

■ 研究紹介

MEG II 実験 一分岐比 10^{-14} 台での $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊探索—

東京大学 素粒子物理国際研究センター

家城 佳, 内山 雄祐

iekikei@icepp.s.u-tokyo.ac.jp, uchiyama@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

2018 年(平成 30 年)4 月 30 日

1 はじめに

東京大学を中心とする国際共同グループはスイス・ポルシェラーレ研究所 (PSI) にて、荷電レプトンの世代間混合現象となる $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊の発見を目指し、MEG 実験を 2008–2013 年にかけて行った。その最終結果は [1] にて報告され、[2] にて総括されている。先行実験の上限値を 30 倍更新する $\mathcal{B}(\mu^+ \rightarrow e^+\gamma) < 4.2 \times 10^{-13}$ (90% C.L.) という制限を付けたが、残念ながら発見には至らなかった。しかし、これで話が終わるわけではない。同研究グループは測定器のアップグレードとビーム強度の増強により感度を約 10 倍改善する実験計画 MEG II を 2012 年末に提案し [3]、その準備を進めてきた。2015 年以降、実際の環境下での試験・性能評価を目的として、組み上げられた測定器から順次インストールし、大強度ミューオンビームを用いたパイロットランを実施している。現在はその最終局面を迎えているところである。最近、提案書以降の更新をまとめた実験設計書を出版した [4]。本稿では、その要点と最新の状況を報告する。

検出したい信号、 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊は、静止正電荷ミューオンの二体崩壊であり、したがって、それぞれミューオン静止質量の半分 (52.8 MeV) のエネルギーを持った陽電子とガンマ線が、同時に正反対の方向に放出される事象である。一方、高計数率となる MEG II 実験では、別々のミューオン崩壊に起源をもつ陽電子とガンマ線が、またま重なり合って信号事象のように観測されてしまう偶発的背景事象が支配的な背景事象となる。52.8 MeV 付近の陽電子はミューオンの通常崩壊 ($\mu^+ \rightarrow e^+\nu_e\bar{\nu}_\mu$) から生じる。信号領域の背景ガンマ線はミューオンの輻射崩壊 ($\mu^+ \rightarrow e^+\nu_e\bar{\nu}_\mu\gamma$) と、陽電子が飛行中に測定器物質中の電子と起こす対消滅の二つの起源がある。

MEG II 実験の全体像を図 1 に示す。基本的な実験原理は MEG を踏襲している。実験の仕組みに関しては記事 [2] を参照いただきたい。本稿では、変更点・改善点に焦点をあてて紹介する。ざっくりいようと、ビーム強度 2 倍、検出効率 2 倍、そして各物理量の測定精度（検出

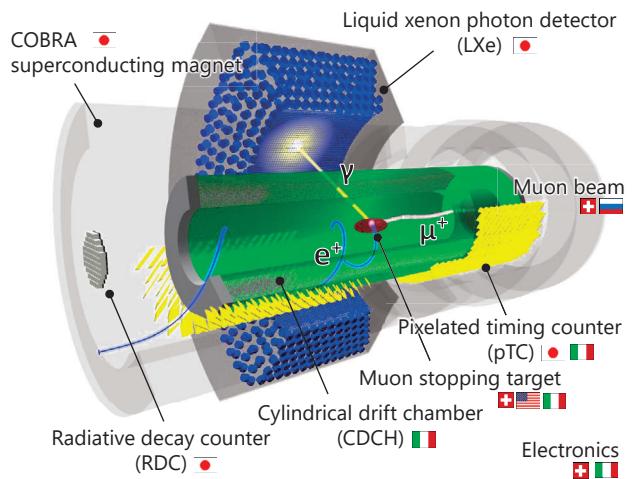


図 1: MEG II 実験装置全体像。

器分解能）を 2 倍改善することで探索感度を 10 倍向上させることを目指している。MEG II で期待される性能を MEG と比較する形で表 1 にまとめる。以降の章で、いかにこれを達成するか説明していく。

10 倍の感度向上で十分かという問い合わせに対する答えは人によるだろう。新物理の直接証拠となる実験結果がなかなか出てこない中、LHC 実験によって新物理のエネルギー スケールはどんどん押し上げられてきている。 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 探索のような事象確率を測る実験の場合、新物理スケールに対する感度は、基本的に分岐比感度の逆数の四乗根に比例する。つまり、10 倍の感度向上は 1.8 倍のスケールでの探索に相当する。たかが二倍弱だが、重要な領域をカバーする（たとえば、最近のレビューとして [5] を参照）。超対称性を導入した大統一およびシーソー模型において、MEG II の期待感度は 5–10 TeV の超対称粒子の寄与を捉えることができる。LHC および HL-LHC で超対称粒子が検出されない場合でも MEG II によってカバーできる可能性はおおいにある。ただし、直接探索と比べ、超対称性の破れの機構やそのパラメータに依存する点が間接探索の弱い点である。近い将来、超対称粒子が発見された場合は、MEG II での探索はそ

表 1: MEG II 期待性能のまとめと MEG との比較

Resolution	MEG	MEG II
E_{e^+} (keV)	380	90–130
θ_{e^+}/ϕ_{e^+} (mrad)	9.4/8.7	5.5/4
E_γ (%) ($w_\gamma < 2$)/($w_\gamma > 2$ cm)	2.4/1.7	1.1/1.0
$u_\gamma/v_\gamma/w_\gamma$ ^{a)} (mm)	5/5/6	2.6/2.2/5
$t_{e^+\gamma}$ (ps)	122	65–85
Efficiency & Rate		
ϵ_γ (%)	63	69
ϵ_{e^+} (%)	30	70 ± 10
R_{μ^+} (s ⁻¹)	3×10^7	7×10^7
Sensitivity (90% C.L.)	5.3×10^{-13}	6×10^{-14}

