

# 修士学位論文

## $\mu \rightarrow e \gamma$ 崩壊探索実験用 液体キセノンガンマ線検出器の開発

宇宙線を用いた液体キセノン中でのシンチレーション光の減衰長の測定

早稲田大学理工学研究科  
物理及び応用物理学専攻

菊池 順 研究室所属

600L047  
澤田 龍

2002年1月



## 概要

現在世界中で素粒子の標準理論を超える新しい物理への探求が行われている。レプトンフレーバー非保存現象 (LFV) である  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  探索もその一つである。我々の実験は画期的な検出器と世界最強の  $\mu$ (ミューオン) ビームをもって、 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  の発見を目指すものである。

実験は 2003 年よりスイス国立 Paul Scherrer Institut(PSI) にて行われる予定である。現在は早稲田大学菊池研究室、東京大学素粒子物理国際研究センター、高エネルギー加速器研究機構、スイス PSI、イタリア国立素粒子原子核研究機構 (INFN)-Pisa、ロシア Budker 原子核研究所 (BIMP) の協力のもとに、各検出器、ビーム、シミュレーション等さまざまな面から準備が進められている。

早稲田大学はガンマ線検出器を担当しており、本稿ではガンマ線検出器の試作器についてまとめる。

我々の実験で使用されるガンマ線検出器は液体キセノンシンチレーション検出器である。これは世界最大規模の液体キセノンシンチレーション検出器になる。我々はこの大型の検出器の性能を確かめるために、実機の一部に相当する試作器を製作した。ここでは検出器の大型化にともない様々な新しい技術が試みられたが、試作器は既に完成しており検出器として動作させることに成功している。

検出器の大型化にともないキセノン中でのシンチレーション光の減衰が測定に影響を与えるようになる。一般に検出される光電子数が多いほど統計誤差が小さくなるので、測定においてはシンチレーション光の吸収が少ない方が望ましい。本研究ではこの大型の試作器 (ラージプロトタイプ) を用いて宇宙線によるキセノンの発光を観測することにより、キセノン中でのシンチレーション光の減衰の様子を探る。

本測定では予想より短い減衰長が見積もられたが、その原因として液体キセノン中の不純物による吸収が考えられる。今後この原因を明らかにし改善を図る必要がある。

## 目次

<b>1</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	標準理論と保存則	1
1.2	$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 探策実験	3
<b>2</b>	<b><math>\mu^+ \rightarrow e^+\gamma</math> 崩壊探索実験</b>	<b>6</b>
2.1	検出感度	6
2.2	バックグラウンド	6
2.3	検出器	7
2.3.1	ビームとターゲット	9
2.3.2	陽電子検出器	9
2.3.3	液体キセノンガンマ線検出器	12
<b>3</b>	<b><math>\mu^+ \rightarrow e^+\gamma</math> 崩壊探索実験用液体キセノンガンマ線検出器</b>	<b>13</b>
3.1	検出器の構造	13
3.1.1	光電子増倍管	13
3.1.2	ハニカムウィンドウ	16
3.2	シンチレータとしてのキセノンの性質	16
3.2.1	液体キセノンの性質	16
3.2.2	液体キセノンのシンチレーション	16
3.2.3	シンチレーション光の減衰	19
3.3	スモールプロトタイプ実験	21
<b>4</b>	<b>プロトタイプ実験</b>	<b>25</b>
4.1	プロトタイプ実験の目的	25
4.2	ラージプロトタイプを用いて行なわれる実験	25
4.2.1	ビームテスト	25
4.2.2	宇宙線実験	26
4.3	検出器	26
4.3.1	光電子増倍管とホルダー	27
4.3.2	補間物とヒータ	29
4.3.3	モニター系	29
4.3.4	フィードスルー	29
4.3.5	液面計	31
4.3.6	キセノンの輸送と純化装置	31
4.3.7	安全対策	35
4.3.8	冷却システム	35
4.4	宇宙線実験	35
4.4.1	セットアップ	35
4.4.2	データ取得回路	35
4.4.3	手順	39

<b>5</b>	<b>実験データの解析</b>	<b>40</b>
5.1	モンテカルロシミュレーション	40
5.2	実験データ	40
5.2.1	イベントの選択	40
5.2.2	PMTのゲインの見積りについて	42
5.3	全光電子数について	44
5.4	吸収長の見積り	46
5.4.1	解析1	46
5.4.2	解析2	46
5.4.3	解析3	48
5.5	結果	51
<b>6</b>	<b>考察と今後の計画</b>	<b>52</b>
6.1	光電子数の合計について	52
6.2	吸収長が短い原因について	52
6.3	短い吸収長によるガンマ線検出器の分解能への影響	52
6.4	キセノンの純度について	57
6.5	対策	57
6.6	今後の計画	60

# 1 序論

## 1.1 標準理論と保存則

人は古代より物の本質について知りたいと願ってきた。ギリシャ時代のエピクロス哲学ではすでに、「宇宙万物は、これ以上分割不可能なる原子— $\dot{\alpha}\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$ —と空虚— $\kappa\acute{\epsilon}\nu\omicron\nu$ —とから成る。」[1]と考えられている。近世以降ではドルトンの原子仮説、長岡の原子核模型、パウリのニュートリノ仮説、湯川の中間子論、ゲルマン等によるクォーク理論が実験的に確かめられ、現代の物質観が形作られて来た。しかし、未だ素粒子の世界では解決されていない問題も多く、人はその知的な旅の過程にある。

$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  はその存在を予言されてから今日まで観測の可能性の大きなレプトンフレーバー非保存現象として理論、実験の両面からその研究が行なわれてきた。

現在の素粒子物理学は標準理論を基礎としている。標準理論においてレプトンは世代毎に粒子数が保存すると考えられており、 $\mu$ (ミューオン) はほぼ 100 % の確率で Michel 崩壊 ( $\mu \rightarrow e\nu_\mu\bar{\nu}_e$ ) により崩壊するとされている。(そのうちの 1.4 % がガンマ線をともなう輻射崩壊である)

しかし、近年標準理論には綻びが見え始めている。例えば、スーパーカミオカンデにおけるニュートリノ振動の観測である。大気ニュートリノの観測からは  $\nu_\mu$  と  $\nu_\tau$  の混合が確認され [2]、さらに太陽ニュートリノの観測からは  $\nu_e$  と  $\nu_\mu$  もしくは  $\nu_\tau$  の間の振動が示唆される [3]。これはニュートリノセクションにおける世代別粒子数の非保存であり、標準理論では許されない現象である。この問題を解決する理論としては、重い右巻きニュートリノの導入によってニュートリノに質量を与えるシーソー機構があげられる [4]。このときニュートリノの世代を超えた変換を通じて図 1 のようなダイアグラムにより  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  が可能となる。

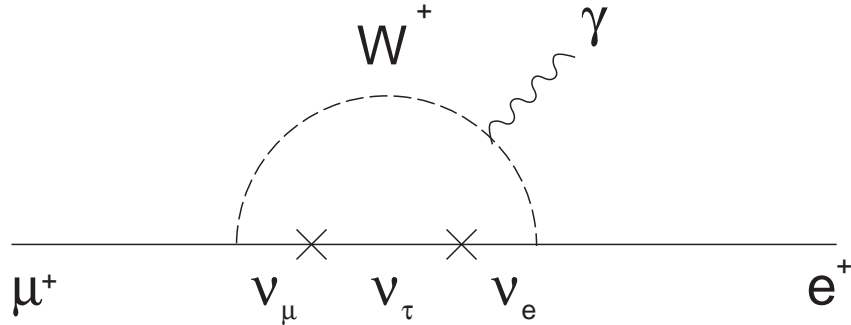


図 1: ニュートリノ振動を仮定したときの  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  のダイアグラム。このようにニュートリノ振動により  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  は可能となるがこの仮定だけでは分岐比は小さく観測にはかからない。

しかし、ニュートリノに質量を与えただけでは  $\text{Br}(\mu^+ \rightarrow e^+\gamma)$  は観測にかかるような値にはならない。

また、Brookhaven National Laboratory における E821 実験において  $\mu$  のジャイロ磁気比  $g$  の精密測定が行われ、

$$a_\mu^{\text{LBL}} = \frac{g-2}{2} = (11659202.3 \pm 15.1) \times 10^{-10} \quad (1)$$

と発表された [5]。  $a_\mu$  は標準理論においても高次の項を考慮すると 0 にはならない。しかし、こ

の実験値が標準理論の予言との間に  $2.6\sigma$  と大きな差があるとされ一時大きな話題となったが、その後理論的予測に間違いが見つかり、再計算と検証が行われている。

E821 では今後、精度を  $4 \times 10^{-10}$  まで良くするよう努力されており大変注目されている。

もし  $g-2$  に標準理論からの予言からのずれがあった場合に関してもさまざまな理論が提唱されているが、なかでも超対称性理論が有力である。

超対称性理論では標準理論の各素粒子にスピンの違ったパートナーを導入する。例えばレプトンにはスカラーレプトン、光子にはフォティーノといった具合である。超対称性理論はこのパートナーの間の対称性であるが現在このような粒子は直接観測されていないので、この対称性はどこかで破れていなければならない。この破れのためにスカラーレプトンの質量行列は非対角成分を持つことが可能となり、スカラーレプトンの世代を超えた変換が起こり得ることになる。

図 2 は超対称性を仮定した場合に、 $\mu$  異常磁気能率を説明するダイアグラムである。

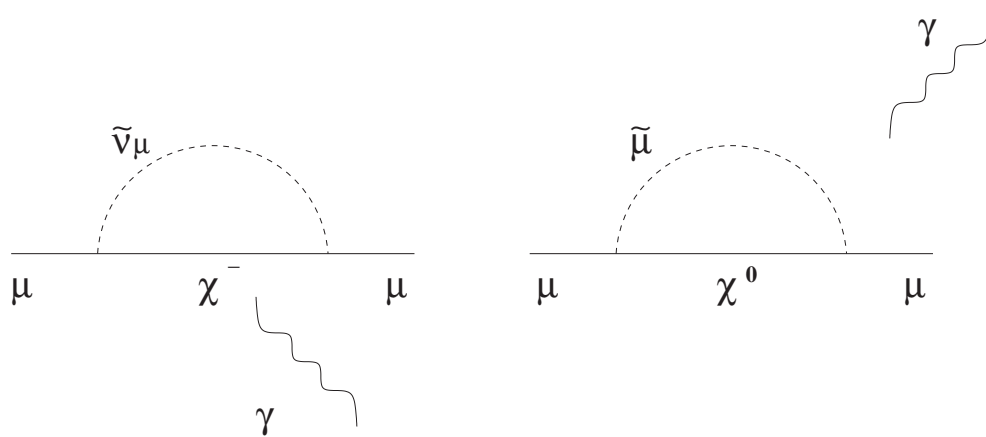


図 2: 超対称性を仮定した時に異常磁気能率を説明するダイアグラム。

このダイアグラムで、スカラーレプトンの世代を超えた変換を導入すると、図 3 のように  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  がおきることになる。

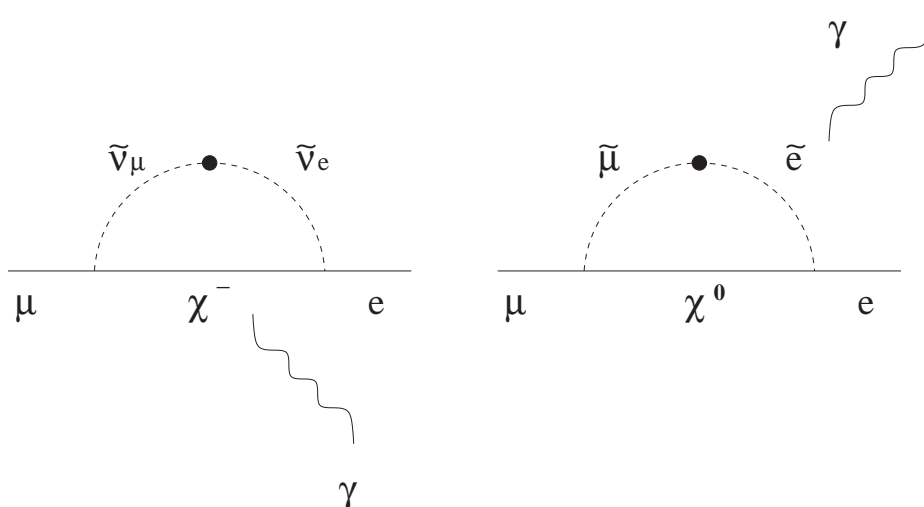


図 3: 超対称性を仮定した時の  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  のダイアグラム

ここで、左巻きのスカラーレプトンに混合があったとした場合、 $\delta a_\mu^{\text{SUSY}}$  (SUSY による  $a_\mu$  のずれ)

と  $\text{Br}(\mu^+ \rightarrow e^+\gamma)$  の関係は以下のように与えられる [7]。ここで  $m_{\text{SUSY}}$  は質量行列の対角成分の大きさである。

$$B(\mu \rightarrow e\gamma) \simeq 3 \times 10^{-5} \left( \frac{\delta a_\mu^{\text{SUSY}}}{10^{-9}} \right) \left( \frac{\left( m_{\tilde{l}_L}^2 \right)_{12}}{m_{\text{SUSY}}^2} \right)^2 \quad (2)$$

ここで  $\delta a_\mu^{\text{SUSY}} \sim 10^{-9}$  と仮定し、ニュートリの振動の観測から  $\left( m_{\tilde{l}_L}^2 \right)_{12}/m_{\text{SUSY}}^2 \sim 10^{-4}$  を仮定すると、 $\text{Br}(\mu^+ \rightarrow e^+\gamma)$  は観測可能な領域に入る。

図 4 に SU(5) SUSY モデルから予測される  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  の分岐比を示す。超対称性大統一理論を仮定した場合、現在の目標としている実験を行うことができれば  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  の発見の可能性は高いと言える。また、もし  $10^{-14}$  という分岐比で  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  が発見されなかった場合は標準理論を超える新しい理論に強い制限を与えるものとなる。

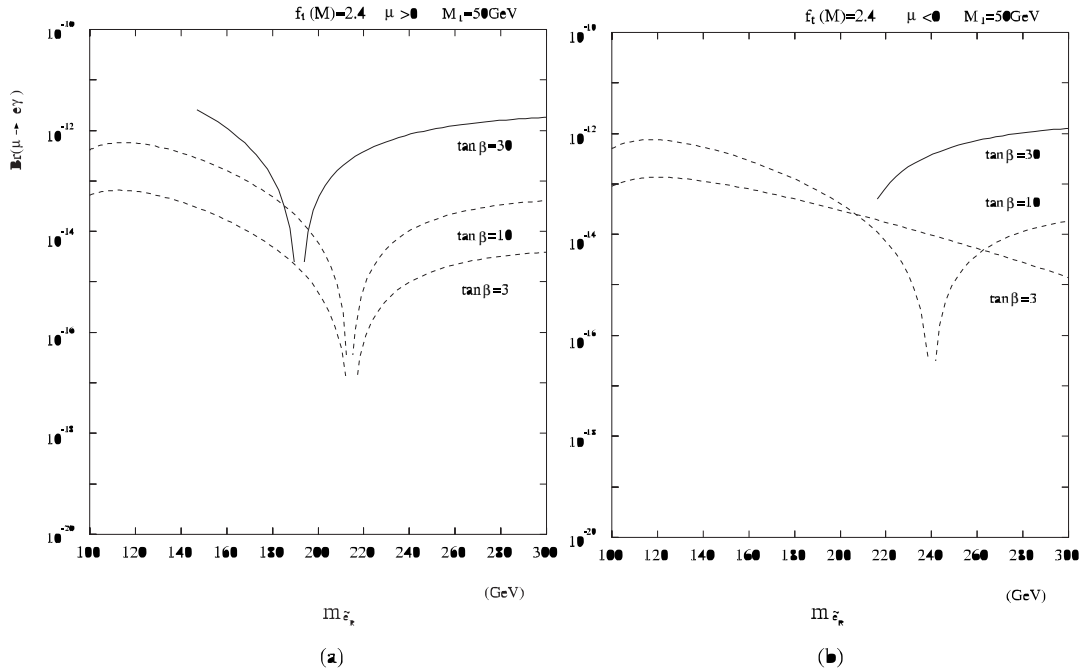


図 4: SU(5) SUSY モデルにおける  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  の分岐比 [10]。

## 1.2 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 探策実験

$\mu$  の希崩壊の探策の歴史は古く 1940 年代には分岐比の上限値が測定されている。その後徐々にその上限値は下げられてきており、近年で代表的なものとしては CrystalBox 実験 [11] と MEGA 実験 [12] があげられる。現在の  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  の上限は 1999 年に出された MEGA の結果によるものである。ここでは本稿のテーマであるガンマ線検出器を中心に各々の実験を概観する。

CrystalBox 実験は LAMPF で行われ、1988 年に最終的な結果が出されている。この検出器はその名前の由来となる NaI シンチレータ、ドリフトチェンバー、プラスチックシンチレータにより構成されている。ガンマ線は NaI のシンチレーション光として観測される。しかしガンマ線の飛来した時刻を正確に測るのは難しく、ガンマ線についての時間分解能は 1.2 ns(FWHM) となっ



ている。またガンマ線に関してはエネルギーについても8%(FWHM)の分解能しか得られていない。 $\mu$ の停止頻度は平均として $4 \times 10^5$ 個/secであった。この実験では最終的に $4.9 \times 10^{-11}$ という上限値が与えられた。

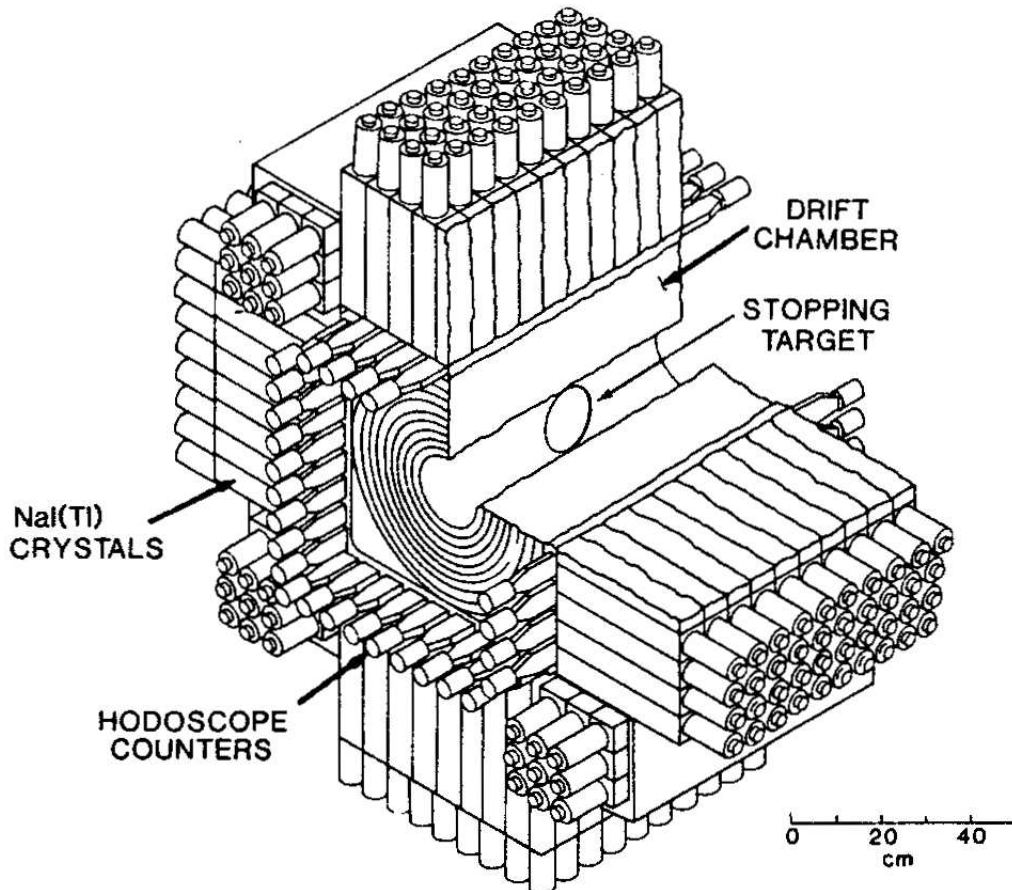


図 5: CrystalBox 実験の検出器。

MEGA 実験の検出器を図 6 に示す。MEGA では超伝導マグネットにより 1.5 T の磁場を発生させており、陽電子はその飛跡から崩壊直後の運動方向とエネルギーを知ることができる。ガンマ線は時間測定用のシンチレータを通った後、鉛の箔で電子陽電子対生成をおこす。ガンマ線の位置とエネルギーはその電子と陽電子の運動量を測定することで行われた。これによりガンマ線のエネルギー分解能は 1.4 %(FWHM) と改善されたものの、時間分解能については 1 nsec(FWHM) と大きな変化は見られていない。 $\mu$ の停止頻度は  $1.5 \times 10^7$  個であった。この実験により現在の  $\text{Br}(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma)$  の上限値である  $1.2 \times 10^{-11}$  という値が与えられた。

我々はさらに 2 ~ 3 桁上まわる実験を計画しており、 $10^{-14}$  が実現できると考えている。我々の検出器で期待できる性能を CrystalBox、MEGA と比較し表 1 にまとめる。ここでは分解能として半値幅をとる。なお以降分解能は特にことわらない限り標準偏差を指すこととする。次章では我々の画期的な実験をガンマ線検出器を中心に説明する。

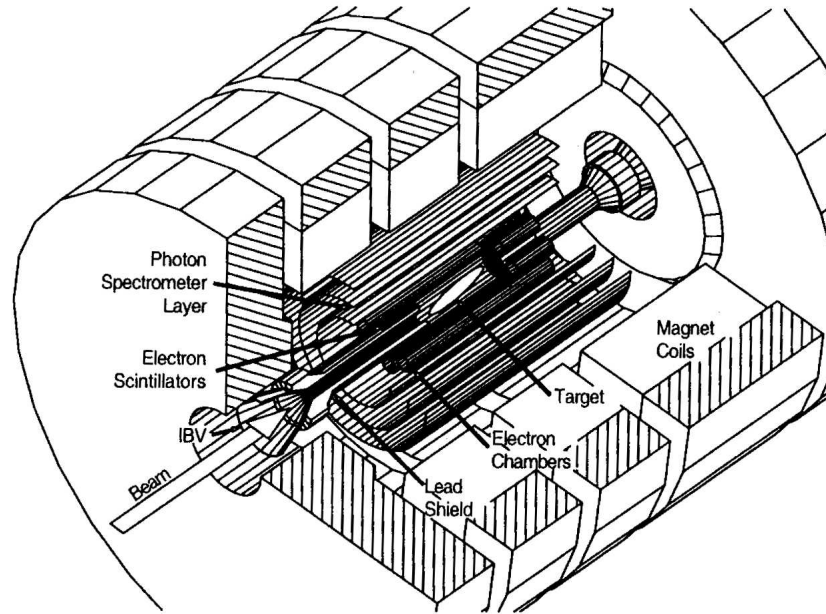


図 6: MEGA 実験の検出器。

表 1: 我々の実験と MEGA 実験の検出器の分解能 (FWHM) の比較。我々の実験については Proposal[13] の値を示す。

	Proposal[13]	MEGA[14]	CrystalBox
$\Delta E_e(\%)$	0.7	1.0	8
$\Delta E_\gamma(\%)$	1.4	3.2	8
$\Delta\theta_{e\gamma}(\text{mrad})$	11	33	87
$\Delta t_{e\gamma}(\text{nsec})$	0.14	1.6	1.8

## 2 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊探索実験

我々の計画 [13] は現在、早稲田大学、東京大学、高エネルギー加速器研究機構、スイス PSI、イタリア INFN-Pisa、ロシア BINP 研究所の協力の元に準備が進められている。すでにタイミングカウンター [16]、陽電子検出用のドリフトチェンバー [17] の試作器がテストされ、それぞれ期待通りの性能を示している。現在は本実験に向けての準備が始められている段階である。

本実験は PSI で 2003 年より 1~2 年間行なわれる予定である。PSI における  $\mu$  ビームは、世界最高の強度をほこり、 $\mu$  の停止頻度は  $10^8 \text{ sec}^{-1}$  が見込まれている。

我々の実験グループはガンマ線、陽電子について高精度、高計数率の測定を行なうことにより、 $10^{-14}$  という非常に感度の高い測定を行なうことを目標としている。

### 2.1 検出感度

$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  探索実験における検出器の検出感度は

$$S(\mu^+ \rightarrow e^+\gamma) = \left( N_\mu \times T \times \left( \frac{\Omega}{4\pi} \times \epsilon_e \times \epsilon_\gamma \times \epsilon_{\text{sel}} \right) \right)^{-1} \quad (3)$$

で与えられる。ここで  $N_\mu$  は  $\mu^+$  の停止頻度、 $T$  は測定時間、 $\Omega$  は検出器のアクセプタンス、 $\epsilon_e$ 、 $\epsilon_\gamma$  はそれぞれ陽電子、ガンマ線の検出効率、 $\epsilon_{\text{sel}}$  はイベントの選別効率を表す。測定時間は  $2.2 \times 10^7 \text{ sec}$  が予定されている。また  $\mu$  の停止頻度はシミュレーションから  $1 \times 10^8$  程度である。アクセプタンスは検出器の形状から決まる。また  $\epsilon_e$ 、 $\epsilon_\gamma$ 、 $\epsilon_{\text{sel}}$  はシミュレーションにより実現可能な数値が求まっている。

表 2: 検出器の感度に関するパラメータ

$N_\mu$	$1 \times 10^8$
$T$	$2.2 \times 10^7 \text{ sec}$
$\Omega/4\pi$	0.09
$\epsilon_e$	0.95
$\epsilon_\gamma$	0.7
$\epsilon_{\text{sel}}$	0.8

この場合  $S = 0.94 \times 10^{-14}$  となり、目標とする  $10^{-14}$  を達成することができることになる。

### 2.2 バックグラウンド

$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  崩壊は単純な 2 体崩壊であるためそのシグナルは特徴的なものとなる。 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  崩壊では陽電子とガンマ線は互いに逆向きに 52.8 MeV のエネルギーを持って飛ぶ。 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  の測定に対しては 2 種類のバックグラウンドがある。1 つは Prompt Background、もう 1 つは Accidental Background と呼ばれるものである。

