

つくば-神岡間長基線ニュートリノ振動実験に使用する  
シンチレーティングファイバーの経年変化の測定と  
ファイバー検出器の性能評価

神戸大学 自然科学研究科 博士前期課程 物理学専攻  
越後 慎也

平成 12 年 3 月 1 日

## 論文要旨

「つくば-神岡間長基線ニュートリノ振動実験 (KEK-PS E362, 通称 K2K, 以下本実験)」では, 前置検出器の一つに水標的とシート状にしたシンチレーティングファイバー (Scintillating Fiber, 以下 SCIFI) の多層サンドイッチ構造の飛跡検出器を使用する. 本実験に使用する SCIFI として, 前に行われた光量測定において, 粒子検出効率が 99% 以上であることから Kuraray 社の「SCSF-78M」(直径  $700 \mu\text{m}$ ) を選択した. 一般に SCIFI は時間が経つにつれ劣化すると知られているが, その要因ははっきりとわかっていない. そこで様々な環境が SCIFI の経年変化に与える影響を系統的に調べた. その結果, 特に酸素の存在が経年変化を促進するとわかり, それを踏まえて, Kuraray 社は SCSF-78M に酸素対策を施した「SCSF-78M 改良 11」を開発した. この SCIFI について高温中での経年変化測定を行い, その結果を外挿することで  $15^\circ\text{C}$  空気中では測定される光量が 10% 減少するのに  $3915 \pm 1924$  日かかることがわかった. この日数は準備期間を含めると 5 年に及ぶ本実験期間と比較して長いため, SCSF-78M 改良 11 は光量だけでなく, 寿命の面からも本実験に適した性能を持つことがわかった.

次に, 実機と同じ SCIFI を使用して製作されたファイバー検出器を用いて, 宇宙線により検出器の検出効率と位置分解能の測定を行った. これより検出効率は  $99.3 \pm 0.4 \%$ , 位置分解能は  $289 \pm 12 \mu\text{m}$  という結果を得た. さらに高エネルギー加速器研究機構田無分室にある電子シンクロトロン電子ビームを使い, 電子識別能力と電子に対するエネルギー分解能の測定を行った. その結果, 電子シャワーの発達を見ることができ, 電子の識別が可能であるとわかった. またエネルギー分解能は  $15.0\%/\sqrt{E [\text{GeV}]}$  であった.

# 目次

<b>第1章 序章</b>	<b>6</b>
1.1 ニュートリノ	6
1.2 大気ニュートリノ異常	6
1.3 ニュートリノ振動	7
1.4 ニュートリノ振動実験	8
<b>第2章 つくば-神岡間長基線ニュートリノ振動実験</b>	<b>10</b>
2.1 概要	10
2.2 ビームライン	10
2.3 前置検出器	10
2.3.1 水チェレンコフ検出器	11
2.3.2 Fine-Grained Detector	11
2.4 スーパーカミオカンデ検出器	12
<b>第3章 シンチレーティングファイバーの経年変化測定</b>	<b>16</b>
3.1 シンチレーティングファイバー	16
3.2 経年変化測定の目的	17
3.3 光量測定	17
3.3.1 光量測定の装置	17
3.3.2 解析方法	18
3.3.3 結果	19
3.4 経年変化の測定	20
3.4.1 保存環境	20
3.4.2 解析方法	21
3.4.3 結果	21
3.5 経年変化の温度依存性	23
<b>第4章 ファイバー検出器の性能評価</b>	<b>36</b>
4.1 宇宙線テスト	36
4.1.1 プロトタイプ-I	36
4.1.2 セットアップ	36
4.1.3 データ解析法	36
4.2 電子ビームテスト	37
4.2.1 プロトタイプ-II	37
4.2.2 セットアップ	38
4.2.3 解析方法	38
4.2.4 測定結果	39
4.3 宇宙線テストと電子ビームテストのまとめ	40
4.4 今後の予定	40

第 5 章 結論	54
Appendix A 自動酸化反応	55
Appendix B イメージインテンシファイアータブ	56
B.1 第 1 世代イメージインテンシファイアー：静電型	56
B.2 第 2 世代イメージインテンシファイアー：MCP 型	56
B.3 第 3 世代イメージインテンシファイアー：ガリウム砒素光電面型	56
謝辞	58
参考文献	59



# 目次

1.1	大気ニュートリノ実験が示唆するニュートリノ振動のパラメータ領域	9
2.1	つくば-神岡間長基線ニュートリノ振動実験	13
2.2	ニュートリノビームライン	13
2.3	スーパーカミオカンデ検出器で観測される $\mu$ エネルギー分布の変化	14
2.4	前置検出器	14
2.5	水標的/シンチレーティングファイバートラッカー	15
2.6	スーパーカミオカンデ検出器	15
3.1	シンチレーティングファイバー	25
3.2	シンチレーティングファイバーの光量測定装置	25
3.3	光量測定に用いるトリガシステムの拡大図	26
3.4	光量測定で得られる典型的な ADC 分布	26
3.5	光電子増倍管の較正用の ADC 分布	27
3.6	SCIFI 内での $\beta$ 粒子の電離損失分布	27
3.7	フィットの結果から予想される ADC 分布	28
3.8	SCIFI 内での光の伝播の様子	28
3.9	測定される光量の距離依存性 (1)	29
3.10	測定される光量の距離依存性 (2)	29
3.11	SCIFI を 70 °C で直線状に保存するためのシステム	30
3.12	光量の時間変化 (1)	30
3.13	光量の時間変化に与えるメカニカルストレスの影響	31
3.14	光量の時間変化に与える酸素の影響	31
3.15	光量の時間変化に与える湿度の影響	32
3.16	光量の時間変化に与えるアルミコーティングの影響	32
3.17	光量の時間変化に与えるシリコンペイントの影響	33
3.18	光量の時間変化 (2)	33
3.19	光量の時間変化に与える温度の影響	34
3.20	反応と活性化エネルギー	34
3.21	経年変化の温度依存性	35
4.1	シンチレーティングファイバーシート	41
4.2	プロトタイプ-I の読み出し部分の製作	42
4.3	宇宙線測定のセットアップ図	42
4.4	IIT-CCD チェーン	43
4.5	クラスタとヒット同定法	43
4.6	プロトタイプ-I の位置較正データ	44
4.7	ファイバーの位置の計算	44
4.8	典型的な宇宙線事象	45
4.9	マルチクラッドシートの位置分解能	46

4.10	プロトタイプ-II の読み出し部分の製作 . . . . .	47
4.11	プロトタイプ-II の読み出し部分 . . . . .	48
4.12	電子ビームテストのセットアップ図 . . . . .	49
4.13	典型的な電子 (1 GeV) シャワーイベント . . . . .	50
4.14	プロトタイプ-II の位置較正用のデータ . . . . .	50
4.15	電子事象による各層のヒット位置分布 . . . . .	51
4.16	各層当りのヒット数分布 . . . . .	52
4.17	6～8 層のヒット数分布と電子収集率とミューオン混入率 . . . . .	52
4.18	電子事象のヒット数とエネルギー損失の相関 . . . . .	53
4.19	電子事象によるエネルギー当りのヒット数分布 . . . . .	53
B.1	近接焦点型 IIT と倒立型 IIT . . . . .	57
B.2	マイクロチャンネルプレート . . . . .	57

# 表 目 次

1.1	ニュートリノとその質量 . . . . .	6
1.2	大気ニュートリノフラックスの測定結果 . . . . .	7
3.1	SCIFI の材質 . . . . .	17
3.2	SCIFI の光量測定の結果 (製品別) . . . . .	20
3.3	SCIFI の光量測定の結果 . . . . .	20
3.4	SCIFI の保存環境 . . . . .	21
3.5	SCIFI の経年変化測定の結果 . . . . .	22
4.1	電子シンクロトロンの基本性能 . . . . .	38
4.2	実機とプロトタイプ検出器の比較 . . . . .	38

# 第1章 序章

## 1.1 ニュートリノ

物質を構成する最も基本的な粒子を素粒子と呼ぶ。測定技術の向上にともなって時代とともにより微細な素粒子が発見された。現在の素粒子の標準理論は、6種類のクォークと6種類のレプトンと4種類の力を媒介するゲージボゾンからなっている [1]。そのレプトンの中のニュートリノは電荷を持たない、質量がゼロと仮定された素粒子である。

電荷を持つレプトンには電子 ( $e$ )、ミューオン ( $\mu$ )、タウ ( $\tau$ ) の3世代あるが、ニュートリノはこれに対応する電子ニュートリノ ( $\nu_e$ )、ミューニュートリノ ( $\nu_\mu$ )、タウニュートリノ ( $\nu_\tau$ ) が存在する。ニュートリノの質量は、表 1.1 にあげるように実験的には質量の上限値しか求まっておらず、理論からもその質量がゼロであるという制限もない。よってニュートリノに有限な質量が観測されたならば、それは標準理論を越えた新しい物理を示唆することになる。実際に、以下にあげる「大気ニュートリノ異常」といった質量の存在を示唆する現象が観測されている。

また、宇宙の質量の90%以上を占めると考えられている暗黒物質 (ダークマター) にはいくつかの候補があるが、もしニュートリノが質量を持つならば、特にホットダークマターの有力な候補になりえる。このようにニュートリノが質量を持つか否かは、素粒子物理学のみならず宇宙物理学に重大な影響を及ぼす。

表 1.1: ニュートリノとその質量

質量				
$\nu_e$	<	23	eV	[2]
$\nu_\mu$	<	170	keV	[3]
$\nu_\tau$	<	24	MeV	[4]

## 1.2 大気ニュートリノ異常

一次宇宙線の主成分の陽子が大気中の原子核と反応して、

$$p + N \rightarrow \pi, K, \dots + N' \quad (1.1)$$

のように、 $\pi$  中間子や  $K$  中間子を生成する。 $\pi$  や  $K$  は以下に示すような弱い相互作用で崩壊し、主に  $\mu^+$  と  $\nu_\mu$ 、またはそれらの反粒子になる。

$$\left. \begin{array}{l} \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \\ K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{分岐比 } 99.99\% \\ \text{分岐比 } 63.51\% \end{array} \quad (1.2)$$

さらに崩壊の結果生成される  $\mu$  も弱い相互作用により  $e$ ,  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  に崩壊する。

$$\begin{aligned}\mu^+ &\rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \\ \mu^- &\rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu\end{aligned}\tag{1.3}$$

ニュートリノは電荷を持たず、弱い相互作用でのみ反応を起こすので、そのほとんどがそのまま地表に降り注ぐ。これらを大気ニュートリノと呼ぶ。式 (1.2), (1.3) から大気ニュートリノ  $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$  と  $\nu_e + \bar{\nu}_e$  のフラックスの比は約 2 となる。

表 1.2 に様々な大気ニュートリノフラックスの測定結果をあげる。ここで  $R$  は電子ニュートリノとミューニュートリノのフラックスの比を観測値と標準理論に基づいたモンテカルロシミュレーションによる期待値について比をとったもの、

$$R = \frac{\{N(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)/N(\nu_e + \bar{\nu}_e)\}_{data}}{\{N(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)/N(\nu_e + \bar{\nu}_e)\}_{MC}}\tag{1.4}$$

である。ここで  $R$  を使うのは、モンテカルロシミュレーションを使って計算された大気ニュートリノのフラックスの絶対値には約 20% の不定性があるが、比をとることで不定性を 5% 程度に軽減できるからである [5]。Fréjus, NUSEX は観測値と期待値がほぼ同じという結果を得たが、他の実験では観測値が標準理論の期待値の約 60% しかない。これを大気ニュートリノ異常という。

表 1.2: 大気ニュートリノフラックスの測定結果.  $p_l$  は測定したレプトン (電子及びミューオン) の運動量を示す。

	$p_l$ [MeV/c]	観測時間 [kt · year]	$R$	
Kamiokande	$\left(\begin{array}{l} e: 100 \sim 1330 \\ \mu: 200 \sim 1400 \end{array}\right)$	7.7	$0.60^{+0.06}_{-0.05} \pm 0.05$	[6]
	$\left(\begin{array}{l} e: 1330 \sim \\ \mu: 1400 \sim \end{array}\right)$	6.0 ~ 8.2	$0.57^{+0.08}_{-0.07} \pm 0.07$	[6]
IMB	$\left(\begin{array}{l} e: 100 \sim 1500 \\ \mu: 300 \sim 1500 \end{array}\right)$	7.7	$0.54 \pm 0.05 \pm 0.12$	[7]
Fréjus	$\left(\begin{array}{l} e: 200 \sim \\ \mu: 200 \sim \end{array}\right)$	2.0	$1.00 \pm 0.15 \pm 0.08$	[8]
NUSEX	$\left(\begin{array}{l} e: 200 \sim \\ \mu: 200 \sim \end{array}\right)$	0.74	$0.99^{+0.35}_{-0.25}$	[9]
Soudan 2	$\left(\begin{array}{l} e: 150 \sim \\ \mu: 100 \sim \end{array}\right)$	2.83	$0.61 \pm 0.14^{+0.05}_{-0.07}$	[5]
Super-Kamiokande	$\left(\begin{array}{l} e: 100 \sim 1330 \\ \mu: 200 \sim 1400 \end{array}\right)$	20	$0.635 \pm 0.033 \pm 0.053$	[5]
	$\left(\begin{array}{l} e: 1330 \sim \\ \mu: 1400 \sim \end{array}\right)$	18 ~ 20	$0.604^{+0.065}_{-0.058} \pm 0.067$	[5]

### 1.3 ニュートリノ振動

上記の大気ニュートリノ異常を説明する理論として「ニュートリノ振動」がある。

ニュートリノは弱い相互作用を通してフレーバーの固有状態として観測される一方、ニュートリノがそれぞれ異なる質量を持てば質量の固有状態も存在する。一般にフレーバーの固有状態は質量の固有状態の重ね合わせで書くことができる。ここでは簡単のため 2 世代のみ考える。

$$\begin{pmatrix} \nu_{f_1} \\ \nu_{f_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_{m_1} \\ \nu_{m_2} \end{pmatrix}\tag{1.5}$$

ここで  $\nu_{f_i}$  ( $i = 1, 2$ ) はフレーバーの固有状態 ( $\nu_{f_1} = \nu_e$ ,  $\nu_{f_2} = \nu_\mu$ ),  $\nu_{m_i}$  は質量の固有状態を表す。また  $\theta$  は混合角である。

真空中をニュートリノが伝播する時、質量の固有状態の時間発展は Schrödinger 方程式を使って表すことができる。各ニュートリノのエネルギーを  $E_i$  とおくと、時刻  $t$  における質量の固有状態  $\nu_{m_i}(t)$  は、

$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \nu_{m_1}(t) \\ \nu_{m_2}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 & 0 \\ 0 & E_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_{m_1}(t) \\ \nu_{m_2}(t) \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

と書くことができる。この解は,

$$\begin{pmatrix} \nu_{m_1}(t) \\ \nu_{m_2}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{-iE_1 t} & 0 \\ 0 & e^{-iE_2 t} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_{m_1}(0) \\ \nu_{m_2}(0) \end{pmatrix} \quad (1.7)$$

となる。これをフレーバーの固有状態で書き直すと,

$$\begin{pmatrix} \nu_{f_1}(t) \\ \nu_{f_2}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-iE_1 t} & 0 \\ 0 & e^{-iE_2 t} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_{f_1}(0) \\ \nu_{f_2}(0) \end{pmatrix} \quad (1.8)$$

となる。式 (1.8) から、時刻  $t = 0$  の時に  $\nu_{f_1}$  であったニュートリノが時刻  $t$  の時に  $\nu_{f_2}$  として観測される確率  $P(\nu_{f_1} \rightarrow \nu_{f_2})$  が計算できる。

$$\begin{aligned} P(\nu_{f_1} \rightarrow \nu_{f_2}) &= |\langle \nu_{f_2}(t) | \nu_{f_1}(0) \rangle|^2 \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{E_2 - E_1}{2} t \end{aligned} \quad (1.9)$$

ここでニュートリノの質量  $m_i$  が運動量  $p$  に比べて非常に小さいならば、エネルギー  $E_i$  は,

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \sim p + \frac{m_i^2}{2p} \quad (1.10)$$

と近似できる。これを式 (1.9) に代入すると,

$$P(\nu_{f_1} \rightarrow \nu_{f_2}) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left( \frac{1}{4} \frac{m_2^2 - m_1^2}{pc} ct \right) \quad (1.11)$$

$$= \sin^2 2\theta \sin^2 \left( 1.27 \Delta m^2 [\text{eV}^2] \cdot \frac{L [\text{km}]}{E [\text{GeV}]} \right) \quad (1.12)$$

となる。したがって、もし 2 種類のニュートリノの質量が異なり、有限な混合角をもつならば、ニュートリノは飛行中に交互に異なるフレーバーに変化する。これをニュートリノ振動と呼ぶ。

式 (1.12) より、ニュートリノのエネルギー  $E$  と飛行距離  $L$  が決まれば、ニュートリノ振動の確率は 2 つのパラメータ  $\sin^2 2\theta$  と  $\Delta m^2$  の関数となる。図 1.1 に様々な大気ニュートリノ実験が示唆する振動のパラメータ領域を示す。

## 1.4 ニュートリノ振動実験

原子炉や加速器で生成された人工的なニュートリノを使い、ニュートリノ振動を検証する様々な実験が行われてきた。これらの実験は、 $L/E$  の値が小さいものを短基線 (short-baseline) ニュートリノ振動実験、大きいものを長基線 (long-baseline) ニュートリノ振動実験と呼び、式 (1.12) からわかるように、短基線実験は  $\sin^2 2\theta$  の値が小さい領域を、長基線実験は  $\Delta m^2$  の値が小さい領域を探索するのに有効である。短基線実験には CHORUS[10], NOMAD[11] などがあり、長基線実験には MINOS[12], ICARUS[13] といった実験が準備、計画中である。

長基線ニュートリノ振動実験の一つに「つくば-神岡間長基線ニュートリノ振動実験」がある [14]。この実験では、大気ニュートリノ異常が示唆するパラメータ領域 ( $\Delta m^2 \sim 10^{-2} \text{eV}^2$ ,  $\sin^2 2\theta \sim 1$ ) を加速器を用いて探索するため (図 1.1), 茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構で生成したニュートリノビーム (平均エネルギー 1.4 GeV) を、約 250 km 離れた岐阜県吉城郡神岡町にあるスーパーカミオカンデ検出器に向けて打つ。この実験について次章で詳しく述べる。

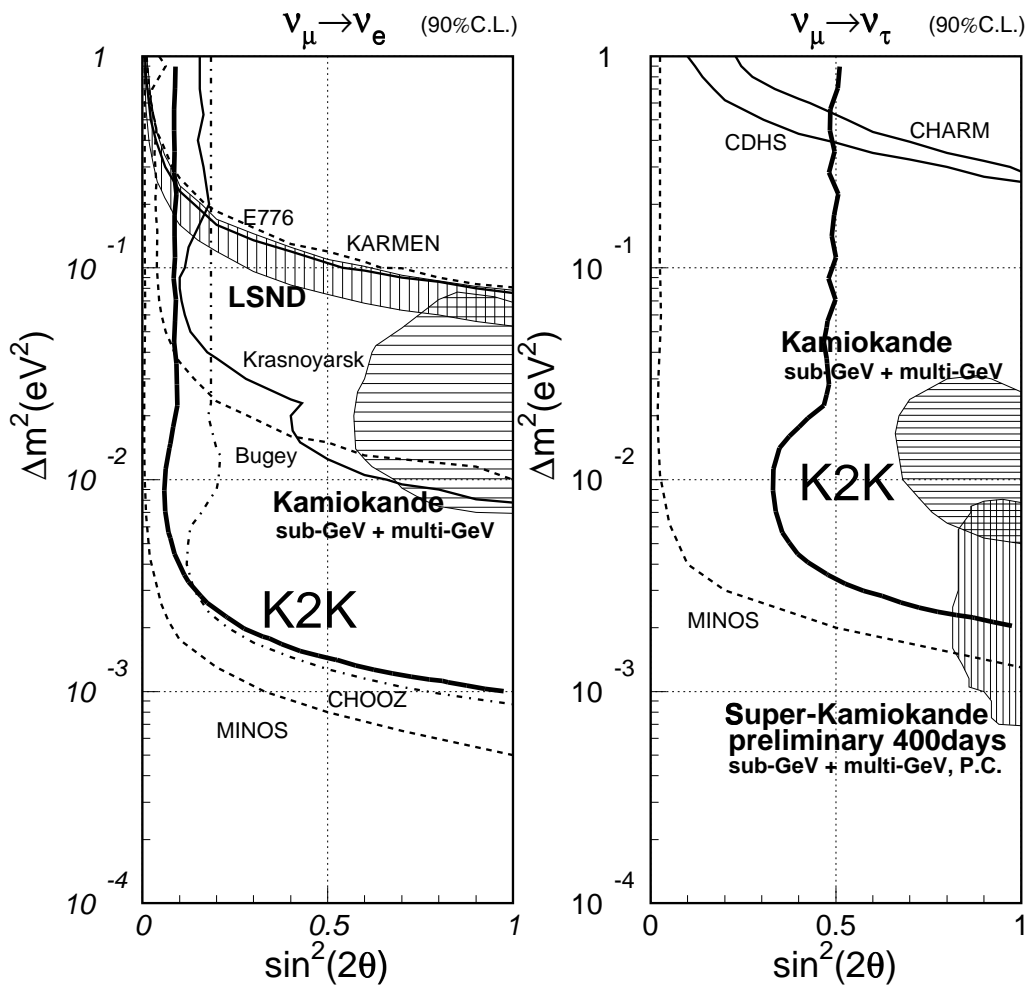


図 1.1: 大気ニュートリノ実験が示唆するニュートリノ振動のパラメータ領域. 左図は  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ , 右図は  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  への振動についての結果で, 「K2K」と書かれた線より右上の部分が大気ニュートリノ実験で探索可能なパラメータ領域である.

## 第2章 つくば-神岡間長基線ニュートリノ振動実験

### 2.1 概要

つくば-神岡間長基線ニュートリノ振動実験 (KEK-PS E362, 以下本実験) は, 茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構 (以下 KEK) の 12 GeV 陽子シンクロトロンで加速される陽子を使って平均エネルギー 1.4 GeV のニュートリノビームを生成し, 岐阜県吉城郡神岡町にあるスーパーカミオカンデ検出器に向けて入射する (図 2.1). KEK 所内に設置するビームモニタと前置検出器でニュートリノの角度分布とエネルギー分布を測定することにより, 250 km 先にあるスーパーカミオカンデ検出器におけるニュートリノ振動がない場合のエネルギー分布を予想し, それと観測結果を比較することでニュートリノ振動現象の有無を実験的に検証するのが目的である.

以下に各構成要素を説明する.

