

MEG 実験 2009 年ランにおける $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 探索

東京大学 素粒子物理国際研究センター

澤田 龍, 岩本 敏幸

on behalf of the MEG collaboration

sawada@icepp.s.u-tokyo.ac.jp, iwamoto@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

2010 年(平成 22 年)11 月 12 日

1 はじめに

MEG 実験グループではスイスのポールシェラー研究所 (PSI) の世界最高強度の直流ミュオン粒子ビームを用いてレプトンフレーバーを破る崩壊である $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ の探索をおこなっている。2008 年には本格的な物理測定を開始したが、ドリフトチェンバーの放電により検出効率が著しく低かった。2009 年にはこの問題が解決され、安定した検出器の状態の元で約 2 ヶ月間のデータ取得をおこなった。この記事では 2009 年ランの検出器の状況と解析、プレリミナリーな物理結果について述べる。その後陽電子再構成に関する大きな系統誤差の原因の一つが解明され、現在データを再ブラインドして解析中であり、最終結果は本稿に書かれている結果から系統誤差の範囲内で変わる可能性がある。

2 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊探索

MEG 実験では、レプトンフレーバーを破る $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊事象を独創的かつ巧妙な実験装置を用いて極微の分岐比まで探索することを目的としている。スーパーカミオカンデ実験などによって明らかにされたニュートリノ振動は、レプトン間においてもフレーバーが破れていることを証明するものである。このニュートリノ振動現象は、シーソー理論によって未知の超高エネルギーに新しい物理が存在することを強く示唆している。一方このような超高エネルギーにおいて、素粒子に働く三つの力が統一されることが実験によって明らかにされた。以上のような新しい物理となる超対称性大統一理論やシーソー理論は、荷電レプトンにおいても大きなレプトンフレーバーの破れを引き起こすことがわかっており、標準理論では検出不可能な $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊が現在の実験上限値 1.2×10^{-11} のすぐ下の分岐比で起こると予想されている。つまり、もしこの崩壊事象が発見されれば、超対称性大統一理論やシーソー理論など、標準理論を超える新しい物理の決定的な証拠となる。

これまでの $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ μ 崩壊探索実験としては、アメリカのロスアラモス国立研究所の MEGA 実験がもっともよい感度で探索をおこなっており、上限値は上述のように 1.2×10^{-11}

となっている[1]。MEG 実験は 2008 年度より測定を開始しており、2008 年に取得されたデータはドリフトチェンバーの検出効率に問題があり統計が少なかったが、現在の上限値に匹敵する実験感度を達成し、その結果は既に発表されている[2]。2009 年度は、検出効率を改善して 10 月より実験を再開し、約 2 ヶ月間データを取得した。

$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊の信号は静止ミュオン粒子からの二体崩壊であり、正反対にミュオン粒子の質量の半分のエネルギー (52.8 MeV) を持ったガンマ線と陽電子が同時に放出される。バックグラウンドは、ミュオン粒子の輻射崩壊 $\mu \rightarrow e\nu\gamma$ から陽電子とガンマ線が正反対に出た場合と、通常のミッシュェル崩壊 $\mu \rightarrow e\nu$ から来る陽電子とミュオン粒子の輻射崩壊 $\mu \rightarrow e\nu\gamma$ などから出るガンマ線の偶発的に重なった事象 (アクシデンタルバックグラウンド) が考えられる。陽電子が物質内を飛行中消滅してガンマ線に転換する事象 (AIF, annihilation in flight) もガンマ線バックグラウンド源となる。われわれの実験では、このうちアクシデンタルバックグラウンドが主要なバックグラウンドとなる。アクシデンタルバックグラウンドの頻度 (n_{acc}) はビーム強度 (I_μ)、角度、ガンマ線エネルギー、時間および陽電子エネルギーの分解能 (それぞれ $\Delta\theta$, δE_γ , $\Delta T_{e\gamma}$, ΔE_e) から次式のように表される。

$$n_{acc} \propto I_\mu^2 \Delta\theta^2 \delta E_\gamma^2 \Delta T_{e\gamma} \Delta E_e$$

このことから、それぞれの検出器の高分解能がバックグラウンドの低減に欠かせないことがわかる。この検出器の分解能がわれわれの最終感度を制限することになる。図 1 に陽電子とガンマ線のバックグラウンドのエネルギースペクトルを示す。

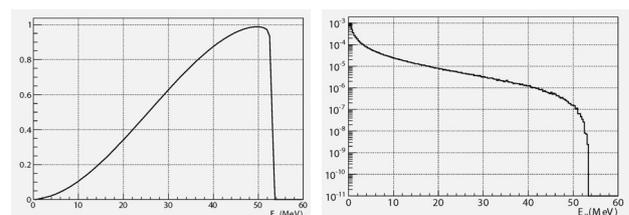


図 1: バックグラウンドのエネルギースペクトラム

- (a) バックグラウンドの陽電子エネルギースペクトル。
- (b) バックグラウンドのガンマ線エネルギースペクトル。

陽電子側は 52.8 MeV 近辺の事象が多く、高い計数率環境でも安定に動作し、しかも高分解能である必要がある。このために特殊勾配磁場を持つ超伝導電磁石が開発され、低運動量を持つ陽電子は検出器に留まることなく速やかに検出器の外に掃き出される。また陽電子スペクトロメータは多重散乱、AIF などのガンマ線バックグラウンドをできるだけ減らすために物質も徹底的に抑えられている。逆にガンマ線側は信号領域ではエネルギーが高くなると指数関数的に減っていくため、ガンマ線検出器の分解能が向上すれば原理的にはそれだけバックグラウンドも削減することがわかる。

従って、 $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊を極微の分岐比まで探索するために、おもに二つの測定器を新たに開発した。900 リットルの高分解能液体キセノンガンマ線検出器と、特殊勾配磁場を持った陽電子スペクトロメータである。また、PSI の持つ世界最高強度直流ミュオン粒子ビームが本実験には必須となる。

3 MEG 実験

MEG 実験は東京大学と高エネルギー加速器研究機構 (KEK)、早稲田大学、ロシアの研究者らが 1999 年に PSI に実験計画の提案をおこない、承認されてから PSI、イタリア、アメリカの研究者も加わり現在では約 60 名の国際共同実験となっている。実験の詳細はこれまでの記事などを参考にさせていただきたい[3][4]。ここでは簡単に MEG 実験についてまとめる。

