タイミングカウンターからなる陽電子検出器、 γ 線の検出は液体キセノン γ 線検出器を用いて行われた。結果としては $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊の発見には至らず、現在の $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊の上限値である $\text{Br}(\mu \rightarrow e\gamma) \leq 4.2 \times 10^{-13}$ (90% C.L.) の制限を得た [10]。

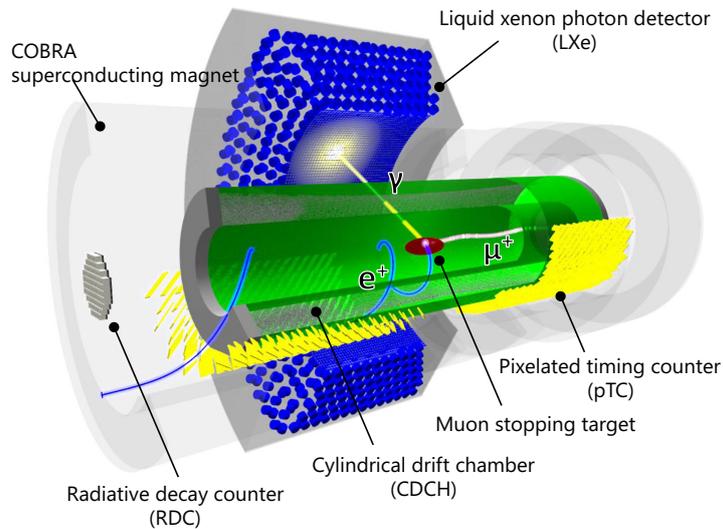


図 2.5 MEG II 実験の検出器の全体。陽電子をドリフトチェンバーと新たに導入されたタイミングカウンター、 γ 線を液体キセノン検出器で検出する。[19]

2.4 MEG II 実験

MEG II 実験は、上記の MEG 実験から検出器のコンセプトなどを継承した上で、それらをアップグレードし探索感度を一桁上げることを目指す。MEG II 実験の検出器の概略図を図 2.5 に示す。MEG 実験では、ビーム強度の二乗に比例する偶発的背景事象に対し検出器の性能が不十分であったため、ビームレートを $3 \times 10^7 \mu^+/\text{s}$ に下げざるを得なかった。MEG II 実験では以下で述べる MEG 実験からの各検出器のアップグレードにより、2 倍以上ビームレートを上げた $7 \times 10^7 \mu^+/\text{s}$ でのデータ取得を行い高統計を目指す。

2.4.1 ターゲット

ターゲットは、ターゲットで崩壊した粒子の多重散乱を抑えるため、以下の 2 通りが提案されている。

- 厚さ $130 \mu\text{m}$ のポリビニルトルエン (PVT) : PVT はシンチレーション光を発するため、その発光の観測によりビーム位置を知ることができ、更にターゲット自身の位置や変形のモニターが可能となる。
- 厚さ $140 \mu\text{m}$ のポリエチレン。

更に、ターゲット上にマーカーが施されており、これをカメラでモニターすることで、MEG 実験で問題となったターゲットの変形による崩壊点の位置及び陽電子の角度不定性を削減する。また、



図 2.6 MEG II 実験での静止ターゲット [19]。位置評価用のマーカーが施されている。

生成された陽電子と γ 線を相互作用させないように検出器方向の厚さを薄くしつつ、ビーム軸方向の厚みを確保しより多くの μ^+ を静止させるため、ビーム軸に対し 15° 傾けて設置されている。

2.4.2 陽電子検出器

■**COBRA** COntant Bending RAdius (COBRA) 磁石は超伝導磁石であり、陽電子の放出方向に関わらず同じ運動量の陽電子は近い半径で回転するような特殊な勾配磁場をかけることが可能である。これにより信号領域の高エネルギー陽電子のみを選択して測定することができ、陽電子検出器のヒットレートを抑えることができる。また、中心から離れるほど磁場が弱くなるため、陽電子を素早く COBRA 外に掃き出すことでヒットレートを抑え、効率よく測定することが可能である。

■**ドリフトチェンバー** MEG II 実験のドリフトチェンバーは全長 1.91 m の単体の円筒にタンゲステン、アルミニウム製のワイヤーが貼られた構造である (図 2.7)。これは MEG 実験では分割型のものを使用したが、それぞれのモジュールなどで陽電子が散乱し、陽電子の飛跡測定性能を下げてしまったためである。また全長が伸びたことで、後段のタイミングカウンターの直前までトラッキングが可能となり、タイミングカウンターとの粒子のマッチングの効率が向上する。更に、内部を満たす物質として、軽いガスである He: Isobutane = 9:1 の混合ガスを用いることで物質量を削減する。

■**陽電子タイミングカウンター** MEG II 実験でのタイミングカウンターは、細分化されたシンチレーションカウンターを上流側と下流側にそれぞれ 256 個、計 512 個設置する (図 2.8)。一つのシンチレーターは縦 40, 50 mm、横 120 mm、厚さ 5 mm で、直列接続された Silicon Photo Multiplier (SiPM) で信号の読み出しを行う。細分化されたことによる利点は、信号となる陽電子が平均 9 個あたりのカウンターにヒットするようになり、時間分解能 35 ps 程度を達成できることや、ビームレートが増加してもシンチレーターあたりのヒット数を抑えることができることである。

2.4.3 液体キセノン検出器

液体キセノン γ 線検出器 (以下液体キセノン検出器と記す。図 2.9, 2.10) は γ 線のエネルギー、位置、反応時間を測定する。真空断熱容器に 900 L の液体キセノンがシンチレータとして満たされている。液体キセノンを用いる利点としては、

- 原子番号が大きく、高密度による高い阻止能を持つ。
- 発光量が多い。
- 液体なので均一性が高い。

がある。一方、欠点もあり、

- シンチレーション光の波長が真空紫外領域にある (175 nm) (図 2.11)[16]。
- 高純度 (光量を落とさず一定にするため)、低温 (165 K) の状態で維持する必要がある。
- 高価である。

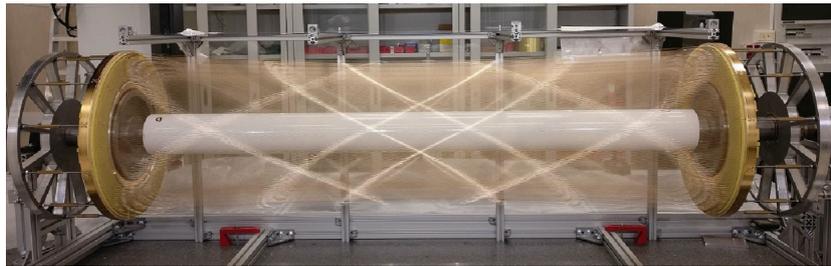


図 2.7 MEG II 実験のドリフトチェンバー。[19]

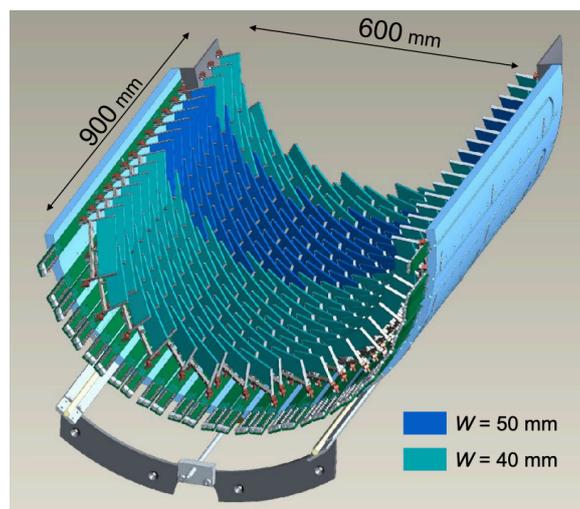


図 2.8 ビーム下流側の MEG II 実験のタイミングカウンター。横幅 40 mm と 50 mm のものがある。[19]

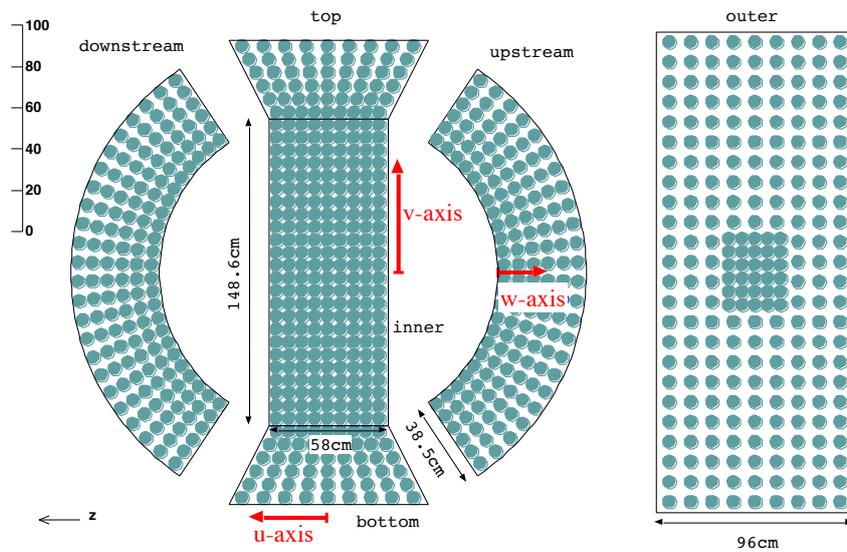


図 2.9 液体キセノン検出器の PMT の配置と座標軸の定義。図は MEG 実験のものであり、MEG II 実験では inner 面は MPPC に置き換わっている。検出器内の座標軸として u, v, w が定義されている。[10]

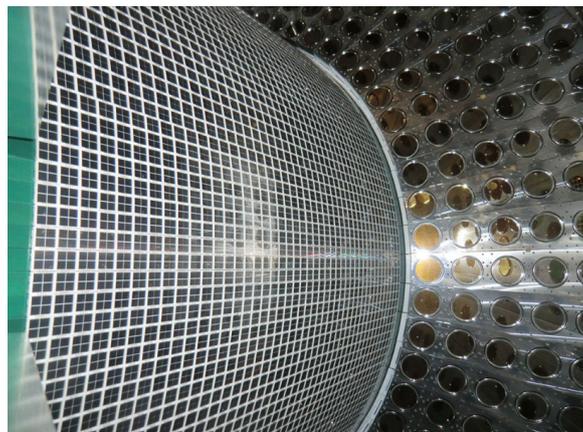


図 2.10 MEG II 実験の液体キセノン検出器内部。 γ 線の入射面の PMT が MPPC に置き換えられた。[19]

が挙げられる。

真空紫外領域のシンチレーション光を検出するため、PMT 及び SiPM を用いる。PMT は浜松ホトニクス社と共同で開発された [[17]]。この PMT は液体キセノン中で動作可能であり、液体キセノン中のシンチレーション光に対し感度を持つ。また、 γ 線入射面には 4092 個の浜松ホトニクス社製の MPPC を用いる (図 2.10)。MPPC 一つの大きさは $15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ であり、直径 2 インチの PMT に比べて小型である。この小型の MPPC を隙間なく入射面に敷き詰めることで、高精細な読み出しが可能となる。詳細は 3 章で述べる。

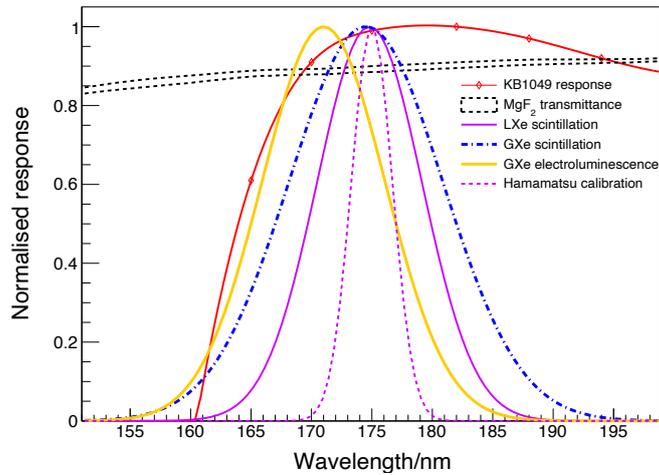


図 2.11 液体キセノンのシンチレーション光の波長スペクトル。紫が液体キセノン中での波長スペクトルである。[15]

2.4.4 輻射崩壊同定用カウンター

輻射崩壊同定用カウンター (Radiative Decay Counter, RDC) は 2.2 章で述べた RMD による γ 線バックグラウンドの削減を目的に MEG II 実験で新たに導入される検出器である。RMD において γ 線と同時に放出される陽電子を検出し、RMD による偶発的背景事象を減らす。RMD による高エネルギー γ 線がバックグラウンドになる場合に同時に放出される陽電子は、低エネルギー (2 ~ 5 MeV) になるため、COBRA の磁場のよる半径が小さく際にビーム軸近くを通る。そこでビーム上流、下流のビームライン上に一つずつ検出器を設置する。

下流側の検出器に関しては既に設置が完了していて、時間測定用のプラスチックシンチレーター 12 本と、エネルギー測定用の LYSO 結晶 76 個からなる (図 2.12)。上流側の検出器についてはビームが通過するため、ビームに影響を与えないように低物質量化されたガス検出器 RPC の開発が進められている。

2.4.5 DAQ

データ取得には DRS (Domino Ring Sampling chip)[[18]] という高速波形デジタイザーが用いられる。トリガーがかかるとその時点での波形情報を保持し、シフトレジスターにより順に読み出される。サンプリング周波数は 0.5 GHz-5 GHz が設定可能である。

2.4.6 アップグレードの現状と、期待される性能

以上の検出器のアップグレードによる MEG II 実験の期待される性能を以下に示す(表 2.1)。これにより MEG II 実験は最終的に $6 \times 10^{-14} * 2$ の感度を達成する見込みである。

2021 年現在、上流側 RDC 以外の検出器の建設及び検出器の全チャンネルでの DAQ 取得の準備が完了し、2021 年夏から全チャンネルでのビームデータの取得を開始している。上流側 RDC は 2023 年の物理データ取得までの建設完了を予定している。

表 2.1 MEG II 実験の期待される性能 [19]

分解能	MEG	MEG II
E_{e^+} (陽電子のエネルギー) [keV]	380	130
$\theta_{e^+} / \phi_{e^+}$ (陽電子の放出角度) [mrad]	9.4/8.7	5.3/3.7
z_{e^+} / y_{e^+} (陽電子生成位置) [mm]	2.4/1.2	1.6/0.7
E_γ (γ 線のエネルギー) [%]	2.4/1.7	1.1/1.0
$u_\gamma / v_\gamma / w_\gamma$ (γ 線の位置、図 2.9 参照) [mm]	5/5/6	2.6/2.2/5
$t_{e^+\gamma}$ (γ 線と陽電子の時間差) [ps]	122	84
検出効率 [%]	MEG	MEG II
γ 線	63	69
陽電子	30	70

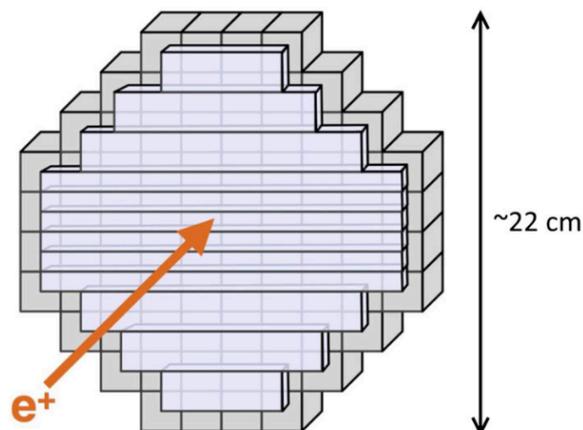


図 2.12 輻射崩壊同定用カウンターの構造。手前はシンチレーター部分、奥が LYSO 部分である。[19]

*2 上流側 RDC による改善は含まれていない

第 3 章

液体キセノン検出器

3.1 アップグレードの概要

MEG 実験の液体キセノン検出器は、液体キセノン中で γ 線が反応した際に発生するシンチレーション光を検出するために PMT が用いられていた。 γ 線入射面にはなるべく密になるように 216 個の PMT が敷き詰められたが、光電面の直径が 46 mm に対し PMT 同士の中心間距離は 62 mm であった。これにより入射面の PMT の真上で反応したイベントと、PMT 間で反応したイベントで収集光量に大きな差が生まれ、結果検出器の位置、エネルギー分解能を制限してしまった (図 3.1)。

MEG II 実験では、 γ 線入射面の PMT を浜松ホトニクス社製の Silicon Photo-Multiplier (SiPM) である MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) に置き換えた。この MPPC は 15 mm \times 15 mm の小型で四角く、隙間なく敷き詰めることでシンチレーション光の様な読み出しが可能となり、分解能が向上する。また小型であることで繊細な読み出しが可能となり、接近したパイルアップイベントの分離も可能となった。

側面の PMT については、 γ 線の入射面がビーム軸方向に 10% ずつ広げられた。これにより側面付近に入射する γ 線の事象での電磁シャワーの漏れ出しによる分解能低下を改善する。また側面の PMT の光電面が同一平面上にあるように向きが変更された (図 3.2)。これにより、MEG 実験において PMT の影によりシンチレーション光の集光率が低下する問題が解決された。

3.2 真空紫外光に感度のある MPPC の液体キセノン検出器への導入

液体キセノン検出器に入射した γ 線によるシンチレーション光は波長 175 nm の真空紫外光 (Vacuum ultraviolet light: VUV) であり、一般の SiPM ではこの短い波長の光に対して感度を持たない。そのため MEG II 実験では新たに VUV に感度のある MPPC を浜松ホトニクスと共同で開発した。以下では SiPM の動作原理を述べた後、開発された MPPC (VUV-MPPC) について述べる。

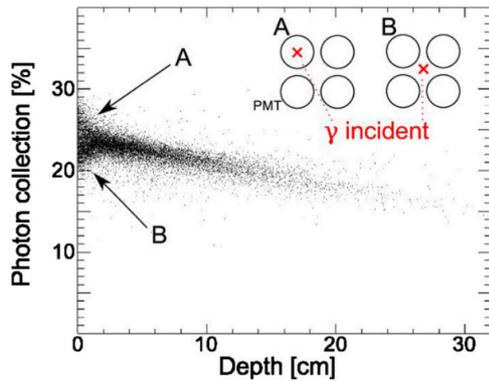


図 3.1 光の収集効率の検出器の深さ依存性。検出器の浅い領域でのイベントでは収集効率が大きく幅を持つことがわかる。[19]