^{a)} ガンマ線のコンバージョン位置を表す。 u はビーム軸方向, v は方位方向, w は動径方向。

の結果にかかわらず、その背後の物理の同定に貴重な情報を与える。

他にも、近年 B の物理に現れているアノマリーを説明できると注目を集めているレプトクォーク模型は、特殊な対称性やパラメータの微調整を課さない限り、一般的に $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ にも大きく寄与する [6]。同様のことが、長年未解決となっているミューオン異常磁気能率の標準理論からのずれ ($(g-2)_\mu$ アノマリー) を説明する多くの模型についてもいえる [7]。このような状況の中、LHC, Belle II, $(g-2)_\mu$ 実験らと並行して MEG II 実験を実施する意義は高いと考えている。

2 ミューオンビームと静止標的

ミューオン源は MEG に引き続き PSI · πE5 ビームラインを使用する。PSI には 1.3 MW の 590 MeV 陽子サイクロotron (RF 周波数 50.63 MHz) を中心とした加速器群施設があり、πE5 はその二次ビームラインの一つである。直流ミューオンビームとして世界最高強度を誇り、 $1 \times 10^8 \mu^+/s$ を超える表面ミューオンを供給する。MEG 実験時は強度を $3 \times 10^7 \mu^+/s$ に落として使用していた。これは測定器がこれ以上の高計数率に対応できないことと、背景事象が増え感度が改善できることによる。MEG II ではこのビーム強度を使い切ることで現有する施設における究極の $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 探索を目指す。

測定器までのビーム輸送光学系は MEG と同じものを使用する。後述する静止標的での静止効率を考慮すると $7 \times 10^7 \mu^+/s$ が MEG II でのミューオン静止頻度となる。MEG 実験時に実証され、MEG II パイロットランにおいてすでに使用している。

ビームラインの調整は、これまで年ごとに¹ランを開始する前に一ヶ月ほどかけて行っていた。ランの途中で MEG ビームラインより上流で問題や変更が生じると、ビーム軌道がずれたり、強度が変化したりすることがあった。そこで、MEG II では新たにビームをモニターするシステムを複数開発している。次に記述する新しい静止標的もまた、そのうちの一つである。これらの新しいシステムにより継続的にビームの状態を監視し、変化が生じた際は修正を加えることが可能となる。さらに、ビーム調整の時間も短縮され、ビームタイムの効率的な使用が期待される。

29.8 MeV/c で生成された表面ミューオンをビームライン中に設置した減速材で減速し、へろへろな状態で測定器中心まで輸送し、最終的に薄膜の標的に静止させる。標的の厚みは崩壊陽電子の多重散乱を抑えるため、また、陽電子が標的中の物質と相互作用して生成されるガンマ線の発生を抑制するために重要な要素である。MEG では 205 μm 厚のポリエチレンベースのシートを使用していたが、より高い分解能・より少ない背景ガンマ線を達成するために 140 μm 相当の物質量が要請される。ミューオンビームの運動量分布は MEG と変わらないので、ビーム方向の厚みを保ちながら検出器方向の厚みを減らすために、標的のビーム軸からの設置角度を 21° から 15° にすることを実現する。

標的素材としては、新たにシンチレーティングシート (BC-400B) を用いる。これにより、標的上のビームプロファイルと強度が直接モニター可能となる。標的から発せられたシンチレーション光をビーム軸下流に設置した鏡を介して陽電子スペクトロメータ外に設置する CCD カメラで検出する。ただし、これはイベント毎にミューオンや陽電子を検出しようとする、いわゆるアクティブ標的ではない点には注意してほしい。MEG II ではシンチレーティングファイバを用いるアクティブ標的の検討・開発も進めてきたが、さまざまな技術的困難のため現在実現可能性は見られていない。

静止標的は、ただミューオンを静止するだけではなく、崩壊点を二次元に制約する。つまり、ミューオン崩壊点は陽電子の再構成された飛跡と標的面との交わる点として再構成される。この際、標的位置や角度に不定性があると、また、平面からのずれ (歪み) があると崩壊点のみでなく陽電子の放出方向に誤差を与えてしまう。MEG における $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 探索の最大の系統誤差はここにあった。MEG II では標的位置・形状を高精度で恒常にモニターするシステムを開発している。図 2 に 2017 年パイロットランで使用した静止標的のプロトタイプを示す。透明なシンチレーティングシート上に格子点パターンが印刷されている。ビームライン中の上流側に

¹ PSI の加速器は例年クリスマス前から 5 月頭まで停止される。これはスイスでは冬季に電気消費量が高くなるためと思われる。



図 2: 2017 年ランで使用したシンチレーティング標的。

設置するもう一つの CCD カメラにより標的を撮影し、格子点パターンを画像解析することにより標的の位置・角度・歪みを再構成する。2017 年ランで初めて実装・試験し、 $100 \mu\text{m}$ 以下の精度でモニターできることを実証できたが、使用したカメラが磁場中で正しく動作しないなど運用に向けての課題は残されている。

PSI におけるミューオンビームの今後の展望について少し述べておく。一次ビームのパワーを徐々に上げていく計画が進行中で、これまでに 1.4 MW を断続的に達成、最終的には 1.8 MW を目指している。2018–2019 年は入射加速器の増強が計画されている。これとは独立に、ミューオンの生成標的の形状・材料を最適化することで表面ミューオンの収率を 30%–60% 上げられることが、MEG II コラボレータらの研究で示された [8]。MEG II 実験の期間内ないし終了時あたりにより高強度のビームが得られる可能性が高い。さらなる感度向上には実験側の対応が要求される。さらに、将来計画として一桁から二桁強度が高い新しいビームラインの研究 (HiMB プロジェクト [9]) も進められている。

3 陽電子スペクトロメータ

ミューオンが一つ崩壊すると、常に一つの陽電子が放出される。つまり、100 MHz 程度²の陽電子をさばきながら $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ からの陽電子を高精度で測定しなければならない。効率よい測定のために、MEG II でも MEG で開発した特殊勾配磁場を用いる。陽電子スペクトロメータは以下の構成要素からなる。