3.1 ビームライン

PSI にはパイ中間子やミュオン粒子の研究に適した 590 MeV 陽子サイクロトロンがあり、2.2 mA で稼働中であ

る。現在のところビームパワーが 1.3 MW と世界最強を誇っているが、さらにビーム強度の増強計画が進行中である。陽子ビームは 50 MHz の RF パルス構造を持つが、ミュオン粒子の寿命が $2 \mu\text{sec}$ であるためミュオン粒子崩壊事象としては直流ミュオン粒子ビームと同等となる。大量のミュオン粒子崩壊が不可欠ではあるが、瞬間的なビーム強度はアクシデンタルバックグラウンドに二乗で効くため、パルスでなく直流ビームがわれわれに適している。図 2 は MEG 実験ビームラインの概略図である。

陽子ビームは、グラファイトターゲットに入射されることにより表面ミュオン粒子を生成する。同時に大量に生成される陽電子を静電セパレータ、四重極電磁石を使って取り除いた後で、このミュオン粒子がビーム輸送用超伝導ソレノイドによって COBRA 陽電子スペクトロメータへと導かれる。前述のように COBRA 電磁石は勾配を持っており、COBRA 中心に近づくにつれて強くなっていき、ビームサイズは絞られる。COBRA 中心にあるターゲットの場所で測定されたビームの広がり約 1 cm である。ミュオン粒子静止用ターゲットは、物質量を減らすためできるだけ薄い方がよいが、もちろん逆にできるだけ多くのミュオン粒子を静止させる必要もある。この両方の要請を満たすべく現在では 200 μm のポリエチレン・ポリスチレンのサンドイッチ構造にしたターゲットを、ビーム軸に対して約 20 度の角度に傾けて設置することにした。

PSI の加速器は $1 \times 10^8 / \text{sec}$ 以上のミュオン粒子をターゲット上に供給可能であるが、現在のところ検出器の性能とバックグラウンドとの兼ね合いから $3 \times 10^7 / \text{sec}$ のビーム強度を使用している。

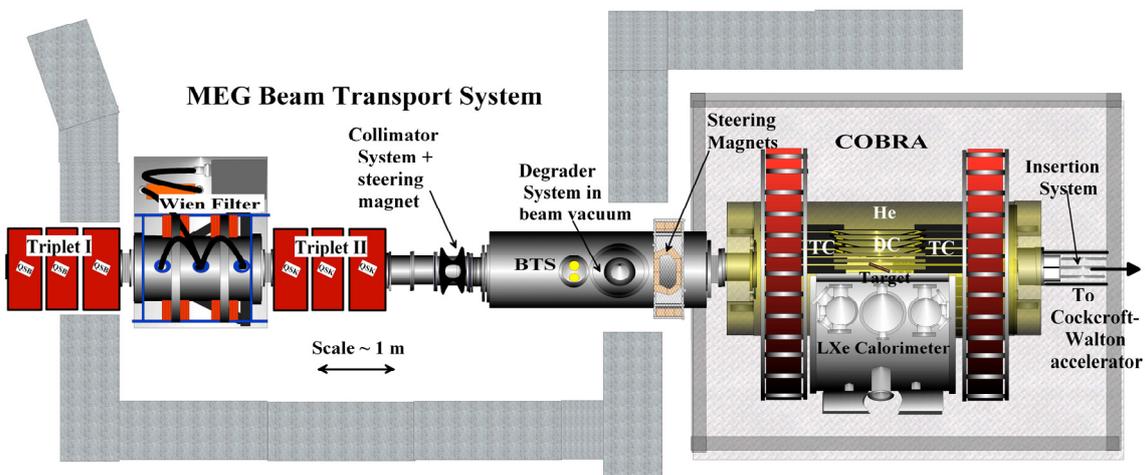


図 2 : MEG 実験ビームラインの概要

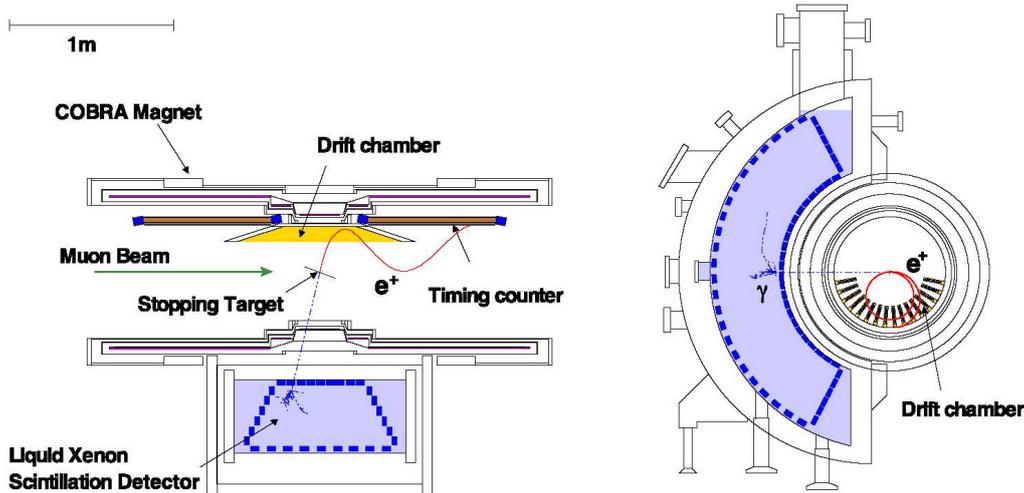


図 3 : MEG 実験の検出器の概要

3.2 COBRA 陽電子スペクトロメータ

図 3 に MEG 実験に使用される検出器を示す。

$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊からの陽電子は COBRA と呼ばれる特殊勾配磁場を持つ超伝導電磁石により曲げられ、その飛跡がドリフトチェンバーによって記録され、最終的にはタイミングカウンターで時間が計測される。磁場の大きさは、COBRA 中心では 1.27 T であり中心から離れるに従って弱くなり、両端で 0.49 T となる。この特殊勾配磁場はターゲットから放出された陽電子が、同じ運動量を持つ場合の軌道半径が放出角度によらず一定になるように設計されている (COBRA, COntant Bending RADIUS)[5]。ドリフトチェンバーは中心から離れたところに設置されており、信号に近い運動量を持つもののみが検出器にかかるよう設計されており、必要のない低運動量を持つ陽電子は決して検出器に届かない。またビーム軸に対して垂直方向に放出された陽電子も速やかに外に掃き出されるため、計数率を下げることが可能となった。もともと $3 \times 10^7 / \text{sec}$ で崩壊するミュオン粒子を観測するわけであるが、検出効率を失わずに結果としてドリフトチェンバーでのミッセル崩壊陽電子計数率は $10 \text{ kHz} / \text{cm}^2$ 以下に抑えられた。また COBRA の超伝導電磁石は非常に薄く作られており 52.8 MeV の信号ガンマ線のうち 85% がこの電磁石を通り抜けガンマ線検出器に入ることになる。電磁石の外側には磁場補償コイルが設置され、ガンマ線検出器の場所において漏れ磁場を 50 ガウス以下に抑え、光電子増倍管の使用を可能にしている。

