スーパー神岡実験用高電圧電源システムの研究

大阪大学大学院修士課程 2 年
長島研究室　　山口 敬之

平成 7 年 3 月 31 日

Abstract

１９９６年４月に観測を開始する予定であるスーパー神岡実験における超大型水チェレンコフ検出器 ~ スーパーカミオカンデ ~ に使用する高電圧電源の性能を評価するために、太陽ニュートリノと Rn からのバックグラウンド に対するシミュレーションを行ない、太陽ニュートリノ解析の、各光電子増倍管にのるノイズに依る影響を調べた。

その結果、ノイズを 0.4 p.e. 以下に抑えることが出来れば、現行の神岡実験の Rn 濃度でも、エネルギー閾値 = 6.5 MeV で観測が可能になり、スーパー神岡実験の観測で、^{37}Cl 実験、現行神岡実験、SAGE 実験、GALLEX 実験で許容されるニュートリノ振動の MSW 効果による非断熱解と準真空解を識別することが可能になる。更に、予定通り Rn 濃度を 1/100 に減じることに成功すれば、プロポーザルにある、5 MeV まで解析閾値を下げられることが確かめられた。

この結果に基づいて、チェレンコフ光を検出する為の 11,200 本の光電子増倍管に高電圧を印加する高電圧電源試作機のテストを行なった。その結果、接続方法の改良及び電源自体の簡単な改良で、ノイズを 0.2 p.e. 以下迄下げることに成功した。

さらに、コンピューター制御で 24 ch 分の高電圧電源の基本性能を調べるシステムを製作し、高電圧試作機に対して基本性能の評価を行ない、スーパー神岡実験の要求をほぼ満足していおり、本質的に問題がないことが確認された。

目 次

1 序論 **7**

1.1 概要 7

1.2 高電圧電源システムの重要性 7

2 スーパー神岡実験 **9**

2.1 スーパー神岡実験 9

2.2 太陽ニュートリノ 9

2.2.1 太陽ニュートリノ 9

2.2.2 標準太陽模型 10

2.2.3 太陽ニュートリノ問題 10

2.2.4 MSW 効果 13

2.3 核子崩壊 14

2.3.1 大統一理論 (GUTs) 14

2.3.2 SU(5) と核子崩壊 16

2.3.3 陽子の寿命 16

3 スーパーカミオカンデ検出器 **20**

3.1 検出原理 20

3.2 概要 21

3.3 20 インチ光電子増倍管 25

3.4 スーパーカミオカンデ用エレクトロニクス 26

3.5 データ収集システム 30

4 シミュレーション **32**

4.1 シミュレーションを用いた低エネルギー電子事象のノイズに対する影響の評価の意義 32

4.2 物理的要請 33

4.3 エネルギー分解能 33

4.4 バックグラウンドの評価 37

4.4.1 スーパー神岡実験における ^{214}Bi 事象 38

4.4.2 ^{214}Bi からの β 線の染み込み 38

4.4.3 S/N 比 . . . 39
4.4.4 良度指数 (figure of merit) . . . 39
4.4.5 評価 . . . 46
4.5 シミュレーションでの結論 . . . 46

5 高電圧電源に要求される性能 47
5.1 要求される性能 . . . 47
5.2 出力高電圧設定範囲 . . . 48
5.3 出力電圧設定精度及び高電圧モニター . . . 48
5.4 安定度 . . . 48
5.5 保護機能及び電流モニター . . . 50
5.6 高電圧電源分配器制御モジュール . . . 50
5.7 リップル . . . 50
5.8 総合テスト . . . 51

6 テスト 52
6.1 CAEN 製高電圧電源システム . . . 52
6.2 テスト項目 . . . 54
6.3 計算機によるコントロール及びモニターのテスト . . . 54
6.3.1 VME - CAENet コントローラー (V288) . . . 54
6.3.2 V288 による高電圧システムの制御 . . . 55
6.3.3 結果 . . . 56
6.3.4 CAENet による実際の実験場での操作時間の見積り . . . 56
6.4 リップル電圧の測定 . . . 58
6.4.1 セットアップ . . . 59
6.4.2 結果 . . . 60
6.5 高電圧出力の設定精度及びモニター精度のテストと電流計の精度のテスト。 61
6.5.1 セットアップ . . . 61
6.5.2 高電圧出力の設定精度及びモニター精度のテスト . . . 64
6.5.3 電流計の精度のテスト . . . 69
6.6 長期安定性のテスト . . . 69
6.7 過電流に対するテスト . . . 73
6.8 スーパー神岡用 PMT & ATM モジュール (Analog Timing Module) を繋いでの総合ノイズテスト . . . 73
6.8.1 目的 . . . 73
6.8.2 セットアップ . . . 73
6.8.3 テスト . . . 73
6.8.4 改良 . . . 75
6.8.5 結論 . . . 78

7 スーパー神岡実験における高電圧出力モニターシステム **79**
7.1 モニターシステムの必要性 79
7.2 モニターシステム 79

8 結論 **82**

A シュミレーションプログラム **84**
A.1 プログラムの構成 84
A.2 検出器内での粒子の振舞い 84
A.3 チェレンコフ光 85
A.4 光電子増倍管の荷電及び時間分解能 85

表 目 次

2.1 $Solar\ \nu\ Flux$ 10

3.1 各粒子のチェレンコフ放射の臨界エネルギー 21
3.2 スーパーカミオカンデとカミオカンデの比較 22

4.1 ^{214}Bi の β 崩壊の主な崩壊系列 33

6.1 CAENet による操作時間の見積り 58
6.2 高電圧出力精度の測定 1 68
6.3 高電圧出力精度の測定 2 69
6.4 電流計の評価 70

図 目 次

2.1 $p-p\,chain$ による太陽ニュートリノの生成 11
2.2 太陽ニュートリノのエネルギー分布 12
2.3 ν と物質との反応 13
2.4 ニュートリノの質量の固有値の変化 14
2.5 現在 MSW 効果で許されている質量自乗差と混合パラメーター領域 15
2.6 スーパーカミオカンデの検証能力 (ニュートリノ振動) 15
2.7 新ゲージ粒子 X_α 、Y_α の反応 16
2.8 新ゲージ粒子 X_α 、Y_α による陽子崩壊 17
2.9 μ の崩壊 17
2.10 p の崩壊 18
2.11 スーパーカミオカンデの検証能力 (核子崩壊) 19

3.1 粒子の進行方向とチェレンコフ光の放出方向の関係 20
3.2 Kamiokande-II & Super-Kamiokande 検出器の構造 23
3.3 Super-Kamiokande 検出器の建設位置 24
3.4 光電子増倍管の形状と大きさ 25
3.5 光電子増倍管の回路模式図 26
3.6 10^7 ゲインでの PMT の印加電圧値の分布 27
3.7 スーパー神岡用光電子増倍管のケーブル 27
3.8 20 インチ PMT の 1 光子に対するパルス高の分布 28
3.9 スーパーカミオカンデ用エレクトロニクスのブロックダイアグラム 28
3.10 ATM モジュールのブロックダイアグラム 29
3.11 ATM モジュール用カードエッヂコネクター 30
3.12 スーパーカミオカンデにおけるエレキハット 30

4.1 $P_e = 5MeV/c$ で発生させた電子の N_{hit} 分布 34
4.2 N_{hit} - エネルギーの線形性 35
4.3 エネルギースケールの変化 36
4.4 エネルギー分解能の変化 37
4.5 end point energy = 3.26 MeV の β 崩壊の運動量分布 38
4.6 PMT の各閾値に対する ^{214}Bi のエネルギーの染み込みの分布 40
4.7 PMT の各閾値に対する太陽ニユートリノの N_{hit} の分布 41

4.8 スーパー神岡実験における太陽ニュートリノと Rn のバックグラウンド事象の S/N 比 1 42
4.9 スーパー神岡実験における太陽ニュートリノと Rn のバックグラウンド事象の S/N 比 2 43
4.10 スーパーカミオカンデにおける太陽ニュートリノ事象の算出方法 44
4.11 スーパー神岡実験における太陽ニュートリノ事象の良度指数 1 45
4.12 スーパー神岡実験における太陽ニュートリノ事象の良度指数 2 45

5.1 スーパーカミオカンデ検出器における $P^+ \rightarrow K^+ \nu \rightarrow \mu^+ \nu \nu$ 崩壊からの μ 事象 49

6.1 A933K の仕様 53
6.2 CAENet による高電圧電源システムの接続 55
6.3 CAENet コントロールのテストセットアップ。 56
6.4 CAENet によるモニター値の読みだし時間のケーブル長に対する依存性 . . 57
6.5 リップル電圧測定用回路 59
6.6 リップル電圧測定のセットアップ 59
6.7 リップル電圧の写真 60
6.8 スペクトルアナライザーによる測定結果 61
6.9 リレーモジュール 62
6.10 精度測定テストセットアップ 63
6.11 高電圧出力の精度測定の手順 64
6.12 立ち上がり時間の測定 65
6.13 リレー切替後の待ち時間のグラフ 66
6.14 精度のグラフ 67
6.15 電源の内部抵抗の概略図 70
6.16 電流モニターの評価 71
6.17 長期安定性のテストの手順 71
6.18 長期安定性のグラフ 72
6.19 ノイズテストのセットアップ 74
6.20 グランドケーブルのセットアップによる違い (写真) 74
6.21 PMT と ATM 、HV の接続 75
6.22 ノイズテストの写真 76
6.23 A933K に対する改良 76
6.24 改良後のリップルのスペクトルアナライザーに依る測定 77
6.25 改良後のノイズテストの写真 78

7.1 高電圧システムのコントロール概略図 80

A.1 水の透過率の波長依存性 86
A.2 カミオカンデにおける電荷量と時間の関係 86

第 1 章

序論

1.1 概要

現在岐阜県神岡町で稼働している神岡核子崩壊検出器 (カミオカンデ) は、3,000 トンの水と内壁に取り付けられた約 1,000 本の 20 インチ光電子増倍管 (PMT) からなる円筒形水チェレンコフ検出器 (図 3.2) であり、１９８３年に核子崩壊観測実験として測定を開始した。その後、１９８６年以降は 123 本の PMT を取り付けた外水槽 (アンタイカウンター) を取り付け、更にエレクトロニクスの改良を行ない、核子崩壊検出器としてだけでなく、低エネルギー (10 MeV 近辺) ニュートリノ検出器として用いられてきた。カミオカンデ はこれまでに、陽子の寿命測定 [1] のみならず、太陽ニュートリノ [2]、超新星からのニュートリノ [3] などの観測を行ない、ニュートリノ検出器としても、様々な成果をあげてきた。

この実験の次期計画として、 超大型水チェレンコフ検出器 (スーパーカミオカンデ) が現在岐阜県神岡町の茂住坑の地下 1,000 m の地点に建設中である (１９９６年４月から観測開始予定)。スーパーカミオカンデは 50,000 トンの水と内壁に 11,200 本の 20 インチ光電子増倍管 (PMT) が取り付けられた内水槽と 1,867 本の 8 インチ PMT が取り付けられた外水槽からなる、カミオカンデと同様の円筒形水チェレンコフ検出器 (図 3.2) である。これは、現行のカミオカンデと比較して 10 倍以上の質量をもち、また光電子増倍管の密度は 2 倍になっている。これにより、カミオカンデに比べ、遥かに高統計、高分解能のデータを得ることが可能になり、ニュートリノ振動や大統一理論の検証に大きな成果が期待される。

1.2 高電圧電源システムの重要性

スーパーカミオカンデ検出器はその構造上、事象のトリガー及び観測事象の再構成を 11,200 本の PMT で得られた情報を用いて行なっている。そのため、PMT からの信号には次のことが要求される。

ノイズが少ないこと 実際の観測事象からの信号以外のノイズ成分が多く含まれていると、誤ったトリガーの頻度が高くなったり、誤ったトリガーが起こる。スーパー神岡実験は、加速器実験と異なり、ビームタイミングが無いので、自らの情報でトリガー (セルフトリガー) を作らねばならない。そのため、ノイズの影響が大きくなりやすく、ノイズ源があると、その影響を防ぐためにトリガーのエネルギー閾値を高く設定せねばならないという不都合が生じる。

利得が一様で且つ一定である 利得にばらつきや不安定性があると、トリガー及び事象のエネルギーや粒子の方向、粒子の特定などに、大きな系統誤差を招くことになる。

そのため、PMT に高電圧を印加する高電圧電源システムは低ノイズで高精度、高安定性のものが要求される。

本論文では、スーパーカミオカンデで使用する PMT に高電圧を印加する高電圧電源システムに要求される性能をシュミレーションを用いて評価し、実際に用いられる電源システム (試作品) に対するテスト及び実際の実験に即したエレクトロニクス、PMT、高電圧電源の接続状態でのテストの経過及び結果を述べ、実際のスーパー神岡実験での高電圧電源のシステム構成を述べる。

第 2 章

スーパー神岡実験

この章では、スーパー神岡実験の実験目的とその意義を述べる。検出器については次の章で述べる。

2.1 スーパー神岡実験

スーパー神岡実験の主な目的は、

- 太陽ニュートリノの観測
- 核子崩壊事象の探索

である。この節ではこれらについて簡単に述べる。

2.2 太陽ニュートリノ

2.2.1 太陽ニュートリノ

現在、太陽などの恒星が軽元素 (p , He , Be , B , etc) の核融合に依って燃焼していることは一般的に知られている。この核融合は恒星の内深部で起き、またその際に発生する光が恒星表面に達するには長い時間がかかる ($10^6 \sim 10^7$ 年)。そのため光学的に今現在の恒星の内部の物理過程を詳しく知ることは極めて困難である。しかし、核融合の過程で発生するニュートリノ (ν_e) は恒星内部でほとんど反応しないため、リアルタイムな恒星内部の物理過程を知る上で重要な手がかりになる。

太陽は、地球に最も近く、その半径、輝度、年齢、地球からの距離が最も正確に分かっている恒星である。従って太陽からのニュートリノを調べることは、恒星の模型を検証する上で、最も有効な手段の一つである。また太陽からのニュートリノは地球まで約 $1.5 \times 10^{11} m$ の長距離を通過してくる上に、太陽中心という高密度な領域も通過してくる (太陽中心の密度は $150\ \mathrm{g}/cm^3$、 太陽半径は $6.96 \times 10^9 m$)。そのため、ニュートリノの特性を知る上

で、地球上で行なわれるニュートリノビーム実験では得られない種のデータを得ることが出来る。

2.2.2 標準太陽模型

太陽の燃焼機構は標準太陽模型 (Standard Solar Model = SSM) [4] によって理論的に予想されている。SSM によると太陽の中心核は水素の燃焼段階 (主系列星) にあり、４つの水素原子核が反応して、ヘリウム原子と２つの陽電子、電子ニュートリノ、$25.6MeV$ の運動エネルギーになる反応 ($p-p\,chain$)

$$4p \longrightarrow \alpha + 2e^{+} + 2\nu_e + 26.7MeV \tag{2.1}$$

によって、太陽の全エネルギーの 98.5% が生成されていると考えられている。この反応の反応系列は図 2.1、地球上でのニュートリノのフラックスとエネルギー分布 [4] は表 2.1、図 2.2に示す。

Source	Flux($cm^{-2}\,sec^{-1}$)
pp	$6.00 \times 10^{10}(1 \pm 0.02)$
pep	$1.43 \times 10^{8}(1 \pm 0.04)$
hep	1.23×10^{3}
^{7}Be	$4.89 \times 10^{9}(1 \pm 0.18)$
^{8}B	$5.69 \times 10^{6}(1 \pm 0.43)$
^{13}N	$4.92 \times 10^{8}(1 \pm 0.51)$
^{15}O	$4.26 \times 10^{8}(1 \pm 0.58)$
^{17}F	$5.39 \times 10^{8}(1 \pm 0.48)$

表 2.1: $Solar\ \nu\ Flux$

2.2.3 太陽ニュートリノ問題

初めての太陽ニュートリノ観測実験は、R.Davis 等によって１９６８年から行なわれた実験 [5] である。この実験はアメリカのノースダコタ州にあるホームステーク金山の地下 2480m の地点に設置された^{37}Cl による検出器によって行なわれた。この検出器は $3.8 \times 10^{5}\,l$ の C_2Cl_4から成り立っている。これは 2.2×10^{30}個 (133ton) の ^{37}Cl に相当する。ニュートリノは^{37}Cl との反応、

$$^{37}\mathrm{Cl} + \nu_{\mathrm{e}} \rightarrow {}^{37}\mathrm{Ar} + \mathrm{e}^{-} \tag{2.2}$$

によって捉えられる。この反応の敷居値は $0.814MeV$で、主に^{8}B、^{7}Be ニュートリノに対して感度がある。SSM による Ar 生成の期待値は、$8.0 \pm 3.0SNU$[1][4] であり、誤差は理論

[1] $SNU(=\ Solar\ Neutorino\ Unit)$ は $one\ neutrino\ capture\ /10^{36} target\ atoms\,\mathrm{sec}$