### 2.2 ビームライン

ビームラインの役割は, ニュートリノビームを生成し, スーパーカミオカンデ検出器へビームを収束させることである. 図 2.2 にその全体図を示す. 加速された陽子はスーパーカミオカンデ検出器に狙いを向けるため北カウンターホールより陽子ビームラインを北へ約 150 m ほど延長させ, 西北西の方向へ曲げられる. その後, 陽子ビームをアルミニウムターゲットに照射し,  $\pi$  中間子を生成する. 生成後直ちに, 2 つのホーンマグネット [15] を通過させて,  $\pi^+$  ビームを収束させる. 2 つ目のホーンマグネットを通過後,  $\pi$  中間子のエネルギーと角度分布を調べるために「 $\pi$  モニタ」と呼ばれるリングイメージ型ガスチェレンコフ検出器を設置する [16]. これを用いて, 前置検出器及びスーパーカミオカンデ検出器におけるニュートリノビームのエネルギー分布や広がり予測する. 続いて,  $\pi^+$  を崩壊させて  $\nu_\mu$  ビームを生成するために, 200 m ある崩壊領域を通過させる. この崩壊過程により生成される  $\mu^+$  のフラックスを測定し,  $\nu_\mu$  のフラックスを測定するために「 $\mu$  モニタ」と呼ばれるイオンチェンバーを設置する [16]. また崩壊領域の終端にはビームダンプが設置され, 未反応の粒子などを前置検出器まで到達させないようにしている.

### 2.3 前置検出器

生成されてすぐのニュートリノフラックスを測定するための前置検出器が KEK 所内に設置される. 図 2.3 に,  $\nu_\mu$  ビームとスーパーカミオカンデ検出器内に静止した中性子の荷電カレント準弾性散乱反応,

$$\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$$

から生じる  $\mu$  のエネルギー分布がニュートリノ振動の有無によりどのようにスーパーカミオカンデ検出器で測定されるか示す. この方法は  $\nu_\mu$  フラックスが減少したことを測定するので, disappearance モードと呼ばれる. 前置検出器のもう一つの目的は  $\mu$  粒子や  $K$  中間子の崩壊により生成される  $\nu_e$  の混入率を測定することである.  $\nu_e$  の混入率から期待されるスーパーカミオカンデ検出器での  $\nu_e$  の反応数よりも観測された反応数が多い場合, ニュートリノ振動が起こったといえる. これは本来測定されないはずの  $\nu_e$  による事象を測定するため, appearance モードと呼ばれている. この  $\nu_\mu$  の disappearance と  $\nu_e$  の appearance の 2 つのモードからニュートリノ振動を検証する.



図 2.4 に前置検出器の全体図を示す。前置検出器は大きく分けて、水チェレンコフ検出器と Fine-Grained Detector と呼ばれる 2 つの要素からなる。

### 2.3.1 水チェレンコフ検出器

Kamiokande 実験の補償実験である E261A 実験 [17] で使われた水槽を再利用し、1,000 トンの水を蓄えた水チェレンコフ検出器を建設する。スーパーカミオカンデ検出器と同じ水ターゲット、検出装置、解析法を使うことで、水チェレンコフ検出器の系統誤差を減らすことができる。ここで  $\nu_\mu$  のフラックスと  $\nu_e$  のエネルギーを測定する。

### 2.3.2 Fine-Grained Detector

Fine-Grained Detector では、最上流に設置される水標的内の核子とニュートリノが起こす荷電カレント準弾性散乱反応、

$$\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p \quad (2.1)$$

の結果生成される  $\mu^-$  の生成角と飛程を測定することで、 $\nu_\mu$  のエネルギー分布を再構成することを主な目的とする。核子の質量を  $m_N$ 、 $\mu$  粒子の質量、運動量、エネルギー、生成角をそれぞれ  $m_\mu$ 、 $p_\mu$ 、 $E_\mu$ 、 $\theta_\mu$  と置くと、再構成されるニュートリノのエネルギー  $E_\nu$  は

$$E_\nu = \frac{m_N E_\mu - m_\mu^2/2}{m_N - E_\mu + p_\mu \cos \theta_\mu} \quad (2.2)$$

となる。Fine-Grained Detector は 4 種類の検出器からなる。以下に各構成要素を説明する。

- 水標的/シンチレーティングファイバートラッカー

20 層の  $2.4 \text{ m} \times 2.4 \text{ m} \times 6.0 \text{ cm}$  の水標的とシンチレーティングファイバースシート (標的部は  $2.4 \text{ m} \times 2.4 \text{ m}$ , これを  $x, y$  の 2 方向用いる) の多層サンドイッチ構造を持つ飛跡検出器で、その概観を図 2.5 に示す。水標的と反応したニュートリノの反応点と反応の結果から生成される荷電粒子の飛跡を再構成することが主な目的である。多数のシンチレーティングファイバーの情報を読み出すために、24 台のイメージインテンシファイアチューブ (Image Intensifier Tube, 以下 IIT) と CCD カメラを使った読み出し装置が利用される。

- トリガカウンタ [18]

ミューオンチェンバーの TDC のスタート信号を測定することを目的とする。100 本のプラスチックシンチレーションカウンタ (1 本の大きさは  $466.0 \text{ cm} \times 10.8 \text{ cm} \times 4.2 \text{ cm}$ ) からなり、VENUS 実験のカウンタを再利用する。これと同型のシンチレータがシンチレーティングファイバートラッカーの上方にも設置され、宇宙線のベトーカウンタとしても使われる。

- 鉛ガラスカロリメータ [19]

$\nu_e$  から生成される  $e$  の同定とそのエネルギー測定を行う。エネルギー分解能は  $8\%/\sqrt{E} [\text{GeV}]$  である。TOPAZ 実験で使用された鉛ガラスカロリメータを再利用する。

- ミューオンチェンバー

鉄板とドリフトチェンバーの多層サンドイッチ構造をしている。μ の飛程を測定することで、μ のエネルギーを測定する。VENUS 実験のチェンバーを再利用する。

## 2.4 スーパーカミオカンデ検出器

岐阜県吉城郡神岡町の神岡鉱山に建設された水チェレンコフ検出器である (図 2.6)。直径、高さともに約 40 m の円筒に 50,000 トンの水を蓄え、その周囲を 11,146 本の光電子増倍管で覆っている。これらの光電子増倍管によりニュートリノと核子の荷電カレント準弾性散乱,

$$\nu_l + n \rightarrow l + p \quad (2.3)$$

の終状態に生成されるレプトン  $l$  が出すチェレンコフ光をとらえる。水チェレンコフ検出器の利点は、

- $\nu$  の到来方向がわかる
- イベントの時間情報がわかる

が挙げられ、到来方向とビームのタイミング情報から前置検出器のイベントと対応づけることが可能となる。1996 年 4 月より太陽ニュートリノ、大気ニュートリノ、陽子崩壊の測定を開始し、現在も稼働中である。

本論文において「つくば-神岡間長基線ニュートリノ振動実験」で使用するシンチレーティングファイバーの研究を行った。第 3 章でシンチレーティングファイバーの経年変化についての測定法と解析法を述べる。また第 4 章ではシンチレーティングファイバーを使って製作した検出器の性能を調べたので、これについて述べる。



図 2.1: つくば-神岡間長基線ニュートリノ振動実験. 茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構から岐阜県吉城郡神岡町にあるスーパーカミオカンデ検出器へニュートリノビームを照射し, ニュートリノ振動の有無を検証する実験である.

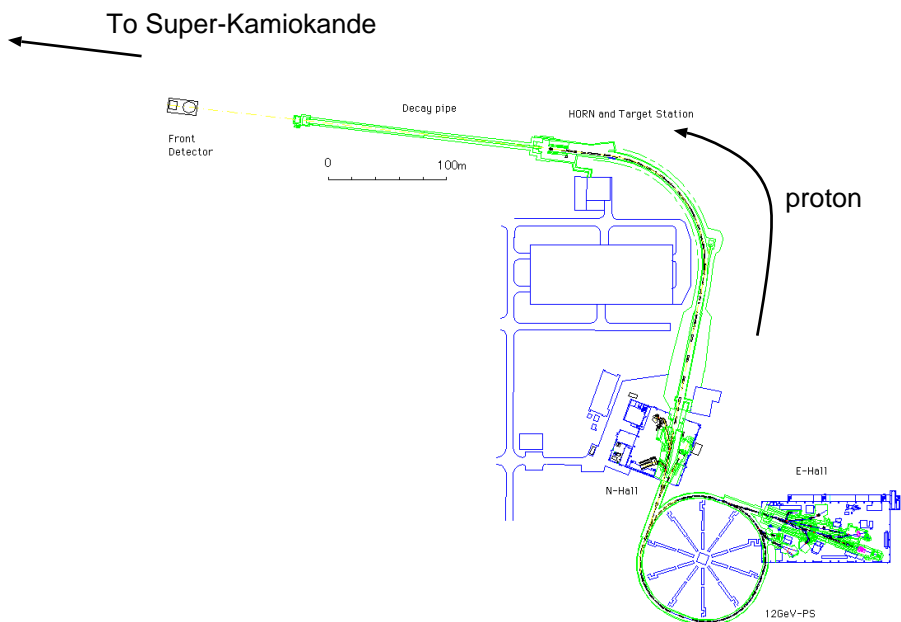


図 2.2: ニュートリノビームライン. 12 GeV 陽子シンクロトロンで加速された陽子をスーパーカミオカンデ検出器の方角に向けるために, 約 90 度曲げられる. 陽子はアルミ標的と反応し,  $\pi$  を生成する. 2 つのホーンマグネット で  $\pi$  ビームをそろえ, 200 m ある崩壊領域で  $\nu_{\mu}$  に崩壊させる.

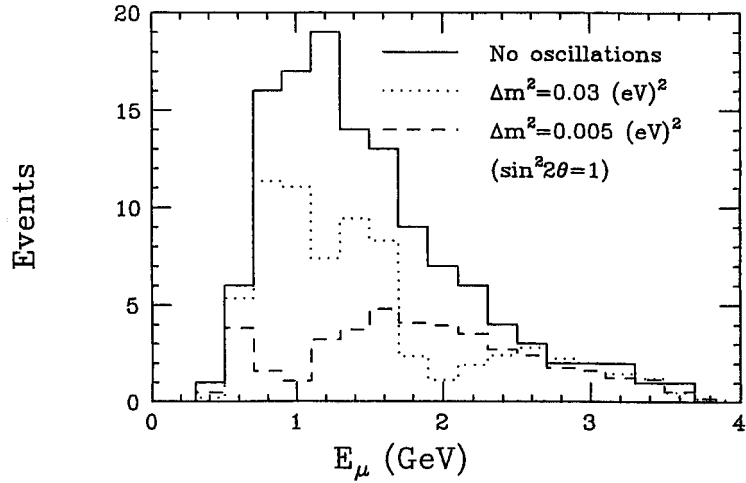


図 2.3: スーパーカミオカンデ検出器で観測される  $\mu$  のエネルギー分布の変化.  $\nu_\mu$  ビームがスーパーカミオカンデ検出器内に静止している中性子と荷電カレント準弾性散乱反応,  $\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$  を起こして  $\mu^-$  を放出するため,  $\mu$  粒子のエネルギー分布を測定することは, 間接的に  $\nu_\mu$  のエネルギー分布を測定することになる. いずれもモンテカルロシミュレーションによる結果で, 実線はニュートリノ振動がない場合, 点線と破線はある場合を示している.

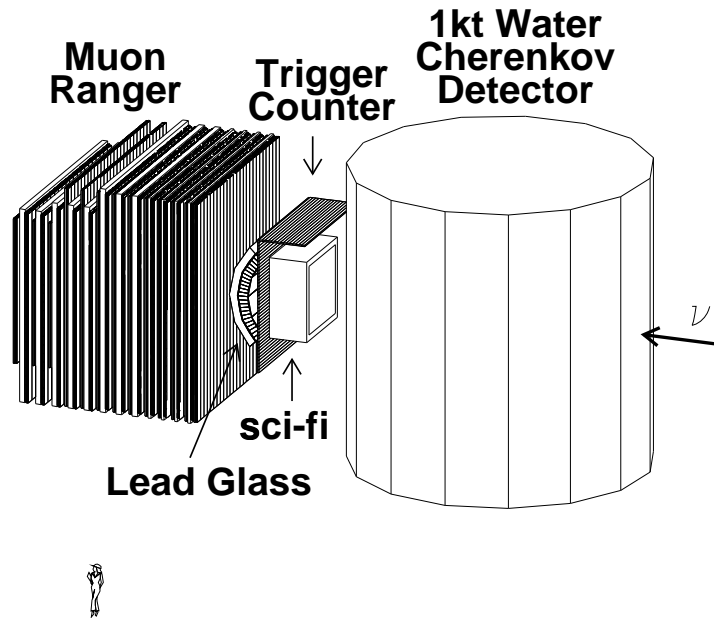


図 2.4: 前置検出器. 大きく分けて, 1 kt の水を使った水チェレンコフ検出器と, シンチレーティングファイバートラッカー, トリガカウンタ, 鉛ガラスカロリメータ, ミューオンチェンバーからなる Fine-Grained Detector の 2 つからなる.

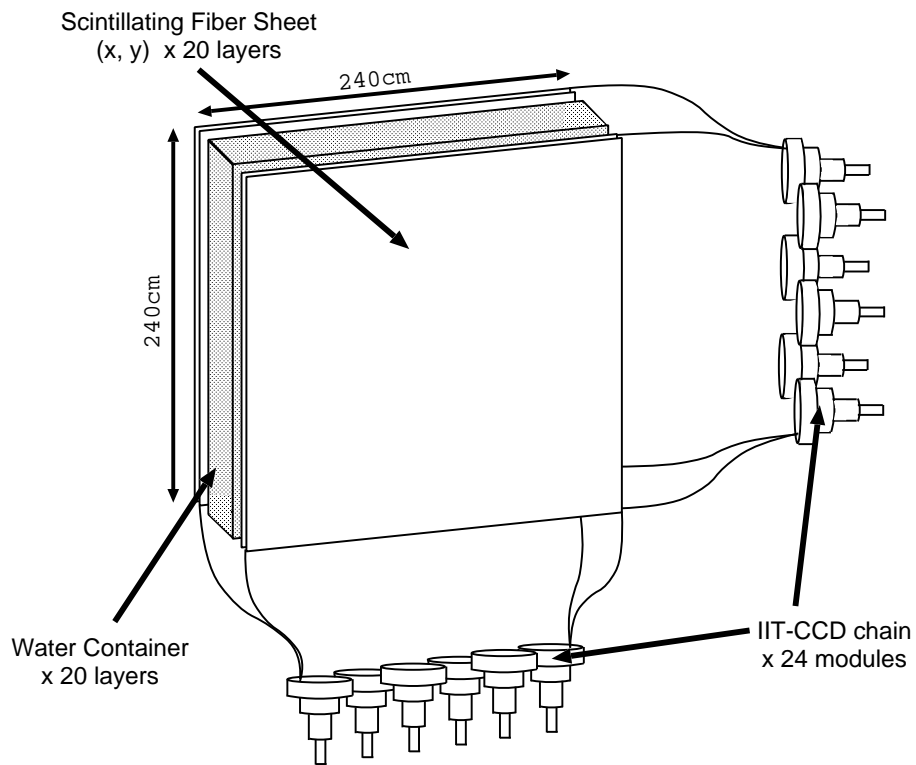


図 2.5: 水標的/シンチレーティングファイバートラッカー. 20 層の水標的とシンチレーティングファイバーシートが多層サンドイッチ構造を持つ.

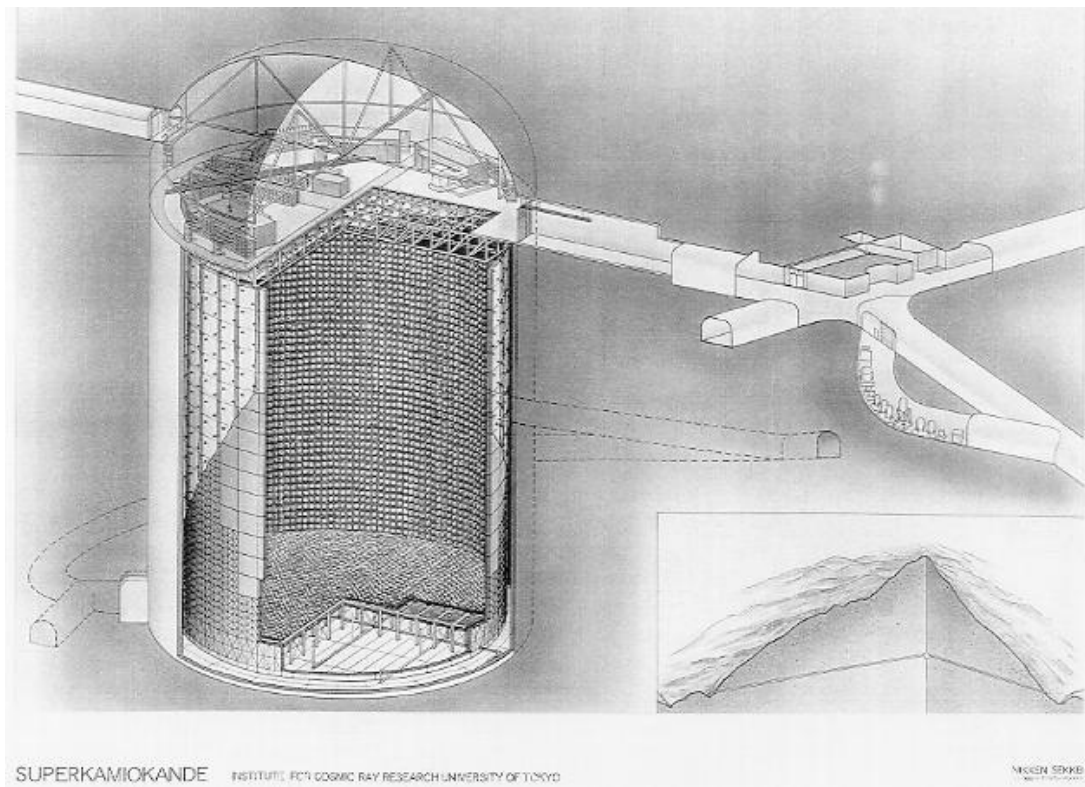


図 2.6: スーパーカミオカンデ検出器. 50,000 トンの水と 11,146 本の光電子増倍管を使った水チェレンコフ検出器.

# 第3章 シンチレーティングファイバーの経年変化測定

## 3.1 シンチレーティングファイバー

シンチレーティングファイバー (Scintillating Fiber, 以下 SCIFI) とは自らが発光体である光ファイバーの一種で [20], 中心部にシンチレータのコア, 周辺部にクラッドという構造になっている. 図 3.1 に断面が円形の「シングルクラッド (single cladding)」と呼ばれる SCIFI を示す. プラスチックシンチレータを発光体として使用した SCIFI の場合, 一般にコアはポリスチレン (屈折率 1.59), クラッドはポリメチルメタアクリル (以下 PMMA, 屈折率 1.49) でできている. 断面には円形や四角形の物があるが, クラッドの厚みは全体の厚みに対して 2~3% ほどである.

ポリスチレンより等方的に発生した光のうち, SCIFI 内を伝播してゆくことができるのは境界面で全反射する光である. すなわち, 境界面への入射角  $\theta$  (図 3.1 参照) が

$$\cos \theta \geq \frac{n_2}{n_1} \quad (3.1)$$

という条件を満たす角度で放出された光である.  $n_1$  はコア (もしくはクラッド) の屈折率,  $n_2$  はクラッド (もしくは空気) の屈折率である. 上記の組合せのプラスチック SCIFI の全反射の臨界角はコアとクラッド境界面で 20.4 度, クラッドと空気面で 47.8 度となっている.

発生した光を効率良く伝播させるために, コアの中に波長変換蛍光体 (ウエーブレングスシフター, 以下 WLS) と呼ばれるものを混ぜている. これにより短波長の光から伝播効率の良い長波長の光に変換する. ポリスチレンは 340 nm の発光波長を持ち, SCIFI の種類により含まれる WLS の種類も異なるが, Kuraray 社の製品 SCSF-78 シリーズではその光を 430 nm までシフトさせる. WLS の吸収スペクトルと放出スペクトルには重なりがあり, WLS により放出された光が再び吸収されることがある. この光が再び放出される時に全反射の臨界角を破るような角度で放出されたり, WLS に吸収されてしまい放出されないことがある. このような理由から WLS の濃度を上げすぎると伝播効率が悪くなるので, 適切な濃度に調整されている.

