

修士論文

50,000 トン水チェレンコフ検出器における  
エネルギー較正システムの開発研究

東北大学大学院理学研究科  
物理学専攻

津島 史

平成9年

# 目次

|       |                           |    |
|-------|---------------------------|----|
| 1     | 序論                        | 1  |
| 1.1   | 水チェレンコフ検出器                | 1  |
| 1.2   | スーパー神岡実験                  | 2  |
| 1.2.1 | 大気ニュートリノ異常                | 2  |
| 1.2.2 | 陽子崩壊事象の探索                 | 4  |
| 1.3   | 検出器の較正                    | 4  |
| 1.4   | スーパーカミオカンデ検出器の較正の必要性とその方針 | 8  |
| 1.5   | 物理解析からの検出器較正への要請          | 9  |
| 2     | スーパーカミオカンデ検出器             | 11 |
| 2.1   | 概要                        | 11 |
| 2.2   | 純水装置                      | 16 |
| 2.3   | 20 インチ光電子増倍管              | 18 |
| 2.3.1 | 概要                        | 18 |
| 2.3.2 | 量子効率                      | 20 |
| 2.3.3 | 利得                        | 22 |
| 2.3.4 | 安定性                       | 23 |
| 2.4   | エレクトロニクス                  | 25 |
| 2.5   | オンラインデータ収集システム            | 26 |
| 2.6   | オフライン計算機システム              | 26 |
| 3     | 較正実験装置                    | 29 |
| 3.1   | 概要                        | 29 |
| 3.2   | キセノンフラッシュランプ              | 31 |
| 3.3   | ガラスフィルター                  | 33 |
| 3.4   | 光ファイバー                    | 34 |
| 3.5   | シンチレータボール                 | 35 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.6   | LED(light emitting diode) . . . . .      | 38 |
| 3.7   | 光モニター . . . . .                          | 39 |
| 4     | 20 インチ光電子増倍管の利得較正 . . . . .              | 45 |
| 4.1   | 20 インチ光電子増倍管の印加電圧調整 . . . . .            | 45 |
| 4.1.1 | 光電子増倍管の印加電圧値の初期値 . . . . .               | 45 |
| 4.1.2 | 光電子増倍管の印加電圧値の調整 . . . . .                | 46 |
| 4.1.3 | 印加電圧値調整後の光電子増倍管の利得 . . . . .             | 49 |
| 4.2   | 20 インチ光電子増倍管の利得微調整 . . . . .             | 51 |
| 4.2.1 | シンチレーターボールに対する様々な補正 . . . . .            | 51 |
| 4.2.2 | 補正の結果 . . . . .                          | 57 |
| 4.2.3 | ゲインテーブル . . . . .                        | 59 |
| 4.3   | 物理事象による 20 インチ光電子増倍管の利得調整結果の評価 . . . . . | 63 |
| 4.3.1 | $\mu - e$ 崩壊事象 . . . . .                 | 63 |
| 4.3.2 | 結果 . . . . .                             | 69 |
| 5     | 20 インチ光電子増倍管の利得の経年変化 . . . . .           | 73 |
| 5.1   | 個々の光電子増倍管の相対的な経年変化 . . . . .             | 73 |
| 5.1.1 | 測定および解析方法 . . . . .                      | 73 |
| 5.1.2 | 結果 . . . . .                             | 74 |
| 5.2   | 利得が大きく変化した光電子増倍管について . . . . .           | 77 |
| 5.3   | 利得の絶対的な経年変化 . . . . .                    | 82 |
| 5.3.1 | 測定方法 . . . . .                           | 82 |
| 5.3.2 | 結果 . . . . .                             | 83 |
| 6     | 結論 . . . . .                             | 84 |
| A     | bad channel . . . . .                    | 86 |

## 図一覧

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | Ni 缶の概図   | 5  |
| 1.2  | ライナック較正システムの全景  | 5  |
| 1.3  | タイミング較正のための装置   | 7  |
| 1.4  | 透過率測定装置   | 8  |
| 1.5  | モンテカルロ・シミュレーションによる $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ の反応が起きたときの陽子の質量とフェルミ運動量の関係 | 10 |
| 2.1  | スーパーカミオカンデ検出器の位置  | 11 |
| 2.2  | スーパーカミオカンデ検出器   | 13 |
| 2.3  | スーパーカミオカンデ検出器の内部  | 14 |
| 2.4  | スーパーカミオカンデ検出器の磁場補正コイル   | 15 |
| 2.5  | 純水装置とラドンフリーエアシステム   | 17 |
| 2.6  | 20 インチ光電子増倍管  | 18 |
| 2.7  | 20 インチ光電子増倍管の規格   | 19 |
| 2.8  | 1 光電子レベルの光の波高分布   | 20 |
| 2.9  | チェレンコフ光のスペクトル   | 21 |
| 2.10 | 20 インチ光電子増倍管の量子効率   | 21 |
| 2.11 | シミュレーションによる 20 インチ光電子増倍管のダイノード間での電子の飛跡                                    | 22 |
| 2.12 | 20 インチ光電子増倍管のプリーダー回路  | 23 |
| 2.13 | 印加電圧値と利得の相関図  | 24 |
| 2.14 | $10^7$ 利得の印加電圧値の分布  | 24 |
| 2.15 | カミオカ検出器に設置されていた 20 インチ光電子増倍管の利得の安定性                                       | 25 |
| 2.16 | ATM のブロックダイアグラム   | 26 |
| 2.17 | データ収集系のブロックダイアグラム   | 27 |
| 2.18 | オフラインシステム   | 28 |
| 3.1  | エネルギー較正システム   | 30 |
| 3.2  | Xe-lamp の外観および構成  | 31 |

|      |                                      |    |
|------|--------------------------------------|----|
| 3.3  | Xe-lamp の波長分布                        | 32 |
| 3.4  | Xe-lamp の波形                          | 33 |
| 3.5  | UV フィルターの光透過率の波長依存性                  | 34 |
| 3.6  | 大口径純粋石英コア光ファイバーの波長損失特性               | 34 |
| 3.7  | シンチレーターボール                           | 36 |
| 3.8  | BBOT シンチレーターの吸収、発光曲線                 | 37 |
| 3.9  | LED とシンチレーターボール                      | 38 |
| 3.10 | 2inch 光電子増倍管の分光感度特性                  | 39 |
| 3.11 | アバランシェフォトダイオードの分光感度特性                | 41 |
| 3.12 | 光モニターテストの概図                          | 41 |
| 3.13 | 光モニター同士の直線性                          | 43 |
| 3.14 | 光モニターとシンチレーターボールからの光の直線性             | 44 |
|      |                                      |    |
| 4.1  | ビームテストの結果                            | 46 |
| 4.2  | 側面の光電子増倍管の印加電圧値の調整方法                 | 48 |
| 4.3  | 上面、下面の光電子増倍管の印加電圧値の調整方法              | 49 |
| 4.4  | 印加電圧値の調整の前後における利得の分布                 | 50 |
| 4.5  | 光電子増倍管の見込み角に対する電荷情報の関数               | 52 |
| 4.6  | シンチレーターボールに対する座標の定義                  | 52 |
| 4.7  | シンチレーターボールの $\theta$ 方向の光の不均一性の求め方   | 53 |
| 4.8  | $\theta$ の周期関数としてフィッティングした結果         | 54 |
| 4.9  | $\varphi$ の周期関数としてフィッティングした結果        | 55 |
| 4.10 | 各波長領域における透過率                         | 56 |
| 4.11 | 測定方法の違いによる利得のずれ                      | 58 |
| 4.12 | 側面の光電子増倍管の利得と、上面、下面の光電子増倍管の利得の関係の求め方 | 60 |
| 4.13 | 側面の光電子増倍管と、上面下面の光電子増倍管の利得の関係         | 61 |
| 4.14 | 上面と下面の光電子増倍管の利得の関係                   | 62 |
| 4.15 | $\mu - e$ 崩壊事象の選別方法                  | 64 |
| 4.16 | 崩壊電子の運動量の $\cos\theta_{decay}$ 分布    | 66 |
| 4.17 | 利得の一様性を調べるために最適な $\mu - e$ 崩壊事象の選別方法 | 67 |
| 4.18 | 検出器内で崩壊した $\mu$ 粒子の事象例               | 68 |
| 4.19 | 崩壊電子の事象例                             | 68 |
| 4.20 | 崩壊電子の運動方向に対する天頂角の定義                  | 69 |
| 4.21 | 光電子増倍管の領域分け                          | 70 |
| 4.22 | 天頂角分布の各 bin において領域の占める割合             | 70 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 4.23 | $\mu - e$ 崩壊事象の崩壊電子による、ゲインテーブルの評価 . . . . .                  | 71 |
| 5.1  | 1996 年 12 月の利得でそれぞれの測定での利得を割った値を規格化した分布 . . . . .            | 75 |
| 5.2  | 1996 年 12 月の利得でそれぞれの測定での利得を割った分布の $\sigma$ の値の経年変化 . . . . . | 76 |
| 5.3  | リストアップされた光電子増倍管の水槽内における場所 . . . . .                          | 80 |
| 5.4  | 光電子増倍管のアナログ信号 . . . . .                                      | 81 |
| 5.5  | 崩壊電子の運動量分布 . . . . .   | 82 |
| 5.6  | $\mu - e$ 崩壊事象を用いた利得の絶対的な経年変化 . . . . .                      | 83 |

## 表一覧

|     |                        |    |
|-----|------------------------|----|
| 1.1 | 各種大気ニュートリノ実験の結果        | 3  |
| 2.1 | スーパーカミオカンデの性能          | 15 |
| 3.1 | Xe-lamp の仕様            | 31 |
| 3.2 | フィルターの型名               | 33 |
| 3.3 | 大口径純粋石英コアファイバーの仕様      | 35 |
| 3.4 | ヘッドオン型 2inch 光電子増倍管の仕様 | 40 |
| 3.5 | アバランシェフォトダイオードモジュールの仕様 | 40 |
| 5.1 | 経年変化の測定を行なった日時         | 73 |
| 5.2 | 利得が大きく変化した光電子増倍管       | 78 |
| 5.3 | 利得が常に低く見える光電子増倍管       | 78 |
| 5.4 | 利得が常に高く見える光電子増倍管       | 79 |

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 水チェレンコフ検出器

まず、水チェレンコフ検出器について述べる。

荷電粒子が屈折率  $n$  の媒質中を  $c/n$  ( $c$  は光速) 以上の速度で進むとき、チェレンコフ光と呼ばれる光を放出する。ホイヘンスの原理から、チェレンコフ光は荷電粒子の進行方向に対して式 1.1 の角度  $\theta_c$  の方向に放出される。

$$\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta} \quad (1.1)$$

$\theta_c$  をチェレンコフ角という。また、 $v$  (m/s) は荷電粒子の速度で、 $\beta = v/c$  である。

チェレンコフ光のエネルギー分布は古典電磁気学で計算できる。荷電粒子が  $dl$  の長さ進んだときに、チェレンコフ輻射で放出されるエネルギー  $dW$  は、

$$\frac{dW}{dl} = \frac{z^2 e^2}{c^2} \int_{\beta n > 1} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \omega d\omega \quad (1.2)$$

である [1]。  $\omega$  は輻射される光の角振動数、  $e$  は電子の電荷、  $z$  は荷電粒子の電荷を  $e$  単位で表したものである。(1.2) 式から、波長  $\lambda_1, \lambda_2$  の間で輻射される光子の数  $N$  が導かれる。

$$N = 2\pi\alpha l z^2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) \sin^2 \theta_c \quad (1.3)$$

$\alpha$  は微細構造定数である。例えば、水 ( $n \sim 1.34$ ) の中を電荷  $e$  の粒子が 1cm 進むとき、放出される波長 300~600nm の光子の数は、約 340 個と計算できる。

水チェレンコフ検出器は、このような過程で発生したチェレンコフ光を観測することにより、水中を高速で運動する粒子の情報を得ることができる。従って、水チェレンコフ検出器は、荷電粒子が反応を引き起こすのに必要な純水を蓄える水槽と、水槽の壁面に二次元的に配置されたチェレンコフ光を検出するための光電子増倍管から構成される。チェレンコフ光は 1.1 式より、粒子の運動方向を軸とする円錐状に放射されるので、壁面ではリング上に観測される。各光電子増倍管が受けとった光量・到着時刻の情報からリングの形状を再構成し、荷電粒子の種類・エネルギー・発生点・方向を求めることができる。



## 1.2 スーパー神岡実験

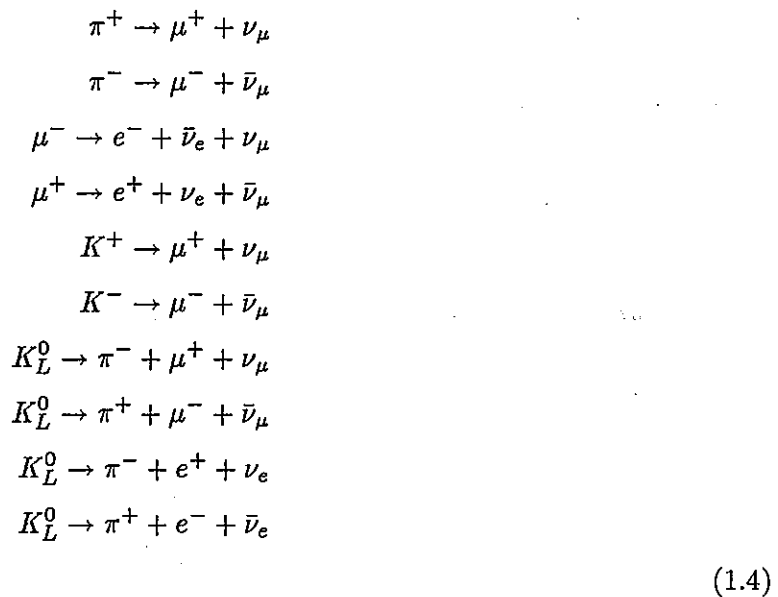
スーパーカミオカンデ検出器は、約 50,000 トンの純水と 11,146 本の大口径 20 インチ光電子増倍管からなる水チェレンコフ検出器である。世界初の超新星ニュートリノの観測など、様々な業績を残したカミオカンデの後継器として、1996 年 4 月から運転を始めている。

このスーパーカミオカンデ検出器を用いて、核子崩壊事象の探索・大気ニュートリノの検出・太陽ニュートリノの検出等が可能であり、これらの実験的検出は、素粒子物理学および宇宙物理学の分野において重要な知見をもたらす。以下に、スーパー神岡実験の主要なテーマとなる大気ニュートリノ異常の解明と核子崩壊事象の探索について簡単に述べる。

### 1.2.1 大気ニュートリノ異常

現在、大気  $\mu$  ニュートリノ・フラックスの観測値が理論値に比べて少ない、大気ニュートリノ異常という問題が存在する。

主に陽子からなる一次宇宙線は大気中に入ると、原子核と反応して、核子カスケードシャワーを起こす。このとき生成された  $\pi$  粒子、 $K$  粒子が崩壊することによって、ニュートリノが生成される。これが、大気ニュートリノである。ニュートリノ生成の素過程として、以下の反応があげられる。

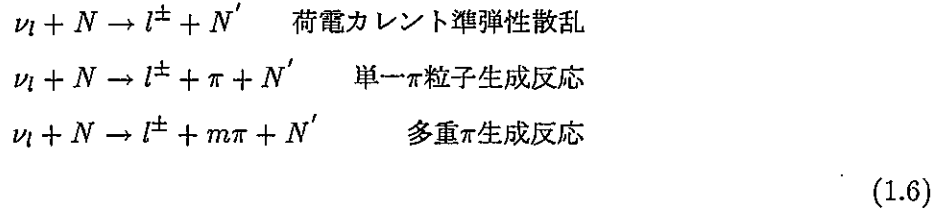


これらのニュートリノは典型的に高度数十 km の上空で作られる。大気ニュートリノのフラックス、エネルギースペクトルは、数人の理論家によって計算されている [2][3]。そのフラックスについては、約 30% の不確実性がある。しかし、その成分比

$$R(\mu/e) = \frac{\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu}{\nu_e + \bar{\nu}_e}
 \tag{1.5}$$

は、様々な計算で約 5% 以内に一致している。

スーパー神岡実験における大気ニュートリノの検出は、検出器中の物質との相互作用によって生成される荷電粒子を観測することによって、行なう。以下に主な3つの反応を示す。



$N, N'$  は核子、 $l$  はレプトン、 $m$  は整数 ( $m \geq 2$ ) である。荷電カレント準弾性散乱においては、生成される電子、 $\mu$  粒子によるチェレンコフ光を検出し、その区別を行なうことで、もとのニュートリノのフレーバーを知ることができる。

スーパー神岡実験では、観測された1.5式の  $R(\mu/e)_{data}$  と、モンテカルロシミュレーションの計算結果による  $R(\mu/e)_{MC}$  との比

$$R = \frac{R(\mu/e)_{data}}{R(\mu/e)_{MC}} \tag{1.7}$$

をとることで、大気ニュートリノ・フラックスを調べている。

|                   | Target | Total exposure | $\frac{R(\mu/e)_{data}}{R(\mu/e)_{MC}}$ |
|-------------------|--------|----------------|---|
| <i>NUSEX</i>      | Iron   | 0.74ktyr       | $0.96^{+0.32}_{-0.28}$                  |
| <i>Frejus</i>     | Iron   | 1.56ktyr       | $1.00 \pm 0.15 \pm 0.08$                |
| <i>Soudan2</i>    | Iron   | 5ktyr          | $0.72 \pm 0.19^{+0.05}_{-0.07}$         |
| <i>IMB-3</i>      | Water  | 7.7ktyr        | $0.54 \pm 0.05 \pm 0.12$                |
| <i>Kamiokande</i> | Water  | 7.7ktyr        | $0.60^{+0.06}_{-0.05} \pm 0.05$         |

表 1.1: 各種大気ニュートリノ実験の結果

表 1.1に、各種大気ニュートリノ実験の結果を示す。IMB-3 と Kamiokande は、観測値が理論値よりも少ない、大気ニュートリノ異常を報告している。NUSEX、Frejus は矛盾のない結果を報告しているが、感度および精度が足りないため、IMB-3 と Kamiokande の結果を否定するには至っていない。

大気ニュートリノ異常が確認されたとき、これを説明する一つの可能性として、ニュートリノ振動が考えられる。これはニュートリノが質量を持ち、さらに異なるフレーバーの間に量子力学的混合がある場合に起こるものである。ここで二種類のニュートリノを考えてみる。あるフレーバーのニュートリノが距離  $L(km)$  進んだときに、他方のフレーバーのニュートリノが観測される確率  $P$  は、(1.8) 式のように表される。

$$P = \sin^2 2\theta \sin^2 \left( 1.27 \Delta m^2 (eV^2) \frac{L(km)}{E_\nu (GeV)} \right) \tag{1.8}$$

$\theta$  は混合角、 $\Delta m^2$  は質量の二乗差、 $E_\nu$  はニュートリノのエネルギーを表す。ニュートリノ振動が観測されると、その解析からニュートリノの質量に関する情報を得ることができる。

### 1.2.2 陽子崩壊事象の探索

電弱相互作用と強い相互作用、クォークとレプトンを統一する大統一理論 (GUTs) では、バリオン数・レプトン数は保存量でなくなり、核子は安定でなくなる。例えば minimalSU(5)GUT は、陽子が  $10^{28} \sim 10^{31}$  年の寿命で、

$$p \rightarrow e^+ + \pi^0 \quad (1.9)$$

と崩壊することを予言する。この予言を受けて、1980 年代にいくつかの実験で核子崩壊の探索が始められた。およそ 15 年の探索が行なわれたが、核子崩壊の確たる証拠は未だ見つかっておらず、1.9 式の  $p \rightarrow e^+ + \pi^0$  のモードに対して、 $5.5 \times 10^{32}$  年、 $p \rightarrow \bar{\nu} + K^+$  のモードに対して、 $10 \times 10^{31}$  年という寿命の下限が求まっている [4][5]。

スーパー神岡実験では、陽子の寿命が  $10^{33} \sim 10^{34}$  年であるならば、陽子崩壊事象を 5 年間で数事象観測できる。

## 1.3 検出器の較正

スーパー神岡実験で、核子崩壊事象や大気ニュートリノフラックスなどの正確な測定を行なうために、検出器の様々な較正を行なわなくてはならない。以下に順を追って述べる。

### A. 絶対的エネルギー較正

エネルギーを正確に測定するためには、エネルギー絶対値を精度良く決める必要がある。スーパー神岡実験では、エネルギー絶対値を以下のように決めている。まず、エネルギーのわかっているソースを用いて測定する。次に、測定結果を再現するようにシミュレーションを合わせ、その結果をもとに、光電子増倍管で得られる電荷情報とエネルギーの関係を求める。最終的に、その関係を使って実際の電荷情報をエネルギーに換算している。以下に具体的に方法について簡単に述べる。

#### (a) $\gamma$ 線源による方法

エネルギーのわかっているソースとして、Ni が熱中性子を捕獲するときに放出する  $\gamma$  線を使う。図 1.1 に  $\gamma$  線を放出させる Ni の缶を示す。Cf の自発的核分裂で放出された中性子は、Ni と Cf の間の水で減速され熱中性子化する。Ni 缶はその熱中性子を捕獲し、9MeV の  $\gamma$  線を放出する。数 MeV 領域の事象である太陽ニュートリノの測定に適した較正である。

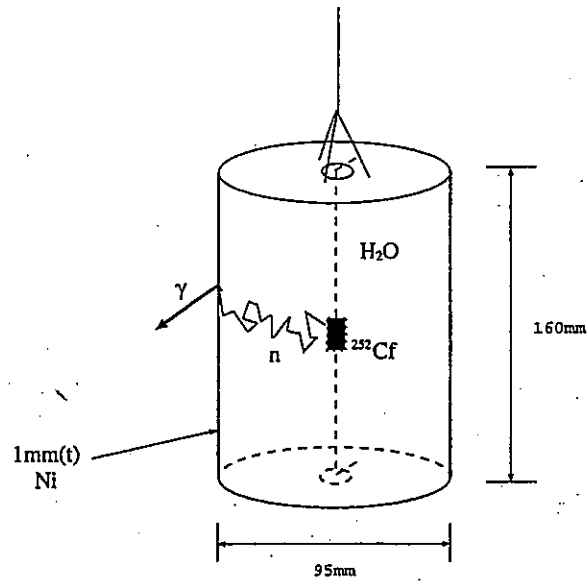


図 1.1: Ni 缶の概図

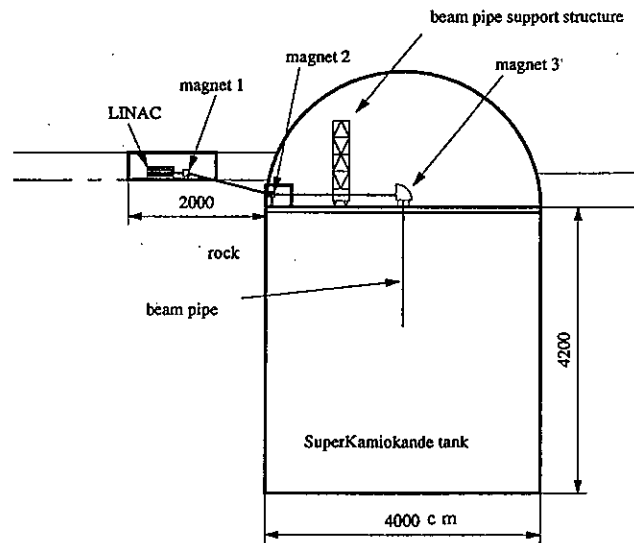


図 1.2: ライナック校正システムの全景

## (b) 電子線型加速器(ライナック)による方法

ライナックは、水槽脇のシールドされた部屋の中に設置されており、そこからビームパイプを水槽内まで伸ばし、所定位置で電子を送っている。図 1.2 にライナックの全景を示す。5MeV から 20MeV までの単一エネルギーの電子を送ることができる。これも、数 MeV 領域の事象である太陽ニュートリノの測定に適した較正である。

太陽ニュートリノは検出器内で

$$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^- \quad (1.10)$$

という反応を起こし、電子の発するチェレンコフ光を検出している。(a)と違って、電子を使って較正ができるという意味で、大変有効である。

(c)  $\mu - e$  崩壊事象の崩壊電子による方法

検出器に入射する宇宙線起源の  $\mu$  粒子のうち、約 1.7% が検出器内で崩壊し、電子を放出する。その崩壊電子のエネルギーは、最大 53MeV、平均 37MeV であり、数十 MeV 領域のエネルギー較正のために使われている。

(d)  $\pi^0$  粒子による方法

大気ニュートリノと検出器中の物質との相互作用により、 $\pi^0$  粒子が生成される場合がある。 $\pi^0$  粒子の崩壊による 2 つの  $\gamma$  線を検出し、 $\pi^0$  粒子の不変質量を組む。その質量を比較することにより、100MeV 領域のエネルギー較正を行なうことができる。

(e)  $\mu - e$  崩壊事象の  $\mu$  粒子による方法

検出器内で崩壊する  $\mu$  粒子に対して、入射点と崩壊点から飛跡を同定することができる。単位長さ当たり損失するエネルギーが計算できるので、この  $\mu$  粒子をエネルギー較正に使用することができる。宇宙線起源の  $\mu$  粒子はエネルギーが高いので、数 GeV 領域のエネルギー較正に使われる。

## B. 相対的エネルギー較正

1.4節以降で、詳しく述べる。

## C. タイミング較正

光電子増倍管の時間情報は、粒子の発生点を求めるために重要である。まず、スーパー神岡実験の始まる前に、全光電子増倍管の相対時間を合わせる必要がある。図 1.3 の測定装置を示す。光源には 384nm のレーザー光を用い、水槽内の拡散球から等方的に光を放出させる。この装置を使って、相対時間を合わせた。

次に、この時間情報は得られる光の強さに依存するので、個々の光電子増倍管についての時間情報と光の強さの関係を測定しなければならない。これについても、図 1.3 の測定装置を使用

して行なう。様々なフィルターを使って光量を変えることで、時間情報の光の強さに対する依存性を調べることができる。

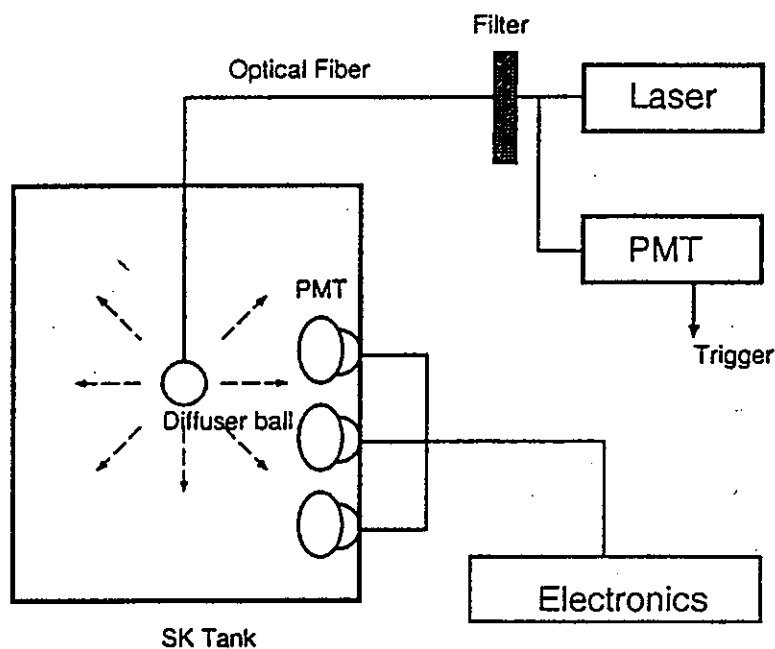


図 1.3: タイミング校正のための装置

#### D. 水の透過率

スーパーカミオカンデ検出器の純水装置は、数十 nm レベルの異物まで除去することができ、水槽内は極めて純度の高い水で満たされている。しかし、直径 39メートル、高さ 41メートルもある大型の水槽であるので、水の透過率を考慮に入れることは必要である。スーパー神岡実験では、以下の二つの方法で調べている。

##### (a) レーザー光による方法

光源には単色レーザーを使い、水槽内の拡散球から光を放出させる。水中を透過してきた光は、水面上の CCD カメラによって測定される。拡散球をいろいろな位置にセットして光が進む距離を変え、そのときの CCD カメラによる光とモニター光との関係から減衰係数を求めている。図 1.4に透過率測定装置を示す。

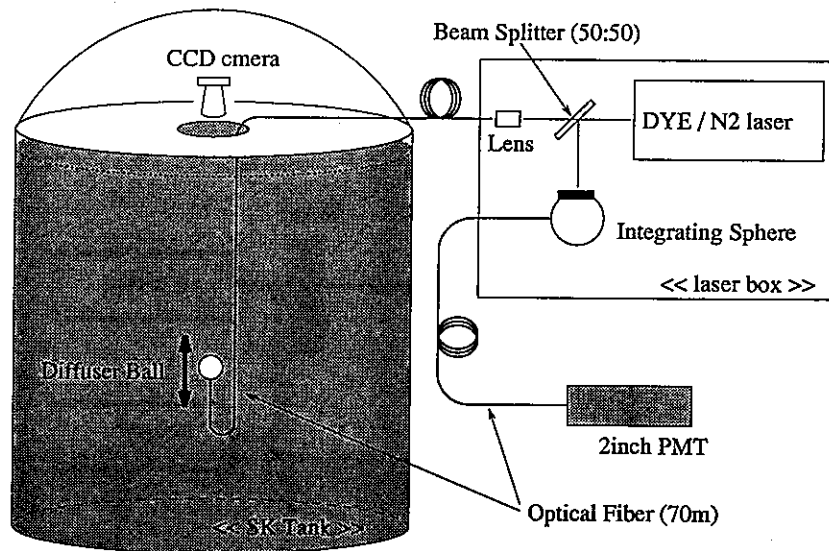


図 1.4: 透過率測定装置

(b)  $\mu$  粒子による方法

水槽を上から下に突き抜けていく宇宙線  $\mu$  粒子を用いる。  $\mu$  粒子が生成する単位長さ当たりの光子数は一定とみなせる。また、光の射出位置と測定器の受光位置から伝播した距離がわかるので、それらから透過率を求めることができる。

#### 1.4 スーパーカミオカンデ検出器の較正の必要性とその方針

スーパーカミオカンデ検出器の相対的エネルギー較正についての結果をまとめたのが本研究である。相対的エネルギー較正を行なう上で、以下に述べる必要がある。

- A. スーパー神岡実験の測定が始まる前に、光電子増倍管の印加電圧値の初期値を決める。
- B. 利得のばらつき、水槽内の場所による利得の偏りを小さくする。
- C. 利得の経年変化を測定する。