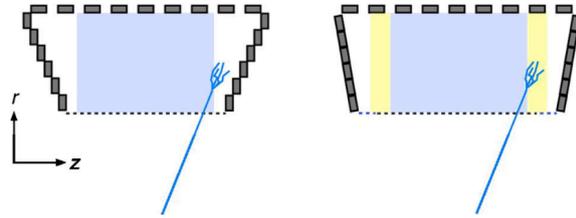


図 3.2 PMT の配置の変更。入射面が広げられ(黄色部分)、側面 PMT の光電面を同一平面上に揃えることでシンチレーション光による影を削減できるようになった。[19]

3.2.1 MPPC の動作原理と特徴

SiPM は複数の Avalanche Photo Diode (APD) からなる検出器である。APD において PN 接合に逆電圧を印加することで空乏層ができ、入射した光子から電子・正孔対が生成される。生成された電子・正孔対は電場によって加速され、シリコン結晶格子と衝突し新たな電子・正孔対を生成する。この過程を繰り返すことで電子・正孔対は連鎖的に増加する(アバランシェ増倍、図 3.3)。印加電圧が降伏電圧という値を超えると、入射光量に関係なく一定値を出力するようになる。この状態で動作させることをガイガーモードという。

MPPC はこのガイガーモードの APD を並列接続し Multi-pixel 化したものである。ガイガー

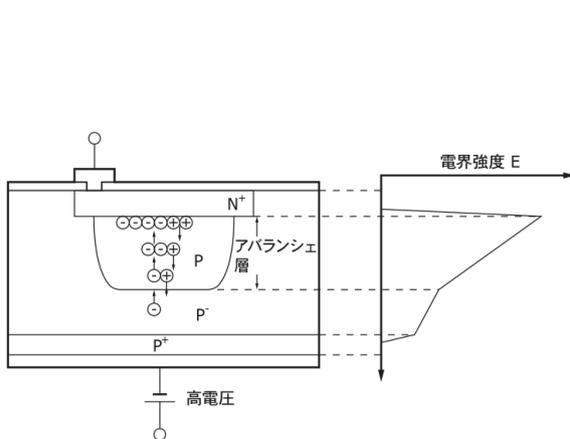


図 3.3 アバランシェ増倍の仕組み。[20]

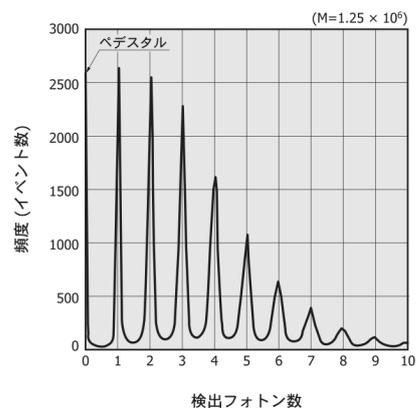


図 3.4 MPPC のパルス波高の検出。入射光子数に応じて離散的になる。[20]

モードでは、各ピクセルで一定の値を出力するため、入射光子数に対し十分なピクセル数の場合、各ピクセルの出力の合計は光子数に比例する。そのため光子数の計測が可能となる(図 3.4)。また、一度光子を検出した後に素早く次の光子を検出できるように、クエンチング抵抗が各 APD のピクセルに直列に接続されている。これにより空乏層に溜まった電荷が信号電流として流れた際に電圧降下が起こり、増倍が停止することで次の光子の検出に素早く備えることができる。

以下に MPPC の特徴を列挙する。

- 小型で PMT と同程度の増倍率 ($10^6 - 10^7$)。
- 入射光子数の検出が可能。
- 磁場中で動作が可能。
- 動作電圧が PMT と比べて小さい: O(10 V)

一方、MPPC の実験への運用にはいくつか気を付ける点がある。

■**ダークノイズ** 入射光子と関係ない、空乏層で熱的に発生した電子・正孔対も 1 光子相当の信号を発生させることがある。これをダークノイズという。ダークノイズのレートは温度の低下とともに減少する。液体キセノン (165 K) 内に置かれる MPPC は低温に保たれるため、この影響は無視できる。

■**クロストーク** アバランシェ増倍の過程で発生した二次光子が別のピクセル(主に隣接したピクセル)で検出されることがある。これをクロストークという。クロストークは実際に入射した光子数を多く見積もる原因となる。クロストークは温度依存性は殆どないが、増倍率が大きいほど、つまり印加電圧が大きいほど発生しやすくなる。

■**アフターパルス** アバランシェ増倍の過程で、結晶欠陥に電子・正孔対が捕獲され、遅れて増倍されることで発生するパルスをアフターパルスという。この事象も増倍率が大きいほど発生しやすくなる。

■**サチレーション** ガイガーモードでの使用により、MPPC の各ピクセルが出力する値は、入射光子数に関係なく同じ大きさである。従って、各ピクセルに 2 光子以上入射すると、MPPC の検出光子数を過小評価することになる。このような現象はピクセル数に対し入射光子数が同程度以上になると起こり得る(図 3.5)。

液体キセノン検出器で用いられる MPPC は、1 つの素子は 57600 個のピクセルからなる。シミュレーションでは、MEG II 実験液体キセノン検出器内のターゲット側で γ 線が検出されるイベント(浅いイベント、1 cm 以下)では、検出される光電子数は 12000 個程度と見積もられているが、これは MPPC 1 つの総ピクセル数の約 20 %であり、大きな影響とはならないと考えられる。

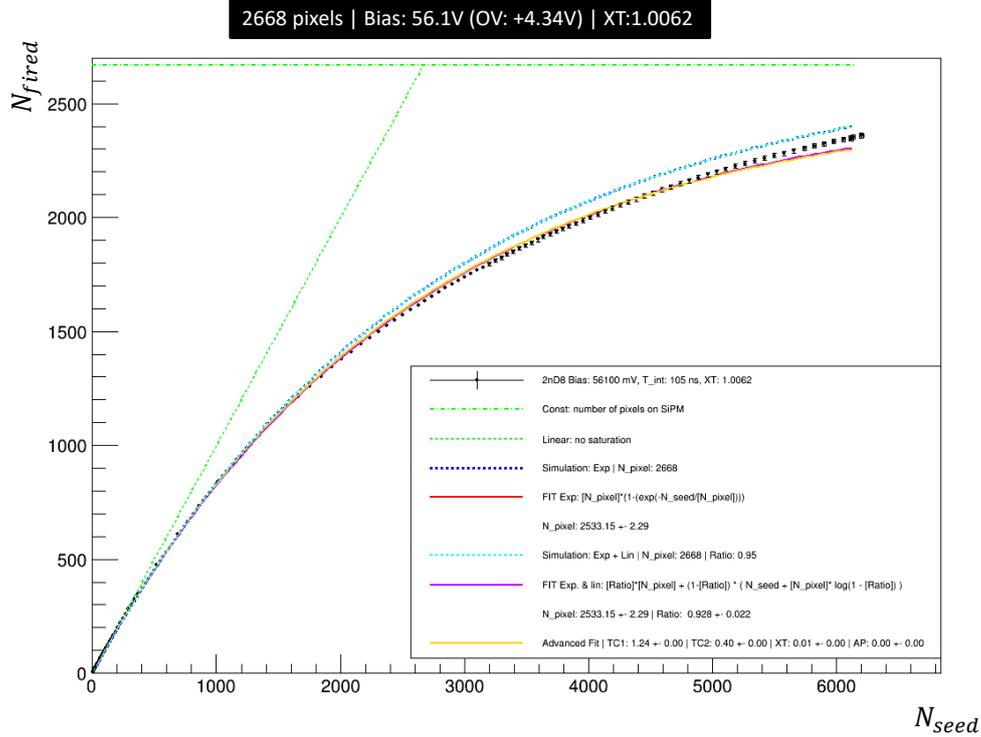


図 3.5 MPPC への入射光子数と検出光子数の関係。黒のプロットが測定結果であり、他は理論モデルのフィッティングである。入射光子数が増加するにつれ、検出光子数との関係が線形でなくなっている。[21]

MPPC のゲイン M は

$$M = \frac{Q}{q} = \frac{C \times (V_R - V_{BR})}{q} \quad (3.1)$$

と書ける。 Q は 1 ピクセルが 1 光子を検出した時に発生したパルスの電荷量、 q は 1 電子の電荷量 (1.6×10^{-19} C)、 C は 1 ピクセルの電気容量、 V_R と V_{BR} はそれぞれ印加電圧と降伏電圧である。よって式 3.1 より印加電圧と降伏電圧の差が大きいほどゲインは高くなる。また光子検出効率 (Photon Detection Efficiency, PDE) は、MPPC の受光面に対する有感領域の面積比 ϵ 、量子効率 QE、アバランシェ確率 P を用いて

$$PDE = \epsilon \times QE \times P \quad (3.2)$$

と書ける。アバランシェ確率は印加電圧が高いほど増大するため、それに伴い PDE も高くなる。その一方印加電圧の増大とともに、上に述べたクロストークやアフターパルスが多くなってしまふ。このため MPPC の動作電圧は、これらを考慮した最適な値となる。

3.2.2 真空紫外光に感度のある MPPC の開発

MEG II 実験液体キセノン検出器に MPPC を用いる場合、以下のような要求がある。

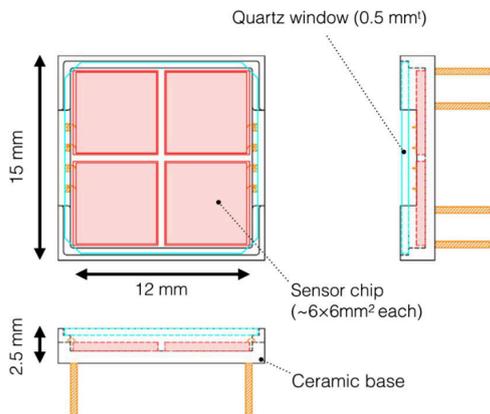


図 3.6 VUV-MPPC の設計。センサーチップ 4 つからなり、クォーツが取り付けられている。[19]



図 3.7 VUV-MPPC と PMT。γ 線入射面に PMT を使っていた頃と比べて細密な読み出しができるようになった。

- 真空紫外光 (波長 175 nm) に十分な感度がある。
- 液体キセノン内の低温環境下 (165 K) で動作が可能である。
- 読み出しチャンネル数を少なくするために、1 つの MPPC で広い範囲 ($10 \times 10 \text{ mm}^2$ 程度) の読み出しが可能である。

一般の MPPC は真空紫外光への感度はなく、大きさも小さいため ($3 \times 3 \text{ mm}^2$ 程度)、上の要求を満たす MPPC はなかった。そこで浜松ホトニクス社と共同で上の要求を満たす MPPC (VUV-MPPC) が新たに開発された [22]。パッケージの大きさは $15 \times 15 \text{ mm}^2$ であり、 $6 \times 6 \text{ mm}^2$ のチップが 4 つ並んでいる (図 3.6)。液体キセノン検出器に用いられている PMT と比較した写真を図 3.7 に載せる。

一般の MPPC では、波長の短い光は受光面の保護層やシリコン結晶中で減衰され、有感領域まで到達できず検出が困難であった。そこで保護層を取り払うことや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処理により、真空紫外光の検出を可能にした (図 3.8)。また保護層の代わりとしてクォーツを取り付けているが、このクォーツと受光面の間に液体キセノンが満たされる隙間が作られた。これにより、クォーツと液体キセノンは屈折率が近いことから、境界面での入射光の反射を抑えることができる。

MPPC の大型化に関しては、単純な大型化ではキャパシタンスが増加し、波形の時定数が増加し時間分解能とパイルアップ耐性を制限してしまう。そこで $6 \times 6 \text{ mm}^2$ の MPPC を 4 つ直列接続し、この増加を抑える。しかし単純な直列接続では MPPC への必要な印加電圧が大きくなってしまう。そこでハイブリッド接続という接続を採用した (図 3.9)。この接続は、信号は直列に読み出す一方、各チップへの印加電圧は並列接続となり印加電圧の増加を抑えることができる。但し全てのチップに同じ電圧がかかるため、4 つのチップの降伏電圧が揃っている必要がある。

MPPC は Print Circuit Board (PCB) と呼ばれる基板に付けられる。1 枚の PCB に 22 個の

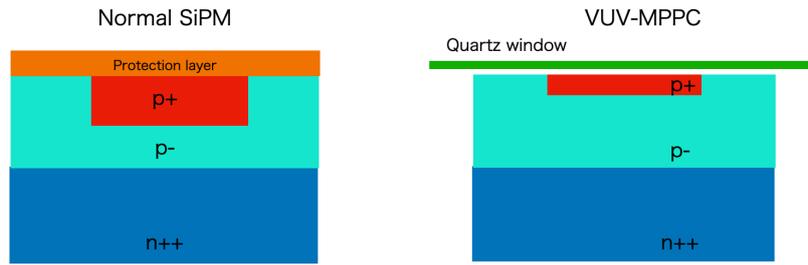


図 3.8 VUVMPPC の構造。短波長の入射光子も有感領域に届くようになり検出が可能となる。

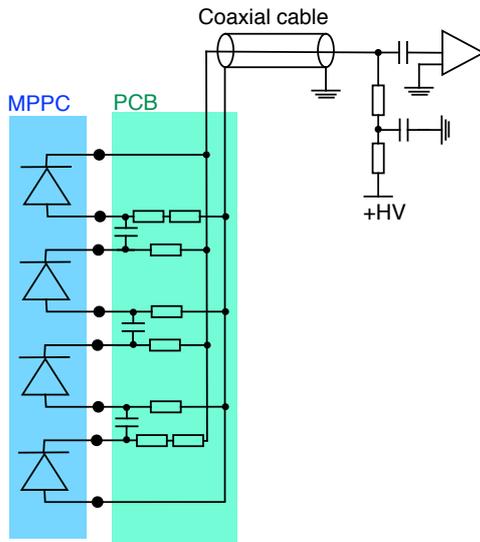


図 3.9 ハイブリッド接続の設計。青枠は MPPC、緑の枠は MPPC が設置されている PCB を表す。信号はコンデンサを通り直列に読み出され、印加電圧は抵抗を通り並列にかかる。[13]

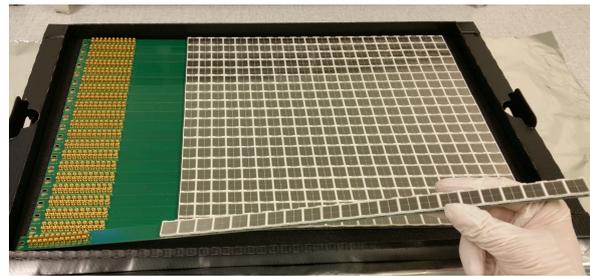


図 3.10 PCB に付けられた VUV-MPPC。一列に 22 個乗せられている。

MPPC が一列に付けられ(図 3.10)、その PCB が 186 個用いられ、総計 4092 個の MPPC が導入された。

3.2.3 運用の現状

2017 年に MEG II 実験液体キセノン検出器は、実験エリアへの設置が完了しており、2017 年から一部の MPPC 及び PMT を信号の読み出しに用いたコミッショニングランを開始した。2021 年より、全ての MPPC 及び PMT での信号の読み出しを開始している(図 3.11)。

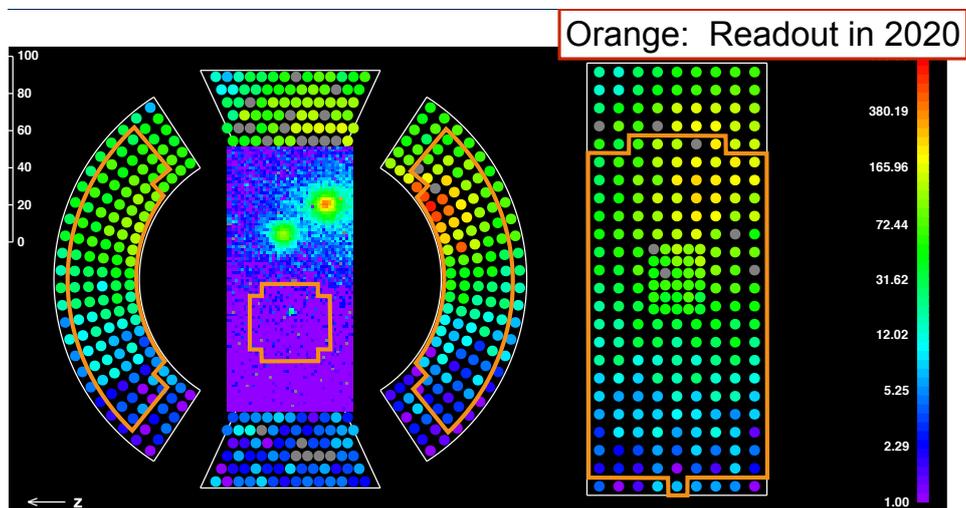


図 3.11 全 MPPC 及び PMT での γ 線イベント。オレンジの領域は 2020 年に読み出しに使用された範囲。灰色の素子は dead channel である。[23]

第II部

VUV-MPPCの大強度ビーム環境下での 光子検出効率の低下の原因調査に関する研究

第 4 章

VUV-MPPC の光子検出効率の低下

前章で述べたように、MEG II 実験液体キセノン検出器では、 γ 線の入射面に VUV-MPPC 4092 個を敷き詰めるアップグレードを行った。しかし、この検出器内の VUV-MPPC の光子検出効率 (PDE) がビーム運転時に減少するという問題が観測されている。この問題は MEG II 実験において非常に重要な問題である。

本章では、まず VUV-MPPC の光子検出効率 (PDE) の減少について述べ、減少の原因として考えられる候補と過去の調査結果について触れる。

4.1 PDE のミュオンビーム運転時の減少

4.1.1 液体キセノン検出器での PDE の測定方法

液体キセノン検出器内には MPPC と PMT のキャリブレーションに使用するため、 α 線源として ^{241}Am が取り付けられたワイヤ (図 4.1) と LED (図 4.2) が設置されている。

まず液体キセノン検出器内の MPPC の PDE 測定の方法を述べる。PDE は、MPPC に入射した光子数 N_{int} と MPPC が検出した光電子数 N_{det} を用いて、

$$PDE = \frac{N_{\text{det}}}{N_{\text{int}}} \quad (4.1)$$

と定義される。

N_{det} は信号と 1 光電子の信号電荷をそれぞれ $Q_{\text{signal}}, Q_{1\text{p.e.}}$ として

$$N_{\text{det}} = \frac{Q_{\text{signal}}}{Q_{1\text{p.e.}} \times ECF} \quad (4.2)$$