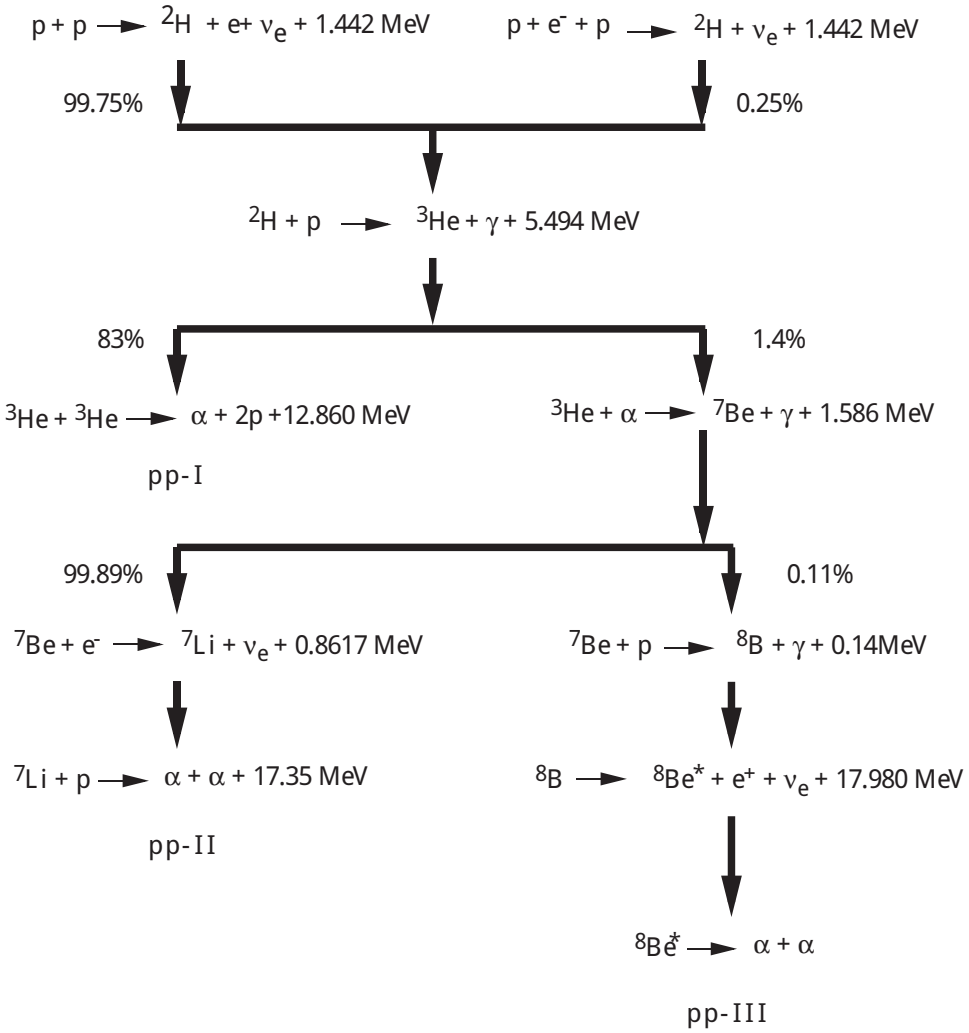

図 2.1: $p-p\ chain$ による太陽ニュートリノの生成

図 2.2: 太陽ニュートリノのエネルギー分布

値の 3σ である。これに対して、観測結果は $2.3 \pm 0.3(1\sigma)SNU$[5] であった。これは期待値の僅か $1/4$ である。この問題がいわゆる太陽ニュートリノ問題である。

一方、１９８７年に太陽ニュートリノのデータの解析が可能になった KAMIOKANDE-II においても、太陽ニュートリノの観測がなされた。KAMIOKANDE-II は ^8B からのニュートリノのみに感度を持つ。 KAMIOKANDE-II 検出器は太陽ニュートリノに対して

$$\nu_e \; e^- \; \rightarrow \; \nu_e \; e^- \tag{2.3}$$

の反応からの電子を検出するため、ニュートリノの方向を調べることで、太陽からのニュートリノを選び出すことが出来る。１９９０年４月迄の１０４０日間の観測による結果、SSM と観測値の比は $0.46 \pm 0.05(stat.) \pm 0.06(sys.)$[2] であった。この観測によって、太陽ニュートリノ問題の追証がなされた。

また、旧ソビエトの SAGE[6]、イタリアの GALLEX[7] 等の ^{71}Ga を用いた実験でも追証がなされた。これらの検出器は、

$$^{71}\mathrm{Ga} + \nu_\mathrm{e} \rightarrow {}^{71}\mathrm{Ge} + \mathrm{e}^- \tag{2.4}$$

の反応によって太陽ニュートリノを検出する。この反応の敷居値は $0.2332MeV$ で pp 反応のニュートリノに感度を持っている。SAGE、GALLEX それぞれの結果は、$58^{+17}_{-24}(sys.) \pm 14(stat.)SNU$[6]、 $79 \pm 10(sys.) \pm 6(stat)SNU$[7] であった。これに対し、SSM の期待値は $132^{+21}_{-17}SNU$[4] であり、 pp 反応のニュートリノについても、観測値は期待値を下回ることが示された。

2.2.4 MSW 効果

「太陽ニュートリノ問題」の発生以降、多くの理論的解決案が議論されてきたが、それらの中で有力なものは太陽モデルに依存するものでなく、ニュートリノの特性に依存するものである。その中でも有力視されているものに、ニュートリノ振動の効果に依るものである。以降この理論について述べる。

ニュートリノの質量の固有状態が非縮退で且つ弱い相互作用の固有状態が質量の固有状態の混合状態として記述されるとき、各ニュートリノ間で振動が起こる。太陽ニュートリノとして放出されている ν_e がν_μ や ν_τ に変化する事によって太陽ニュートリノの減少を説明できる。

また、ニュートリノが物質中を通過する際には MSW 効果 (Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein effect)[8] による振動の増幅も予想される。

物質中では ν_e は、他のニュートリノと異なり、電子密度に比例した力を持つ荷電カレントの相互作用を持つ (図 2.3)。太陽中心では、ν_e の質量が大きくなり、相互作用がなくなる太陽表面に達するまでにレベル交差を起こし、ν_e が ν_μ に変わってしまうことが出来る (図 2.4)。この効果を MSW 効果 と言う。

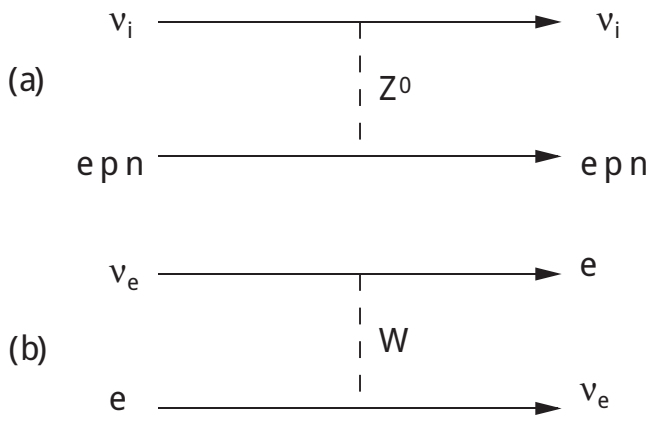

図 2.3: 物資中での ν の反応のダイアグラム。(a) の反応は ν の種類によらないが ($\bar{\nu}$ でも OK!)、(b) の反応は ν_e のみ関与する。

スーパーカミオカンデは、ニュートリノ (正確には反跳電子[2]) の方向とエネルギー分がリアルタイムで測定でき、また大きな統計量 (エネルギー閾値が 5 MeV で測定した時 $\sim 23 events/day$) が期待できるので 、MSW 効果の検証に決定的な役割を演ずる。MSW 効果による太陽ニュートリノのエネルギー分布の変化はニュートリノの質量自乗差、混合角に依って違う。現在までに、^{37}Cl 実験、神岡実験、 ^{71}Ga 実験の実験から、ニュートリノの質量自乗差$\sim 10^{-5} eV^2$ 、$sin^2 2\theta \sim 10^{-2}$ (混合角θ) の非断熱解の一部 (図 2.5中 (a))

[2]スーパーカミオカンデ検出器の観測出来る太陽ニュートリノは ^8B からのニュートリノのみであり、そのエネルギーの範囲 ($<\sim 14 MeV$) では、電子とニュートリノの散乱のみが起こる

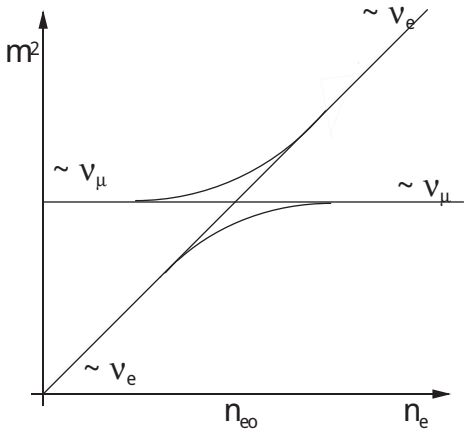

図 2.4: ニュートリノの質量の固有値が電子密度の変化と共にどう変わるかを示す。

と、質量自乗差 $\sim 10^{-5}eV^2$ 、$sin^2 2\theta \sim 0.5$ の準断熱解の一部 (図 2.5中 (b)) のみ許されている。

これら 2 つの解はエネルギー分布が異なるため、そのエネルギー分布の違いを見るために、エネルギーの敷居値を出来るだけ下げなければならない。スーパーカミオカンデでは、エネルギーの閾値を 5MeV で測定する。このため、図 2.6にスーパーカミオカンデの検証能力を示すが、MSW 効果に対し十分な検証能力を持つ。

2.3 核子崩壊

2.3.1 大統一理論 (GUTs)

素粒子間に作用する 3 つの相互作用 (電磁気相互作用、弱い相互作用、強い相互作用) は、電磁気相互作用と弱い相互作用は電弱理論、強い相互作用は QCD (量子色力学) で説明される。電弱理論 ($\mathrm{SU(2)} \times \mathrm{U(1)}$) と QCD ($\mathrm{SU(3)}$) を合わして「標準理論」($\mathrm{SU(3)} \times \mathrm{SU(2)} \times \mathrm{U(1)}$) と呼んでいる。

これらの標準理論には 3 つの結合定数 (α'、α_2、α_sがあるが、これらは互いに独立である。しかし、結合定数はエネルギースケールと共に変わっていくので、高エネルギーのどこかで 3 つの結合定数は一致しそうに見える。この様な議論を大統一理論 (grand unified theories = GUTs) と言う。

図 2.5: 現在 MSW 効果で許されている質量自乗差と混合パラメーター領域 ：縦軸にニュートリノの質量自乗差、横軸に混合角の $sin^2 2\theta$ をとった MSW 解の許容範囲。黒塗りの部分が許されており、(a) の領域を非断熱解、(b) の領域を準真空解と言う

図 2.6: SSM を 1 とした時の観測されるイベントの割合。誤差棒付き点は 3 年間の観測でスーパーカミオカンデで予想される観測値。(a) 非断熱解 : $sin^2 2\theta = 6.3 \times 10^{-3}$, $\Delta m^2 = 1.0 \times 10^{-5}$、(b) 準真空解 : $sin^2 2\theta = 7.0 \times 10^{-1}$, $\Delta m^2 = 2.0 \times 10^{-5}$

2.3.2 SU(5) と核子崩壊

大統一理論の一つに Georgi と Glashow の唱えた SU(5) ゲージ場理論 [9] がある。この理論は、標準理論と同様にゲージ対称性に基礎を置く理論である。

ゲージ対称性を考える場合、それに対応するゲージ粒子が必要になる。標準理論に必要なゲージ粒子は、 SU(3) 、SU(2) 、U(1) から合計１２個である。しかしこれに対して、SU(5) では２４個のゲージ粒子が必要になり、標準理論にはない新しい１２個のゲージ粒子が必要になる。

SU(5) はゲージ対象性ににもとずく最も簡単な群であるが、少なくとも大統一がゲージ理論にもとずいている限り、新しいゲージ粒子が必要になる。つまり、ゲージ理論にもとずく GUT を証明するためには新しいゲージ粒子による反応を観測する必要がある。

SU(5) で予言される新しいゲージ粒子はクォーク-レプトン間の相互作用を司る粒子である (図 2.7)。そのため、新しいゲージ粒子の存在を証明する唯一の方法がが核子崩壊 (図

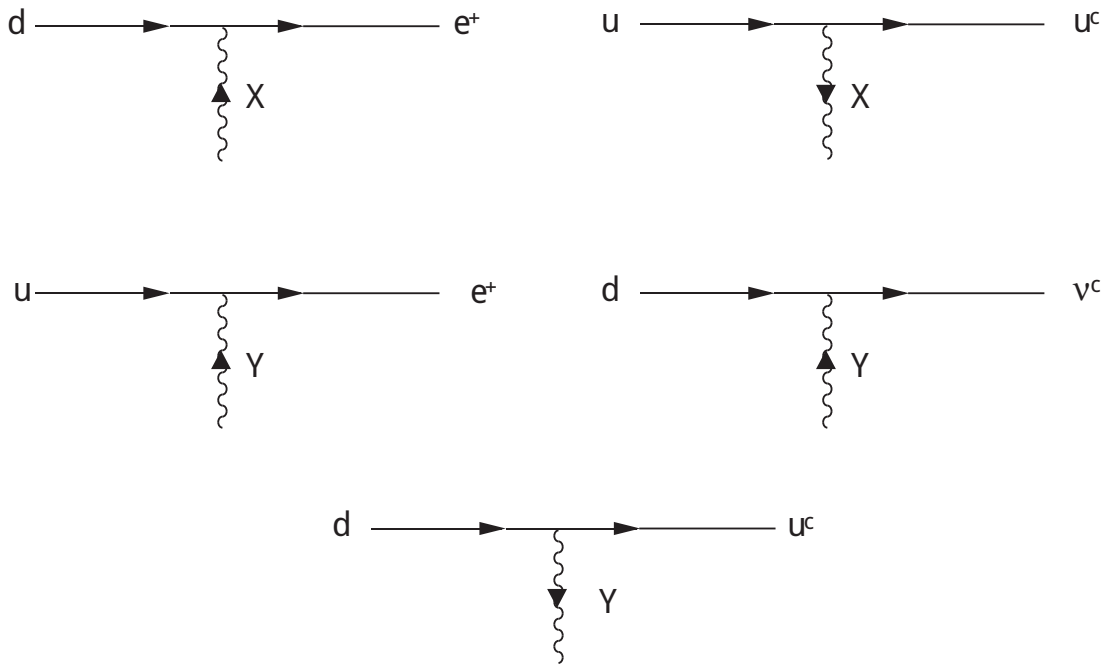

図 2.7: 新ゲージ粒子 X_α 、Y_α の反応

2.8) の発見である。(当然この反応では図 2.8 の様な e, ν_e, π に関係したものだけでなく μ, ν_μ, K に関係したものもある。)

2.3.3 陽子の寿命

GUTs で予言される新しいゲージ粒子による陽子崩壊を、簡単のため、弱い相互作用による μ の崩壊の類推で考える。図 2.9での崩壊幅は、

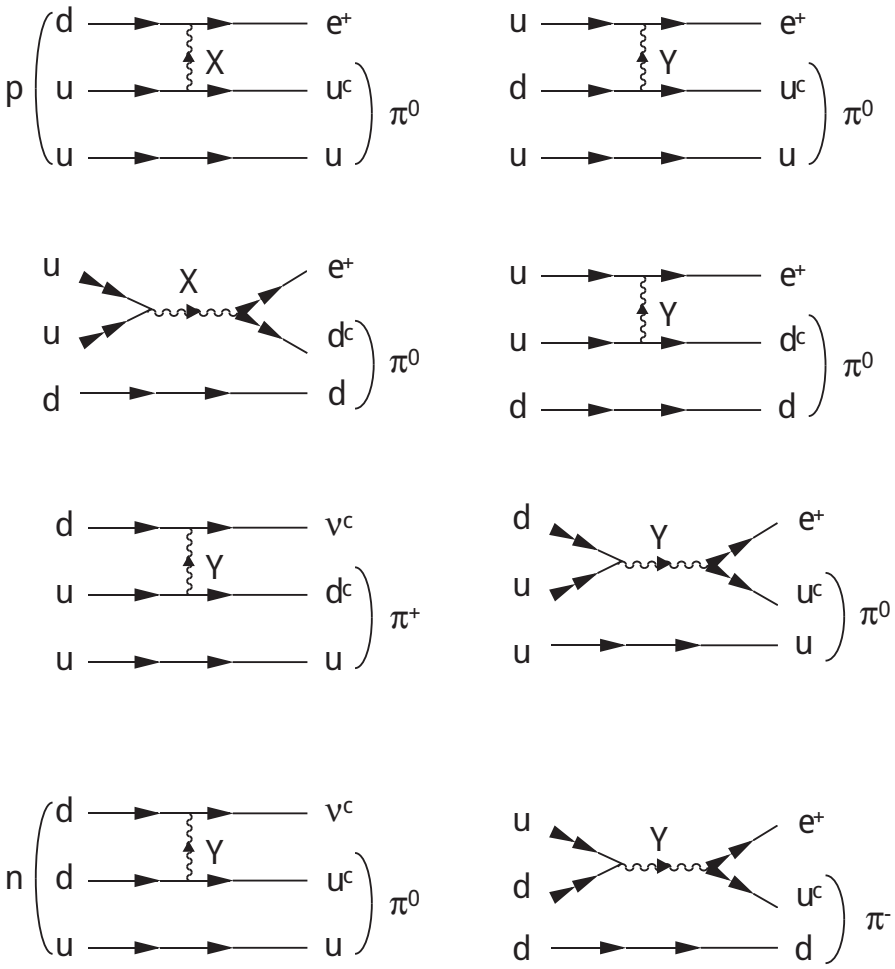

図 2.8: 新ゲージ粒子 X_α 、Y_α による陽子崩壊

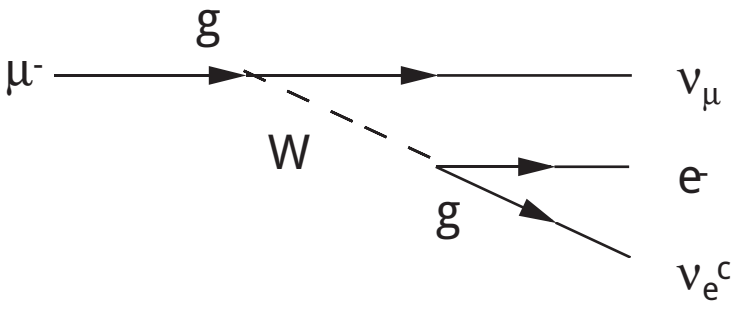

図 2.9: μ の崩壊

$$\frac{G}{\sqrt{2}} = \frac{g^2}{8{M_W}^2} \tag{2.5}$$

で、

$$\begin{aligned} \Gamma(\mu \to e\bar{\nu_e}\nu_\mu) &\sim G^2{m_\mu}^5 \\ &\sim \frac{g^4{m_\mu}^5}{{M_W}^4} \end{aligned} \tag{2.6}$$