これらをどのように解決していくか、以下に方針を示す。

我々はスーパー神岡実験の測定を始める前に、全ての 20 インチ光電子増倍管の利得が同じになるように、印加電圧値を決めたい。それには、各光電子増倍管に同じ光量を当てて、出力信号を同じにするという方法をとればよい。光源として最も信頼できるものは、検出器内で観測されるチェレンコフ光である。しかし測定を始める前の、水が満たされていない状況なので、チェレンコフ光を使うことは不可能であり、人工的に光を出す光源が必要となってくる。そこで、検出器内部で光を放出する

ことができ、さらに全立体角に等方的に出るような校正実験装置を作り、これを用いて印加電圧値を調整することにする。

この段階では電圧調整が粗いので、同じ校正実験装置を使って、各光電子増倍管についての利得のばらつきや水槽内の利得の偏りを表すゲインテーブルを作ることにする。ゲインテーブルを解析時に使用することにより、利得をさらに微調整することができるからである。

そして、実際の物理事象に基づいたチェレンコフ光を使って、印加電圧値調整時における利得、ゲインテーブル使用後による利得、についての評価を行なう。

利得の経年変化を測定することも大変重要である。これについても、観測されるチェレンコフ光を使うのが一番であるが、光電子増倍管を一本一本比較するのは、大変困難である。従って、利得の全体的な変化は、物理事象に基づいたチェレンコフ光でチェックし、各光電子増倍管についての相対的な経年変化は、校正実験装置を使って測定していくこととする。

以上をまとめて、本研究を

- A. スーパー神岡実験の測定前に、校正実験装置を使って、20インチ光電子増倍管の印加電圧値の調整を行なう。
- B. 校正実験装置を使って、個々の利得の微調整をソフトウェア的に行なうためのゲインテーブルを作る。
- C. 物理事象に基づいたチェレンコフ光を使って、A.の印加電圧値調整時における利得、B.のゲインテーブル使用後による利得、についての評価を行なう。
- D. 校正実験装置を使って、利得の相対的な経年変化を測定する。全体的な利得の変化は、物理事象に基づいたチェレンコフ光を使って測定する。

という方針で進めていくこととする。

## 1.5 物理解析からの検出器校正への要請

ここでは、利得の検出器内の場所による偏りが、実際に物理解析する立場から、どの程度まで押えられていけばよいか考えてみる。

まず、大気ニュートリノ・フラックスの観測への影響、例として有効体積22.5kton、 $P_e > 100\text{MeV}/c$ 、 $P_\mu > 200\text{MeV}/c$ 、 $E_{vis} < 1.3\text{GeV}$ の条件のときの $R(1.7\text{式})$ への影響を考えてみる。 $P_e$ は電子の運動量、 $P_\mu$ は $\mu$ 粒子の運動量、 $E_{vis}$ は粒子を、電子として換算した場合のエネルギーである。利得の偏りは、 $P_e$ 、 $P_\mu$ 、 $E_{vis}$ を求めるときに大きく影響する。ここで、個々の光電子増倍管の場所による利得の偏りを3%と仮定したとき、 $P_e$ 、 $P_\mu$ 、 $E_{vis}$ のピーク値の誤差が $R$ にどの程度影響するか計算してみた。計算した結果、 $R$ の系統誤差は0.1%以下となった。場所による利得の偏りを上記の値以内に押えれば、 $R$ は充分精度よく求められることがわかった。



次に、核子崩壊事象の探索への影響を考えてみる。ここでは、主要な崩壊モードである  $p \rightarrow e^+ + \pi^0$  が起きたとして、そのときの再構成した陽子の質量への影響を考えてみる。 $p \rightarrow e^+ + \pi^0$  の反応が起きたとき、 $e^+$  事象と  $\pi^0$  粒子が崩壊してできる二つの  $\gamma$  線事象が検出される。場所による利得の偏りは、 $e^+$  事象と、二つの  $\gamma$  線事象の運動量を求めるときに大きく影響する。ここで、場所による利得の偏りを 3.0% と仮定したとき、 $e^+$  の運動量と  $\gamma$  線の運動量のピーク値の誤差が陽子の質量にどの程度影響するか計算してみた。陽子の質量のピーク値の誤差は約 2.1% であった。

図 1.5 に、モンテカルロ・シミュレーションによる  $p \rightarrow e^+ + \pi^0$  の反応が起きたときの陽子の質量とフェルミ運動量の関係を示す。

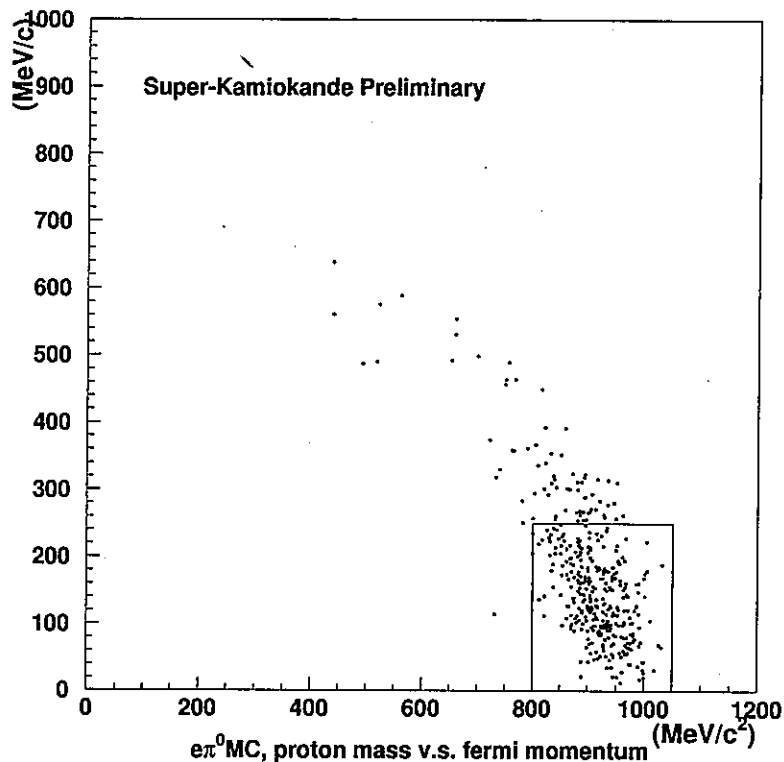


図 1.5: モンテカルロ・シミュレーションによる  $p \rightarrow e^+ + \pi^0$  の反応が起きたときの陽子の質量とフェルミ運動量の関係。横軸は陽子の質量 ( $MeV/c^2$ )、縦軸はフェルミ運動量 ( $MeV/c$ ) である。

スーパー神岡実験では、 $p \rightarrow e^+ + \pi^0$  が起きたとして計算したとき、陽子の質量が  $800 MeV/c^2$  以上、 $1050 MeV/c^2$  以下、フェルミ運動量が  $250 MeV/c$  以下となる事象を、陽子崩壊事象の候補としている。この図から、陽子の質量のピーク値の誤差が 2.1% であったとき、候補から外れる可能性のある事象は、7 事象である。陽子崩壊事象に対する検出器の efficiency はよいと言える。

従って、検出器の場所による利得の偏りを 3.0% 以内にするを目標に、本研究を進めていくことにする。

## 第 2 章

### スーパーカミオカンデ検出器

#### 2.1 概要

スーパーカミオカンデ検出器は、岐阜県吉城郡神岡町東茂住にある神岡鉱山の山頂直下 1,000m(2,700 m.w.e<sup>1</sup>) に位置している。図 2.1 にスーパーカミオカンデ検出器の位置を示す。この検出器が地下 1,000m に設置されている理由は、測定の大きなバックグラウンド事象となる宇宙線  $\mu$  粒子をできるだけ減らしたいためである。地表での  $\mu$  粒子の強度は約  $10^9/m^2y$  であるが、地下 1,000m ではその約  $10^{-5}$  となる。スーパーカミオカンデ検出器で観測される  $\mu$  粒子の頻度は約 2.2Hz である。

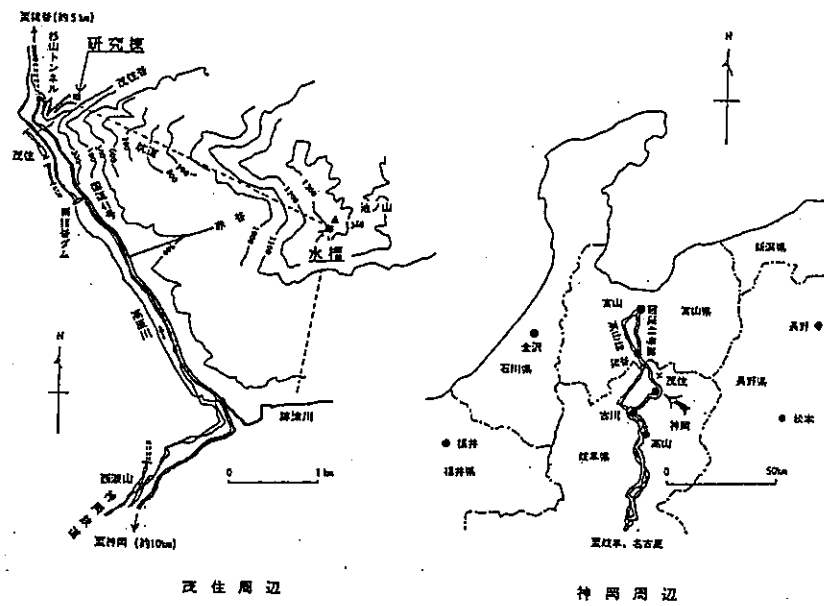


図 2.1: スーパーカミオカンデ検出器の位置

<sup>1</sup>meter water equivalence : 水換算深度

スーパーカミオカンデ検出器の本体となる水槽は、直径 39m、高さ 42m の円筒型の形をしており、総重量 50,000 トンの純水を満たしている。外観を図 2.2 に、内側から見た光景を図 2.3 に示す。外壁は厚さ約 50cm のコンクリートで覆われており、水に接する表面は 3~4mm 厚のステンレスが張られている。外壁から 2.5m の位置にステンレスの枠組の構造体が建てられており、そこに光電子増倍管が取り付けられている。光電子増倍管の間には、ブラックシートが張られ光学的に内水槽と外水槽に分けられている。

内水槽は、直径 36.2m、高さ 33.8m であり、口径 20 インチの光電子増倍管 11,146 本が内向きに取り付けられている。側面の光電子増倍管の数は 7,650 本、上面と下面の数はそれぞれ 1,748 本ずつであり、全表面積の 40% をカバーしている。内水槽は粒子検出の主となる場所である。なお、20 インチ光電子増倍管については、第 2.3 章で述べる。外水槽には、口径 8 インチの光電子増倍管 1857 本が外向きに取り付けられており、壁の表面は光の収集効率をよくするために白色のタイベックで覆っている。外水槽は岩盤からの  $\gamma$  線を吸収するとともに、外部から入射する粒子や外部へ抜ける粒子の識別を行なう役割を持っている。

水槽のまわりには図 2.4 のような地球磁場を打ち消すためのヘルムホルツコイルが巻かれている。これにより、光子の入射位置による光電子増倍管の収集効率が、地磁気の影響で変わらないようになっている。

スーパーカミオカンデ検出器の性能を表 2.1 に示す。

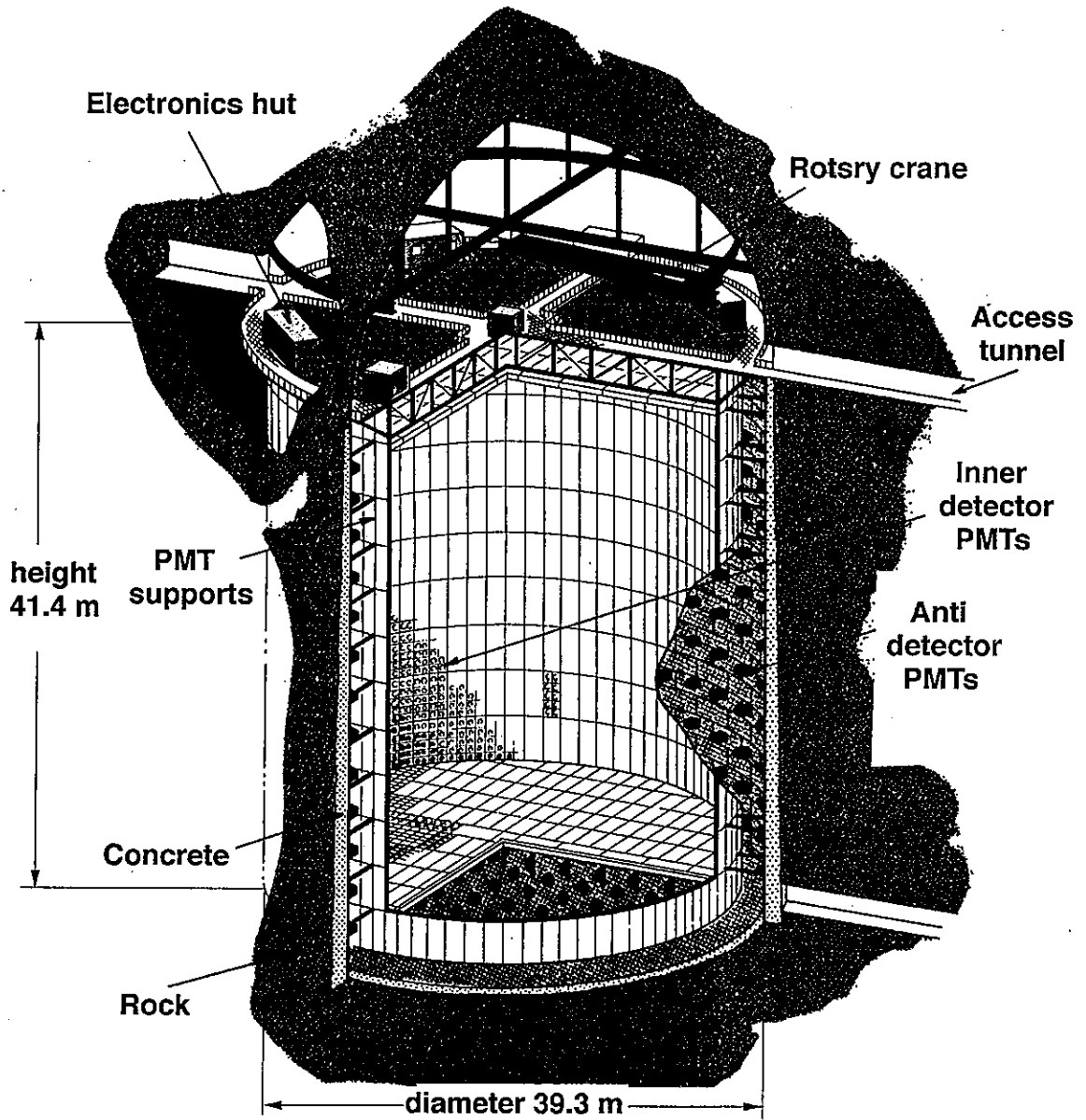


図 2.2: スーパーカミオカンデ検出器

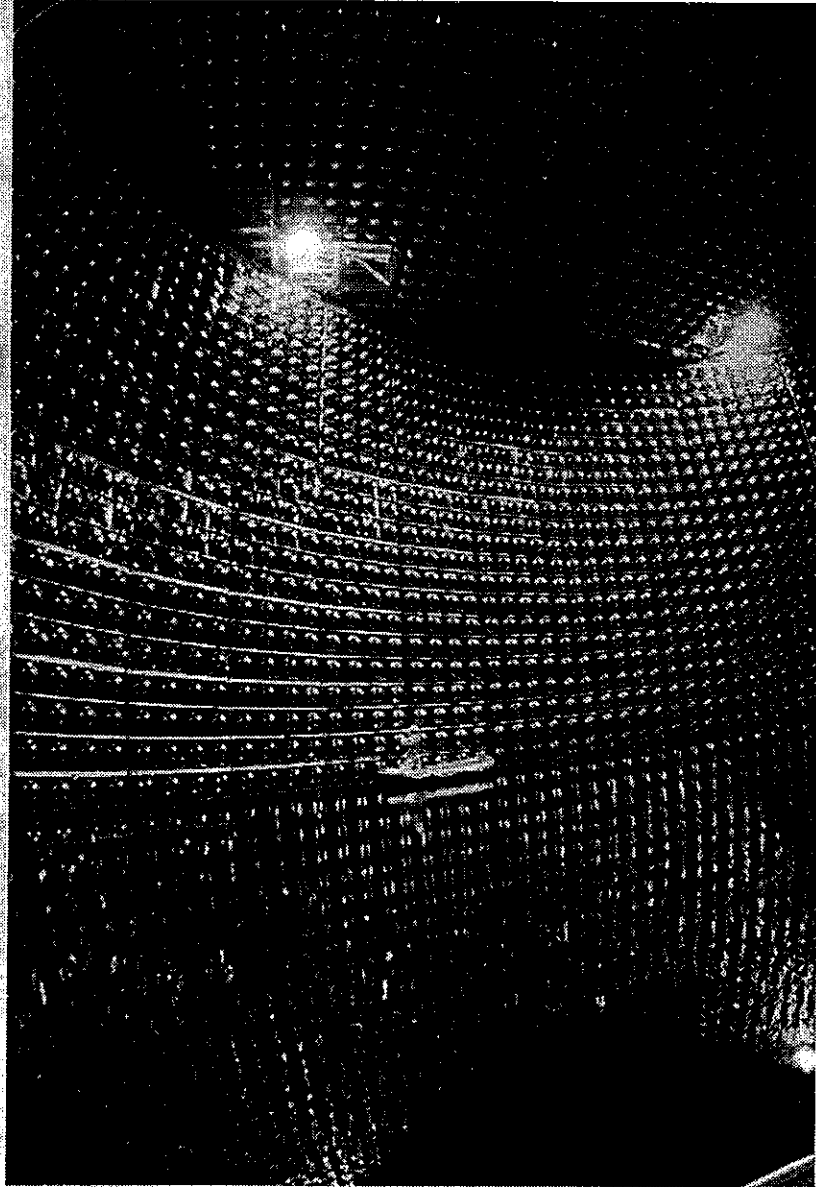


図 2.3: スーパーカミオカンデ検出器の内部

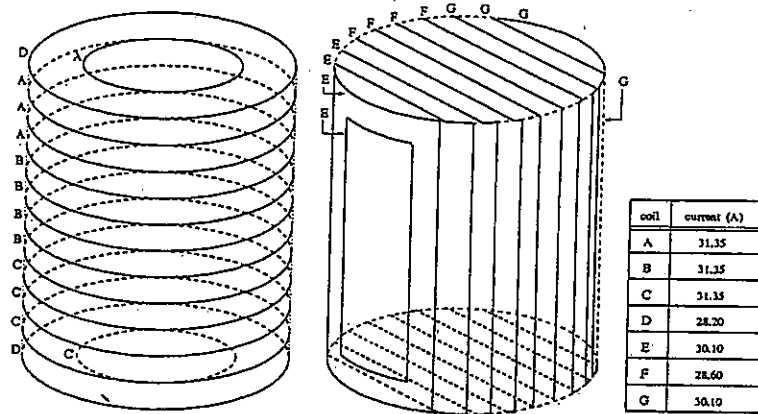


図 2.4: スーパーカミオカンデ検出器の磁場補正コイル

| パラメータ         | スーパーカミオカンデ                                  | 備考   |
|---------------|---|--|
| 大きさ           | 42m $\times$ 39m $\phi$                     |  |
| 全体積           | 50,000 t                                    |  |
| 有効体積          | 32,000 t<br>22,000 t<br>22,000 t            | 超新星爆発<br>陽子崩壊<br>太陽ニュートリノ                            |
| 光電子増倍管の数      | 11,146<br>1,885                             | 内水槽<br>外水槽   |
| 光電面の占める割合     | 40%   | 内水槽  |
| 光電子増倍管の時間分解能  | 3nsec                                       | 1 光電子レベルでの値  |
| エネルギー分解能      | 2.6%/ $\sqrt{E}$<br>2.5%<br>16%/ $\sqrt{E}$ | e(GeV)<br>$\mu$ (<1GeV)<br>e(<20MeV)                 |
| 位置分解能         | 50cm<br>$\sim$ 10cm                         | 10MeV<br>$p \rightarrow e^+ + \pi^0$                 |
| 角度分解能         | 28°<br>$\sim$ 1°                            | 10MeV<br>突き抜け $\mu$ 粒子                               |
| トリガー閾値        | 4~5MeV                                      |  |
| エネルギー閾値       | 5MeV  | 太陽ニュートリノ   |
| e/ $\mu$ 識別能力 | 99%   | 0.03 < $p_e$ < 1.33GeV/c<br>0.2 < $p_\mu$ < 1.5GeV/c |

表 2.1: スーパーカミオカンデの性能

## 2.2 純水装置

スーパーカミオカンデ検出器内部の水には、鉱山内に湧き出ている水を使用しており、純水装置をとおして循環させている。純水装置は、水中に含まれている様々な不純物を取り除いている。その不純物として、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$  などの金属イオン、バクテリア、放射性元素 (主に  $^{222}\text{Rn}$  の娘核である  $^{214}\text{Bi}$ ) があげられる。 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$  などの金属イオンは、光を散乱・吸収させるため、透過率を低くする原因となる。バクテリアは、同じく透過率を低下させ、また光電子増倍管のガラス表面に付着して、集光率を悪くさせる。 $^{214}\text{Bi}$  の  $\beta$  崩壊によって生ずる電子は、低エネルギー事象のバックグラウンドとなる。

純水装置は以下のものから構成されている。

### 1. フィルター

水中に混入している  $\sim 1\mu\text{m}$  レベルのゴミを除去する。

### 2. 熱交換機

純水の冷却を行ない水温を一定に保っている。ポンプや光電子増倍管から発生する熱による水温上昇を押えるためである。

### 3. イオン交換機

水中の金属イオンを除去する。

### 4. 紫外線殺菌

水中のバクテリアや細菌を紫外線を照射することで死滅させる。

### 5. 真空脱気装置

水中にとけている気体を除去する。これにより、酸素の 90%、 $\text{Rn}$  ガスの 96% を除去できる。

### 6. ウルトラフィルター

数十 nm レベルのゴミを除去する。ここを通過した水が水槽に送られる。それ以外はもう一度処理が行なわれる。

また、空気中の  $^{222}\text{Rn}$  が水中に溶解するのを防ぐために、水槽上部の空気の層にはラドンフリーエアを使用している。このラドンフリーエアを作り出す装置は、空気中のラドンの濃度を  $1,500\text{Bq}/\text{m}^3$  から数十  $\text{Bq}/\text{m}^3$  まで落している。

図 2.5 に純水装置とラドンフリーエアシステムを示す。

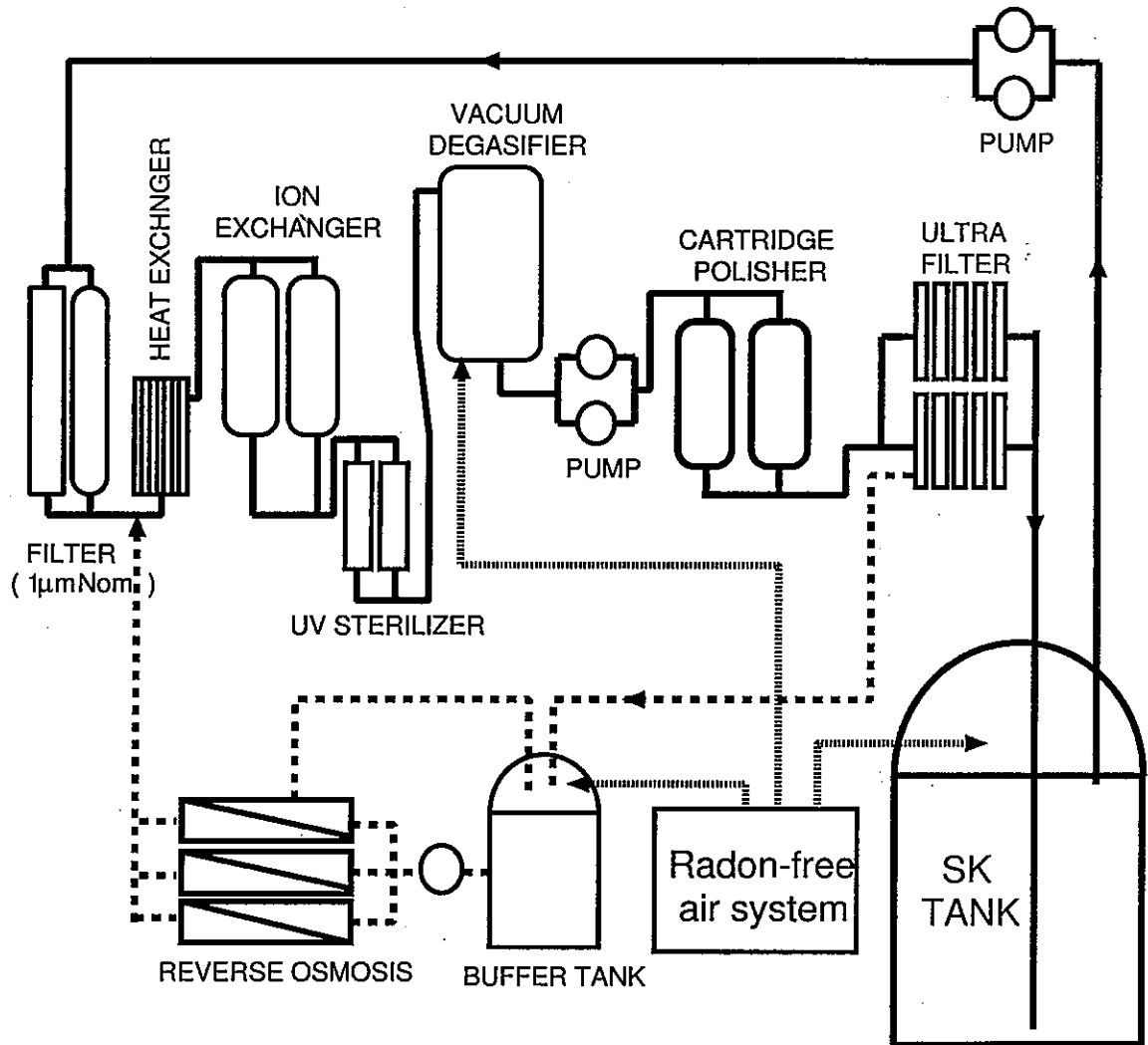


図 2.5: 純水装置とラドンフリーエアシステム



## 2.3 20 インチ光電子増倍管

### 2.3.1 概要

スーパーカミオカンデ検出器では、浜松ホトニクス株式会社で製造され、光電子増倍管としては世界最大の口径である 20 インチ光電子増倍管を使用している。この 20 インチ光電子増倍管 (R3600) を使用した理由は、検出器を覆う光電面の割合を広くできるからである。その結果、検出器内部の表面の実に 40% を光電面で覆うことができる。また他の理由として、光電面が球形となっているので、広い角度で光をとらえることができることもあげられる。20 インチ光電子増倍管の断面図を図 2.6、規格を図 2.7 に示す。

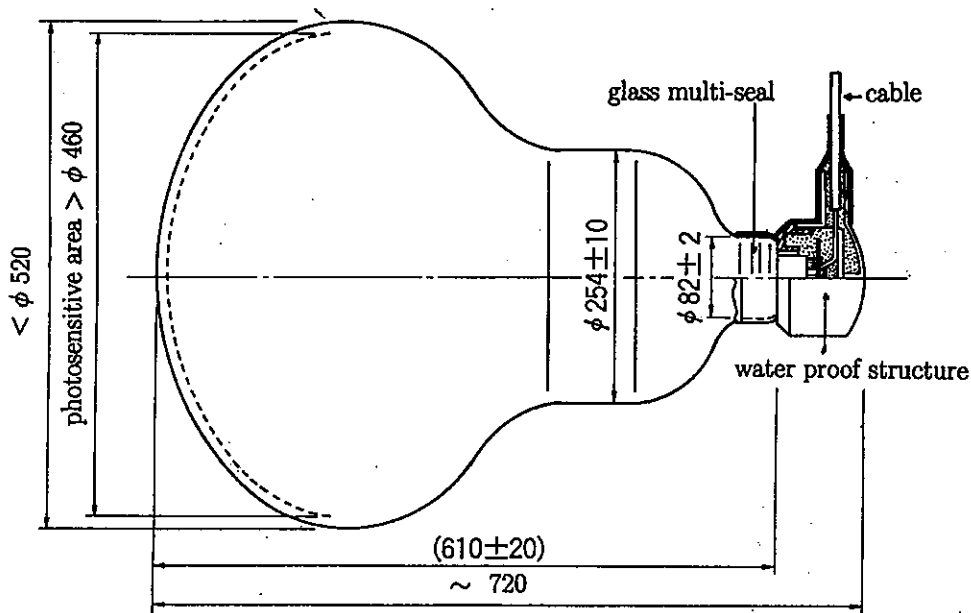


図 2.6: 20 インチ光電子増倍管

規 格

| 責 仕 様 書                           |                             | R3600-05仕様      |       |               |                       |                    |
|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------|-------|---------------|-----------------------|--------------------|
| 項 目                               | 規 格                         | 略号・他            | 規 格   |               |                       | 単 位                |
|                                   |                             |                 | Min.  | Typ.          | Max.                  |                    |
| 形状及び寸法                            | 図1                          | 図1              |       |               |                       |                    |
| 最大口径                              | 520mm以下                     |                 | 498   | 508           | 518                   | mmφ                |
| 有効口径                              | 460mm以上                     |                 | 460   | -             | -                     | mmφ                |
| 全長(防水ケース含む)                       | 720mm以下                     |                 | -     | 695           | 720                   | mm                 |
| 重量(ケーブル含む)                        | 20kg以下                      |                 | -     | 13            | 15                    | Kg                 |
| 耐水気密                              | 6気圧以上                       |                 | 6     | -             | -                     | 気圧                 |
| 材料                                |                             |                 |       |               |                       |                    |
| 光電面                               | バイアルカリ                      |                 |       | バイアルカリ        |                       |                    |
| 窓材                                | 硼硅酸ガラス                      |                 |       | 硼硅酸ガラス        |                       |                    |
| その他                               | 硼硅酸ガラス・ポリエチレン               |                 |       | 硼硅酸ガラス・ポリエチレン |                       |                    |
| ブリーダ回路及びケーブル                      |                             | 図2              |       |               |                       |                    |
| ブリーダ電流(増幅率 $1 \times 10^7$ 時)     | 0.5mA以下                     |                 | -     | -             | 0.5                   | mA                 |
| 抵抗値精度                             | $\pm 5\%$ 以下                |                 | -     | -             | $\pm 5$               | %                  |
| 高電圧印加方式                           | +高電圧                        |                 |       |               | +高電圧印加                |                    |
| ケーブル構造                            | 図2・図3                       | 図3              |       |               |                       |                    |
| ケーブル長                             | 70m                         |                 |       | 70            |                       | m                  |
| ケーブル外被耐水気密                        | 6気圧以上                       |                 | 6     | -             | -                     | 気圧                 |
| ケーブル外被材質                          | ポリエチレン                      |                 |       | ポリエチレン        |                       |                    |
| 防水ケース                             |                             | 図4              |       |               |                       |                    |
| 耐水気密                              | 6気圧以上                       |                 | 6     | -             | -                     | 気圧                 |
| ケース材質                             | ポリエチレン                      |                 |       | ポリエチレン        |                       |                    |
| 使用温度範囲                            | 0°C~35°C                    |                 | 0     | -             | 50                    | °C                 |
| 特性                                |                             |                 |       |               |                       |                    |
| 光電面量子効率                           | 20%以上(390~400nm)            |                 | 20    | -             | -                     | %                  |
| 光電面ルーメン感度                         | $35 \mu A / \ell m$ 以上      | Sk              | 35    | -             | -                     | $\mu A / \ell m$   |
| 光電面青感度(コニヤ No.5-58)               | $5.5 \mu A / B \ell m$ 以上   | Skb             | 5.5   | -             | -                     | $\mu A / B \ell m$ |
| 増幅率                               | $1 \times 10^7$ で安定動作       |                 |       |               | $1 \times 10^7$ で安定動作 |                    |
| 動作電圧(増幅率 $1 \times 10^7$ 時)       | +1500V~+2500V               | Ebb             | +1500 | -             | +2500                 | V                  |
| 暗電流(増幅率 $1 \times 10^7$ 時, 25°C)  | 1000nA以下                    | ldb             | -     | -             | 1000                  | nA                 |
| 暗パルス率( " )                        | 80KHz以下                     |                 | -     | -             | 80                    | KHz                |
| 時間分解能( " , 1光電子, 全面)              | $1\sigma$ 3.4ns以下           | TTS( $\sigma$ ) | -     | -             | 3.4                   | ns                 |
| " 1500本平均値                        | 2.6ns以下                     |                 | -     | -             | 2.6                   | ns                 |
| 立上時間(増幅率 $1 \times 10^7$ 時, 1光電子) | 15ns以下                      |                 | -     | -             | 15                    | ns                 |
| エネルギー分解能( " )                     | 1光電子の最高電圧がである事              |                 |       |               | 1光電子の最高電圧がである事        |                    |
| " ピーク・バレー比                        | 1.1以上                       | P/V             | 1.1   | -             | -                     |                    |
| カソード光感度一様性(410nm, 5mmφ)           | -60° ~ +60° で $\pm 10\%$ 以内 |                 | -     | -             | $\pm 10$              | %                  |
| 遅延疑似パルス                           | 1%以下                        |                 | -     | -             | 1                     | %                  |
| 磁場特性(0.1ガウス)                      | 特性変化ないこと                    |                 |       |               |                       |                    |
|                                   |                             |                 |       |               |                       | 特性変化ないこと           |