から求められる。ここで ECF (Excess Charge Factor) は、3 章で述べた MPPC のクロストークやアフターパルスなどによる N_{det} の過大評価を較正するための係数である。ECF は MPPC に入射する光量分布から次のように求められる。クロストークやアフターパルスがないと仮定した場合、検出される光電子数は Poisson 分布に従う。即ち、 $N_{\text{det}} = n$ となる確率を $P(n)$ とすると、

$$P(n) = \frac{\lambda^n e^{-\lambda}}{n!} \quad (4.3)$$

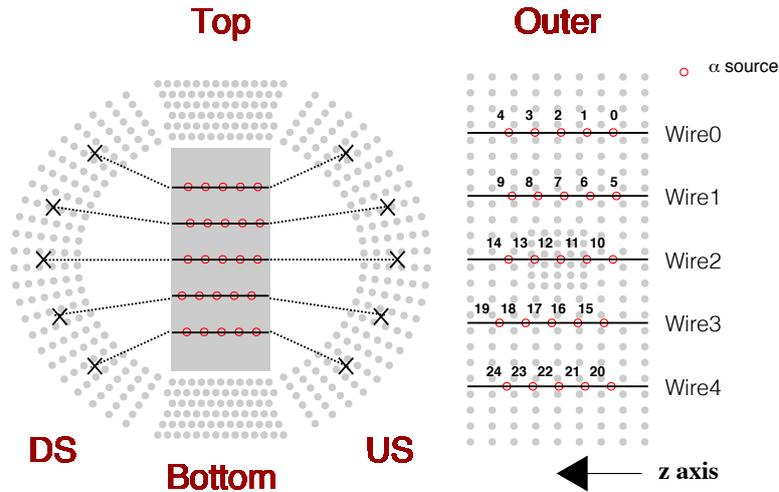


図 4.1 液体キセノン γ 線検出器内の α 線の位置。[24]

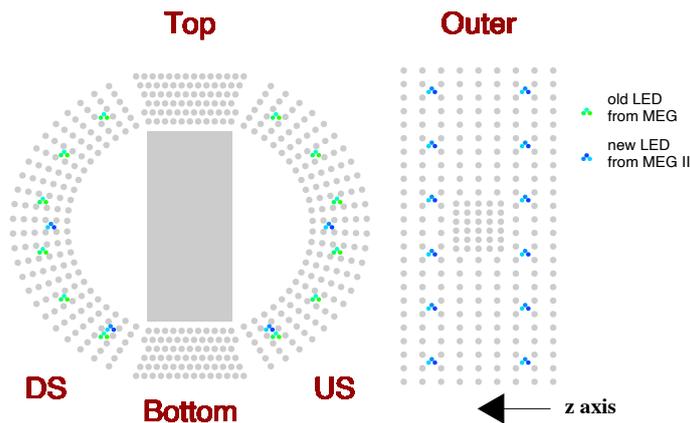


図 4.2 キセノン検出器内の LED の設置図。緑は MEG 実験から使われてきた LED、青は MEG II 実験で新たに導入された LED を表す。[14]

と表される。 λ は Poisson 分布の平均値、つまり真の検出光電子数の平均である。実際にはクロストークやアフターパルスがあるため N_{det} が 1 以上となるとその確率は Poisson 分布に従わないが、 $N_{\text{det}}=0$ の場合はクロストークやアフターパルスに影響されないため、この確率は Poisson 分布に従う。 $\sum P(n)=1$ を用いることで、

$$\frac{P(n=0)}{\sum P(n)} = e^{-\lambda} \quad (4.4)$$

となり、式 4.4 の左辺は全検出イベント数に対する $N_{\text{det}}=0$ のイベント数の割合であり、これにより λ も求まる。また、光量分布において $N_{\text{det}}=0$ と $N_{\text{det}}=1$ の値の差をゲインと呼ぶが、光量分布全体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。この値を μ とおくと、こ

これは ECF を含んだ値であるため、 μ を式 4.4 で求めた ECF の含んでいない値である λ で割ること
 ことで ECF が求められる。

$$ECF = \frac{\mu}{\lambda} \quad (4.5)$$

これにより、式 4.2 からイベント毎に N_{det} を算出することができる。

入射光子数 N_{int} については、 α 線の位置や予想される放出光量から計算して求めることができる。 α 線を点光源とした場合の MPPC 受光面を見込む立体角を Ω 、 α 線からのエネルギーを E_α 、
 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要する平均エネルギーを W と
 すれば、

$$N_{\text{int}} = \frac{E_\alpha}{W} \times \frac{\Omega}{4\pi} \quad (4.6)$$

と求められる。

液体キセノン検出器内の MPPC の PDE は式 4.7 のように定義される。

$$PDE_{\text{data}} = PDE_{\text{MC}} \times \frac{N_{\text{data}}}{N_{\text{MC}}} \times F \quad (4.7)$$

測定における検出光電子数 N_{data} を Monte Carlo (MC) シミュレーションで設定した光子検出効
 率 PDE_{MC} と検出光電子数 N_{MC} と比較して、測定での光子検出効率 PDE_{data} を求める。その
 際、液体キセノン内のシンチレーション光の発光量はその純度に関係するため、液体キセノン内の
 不純物の補正因子を F としている。

α 線によるシンチレーション光の波長は γ 線が液体キセノン検出器内に入射した際のものと同じ
 175 nm であるため、 α 線によって測定された PDE はそのまま γ 線の測定の際に用いることがで
 きる。LED は可視光に対する VUV-MPPC の PDE や上で述べたゲイン、ECF の測定のために
 用いられる。

4.1.2 検出器内の VUV-MPPC の PDE 減少

2017 年から始まった液体キセノン検出器の一部の MPPC を用いた測定 (コミッショニンググラ
 ン) において、VUV 光に対する PDE (VUV-PDE) が、ミューオンビーム運転時に減少しているこ
 とが分かった (図 4.3)。MEG II 実験で予定されるミューオンビーム強度 ($7 \times 10^7 \mu^+/\text{s}$) における
 VUV-PDE の減少速度は $\sim 0.06\%/\text{h}$ である。これは 60 日間で PDE が 0 となり検出器の運用が
 できなくなってしまうことを示唆しているため、MEG II 実験において非常に深刻な問題である。
 一方、LED 光によって測定された 470 nm 程度の波長に対しては同程度の PDE の減少は確認され
 なかった。^{*1}

PDE 減少の研究は、減少の推移やその原因、また減少した PDE の回復方法が行われている。減
 少の原因と減少の推移についての研究はそれぞれ次節と 5 章、6 章で詳しく述べる。

*1 1/10 の速度で観測された。

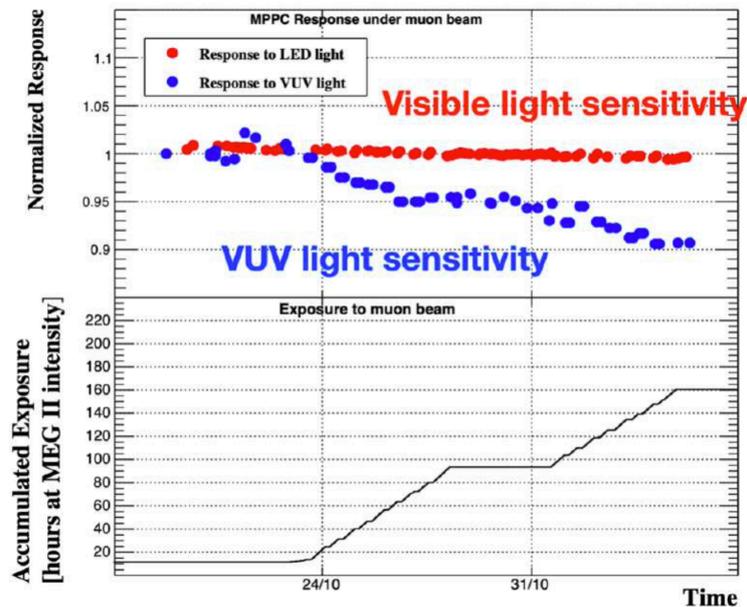


図 4.3 PDE 減少の推移。上部の縦軸はビーム照射前の PDE を 1 に規格化した相対的な PDE。下部の縦軸はミュオンビーム照射時間 (ビーム強度を 7×10^7 に合わせたもの)。[24]

表 4.1 アニーリングの際に特に注意すべき機器の許容温度

周辺機器	許容温度 (°C)
MPPC	100
CFRP	45
PCB	120
Glue	65

PDE の回復方法については MPPC の加熱処理 (アニーリング) が有効であると分かっている [39]。この有効性は、MPPC に逆バイアスを印加して流れる電流によるジュール熱の加熱による手法で確認されている。電流を促進するための光源として、実験室においては室内照明、液体キセノン検出器内の MPPC においては検出器内の LED を用い、アニーリングが実行された。また検出器内の MPPC のアニーリングでは、LED はアニーリングによる PDE 回復のモニターにも用いられ、後ほど α 線源を用いて PDE の改善が確認された。この際、加熱温度を図 4.4 に示す周辺機器を考慮して決める必要がある (表 4.1)。またアニーリング後に ECF やゲインの変化は見られなかった。2022 年 2 月-3 月には検出器内の全ての MPPC のアニーリングによる PDE の回復が予定されていて、上記のジュール熱による方法の他に温水による加熱方法も提案されている。

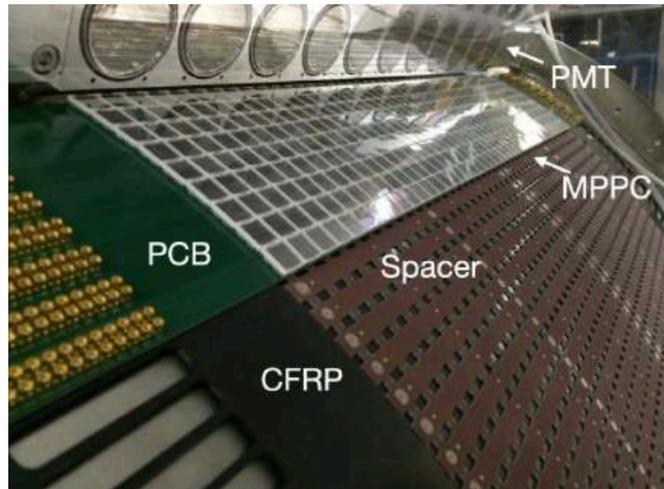


図 4.4 検出器内の MPPC と周辺機器の構造。[25]

4.2 減少原因の候補とこれまでの調査

PDE 減少の原因は、液体キセノン検出器内の MPPC の設置されている環境と、PDE 減少の特徴から推測される。

まず、検出器内の MPPC の環境を挙げる。

- 液体キセノン：検出器内は及び MPPC は液体キセノン温度 ($\sim 165\text{ K}$) に保たれている。
- 電離放射線：2.2 章で述べた、 $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊探索の背景事象となる RMD や AIF による MPPC への γ 線の照射が起きる。MEG II 実験では一つの MPPC に最大で 0.006 Gy の照射が予想されている。
- 中性子：加速器由来の中性子の照射が起きる。
- VUV 光：液体キセノンのシンチレーション光の波長は $\sim 175\text{ nm}$ で、VUV 光である。シンチレーション光の波長スペクトルは図 2.11 である。

次に、確認されている PDE 減少の特徴は以下である。

- ビーム運転時に減少し、ビーム停止時は減少していない (図 4.3)。
- MEG II 実験のターゲットに近い MPPC ほど PDE が低い (図 4.5^{*2})。

これらの特徴から、PDE 減少の原因はビームに起因するものと推測でき、考えられる原因として VUV 光と γ 線が挙げられた。中性子については、ターゲットに対する位置依存性からその可能性

^{*2} PDE の値は絶対値である。2019 年時は読み出しチャンネル数が限られていたため、ケーブルを繋ぎ直しながら全 MPPC の PDE を測定した。このため、殆どの MPPC は測定回数が 1 回に限られ、PDE の変化量でプロットを作成できなかった。

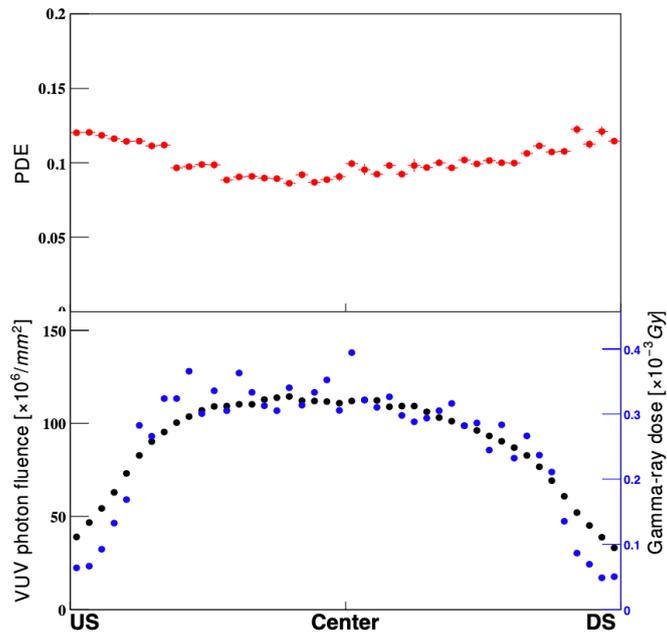


図 4.5 PDE の MPPC の位置依存性。横軸は MPPC の位置 (Center、US、DS はそれぞれターゲット、ビーム上流側、下流側を表す)。上部の縦軸は MPPC の PDE、下部の縦軸は左側、右側それぞれ VUV 光 (黒)、 γ 線 (青) の MPPC への照射量を表す。

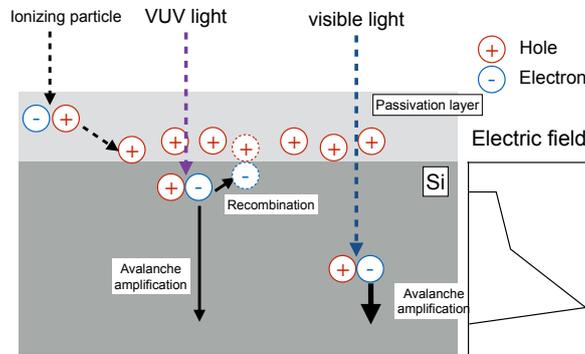


図 4.6 VUV 光の場合の表面損傷の模式図。VUV 光により MPPC 表面に生成された正孔が MPPC 内部の電場を弱める。

を排除した。

VUV 光や γ 線が MPPC の PDE を減少させる理由としては、表面損傷が考えられる [26]-[30]。VUV 光の場合の考えられる表面損傷の過程は (図 4.6)、VUV 光が VUV-MPPC に入射した際に Si 層と不活化層 (SiO_2 など) の間でエネルギーを落とし、電子・正孔対を生成する。生成された電子・正孔対の一部はすぐに再結合するが、一部の対はキャリアとして Si 層と不活化層付近にとどまる。この際、電子は容易に電場などにより外部に移動するが (易動度 $\mu_e \sim 20 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$)、正孔は

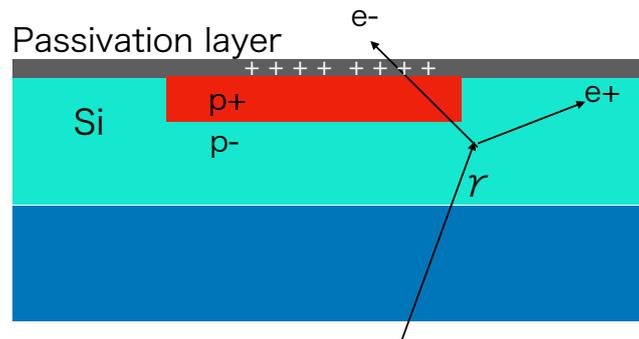


図 4.7 γ 線の場合の表面損傷の模式図。 γ 線から電子・正孔対が発生し、その電子線が MPPC 表面に正孔を発生させ MPPC 内部の電場が弱まる。

容易に移動できないため内部に留まる ($\mu_h \sim 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{Vs}$)。この正電荷により、キャリア電子が再結合したり、MPPC 表面付近の内部電場が弱められアバランシェ増倍が起きにくくなると考えられる。一方波長 470 nm 程度の可視光では、波長が長いいためアバランシェ層に容易に到達できるため、VUV と同程度の PDE 減少が確認されなかったと考えられる。参考実験として、 SiO_2 を光子の入射窓に用いた APD の量子効率 (Quantum Efficiency, QE) が、短波長を多く照射した際に減少したことが確認されている [31]。

γ 線の場合は (図 4.7)、MPPC に入射した際に Si 層と不活化層間で電子・陽電子対を発生させ、電子線が MPPC の Si 層と不活化層の境界で電離を起こし電子・正孔対を発生させ、上で述べた内部電場が弱められる過程を疑っている。

VUV 光と電離放射線を PDE 減少の原因として疑った場合、検出器内の MPPC は低温のため、低温環境で表面損傷による正孔は動きづらくなると予想されることから、PDE 減少の原因の候補としての疑いが更になくなった。

VUV 光による PDE 減少の検証実験は本研究室で行われてきた。2019 年のデータ取得期間で MPPC に照射されたと見積もられる VUV 光の量 ($4.6\text{--}5.8 \times 10^{10} \text{ photon/mm}^2$)、またその際の PDE 減少率 (9%) と、実験室での各実験の VUV 光の照射量と結果を比較する形で調査が行われた。各実験の結果を表 4.2 にまとめる。

加えて、液体キセノン検出器内の MPPC に近い環境の実験として、液体キセノンの入った容器に MPPC を浸し、 α 線源による VUV 光を照射する実験も行われたが、PDE の減少は確認できなかった [25]。

これらの結果から、VUV 光の照射では液体キセノン検出器内での PDE 減少を再現できなかった。そこで本論文では、疑われるもう一方の原因である γ 線の VUV-MPPC への照射実験を行った結果について述べる。

表 4.2 VUV 光の照射実験の結果 [25]A

照射波長 (nm)	照射光量 照射光子数 (波長成分)	照射条件 MPPC の温度	PDE 減少の結果 ($7 \times 10^7 \mu/s$ 換算)
185 – 1000 nm	3.1×10^{16} (UV)	常温 (室温)	$1.5 \times 10^{-6} \%$ /h[32]
185 – 1000 nm	1.3×10^{15} (UV)	低温 (240 K)	$1.7 \times 10^{-6} \%$ /h
175 nm	1.0×10^{14} (VUV)	常温 (室温)	$1.7 \times 10^{-5} \%$ /h
160 – 400 nm	1.7×10^{11} (VUV)	低温 (165 K)	確認されなかった。