- 特殊勾配磁場を形成する超伝導電磁石
- 飛跡を検出する超軽量円筒形ドリフトチェンバ
- 高精度時間測定とトリガー信号生成を目的とした細分型タイミングカウンタ

電磁石は MEG のもの (COnstant Bending RAdius, COBRA 電磁石) をそのまま利用する³が、中身の検出器は一新する。

新しい陽電子検出器を設計する際、もっとも考慮した点は、検出効率の改善である。MEG ではドリフトチェンバで飛跡が測定された後、さらに半周ほど飛行してタイミングカウンタにあたる設計であった。その途中、ドリフトチェンバの前置増幅器などの不感物質を通過すると多重散乱を受ける。飛跡が変更されてしまった陽電子が検出および再構成の大きな非効率となり、最終的な効率は 30% 程度にとどまっていた。

MEG II ではドリフトチェンバを伸長しタイミングカウンタにあたる直前まで物質を最小限に抑えつつ飛跡を測定する。これにより、検出効率は原理的には ~90% に改善される。

3.1 新しいドリフトチェンバ CDCH

MEG では平行平板形のモジュール化したドリフトチェンバを使用していたが (詳しくは [10])、MEG II では円筒形ドリフトチェンバ (Cylindrical Drift Chamber, CDCH) を採用する。ドリフトチェンバというとすでに確立された技術と感じられると思うが、MEG II CDCH は軽量化を突き詰めた点で無二である。50 MeV/c 程度の低運動量の荷電粒子は、検出器の物質によるクーロン多重散乱でその測定精度が制限される。高計数率のトラッキングにはシリコンピクセル検出器がよく用いられるのでそれを例に考える。最近では極薄のセンサーが開発されてきているが、たとえば $50 \mu\text{m}$ のシリコン薄膜で $50 \text{ MeV}/c$ の陽電子は 5 mrad (RMS) 散乱する。これは MEG II の目標とする角度分解能に相当する。つまり、現在の技術で最薄と考えられるシリコンセンサーをたった一枚置いただけで (サポートや読み出し、冷却など何もない) MEG II の目標分解能は達成できないことがわかる。そこで、ガス検出器を用い、さらに軽量化を突き詰めるわけだが、後述する問題・困難も基本的にはここに起因する。

MEG II CDCH は、全長 191 cm、半径 17–29 cm の領域を占め、その体積は物質量の少ないヘリウムベースのガス $\text{He} : i\text{-C}_4\text{H}_{10} = 90 : 10$ で満たされる。ワイヤは全部で 13056 本あり、うち 1920 本がセンスワイヤである。各センスワイヤは 8 本のフィールドワイヤで囲まれドリフトセルを形成する。各セルは 6.6–9.0 mm 角の大きさで、動径方向に 10 層構造となっている。各層は交互に逆向きの角度 (6° – 8.5°) をもって張られ、ビーム軸方向の再構成が可能となっている。 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊のアクセプタンスはガンマ線検出器の張る立体角で決まるため、信号検出の観点からは方位角 2π をカバーする必要はないが、テンションや電場を一様に保つために 2π にわたってワイヤは張られる。読み出しはアクセプタンスに対応する 1280 本のセンスワイヤのみ行う。ヒットレートは最内層の中心部分で $30 \text{ kHz}/\text{cm}^2$ となる。

²標的に静止しない分も寄与することに注意。

³これにより検出器のサイズ・形状は大まかに決定される。



図 3: ワイヤ張りの終了した CDCH。

高密度 ($12 \text{ 本}/\text{cm}^2$) で精度よくワイヤを張るため、精度よく製作された PCB 上にワイヤをはんだ付けする手法を採用した [11]。センスワイヤは $20 \mu\text{m}$ 径の金コーティングされたタングステンワイヤを、より数が多いフィールドワイヤは物質量を最小限に抑えるため 40 または $50 \mu\text{m}$ 径の銀コーティングされたアルミニウムワイヤを採用した。各ワイヤには $20\text{--}30 \text{ g}$ (ワイヤの種類による) のテンションがかけられる。テンションは CDCH の外枠である 2 mm 厚の炭素繊維製の筒で支えられる。一方、内側は陽電子が飛跡を検出される前に通過するため、アルミ蒸着マイラーフィルム ($20 \mu\text{m}$ 厚) によりビーム領域 (ヘリウムガス) と分けられている。

このようにあらゆる要素を軽量化することで、一つの陽電子が通過する CDCH の物質量は $1.6 \times 10^{-3} X_0$ となっている。これは MEG での $2.0 \times 10^{-3} X_0$ をさらに下回る。

CDCH は本稿執筆時点では唯一、建設が完了していない検出器である。これはワイヤ断線問題に長らく苦しまされたことにより、大幅に計画が遅れたためである。

ここで問題となっているのはフィールドワイヤである。ワイヤの選定は KLOE 実験での経験をもとにした [12]。ただし、ワイヤ径は KLOE の $80 \mu\text{m}$ から大幅に細くなっている。KLOE ドリフトチェンバでは断線問題は起こらず、10 年以上にわたり正常に運用された。

ワイヤのはんだ付け作業はイタリアのレッチャ(INFN Lecce)で行い、その後、チェンバの組み立てをピサ(INFN Pisa)で行っている。はじめに問題が判明したのは 2016 年 3 月。チェンバを設計値まで伸長した際に断線が生じたのを見つめた。詳しく調べると、計 17 本のフィールドワイヤが断線していた。調査の結果、組み立て作業を行っている部屋で停電時に空調がとまり、湿度が一時的に上昇した際の結露が原因と判断した。そこで、空調管理を徹底しワイヤ張りを一からやり直した。その後、2017 年 7 月に 6 本の断線が発見された。この時は一度も相対湿度 60 % を超えることはなかった。調査の末、断線は腐食によるものと理解している。とくに、銀コーティング中の細かな割れによる局部腐食・銀-アルミのイオ

ン化傾向の違いによる異種金属接触腐食・テンションと湿度の両方がそろったときに発生する応力腐食割れなどの現象が絡んでいると考えられる。対応策として、建設中、湿度を 20% 以下に保ち、ワイヤテンションを下げることにした。2017 年 10 月からワイヤ張りを再開し、現在まで断線は起きていない。