PMMA の外側により屈折率の小さいフッ化ポリマー \* を重ねた二重構造のクラッドを持つ「マルチクラッド (multi cladding)」とよばれるものがある. 全反射の臨界角は 1 層目と 2 層目のクラッド面で 17.6 度, 2 層目と空気面で 45.2 度となる. SCIFI がシンチレーション光を捕獲する量の指標として開口度  $NA$  というものがあり, この値が大きいほど光を捕獲しやすいことを意味する.

$$NA = \sqrt{n_{core}^2 - n_{outer}^2} \quad (3.2)$$

ここで  $n_{core}$ ,  $n_{outer}$  はそれぞれコア, クラッド (マルチクラッドの場合は外側のクラッド) の屈折率である. シングルクラッドの場合 0.55 であるのに対しマルチクラッドの場合 0.72 となる. 発生光の捕獲率は, 立体角の比より

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{n_{core}}{n_{outer}} \right) \quad (3.3)$$

で表される (但し, ここでは発生光の半分を捕獲する割合を示す). これよりシングルクラッドの場合 3.1% であるのに対しマルチクラッドの場合 5.3% となり, 開口度と捕獲率のいずれからでも, マルチク

\* PMMA にフッ素化合したものの, 屈折率は 1.42

ラッドの方がより多くの光を捕獲することがわかる。なお、マルチクラッドにおいて外側のクラッドで全反射を起こす光はコアと 1 層目のクラッドの境界面に 26.7 度以下で入射する光であり、この値はシングルクラッドのコアとクラッド面の全反射角よりも大きい。これからもマルチクラッドの方がより多くの光を捕獲することがわかる。表 3.1 にシングルクラッド及びマルチクラッドファイバーの材質と構造をまとめておく。

表 3.1: SCIFI の材質

		材質	屈折率	密度 [ $g/cm^2$ ]
コア		ポリスチレン	1.59	1.05
クラッド	シングルクラッド マルチクラッドの 1 層目	ポリメチルメタアクリル	1.49	1.15
	マルチクラッドの 2 層目	フッ化ポリマー	1.42	1.43

### 3.2 経年変化測定のための目的

一般に SCIFI は時間とともに劣化し、有限な寿命を持つことが知られている。この経年変化による劣化を起こす要因として、

- 酸素
- 温度
- メカニカルストレス
- 紫外線

などが考えられている [21]。そこで、上記に挙げた要因が経年変化に与える影響を調べるため、様々な環境下での SCIFI の寿命を測定した。そして KEK で行われた光量測定の結果 [22] から本実験で使用することとなった Kuraray 社の「SCSF-78M」が、準備期間を含めると 5 年に及ぶ本実験期間中光量の減少が 10% 以内であるかどうか、またどのようにすれば光量の減少を 10% 以内にできるかを調べた。

### 3.3 光量測定

SCIFI の経年変化を評価するために SCIFI の発光量を測定し、その寿命を算出する。以下に光量測定のセットアップと解析法を述べる。

#### 3.3.1 光量測定の装置

光量測定の装置を図 3.2 に示す。

暗箱内にテンションをかけて張られた SCIFI (長さ 270 cm) を  $\beta$  線源 ( $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ) により励起発光させ、読み出し端面に設置した光電子増倍管 (浜松ホトニクス社 R329-05S, 以下 PMT) により光量を測定する。今回使用した PMT の光電面の量子効率  $430\text{ nm}$  の光に対して 24.5 % である [23]。PMT で光量を電荷量に変換し、電荷積分型 ADC (LeCroy 社 2249W) により測定する。測定されたデータはワークステーション上で解析される。

トリガシステムを図 3.3 に示す。可動式のステージ上に、 $2.0 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$  の窓を持つコリメータを SCIFI を挟み込むように設置する。SCIFI の下方にトリガカウンタが固定されている。SCIFI を励起する場所は、トリガシステムを移動させることにより、PMT から  $10 \text{ cm}$ ,  $50 \text{ cm}$ ,  $100 \text{ cm}$ ,  $150 \text{ cm}$ ,  $185 \text{ cm}$ ,  $220 \text{ cm}$ ,  $260 \text{ cm}$  離れた点で行った。このデータを使って SCIFI の減衰長を調べることができる。

SCIFI の読み出し側の端面と PMT の光電面との間で光量が減衰することを防ぐために、オプティカルグリースを使用した。読み出しとは逆の端面は、そこでの反射光をなくすために鋭利な刃物で  $45$  度の角度で斜めに加工した。

このセットアップにより得られた典型的な ADC 分布を図 3.4 に示す。

### 3.3.2 解析方法

#### 光電子増倍管の較正方法

測定の結果から得られる ADC 分布を光電子数に変換するためには、1 光電子に対応する ADC 値がわかればよい。そこで PMT 表面と SCIFI の読み出し面の間にフィルターを挿入して、測定する光量を減らすことで 1 光電子による ADC 分布を測定した (図 3.5)。

こうして得られた分布に対し正規分布関数でフィットを行った。その結果、1 光電子に対応する ADC 値  $x_1$  は、

$$\begin{aligned} x_1 &= (\text{ADC 分布の peak}) - (\text{pedestal 分布の peak}) \\ &= 20.5 \pm 0.1 [\text{ADC counts}] \end{aligned} \quad (3.4)$$

であった。

#### 平均光量の算出

平均光量を算出するには ADC 分布の平均値がわかればよい。しかし単純に分布の平均値を計算したのでは宇宙線やトリガカウンタの熱雑音によるミストリガが含まれてしまうので、SCIFI は  $\beta$  粒子により発光したが伝播による減衰により PMT で検出できなかったという事象「ゼロヒット事象」の割合を正しく評価することができない。そこで以下のような関数でペDESTAL 付近の情報を使わずにフィットして、ゼロヒット事象を正しく見積もった平均光量を求める必要がある。ある ADC 値  $x$  を持つイベント数  $f(x)$  は

$$\begin{aligned} f(x) &= C \int G(E) \sum_n \text{Poisson}(n; \mu = \alpha(l)E) \cdot \text{Gaussian}(x; x_n, \sigma_n) dE \\ &= \frac{C}{\sqrt{2\pi}} \int G(E) \sum_n \frac{e^{-\mu} \mu^n}{n!} \cdot \frac{1}{\sigma_n} \exp\left[-\frac{(x - x_n)^2}{2\sigma_n^2}\right] dE \end{aligned} \quad (3.5)$$

となる。ここで  $C$  は規格化定数、 $\alpha(l)$  は SCIFI 中で  $\beta$  粒子が損失したエネルギーと SCIFI を距離  $l$  だけ伝播させた後に測定される光電子数の変換係数である。1 光電子の ADC 分布を正規分布関数によりフィットした結果の平均 ADC 値を  $x_1$ 、その標準偏差を  $\sigma_1$  とすると、 $n$  個の光電子に対応する ADC 値  $x_n$  とその広がり  $\sigma_n$  は以下のように表せる。

$$\begin{aligned} x_n &= n \cdot x_1 \\ \sigma_n &= \sqrt{n} \cdot \sigma_1 \end{aligned} \quad (3.6)$$

この広がりには PMT の分解能を表している。但し  $n = 0$  の時は、ペDESTAL の分布を正規分布関数でフィットした結果の平均と標準偏差を使う。  $G(E)$  は SCIFI における  $\beta$  粒子の電離損失分布であり (図 3.6)、モンテカルロシミュレーションパッケージ (GEANT[24]) を使って計算された。計算する際に実際のトリガシステムの形状、 $\beta$  線のエネルギー分布も考慮に入れて行った。



式 (3.5) を使って実際にフィットした結果を図 3.7 に示す. 平均光電子数は式 (3.4) で表される較正值を使い, 予想される ADC 分布の平均値より算出される.

### ゼロ点光量と減衰長

次に光ファイバーの特性である, 発光点での光量と減衰長について調べる. 光を十分長い距離  $l$  だけ SCIFI 中を伝播させた場合, 測定される光量  $Y(l)$  は

$$Y(l) = Y_0 \cdot \exp\left[-\frac{l}{\lambda}\right] \quad (3.7)$$

のように, 指数関数に従って減少してゆく.  $Y_0$  は  $l=0$  のときの光量で, 「ゼロ点光量」と呼ぶことにする. また  $\lambda$  は減衰長と呼ばれ, 測定される光量が  $Y = Y_0/e$  となる距離である.

式 (3.7) が示すように, 光が SCIFI 内を伝播するにつれて光量が減衰する理由として 2 つ考えられる. 1 つ目は, コアで発生, 捕獲された光は全反射角を保ちながら伝播していくが, コアやクラッドに不連続面があった場合に全反射角を破り SCIFI の外へと抜けてしまうことである. 2 つ目は, コア内に混入された WLS がシンチレーション光を自己吸収するからである.

SCIFI 内に捕獲された光が伝播する仕方には, 全反射を起こす境界面の場所によりコアモード (図 3.1) とクラッドモード (図 3.8 の左図) がある. コアモードはコアとクラッドの境界面で全反射を起こし, クラッドモードはクラッドと空気の境界面を全反射しながら伝播する. コアモードに比べクラッドモードは屈折回数が多くなるために光量が早く減衰する. また, 捕獲された光の進行方向が SCIFI の中心軸を外れている場合, SCIFI の軸を中心に回転しながら伝播する. これをスパイラルモード (図 3.8 の右図) と呼ぶ. スパイラルモードは SCIFI の中心軸を通過しながら伝播するモードよりも屈折, 反射回数が多くなる. 以上の理由により, SCIFI 内の光の伝播距離  $l$  が短いほど, 早く減衰する成分が含まれるために全体の光量の減衰長が短くなる. 光ファイバーの減衰長といった時, 光量が早く減衰する成分を除いた時の減衰長を指すために, 伝播距離  $l$  の長い時のデータを使って SCIFI のゼロ点光量と減衰長を計算することにする.

### 3.3.3 結果

本実験で使用する SCIFI の候補として, 表 3.2 にあげられた SCIFI がある. そのなかでも Kuraray 社の「SCSF-78M」(直径  $700 \mu\text{m}$ ) が, KEK で行われた SCIFI の光量測定の結果 [22] から最有力候補となっている.

図 3.9, 3.10 に SCIFI の伝播距離と測定される光電子数の関係を示す.

最初に製品の違いにより光量がどのくらい違うか調べた (図 3.9). 測定に使用した SCIFI の径はどれも  $700 \mu\text{m}$  で, それぞれ 10 本のサンプルを測定してその平均をとった. 調べたサンプルは 4 種類で, SCSF-78M, SCSF-78, SCSF-77M (いずれも Kuraray 社), BCF-12 (Bicron 社) である. 測定結果を表 3.2 に示す. ゼロ点光量と減衰長の両面から, 本実験の飛跡検出器の製作には「SCSF-78M」を使用することにした.

次に SCIFI に 2 つの加工を行い, その結果測定される光量に変化が現れるかどうかを調べた. SCIFI は飛跡検出器として製作する際に白いシリコンペイントを接着剤としてシート状に固められる [25]. 線材の場合でこの状況を再現し, 測定される光量に違いがあるかどうか調べた. また, ファイバー表面全面を蒸着による薄いアルミ膜 (厚さ  $\sim 1000 \text{\AA}$ ) で覆った SCIFI についても同様に光量の違いを調べた. その結果を表 3.3 にまとめる. いずれも何もしなかった場合と比較して, 測定される光量に有意な差は見られなかった.

表 3.2: SCIFI の光量測定の結果 (製品別). 表には測定したサンプルの平均値とその標準偏差を示した. この標準偏差が SCIFI の個性によるばらつきを表す.

製品名		クラッド	サンプル数 [本]	ゼロ点光量 [p.e.]	減衰長 [cm]
Kuraray	SCSF-78M	マルチ	10	$8.2 \pm 0.8$	$346 \pm 37$
	SCSF-78	シングル	10	$6.2 \pm 0.7$	$346 \pm 52$
	SCSF-77M	マルチ	10	$7.4 \pm 1.0$	$247 \pm 27$
Bicron	BCF-12	シングル	10	$5.6 \pm 0.4$	$270 \pm 17$

表 3.3: SCIFI の光量測定の結果. 測定に使用した SCIFI はすべて SCSF-78M である. サンプルの平均値とその標準偏差を表に示す.

	サンプル数 [本]	ゼロ点光量 [p.e.]	減衰長 [cm]
加工無し	10	$8.2 \pm 0.8$	$346 \pm 37$
ペイント有	4	$7.1 \pm 0.6$	$393 \pm 38$
<i>Al coating</i>	10	$7.1 \pm 0.6$	$375 \pm 35$

### 3.4 経年変化の測定

以上のような方法で測定される光電子数の時間変化から, SCIFI の寿命が算出できる. 以下に SCIFI を保存する環境の種類を説明し, 光量測定から得られるデータの解析法を述べ, 最後に結果を書く.

#### 3.4.1 保存環境

温度依存性を調べるために恒温槽を使用して,  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  という温度環境を準備した. ただし今回測定に使用する SCIFI は  $270\text{ cm}$  と非常に長いので, 保存場所の関係上, 円形に巻いて密閉容器に入れて保存した.

次に円形に保存した場合の寿命と比較するために, 直線状のまま保存できるような環境を準備した (図 3.11). スペースの都合上, 数多くこの環境を準備することができなかったが, この結果から円形保存の時にかかるメカニカルストレスの寿命への影響を調べることができる. 温度条件はヒータにより変更可能ではあるが, 今回は  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  について測定した.

SCIFI の劣化の原因の一つと考えられる酸素による影響を調べるために, SCIFI を窒素で充填した密閉容器内に円形に巻いて保存した. これにより酸素の体積比が容器内の気体の  $1.0\%$  以下という低酸素濃度を実現することができた. この容器を水中に保存することで, 容器内への酸素の侵入を防ぎ, 保存中酸素濃度を一定に保った.

また本実験では SCIFI を使った飛跡検出器を水捌の良くない地下に設置するため, 湿度による経年変化への影響も調べる必要がある. そこで密閉容器内を相対湿度  $100\%$  にして恒温槽に保存した. これも同じく SCIFI を円形に巻いて容器内に入れた.

本実験では前置検出器を地下に設置し, かつ, 遮光するため紫外線の影響はないので, 今回の経年変化測定の保存環境から紫外線を除いた. また, 保存容器を遮光し実験室の蛍光灯を紫外線を出さないものに代えるなどして, 紫外線の影響を受けないよう配慮した.

表 3.4 に全保存環境をまとめる. こうして準備した保存環境下に SCIFI を保存し, 一定期間経過後, 光量測定を行う. 光量測定後は再び保存していた時と同じ環境に戻す. これを繰り返して, 光量の時間変化のデータを集める.

表 3.4: SCIFI の保存環境. 図中の記号は「○」が準備した環境, 「-」が準備しなかった環境を意味する.

	温度 [°C]	BCF-12	SCSF-78	SCSF-78M
円形保存	5	-	-	○
	25	-	-	○
	40	-	○	○
	70	○	○	○
直線保存	70	○	-	○
窒素充填	25	-	-	○
	70	-	○	○
相対湿度 100%	25	-	-	○
	40	-	○	-
	70	-	○	○

### 3.4.2 解析方法

保存開始からの時間が  $t$  の時に測定される光電子数  $Y(t)$  は,

$$\begin{aligned} Y(t) &= Y(t=0) \cdot \exp[-vt] \\ &= Y(t=0) \cdot \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right] \end{aligned} \quad (3.8)$$

となる. ここで  $v$  は測定される光量が  $Y(t=0)/e$  になる速度で, 劣化速度と呼ぶ. また  $\tau$  は光量が  $Y = Y(t=0)/e$  となる時間で寿命と定義する. 実際に寿命を計算する際, 最も遠い測定点である 260 cm の点での光量の情報を使った. ある保存環境での SCIFI の平均寿命は, 式 (3.8) より一本一本のデータから劣化速度  $v_i$  を求め, その平均をとって平均劣化速度  $\bar{v}$  を算出する.

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \quad (3.9)$$

そして平均劣化速度の逆数をとることで平均寿命  $\bar{\tau}$  とする.

$$\bar{\tau} = \frac{1}{\bar{v}} \quad (3.10)$$

以上のようにして平均寿命を算出し, ある保存環境下における SCIFI の経年変化による劣化を評価する. また, 個々の SCIFI の寿命の標準偏差をその保存環境下における SCIFI の寿命の誤差とした.

### 3.4.3 結果

全ての測定の結果を表 3.5 にまとめる. ただし, 1997 年 12 月 26 日現在で光量の減衰が観測されていない条件については「測定中」とした.

#### 製品による寿命の違い

保存した SCIFI の全種類について 70 °C 空気中に円形保存したため, その時の寿命を使って製品による経年変化の違いがわかる. 結果を図 3.12 に示す. これより最も長寿命の SCIFI は SCSF-78 で, その寿命は  $36 \pm 7$  日であった.

表 3.5: SCIFI の経年変化測定の結果. 平均寿命とサンプルの標準偏差を示した.

サンプル	温度 [°C]	サンプル数 [本]	寿命 [日]
Kuraray SCSF-78M	70	10	15 ± 1
	40	10	1669 ± 1991
	25	8	測定中
	5	8	測定中
	(窒素充填) 70	9	測定中
	(窒素充填) 25	10	測定中
	(相対湿度 100%) 70	7	21 ± 6
	(相対湿度 100%) 25	9	測定中
	(直線保存) 70	7	38 ± 3
(アルミコーティング) 70	9	43 ± 5	
Kuraray SCSF-78	70	6	36 ± 7
	40	8	310 ± 35
	(窒素充填) 70	10	測定中
	(相対湿度 100%) 70	9	25 ± 5
	(相対湿度 100%) 40	9	453 ± 79
Bicron BCF-12	70	2	7 ± 2
Kuraray SCSF-78M 改良 10	70	5	21 ± 3
Kuraray SCSF-78M 改良 11	70	3	88 ± 8
	67	5	134 ± 10
	53	4	738 ± 163
	41	5	1449 ± 396
	25	4	測定中
	(ペイント有) 70	3	119 ± 23

### メカニカルストレスの影響

円形保存と直線保存のデータを比較することで、メカニカルストレスが寿命に与える影響をみる (図 3.13)。この結果、メカニカルストレスをかけた方が有意に寿命が短くなった。実機製作工程において様々なメカニカルストレスがかかると予想されるので、これらを減らす努力が必要である。また以後、寿命を比較、予想する場合は円形保存の結果を使うことにする。

### 酸素の影響

酸素が寿命に与える影響を窒素充填を行った保存環境と比較することで調べた。結果を図 3.14 に示す。明らかに空気中よりも窒素充填のほうが寿命が長く、約 450 日の保存でも光量の減衰が観測されずに、むしろ、測定される光量が時間とともに増えているように見える。しかし、これは誤差の範囲内で光量に変化が見られないとも言えるため、より長期間の測定結果が待たれる。

光量が時間とともに増える理由として次のようなことが考えられる。SCIFI の劣化はポリスチレンに酸素原子が結合することで進行すると考えられている (Appendix A 参照)。しかし酸素原子との結合エネルギーよりも多くのエネルギーを与えられた場合、活性化状態と呼ばれる不安定な状態に遷移し、この状態で分子内の原子が再編成する結果、酸素原子を放出して安定な状態になることがある (アニーリング)。保存環境に酸素がない状態だとアニーリングにより、時間とともにその性能がよくなるという現

象が起こり得る。

## 湿度の影響

測定される光量に対する湿度の影響を図 3.15 に示す。相対湿度 20% 以下と 100% の環境との比較から、寿命に有意な差が見られなかった。これにより本実験は、湿度に対する経年変化対策を特に考慮する必要がないことがわかった。

## コーティングの効果

ファイバーシートを製作する際に接着材として使用するシリコンペイントが、経年変化に影響を及ぼすかどうかを調べた。また、酸素が SCIFI の劣化を促進するとわかったので、酸素分子に対する保護膜としてアルミコーティングを行った。図 3.16, 3.17 にそれらの結果を示す。

シリコンペイントの場合には寿命に有意な差が見られなかったが、アルミコーティングの場合は寿命が約 3 倍の  $43 \pm 5$  日に延びた。この結果から、シリコンペイントが SCIFI の経年変化に対して悪い影響を与えないとわかったので、シリコンペイントをファイバーシート製作の接着材として使用しても問題がない。アルミコーティングの寿命が加工しなかった SCIFI に対して長くなった理由は、アルミ膜が酸素分子から SCIFI を保護している以外に、クラッド表面に傷が付くことを防ぐためだと考えられる。しかし、アルミコーティングはコスト、工程の手間などの問題から実機製作には行わない。

## SCIFI の改良

窒素を充填した容器に保存した SCIFI の寿命が最も長く測定されたことから、酸素が SCIFI の劣化の主な原因となっていることがわかった。そこでこの結果を基に Kuraray 社が SCSF-78M に改良を施し、「SCSF-78M 改良 10 (以下, 改良 10)」「SCSF-78M 改良 11 (以下, 改良 11)」の 2 種類を開発した。前者はコア内に含まれる不純物を取り除いたもの、後者はコアに酸素対策用の物質を混ぜたものである。

これらの SCIFI を同様に、70 °C 空气中に円形で保存した時の光量の変化を図 3.18 に示す。その結果、改良 10 の寿命は  $21 \pm 3$  日と SCSF-78M より長寿命であったが、改良 11 の寿命は著しく伸び  $88 \pm 8$  日であった。

同じ経過日数での絶対光量を見ても改良 11 が最も多いので、本実験では改良 11 を採用することに決定した。

## 温度の影響

最後に温度の影響についての結果を述べる。図 3.19 に改良 11 について温度条件がそれぞれ 70 °C, 67 °C, 53 °C, 41 °C の時の平均光量の時間変化を描いた。これより温度が高い程、寿命が短くなることが確認された。この結果から次節で説明する「アレニウスプロット」を用いて、本実験で実現可能な温度環境における改良 11 の寿命を見積もった。

## 3.5 経年変化の温度依存性

化学反応において、アレニウス (Arrhenius) は反応速度と反応温度との間に経験的な関係を見つけた。この関係は広い範囲に適用されることが認められている [26]。アレニウスが発見した経験則を使って、温度  $T$  の時の反応速度定数、すなわち寿命  $\tau$  は

$$\tau = A \cdot \exp \left[ \frac{E}{kT} \right] \quad (3.11)$$

のように書ける。  $A$  は頻度因子,  $E$  は活性化エネルギー (図 3.20) とよばれる量で, 反応に特有な定数である。  $k$  はボルツマン定数で,

$$k = 8.62 \times 10^{-5} [\text{eV} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (3.12)$$

である。アレニウスはこの経験則を以下のように解釈した。分子が外部から活性化エネルギーに相当するエネルギーを受けた時, 分子は一度活性分子状態という不安定な状態になる。活性分子状態とは分子の結合力が弱まり, 分子内の原子が個々の原子として振舞う中間状態である。この状態から原子の再構成が行われて, 初めて反応が進む。活性化状態になった時の周囲の環境により, どちらの向きに反応が進むか決まる。SCIFI が劣化する原因として、プラスチックの劣化反応の一つである自動酸化反応が SCIFI 内部でも起こっていると考えられる (Appendix A 参照)。酸化反応にはポテンシャル障壁が存在するので上の議論を適用できる。今回の測定から改良 11 の活性化エネルギーが求められ,  $0.93 \pm 0.01$  eV となる。絶対温度の逆数と寿命の対数には, 式 (3.11) からわかるように比例の関係がある。この関係をグラフに書いたものをアレニウスプロットという。アレニウスプロット (図 3.21) より改良 11 の 15, 20 °C での寿命を外挿すると, それぞれ  $39152 \pm 19240$  日,  $20636 \pm 10047$  日になる。さらに式 (3.8),

$$Y(t) = Y_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \sim Y_0 (0.9)^{\frac{t}{0.1\tau}} \quad (3.13)$$

より, 光量が最初の 90% となる時間は  $0.1\tau$  である。よって改良 11 の光量が 10% 減少する時間は 15, 20 °C の時それぞれ  $3915 \pm 1924$  日,  $2064 \pm 1005$  日すなわち約 11 年半, 5 年半と計算できる。本実験は準備期間も含めて 5 年間行われると考えると, 15 °C の環境下で保管, 使用すればその期間中光量の減少を 10% 以下で抑えることができるとわかった。

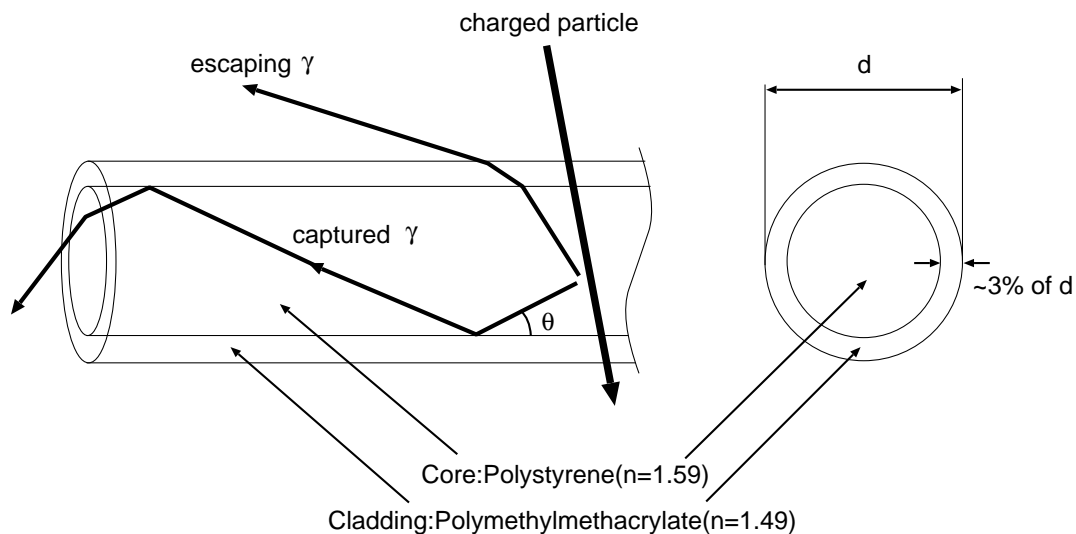


図 3.1: シンチレーティングファイバー. 図はシングルクラッドファイバーで, 右図は断面図を表す. SCIFI は中心部のコアと呼ばれるシンチレータと周辺部のクラッドと呼ばれる部分からなる. 典型的なクラッドの厚みは直径の 3% である.