第 5 章

放射線源を用いた PDE 減少の実験室での調査

5.1 概要

5.1.1 実験の背景と目的

前章で述べたように、PDE 減少の原因として VUV 光と γ 線が挙げられ、VUV 光に関しては実験室での実験が行われたが、液体キセノン検出器内の PDE 減少を再現できなかった。

そこで著者は γ 線について、実験室において照射実験を行った。

5.1.2 本実験での MPPC への照射量

MEG II 実験の 3 年間の運転を仮定すると、液体キセノン検出器内の MPPC への γ 線照射量は、1 つの MPPC あたり平均 0.006 Gy と予想されている。実験ではこの値を目標に照射を行い、4 章で述べた液体キセノン検出器での減少速度 0.06 %/h と比較する方法で PDE 減少の確認を行った。

実験室で放射線源を用いた場合の MPPC (S10943-4372) への照射量の概算は以下のように行なった。線源として、主に 1.17 MeV と 1.33 MeV の γ 線を放出する ^{60}Co を仮定すると、反応断面積は $0.07 \text{ cm}^2/\text{g}$ である (図 5.1)。 γ 線が MPPC の Si 層部分 (厚さ 0.5 mm) でエネルギーを落とすことを仮定しているので*1、1 つの γ 線について反応確率は

$$0.07 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1} \times 2.3 \text{ g cm}^{-3} \times 0.5 \text{ mm} \times \left(\frac{12 \text{ mm}}{15 \text{ mm}}\right)^2 = 2 \times 10^{-3} \quad (5.1)$$

となる。 2.3 g cm^{-3} は Si の密度、左辺の最後の項は、MPPC の大きさは 15 mm 四方であるのに対し、Si 層部分は 12 mm 四方であることを補正する項である。これから、 ^{60}Co からの γ 線が Si

*1 想定している表面損傷は不活化層 (SiO_2 など) でキャリアを作る場合を仮定しているが、MEG II 実験での γ 線照射量との相対的な比較のために Si 層でのエネルギー損失を計算に用いている

Silicon

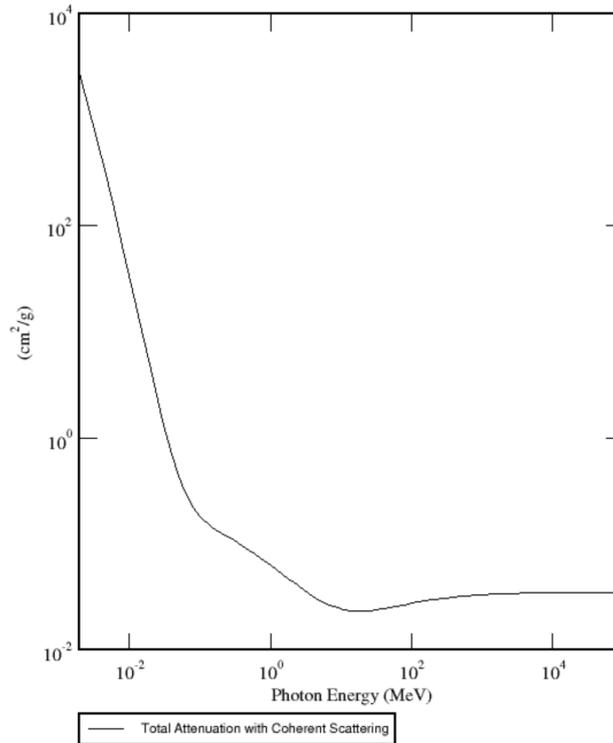


図 5.1 γ 線の反応断面積。[37]

層部分にエネルギーを落とすイベント数は、線源と MPPC の距離を 18 mm とすると、線源からの γ 線は 1 秒あたり 2200 イベント程度となるので、50 時間の MPPC への照射を仮定すると、

$$2 \times 10^{-3} \times 2200 \text{ s}^{-1} \times 3600 \text{ s} \times 50 \text{ h} \simeq 10^6 \quad (5.2)$$

程度となる。また、1 つの γ 線が Si 部分で落とすエネルギーは、 $dE/dx = 2 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^2$ より (図 5.2)、

$$2 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^2 \times 2.3 \text{ g cm}^{-3} \times 0.5 \text{ mm} = 230 \text{ keV} \quad (5.3)$$

である。よって、50 時間の照射実験で γ 線が MPPC の Si 層部分へ落とすと予想されるエネルギーは

$$\frac{230 \text{ keV} \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{1.7 \times 10^{-4} \text{ kg}} = 2 \times 10^{-4} \text{ Gy} \quad (5.4)$$

となる。これは MEG II 実験 1 週間での液体キセノン検出器内の MPPC への γ 線照射量に等しい。この照射量は PDE 減少を確認するのに十分ではない。

そこで、実際の実験で支配的となる γ 線源ではなく、放射線による表面損傷について同等のソースとして β 線源である ^{90}Sr を用いる場合を考える。 β 線の場合、Si 層部分に入射した β 線は必ず

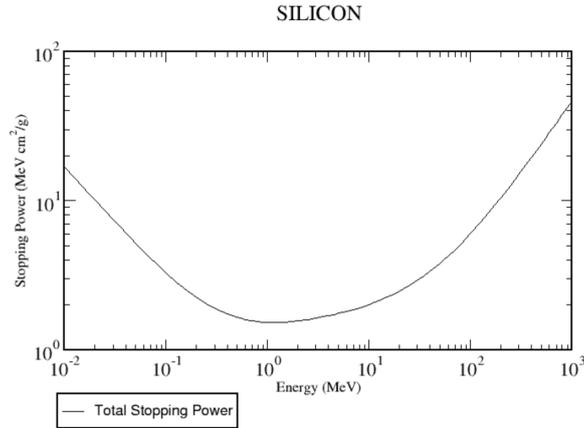


図 5.2 シリコン内でのエネルギー損失。[38]

エネルギーを落とし、そのエネルギーは

$$1.664 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^2 \times 2.3 \text{ g cm}^{-3} \times 0.5 \text{ mm} = 190 \text{ keV} \quad (5.5)$$

と見積もられる。ここで、 $1.664 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^2$ は Si における最小電離損失である。この値を用いることで、 β 線の落とすエネルギーを過大評価しないようにした(図 5.2)。 ^{90}Sr からの 1 秒あたりに MPPC に入射する β 線は、線源と MPPC の距離を後述の実験のセットアップで用いられる 18 mm とすると 1.5×10^4 程度(ここで線源強度は $10^6/\text{s}$)なので、1 時間の照射で MPPC の Si 層部分に落とすエネルギーは、

$$\frac{190 \text{ keV} \times 1.5 \times 10^4 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} \times 1 \text{ h}}{1.7 \times 10^{-4} \text{ kg}} \simeq 0.02 \text{ Gy} \quad (5.6)$$

となり、MEG II 実験 3 年間での液体キセノン検出器内の MPPC への γ 線照射量に到達する照射が実験室で可能となる。

5.2 常温の MPPC への照射実験

5.2.1 照射実験のセットアップ

β 線の MPPC への照射のセットアップを図 5.3, 5.4 に示す。MPPC と ^{90}Sr 線源は 18 mm の距離に向かい合わせに設置された。放射線源の中心と MPPC の中心を合わせることで、MPPC の 4 チップになるべく均等に照射されるようにした。実験での照射時間は 200 時間で、液体キセノン検出器内の MPPC の γ 線照射量の約 200 倍を照射する実験である。

照射温度は室温 (22°C) で行った。照射中にアニーリングが同時に起こり、PDE 減少を確認できないのではないかと懸念に関しては、先行研究によれば常温でのアニーリングによる PDE の回復速度は $1.67\%/24 \text{ h}$ [32] であるため、上述の期待される PDE 減少速度に比べて十分に遅い。

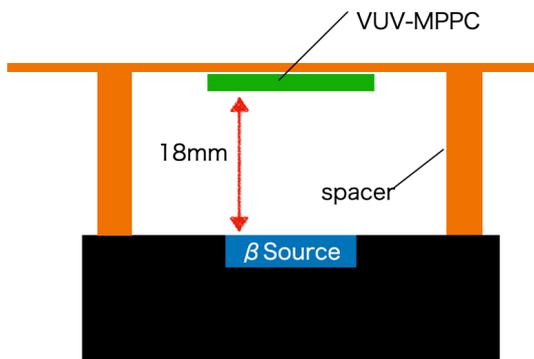


図 5.3 照射のセットアップ (概略図)。

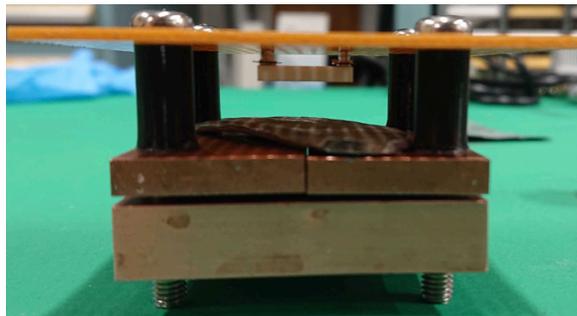


図 5.4 実際の照射セットアップ。鉛板を入れることで照射開始と終了時間を決めている。

また照射は MPPC に電圧を印加せずに行った。^{*2}

今回の実験はかなり短時間で大きな照射量に達する。照射開始と終了の時間をなるべく正確にするため、鉛板を放射線源と MPPC の間に挟むことで、鉛板の抜き差しタイミングからそのタイミングを決定した。

5.2.2 PDE 減少の測定セットアップ

照射前後の MPPC の PDE をモニターするための PDE 測定用のセットアップは図 5.5 であり、UV 光 (波長約 190 nm) と青色 LED (波長約 460 nm) を用いて PDE のモニターが行われた (図 5.6)。セットアップは恒温槽内 (22°C で一定) にある。UV 光に関しては、190 nm 以上の波長の光を放出する浜松ホトニクス製の 5 W キセノンランプ (図 5.7, 5.8) に、eSource optics 社製の 172 nm 付近の真空紫外光を主に透過させるバンドパスフィルター (図 5.9) を重ねることで、190 nm 付近の UV 光に限定して取り出す方法をとった。^{*3} PDE 測定の際の MPPC は、照射されたものと照射されていないものを設置した。また MPPC の 48 時間の常温保存時において 1、3、5、48 時間後の印加電圧と電流の測定 (IV 測定) を行い、MPPC の特性が常温保存期間で大きく変わらないことを確認した (図 5.10)。

PDE 減少したかどうかの判断は、照射された MPPC の charge と照射されていない MPPC の charge の比を取ることで、入射光量の変化を補正した PDE の変化をモニターする方法で行った。^{*4}

^{*2} 読み出しエレクトロニクス数が限られており、これまで読み出しに使われていなかった MPPC は電圧が印加されていないにもかかわらず、PDE 減少が確認されている。

^{*3} 実際、VUV-MPPC と短波長に感度のない一般の MPPC で上記のセットアップの UV 光による信号を確認し、一般の MPPC の信号は VUV-MPPC のものより大きく減少していた (光電子数で 1/20 程度) ことから、波長 190 nm 付近の UV 光を選択的に取り出していることを確認した。

^{*4} PDE は MPPC に入射した光子数 N_{pho} と MPPC が検出した光電子数 N_{phe} を用いて、

$$PDE = \frac{N_{\text{phe}}}{N_{\text{pho}}} \quad (5.7)$$

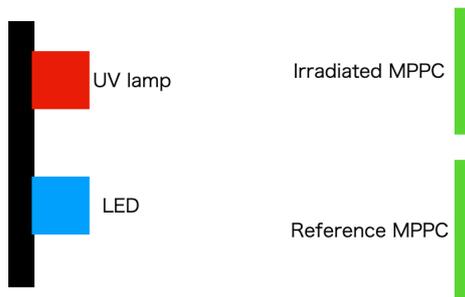


図 5.5 PDE 測定のセットアップ (概略図)。

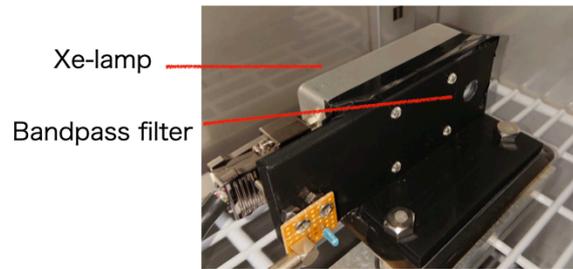


図 5.6 PDE 測定時のランプのセットアップ。キセノンランプの前にバンドパスフィルターを設置した。各 MPPC と各光源の相対位置は固定されている。



図 5.7 キセノンランプ (L9455-01)。[33]

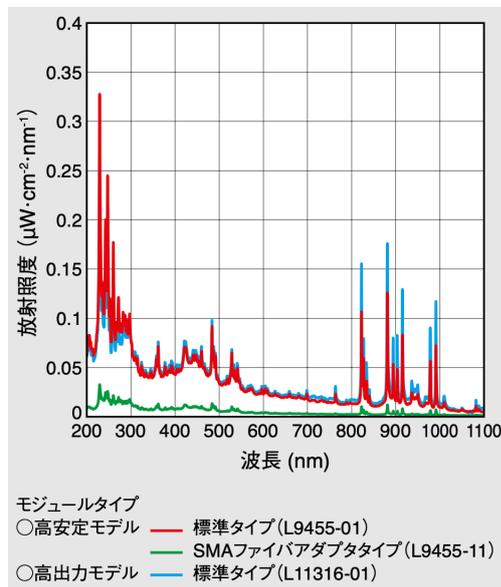


図 5.8 キセノンランプの波長分布。使用したものの波長分布は赤のスペクトルである [33]。

と書ける。照射していない MPPC を用いて光量を補正することで、

$$PDE_{\text{relative}} = \frac{\left(\frac{N_{\text{phe,af}}^{\text{irr}}}{N_{\text{phe,af}}^{\text{ref}}} \right)}{\left(\frac{N_{\text{phe,be}}^{\text{irr}}}{N_{\text{phe,be}}^{\text{ref}}} \right)} \quad (5.8)$$

となる。添字 be,af はそれぞれ照射前、照射後の物理量、irr と ref はそれぞれ照射された MPPC とされていない MPPC についての物理量を表す。

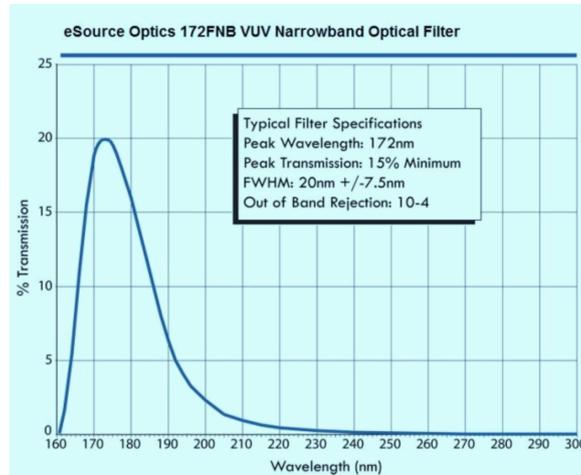


図 5.9 バンドパスフィルターの透過波長の分布。[35]

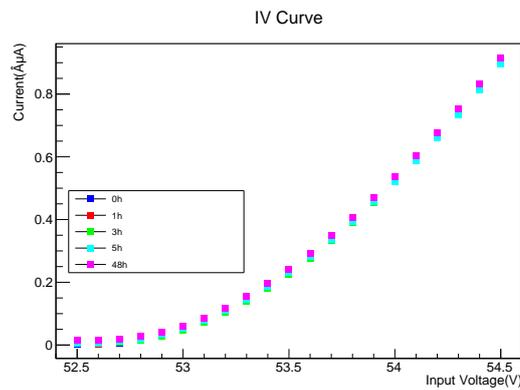


図 5.10 IV 測定の結果。48 時間の常温保存において IV 曲線が大きく変化しないことを確認した。

5.2.3 照射実験とその結果

UV 光と LED 光を用いた PDE 減少の評価結果はそれぞれ図 5.11, 5.12 である。どちらも誤差は MPPC の 4 チップの PDE の標準偏差でつけた。図 5.11 より UV 光に対する PDE が減少しているが、今回の減少速度はミュオンビームレート $7 \times 10^7 / \text{s}$ に換算すると $1.5 \times 10^{-11} \% / \text{h}$ であり、液体キセノン検出器での減少速度 $0.06 \% / \text{h}$ の $1 / 10^{10}$ 程度の速度である。よって今回の減少は液体キセノン検出器での PDE 減少を説明できないため、PDE 減少は確認されなかったと言える。

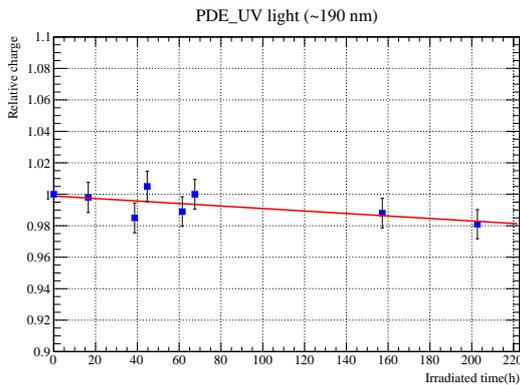


図 5.11 照射結果(UV 光(~ 190 nm)による PDE)。

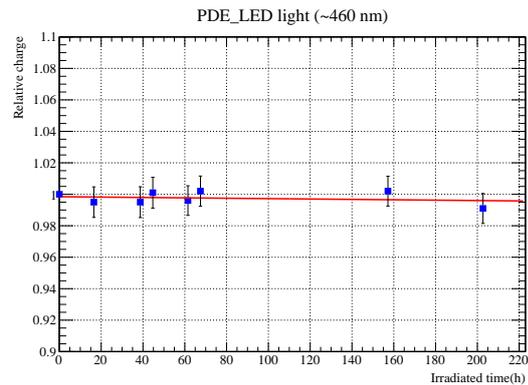


図 5.12 照射結果(LED 光(~ 460 nm)による PDE)。

5.3 低温の MPPC への照射実験

しかし、前節の測定では照射時の MPPC は常温であり、液体キセノン検出器内の MPPC の状況とは大きく異なる。更に、前章で述べた表面損傷における正孔は低温で動きづらいことや、表 4.2 の UV 光の常温の MPPC への照射結果 [32] から、常温であるため減少速度が遅い可能性も考えられる。そこで、液体キセノンの温度 (165 K) の MPPC への照射を行なった。