$$\tag{2.7}$$

となるから、図 2.10での崩壊幅は、

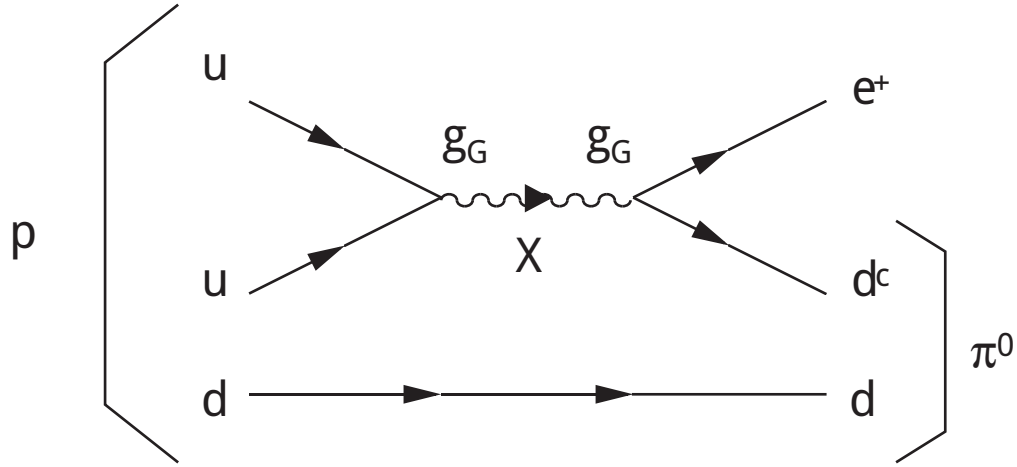

図 2.10: p の崩壊

$$\frac{G_G}{\sqrt{2}} = \frac{{g_G}^2}{8{M_X}^2} \tag{2.8}$$

で、

$$\begin{aligned} \Gamma(p \to \pi e) &\sim {G_G}^2{m_p}^5 \\ &\sim \frac{{g_G}^4{m_p}^5}{{M_X}^4} \end{aligned} \tag{2.9}$$

$$\tag{2.10}$$

となる。

式 2.9から陽子の寿命は、

$$\tau_p \sim \frac{{M_X}^4}{{g_G}^4{m_p}^5} \tag{2.11}$$

の様になり、ゲージ粒子の質量に非常に敏感になる。

$\mathrm{SU}(5)$ から予言される陽子の寿命は、実際には [10]、$M_X = 6 \times 10^{14}$ として、

$$\tau_p \simeq 10^{30} \sim 10^{32} \ \ year \tag{2.12}$$

と予想される。

しかし、現在までに神岡核子崩壊実験 [1] や IMB[3][11] から、陽子の寿命は

$$\tau(p \to e^+\pi^0) = \frac{\tau_p}{B(e^+\pi^0)} > 8 \times 10^{32} \ year(90\%C.L.) \tag{2.13}$$

となっている。(ここで、$B(e^+\pi^0)$ は分岐比で $B > 0.5$)

この値は $\mathrm{SU}(5)$ の予言値より大きく、その意味で minimal $\mathrm{SU}(5)$[4] は破綻している。しかし、ゲージ対称性を用いた大統一が完全に否定された訳ではなく、$\mathrm{SO}(10)$ というゲージ群をとる場合、$e^+\pi^0$ のモードで $10^{33\pm1}$ 年の崩壊寿命が予言されている [12]。

これに対して、スーパーカミオカンデは 22,000t の有感質量を持っているため、5 年の観測で 10^{34} 年まで観測できる能力を持っており (図 2.11)、$\mathrm{SO}(10)$ モデルの検証に十分な能力を持っている。

図 2.11: スーパーカミオカンデの検証能力 (核子崩壊): 5 年間の測定で到達できる各崩壊モードでの寿命の下限値

[3]アメリカで行なわれたカミオカンデと同様な水チェレンコフ型検出器 ($8{,}000t$) を用いた実験

[4]Higgs 粒子が最小の $\mathrm{SU}(5)$

第 3 章

スーパーカミオカンデ検出器

3.1 検出原理

スーパーカミオカンデ検出器は総重量５０、０００トンの大型水チェレンコフ検出器であり、その検出原理は、荷電粒子が純水中を放出するチェレンコフ光を PMT で検出することで行なわれる。

チェレンコフ光は、屈折率 n の媒質中で荷電粒子がその媒質中での光速 c/n を越えて運動するさいに放出する光で、その放出方向は図 3.1の関係で

$$cos\theta = \frac{1}{n\beta} \tag{3.1}$$

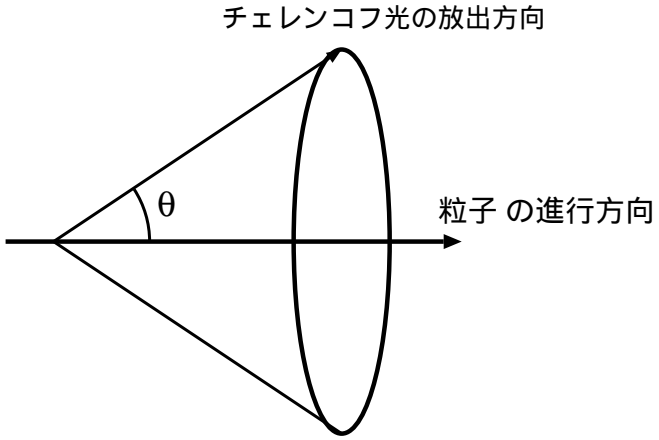

図 3.1: 粒子の進行方向とチェレンコフ光の放出方向の関係

のようになる。ここで、θはチェレンコフ光の放出角 (図 3.1)、n は媒質の屈折率、βは荷電粒子の粒子の速度 ($= v/c$)である。スーパーカミオカンデ検出器の媒質は純水であるの

で、屈折率 $n = 1.344$ であり、電子及びμ 粒子、π 粒子のチェレンコフ放射の臨界エネルギーは表 3.1の様になる。また、$\beta = 1$ では放出角は約 42° になる。

粒子の種類	臨界エネルギー (MeV)
電子 ($e^{\pm}$)	0.763
$\mu^{\pm}$ 粒子	158.1

表 3.1: 各粒子のチェレンコフ放射の臨界エネルギー

また、チェレンコフ光の波長分布は、

$$\frac{d^2N}{dxd\lambda} = 2\pi Z^2\alpha\left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2}\right)\frac{1}{\lambda^2} \tag{3.2}$$

ここで、Nは放出される光子数、x は過電粒子の進む距離、λは放出される光子の波長、Zは荷電粒子の電荷、αは微細構造定数 ($1/137$) である。

式 3.2から、$Z = 1$ の過電粒子が水中を $1cm$ 進む間に放出する光子数は、PMT の有感領域 ($300 \sim 600nm$) の範囲で、 ~ ３４０個になる。

実際の検出方法は以下のようである。荷電粒子がタンク内の純水中を進む時、例えばその速度がほぼ光速の時、進行方向に対して約 42° の方向に光が放射される。この光をタンクの内壁に、２次元的に取り付けられた光電子増倍管 (PMT) で捕らえる。PMT はタンクの内壁に、タンク内の水を取り囲むように、全方向に取り付けられているので、チェレンコフ光のリングを認識することができる。そして、各 PMT の光電子数と PMT への光の到達時間から事象の再構成を行ない、その事象の発生点、運動量、粒子の種類を決定できる。

3.2 概要

スーパーカミオカンデ検出器は、岐阜県神岡町にある神岡鉱山茂住抗の地下 $1000m$(水深 $2700m$ 相当) の地点に、現在建設中である (１９９６年４月観測を開始予定)。この検出器に期待される性能及び構造を同様に水チェレンコフ検出器であるカミオカンデ-II と対比させて表 3.2、図 3.2 に示す。

スーパーカミオカンデ検出器は現在 (１９９５年２月)、岐阜県神岡鉱山茂住坑の地下 1000m の地点 (水深 2700m 相当) の現行のカミオカンデ検出器とほぼ同位置 (距離約 200m) に建設中 (図 3.3) であり、１９９６年４月には太陽ニュートリノ等の物理事象の観測を開始する予定である。

この検出器が地下 1,000 m に設置される理由は、バックグラウンド事象となる宇宙線中の μ 粒子を減らすためである。地表での μ 粒子の強度は約 $10^9 m^{-2} y^{-1}$ であるが、地下 1000m の地点 (水深 2700m 相当) ではその約 10^{-5} となり、その頻度の期待値は $2 \sim 3Hz$ である。

Parameters	Super-KAMIOKANDE	KAMIOKANDE-II	Remarks
Total size	$41mh \times 39m\phi$	$16mh \times 19m\phi$	
Total mass	$50,000t$	$4,500t$	
Fiducial mass （有感質量）	$32,000t$ $22,000t$ $22,000t$	$2,140t$ $1,040t$ $680t$	$supernova\ \nu\ burst$ $proton\ decay$ $solar\ \nu$
Thickness of anti-counter	$2m$	$1.2m \sim 1.5m$	
Number of PMTs	$11,200$ $1,867$	948 123	$inner-counter$ $anti-counter$
Photosensitive coverage	40%	20%	
PMT timing resolution	$2.5nsec$	$4nsec$	$at\ 1\ P.E.$
Energy resolution	$2.6\%/\sqrt{E}$ 2.5% $16\%/\sqrt{E}$	$3.6\%/\sqrt{E}$ 4% $20\%/\sqrt{E}$	$e\ of\ E(GeV)$ $\mu(\leq 1\ GeV)$ $e(\leq 20\ MeV)$
Position resolution	$50cm$ $\sim 10cm$	$110cm$ $15cm$	$10MeV\ e$ $p \rightarrow e^+\pi^0$
Angular resolution	28° $\sim 1^\circ$	28° 2.7°	$10\ MeV\ e$ $Thru-going\ \mu$
E_{th}(trigger) E_{th}(analysis)	$4 \sim 5MeV$ $5MeV$	$5.2MeV$ $7.5MeV$	 $solar\ \nu$
e/μ separation	99%	$98 \pm 1\%$	$0.03 < p_e < 1.33GeV/c$ $0.2 < p_\mu < 1.5GeV/c$
$\epsilon_{\mu^+ \rightarrow e^+ \bar{\nu_\mu} \nu_e}$	95%	$87 \pm 1\%$	

表 3.2: スーパーカミオカンデとカミオカンデの比較

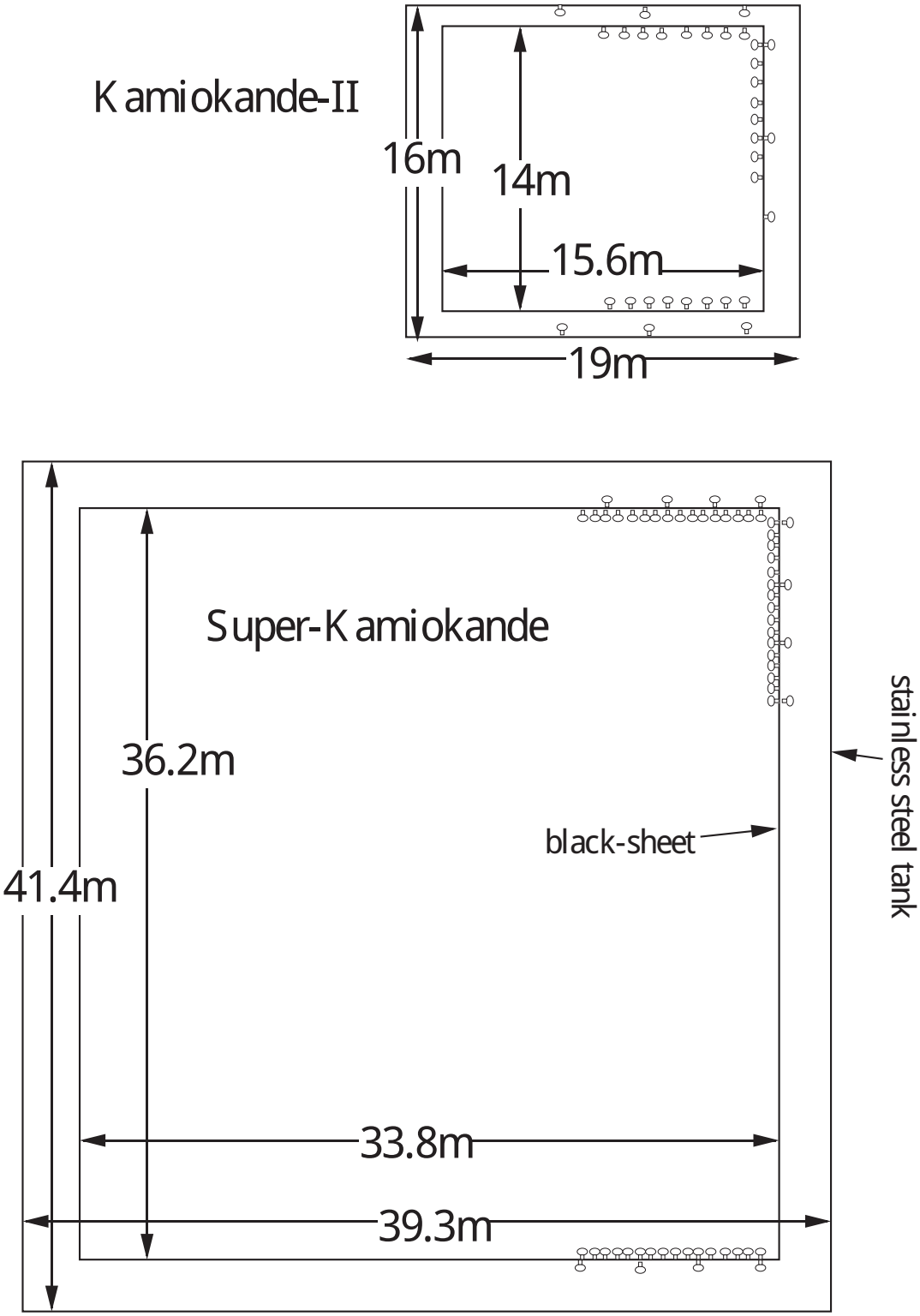

図 3.2: Kamiokande-II & Super-Kamiokande 検出器の構造

図 3.3: Super-Kamiokande 検出器の建設位置

スーパーカミオカンデ検出器は図 3.2のように内水槽と外水槽 (アンタイカウンター) の２重構造になっており、PMT はそれぞれ内向き、外向きになっている。

内水槽はこの検出器の主となる部分で、この水槽の内壁に、直径 20 インチ PMT が内水槽の上面及び下面には約 1,750 本ずつ、側面には約 7,700 本の計 11,200 本、約 $0.5m^2$ に一本の割合で取り付けられており、内壁の全表面積の約 40% を覆っている 。これはカミオカンデ検出器の 2 倍で、この値は直接エネルギー分解能に効いてくる。

外水槽はアンタイカウンターと呼ばれるもので、1,867 本の直径 8 インチ PMT が取り付けられている。この水槽の目的は測定器に混入する外からもしくは外へ抜けた事象を認識ある。この実験の主目的であるニュートリノの測定や核子崩壊事象は、実際にはタンク内 (内水槽) の純水との反応を見てやることである。そのため、外水槽 PMT の情報を使って、内水槽起源の事象と宇宙線起源の荷電粒子 (特に μ 粒子) による事象とを区別することが出来る。また、タンク外の岩盤からの γ 線に対するシールドの役目もする。

3.3 20 インチ光電子増倍管

スーパーカミオカンデ検出器に用いる光電子増倍管 (R3600) は、浜松ホトニクスで開発された。その外観図及び回路図を図 3.4、3.5[13] に示す。

図 3.4: 光電子増倍管の形状と大きさ

この PMT は現行のカミオカンデ検出器で用いられている 20 インチ光電子増倍管 (R1449) を改良したものであり、正極性の印加電圧に対して作動する。

この改良によって防水性の強化がはかられ、時間分解能も現行の PMT の 1 p.e. に対して $5nsec$ から $3nsec$ と向上している [13]。さらに、出力パルスの波高も、6×10^6 ゲイン相