2018 年中にインストールしコミッショニングを進めるために、もともと 10 層の設計であったが 9 層でワイヤ張りを終了した (図 3)。執筆時現在、チェンバは閉じられ (いったんチェンバを封じてしまえば湿度をゼロに維持できる)、ピサから PSI への輸送の準備をしている。2018 年 7 月にインストールする予定である。なお、一層減らしたことにより、パターン認識の効率が 10% 低下する一方、分解能には影響がないと見積もられている。今後、9 層でのパターン認識の最適化などをしていく必要がある。

3.2 新しいタイミングカウンタ pTC

高精度の時間測定は大量の偶発的背景事象の中から信号 (陽電子とガンマ線の同時事象) を見つけ出すのに有效である。陽電子の時間測定は細分化されたシンチレーションカウンタからなるタイミングカウンタ (pixelated Timing Counter, pTC) が担う。また、pTC は陽電子の放出時刻と方向をリアルタイムで判定するトリガー信号の生成も担う。

MEG でのタイミングカウンタの時間分解能は 75 ps (RMS) であった。意味を持つのは陽電子とガンマ線の相対的な時間であるので、陽電子側だけ極端によくしてもあまり効果がない。後述するガンマ線検出器の改善と包括的に考えると、MEG での分解能を半減させる 30 ps 台が目標となる。

高い時間分解能を持つ検出器の開発は、世界中で活発に進められている。これらの多くは、一つ (もしくは二、三層) の検出器で $O(10 \text{ ps})$ の分解能の達成を目指している。われわれの方向性は少し異なる。当然、おのおのの検出器の分解能が良いに越したことはないので、高時間分解能力カウンタの開発も行ったが、キーとなるコンセプトは、多重測定による分解能向上である。この方針は MEG での経験をもとにしている。

30 ps というレベルになってくると、ちょっとしたことで簡単に分解能が悪化してしまう。たとえば、実験現場でのノイズ・読み出し回路のジッターや同期誤差・モジュール間の時間オフセットの較正誤差・大量生産時の性能のばらつきなどである。実際、MEG のタイミングカウンタは理想的な環境では 40 ps の分解能を達成したが、実際の運用ではこれらの寄与を総合して、上記の 75 ps にとどまってしまった。これらすべての要素を 10 ps レ

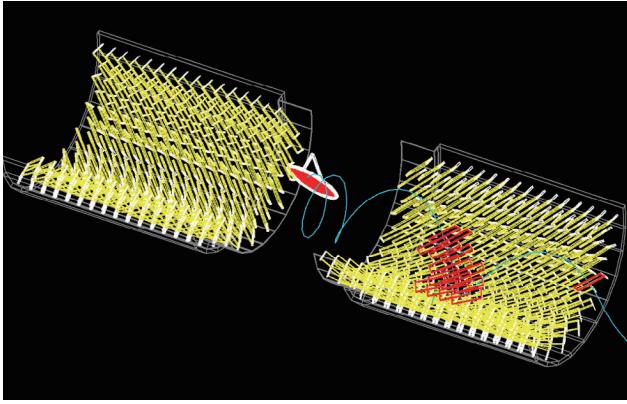


図 4: MEG II pTC 概念図。シミュレーションによる信号陽電子の飛跡が重ねて描かれている。複数のカウンタにヒットする様子がわかる。

ベルの精度でコントロールすることは非常に難しく、開発も長期化することが予想される。

一方、複数のカウンタで一つの粒子を測定すると、カウンタの固有の測定精度だけでなく、上記の付属的な寄与も含めて $1/\sqrt{N}$ で分解能を向上することができる（ただし、測定誤差に相関がある場合はこの限りではない点には注意する必要がある）。個々の要素への要求は緩和され、頑強な測定が可能となる。さらに、デッドチャンネルがあったときの非効率の低減や偽ヒットの判定など複数測定ならではの利点もある。

図 4 に pTC の概念図を示す。磁場中での陽電子の飛跡に沿うように、小型のシンチレーションカウンタを上流・下流それぞれ 256 個配置する。信号陽電子は平均 9 個のカウンタにヒットする。このような検出器の設計は MEG を準備していたころには不可能であったが、2000 年代後半から実用化が進んだ SiPM を活用することで可能となった。

SiPM は高い光子検出効率 ($> 40\%$) と高い一光子時間分解能 ($< 100 \text{ ps}$) を持ち、これにより高い固有時間分解能が得られる。また、SiPM の特徴であるコンパクトさ・磁場耐性・低価格などから自由度の高い検出器設計が可能となる。

カウンタモジュールの開発は [13] を参照していただきたい。最終的な設計を図 5 に示す。高速な立ち上がりをもつシンチレータ BC-422 の両端に AdvanSiD 社製の SiPM がそれぞれ 6 個接着されている。6 個の SiPM を直列に接続し、信号を合算して読み出す。直列接続の採用理由は、センサーの静電容量を低減し、立ち上がりの早い信号を得るためにある。電子回路や検出器設計を容易にするために前置増幅器は用いない。増幅・整形は読み出しボード上で行い、信号はそこまで 7 m の同軸ケーブルで伝送する。静電容量の低減により、 50Ω での信号伝達でも信号をなまらせずに高い時間分解能を維持で

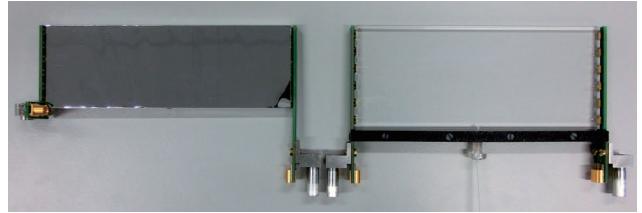


図 5: pTC カウンタ。配置する場所によりシンチレータの高さは 4 cm と 5 cm のものがある。シンチレータには鏡面反射材 (ESR2) が巻かれ、下方から較正用のレーザー光を入射する光学ファイバが取り付けられる。

きる。

AdvanSiD SiPM を採用した理由は価格である。限られた予算の中で各カウンタに取り付けられる SiPM の個数を考慮したうえで、最高の時間分解能を得るよう選択した。ただし、大量生産における品質管理や生産ラインの安定性という点では某大手にはかなわないようだ。SiPM 開発は各社とも急速に発展しており、pTC で採用した型はすでに型遅れのものとなっている。センサーの性能改善とともに品質管理の向上も今後、期待したい。