<納入品添付データ>

- (a) 製造番号
- (b) 増幅率の電圧依存性
- (c) 光電面青感度 : Sk b
- (d)  $1 \times 10^7$  の増幅率を与える電圧 : E b b
- (e)  $1 \times 10^7$  の増幅率での暗電流と暗パルス率 : l d b
- (f)  $1 \times 10^7$  の増幅率での一光電子相当光全面照射の場合の時間分解能 : T T S ( $\sigma$ )
- (g)  $1 \times 10^7$  の増幅率での一光電子相当光全面照射の場合の出力波高分布のe<sub>max</sub>/e<sub>min</sub>比 : P / V

図 2.7: 20 インチ光電子増倍管の規格

この20インチ光電子増倍管は、神岡実験に使用されていた20インチ光電子増倍管(R1449)を改良してできたものであり、その結果、優れた性能を得ることができた。特に大きな改良点は、1光電子レベルの非常に微弱な光を見ることができたことと、1光電子レベルにおける時間分解能が4nsecから3nsecと向上したことである。図2.8に、1光電子レベルの光の出力信号の波高分布を示す。

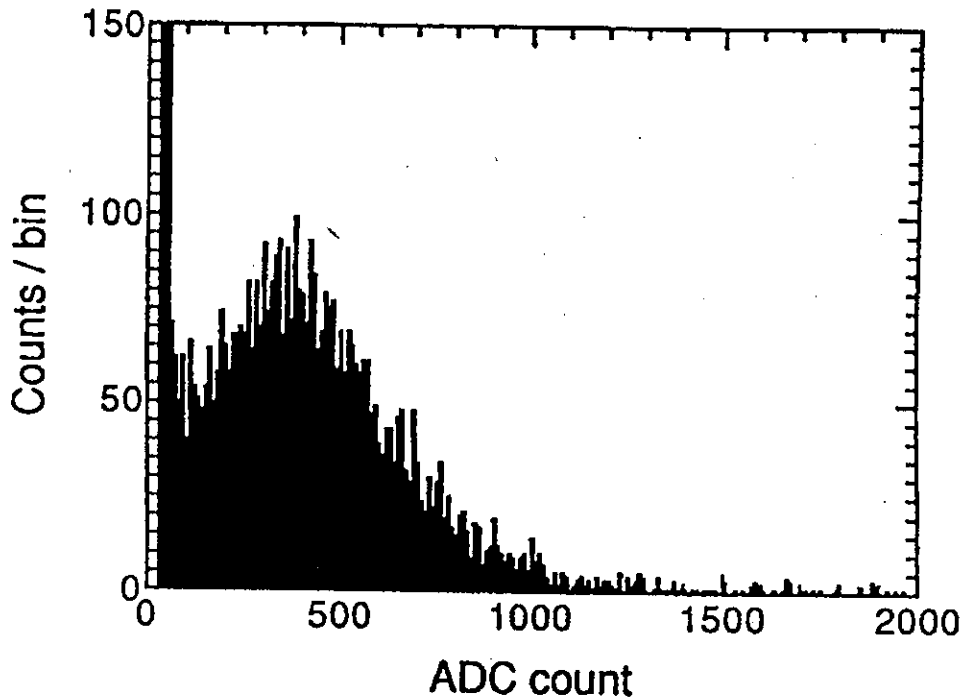


図 2.8: 20 インチ光電子増倍管の 1 光電子レベルの波高分布

### 2.3.2 量子効率

光子が光電面に入射すると、光電効果により光電子が飛び出す。量子効率とは、光電面から出る光電子数を入射した光子数で割った値である。光電面の材質としては、仕事関数の低いアルカリ金属を中心とした化合物半導体が使われている。今回の20インチ光電子増倍管の光電面には、バイアルカリ<sup>2</sup>が使用されている。なぜバイアルカリかというと、バイアルカリを使用した場合の量子効率がチェレンコフ光の波長領域に対して高いからである。また、熱電子放出が少ないこともあげられる。図2.9にチェレンコフ光のスペクトルを、図2.10に20インチ光電子増倍管の量子効率を示す。チェレンコフ光のスペクトルのピーク位置と量子効率のピーク位置はほぼ一致している。チェレンコフ光のスペクトルのピーク値 $\lambda = 390\text{nm}$ で、量子効率は22%である。

<sup>2</sup>2種類のアルカリ金属。Sb-Rb-Cs、Sb-K-Cs

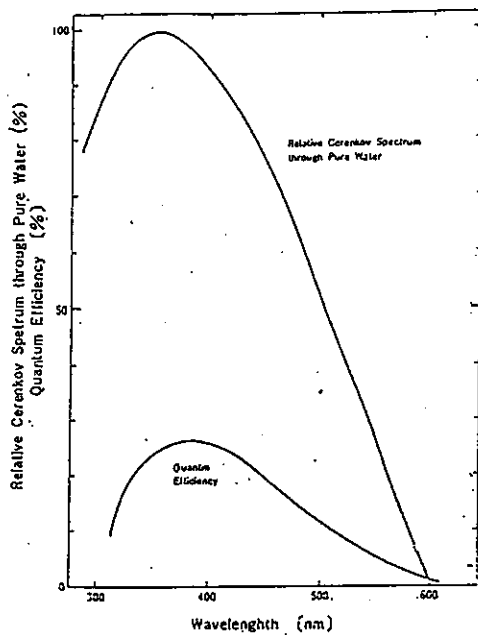


図 2.9: チェレンコフ光のスペクトル

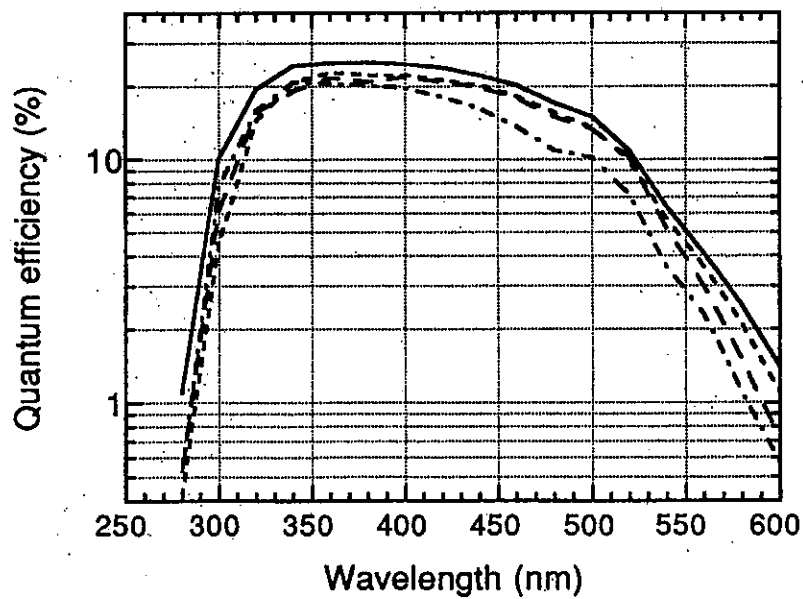


図 2.10: 20 インチ光電子増倍管の量子効率

### 2.3.3 利得

光電面から放出された光電子は、集束電極によりダイノードと呼ばれる電極に収束される。光電子はダイノードに衝突すると二次電子を放出し、放出された電子はさらに次のダイノードに衝突し二次電子を放出する。このように、各ダイノードで二次電子放出が繰り返され、最初のシグナルは最終的に大きく増幅されることになる。ダイノードとは、本研究に大きく関わってくる電子を増幅する部分である。この増幅された電子は、入射した光量に比例した信号として出力される。

ダイノードの種類はいくつかあり、用途により使い分けられている。今回の 20 インチ光電子増倍管には、ベネチアン・ブラインド型ダイノードが用いられている。図 2.11 は、シュミレーションによるダイノード間での電子の飛跡を表しているが、これがベネチアン・ブラインド型である。使用した理由は、第一ダイノードの面積をなるべく広くするためである。時間分解能をよくするためには、光電面から出た光電子の第一ダイノードまでの飛行時間をどこからでも一定に保ちたい。また、精度よく光量を測定するために、光電子を逃すことなくダイノードに集束させたい。光電面は 20 インチもある大口径なので、上の要請を満たすには、ベネチアン・ブラインド型のようなダイノードの面積が広いものが必要なのである。一方ベネチアン・ブラインド型は、ダイノードでの二次電子捕獲率が悪い。しかしそこは改良されており、他のダイノードの場合に匹敵するおよそ 78% の二次電子捕獲率実現している。図 2.11 にダイノードにおける電流分割回路を示す。

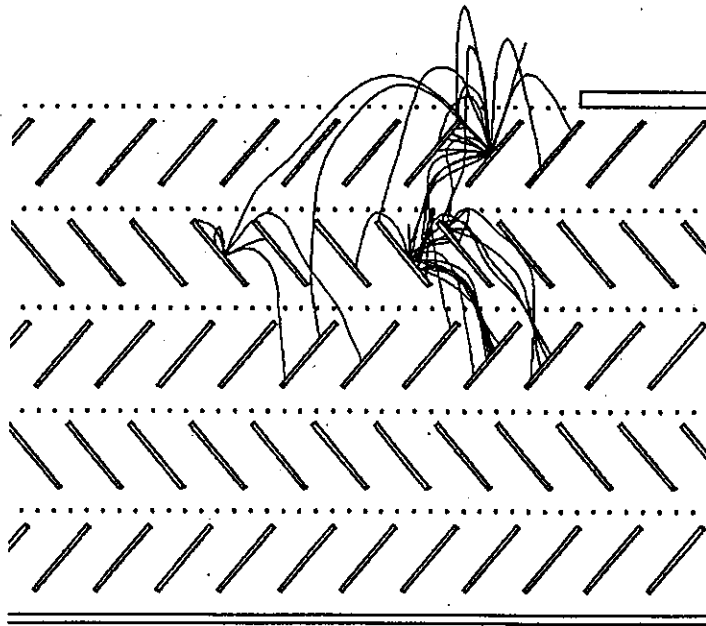


図 2.11: シュミレーションによる 20 インチ光電子増倍管のダイノード間での電子の飛跡

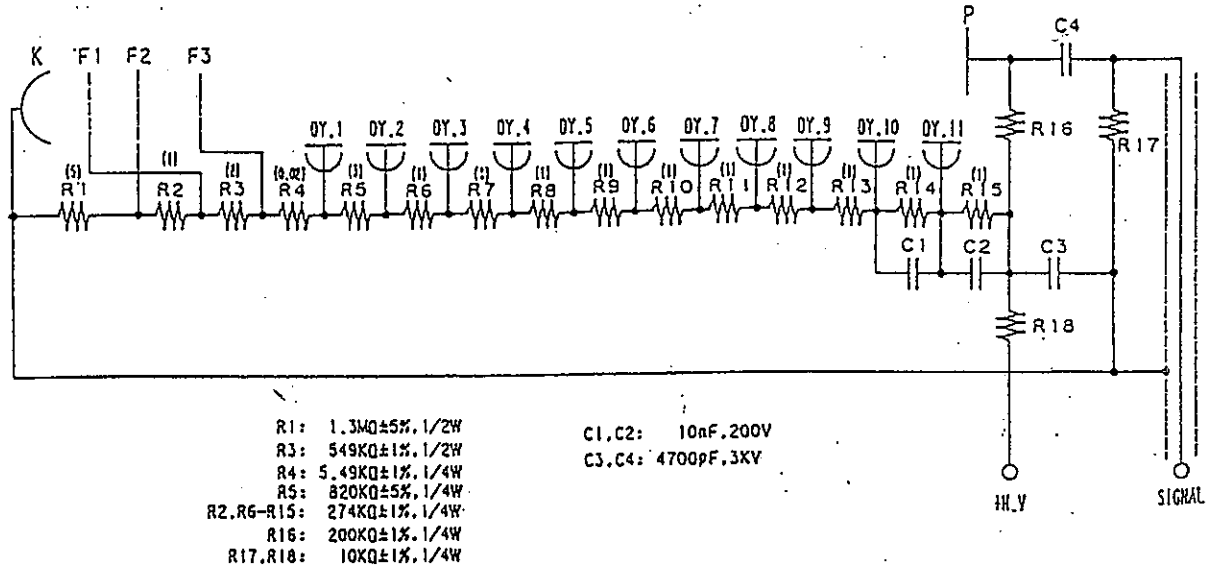


図 2.12: 20インチ光電子増倍管のプリーダ回路

各ダイノードあたりの二次電子放出比は、ダイノード間の電圧を  $E$  としたとき、

$$\delta = A \cdot E^\alpha \quad (2.1)$$

で表される。  $A$  は定数、  $\alpha$  はダイノードの形、材質によって決まり、一般に  $0.7 \sim 0.8$  程度である。

従って、光電子増倍管の利得と印加電圧値の関係は、

$$G = (A \cdot E^\alpha)^N \simeq \left\{ A \left( \frac{V}{N+1} \right)^\alpha \right\}^N = K \cdot V^{\alpha \cdot N} \quad (2.2)$$

と表される。  $N$  はダイノードの段の数、  $G$  は光電子増倍管の利得、  $V$  は陰極陽極間の電圧である。  
 $\alpha \cdot N \simeq 7 \sim 9$  程度である。代表的な光電子増倍管の印加電圧値と利得の関係を図 2.13に、 $10^7$  利得の印加電圧値の分布を図 2.14に示す。

### 2.3.4 安定性

本研究の目的の一つは、利得の経年変化を調べることである。今回使用する 20 インチ光電子増倍管の長期的な利得の安定性をテストした結果は、存在しない。しかし、神岡実験に使われていた光電子増倍管の利得の安定性は、調べられている。図 2.15に、実際にカミオカ検出器に設置されていた光電子増倍管の利得の安定性を示す。図を見ればわかるように、利得の変化は 4 年間で  $\pm 3\%$  以内である。今回使用する 20 インチ光電子増倍管においても、同様な性能が期待される。

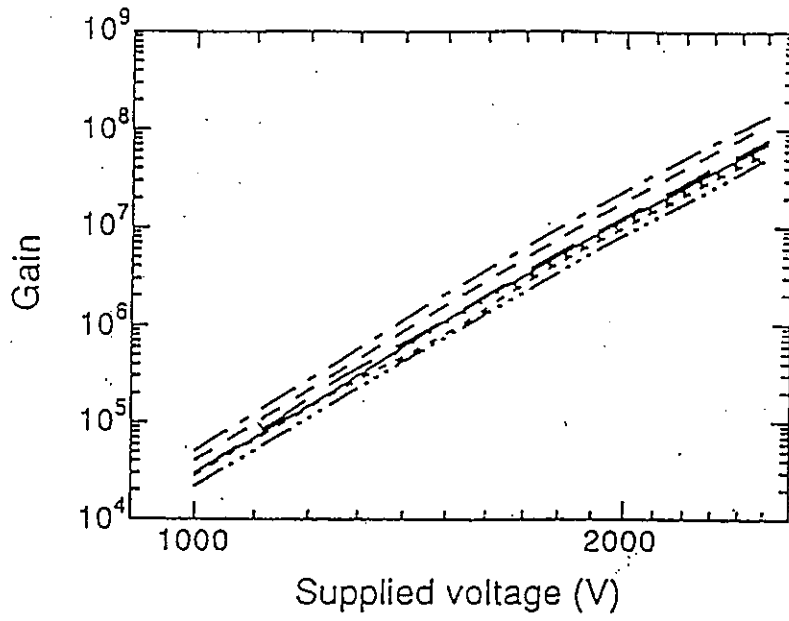


図 2.13: 印加電圧値と利得の相関図

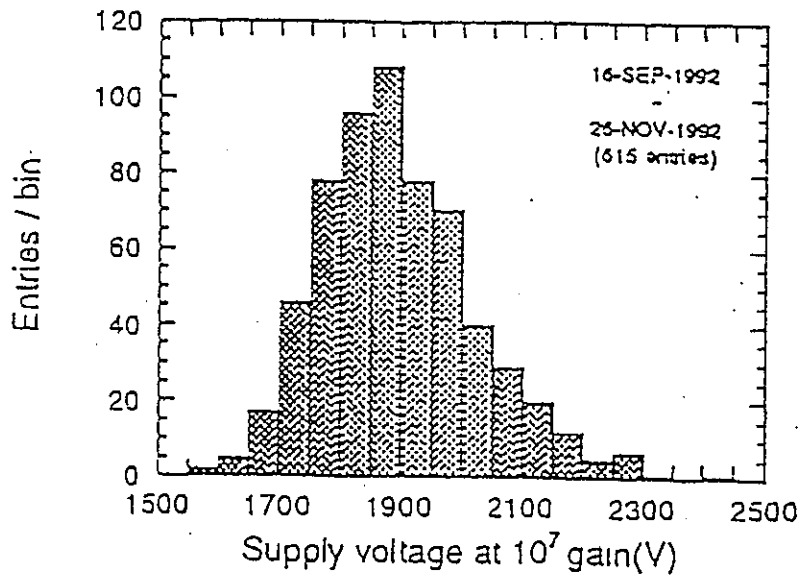


図 2.14:  $10^7$  利得の印加電圧値の分布

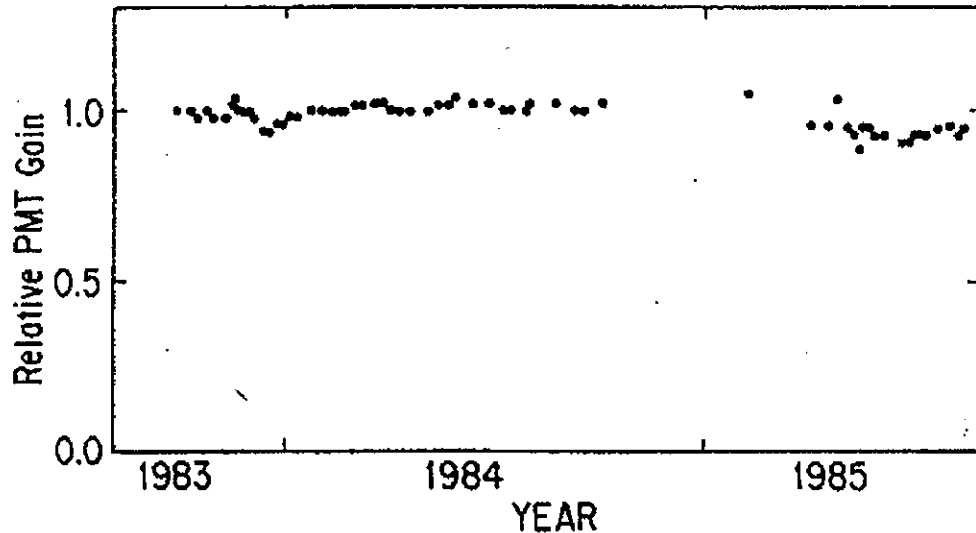


図 2.15: カミオカ検出器に設置されていた 20 インチ光電子増倍管の利得の安定性

## 2.4 エレクトロニクス

光電子増倍管からの信号を受けとり、電荷、時間情報をデジタル情報へ変換しているモジュールは、ATM<sup>3</sup>である。ATM は、ADC<sup>4</sup>、TDC<sup>5</sup>、増幅器、波高弁別器、メモリーからなる。ATM は、TKO<sup>6</sup>規格に基づいた東芝製モジュールで、スーパーカミオカンデ検出器のために作られた。図 2.16 に ATM のブロックダイアグラムを示す。

ATM はそれぞれ、12 本の光電子増倍管からの信号を扱う。光電子増倍管からの信号は、ATM 内で増幅され電流分配器によっていくつかに分けられる。そのうちの一つは、波高弁別器をとおされたあと、12 チャンネル分の信号と足し合わされて、HITSUM と呼ばれるアナログ信号になる。別の二つは、TAC<sup>7</sup>/QAC<sup>8</sup>によって、時間情報と電荷情報に相当するパルス高の信号にそれぞれ変換される。それぞれの ATM の HITSUM は、トリガーモジュールをとおしてワークステーションに送られる。そこでトリガーが作られる。トリガー信号は GONG<sup>9</sup>モジュールをとおして、全ての ATM に送られる。ATM はトリガー信号を受けると、TAC/QAC で作られた信号を ADC、TDC でデジタル信号に変換する。

<sup>3</sup>Analog Timing Module

<sup>4</sup>Analog to Digital Converter

<sup>5</sup>Time to Digital Converter

<sup>6</sup>KEK(高エネルギー物理学研究所)で開発されたデータ収集システム。TRISTAN-KEK-Online

<sup>7</sup>Time to Analog Converter

<sup>8</sup>charge(Q) to Analog Converter

<sup>9</sup>Go or Not Go



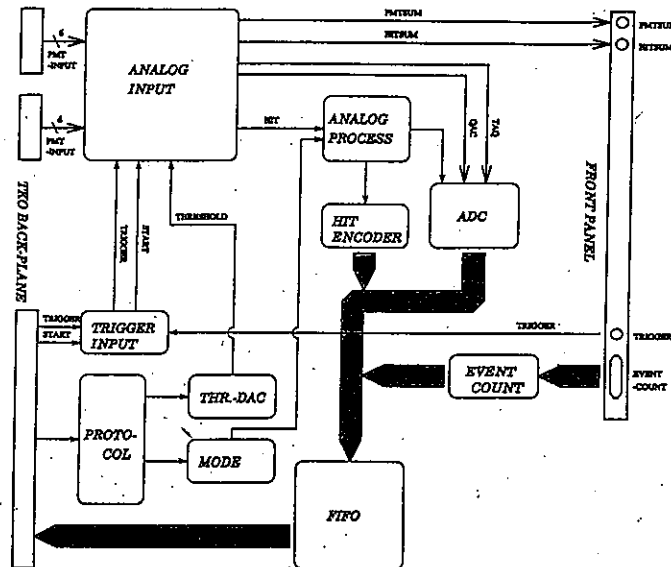


図 2.16: ATM のブロックダイアグラム

## 2.5 オンラインデータ収集システム

ATM で変換されたデジタル情報は、FIFO<sup>10</sup>メモリに送られる。FIFO メモリの情報は、SCH<sup>11</sup>と呼ばれる VME<sup>12</sup>制御ボードに送られ、さらに SMP<sup>13</sup>と呼ばれるメモリバッファに蓄えられる。デジタル情報はその後、8 台の計測用ワークステーションに送られ、FDDI<sup>14</sup>をとおして、1 台のクライアントワークステーションに集められる。転送されたデータを各事象ごとに整理して記録している。図 2.17 にデータ収集系のブロックダイアグラムを示す。

## 2.6 オフライン計算機システム

クライアントワークステーションのデータは、検出器と研究棟を結ぶ FDDI ネットワークを介して、研究棟のオフライン計算機システムに送られる。収集されたデータは、まずテープに記録されたあと、10 台のワークステーションからなる並列データ処理装置に送られ解析される。解析された結果は、再びテープに記録される。

<sup>10</sup>First In First Out

<sup>11</sup>Super Control Header

<sup>12</sup>Versa Module Europe

<sup>13</sup>Super Memory Partner

<sup>14</sup>光ファイバケーブル

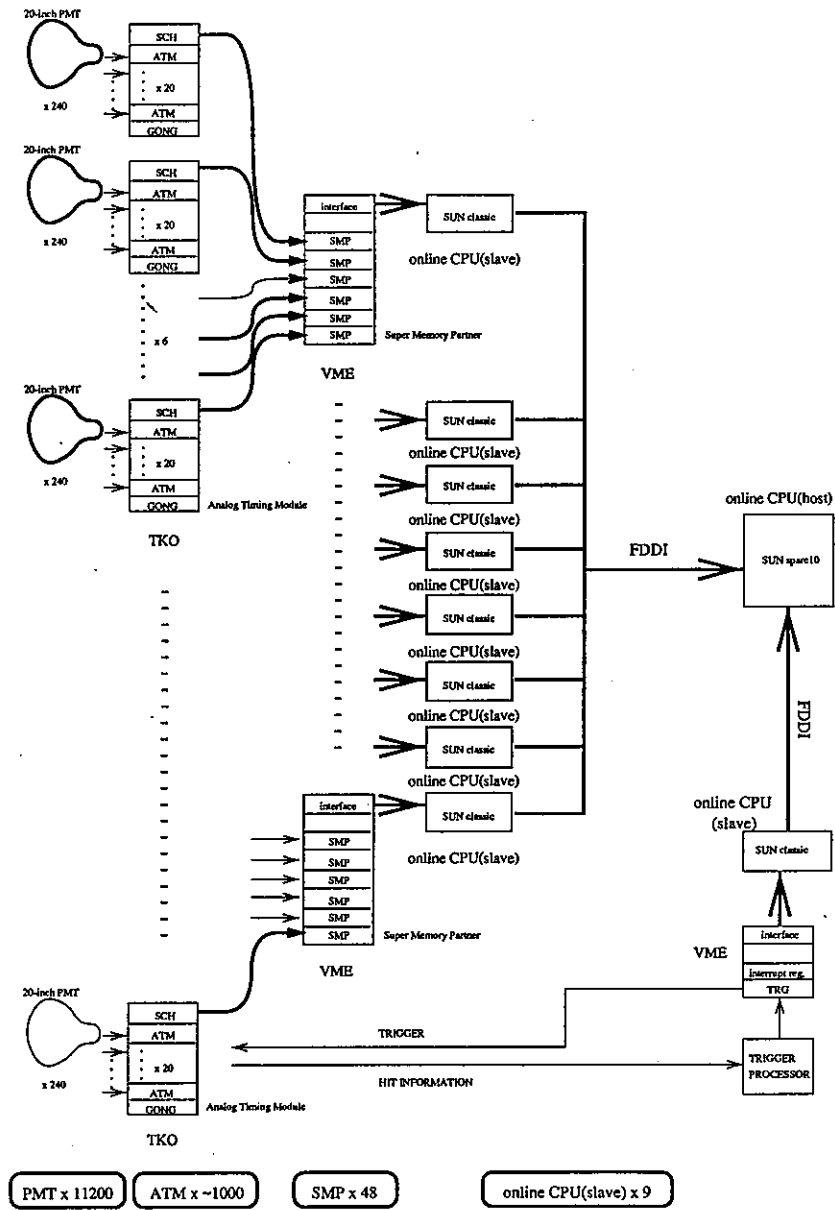


図 2.17: データ収集系のブロックダイアグラム

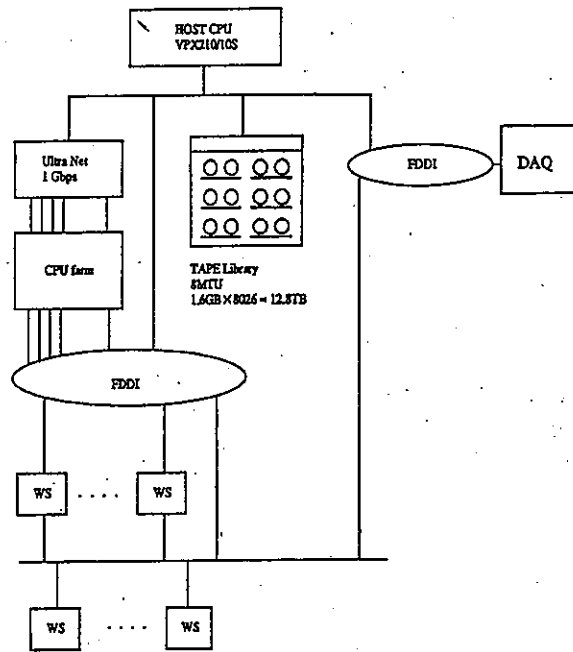


図 2.18: オフラインシステム

## 第 3 章

### 較正実験装置

この章では、本研究に用いるエネルギー較正装置について述べる。

#### 3.1 概要

本研究の目的である、光電子増倍管の利得をそろえ、経年変化を調べるために、以下のような特性を備えたエネルギー較正装置が必要である。

- A. チェレンコフ光に近い波長を出す
- B. パルス光源である
- C. 等方的に光を発する
- D. 光量が調節できる
- E. 光量が安定している
- F. 水槽内に出し入れすることができ、設定した場所に精度良くセットすることができる
- G. 寿命が長い

