

平成21年 5月31日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19549002

研究課題名（和文） MEG検出器のパイ中間子ビームを用いた較正方法の開発研究

研究課題名（英文） R&amp;D of the MEG detector calibration method with pion beam

研究代表者 岩本 敏幸（IWAMOTO TOSHIYUKI）

東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教

研究者番号：20376700

研究成果の概要：レプトンフレーバーを破るミュー粒子 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊を分岐比 $10^{-13}$ まで探索する実験MEGの物理データ取得が2008年9月より本格的に開始された。稀崩壊事象探索実験となるため、検出器の較正が決定的に重要となる。本研究においてパイ中間子ビームを用いて主にガンマ線検出器である液体キセノン検出器の位置分解能測定、さらにはガンマ線検出器と陽電子検出器の相対時間較正の手法を確立した。

交付額

（金額単位：円）

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 平成19年度 | 1,600,000 | 0       | 1,600,000 |
| 平成20年度 | 1,700,000 | 510,000 | 2,210,000 |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 3,300,000 | 510,000 | 3,810,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子物理

## 1. 研究開始当初の背景

(1)本実験は2007年度秋より開始される予定であった。実験開始時になにより大切になってくるのは、検出器の徹底的な理解である。エネルギー、位置、時間をそれぞれの検出器に対して独立に、また組み合わせて行うことにより初めて、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 事象の探索が可能になる。まずは2007年度12月までのビームタイムにおいて、できる限りの検出器の較正方法を確認し、実験データの蓄積も行う。

(2)2008年度以降の定常運転に向けた必要事

項を2007年度のデータで洗いなおすことが必要不可欠となる。新たな手法を試す必要が生じた場合にでも、来年1～3月までの加速器のシャットダウン時に必要な較正方法を検討、テストすることにより、2008年度のデータ収集開始時に速やかに較正を開始できるように準備することが可能になる。

(3)上記理由により、2007年度研究を開始し、必要な較正データをとることは重要であるため、今回の科研費の応募を行ったのが背景である。

## 2. 研究の目的

(1)標準模型を越える物理研究は、現在各国の研究者が総力をあげて取り組んでいる重要な研究課題である。スーパーカミオカンデ実験により明らかにされたニュートリノ振動現象は、ニュートリノにおいてレプトンフレーバーが保存していないことを世界で初めて示すものである(Phys.Rev.Lett. 81,1562-1567,1998)。トップクォークの質量が重いために超対称性大統一理論においてレプトンフレーバーの破れが非常に大きくなることが示されたこととあわせ、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊の実験的研究が世界的に注目されている。さらにSNOやKamLAND実験で検証された太陽ニュートリノ大混合角解を用いると、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊分岐比がMEGA実験の上限値 $10^{-11}$ のすぐ下にくる可能性が極めて高く、この領域の探求が新しい物理の発見にとって緊急かつ重要な責務となっている。

(2)これまでの $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊探索実験としては、米国ロスアラモス国立研究所において行われたMEGA実験があり、崩壊分岐比の上限は $10^{-11}$ にとどまっている

(Phys.Rev.Lett.83,1521,1999)。MEG実験では、これを超えるためにPSIにある現在世界一強力なミュオン粒子直流ビームを供給する加速器を利用し、 $\gamma$ と $e^+$ のエネルギー分解能の優れた測定器を開発する。現行実験の100倍以上の感度でこの事象を探索する唯一の実験となる。関連する研究として、原子核での $\mu \rightarrow e$ 転換を探索する実験があり、現在の精度はMEGA実験と同程度である。次期 $\mu \rightarrow e$ 転換探索実験としては、米国ブルックヘブン国立研究所で計画されているMECO実験があり、MEG実験にほぼ匹敵する精度を目指しているが、実験開始は2010年以降とされている。超対称性粒子を直接測定できるLHC実験などに先駆けて $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊事象を発見することは、標準模型を超える新しい物理の発見、SUSY-GUTの強力な証拠を意味し、今後の素粒子物理学の方向性を与えるという点で極めて重要かつユニークな意義をもつ。

(3)2007年秋より、このレプトンフレーバーを破る $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊探索実験MEGAがスタートする予定となっている。本実験はスイス国立ポールシェラー研究所に現存する世界最高

強度のミュオン粒子ビームを利用し、陽電子とガンマ線に崩壊する事象を高計数下において高精度で検出可能な測定器を開発し、現行実験の100倍以上の感度でもって超対称性大統一理論の強力な証拠をどの実験よりも早く発見し、今後の素粒子物理学の方向性を決めることを目的とする実験である。