**Prompt Background** Prompt Background とは  $\mu$  の輻射崩壊が  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  と似たシグナルを示す場合である。 $\mu$  の輻射崩壊は 4 体崩壊であるため必ずしも陽電子とガンマ線は逆方向へ飛ぶとは限らない。また二つのニュートリノへもエネルギーが与えられるために陽電子、ガ

ンマ線はともに 52.8 MeV のエネルギーを持つことはできない。よってエネルギーと粒子の放出角を精度よく測れれば  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  と輻射崩壊の区別ができる。図 8(a) はシミュレーションにより  $10^{14}$  個の  $\mu$  粒子を輻射崩壊させ、 $(\pi - \theta_{e\gamma}) < 8.4$  mrad であるイベントだけを選びだし、さらに 10 イベントの  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  崩壊を発生させたものである。丸で囲まれたイベントは  $0.995 < (2E_e/m_\mu) < 1.005$ ,  $0.99 < (2E_\gamma/m_\mu) < 1.01$  とした時に選び出されたもので、全て  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  崩壊である。検出器に対して表 1 の分解能を仮定すると

$$B_{\text{prompt}} \sim 10^{-17} \quad (4)$$

となり、検出器の感度以下に抑えることができる。

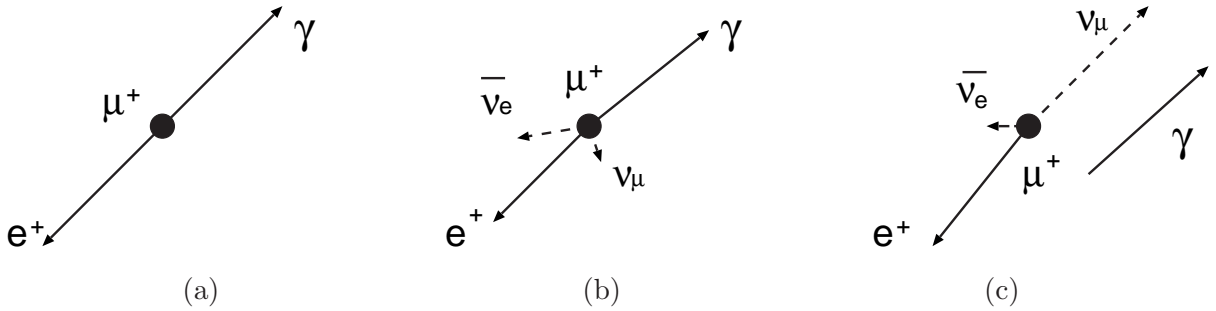


図 7:  $\mu$  崩壊における陽電子、ガンマ線のふるまい。(a) は  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  崩壊、(b) は Prompt Background、(c) は Accidental Background の図である。 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  が単純な 2 体崩壊なのに対し、輻射崩壊は 4 体崩壊であり  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  とは違うシグナルを作る。

**Accidental Background** Michel 崩壊による陽電子と、高エネルギーのガンマ線が偶然同時に観測された場合  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  と似たようなシグナルを与える可能性がある。このようなガンマ線の主要な成分は Michel 崩壊の陽電子が検出器の構造物と反応して出てくるものである。このバックグラウンドを Accidental Background と呼ぶ。このバックグラウンドを除去するにはエネルギー、位置だけではなく時間の分解能も重要になる。

Accidental Background ( $B_{\text{acc}}$ ) は、

$$B_{\text{acc}} \propto \delta E_e \cdot \delta t_{e\gamma} \cdot (\delta E_\gamma)^2 \cdot (\delta \theta_{e\gamma})^2, \quad (5)$$

で表される [13]。ここで、表 1 の分解能を仮定すると

$$B_{\text{acc}} \sim 5 \times 10^{-15} \quad (6)$$

となり図 8(b) のようにバックグラウンドと識別することが可能である。

バックグラウンドをこのような値に抑えられた時に、もし  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  が観測されなかった場合には  $\text{Br}(\mu^+ \rightarrow e^+\gamma) < 2.6 \cdot 10^{-14}$  (90% C.L.) と結論することができる [19]。

## 2.3 検出器

$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  崩壊探索実験で用いる検出器を概観する。ガンマ線検出器、陽電子検出器はそれぞれ、今までにない画期的な特徴を持つ。ガンマ線検出器については本稿のテーマであるため次章で詳述する。

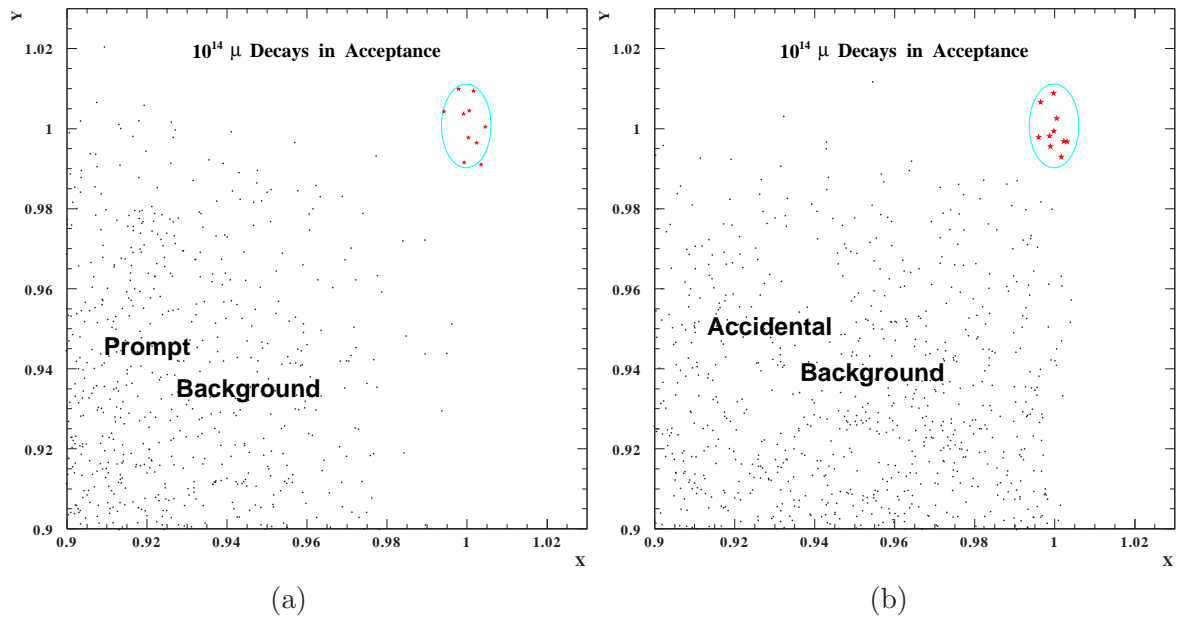


図 8: (a) プロンプバックグラウンドと  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  崩壊との識別。(b) アクシデンタルバックグラウンドと  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  崩壊との識別。丸で囲まれた部分が識別された  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  崩壊である。

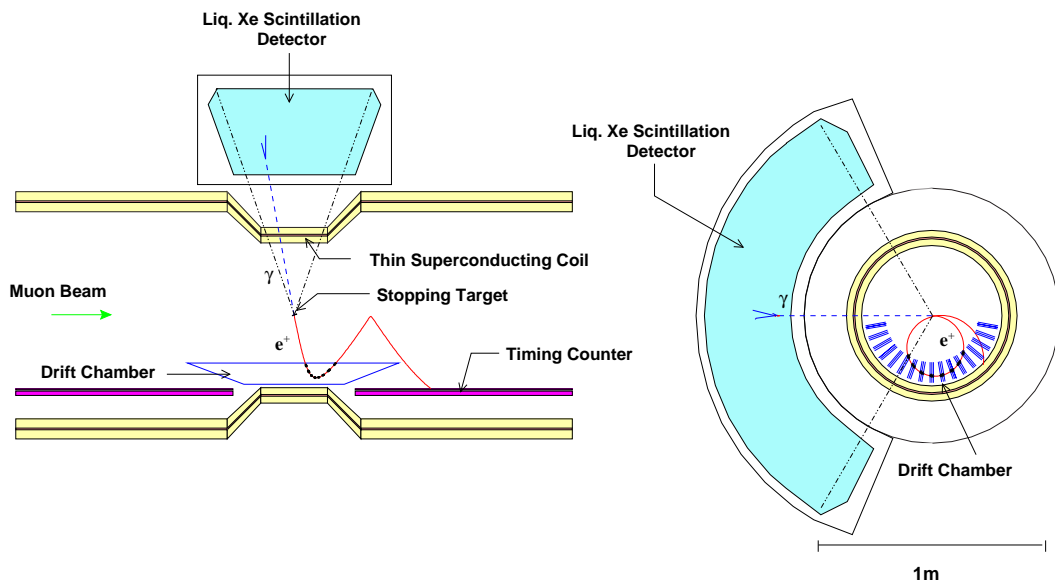
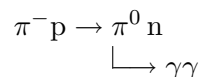


図 9:  $\mu \rightarrow e\gamma$  崩壊探索実験で用いる検出器。液体キセノンガンマ線検出器とポジトロンスペクトロメータはそれぞれ画期的な特徴を持ち、高精度、高計数率による測定を可能にする。

### 2.3.1 ビームとターゲット

スイスの PSI にある  $\pi E5$  チャンネルは  $\mu$  ビームとしては現在世界最高強度を誇り、 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  探索実験には  $8 \sim 10 \times 10^8 \mu/\text{sec}$  の強度のビームを供給できる。

また、低エネルギーの  $\pi^-$  ビームも供給できるので、



という反応から生成されるガンマ線を液体キセノンガンマ線検出器の較正に使うことが検討されている。 $\pi E5$  チャンネルの仕様は表 3 の通りである。

表 3:  $\pi E5$  ビームチャンネルの主な仕様。

solid angle acceptance	150 msr
momentum range	20–120 MeV/c
length	10.4 m
momentum band (FWHM)	10 %
momentum resolution (FWHM)	2 %
horizontal emittance	15.3 cm-rad
vertical emittance	3.6 cm-rad
spot size	$4 \times 4 \text{ cm}^2$

### 2.3.2 陽電子検出器

陽電子は超伝導ソレノイドの中に配置されたドリフトチェンバーとタイミングカウンターにより検出される (図 10)。

陽電子検出器は COBRA (COntant Bending RAdius) スペクトロメータと呼ばれるが、その由来はこの検出器の最大の特徴である磁場の形状にある。超伝導マグネットはターゲットの近くほど半径が小さくなっている<sup>1</sup>。またターゲットからの距離によりコイルの巻き方を変えている。これらにより中心部分から離れるにしたがって磁場が弱くなるようになっている。この結果同じ陽電子がドリフトチェンバー内を通る回数を減らしパイルアップを低減することができる。また陽電子の回転半径が放出角によらず一定となる。 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  の陽電子はドリフトチェンバーの最外部を通るようにするが、これよりもエネルギーの小さい陽電子は、より内側を通ることになる。これにより早い段階での  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  の識別が可能となる。

またガンマ線検出器中の PMT (光電子増倍管) は使用に際して約 100 G 以上の磁場が許されないため、常電導の補償コイルによりガンマ線検出器付近の磁場を抑える。

ドリフトチェンバーシステム 図 10 で見たようにドリフトチェンバーは  $10^\circ$  間隔で並べられた 17 枚のセクターからなる。それぞれのドリフトチェンバーはそれぞれ 2 層構造をしており、上下各

<sup>1</sup>(図 10 では連続的に半径が小さくなっているが実際は 3 段階に分けて半径を小さくする。)

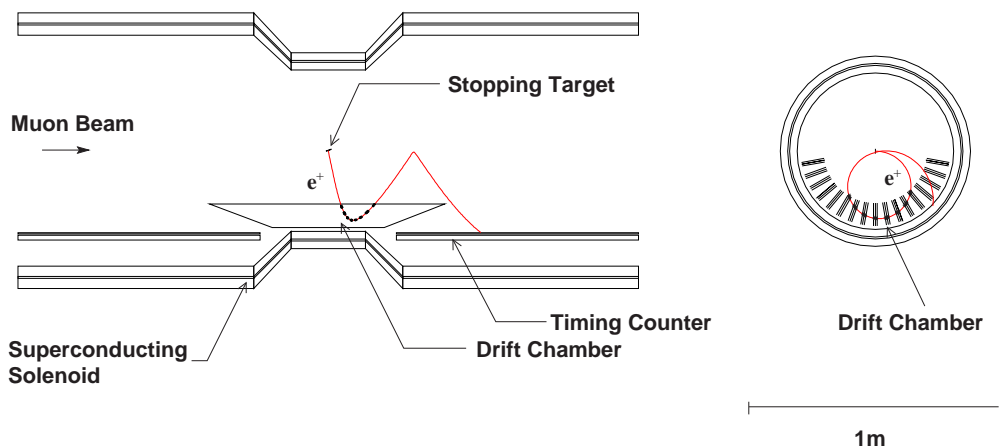


図 10: ポジトロンスペクトロメータの概観。図の左方向から来る  $\mu^+$  はターゲットで静止し、 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  崩壊の場合、ポジトロンはドリフトチェンバーを通過しながら特殊な磁場によるドリフトで速やかに掃き出され、1.5 回転した後にタイミングカウンターに達する。

層は半セルずつずらした構造をしている (図 11)。ここで検出する陽電子は 52.8 MeV と比較的低エネルギーであるため、使用する材料については低物質質量であることが要求される。チェンバーガスとしてはヘリウムとエタンの混合ガスが使用される。これは物質質量を極力小さくし、クーロン多重散乱の影響を低減するためである。

陽電子の飛跡の  $z$  方向 (ビーム方向) の位置の測定は「バーニアパッド法」を用いる。これは図 11 のようにワイヤと平行な方向にジグザグに切ったストリップを使用するものである。このとき 3 本のパッドができるが、これをバーニアパッドと呼ぶ。この 3 本のパッドから誘起された電荷の比はパッドの形状に依存するため、逆にこの比から  $z$  方向の位置を再構成することが可能となる。実際にはこのジグザグの周期は 6 cm であるので、どの周期にあるかをセンスワイヤーの両端の電荷量の比から粗く見積った後に周期内での位相をバーニアパッド法より求めることになる。

陽電子の位置の測定は、昨年テスト [18] から半径方向で  $200 \mu\text{m}$ 、 $z$  方向で  $450 \mu\text{m}$  以上の分解能を期待できる。

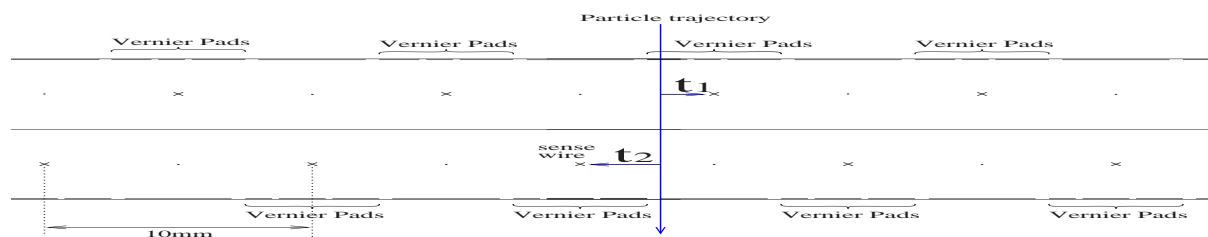


図 11: ドリフトチェンバーの断面図。

ポジトロンタイミングカウンター 陽電子の時間についての測定はプラスチックシンチレータで行なう。これまでのテストにより 52.8 MeV のポジトロンに対して、約 40psec の時間分解能が期待される。

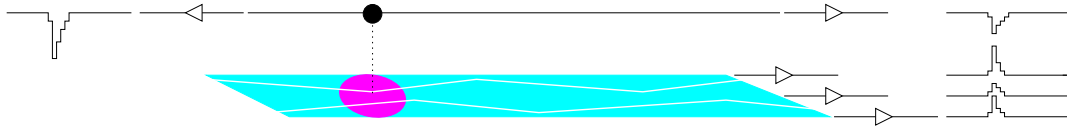


図 12: バーニアパッドの概念図。

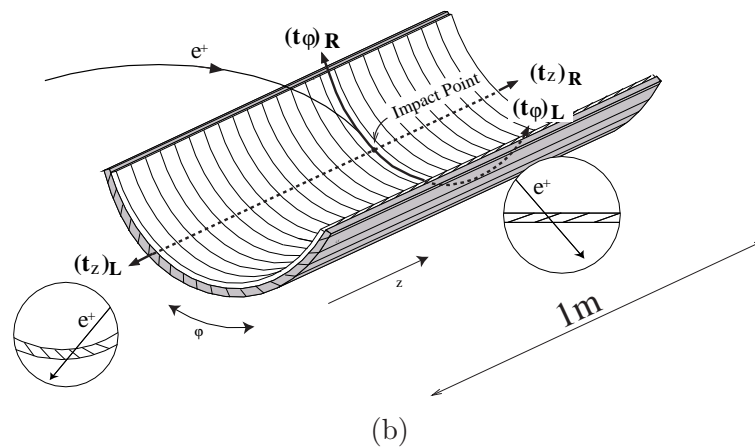
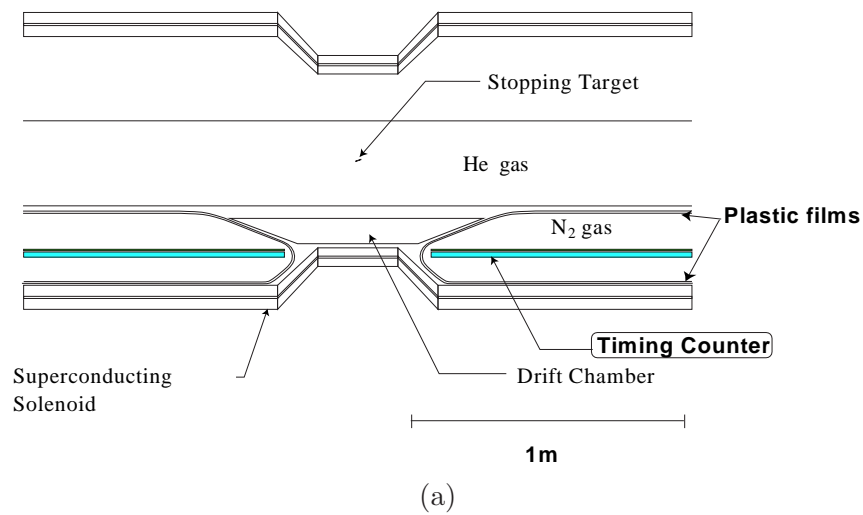


図 13: ポジトロンがタイミングカウンター内で発するシンチレーション光は表面反射を繰り返し  $\varphi$  方向を伝わって PMT に入る。タイミングカウンターはタイミングを見る以外にも位置も測定でき、 $\varphi$  方向と  $z$  方向のシンチレーターの両端にはライトガイドを介して光電子増倍管が取り付けられており、PMT の信号の時間差  $(t_\varphi)_R - (t_\varphi)_L$ 、 $(t_z)_R - (t_z)_L$  及び光量から当たった位置が求まる。



### 2.3.3 液体キセノンガンマ線検出器

ガンマ線の検出には図 14 のような液体キセノンをシンチレーション媒体とする検出器を使用する。これは液体キセノンの有効領域を囲む約 800 個の PMT が有効領域内をのぞむように配置されたカミオカンデ型の検出器である。この検出器によりガンマ線のエネルギー、放出角、時間を測定する。

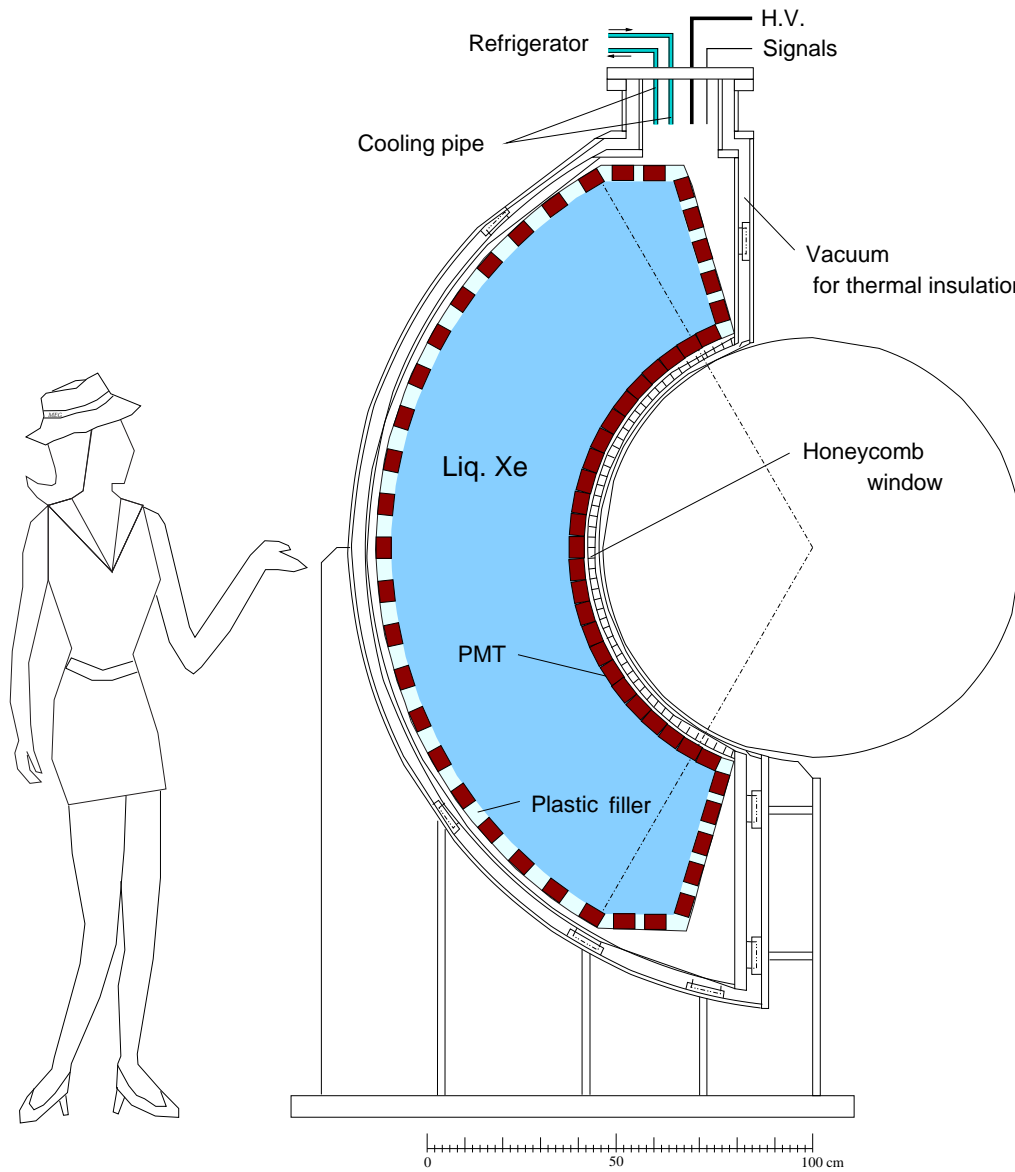


図 14: 液体キセノンガンマ線検出器の概略図。

### 3 $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊探索実験用液体キセノンガンマ線検出器

$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  実験における最大の特徴はガンマ線検出器として液体キセノンを媒体としたシンチレーション検出器を用いている点にある。これは今までの  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  探索実験で分岐比を下げる時にガンマ線検出器がボトルネックになっている点を考えると、ガンマ線を精度よく測れることができれば大きな利点となる。

液化した希ガスを用いた検出器は今までもしばしば使われてきた。例えば CERN における NA48 の液体クリプトンカロリメータや、ICARUS での液体アルゴンカロリメータ等の例がある。しかしキセノンは非常に高価であるために大型の検出器で使われることがなかった。キセノンは原子番号が大きく粒子の飛程を短くできること、希ガスシンチレータの中ではシンチレーション光の波長が長く PMT による検出が可能であるということがあり注目されている。さまざまな分野での応用が期待されているが、素粒子分野ではダークマター探索、二重ベータ崩壊探索、ニュートリノ検出器への応用が計画されている。我々の検出器は PMT(光電子増倍管) 約 800 本、液体キセノン 2.4 t を使用する世界最大規模の液体キセノン検出器となる。

#### 3.1 検出器の構造

ガンマ線検出器は PMT で囲まれた有効領域中に超高純度の液体キセノンを満たした構造をしたカミオカンデ型の検出器である。検出器有効領域の水平面による断面は台形をしており、 $z$  方向の長さは内側で 60 cm 程度、外側で 90 cm、 $r$  方向の長さは約 40 cm 程度である (図 16)。 $\phi$  方向は約  $120^\circ$  をカバーするようになっている (図 14)。

##### 3.1.1 光電子増倍管

従来液体キセノンシンチレーション検出器はフッ化カルシウム等でできた透明の窓を通して真空中におかれた PMT で光を検出するという手法がとられてきた。しかし、この場合液体キセノン、フッ化カルシウム、真空、PMT のウィンドウとさまざまな物質の境界で、光が反射されるので分解能が悪くなってしまう。そこで、我々のグループでは浜松ホトニクスとともに液体キセノン中で動作可能な PMT を開発した。

この PMT(HAMAMATSU R6041Q) は以下のような特徴を持つ。

- メタルチャンネル型ダイノードの採用によりゲインを確保しつつ、縦方向の長さを短くしている。これにより検出器全体を小さくすることができ、使用する液体キセノンの量を少なくすることができる。
- 窓材としてクォーツを使用することによりキセノンの発光波長 (175 nm) の光に対しても感度を持つ (図 17)。
- 液体キセノン検出器中の環境 (165 K,  $\sim 3$  atm) での安定動作が可能である。
- 放出ガスが少なく、液体キセノンの純度を悪くすることがない。
- 構造上第一ダイノードと本体側面が導通している。この状況で高い収集効率を確保するために印加電圧はプラスにしている。