図 3.5: 光電子増倍管の回路模式図

当の印加電圧[1]で、1 p.e.[2]に対して、3mV (現行の PMT では 1mV) と大きくなっている。

また、一定の電流増幅率での個々の PMT への印加電圧はタングステン光源を使ったテストで工場からの出荷の時点で既に押えられている。その分布を図 3.6に示す [13] 。
また一般的に、電流増幅率と印加電圧の間には、

$$G_{curr} \;=\; KV^{b} \tag{3.3}$$

の関係がある。ここで、K、b は PMT 毎に決まる定数である。スーパーカミオカンデ用 PMT では $b = 8 \sim 9$ である。

また、PMT とデータ収得用エレクトロニクス、高電圧電源を繋ぐケーブルは図 3.7の用なものを使用している。

また、この PMT の 1 光子に対するパルス高の分布は図 3.8の様になっている [13]。

3.4 スーパーカミオカンデ用エレクトロニクス

スーパー神岡実験におけるエレクトロニクスは TKO[3] モジュールと VME[4] モジュールから構成されている。(図 3.9)

PMT からの信号を TKO 規格のモジュール ATM[5] でうけとる。ATM はその内部に、増

[1]スーパー神岡実験で印加する電圧
[2]photo electron
[3]KEK (高エネルギー研) で開発されたデータ収集システムで TRISTAN-KEK-Online の略である。
[4]Versa Module Europe
[5]Analog Timing Module

図 3.6: 10^7 ゲインでの PMT の印加電圧値の分布

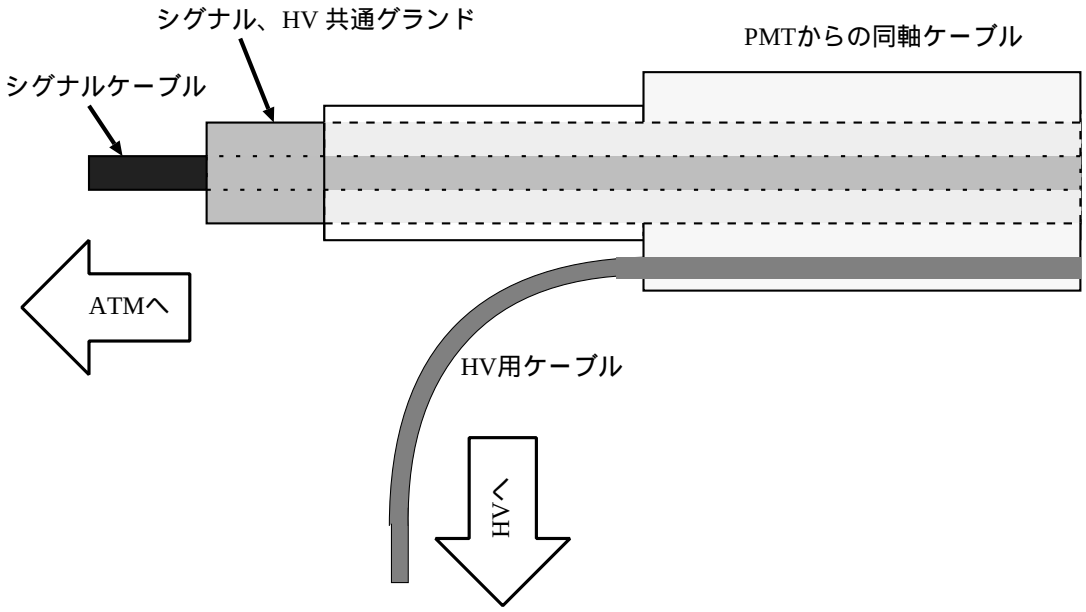

図 3.7: スーパー神岡用光電子増倍管のケーブル

図 3.8: 20 インチ PMT の 1 光子に対するパルス高の分布

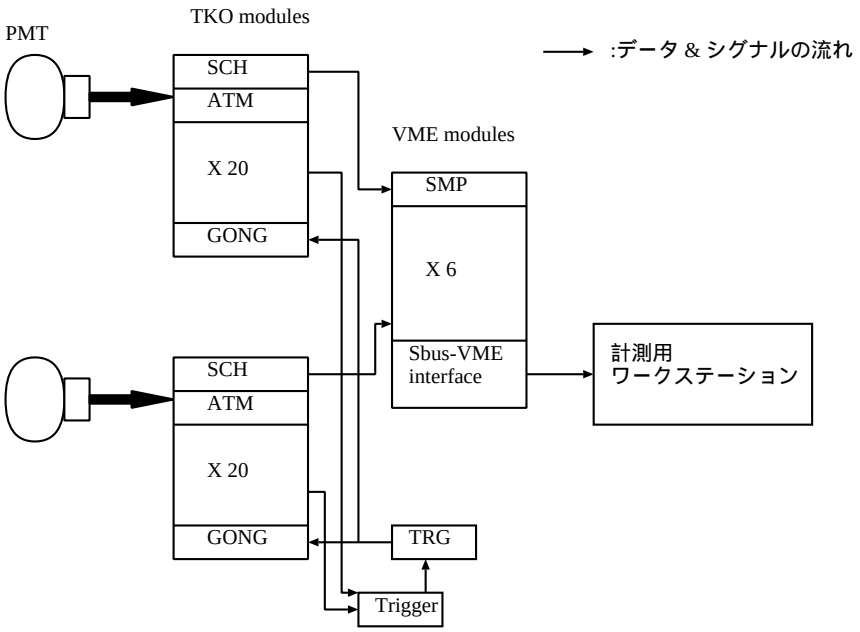

図 3.9: スーパーカミオカンデ用エレクトロニクスのブロックダイアグラム

幅器、ディスクリミネーター、ADC[6] 、TDC[7]、メモリーを持っている。ATM のブロックダイアグラムを図 3.10に示す。

図 3.10: ATM モジュールのブロックダイアグラム

PMT からのシグナルの入力はカードエッヂコネクター (図 3.11) というコネクターを使う。また、図 3.7から判るように、シグナルのグランドと共通に PMT のグランドを取るため、この電源のグランドもこのコネクターから取る。

ATM に入ってきたシグナルは、電流分配器によって 4 つに分配される。

そのうちの 1 つは、内部のアンプを使って 100 倍に増幅される。ディスクリミネーターによるシグナルの敷居値は、この 100 倍に増幅された後の信号に対するものである。シグナルがディスクリミネーターの敷居値を越えた場合、HITSUM と呼ばれる幅 200nsec 、波高 20mV の矩形波が作られ、その重ね合わせがフロントパネルに出力され、データ収得のトリガーを作る部分に送られる。

別の 2 つは TAC[8]/QAC[9] におくられ、トリガーがあれば ADC に送られ、デジタル情報に変換される。その後、SCH[10] → SMP[11] をへてオンラインコンピューターに送られる。

[6]Analog to Digital Converter の略
[7]Time to Digital Converter の略
[8]Time to Analog Converter : 時間情報を電圧値に変換する IC
[9]charge(Q) to Analog Converter : 電荷情報を電圧値に変換する IC
[10]Super Contorl Header : TKO のシステムコントロラーでデータ転送を制御する
[11]Super Memory Partner : VME 規格のバッファーメモリー

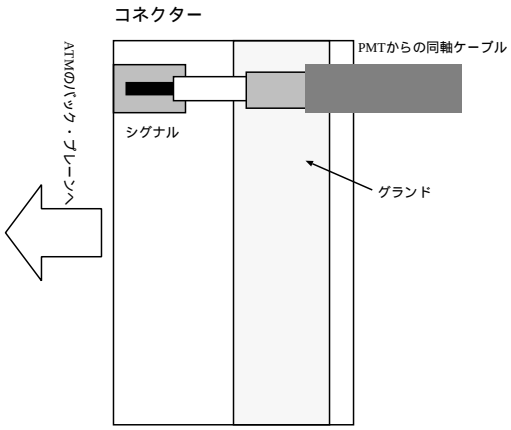

図 3.11: ATM モジュール用カードエッヂコネクター

3.5 データ収集システム

スーパーカミオカンデでは、そのタンクの上に 5 つの小屋 (ハット) が設置される。(図 3.12)。これら 5 つのハットの内、外側に位置する 4 つのハットには計測用エレクトロニク

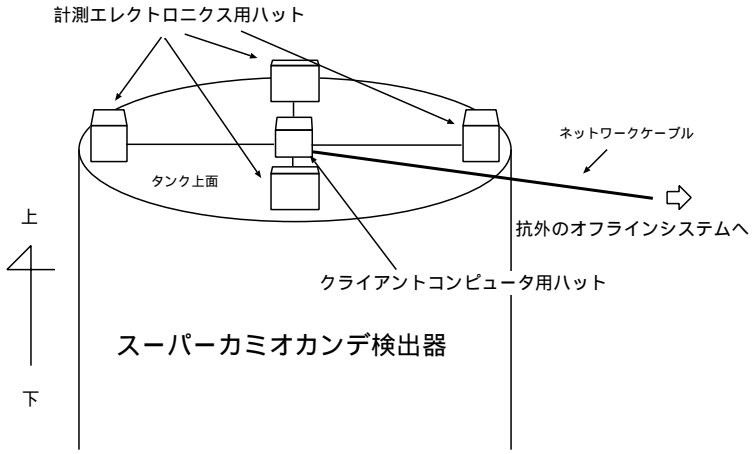

図 3.12: スーパーカミオカンデにおけるエレキハット

ス及び計測用コンピュータ (SUN 製 SPARCclassic)、高電圧電源システムが置かれる。これらは 1 つのハットにつきそれぞれ、１２クレート (約 3000 チャンネル相当)、２台、１２クレート (約 3000 チャンネル相当) は置かれる。

４つのハットでそれぞれで集められたデータはネットワークを介して、中央のハットに転送される。これらのデータは、このハットに置かれるクライアントコンピュータ (SUN 製 SPARCstation10) が受け取り、データ毎に、反応した PMT の番号及びその時間情報、電

荷情報を整理し記録する。整理されたデータはネットワークを通じて鉱山の外に置かれるオフライン用のコンピュータ (SUN 製 SPARCstation10 × 10 + 富士通製 VPX210/10S) に送られ解析される。

第 4 章

シミュレーション

この章では、スーパーカミオカンデ検出器の低エネルギー電子事象に対する性能をシミュレーションに依って評価してやり、高電圧電源システムに必要とされる性能をもとめる。

4.1 シミュレーションを用いた低エネルギー電子事象のノイズに対する影響の評価の意義

カミオカンデやスーパーカミオカンデの様な型の水チェレンコフ型検出器を用いた実験のでは、事象のエネルギーを決めるには、本来ならば、PMT が放出した光電子の総数を使う。実際、高エネルギーな事象 (核子崩壊事象や μ 粒子に依る事象) の場合は光電子の総数を使う。しかし、低エネルギーの事象の場合、エネルギーの決定に光電子を放出した PMT の数 (N_{hit}) で行なう。この場合、エネルギーの分解能は、簡単には、$1/\sqrt{N_{hit}}$ に比例する。

スーパー神岡実験では事象のトリガー条件として PMT からの信号を 100 倍した後に閾値を設けている。理想的なノイズのない状態ではこの閾値は必要なく、光電子を放出した全ての PMT の情報を使うことができる。しかし、実際にはノイズは存在するため、閾値を設定し、ノイズを落さなければならない。そのため、図 3.8の分布に見られる、出力パルス高の低い PMT の情報は捨てられ、この閾値を越えた PMT の数が N_{hit} となる。当然、この閾値が小さいほど、N_{hit} は大きくなり、エネルギー分解能も良くなる。 そのため、各チャンネルの信号に対する閾値が重要になってくる。

この閾値を下げるためには、PMT からの信号のノイズ成分を下げる必要がある。ノイズ源としては、読み出しの電子回路、PMT の暗電流、高電圧電源等が考えられるが、今回の実験では特に高電圧電源が大きなノイズ源になり得る。これは、高電圧出力と PMT を繋ぐケーブルが、図 3.7 の様な形状をしており、グランドを信号のグラウンドと共通に取るため、グランドループになり易く、環境ノイズの影響を受け易くなるためである。

そのため、高電圧電源からのノイズをどの程度まで抑えねばならないか、つまり各チャンネルの閾値を何処に設定すべきかを、低エネルギー事象のシミュレーションを行なって、評価する。

4.2 物理的要請

スーパー神岡実験は、主目的の一つである太陽ニュートリノの MSW 効果によるニュートリノ振動を検証するため、事象のトリガー閾値を 5 MeV に設定して行なう (図 2.6)。

この閾値で実験を行なう時に最も重要な問題は、スーパーカミオカンデ検出器内 (主に水中) に含まれる ^{222}Rn の崩壊によって生じる ^{214}Bi の β 崩壊からのバックグラウンドである。

この ^{214}Bi の β 崩壊には主に 8 通りの崩壊系列がある (表 4.1)。これらの崩壊系列の中

Branching-ratio(%)	β 崩壊の end point energy(MeV)	γ energy(MeV)
18	1.53	1.12 0.61
18	1.5	1.76
4	1.88	1.38
4	1.88	0.77 0.61
5.5	1.06	2.2
3	1.14	1.52 0.6
1.3	1.14	2.12
18	3.26	

表 4.1: ^{214}Bi の β 崩壊の主な崩壊系列

で問題になるのは、end point energy が 3.26 MeV の崩壊からの β 線の染み込みである。この染み込みは、正に検出器の低エネルギーの電子に対するエネルギー分解能に依るものである。そのため、実験上十分な S/N 比が得られるまで、各チャンネルに対する光量の閾値を下げなければならない。

4.3 エネルギー分解能

先ず、5 MeV/c、10 MeV/c、15 MeV/c の運動量の電子を有感領域内 (内水槽の壁から 2 m 内側、表 3.2) に 10,000 事象ずつ発生させた (付録 A)。次にこれらの事象に対して、各チャンネルに対する光量の閾値 (P_{thre}) を変化させて、閾値を越える光量を得た PMT の数 (N_{hit}) の分布を取った (図 4.1)。得られた値を用いて、N_{hit} - エネルギーの関係は図 4.2のようになり、どの閾値に関しても 1 対 1 の線形性が保たれている。以降、エネルギーから N_{hit} への変換はこの関係を使う。

また、各 P_{thre} に対するエネルギー・スケールの変化は図 4.3のようになる。エネルギー

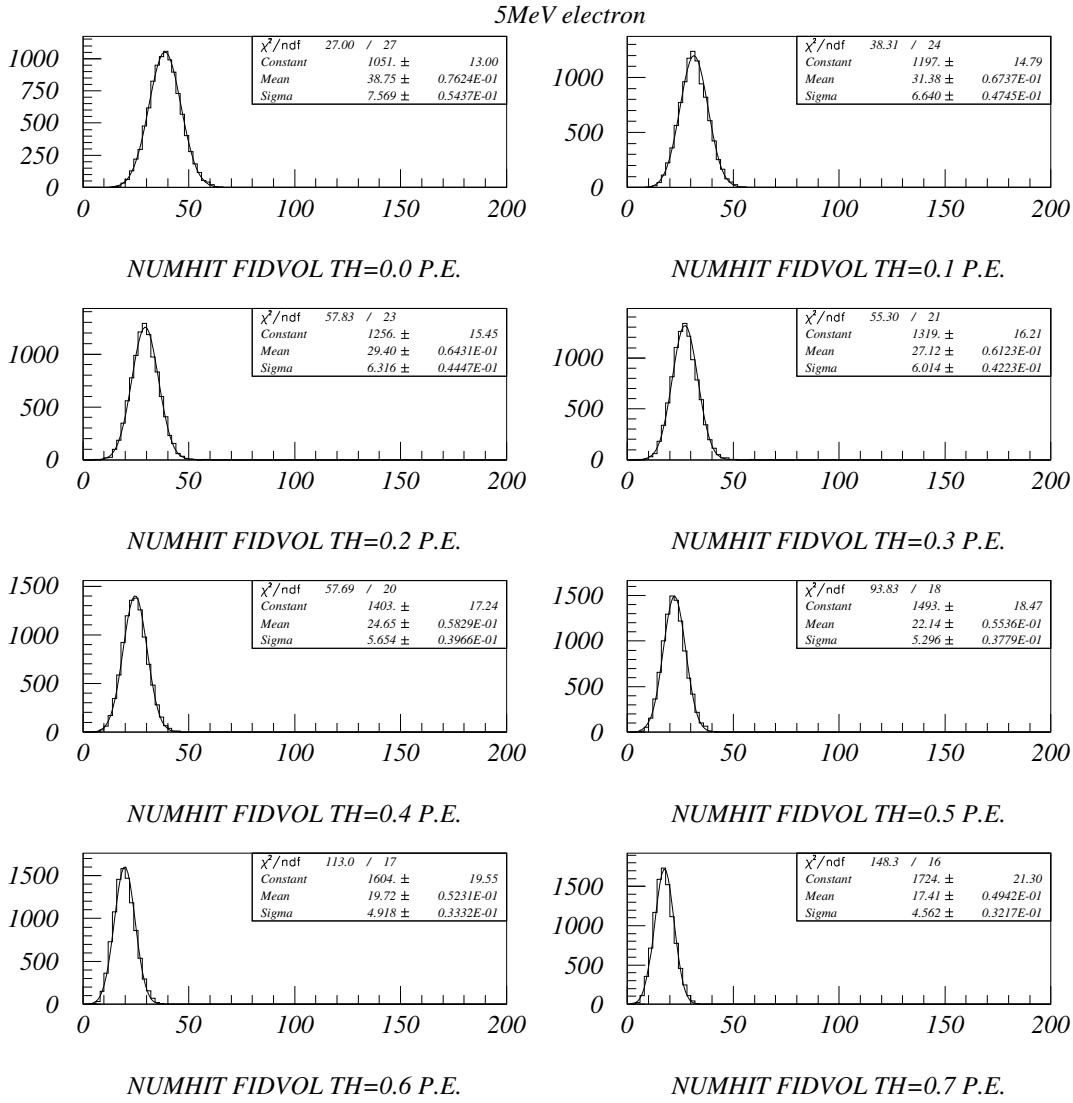

図 4.1: $P_e = 5MeV/c$ で発生させた電子の N_{hit} 分布 ： フィットを行なった関数はガウス型である。$P_e = 10MeV/c,\ 15MeV/c$ に対しても同様に行なった。