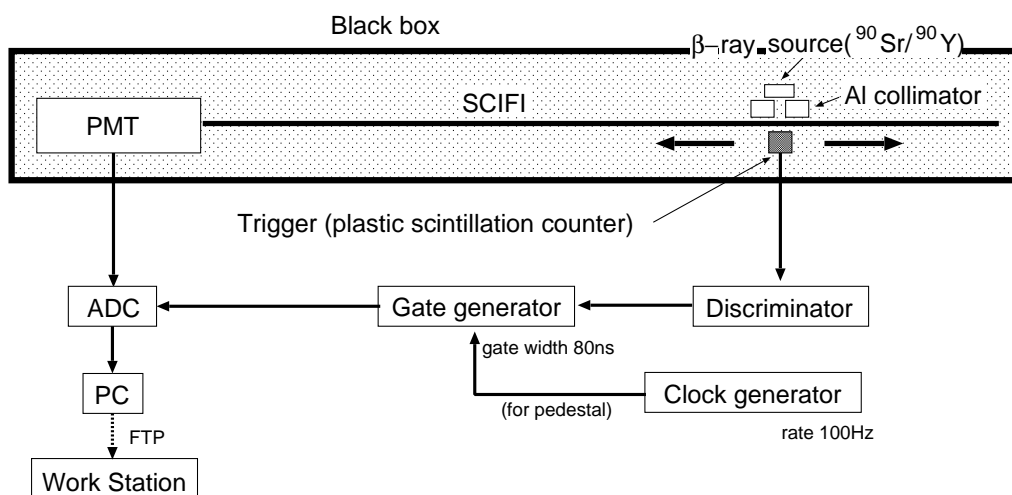


図 3.2: シンチレーティングファイバーの光量測定装置の全体図. 暗箱の中に SCIFI をテンションをかけて張り,  $\beta$  線源で発光させて光電子増倍管で光量を測定する. トリガシステムを移動させることで任意の場所での光量を測定することができる.

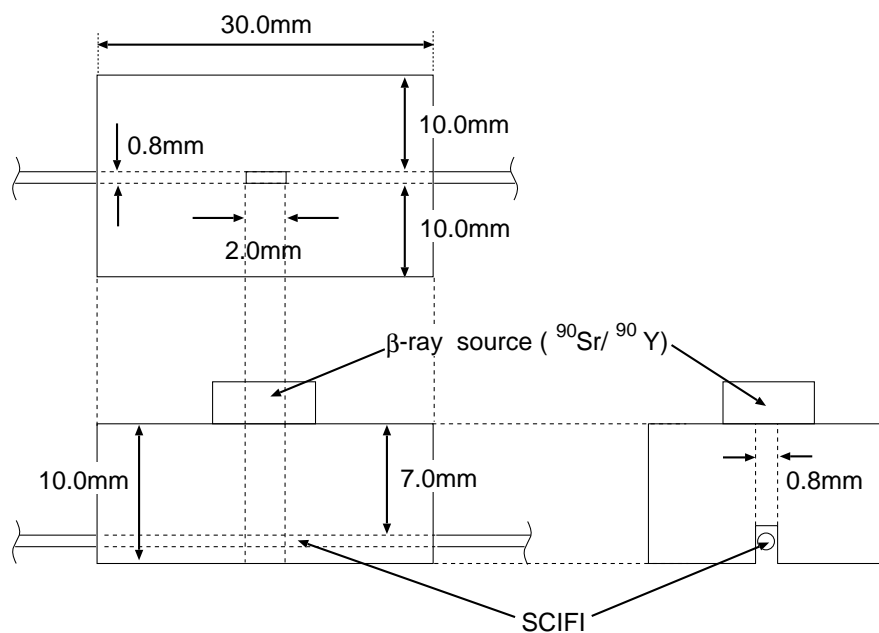


図 3.3: トリガシステムの拡大図. アルミニウム製のコリメータで SCIFI を挟み込み, コリメータの上に  $\beta$  線源を置く. コリメータの下にはプラスチックシンチレーションカウンタがあり, これによりトリガをかける. スリットの大きさは  $2.0\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$  である.

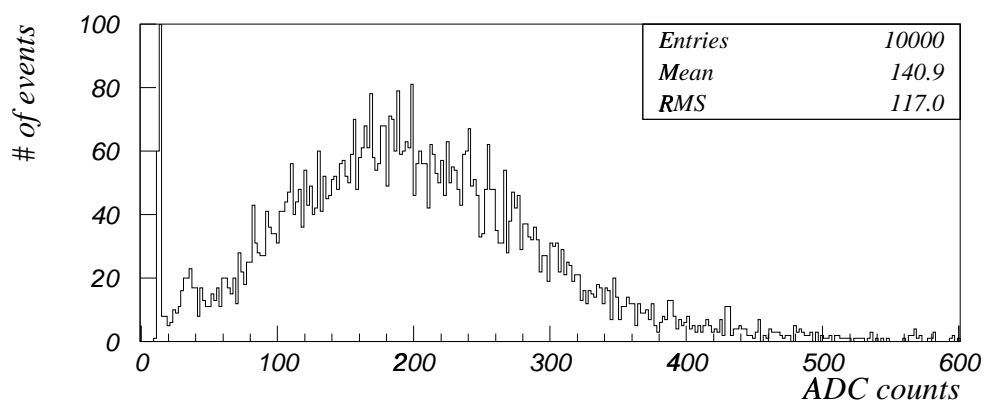


図 3.4: 光量測定で得られる典型的な ADC 分布. 使用した SCIFI は Kuraray 社の SCSF-78M ( $700\text{ }\mu\text{m}\phi$ ) で, 図は線源を PMT より  $50\text{ cm}$  のところに置いた場合を示す. 左端に見えるピークはペDESTアルである.



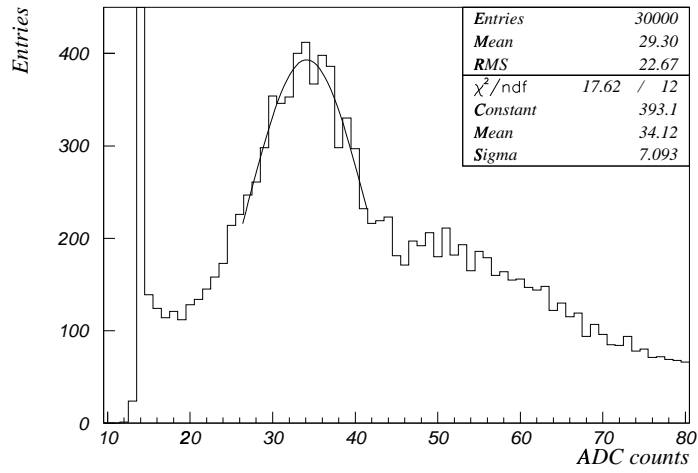


図 3.5: 光電子増倍管の較正用の ADC 分布. ヒストグラム上の曲線は正規分布関数によるフィットの結果. これより  $1 \text{ p.e.} = 20.5 \pm 0.1 \text{ ADC counts}$  であった.

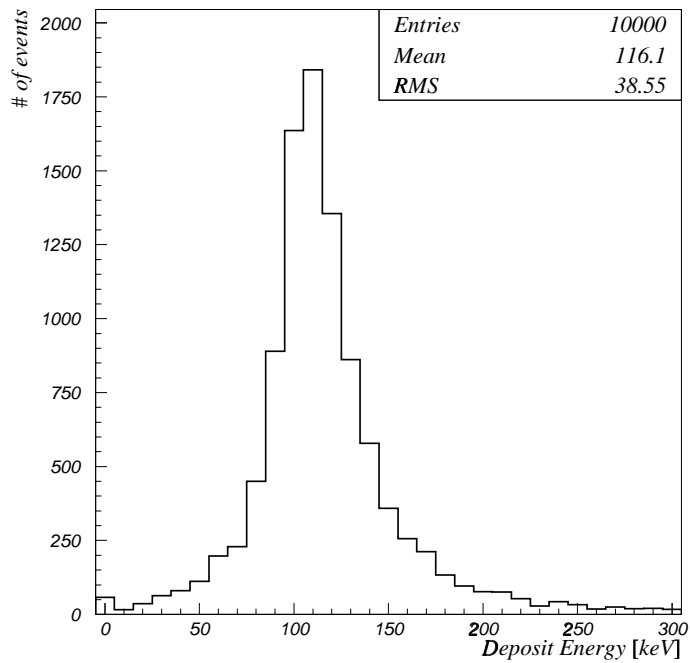


図 3.6: SCIFI 内での  $\beta$  粒子の電離損失分布. GEANT を使って実際のトリガシステムや  $\beta$  線のエネルギー分布を再現してシミュレーションを行った.

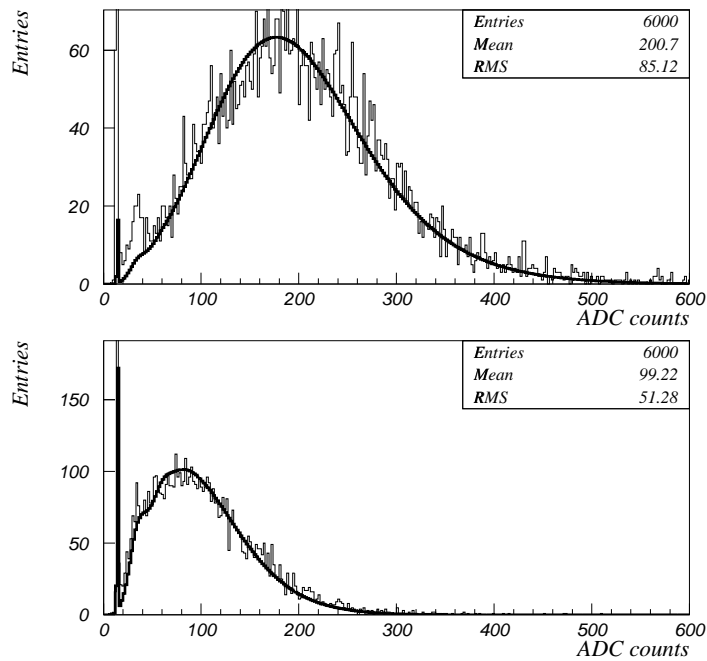


図 3.7: 光量測定より得られた ADC 分布 (ヒストグラム) に対するフィットの結果から予想される ADC 分布 (太線). 線源は光電子増倍管より上図で 50 cm, 下図で 260 cm のところに置いた.

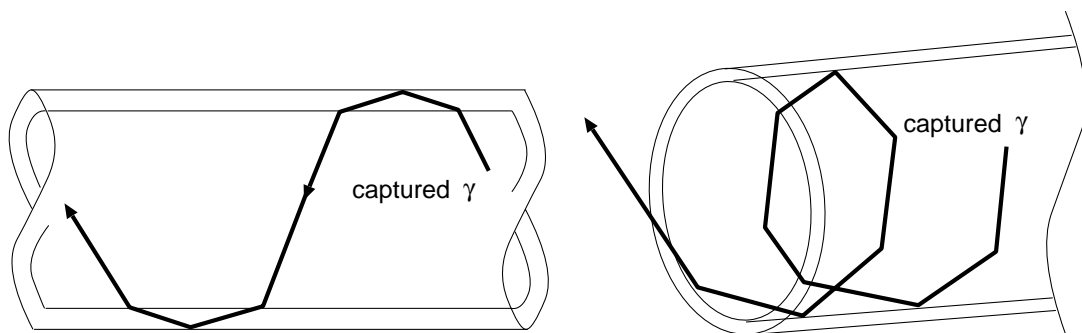


図 3.8: SCIFI 内での光の伝播の様子. 光の伝播には主にコアモード (図 3.1 参照), クラッドモード (左図), スパイラルモード (右図) などがある. ここにあげた 2 つはコアモードよりも屈折, 反射回数が多く, 伝播距離も長いいため, 光はコアモードより早く減衰する.

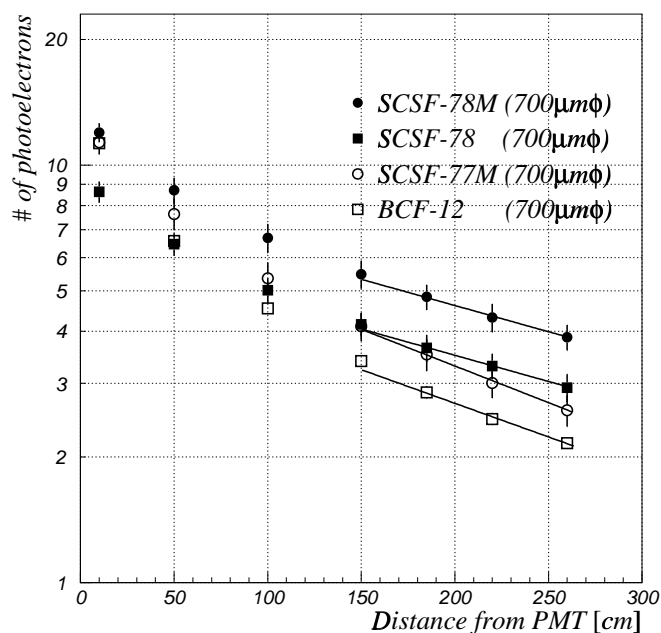


図 3.9: 測定される光量の距離依存性 (1). 使用した SCIFI は SCSF-78M, SCSF-77M (いずれもマルチクラッド) SCSF-78, BCF-12 (いずれもシングルクラッド) で, すべて径は  $700\ \mu\text{m}$  である. 測定したサンプル数はそれぞれ 10 本で, グラフにはその平均がかかっている. グラフ上の線は式 (3.7) によるフィットの結果を示す. 結果は表 3.2 にまとめる.

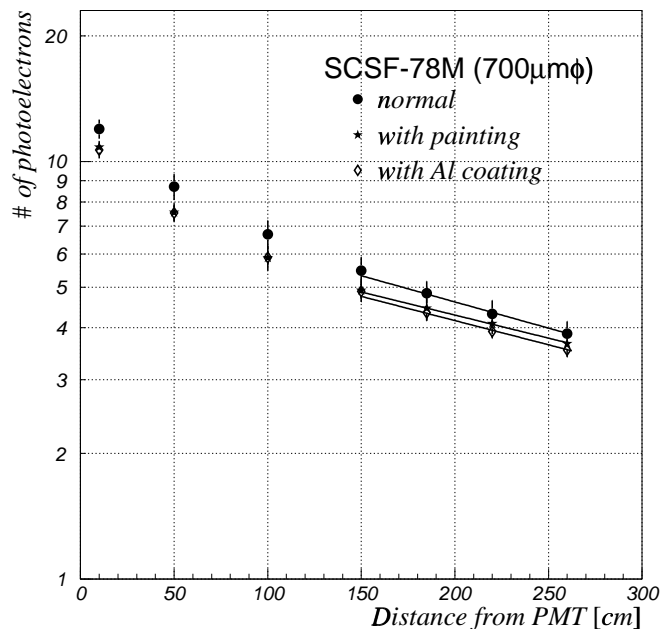


図 3.10: 測定される光量の距離依存性 (2). 使用した SCIFI は Kuraray 社の SCSF-78M で, ファイバーの表面全面にペイントした場合, ファイバーの表面全面にアルミコーティングした場合, そして何もしない場合の 3 種類についての測定を行った. グラフ上の線は式 (3.7) によるフィットの結果を示す. 測定結果は表 3.3 にまとめる.

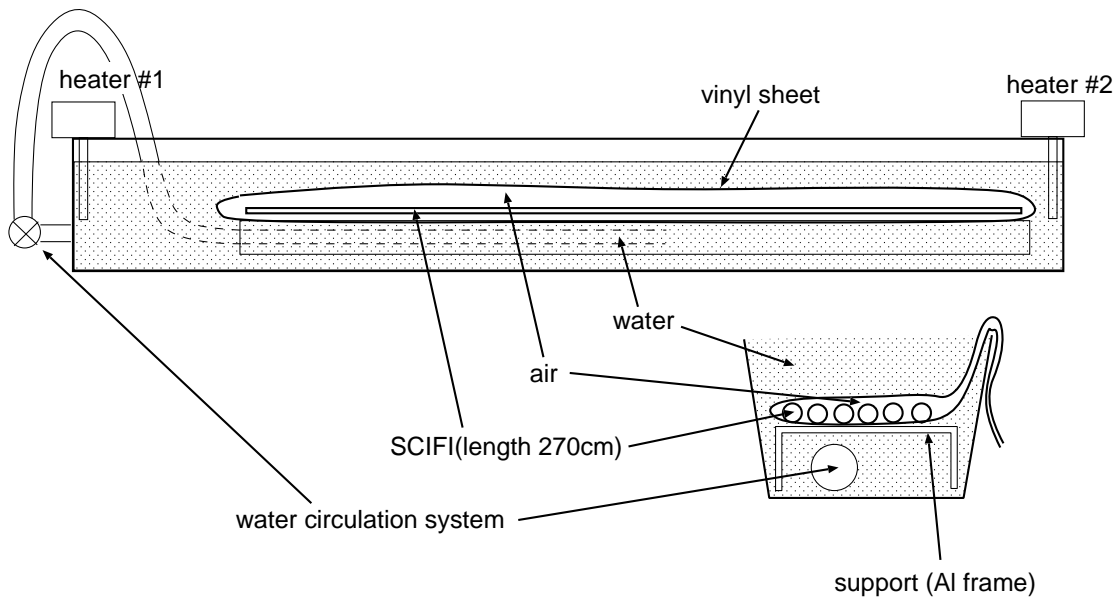


図 3.11: SCIFI を 70 °C で直線状に保存するためのシステム. 2 つのヒータにより 70 °C の温水を作り, その中にビニルシートでくるんだ SCIFI を並べて保存する. 温水は循環装置によりどの場所も常に一定の温度になるようにしている.

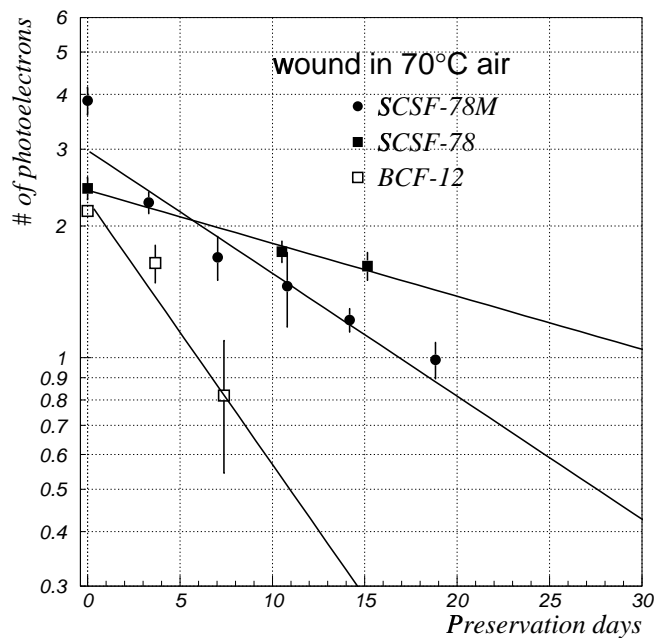


図 3.12: 光量の時間変化 (1). グラフには 70 °C 空気中に円形保存された SCSF-78M, SCSF-78, BCF-12 の平均光量の変化と式 (3.8) によるベストフィットが描かれている. これより寿命はそれぞれ  $15 \pm 1$  日,  $36 \pm 7$  日,  $7 \pm 2$  日とわかった.

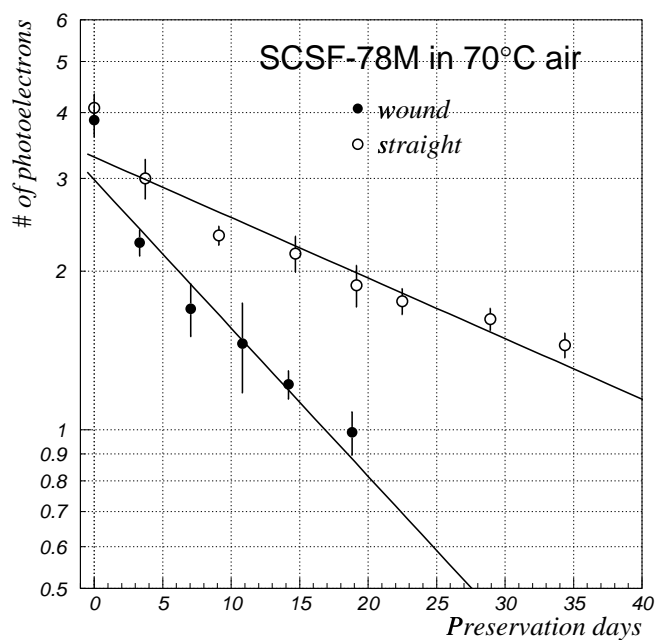


図 3.13: 光量の時間変化に与えるメカニカルストレスの影響. SCSF-78M を 70 °C 空气中に円形に巻いて保存した場合と直線状に保存した場合の光量の時間推移をグラフに描いた. これから直線保存の寿命は  $38 \pm 3$  日となり, 円形保存の場合 ( $15 \pm 1$  日) の 2 倍以上であることがわかった.

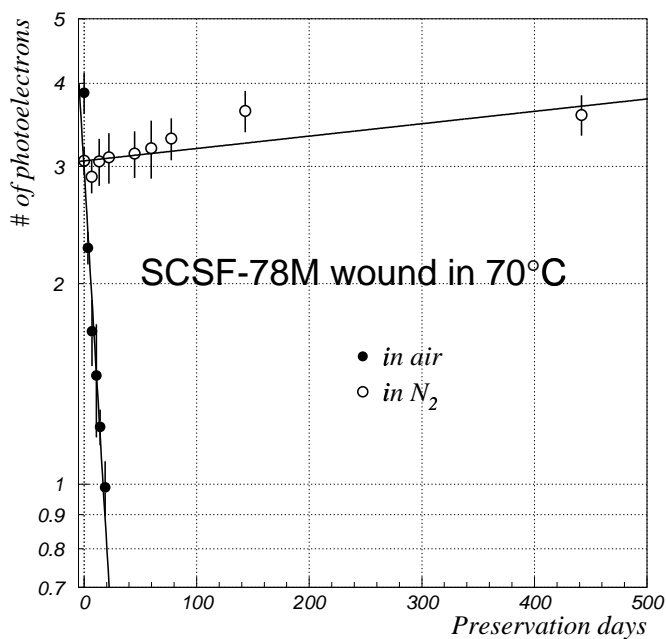


図 3.14: 光量の時間変化に与える酸素の影響. 円形に巻いて 70 °C の環境下に SCSF-78M を保存した. 寿命は空气中では  $15 \pm 1$  日であったが, 窒素充填下では 450 日間保存しても光量の減衰が観測されなかった.