もう一点だけ愚痴をこぼすと、シンチレータの品質にも苦労した。開発時に入手したサンプルは非常に良い性能を示したが、大量生産時はばらつきが大きく、全く使い物にならないものもあった。40%ほど返品・交換してもらったが、それでもたいへん満足とはいかなかった。

pTC は他の検出器に先駆けて 2015 年、MEG II ミュオンビームを用いたパイロットランを実施した。この時は 1/4 にあたる 128 カウンタをインストールした。これによりインストールや運転の確立・ビーム下でのカウンタの振る舞いの確認・レーザーを用いた較正手法の開発・解析手法の確立などを達成するとともに、潜在化していた問題—SiPM の乖離問題と放射線損傷問題—の早期判明につながった。この二つの問題に関しては、その後のスタディにより解決をみている。

さらに重要な点はパイロットランを実施することにより、検出器とは独立に開発されていた読み出し回路（6 章参照）の問題点を洗い出すことができた点である。読み出し回路の開発は 2015 年ランを機に大きく進展した。

その後、他の検出器も徐々に加えながら毎年パイロットランを実施し、課題点を段階的に達成してきた。2017 年ランでは 512 カウンタすべてをインストールし、完全な状態で運転・性能評価を行った。物理ランの開始準備は整った。

4 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・時間の測定には 900ℓ の世界最大級の液体 Xe 検出器を用いる。液体 Xe はシンチ

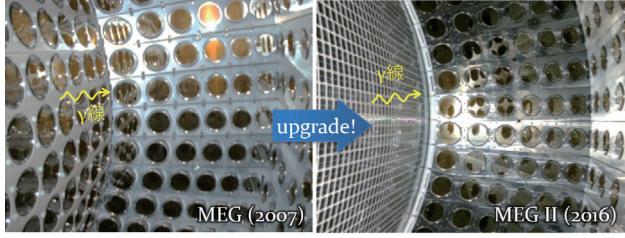


図 6: 液体 Xe 検出器のアップグレード前後の写真。

レーション光量が大きい (NaI の約 75%) , 時定数が短い (ガンマ線で~45 ns), 放射長が短い ($X_0 = 2.77$ cm), 液体なので一様である, といった利点があり, その性能は MEG 実験においてすでに実証された。MEG II ではこの液体 Xe 容器 [14] はそのまま再利用しつつ, シンチレーション光の読み出しに使用していた PMT の一部を MPPC⁴に置き換えるだけで, エネルギー分解能と位置分解能を大幅に改善してやろうというのがアップグレードの目論見である。

図 6 は MEG および MEG II における液体 Xe 検出器内部の写真である。ガンマ線入射面の 2 インチ径 PMT 216 本が, 12 mm 角の MPPC 4092 個に置き換えられている。ここで重要なのは MPPC が隙間なく敷詰められている点で, MEG では PMT どうしに間隔があったため, ガンマ線が各 PMT の正面に入射した場合と, PMT の間に入射した場合とで検出光量にばらつきがあり, それがエネルギー分解能を制限していた。MEG II では光検出器が一様に入射面を覆い, かつ細分化されたことによって, エネルギー分解能と位置分解能がそれぞれ約 2 倍改善されると見込まれている (表 1)。

アップグレードの鍵となったのはやはり MPPC の開発である。この MPPC (図 7 左) は液体 Xe が発する約 170 nm という短い波長 (真空紫外光と呼ばれる領域) のシンチレーション光に感度があり, かつ 12 mm 角と大型であるという要請のもと製作された。このような素子は市販されていなかったため, 浜松ホトニクスと共同開発を行った。通常の MPPC では真空紫外光がシリコン表面の不感層で吸収されてしまうため検出できないが, 本 MPPC では表面の保護膜を除去したり反射防止膜を調整したりすることで, 真空紫外光に対して 15%以上の検出効率を達成した。もう一つの課題は素子の大型化で, これは読み出しチャンネル数を抑制するために必要であった。しかし, 大型化すると静電容量が増加して信号波形の時定数が増大し, 背景ガンマ線とパイルアップすることが問題となる。そこで 12 mm 角の素子を 6 mm の素子 (チップ) 四つに分割し, これらを MPPC の設

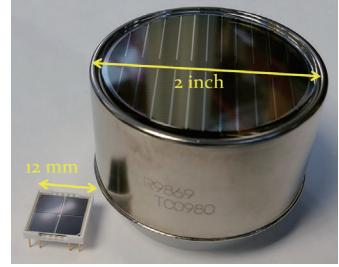


図 7: 液体 Xe 検出器で使用する PMT と新型 MPPC。



図 8: MPPC を設置する基板 (左) と Xe 容器内外をつなぐフィードスルー (右)。

置基板上で直列接続⁵することで容量を減らし, 時定数~30 ns の短い応答波形を得ることに成功した。

MPPC の設置方法や信号の伝送も大きな課題であった。MPPC は湾曲した面に隙間なく精度よく並べる必要があり, 図 8 左のような細長い PCB に MPPC を設置することでこれを実現した。PCB 内部は信号線の周りをグラウンド層で覆った同軸ケーブルのような多層構造を作り, 電気回路のノイズやクロストークを抑える設計となっている。液体 Xe 容器は約 170 K に保つ必要があるため, 発熱量の大きい信号增幅器やデジタル化回路は Xe 容器の外に設置する必要があり, その場で信号をデジタル化することができない。MPPC 4092 個と PMT 668 個という大量のチャンネルの信号を Xe 容器外部に伝送するため, 図 8 右のような PCB をフランジに突き刺した形のフィードスルーを開発した。こちらも内部に同軸ケーブルのような構造を持っている。

MPPC の試験はいくつかの段階を経て行われた。詳細な性能試験は 2 ℥ の小型 Xe 容器を用いて少数サンプルについて行い, ゲインや光子検出効率といった基礎特性を測定した。2015 年には約 600 個の MPPC を液体 Xe 中で大量試験し, 上記の読み出し基板やフィードスルーパーを含めた全てのシステムが問題なく動作することを確認した。実機に搭載する MPPC は 2015 年 4 月から 10 月にかけて大量生産され, その全数を試験した。この試験では個々のチップについて直列接続せずに常温で I-V 応答曲線を測定したが, 電流値に異常があるとして除外され