そこで、図 3.1にあるようなエネルギー較正装置を製作することにした。

光源にはキセノンフラッシュランプを用いる。放出された光はフィルターを通して光ファイバーに入り、その後二つに分けられる。一方の光は、検出器中央にある球形のシンチレーター(シンチレーターボール)に導かれ、そこで検出器全体に放出される。もう一方は、キセノンフラッシュランプの光量の変化を見るための 2 インチ光電子増倍管と、フォトダイオードに導かれる。

キセノンフラッシュランプ、フィルター、2 インチ光電子増倍管は、アルミで覆われたボックスの中に設置されている。キセノンフラッシュランプの放電により、ノイズがのってしまうので、フォトダイオードはボックスの外に設置されている。

次節から、この装置を構成している一つ一つの部分について、説明していくことにする。

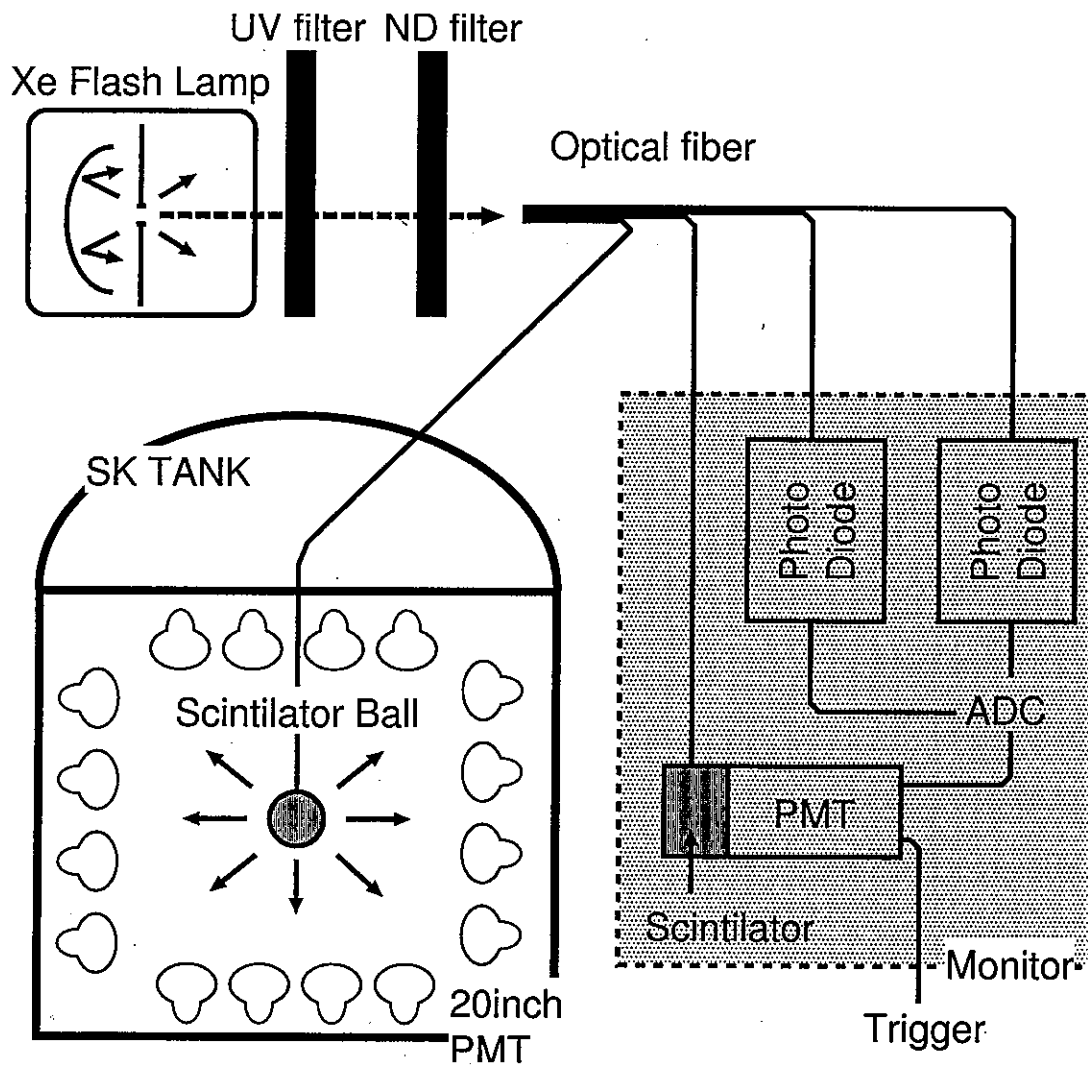


図 3.1: エネルギー校正システム

## 3.2 キセノンフラッシュランプ

本研究では光源に、浜松ホトニクス社製高安定キセノンフラッシュランプ L4634-01(以下 Xe-lamp)を使用することにした。Xe-lamp の円筒形のガラスバルブ内には、陽極、陰極、トリガープローブ<sup>1</sup>、スパーカ<sup>2</sup>が組み込まれており、また高純度のキセノンガスが封入されている。トリガープローブ間での予備放電のあと、陽極、陰極間で放電、発光させる。図 3.2に、Xe-lamp の外観と構造を示す。表 3.1に、Xe-lamp の仕様を示す。

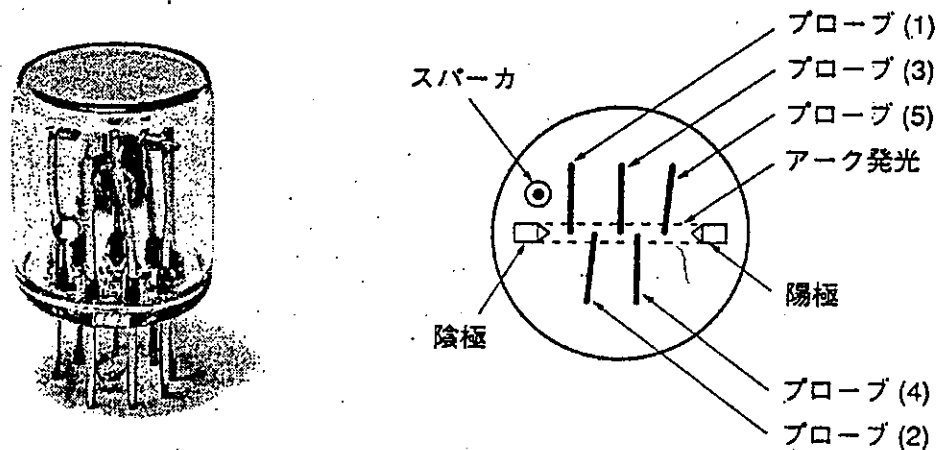


図 3.2: Xe-lamp の外観および構成

|                 |                       |
|-----------------|-----------------------|
| 型名              | L4634-01              |
| アークサイズ          | 1.5mm                 |
| バルブ形状           | 平行光                   |
| 窓材              | UV ガラス                |
| 放射波長            | 185~2000nm            |
| 発光繰り返し周波数 (Max) | 100Hz                 |
| 光出力変動 (Max)     | 5%                    |
| 動作寿命            | $5 \times 10^8$ フラッシュ |

表 3.1: Xe-lamp の仕様

<sup>1</sup>トリガープローブとは、予備放電のための電極で Xe-lamp の主放電を安定にそして容易にさせる働きを持つ。

<sup>2</sup>スパーカは、放電が毎回安定して動作できるように取り付けられている電極である。

この Xe-lamp を使用した理由は、以下のとおりである。

- A. 原理上 Xe-lamp がパルス光源であるから。
- B. 一回一回の放電による光出力の安定性に優れているから。そのばらつきは5%であり、アルゴンなど他の放電ランプに比べてよい。また、数時間使用したあとの全体的な光量の変化は1%である。
- C. 寿命はフラッシュ数にして  $5 \times 10^8$  回であり、長寿命であるから。仮に 20Hz としても約 290 日使用でき、利得の経年変化の測定には十分である。しかし、放射強度はその間に 20% 落ちてしまい、長期的な安定性はあまりないと言える。
- D. シンチレーターボールの吸収スペクトル(図 3.8 参照)に合うように、窓材に UV 透過ガラスを用意することができるから。

Xe-lamp の放射スペクトルを図 3.3 に示す。

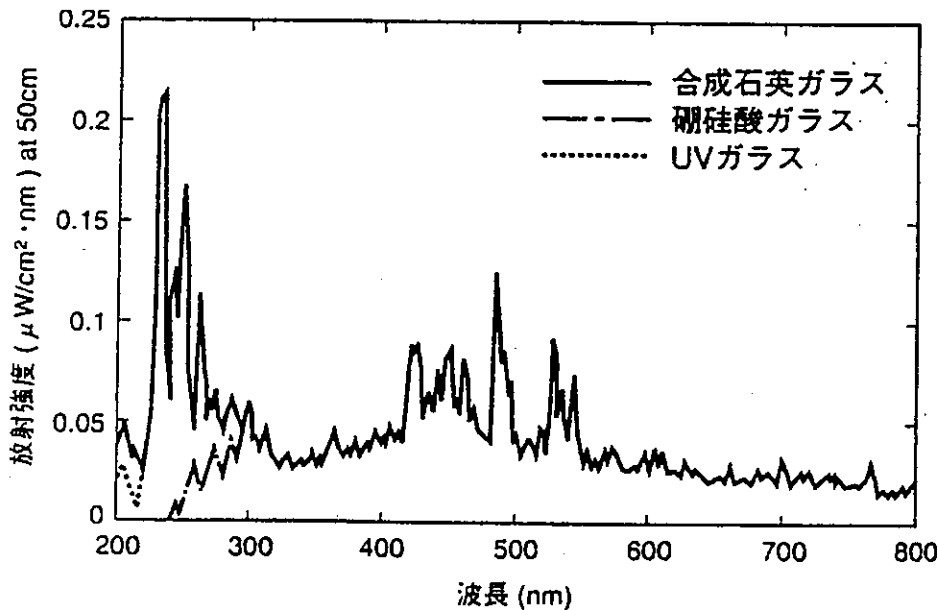


図 3.3: Xe-lamp の波長分布

このように、放射スペクトルは紫外から可視および赤外にわたって連続しているが、窓材に UV 透過ガラスを使うことで、紫外域を強くすることができる。

Xe-lamp の波形を図 3.4 に示す。ひと目盛りは 100nsec である。

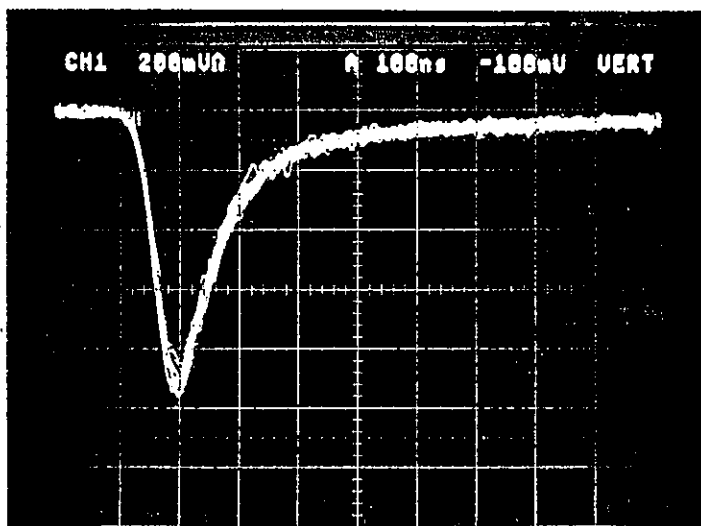


図 3.4: Xe-lamp の波形

### 3.3 ガラスフィルター

Xe-lamp からでた光は、UV フィルター (紫外透過可視吸収フィルター)、ND(neutral density) フィルター、ディフューザーを通過して、光ファイバーに入る。

UV フィルターは、紫外域の波長の光を透過させ、可視光域の光を減衰させる。図 3.5 に光透過率の波長依存性を示す。UV フィルターを使用した理由は、シンチレーターボールの吸収スペクトル (図 3.8 参照) が、紫外域を中心としているからである。

ND フィルターは、全ての波長領域について光を減衰させる。水槽内の光電子増倍管に届く光量を調節するために使用する。Xe-lamp は高出力のものを使用しているので、ND フィルターがなくても、水槽内には十分な光量が届く。

ディフューザーは、入射した光を乱反射させる機能がある。Xe-lamp の放電による光は、場所ごとで光量が違ってしまふ。ディフューザーを使うことで、光ファイバーがずれてしまっても、水槽内に導かれる光量が大きく変わることはない。表 3.2 にこの 3 つの型名を示す。

|      | UV フィルター | ND フィルター        | ディフューザー          |
|------|----------|-----------------|------------------|
| 型名   | UV-D36C  | FNDU-50C02 シリーズ | DFSQ1-50C02 シリーズ |
| メーカー | 東芝       | シグマ光機           | シグマ光機            |

表 3.2: フィルターの型名



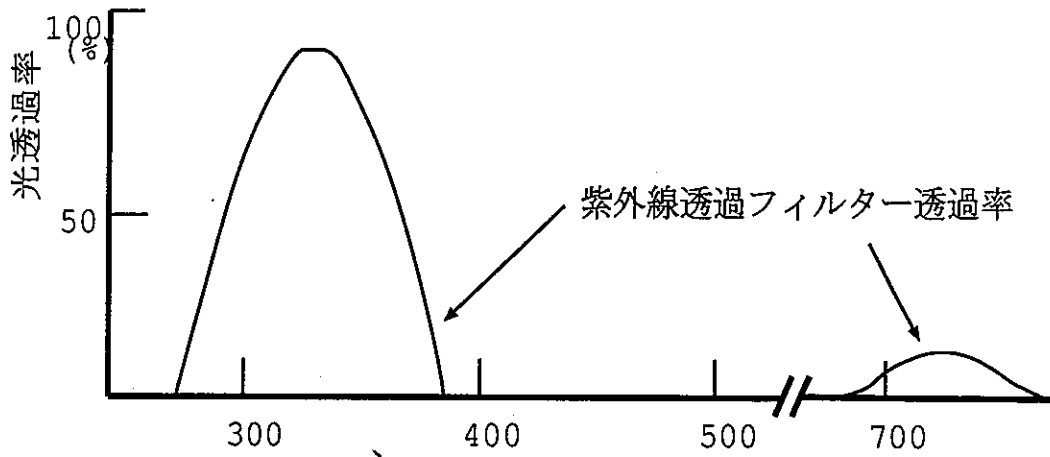


図 3.5: UV フィルターの光透過率の波長依存性

### 3.4 光ファイバー

ディフューザーを透過した光は、光ファイバーに導かれる。ディフューザーを透過した光の波長は紫外域を強くしてあるので、この領域で伝送損失が小さい光ファイバーが要求される。そこで、コア部に純粋石英を利用したフジクラ製大口径純粋石英コアファイバーを使用することにした。表 3.3 に仕様を、図 3.6 に損失波長特性を示す。

光ファイバーは 2 本あり、一方は水槽内にあるシンチレーターボールに向かい、もう一方は光電子増倍管、二つのフォトダイオードで構成されている光モニターシステムに導かれる。

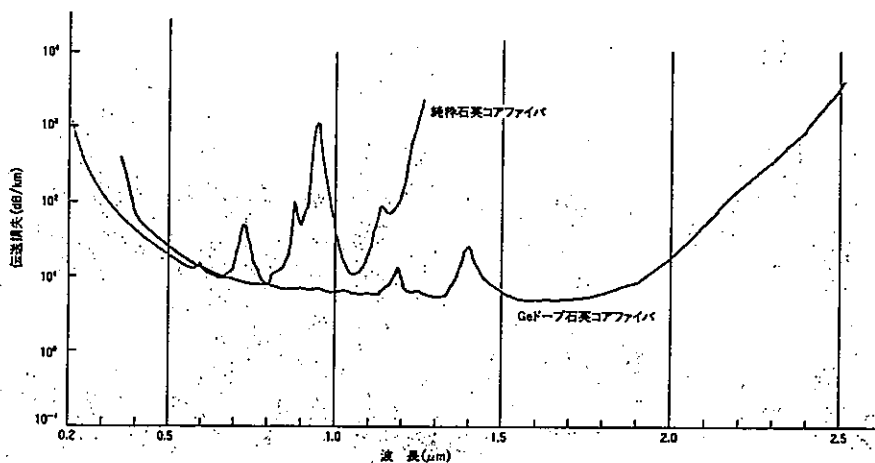


図 3.6: 大口径純粋石英コア光ファイバーの波長損失特性

| 型名  |        | 800/1000     |
|-----|--------|--------------|
| コア部 | コア材質   | 純粋石英         |
|     | コア径    | 800 $\mu$ m  |
|     | クラッド径  | 1000 $\mu$ m |
|     | 緩衝層    | 低屈折率シリコン     |
|     | 被覆     | ポリアミド        |
|     | 外径     | 1.7mm        |
|     | 伝送損失   | 図 3.6参照      |
|     | 開口数    | 0.2          |
|     | 重量     | 3.0kg/km     |
| 被強部 | 被強     | アラミッド繊維      |
|     | 外径     | 3.3mm        |
|     | 重量     | 9kg/km       |
|     | 許容曲げ半径 | 200mm        |

表 3.3: 大口径純粋石英コアファイバーの仕様

### 3.5 シンチレーターボール

光ファイバーからの光は、球形のシンチレーター（シンチレーターボール）をとおして、水槽内に等方的に発散させる。図 3.7にシンチレーターボールの写真を示す。シンチレーターボールの直径は 5cm である。3mm の穴を開け、そこに光ファイバーの先端部分を差し込み、入射した光がシンチレーターボールの中心部分にあたるようにしてある。組成は、BBOT が 50ppm<sup>3</sup>、MgO が 500ppm で、ベースはアクリルである。

通常シンチレーターは、荷電粒子の通過により励起されて紫外線を発光する第一溶質と、その紫外線を吸収して、光電子増倍管の最も量子効率のよい波長領域の光に変換する第二溶質 (Wavelength shifter) とからなる。BBOT はシンチレーターの第二溶質として使われる物質の一種で、その吸収および発光曲線は図 3.8のとおりである。シンチレーターの第二溶質として BBOT を選んだ理由を、以下に示す。

1. BBOT シンチレーターの発光曲線が水中を進んだチェレンコフ光のスペクトルに近いから
2. BBOT シンチレーターが第二溶質の中では光学的に極めて安定であるから

Xe-lamp の窓材、UV フィルターは、BBOT の吸収スペクトルに合うように決められている。

<sup>3</sup>百万分率の数値に添える記号。part per million

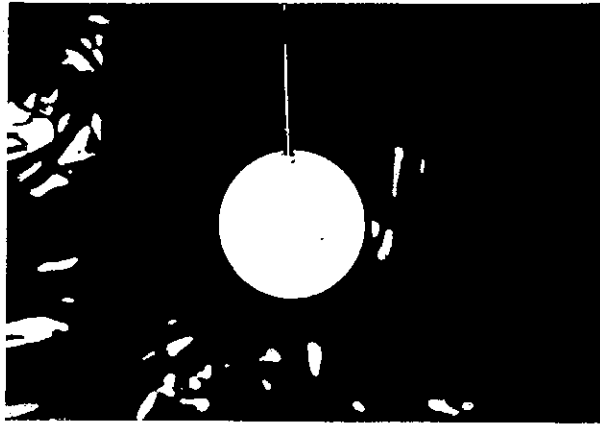


図 3.7: シンチレーターボール

MgO は、シンチレーターボールからの光を等方的に発散させるための、拡散剤である。シンチレーターボールの中で光を乱反射させている。しかし、シンチレーターボールから放出される光量は、実際には方向によって異なっている。その理由は正確にはわからないが、いくつか考えられる要素がある。まず一つに、光ファイバーから放出される光が構造上シンチレーターボールの中で下向きになってしまうために、どうしても下向きの光量が強くなってしまおうというのが考えられる。第 4.2 章で述べるが、光が下方向に強く出る傾向は実際にある。また、これは目で見た印象ではあるが、光ファイバーの末端の位置が、シンチレーターボールの中心ではないように見える。よって、最初にあげた理由と合わせて、特に横方向に行く光が対称にならないというのも考えられる。また、光を等方的に拡散する MgO がシンチレーターボールの中で均質になっていない、というのも考えられる。第 4.2 章で、光の不均一性についての補正の仕方を詳しく述べる。

シンチレーターボールに光を当て続けたとき、発光効率が落ちないか、水中で使えるか、の二つも保証されていなければいけない。しかしこれらは、[8] より、問題ないことがわかっている。

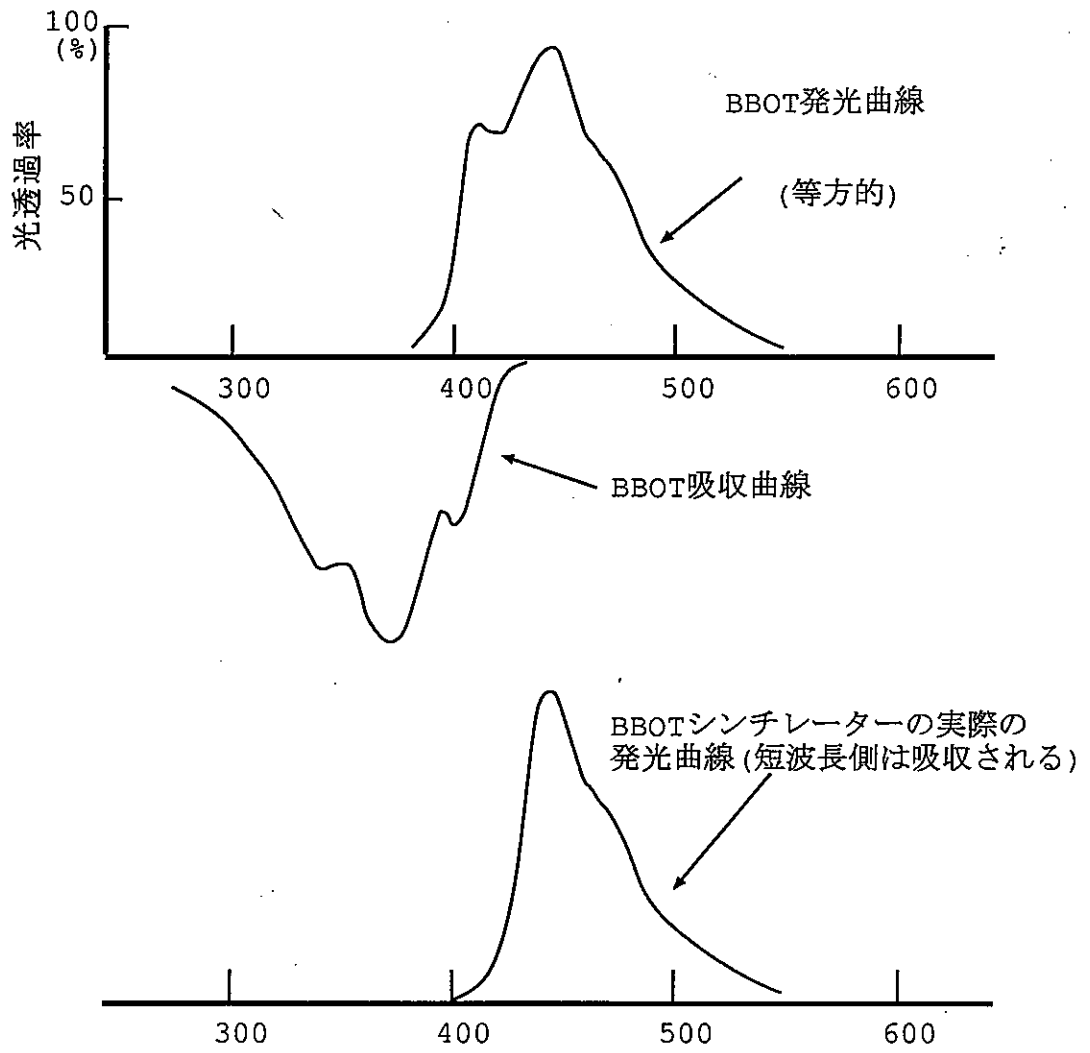


図 3.8: BBOT シンチレーターの吸収、発光曲線

### 3.6 LED(light emitting diode)

ところで、我々は実際の測定において、シンチレーターボールを検出器の上からワイヤーで吊るすという方法をとっている。よって、ワイヤーの長さから測定場所を同じにすることもできるが、ワイヤーは水槽内でどうしてもねじれてしまうので、シンチレーターボールの向いている方向、つまり極座標表示での $\varphi$ 方向の向きを毎回同じにすることはできない。

そこで、我々はシンチレーターボールの柄の部分に緑色のLED (light emitting diode)をつけることにした。(図3.9参照) Xe-lamp による測定の前に、LEDを点灯させて内水槽の光電子増倍管でデータをとることで、シンチレーターボールの $\varphi$ 方向の向きがわかることになる。その後、シンチレーターボールの $\varphi$ 方向の光の不均一性を表す4.6式を使って、正確な利得の経年変化を調べればよい。光の不均一性の求め方は、第4.2章で詳しく述べる。

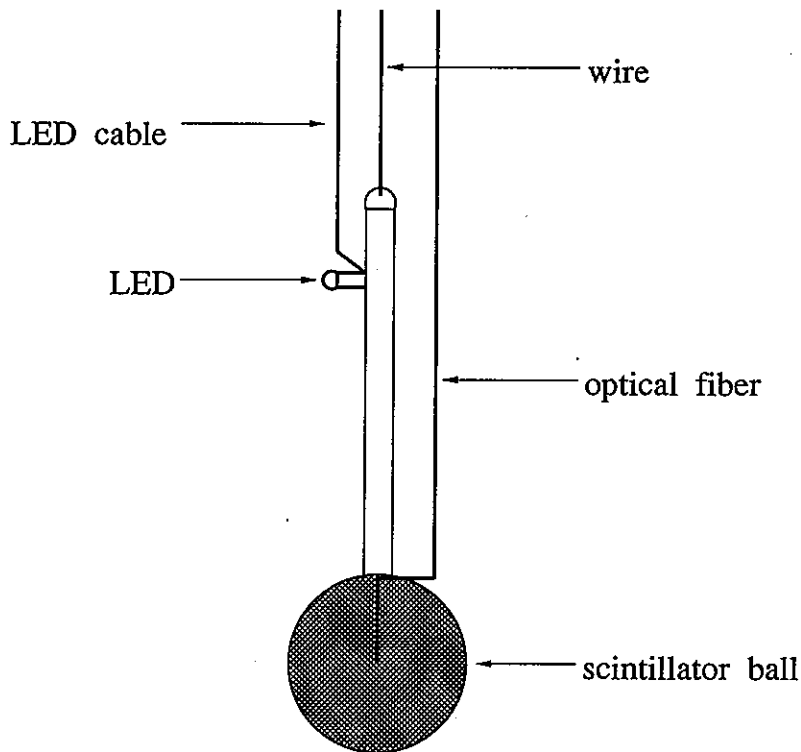


図 3.9: LED とシンチレーターボール

## 3.7 光モニター

シンチレーターボールの位置を変えて利得の場所依存性を調べるとき、Xe-lampの光量が測定の始めと終りで大きく変化してしまうと、正確な比較ができない。そこで我々は、Xe-lampの数時間以内の光量の変化をモニターできるシステムを作ることにした。(図3.1参照)光ファイバーを使って、Xe-lampからの光を2inch光電子増倍管と二つのシリコンフォトダイオードに導く。計三つの検出器を使用した理由は、一つの検出器でモニターするよりも信頼性がより高くなるためである。

2inch光電子増倍管は、浜松ホトニクス社製ヘッドオン型2inch光電子増倍管R329を使用した。ガラス表面には、シンチレーターボールと同じ材質のシンチレーターを取り付けている。光ファイバーをシンチレーターの中に埋め込み、周りを黒テープで遮光している。シンチレーターを取り付けた理由は、水槽内の光電子増倍管と同じ波長領域で比べるためである。2inch光電子増倍管の陰極放射感度と量子効率を図3.10に、仕様を表3.4に示す。

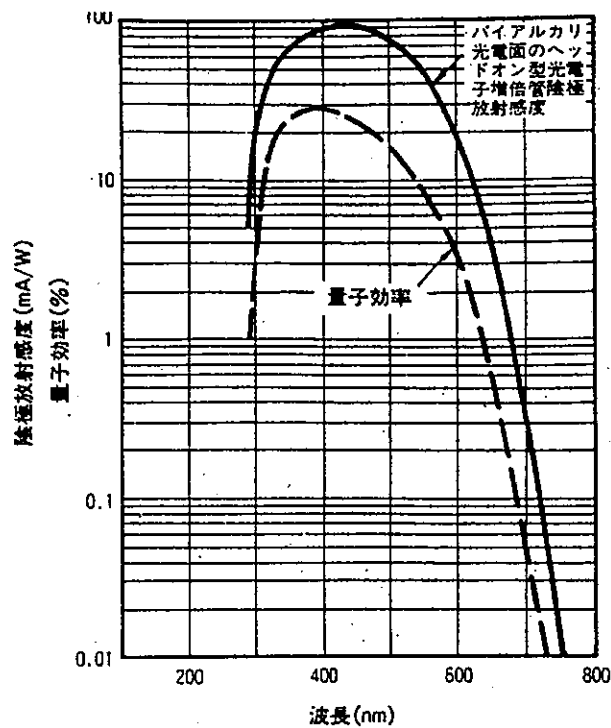


図 3.10: 2inch 光電子増倍管の分光感度特性

|         |                    |
|---------|--------------------|
| 型名      | R329               |
| 波長範囲    | 300~650nm          |
| 最大感度波長  | 420nm              |
| 光電面の種類  | バイアルカリ             |
| 窓材質     | 硼硅酸                |
| ダイノード構造 | ライン・フォーカス型         |
| ダイノード段数 | 12 段               |
| 最大印加電圧  | -2700V             |
| 利得      | $1.3 \times 10^6$  |
| 暗電流     | $\leq 40\text{nA}$ |
| 立上り時間   | 2.6ns              |
| 電子走行時間  | 48ns               |

表 3.4: ヘッドオン型 2inch 光電子増倍管の仕様

フォトダイオードは、DC コンバータ、温度補償バイアス回路、高速増幅器とセットになっている、浜松ホトニクス社製 APD (アバランシェフォトダイオード) モジュール C5331-12 を使用した。これを使用した理由は、内蔵されているアバランシェフォトダイオードが他のフォトダイオードより短波長の光に対して感度がよく、また DC コンバータなどとセットになっているので、扱いが簡単だからである。アバランシェフォトダイオードの分光感度特性を図 3.11 に、仕様を表 3.5 に示す。