陽電子の飛跡を測定するドリフトチェンバーは 16 枚の独立したモジュールからなり、ターゲットの周りに放射状に配置されている [6]。各モジュールは九つのドリフトセルからなるレイヤー 2 枚を半セル分ずらして構成されており、左右不定性の判定に使用する。なおチェンバーガスはヘリウム、エタン混合ガス (50 : 50) である。それぞれのレイヤーはジグザグ型の vernier パッドが入ったカソードフォイルで仕切られており、vernier パターンからの信号比とアノード

ワイヤの信号比を合わせて飛跡のビーム軸に沿った位置の精度を高めている。

陽電子はドリフトチェンバーを通った後にその両端に設置されたタイミングカウンターで時間が測定される。外側にプラスチックシンチレーターと両端にファインメッシュ型光電子増倍管が設置されたシンチレーションバーカウンターがドリフトチェンバーの両端に 15 本ずつ COBRA の内壁に沿って円筒状に置かれている。この両端の信号から時間とビーム軸に沿った位置を再構成し、またバーのヒット情報から方位角を知ることができる。シンチレーションカウンターの内側にはビーム軸に垂直方向にそれぞれ 128 本敷き詰められたシンチレーションファイバーと APD を組み合わせたファイバーカウンターがある。これはおもにビーム軸に沿った位置をより正確に知るために使用され、バーカウンターの方位角情報と合わせてトリガーに使用される。

3.3 液体キセノン検出器

液体キセノンはガンマ線検出器として優れた性能を持つことが知られている。放射線の入射により液体キセノンはおもに電離からの電荷信号とシンチレーション光が発生するため、用途に応じて必要な情報が使用される。MEG 実験では検出器を単純に、また時間応答のよさを最大限に生かすためにシンチレーション光のみを使用する。液体キセノンの特徴としては、発光光量が多い (NaI の 75% 程度)、波形の減衰時間が短い (ガンマ線入射に対して 45 nsec)、密度が多い ($2.98 \text{ g} / \text{cm}^3$) などが挙げられる。また液体でありシンチレーション光の自己吸収がないため大容量化が比較的簡単で一様性にも優れている。その反面いくつかの難点があり、使用する場合には注意が必要でもある。まずシンチレーション光の波長が 178 nm と非常に短く通常の PMT は感度がないため、特別仕様のものを使う必要がある。また液体キセノンは 165 K と比較的低温に保つ必要があり、低温容器、冷凍機などの準備が必要となる。またシンチレー

シオン光は水、酸素などの不純物により簡単に吸収されてしまうため、一度検出器を液体キセノンで満たした後などに純化がどうしても必要になる。これらすべての困難な点を克服し、2007年末には液体キセノン検出器が完成し、物理データ取得にいたった。ここでは完成にいたるまでの詳細は参考文献[7]に譲るとし、液体キセノン検出器の重要な点について述べる。液体キセノン検出器は900リットルの液体キセノンとシンチレーション光を検出するための846本の光電子増倍管で構成される。また液体キセノンを低温に保つために2層構造となっており、外側は熱流入を軽減させるための真空層となる。また検出器の形は超伝導磁石の外側の形に合うようC型になっている。全体では10%の立体角を覆う大きさとなる。図4に液体キセノン検出器の概要を示す。ガンマ線が入射する面は、物質量をできるだけ減らすため、かつ3気圧程度にまで耐えるように内側容器はハニカム構造になっており、外側は0.7mmのステンレス板になっている。ガンマ線入射窓の物質量としては $0.075 X_0$ に抑えられた。液体キセノンを165Kに保つためにはKEKグループにより開発された200Wのパルス管冷凍機が使用される。光電子増倍管は浜松ホトニクスとの共同開発により、低温で178nm付近のシンチレーション光に感度のある光電子増倍管が完成した。これら846本の光電子増倍管は直接液体キセノンに浸され、全体では液体キセノンを囲むように6面に設置され、全体で35%を覆っている。液体中の不純物を取り除くために、モレキュラーシーブスを利用した液体純化装置、またゲッターを利用したガ

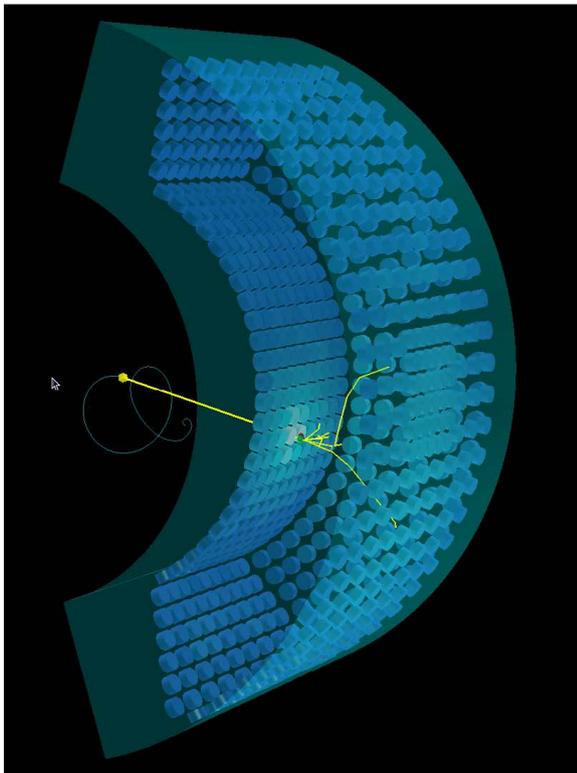


図4：液体キセノン検出器

ス純化装置の開発もおこない、2009年の物理ラン開始時には予想される光量と同程度の発光量を達成している。

PSIの研究者を中心に開発されたDRS4[8]という波形記録装置を用いて、すべての光電子増倍管の波形が1.6GHzのスピードで記録されている。図5に一つの光電子増倍管で取得された波形を示す。この波形からまずはシンチレーション光の時間、電荷情報を引き出し、ガンマ線のエネルギー、時間、位置の再構成をおこなう。エネルギーに関しては基本的にはこの電荷情報を、場所ごとに異なる光電子増倍管の覆う面積の違いを考慮して足し合わせることで求める。ガンマ線の反応位置は、その近辺の光電子増倍管の光量分布を、立体角を考慮した予想光量分布を用いて三次元フィッティングをおこなうことにより求める。時間は、その反応点を再構成した後にシンチレーション光の伝播時間とチャンネル毎のエレクトロニクスによる応答時間の違いを差し引いた後で、電荷がある閾値を超えたものを用いてフィッティングをおこなうことにより求める。