⁴浜松ホトニクス社製 SiPM に関しては同社の商品名で MPPC と呼ぶことにする。

⁵厳密には電圧供給を並列, 信号読み出しを直列に接続するハイブリッド接続を採用することで, 低電圧での動作を可能にしている。

た素子はわずか 0.2%未満であった。さらに、PCB に設置した後や、実機にインストールした後にも隨時動作試験を行った。

実機の組み立ては 4 m 立方の特注サイズのクリーンブース内で行われた。これは、Xe に不純物が混入するとシンチレーション光が吸収されてしまうためである。作業は Xe 容器の清掃から始まり、再利用する PMT の試験とインストール、MPPC のインストール、ケーブリングと試験、冷凍機やポンプの取り付けなど、約一年にわたって行われた。Xe 容器は MEG から再利用されているがチャンネル数は 5 倍以上に増えているため、限られたスペースでケーブリングする作業に時間を要した。

完成後は実験エリアに輸送し、冷凍機系をつないで Xe を注入した。冷凍機のコントロールは MEG のときと同様に PSI で開発された SCS と呼ばれるモジュールを通じて行った。このモジュールは圧力計や温度計、液面計などの読み出しを行うだけでなく、設定したプログラムあるいはネットワーク越しの操作によって冷凍機やポンプ等の手動および自動制御などを全て担う汎用モジュールである。チャンネル数が増えたことによるケーブルからの熱流入の増加を相殺するため、GM 冷凍機を追加で導入した。これまで使用してきたパルスチューブ冷凍機は低温部に可動部品を持たないため、振動が無くメンテナンスフリーであるという特徴があった。一方で、GM 冷凍機は冷凍能力が大きいが、振動がノイズを生む可能性がある。そこで Xe 検出器と離れた容器、循環経路の途中に GM 冷凍機を導入した。この方法は KEK の LAr グループで実績がある方法であり、MEG II でも問題なく機能した。

Xe 注入後は二ヶ月以上にわたって液相と気相の両方で純化を続けた。液相純化ではシンチレーション光を吸収する最大の要因である水をモレキュラーシーブスを通して取り除いた。気相純化は液相と比べて循環に時間がかかるが、ゲッターを使って水だけでなくの酸素や窒素も取り除くことができるため、恒常的に使用した。Xe 純度は容器内部に設置されたアルファ線源や宇宙線からのシンチレーション光の測定によって定常的にモニターレイアードした。一方で検出器の試験運転は純化と並行して行い、LED やアルファ線源からのシンチレーション光を光源として MPPC のゲインや光子検出効率を確認した。

170 K の Xe が約 3 t 入ると、Xe 容器はその重さと熱収縮によって変形し、MPPC の位置が変わる。熱収縮は 1 m に対して約 1.6 mm と小さいが、目標とするガンマ線の位置分解能に対して無視できない大きさである。そこで、MEG II では MPPC の設置後にその位置を FARO 社のレーザーームによって三次元測量した。一方、Xe 注入後には ^{57}Co 線源からの X 線を Xe 容器外部からコリメートして照射し、照射位置をスキャンしたときに各

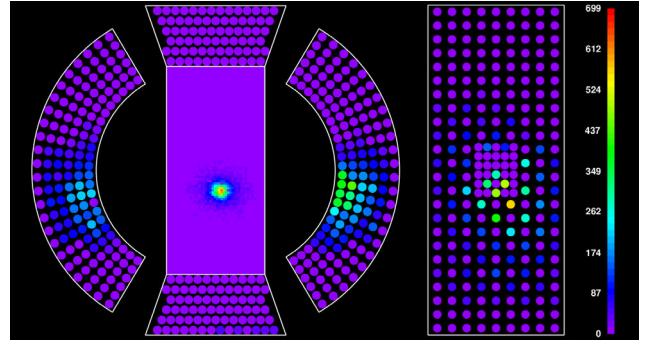


図 9: ミューオンビームからの背景ガンマ線の観測例。

MPPC の目の前で発生するシンチレーション光のトリガーレートの変化を測定することで、MPPC の位置を計測した。X 線を用いた測量結果は FARO アームを用いた常温での測量結果に熱収縮の効果を補正した結果と約 300 μm の精度で一致している。

2017 年末にはついにミューオンビームを用いた測定を開始し、信号エネルギーである 52.8 MeV に近いエネルギーのガンマ線を観測することに成功した（図 9）。この測定の時点では、使用可能な読出し回路のチャンネル数が限られていたため、最終形の約 1/4 のチャンネルのみを使用してデータ取得を行った。エネルギー分解能や位置分解能については現時点のデータではまだ評価ができるいないが、時間分解能については偶数チャンネルと奇数チャンネルの時間の差の分散から約 45 ps という値が得られており、これはシミュレーションで期待される目標値と一致する（ただし、この値はチャンネル間で相關のあるノイズやガンマ線の飛行時間による不定性を含まない）。

今後は全チャンネルでの試験を行い、物理データ取得に向けて検出器の理解を深める必要がある。2017 年にはできなかった $^7\text{Li}(p, \gamma)^8\text{Be}$ 反応を利用した 17.7 MeV の単一エネルギーガンマ線の測定や、パイオンの荷電交換反応 ($\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$) からの π^0 の back-to-back 崩壊を選択して得られる 55 MeV のガンマ線を利用し、ガンマ線に対する位置・エネルギー分解能を評価する。現在はこれらに向けた較正用セットアップなどを準備中である。

5 辐射崩壊同定カウンタ RDC

RDC (Radiative Decay Counter) は MEG II から新しく導入された検出器である。他の検出器が分解能を上げることによって偶発的背景事象を抑制しようとするのに対し、RDC は背景事象の元となる輻射崩壊 (Radiative Decay, $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \gamma$) からのガンマ線を積極的にタグすることで背景事象の削減を行う。 $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 探索の最大の敵である偶発的背景事象において、高エネルギーガンマ線源である輻射崩壊と陽電子の対消滅の比率は