アバランシェフォトダイオードを二つ使っている理由は、多くの光検出器でモニターしたほうがより正確に比較できるからである。また、このモジュールは大変空調のよい部屋に設置されているので、フォトダイオードの温度変化を気にする必要はない。

|         |  |
|---------|--|
| 型名      | R5331-12                                   |
| 受光径     | 直径 3mm                                     |
| 感度波長範囲  | 200~1000nm                                 |
| 最大感度波長  | 620nm                                      |
| 信号帯域幅   | 0.004~40MHz(-3dB)                          |
| 光電変換利得  | $1.4 \times 10^4 \text{V/W}$ (620nm, M=30) |
| 利得温度安定性 | $\pm 2.5\%$ ( $25 \pm 10^\circ \text{C}$ ) |
| 消費電流    | 60mA                                       |

表 3.5: アバランシェフォトダイオードモジュールの仕様

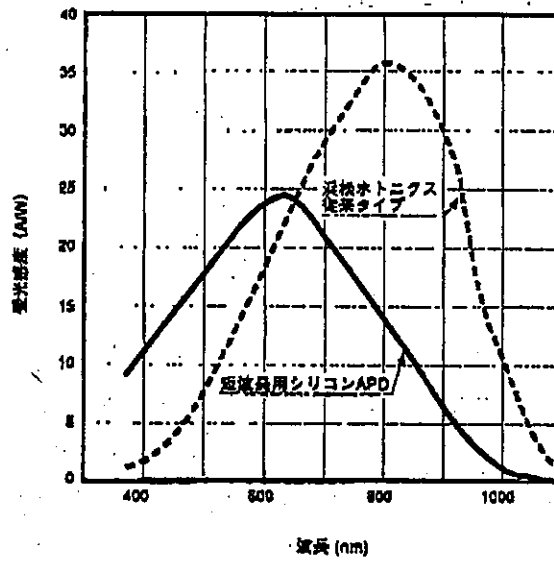


図 3.11: アバランシェフォトダイオードの分光感度特性

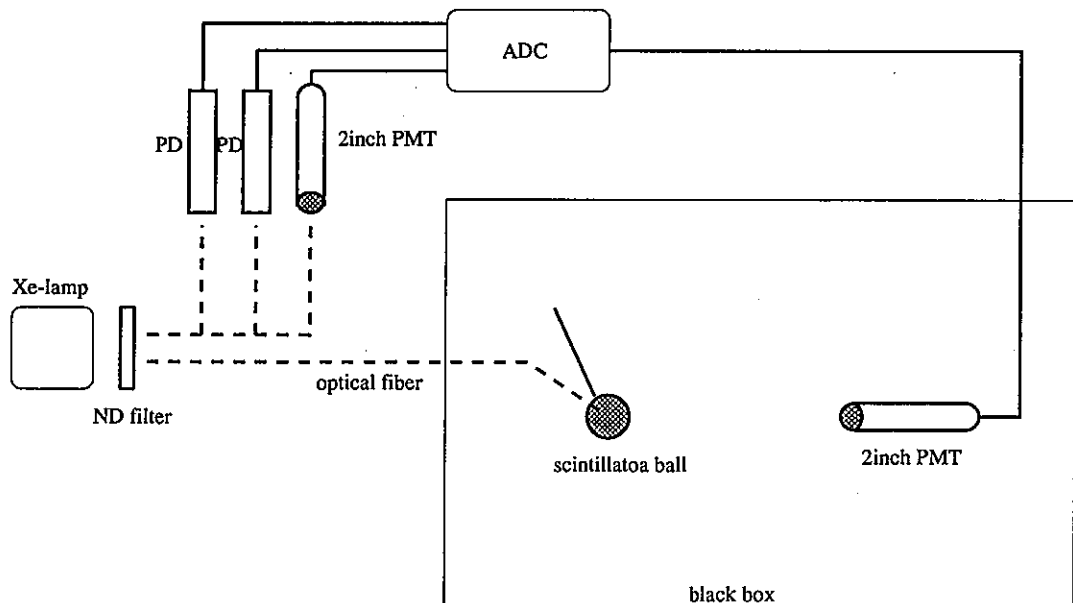


図 3.12: 光モニターテスト概図



ここで我々は、これらの光検出器がどの程度の精度でモニターとして働くか調べてみた。Xe-lampの光量を変化させたとき、シンチレーターボールから放出される光量と光モニターの受けとる光量が良い直線性を示すかを、実際に測定してみることにした。図3.12に光モニターの直線性のテストの概図を示す。

Xe-lampからの光量を実際に変化させることはできないので、3.3で説明したNDフィルターの種類を変えることで、様々な光量を実現する。シンチレーターボールは暗箱の中にセットする。適当な距離に光モニターとは別の2inch光電子増倍管を置き、シンチレーターボールの光量の変化を調べ、得られた信号と光モニターからの信号を比較してみる。

まず、光モニターの3つの検出器同士の直線性を調べてみた結果を、図3.13に示す。3つの光モニター同士の相関は非常によいことがわかった。

次に、シンチレーターボールの光を受ける光電子増倍管と、三つの光モニターの平均値との直線性を調べて見た結果を、図3.14に示す。非常に相関は良く、この光モニターは十分信頼できるものとわかった。

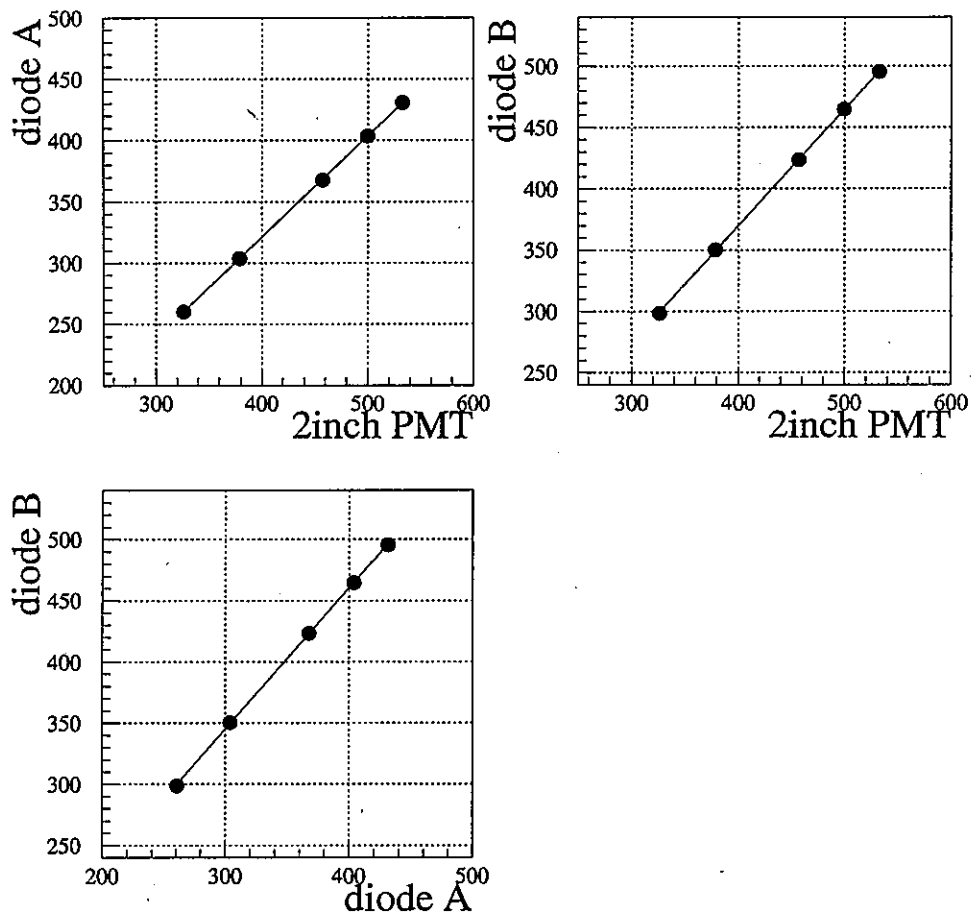


図 3.13: 光モニター同士の直線性

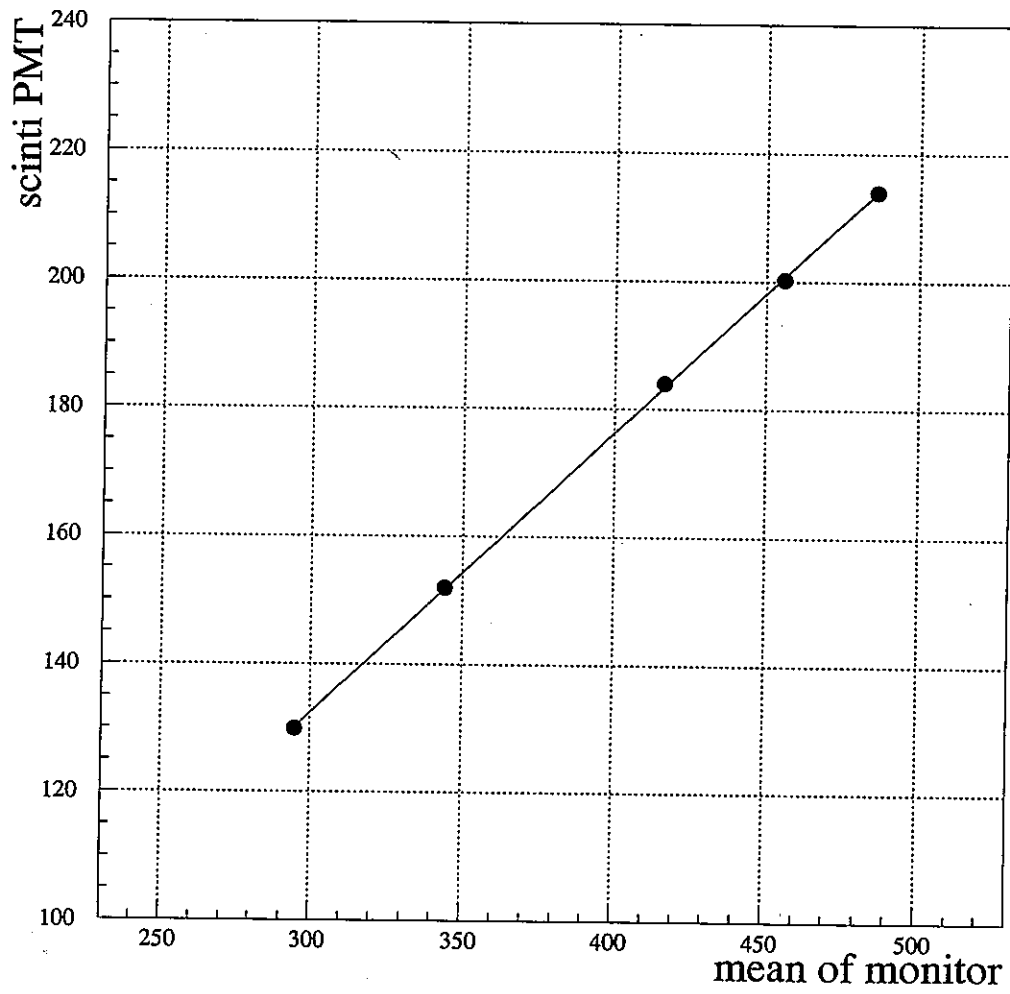


図 3.14: 光モニターとシンチレーターボールからの光の直線性

## 第 4 章

### 20 インチ光電子増倍管の利得較正

我々は、内水槽にある光電子増倍管が、同じ強さの光を受けたときに同じ大きさのシグナルを出すようにしたい。そこでまず、スーパー神岡実験の測定の始まる前に、第 3 章で述べた較正実験装置を使用して、20 インチ光電子増倍管の印加電圧値の調整を行なう。それより細かい利得の調整は、各利得のばらつきや水槽内の場所による利得の偏りを表すゲインテーブルを作ることで、ソフトウェア的に行なうことにする。さらに、実際の物理事象に基づくチェレンコフ光を使って、印加電圧値調整時の利得の評価、ゲインテーブル使用時の利得の評価、を行なうことにする。

#### 4.1 20 インチ光電子増倍管の印加電圧調整

##### 4.1.1 光電子増倍管の印加電圧値の初期値

スーパー神岡検出器に使用される 11,146 本の 20 インチ光電子増倍管は、浜松ホトニクス株式会社において製造された。まず、光電子増倍管の印加電圧値の初期値として、浜松ホトニクス株式会社が測定した、 $10^7$  倍の利得に対する印加電圧値を使用することにした。

浜松ホトニクスの測定では、タングステンランプを用いている。この測定は本来我々の見るチェレンコフ光の場合と比べて、スペクトル、連続光である、という点で異なる。そこで、浜松ホトニクスの測定値がどれくらい信頼できるか確かめるために、ビームテストを行なった。ビームテストは、高エネルギー物理学研究所 12GeV 陽子シンクロトン  $\pi^2$  ラインにおいて行なわれた。荷電粒子である  $\pi^-$  粒子、 $\mu^-$  粒子を水中に入射させて発生させたチェレンコフ光を使って、 $10^7$  倍の利得に対する印加電圧値を測定した。その測定結果を図 4.1 に示す。

ビームテストの結果と浜松ホトニクスの測定値は、よい直線性を示しているが、浜松ホトニクスの測定値はビームテストの結果よりも、約 100V 高い値を示している。ここでビームテストの結果を信頼するものとする、真の値より全体的に約 100V 高い値をセットすることになり、(2.2) 式から、利得に差ができてしまう。しかし、それによって生ずる全体的な利得の誤差を計算してみると約 4% であり、印加電圧値の初期値としては、気にならない程度である。これらから、浜松ホトニクスの測定値は、初期値として使用に絶え得るものであるということがわかる。

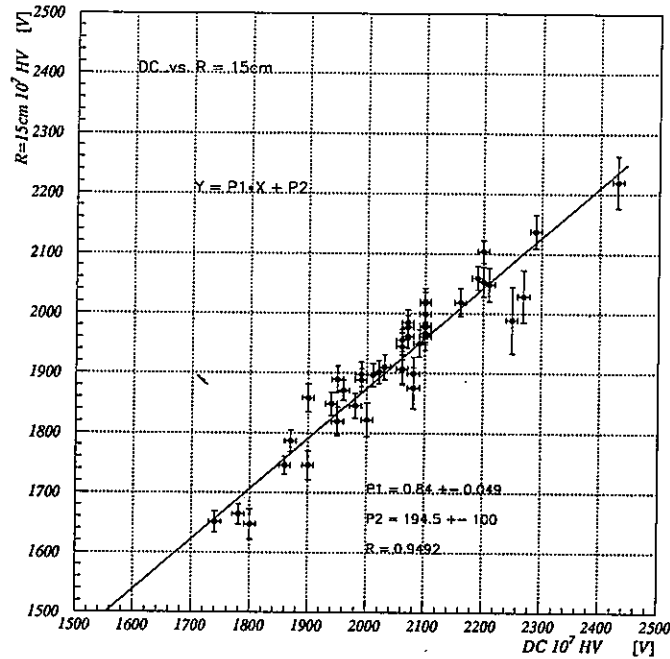


図 4.1: ビームテストの結果。横軸は浜松ホトニクスによって測定された  $10^7$  利得に対する印加電圧値、縦軸はビームテストの結果得られた  $10^7$  倍の利得に対する印加電圧値である。

#### 4.1.2 光電子増倍管の印加電圧値の調整

全ての光電子増倍管を水槽内に取り付けたあと<sup>1</sup>、印加電圧値に浜松ホトニクスの測定値をセットした。そして、1995年12月15,16日、第3章で説明した校正実験装置を使用して、空気中で電圧値を調整していった。以下に調整方法を述べる。

##### 電荷情報の補正について

電圧値を調整する際、個々の光電子増倍管が得る電荷情報から相対的な利得の違いを調べていく。しかし、光電子増倍管のシンチレーターボールに対する距離、角度、位置によって、個々の光電子増倍管に届く光量は変わってしまう。よって、得られた電荷情報をそのまま比較することはできない。

空気中での調整で、

- A. シンチレーターボールとそれぞれの光電子増倍管までの距離
- B. シンチレーターボールに対する光電子増倍管の見込み角

<sup>1</sup>上面の一部の光電子増倍管は取り付けられていなかった。これらについては、後日合わせた。

## C. シンチレーターボールの発する光の不均一性

の3つの影響を受けることになる。従って、この3つによる影響ができるだけ小さくて済むように、光電子増倍管の調整を行なっていった。

A,Bについては式4.1を使って、補正することにした。

$$Q_{cor1} = \frac{Qr^2}{f_{acc}(\theta_{PMT})} \quad (4.1)$$

$Q$ はADCのchannelの値、 $r$ はシンチレーターボールと個々の光電子増倍管との距離、 $f_{acc}(\theta_{PMT})$ は光電子増倍管の見込み角に対する電荷情報を表す関数である。Cについては、以下に述べる測定方法で影響を小さくすることにする。補正についての細かい議論は4.2で述べる。

## 側面の光電子増倍管の印加電圧値の調整

検出器の円筒側面に設置された光電子増倍管を調整するための測定方法を述べる。なお、検出器内の座標は、円筒形の水槽の中心を $(x,y,z)=(0,0,0)$ とし、 $z$ 軸を円筒の高さ方向にとることにする。まず一回の測定で、シンチレーターボールの位置に対して $z$ 座標で $\pm 3$ 層以内にある光電子増倍管の電荷情報を得る。(図4.2参照)シンチレーターボールの場所を方向に変え計9箇所での測定を行なうことで、側面にある全ての光電子増倍管についての電荷情報を得ることになる。

このようにした理由のまず一つは、シンチレーターボールの $\theta$ 方向<sup>2</sup>に放出される光の不均一性の影響を受けないようにするためである。シンチレーターボールの位置に対して $z$ 座標で $\pm 3$ 層ずつのデータをとることで、 $\theta$ の小さい領域での調整が可能となる。二つめの理由は、光電子増倍管のシンチレーターボールに対する見込み角の違いが小さい領域での調整が可能となるからである。

このような測定方法で得られたデータを使って、側面にある全ての光電子増倍管について式4.1の $Q_{cor1}$ を計算する。さらに、 $Q_{cor1}$ の平均である $Q_{cor1mean}$ を計算し、個々の光電子増倍管について $Q_{cor1}/Q_{cor1mean}$ を得る。この値を比較することで、個々の光電子増倍管の利得の大小がわかる。式2.2の $G = K \cdot V^{\alpha \cdot N}$ に従って、利得( $G$ )が同じになるように、印加電圧値( $V$ )の調整を行なった。

<sup>2</sup>極座標表示 $(r, \theta, \varphi)$ の $\theta$ 方向

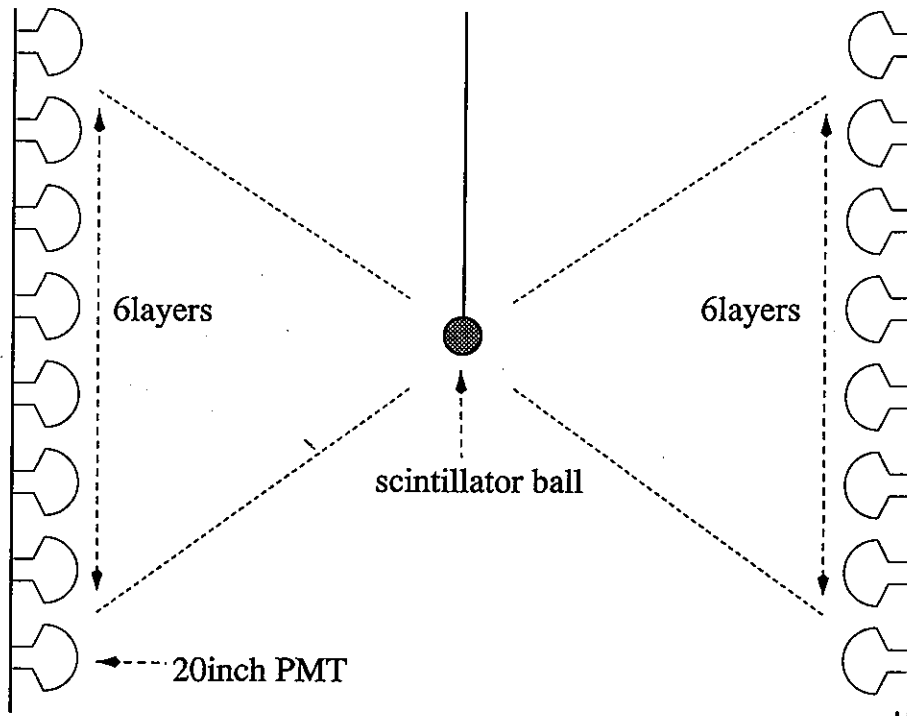


図 4.2: 側面の光電子増倍管の印加電圧値の調整方法

#### 上面、下面の光電子増倍管の高電圧値の調整

検出器の円筒上面、円筒下面に設置された光電子増倍管については、シンチレーターボールの位置が  $z=0$  のときのデータのみを使用した。まず、上面、下面の光電子増倍管をシンチレーターボールからの距離によるいくつかのグループに分ける。各グループは、 $1/r^2$  ( $r$  はシンチレーターボールとそれぞれの光電子増倍管までの距離) の差が 5% になるように分けられている。各グループ毎に式 4.1 の  $Q_{cor1}$  の平均  $Q_{cor1mean}$  を計算し、個々の光電子増倍管について  $Q_{cor1}/Q_{cor1mean}$  を得る。(4.3参照)

このようなグループ分けをした理由は、側面の光電子増倍管の場合と同じように、シンチレーターボールから放出される光の  $\theta$  方向に対する不均一性の影響を少なくするためである。また、各グループ同士の  $Q_{cor1mean}$  の比較は行なっていない。なぜならば、浜松ホトニクス社の測定値の、真の  $10^7$  倍の利得の印加電圧値に対するばらつきは、場所によらず一様であると考えられるからである。従って、統計的に各グループ同士の  $Q_{cor1mean}$  は同じであるという仮定を行なった。

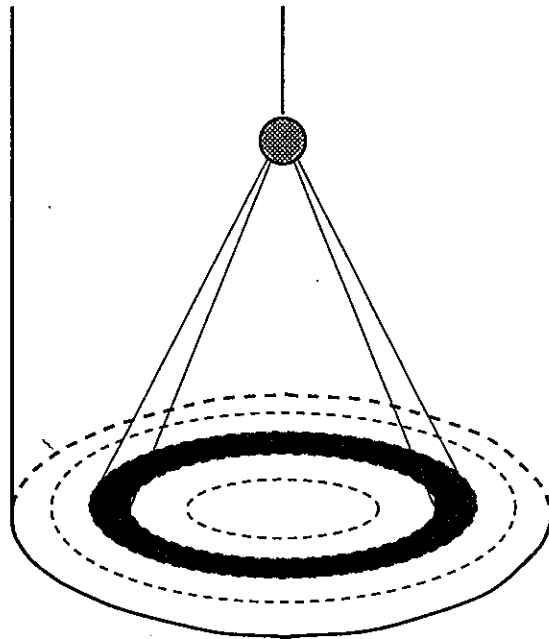


図 4.3: 上面、下面の光電子増倍管の印加電圧値の調整方法

#### 4.1.3 印加電圧値調整後の光電子増倍管の利得

以上のようにして印加電圧値を調整した。後日再度同じ方法により  $Q_{cor1}$  を求めて、光電子増倍管の調整する前と後の  $Q_{cor1}$  の分布を比較してみた。図 4.4に示す。

本来ならば、図 4.4の下のグラフは、 $\delta$  関数になるはずである。しかし、実際は 3.5% の広がりを持っている。この広がり、式 4.1の補正の不完全さと、印加電圧値を 1V 単位未満で調整できないことが原因として考えられる。

これよりも細かい調整は、ソフトウェアで行なうことにする。具体的には、シンチレータボールの不均一性を考慮に入れて、各光電子増倍管についての利得のばらつきや、場所による偏りを表すゲインテーブルを用意し、それを解析時に使用することにする。ゲインテーブルについては、4.2.3で述べる。



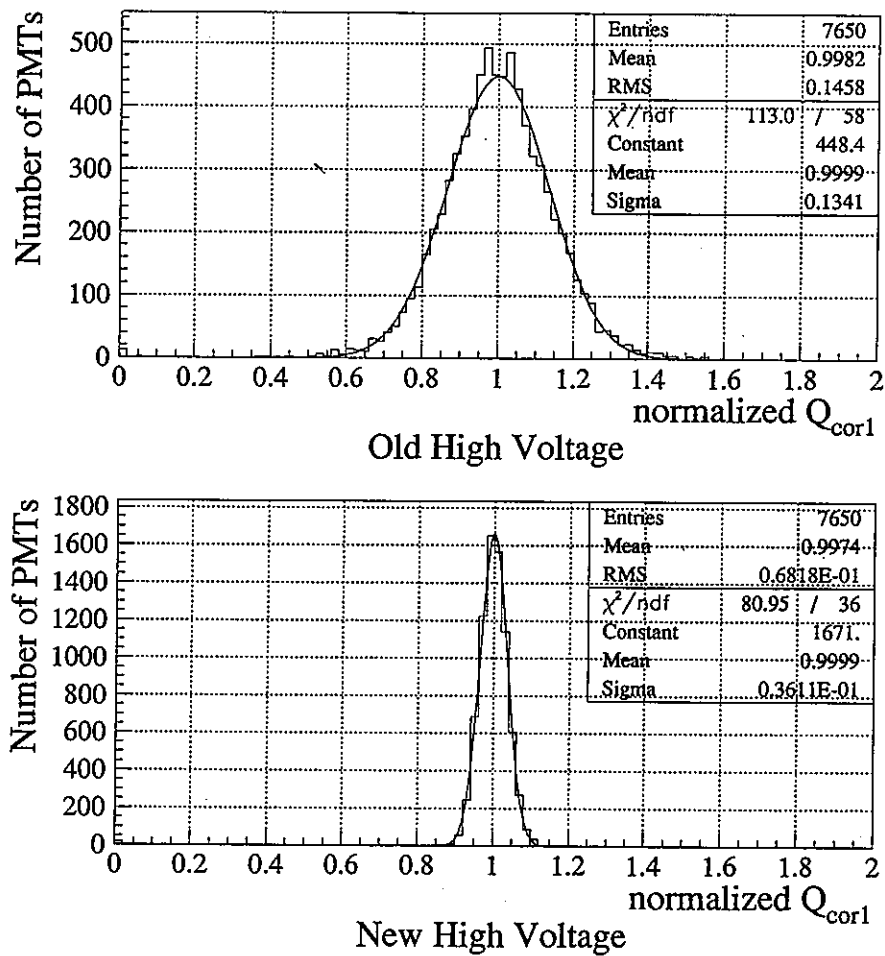


図 4.4: 印加電圧値の調整の前後における利得の分布。横軸は個々の光電子増倍管の  $Q_{cor1}$  を規格化した値。縦軸は光電子増倍管の数である。上図は調整前、下図は調整後である。なお、この図は側面の光電子増倍管についてである。

## 4.2 20インチ光電子増倍管の利得微調整

各光電子増倍管の利得ばらつきを表すゲインテーブルを作るためには、水槽内の光電子増倍管の利得が正確に比較できなければならない。従って、較正実験装置を使って得られる電荷情報に、様々な補正を加える必要がある。以下に示す要素については理解が得られているので、これらの補正を加えることで、より信頼できる結果を得ることができる。

その後、4.2.3でゲインテーブルをつくることにする。

## 4.2.1 シンチレーターボールに対する様々な補正

## A. シンチレーターボールに対する距離の違いの補正

シンチレーターボールから光は放射状に放出される。立体角の関係から、個々の光電子増倍管の受けとる光は、 $1/r^2$  ( $r$ はシンチレーターボールと個々の光電子増倍管までの距離)に比例する。よって、全ての光電子増倍管の電荷情報を、それぞれ $1/r^2$ で割る必要がある。

## B. シンチレーターボールに対する光電子増倍管の見込み角の違いの補正

シンチレーターボールに対する光電子増倍管の見込み角の違いも、考慮に入れなければいけない。なぜならば、20インチ光電子増倍管の光電面の形状により、シンチレーターボールに対する見込み角が異なると、光が入射する光電面の面積が異なるからである。光電効果を起こす面積が変わるということで、得られる電荷情報も変わってくる。また、光電子増倍管の設置されている向きは、側面では同一平面における円の中心、上面、下面では $z$ 方向に対してである。よって、水槽内のいかなる場所においても、その場所に対する光電子増倍管の見込み角は一樣ではないので、補正を考えなくてはならない。

ここでは、神岡実験において使われていた、見込み角に対する電荷情報の関数を用いて、補正を行なうことにした。式4.2に、その関数を示す。

$$f_{acc}(\theta_{PMT}) = 0.3542135 + 0.5104711 \cos \theta_{PMT} + 0.1160429 \cos^2 \theta_{PMT} + 0.0118482 \cos^3 \theta_{PMT} \quad (4.2)$$

$\theta_{PMT}$ は光電子増倍管の向きに対する入射光の角度である。図4.5に、実際にプロットした関数を示す。

## C. シンチレーターボールの発する光の不均一性の補正

シンチレーターボールは球形に作られているが、3.5でも述べたように、シンチレーターボールから放出される光量は、実際には方向によって異なっている。シンチレーターボールの発する光の不均一性を評価するために、ここでは便宜的に、シンチレーターボールに対して極座標表示で $\theta$ 方向と $\varphi$ 方向に分けて、不均一性を補正する式を求めることとした。図4.6にシンチレーターボールの座標に対する定義を示す。

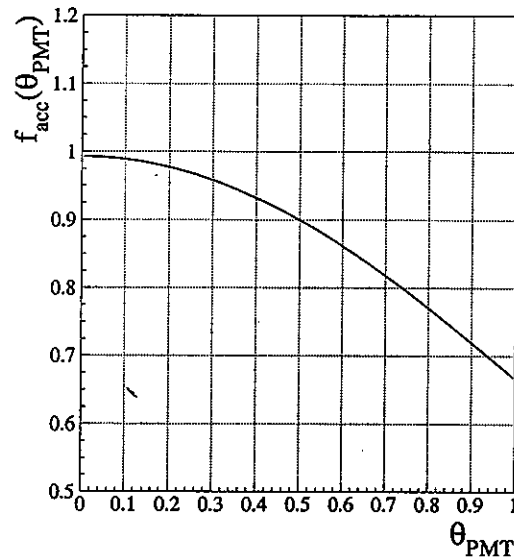


図 4.5: 光電子増倍管の見込み角に対する電荷情報の関数。横軸は光電子増倍管の向きに対する入射光の角度。縦軸は光電子増倍管の正面から光が入射したときを1としたときの、各入射光の角度における相対的な光電子増倍管の電荷情報。