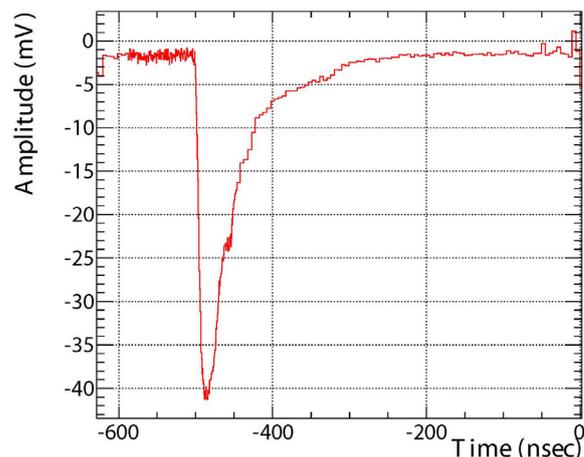


図5：光電子増倍管で取得されたガンマ線検出器の波形情報の例

液体キセノン検出器で特に重要なのが装置の較正である。光電子増倍管の増幅率の測定用にLEDが、また量子効率の測定用などに ^{241}Am の α 線源が装置の中に前もって導入されており、定常的にモニターされている。特に液体キセノン検出器の較正で重要なものはCEXと呼ばれるものである。通常ミュー粒子を導入するビームラインの設定を変更することによりパイオンビームに変更可能であり、ターゲットを液体水素に変更すると、 π^- (静止) $+p \rightarrow \pi^0+n$ 、 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 反応から2本のガンマ線が放出される。この2本のガンマ線を正反対の方向で検出すると、それぞれ54.9, 83.0 MeVの単一エネルギーを持つガンマ線が得られる。この54.9 MeVのガンマ線がわれわれの信号となる52.8 MeVと大変近く、非常によい較正手段となる。この較正方法を用いて、絶対エネルギー較正、エネルギー、時間、位置分解能の見積りなどをおこなっている。またわれわれのビームラインとは

反対の下流側に Cockcroft-Walton 型陽子加速器を設置し、標的にリチウムを用意して原子核励起状態から出る 17.6 MeV 単一エネルギーのガンマ線を利用する較正方法もある。この方法では絶対エネルギーは信号よりも低いが、CEX とは異なり頻繁におこなうことが可能となるため、週 2, 3 回測定をおこない、光量のモニター、入射位置のエネルギー依存性の補正などに使用している。

4 2009 年ラン

4.1 検出器の状況

2008 年のランではドリフトチェンバーの放電により多くのドリフトチェンバーが動作しなかった。検出器はヘリウム中に置かれているが、このヘリウムが数ヶ月の運転中にゆっくりと回路の周りに拡散したことが原因と考えられている。その後 2009 年のランを始める前に原因を究明し、基板のデザインの変更と新たなモジュールの導入により問題を解決した。2009 年ラン中はすべてのチェンバーモジュールが正常に動作した。

液体キセノンは 2009 年ランの前に一度タンクに送り、ガスに戻した後にゲッターにより純化をおこなった。また、リークが疑われた冷却用液体窒素の配管も交換した。これにより純度が上がり、光量が 2008 年の実験終了時より 45% 増加した。測定中は純化をおこなわなかったが、光量の変化は見られなかった。

波形記録用に使用している DRS チップをアップグレードすることで応答が線形な入力電圧範囲が増えた。また、前のバージョンでは波形を読んだ後でも電荷の一部が解放されずに残ってしまい、その次の事象に小さなパルスとして残るゴーストパルス問題があったが、その問題も解決された。

4.2 データ取得

2009 年には 8 月から 9 月にかけて CEX による液体キセノン検出器の較正および性能評価のためのデータを取得した。10 月中にトリガーと新たに導入した DRS4 の調整をおこない 10 月末から 12 月まで物理データを取得した。トリガーではガンマ線のエネルギー、キセノン検出器とタイミングカウンター間の時間差およびガンマ線と陽電子の間の角度により事象が選ばれる。陽電子のエネルギーに関しては、タイミングカウンターにヒットがあるということにより、信号付近の事象が選択される。

物理データの取得と並行して、各検出器のシングルトリガーデータやランダムトリガーデータも較正用にプリスケールして取得した。このデータは物理結果のノーマライゼーション(後述)にも使われる。

4.3 検出器の解析と性能評価

陽電子の飛跡はドリフトチェンバーのヒットをカルマンフィルターにより物質による多重散乱やエネルギーロス、勾配磁場を考慮してフィッティングをおこない再構成される。ドリフトチェンバーモジュールのアラインメントはレーザーを用いたオプティカルサーベイの後、ミッセル陽電子データを使いおこなった。この結果を磁場なしでの宇宙線データを用いたアラインメントと比較しチェックした。

陽電子のエネルギーと角度の分解能は一つの陽電子が二度ドリフトチェンバーを通った事象を用いておこなう。それらの事象で、二つのターンでそれぞれ別にフィットをおこない、差の分布の幅により分解能を測定できる。この方法で見積もられる値と真の分解能との差は MC を用いて評価し、その違いは物理解析の中で考慮した。陽電子の角度分解能はビーム軸方向を z 軸とした時の天頂角 (θ) 方向で 11.2 mrad, 方位角 (ϕ) 方向の core の分解能は 7.1 mrad となり 2008 年よりもよくなった。

エネルギーレスポンスはダブルガウシアンで表現され、二つの成分のシグマ(と割合)はそれぞれ 0.39 MeV (79%) と 1.71 MeV (21%) である。この分解能はミッセル陽電子のエネルギー分布のエッジをフィットすることでも見積もり確認をした。また、絶対的なエネルギーのスケールもミッセル陽電子のエネルギー分布より算出した。