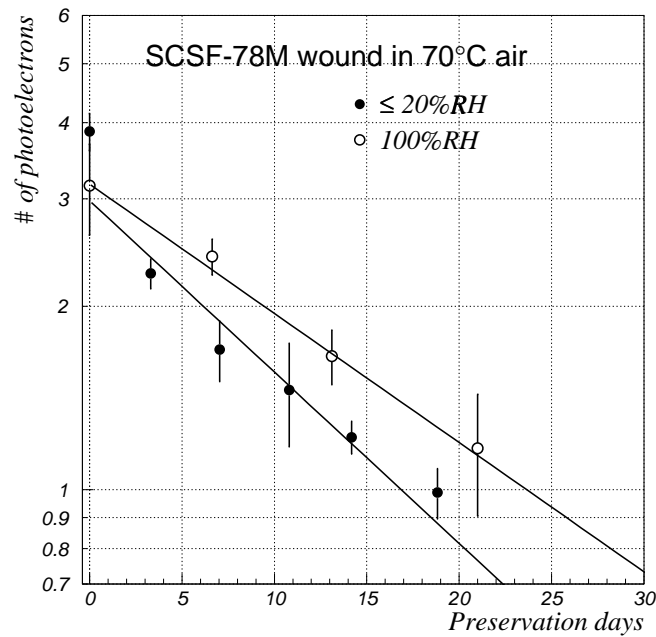


図 3.15: 光量の時間変化に与える湿度の影響. SCSF-78M を  $70^{\circ}\text{C}$  の空気中に円形に巻いて密閉容器内に保存した. 寿命は相対湿度 20% 以下の時に  $15 \pm 1$  日, 100% の時に  $21 \pm 6$  日となり, 有意な差は観測されなかった.

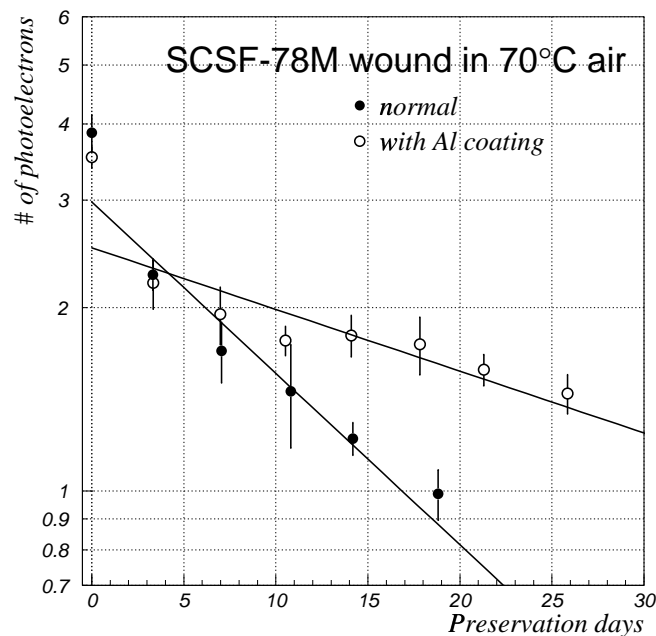


図 3.16: 光量の時間変化に与えるアルミコーティングの影響. SCSF-78M にアルミコーティングした場合としない場合を示した. いずれの SCIFI も円形に  $70^{\circ}\text{C}$  の空気中に保存した. その結果, コーティングすると寿命が約 3 倍に延び,  $43 \pm 5$  日となった.

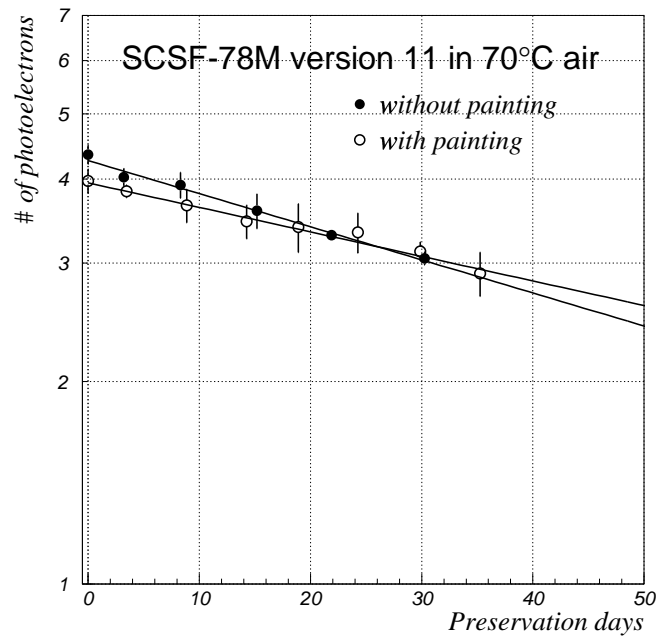


図 3.17: 光量の時間変化に与えるシリコンペイントの影響. SCSF-78M 改良 11 を 70 °C の空气中に円形に保存した. 寿命はペイントした場合で  $119 \pm 23$  日, しなかった場合で  $88 \pm 8$  日となり, 有意な差は見られなかった.

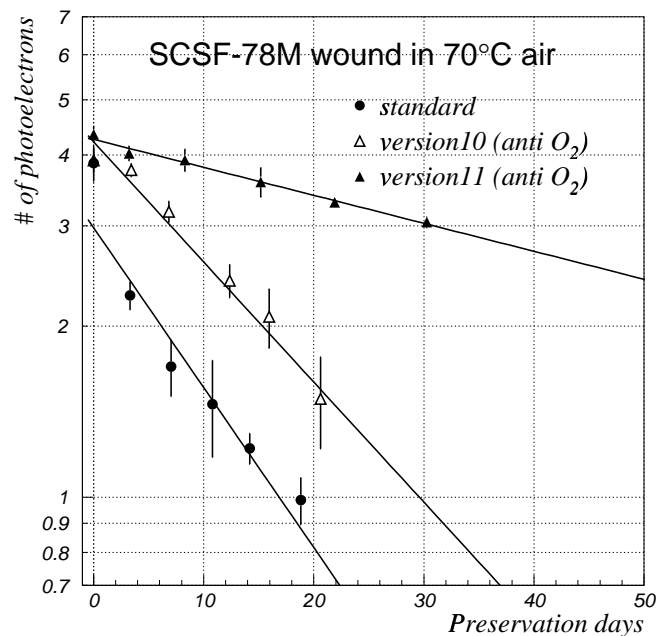


図 3.18: 光量の時間変化 (2). グラフには 70 °C 空气中に円形保存された SCSF-78M とその改良版である SCSF-78M 改良 10, SCSF-78M 改良 11 の平均光量の変化と式 (3.8) によるベストフィットが描かれている. 寿命はそれぞれ  $15 \pm 1$  日,  $21 \pm 3$  日,  $88 \pm 8$  日となった.

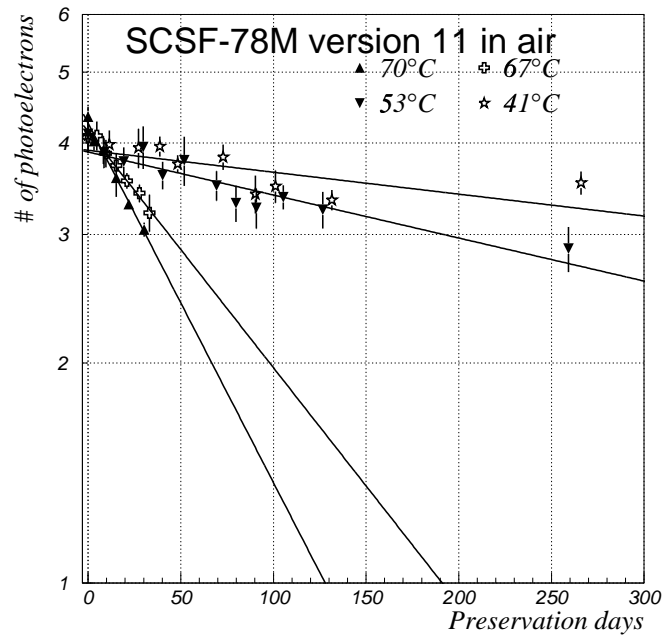


図 3.19: 光量の時間変化に与える温度の影響. グラフには空气中に円形保存された SCSF-78M 改良 11 について描かれている. 寿命は 41 °C で  $1449 \pm 396$  日, 53 °C で  $738 \pm 163$  日, 67 °C で  $134 \pm 10$  日, 70 °C で  $88 \pm 8$  日となった.

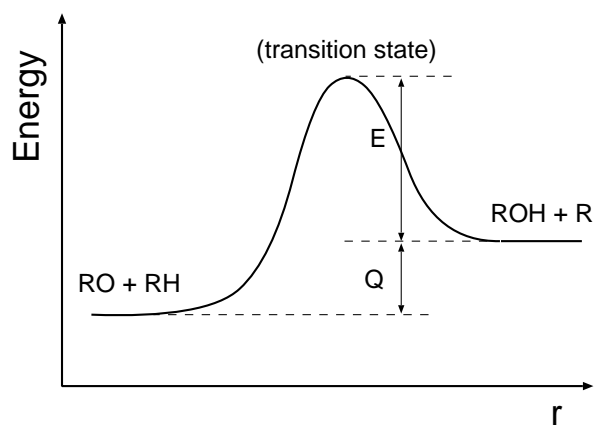


図 3.20: 反応と活性化エネルギー. 横軸は R 基と H イオン間の距離, 縦軸は全体のエネルギーを示す. アレニウウスは反応は活性分子 (active molecule) のみ起こすことができると考えた. 活性分子になるためには活性化エネルギー  $E$  が必要で, どちらの向きに反応が起こるかは, 周囲の環境などに左右される.



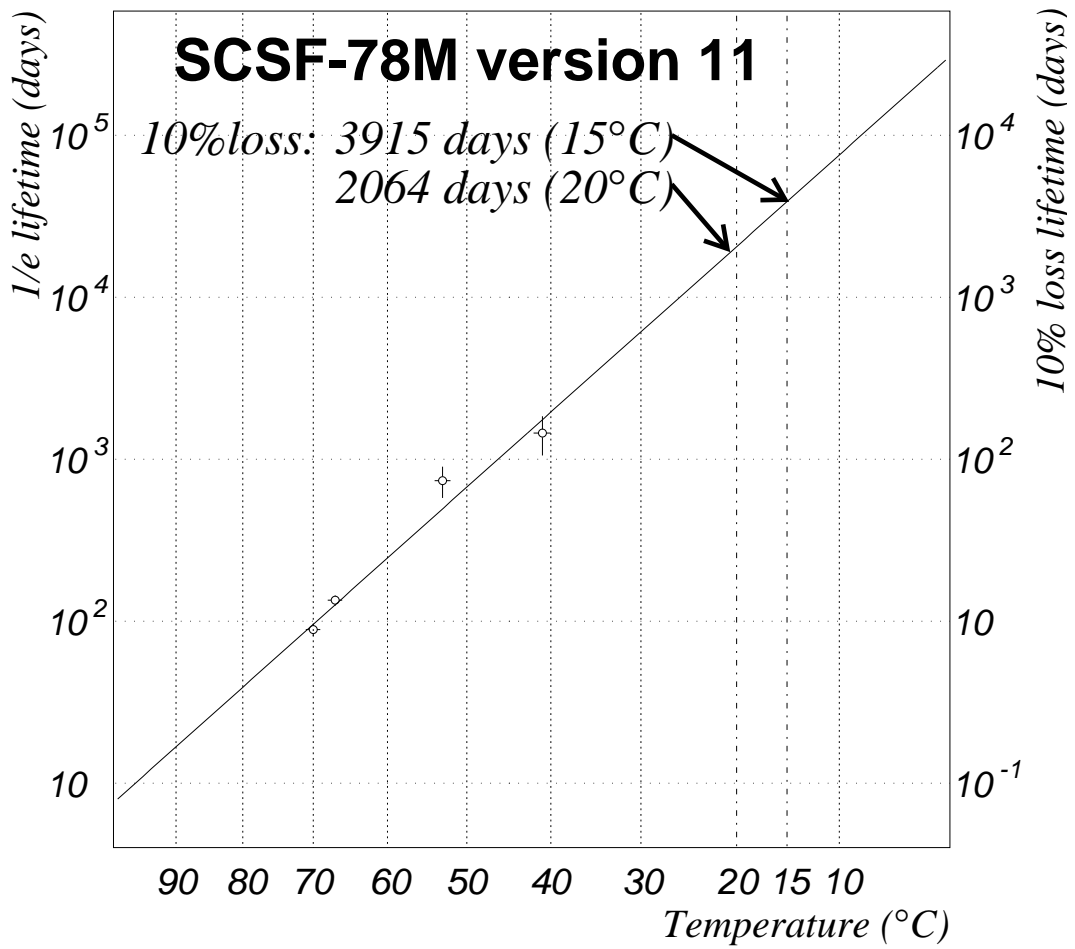


図 3.21: 経年変化の温度依存性. 図はアレニウスプロットと呼ばれ, 温度とその時の反応速度の関係を調べるのに使われる. グラフの横軸は絶対温度の逆数, 縦軸は SCSF-78M 改良 11 の寿命を表している. これより 15 (20) °C の時の寿命を計算すると  $39152 \pm 19240$  日 ( $20636 \pm 10047$  日) となり, 光量が 10% 減少するのにかかる時間に換算すると  $3915 \pm 1924$  日 ( $2064 \pm 1005$  日) となる.

## 第4章 ファイバー検出器の性能評価

本実験では、 $\nu_\mu$  のエネルギーを再構成するために、ファイバー検出器を用いて  $\mu$  の反応点と生成角を測定し (第 2 章参照), 荷電粒子の水標的やファイバーシート内のエネルギー損失も測定する. ファイバー検出器に使用するシンチレーティングファイバー, SCSF-78M 改良 11 の光量, 減衰長, 寿命は第 3 章で示した通り本実験の要請を満たしている. そこで実機とほぼ同じ構造を持つファイバー検出器を製作し, 検出効率, 位置分解能, エネルギー分解能といった検出器の性能を評価するために, 宇宙線テスト及び電子ビームテストを行った.

### 4.1 宇宙線テスト

#### 4.1.1 プロトタイプ-I

宇宙線テストを行うためプロトタイプのファイバー検出器 (以下プロトタイプ-I) を製作した. プロトタイプ-I は 5 層のファイバーシートからなり, うち真中の層にはマルチクラッドシート (幅 80 mm) を, その他の層にはシングルクラッドシート (幅 200 mm) を使った. ファイバーシートは読み出し部分, ライトガイド部分, 粒子検出器部分からなり, 長さはそれぞれ 100 mm, 700 mm, 500 mm である (図 4.1 参照). 読み出し部分と検出器部分に含まれる SCIFI はペイントで固定されるが, ライトガイド部分には自由に曲げることができるようペイントしない. ファイバーシートを製作する際 SCIFI をすき間なく並べるために, SCIFI の中心を結ぶ線が正三角形を描くように積む. このような積み方には 2 種類あるが (図 4.1 参照), そのうち「俵積み」を採用した. 読み出し部分は 40 mm の幅に等分し, 図 4.2 のように積み重ねてブロック状 (以下バンドル) にした. バンドル表面は IIT 表面との接触を均一にし, その間での光量の減衰を防ぐために, ダイヤモンドカッターをつけた旋盤により研磨された. オプティカルグリースなどを用いて光量の減衰を防ぐ方法もあるが, 接触面積が大きいため一度装着すると離れなくなるので使用しない. 検出器部分のシートは L アングルで支持台を作り, 6 cm 間隔に固定した.

#### 4.1.2 セットアップ

図 4.3 に宇宙線測定のセットアップを示す. プロトタイプ-I の上方に 100 mm × 100 mm の, 下方に 50 mm × 50 mm のプラスチックシンチレーションカウンタを設置し, 荷電粒子が両方共に通過した場合 IIT-CCD チェーン (図 4.4) で観測した SCIFI の輝度情報を Flash ADC により取得する. CCD カメラの 768 × 493 画素の位置情報をサンプリング用クロック信号および座標データ生成モジュール (Clock & Coordinate Generator, 以下 CCG) によりコントロールする. CCD カメラの 1 画素に記録された輝度は CCG が発する位置情報と組み合わせられてワークステーションへ送られる.

#### 4.1.3 データ解析法

##### CCD 画像のクラスタ化

真のイベントとノイズを分離するため, CCD 画像上の光の像 (以下クラスタ) に含まれる画素数  $N_{pix}$  が 5 以上となるものを見つける. 図 4.5 にクラスタの例を示す. クラスタに対して  $N_{pix} \geq 5$  を要求するのは,  $\beta$  線源を用いた検出効率の測定結果から, 検出効率が 99.5 %, かつ, ノイズ混入率は 0.5% 以下

となるからである [27, 28].

## ヒット同定法

前述のクラスタ化された画像について, ファイバー内に含まれる画素数  $N_{pix}$  が 5 以上となるファイバーをヒットファイバーと定義する [29]. 次に複数のヒットファイバーが隣接した場合, これらのファイバー中心の位置を各ファイバー内の ADC 値で重みをつけ重心を計算し, これをヒット位置と定義した.

## EL を用いたファイバー位置較正

バンドル面の各ファイバーが CCD 画像上のどの画素に対応するか調べるために, エレクトロルミネッセンス (Electro Luminescence, 以下 EL) と呼ばれる蛍光板を使い, 検出器部分のファイバーを 1 本おきに発光させ位置較正を行った. EL による CCD 画像を図 4.6 に示す. ファイバー中心の座標は全イベントの積分画像にクラスタ化を適用し, 検出されたクラスタの重心座標を使った. EL の光量が大きすぎて複数のクラスタがひとつとなり, 上に述べたクラスタ化では正しくファイバーを認識できないことがある. そこで積分画像の ADC 分布から変曲点を探しだし, 二階導関数が負の値を持つ範囲をクラスタと定義した (図 4.7). 以上より得られた全ファイバーを図 4.6 に示す. バンドル上のファイバーは検出器部分と 1 対 1 に対応するので, これより検出器部分のファイバー中心位置を CCD 画素に変換できる.

## 検出効率と位置分解能

典型的な宇宙線事象を図 4.8 に示す. 中央のマルチクラッドシートにおけるヒット位置を測定するため, 最初に全 5 層あるシートの内, 上 2 層, 下 2 層にヒットがあるイベントを探した. 次にそれらの層にあるヒットの位置情報を使って飛跡を直線フィットにより再構成し, その分散が 0.2 以下となるイベントを選んだ. 分散分布図を図 4.9 に示す. それらのイベントの中で, 飛跡から予想されるマルチクラッドシート上のヒット位置から  $\pm 5.0 \text{ mm}$  以内にヒットがあるかどうか調べることで検出効率  $\epsilon$  を求めた.

$$\begin{aligned}\epsilon &= \frac{\text{予想される位置にヒットがあったイベント数}}{\text{選択した全イベント数}} \\ &= 99.3 \pm 0.4 \%\end{aligned}\tag{4.1}$$

但し誤差は統計誤差のみである.

次に同じイベントを使って, 再構成された飛跡から予想されるマルチクラッドシート上のヒットの位置と予想されるヒットから最も近いヒットの位置の残差分布をとった. この分布を正規分布関数でフィットし, 位置分解能を求めたところ,  $289 \pm 12 \mu\text{m}$ であった (図 4.9). 但し誤差は統計誤差のみである.

検出効率, 位置分解能, 共に本実験の要請を満たしている.

## 4.2 電子ビームテスト

SFT の電子の識別能力とエネルギー測定能力を調べるために, 前述の宇宙線測定で使用したプロトタイプ-I とは異なるプロトタイプ検出器 (以下プロトタイプ-II) を製作し, 高エネルギー加速器研究機構田無分室 (旧東京大学原子核研究所, 以下田無分室) にある電子シンクロトロンを使って, 電子ビームテストを行った. 表 4.1 に電子シンクロトロンの基本的な性能を挙げる.

### 4.2.1 プロトタイプ-II

プロトタイプ-II は 8 層のファイバーシートと 7 層の水標的の多層サンドイッチ構造を持つ. ファイバーシートはプロトタイプ-I と幅が異なる以外 ( $200 \text{ mm} \rightarrow 403 \text{ mm}$ ) は同じシートを使い, シートの検出器部

表 4.1: 電子シンクロトロンの基本性能.

エネルギー	繰り返し	ビームスピル
0.1 ~ 1.22 GeV	21.2 ~ 22.2 Hz	~ 3 ms

分には補強のために厚さ 1.0 mm の G10 を張った. 水標的は 1 層の大きさが 45.0 cm × 40.0 cm × 6.0 cm で, アルミ製の箱に水を充填したものを使用し, その表面にファイバーシートを接着する. プロトタイプ-II では全 8 層のファイバーシートのうち, 4 層目と 5 層目にはマルチクラッドファイバーのシートを使ったが, その他にはシングルクラッドファイバーのシートを使った. 実機とプロトタイプの比較を表 4.2 にまとめる.

プロトタイプ-II は使用する全ファイバーの本数が 9156 本で, 2635 本のプロトタイプ-I よりも増えるため, IIT の有効光電面 (直径 100 mm) を効率良く利用しなければ 1 本の IIT で全てのファイバーを読み出すことができない. そこで読み出し部分は, 総数 1148 本のシート (幅 403 mm) を 274 本 (幅 96 mm), 262 本 (92 mm), 242 本 (85 mm), 210 本 (74 mm), 160 本 (56 mm) となるよう 5 つの部分に分割し (図 4.10), それらを階段状 (以下バンドル) に固めた. 図 4.11 により詳しいバンドルの設計図を示す. プロトタイプ-II では 8 枚のシートを使ったので上下非対称なバンドルとなったが, 同じ設計の実機では 10 枚のシートを使うためバンドルは上下対称となる. バンドル表面はプロトタイプ-I と同様に研磨された. 表 4.2 に実機とプロトタイプ検出器の比較を示す.

表 4.2: 実機とプロトタイプ検出器の比較. プロトタイプ-I は宇宙線テストに使われた検出器, プロトタイプ-II は電子ビームテストに使われた検出器を表す.

	実機	プロトタイプ-I	プロトタイプ-II
水標的数	20 層	なし	7 層
シート数	20 層*	5 層 <sup>†</sup>	8 層 <sup>‡</sup>
粒子検出部分の面積	240cm × 240cm	40cm × 40cm	30cm × 30cm

#### 4.2.2 セットアップ

田無分室の  $\gamma$ 3 実験エリア内にプロトタイプ-II を設置した (図 4.12). トリガカウンタとして, 電子のエネルギー選択用の双極電磁石の直後に 1 つ, プロトタイプ-II の直前に 2 つ, 計 3 つのプラスチックシンチレーションカウンタを設置した. 電子がこれら 3 つのカウンタをすべて通過した時にトリガをかけた. 5 本の 550 mm × 130 mm × 80 mm のプラスチックシンチレータと 360 mm × 360 mm × 340 mm の鉛ガラスカウンタが, プロトタイプ内でのエネルギー損失測定のためプロトタイプ-II の後方に設置される. プロトタイプ-II の直前にアルミニウム板を設置することで, 電子シャワーを発生させ, その広がりを調べた. 典型的な電子事象を図 4.13 に示す.