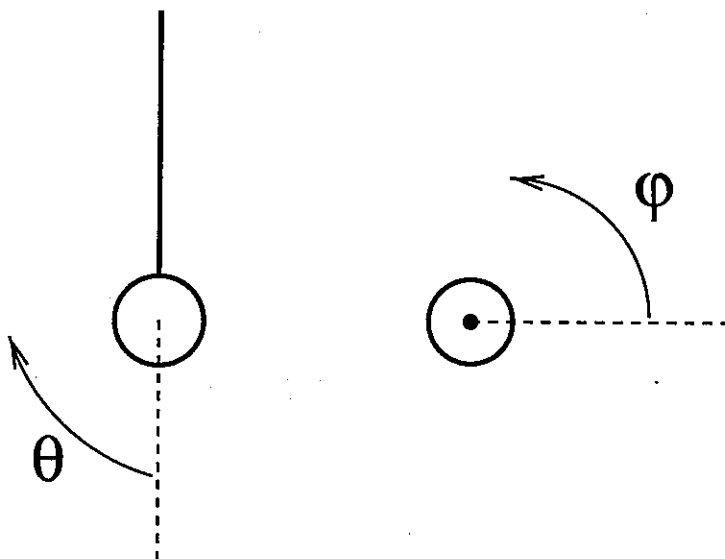


図 4.6: シンチレーターボールに対する座標の定義。左はシンチレーターボールを横から見たときの図で、柄の付いている方向を  $\theta = \pi$  とする。右はシンチレーターボールを上から見たときの図で、LED が付いている方向を  $\varphi = 0$  とする。

以下にスーパーカミオカンデの水槽内で求めた方法と、その結果を示す。

(a)  $\theta$  方向

$\theta$  方向依存性を求めるために、シンチレーターボールを水平に傾け、中心付近にある側面の光電子増倍管を使うという方法をとることにする。図 4.7 に示す。このようにする理由は二つある。一つは、シンチレーターボールに対する距離、見込み角の違いが小さい光電子増倍管で求めたいからである。二つめは、側面の光電子増倍管だけを使用したいからである。4.2.3 において述べるが、側面、上面、下面の光電子増倍管の利得は、システムティックにずれている。

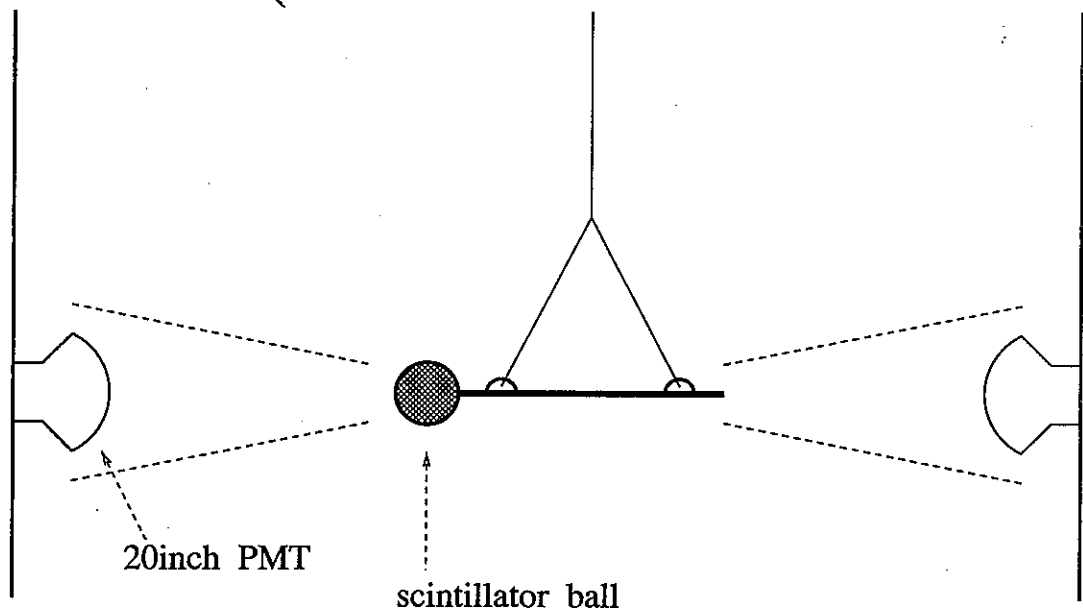


図 4.7: シンチレーターボールの  $\theta$  方向の光の不均一性の求め方

このような方法で、空気中と水中の 2 回調べる。また、式 4.3 で定義する  $Q_{cor2}$  を用いて、光量の分布を見ることとする。

$$Q_{cor2} = \frac{Qr^2}{f_{acc}(\theta_{PMT}) \times const} \quad (4.3)$$

$Q$  は光電子増倍管が得た電荷 (p.e.)、 $r$  はシンチレーターボールとそれぞれの光電子増倍管との距離、 $f_{acc}(\theta_{PMT})$  は式 4.2 で定義した、光電子増倍管の見込み角に対する電荷情報の関数である。 $r^2$  と  $f_{acc}(\theta_{PMT})$  の項を入れることで、個々の光電子増倍管が受けとる光量の違いを補正することができる。 $const$  は印加電圧値の調整を行なった後、それぞれの光電子増倍管の  $Q_{cor1}$  をその平均  $Q_{cor1mean}$  で割った値である。 $const$  の補正を入れる

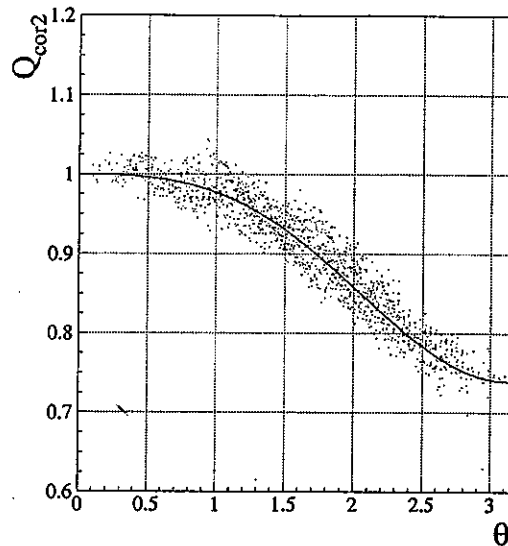


図 4.8:  $\theta$  の周期関数としてフィッティングした結果。横軸は図 4.6 で定義した  $\theta$ 、縦軸は  $\theta = 0$  を 1 としたときの各方向の  $Q_{cor2}$  である。

ことにより、個々の光電子増倍管の利得のばらつきを消すことができる。

さらに、光の不均一性を  $\theta$  の関数として求めるために、得られた結果を便宜的に  $\theta$  の周期関数としてフィッティングすることにする。図 4.8 に示す。

その結果、シンチレーターボールの  $\theta$  方向に対する光の不均一性を補正する式を  $f_{\theta}(\theta)$  とすると、式 4.4 のようになった。

$$f_{\theta}(\theta) = 0.8959245 + 0.130419\cos(\theta) - 0.0262928\cos(2\theta) \quad (4.4)$$

$\theta$  は図 4.6 で定義したものである。この式から、シンチレーターボールの中で光ファイバーが向いている方向に、光が強く発せられることが確認できた。光ファイバーが向いている方向とその反対方向との差は、約 21% である。また、この関数の系統誤差は、個々の  $Q_{cor2}$  の式 4.4 からのずれを調べた結果、約 1.5% であった。

#### (b). $\varphi$ 方向

$\varphi$  方向依存性を求めるために、シンチレーターボールを縦にした  $z = 0$  におけるデータと、そこからシンチレーターボールを  $\varphi$  方向に 180 度回転させたデータとを比較するという方法をとることにする。このようにした理由は、2 つのデータの差をとることで、光電子増倍管の利得のばらつきを消すことができるからである。なお、 $\theta$  方向の場合と同

じように、 $z=0$  付近にある光電子増倍管のみを使用する。

3.6で述べたように、シンチレーターボールを固定しておくための柄の部分には、LEDがついている。LEDはシンチレーターボールに対して常に一定の方向を向いているので、それを光らせることで、シンチレーターボールの方向を知ることができる。

また、式4.5で定義する $Q_{cor3}$ を用いて、光量の分布を見ることとする。この式を使うことにより、個々の光電子増倍管が受けとる光量の違いを最小限に押えることができ、正しい $\varphi$ 方向の光の不均一性を求めることができる。

$$Q_{cor3} = \frac{Qr^2}{f_{acc}(\theta_{PMT})} \quad (4.5)$$

$Q$ は光電子増倍管が得た電荷(p.e.)、 $r$ はシンチレーターボールとそれぞれの光電子増倍管との距離、 $f_{acc}(\theta_{PMT})$ は式4.2で定義した、光電子増倍管の見込み角を補正する関数である。

さらに、光の不均一性を $\varphi$ の関数として求めるために、 $\theta$ 方向のときと同じように、得られた結果を便宜的に $\varphi$ の周期関数としてフィッティングすることにした。図4.9に示す。

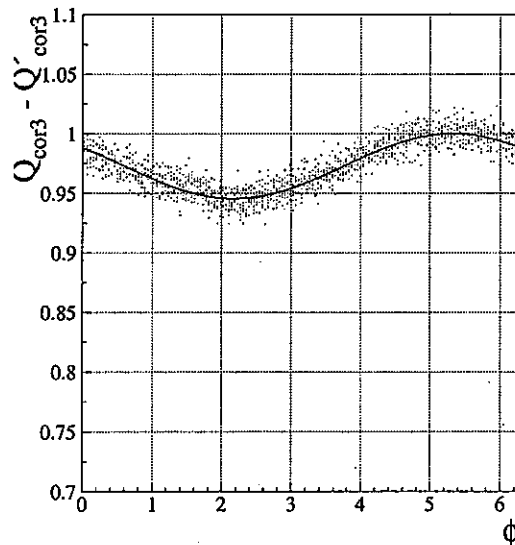


図 4.9:  $\varphi$ の周期関数としてフィッティングした結果。横軸は図4.6で定義した $\varphi$ 、縦軸は光が一番強い方向を1としたときの各方向の $Q_{cor3}$ である。

その結果、シンチレーターボールの $\varphi$ 方向に対する光の不均一性を補正する式を $f_{\varphi}(\theta, \varphi)$

とすると、(4.6)式のようにになった。

$$f_{\varphi}(\theta, \varphi) = -0.0273 \cos(\varphi - 2.17911) \sin(\theta) + 0.9727 \quad (4.6)$$

$\theta, \varphi$ は、図4.6で定義したものである。 $\sin\theta$ を掛けた理由は、上面、下面に近づくにつれて $\varphi$ 方向の不均一性の寄与が小さくなるためである。この式から、最大約5.5%の不均一性があることがわかった。また、この関数の系統誤差は、個々の $Q_{cor3}$ の式4.6からのずれを調べた結果、約2.2%であった。

#### D. 水の透過率の補正

スーパー神岡検出器は大型の水槽なので、減衰係数の補正を加えることは必要である。

ここでは、透過率測定装置を使って定期的に求められている減衰係数の結果を用いた。1.3の図1.4に透過率測定装置が示されている。

図4.10に測定結果を示す。図3.8に示したBBOTシンチレーターの発光曲線から、波長460nmの結果を使用することにした。

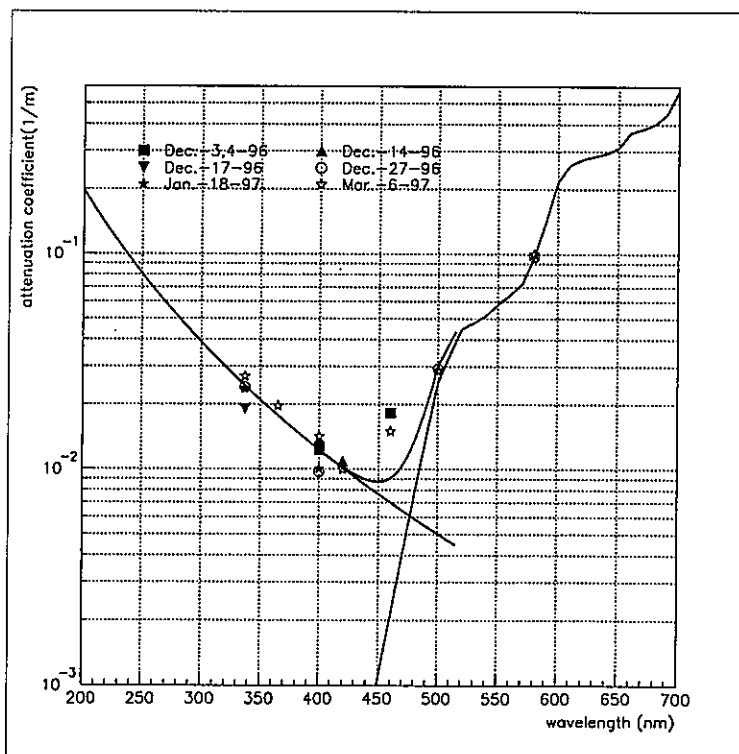


図4.10: 各波長領域における透過率

## 4.2.2 補正の結果

このような種々の補正の結果、式 4.7 を使えば、全ての光電子増倍管の利得の相対的な比較は可能となる。

$$Q_{cor} = \frac{Q r^2}{\exp(-\frac{r}{\lambda}) f_{acc}(\theta_{PMT}) f_{\theta}(\theta) f_{\varphi}(\theta, \varphi)} \quad (4.7)$$

$Q$  は光電子増倍管が得た電荷 (p.e.)、 $r$  はシンチレーターボールとそれぞれの光電子増倍管との距離、 $\exp(-\frac{r}{\lambda})$  は水の減衰率を表す式で  $\lambda$  は測定した水の減衰係数、 $f_{acc}(\theta_{PMT})$  は光電子増倍管の見込み角に対する電荷情報を表す関数 (式 4.2)、 $f_{\theta}(\theta)$  はシンチレーターボールの  $\theta$  方向に対する光の不均一性を表す関数 (式 4.4)、 $f_{\varphi}(\theta, \varphi)$  はシンチレーターボールの  $\varphi$  方向に対する光の不均一性を表す関数 (式 4.6) である。ここで、どの程度正確に補正されているか見てみることにする。

もし様々な補正が正しいならば、たとえ異なった測定方法でも、4.7 式の  $Q_{cor}$  の値は同じ結果になるはずである。そこで、シンチレーターボールを水槽の中心のみで測定した場合と、印加電圧値を調整したときの方法 (高さを変えてシンチレーターボールの横 ±3 段分ずつ測定していく) で測定した場合の比較を行なってみることにする。図 4.11 の横軸は水槽の中心から光電子増倍管までの距離、縦軸は光電子増倍管の  $Q_{cor}$  を規格化したときの各 bin に含まれる利得の平均を表している。白丸は、中心のみで測定した場合、黒丸は印加電圧値を調整したときの方法で測定した場合である。水槽の中心から遠くなるにしたがって、白丸が大きくなっているのがわかる。

従って、シンチレーターボールを中心のみで測定した場合の遠い場所に対する補正が不十分であると考えられる。その補正とは、距離の関数である水の透過率と、光電子増倍管の取り付け向きにより遠くなるにつれて大きくなる光電子増倍管の見込み角である。水の透過率については、場所により異なっている可能性がある。見込み角の補正については、式 4.2 が光電子増倍管の表面の形状のみで求められており、入射光の場所依存性が考慮されていないからというのが考えられる。実際 [10] によると、最大 40% の違いがある。さらに、中心から離れている上面、下面近くの光電子増倍管は、検出器の形状から上面、下面の光電子増倍管の表面による反射の影響を大きく受けると考えられる。水の透過率、見込み角の違い、反射の 3 つの影響を一つ一つ独立に評価していければいいのだが、時間の都合でそれはできなかった。

従って、これら 3 つの影響ができるだけ少ない、高さを変えてシンチレーターボールの横 ±3 段分ずつ測定したデータで、ゲインテーブルを作ることにする。



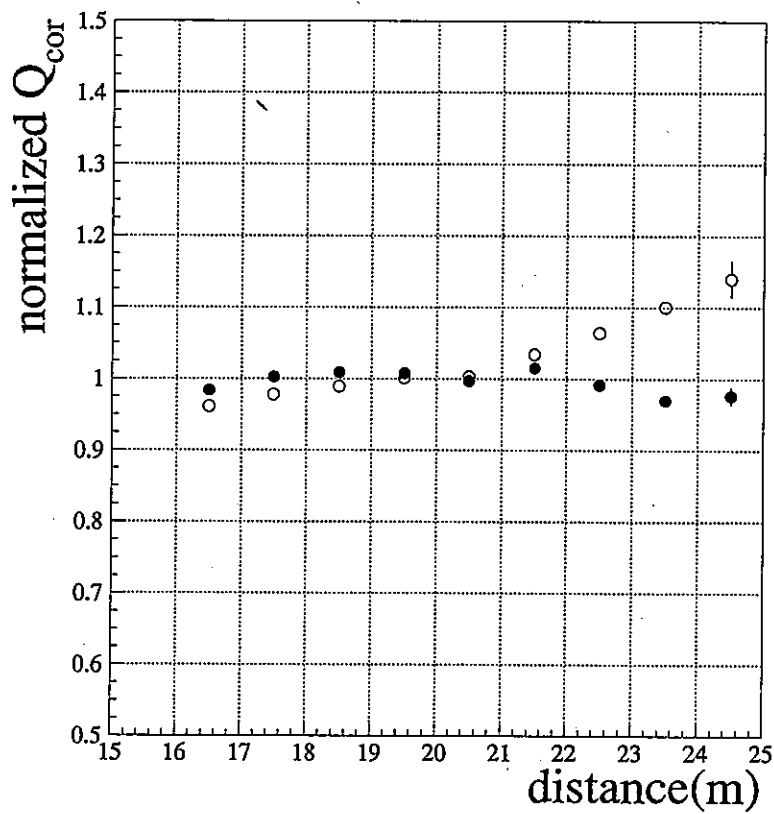


図 4.11: 測定方法の違いによる利得のずれ。横軸は水槽の中心から光電子増倍管までの距離、縦軸は光電子増倍管の  $Q_{cor}$  を規格化したときの各 bin に含まれる利得の平均を表す。白丸は、中心のみで測定した場合、黒丸は場所を変えた場合である。

### 4.2.3 ゲインテーブル

4.2.2で述べたが、一回の測定で全ての光電子増倍管の利得を比較することは出来ない。

そこで、一回の測定では、シンチレーターボールに対する条件がなるべく同じになるような光電子増倍管だけを比較するようにし、様々な測定をすることにより全ての光電子増倍管が比較できるようにする、という方針で進めていくことにする。そのようにすれば、正しいゲインテーブルを作ることができるはずである。以下に具体的に方法を述べる。

#### A. 側面の個々の光電子増倍管の利得

側面の個々の光電子増倍管のゲインテーブルは、利得の調整を行なったときと同じ測定方法で得られた結果を用いて、作ることにする。(4.1.2参照)一回の測定で、シンチレーターボールの横±3層以内にある光電子増倍管の電荷情報を得る。z座標を変えた計9箇所の測定で、側面の全ての光電子増倍管の電荷情報を得る。これらの電荷情報を使えば、側面の全ての光電子増倍管のゲインテーブルを作ることになる。3.7の2inch光電子増倍管、フォトダイオードでXe-lampの光量を精度よくモニターしているので、光量の変化による各段ごとの利得の違いは無視できる。

#### B. 上面、下面の個々の光電子増倍管の利得

上面、下面の個々の光電子増倍管のゲインテーブルは、シンチレーターボールが中心にある一回の測定で得られた結果を用いて、作ることにする。シンチレーターボールに対する条件が、上面下面の中心部分とその外側部分で異なるが、測定した場所の都合上、この方法による結果で作ることにする。

## C. 側面の光電子増倍管の利得と、上面、下面の光電子増倍管の利得の関係

シンチレーターボールの $\theta$ 方向の光の不均一性は、式4.4にあるように約21%ある。側面と、上面下面の利得の関係を見るとき、補正するとはいえ21%違う光量で比較するのは避けたい。そこで、 $\theta$ 方向の光の不均一性を求めたときのデータ、つまりシンチレーターボールを水平に傾けて測定したときのデータを使って、上面、下面の光電子増倍管の利得の全体的な関係を調べることにした。(図4.7参照)シンチレーターボールの $\varphi$ 方向の光の不均一性は、式4.6にあるように約5.5%なので、シンチレーターボールを縦にしたときと比べると、より近い光量で比較ができる。

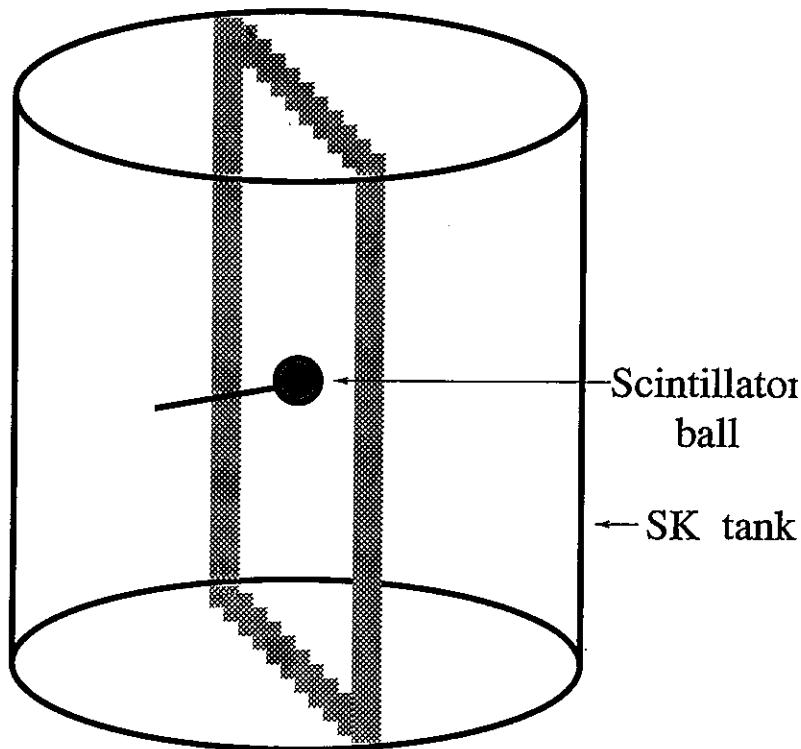


図 4.12: 側面の光電子増倍管の利得と、上面、下面の光電子増倍管の利得の関係の求め方。図の塗りつぶした部分にある光電子増倍管を使って比較を行なう。

比較方法は、シンチレーターボールの $\theta$ 方向の光の不均一性の寄与を小さくするため、図4.12のようにシンチレーターボールの真横の方向にある上面、下面の光電子増倍管だけを集めて、行なうことにする。さらに、水の透過率の寄与を小さくするため、シンチレーターボールとの距離が同じになるような光電子増倍管同士を比較してみる。その結果を図4.13に示す。●は側面の光電子増倍管、○は上面と下面の光電子増倍管の平均を表す。

図4.13を見ればわかるように、側面の光電子増倍管の利得のほうが、上面下面の利得より

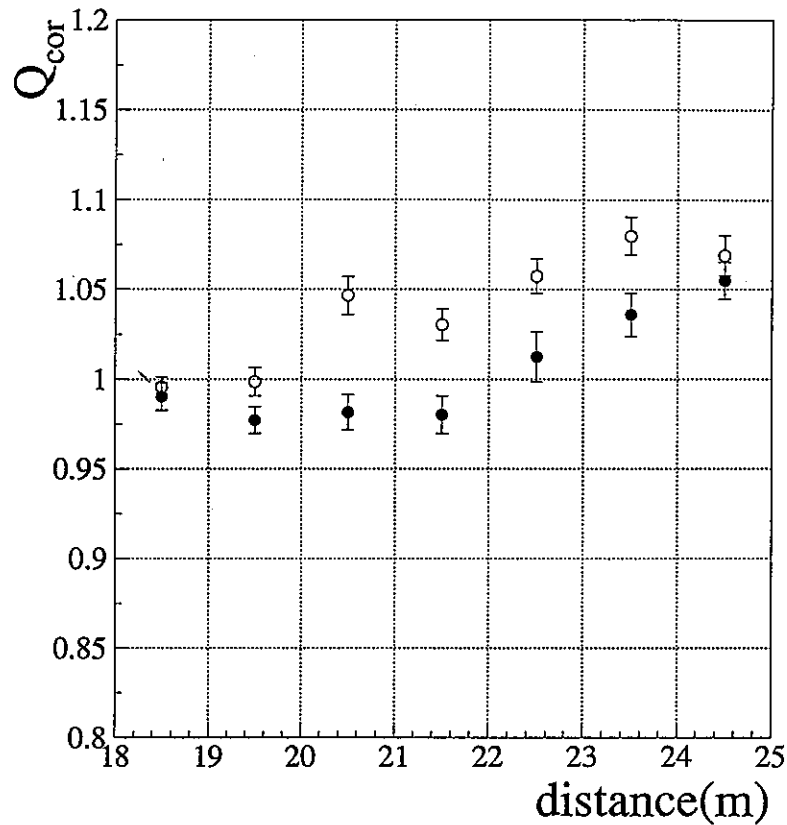


図 4.13: 側面の光電子増倍管と、上面下面の光電子増倍管の利得の関係。●は側面の光電子増倍管、○は上面と下面の光電子増倍管の平均を表す。横軸はシンチレーターボールと光電子増倍管の距離、縦軸は規格化した  $Q_{cor}$  の各 bin における平均である。

も小さいが、その差は、1%から7%と距離により違い、利得の違いは一様ではない。ここでは、利得のゲインテーブルを作るという目的から、距離によるそれぞれの利得の差の平均をとり、それを全体的な違いとすることにする。従って、側面の光電子増倍管の利得のほうが上面下面のそれより3.5%小さく、上面下面の利得を全体的に1.035倍して利得のゲインテーブルを作ることにする。

## D. 上面の光電子増倍管の利得と、下面の光電子増倍管の利得の関係

上面、下面の光電子増倍管の利得の比較においても、前節と同じようにシンチレーターボールを水平に傾けて測定したときのデータを使って、全体的な関係を調べることにする。その結果を図 4.14 に示す。△ は上面の光電子増倍管、\* は下面の光電子増倍管を表す。

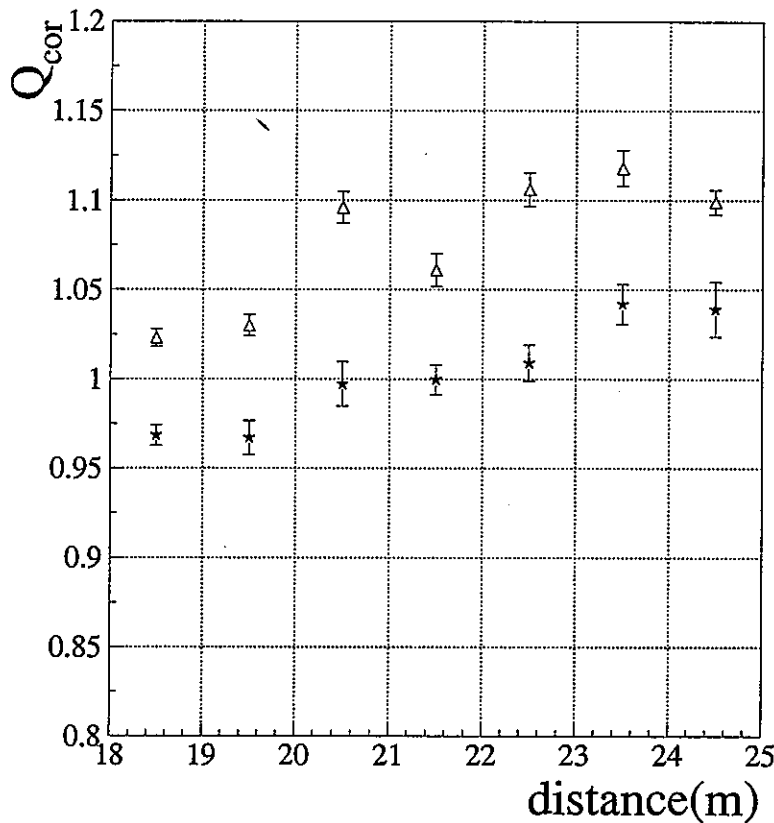


図 4.14: 上面と下面の光電子増倍管の利得の関係。△ は上面の光電子増倍管、\* は下面の光電子増倍管。横軸はシンチレーターボールと光電子増倍管の距離、縦軸は規格化した  $Q_{cor}$  の各 bin における平均である。

図 4.14 を見ればわかるように、上面の利得のほうが下面の利得よりも大きいですが、その差は、5% から 10% と距離により違い、上面と下面の利得の違いは一様ではない。ここでも、利得のゲインテーブルを作るという目的から、距離によるそれぞれの利得の差の平均をとり、それを全体的な違いとすることにする。従って、上面の光電子増倍管の利得のほうが下面のそれより 7.3% 大きく、上面の利得をそれぞれ 1.073 倍して利得のゲインテーブルを作ることにする。

### 4.3 物理事象による 20 インチ光電子増倍管の利得調整結果の評価

前節で作ったゲインテーブルを実際の物理事象で評価することは、非常に重要であり、結果の信頼性が増すことになる。ここでは、宇宙線起源の  $\mu$  粒子が検出器内で崩壊したときに生成される電子のチェレンコフ光を使って、チェックすることにした。利得のゲインテーブルの評価を行なうことにする。

#### 4.3.1 $\mu - e$ 崩壊事象

ゲインテーブルの評価に、 $\mu - e$  崩壊事象の電子のチェレンコフ光を使った理由は、事象数が多いから、また検出器内に放出される光量が特定の場所に偏らず比較的一様だからである。

以下に、スーパーカミオカンデ検出器における全ての事象から、 $\mu - e$  崩壊事象を選別する方法について順を追って述べていく。なお、A,Bについては $\mu$ 粒子に対する、C,Dについては、崩壊電子に対する選別である。

- A. 光電子増倍管が検出した光量の総和が、1,000p.e.(120MeV)以上である。

エネルギーが数 MeV レベルである低エネルギー領域の事象を除くためである。

- B. 外水槽の光電子増倍管の時間分布が、260nsec以下である。また外水槽において、チェレンコフ光を捉えた光電子増倍管の領域が一箇所である。

検出器に入射してそのまま突き抜けていくような事象の場合、外水槽の光電子増倍管は、粒子の入口と出口の部分の二ヶ所でチェレンコフ光を捉え、外水槽の光電子増倍管の時間分布は広くなる。検出器を突き抜ける粒子による事象を除くための条件である。 $\mu - e$  崩壊事象は水槽内で起こるため、検出器を突き抜けることはない。