5.3.1 照射実験のセットアップ

MPPC への β 線の照射のセットアップを図 5.13, 5.14 に示す。安価かつ容易に入手できることから、冷却媒体として液体窒素 (196 K) を用いた。銅柱を液体窒素に浸し、その銅柱の上部にヒーター [36] を巻くことで、銅柱上部の MPPC をのせるステージ部の温度を 165 K に保った。セットアップ内は窒素が液体窒素からのものと外部から流入しているもので充滿しているため、MPPC 表面は結露しづらくなっている。更に測定中は目視によって MPPC 表面が結露していないことを確認した。本測定においても MPPC に電圧は印加していない。MPPC と線源の距離は 7.6 cm であり、本実験では 5 時間の照射を行った。この際の照射量は 5.6 式の計算と同様にして、MEGI I 実験 3 年間での MPPC への γ 線照射量に相当すると見積もられる。

5.3.2 PDE 測定のセットアップ

PDE 測定のセットアップは図 5.5 で、常温照射と同じである。また PDE 減少の評価方法も、式 5.7-式 5.8 であり、常温照射と同じである。但し、PDE 測定は MPPC の低温照射後に常温への昇温をしてから行った。昇温の時間は 30 分程度であり、常温での MPPC のアニーリング速度は 1.67%/24h であることから、PDE 減少の確認には問題ないを考える。

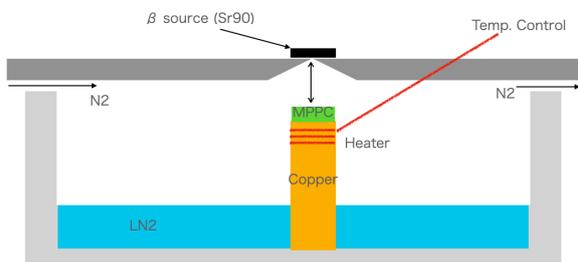


図 5.13 照射セットアップ (概略図)。

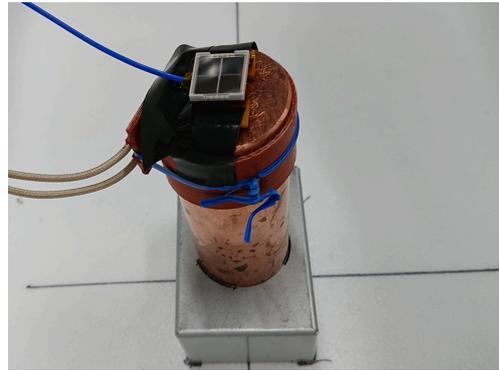


図 5.14 照射における MPPC と銅柱とヒーター。

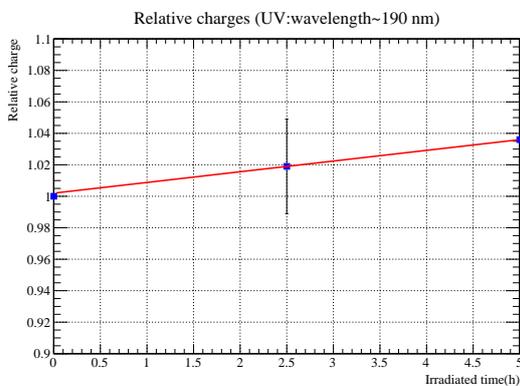


図 5.15 照射結果 (UV 光 (~190 nm) による PDE)。

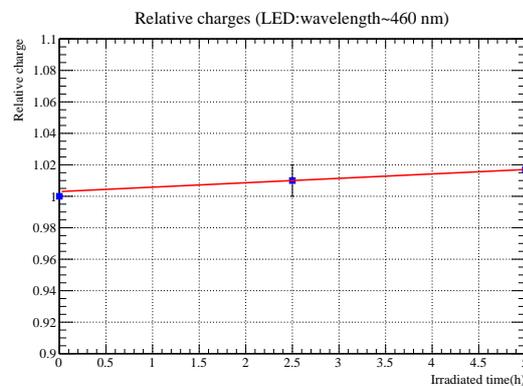


図 5.16 照射結果 (LED 光 (~460 nm) による PDE)。

5.3.3 低温での照射実験とその結果

UV 光と LED 光を用いた PDE 減少の評価結果はそれぞれ図 5.15, 5.16 である。誤差はどちらも MPPC の 4 チップの PDE の標準偏差でつけている。UV 光に対する PDE の減少速度はミューオンビームレート $7 \times 10^7 / \text{s}$ に換算すると $-7 \pm 6 \times 10^{-7} \% / \text{s}$ であり、PDE が上昇した。よって本実験でも PDE 減少は確認されなかった。

5.3.4 低温での照射速度を遅めた実験

上に述べた実験は、約 5 時間の照射で MEG II 実験 3 年間での MPPC への γ 線照射量に到達する、キセノン検出器内の MPPC と比べて照射速度の速い実験であった。そこで、PDE 減少の照射速度依存性を調査するため、この照射速度を遅めた実験を行なった。

照射セットアップは図 5.13 と同様であるが、 ^{90}Sr 線源と MPPC の距離を 18 mm から 40 cm に

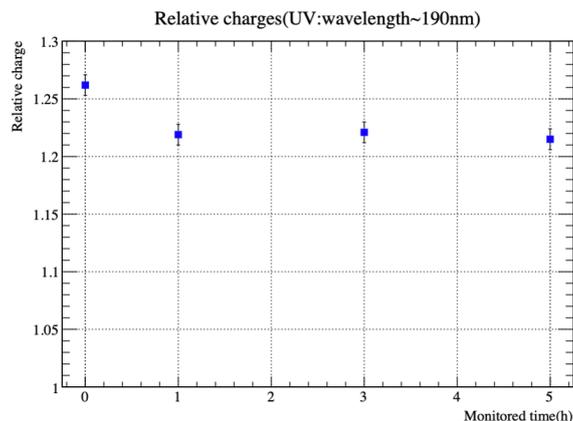


図 5.17 MPPC の安定性の実験の結果。誤差は MPPC の 4 チップ個々の結果の標準偏差で取っている。

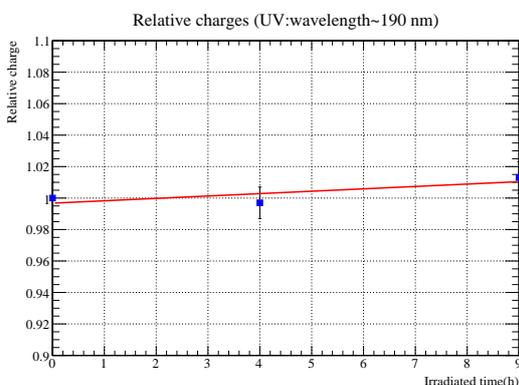


図 5.18 照射結果 (UV 光 (~190 nm) による PDE)。誤差は MPPC の安定性の実験による誤差をつけた。

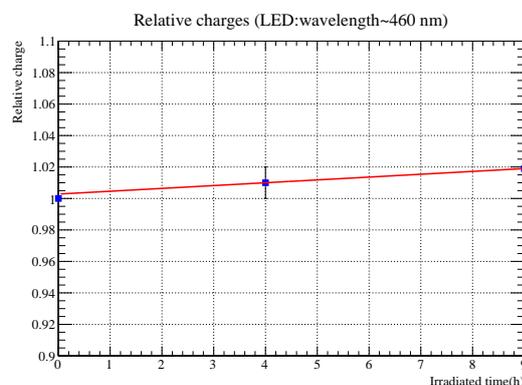


図 5.19 照射結果 (LED 光 (~460 nm) による PDE)。誤差は 4 チップの PDE の標準偏差をつけた。

遠ざけて配置した。本実験での照射は 9 時間行った。この際の照射量は 5.6 式の計算と同様にして、MEG II 実験 3 週間での MPPC への γ 線照射量に相当すると見積もられる。

また、PDE 測定のセットアップについて、追加実験を行なった。常温照射実験で述べたように、PDE 減少が実験前後で起こったかどうかの判断には、照射された MPPC とされていない MPPC の charge の比を用いる。その際の、照射されていない MPPC による補正以外での charge のぶれ (光量変化の補正の精度、測定の系統誤差) を測定する実験を行った。実験方法は、PDE 測定のセットアップ内に 2 つの MPPC を放置し、定期的にそれぞれの MPPC の charge を測定し、2 つの MPPC の charge の比をとるというものである。本実験では、5 時間の範囲である時間間隔で charge の測定を行い、実験結果図 5.17 である。この実験は PDE 減少の判断の際の charge 測定 (式 5.8) と全く同じ状況のため、この実験での PDE のぶれを照射速度を遅めた実験での UV 光による PDE 減少の測定の誤差に取り入れた。

照射速度を遅めた実験の UV 光と LED 光による PDE 減少の評価結果はそれぞれ図 5.18, 5.19

である。UV 光に対する PDE の減少速度は、ミューオンビームレート $7 \times 10^7 / \text{s}$ に換算すると $-7 \pm 7 \times 10^{-5} \% / \text{s}$ であり、PDE が上昇した。よって本測定でも PDE 減少は確認されなかった。前実験と合わせて、低温の MPPC への照射ではどちらも PDE が上昇したことになる。一方、4 章の表 4.2 の VUV 光を低温の MPPC に照射する実験においても、ビームレート $7 \times 10^7 / \text{s}$ に換算すると $1.7 \pm 1.0 \times 10^{-3} \% / \text{s}$ という比較的同様の速度で PDE が上昇した ([25], 6.3 章)。この結果の解釈として UV 光による表面洗浄を疑った*⁵。表面洗浄の可能性は棄却されていないが、本実験と照射後の MPPC を短時間で常温に戻し PDE 測定をしたという点で実験環境が類似している。液体キセノン検出器内の MPPC を常温に素早く戻した際に VUV 光に対する PDE の測定は行われていないため、実験室において低温にした MPPC の急激な温度上昇による PDE の変化の測定実験を行い、今回の実験での PDE 上昇の振る舞いを調査する必要があると考えられる。

5.4 結論と今後の展望

以上 3 つの照射実験から PDE 減少は確認されなかったため、 γ による VUV-MPPC の表面損傷を、PDE 減少の原因と特定することはできなかった。よって、VUV を PDE 減少の原因と疑った実験 (表 4.2) の結果と合わせて、これら 2 つの候補以外に PDE 減少の原因がある可能性が出てきたと結論づけられる。現在 PDE 減少速度の位置依存性を説明できる他の候補はない。今後の展望として、前章で述べた PDE 測定も含めた液体キセノン検出器での MPPC に近い環境での実験や、他の表面損傷の候補を模索することを行いたいと考えている。

但し、原因 PDE 減少の原因の理解は、MEG II 実験の運転計画において非常に重要であるため、今後もこの原因調査は続ける予定である。

*⁵ UV 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ることを UV 洗浄と呼ぶ。

第III部

液体キセノン γ 線検出器の安定性に関する研究

第 6 章

α 線による PDE のモニター

6.1 概要

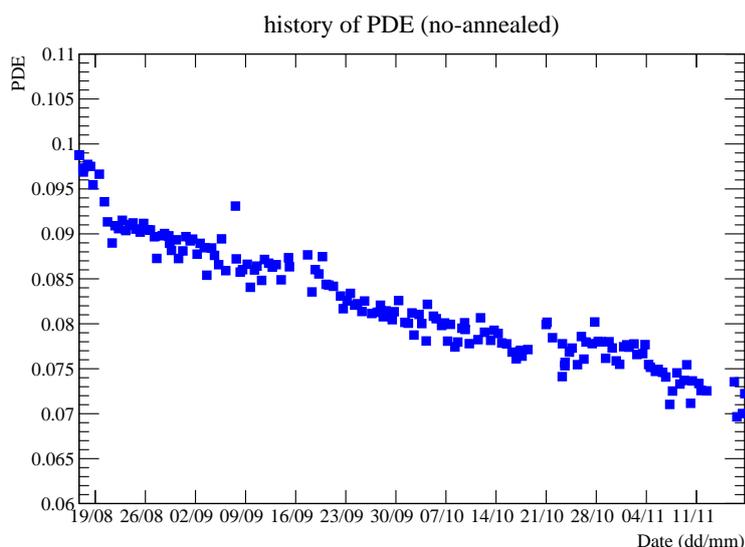


図 6.1 PDE の推移。縦軸は液体キセノン検出器内の全ての MPPC の PDE の平均である。データ期間は 2021 年 8 月中旬から 11 月中旬の 4 ヶ月間。

PDE は液体キセノン検出器内の 4092 個の MPPC の PDE の平均をとって推移を確認している。2021 年のデータ取得における PDE の推移を図 6.1 に示す。一方で、個々の MPPC について PDE 減少の経過を追い、その違いを調査することは行われていなかった。また、いくつかの MPPC はアニーリング (MPPC の加熱処理) により PDE を回復させる作業を 2019、2020 年に行ったが [39]、アニーリングされていない MPPC との PDE 減少の特性の比較も行われていない。MEG II 実験が本格的にデータ取得を始めると、アニーリングは定期的に行うことが必要不可欠であるため、この調査は非常に重要である。

以下では、MPPC の較正方法を述べた後、PDE の推移について条件の違いごとに調査した結果

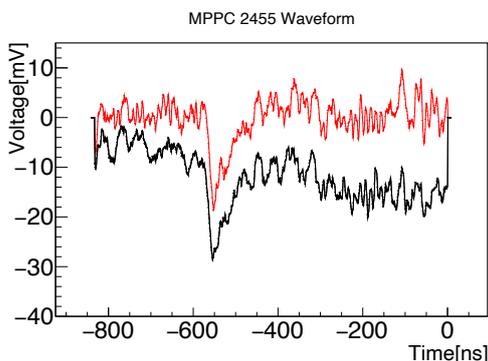


図 6.2 隣り合った MPPC の波形を差し引いた場合の波形 (赤) と、差し引かなかった場合の波形 (黒)。低周波ノイズが減少している。[14]

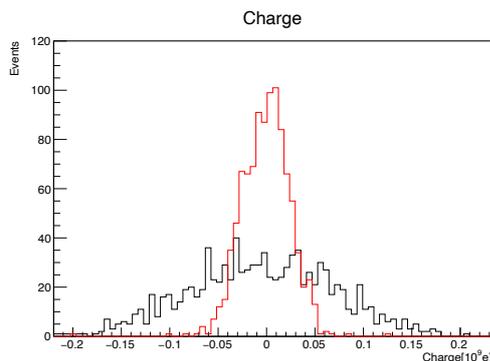


図 6.3 信号のないイベントにおいて、隣接 MPPC の波形をノイズテンプレートとして差し引いた場合の電荷分布 (赤) と、差し引かなかった場合の電荷分布 (黒)。積分電荷のばらつきが抑えられている。積分時間は共に 150 ns である。[14]

について述べる。

6.2 MPPC の PDE 測定方法

液体キセノン検出器内の MPPC の PDE 測定の方法を述べる。まず、MPPC のゲインと ECF の測定は検出器内の LED (図 4.2) を用いて行われる。一般的なゲインの較正方法は、数個程度の光子が検出される光量で LED を光らせ、電荷分布から 1 光子を検出した場合の電荷量を求める方法である。液体キセノン検出器内の MPPC については以下の 2 つの工夫によりゲインの較正を行っている。

- ゲイン測定を行う MPPC の隣の MPPC の電圧を切り、その波形を差し引く。これにより隣接した MPPC 間に共通で起っている、干渉によるノイズを削減する (図 6.2, 6.3)。
- 1 光電子に対応する波形よりも短い波形積分領域を複数用い、積分範囲とゲインの相関をフィットすることから実際のゲインを求める (図 6.4)。

ECF はゲインと同様に LED を微弱発光させ較正される。4.1.1 章で述べたように、ポワソン分布を用いて計算する。更に図 6.5 のように、式 4.5 の μ 、 λ の積分範囲を複数用意しフィッティングを用いることで、ECF の評価を行う。

以上の較正を経て、MPPC の VUV 光に対する PDE は、液体キセノン検出器内の α 線 (図 4.1) から放出される波長 175 nm 付近の光によって、4.1.1 章で述べた方法で評価される。

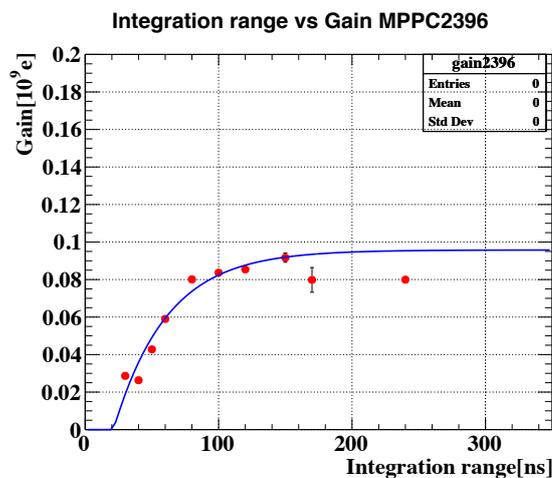


図 6.4 異なる積分範囲を用いて求めたゲインの分布。広い積分範囲での電荷分布は 1 光電子に対応するピークを分離できず、ペDESTAL側によっているため、フィッティングには使用していない。[14]

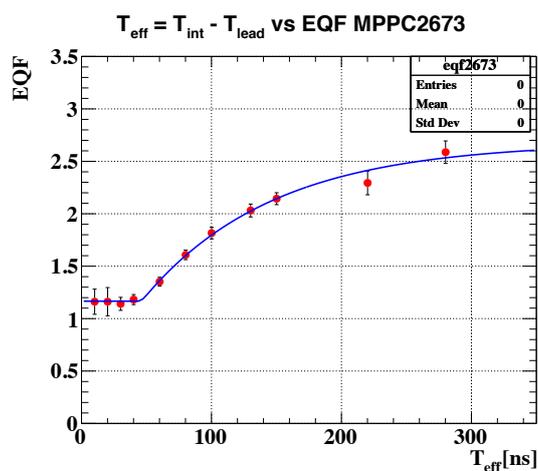


図 6.5 ECF の積分範囲依存性。積分範囲の短い領域ではクロストーク、長い領域ではアフターパルスにより電荷が増加していることがわかる。[14]

6.3 MPPC の PDE 減少速度の比較

6.3.1 MPPC の位置と使用期間による PDE 減少速度の比較

各 MPPC の PDE の減少速度の評価は、2021 年 8 月後半から 2021 年 11 月前半までの PDE の推移を一次関数でフィッティングすることで行った (図 6.6)。PDE の減少速度はビームレート依