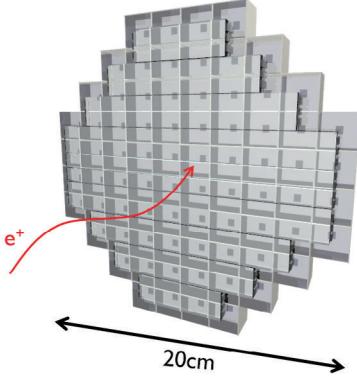


図 10: 下流側 RDC 検出器。

$E_\gamma > 48 \text{ MeV}$ のとき約 2:1 である。輻射崩壊において高エネルギーガンマ線が生成されるとき、これに付随して低エネルギーの陽電子が生成されるため、これを捉えることで輻射崩壊を判別できれば、背景事象を大きく減らすことができる。

輻射崩壊から生成された 1–5 MeV の陽電子は磁力線に巻き付いて上流あるいは下流に流されるため、そこにビーム軸から半径約 10 cm の領域を覆う検出器を置けば、輻射崩壊由来の陽電子の約 90% を検出することができる。設置場所は COBRA 電磁石の内側となるためスペースが小さく、また磁場に影響を受けない設計にする必要がある。また、大量のミューオンビームおよびその通常崩壊で生成される陽電子が当たる環境に設置されるため、検出器を分割して読み出さないと計数率が高すぎて輻射崩壊由来の陽電子が区別できない。これに加えて、上流側の検出器はミューオンビームが突き抜ける必要があるため、極限まで物質量を減らす必要がある。

このような要請のもと、下流側の RDC はプラスチックシンチレータ 12 枚と 2 cm 角の LYSO 結晶 76 個を組み合わせた構造に決定した（図 10）。プラスチックシンチレータは陽電子の時間を測定し、それが液体 Xe 検出器で検出される高エネルギーのガンマ線と同じタイミングか否かで輻射崩壊由来のガンマ線かそれ以外かを区別する。また、LYSO 結晶で陽電子のエネルギーを測定し、ミューオン通常崩壊からの高エネルギーな陽電子と輻射崩壊由来の低エネルギーな陽電子を区別する。

プラスチックシンチレータと LYSO はどちらも MPPC によってシンチレーション光の読み出しを行う。MPPC は小型で磁場中での動作が可能であるため、このような限られたスペースの多チャンネル読み出しにうってつけである。プラスチックシンチレータは pTC と同じように高速シンチレータの両側に MPPC を複数接着し、約 100 ps の時間分解能を達成した。LYSO 結晶の方は各結晶に 1 つの MPPC を装着している。LYSO はそれ自体が放射性同位体である ^{176}Lu を含み、ベータ崩壊とそれに

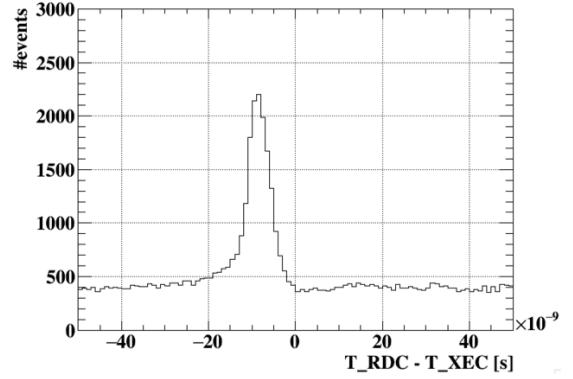


図 11: 液体 Xe で観測された高エネルギーガンマ線と、RDC で観測された陽電子の時間差分布。

伴うガンマ崩壊によって自己発光する。しかしそのレートは約 2 kHz と小さいため輻射崩壊の検出には影響せず、一方でエネルギー較正に利用することができる。

この下流側検出器についてはすでに製作が終了し、2017 年の年末には液体 Xe 検出器と共に実際にミューオンビームを用いて輻射崩壊の測定を行った。図 11 に液体 Xe で観測されたガンマ線の時間と RDC プラスチックシンチレータで観測された陽電子の時間差の分布を示す。ピークの部分がガンマ線と陽電子が同期した輻射崩壊事象に対応している。詳細な性能評価は現在進行中であるが、下流側検出器については物理ランに向けてすでに準備完了であると言える。

一方で、上流側検出器は低物質量という要請が難しいため、まだ検出器の製作に至っていない。当初はシンチレーティングファイバを MPPC で読み出すデザインを検討していた。このとき検出器の厚みはミューオンビームを通過させる必要があるため、約 250 μm 程度と非常に薄い。上流側検出器を設置する際に考えられる問題点として、ミューオンビームが RDC を通過することで広がりを持つてしまうことが懸念されたが、これについてはシミュレーションおよびモックアップを用いた実測により十分小さいことが確認された。

この検出器は薄さゆえに検出されるシンチレーション光量が小さく、プロトタイプのファイバ検出器ではファイバ片側あたり 2 p.e. に満たない光子数であった。さらに深刻なのは放射線損傷で、文献値 [15] から計算するとわずか二週間のミューオンビーム測定で検出光量は半分以下になると予想される。そのため、現在はシリコン検出器やガス検出器を検討している。

すでに建設が完了した下流側検出器が期待通りの性能を発揮すれば、MEG II の探索感度は RDC 無しの場合と比べて約 15% 向上する。これに加えて上流側検出器も実現することができれば、探索感度はそこからさらに約 10% 改善できると期待されている。



図 12: WaveDREAM を 16 ボード搭載したクレート。

6 エレクトロニクス

MEG II では検出器の読み出しチャネル数が MEG から約 3 倍 (~9000 チャンネル) に増加し、またビーム強度と検出効率の増加に伴いイベントレートも 10 倍前後に増加する。アップグレードを実現するには、検出器やビームだけでなく読み出しエレクトロニクスも大きく変える必要がある。