(4) $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 事象の探索は、ターゲット中で静止した $\mu^+$ の2体崩壊から正反対に放出される52.8MeVの陽電子とガンマ線を同時に検出することにより行われる。バックグラウンド事象には主に2種類あり、

1. ミュオン粒子の輻射崩壊  $\mu \rightarrow e\nu\nu\gamma$
2. 偶発的なバックグラウンド

に分けられる。1に関しては比較的達成可能なエネルギー、運動量の測定精度が得られれば問題にはならない。2に関しては、通常ミュオン粒子崩壊( $\mu \rightarrow e\nu\nu$ )からの陽電子と、陽電子が付近で対消滅反応を起こした結果出る $\gamma$ 線などが偶然同時に計測される事象で、本実験で使用されるミュオン粒子ビーム強度は $3 \times 10^7 \mu^+/\text{sec}$ と高計数であることから、本バックグラウンドの削減が重要になってくる。特に $\gamma$ 線エネルギー分布は高エネルギー部分で急激に落ちるため、 $\gamma$ 線検出器のエネルギー分解能はこのバックグラウンドを落とすために必須となる。

(5)現在この $\gamma$ 線検出器として、新しいタイプの液体キセノンカロリメーターが開発されている。液体キセノンの利点は、発光量がNaI(Tl)と同程度に大きい、液体のため大型化のときに均質にできる、発光の減衰時間が45nsと短く、高い計数測定にも適し、時間分解能もよいという点があげられる。一方、陽電子の運動量と方向は磁場勾配をもった特殊な超伝導ソレノイド電磁石のスペクトロメーターを用いることにより早い段階で運動量を識別する。スペクトロメーターは、超伝導電磁石、その内部にドリフトチェンバー、タイミングカウンターから構成され、陽電子の運動量、方向、時間の測定に使用される。ドリフトチェンバー、タイミングカウンターの一部と、すでに完成している超伝導ソレノイド電磁石を含めて実際の実験場所に設置し、 $\mu^+$ ビームを用いたエンジニアリングランが昨年冬に行われた。

(6)本実験の成功の鍵をにぎる液体キセノン検出器は、2007年5月末の完成に向けて建設が進んでいた。本検出器には、900リットルの液体キセノンと、846本の2インチ光電子増倍管が使用される。応募者はこれまで本ガンマ線検出器の開発研究に携わり、主に検出器の性能を評価するための較正方法の検討、予備実験などを行ってきた。特に2003年秋、2004年秋のPSIにおける $\pi^-p \rightarrow \pi^0n$ ,  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 反応を利用したビームテストにおいて本実験に近いエネルギー領域(55, 83, 129MeV)の $\gamma$ 線テストを行い、十分要求を満たす性能を確認した。2本の $\gamma$ 線が正反対にできるため、私はキセノンの反対側にNaI検出器を設置し、NaI側で $\gamma$ 線の位置、エネルギーを測定すると、キセノン側の $\gamma$ 線のエネルギーが決まり、ほぼ単一エネルギーでのキセノン検出器のエネルギー分解能測定を可能にした。実際の実験ではこの $\pi$ ビームを用いて、ガンマ線検出器のエネルギー分解能の見積り、52.8MeV近辺のエネルギースケールの決定、さらにNaI検出器の前に鉛、プラスチックシンチレータを設置し、参照時間を求めることにより、時間分解能の見積りを行う。NaI検出器は、磁場中で使用するためにシンチレーション光の検出用としてAPDを使用する。さらに、液体キセノン検出器の場所依存を測定するために9本のNaI検出器を上下左右に動かす駆動装置も設置し、できる限り検出器の系統誤差を減らす。 $\pi$ ビームを使用するこのキャリブレーション方法は、ビームラインの変更、ターゲットの液体水素への変更、さらにはNaI検出器を移動して様々な場所で測定することなどにより、少なくとも数日はかかってしまうため、頻繁に行うことは困難となる。

(7)この間のデータの質を保証するためには、励起原子核からのガンマ線を使用する。陽子をLiF標的に入射させたとき、 $Li(p,\gamma)Be$ 反応から17.6MeVのガンマ線が生じる。このガンマ線は単一エネルギーであるために、絶対エネルギー較正と分解能の見積もりが可能となる。陽子ビーム用にコッククロフト・ウォルトン型陽子加速器を使用する。ポロンターゲットを使用すると、 $B(p,\gamma)C$ からの16.1MeV、11.7MeV、4.4MeVのガンマ線が放出されるため、これらのエネルギー検出と先のLiFターゲットの結果と合わせると、エネル

