

## 論文の内容の要旨

### 論文題目 **Liquid Xenon Scintillation Detector for the New $\mu \rightarrow e\gamma$ Search Experiment**

(新しい  $\mu \rightarrow e\gamma$  崩壊探索実験のための  
液体キセノン・シンチレーション検出器)

氏名 小曾根 健嗣

2006年にスイスの Paul Sherrer Institute (PSI) で開始される MEG 実験は、レプトンフレーバー非保存事象である  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  崩壊の探索を通じて超対称性大統一理論を検証する実験である。本研究は、液体キセノンを用いた高性能  $\gamma$  線検出器を新たに開発し、それを使って行われる MEG 実験によって新しい物理が検証可能であることを示したものである。

スーパーカミオカンデ実験によって大気ニュートリノ振動が観測され、ニュートリノに微小な質量を持つこととニュートリノ間の大きな混合角が観測された (Super-Kamiokande Collaboration, Y. Fukuda et al., Phys. Rev. Lett. **81**(1998) 1562.)。このニュートリノ振動はレプトンフレーバー非保存によって引き起こされるものであり、右巻きニュートリノを導入し、ニュートリノに小さな質量を与えるシーソー機構で説明される。荷電レプトンにおいてもレプトンフレーバー非保存な現象が現れるように拡張することができ、 $\mu \rightarrow e\gamma$  崩壊の起こる確率が観測可能な程度まで引き上げられる。この  $\mu \rightarrow e\gamma$  崩壊を探索することで、レプトンフレーバーの破れや、さらには SU(5) SUSY や SO(10) SUSY といった超対称性理論のモデルをニュートリノ振動とは独立な観点で検証することが可能となる。また、クォーク・レプトンの世代構造の起源を解明する糸口や、未知の超高エネルギーの世界に関する情報が与えられると期待される。

$\mu \rightarrow e\gamma$  崩壊の起こる上限値は Los Alamos Meson Physics Facility で行なわれた MEGA 実験によって上限値が与えられており、通常の  $\mu$  粒子の崩壊である  $\mu \rightarrow e \bar{\nu}_e \nu_\mu$  (Michel 崩壊) に対する分岐比にして  $1.2 \times 10^{-11}$  となっている。(M. L. Brooks et al., Phys. Rev. Lett. **83**(1999) 1521.)。図 1 に SU(5) SUSY 模型で予言される分岐比を示す。MEG 実験は現在の上限値を 2, 3 桁上回り、理論で予言されている領域での探索を目指している。

図 2 は MEG 実験検出器の外観図である。PSI には世界最大強度 ( $8 \sim 10 \times 10^8 \mu^+/\text{sec}$ ) を誇るビームチャンネルがあり、大量に供給される  $\mu^+$  粒子をターゲット中で静止させて  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  崩壊を探索することになる。 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  崩壊では  $\gamma$  線と陽電子が  $\mu$  粒子の静止質量の半分の 52.8 MeV/c の運動量をもってお互いが反対の向きに放出される。通常、 $\mu^+$  粒子はおよそ 99% が Michel 崩壊 ( $\mu \rightarrow e\nu_e\bar{\nu}_\mu$ ) をするため、Michel 崩壊による陽電子とビーム起源の高エネルギー  $\gamma$  線が偶然同時に観測されてしまうこと (アクシデンタル・バックグラウンド) がある。また、 $\mu^+$  粒子は約 1% が輻射崩壊 ( $\mu^+ \rightarrow e^+\nu_e\bar{\nu}_\mu\gamma$ ) をするが、運動量がニュートリノにも与えられるため、50 MeV 付近の  $\gamma$  線が生成され観測される割合はアクシデンタル・バックグラウンドの割合 ( $B_{acc}$ ) に比べて低い。したがって、 $B_{acc}$  を検出器の感度以下にいかにか抑えられるかが実験の鍵となる。