ミュ粒子の崩壊点は再構成された陽電子の飛跡がターゲットに当たる位置として見積もられる。崩壊点の位置の分解能も角度や陽電子のエネルギーと同様の方法でおこない、ビーム軸方向とそれに垂直な方でそれぞれ 2.8, 2.3 mm と見積もった。この結果は、意図的にターゲットに開けた穴の部分のエッジの見え方から確認をした。

場所によるエネルギースケールの違いは較正用の 17.6 MeV もしくは 54.9 MeV のガンマ線の測定データを用いて調べられ較正される。信号の 52.8 MeV のガンマ線に対する反応は、CEX での 54.9 MeV のガンマ線を用いて場所ごとに調べられた。分解能は深さ (w cm) に依存し、典型的には 2.1% ($2 \leq w$), 2.8% ($1 \leq w < 2$), 3.3% ($0 \leq w < 1$) である。エネルギーの絶対スケールは CEX データを用いておこない、その誤差は 0.4% である。物理データ取得中のエネルギースケールの変化は陽電子ビームを用いた $\text{Li}(p, \gamma)$ 反応による 17.6 MeV の単一エネルギーのガンマ線を用いて数日に一度の頻度でモニターしたが、変化は見られなかった。ガンマ線エネルギーのスケールと分解能は、ミュ粒子の輻射崩壊のエネルギースペクトルからの見積もりと比較し確認した。

大量のミュ粒子を測定するために、ガンマ線検出器においても、たとえばガンマ線が 2 個同時に検出器に入るような事象には注意が必要である。この波形情報からパイル

アップ事象を見つけ出すことが可能であり、また光量分布、PMT信号時間の広がりなどからもパイルアップ事象を見つけ出し、識別に使用している。そのようにして見つかったパイルアップ事象ではエネルギーの小さい方のガンマ線のエネルギーを引いてから物理解析に用いる。宇宙線は検出器の外側の面でも多くの光が検出される特徴的な分布によりガンマ線事象と区別され、物理解析のデータセットからは除外される。

ガンマ線のキセノン中での最初の反応点の位置の分解能はシミュレーションより、入射面に平行な方向で5mm、深さ方向で6mmと見積もられた。この結果はCEXによる54.9MeVのガンマ線の測定を検出器の前に鉛のスリットを置いておこない、その再構成されたスリットの形からの分解能を見積もり確認した。

ガンマ線の放出角は、見積もられたミュ粒子の崩壊点と液体キセノン検出器により再構成されたガンマ線の最初の反応点から決められる。陽電子の角度分解能、ターゲット上での崩壊点の位置分解能、ガンマ線の位置分解能を合わせて、陽電子とガンマ線との角度分解能は θ, ϕ 方向それぞれで14.7および12.7mradである。

ガンマ線と陽電子の間の時間差の分解能は、測定されたミュ粒子の輻射崩壊事象での時間差の分解能から、信号とのエネルギーの違いを考慮し142psecと評価した。時間差の中心値はミュ粒子の輻射崩壊データと陽電子ビームを用いた $B(p, 2\gamma)$ 反応からの二つのガンマ線を用いてモニターし15psec以内で安定であった。

5 結果

5.1 物理解析

物理解析では、blind unbinned extended maximum likelihood 解析を用いた。解析は五つの変数 — ガンマ線エネルギー(E_γ)、陽電子エネルギー(E_e)、二つの粒子の時間差($T_{e\gamma}$)、粒子間の天頂角($\theta_{e\gamma}$)と方位角($\phi_{e\gamma}$)を使っておこなう。なお、角度は陽電子の運動量を反転したベクトルとガンマ線の運動量の間の角である。

解析範囲の事象は検出器の較正や物理解析の最適化の際には E_γ と $T_{e\gamma}$ によりブラインドされており、それらがすべて決まってからこの範囲の事象を読めるようにし物理解析をおこなった。

信号数と分岐比の変換をおこなうためのノーマライゼーションファクター(以降kファクターと呼ぶ)は、物理データの取得中に同時にとられているミッセル崩壊データを用いて算出した。ミッセル崩壊データは 1×10^7 のファクターでトリガーの段階でプリスケールして取得し、そのトリガー条件は物理データのものからガンマ線の条件を除き、陽電子のヒットのみが要求されるようにしたものである。kファ

クターの算出の際には信号とミッセル陽電子のエネルギーの違いによる効率の違いを考慮している。ガンマ検出器の検出効率はシミュレーションで計算されたものを使っているが、これはCEXのデータを用いて正しいことを確認している。その他トリガー効率を考慮しkファクターを $1.01 \pm 0.08 \times 10^{-12}$ と算出した。

物理解析に使う事象は $48 \leq E_\gamma \leq 58 \text{ MeV}$, $50 \leq E_e \leq 56 \text{ MeV}$, $|T_{e\gamma}| \leq 0.7 \text{ nsec}$, $|\phi_{e\gamma}| \leq 50 \text{ mrad}$, $|\theta_{e\gamma}| \leq 50 \text{ mrad}$ の範囲で選んだ。この範囲はそれぞれの変数の分解能の10倍程度に相当する広い範囲である。また、トラックフィットの χ^2 などの陽電子解析のクオリティによるカット、カロリメータの宇宙線事象カット、フィデューシャルボリュームのカットもおこない、これらの効果は確率分布関数(p.d.f.)とkファクターの計算の際に考慮した。

ライクリフッドは次式のように書ける。

$$\begin{aligned} -\ln L(N_{\text{sig}}, N_{\text{MRD}}, N_{\text{BG}}) \\ &= N_{\text{exp}} - N_{\text{obs}} \ln(N_{\text{exp}}) \\ &\quad - \sum_{i=1}^{N_{\text{obs}}} \ln \left[\frac{N_{\text{sig}}}{N_{\text{exp}}} S(\vec{x}_i) + \frac{N_{\text{RMD}}}{N_{\text{exp}}} R(\vec{x}_i) + \frac{N_{\text{BG}}}{N_{\text{exp}}} B(\vec{x}_i) \right] \end{aligned}$$