ギースケールを決定することが可能になる。一旦この手法が確立すれば、ビームラインの下流側に陽子加速器は常時設置しておくことが可能であり、ターゲットの変更のみで較正が行えるため、ほぼ毎日この較正を行うことが可能となる。つまり、実験データ取得中に、一度 $\pi$ ビームで較正したエネルギースケールなどの安定性をモニターすることが可能になる。

このように、エネルギー較正に関してはかなり精度よくキャリブレーションが可能であると考えているため、今回応募者はそれ以外のキャリブレーションに関してよりよい精度を求めべく較正方法の開発検討を試みる。特に、液体キセノン検出器の時間、場所較正に関して、さらには他の検出器との同時較正などを通してあらゆる系統誤差をなくすことを考える。特に $\pi$ ビームからの線を利用し、一本は液体キセノン検出器に、もう一方はタンゲステンなどのコンバーターを置くことにより、電子陽電子対に変換し、ドリフトチェンバーで軌跡を追う、というものである。さらには、コンバーター近辺にパーティックス検出器を設置し、より精密に放出場所の特定を行い、ガンマ線、陽電子の位置、時間を詳細に抑えることにより検出器の系統誤差をへらし、実験探索領域を極限まで引き出すことを目指す。

### 3. 研究の方法

(1)2007年度には、液体キセノン検出器の絶対エネルギー較正用として、液体水素ターゲットを使用した $\pi^-p \rightarrow \pi^0n$ 反応からのガンマ線を利用した実験を行う予定である。反対側にNaI検出器を設置し、 $\pi^0$ から正反対に放出されるガンマ線を検出すると、ほぼ単一エネルギーの55,83MeVのガンマ線が液体キセノン検出器で得られる。この実験の主な目的は、この55MeVの単一エネルギーガンマ線を検出して絶対エネルギーの較正、エネルギー分解能の見積り、さらには52.8MeVにおける液体キセノン検出器のレスポンスファンクションの作成にある。ガンマ線の液体キセノン検出器への入射位置によるエネルギー依存を調べるために、NaI検出器には駆動装置が設置されている。さらにNaI検出器の前には、鉛+プラスチックシンチレータが設置され、液体キセノン検出器の時間分解能も入射面すべてにおいて較正可能となっている。

(2)今回は、この $\pi^-$ ビームをさらに利用して、他の較正方法の可能性を探る。ひとつは、液体水素ターゲットのすぐ後ろ液体キセノン検出器の反対側にタングステンなどのコンバーターを設置する、もしくはDalitz崩壊となる $\pi^0 \rightarrow e^+e^-\gamma$ 方法を利用する方法である。前者は、2本放出されるガンマ線の一方を電子陽電子対に変換し、陽電子をドリフトチェンバーで検出し、後者では直接陽電子、ガンマ線を検出すると、液体キセノン検出器とドリフトチェンバー、タイミングカウンターの較正が可能となる。上記NaI検出器の目的とほぼ同じことが、より平易に行える利点がある。

(3)このようにして、 $\pi^-$ ビーム時に、実際にコンバーターをいくつかの場所に設置するかDalitz崩壊を利用して、ガンマ線と陽電子の同時計測を試みる。この手法によりドリフトチェンバー側で軌跡を再構成し、 $\pi^0$ からの正反対方向に放出されたガンマ線の選別を可能にし、また同時時間を保証することにより、液体キセノン検出器のエネルギー較正が行えることを確認する。このためにはトリガー条件を変更する必要性が生じるため、トリガーの改良、またデータの質をオンラインで確認するためのソフトウェアの整備も行う。

(4)液体キセノン検出器の位置分解能測定として、現在液体キセノン検出器の前にコリメーターを置くことを考えている。2インチ光電子増倍管が液体キセノン検出器には使用されるが、この光電子増倍管のどこに入射したかによって受け取る電荷は異なる。この量を知らないと精度よい位置再構成は不可能となるため、この較正は必須である。超伝導電磁石と液体キセノン検出器の間に鉛板を置き、その鉛板に何箇所も穴を開けておくことにより、液体キセノン検出器で再構成を行う。液体キセノン検出器の分解能よりは小さい孔を開けることにより、評価可能となる。特に鉛板の厚み、大きさ、穴の位置、大きさなどをシミュレーションで最適化し、2007年度の測定に間に合うよう準備を行う。