- C.  $\mu$  粒子のトリガーのあと、1.2 $\mu$ sec以上、8.0 $\mu$ sec以下に事象が起こり、しかも検出される事象は1個だけである。

8.0 $\mu$ sec以下として、崩壊電子とは関係のない事象の混入を防いでいる。

- D. 150p.e.以上の光量を受けとった光電子増倍管の数が4個以下である。

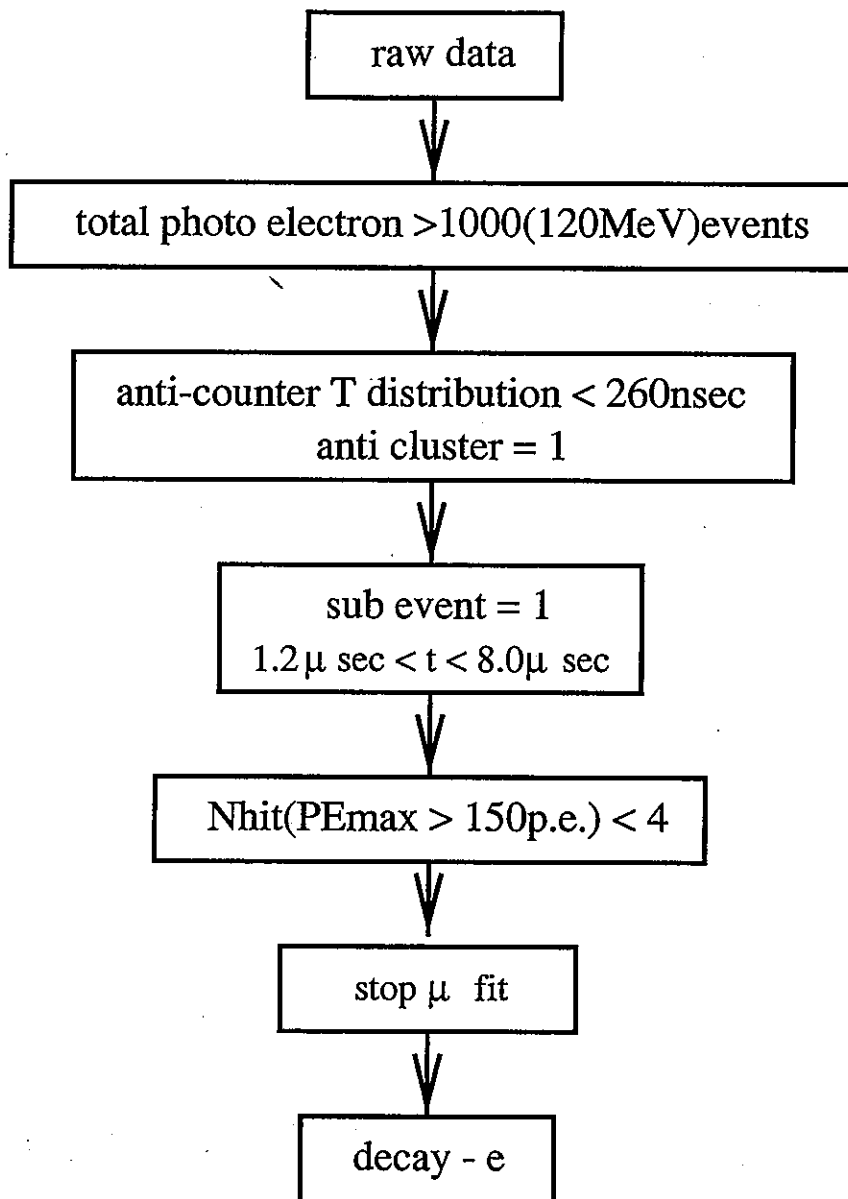
150p.e.もの大きな光量を受けとるのは、その光電子増倍管の近くを粒子が通過したときである。崩壊電子が外部に突き抜けていないための条件である。

- E.  $\mu$  粒子の入射位置と軌道の再構成、崩壊電子の発生点の再構成に成功した事象である。

再構成は各光電子増倍管の時間情報を使って行なうが、ノイズの影響で失敗する場合がある。

図 4.15に、この選別方法のフローチャートを示す。

さらに、 $\mu - e$  崩壊事象に対しても各種の選別を行ない、利得の一様性を調べるのに最適である事象のみを使用していくことにした。 $\mu - e$  崩壊事象に対する各種の選別を以下に述べる。

図 4.15:  $\mu - e$  崩壊事象の選別方法

A. 崩壊電子の発生点が内水槽の壁から 2m 以上離れている。

内水槽の壁際では、岩盤からの  $\gamma$  線が引き起こす低エネルギー領域の事象が数多くある。これらは、崩壊電子の発生点を定める上で大きなノイズとなるので、有効体積の領域を壁から離さなくてはならない。また、大気ニュートリノ事象や核子崩壊事象の探索の解析では、有効体積を壁から 2m 以上としている。従って、崩壊電子の事象の有効体積も壁から 2m 以上とすることにした。

B. goodness が、 $\mu$  粒子、崩壊電子とも、0.65 以上である。

goodness とは、事象の発生点に対する再構成の善し悪しを表した量である。goodness の定義を (4.8) 式に示す。

$$goodness = \frac{1}{\sum_{i=1}^{Nhit} \frac{1}{\sigma_i^2}} \times \sum_{i=1}^{Nhit} \frac{1}{\sigma_i^2} \exp \left[ -\frac{t_{res,i}^2}{2\sigma_i^2} \right] \quad (4.8)$$

$Nhit$  はチェレンコフ光を捉えた光電子増倍管の数、 $\sigma_i$  は  $i$  番目の光電子増倍管の時間分解能である。 $t_{res,i}$  は (4.9), (4.10) 式で定義される量である。

$$t_{res,i} = t_i - t_c \quad (4.9)$$

$$t_i = t_i^0 - \frac{n}{c} \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (4.10)$$

$t_i^0$  は  $i$  番目の光電子増倍管の TDC の値、 $n$  は水の屈折率、 $c$  は真空中で光の速度、 $(x, y, z)$  は粒子の発生点、 $(x_i, y_i, z_i)$  は  $i$  番目の光電子増倍管の位置、 $t_c$  は  $t_i$  の平均である。もし再構成した発生点より正確ならば、 $t_i$  の分布の幅は光電子増倍管の時間分解能の値程度になり、goodness は大きくなる。goodness は再構成した発生点に対する信頼度を表しており、次に述べる C. の計算をするために、goodness が大きい事象を選ぶことにした。

C.  $\mu$  粒子の入射方向に対する電子の崩壊方向の角度を  $\theta_{decay}$  とすると、 $-0.25 < \cos \theta_{decay} < 0.25$  である。

$\mu$  粒子の崩壊による放出電子の分布は、以下の (4.11) 式で表される。(Michel spectrum)

$$\frac{d\Gamma}{dx \cdot d\Omega} \propto x^2 \cdot \left( \frac{3}{2} - x \right) \quad (4.11)$$

$x$  は崩壊電子の最大エネルギーを単位とした電子のエネルギー、 $d\Omega$  は  $\mu$  粒子静止系における崩壊電子の立体角である。崩壊電子のエネルギーは  $\theta_{decay}$  に依存する。図 4.16 に崩壊電子の運動量の  $\cos \theta_{decay}$  分布を示す。

$\mu$  粒子は上面から入射する場合が多いので、利得の一様性を見るためには、同じ運動量で調



べる必要がある。従ってここでは、 $-0.25 < \cos\theta_{decay} < 0.25$  の条件をつけることにした。この領域における崩壊電子の平均運動量は、約0.5%の範囲で一致している。

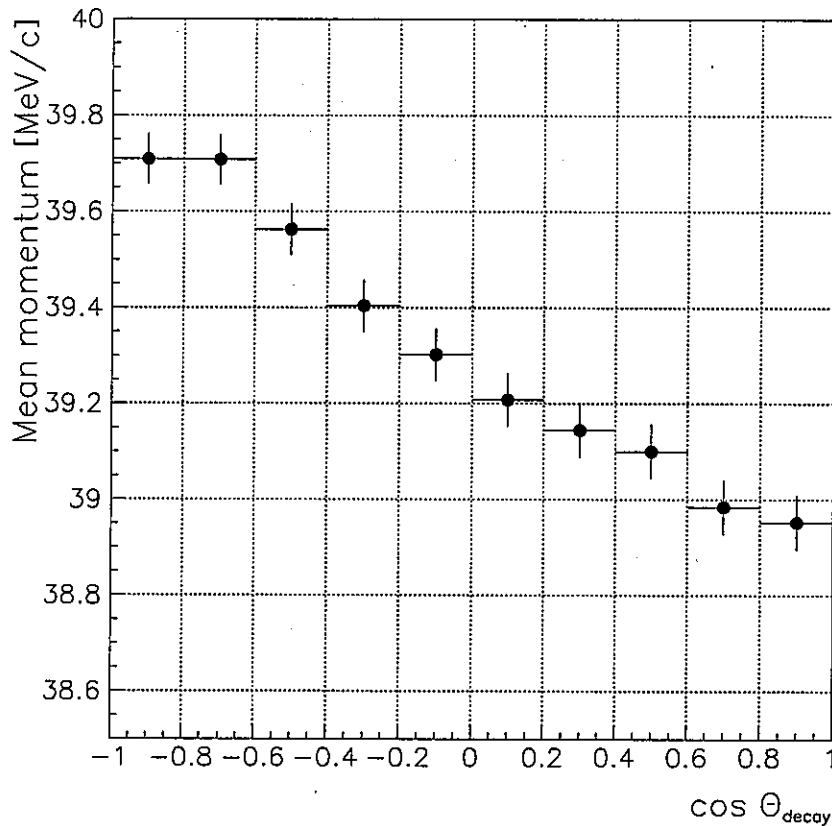
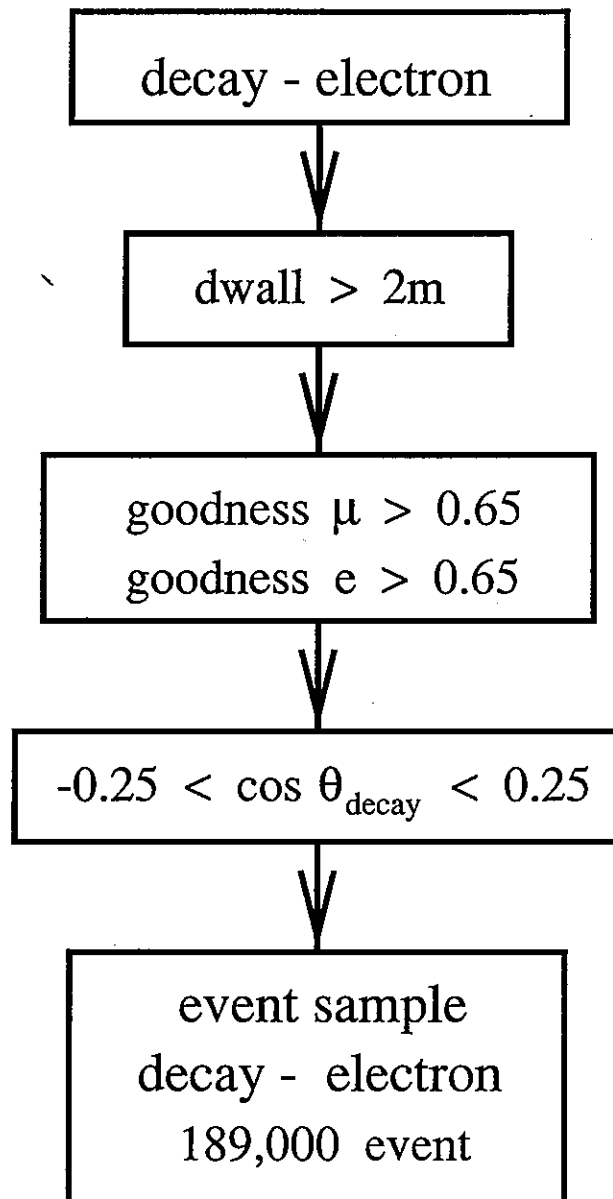


図 4.16: 崩壊電子の運動量の  $\cos\theta_{decay}$  分布。横軸は  $\mu$  粒子の入射方向に対する電子の崩壊方向の角度  $\theta_{decay}$ 、縦軸は各 bin における平均運動量である。

この結果、約 189,000 の  $\mu - e$  崩壊事象が選ばれ、これらを用いて利得の一様性を調べることにした。図 4.17 に  $\mu - e$  崩壊事象に対する選別のフローチャートを示す。また、検出器内で崩壊した  $\mu$  粒子の事象例を図 4.18 に、崩壊電子の事象例を図 4.19 に示す。

図 4.17: 利得の一様性を調べるために最適な  $\mu - e$  崩壊事象の選別方法

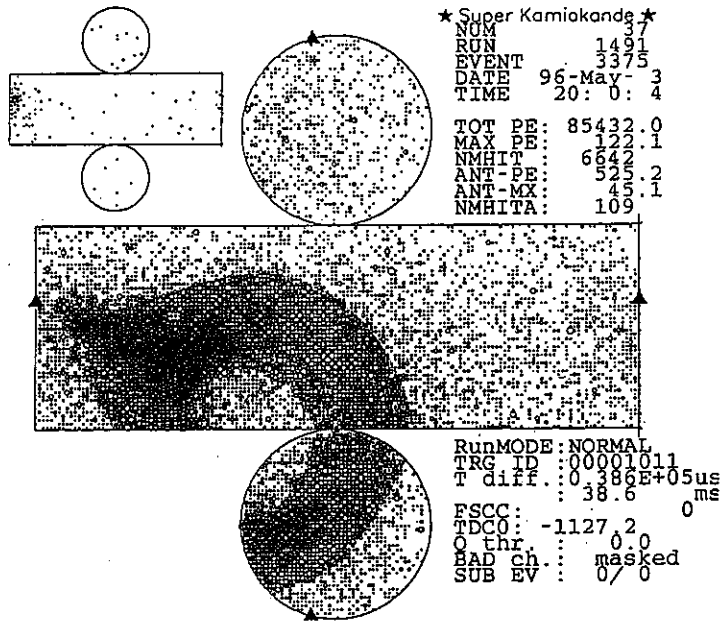


図 4.18: 検出器内で崩壊した  $\mu$  粒子の事象例

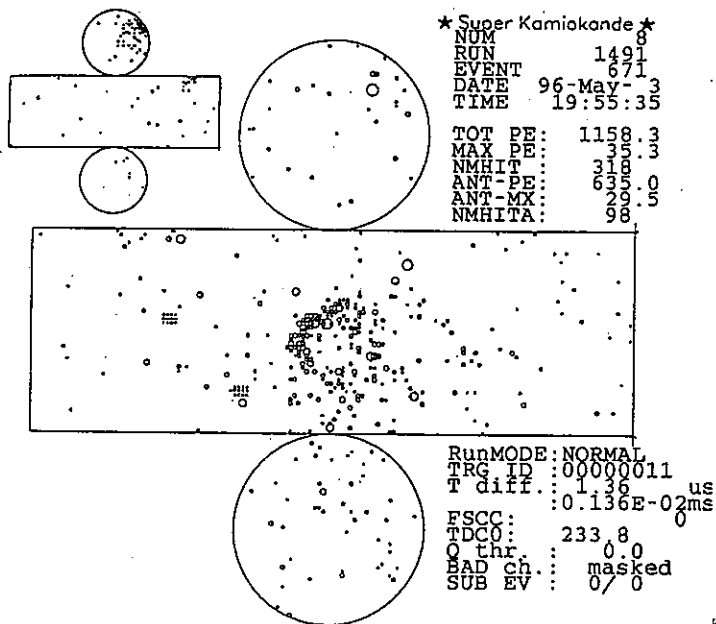


図 4.19: 崩壊電子の事象例

## 4.3.2 結果

ここでは、前節で選別した  $\mu - e$  崩壊事象の崩壊電子を使って、ゲインテーブルの評価を行なう。

我々は光電子増倍管の場所をできるだけ細かく分けて、利得を比較していきたい。しかし、崩壊電子の運動量はチェレンコフ光を受けとった光電子増倍管の全光量で決められるので、光電子増倍管の場所を厳密に分けて利得を調べていくことはできない。よってここでは、崩壊電子の運動方向を天頂角で表した分布で、利得を比較していくことにする。図 4.20 に崩壊電子の天頂角、 $\theta_e^{zen}$  の定義を示す。

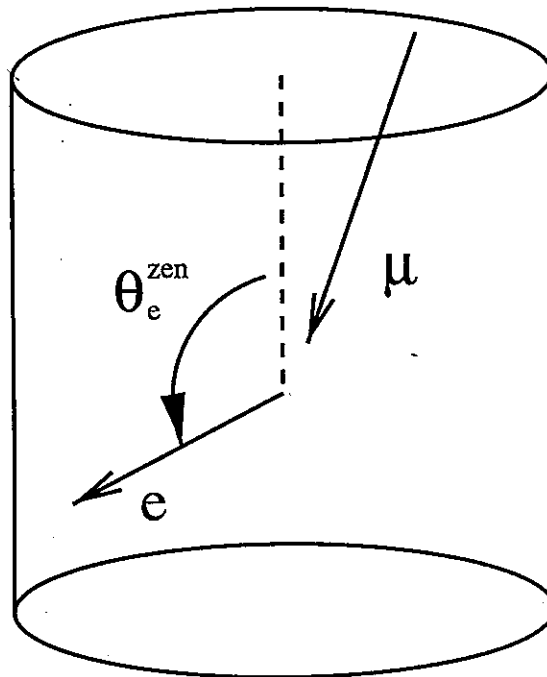


図 4.20: 崩壊電子の運動方向に対する天頂角の定義

利得を比較するとき、 $\cos \theta_e^{zen}$  を 5 つの bin に分けて、各 bin を比較することにする。ここで、各 bin にどの領域の光電子増倍管がどのくらいの割合に含まれているか調べてみることにする。

まず、光電子増倍管の領域分けの方法を図 4.21 に示す。このように全ての光電子増倍管を 7 つの領域に分けることにした。次に、領域分けしたそれぞれの部分が、 $\cos \theta_e^{zen}$  の各 bin に含まれる割合を図 4.22 に示す。

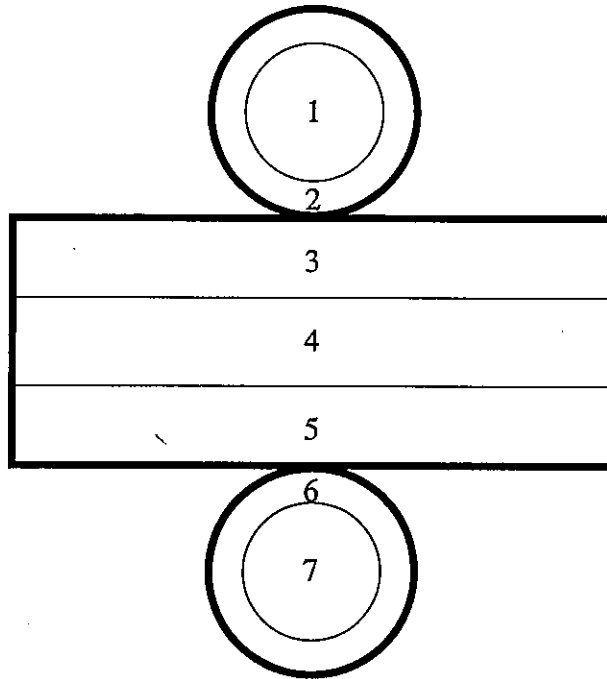


図 4.21: 光電子増倍管の領域分け

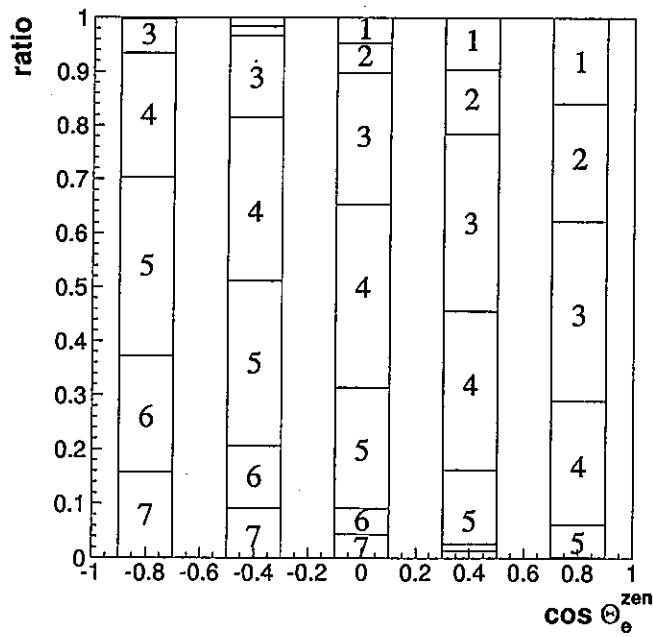


図 4.22: 天頂角分布の各 bin において領域の占める割合

結果を図 4.23 に示す。横軸は図 4.20 で定義した崩壊電子の運動方向に対する天頂角、縦軸は崩壊電子の平均運動量を表している。黒星が今回作ったゲインテーブルの結果、白い四角はゲインテーブルなしの結果である。

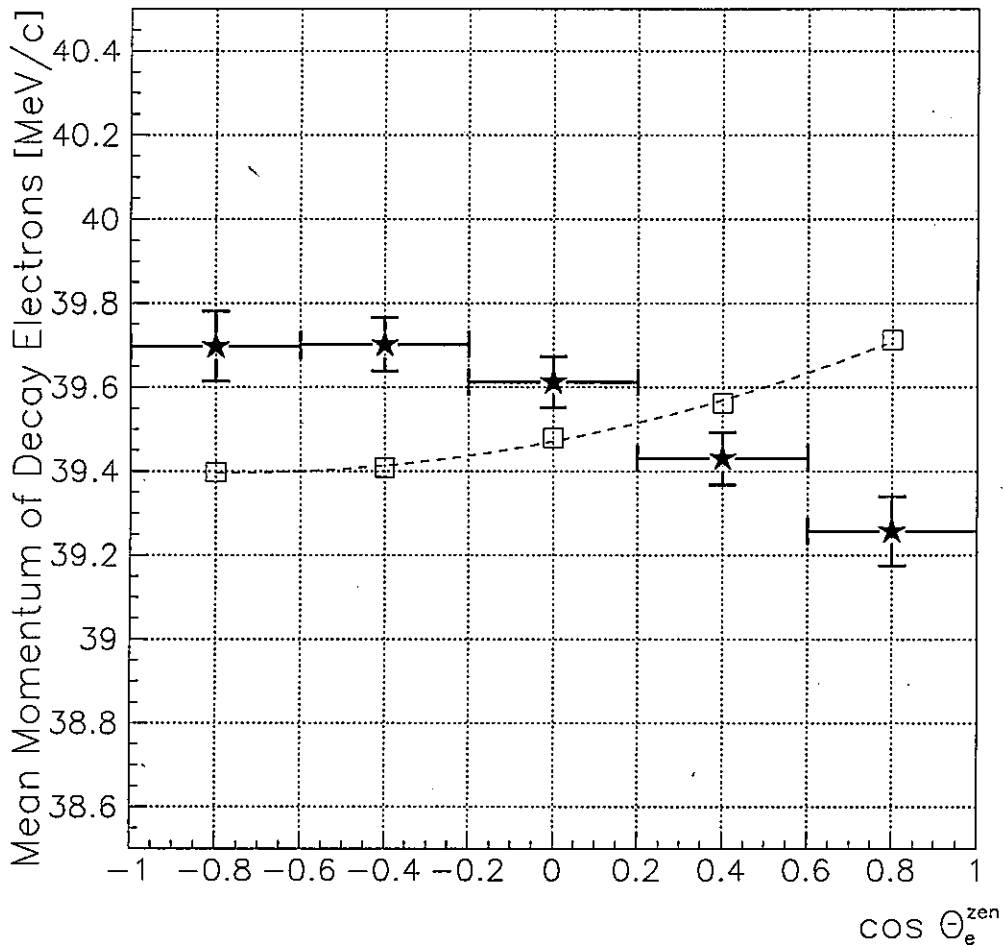


図 4.23:  $\mu$ -e 崩壊の  $e$  事象による、ゲインテーブルの評価。横軸は図 4.20 で定義した崩壊電子の運動方向に対する天頂角、縦軸は崩壊電子の平均運動量を表している。黒星が今回作ったゲインテーブルの結果、白い四角はゲインテーブルなしの、印加電圧値調整時の結果である。

印加電圧値の調整の結果、水槽内における利得の一様性は約 0.8% であった。1.5 で、水槽内の場所による利得の偏りを 3.0% 以下に押えることが目標であった。この結果はそれを十分満たしており、較正実験装置を使って印加電圧値の調整をしたことに対する信頼性は得られた。

また、ゲインテーブルを使った利得の一様性は約 1.1% であった。これも、1.5 での水槽内の場所

による利得の偏りの目標を達成している。校正実験装置を使ってゲインテーブルを作り、解析に使用することに対する信頼性は得られた。

しかし、ゲインテーブルによる結果が、印加電圧値の調整のみによる結果より、約0.3%悪くなってしまった。本来ならば、ゲインテーブルを作ってさらに細かい調整を行なったので、よくなるはずである。今回、その原因を突き止めることはできなかった。しかし、次のことが考えられる。

- A. 上面、下面、側面の光電子増倍管の関係を求めたが、さらに細かくゲインの場所による偏りを考えなければいけない。
- B. 上面、下面、側面の光電子増倍管の関係を求めたとき、シンチレーターボールの位置、シンチレーターボールの柄の向き、を実際と異なる値にしてしまった。

これらについて、さらに検討が必要である。

## 第 5 章

### 20 インチ光電子増倍管の利得の経年変化

ここでは、光電子増倍管の利得の約 2 年にわたる経年変化について述べる。個々の光電子増倍管の相対的な変化については、第 3 章で述べた校正実験装置を使って調べる。また、この装置では経年変化の測定ごとに放出される光量が変わってしまい、利得の絶対的な経年変化を調べることができない。従って、観測される物理事象を使って、絶対的な変化を調べることにする。

#### 5.1 個々の光電子増倍管の相対的な経年変化

##### 5.1.1 測定および解析方法

我々は個々の光電子増倍管の経年変化を、毎回検出器の中心にシンチレーターボールを沈めて測定し、得られた電荷情報を比較することで調べることにする。

水槽上部には、様々な校正用のためのホール(キャリブレーションホール)がいくつかある。その中で xy 平面でほぼ中心<sup>1</sup>にあるキャリブレーションホールから、シンチレーターボールを z=0 まで下ろして、測定を行なうことにする。また経年変化の測定を行なった日時を、表 5.1 に示す。

| 日時        |
|-----------|
| 1996年 6月  |
| 1996年 12月 |
| 1997年 4月  |
| 1997年 7月  |
| 1997年 9月  |
| 1997年 11月 |

表 5.1: 経年変化の測定を行なった日時。なお、光電子増倍管の印加電圧値を調整したのが 1995 年 12 月、スーパー神岡実験の測定を開始したのが 1996 年 4 月であった。

<sup>1</sup>x=35.3cm,y=-70.7cm.