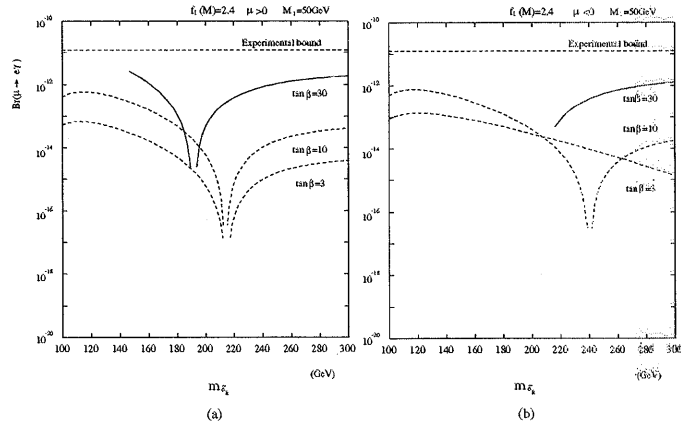


図 1: SU(5) SUSY 模型における  $\mu \rightarrow e\gamma$  崩壊の分岐比 (J. Hisano et al., Phys. Lett. **391**(1997) 341.). SO(10) 超対称大統一模型では  $10^{-13}$  から  $10^{-11}$  と大きくなるとされている。

図 2 のように MEG 検出器は陽電子検出器と  $\gamma$  線検出器の 2 つから構成されている。陽電子検出器は、陽電子の運動量を選別する COBRA 超伝導電磁石、陽電子の飛来時間を測定するタイミング・カウンター、そして陽電子の軌道から運動量を測るドリフト・チェンバーからなる。 $\gamma$  線検出器は液体キセノン・シンチレーション検出器 (本要旨では以下、LXe 検出器) であり、その開発と実用化が本研究の主題である。

MEG 実験における LXe 検出器は 1000 リットルの液体キセノンで満たされ、その中に約 800 本の光電子増倍管 (PMT) が並べられている。本研究では MEG 検出器を想定して製作された大型の試作器 (図 3) を用い、安定したオペレーションの確立と検出器性能の評価を行った。試作器には 100 リットルのキセノンの中に 228 本の PMT が配置されており、MEG 実験の LXe 検出器とは縦方向が小さくなっているだけで、奥行きや幅は同等である。LXe 検出器に使われている冷凍機や真空断熱容器、キセノン液化・回収システムなどは全て MEG 実験の LXe 検出器を想定して設計されたものである。LXe 検出器の安定性に関しては、液体キセノン温度 (110 K) を 3ヶ月間に渡って安定に保てることが検証できた。LXe 検出器で使われる PMT は浜松ホトニクス K.K. と共同で開発されたものであり、110 K という低温下でも安定した動作が実証できている。