また液体キセノン中の動作に関して長期間の安定性も確かめられている。図 18 で、時間軸の原点はキセノンの液化終了時を表す。

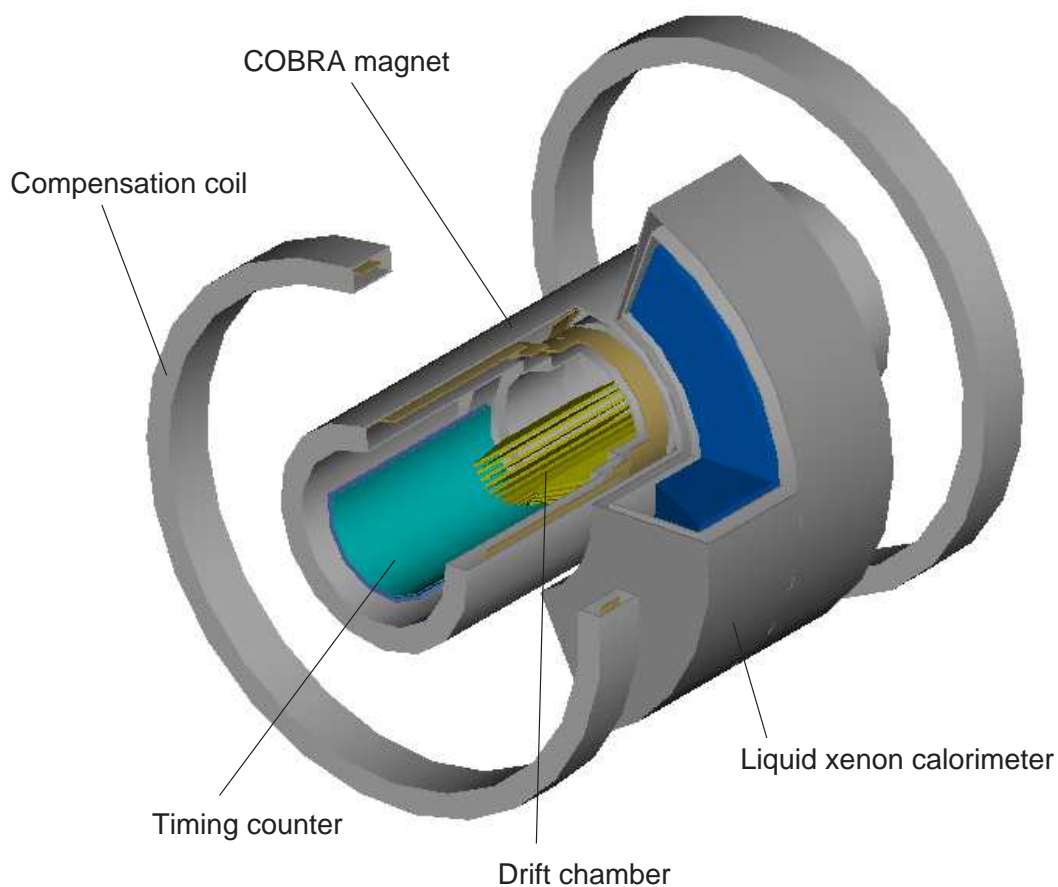


図 15:  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  探索実験の検出器

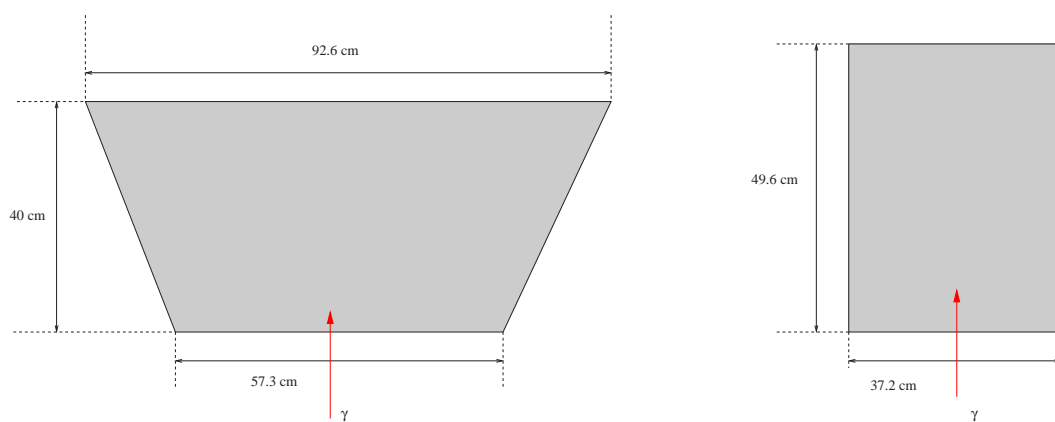


図 16: ガンマ線検出器の有効領域断面の形状。左の図が実機、右の図は本稿のテーマである大型試作機（ラージプロトタイプ）の断面形である。

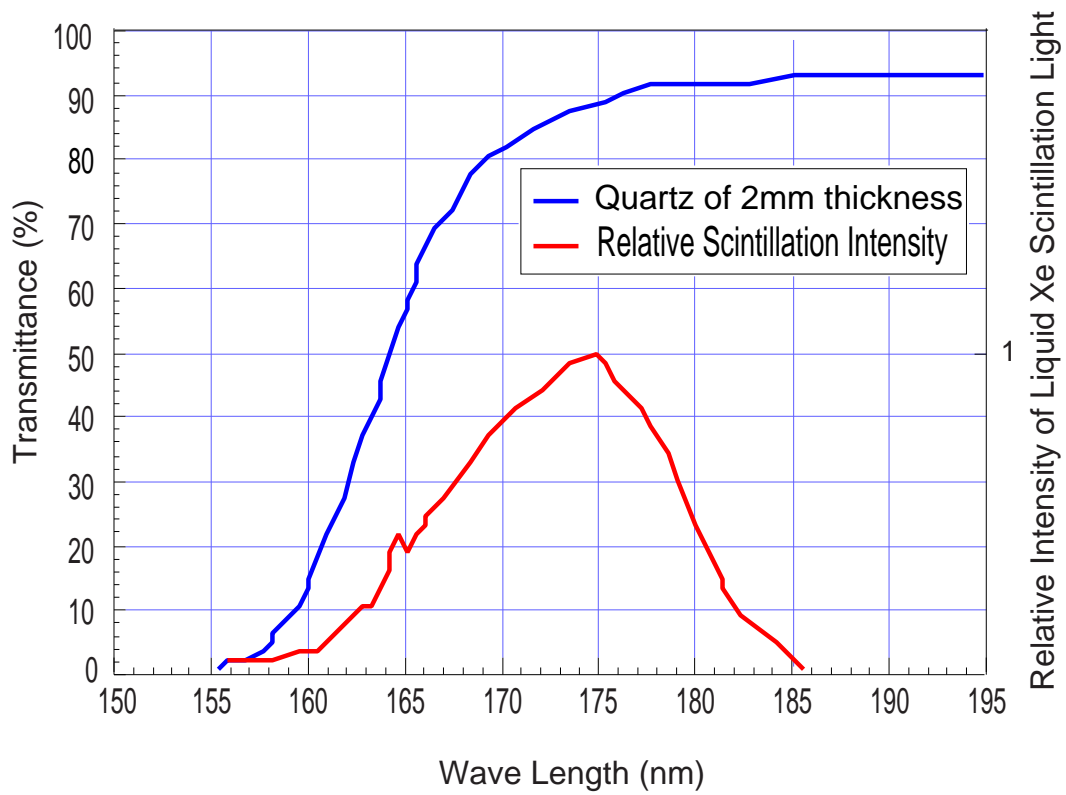


図 17: 液体キセノンのシンチレーション波長とクォーツに対する透過率。

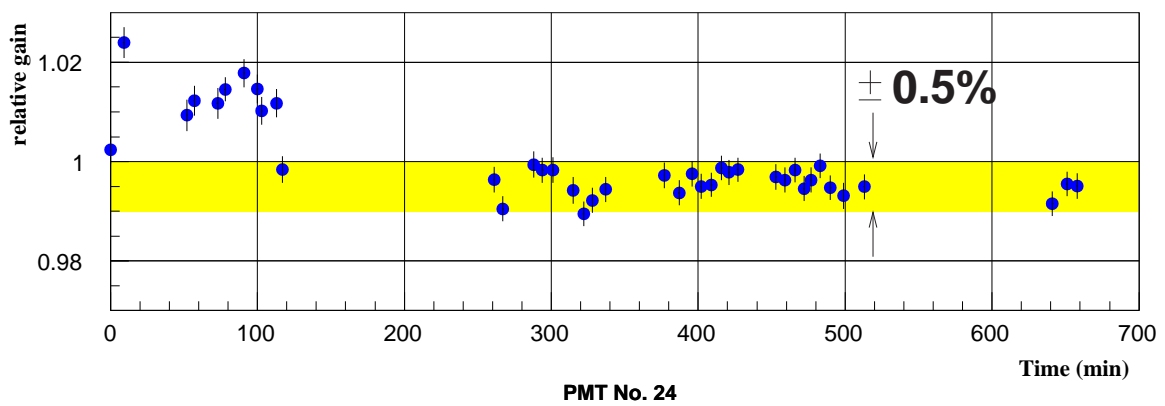


図 18: PMT の長時間安定性。約 10 時間に渡って安定した増幅率が得られている。

### 3.1.2 ハニカムウィンドウ

真空容器によるガンマ線の減衰をなるべく抑える必要がある。そのためガンマ線の入射する面の真空容器は蜂の巣状の構造を持ち、厚さ方向の物質量が少なくなるような板を用いる。材質については未だ検討段階であるが、カーボンファイバー、ステンレス、アルミニウムがその候補である。ラージプロトタイプにおいてはステンレス製のものが使われている。

## 3.2 シンチレータとしてのキセノンの性質

### 3.2.1 液体キセノンの性質

液体キセノンの主な特徴を表 4 にまとめる。図 20 はキセノンの相図である。我々は通常 1 atm~1.5 atm 程度の圧力で測定を行う。

シンチレータとしてのキセノンは以下のような利点がある。

- シンチレーションの発光、減衰が早いために、より大きな計数率の測定に使用でき、時間分解能も非常に良い。
- 液体であるために結晶ではできないような大型の検出器を作ることができる。
- 発光効率が NaI 並に大きく、高分解能が得られる。
- 結晶ではないので放射線損傷に強い。
- 原子番号が大きいためにガンマ線の飛程が短くなる。これにより検出器を小さくできる。またより高精度な測定ができることにもなる。

しかし

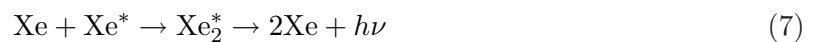
- 非常に高価である。
- 常に低温に保つ必要がある。
- 超高純度の液体キセノンを精製しその純度を保つ必要がある。

といった短所もある。

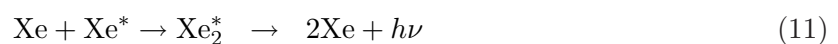
### 3.2.2 液体キセノンのシンチレーション

液体キセノン中に発生する光は直接蛍光である [20]。この直接蛍光は二つの異なる生成過程からなり、励起光と再結合光にわかれることが知られている。

励起光は



という過程に従い、再結合光は以下の過程により放出される。



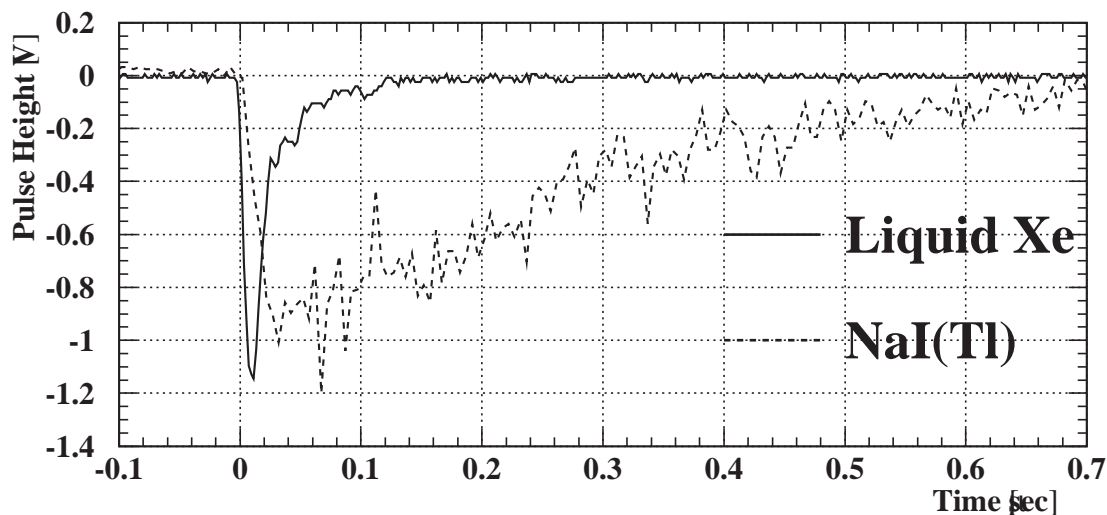


図 19: NaI と液体キセノンのシンチレーション光波形の比較。液体キセノンは早い立ち上がりとし減衰を示すため、高時間分解能と高計数率が可能となる。

表 4: 液体キセノンの緒特性。

Atomic Number	54
Mass Number	131.29
Density	3.00 g/cm <sup>3</sup>
Boiling point	165 K
Melting point	161 K
Triple point(temperature)	161 K
Triple point(pressure)	0.805 atm
Triple point(density)	2.96 g/cm <sup>3</sup>
Refractive index	1.56
Radiation length	27.7 mm
Critical energy	10.5 MeV
Mollier radius	4.1 cm
Scintillation wave length	175±10 nm
Energy per scintillation photon (52.8 MeV)	23.7 eV
Decay time(recombination)	45 ns
Decay time(Fast Components)	4.2 ns
Decay time(Slow Components)	22 ns

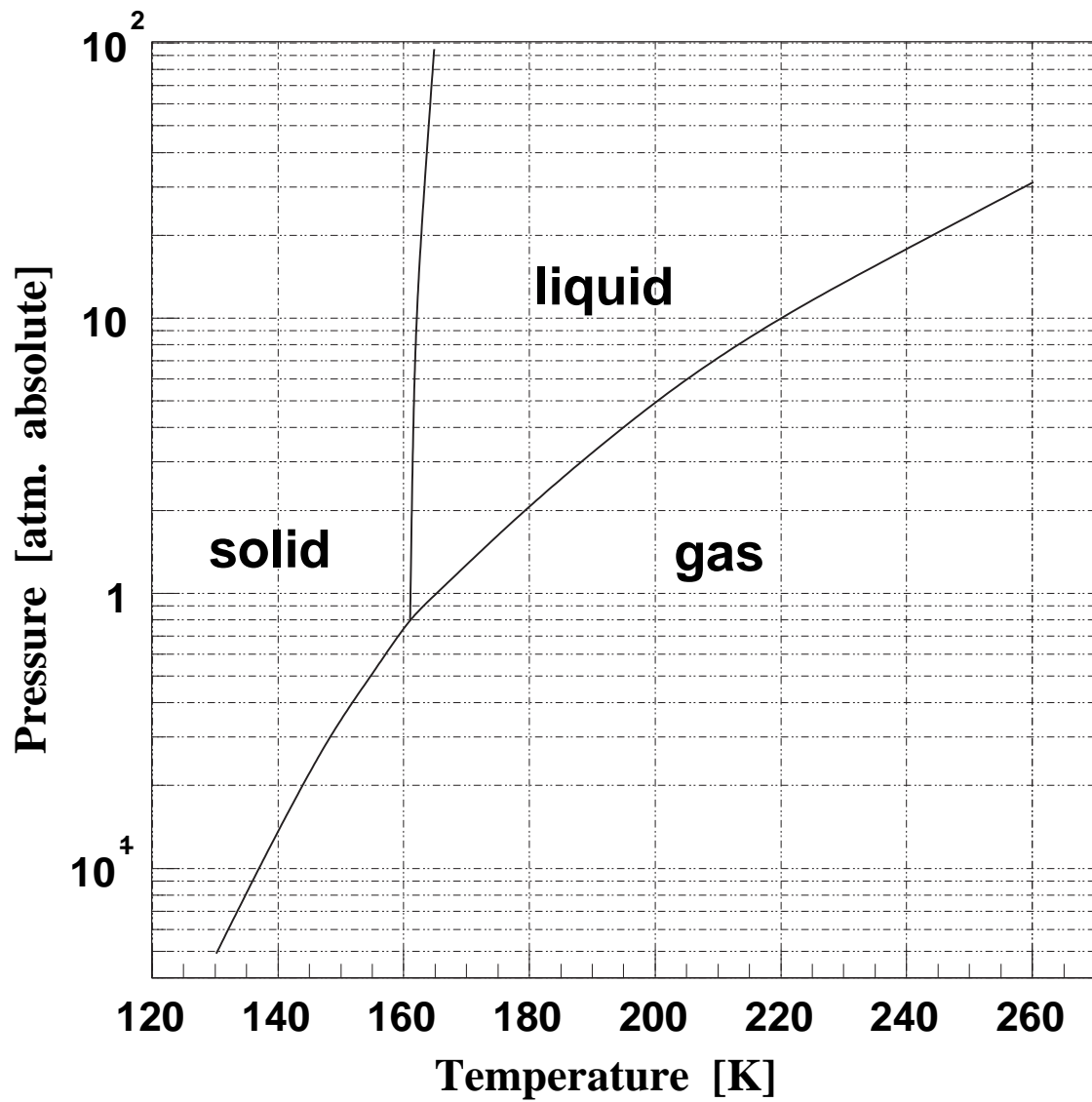


図 20: キセノンの相図。

いずれにしても最終的には励起分子  $\text{Xe}_2^*$  からの発光であるのでその波長は共通で、中心波長 175 nm である。液体キセノンの発光は再結合の時間を含めて、減衰時間が数十 ns と非常に早い。また発光は励起した原子からではなく分子からの発光であるため、シンチレーション光の自己吸収はない。

### 3.2.3 シンチレーション光の減衰

シンチレーション光の減衰は光がエネルギーを失わずにその運動方向を変えるレイリー散乱と、何らかの物質による吸収に分けられる。吸収はキセノンによる自己吸収がないということから不純物の量と成分によると考えられる。

現在までにいくつかのグループによりキセノン中のシンチレーション光の減衰長の測定は何度か行なわれており、最新のものとしては  $29.2 \pm 2$  cm という値が報告されている [21]。

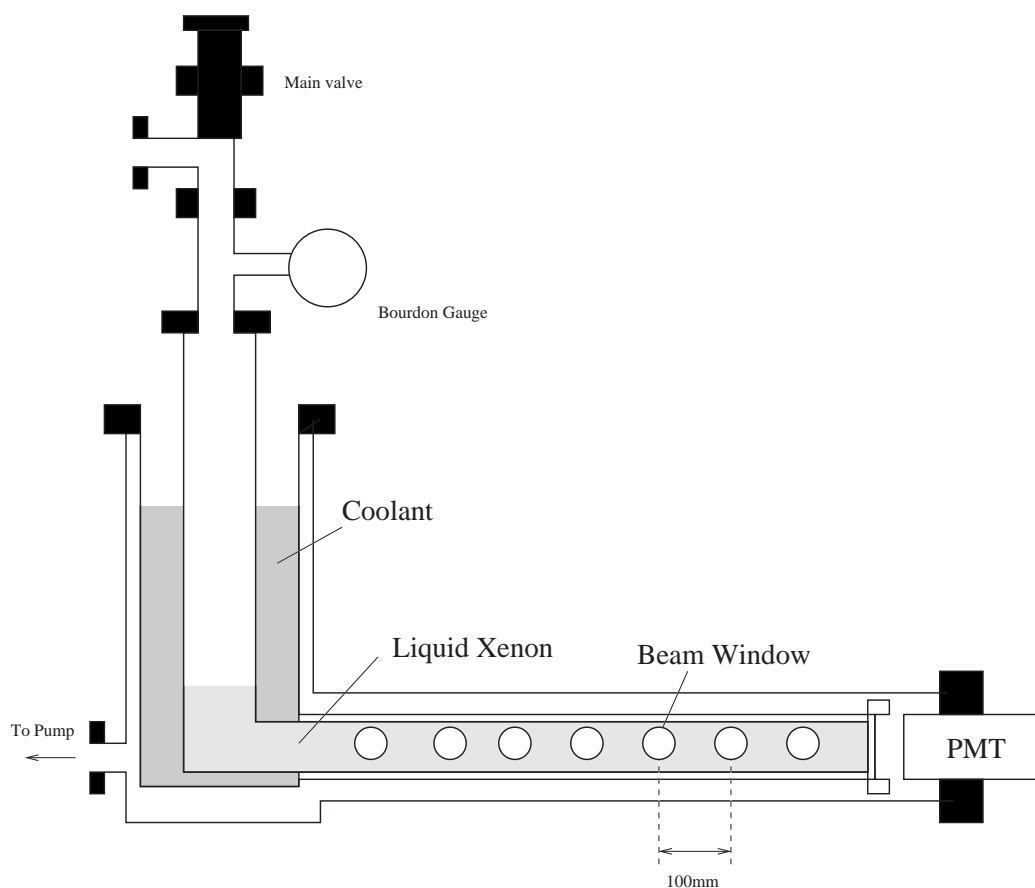


図 21: シンチレーション光の減衰長測定実験。窒素原子核ビームを打ち込む場所を変えることにより、発光点と検出器の距離を変え減衰長を測定した。この時減衰長は  $29.2 \pm 2$  cm という結果が出ている。

キセノンのシンチレーション光ではなく、単色の光により波長毎の減衰長も測定されている [22]。これは図 22 のような装置により行なわれた。60 cm の長さの筒状の容器中に液体キセノンを満たす。PMT で観測される光量の、容器中が真空の場合とキセノンを満たした場合での違いから減衰長を計る。

この実験の結果を図 23 に示す。



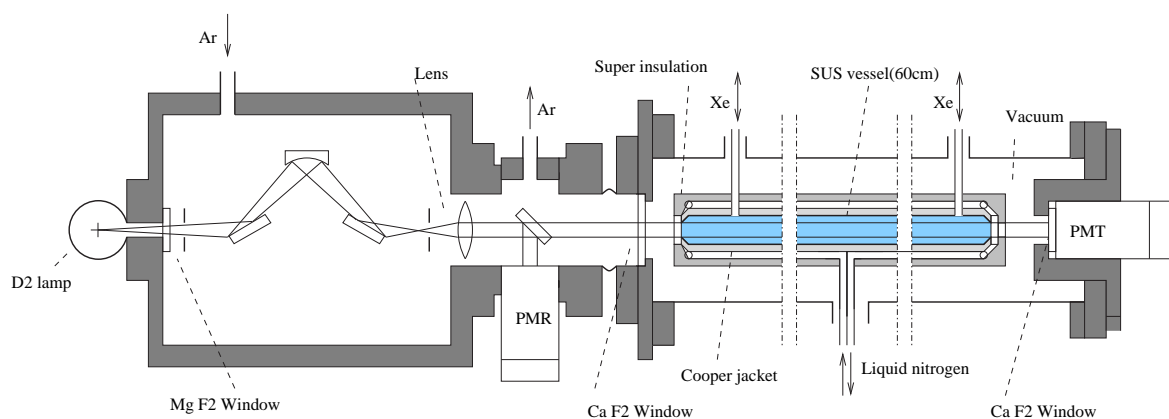


図 22: 単色光源による減衰長の測定。光源の明るさは PMR により測定され、補正に使われる。キセノン容器は長さ 60 cm、直径 3 cm である。

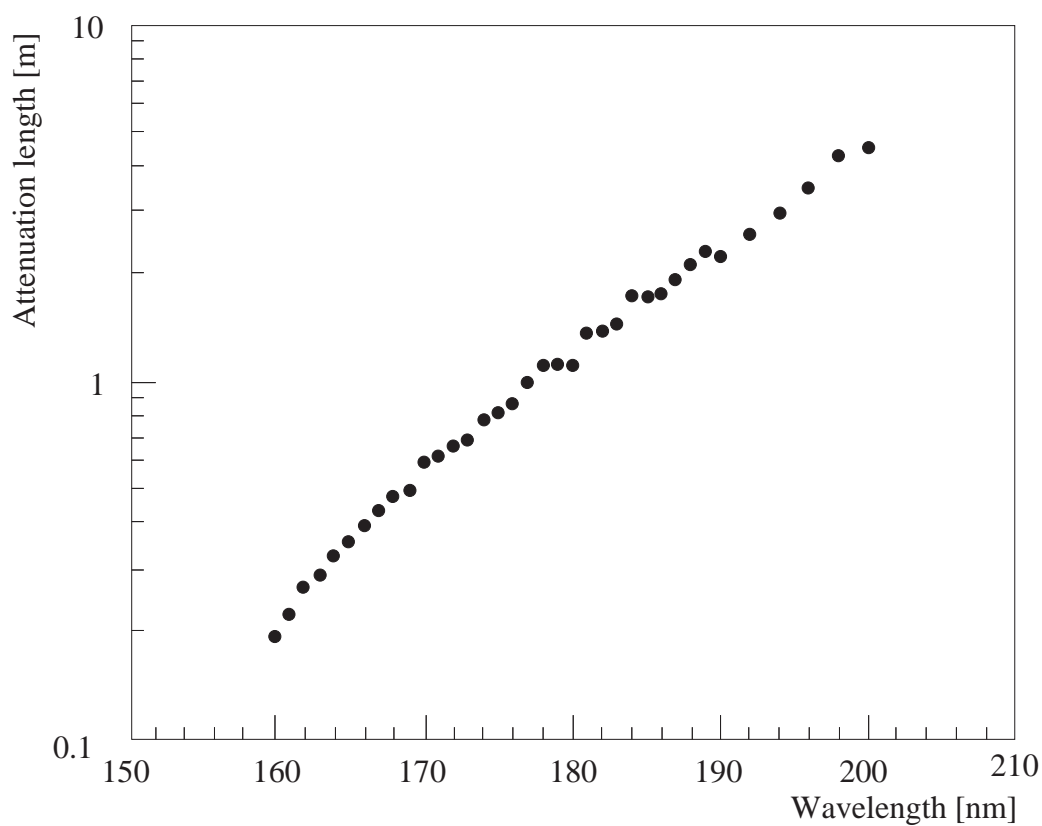


図 23: 波長と減衰長の関係。

しかしいずれも散乱と吸収を合わせた効果としての減衰の測定であり、このふたつを切り分けて測定されたことはない。

液体キセノンガンマ線検出器における測定の統計誤差は光量による。我々の検出器は有効領域を囲むようにPMTが配置されているため主に吸収が光量に影響を与える。このため、我々の興味は主に吸収にある。吸収長は不純物によるため、実際に $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 実験で使用される検出器と近い環境にあるラージプロトタイプ中での吸収長を調べる必要がある。