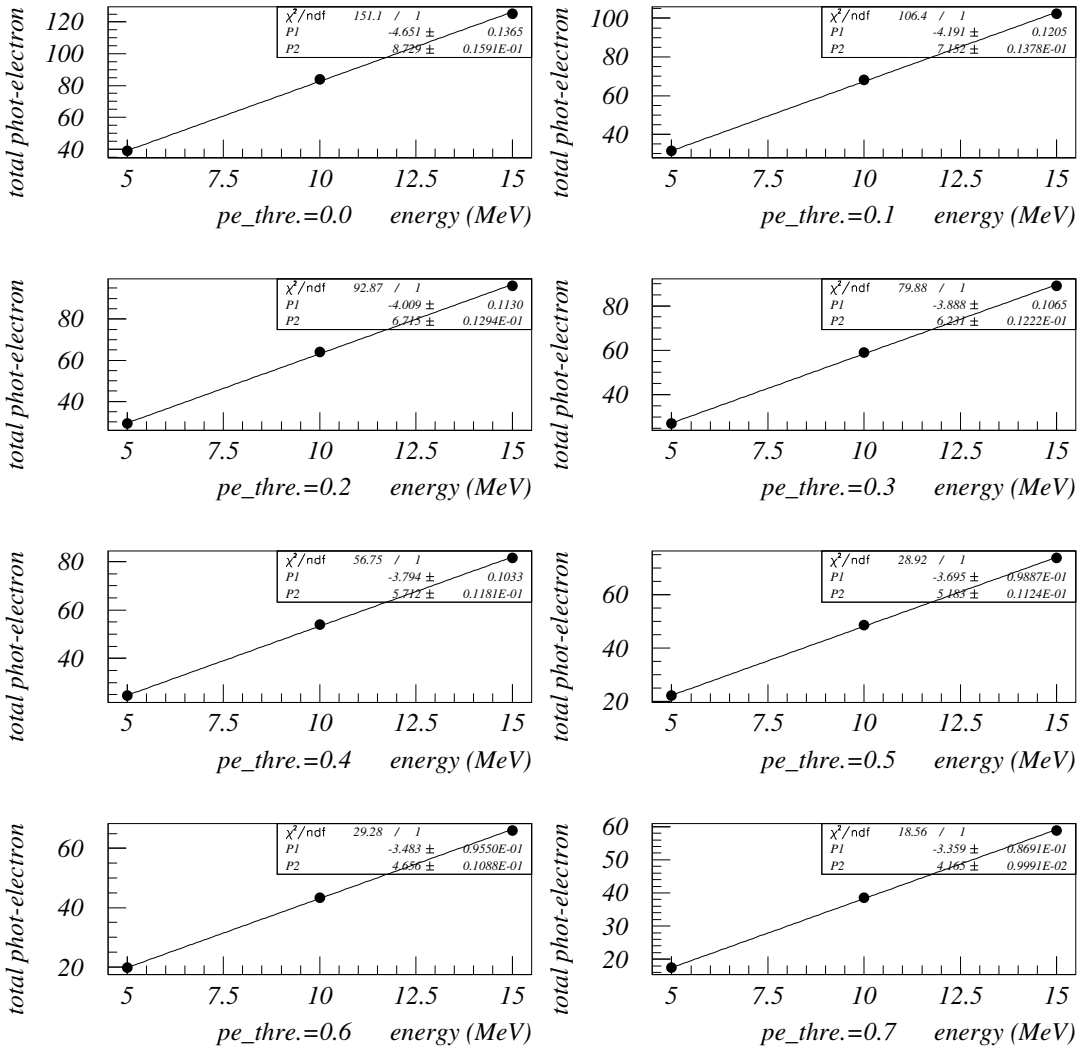

図 4.2: N_{hit} - エネルギーの線形性

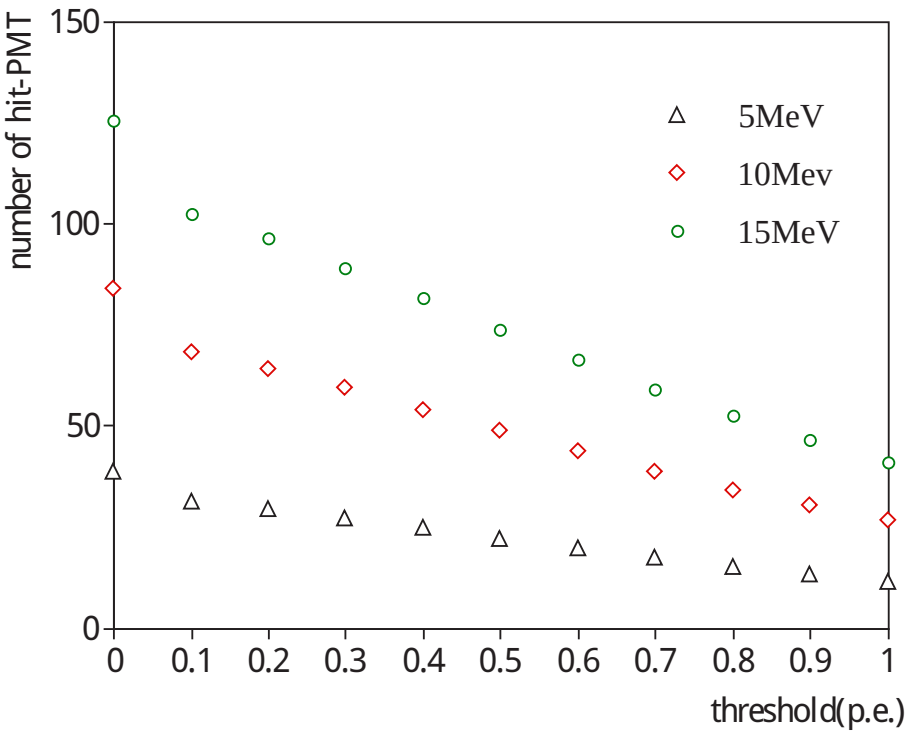

図 4.3: エネルギースケールの変化

分解能を、

$$\sigma_{energy} = \frac{\sigma}{E} \tag{4.1}$$

σ : エネルギーの分布をガウス型関数でフィットした時の幅

E : エネルギー

(4.2)

と定義した時、エネルギーと N_{hit} は比例関係にあるから、図 4.1の値をそのまま使えば良く、分解能の分布は図 4.4の様になる。この図から明らかに、P_{thre} を高くすればエネルギー

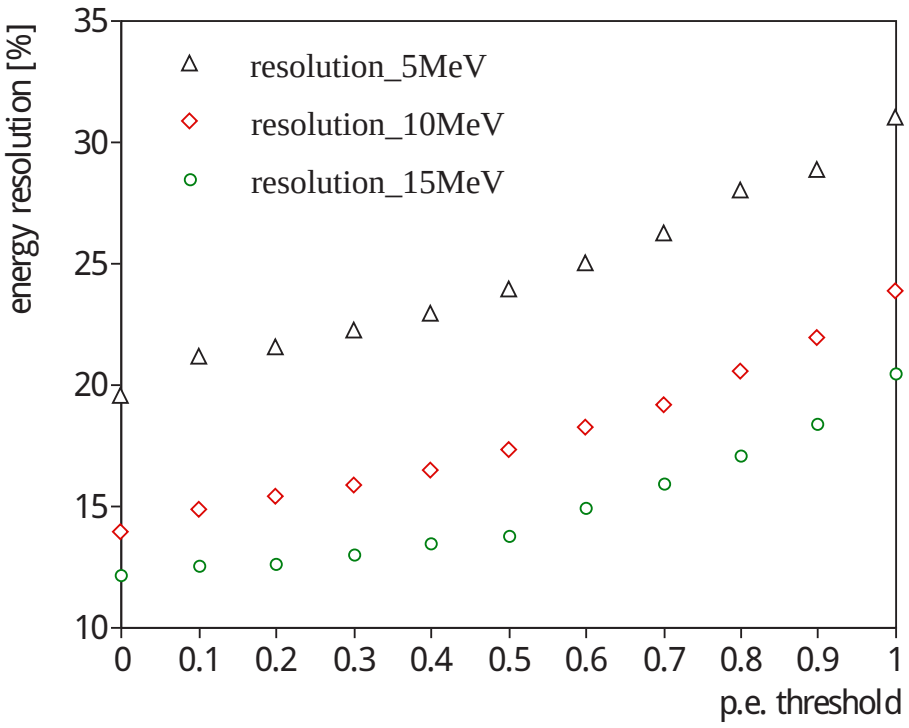

図 4.4: エネルギー分解能の変化

の分解能は悪くなる。その結果、$P_{thre} \simeq 0.8 p.e.$ 程度になれば、スーパーカミオカンデ検出器のエネルギー分解能は、現行のカミオカンデ検出器と同程度 (表 3.2) になり、PMT の密度を 2 倍にすることに依る効果は消されてしまう。

4.4 バックグラウンドの評価

節 4.2で述べたように、スーパー神岡実験で問題になるのは ^{214}Bi には 8 通りの崩壊系列の中の、end point energy が 3.26 MeV の β 崩壊からの β 線の染み込みである。そのため、この崩壊からの β 線のみを用いてバックグラウンドの評価をおこなう。

4.4.1 スーパー神岡実験における ^{214}Bi 事象

スーパー神岡実験における、^{214}Bi の事象数は、現行の神岡実験での測定から類推することが出来る。この、^{214}Bi は ^{222}Rn の崩壊に依って生じるのだが、現行の神岡実験における ^{222}Rn の濃度は 1990 年 11 月の測定で $0.03pCi/l$ である。そのため、スーパー神岡実験では5年間の観測で、有感体積内に 3.93×10^{12} 事象が予想される。ただし、スーパー神岡実験では純水装置等を強化することで、^{222}Rn の濃度を $1/100$ に減らすことを目標にしている。

4.4.2 ^{214}Bi からの β 線の染み込み

先ず、end point エネルギーが 3.26 MeV の β 崩壊からの β 線を 4.0×10^5 事象発生させた(図 4.5)しかし、この事象数では、分岐比の影響や ^{222}Rn の濃度の削減の効果を考えて

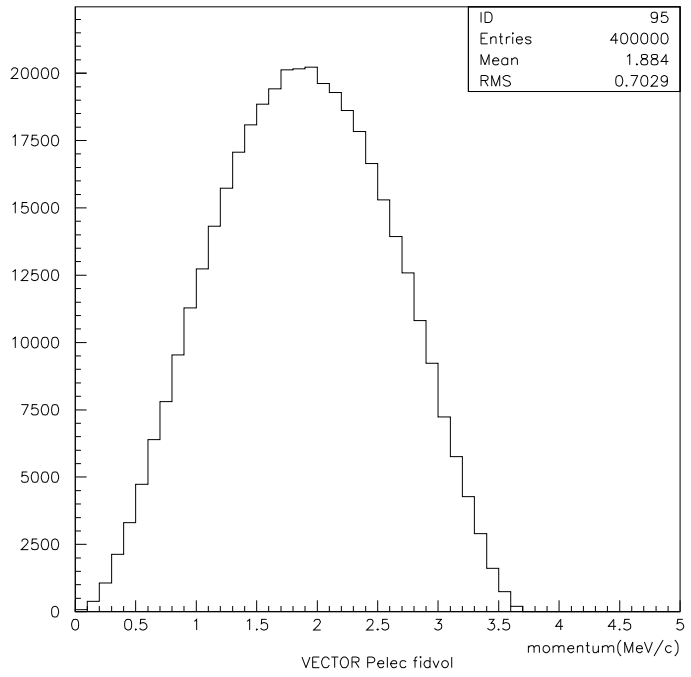

図 4.5: end point energy $= 3.26$ MeV の β 崩壊の運動量分布

も、実際の事象数に比べて $\sim 10^4$ 小さく、5 MeV 以上の領域(スーパー神岡実験の領域)への染み込みを十分には見積もれない。そのため、以下の手順で染み込みを見積もった。

1. ^{214}Bi のβ 崩壊の運動量分布を 0.1 MeV/c 毎にもとめる。

2. $2.8MeV \sim 3.8MeV$ の範囲で 0.1 MeV/c 毎に 10^5 事象ずつ、β 線の事象を発生させる。

3. 2 の結果に対して、0.0 p.e. $\sim$ 1.0 p.e. の範囲で P_{thre} を変えてエネルギー分布を調べる。

4. 1、3 の結果を掛け、それに ^{214}Bi の崩壊量 (全崩壊量 $\times$ end point エネルギー $= 3.26$ MeV の崩壊の分岐比) をかける。

ただし、4 での ^{214}Bi の崩壊量の計算には、太陽方向に対するカット[1]の効果も含めてある。その結果、PMT の各閾値に対して、エネルギーの染み込みは図 4.6の様になった。

4.4.3 S/N 比

スーパー神岡実験の 5 年間の観測で予想される、^8B ニュートリノの数は $N_\nu \simeq 2.6 \times 10^5$ である [14]。これに対して、今回 1.0×10^5 事象発生させた。このデータに対して、PMT の閾値を変えてエネルギー分布を調べ (図 4.7)、先に求めた^{214}Bi からのバックグラウンドと比較して S/N 比を求める。

実際のスーパー神岡実験では、エネルギーに対するカットだけでなく、太陽方向に対するカット等がある。さらに、^{214}Bi 以外のバックグラウンド (岩盤からの γ 線や、μ 粒子による原子核破壊) の効果も考えなければならない。しかし、5 MeV 近辺のバックグラウンドは ^{214}Bi がほとんど全てといって良いので、今回は ^{214}Bi 以外の事象は無視した。又ここでは、N_{hit} を用いての解析だけであるから、太陽方向に対するカット以外は、^8B ニュートリノと^{214}Bi からのバックグラウンドの両方に同じ効果があると考えられる。そのため、これらの効果は、S/N 比を考える場合無視出来る。また、太陽方向に対するカットは、吉本氏の修論 [14] から、太陽ニュートリノについては 60 % の事象が残り[2]、^{214}Bi の事象については 10 % が残るとした。

これらの結果を使って、スーパー神岡実験における太陽ニュートリノと ^{214}Bi からのバックグラウンドの S/N 比を求めた。0.5 MeV 幅毎の微分値を図 4.8、各エネルギー閾値に対する積分値は図 4.9 に示す。

4.4.4 良度指数 (figure of merit)

MSW 効果の検証のためには、図 2.6に示したように、太陽ニュートリノのエネルギー分布を見てやる必要がある (節 2.2.4)。そのため、太陽ニュートリノのエネルギー分布のエラーは、図 2.6の (a)、(b) の違いが分かる程度に小さくなければならない。

前節の図 4.8を見る限り、太陽ニュートリノ事象と Rn バックグラウンドの S/N 比は、非常に悪く、太陽ニュートリノのエネルギー分布の違いを見るのは不可能のようにみえる。

[1]太陽からのニュートリノに依る散乱電子は、太陽の方向を覚えているので、太陽方向に対するカット (太陽方向を $cos\theta = 1$ として、$cos\theta > 0.8$ を選び出す) を行なうことで、太陽からのニュートリノに依る事象を見わける。そのため、方向がランダムなバックグラウンドは 10% に減る。