(5)平成20年度には、19年度にとられたデータをもとに、上記方法をさらに発展させるべくコンバーターの直後にバーテックス検出器

を設置する方法を考える。陽電子側の位置、時間を精度よく測定することにより、液体キセノン検出器とドリフトチェンバーのエネルギー、時間較正を同時に行うことが可能になる。現在液体キセノン検出器とタイミングカウンターの時間調整、時間分解能測定には本実験のバックグラウンド事象であるミュオン粒子の輻射崩壊 $\mu \rightarrow e\nu\nu\gamma$ からのガンマ線と陽電子を検出することを予定しているが、実験開始時のミュオンビーム強度 $3 \times 10^7/s$ ではアクシデンタルバックグラウンドに埋もれる可能性が高く、ビーム強度を下げてミュオン粒子輻射崩壊用のデータを取得する必要がある。この間実際の実験データは取得できないため、時間短縮、精度向上のためにもバーテックス検出器の検出時間を参照し、それぞれ液体キセノン検出器とタイミングカウンターの時間分解能を測定することは大変重要となる。この方法が、Dalitz崩壊を使用することにより実現されるかどうかを検証する。もし内部にコンバーター、バーテックス検出器を入れずにこれらの測定が可能となれば、より本実験の状態に近い較正が可能となる。

(6)以上の研究により、液体キセノン検出器のエネルギー、位置、時間分解能を総合的に調べることが可能になり、液体キセノン検出器の性能を最大限に引き出すことにつながる。さらに、ドリフトチェンバー、タイミングカウンターを含めた較正を行うことにより、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 事象の探索への系統誤差を直接削減することも可能になる。この研究により、前人未到の $\mu \rightarrow e\gamma$ 事象探索を行い、超対称性大統一理論など新しい物理の発見をめざす。

#### 4. 研究成果

(1)2007年度は液体キセノン検出器を含む全ての検出器が揃い、少しではあるが物理データの取得が行われた。また、液体キセノン検出器の絶対エネルギー較正用として、液体水素ターゲットを使用した $\pi^-p \rightarrow \pi^0n$ 反応からのガンマ線を利用した較正実験も行われた。この較正の主な目的は信号に近い55MeVの単一エネルギーガンマ線を検出しての絶対エネルギー較正、エネルギー分解能の見積り、レスポンス関クションの取得にあった。検出器の準備に多少遅れが生じたため、ビーム

タイムの最後3日間この較正が行われた。ガンマ線入射位置の、ある限られた領域についてはあるが、この較正方法による分解能の見積もり等の手法は確認された。

このときに、実際に液体キセノン検出器の位置分解能を測定するために小さい孔を何か所か開けてある鉛のコリメータを超伝導電磁石と液体キセノン検出器の間に設置し、データを取得した。この事象に関して位置再構成を行い、分解能を見積もることに成功した。今回は少ない時間のなか、ある一部分のみテストする鉛を製作し試験したが、今後は全体を速やかにスキャンする手法を整える。

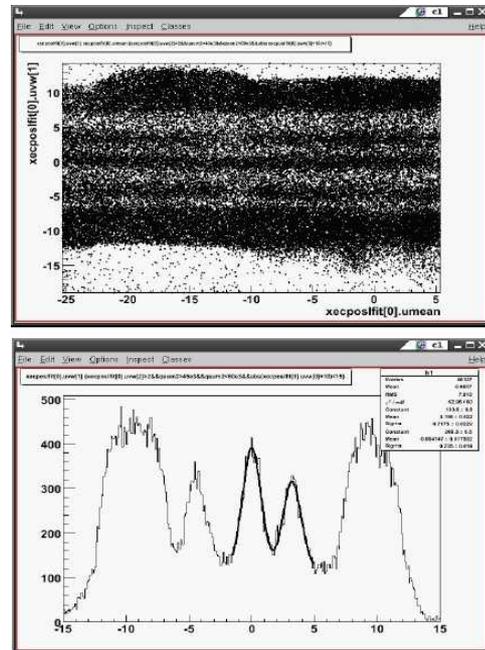
本研究を行うために液体キセノン検出器と反対側に設置したNaI検出器のコインシデンスをトリガーに用いたが、液体キセノン側で効率的に正反対の方向に出たガンマ線を検出するようにトリガーの改良を行い、解析の効率を上げることに成功した。

なお、2007年度は3日間という時間を、本来の目的の達成のために費やしたため、実際にコンバーターを設置する時間が取れなかった。その代わりに、液体キセノン検出器と陽電子スペクトロメータの同時較正を目的とする本方法は、来年度の実現を目指してトリガー条件の洗い出し、ソフトウェアの整備を行った。

(2)2008年度は、MEG実験で本格的な物理データ取得が9月より開始された。この物理データを意味あるものにするためにはMEG検出器の性能評価、較正が決定的に重要となっていた。このため物理データ取得の前に、パイ中間子ビームを用いて液体キセノン検出器の較正を約1か月行った。