### 3.3 スモールプロトタイプ実験

昨年までにスモールプロトタイプと呼ばれる小型の液体キセノンシンチレーション検出器においてさまざまなテストが行なわれた。スモールプロトタイプ検出器ではPMTを32本を使用した。また有効領域内の液体キセノンは約2リットルである。

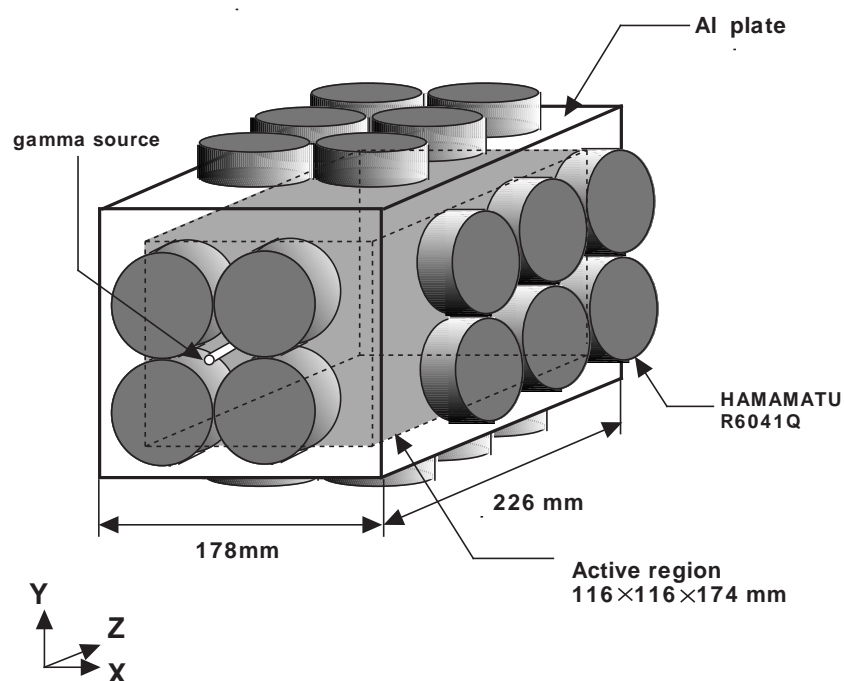


図 24: スモールプロトタイプの PMT 配置。

スモールプロトタイプにおいては放射線源からのガンマ線による発光から検出器の性能を見積もった。線源としては以下の5種類を使用した。

この結果から 52.8 MeV のガンマ線で得られる分解能を見積もると、エネルギー、位置、時間についてそれぞれ 1% 以下、数 mm、55 psec という値が期待できる。

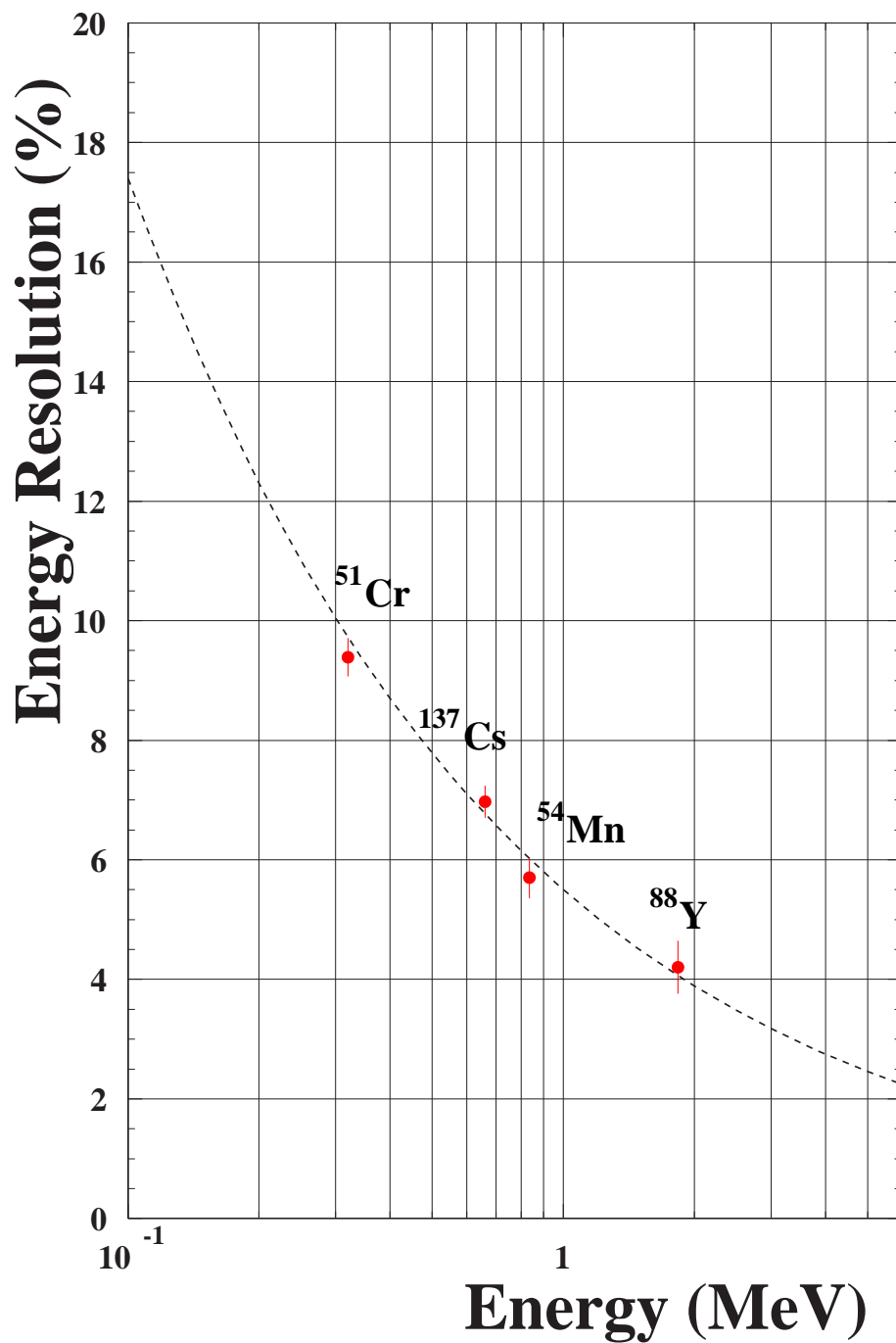


図 25: 点線はシュミレーションによる分解能の見積りである。52.8 MeV のガンマ線では 1.4~2.0 % (FWHM) の分解能が期待できる。

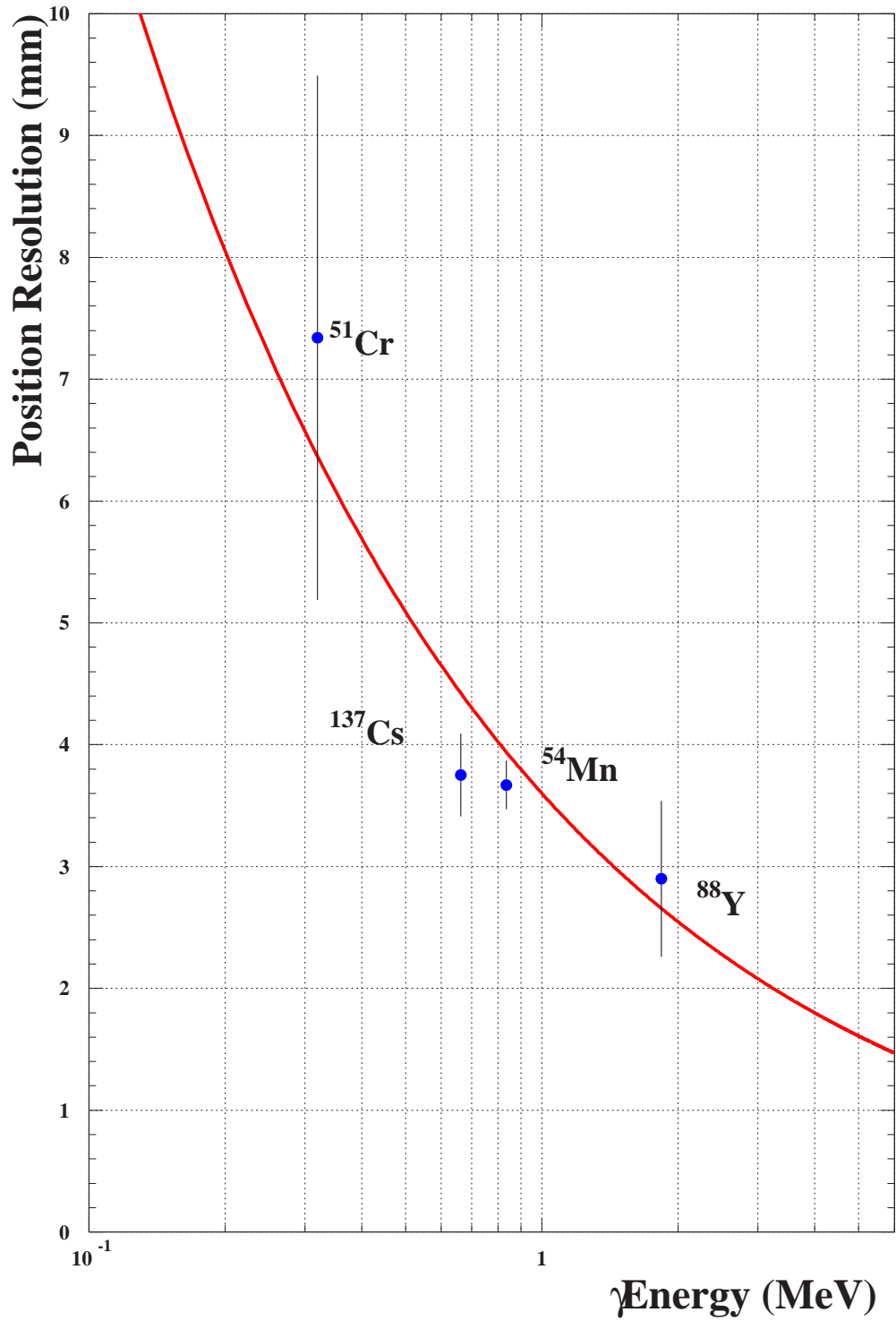


図 26: スモールプロトタイプで得られた位置分解能。52.8 MeV のガンマ線では数 mm の分解能が得られると期待できる。

表 5: スモールプロトタイプ実験で使用した線源。

ガンマ線源	ガンマ線のエネルギー (keV)
$^{51}\text{Cr}$	320
$^{137}\text{Cs}$	662
$^{54}\text{Mn}$	835
$^{88}\text{Y}$	1836

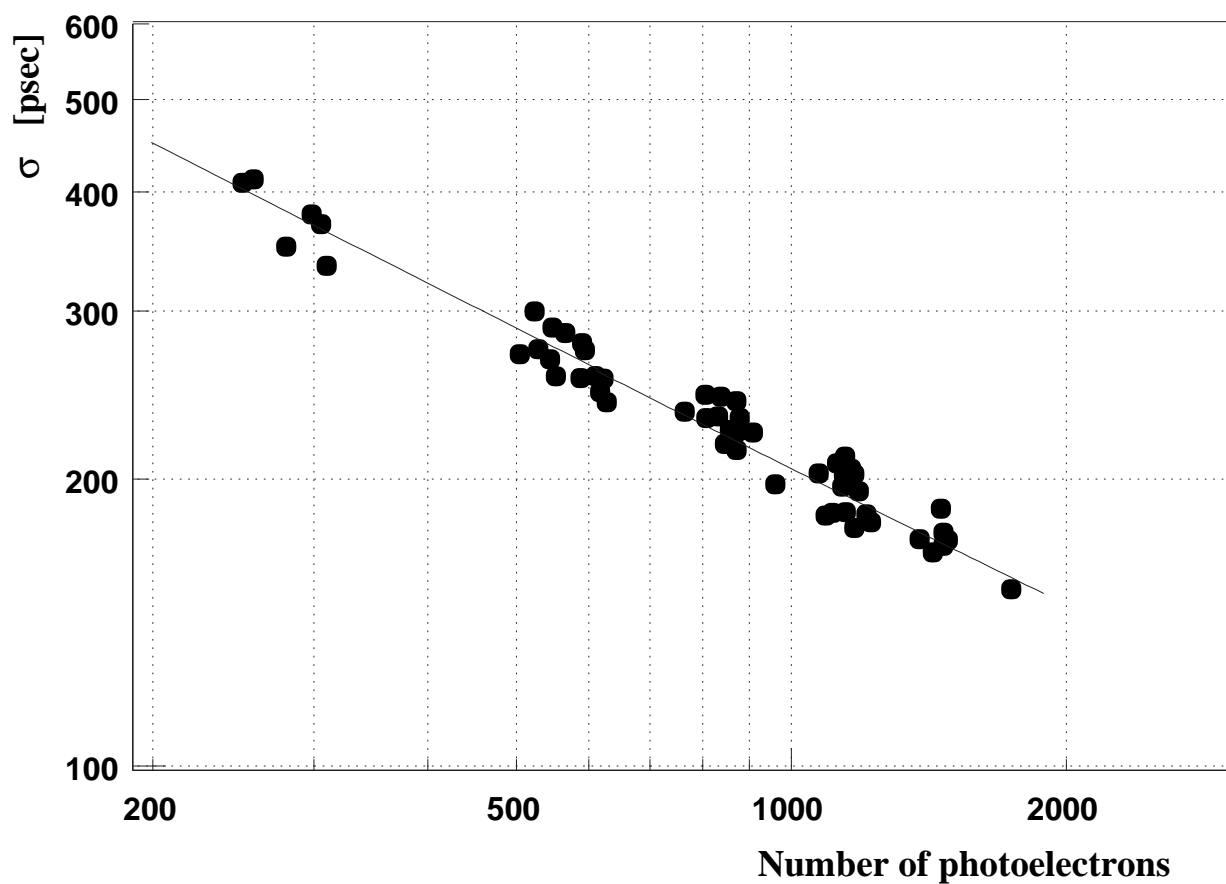


図 27: 52.8 MeV のガンマ線では 55 psec の分解能が得られると期待できる。

## 4 プロトタイプ実験

### 4.1 プロトタイプ実験の目的

スモールプロトタイプにおいてキセノンを用いたシンチレーション検出器が低エネルギーのガンマ線において十分な性能を持つことがわかった。そこで、より実機の条件に近い条件での性能を確かめるといことがラージプロトタイプ実験の目的である。

スモールプロトタイプではガンマ線のエネルギーが最大で 1.8 MeV であり、ガンマ線は主にコンプトン散乱によりエネルギーを失う。しかし 52.8 MeV のガンマ線では電子陽電子対生成が支配的になる。また、スモールプロトタイプ実験では線源が検出器内に挿入されていたが、実機においては検出器外から入射されるため有効領域外でのエネルギー損失の影響が現れる。さらに検出器の大型化にともないシンチレーション光の散乱や減衰の影響も大きくなる。

また、大型化、多チャンネル化にともないPMTホルダー、フィードスルー、冷却システム、エレクトロニクス等ハードウェア的なあらゆる面においてスモールプロトタイプからの変更が加えられており、それらのテストを行なうこともその目的となる。

### 4.2 ラージプロトタイプを用いて行なわれる実験

#### 4.2.1 ビームテスト

産業技術総合研究所 (AIST) の電子蓄積リング (TERAS) による逆コンプトンガンマ線によるビームテストを行なう。この加速器は最大 40 MeV のガンマ線を出すことができるので実機に近い条件でのテストを行なうことができる。ここで、エネルギー、位置、時間の測定における検出器の性能を評価する予定である。

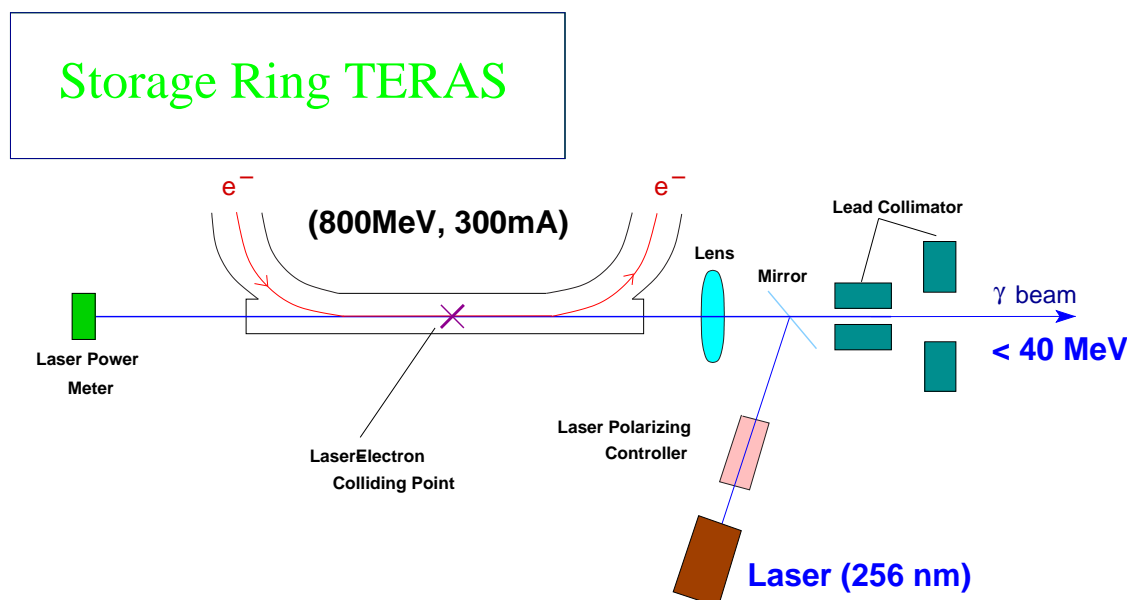


図 28: 800 MeV の電子と 256 nm のレーザー光を正面衝突させることにより、最大 40 MeV の逆コンプトンガンマ線をつくることことができる。

### 4.2.2 宇宙線実験

宇宙線実験はキセノン中のシンチレーション光の減衰長を測定することを主な目的としている。ラージプロトタイプは光源を囲むように PMT が配置されているため吸収と散乱が異なった形で現れる。このため、あまり散乱長によらない量を調べることでより吸収長のみを測定できることになる。

### 4.3 検出器

ラージプロトタイプは 2000 年までにその容器、PMT、キセノンタンクの製作が行なわれた。またそれと並行し、キセノンの輸送ライン、キセノンタンク、純化装置の準備、PMT の動作確認、キセノンの入手とその純度測定、液体キセノン用液面計の開発、検出器材料の選定、製作、低温試験等を行なった。2001 年 1 月には容器の耐圧テスト、熱流入量の測定を行い、2 月には実際に液体キセノンの液化を行った。液化テストは PMT 等は入れずに容器だけで行われ、約 10 リットルのキセノンの液化に成功した。その後 3 月までに PMT の設置、配線等、検出器としての組み立てを行った。この状態では約 90 リットルのキセノンの液化を行い、長時間キセノン液体の状態に保持できることが確認された。

図 29 は検出器の断面図である。以降この様に軸の向きをおくことにする。また特にことわらない限り位置座標の原点は有効領域の中心とする。

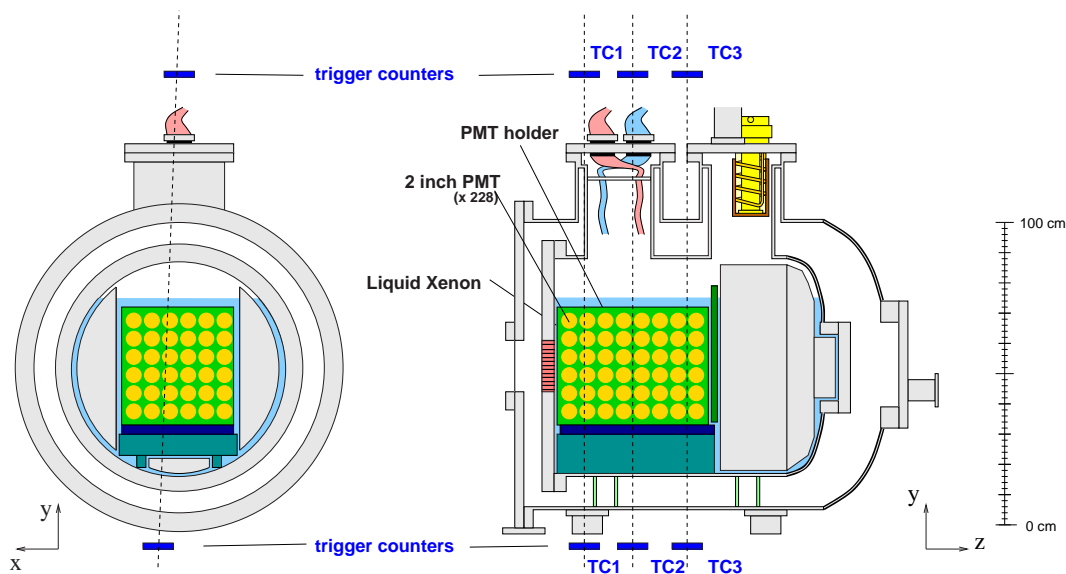


図 29: 宇宙線実験のセットアップ。3 対のトリガーカウンタ対によってトリガーがかけられる。トリガーカウンタ対はそれぞれ、有効領域の前方、中、後方を通る宇宙線にたいしてトリガーをかける。

容器は円筒形のステンレス容器である。容器は二重構造をしており外側を真空にすることで断熱することができる。さらに断熱真空内はアルミニウムを蒸着したマイラーのシートを重ねて巻くことにより熱の流入を抑えている。

## 4.3.1 光電子増倍管とホルダー

ラージプロトタイプでは2インチのPMTを最大264本使うことができるが、ビームテストにおいて後方のPMTはあまり重要でないので、実際には228本使用している。

図31がその配置である。以降、 $x, y, z$ のプラス方向をそれぞれ、左、上、後ろと呼び、検出器の各面を図31のように呼ぶこととする。ビームテストに最適化した配置であるため、後方にはPMTの置かれていない部分がある。

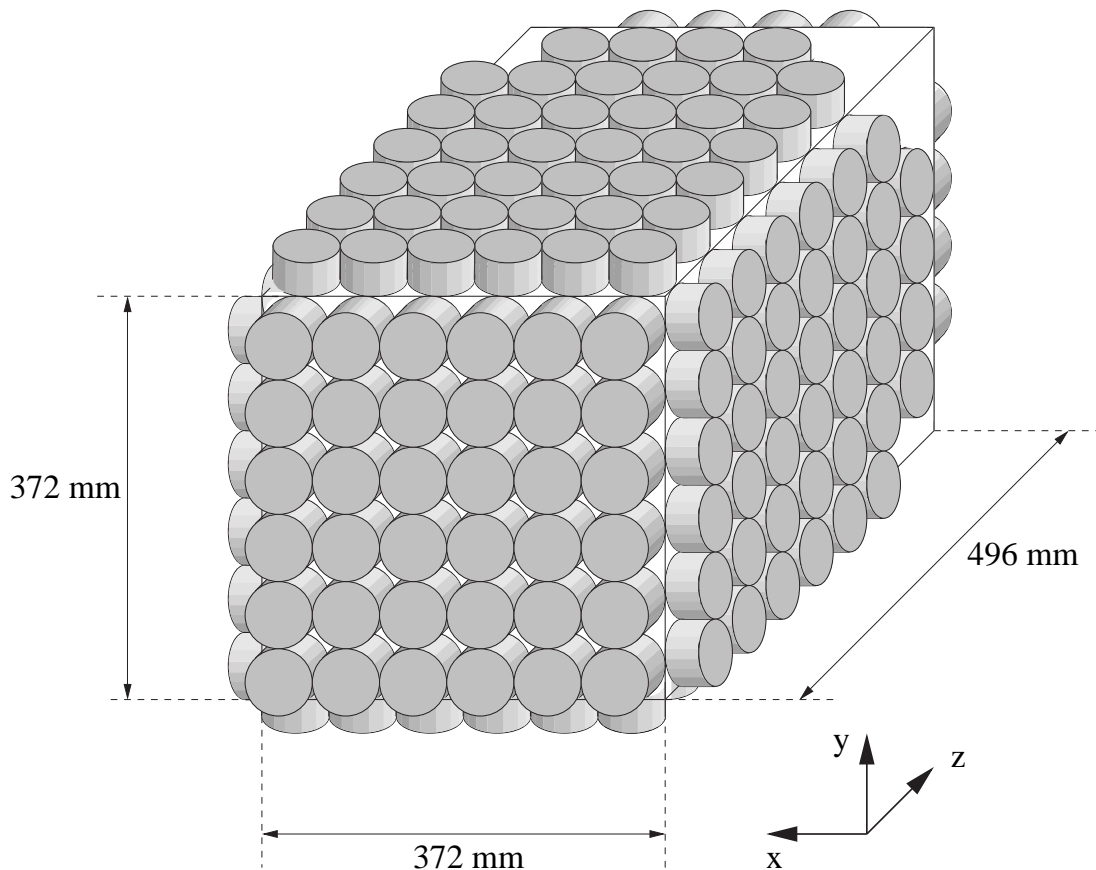


図 30: キセノン中の PMT の配置。

ホルダーの内側はアルミニウム、外側はルサイト (アクリル) で作られている。ただし前面に関しては、ガンマ線の減衰を抑えるためにアルミニウムの代わりに G10(ガラスエポキシ積層板) を用いた。PMT とアルミニウムの間はテフロンシートにより絶縁され PMT のグラウンドがホルダーから浮くようになっている。

ビームテストにおいては、PMT の裏の空間のキセノンによるガンマ線の減衰を抑えるために前面の PMT の背面を有機物で空間を埋める必要がある。そこで初めはシリコンゴムを使用した (図 32)。しかし熱収縮のため PMT のステム部を破壊し PMT 内の真空を破ってしまうことが確認されたため、宇宙線実験においてはシリコンゴムは取り除いた。ただし、PMT の破壊を起こさない場所にはシリコンゴムも使用されている。