[2]悪くても。

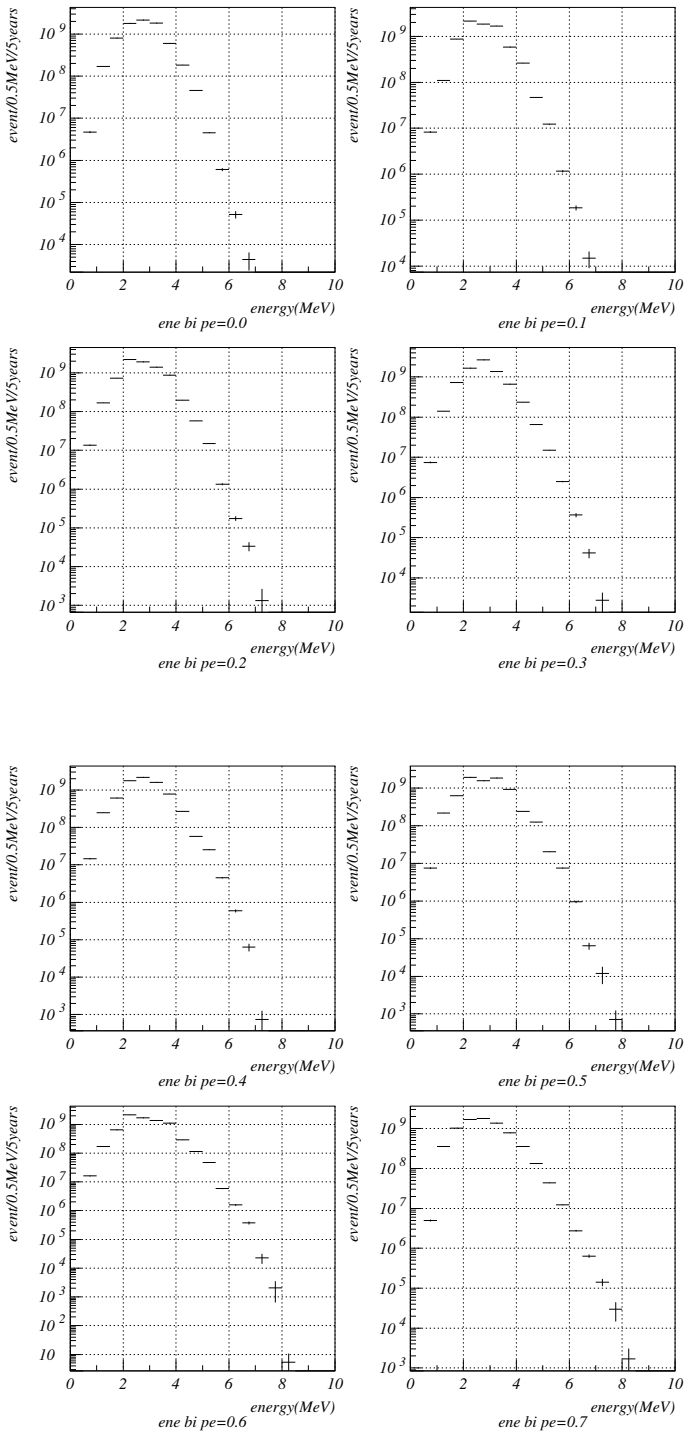

図 4.6: PMT の各閾値に対する ^{214}Bi のエネルギーの染み込みの分布 : 統計量は現行カミオカンデの Rn 濃度($0.03\mathrm{pCi/l}$)で 5 年間の測定で $3.93\times10^{12}\times0.18$(分岐比)$\times0.1$(太陽方向にカットの効果) $=7.08\times10^{10}$

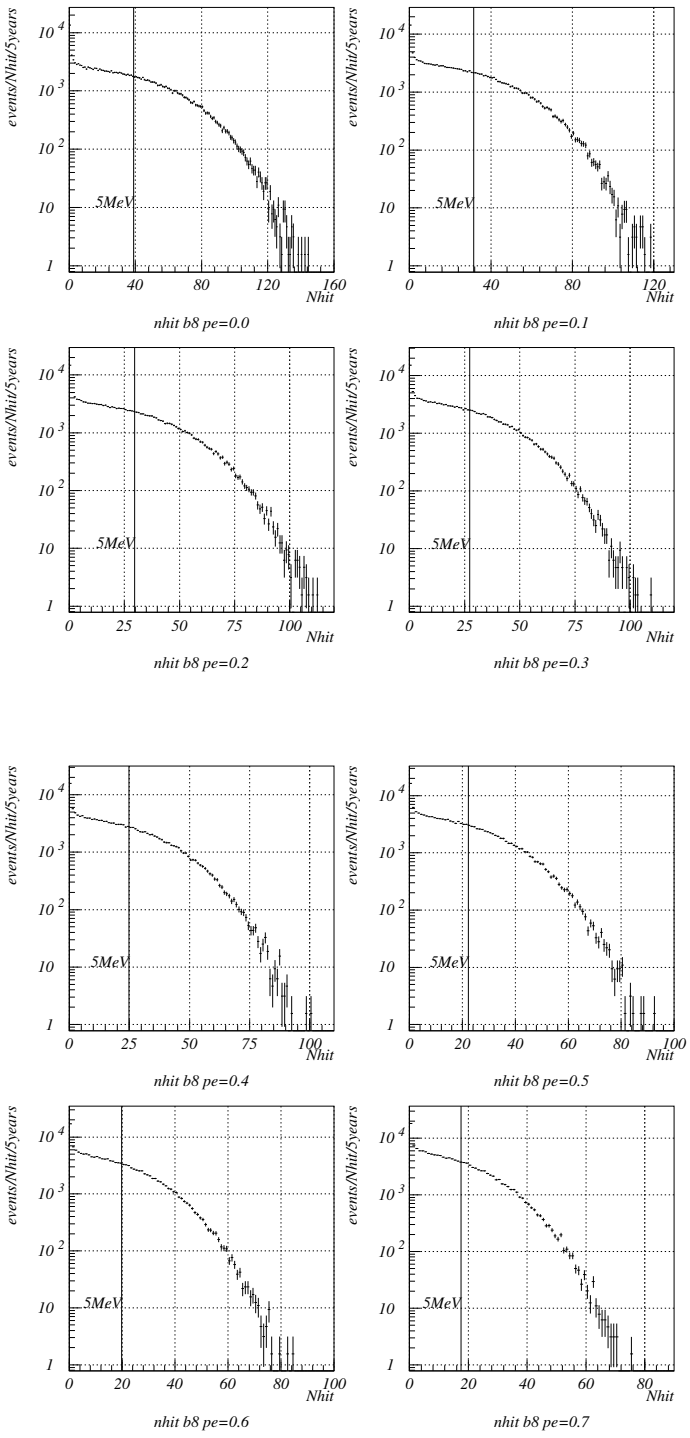

図 4.7: PMT の各閾値に対する太陽ニュートリノの N_{hit} の分布：統計量は現行カミオカンデの結果 ($0.46 \times \mathrm{SSM}$) から 5 年間にスーパーカミオカンデで予想される値 $2.6 \times 10^5 \times 0.6$(太陽方向にカットの効果) $= 1.56 \times 10^5$

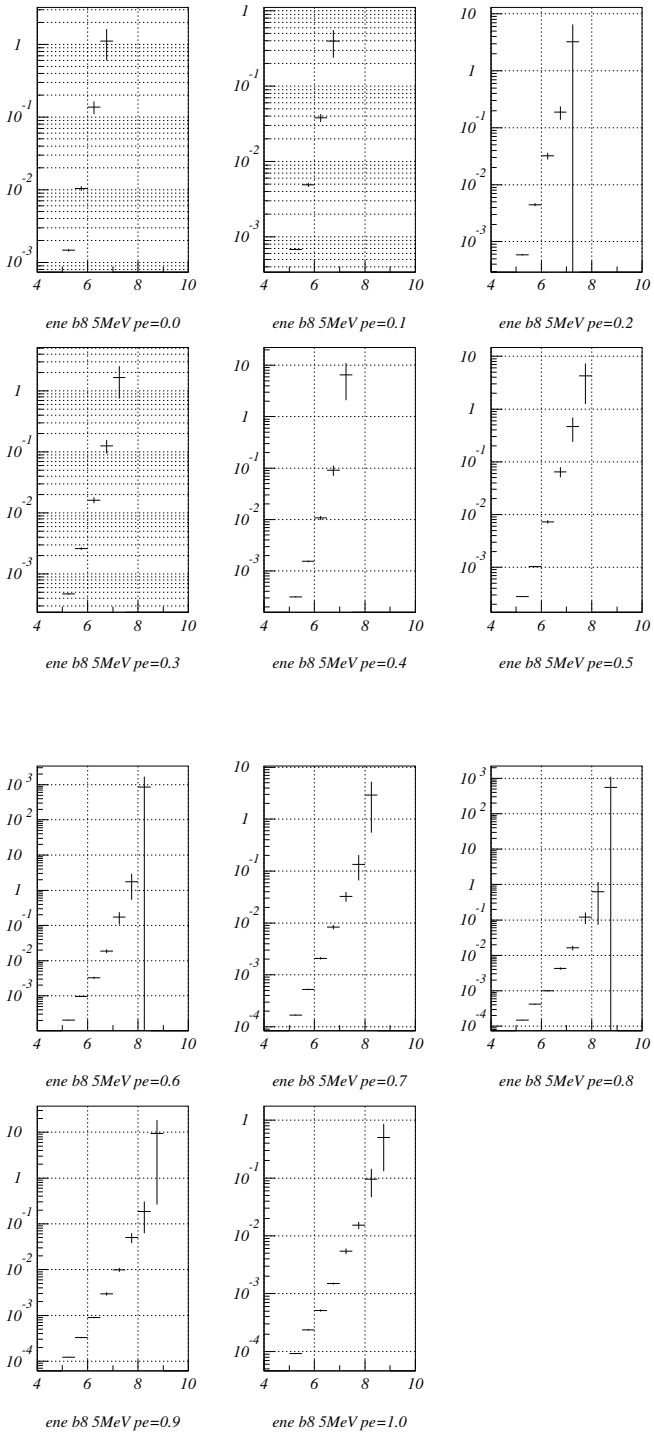

図 4.8: スーパー神岡実験における太陽ニュートリノと Rn のバックグラウンド事象の S/N 1： 現行のカミオカンデの Rn 濃度 (0.03pCi/l) で 5 年間測定を行なった場合の、 5 MeV 以上の領域について、幅 0.5 MeV 毎の S/N 比。

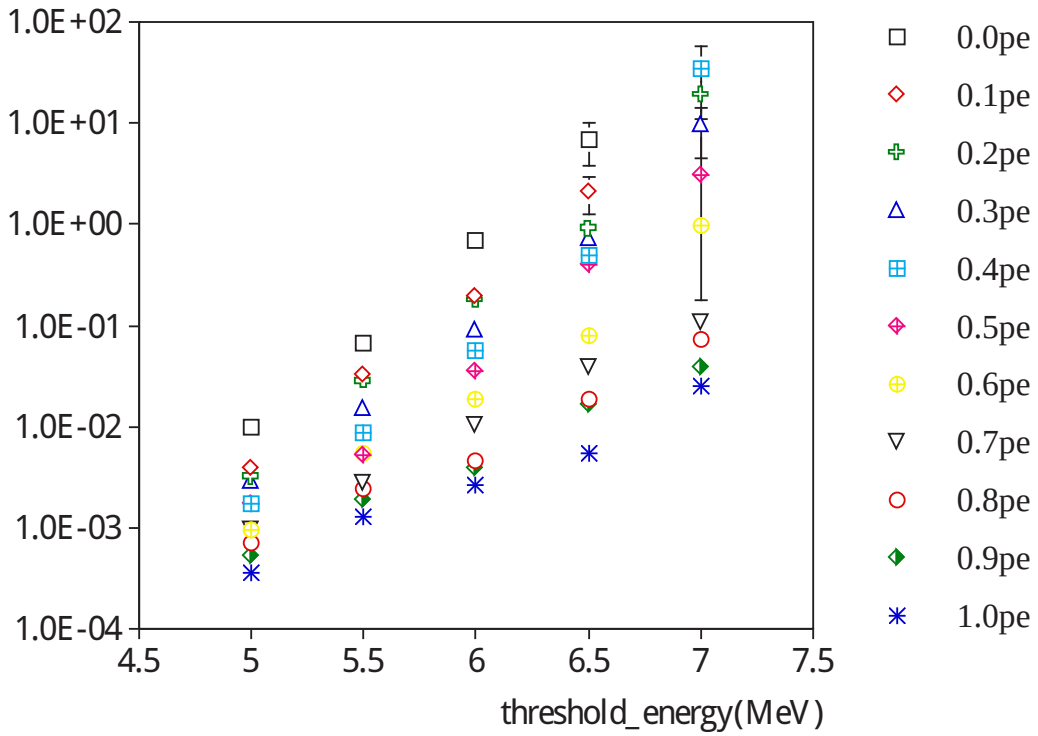

図 4.9: スーパー神岡実験における太陽ニュートリノと Rn のバックグラウンド事象の S/N 2 : 現行のカミオカンデの Rn 濃度 (0.03pCi/l) で 5 年間測定を行なった場合の、 E_{thre} が 5 MeV 以上の領域について、スーパー神岡実験の各エネルギー閾値での積分値の S/N 比

しかし、節 2.2.3で説明したように、スーパーカミオカンデ検出器はニュートリノによる反跳電子の方向から、ニュートリノの方向を調べることが出来るため、太陽方向以外からきた事象を用いて見積もることができる。スーパー神岡実験における、太陽ニュートリノ事象からのバックグラウンドを差し引く手順は次のとおりである。

1. 低エネルギー電子事象に対して、太陽方向の事象を選び出す。(図 4.10中での S + N2 。この図では太陽方向からの事象を $cos\theta$ =1 として、$cos\theta \geq 0.8$ とした)
2. 図中の N1 の事象数から、バックグラウンドの量を求める。
3. 求めた N1 から N2 のバックグラウンドの量を計算する (N1′)
4. 太陽ニュートリノの事象数を求める。(S + N2 - N1′)

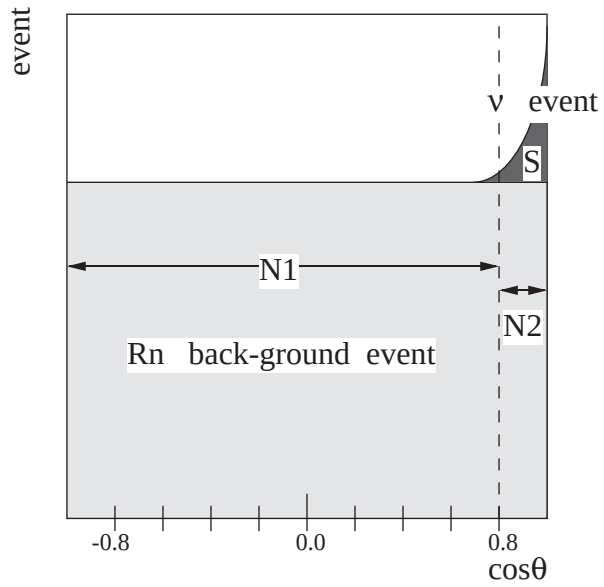

図 4.10: スーパーカミオカンデにおける太陽ニュートリノ事象の算出方法：スーパーカミオカンデにおける低エネルギー電子事象の太陽方向分布の摸式図

そのため、選び出した太陽ニュートリノの事象数のエラーは、$\sqrt{S+N2}$となる。

選び出した太陽ニュートリノの事象数とエラーの比($\frac{S+N2-N1'}{\sqrt{S+N2}}$)を調べることでスーパーカミオカンデ検出器のエネルギー分布に対する検証能力を知ることが出来る。このエラーで観測された太陽ニュートリノの事象数を割ったものを良度指数(figure of merit)と呼ぶ。つまり、良度指数は統計誤差の $1\ \sigma$ に相当する。

今回、発生させた太陽ニュートリノ及び ^{214}Bi の β 崩壊からの 電子は 5 年分相当であるが、図 2.6 と比較するために、 3 年分相当に焼き直して、良度指数を求めた。

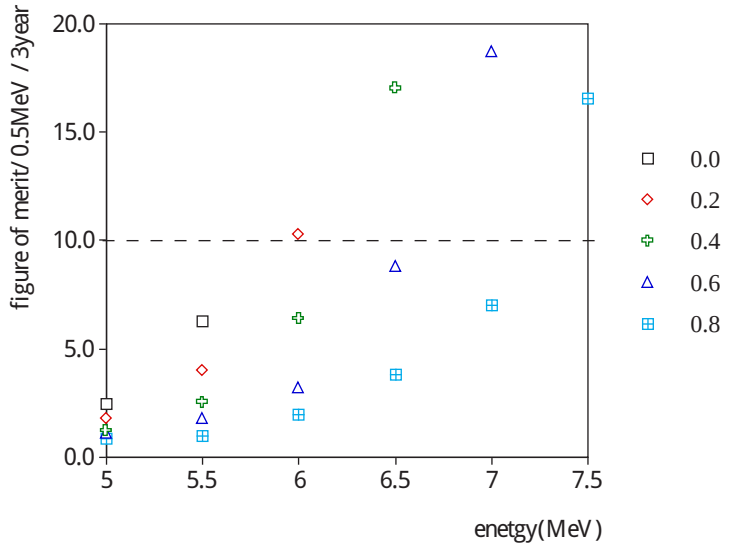

図 4.11: スーパー神岡実験における太陽ニュートリノ事象の良度指数 1 :現行神岡実験の Rn 濃度(0.03pCi/l)で 3 年間の観測に対する値

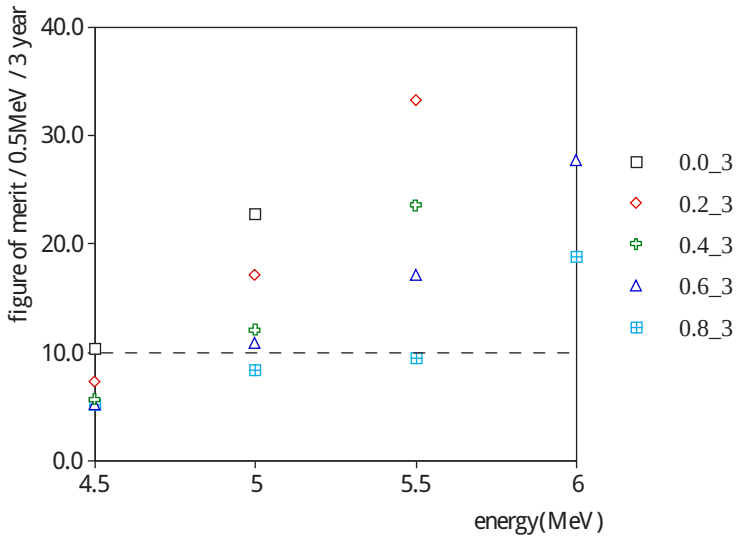

図 4.12: スーパー神岡実験における太陽ニュートリノ事象の良度指数 2 ：現行神岡実験の Rn 濃度の 1/100 の濃度 (0.0003pCi/l) で 3 年間の測定に対する値