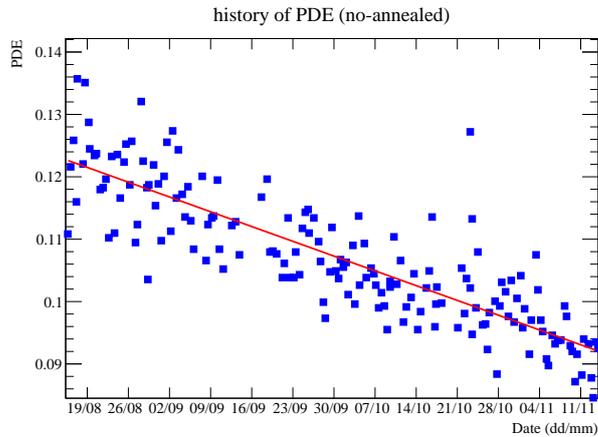


図 6.6 典型的な MPPC1 素子での PDE の推移とフィッティング。横軸は日付、縦軸は PDE である。

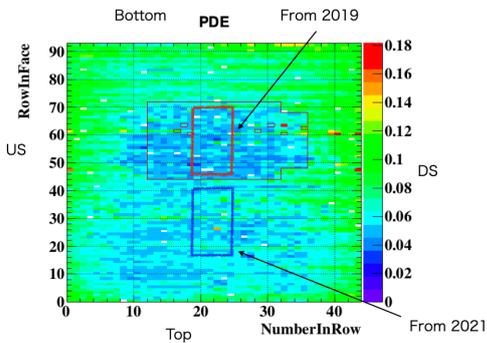


図 6.7 検出器内の各 MPPC の PDE。図 6.8 において比較した used MPPC と new MPPC の位置を色で示す。青が new MPPC、赤が used MPPC を表す。US,DS はビーム上流側、下流側、top,bottom は検出器上部、下部を表す。検出器下部側の細い赤枠の範囲が used MPPC 全体の領域である。赤、青それぞれの領域から 18 素子ずつ選択し、図 6.8 にプロットしている。

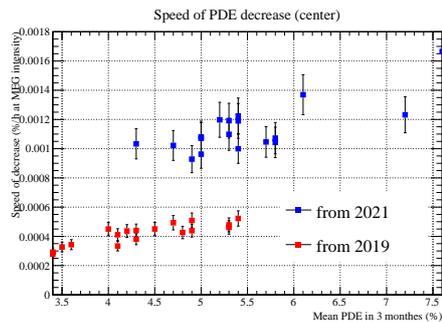


図 6.8 検出器中心にある used MPPC と new MPPC の PDE 減少速度の比較。青が new MPPC、赤が used MPPC を表す。横軸は各 MPPC の 3 ヶ月間の PDE の平均を表す。誤差はフィッティングの際の誤差である。

存性があり、この期間においてミューオンビームレートは $3 \times 10^7 \mu^+ / s$ の期間が 90 % 以上を占めていたため、殆ど線形に減少すると予測されるからである。PDE の減少速度の誤差はこの一次関数でのフィットの際の誤差で評価している。

液体キセノン検出器内の MPPC は、コミッションングランの時から信号の読み出しに使用されてきた MPPC (以下 used MPPC と記す) と、今年度から使用を開始した MPPC (以下 new MPPC と記す) に分けられる。図 2.9 の u 方向の位置で液体キセノン検出器内を中心 (図 6.7)、上流・下流側 (図 6.9) に分け、それぞれの位置について used MPPC と new MPPC (それぞれ図 6.7, 6.9 の赤と青の領域) の PDE 減少の速度の比較を行った。

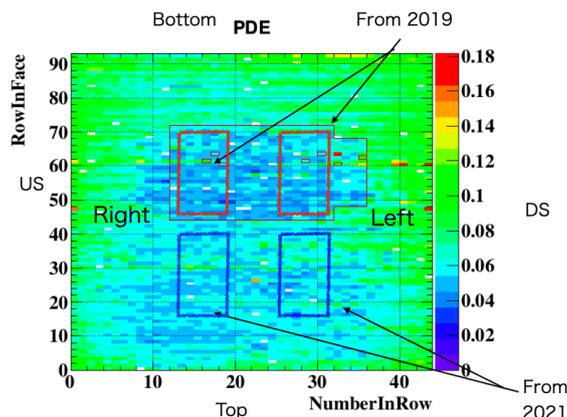


図 6.9 検出器内の各 MPPC の PDE。図 6.10, 6.11 において比較した used MPPC と new MPPC の位置を色で示す。青が new MPPC、赤が used MPPC を表す。US, DS はビーム上流側、下流側、top, bottom は検出器上部、下部を表す。検出器下部側の細い赤枠の範囲が used MPPC 全体の領域である。ビーム上流、下流側それぞれに対し、赤、青の領域から 18 素子ずつ選択し、それぞれ図 6.11, 6.10 にプロットしている。

結果は図 6.8–図 6.11 である。図 6.8 は u 方向の検出器中心にある used MPPC と new MPPC の PDE 減少速度の比較, 図 6.10, 6.11 はそれぞれ u 方向の検出器下流側、上流側にある used MPPC と new MPPC の PDE 減少速度の比較である。全ての結果で共通していることは、同じ PDE での縦軸の値 (PDE 減少速度) が new MPPC の方が大きいため、new MPPC の方が PDE 減少速度が速いと言えることである。また、現在の PDE が大きいほど PDE の減少速度も大きいことが分かる。used MPPC の方が現在の PDE が小さいが、ビーム環境下にあった期間は new MPPC と同じであり、4.2 章で述べた表面損傷は電圧の印加に関係ないはずなので、この理由も理解できていない。

次に、PDE の減少速度の液体キセノン検出器内での位置依存性を調べるため、new MPPC について位置を液体キセノン検出器内の u 方向上流側、中心、下流側で分け (図 6.12)、PDE の減少速度を比較した。更に、検出器上部と下部 (図 6.14) の new MPPC について PDE 減少の速度を比較した。

結果はそれぞれ図 6.13, 6.15 である。6.13 から判断できるように、液体キセノン検出器において u 方向の中心 (ターゲットに近い) の MPPC が、同じ PDE で比較した際に PDE 減少速度が速いことがわかる。よって検出器中心の MPPC が PDE 減少の速度が大きい。図 6.15 では $PDE \leq 6\%$ において、検出器上部の MPPC の方が同じ PDE で比較すると PDE 減少速度が大きいことが分かる。これらの MPPC は液体キセノン検出器内において u 方向中心にある MPPC である。よって、検出器上部の中心の MPPC は下部の中心の MPPC よりも PDE 減少速度が大きいことが判明した。

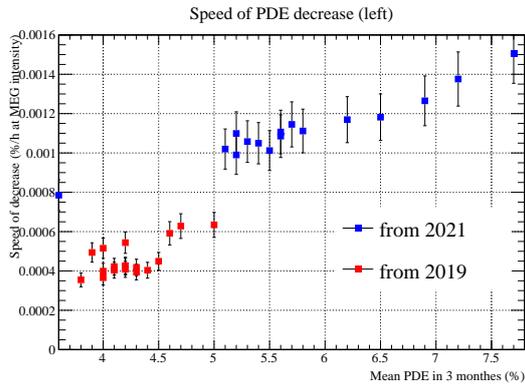


図 6.10 検出器下流側にある used MPPC と new MPPC の PDE 減少速度の比較。青が new MPPC、赤が used MPPC を表す。横軸は各 MPPC の 3 ヶ月間の PDE の平均を表す。誤差はフィッティングの際の誤差である。

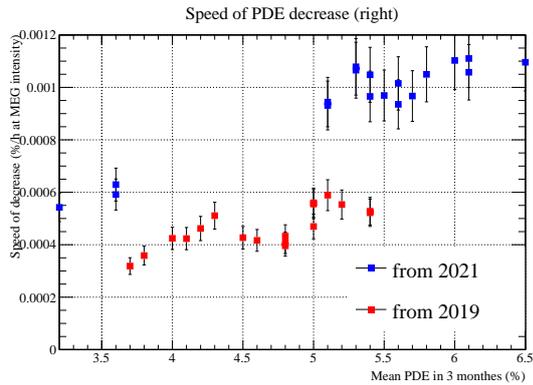


図 6.11 検出器上流側にある used MPPC と new MPPC の PDE 減少速度の比較。青が new MPPC、赤が used MPPC を表す。横軸は各 MPPC の 3 ヶ月間の PDE の平均を表す。誤差はフィッティングの際の誤差である。

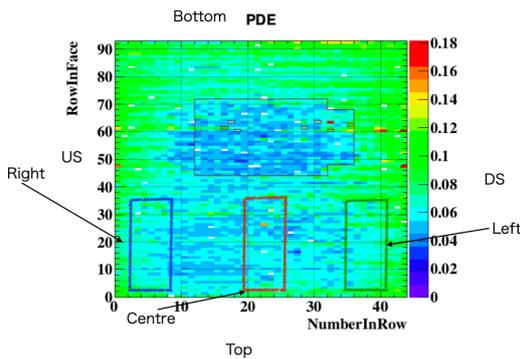


図 6.12 検出器内の各 MPPC の PDE。図 6.13 において比較した used MPPC と new MPPC の位置を色で示す。青が検出器上流側、赤が中心、緑が下流側を表す。US,DS はビーム上流側、下流側、top,bottom は検出器上部、下部を表す。それぞれの位置から 27 素子ずつ選択し、図 6.13 にプロットしている。

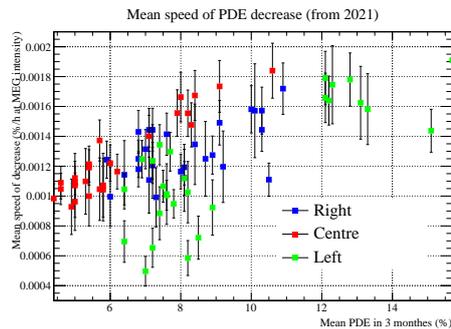


図 6.13 new MPPC の PDE 減少速度の位置ごとの比較。青は検出器上流側、赤が中心、緑が下流側を表す。横軸は各 MPPC の 3 ヶ月間の PDE の平均を表す。誤差はフィッティングの際の誤差である。

6.3.2 MPPC のアニーリングの有無による PDE 減少速度の比較

アニーリングを行った MPPC (annealed MPPC) とされていない MPPC (used MPPC) の PDE 減少の速度の比較を行った。各 annealed MPPC に対して v 軸対称な位置の used MPPC を選び、それらの PDE 減少の速度を比較した。結果は図 6.16 である。同じ PDE で比較した際にアニーリングされていない MPPC の方が PDE 減少速度が大きいため、annealed MPPC の方が

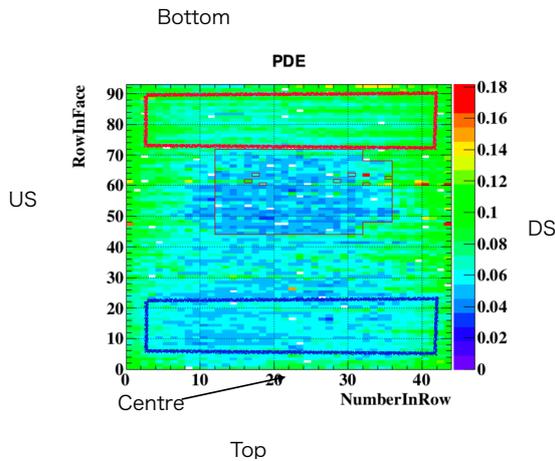


図 6.14 検出器内の各 MPPC の PDE。
 図 6.15 において比較した used MPPC と new MPPC の位置を色で示す。青が検出器上部側、赤が下部側を表す。US,DS はビーム上流側、下流側、top,bottom は検出器上部、下部を表す。それぞれの領域から 27 素子ずつ選択し、図 6.15 にプロットしている。

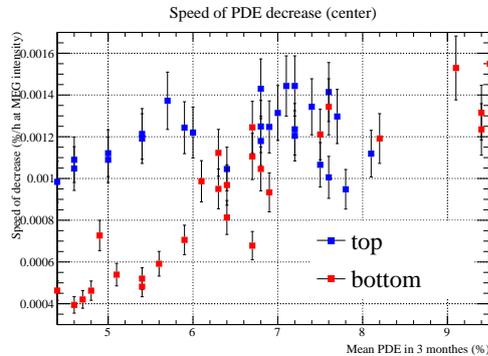


図 6.15 new MPPC の PDE 減少速度の位置ごとの比較。青は検出器上部、赤が下部を表す。横軸は各 MPPC の 3 ヶ月間の PDE の平均を表す。誤差はフィッティングの際の誤差である。

PDE の減少速度が遅いことがわかる。annealed MPPC において、used MPPC と同程度の PDE まで下がっている素子があるが、これは検出器 u 方向中心の MPPC である。

6.3.3 ビームレートによる PDE 減少速度の比較

今年度の MEG II 実験のミューオンビームの運転は、複数のビームレートで行った。そこで液体キセノン検出器内の全 MPPC の PDE 減少速度の平均のビームレートによる違いを評価した。全 MPPC の PDE の平均の推移を、各ビームレート期間で一次関数によりフィッティングする方法を用いた。

結果は表 6.1 である。データ期間は 8 月下旬から 11 月下旬の四か月間であり、ビームレートは $3 \times 10^7 \rightarrow 4 \times 10^7 \rightarrow 5 \times 10^7 \mu^+/\text{s}$ の順で推移している。ビーム強度 $4 \times 10^7 \mu^+/\text{s}$ 、 $5 \times 10^7 \mu^+/\text{s}$ での誤差が大きいのは、これらの期間は 1 週間程度であり、 $3 \times 10^7 \mu^+/\text{s}$ の期間 (約 3 ヶ月) と比べて短いためである。 $3 \times 10^7 \mu^+/\text{s}$ と他の 2 つの結果の比較から、ビームレートが大きいほど PDE 減少の速度は大きいと考えられる。しかし、 $4 \times 10^7 \mu^+/\text{s}$ の方が $5 \times 10^7 \mu^+/\text{s}$ よりも PDE 減少速度が速い。現在考えている原因は、 $5 \times 10^7 \mu^+/\text{s}$ の期間の方が MPPC の PDE が小さく、PDE 減少の速度が小さくなるため (6.3 章の各結果より) と考えている。また、 $4 \times 10^7 \mu^+/\text{s}$ から $5 \times 10^7 \mu^+/\text{s}$ へのビームレートの変更時に、ビームスリットを変更したことも原因の候補である。但し、現在これらの影響を定量的に評価することはできていない。

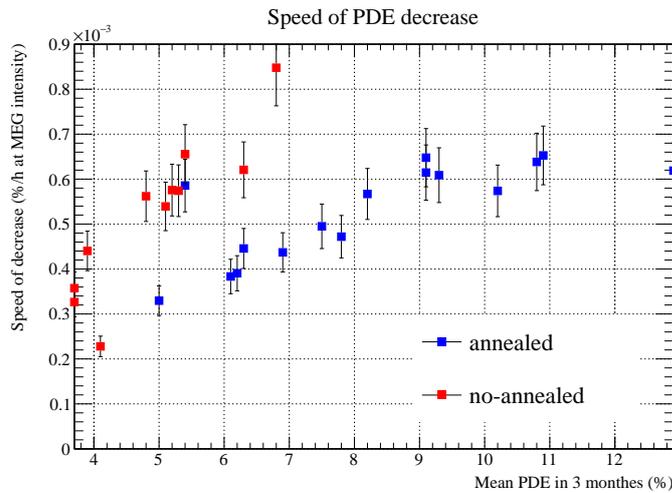


図 6.16 PDE の減少速度のアニーリングの有無による比較。青が annealed MPPC、赤が used MPPC である。誤差はフィッティングの際の誤差である。

表 6.1 PDE 減少速度のビームレートごとの比較。誤差は一次関数でのフィッティングの際の誤差を取っている。

ビームレート (μ^+ / s)	PDE 減少速度 (%/h)	誤差 (%/h)
3×10^7	7.6×10^{-6}	3×10^{-8}
4×10^7	1.8×10^{-5}	5×10^{-6}
5×10^7	1.2×10^{-5}	4×10^{-6}

6.4 PDE 減少についての考察

以上の結果からのまとめを以下に列挙する。

1. 現在の PDE が大きいほど、PDE の減少速度は大きい。
2. MPPC の読み出し使用期間が長いほど PDE の減少速度は遅い。
3. 液体キセノン検出器内で u 方向中心 (ターゲットに近い) の MPPC ほど PDE の減少速度は速い。
4. u 方向中心の MPPC について、検出器上部にある MPPC ほど PDE の減少速度は速い。
5. アニーリングされた MPPC ほど PDE の減少速度は遅い。
6. ビーム強度が大きいほど PDE 減少速度は大きくなる。

3、6 の結果は、VUV 光と γ 線による表面損傷を疑った場合に説明できる結果である (4.2 章)。しかし 4 は VUV 光と γ 線の照射量の位置依存性では説明できない結果である。更に 2、5 は、現在疑っている PDE 減少の過程である表面損傷では説明できない結果である。これらの結果から、

PDE 減少の原因は位置依存性のあるものではあるが、その減少の過程は必ずしも VUV 光や γ による表面損傷ではない可能性が出てきたと結論できる。1 からは、PDE の減少速度が PDE の減少とともに小さくなることを示唆しており、PDE 減少の推移は MEG II 実験の運転計画に大きく関わるため、非常に重要な結果と考えられる。

今後の展望は、これらの結果は液体キセノン検出器内での MPPC の PDE 測定の系統誤差の影響を可能な限り排除することである。4 章において、液体キセノン検出器内の MPPC の PDE は式 4.7 で求めていると述べた。現在 PDE は、液体キセノン検出器内の光量分布を MC シミュレーションで再現できていない状態で求めている。光量分布の問題の主な要因として、検出器内の PMT のホルダーに使われているアルミニウム壁の反射があり、本研究時点ではホルダーによる反射率を 0 としていた。一方、現在では反射を考慮することで (0.5 程度の反射率) 実際の液体キセノン検出器内の光量分布を概ね再現していることが分かっている。本研究はこの反射を考慮していない状態で求めた PDE で行ったため、比較に用いた各素子を検出器の対称な位置で選ぶことは行っているものの、上の結果はこの系統誤差の影響を否定できていない。