シリコンゴムの代替物の候補としてスタイキャストがあげられる。スタイキャスト (Stycast 1266) はガラスビーズ (0.5 mm $\phi$ ) を混ぜ熱膨張率をガラスに近づけることにより PMT の破壊を防げると考えられる。今回の宇宙線実験ではガラスビーズ無しとガラスビーズを混ぜたものをそれぞれ一本ずつの PMT にモールドシテストを行なった。ビーズ無しのものは PMT の真空破壊がおこっ



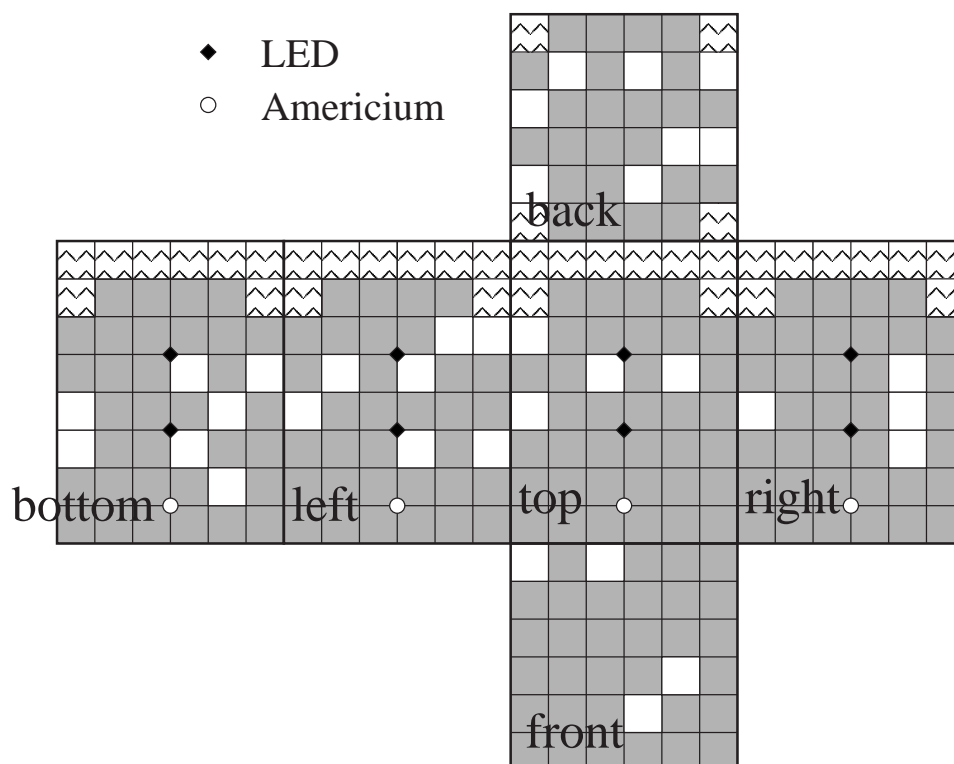


図 31: キセノン中の PMT の配置 (展開図)。斜線部は PMT のおかれていない部分である。白い部分は様々な原因により今回解析に使わなかった PMT である。

てしまったと思われるが、ビーズ有りの場合には PMT は問題なく動作した。

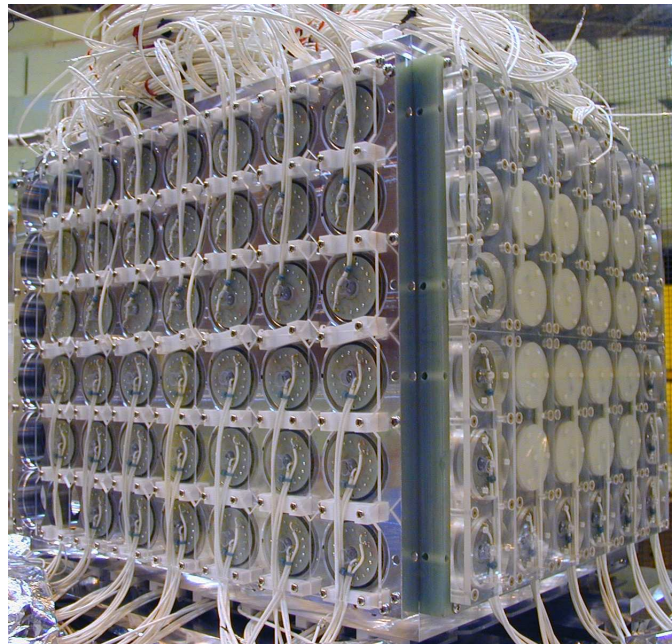


図 32: PMT と PMT ホルダーの写真。前面の PMT の背面はシリコンゴムでモールドされている。

#### 4.3.2 補間物とヒータ

検出器の有効領域が約 70 リットルなのに対して、我々が所有するキセノンは 100~120 リットルであるため、有効領域外の空間のほとんどを補間物で埋めなければ有効領域をキセノンで満たすことができない。そこでアルミニウム、アクリル、銅の補間物でできる限り空間を埋めた。底面の空間にはアルミニウムと銅の補間物の間にヒータが挿入されている。このヒータは実験後のキセノンの回収、真空容器のベイクアウト、キセノン回収後のチェンバーの加温等に用いられる。

#### 4.3.3 モニター系

検出器内の圧力、温度 (8 箇所)、キセノンの液面の高さ、キセノン輸送ライン内の流量、キセノンタンク中の圧力が計測され 30 秒ごとに記録されている。スモールプロトタイプで温度は熱電対によって計られていた。しかし熱電対は熱容量が大きいため短時間での温度変化に敏感でなく、さらには出力が室温によるため精度もよくない。そこでラージプロトタイプでは白金抵抗温度計 (pt100) を用いることにした。これによりキセノンの状態をよりよく分かるようになった。

#### 4.3.4 フィードスルー

図 34 はシグナル、H.V. のフィードスルーの写真である。できるだけコンパクトに 264 チャンネル分のシグナル、H.V. を通せるように工夫されている。

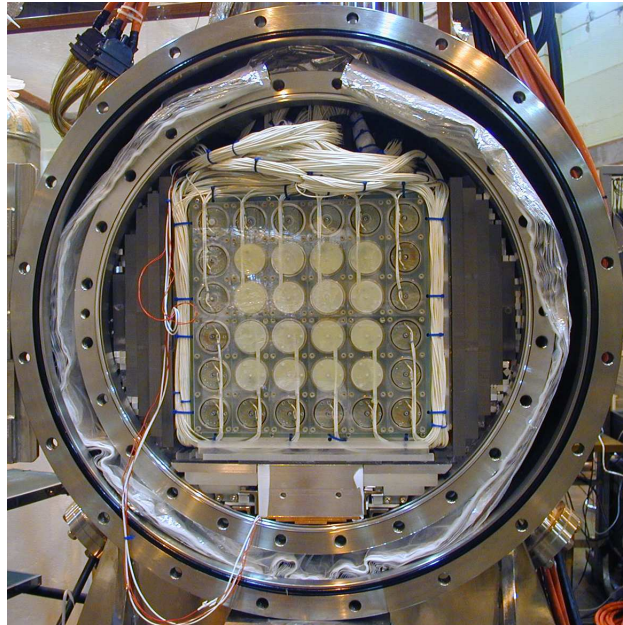


図 33: 前方からのラージプロトタイプ内の写真。有効領域以外の空間は補間物で埋められている。

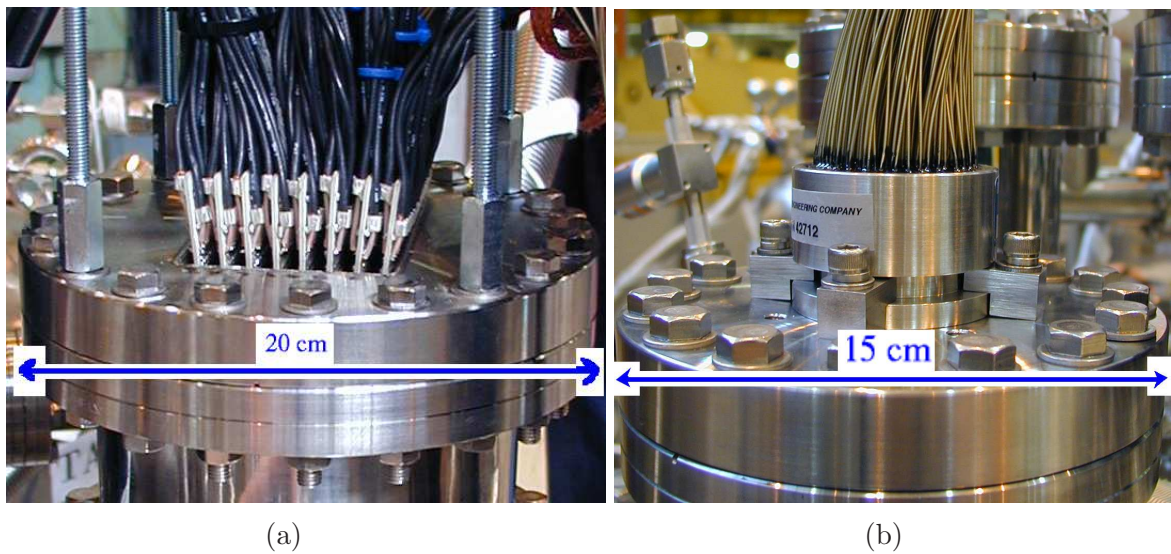


図 34: フィードスルーの写真。(a) はシグナル線 (b) は H.V. 用のフィードスルーである。

## 4.3.5 液面計

キセノンの液面を計るには

- 低温中で動作する。
- 3 atm 程度の圧力に耐えられる。
- キセノンを汚さない。
- 検出器内に光が入らないようにする。
- キセノンを液体に保つために、大きな熱源とならない

という制約がある。このような条件を満たすものとしてコンデンサにより液面を測定するというアイデアがあったが、今まで実用されることはなかった。そこで今回、実用化を目指して開発を行なった。

キセノンは誘電体であるため (誘電率 1.9(6))、液面は平行平板のコンデンサの容量の変化によって知ることができる。液面計は多層にすることにより大きな容量を持つよう工夫されている。図 35 は試作器である。極板は G10 の板に銅箔をはったものである。極板の間隔は 1 mm である。この間隔はテフロンのリングにより保たれている。

容量の変化の線形性は液化窒素の液面を計ることで試した。これは液化窒素の液面は直接定規で計ることができるからである。静電容量は LCR メータで測定した。図 36 はこの時の結果である。

液化窒素による計測から分解能は 3 mm 程度であることが確認された。液体キセノンは液化窒素よりも誘電率が大きいために、キセノン中で使用した場合分解能はこれ以上に良いことが期待される。

ラージプロトタイプでは静電容量はタイマー IC ( $\mu$ PD556) により、矩形波の周波数に変換されマルチメータで測定される。図 37 に静電容量計の回路図を示す。回路は NIM モジュール内に収められ、電源は NIM ピンより +6 V または +12 V をとれるようになっている。電源部には 1  $\mu$ F と 100 nF のバイパスコンデンサとコイルを入れることにより、電源からのノイズをカットするようにしている。この時矩形波の周波数  $F$ 、デューティー比  $D$ 、静電容量  $C$  は以下のような関係となる。

$$F [\text{Hz}] \sim 2.13 \times 10^{-5} / C [\text{F}] \quad D \sim 51[\%] \quad (12)$$

ラージプロトタイプでは高さを 25 cm とした。また同じものを上下に並べておいている。これにより 50 cm の範囲で液面を測定できるようになっている。図 38 は宇宙線実験での液化時の液面を、液面計で測定したものである。

## 4.3.6 キセノンの輸送と純化装置

キセノンの輸送ラインは図 39 のようになっている。配管は内径 16 mm のステンレス管で構成され、接続はメタルパッキンを使用する VCR またはコンフラットによって行なわれている。またバルブも全てメタルバルブを使用しており、輸送中にキセノンを汚さないよう配慮されている。配管は使用前に 130°C 以上の高温でベイクアウトし、放出ガスが少なくなるようにしている。キセノンの純化は液化時に Oxisorb と呼ばれる純化装置を通すことによって行なわれる。Oxisorb では水を 0.5 vpm 以下、酸素を 1 vpm 以下まで除去できることが保証されている。

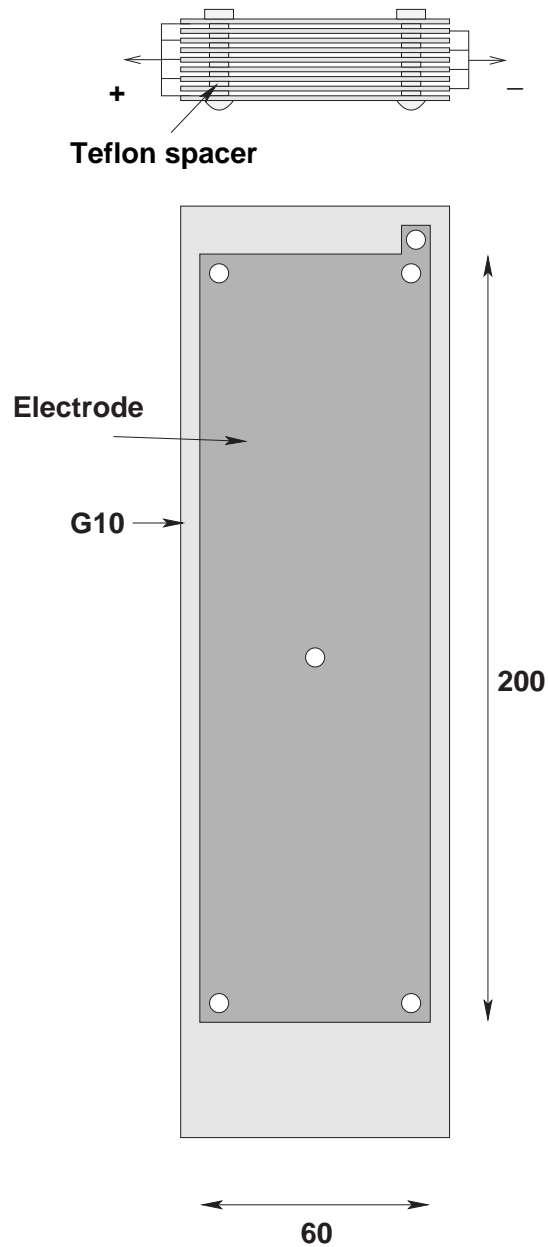


図 35: 静電容量式液面計。液体キセノンは誘電体であるため、コンデンサの容量の変化から液体キセノンの液面の高さを知ることができる。

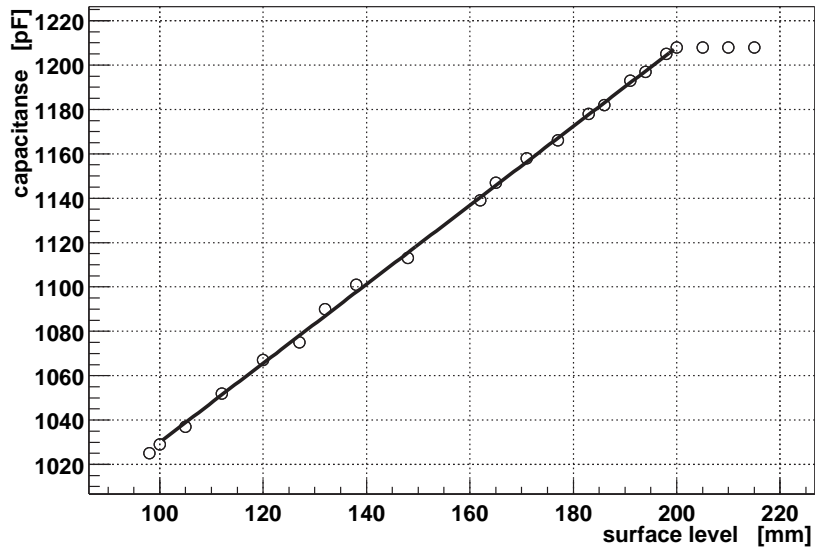


図 36: 静電容量式液面計の線形性。これは液面計の試作器 (図 35) の線形性を液化窒素により確かめたものである。

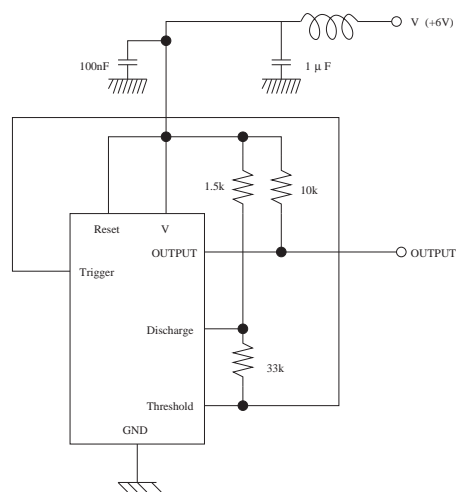


図 37: 静電容量計の回路図。

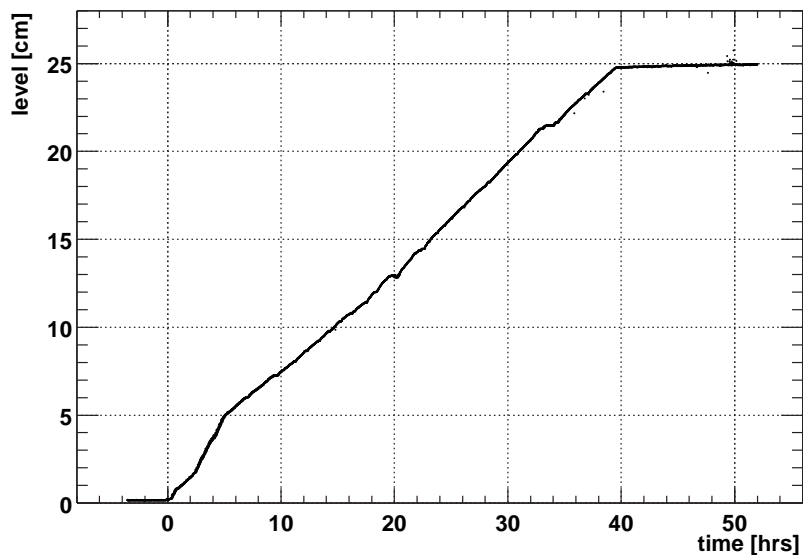


図 38: 宇宙線実験液化時のキセノン液面の様子。これは上下2つの液面計のうち下側の液面計の出力である。時間の原点は液面が液面計の下端に達した時間とした。高さの原点も同様である。

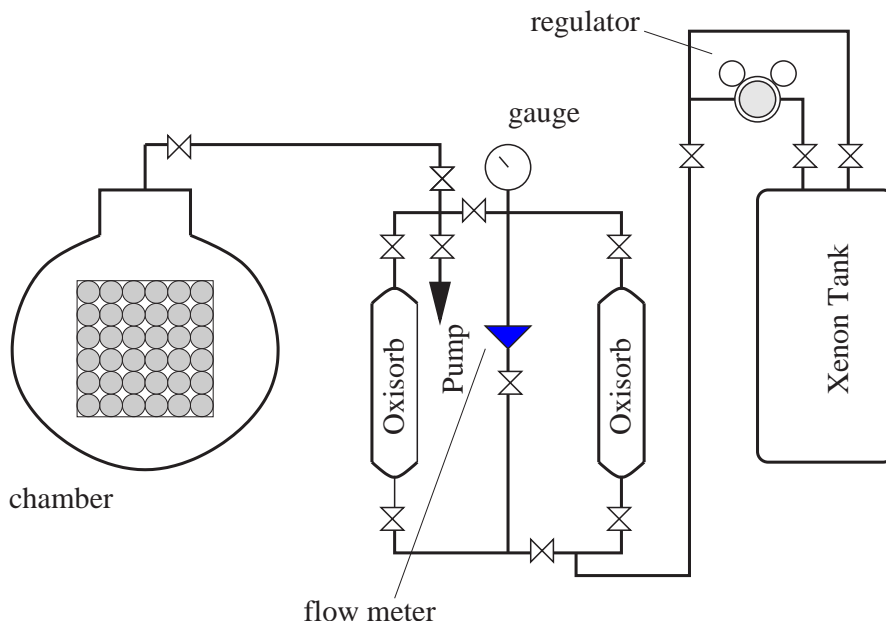


図 39: キセノンの輸送ライン。キセノンはタンクからチェンバーに送られる途中で Oxisorb により純化される。配管、接続部分にはできる限り金属を用い、キセノンの汚染を防いでいる。

### 4.3.7 安全対策

ラージプロトタイプではキセノンの圧力の上昇に対して3重の安全策がとられている。

第一段階としては、冷凍機の運転中でも常に液化窒素による冷却の用意がされており、冷凍機により圧力の制御が不能になった場合は自動的に液化窒素によりキセノンの圧力が保たれる。

第二段階はPMTを守るためにとられている。これは逆止弁によってキセノン圧力が2.5 atm以上になった時にキセノンを大気中に逃がすようになっている。これはPMTの対圧が3 atmであるためである。

第三段階としてそれ以上の圧力上昇により逆止弁による開放が追い付かない場合は破裂板が割れて、より速く大気中にキセノンを逃がす。これにより真空容器の爆発を避けることができる。

### 4.3.8 冷却システム

我々はキセノンの冷却法として液化窒素と冷凍機の併用を採用した。これら二つの冷却法は独立に動作することができる。

検出器容器のトップフランジには図40のように螺旋上の銅パイプがとりつけてある。液化窒素による冷却はこのパイプに液化窒素を流すことにより行われる。液化窒素のコントロールは電磁弁により行われる。電磁弁の開閉はキセノンの圧力が、設定した上下限内に保たれるように自動的に行われる。液体窒素による冷却は非常に強力であるため、液化時には速い液化が可能である。またキセノンの急な蒸発による内圧の上昇へすばやく対応することができる。

しかし長期間の運転時には大量の液化窒素が必要となるため、長期間の運転中には冷凍機によってキセノンを液体に保つ。冷凍機はパルス管冷凍機と呼ばれているもので、低温部での機械的可動部分がなく低振動、低騒音なものである。これはラージプロトタイプにおいて実際に使用され約2週間にわたる安定な運転が確認されている。

冷凍機の制御はコールドヘッドに付けられたヒータで余剰の冷凍能力を打ち消すことで行なわれる。コールドヘッドの温度(またはキセノンの圧力)に目標値を設定しPID制御を行なうことにより、キセノンの状態の変化を非常に小さくすることができる。

## 4.4 宇宙線実験

### 4.4.1 セットアップ

実験は図29のようにラージプロトタイプ検出器の上下に3組のプラスチックシンチレータを置き、直上からの宇宙線に対してトリガーがかけられるようにした。プラスチックシンチレータは10 cm×10 cm×6 mmの大きさである。シンチレータの発光はライトガイドにより効率的にPMTに運ばれる。シンチレータの中心の座標は表6のとおりである。下側のシンチレータはチェンバー構造物により、 $x = 0$  cmに置くことができず $x = 6.25$  cmとなっている。

### 4.4.2 データ取得回路

データ取得回路はビームテストでの時間分解能測定のために128本のPMTについては、はじめにディバイダにより信号が分岐され、それぞれ波高測定用、時間測定及びセルフトリガー用に使われる。セルフトリガー用に使われる128本は16本ずつ8組に分けられディスクリミネータに送られる。ディスクリミネータはそれぞれのチャンネルについて閾値の設定をすると同時に、閾値に達したチャンネル数に応じた大きさの出力(sum output)を出すことができる。sum output



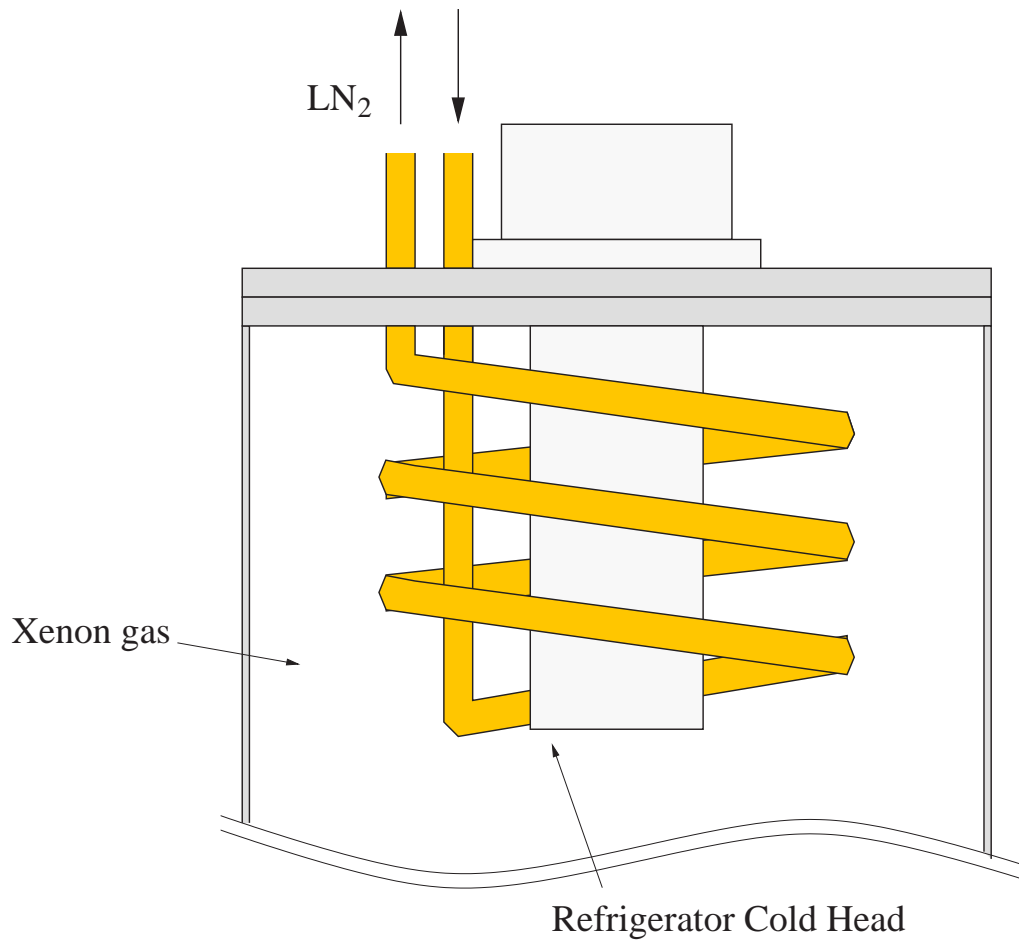


図 40: ラージプロトタイプにおけるキセノンの冷却法。

表 6: トリガーカウンタの配置。

	$x$	$y$	$z$
TC1(upper)	0 cm	120 cm	-168 cm
TC1(lower)	6.25 cm	-60 cm	-168 cm
TC2(upper)	0 cm	120 cm	0 cm
TC2(lower)	6.25 cm	-60 cm	0 cm
TC3(upper)	0 cm	120 cm	186 cm
TC3(lower)	6.25 cm	-60 cm	186 cm