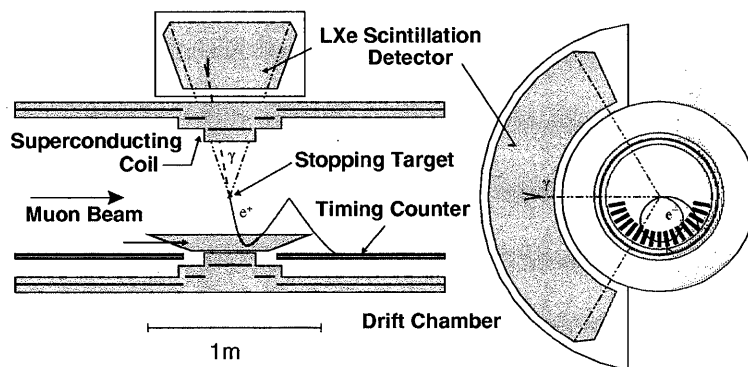


図 2: MEG 検出器の概略図。シミュレーションによる  $\mu \rightarrow e\gamma$  事象の 1 例も描かれている。

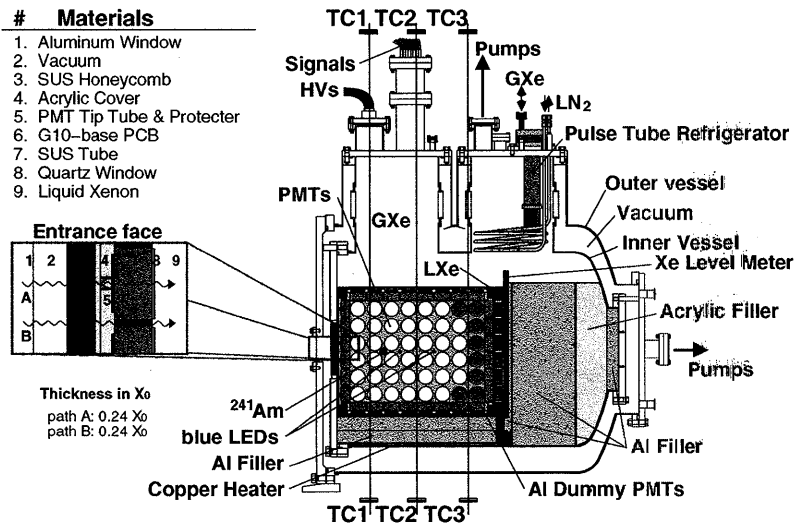


図 3: 性能評価に用いた 100 リットル型プロトタイプの様式図。MEG 検出器同様、入射  $\gamma$  線の efficiency を上げるため入射面はハニカムなど物質量の少ない物質で構成されている。

LXe 検出器の開発にあたり、その性能を飛躍的に高めたのは液体キセノンの循環式純化システムの導入であった。開発当初、LXe 検出器の LXe 中に 100 ppm 程度の水が含まれていた。水分子は  $\gamma$  線とキセノンとの相互作用で生じるシンチレーション光をよく吸収するため、10 ppm の水が存在すると、期待される光量の 1/10 程度しか PMT で捉えることができなくなってしまった。そこで、液体キセノンを純化させる装置を新たに組み入れることで、100 ppb 程度まで低減させることに成功した。純化をしている間、検出器上下にとりつけたカウンター（図 3 中の TC1, TC2, TC3）によってトリガーされた宇宙線  $\mu$  粒子や検出器内 4 個所に取りつけられた  $\alpha$  粒子のイベントを用いてシンチレーション光の推移を常時モニターした。その様子は図 4 で見てとれる。およそ 1ヶ月で光量は飽和したが、モンテカルロシミュレーションによって、12cm であった吸収長がから 1m まで伸びたことが分かった。その後、検出器内で使用されていたアクリルを SUS や PTFE に交換したところ、現在は吸収長を 1m まで伸ばすことに成功している。