第7章

宇宙線データの解析

7.1 宇宙線による液体キセノン γ 線検出器のモニター

液体キセノン検出器のモニターには、いくつかのソースが用いられている。

- Cockcroft-Walton (以下 CW と記す) : CW 加速器からの 440 keV の陽子ビームを $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ターゲットに照射することで、 ${}^7_3\text{Li}(p, \gamma){}^8_4\text{Be}$ という反応により 17.6 MeV の生成位置の広がり小さい単色 γ 線が得られる (図 7.1)。
- Neutron Generator (以下 NG と記す) : 中性子を $d(d, {}^3\text{He})n$ の反応で発生させ、ポリエチレンで熱中性子化し、Ni に照射して捕獲され放出される 9 MeV の γ 線によるモニター (図 7.2)。
- 宇宙線 : 液体キセノン検出器に上方から入射している。

3つのソースのエネルギー推移を比較することで、検出器に不自然な異変がないか (検出器の安定性) を常にモニターすることが可能である。宇宙線を用いて検出器のモニターを行う利点は以下が挙げられる。

- 宇宙線は常に検出器に入射する。
- 他の検出器のモニターに用いられるソースと干渉しない。

よって、宇宙線データは他のソースとは異なり、常時取得することができる重要なソースとなる。

液体キセノン検出器における宇宙線のエネルギースペクトルは図 7.3 である。物質中を荷電粒子がエネルギーを落としながら通過するため、フィッティングはランダウ分布を仮定している。エネルギーの低いピークが見られるが、これは宇宙線が液体キセノン検出器の一部を短く通過するイベントによるものと考えられる (図 7.4)。

他の検出器のモニターソースによるピークの推移と比較しながら検出器の安定性をモニターする際、宇宙線によるエネルギーピークが検出器の安定性以上に大きく動くことなく安定して推移するイベントの選別方法が求められる。そこで、以下の複数の選別方法を用意し、この推移の安定性を評価した。

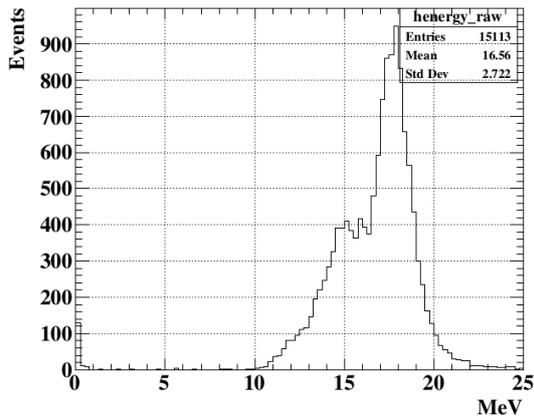


図 7.1 液体キセノン検出器における CW による 17.6MeV のエネルギーピーク。14.6MeV 付近にもピークが確認できる。

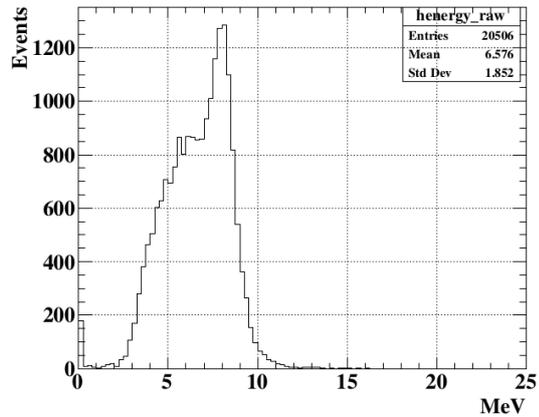


図 7.2 液体キセノン検出器における NG による 9MeV のエネルギーピーク。

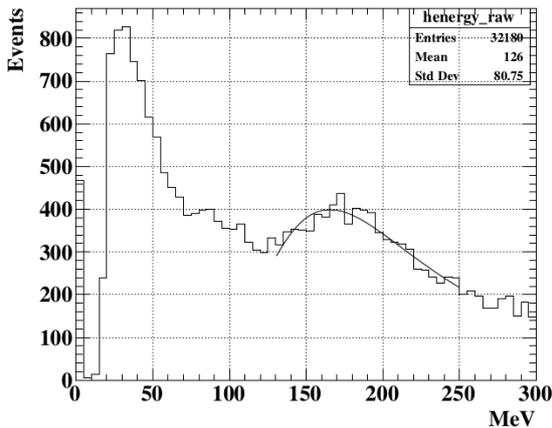


図 7.3 液体キセノン検出器の宇宙線イベントのエネルギースペクトル。フィットはランダム分布で行った。

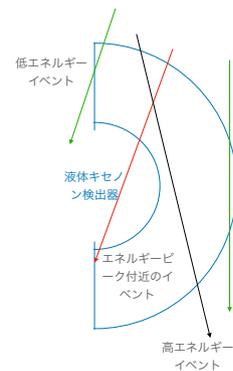


図 7.4 液体キセノン検出器における宇宙線が落とすエネルギーの違いの模式図。緑が低エネルギーイベント、赤がエネルギーピーク付近のイベント、黒が高エネルギーイベントである。

- 検出器の一番外側の PMT と内側の MPPC (outer と inner、図 2.9) とで落とす光量の比による選別。
- 検出器のターゲット方向の深さ (w 方向、図 2.9) による選別。w=0 が MPPC の敷き詰められた入射面である。今回は $w < 20 \text{ cm}$ と $w < 30 \text{ cm}$ で行った。

選別によるエネルギースペクトルは図 7.5 である。これらのスペクトルのフィッティングから得られたエネルギーピークの日ごとの推移を図 7.6 に示す。ピーク推移の安定性の評価は、各選別においてこれを一次関数でフィットし、データ点とフィット結果の差の絶対値の標準偏差を取ることでより評価した。

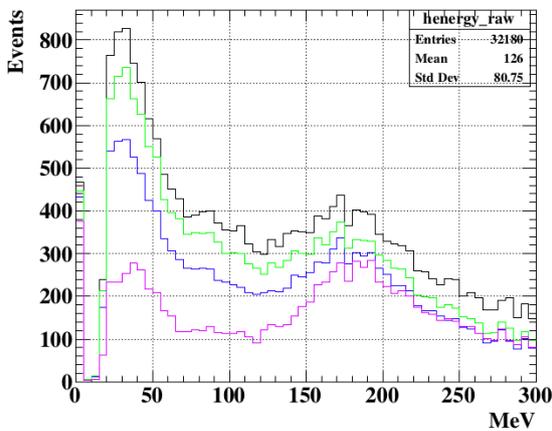


図 7.5 イベントの選別によるエネルギースペクトルの変化。黒は何も選別を入れないもの、緑、青、紫はそれぞれ $w < 30$ cm, $w < 20$ cm, $outer/inner < 2$ による選別を入れたもの。

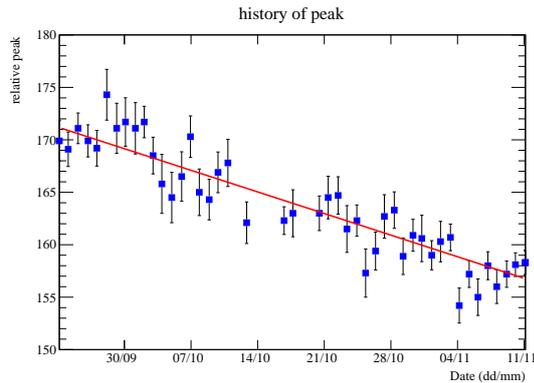


図 7.6 イベントの選別をかけていない場合のエネルギーピークの推移。

表 7.1 エネルギーピークの推移の安定性。データ点は 45 個である。

選別	安定性	図 7.6 のフィッティングの χ^2
なし	2.41	104
$w < 20$ cm	1.82	57.5
$w < 30$ cm	2.08	61.6
$outer/inner < 2$	2.96	299

結果は表 7.1 である。 w 方向による選別 ($w < 20$, $w < 30$) がより安定したエネルギーピークの推移を得られることが分かった。

次に、液体キセノン検出器のモニターに用いられる他のソースとの比較を行った。液体キセノン検出器のモニターには宇宙線の他に CW と NG がソースとして用いられる。これらのエネルギーピークと宇宙線のエネルギーピークの推移の比較を行った。この際、CW、NG についてはイベントの選別はしておらず、宇宙線については表 7.1 の $w < 20$ による選別をしている。結果を図 7.7 に示す。3つのソースのエネルギーピークは同じような振る舞いを見せることがわかる。CW、NG と宇宙線のデータ点の差はそれぞれ 1.60 %、1.94 % である。宇宙線のモニターを常に行うことで、他の二つのモニターソースのデータとの比較から、液体キセノン検出器の安定性のモニターが可能となる。また、各モニターソースのエネルギーピークの図 7.7 の期間での減少速度と、この期間の MPPC の PDE の減少速度を表 7.2 に示す。各ソースでエネルギーピークの減少速度が異なるが、各ソースからの γ 線が MPPC と PMT へ落とす光量の比の違いによる、PDE 減少の寄与の違いからくるものと考えられる。

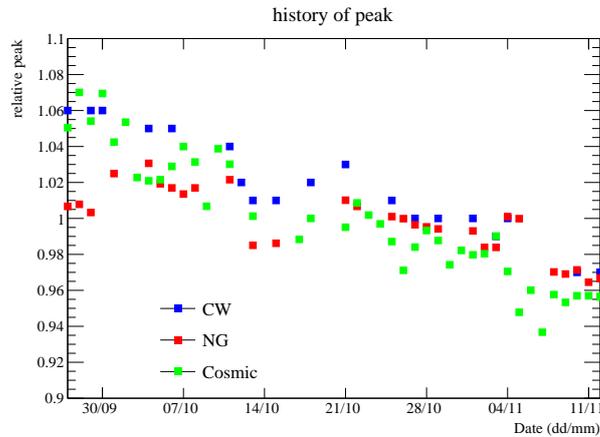


図 7.7 各モニターソースのエネルギーピークの推移。赤が NG、青が CW、緑が宇宙線である。エネルギースケールは図の期間の各エネルギーピークの前で合わせていて、横軸は日付である。10 月 14 日付近で 3 つのソースのピークが同様に下がっていることが分かる。

表 7.2 各ソースのエネルギーピークの減少速度。ミュオンビーム強度 3×10^7 での減少速度である。

ソース	減少速度 (%/h)	誤差
CW	0.008	0.0006
NG	0.004	0.0006
宇宙線	0.009	0.0005
PDE 減少速度	0.011	0.0005

7.2 ミュオンビーム運転中の液体キセノン検出器における宇宙線のデータの取得

宇宙線は常に液体キセノン検出器に入射するため、ミュオンビーム運転中であってもデータ取得が可能である。ビーム運転中の宇宙線データの取得が可能となれば、検出器の安定性をより頻りにモニターすることができる。その際、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索などに影響しないようなデータ取得が必要である。以下では、ビーム運転中に宇宙線データを取得する際の energy threshold の決定に関する研究結果を述べる。

7.2.1 データ取得の際に求められる energy threshold

ミュオンビーム運転中の宇宙線データの取得の際には以下のことが要求される。

- $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ の信号のエネルギー (52.8 MeV) より十分大きい energy threshold。
- $\mu^+ \rightarrow e^+ X, X \rightarrow \gamma\gamma$ (X: New light particle) 探索の効率に影響しない energy thresh-

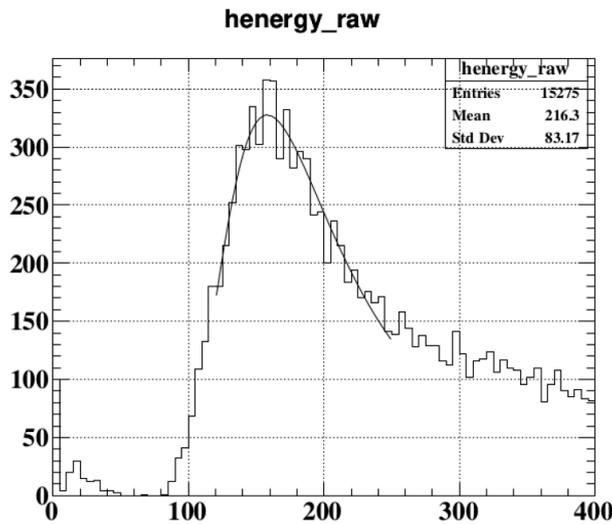


図 7.8 ビーム運転中において $E_{\text{thd}} \sim 100$ MeV で取得した液体キセノン検出器における宇宙線のエネルギースペクトル。横軸はエネルギー (MeV)、縦軸はイベント数である。ピーク付近のエネルギーが切れてしまい、フィッティングの際のピーク値に影響しているように見える。

old (~ 80 MeV) (B [41])。

- MEG II 実験のデータ容量を削減しつつ、宇宙線のエネルギーピークに干渉しない energy threshold (図 7.8)。

以上から、ミューオンビーム運転中の液体キセノン検出器における宇宙線データ取得のための energy threshold E_{thd} は、

- 80 MeV 以上であり、宇宙線のエネルギーピークに干渉しない、可能な限り大きな値であることが要求される。

7.2.2 適切な energy threshold の決定

液体キセノン検出器における宇宙線データ取得の energy threshold は、検出器全体での検出光電子数でかけている。そこで以下の手順でミューオンビーム運転中の宇宙線データ取得のための検出光電子数の threshold (以下 Q_{thd} と記す) を決定した。

1. ミューオンビーム運転をしていない際の宇宙線エネルギースペクトル (7.1 章) に対し、いくつかの Q_{thd} を threshold としてかけ、そのスペクトルをフィットし、エネルギーピークの値を出す (図 7.9, 7.10)。
2. threshold をかけていない宇宙線エネルギースペクトルのフィッティングによるエネルギーピークの値との差を評価する。
3. フィッティングの下限依存性が考えられるため、下限をいくつか用意し、1、2 の評価を繰り返す。

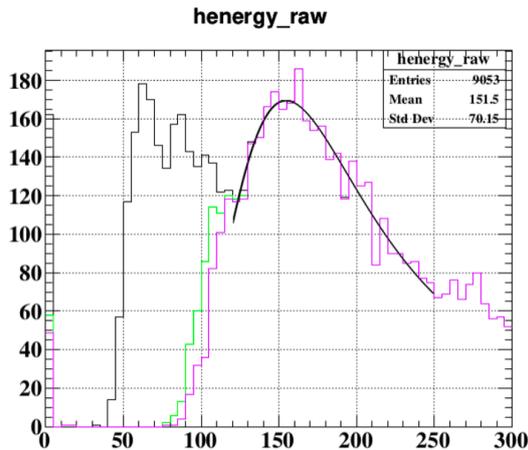


図 7.9 液体キセノン検出器におけるビーム運転をしていない際の宇宙線エネルギースペクトルにおいて、 Q_{thd} を threshold としてかけた場合のスペクトル。横軸はエネルギー (MeV)、縦軸はイベント数である。緑は $Q_{\text{thd}} = 6044000$ 、紫は $Q_{\text{thd}} = 6420000$ 、黒は何もかけていない場合のものである。

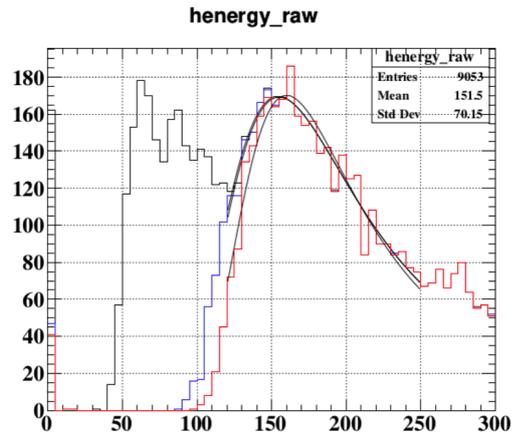


図 7.10 液体キセノン検出器におけるビーム運転をしていない際の宇宙線エネルギースペクトルにおいて、 Q_{thd} を threshold としてかけた場合のスペクトル。横軸はエネルギー (MeV)、縦軸はイベント数である。青は $Q_{\text{thd}} = 6800000$ 、赤は $Q_{\text{thd}} = 7560000$ 、黒は何もかけていない場合のものである。

表 7.3 各 Q_{thd} のエネルギーピークへの影響の、フィッティングの範囲を変えて評価した値。使用したデータ数は 10 月 25 日-11 月 12 日の 19 個である。誤差は各フィット範囲において、各データでのピークのずれの標準偏差をとっている。

Q_{thd}	フィット範囲 110-250 (MeV) でのピークのずれ (%)	フィット範囲 120-250 (MeV) でのピークのずれ (%)	フィット範囲 130-250 (MeV) でのピークのずれ (%)
6044000 (~80 MeV)	0.3±0.1	0.1±0.1	0.1±0.1
6420000 (~85 MeV)	0.5±0.1	0.3±0.1	0.2±0.1
6800000 (~90 MeV)	1.7±0.3	0.7±0.2	0.3±0.1
7560000 (~100 MeV)	4.4±0.7	3.4±0.5	1.3±0.4

返す。

結果は表 7.3 である。 $Q_{\text{thd}} \leq 6800000$ では、フィット範囲の下限が 120 MeV 以上であれば、threshold によるエネルギーピークへの干渉を抑えることができる。よって、ミュオンビーム運転中において $Q_{\text{thd}} \sim 6800000$ (~90 MeV) を用いて液体キセノン検出器における宇宙線データを取得すれば、前節の要求を満たすことが可能となる。

7.3 結論

液体キセノン検出器の宇宙線データによるモニターを用いることで、他の検出器のモニターソースである CW、NG とのエネルギーピークの推移との比較により、液体キセノン検出器の安定性をモニターできることがわかった。一方で、CW、NG はそれぞれのためのターゲットやビームラインがミュオンビーム運転時のそれらと干渉することから、常時利用することはできない。宇宙線は特別なターゲットやビームラインを必要とせず、更に今回の研究でミュオンビーム使用時においても、適切な energy threshold をかけることで物理解析に影響せずにモニターが可能であるという結論が得られた。よって、宇宙線は MEG II 実験においてビーム使用の有無に関係なく常時液体キセノン検出器をモニターできる非常に重要なソースとなる。今後の展望は、光センサーのキャリブレーションを行うことができていないので、これらを考慮しより良い検出器の安定性のモニターを行う。