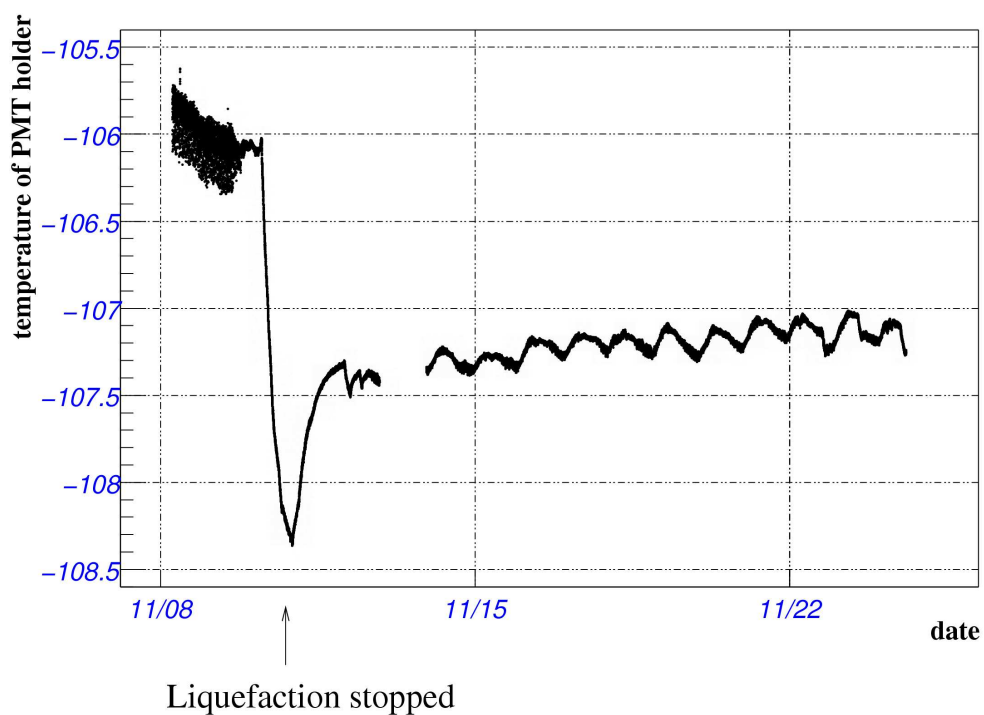


図 41: ラージプロトタイプ宇宙線実験における PMT ホルダーの温度変化。約 2 週間の温度の変化が 0.5 K の範囲内にあることがわかる。キセノンの液化は 11 月 10 日まで液化窒素により行なわれ、液化終了時より冷凍機による冷却に切替えられた。一日周期での温度の振動は室温の変化により冷凍機の冷却水の温度が変化していることによると考えられる。

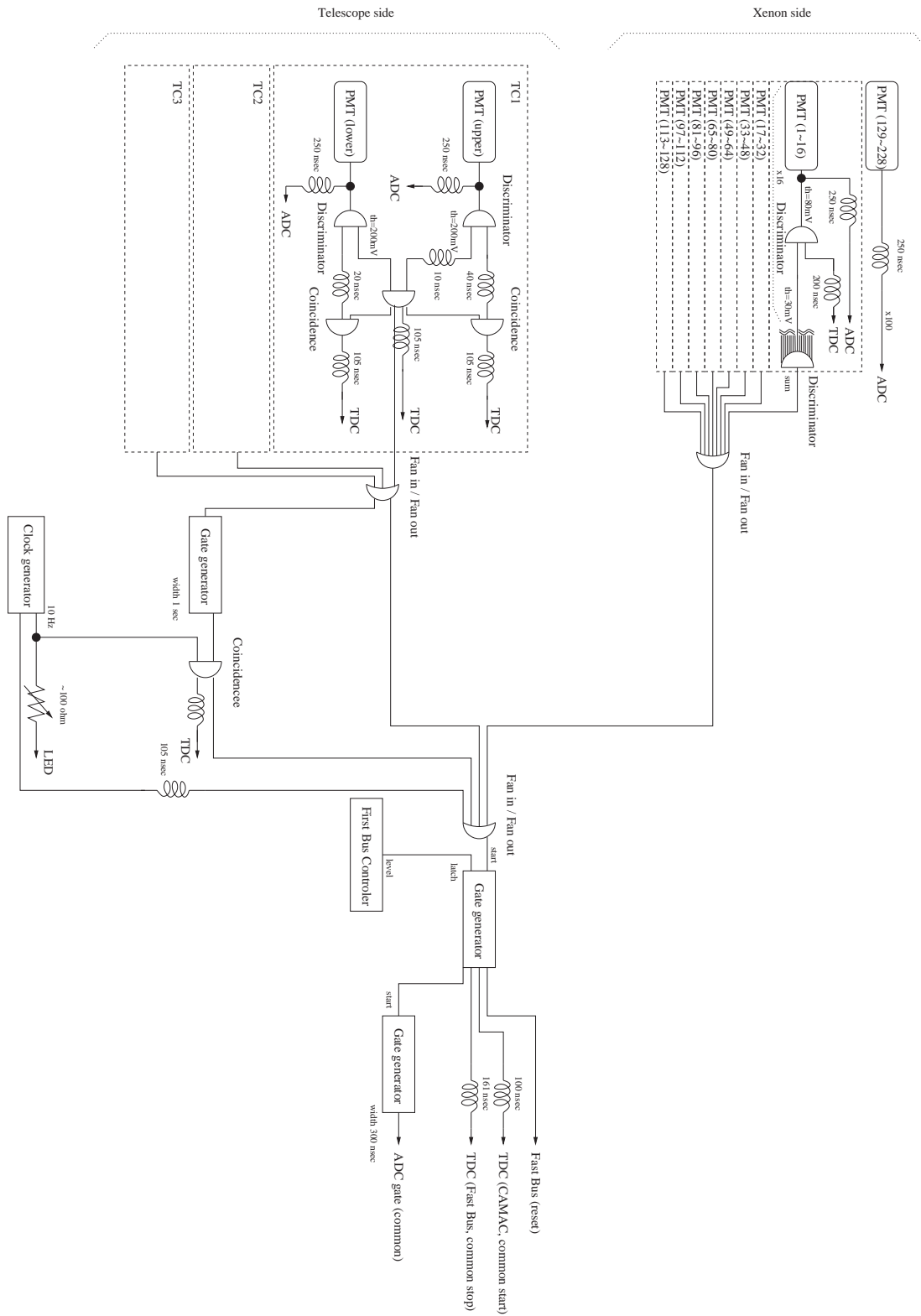


図 42: データ取得回路。トリガーは、セルフトリガー, 宇宙線によるトリガー, クロックジェネレータによるトリガーから選ぶことができる。

は(閾値に達したチャンネル数  $\times 50$  mV) を出力する。結果的に、128本のPMTのいずれかが80 mV以上の信号を出力した場合にセルフトリガーがかかるようにしている。

今回の実験においてトリガーは3対のトリガーカウンタにより与えられる。TC1、TC2、TC3のトリガーカウンタのいずれかの組の上下のPMTの出力のコインシデンスによりトリガーがかかるようにした。トリガーカウンタの閾値はシンチレーション光によるピークはすべて含み、さらにチェレンコフ光によるイベントも一部トリガーがかかる程度にした(5.2.1参照)。各トリガーカウンタのディスクリミネータ、コインシデンスの出力はTDCに送られ、オフラインの解析時にどのカウンタ対によってトリガーがかけられたかを知ることができる。

測定は最長で約24時間連続して行なわれたが、今回使用したADCはペDESTALが不安定で長期間の間に変化することが確認されている。このため1イベントの取得後に10回のペDESTAL測定を行ないこの平均値をペDESTALとして差し引くことにした。具体的には1イベント取得後にクロックジェネレータにより10回トリガーをかける。この時クロックジェネレータの信号をTDCにも送ることにより、オフラインの解析時にペDESTAL測定のイベントであるかどうかを知ることができる。

#### 4.4.3 手順

キセノンの液化を行なう前に検出器内を2週間の間ロータリーポンプとターボ分子ポンプにより真空引きを行なった。到達真空度は $4.4 \times 10^{-2}$  Paである。その後約三日間、精製および液化を行なった。液化したキセノンは約120リットルである。有効領域はキセノンで満たされた。

宇宙線の測定はPMTのゲイン(増幅率)を $3 \times 10^6$ にそろえた後、約2週間行った。PMTのゲイン測定は毎日行なったが、極端に異常なものを除いてはゲインに変更を加えなかった。ゲインの違いはオフラインの解析時に考慮することにする。

## 5 実験データの解析

今回の解析では、減衰長を変化させたシミュレーションを行ない最も実験値と光量の分布が近いものを探するという方法で減衰長を求める。

### 5.1 モンテカルロシミュレーション

シミュレーションは geant3 により以下のような条件で行なった。入射角と入射位置 ( $x$  方向) は、実験で用いた上下のトリガーカウンタを通るように選んでいる。 $z$  方向の位置は有効領域全てにランダムに生成させている。ここで壁面での反射はないとしている。また、液体キセノンとクォーツ (屈折率 1.6) は屈折率が近いために反射は考えていない。

表 7: シミュレーションの条件。

入射粒子	$\mu^-$
入射粒子のエネルギー	3 GeV
カットオフエネルギー	10 keV
光子一個の発光に必要なエネルギー	23.7 eV
キセノンの屈折率	1.566
PMT の量子効率	7.9 %

また減衰長については吸収長、散乱長をそれぞれ

吸収長 … 5 cm, 15 cm, 30 cm, 50 cm, 100 cm, 250 cm, 無限大

散乱長 … 5 cm, 15 cm, 30 cm, 50 cm, 100 cm, 200 cm, 無限大

の場合について、それぞれ 6000 イベントずつシミュレーションを行なった。吸収長と散乱長の組合せは全部で 49 通りとなるが、この全てについてシミュレートした。

宇宙線はその飛跡に沿ってキセノン原子を励起または電離させることで、エネルギーを失いながらほぼ直線的にキセノン中を走る (図 43)。エネルギー損失は最小電離粒子について 155MeV 程度になる (図 44)。

以降、前面、後面、右面、左面、上面、下面で得られた光電子数の和をそれぞれ  $\Sigma_f, \Sigma_{bk}, \Sigma_r, \Sigma_l, \Sigma_t, \Sigma_{bt}$  と呼ぶことにする。またすべての PMT で得られた光電子数の和を  $\Sigma_{total}$  とする。

### 5.2 実験データ

#### 5.2.1 イベントの選択

実験で得られたデータのイベント数は TC1, TC2, TC3 それぞれ 4479, 4582, 3945 イベントであった。しかしこのイベントにはプラスチックシンチレータと PMT の間においたライトガイドにおけるチェレンコフ光による発光によるイベントも含まれている。TC1 について上下のトリガーカウンタの出力を散布図にすると図 45 のようになる。明らかに領域は 4 つに分けられる。一つの PMT について出力の大きなものがシンチレータによる発光、小さなものがチェレンコフ光であると考えられる。キセノン中の発光について光量の重心をとることにより再構成した位置 (5.4.2 参照) を図 46 に示す。図 46 から、図 45 の右上の領域のイベントを選択することにより、シンチレータの発

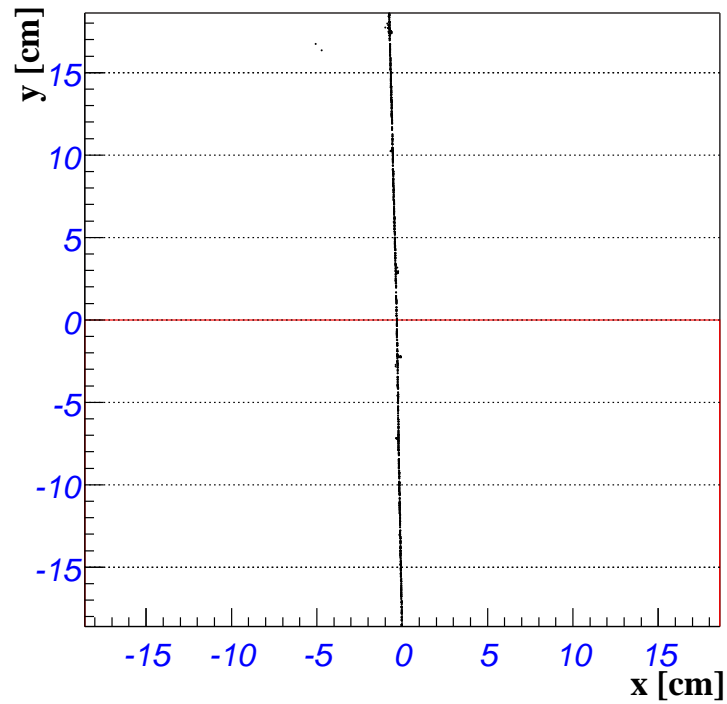


図 43: キセノン中の宇宙線のエネルギー損失。シミュレーションにおいて 10keV 以上のエネルギー損失があった位置をプロットしたものである。

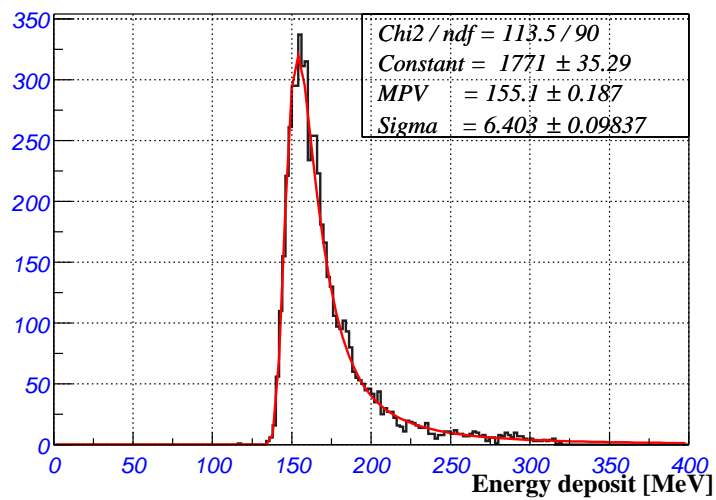


図 44: 宇宙線のキセノン中でのエネルギー損失。最小電離粒子について 155MeV 程度になる。

光によるイベントを選択できていることがわかる。このような選択をすることによりイベント数は TC1, TC2, TC3 でそれぞれ 2522, 2279, 2341 となる。

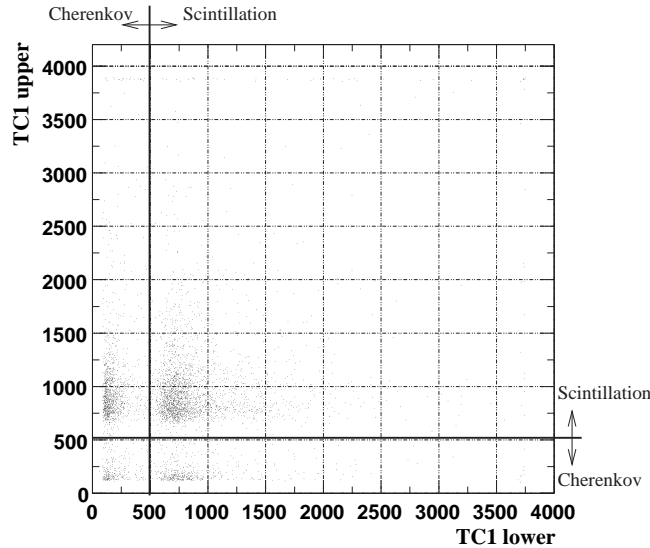


図 45: 上下のトリガーカウンタの出力。値は ADC のチャンネル数である。ここでは TC1 について示す。右上の領域が上下ともにシンチレーションがおこった領域になる。

### 5.2.2 PMT のゲインの見積りについて

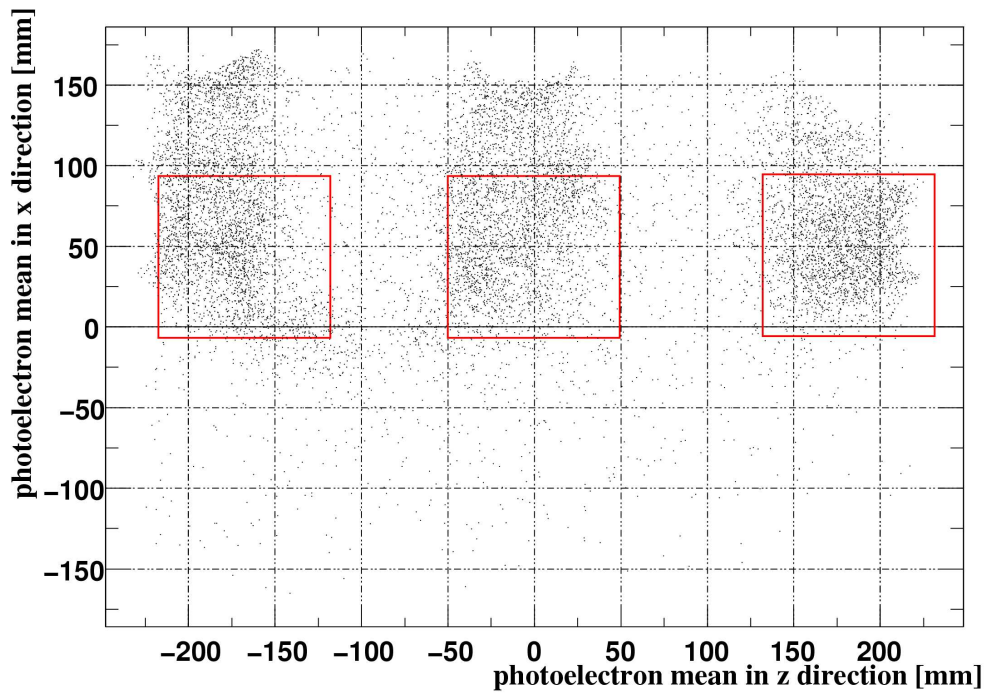
PMT のゲインの見積りは検出器内の LED によって行なう。一定の光量の光を PMT で観測した場合、光源が十分明るければその出力の分布がガウス分布になることを利用する。PMT で得られる光電子数の平均値と標準偏差をそれぞれ  $n, \sigma$ 、PMT のゲインを  $g$ 、PMT の出力の平均値と標準偏差をそれぞれ  $N, \Sigma$  とする。このときガウス分布の性質を利用すると以下のようにゲインを計算することができる。

$$\frac{\Sigma}{N} = \frac{\sigma}{n} = \frac{\sqrt{n}}{n} = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (13)$$

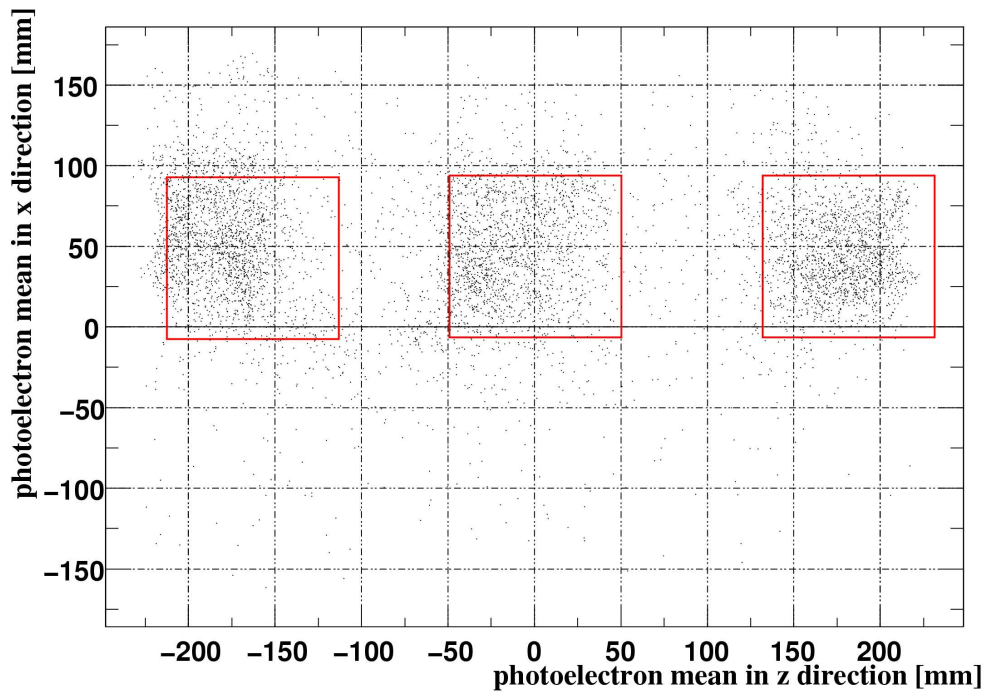
$$g = N/n = \frac{N^3}{\Sigma^2} \quad (14)$$

ラージプロトタイプ検出器の中には 8 個の LED が備え付けられており (図 31) すべての PMT のゲインを調べることができるようになっている。LED は TTL 信号を可変抵抗に通すことにより明るさを調節できるようにしている。ゲインについては LED 8 個それぞれで見積りを行ない、

- ADC mean が 150 ch 以上 3800 ch 以下
- $\chi^2/Ndf$  が 100 以上
- ゲインが  $10^5 \sim 10^8$
- 光電子数が 100 個以上、1000 個未満



(a)



(b)

図 46: 光量重心による位置の再構成。(a) はトリガーカウンタによりトリガーされた全イベントである。これに対し、図 45 の右上の領域を選ぶと (b) のようになる。四角の枠は  $y = 0$  へのプラスチックシンチレータの射影である。



- ゲインの誤差がゲインの 30 %以下

の条件を満足したものについて平均をとった。ゲイン測定は毎日一度行ったが、一回の測定でのゲインの分布を調べると図 47 の様になる。この時ゲインの平均値は  $2.6 \times 10^6$ 、標準偏差は  $2.4 \times 10^6$  であった。

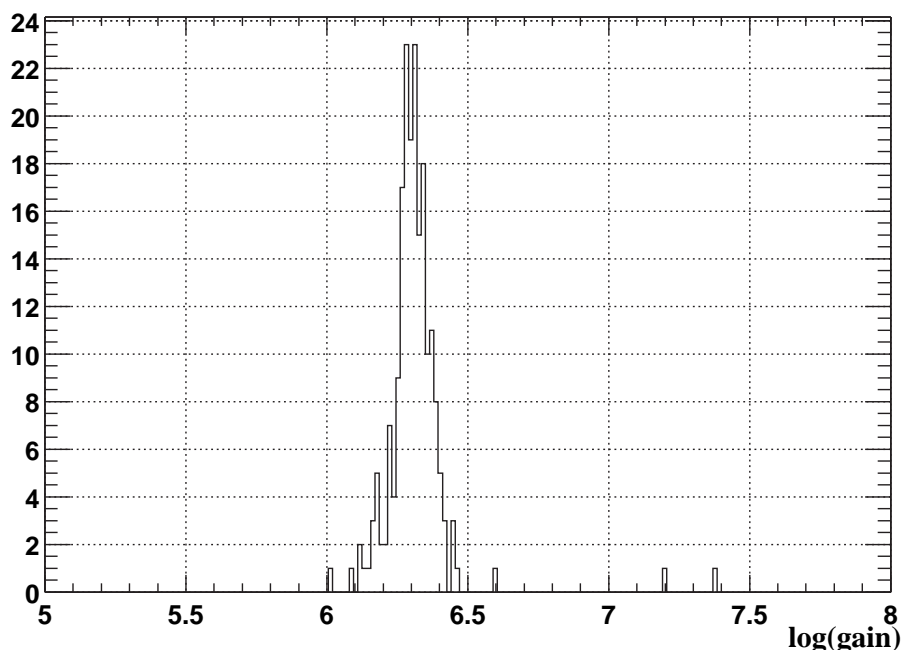


図 47: PMT のゲインの分布。

量子効率については個々の PMT により異なるが、一本ずつの測定はなされていない。そこで、何本かの PMT の出力の和で解析を行なうことにより誤差を小さくする。また解析では必ず何らかの比を使うことにより光量の絶対値によらないようにする。

PMT は 228 本インストールされているがディレイケーブルの破損やケーブルアサインのミス等により解析に使えないものがあり、今回の解析では 194 本の PMT を用いる (図 31)。実験の解析に使用しなかった PMT についてはシミュレーションでの値も 0 にしている。

### 5.3 全光電子数について

5.2.2 のようにして得られたゲインをもとにそれぞれの PMT で得られた光電子数の合計をシミュレーションと比べる。ここでは TC2 によりトリガーされたイベントのみを扱う。TC2 を使うのは有効領域の中心のイベントであるため光量の見え方が宇宙線の入射位置によらずほぼ一様であるためである。表 8 には光電子数のヒストグラムをランダム分布でフィットしたときのピーク値を示す。また、誤差はランダム分布によるフィッティングの誤差である。ここではシミュレーションについては散乱長を 30 cm に固定した。

実験値はシミュレーションに比べて光電子数が少ない。この理由については 6.1 で考察する。

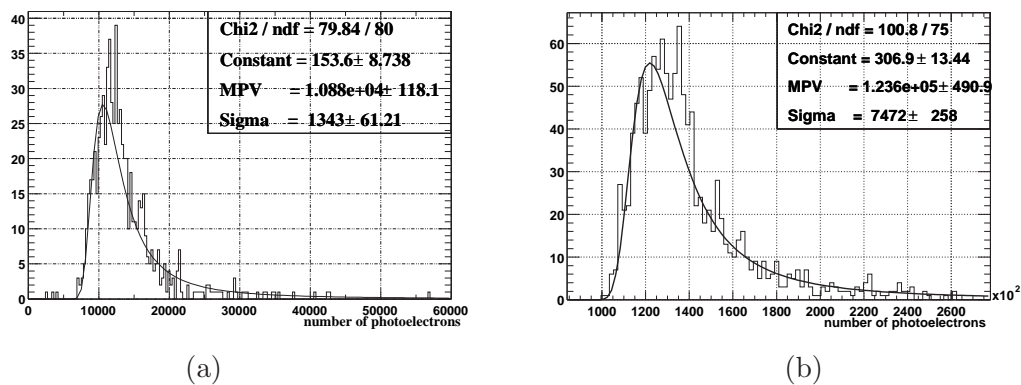


図 48: シミュレーションと実験における光電子数の合計の比較。(a) は実験値、(b) は散乱長を 30 cm、吸収長を 100 cm とした場合のシミュレーションの値である。