MEG では各検出器からの信号を二つに分割し、トリガーの生成と波形読み出しを別々に行っていた。MEG II では WaveDREAM と呼ばれる PSI で新しく開発されたボード (図 12) を用い、トリガーと波形読み出し同じボード上で行うことで、省スペース化を実現しつつ複雑なトリガーの生成も行うことができる。WaveDREAM はこのトリガーと波形読み出しに加え、SiPM で必要となる増幅器 (ゲインは 0.5–100 倍の離散的な値でいつでも変更可能)、波形の整形回路 (オンオフや強さを調整できるポールゼロ消去回路) や HV 電源 (各チャネルに基準電圧 ± 2.5 V の範囲で違う電圧をかけられる) も同一のボードに搭載している。

波形読み出しには MEG のときと同じく DRS (Domino Ring Sampler) と呼ばれる PSI で開発されたチップを用いている。このチップは Switched Capacitor Array を利用することで高速 (5 GHz) かつ高分解能 (12 bit) の読み出しを安価で実現した。WaveDREAM では DRS に入力された信号は 80 MHz の ADC によって同時に読み出し、その出力を FPGA (Field-Programmable Gate Array) で処理することで、DRS の高速な読み出しと複雑なトリガーの生成を同時にを行うことができる。

$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ のトリガーには高エネルギーのガンマ線と、陽電子とガンマ線のコインシデンス、そして back-to-back であることを要求する。トリガーレートが高いとデータ転送速度やディスク容量が許容量を越え、データ取得を行うことができなくなる。MEG II では MPPC を使用することによる液体 Xe 検出器のエネルギー分解能改善や、高速ディスクリミネータによる時間分解能の改善、陽電子タイミングカウンタの細分化による方向分解能の改善により、トリガーによる偶発的背景事象の分別能力も向上する。これによってトリガーレートを約 10 Hz に抑えることができると見込まれている。

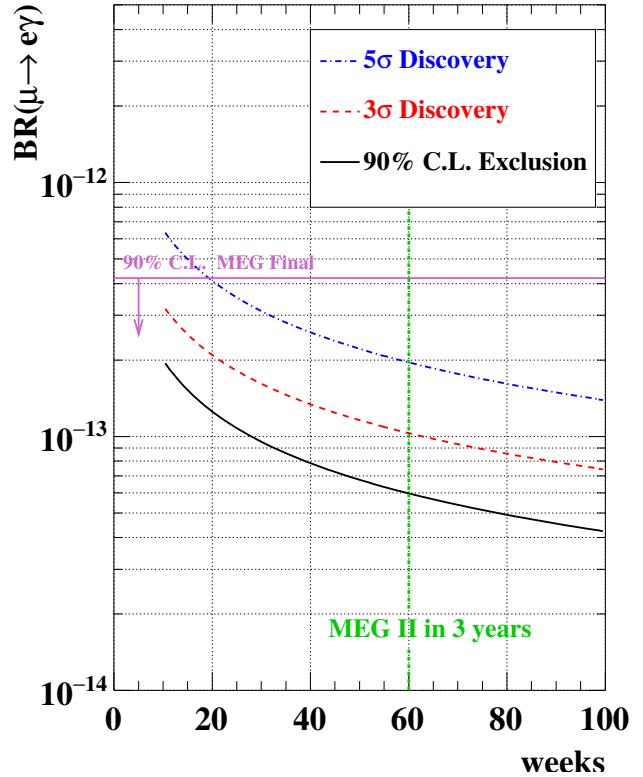


図 13: MEG II 実験期待感度の推移。

WaveDREAM は新しく開発されたデバイスであるということもあり、初期の使用ではファームウェアのバグやノイズなどの問題が見つかった。このように市販品ではないが故のデメリットはあるが、市販品を凌駕する性能を非常に安価 (チャネルあたり約 130 ユーロ) に実現できるという点が大きなアドバンテージである。

7 おわりに

2018 年は最後の建設中の検出器 CDCH が完成し、すべての検出器がインストールされる。また、年末にかけて読み出し回路の大量生産が行われる予定である。2018 年の最大の課題は CDCH の立ち上げと読み出し回路のノイズ削減となる。これらをクリアし、2019 年からよい物理データ収集を開始する。

図 13 に MEG II の期待される探索感度をデータ収集時間とともにプロットした (検出器の設計および導入が決定していない上流側 RDC はこの計算には含まれていない)。期待性能が達成されていれば二ヶ月程度のデータ収集で MEG の感度を上回る。MEG で設定された上限値以下での $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊発見可能性も一年目から十分ある。年間 20 週ランを走らせると仮定すると、三年間で 6×10^{-14} の感度に到達する (ただし、三年で終了するとは言っていない)。今後に期待していただきたい。

謝辞

本研究は MEXT/JSPS 科研費 JP26000004, JP17K14267, JP18K13557 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] A.M. Baldini *et al.* (MEG Collaboration), Eur. Phys. J. C **76**:434 (2016).
- [2] 森俊則, 高エネルギーニュース **36-3**, 127 (2017).
- [3] A.M. Baldini *et al.*, Research proposal to PSI **R-99-05.2** (2013), arXiv:1301.7225.
- [4] A.M. Baldini *et al.* (MEG II Collaboration), Eur. Phys. J. C (in press), arXiv:1801.04688.
- [5] L. Calibbi, G. Signorelli, Riv. Nuovo Cim. **41**, 71 (2018).
- [6] A. Crivellin *et al.*, Phys. Rev. D **97**, 015019 (2018).
- [7] M. Lindner *et al.*, Phys. Rep. **731**, 1 (2018).
- [8] F. Berg *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **19**, 024701 (2016).
- [9] A. Knecht, NuFact2017 (2017).
- [10] 西口創, 高エネルギーニュース **27-4**, 262 (2009).
- [11] G. Chiarello *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **824**, 512 (2016).
- [12] M. Adinolfi *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **488**, 51 (2002).
- [13] P.W. Cattaneo *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci. **61**, 2657 (2014).
- [14] 三原智, 高エネルギーニュース **26-1**, 9 (2007).
- [15] Yu.M. Protopopov, V.G. Vasil'chenko Nucl. Instr. Meth. B **95**, 496 (1995) .