ここで、 N_{obs} は解析に用いた事象数、 $N_{\text{sig}}, N_{\text{RMD}}, N_{\text{BG}}$ はそれぞれ信号、輻射崩壊、アクシデンタルバックグラウンドの数、 N_{exp} はこれらの三つの数の和、 S, R, B はそれぞれの事象タイプのp.d.f.であり \vec{x}_i (各事象での観測量)の関数である。 $N_{\text{sig}}, N_{\text{RMD}}, N_{\text{BG}}$ をパラメータとしライクリフッドが最大になるようにフィットがおこなわれる。解析範囲はそれぞれの変数の分解能の10倍程度の広い範囲であるため、その中のほとんどがアクシデンタルバックグラウンドであり、これによりバックグラウンド数の統計精度を小さくすることができる。

p.d.f.は各事象の特徴により事象毎に違うものが使われる。たとえば、ガンマ線のエネルギー分解能は最初の反応点が入射面からある程度離れた事象の方が近い場合よりもよくなるので、p.d.f.も入射面からの距離に応じて違うものを使っている。これにより分解能がよいところで信号とバックグラウンドをより明確に分けることができる。また、分解能が悪い部分のバックグラウンド分布も考慮されるので、それにより信号に近い計量を持つバックグラウンド事象が観測されても物理結果への影響は適切に扱われる。

5.1.1 確率分布関数

信号のエネルギー、時間差、角度は単一なので信号p.d.f.はそのエネルギーでの検出器の反応である。検出器の反応に関しては4.3節で記述した通りである。

図6に信号付近での検出器のレスポンスを示す。

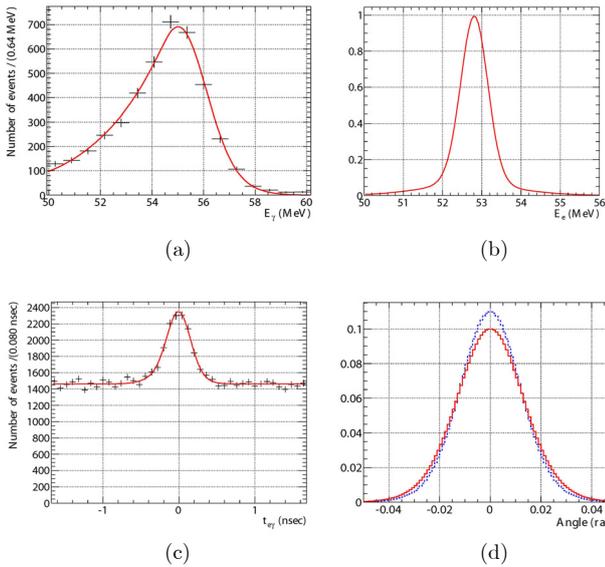


図 6 : 検出器の反応の例

(a) CEX での 54.9 MeV の単一エネルギーのガンマ線に対して測定されたガンマ線エネルギー。(b) 測定された陽電子エネルギーの分解能を元にした信号に対する反応。(c) 低エネルギーでの輻射崩壊による測定された時間差の分布。ピークはアクシデンタル事象によるフラットなバックグラウンド上にある。(d) 測定された分解能を元にした信号事象のシミュレーションにおける陽電子の運動量を反転したベクトルとガンマ線の運動量との角分布。実線が θ 方向、点線が ϕ 方向である。

MEG 実験の主要なバックグラウンドはアクシデンタルバックグラウンドであるが、トリガーにかかるほとんどの事象がアクシデンタルであるため、データを用いて p.d.f. を作ることができる。この際ガンマ線と陽電子の計量に相関はないので、図 7 に示されているガンマ線エネルギーと陽電子エネルギーの p.d.f. を作る際はもう一方の変数をカットに使う必要がなく大きな統計を用いることができる。バックグラウンドの時間 p.d.f. は解析範囲ではフラットである。角度に関しては検出器のアクセプタンスの効果があり完全にフラットではないため、時間とエネルギーの範囲を広げたデータから p.d.f. を作った。

輻射崩壊は解析範囲での観測数が少ないため、データから p.d.f. を作ることはできない。このため理論的な変数の分布と測定された検出器の反応から p.d.f. を作っている。

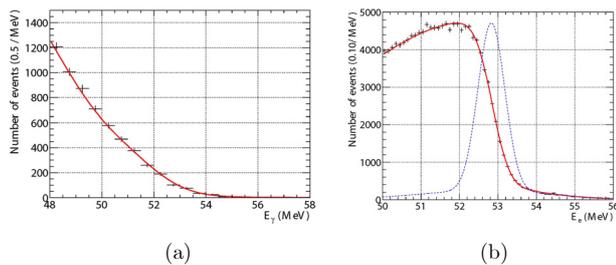


図 7 : アクシデンタルバックグラウンドの p.d.f.

(a) ガンマ線のエネルギー。(b) 陽電子のエネルギー。点線は信号の p.d.f. である。

5.2 実験感度

実験の感度は多数のシミュレーション実験における平均の 90% 信頼度の上限值として計算した。シミュレーションでの事象の生成は前述の p.d.f. を用いておこない、バックグラウンドの事象数の期待値は 2009 年の実験での観測数を用い、信号数の期待値を 0 とした。その結果、感度は 6.1×10^{-12} と計算された。これは現在の分岐比の上限值 1.2×10^{-11} [1] よりも二倍よい分岐比である。MEG 実験のおもなバックグラウンドはアクシデンタルバックグラウンドなので、サイドバンドデータに対して物理解析をおこなったときの信号数の上限値は実験感度とほぼ同じであるはずである。実際、この値は $4 \sim 6 \times 10^{-12}$ となり、シミュレーションの結果と矛盾がない。図 8 に解析領域と同じ広さのサイドバンドの一部における事象の分布を示す。

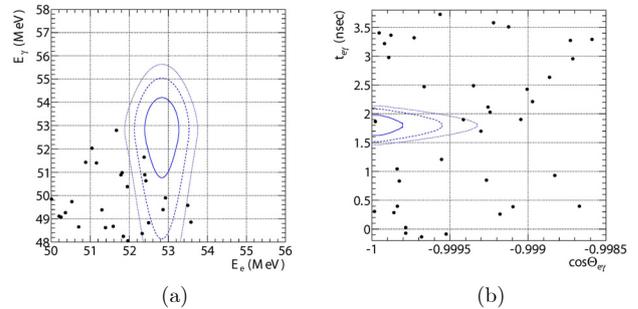


図 8 : サイドバンドでの事象分布

図中の線はそれぞれ 1, 1.64, 2σ に相当する信号の範囲である。それぞれ 39, 74, 87% の信号領域に相当する。(a) ガンマ線エネルギーと陽電子エネルギーのプロット。時間と角度に関してはほぼ 90% に相当するカットをしてある。(b) 時間と角度のプロット。ガンマ線エネルギーと陽電子エネルギーに関してはほぼ 90% に相当するカットをしてある。