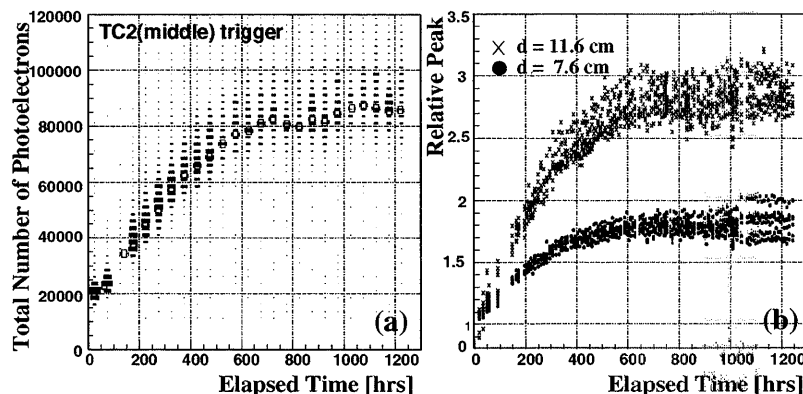


図 4: (a) 宇宙線  $\mu$  イベントで見た光量の増加の様子。(b)  $\alpha$  粒子イベントで見た光量の増加の様子。

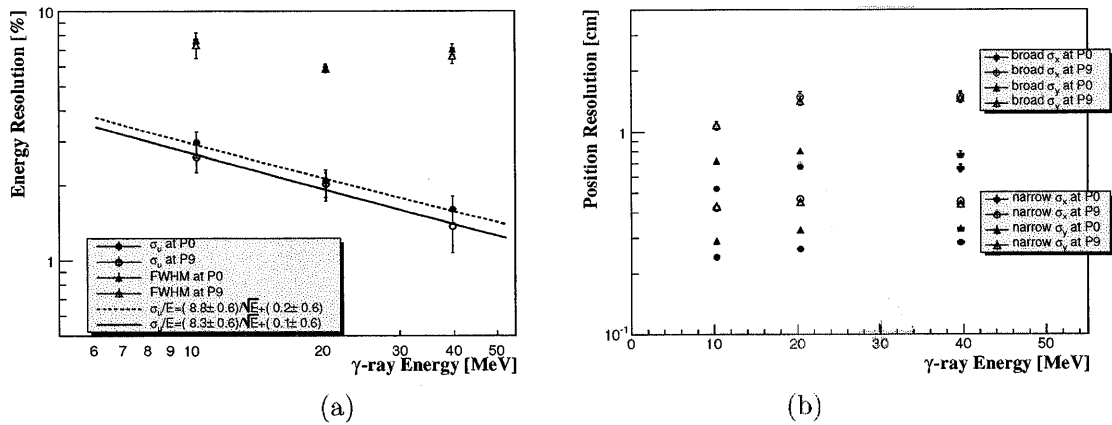


図 5: AIST におけるビームテスト実験における (a) エネルギー、(b) 位置に関する分解能。これらの結果は検出器の中心に  $\gamma$  線を打ち込んだ時のものである。

次に産業技術研究所 (AIST) で行われた LXe 検出器の性能評価実験について述べる。AIST にある電子蓄積リング (TERAS) の 764 MeV の電子にレーザーを当て逆コンプトン散乱させると、最大 40 MeV 付近にコンプトン・エッジを持った  $\gamma$  線スペクトルが得られる。このコンプトン・エッジを LXe 検出器で測定し得られたスペクトルと入射スペクトルを比較することでエネルギー分解能が見積もれる。その結果を図 5(a) に示す。位置分解能については、入射面の PMT で観測された光電子数 ( $N_{pe}$ ) の分布を元に、液体キセノン中で最初に convert した深さを求め、それに応じた重みを各  $N_{pe}$  につけて重心を求めることで評価した。その結果を図 5(b) に示す。

これらの結果とこれまでの性能評価実験の結果を表 1) にまとめる。この場合に期待される  $B_{acc}$  は  $8.9 \times 10^{-14}$  events/ $\mu^+$ -decay であり、 $\mu$  stop rate を  $5.8 \times 10^7$  /sec と仮定すれば  $9.3 \times 10^{-14}$  (90% C.L.) という分岐比まで探索できることが期待される。この値は現在の分岐比の上限値を 2 桁更新できるものであり、 $\mu \rightarrow e\gamma$  事象を発見できない場合には超対称性模型に対して制限を与えることができることが図 1 から分かる。

Resolution	Value
Energy (52.8 MeV $\gamma$ 線)	5.2%
Position(x 方向)	7.8 mm–10.8 mm

表 1: MEG 実験で用いる 1000-liter LXe 検出器で期待される性能。値は全て FWHM。

今回新しく開発された LXe 検出器は低エネルギー  $\gamma$  線検出に対し優れた性能を有していることが本研究により明らかになり、新しい高性能  $\gamma$  線検出器として実用化できることが実証された。2006 年には LXe 検出器を使った MEG 実験によって超対称性大統一理論の検証が始まる。