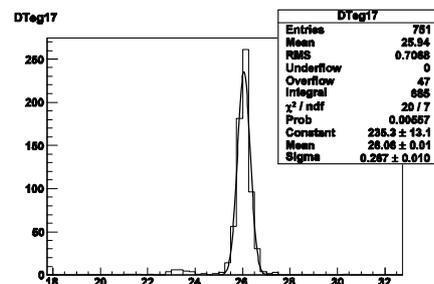
まず液体キセノン検出器の位置分解能測定を場所ごとに評価するために2種類の鉛コリメータを製作した。2007年度は鉛板に穴を開けたが、事象数がかなり削減されてしまい場所ごとの評価が難しくなった。この経験を踏まえ、2008年度は水平方向、垂直方向にスリットを設け、それぞれ場所ごとに水平、垂直方向の端の分布を利用して分解能を評価した。この手法でも液体キセノン検出器すべての面を覆うことは時間的にも難しく、典型的な4か所に8枚の鉛板を設置し測定して全体での分解能を推測し

た。下図にその鉛スリットを水平に設置した部分の事象再構成の2次元プロットと、水平方向へ射影した1次元プロットを示す。この1次元プロットのスリット、エッジ部分をフィットした結果、位置分



解能は5-6.5mmであることがわかった。

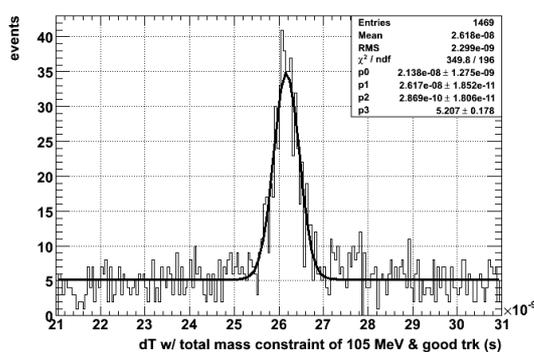
(3)次に液体キセノン検出器と陽電子検出器同時に較正する方法の検討を行った。液体キセノン検出器の較正には $\pi^-p \rightarrow \pi^0 n$ 、 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 崩壊からのガンマ線を利用するが、Dalitz decayである $\pi^0 \rightarrow e^+e^-\gamma$ を利用するとエネルギー、方向は異なるが時間は同時となるため、時間分布が物理事象と全く同じの最適な較正手段であることがわかった。この事象を検出するためにトリガーを設定し、物理データ取得の絶対時間較正に使用した。下図は、陽電子とガンマ線の信号事象と時間に関しては同じ、エネルギーと方向に関しては広めのトリガーを用いて同時計測を試みた結果の、陽電子とガンマ線の相対時間



分布である。この結果より、相対時間分布の

中心は正しく信号領域の中心に来ていることが確認された。

(4)9月より物理データ取得が開始されたが、その間も検出器の性能をモニターする必要があり、この目的のためにミュー粒子輻射崩壊事象 $\mu \rightarrow e\nu\nu\gamma$ の検出を試みた。ビームレートが高いとこの事象は埋もれてしまう可能性があり、 $1 \times 10^6 \mu/s$ のビーム強度に落として取得した。1週間に一日この事象の取得を行い、全体のデータを合わせて本事象の検出に成功した。下図に、その輻射崩壊事象の陽電子、ガンマ線の相対時間分布を示す。MEG



事象トリガー中でも、ミュー粒子輻射崩壊事象の検出にも成功した。液体キセノン検出器と陽電子検出器の相対時間が時間とともに変化する様子が確認された。この結果は重要であり、補正により物理データの信頼性が増した。

以上の結果により、本パイ中間子ビームを用いた較正方法の開発研究により、液体キセノン検出器の較正全体だけではなく、陽電子検出器をも含めた較正方法が確立され、MEG検出器の性能評価が正しく行われることとなった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

T. Haruyama et al, Performance of a liquid xenon calorimeter cryogenic system for the MEG experiment, AIP Conf. Proc., 985, 2008, 1193-1200

T. Iwamoto, Liquid Xenon Detector for the MEG experiment, Nucl. Phys. Proc. Suppl. 172, 2007, 224-226

[学会発表](計1件)

岩本敏幸、MEG2007、日本物理学会第63回年次大会、2008年3月23日、近畿大学

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

岩本 敏幸 (IWAMOTO TOSHIYUKI)  
東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教  
研究者番号：20376700

### (2)研究分担者

### (3)連携研究者