#### 4.2.3 解析方法

解析方法は基本的に宇宙線テストと同じである. ただしプロトタイプ-II ではファイバーの位置較正のために全ファイバーを発光させず 11 本おきに発光させた. EL により発光させたファイバーの CCD

\* 全てマルチクラッドシート

<sup>†</sup> うち 4 層がシングルクラッドシート, 1 層がマルチクラッドシート

<sup>‡</sup> うち 6 層がシングルクラッドシート, 2 層がマルチクラッドシート

画像を図 4.14 に示す。EL で発光させたファイバーの中心位置を計算する方法はプロトタイプ-Iと同じである。次に発光させた各ファイバーの中心位置を 2 次曲線でフィットして仮想的なシートラインの位置を求める。最後にこの曲線に沿ってファイバーの本数で等分し、残りのファイバーの中心位置を内挿した。

#### 4.2.4 測定結果

電子シャワーの発達を見るために各層のイベントあたりの平均ヒット数を求めた。ところが、電子事象のデータから得られるヒット数がモンテカルロシミュレーションよりも多いため、その理由を考察した。ヒット数が増える理由は以下のようなことがあるためと考えられる。

1. 電子シンクロトロン内の電子の制動放射による低エネルギー  $\gamma$  や、エネルギー選択用双極電磁石により除かれた電子のうち実験室の壁で反跳し SCIFI シートをヒットする電子が考えられる。
2. コリメータやトリガカウンタで発生するプリシャワーイベント
3. マイクロチャンネルプレートで発生する光電子の後方散乱による疑似ヒット
4. クラスターの染み出しによる疑似ヒット
5. 室温上昇に伴うクラスターサイズの拡大

1. は、電子シンクロトロン内の電子の制動放射による低エネルギー  $\gamma$  や、エネルギー選択用双極電磁石により除かれた電子のうち実験室の壁で反跳し SCIFI シートをヒットする電子が考えられる。これらのヒットを除くために、各層におけるヒット位置の分布を正規分布関数とバックグラウンドに相当する定数の補正項を加えた関数でフィットした (図 4.15)。フィットの結果から、解析にはピークから  $\pm 3\sigma$  の範囲のヒットのみを使い、さらに各層の平均ヒット数を算出する際、 $\pm 3\sigma$  領域内に含まれる定数項分を差し引いた。

2. は電子がコリメータやトリガカウンタで反応し、プロトタイプに到達する前にシャワーが発生した事象を表す。今回の解析では 1 層目のヒット数が 0 または 1 ヒットのみイベントを使うことで、プリシャワーイベントを除去した。

3. は後段 IIT 内のマイクロチャンネルプレート (以下 MCP) のチャンネルの入口で後方散乱を受けた光電子が別のチャンネルへ入り発生した疑似ヒットのことである。これをサテライトヒットと呼ぶ。散乱された光電子は付近のチャンネルにランダムに入るため、サテライトヒットは実際のヒットの周囲に等方的に発生することがわかっている。サテライトヒットが発生する確率は 20 % ほどだが、このうち実際のヒットと誤認する確率は 7 % 程度ある。MCP 内で発生するためサテライトヒットの除去は難しく、今回の解析ではモンテカルロシミュレーションの結果にサテライトヒットの誤認確率を加えた 1.07 をかけた。

4. は CCD 画像上で隣り合ったファイバーシートにまたがる大きさのクラスターが発生した場合に起こる。これが実空間上では 6 cm 離れた位置に疑似ヒットを発生させる。これをビッグクラスターヒットと呼ぶ。この疑似ヒットが発生する確率は 20 % ある [30]。CCD 画像上で隣り合った 2 つのシートの両方に実際のヒットがあった場合、ビッグクラスターヒットと簡単には区別できない。今回の解析ではモンテカルロシミュレーションの結果にビッグクラスターヒットの発生確率を加えた 1.2 をかけた。

5. は CCD カメラと Flash ADC の特性により温度が高い程クラスターが大きくなるため、4. のビッグクラスターヒット数が増加し、さらに温度が低い場合に検出されなかったクラスターも検出されるようになる。これにより全体のヒット数が増加する。今回の解析では温度依存性の補正は行っていないが、現在、CCD カメラと Flash ADC それぞれについて温度依存性の測定が行われている。

以上の補正を行なった測定データとモンテカルロシミュレーションの結果を図 4.16 に示す。ミュオンの場合、全ての層にわたりヒット数は一定であるが、電子の場合は下流の層に行く程ヒット数が増加する。またイベント当りの 6 ~ 8 層目のヒット数の和の分布を図 4.17 に示す。これより例えば 6 ~ 8 層で 5 ヒット以上を要求するならば、電子収集率は 78 % で、その時のミュオンの混入率は 31 % となる。実機では 20 層のシートを使い電子シャワーの発達を詳しく見ることができると、電子識別率は

向上すると期待される。

ヒット数とエネルギー損失の相関を図 4.18 に示す。プロトタイプ-II におけるエネルギー損失  $E_{sf}^{rec}$  は、

$$E_{sf}^{rec} = E_{beam} - E_{veto}^{rec} - E_{LG}^{rec} \quad (4.2)$$

より再構成される。ここで  $E_{beam}$  は電子ビームのエネルギーで  $E_{veto}^{rec}$ ,  $E_{LG}^{rec}$  はそれぞれプリシャワーカウンタ、鉛ガラスカウンタで再構成されたエネルギー損失である。式 (4.2) を用いると、1 GeV 電子を入射した時のプロトタイプ-II 内での平均エネルギー損失は  $294.1 \pm 4.7$  MeV となった。但し誤差は統計のみである。ヒット数とプロトタイプ内のエネルギー損失の間には直線関係があるので、エネルギー損失当りのヒット数分布をとり正規分布関数でフィットした (図 4.19)。その結果、平均値は 44.1 hit/GeV であり、分布の広がりからエネルギー分解能は  $15.0\%/\sqrt{E}$  [GeV] であった。

### 4.3 宇宙線テストと電子ビームテストのまとめ

プロトタイプ SFT を製作し、宇宙線テストと電子ビームテストを行った。宇宙線テストの結果、マルチクラッドシートによる最小電離損失粒子の検出効率  $99.3 \pm 0.4\%$ 、位置分解能は  $289 \pm 12 \mu\text{m}$  であった。電子ビームテストの結果、電子に対するエネルギー分解能は  $15.0\%/\sqrt{E}$  [GeV] であった。また SFT 内のヒット数を用いて電子識別ができることがわかった。

### 4.4 今後の予定

今後行うべきこととして、前述の疑似ヒット除去の研究がある。ビッグクラスタヒット除去の方法として、ヒットファイバーに含まれる ADC 値がある閾値より大きいと要求すると、実際のヒットを落すこと無く 5% 程度まで除去できるという予備的な結果を得ていて、有効な手段と期待される。複数の飛跡を区別するアルゴリズムとしてハフ (Hough) 変換を利用したものがある。これを使うことで、ノイズと荷電粒子の飛跡を区別できる。さらにファイバーの位置構成法の改善が考えられる。今回の解析で CCD 画像上のファイバーの半径を一定としたが、CCD 画像は端にゆがみを持つため、ファイバーの半径を位置により変える必要がある。

モンテカルロシミュレーションにおいて、シート内の 1 本 1 本のファイバーの位置、シンチレーション光の減衰、CCD 画像のクラスタサイズを導入する必要がある。そしてシミュレーションの結果にデータ解析で使用したプログラムを適用し、解析をやり直す必要がある。

これまで  $\mu$  粒子や電子に対する SFT の応答を調べてきたので、次は  $\pi$  中間子や陽子に対する SFT の検出能力の測定を目的とした  $\pi/p$  ビームテストを 1998 年 3 月に行う予定である。

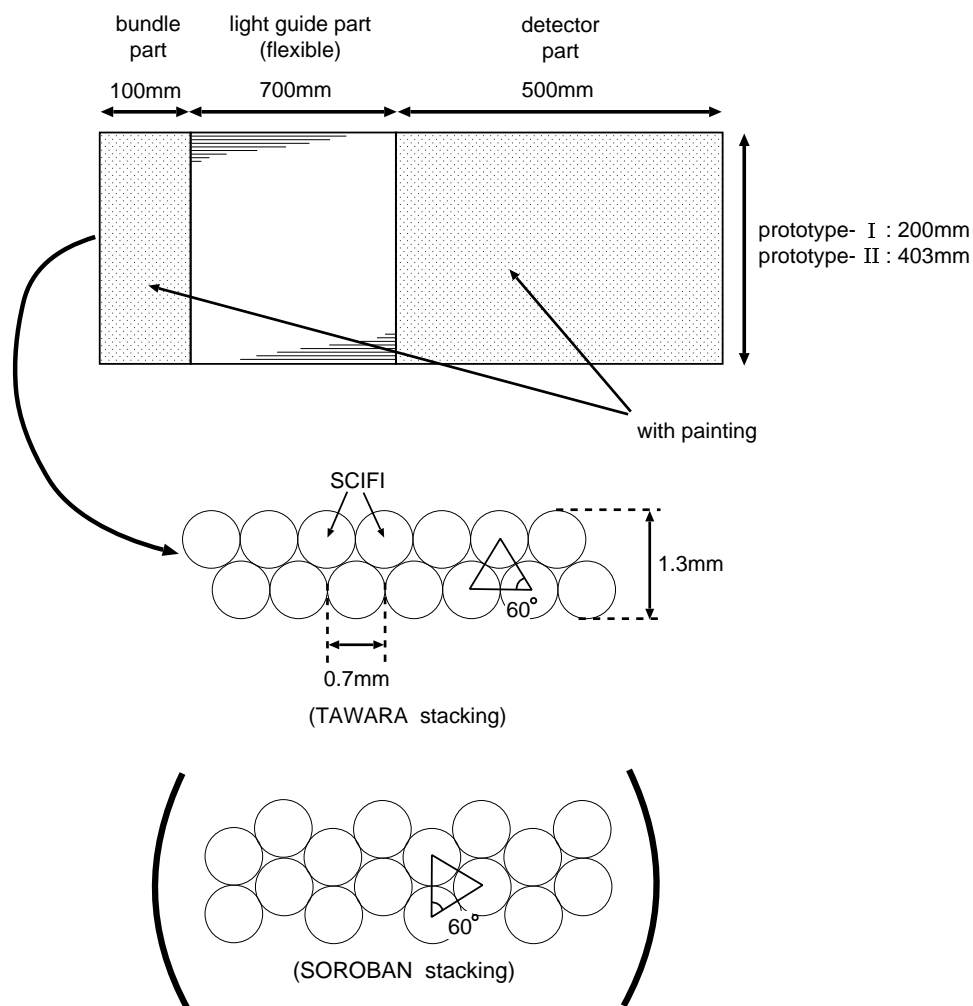


図 4.1: プロトタイプ検出器の製作に使用したシンチレーティングファイバーシート. シートは, 読み出し部分 (bundle part), ライトガイド部分, 粒子検出器部分の 3 つからなる. 読み出し部分と粒子検出器部分は SCIFI を直線状に並べてペイントで固定するが, ライトガイド部分には自由に曲げることができるようにペイントを行わない. 下図はシートの断面図で, できるだけすき間無く SCIFI を並べるため, SCIFI の中心を結ぶ線が正三角形を描くように積む. このような積み方には「俵積み」と「算盤積み」があるが, 本実験では「俵積み」を採用した.

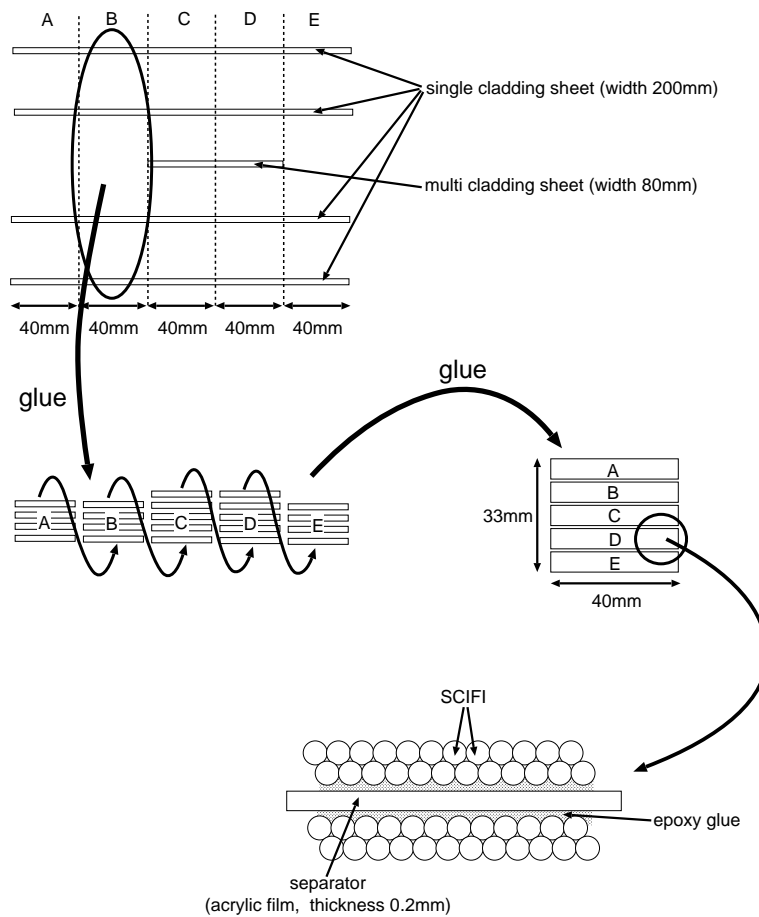


図 4.2: プロトタイプ-I の読み出し部分の製作. 幅 200 mm の 4 枚のシングルクラッドシートと幅 80 mm の 1 枚のマルチクラッドシートを用いた. 200 mm 幅のシートは 5 等分, 80 mm 幅のシートは 2 等分し, 図のように積み重ねてブロック状に束ねた (バンドル). CCD 画像上で SCIFI シートを分離するために 200  $\mu\text{m}$  厚のアクリルフィルムを挟み, エポキシ系接着材で固定した. 最後にバンドル表面を均一にするためダイヤモンドカッターをつけた旋盤により研磨した.

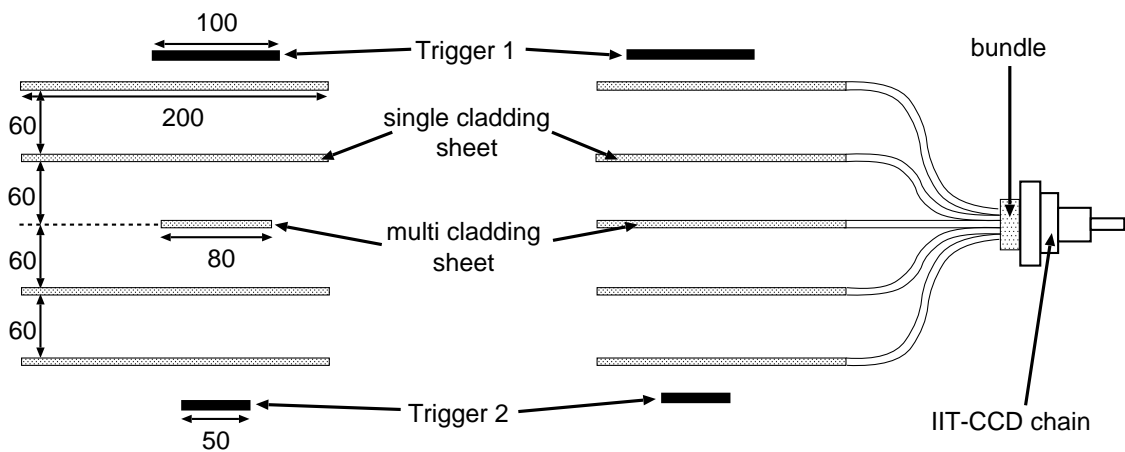


図 4.3: 宇宙線測定の設定アップ図. プロトタイプ-I の上方に 100 mm  $\times$  100 mm の, 下方に 50 mm  $\times$  50 mm のプラスチックシンチレーションカウンターを設置し, 両方を荷電粒子が通過した時にトリガがかかるよう回路を組んだ.



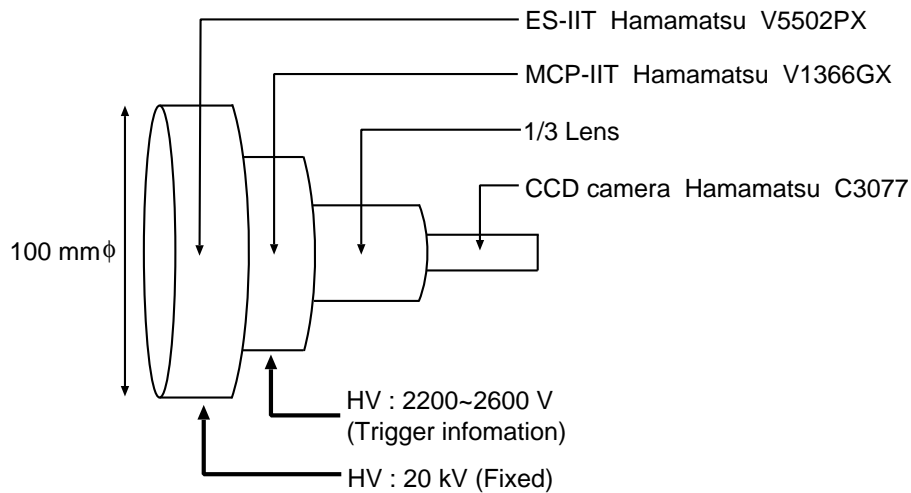


図 4.4: IIT-CCD チェーン. 前段 IIT, 後段 IIT, 光学レンズ, CCD カメラよりなる. 前段 IIT には広範囲の画像を得るために直径  $100\text{ mm}$  の光電面を持つ大口径静電型 IIT を用いる. ここで電子レンズの効果により  $100\text{ mm}\phi$  の 画像は  $23\text{ mm}\phi$  まで縮小される. 後段 IIT には位置情報を保ったまま高利得を得るマイクロチャンネルプレートを持つ IIT を用いる. 光学レンズは画像のサイズを  $1/3$  に縮小し, CCD カメラの撮像面積内 ( $12.8\text{ mm} \times 9.6\text{ mm}$ ) に画像が収まるようにする. CCD カメラは  $768 \times 493$  画素を持ち, 画像の中心付近の 1 画素は IIT 光電面上で  $165\text{ }\mu\text{m} \times 200\text{ }\mu\text{m}$  に対応する. IIT の構造に関しては Appendix B 参照.

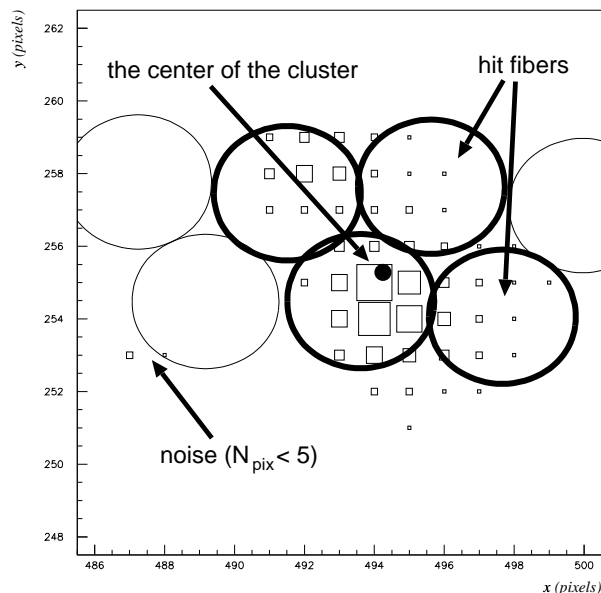


図 4.5: クラスタとヒット同定法. 図は典型的な CCD 画像の拡大図で, 横軸, 縦軸は画素を単位とする. CCD 画像にクラスタ化を適用した結果得られる重心を  $\bullet$  で表す. 左にあるクラスタは  $N_{pix} \geq 5$  を満たさないため, ノイズと認識される. 図中の円はバンドル上のファイバーを表し, 太線のファイバーはヒットファイバーを表す.

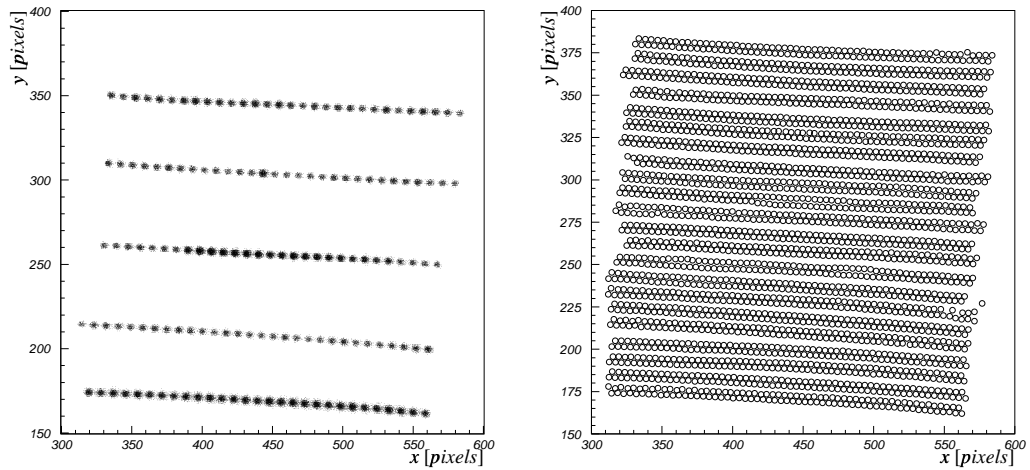


図 4.6: プロトタイプ-I の位置較正データ. 左図は EL を使って 1 本おきにファイバーを発光させたデータで, 100 イベントの画像を積分した. これにクラスタ化を適用し, クラスタの重心を対応するファイバーのバンドル上での位置とした. 右図に全 2635 本のファイバーの位置を示す.

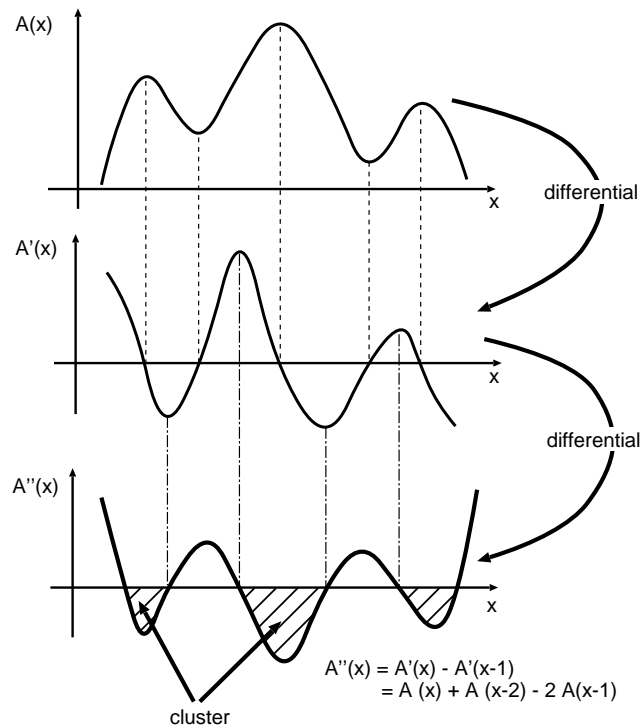


図 4.7: ファイバーの位置の計算. 簡単のため, 1 次元分布で説明する. ADC 分布  $A(x)$  の二階微分は  $A''(x) = A(x) + A(x-2) - 2A(x-1)$  と書ける. この値が負の範囲をクラスタと定義すると, 複数のファイバーが 1 つの像を結んだ場合でも正しくファイバー位置を認識できる.