謝辞

はじめに、MEG II 実験に参加する機会を与えてくださった森俊則教授、大谷航准教授に心よりお礼申し上げます。新型コロナウイルス感染症により海外渡航が難しい情勢において、短い期間ではありましたが海外において研究を行うという貴重な経験をすることができました。岩本敏幸助教授には、研究において多くの助言を頂くと同時に、スイスでの生活についても多くのことを教えていただきました。内山雄祐特任助教、潘晟特別研究員、小林暁氏、恩田理奈氏、大矢淳史氏、家城佳現東京大学宇宙線研究所助教、そして小川真治現九州大学先端素粒子物理研究センター特別研究員には、著者の浅学により大変ご迷惑をおかけしましたが、研究において多くの助言や議論の場を頂き、非常に貴重で楽しい研究生生活を送ることができました。辻直希氏には東京の実験室での研究において、測定器に関する多くの助言を頂いたと同時に、本研究室のもう一方のテーマである ILC 計画について多くのことを教えていただきました。米本拓氏、増田隆之介氏、松下彩華氏、上田裕貴氏、ICEPP の他研究室の皆様、PSI の研究者の皆様、そして特に同期である山本健介氏、池田史氏、村田樹氏には著者の研究生生活を非常に楽しいものにして頂きました。秘書の皆様には、実験のための物品購入が多く PSI への海外渡航手続きも必要であった著者の研究をサポートして頂き大変感謝しています。家族には修士課程まで研究を続けさせてもらえたことに大変感謝しています。

科学の中で素粒子物理学という学問は、それを知らない方々に内容や意義を説明することが非常に難しいと思います。物性物理学や機械工学、化学、免疫学など人間生活に広く使われている分野ではないため、「それは社会の何の役に立つのか。」、「それを勉強してどのように仕事や将来に活かしたいのか。」という問いを投げられることが多くありました。当然のことです。今日の生活に役立っているわけではなく、今後社会に役立つかどうか不明確ではないことを研究している人は稀な存在です。どんな学問も最初はそうですが、一度社会に役立つとそのような問いを投げられることはなくなります。素粒子は物質の最小単位であり、物事の本質に迫る学問ですが、それを解明することは宇宙の謎を解くなどのロマンで行っているところが大きく、実用性は今のところなく、明日この状況が一転するとも思いません。自分の興味を最先端の研究で行えることは誇りであるはずでしたが、このような社会への実用性の問いを投げられる度に、自分がやっていることに自信が持てなくなりました。そんな時に、「自分たちには到底分からない素粒子の学問を研究していることは素晴らしい。」、「殆どの人は素粒子を勉強したくても理解できず終わる、だからそのような凄い学問を研究できることに自信と誇りを持って。」と背中を押してくださった方々に、この6年間の大学生活で大勢お会いしました。自分が研究者に向いていたかは分かりませんが、胸を張って自分の興味に逆らわず「理学の物理」の研究を最後まで行うことができたのは、皆様のおかげです。本当に感謝しています、ありがとうございました。

付録 A

VUV 光の VUV-MPPC への照射実験の結果

■VUV 光の常温照射 VUV 光の照射実験は、浜松ホトニクス社により行われた [42]。照射波長は 175 nm であり、減少速度はミュオンビーム強度 $7 \times 10^7 \mu/s$ に換算すると、 $1.7 \times 10^{-5} \%/h$ であった (図 A.1)。但し、モニターしたのはバイアス電圧が 0 でのセンサーカレントである。電流は電子・正孔対の生成効率と関連しているため、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。

■UV 光の常温照射 照射波長は 185–1000 nm であり、PDE の減少速度はミュオンビーム強度 $7 \times 10^7 \mu/s$ に換算すると、 $1.5 \times 10^{-6} \%/h$ であった (図 A.2)。

■UV 光の低温照射 照射波長は 185–1000 nm であり、本実験では常温照射も上の UV 光の常温照射とは別の実験として行われた。PDE の減少速度はミュオンビーム強度 $7 \times 10^7 \mu/s$ に換算すると、常温照射と低温照射についてそれぞれ $8.4 \times 10^{-7} \%/h$ 、 $1.7 \times 10^{-6} \%/h$ (低温環境下での測定値) であった (図 A.3)。

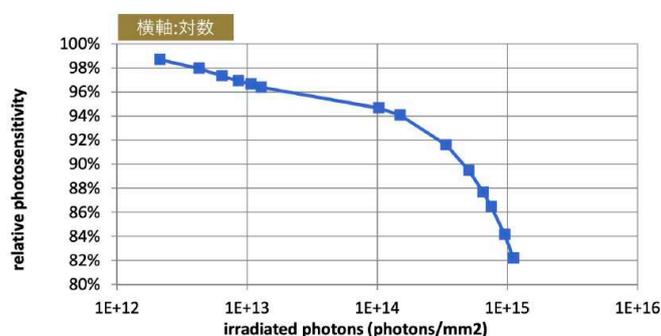


図 A.1 VUV 光の常温の MPPC への照射結果。[42]

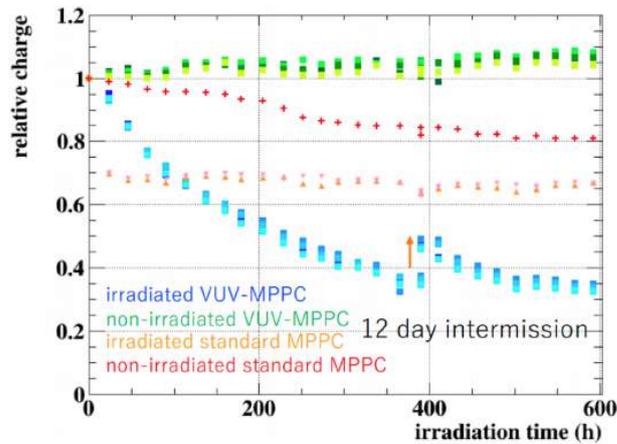


図 A.2 UV 光の常温の MPPC への照射結果。青のプロットが UV 光に対する PDE の推移である。[32]

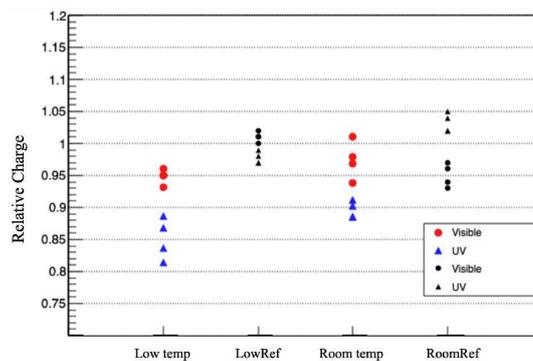


図 A.3 UV 光の低温と常温の MPPC への照射結果。青のプロットが UV 光に対する PDE の結果である。[25]

■VUV 光の低温照射 照射波長は 160–400 nm であり、PDE の減少速度は PDE の減少速度は ミューオンビーム強度 $7 \times 10^7 \mu/s$ に換算すると $-1.0 \times 10^{-3} \%/h$ であり、PDE が上昇した。この結果の解釈として、UV 光による表面洗浄と、PDE 測定時の窒素濃度の不定性*1を疑った。

■ α 線源と液体キセノンを用いた VUV 光の低温照射 液体キセノン検出器内の MPPC の環境に近い実験として、液体キセノンに MPPC と α を浸し、シンチレーション光を照射する実験が行われた。PDE の減少は確認されなかった (図 A.4)。

*1 VUV 光は空气中を殆ど進まないため、窒素を PDE 測定系に充満させた。

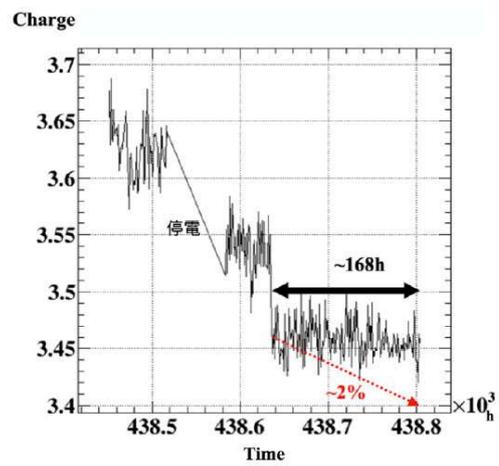


図 A.4 α 線源を用いた VUV 光の低温の MPPC への照射結果。2 度のジャンプがあるが、1 度目は停電による測定系の何らかの変化と考えられており、2 度目については不明である。[25]

付録 B

ME_x2G 反応探索

$\mu^+ \rightarrow e^+ X, X \rightarrow \gamma\gamma$ (X : new light particle) は、CLFV 反応の 1 つである。もし、ミューオンの静止質量よりも軽い新粒子 X (質量 m_X 、崩壊寿命 τ_X) が存在すれば、 $\mu \rightarrow e X$ 崩壊が超対称大統一理論などの新物理の枠組みでは起こり得る。 X の候補としては Axion-like particle[43]–[46]、Majoron[47],[48]、familon[49]–[52]、flavon[53],[54]、flaxion[55]、hierarchion[56]、強い相互作用をする重い粒子 [57],[58] がある。

MEG 実験の際に探索が行われ (図 B.1)、結果としては崩壊寿命 40 ps 以下において質量 20–45 MeV/ c^2 の範囲で発見されず、最も厳しい制限である質量 20–40 MeV/ c^2 の範囲において $\text{Br}(\mu \rightarrow e X, X \rightarrow \gamma\gamma) \leq O(10^{-11})$ (90 % C.L.) の結果を得た [60]。

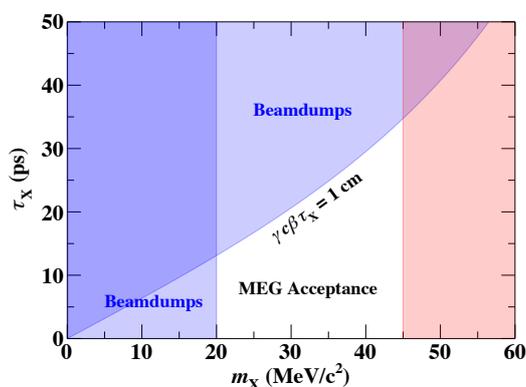


図 B.1 許容される新粒子 X の範囲。青の領域はすでに排除されている [59]。赤の領域は MEG 実験では観測できない領域。

参考文献

- [1] Higgstan. <http://higgstan.com/>
- [2] R. Barbieri, L. J. Hall 1994 “Signals for supersymmetric unification,” *Physics Letters B* 338, 212–218.
- [3] R. Barbieri, L. Hall, A. Strumia 1995 “Violations of lepton flavour and CP in supersymmetric unified theories,” *Nuclear Physics B* 445, 219–251.
- [4] P. Ciafaloni, A. Romanino, A. Strumia 1996 “Lepton flavour violations in SO(10) with large $\tan \beta$,” *Nuclear Physics B* 458, 3–22.
- [5] J. Hisano, T. Mori, M. Yamaguchi 1997 “Exact event rates of lepton flavor violating processes in supersymmetric SU(5) model,” *Physics Letters B* 391, 341–350.
- [6] J. Hisano, et al. 1995 “Lepton-flavor violation in the supersymmetric standard model with seesaw-induced neutrino masses,” *Physics Letters B* 357, 579–587.
- [7] J. Hisano, et al. 1996 “Lepton-flavor violation via right-handed neutrino Yukawa couplings in the supersymmetric standard model,” *Physics Review D* 53, 2442–2459.
- [8] J. Hisano, D. Nomura 1999 “Solar and atmospheric neutrino oscillations and lepton flavor violation in supersymmetric models with right-handed neutrinos,” *Physics Review D* 59, 116005.
- [9] J. Casas, A. Ibarra 2001 “Oscillating neutrinos and $\mu \rightarrow e, \gamma$,” *Nuclear Physics B* 618, 171–204.
- [10] A. M. Baldini, et al. 2016 “Search for the lepton flavour violating decay $\mu \rightarrow e + \gamma$ with the full dataset of the MEG experiment,” *The European Physical Journal C* 76, 434.
- [11] SINDRUM II Collaboration “A Search for muon to electron conversion in muonic gold” <https://inspirehep.net/literature/716542>
- [12] U. Bellgardt et al., Search for the decay $\mu \rightarrow 3e$. *Nucl. Phys. B* 299(1), 1–6 (1988). [https://doi.org/10.1016/0550-3213\(88\)90462-2](https://doi.org/10.1016/0550-3213(88)90462-2)
- [13] 小川真二. 修士学位論文, 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 https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/download/master/m2015_ogawa.pdf
- [14] 小林暁. 修士論文, MEG II 実験液体キセノン検出器における高精度なガンマ線位置測定に関

- する研究 https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/download/master/m2018_kobayashi.pdf
- [15] B. Lopez Paredes, H. M. Araujo, F. Froberg, N. Marangou, I. Olcina, T. J. Sumner, R. Taylor, A. Tomas and A. Vacheret, *Astropart. Phys.* 102, 56-66 (2018) <https://arxiv.org/abs/1801.01597>
- [16] K. Fujii, et al. 2015 “High-accuracy measurement of the emission spectrum of liquid xenon in the vacuum ultraviolet region,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 795, 293–297.
- [17] Y. Hisamatsu 2005 “The Performance Test of Photomultiplier for MEG Liquid Xenon Calorimeter,” Master’s thesis, The University of Tokyo.
- [18] S. Ritt, R. Dinapoli, U. Hartmann 2010 “Application of the DRS chip for fast waveform digitizing,” *Nucl. Instr. Meth. A* 623, 486–488.
- [19] A. M. Baldini, et al. 2018 “The design of the MEG II experiment,” *The European Physical Journal C* 78, 3
- [20] 浜松ホトニクス. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/03_handbook.pdf
- [21] Sascha Krause. SiPM Saturation AHCAL Meeting DESY 2017 https://agenda.linearcollider.org/event/7807/contributions/40543/attachments/32561/49493/AHCAL_Saturation_Krause_v9.pdf
- [22] 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>
- [23] 小林暁. ”MEG II 実験液体キセノンガンマ線検出器の全チャンネル読み出しでの性能評価” 2021 年秋季大会
- [24] 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
- [25] 島田耕平. 修士論文, 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 https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/download/master/m2020_shimada.pdf
- [26] 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>
- [27] 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>
- [28] 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>.
- [29] Erika Gautti, Radiation damage on silicon photo-multipliers, <https://www.desy.de/~garutti/LECTURES/SiPM-RadDamage.pdf>
- [30] 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>
- [31] 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>
- [32] 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
- [33] 浜松ホトニクス. キセノンフラッシュランプカタログ. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/Xe-F_TLS1022J.pdf
- [34] 浜松ホトニクス. キセノンフラッシュランプモジュールカタログ
- [35] eSource optics. 172nm VUV Narrowband Filter <https://www.esourceoptics.com/172fnblink.html>
- [36] 八光電機. https://www.hakko.co.jp/newgoods/cat_sr.pdf
- [37] NIST https://physics.nist.gov/cgi-bin/Xcom/xcom3_1
- [38] estar https://physics.nist.gov/cgi-bin/Star/e_table.pl
- [39] 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
- [40] S. Croft, Nucl. Instr. Meth. A, "The use of neutron intensity calibrated $^9\text{Be}(\alpha, n)$ sources as 4438 keV gamma-ray reference standards" , 281, 103-116, (1989).
- [41] MITSUTAKA NAKAO. Search for lepton flavor violating muon decay mediated by a new light particle in the MEG experiment https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/download/doctor/phD2020_nakao.pdf
- [42] 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)
- [43] R. D. Peccei, H. R. Quinn, CP conservation in the presence of pseudoparticles. Phys. Rev. Lett. 38(25), 1440-1443 (1977). doi:10.1103/PhysRevLett.38.1440
- [44] S. Weinberg, A new light boson? Phys. Rev. Lett. 40(4), 223-226 (1978). doi:10.1103/PhysRevLett.40.223
- [45] F. Wilczek, Problem of strong P and T invariance in the presence of instantons. Phys. Rev. Lett. 40(5), 279-282 (1978). doi:10.1103/PhysRevLett.40.279
- [46] C. Cornella, P. Paradisi, O. Sumensari, Hunting for ALPs with lepton flavor violation. J. High Energy Phys. 158 (2020). arXiv:1911.06279v1
- [47] Y. Chikashige, R. N. Mohapatra, R. D. Peccei, Are there real goldstone bosons asso-

- ciated with broken lepton number? *Phys.Lett. B* 98(4), 265–268 (1981). doi:10.1016/0370-2693(81)90011-3
- [48] G. B. Gelmini, M. Roncadelli, Left-handed neutrino mass scale and spontaneously broken lepton number. *Phys. Lett. B* 99(5), 411–415 (1981). doi:10.1016/0370-2693(81)90559-1
- [49] D. B. Reiss, Can the family group be a global symmetry? *Phys. Lett. B* 115(3), 217–220 (1982). doi:10.1016/0370-2693(82)90647-5
- [50] F. Wilczek, Axions and family symmetry breaking. *Phys. Rev. Lett.* 49(21), 1549–1552 (1982). doi:10.1103/PhysRevLett.49.1549
- [51] Z. Berezhiani, M. Khlopov, Physical and astrophysical consequences of breaking of the symmetry of families. (In Russian). *Sov. J. Nucl. Phys.* 51, 1479–1491 (1990)
- [52] J. Jaeckel, A family of WISPy dark matter candidates. *Phys. Lett. B* 732, 1–7 (2014). doi:10.1016/j.physletb.2014.03.005, arXiv:1311.0880
- [53] K. Tsumura, L. Velasco-Sevilla, Phenomenology of flavon fields at the LHC. *Phys. Rev. D* 81(3) (2010). doi:10.1103/PhysRevD.81.036012
- [54] M. Bauer, T. Schell, T. Plehn, Hunting the flavon. *Phys. Rev. D* 94(5) (2016). doi:10.1103/PhysRevD.94.056003, arXiv:1603.06950
- [55] Y. Ema et al., Flaxion: a minimal extension to solve puzzles in the standard model. *J. High Energy Phys.* 2017(1) (2017). doi:10.1007/JHEP01(2017)096, arXiv:1612.05492
- [56] O. Davidi et al., The hierarchion, a relaxion addressing the Standard Model’s hierarchies. *J. High Energy Phys.* 2018(8) (2018). doi:10.1007/JHEP08(2018)153, arXiv:1806.08791
- [57] Y. Hochberg et al., Mechanism for thermal relic dark matter of strongly interacting massive particles. *Phys. Rev. Lett.* 113(17) (2014). doi:10.1103/PhysRevLett.113.171301
- [58] Y. Hochberg et al., Model for thermal relic dark matter of strongly interacting massive particles. *Phys. Rev. Lett.* 115(2) (2015). doi:10.1103/PhysRevLett.115.021301
- [59] B. Dobrich et al., ALPtraum: ALP production in proton beam dump experiments. *J. High Energy Phys.* 2016(2), 1–27 (2016). doi:10.1007/JHEP02(2016)018, arXiv:1512.03069
- [60] A.M.Baldini et al. Search for lepton flavour violating muon decay mediated by a new light particle in the MEG experiment <https://link.springer.com/article/10.1140/epjc/s10052-020-8364-1>