5.3 解析領域での結果

信号領域での事象分布を図 9 に示す。サイドバンドと比較して多くの事象が信号の中心付近に観測された。図中の数字は事象の対応を示すものである。図 10 に図 9 中の 1 番のイベントディスプレイを示す。

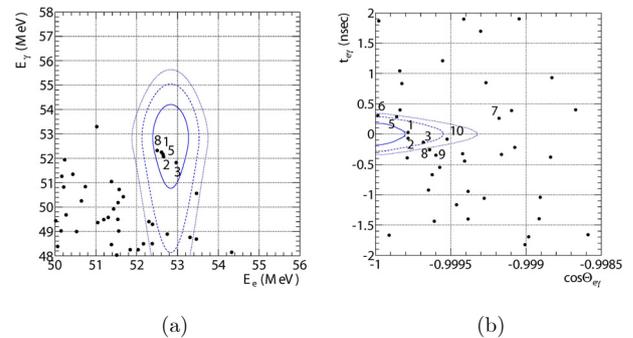


図 9 : 信号付近での事象分布

プロットの説明は図 8 と同様。図中の数字は二つの図での事象の対応を示すためのものである。

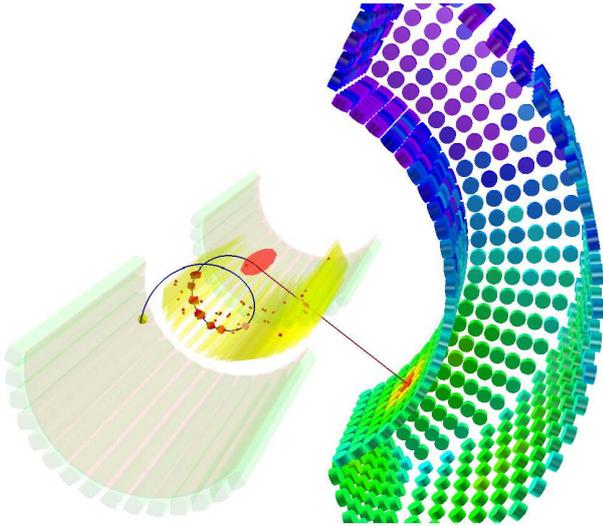


図 10 : 信号らしさの高いイベントのイベントディスプレイ

図 11 はこの事象に対してライクリフッド解析をおこなった結果である。輻射崩壊の数はサイドバンドデータより 32 ± 2 と期待されていたが、フィット結果は 35_{-22}^{+24} となり矛盾がない。信号数のフィット結果の中心値は 3.0 である。90% 信頼区間の計算は信号数の期待値を変化させながら多数のシミュレーションをおこない、各点における期待値の点とベストフィット点でのライクリフッドの比が、実験で得られたものよりも大きくなる確率が 10% 以上となる範囲を探すことによりおこなった[9]。この際フィットに使われる p.d.f. のパラメータを振ることにより系統誤差も考慮される。この方法による信号数の上限値と k ファクターより、系統誤差も含めて分岐比に上限値を付けた。また信号数が 0 の場合は信頼区間内であった。

$$\frac{\mathcal{B}(\mu^+ \rightarrow e^+\gamma)}{\mathcal{B}(\mu^+ \rightarrow e^+\nu\bar{\nu})} < 1.5 \times 10^{-11} \text{ at } 90\% \text{ C.L.}$$

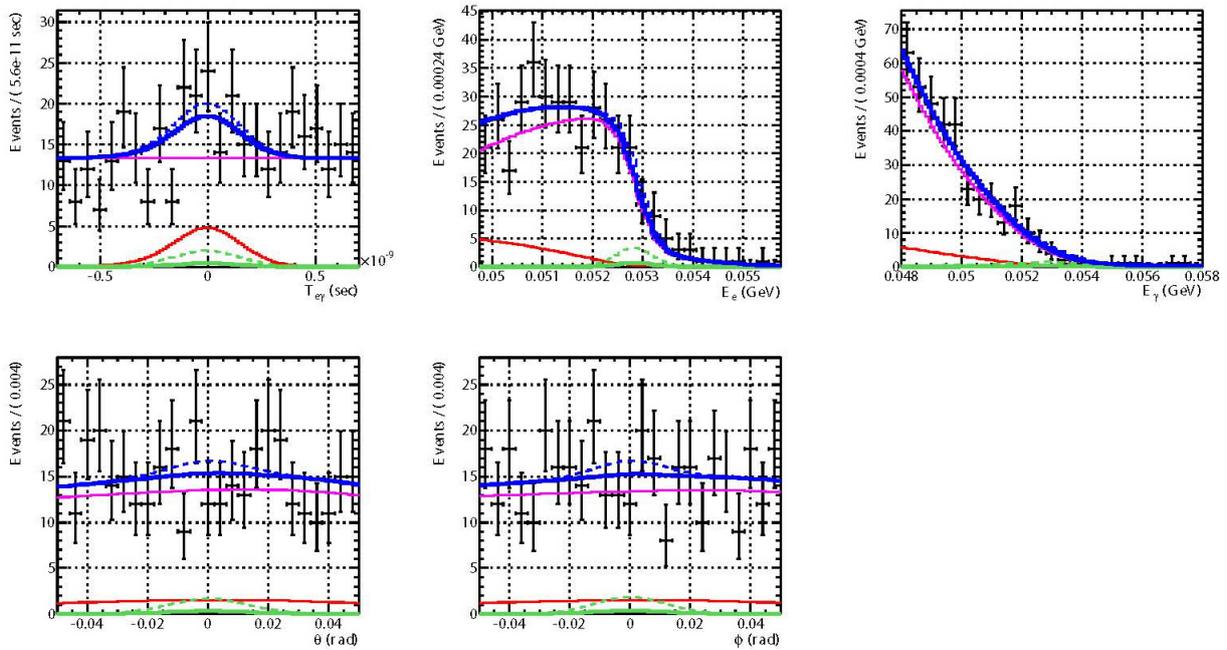


図 11 : ライクリフッドフィットの結果の各変数へのプロジェクション

実線は上から順に、トータル、アクシデンタルバックグラウンド、輻射崩壊、信号である。点線は信号数の 90% 信頼度上限値に相当する。

信号とバックグラウンドのライクリフッドの比で上位にランクされた事象に関しては一事象ずつ詳細に調べられ、解析や較正の間違えなどの問題は見つからなかった。図 12 は陽電子の解析において、トラックフィットの χ^2 などから解析のクオリティが高い事象だけをプロットしたものであるが、この場合でも信号の中心付近の事象は残っており、より有為度が高くなる事が分かる。