表 8: 吸収長による、全光電子数の変化。ここでは散乱長を 30 cm と仮定している。

	$\Sigma_{total}$
実験値	$11220 \pm 132$
シミュレーション (吸収長 5 cm)	$7996 \pm 158$
シミュレーション (吸収長 15 cm)	$38290 \pm 284$
シミュレーション (吸収長 30 cm)	$72282 \pm 379$
シミュレーション (吸収長 50 cm)	$97131 \pm 438$
シミュレーション (吸収長 100 cm)	$123578 \pm 491$
シミュレーション (吸収長 250 cm)	$144290 \pm 537$
シミュレーション (吸収長 $\infty$ )	$161062 \pm 571$

## 5.4 吸収長の見積り

ここで、3つの方法により減衰長を見積る。それぞれの方法で、散乱長と吸収長の組み合わせを求める。実際の散乱長と吸収長の組み合わせは、これら3つの結果が同時に成り立つ領域内に存在することになる。

### 5.4.1 解析1

TC2トリガーによるイベントについて、 $R_1 = (\Sigma_f + \Sigma_{bk}) / \Sigma_{total}$  という量を考える。前面と後面は他の4面よりも発光点からの距離が遠いため、光の減衰が大きいほど  $R_1$  は小さくなる。実験値及びシミュレーションの結果を図49に示す。

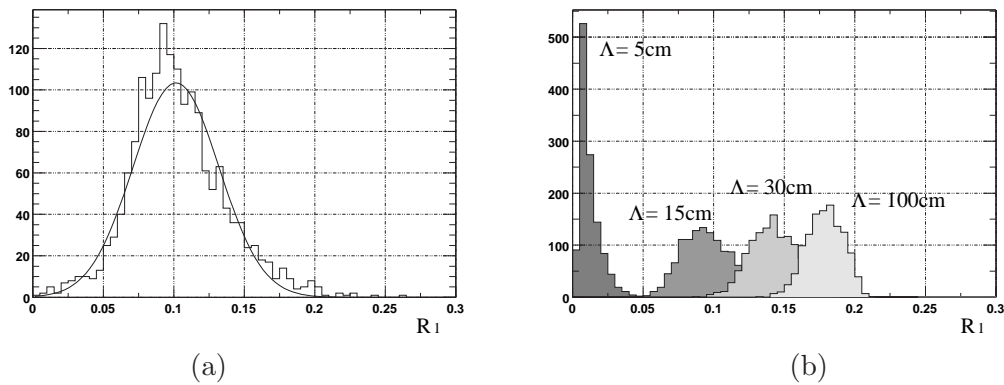


図 49: 前面と後面の光電子数の和が全光電子に占める割合。(a) は実験値、(b) は散乱長 30 cm とした場合のシミュレーションである。実験値はシミュレーションにくらべて分布が広がっている。これは ADC のペDESTAL の揺らぎによるものである。

この分布をガウス分布でフィットすることにより、実験値としては中心値  $R_1 = 10.4 \pm 0.8 \%$  を得る。図50はシミュレーションにおいて散乱長を 30 cm とした場合の  $R_1$  と吸収長の関係をプロットしたものである。曲線はこのプロットを以下の指数関数でフィットしたものである。

$$y = a_0 e^{\frac{a_1}{x-a_2}} + a_3 \quad (15)$$

この関数に実験値の中心値および誤差を代入し  $x$  について解くことにより、実験値からも求められる吸収長とした。この場合吸収長は  $16.7_{-1.5}^{+1.9}$  cm となる。

同様の操作をシミュレーションにおける散乱長の仮定を変えて行い、吸収長を計算すると表9のようになる。

### 5.4.2 解析2

2つ目の解析ではTC1によって得られたイベントについて、 $\Sigma_f / \Sigma_{bk}$  と再構成された発光位置  $\bar{z}$  との関係をしらべる。 $\bar{z}$  は各 PMT の位置を得られた光電子数で重みづけて平均をとったものである。具体的には座標  $(x, y, z)$  にある  $i$  番目の PMT で  $N_i$  個の光電子を得た時、再構成される位置を

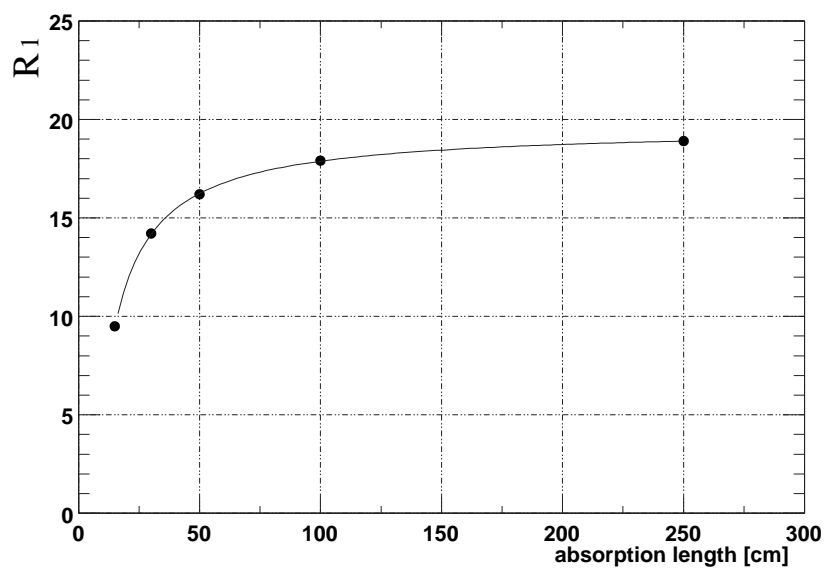


図 50: シミュレーションにおける吸収長と  $R_1$  の関係。ここでは散乱長を 30 cm としている。

表 9: 解析 1 の結果。

散乱長	吸収長
15 cm	$23.1^{+3.4}_{-2.8}$ cm
30 cm	$16.7^{+1.9}_{-1.5}$ cm
50 cm	$14.8^{+1.5}_{-1.2}$ cm
100 cm	$13.8^{+1.1}_{-1.0}$ cm
200 cm	$13.1^{+1.1}_{-1.0}$ cm

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^{228} x_i \cdot N_i \quad (16)$$

$$\bar{z} = \sum_{i=1}^{228} z_i \cdot N_i \quad (17)$$

$$(18)$$

とする。この方法は有効領域の中心付近では正しく位置を再構成するものの、領域のはじでは不正確になる。また原理的に、有効領域のはじの方のイベントは有効領域の中心に引かれる形で再構成される。この効果は吸収長が長いほど顕著になる。そこで今回の解析ではシミュレーションでも実際に粒子が走った位置ではなく、同じ方法で再構成された位置を用いることにする。

図 51 には  $\Sigma_f/\Sigma_{bk}$  と  $\bar{z}$  の関係を示す。シミュレーションとの比較を行なうためにこのプロットを 4 次関数でフィットし、ある  $\bar{z}$  での値を代表値とする。この値を  $R_2$  と呼ぶことにする。発光点が前面に近いほど  $\Sigma_f/\Sigma_{bk}$  は減衰に対して敏感になるので、 $\bar{z}$  はなるべく小さい方が望ましい。しかし、シミュレーションで長い吸収長を仮定した場合再構成される位置は  $z = 0$  に近い方に引かれる形で再構成されてしまうので再構成される位置は前面から遠ざかることになる。。このため可能な限り前面に近い値として  $\bar{z} = -175$  mm の場合を代表とすることにした。実験のデータからは  $R_2 = 48.4 \pm 4.6$  が得られた。

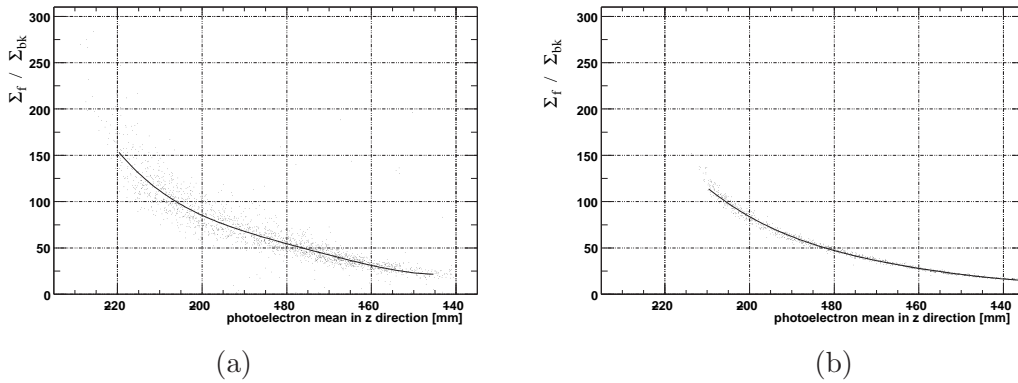


図 51:  $\Sigma_f/\Sigma_{bk}$  と  $\bar{z}$  の関係。(a) が実験値、(b) は散乱長 30 cm、吸収長 100 cm とした場合のシミュレーションのプロットである。この分布を 4 次関数でフィットした後、 $\bar{z} = -175$  の値を代表値として実験値とシミュレーションとを比べる。

解析 1 と同様に、はじめに散乱長を 30 cm に固定し吸収長と  $R_2$  との関係をプロットしたものが図 52 である。これを解析 1 と同様の指数関数型の関数でフィットし実験値を代入すると実験データは吸収長が  $25.2^{+3.0}_{-2.2}$  cm の時にあたるのがわかる。

散乱長の固定値を変えて同様の解析を行なうと表 10 を得る。

なお  $R_2$  として  $\bar{z} = -150$  mm での値を代表値とした場合も同様の解析を行ったが、誤差の範囲内で一致する結果を得た。

### 5.4.3 解析 3

今回の実験においてはトリガーカウンターを  $x$  方向について中心からずらした位置に置いたために  $x$  方向に関しても解析 2 と同じ方法を適用することができる。具体的には  $\Sigma_l/\Sigma_r$  と  $\bar{x}$  の散布

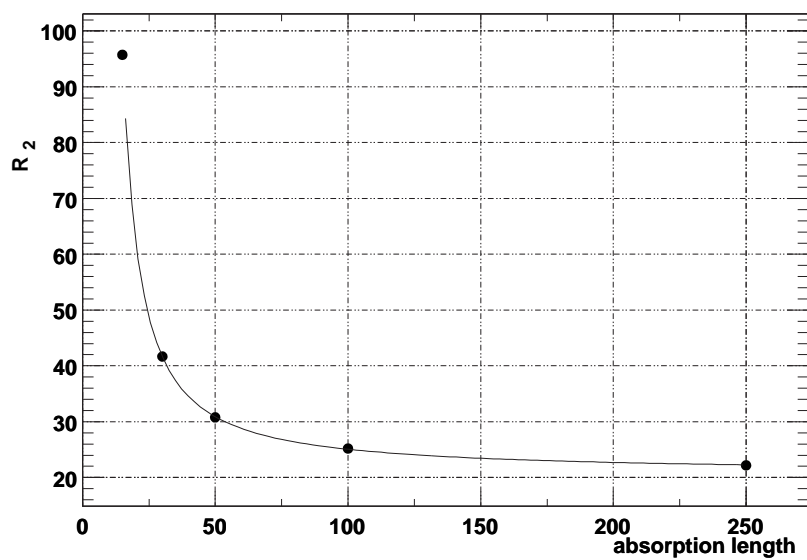


図 52: シミュレーションにおける吸収長と  $R_2$  の関係。ここでは散乱長を 30 cm としている。

表 10: 解析 2 の結果。

散乱長	吸収長
15 cm	$45.6^{+10.2}_{-6.3}$ cm
30 cm	$25.2^{+3.0}_{-2.2}$ cm
50 cm	$21.0^{+5.0}_{-3.0}$ cm
100 cm	$18.0^{+1.5}_{-1.2}$ cm
200 cm	$16.9^{+1.3}_{-1.0}$ cm

図を4次関数でフィットする。解析2と同じ事情によりできる限り左面に近い位置として  $\bar{x} = 50$  mm での値を代表値 ( $R_3$ ) としてシミュレーションと比べた。ここではTC2によってトリガーされたイベントのみを使用する。実験値としては  $R_3 = 2.91 \pm 0.075$  が得られた。

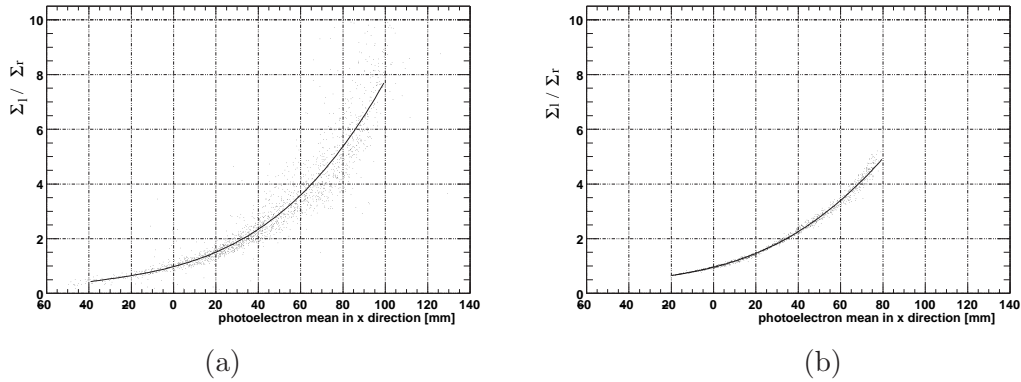


図 53:  $\Sigma_l / \Sigma_r$  と  $\bar{x}$  の関係。(a) は実験値、(b) は散乱長 30 cm、吸収長 100 cm とした場合の散乱長のプロットである。データは TC2 によってトリガーされたイベントのみを使っている。

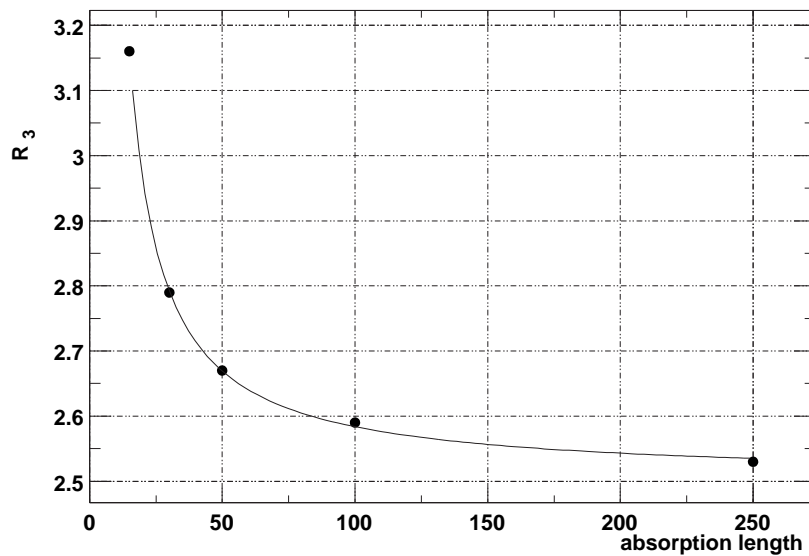


図 54: シミュレーションにおける吸収長と  $R_3$  の関係。ここでは散乱長を 30 cm としている。

解析2と同様に図 54を指数関数でフィットし実験値を代入すると、この時実験値は吸収長  $22.3^{+4.3}_{-3.0}$  に相当することがわかる。

さらに、解析2と同様にシミュレーションにおいて仮定する散乱長を変えて、同様な解析を行うと表 11のようになる。

表 11: 解析 3 の結果。

散乱長	吸収長
15 cm	$37.3^{+13.6}_{-7.4}$ cm
30 cm	$22.3^{+4.3}_{-3.0}$ cm
50 cm	$18.8^{+2.9}_{-2.3}$ cm
100 cm	$16.4^{+2.5}_{-2.1}$ cm
200 cm	$15.0^{+2.4}_{-2.0}$ cm

## 5.5 結果

解析 1 から 3 までの結果をまとめたものが図 55 である。図 55 の曲線は  $l_{att} = \frac{l_{abs} l_{scat}}{l_{abs} + l_{scat}} = 30$  cm となる散乱長と吸収長の組み合わせである。ここに  $l_{att}$ 、 $l_{abs}$ 、 $l_{scat}$  はそれぞれ減衰長、吸収長、散乱長である。この曲線上にのるとき 3.2.3 で示した実験値と一致すると考えられる。

3 種の解析結果は実際の散乱長と吸収長の組み合わせの時では一致するはずであるが、その他の領域では必ずしも一致しない。しかし解析 1 と解析 3 ではすべての領域で誤差の範囲以上の差がある。これは検出器壁面の反射や量子効率等、誤差の計算に含まれないパラメータが原因だと思われる。散乱長を 200 cm 以下と仮定すると吸収長は最短で 13 cm となる。

またキセノンの物性値から計算した散乱長が 40 cm である [23] ことから、これを仮定すると吸収長は 20 cm 程度となる。

いずれにしても 3.2.3 で紹介した実験の値とは一致しない結果が得られた。

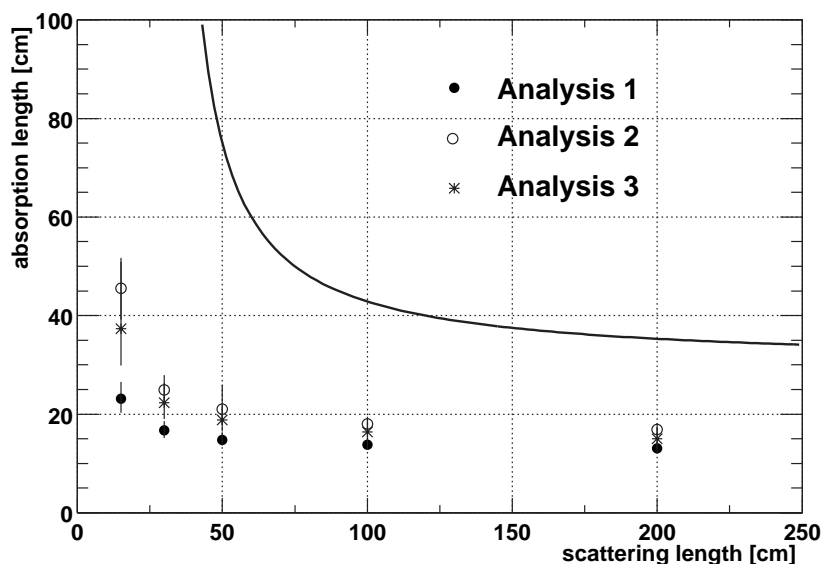


図 55: 解析 1~3 のプロット。曲線は減衰長が 30 cm となる組合せ。今までの実験結果では減衰長は 30 cm 程度とされているが、今回の結果はそれとは矛盾するものとなっている。



## 6 考察と今後の計画

今までに例のない大きさの液体キセノンシンチレーション検出器の製作に成功した。また、約 120 リットルのキセノンの液化、冷凍機による保持に成功し  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  実験に向けその方法が確立された。また、ケーブル、フィードスルー、データ取得回路、データ取得プログラム (MIDAS) も正常に機能した。これらから実機におけるさらなる多チャンネル化に対応する経験を得た。一方、光量と減衰長の低下が確認された。この原因としてはキセノンの純度の低下の可能性が高いが、今後この原因究明と対策には力を入れなければならない。

### 6.1 光電子数の合計について

5.3 で述べたように、実験値とシミュレーションを比べると、実験で得られた光電子数は吸収長を 15 cm と仮定したシミュレーションよりも少ない。この原因としては以下の二つが考えられる。

- 高エネルギーの  $\mu$  に対する  $W_{ph}$ <sup>2</sup> の仮定に誤りがある。
- なんらかの原因により  $W_{ph}$  が大きくなっている。

前者であれば  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  実験に関しては問題にはならないが、後者の場合はこの原因は明らかにしなければならない。原因としては不純物による消光現象の可能性が考えられるが、その場合には不純物の源を特定しなければならない。またゲインの見積りや PMT の量子効率の不定性も光量低下の原因となりうるため光電子数が少なかった原因は今後明らかにしなくてはならない。

### 6.2 吸収長が短い原因について

今回の解析では吸収長が約 20 cm となったが、これは 3.2.3 で紹介した実験結果とは両立しないものである。液体キセノンはシンチレーション光の自己吸収がないということから考えて、原因はキセノンの純度が悪かったためだと思われる。

液体希ガスを使った他の実験では液化後に純度がよくなっていくことが確認されている。これは密度や凝固点の違いにより、キセノンと不純物が分離されていくためと考えられている。

今回の実験値について  $\Sigma_{total}$  の時間変化を見ると、時間とともに増加していることがわかる (図 56)。ここではイベント毎に絶対的な時間を記録していないので、横軸を測定におけるランナンバーとした。1600 から 1900 まではおよそ 270 時間にあたる。

また  $R_1$  についても同様に時間変化を見ると減衰長が時間とともに長くなっているように見える。

### 6.3 短い吸収長によるガンマ線検出器の分解能への影響

ここで、吸収長が 20 cm だった場合に  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  実験にどのような影響があるかを考える。52.8 MeV のガンマ線はほぼ 10 cm 以内で電子陽電子対生成を起こし、全光量の約 30 % は入射位置の周り 16 本の PMT で観測することになる。

ここで散乱長を 30 cm とし、吸収がない場合と吸収長が 20 cm の場合で簡単なシミュレーションを行ない 52.8 MeV のガンマ線における検出器の分解能を概算する。シミュレーションは図 60 のようにラージプロトタイプ検出器の右面に垂直にガンマ線を打ち込むことで行なった。これはラー

<sup>2</sup>光子をひとつ生み出すのに必要なエネルギー

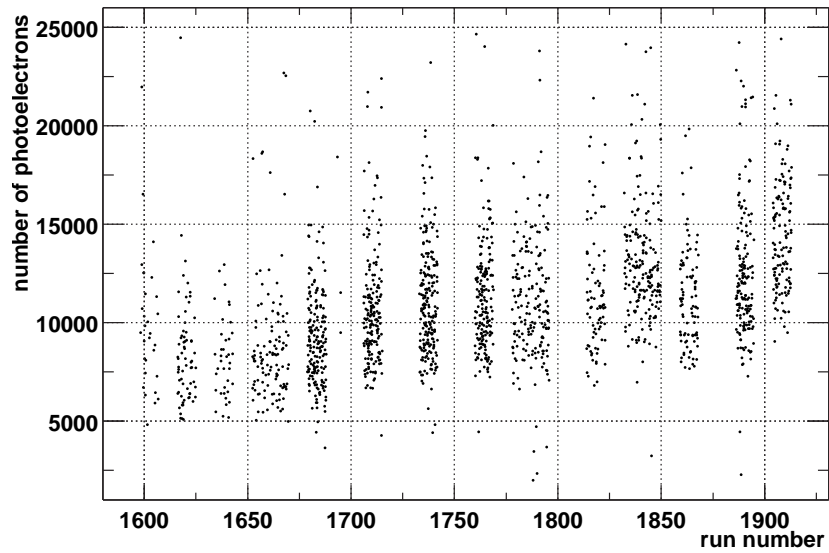
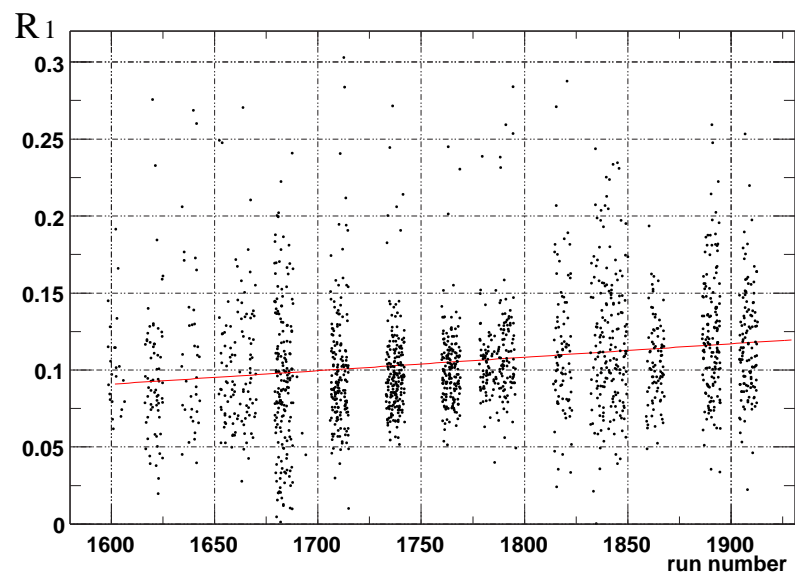


図 56: 光量の時間的变化。

図 57:  $R_1$  の時間的变化。減衰長が時間とともに長くなっているように見える。

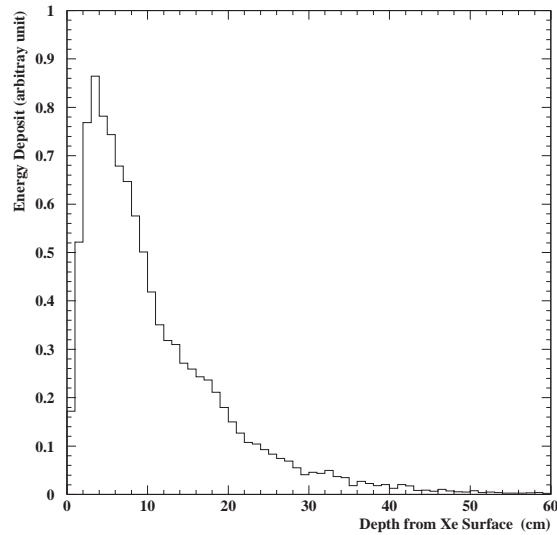


図 58: 52.8 MeV のガンマ線のエネルギー損失。距離は液体キセノンの表面からの距離。ガンマ線はキセノンに入射してから 10 cm 程度で大部分のエネルギーを失う。