4.4.5　評価

図 2.6から、図中の (a)、(b) が識別可能な良度指数を考える。

この図中のエラーバーはバックグラウンドを考えない太陽ニュートリノ信号の統計から来たものである。また、^{214}Bi からの寄与は $\sim$ 7 MeV 程度までであり、それよりエネルギーの高い領域では ^{214}Bi からの影響は無視出来る。5 MeV 近辺のデータが統計的に意味があるデータポイントに成り得るという目安として、エラーの大きさを図上の 11 MeV $\sim$ 13 MeV の領域のエラー程度に抑えたい。そこで、良度指数にたいし、10 以上を要求した。

スーパー神岡実験において、現行神岡実験での Rn 濃度で実験を行なう場合、図 4.11から良度指数 ≥ 10 を満たす領域は $P_{thre} \leq 0.2$ でエネルギーの閾値は 6 MeV 、$P_{thre} \leq 0.4$ で 6.5 MeV である。

また、Rn 濃度が現行の 1/100 に減らすことが出来た場合図 4.12から、$P_{thre} \leq 0.4$ で 5 MeV まで、エネルギー閾値を下げることが可能になる。

4.5　シミュレーションでの結論

低エネルギー電子事象のシミュレーションを用いて、スーパー神岡実験の 5 年間の測定 (ただし、良度指数に関しては 3 年分相当) に対して、ノイズが物理事象の観測に与える影響を評価した。

その結果、スーパー神岡実験の 3 年間の観測において、現行神岡実験での Rn 濃度で観測を行なった場合、ノイズが 0.4 p.e. 以下の場合 6.5 MeV まで、0.2p.e. 以下の場合 6 MeV まで統計的に有意なデータがとれることがわかった。また、Rn 濃度を現行神岡実験の 1/100 まで減らせられた場合、ノイズが 0.6 p.e. 以下で 5 MeV まで統計的に有意なデータがとれることがわかった。

観測を行なうエネルギーの閾値は出来るだけ小さい方が良いのだが、図 2.6から、エネルギー閾値が 6.5 MeV なら十分、図中の (a)、(b) を区別出来る。これらの結果から、Rn 濃度が現行神岡実験と同じ状態で観測が行なわれる最悪の場合を想定し、高電圧電源システムからのノイズレベルは 0.4 p.e.[3] 以下を要求する。

[3] 100 倍に増幅後で 120 mV に相当

第 5 章

高電圧電源に要求される性能

5.1　要求される性能

公示された仕様書に記載された、「高電圧電源に要求される性能」の主な部分は以下の通りである。

出力高電圧設定範囲 正極性、$100 \sim 2500$V（各チャンネル）
ただし、1 ボード内での出力電圧差は 900 V 以上

出力電圧設定精度 $\pm 0.2\%$（各チャンネル）

高電圧モニター 各チャンネルに 1 個、モニター精度 $\pm 0.2\%$ 以下

安定度 $\pm 1V$/週 以下

保護機能 最低 1 ボード毎に過電流時高圧出力停止及び出力短絡アーク放電に対する保護、停電復帰時の高圧再出力防止、過電流保護回路を持つ

電流モニター 最低各ボード 1 個、モニター精度 $\pm 5\%$ 以下

高電圧電源分配器制御モジュール VME 規格のモジュールで計算機とメインフレームとのインターフェースである。計５０台以上のメインフレームのリモート制御、リモート電圧モニター、リモート電流モニター等が可能なこと。個々のメインフレームはデージーチェーンのバスラインで接続されること

リップル $5mV\ peak\ to\ peak$ 以下（各チャンネル）

一般事項 高電圧電源及び高電圧分配器からなるシステムは、リップルノイズに関する性能を満足する他、東大宇宙線研究所の検査システムにおいて、電磁放射ノイズを含めた総合検査に合格せねばならない。この検査システムは、スーパー神岡実験の実験装置を模擬したものである。この検査システムは、スーパー神岡実験で用いる光電子増倍管とフロントエンド回路から構成されている

以降に、これらについての理由を述べていく。

5.2 出力高電圧設定範囲

この項目は、PMT の性能によって決められている。

スーパー神岡実験で使用する PMT は正極性であり、その最大動作電圧は 2500V である。また、節 3.3の図 3.6に示したように、1×10^7 のゲインでの印加電圧の分布は $1550V \sim 2450V$ である。しかし、鉱山内における検出器の建設時に PMT をその印加電圧毎に分類する空間的、時間的余裕がない。そのため、これらを印加電圧の分布を満たすように、出力高電圧設定範囲は決められた。

5.3 出力電圧設定精度及び高電圧モニター

出力電圧設定精度は主に、核子崩壊に代表される、中エネルギー事象からの要請である。例えば、

$$P^+ \ \rightarrow \ K^+ \, \bar{\nu_\mu} \ \rightarrow \ \mu^+ \, \nu_\mu \, \bar{\nu_\mu} \tag{5.1}$$

の様な事象の場合(図 5.1)μ 粒子のエネルギーは単一エネルギーの $\simeq 236MeV/C \Rightarrow N_{hit} \sim O(100)$ となる。この事象の場合、大気ニュートリノからのバックグラウンドを除くため、エネルギーが 6.3 MeV の プロンプト γ 線を共なう単一エネルギーの μ 事象[1]を見る。236 MeV/C の μ 粒子は約 400 p.e. のチェレンコフ光を放出するのでその統計的ふらつきから、エネルギー決定精度は物理的に 5% 程度に制限される。そのため、PMT のゲインのばらつきからの影響は最低限その程度には押えなけれはならない。この場合、PMT 一本あたりの相対的なゲインのばらつきは $\sim 10\%$ 以内が要請される[2]。

PMT の印加電圧とゲインの関係は式 3.3であるので、ゲインは印加電圧の約 10 乗程度である。そのため、ゲインのふらつきに対する高電圧電源の寄与を 1/10 程度に押えたい場合、印加電圧の設定精度及び電圧モニター精度は $\sim 0.1\%$ 程度となる。

5.4 安定度

高電圧出力の安定性も節 5.3の議論とほぼ同様の要請から来ている。

スーパー神岡実験では 1 カ月に 1 度程度、レーザーや 10 MeV 程度の電子線型加速器を用いて較正のためのデータをとる。そのため、高電圧出力の安定性では 1 カ月に 0.2% 以内[3]が要求される。そのため、典型的な高電圧出力値 2000V に対してふらつきが、週に $\pm 0.05\% = \pm 1V$ 以内であることが要求される。

[1] $^{116}\mathrm{O} \rightarrow \bar{\nu}\mathrm{K}^+(\mathrm{K}^+ \rightarrow \mu^+\nu \ + {}^{15}\mathrm{N}^*({}^{15}\mathrm{N}^* \rightarrow {}^{15}\mathrm{N} + \gamma))$

[2] ばらつきがガウス型であると仮定するとエネルギーの決定精度は $10/\sqrt{N_{hit}} = 1\%$

[3] 高電圧出力の設定精度と同じ数字

図 5.1: スーパーカミオカンデ検出器における $P^+ \rightarrow K^+ \nu \rightarrow \mu^+ \nu \nu$ 崩壊からの μ 事象
）

5.5　保護機能及び電流モニター

スーパーカミオカンデでは、節 3.2に説明したように PMT は水中に設置されている。そのために、PMT の内部にタンク内の水が侵入する可能性がある。もし、ブリーダー抵抗に浸水した場合、高電圧出力は短絡された状態になり、過電流が流れて高電圧電源の分配器が故障または燃える可能性がある。また、電源が故障せずに過電流が流れ続けた場合、PMT のブリーダー抵抗ネットワーク間で放電が起こり、PMT 自身が発光することがある (光球)。この現象は、現行の神岡実験でも見られ、誤ったトリガーをかけたり、観測事象を汚したりする。

これらの現象をいち早く発見して防がなければならない。そのため、ブリーダー抵抗の変化を電流計を使いモニターしてやる必要がある。さらに、過電流が流れた場合には安全に高電圧出力を停止する保護回路が必要になる。

5.6　高電圧電源分配器制御モジュール

スーパー神岡実験では 11,200 本もの PMT を使って実験を行なう。節 3.3で説明したように個々の PMT の印加電圧は様々である。また、節 5.3、5.5 で述べたように出力電圧値及び出力電流値をモニターする必要もある。これらの作業を人力のみで行なうのは非常に困難であり、更に過電流保護等の安全対策は、無人の状態で働かなければならない。また、高電圧電源システムの配置は、節 3.5で述べたように、４ヶ所に分散されている。そのため、計算機及びネットワークによるコントロールは不可欠である。また、VME システムを使用する理由は、スーパー神岡実験では CAMAC システムを導入する予定はなく、VME システムを使用するため、それに規格を合わせるためである。

5.7　リップル

第 4章で見てきたように、スーパー神岡実験では PMT の出力のノイズ成分の大きさに依って、観測する物理事象が影響を受ける。

その、ノイズ源の一つに印加する高電圧に含まれるリップル電圧がある。これは、一言でいうと、高電圧の電圧値のふらつきである。一般的に加速器に依るビーム実験で用いられる高電圧電源のリップル電圧は ~ 100 mV (スーパー神岡実験では 100 倍に増幅する前の 1 p.e. が 3 mV) である。

スーパー神岡実験用 PMT の内部抵抗は図 3.5に示した通りであり、スーパー神岡実験用エレクトロニクスの入力インピーダンスは 50Ω である。もしも、リップル電圧が 100 mV の電源を用いると、回路上は図 3.5の抵抗 R16 と 50Ω の比 (約 1/4000) 程度、つまり 0.025 mV しか 3 mV のシグナルに乗らない様に見える。しかし、この PMT につながるケーブルは図 3.7の様になっており、高電圧とシグナルが独立した同軸ケーブルになっていない。そのため、リップル電圧がグラウンドを通じて、何分の 1 かになって、シグナルにのる可能性がある。

また、リップル成分は元の電源を共通にする複数のチャンネル[4]に同期してのる。そのため、スーパー神岡実験のようなセルフトリガーの実験では、低エネルギー事象のエネルギー分解能に影響するだけでなく、トリガーレートが上がり、観測自体が行なえなくなる可能性がある。そのため、現行の神岡実験の経験より、リップル電圧は peak to peak で 5 mV 以下とした。

5.8 総合テスト

このテストは、実際のスーパー神岡実験での、電源からのノイズの影響をスーパー神岡実験で用いる、PMT 及び ATM 等のエレクトロニクスからなるセットアップをもちいる。このテストを行なう理由は、第 4章で見てきたように、ノイズに依ってスーパー神岡実験で観測出来る物理に影響があるからである。

第 4章でも述べたように、スーパー神岡実験では PMT と計測用エレクトロニクス、高電圧電源を繋ぐケーブルとして、図 3.7に示したような一体型のケーブルを使う。このケーブルは、シグナルと高電圧電源のグラウンドが共通であり、ケーブルとエレクトロニクス、高電圧電源を接続するさい、高電圧用の単心のケーブルが、電波放射等に対するシールドがなされないまま、1 m 程度放置される。

そのため、このテストは高電圧電源のみならず、本実験に模擬した PMT、エレクトロニクス、高電圧電源の接続方法こみの総合テストである。

このテストの、目安は閾値を 0.4p.e(PMT 出力に対して 100 倍に増幅後で 120 mV) にセットしてノイズが乗らず計測が可能なことである。

[4]CAEN 社のシステムだと 240 チャンネル

第 6 章

テスト

6.1 CAEN 製高電圧電源システム

今回行なったテストについて述べる前に、簡単にスーパー神岡実験用高電圧電源システムになる予定の CAEN 社の電源システム A933K+ SY527 + V288 について簡単に説明する。

A933K

A933K は高電圧電源の核となるべき 24 チャンネル分の出力を持つ高電圧分配器である。１枚の A933K はの内部には、高電圧電源とそれを 24 チャンネルに分ける分配器が入っている。

A933K の親の高電圧電源は $0V \sim 2550V$ の出力範囲を持ち、分配器は親の高電圧電源の出力に対して 900V 引いた値まで出力することが出来る。(ただし、最大出力値は 2500V)

また、A933K の親電源には電流モニターと出力トリップの保護回路がついている。電流の出力範囲は $\sim 13.00mA$ であり、この範囲内で出力電流の最大値を設定することが出来き、その値を越えた場合、出力が切られる。

A933K の仕様は図 6.1に示す。

SY527

SY527 は高電圧電源をコントロールするメインフレームである。１台の SY527 には、１０枚の A933K ボードを差し込むことができる。

SY527 を使った高電圧電源のコントロールは、

- 前面のテンキー
- RS232C 端子に接続された VT 端末
- CAENet (節 6.3.1を参照)

を使って出来る。

図 6.1: A933K の仕様

V288

V288 は CAENet と VME とのインターフェースモジュールである。これについては、節 6.3.1で説明する。

6.2 テスト項目

１９９４年１２月に、C.A.E.N 社がスーパー神岡用高電圧電源システムの試作品として SY527 + A933K + V288 で構成されたシステムを２４チャンネル分持ってきた。同社が最終的に、スーパー神岡用高電圧電源システムとして大量生産を行なう前に、仕様書に書かれた“総合テスト”を含めて、KEK[1]、ICRR[2] 及び阪大において以下のようなテストを行なった。

- 計算機によるコントロール及びモニターのテスト。
- リップルの測定
- 高電圧出力の設定精度及びモニター精度のテストと電流モニターの精度のテスト。
- 過電流に対するテスト
- 長期安定性のテスト
- スーパー神岡用 PMT & ATM モジュール (ADC TDC モジュール) を繋いでのノイズテスト。(総合テスト)

以降に、これらの各テスト項目について詳しく述べていく。

6.3 計算機によるコントロール及びモニターのテスト

6.3.1 VME - CAENet コントローラー (V288)

節 5.6 でも説明したように、11,200 という多チャンネルの高電圧電源を取り扱う場合、コンピューター・ネットワークを使っての制御は不可欠である。CAEN 社は CAENet という独自の制御システムを持っており、今回のテストを行なった V288 というモジュールも VME 規格の CAENet コントローラーである。

CAENet の接続はレモ規格のコネクター及びケーブル (50Ω の同軸ケーブル) を使い、メインフレーム間はデージーチェーンで結ばれる (図 6.2)。

今回使った V288 モジュール自身はカタログ製品であるため、このモジュール自身の制御には問題はないと考えられるが、今回の試作品の組合せ (SY527 + A933K + V288) で

[1]茨城県つくば市にある高エネルギー物理学研究所
[2]東大宇宙線研

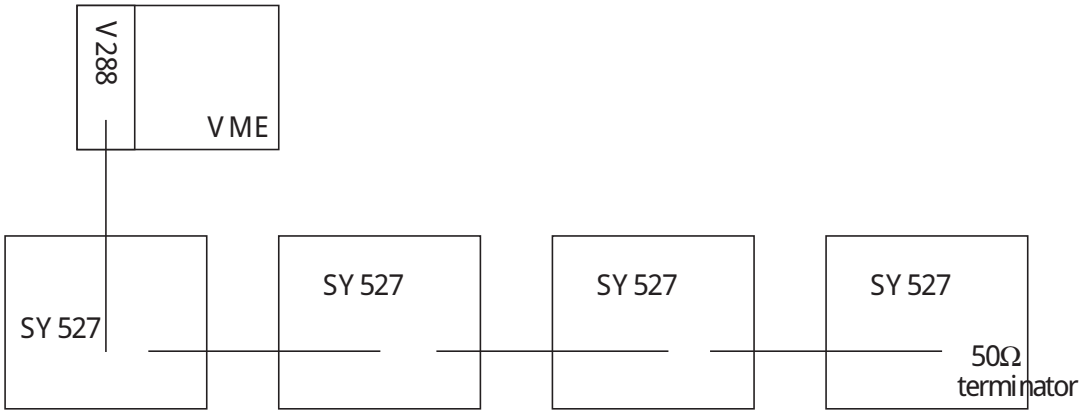

図 6.2: この絵では複数の高電圧電源システムを CAENet によって接続しているが、今回のテストではメインフレームが 1 台しかなかったのでこのような接続ではテストを行なっていない。実際の実験では、ほぼこの絵と同じ形式で制御を行なう。

の CAENet による制御は行なわれていない。そのため、このシステムでのバグ出しやスーパー神岡実験で使用するさいに注意すべき点の発見をしてやる必要がある。さらに、計算機を使った場合の 11,200 チャンネルに対する、高電圧出力の on-off や、設定値やモニター値の読みだし、高電圧値の設定に要する時間の見積りも必要である。

6.3.2 V288 による高電圧システムの制御

V288 + SY527 + A933K のシステムで計算機を使ってで行なえるべきことは以下の通りである。

1. 出力高電圧値の設定
2. 出力電圧モニター値の読み出し
3. 出力電流モニター値の読み出し
4. 高電圧出力の on-off
5. トリップ等のステイタス値[3]読みだし
6. トリップ状態の解除