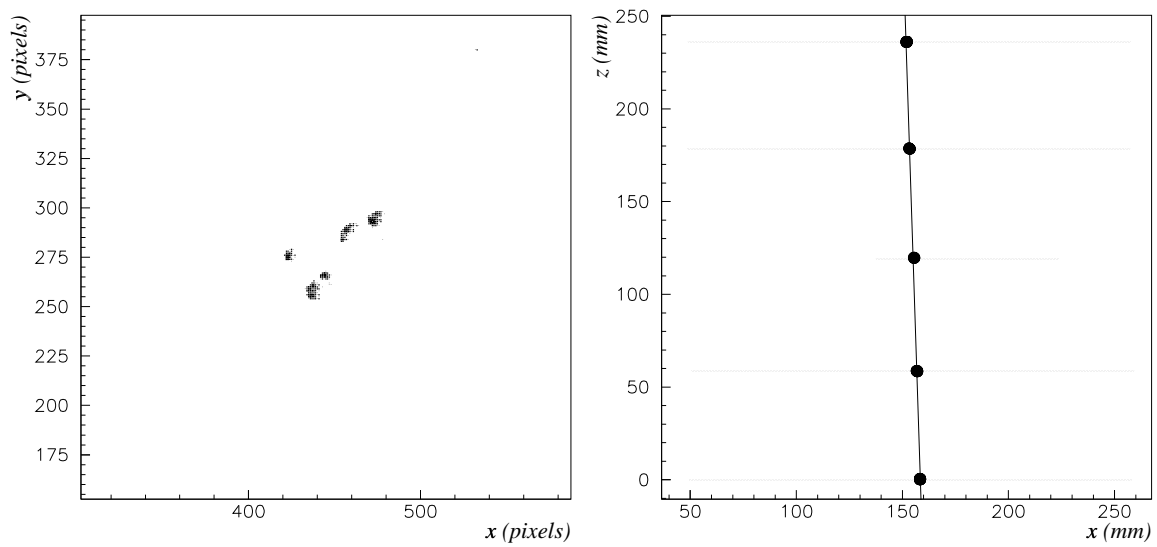


図 4.8: 典型的な宇宙線事象. 左図は CCD 画像の拡大図で, 横軸, 縦軸は画素を単位とする. 右図は左図に対応する実空間上のヒットの位置分布で, グラフの上方が鉛直上方を表す. 縦軸, 横軸ともに単位は  $mm$  で, 水平な直線はシートを, プロットはヒットの位置を, 斜めの線は再構成された飛跡を表す.

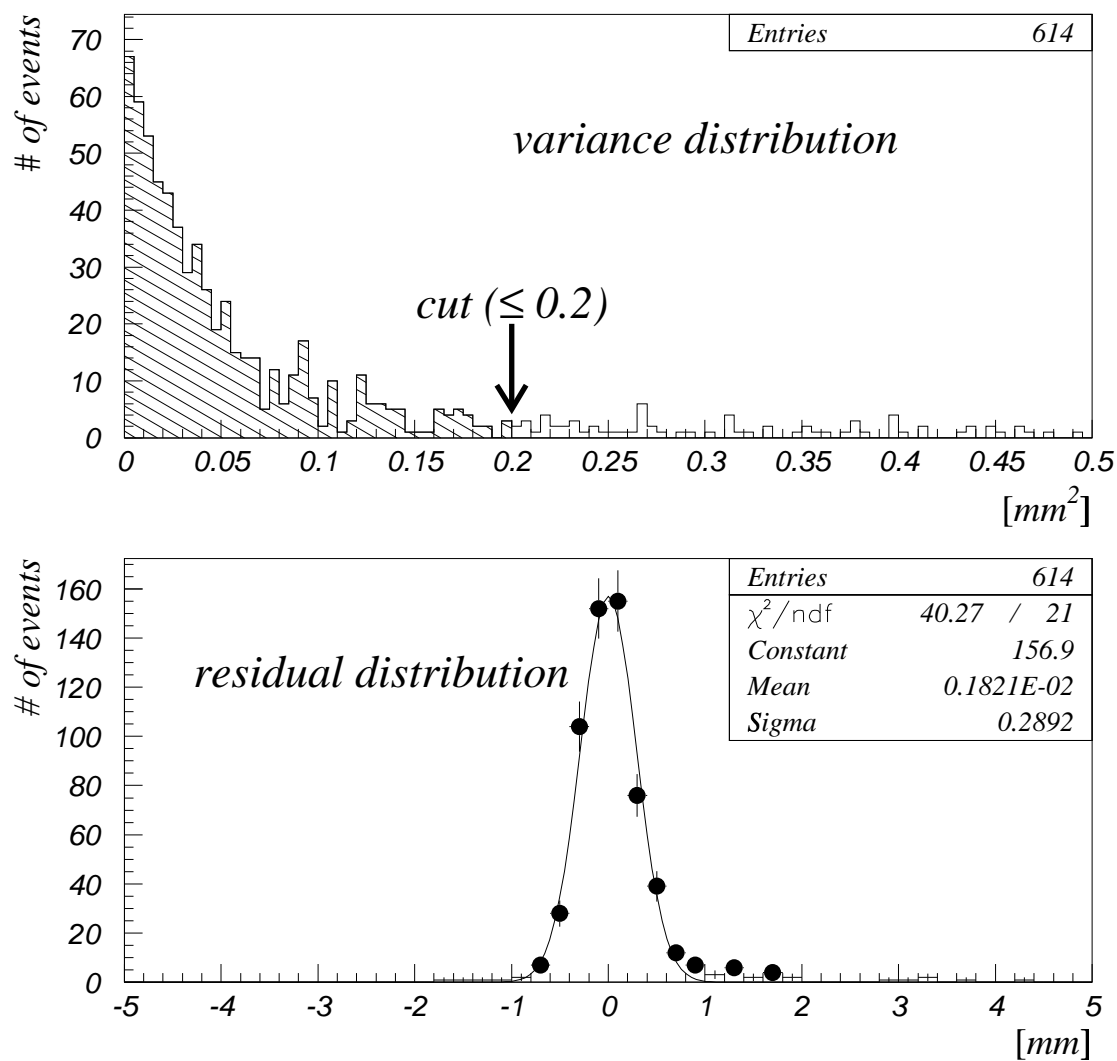


図 4.9: マルチクラッドシートの位置分解能. 上図は再構成された飛跡の分散の分布図である. 検出効率や位置分解能を算出する際, 分散が 0.2 以下である飛跡をもつイベントを使うことで, ノイズのないイベントを選んだ. 下図は選ばれたイベントについて, 飛跡から予想されるヒット位置とそこから最も近い実際のヒット位置の残差分布を示す. これに正規分布フィットを行い, 位置分解能を算出した. その結果  $289 \pm 12 \mu\text{m}$ であった.

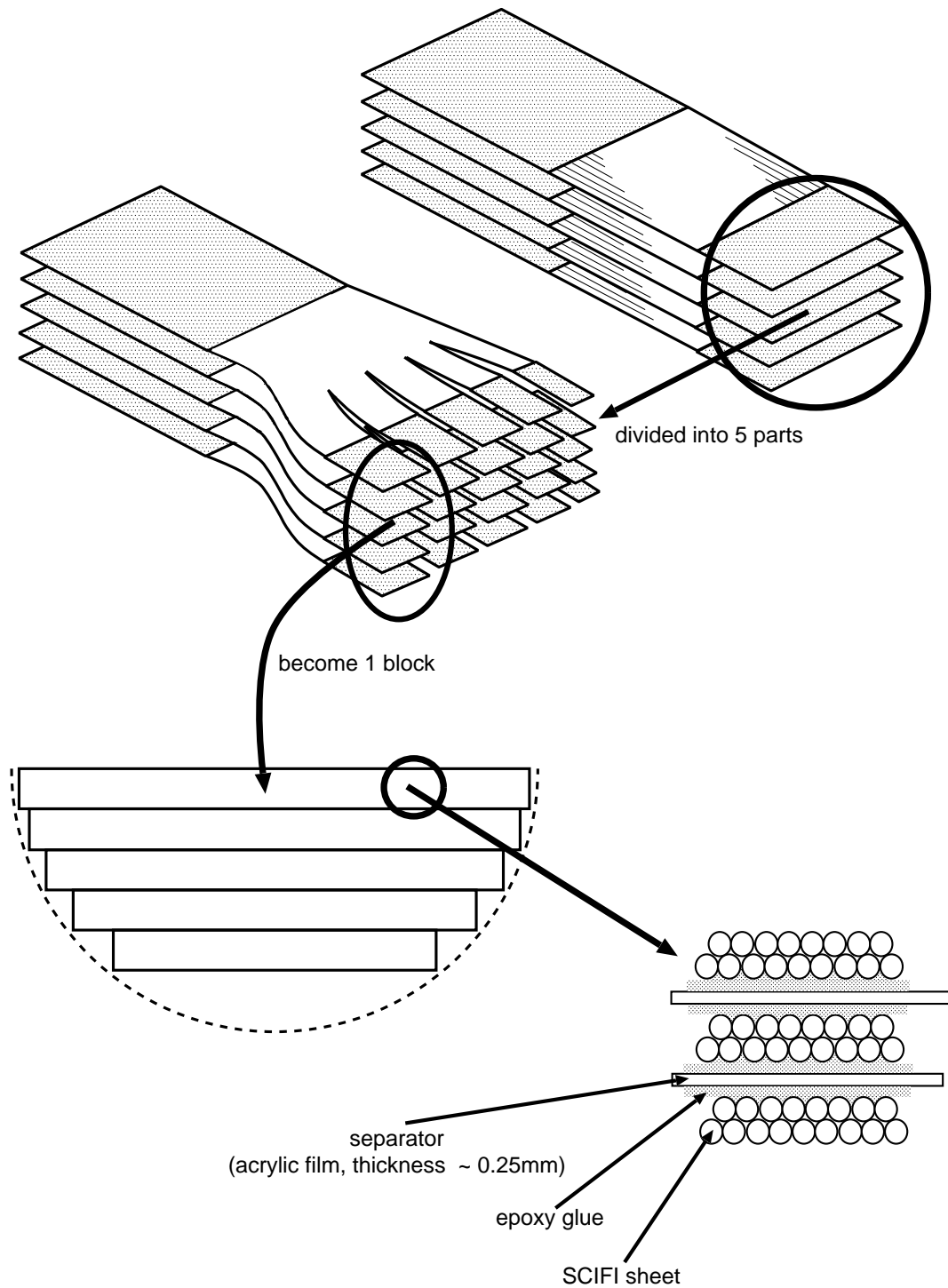


図 4.10: プロトタイプ-II の読み出し部分の製作. ファイバーシートの読み出し側を 5 つに分割し, それぞれ同じ幅の部分を接着しブロック状にする. こうしてできた 5 つの幅の異なるブロックを階段上に積み上げてバンドルの半分が完成する. このような構造により IIT の光電面を有効に利用することができる.

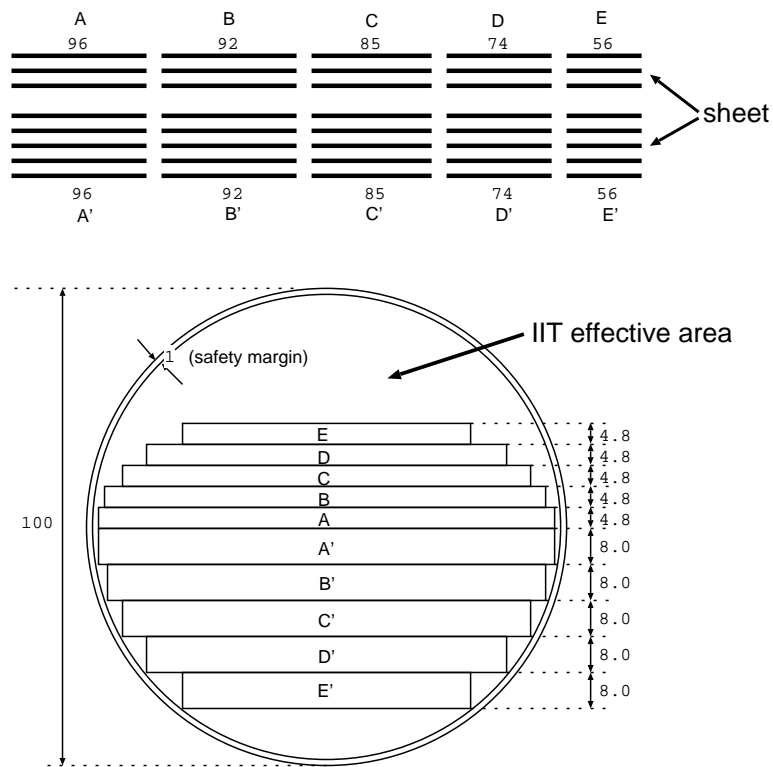


図 4.11: プロトタイプ-II の読み出し部分. 図中の数字の単位は  $mm$  である. 上下非対称な形をしているのは, バンドルの下半分 (A' ~ E') を実機と同じ構造にするためである.

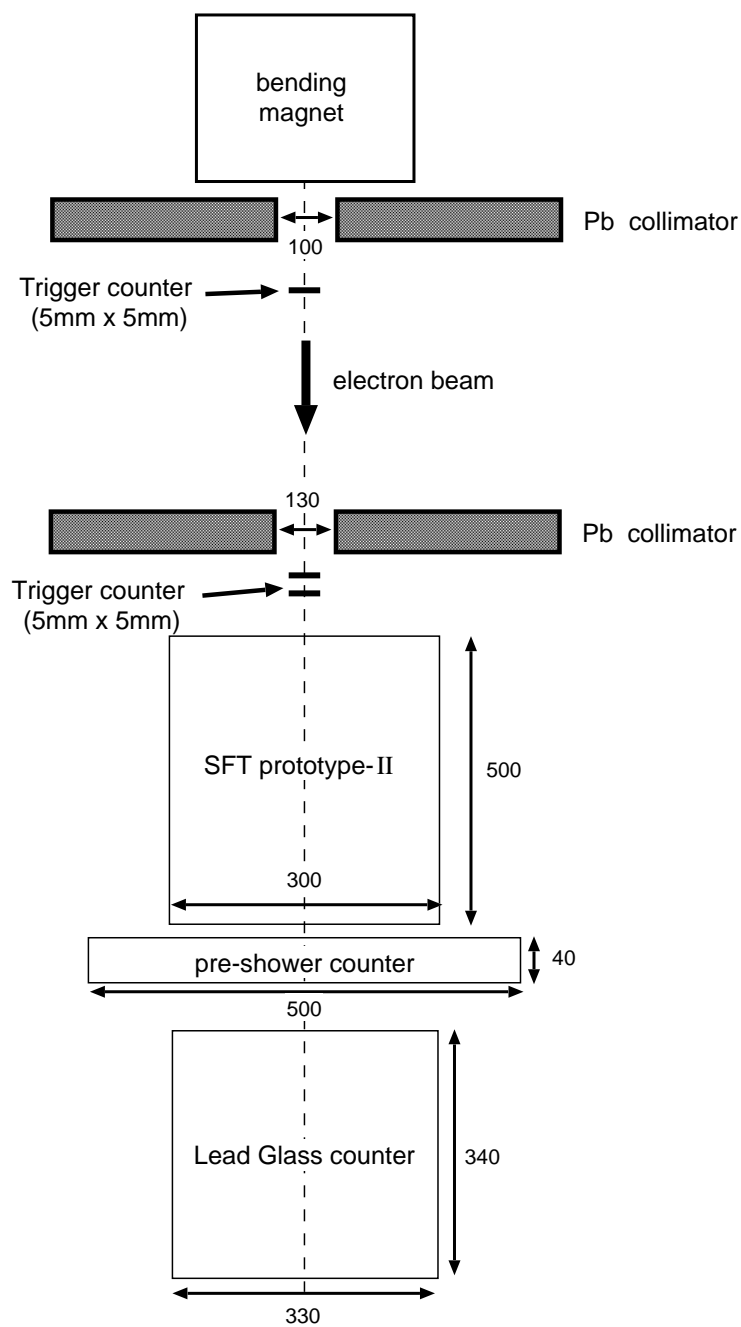


図 4.12: 電子ビームテストのセットアップ図 (平面図). トリガカウンタとして3つのプラスチックシンチレーションカウンタを使用し、すべてにヒットがあった場合にトリガをかける. プロトタイプ-II 内でのエネルギー損失をイベント毎に測定するために、後方にプリシャワーカウンタと鉛ガラスカウンタを設置した.

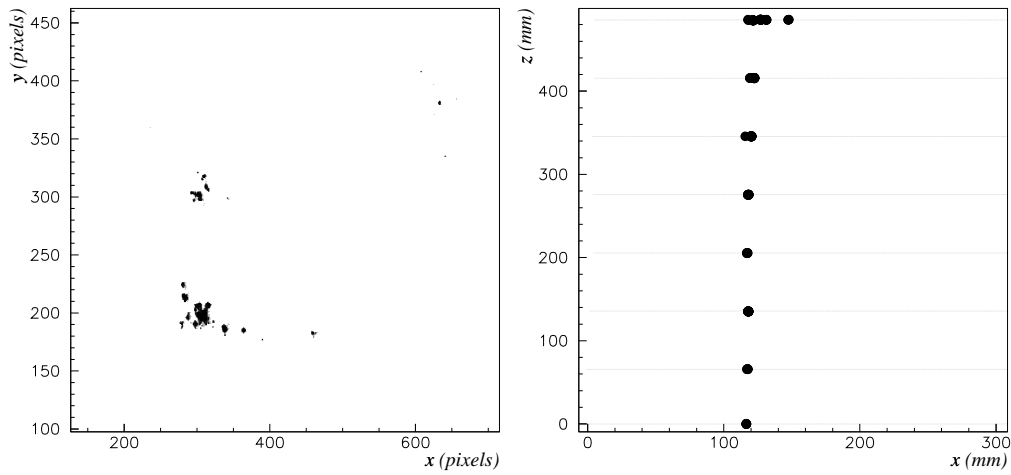


図 4.13: 典型的な電子 (1 GeV) シャワーイベント. 1.0 GeV の電子をプロトタイプ-II に入射させた時のイベント像で, 左図は CCD 画像の拡大図, 右図は実空間におけるヒットの位置を表す. 図の下方から電子ビームが入射される.

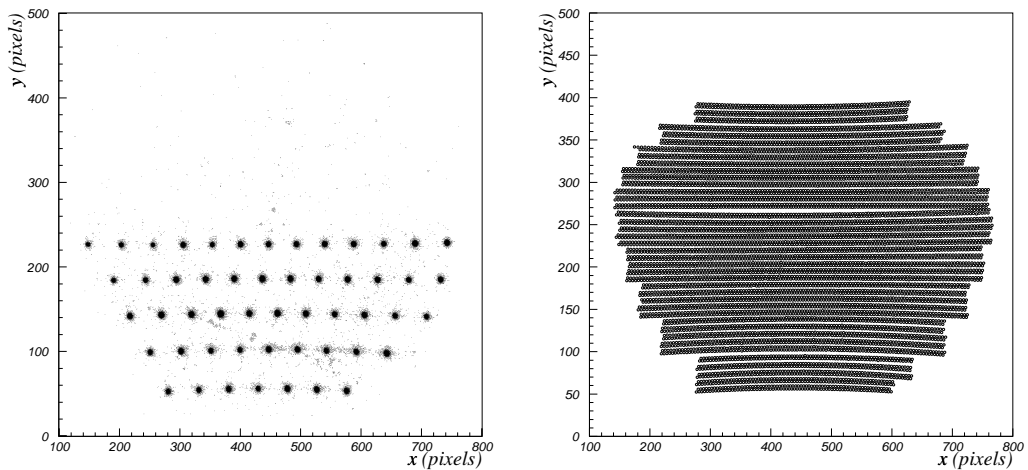


図 4.14: プロトタイプ-II の位置較正用のデータ. 左図はバンドルの下半分のファイバーのみを 11 本おきに EL により発光させた時の 300 イベントの積分画像. プロトタイプ-II には 916 本のファイバーが含まれる. 右図が最終的に計算された全ファイバーの位置である.



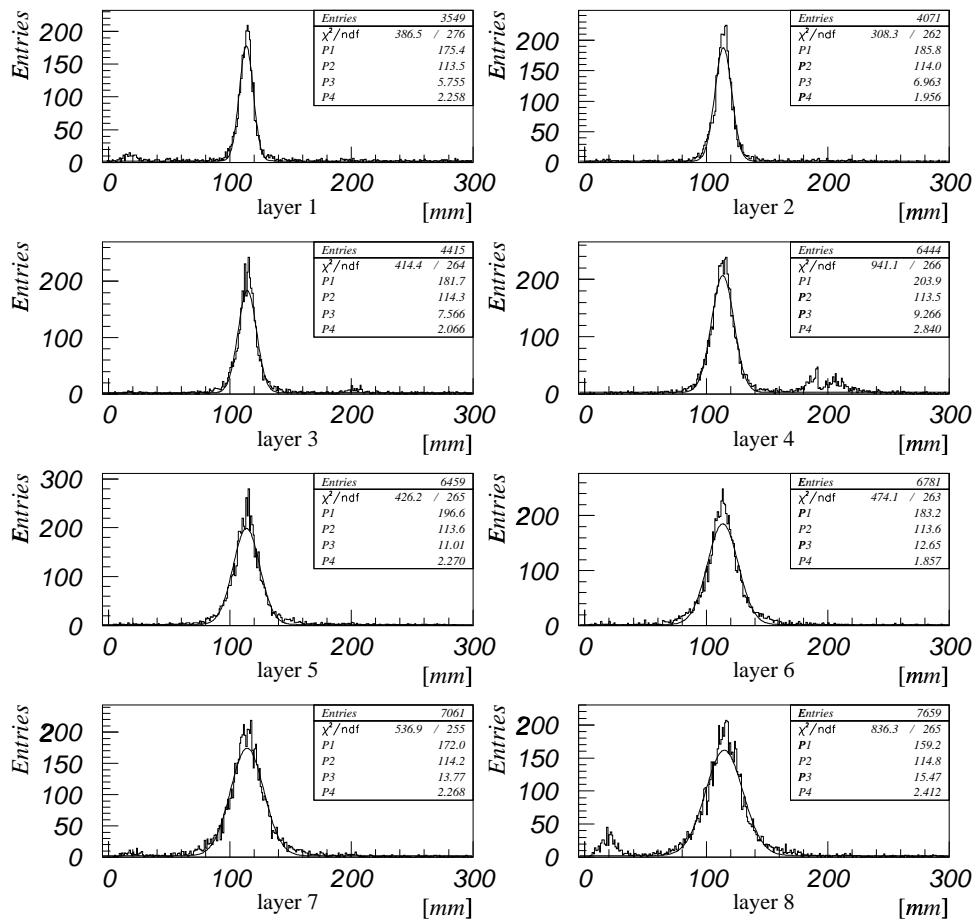


図 4.15: 電子事象による各層のヒット位置分布. 上流から順に layer 1, layer 2, ... と並んでいる. それぞれの層に正規分布関数に定数の補正項を加えた関数,  $P1 \exp\left[-\frac{(x - P2)^2}{2 \cdot P3^2}\right] + P4$  によりフィットした結果を示す.