解析に際して、注意すべき点が二つある。一つは、水の透過率が時間的に変化している可能性があるということである。水の透過率が悪くなっていると、利得の比較を正確に行うことはできない。従って、1.3の図1.4の装置で測定した水の透過率の結果を、得られる電荷情報に毎回反映させる必要がある。もう一つは、シンチレーターボールの $\varphi$ 方向の向きが毎回違ってしまいうということである。シンチレーターボールを吊すワイヤーが、水槽内でねじれてしまうので、シンチレーターボールの方向を固定することができない。4.6式の補正を毎回加えなければならない。

経年変化を調べるという立場から考えると、上で述べた以外の補正を加える必要はない。しかし、ここでは便宜的に4.2で述べた理解している補正を全て入れて解析することにした。その補正の式を、5.1式に示す。

$$Q_{cor} = \frac{Q r^2}{\exp(-\frac{r}{\lambda}) f_{acc}(\theta_{PMT}) f_{\theta}(\theta) f_{\varphi}(\theta, \varphi)} \quad (5.1)$$

$Q$ は光電子増倍管が得た電荷(p.e.)、 $r$ はシンチレーターボールとそれぞれの光電子増倍管との距離、 $\exp(-\frac{r}{\lambda})$ は水の減衰率を表す式で $\lambda$ は測定した水の減衰係数、 $f_{acc}(\theta_{PMT})$ は光電子増倍管の見込み角に対する出力を表す関数(式4.2)、 $f_{\theta}(\theta)$ はシンチレーターボールの $\theta$ 方向に対する光の不均一性を表す関数(式4.4)、 $f_{\varphi}(\theta, \varphi)$ はシンチレーターボールの $\varphi$ 方向に対する光の不均一性を表す関数(式4.6)である。

### 5.1.2 結果

測定結果を図5.1、図5.2に示す。

図5.1は、それぞれの測定での利得を1996年12月の利得で割ったときの分布を表している。分布は、1に規格化してある。この分布の幅を調べることで、個々の光電子増倍管の1996年12月からの利得の変化が、全体的にどうであるかを知ることができる。図5.2は、図5.1の分布をガウシアンでフィットしたときの $\sigma$ の値をプロットしたものである。図中に示した誤差は、測定箇所、水の透過率、シンチレーターボールの向いている方向に起因する系統誤差を表している。これにより、1996年12月から1997年11月までの約一年にわたる個々の光電子増倍管の利得の変化は、約2.0%であることがわかる。ここで、1996年6月における利得を基準としていない理由は、測定箇所が他と異なるため正確な変化を見ることができないからである。

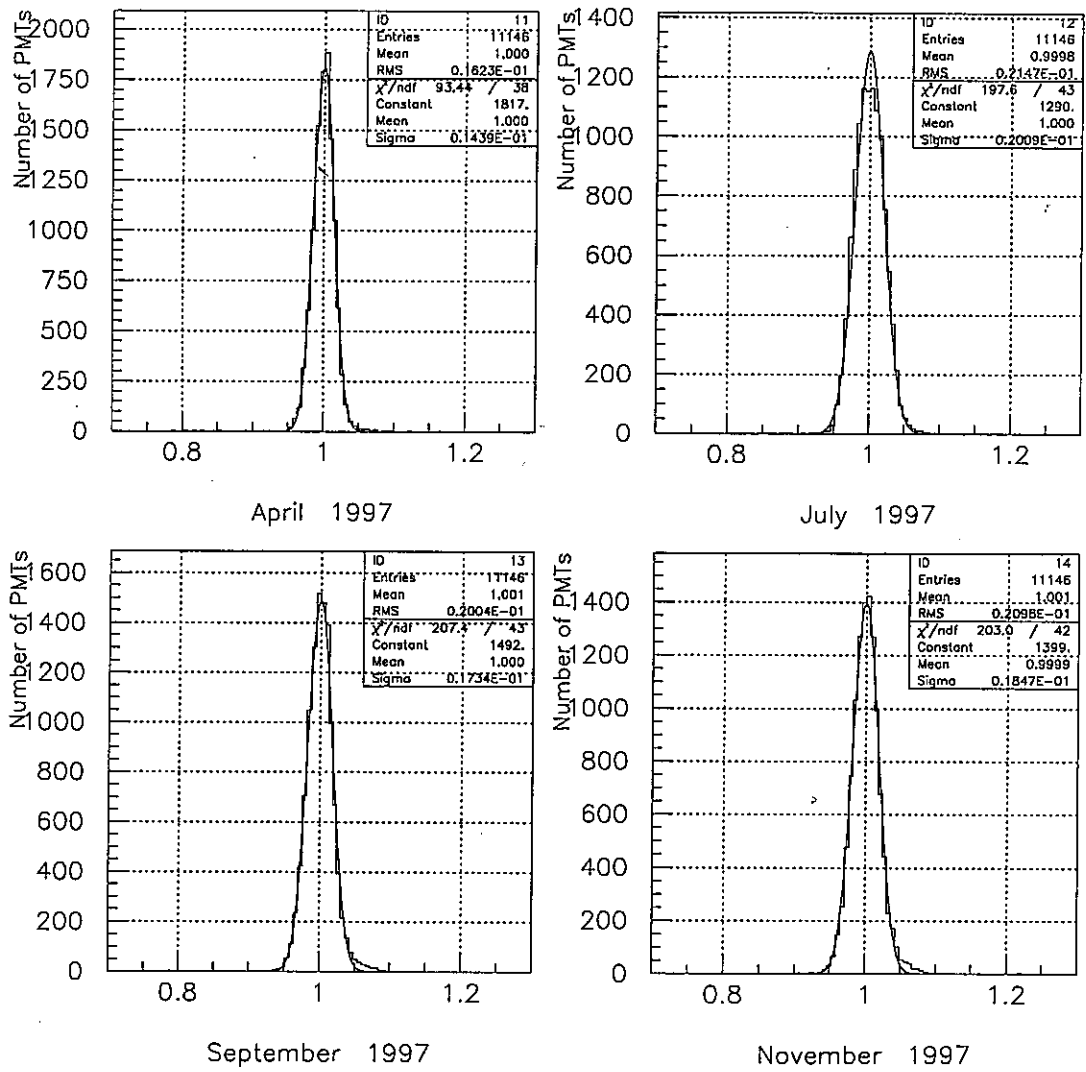


図 5.1: 1996 年 12 月の利得でそれぞれの測定での利得を割った値を規格化した分布

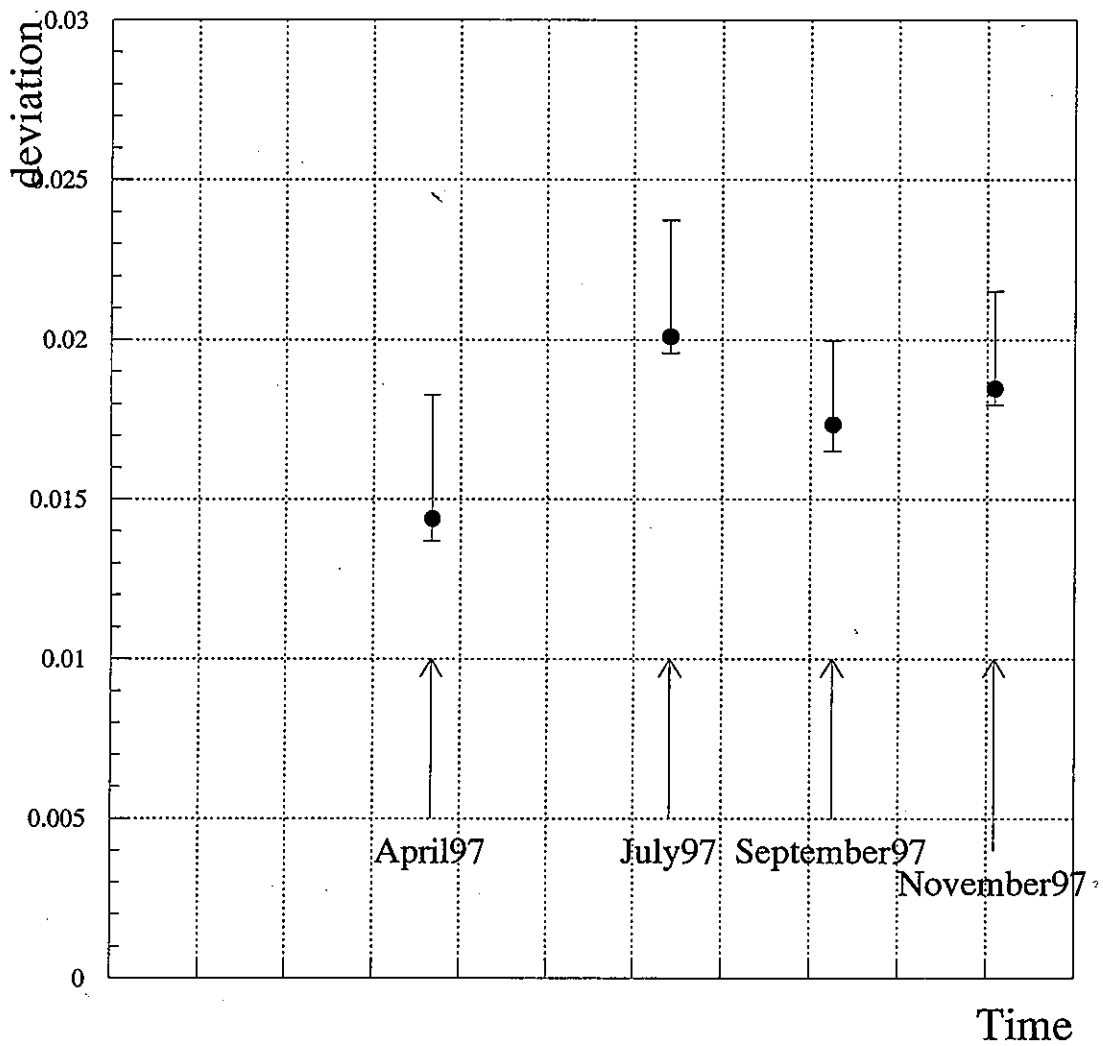


図 5.2: 1996 年 12 月の利得でそれぞれの測定での利得を割った分布の  $\sigma$  の値の経年変化。図中の誤差は系統誤差を表している。

## 5.2 利得が大きく変化した光電子増倍管について

経年変化の測定時、利得が急激に変わった光電子増倍管が発見された。また、利得が著しく高いまま、または著しく低いままである光電子増倍管も発見された。これらは、実際の物理解析時に大きく影響する。ここで、これらの光電子増倍管をリストアップすることにした。

以下に、利得が著しく低い、または高い光電子増倍管をリストアップする方法を述べる。

## 1. bad channel に登録されている光電子増倍管を除く

スーパー神岡実験では、他と比べてレスポンスが極端に少ない、または多い光電子増倍管などを bad channel として登録し、解析に使わないようにしている。詳しくは、付録 A で、述べている。bad channel は解析時に使用しない光電子増倍管のことであるので、まずこれを除く。

## 2. キャリブレーションホールの近くにある光電子増倍管を除く。

今回のシステムを使用する際、キャリブレーションホールからワイヤーと光ファイバーを下ろして測定している。よって、シンチレーターボールを光らせてデータをとるとき、ワイヤーと光ファイバー、シンチレーターボールの柄の部分、キャリブレーションホールの近くに位置する光電子増倍管に影を作ってしまう。そこで、キャリブレーションホールを中心にして半径 3.5 メートル以内の光電子増倍管は正確にわからないものとして、除くことにする。

## 3. 利得の平均から 30% 以内にある光電子増倍管を除く。

(5.1) 式の  $Q_{cor}$  を使って、全ての光電子増倍管の相対的な比較を行なった。 $Q_{cor}$  の平均値の  $\pm 30\%$  以内にある光電子増倍管は問題ないものとみなし、それらを除くことにした。

このような手順を踏んで得られた結果を、利得が常に低く見える光電子増倍管、利得が常に高く見える光電子増倍管、途中で大きく変化した光電子増倍管、の 3 つに分けて、表 (5.2) 表 (5.3) 表 (5.4) に示した。表中の数字は、全ての光電子増倍管の利得の平均を 1 としたときの、その光電子増倍管の値である。リストアップされた光電子増倍管の数は 36 本であった。

| 光電子増倍管の番号 | 1996年6月 | 1996年12月 | 1997年4月 | 1997年7月 | 1997年9月 |
|-----------|---------|----------|---------|---------|---------|
| 122       | 0.25    | 1.02     | 0.99    | 0.99    | 0.99    |
| 3993      | 0.93    | 0.91     | 0.92    | 0.02    | 0.02    |
| 5256      | 0.97    | 0.04     | 0.04    | 0.04    | 0.04    |
| 5720      | 0.93    | 0.71     | 0.39    | 0.19    | 0.94    |
| 6276      | 0.75    | 0.79     | 0.79    | 0.68    | 1.06    |
| 6424      | 1.11    | 1.27     | 1.31    | 1.30    | 1.34    |
| 9312      | 1.23    | 0.97     | 0.95    | 0.92    | 1.33    |
| 9544      | 0.84    | 0.94     | 0.33    | 1.01    | 1.03    |
| 10679     | 1.03    | 1.02     | 0.97    | 0.99    | 0.11    |
| 10734     | 1.04    | 0.99     | 1.00    | 0.05    | 0.05    |
| 10822     | 1.11    | 0.04     | 0.04    | 0.04    | 0.04    |

表 5.2: 利得が大きく変化した光電子増倍管

| 光電子増倍管の番号 | 1996年6月 | 1996年12月 | 1997年4月 | 1997年7月 | 1997年9月 |
|-----------|---------|----------|---------|---------|---------|
| 2630      | 0.62    | 0.62     | 0.64    | 0.65    | 0.65    |
| 3850      | 0.63    | 0.60     | 0.62    | 0.64    | 0.63    |
| 4000      | 0.04    | 0.04     | 0.04    | 0.04    | 0.04    |
| 5338      | 0.72    | 0.79     | 0.75    | 0.52    | 0.51    |
| 5944      | 0.04    | 0.04     | 0.04    | 0.04    | 0.04    |
| 6106      | 0.01    | 0.15     | 0.14    | 0.13    | 0.14    |
| 8951      | 0.69    | 0.71     | 0.71    | 0.72    | 0.71    |
| 9425      | 0.02    | 0.05     | 0.05    | 0.05    | 0.05    |
| 10006     | 0.64    | 0.63     | 0.64    | 0.66    | 0.64    |
| 10199     | 0.01    | 0.00     | 0.03    | 0.03    | 0.03    |
| 10441     | 0.02    | 0.29     | 0.26    | 0.26    | 0.26    |
| 10670     | 0.67    | 0.68     | 0.68    | 0.68    | 0.68    |

表 5.3: 利得が常に低く見える光電子増倍管

| 光電子増倍管の番号 | 1996年6月 | 1996年12月 | 1997年4月 | 1997年7月 | 1997年9月 |
|-----------|---------|----------|---------|---------|---------|
| 713       | 1.57    | 1.62     | 1.56    | 1.54    | 1.60    |
| 922       | 1.30    | 1.25     | 1.24    | 1.23    | 1.22    |
| 923       | 1.33    | 1.30     | 1.29    | 1.29    | 1.26    |
| 7663      | 1.15    | 1.25     | 1.28    | 1.25    | 1.30    |
| 7714      | 1.60    | 1.61     | 1.60    | 1.59    | 1.58    |
| 7740      | 1.18    | 1.25     | 1.25    | 1.29    | 1.30    |
| 8616      | 1.33    | 1.43     | 1.40    | 1.41    | 1.45    |
| 9121      | 1.34    | 1.35     | 1.32    | 1.36    | 1.32    |
| 9383      | 1.25    | 1.27     | 1.29    | 1.30    | 1.31    |
| 9437      | 1.41    | 1.40     | 1.43    | 1.43    | 1.40    |
| 10225     | 1.26    | 1.27     | 1.30    | 1.31    | 1.31    |
| 10562     | 1.32    | 1.29     | 1.32    | 1.31    | 1.32    |
| 10967     | 1.19    | 1.22     | 1.27    | 1.30    | 1.27    |

表 5.4: 利得が常に高く見える光電子増倍管

また、これら 36 本の光電子増倍管が水槽のどの部分に位置しているのかを調べたので、結果を図 5.3 に示す。これを見るとほぼ均等に位置していることがわかる。

これらの光電子増倍管のうち、1997 年 9 月の時点で利得が 30% 以上ずれていた光電子増倍管 28 本について、エレクトロニクスを介さない光電子増倍管からの直接の信号を調べて、本当に利得がずれているのか調べることにした。この調査は光源には経年変化の測定と同じように、第 3 章で説明した較正実験装置を使って、1997 年 11 月に行なった。

その結果、目で見ただけではあるが、28 本のうち 24 本の光電子増倍管が表 (5.2) から表 (5.4) の 1997 年 9 月の値とほぼ一致しており、利得がずれていることが確認できた。また、残りの 4 本については確認できなかった。

図 5.4 に正常な信号と、利得が大きくずれている光電子増倍管の信号をオシロスコープで見た写真を示す。

==Super Kamiokande==

RUN 0 SUBRUN 0 EVENT 0  
 DATE 0-W00-0 TIME 0h 0m 0s 0event(s) scanned

TOT PE 0.0  
 MAX PE 0.0  
 HIT 0  
 ANT-PE 0.0  
 ANT-MX 0.0  
 ANT-HT 0  
 TRG-ID 00000000  
 DT 0.00usec  
 SUB/ALL 2/\*  
 Q 0.1-1000.0  
 T 0.0-2000.0

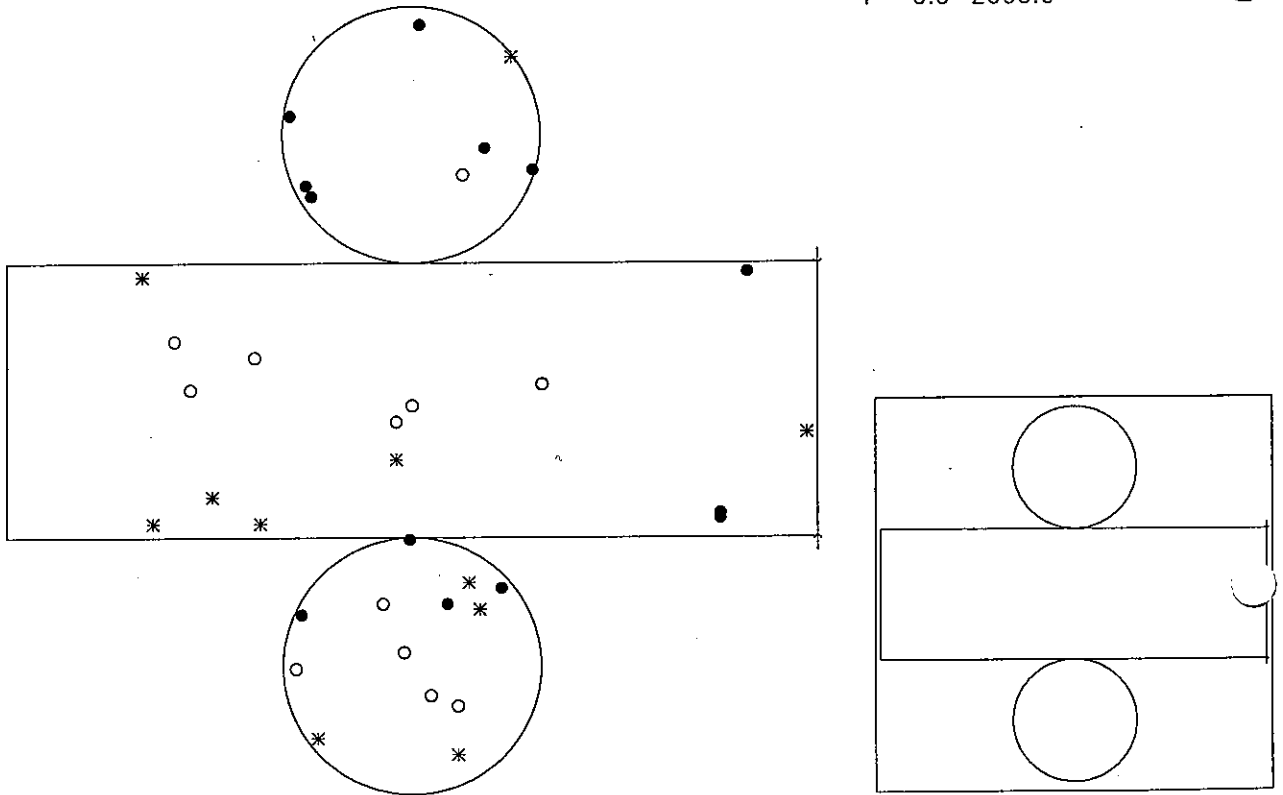


図 5.3: リストアップされた光電子増倍管の水槽内における場所。白丸が利得が常に低い、黒丸が利得が常に高い、バツが利得が大きく推移した光電子増倍管である。

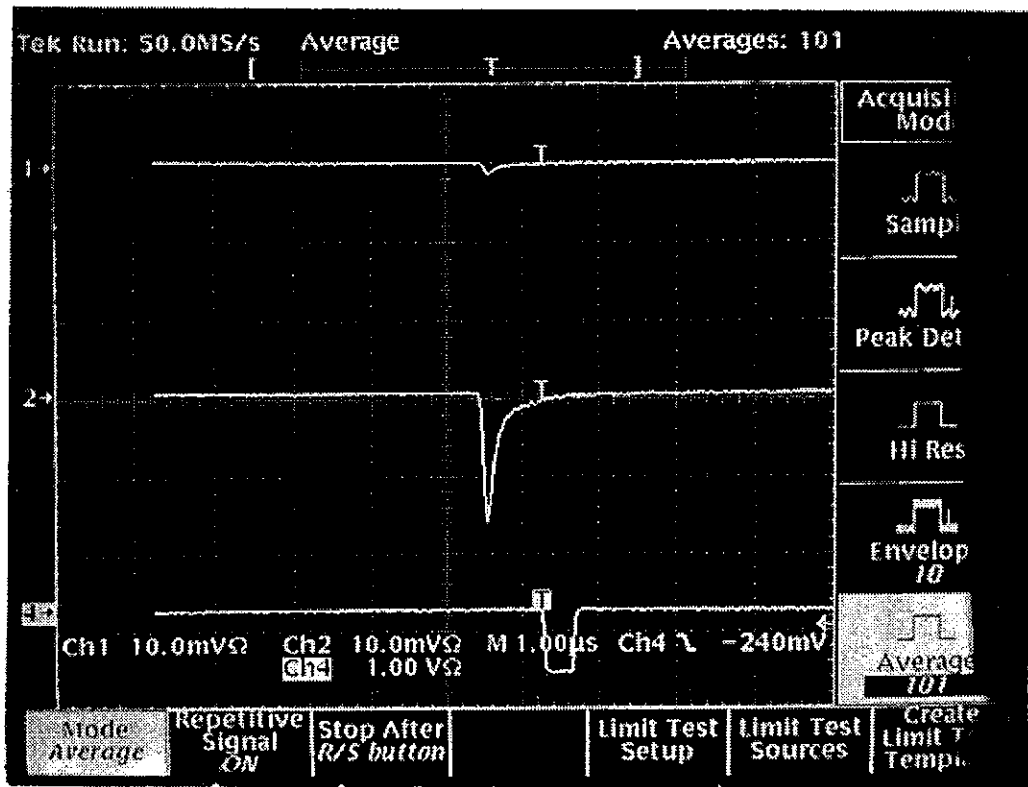


図 5.4: 光電子増倍管のアナログ信号。上が利得が小さい光電子増倍管からの信号、下が正常な信号。



### 5.3 利得の絶対的な経年変化

#### 5.3.1 測定方法

ここでは利得の絶対的な経年変化を、利得の一様性を調べたときと同じ、 $\mu - e$  崩壊事象の電子を使って調べることにする。選別方法は便宜上、4.3.1で述べた方法と同じである。

得られた崩壊電子の平均運動量を各月ごとに調べて、利得の絶対的な経年変化とする。

図 5.5に、得られた崩壊電子の運動量分布を示す。これは、1997年10月のデータである。

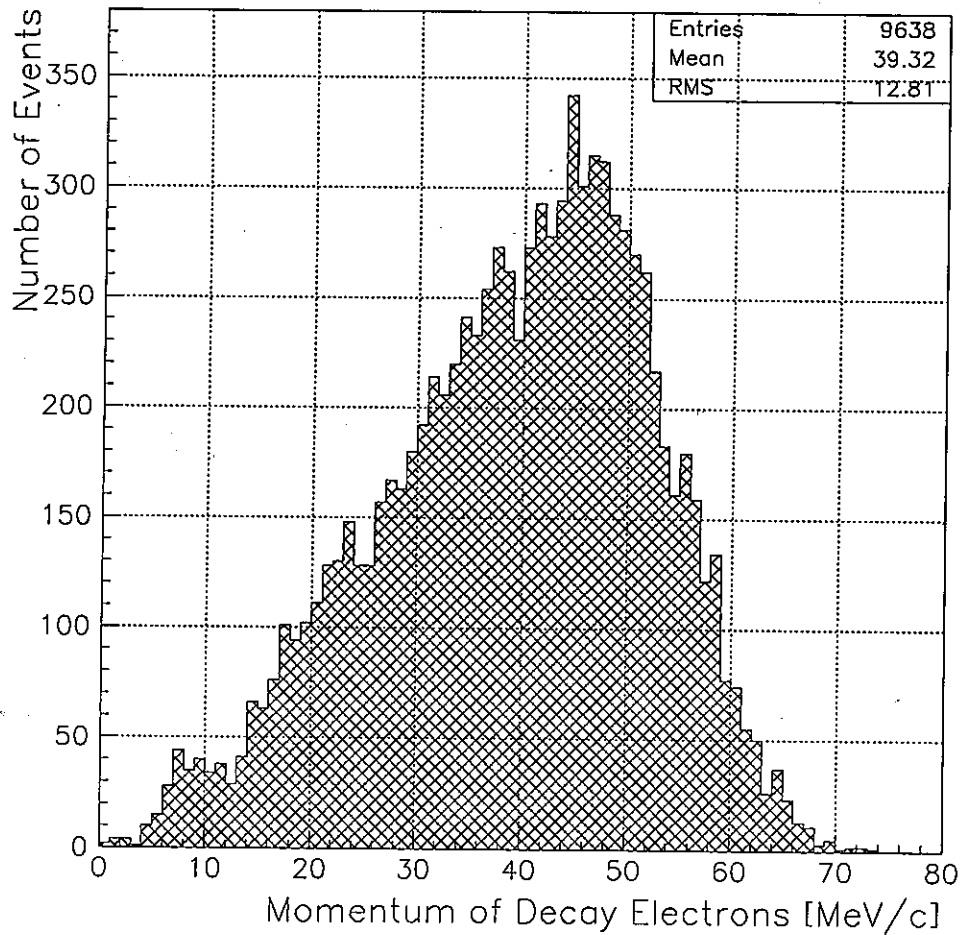


図 5.5: 崩壊電子の運動量分布

## 5.3.2 結果

結果を図 5.6 に示す。1996 年 6 月からの各月ごとにおける、崩壊電子の平均運動量を表している。これから、利得の変化は約 1.7% であることがわかる。光電子増倍管の利得は非常に安定であるといえる。

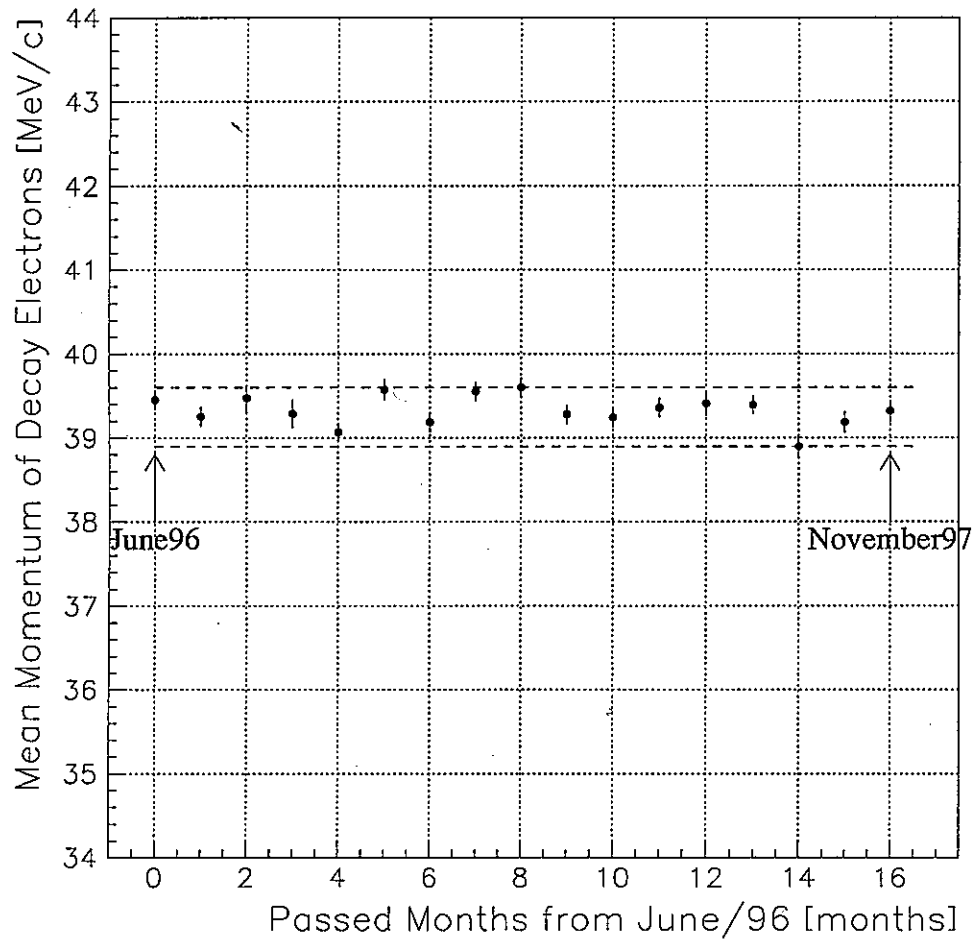


図 5.6:  $\mu - e$  崩壊事象を用いた利得の絶対的な経年変化。横軸は時間、縦軸は崩壊電子の平均運動量である。

## 第 6 章

### 結論

スーパー神岡実験の測定前に、較正実験装置を用いて、20 インチ光電子増倍管の印加電圧値の調整を行なった。そのときの水槽内の場所による利得の偏りを、 $\mu - e$  崩壊事象の崩壊電子を使って解析した。結果は 0.8% であった。物理解析からの検出器較正への要請値は 3.0% であり、較正実験装置を用いて印加電圧値の調整を行なったことに対する信頼性は得られた。

また、個々の利得の微調整をソフトウェア的に行なうためのゲインテーブルを使い、同じように水槽内の場所による利得の偏りを、 $\mu - e$  崩壊事象の崩壊電子を使って解析した。結果は、印加電圧値の調整のみによる場合より、0.3% 悪くなってしまい、検討が必要である。しかし、利得の偏りの結果は 1.1% であり、物理解析からの検出器較正への要請値、3.0% を満たしている。ゲインテーブルを用いて解析することに対する信頼性も得られた。

20 インチ光電子増倍管の利得の経年変化についても調べた。較正実験装置を用いて、1996 年 12 月からの個々の利得の相対的な経年変化を測定した。変化は 2.0% 以内であった。また、 $\mu - e$  崩壊事象の崩壊電子を使って、利得の絶対的な経年変化を調べた。変化は 1.7% 以内であった。これらから、スーパー神岡検出器の光電子増倍管の利得は、非常に安定であると言える。

## 参考文献

- [1] J.V.Jelley.: Čerenkov Radiation and Its Application, PERGAMON PRESS, (1958)
- [2] Honda et al., Phys. Rev. D52 (1995) 4985
- [3] V.Agrawal, T.K.Gaisser et al., Phys. Rev. D53 (1996) 1314
- [4] R.Becker-Szency et al., Phys. Rev. D42 (1990) 2974
- [5] K.S.Hirata et al., Phys. Lett. B220 (1989) 308
- [6] 古賀真之 「新しい 20 インチ光電子増倍管の利得較正」 新潟大学修士論文 (1994)
- [7] 技術資料 高安定性キセノンフラッシュランプ 浜松ホトニクス株式会社 (1993 年 2 月)
- [8] 梶田隆章 「陽子崩壊実験における 20 インチ光電子増倍管キャリブレーションシステム」 東京大学修士論文 (1983)
- [9] 光電子増倍管と関連部品 浜松ホトニクス株式会社 (1990 年 10 月)
- [10] A.Suzuki et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A329(1993)299-313

## 付録 A

### bad channel

スーパー神岡実験では、他と比べてレスポンスが極端に少ない、または多い光電子増倍管などを bad channel として登録し、解析に使わないようにしている。粒子のエネルギー、粒子の発生点、粒子の運動方向を正確に計算できないからである。bad channel に登録される条件は、以下の通りである。

1.  $\mu$  粒子事象の数に対して、hit<sup>1</sup>した回数が 20% 以下の光電子増倍管

他の事象による hit を考慮に入れないように、トリガーのかかった場所近くにある光電子増倍管を使用して、hit の回数を計算している。これは、機能していない光電子増倍管を除く条件である。

2. ミューオン事象における TDC の分布の標準偏差が、10count 未満の光電子増倍管

この条件でも、他の事象による hit を考慮に入れないように、トリガーのかかった場所近くにある光電子増倍管を使って、TDC の分布を調べている。また、1count は、0.4 ns である。

1. と同じように機能していない光電子増倍管を除く条件である。

3. 低エネルギー領域の事象数に対して、hit した回数が 20% 以上の光電子増倍管

hit する回数が以上に多いので、解析の時のノイズになり得る。この条件は 1.2. とは逆の、解析に邪魔な光電子増倍管を除くための条件である。よって、トリガーのかかった場所から離れている光電子増倍管を使用して、hit の回数を計算している。

---

<sup>1</sup>hit とは、光電子増倍管がなんらかの光を受けとってレスポンスを出すことである。