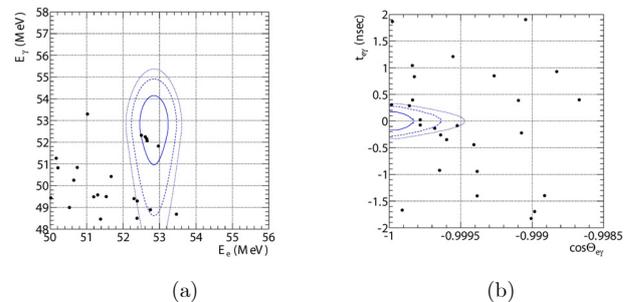


図 12 : 陽電子の解析のクオリティの高い事象を選んだ場合の信号付近での事象分布

プロットの説明は図 8 と同様。クオリティの高い事象を選んでいるため、信号を表す線の範囲が図 9 に比べて小さくなっている。また、バックグラウンド事象数がより少なくなっている。

6 まとめと今後の予定

MEG実験はポールシェラー研究所の世界最高強度の直流ミュー粒子ビーム、世界最大の液体キセノンガンマ線検出器、特殊な勾配磁場を作る超電導マグネット、低物質量子ドリフトチェンバーと高分解能の陽電子タイミングカウンターを用いて $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ の探索をおこなっている。2009年には安定した検出器の状態の元で約2ヶ月間のデータ取得をおこなった。検出器の較正や事象選択、物理解析の方法の決定などは解析領域のデータを用いずにおこなった。実験感度は 6.1×10^{-12} であり、現在の実験的な上限値を約2倍上回るものである。解析領域の事象に対してライクリフト解析をおこなった。この解析で使われる p.d.f. のほとんどはデータを用いて作った。フィットによる信号数の中心値は 3.0 となり、上限値は Feldman と Cousins の方法で算出し、系統誤差も含めて $\mathcal{B} < 1.5 \times 10^{-11}$ である。解析領域では p.d.f. から計算される平均や、サイドバンドよりも多めの事象が観測されたが、これは統計的にはバックグラウンドの揺らぎである可能性を排除できない程度である。なお、この記事の結果はプレリミナリーなものである。その後磁場の扱いによる陽電子のエネルギーおよび角度の系統誤差を小さくすることができたため、現在データを再解析・ブラインドし最終的な結果を出す過程にある。

MEG実験の2010年は8月より物理データ収集を開始し、8月の終わり2週間ほど一度液体キセノン検出器の較正として CEX データ取得をおこなった。その後9月に物理データ取得を再開し、これは年末の加速器シャットダウンまで続く予定となっている。2010年物理データ収集開始前には、いくつかの変更点、また新しい較正方法などが試された。ターゲット中におけるミュー粒子静止数を最適化するビームチューニングは2009年物理ラン開始前に予定されていたが、他の実験グループがビームタイムの延長をおこなったため時間がなくなり、2010年開始前におこなわれた。最適化は、ターゲット前のミュー粒子運動量を調整するためにビームラインに置く物質(マイラーフィルムが使われている)を調整することによりおこなわれる。2009年に、200 μm のフィルムが使用された場合にはターゲット上で静止せず下流側に抜けていく割合が多く、300 μm に変更することにより改善したという事実があったため、200 ~ 400 μm の間で最適な厚みを探した結果、2009年の後半にも使用された300 μm が最適であるとの結論を得た。また2009年ランの終了時点で問題のあった5枚のドリフトチェンバーモジュールに関しては新たに製作、交換された。2009年には波形取得用に DRS4 を使用し、前述のように線形性、ゴーストパルスの改善がみられたが、エレクトロニクス自身の時間分解能は以前より悪い結果となった。この原因を調査したところ、ボード上のノイズが原因であることが判明し、デザインの変更、またパラメータの再調整により改善を試みた

結果、2010年夏の CEX で改善していることが確認された。陽電子検出器の性能評価はミッシュル陽電子を使用してきたが、新たな試みとして単一運動量を持つ陽電子ビームの Mott 散乱を利用した陽電子の較正方法のテストをおこなった。この単一運動量は変更可能なために、信号付近(40 ~ 60 MeV)の検出器の反応が詳細にチェックできると期待している。また液体キセノン検出器用には、ビームを出している時でもエネルギー較正が可能となるように中性子源を用いたニッケル捕獲からの9 MeV ガンマ線のキャリブレーション方法が現在テストされている。 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊分岐比に対する検出感度は2010年に2009年の2倍程度改善することが期待されており、さらに少なくとも2012年まで物理ランを続ける予定である。最終的には崩壊分岐比にして 10^{-13} レベルまで到達し、統計で制限されている2009年のMEG実験の結果についてMEG実験自身ではっきりさせることをまずは目標としている。最終的に到達可能な検出感度はもちろん統計にも依存するが、バックグラウンドの削減、つまりは検出器の分解能の改善が必須となり、現在進行中である解析アルゴリズムの改良、検出器較正の改善が大変重要となってくる。

謝辞

MEG実験グループメンバーおよび関係者の方々のご協力に感謝申し上げます。また、本稿執筆の機会を与えてくださった高エネルギーニュース編集委員の皆様へ感謝いたします。本研究の一部は科学研究費補助金(特定領域研究16081205)の助成を受けています。

参考文献

- [1] M. L. Brooks *et al.*, Phys. Rev. Lett. **83**, 1521 (1999).
- [2] J. Adam *et al.*, Nucl. Phys. B **834**, 1 (2010).
- [3] 森俊則, 日本物理学会誌 **64**, 674 (2009).
- [4] 大谷航, 高エネルギーニュース **28**, 227 (2010).
- [5] W. Ootani *et al.*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **14**, 568 (2004).
- [6] 西口創, 高エネルギーニュース **27**, 262 (2009).
- [7] 三原智, 高エネルギーニュース **26**, 9 (2007).
- [8] S. Ritt, Nucl. Instr. and Meth. A **518**, 470 (2004).
- [9] G. J. Feldman and R. D. Cousins, Phys. Rev. D **57**, 3873 (1998).