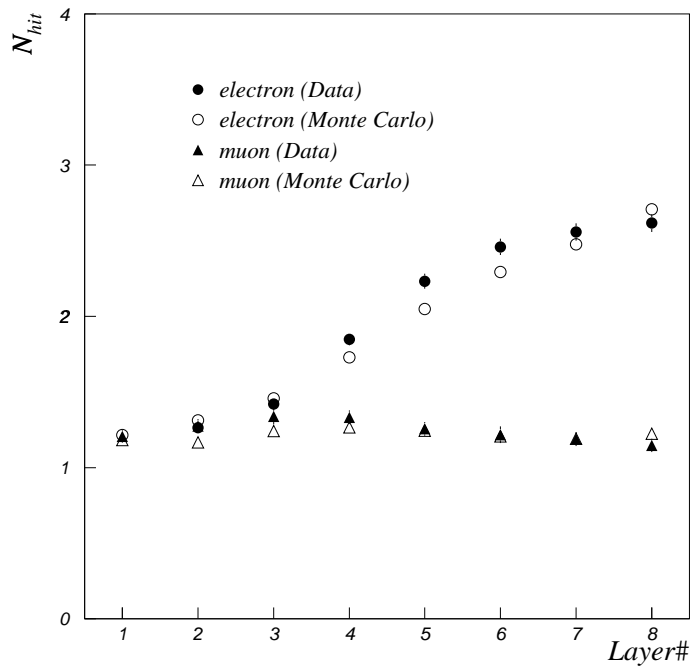


図 4.16: 各層当りのヒット数分布. 電子ビーム, 宇宙線テストの結果を挙げる. モンテカルロシミュレーションの結果には各層の検出効率の重みがかけている.

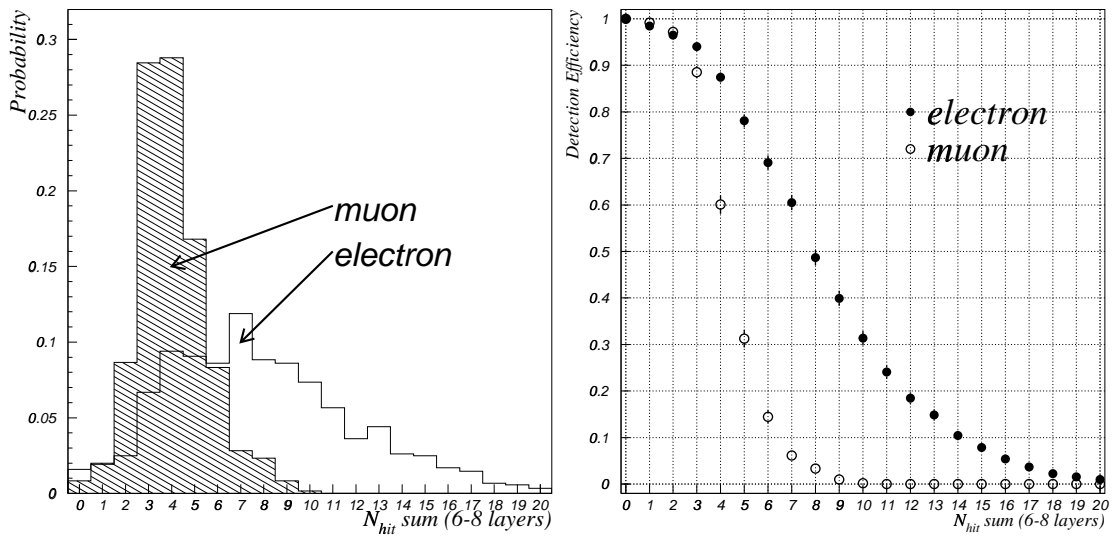


図 4.17: 6~8層のヒット数分布と電子収集率とミュオン混入率.

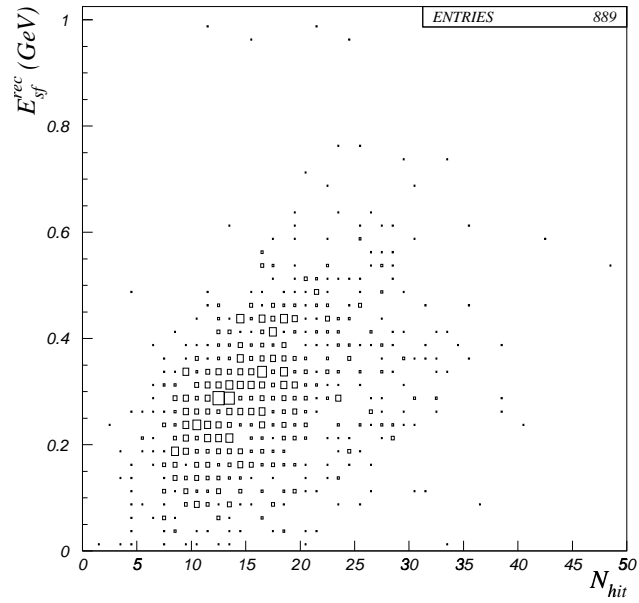


図 4.18: 電子事象のヒット数とエネルギー損失の相関.

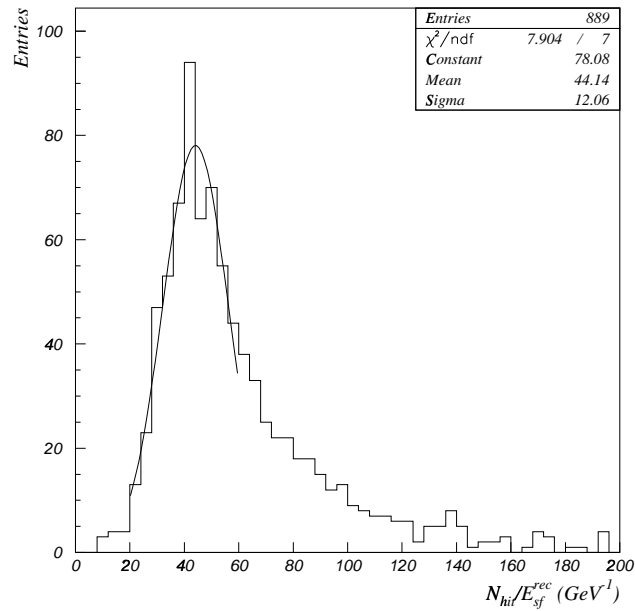


図 4.19: 電子事象によるエネルギー当りのヒット数分布. 電子 1 GeV 当たりのヒット数は 44.1 hit/GeV であった. またこの分布のピーク付近を正規分布関数でフィットした結果より, エネルギー分解能は  $15.0\%/\sqrt{E}$  [GeV] であった.

## 第5章 結論

本論文において「つくば-神岡間長基線ニュートリノ振動実験」で使用するシンチレーティングファイバーの経年変化の測定を行った。そして、光量、減衰長、寿命の全ての面でこれまでのものより優れた SCIFI を Kuraray 社と共同開発し、SCSF-78M 改良 11 を得た。この SCIFI を  $15(20)^{\circ}\text{C}$  空気中で保管、使用すれば光量が 10% 減衰するのに  $3915 \pm 1924$  日 ( $2064 \pm 1005$  日) と期待され、準備期間を含めると 5 年に及ぶ本実験期間中、十分な光量が得られることがわかった。今後より精度の良い結果を得るために、より低い温度での経年変化の測定結果が待たれる。また今回の測定から SCIFI の劣化を遅れさせる方法として、窒素内で保管、使用することやアルミ膜で SCIFI を覆うことが考えられる。これらの方法により、SCIFI を使った長期に渡る実験が可能となるだろう。現在、実機で使用するシートの製作が神戸大学で行われている。SCIFI の劣化の原因として、少なくとも高温、酸素、メカニカルストレスがあることがわかったので、製作工程ではこれらの影響に十分注意している。現在実際に使うシートの約半分の製作を終え、1999 年開始の本実験に向けて着々と準備進行中である。

次に本実験の使用を決定した SCIFI を用いてプロトタイプ検出器を製作した。このプロトタイプ検出器を使って、宇宙線によりマルチクラッドシートによる検出効率と位置分解能の測定を行った。その結果、検出効率は  $99.3 \pm 0.4\%$ 、位置分解能は  $289 \pm 12 \mu\text{m}$  であった。さらに電子ビームにより電子同定テストと電子に対するエネルギー分解能の測定を行った。その結果、検出器内のヒット数から電子とミューオンを識別できることがわかり、もっともよい条件を設定した場合、電子の収集率は 78% でその時のミューオンの混入率は 31% であった。また電子に対するエネルギー分解能は  $15.0\%/\sqrt{E} [\text{GeV}]$  であった。実機ではファイバーシートを 20 層使用するので、ノイズ除去率が向上し、これに伴い、電子識別率とエネルギー分解能は共に向上すると期待される。

## Appendix A 自動酸化反応

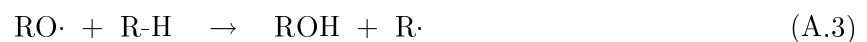
プラスチックの劣化原因の一つ [31]. プラスチックなどの高分子にメカニカルストレスや紫外線を加えると酸素が付きやすくなり, ヒドロペルオキシドになる.



ヒドロペルオキシドは分解しやすく,



という平衡状態になる. できた遊離基 (free radical) \* は近くの弱い結合状態の水素を取り除く.



この状態の時に酸素が存在すると再びヒドロペルオキシドを生成する.



このように繰り返しヒドロペルオキシドが生成され, 高分子が崩れることで劣化が進んでいく.

---

\* 不対電子をもつ分子の総称. 化学反応や光分解反応などの中間体としてつくられ, 一般に反応性が高く不安定である.

# Appendix B イメージインテンシファイアー チューブ

イメージインテンシファイアーチューブ (Image Intensifier Tube, 以下 IIT) は光検出器の 1 種で, 様々な種類が存在するが基本原理は同じである [32]. まず光の像が入力窓より投射され, 光電面で電子に変換される. 電子は高真空チューブ内で印加された直流電圧により加速され, 光電面とは反対側の蛍光面で再び光に変換される. こうして放出された光の像は元の像の形と同じであるが, その光量は増幅されている. IIT は構造から第 1, 第 2, 第 3 世代の 3 種類に区分され, それぞれの長所, 短所により使い分けされる.

## B.1 第 1 世代イメージインテンシファイアー : 静電型

真空チューブ内においてただ 1 つの電位差により電子を加速させる IIT. 利得は 10 倍程度であるが, 高解像度, 広いダイナミックレンジ (明暗の比率の再現能力), 低雑音を特徴とする. 焦点を合わせる方法として次の 2 つがある.

### 1. 近接焦点型二極管

光電面と蛍光面を近接させて配置し, 平行電場により電子を加速させる (図 B.1 の左図).

### 2. 倒立型二極管

光電面から発射された電子を蛍光面上に焦点を結ばせる電子レンズを使用する (図 B.1 の右図). 電子レンズの使い方により, 像を縮小または拡大することができる. 得られる画像は元の画像が反転したものである.

## B.2 第 2 世代イメージインテンシファイアー : MCP 型

真空チューブ内にマイクロチャンネルプレート (Micro Channel Plate, 以下 MCP) を挿入することで, 電子のエネルギーだけでなく, その数も増倍できる IIT. MCP は多数の小さな穴 (典型的には直径  $10\mu\text{m}$ ) を含む厚さ 1 mm 程度の導電性のガラス板で, 穴の壁に高電圧をかけることで継続的な 2 次電子を放出する (図 B.2). 画像の解像度とダイナミックレンジに関しては第 1 世代 IIT に劣るが,  $10^4$  程度の利得を得ることができる. MCP を多段にすることでより高い利得を得る IIT もある.

## B.3 第 3 世代イメージインテンシファイアー : ガリウム砒素光電面型

第 3 世代の IIT は, 一般的なマルチアルカリ光電面の代わりにガリウム砒素の光電面と近接焦点型 MCP-IIT からなる. 利点は赤色光及び近赤外線に対する感度が高いことであるが, その反面, 熱雑音の影響を受けやすい. また紫外線に対しては使用不適切である.

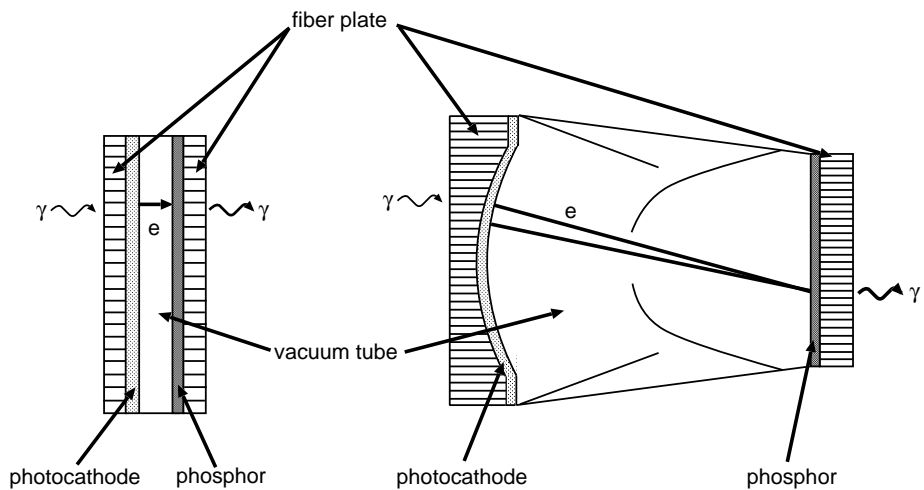


図 B.1: 近接焦点型 IIT と倒立型 IIT. 図に第 1 世代 IIT を示す. 左図は光電面と蛍光面が近接した構造を持つ近接焦点型 IIT, 右図は電子レンズにより蛍光面に結像させる倒立型 IIT. 図中のファイバー窓 (fiber plate) は入射光や放出光の向きを決定するために使われる. これらの真空チューブ内にマイクロチャンネルプレートを挿入した第 2 世代 IIT も存在する.

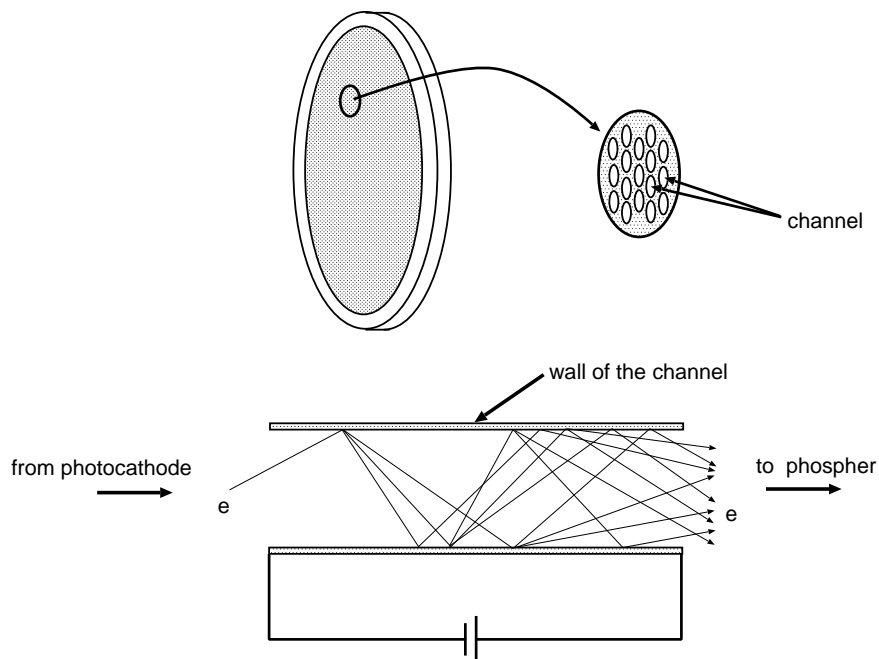


図 B.2: マイクロチャンネルプレート. 厚さ 1 mm 程度のガラス製の板に多数の小さな穴 (チャンネル) が空いた構造を持つ. 電子がチャンネル壁で多重生成を起こし,  $10^4$  程度の利得を得ることができる.

# 謝辞

初めに、「つくば-神岡間長基線ニュートリノ振動実験」に参加する機会を下さいました野崎 光昭教授に深く感謝します。

高エネルギー加速器研究機構の中村 健蔵教授, 西川 公一郎教授には本実験のグループ責任者として御多忙の中, 御指導して頂きました。

直接, 私を指導して下さいました神戸大学の原 俊雄助教授, 青木 茂樹助教授, 鈴木 州助手には, 私が論文を書くにあたり抱えた様々な問題を一緒に考えて下さいました。また不在がちな私のことをいろいろと気遣って下さいましてありがとうございました。

神戸大学の武田 廣教授には研究に関する数々の御助言を頂き, さらに講義や論文講究の時には物理に対する考え方を教えて頂きました。

高エネルギー加速器研究機構の作田 誠助教授, 峰 俊一博士には, SCIFI についての研究に御協力を頂き感謝します。宇宙線測定や電子ビームテストの時には右往左往する私を中心となって引っ張って下さいました。本当にありがとうございます。

東京大学宇宙線研究所の戸塚 洋二教授をはじめとするスーパーカミオカンデ実験の皆様には, ミーティングなどの席で様々な御助言を頂きました。

高エネルギー加速器研究機構の石井 孝信助手, 大山 雄一助手, 石田 卓助手, 小林 隆助手には, 研究で行き詰まった私に的確な御助言を頂きました。また電子ビームテストの時にもお世話になりました。

東北大学の衛藤 雅之さんには, SCIFI の光量測定や SFT を使った測定の時には様々な助言のみならず, 一緒に測定を行って下さいました。本当にありがとうございました。

新治 修様をはじめとする Kuraray 社の開発部の方には, 酸素対策ファイバーの開発に当たりお世話になりました。ありがとうございます。

神戸大学の北村 雅裕君, 東京理科大学の門脇 徹人君, Stony Brook 大学の Eric Sharkey さんには, 宇宙線測定や電子ビームテストなど SFT に関する様々な問題に共に取り組んで頂きまして感謝します。

東京大学の酒井 敦博士, 稲垣 隆宏君, 東北大学の丸山 和純さん, 神戸大学の小浜 光洋さん, 新潟大学の中村 雅利さん, 剣持 範君, 岡山大学の梅田 智幸君, 東京理科大学の稲田 具貞君には研究活動だけではなく, 高エネルギー研究所での日常生活にまで気を遣って頂きました。

経年変化測定を手伝ってくれた神戸大学の田代 和也君, 久米 剛生君, 佐藤 幸一君, 岩下 大器君, 恩地 正裕君, 竹内 秀樹君には感謝の念が絶えません。本当にありがとうございました。

最後になりましたが, 修士課程終了まで私のわがままにつきあってくれた家族に感謝します。



## 参考文献

- [1] F. Halzen and A. D. Martin, “QUARKS & LEPTONS”.
- [2] Loredano, Annals of the New York Academy of Science, **571** 601 (1989).
- [3] K. Assamagan *et al.*, Phys. Rev. **D 53**, 6065 (1996).
- [4] D. Buskulic *et al.*, Phys. Lett. **B 349**, 585 (1995).
- [5] Y. Totsuka, “NEUTRINO PHYSICS (NON ACCELERATOR)”, presented at the Lepton Photon Symposium 1997, Hamburg, July, 1997.
- [6] Y. Fukuda *et al.*, Phys. Lett. **B 335**, 237 (1994).
- [7] R. Becker-Szendy *et al.*, Phys. Rev. **D 46**, 3720 (1992).
- [8] K. Daum *et al.*, Z. Phys. **C 66**, 417 (1995).
- [9] M. Aglietta *et al.*, Europhys. Lett. **8**, 611 (1989).
- [10] E. Eskut *et al.*, “THE CHORUS EXPERIMENT TO SEARCH FOR  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  OSCILLATION”, CERN-PPE/97-33 (1997).
- [11] J. Altegoer *et al.*, “THE NOMAD EXPERIMENT AT THE CERN SPS”, CERN-PPE/97-059 (1997).
- [12] E. Ables *et al.*, “P-875:A Long-baseline Neutrino Oscillation Experiment at Fermilab” (1995).
- [13] ICARUS collaboration, “ICARUS : a proposal for the Gran Sasso Laboratory”, Proceedings of the INFN/AE-85/7 (1985).
- [14] K. Nishikawa *et al.*, “Proposal for a Long Baseline Neutrino Oscillation experiment, using KEK-PS and Super-Kamiokande” (1995).
- [15] 小浜 光洋, 神戸大学自然科学研究科修士論文 (1997).
- [16] 稲垣 隆宏, 東京大学理学系研究科修士論文 (1998).
- [17] S. Kasuga *et al.*, Phys. Lett. **B 374**, 238 (1996).
- [18] 梅田 智幸, 岡山大学理学研究科修士論文 (1998).
- [19] 剣持 範, 新潟大学自然科学研究科修士論文 (1998).
- [20] H. Leutz, Nucl. Instr. and Meth. **A 364**, 422 (1995).
- [21] H. Ishikawa *et al.*, 放射線 **Vol.21, No.3**, 85 (1995).
- [22] 衛藤 雅之, 東海大学大学院理学研究科修士論文 (1997).

- [23] 浜松ホトニクス社, “R329-05S 較正データ”(1995).
- [24] GEANT–Detector Description and Simulation Tool, Application Software Group, Computing and Networks Division (1993).
- [25] 田代 和也, 神戸大学自然科学研究科修士論文 (1998).
- [26] 技報堂, 有機化学ハンドブック.
- [27] 越後 慎也, “Status report of SFT”, K2K internal report (1997).
- [28] 峰 俊一, “大口径 IIT イメージチェーンユニットのテスト”, K2K internal report (1997).
- [29] Shun’ichi Mine, “Report on the Data Analysis of the Cosmic–Ray Test of the Sci-Fi Tracker (I)”, K2KNOTE/DET/SCI/97-005 (1997).
- [30] 北村 雅裕, “Study of the fake hit reduction in SCIFI detector”, K2K internal report (1998).
- [31] 共立出版, 化学大辞典.
- [32] デルフトハイテック株式会社, “イメージ・インテンシファイアの技術の手引” (1994).