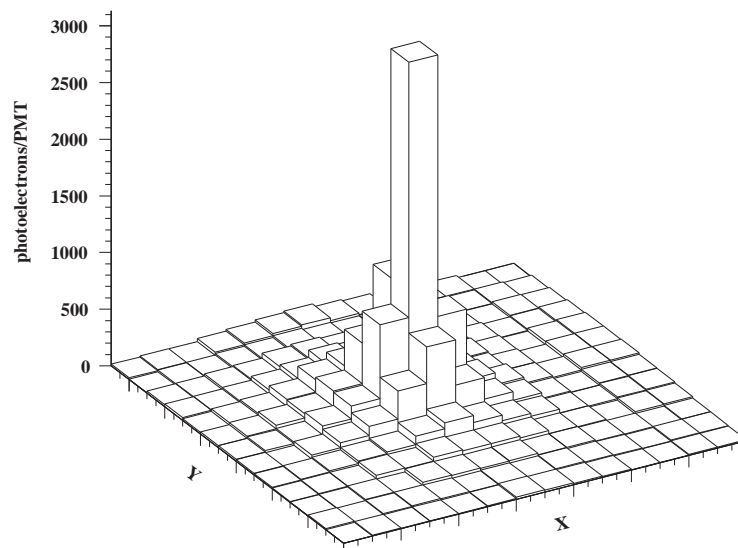


図 59: 52.8 MeV ガンマ線の入射面上の PMT の光量の分布。ガンマ線による発光はほとんどが、近くの PMT で観測される。

ジプロトタイプと実機では  $z$  方向の幅がほぼ同じで、さらにラージプロトタイプの  $x$  方向と実機の  $r$  方向の幅がほぼ同じだからである (図 16 参照)<sup>3</sup>。

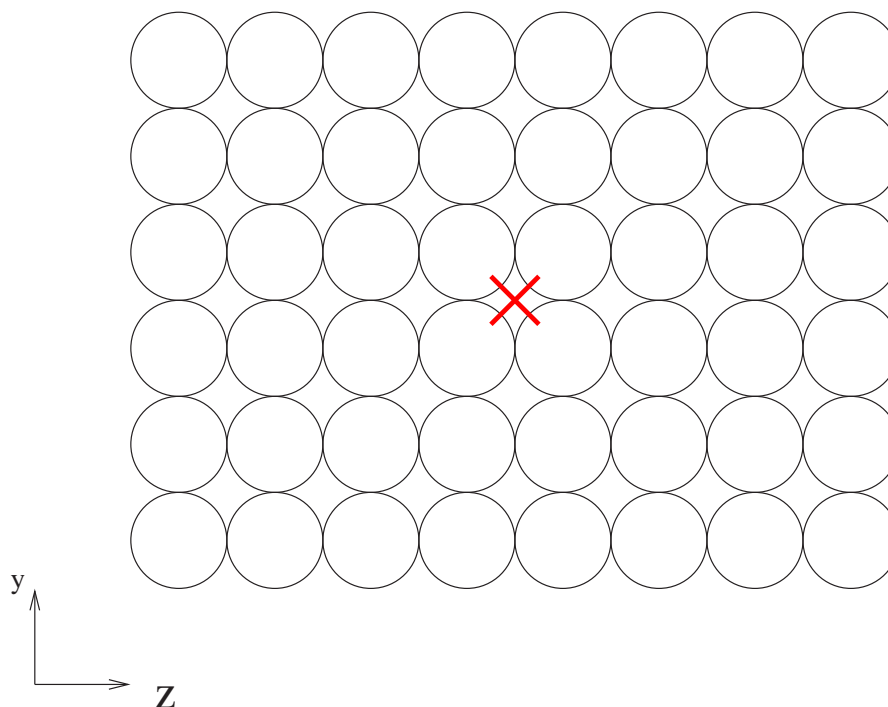


図 60:

吸収長が 20 cm の時は吸収がない時と比べて、入射位置のまわりの 36 本の PMT が検出する光量の和が 51 % となる。また全ての PMT が検出する光量の和は 32 % となる。

ここで、時間、位置、エネルギーの分解能が単純に  $(1/\sqrt{\text{光電子数}})$  に比例すると仮定する。このとき、ガンマ線検出器のエネルギー・時間・位置の分解能を吸収長の関数として  $\delta E(\Lambda), \delta t(\Lambda), \delta p(\Lambda)$  と表すと、

$$\frac{\delta E_{\gamma}(20)}{\delta E_{\gamma}(100)} = \sqrt{1/0.32} = 1.77 \quad (19)$$

$$\frac{\delta t_{\gamma}(20)}{\delta t_{\gamma}(100)} = \sqrt{1/0.51} = 1.40 \quad (20)$$

$$\frac{\delta p_{\gamma}(20)}{\delta p_{\gamma}(100)} = \sqrt{1/0.51} = 1.40 \quad (21)$$

となる<sup>4</sup>。この時  $\delta t_{e\gamma} = 73\text{psec}, \delta\theta_{e\gamma} = 5.5 \text{ mrad}$  となり Accidental Background は  $2.5 \times 10^{-14}$  となるので影響が大きくなってしまう。

<sup>3</sup>実機とシミュレーションでは面が曲面か平面かの違いがあり、さらに上下方向の長さは大きく違う。さらに位置分解能については光量の単純な関数にならない。時間、エネルギーについては位置から再構成する必要があるので、正確に分解能を見積もるには実機のジオメトリーにおけるシミュレーションを行い、実機と同様な解析を行う必要がある。

<sup>4</sup>時間・位置については入射面の PMT だけで決める

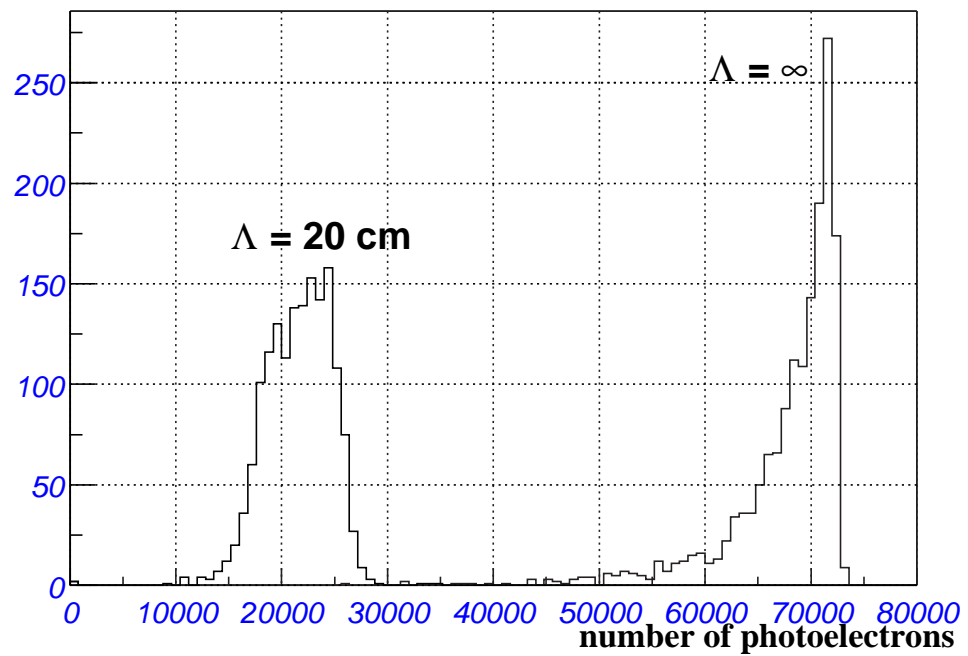


図 61: 52.8MeV ガンマ線で観測される光電子数への吸収長の影響。光電子数はラージプロトタイプの 264 本の PMT で検出されるものの合計である。

## 6.4 キセノンの純度について

ここで、今回使用したキセノンの純度についてまとめる。今回使用したキセノンについて純化装置 (Oxisorb) を通した後のキセノン中の不純物の量は表 12 のようであった。これは純化後のキセノンを一度ボトルに積めて輸送した後に質量分析器で分析した結果である。アルゴンと窒素がかなり混ざっていることが分かる。今後これらにより光量の低下が起こるかどうかは調べる予定である (6.5 参照)。

表 12: 純化後のキセノンに含まれる不純物。Oxisorb では窒素が取り除けないために大量の窒素が混ざっている。

不純物	含有率
酸素	<0.05 ppm
二酸化炭素	<0.06 ppm
窒素	150 ppm
アルゴン	208 ppm
クリプトン	12.0 ppm
エタン	0.06 ppm
メタン	0.08 ppm

また、純化直後のキセノンの純度が十分高い場合でも、検出器内から放出されるガスにより汚されることも考えられる。図 62 はチェンバーのビルドアップテスト<sup>5</sup>の結果である。通常液体キセノンシンチレーション検出器においては圧力上昇の飽和値が 1 Pa 以下となる状態で行われるが、ラージプロトタイプではこの値を大きく上回っている。これは検出器内に多量の放出ガス源があることを示している。ラージプロトタイプではアクリル、シリコンゴム、スタイヤスト等スモールプロトタイプでは使用されていなかった材料が多く使われている。また有効領域以外の空間を埋めるために大量の補間物をいれており、内容物の表面積が非常に大きくなっている。これらが放出ガス源となっている可能性が高い。

## 6.5 対策

今回のような純度の低下は大きな問題となるので、まずこの原因をつきとめなければならない。このために PMT を 1 本使った小さなセットアップでいくつかの実験を行なうことを計画している。ここではスモールプロトタイプで使われ、光量に影響を与えないことが確認されている材料のみを使用する。

1. PMT の正面 3cm の位置に  $^{241}\text{Am}$  を置き、アルファ線によるキセノンのシンチレーション光を観測する。これをシミュレーションと比べることにより PMT の量子効率、ゲインの見積りに問題がないことを確かめる。この時使用するキセノンはラージプロトタイプで使用されたものを使うので、この実験により光量の低下が認められない場合はアルゴンや窒素が  $W_{ph}$  について悪い影響を与えていないことになる。

<sup>5</sup>真空ポンプを止めた後の真空槽内の圧力上昇を見ることで真空槽内への外気のリーク量と放出ガスのスピードを見積もる。

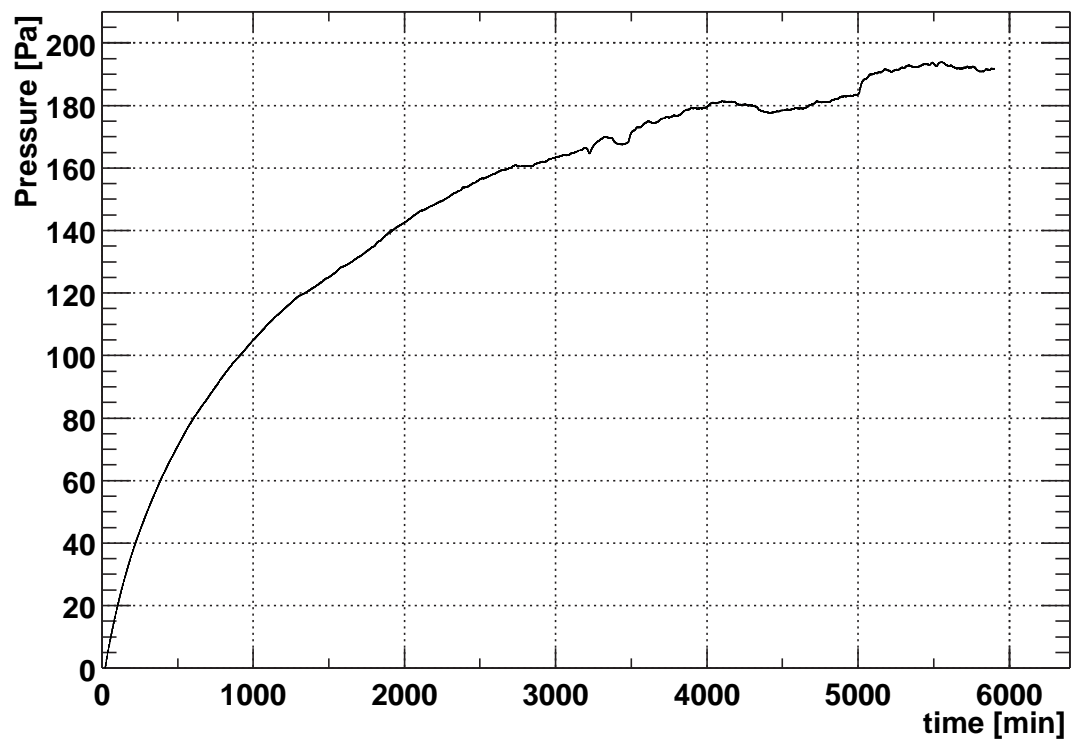


図 62: ラージプロトタイプビルドアップテスト。

2. ラージプロトタイプで使われている材料に問題がないかをひとつずつ調べる。このために1と同様の配置でPMTとともに検体を小型のチェンバーに入れ、 $^{241}\text{Am}$ のアルファ線によるキセノンの発光量を観測する。この時の光量が1の時と比べて少なくなっていないかを調べる。この場合は光源がPMTの近くにあるので吸収の影響が小さく、主に $W_{\text{ph}}$ の変化を見ることができる。
3. 2と同様に検体をPMTとともにチェンバーに入れ、検体が減衰長に与える影響について調べる。直線導入端子によりアルファ線源を移動させた時の光電子数の変化を調べることでシンチレーション光の減衰長を測定することができる。検体を入れることによって、減衰長にどのような変化があるかを調べる。
4. 液体キセノンの宇宙線にたいする $W_{\text{ph}}$ を測定する。これは1のチェンバーの上下にトリガーカウンタを置き、宇宙線による発光を観測することで行なう。

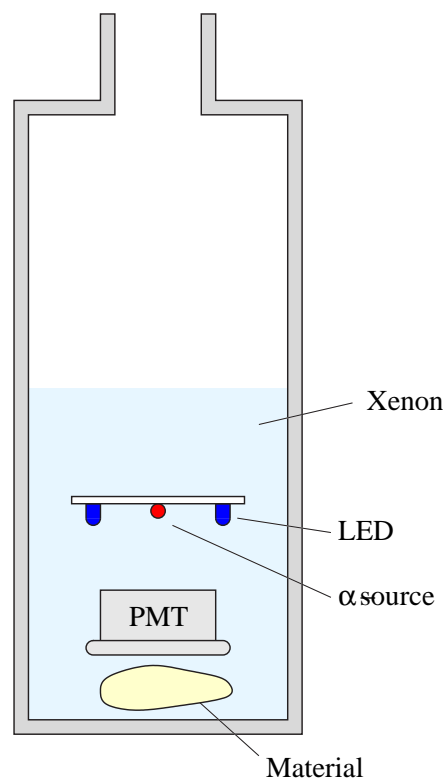


図 63: 小型のチェンバーによる材料試験。アルファ線源をPMTの近くにおいた場合は、減衰の影響が小さいために発光量の評価ができる。またアルファ線源を上下に移動させることにより、材料が減衰長に与える影響についても調べることができる。

またラージプロトタイプにおいてはすでに以下のような対策を講じることにした。

- 真空ポンプまでの真空配管のコンダクタンスを大きくして、十分真空が引けるようにする。
- Oxisorb では除けない不純物を取り除くためにZr-V-Feゲッター式のキセノン精製装置を導入する。この製品は酸素、水、一酸化炭素、二酸化炭素、窒素、水素、メタンを1 ppb以下まで除去できることが保証されている。



- アクリルやシリコンゴム等の放出ガスの多い物質は極力使わないようにし、金属製のものに替える。

### 6.6 今後の計画

我々のグループのロシアのメンバーは図 64にあるようなセットアップで日本のグループとは独立に散乱長と減衰長をそれぞれ調べる予定である。

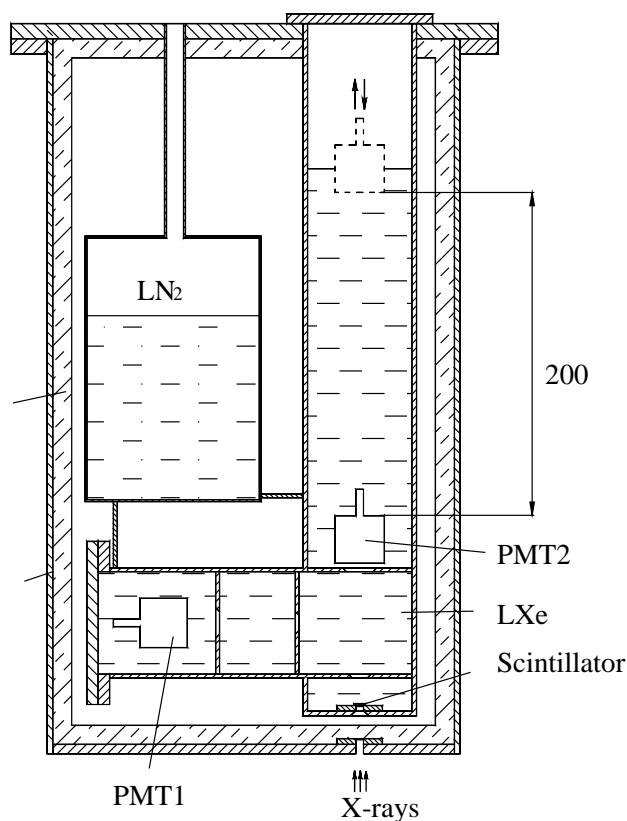


図 64: 小型チェンバーによる減衰長の測定。発光点と PMT2 との距離を変えることにより減衰長を測定する。横においた PMT1 により散乱された光のみを測定する。

2002 年の始めには産総研におけるラージプロトタイプのパームテストが予定されている。このテストにより高エネルギーガンマ線に対する検出器の性能が明らかとなる。

また 2003 年より始まる  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  実験はすぐ目前にせまっております。並行してこの準備も行なう。

## 参考文献

- [1] ルクレティウス, 物の本質について, 岩波文庫.
- [2] Super-Kamiokande Collaboration, Y.Fukuda et al., *Phys. Rev. Lett.* 81 1562-1567 1998.  
Super-Kamiokande Collaboration, Y.Fukuda et al., *Phys. Rev. Lett.* 85 3999-4003 2000.
- [3] Super-Kamiokande Collaboration, Y.Fukuda et al., *Phys. Rev. Lett.* B342 440 1995.
- [4] T.Yanagida, in Proceedings of Workshop on Unified Theory and Baryon Number of Universe., eds. O. Sawada and A. Sugamoto (KEK, 1979) 95;  
M. Gell-Mann, P. Ramond and R. Slansky, in Supergravity, eds. P. van Nieuwenhuizen and D. Freedman (North Holland, Amsterdam, 1979).
- [5] H.N.Brown et al., Muon (g-2) Coll., *Phys. Rev. Lett.* 86 2227 2001.
- [6] J.Bijnens, E.Pallante, J.Parades, [hep-ph/0112255](#) 2001.
- [7] J.Hiasano, K.Tobe, *Phys. Lett.* B510 197-204 2001.
- [8] R.Barbieri, L.J.Hall, A. Stumia, *Nucl. Phys.* B445 219 1995.
- [9] J.Hisano et al., *Phys. Lett.* B391 1997.
- [10] J.Äystö et al., [cern-th/2001-231](#).;  
R.Barbieri, L.J.Hall, A Strumia, *Nucl. Phys.* B445 219 1995.;;  
J.Hisano et al., *Phys. Lett.* B391 341, erratum B397 357 1997.
- [11] R.D.Bolton et al., *Phys. Rev. D* 38-7 2077-2101 1988.
- [12] M.L. Brooks et al., *Phys. Rev. Lett.* 83 1521-1524 1999.
- [13] T.Mori et al., [Proposal to PSI\(R-99-05\)](#) 1999.
- [14] R.Tribble, Transparency for the talk at Tokyo University, 1999.
- [15] 宮沢俊之, [修士学位論文](#), 東京大学, 1999.;;  
小曾根健嗣, [修士学位論文](#), 東京大学, 2000.
- [16] 矢萩幸一, [修士学位論文](#), 東京大学, 2000.
- [17] 西口創, [修士学位論文](#), 東京大学, 2001.
- [18] H.Nishiguchi et al., MEG collaboration technical note [TN013](#) 2000.
- [19] G.Feldman, R.Cousins, *Phys. Rev. D* 57 3873-3889 1998.
- [20] 鈴木聡, 日本物理学会誌 53, 181 1998.
- [21] N.Ishida, et al., *Nucl. Inst. and Meth.* A834 380-386 1997.
- [22] J.Seguilot, J.Tischhauser, T.Ypsilantis, Measurement of Light Transmission in Liquid Xenon and Krypton versus Photon Energy and its Stability for High Resolution Electromagnetic Calorimetry., 1995 (未投稿).
- [23] G.M.Seidel, R.E.Lanou, W.Yao, [hep-ex/0111054](#) 2001.

## 図目次

1	ニュートリノ振動を仮定したときの $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ のダイアグラム	1
2	超対称性を仮定した時に異常磁気能率を説明するダイアグラム	2
3	超対称性を仮定した時の $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ のダイアグラム	2
4	SU(5) SUSY モデルにおける $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ の分岐比	3
5	CrystalBox 実験の検出器	4
6	MEGA 実験の検出器	5
7	$\mu$ 崩壊における陽電子、ガンマ線のふるまい	7
8	バックグラウンドと $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊との識別	8
9	$\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊探索実験用検出器。	8
10	ポジトロンスペクトロメータの概観	10
11	ドリフトチェンバーの断面図	10
12	バーニアパッドの概念図	11
13	ポジトロン・タイミングカウンター	11
14	液体キセノンガンマ線検出器の概略図	12
15	$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 探索実験の検出器	14
16	ガンマ線検出器の有効領域断面の形状	14
17	液体キセノンのシンチレーション波長とクォーツに対する透過率	15
18	PMT の長時間安定性	15
19	NaI と液体キセノンのシンチレーション光波形の比較	17
20	キセノンの相図	18
21	シンチレーション光の減衰長測定実験	19
22	単色光源による減衰長の測定	20
23	波長と減衰長の関係	20
24	スモールプロトタイプのパMT 配置	21
25	スモールプロトタイプで得られたエネルギー分解能	22
26	スモールプロトタイプで得られた位置分解能	23
27	スモールプロトタイプで得られた時間分解能	24
28	電子蓄積リング (TERAS)	25
29	宇宙線実験のセットアップ	26
30	キセノン中の PMT の配置	27
31	キセノン中の PMT の配置 (展開図)	28
32	PMT と PMT ホルダーの写真	29
33	前方からのラージプロトタイプ内の写真	30
34	フィードスルーの写真	30
35	静電容量式液面計	32
36	静電容量式液面計の線形性	33
37	静電容量計の回路図	33
38	宇宙線実験液化時のキセノン液面の様子	34
39	キセノンの輸送ライン	34
40	ラージプロトタイプにおけるキセノンの冷却法	36
41	ラージプロトタイプ宇宙線実験における PMT ホルダーの温度変化	37
42	データ取得回路	38

43	キセノン中の宇宙線のエネルギー損失	41
44	宇宙線のキセノン中でのエネルギー損失	41
45	上下のトリガーカウンタの出力	42
46	光量重心による位置の再構成	43
47	PMT のゲインの分布	44
48	シミュレーションと実験における光電子数の合計の比較	45
49	前面と後面の光電子数の和が全光電子に占める割合	46
50	シミュレーションにおける吸収長と $R_1$ の関係	47
51	$\Sigma_f/\Sigma_{bk}$ と $\bar{z}$ の関係	48
52	シミュレーションにおける吸収長と $R_2$ の関係	49
53	$\Sigma_l/\Sigma_r$ と $\bar{x}$ の関係	50
54	シミュレーションにおける吸収長と $R_3$ の関係	50
55	解析 1~3 のプロット	51
56	光量の時間的变化	53
57	$R_1$ の時間的变化	53
58	52.8 MeV のガンマ線のエネルギー損失	54
59	52.8 MeV ガンマ線の入射面上の PMT の光量の分布	54
60	52.8MeV ガンマ線の入射位置	55
61	52.8MeV ガンマ線で観測される光電子数への吸収長の影響	56
62	ラージプロトタイプビルドアップテスト	58
63	小型のチェンバーによる材料試験	59
64	小型チェンバーによる減衰長の測定	60

表目次

1	我々の実験と MEGA 実験の検出器の分解能の比較	5
2	検出器の感度に関するパラメータ	6
3	$\pi E5$ ビームチャンネルの主な仕様	9
4	液体キセノンの緒特性	17
5	スモールプロトタイプ実験で使用した線源	24
6	トリガーカウンタの配置	36
7	シミュレーションの条件	40
8	吸収長による、全光電子数の変化	45
9	解析 1 の結果	47
10	解析 2 の結果	49
11	解析 3 の結果	51
12	純化後のキセノンに含まれる不純物	57

## 謝辞

ラージプロトタイプ実験は多くの人達の協力のもとに行なわれました。また本稿で扱った宇宙線実験にも多くの方が携わっています。ここで、ラージプロトタイプ実験に参加している全ての方に感謝致します。

私の指導教官である早稲田大学理工総合研究センターの菊池順教授は、このような実験に参加する機会を与えて下さり、さら学部学生の頃より粒子計測の基礎を御指導頂きました。感謝致します。また同センター菊池研究室の道家名誉教授、鈴木先生、寺沢先生、滝沢先生には適切な助言を頂きました。埼玉衛生短期大学の柴村博士には液面計開発の際に指導して頂きました。

$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  実験は東京大学理学部の故折戸教授、同大学素粒子物理国際研究センターの森助教授の提案により始められました。森助教授は他研究機関の私に対しても学会発表時等に指導して頂きました。両先生に感謝致します。

素粒子国際研究センター三原氏、大谷氏、高エネルギー加速器研究機構研究員春山氏、八島氏には実験の現場において、実験の遂行において必要なことを指導して頂きました。

早稲田大学の山下氏、吉村氏、東京大学の小曾根氏、西口氏、三橋氏とは研究生活をともにし、実験と解析の技術や勉強のしかたを学びました。

スイス PSI 研究所の Ritt 氏、イタリア INPN-Pisa の Nicolo' 氏、Signorelli 氏、ロシア BINP 研究所 Grebenuk 氏、Grigoriev 氏、Ioudine 氏はラージプロトタイプ実験の中で貴重な意見を頂きました。

最後に私を育て、大学院で勉強する機会を与えた下さった両親に感謝致します。