これらの、チェックは図 6.3のシステムでおこなった。

高電圧出力のモニター値の読み出し等の時間の見積りは、手元にある高電圧のチャンネル数の問題から、多チャンネルを使用することが出来なかったので、図 6.3のセットアップ

[3]ステイタス値にはつぎのようなものがある:trip,over voltage,under voltage,voltage-out going up,voltage-out going down

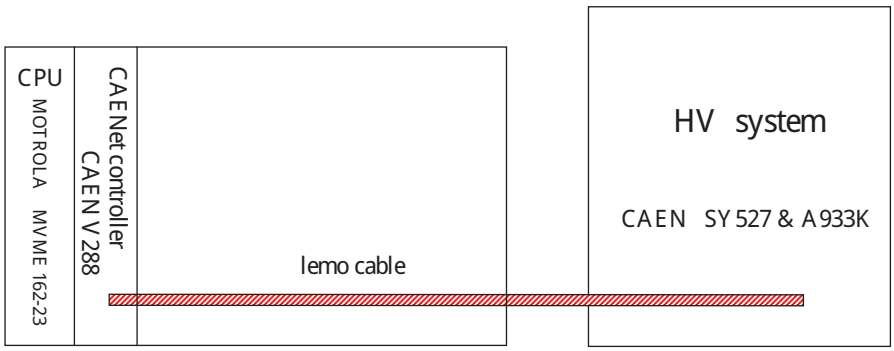

図 6.3: CAENet コントロールのテストのセットアップ:このセットアップで使用した VME システムの CPU ボードはモトローラー社 MVME162-23 で、内蔵している CPU はモトローラーの 68040 である。OS はマイクロウェア・システムズ社の OS-9 version 2.4 を使い、C コンパイラはマイクロウェア・システムズ社 68000 C コンパイラを使用した。この VME システムはスーパー神岡実験でも高電圧のモニターシステムとして使用する予定である。

で同一モジュール (24 チャンネル) を繰り返し読み、11,200 チャンネルに対応する時間を見積もった。時間を見積もった項目は、6.3.1節の最後に書いた 4 項目である。

6.3.3 結果

CAENet によるコントロール

前節に示した CAENet コントロールについてのテスト項目について、$1 \sim 5$ はすべて問題なく行なえた。6 は出来なかった。正確には、『高電圧出力が過電流によりトリップし、トリップステイタスが立っている状態で、高電圧出力の on をした時、トリップステイタスが立った状態のままで高電圧がされる。』という結果が得られた。この状態が本実験の際に起こると、非常に危険な状態にもなり得るため、改善が必要である。

この点については、CAEN 社でも再現され、ソフトウェアーのバグであることが判明し、改善がなされた。

6.3.4 CAENet による実際の実験場での操作時間の見積り

時間の見積りについては次の項目、

- モニター値の読みだし
- 高電圧出力、出力電流の上限値等の設定値の読みだし
- 電源の on/off
- パラメーターの設定

についておこなった。
　測定は 図 6.3のセットアップでおこなった。

CAENet のケーブル長による影響

　このテストは、節 6.3.4で行なう、時間の見積りを実際の実験における測定に焼き直す場合に、結ぶケーブルの長さに依る補正値を調べるために行なった。
　まずは、V288 と SY527 を繋ぐレモ規格ケーブルの長さによる、計測時間の依存性を測定した。測定は、モニター値の読みだしのプログラム及び設定値の読みだしのプログラムを使って、一つのケーブル長に対して $115,200(48 \times 10 \times 24 \times 10)$ チャンネル分 (48 は高電圧電源システムのメインフレームの数、10 は 1 つのメインフレームに含まれる高電圧電源ボードの数、24 は 1 ボードに含まれる出力チャンネル数、最後の 10 は測定回数) 行なった。その結果は、ケーブル長が $4\ \mathrm{m} \sim 100\ \mathrm{m}$ に対して図 6.4のようになった。この結

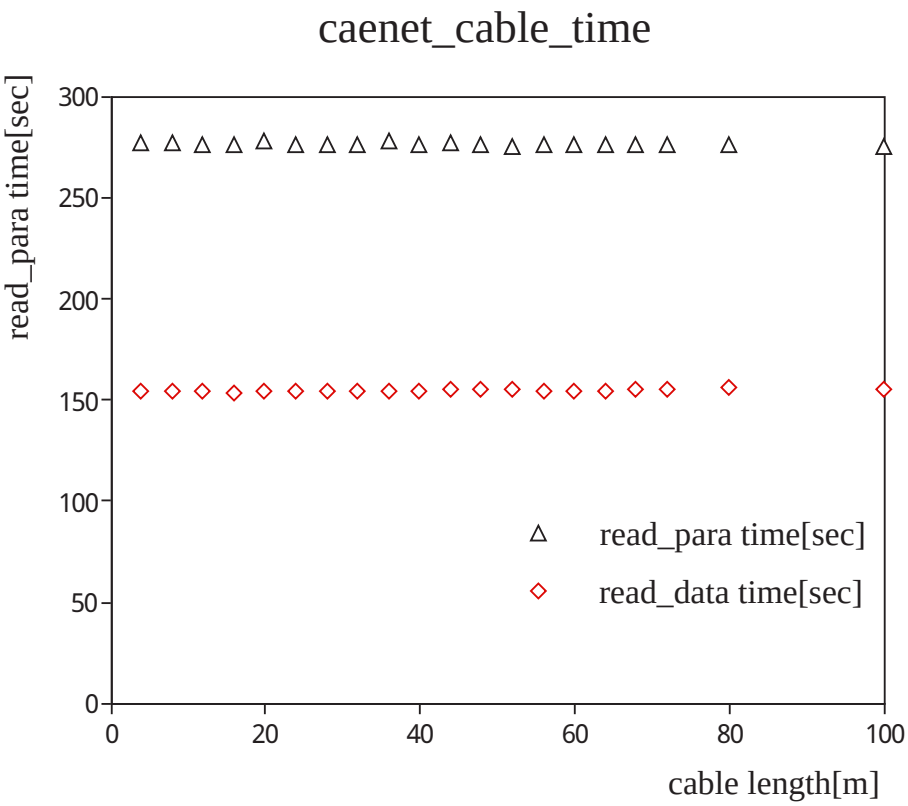

図 6.4: CAENet によるモニター値の読みだし時間のケーブル長に対する依存性 : $read_data$ はモニター値の読み出し、$read_para$ は設定値の読み出し。測定回数は $(48 \times 10 \times 24) \times 10 = 115,200$ チャンネル相当

果を見る限り、ケーブルの長さに対する依存性は見られない。また、CAENet のデータの読みだしについて、これら二つのルーチンはネットワークに対するアクセス回数が 3 倍違

う。このため、ケーブルの長さに対する依存性は、設定値の読み出しの方が顕著に現れるはずである。しかし、全くそのような結果が得られないことから、少なくとも ~ 100 m の範囲では、操作時間の見積りの際にケーブルの長さに依る補正の必要はない。

測定

測定は 4 m のケーブルを使って、$(48 \times 10 \times 24) \times 10$ チャンネル分[4]行なった。この結果の $1/10$ の時間がスーパー神岡実験での高電圧システムの各動作の時間に相当する[5]。結果は、表 6.1のようになった。

測定モード	時間 [sec]	Comment
モニター値の読みだし	154	
設定値の読みだし	277	
モニター値の読みだし + 設定値の読みだし	441	
高電圧値の設定	9452	
出力の on-off	2418 4862	on only on-off の繰り返

表 6.1: CAENet による操作時間の見積： 1 回の測定での測定チャンネル数は 115,200 チャンネル。これは、スーパー神岡でのチャンネル数の約１０倍に相当する。ただし、この測定値のプログラムへの依存性は見積もっていなく、またデータ書き出し等のディスクやネットワーク等への I/O の時間は考慮していない。そのため、この値はあくまで目安に過ぎない。

表 6.1の結果でスーパー神岡本実験の際で重要になってくるのは、停電後の復旧に関係する、高電圧出力の on/off の時間と実験中での高電圧出力の設定値及びモニター値の収集である[6]。これらの値は、単純にはそれぞれ ~ 4 分、~ 30 秒、~ 15 秒であり、実験上問題になる値ではない[7]。

6.4 リップル電圧の測定

このテストは、KEK で行なった。

[4]実際のスーパーカミオカンデ実験の１０倍のチャンネル数に相当

[5]この結果は当然ある程度のプログラム依存性がある

[6]高電圧出力値の設定値は、高電圧電源システム内のメモリー（EPROM）に記憶されるため、実験開始時に一回設定してやればよい。

[7]例えば現行の神岡実験では高電圧出力値のモニターには、約 1,000 チャンネルに対して、~ 10 分程度かかっている

6.4.1 セットアップ

リップル電圧の測定には図 6.5の様な回路を使い、図 6.6の様なセットアップで行なった。回路上の蓄電器の容量は $2,200pF$ 、オシロスコープの入力抵抗値が $1M\Omega$ なので、約 500 Hz 以上の周期の成分に関して測定が可能である。

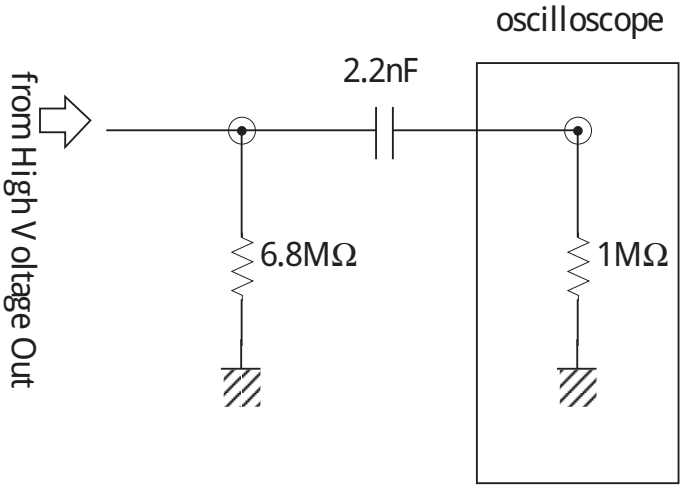

図 6.5: リップル電圧測定用回路。蓄電器の容量は $2,200pF$ 、ダミーロードの抵抗値は $6.8M\Omega$ である。

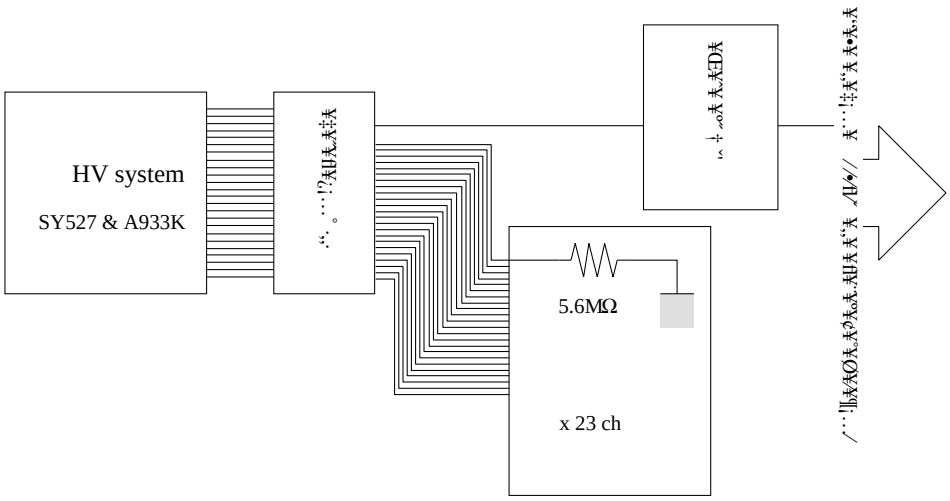

図 6.6: 図 6.5の回路を使ったリップル電圧測定のセットアップ。回路を繋いでいないチャンネルは、実際の実験条件に近付けるため $5.6M\Omega$ (PMT のブリーダー抵抗は、図 3.5から $5.68M\Omega$) の高圧用抵抗で接地している。また、オシロスコープの入力抵抗値は $1M\Omega$ 、周波数分析器の入力抵抗値は 50Ω

6.4.2 結果

リップル電圧の測定結果は図 6.7の様になった。図 6.7の左上の写真から判るように、典

図 6.7: リップル電圧の写真: 左上-全チャンネル高電圧出力 on で ch 0 を測定。設定値 2500 V。右上-全チャンネル高電圧出力 on で ch 0 を測定。設定値 1000 V。左下-全チャンネル高電圧出力 off で ch 0 を測定。右下-全チャンネル高電圧出力 on で ch 0 (下) と ch (上) を測定。

型的には 3 mV p-p[8]である。これは、仕様を十分に満たしている。また、左下の写真からこのリップルについては電源以外の寄与は小さいことがわかる。さらに、右下の図から、リップルは同一ボード内の他のチャンネルと同期している。

次に、リップル電圧の周波数特性を調べるために、同様のセットアップ (図 6.6) で周波

[8]Peak to Peak の略

数分析器つないだ。この結果は、図 6.8のようになった。

図 6.8: スペクトルアナライザーによる測定結果：右が高電圧出力 on 時で、左が off 時である

図 6.8写真からは、リップル電圧の成分のなかで $33KHz$ 付近の成分が目立つ。これは、電源 A933K のスイッチング周期に一致している。また、$33KHz$ のピークのすぐそばの $32KHz$ の成分は、右の写真から高電圧電源以外の成分 (おそらく NIM 電源からのスイッチングノイズである) と考えられる。

6.5 高電圧出力の設定精度及びモニター精度のテストと電流計の精度のテスト。

6.5.1 セットアップ

このテストには図 6.9のようなリレーモジュールを使い、図 6.10の様なセットアップでおこなった。 使用したデジタル・マルチメーター (アドバンテスト社 R6551) の分解能は $10\mu V$ で入力インピーダンスは $1G\Omega$ 、サンプリングレートは 10Hz である。また、図 6.10で使用した 1/2000 の抵抗分圧器及びそれを用いたリレーモジュールの系は、デジタル・マルチメーターを接続した状態で、設定精度 $\pm 0.05\%$ を保証する高電圧電源 (川口電器製作所 model V-703) を用いて、チャンネル毎に更正してある。

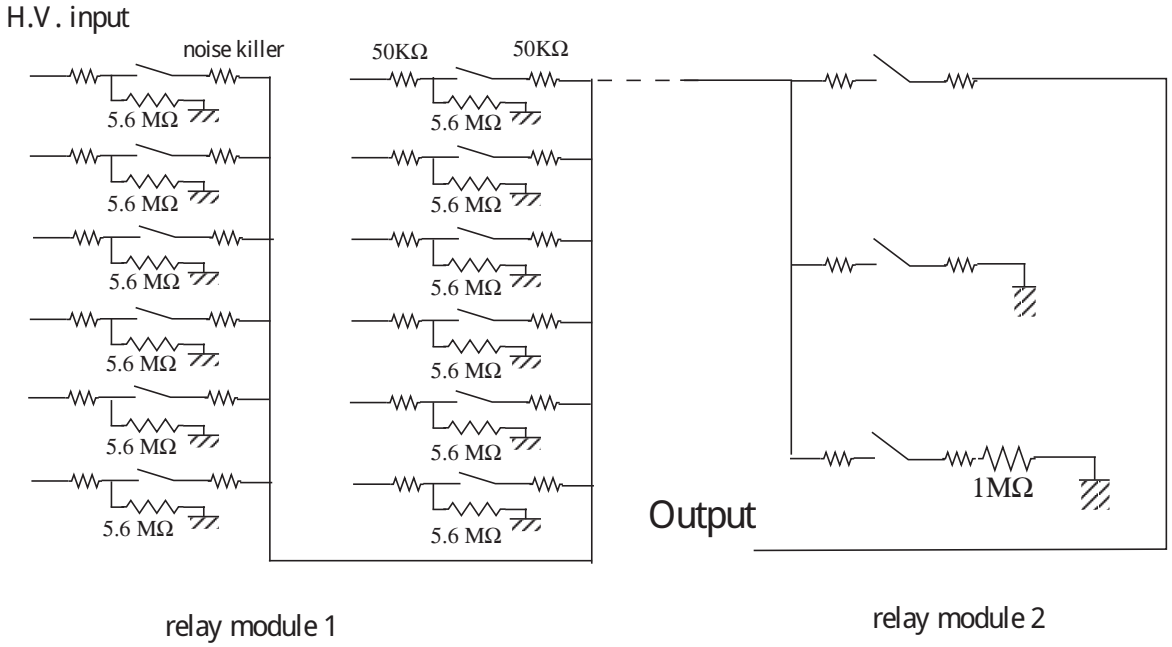

図 6.9: リレーモジュール：ここで用いられている $5.6M\Omega$ の抵抗は、$3.5KV$ の耐圧の J 規格 (精度 $\pm 5\%$) の抵抗であり、リレーは高電圧用水銀リレーで、耐圧は $3.5KV$ である。また、リレーの前後に付いている $50K\Omega$ の抵抗はノイズキラーと呼ばれる。高電圧の切替時に、電波放出によるデジタルレベル (TTL) のノイズが、ラインをアンテナにして回路上にのることがある。このノイズがリレーの制御回路に影響を与える。ノイズキラーはこれを防ぐためのものである。

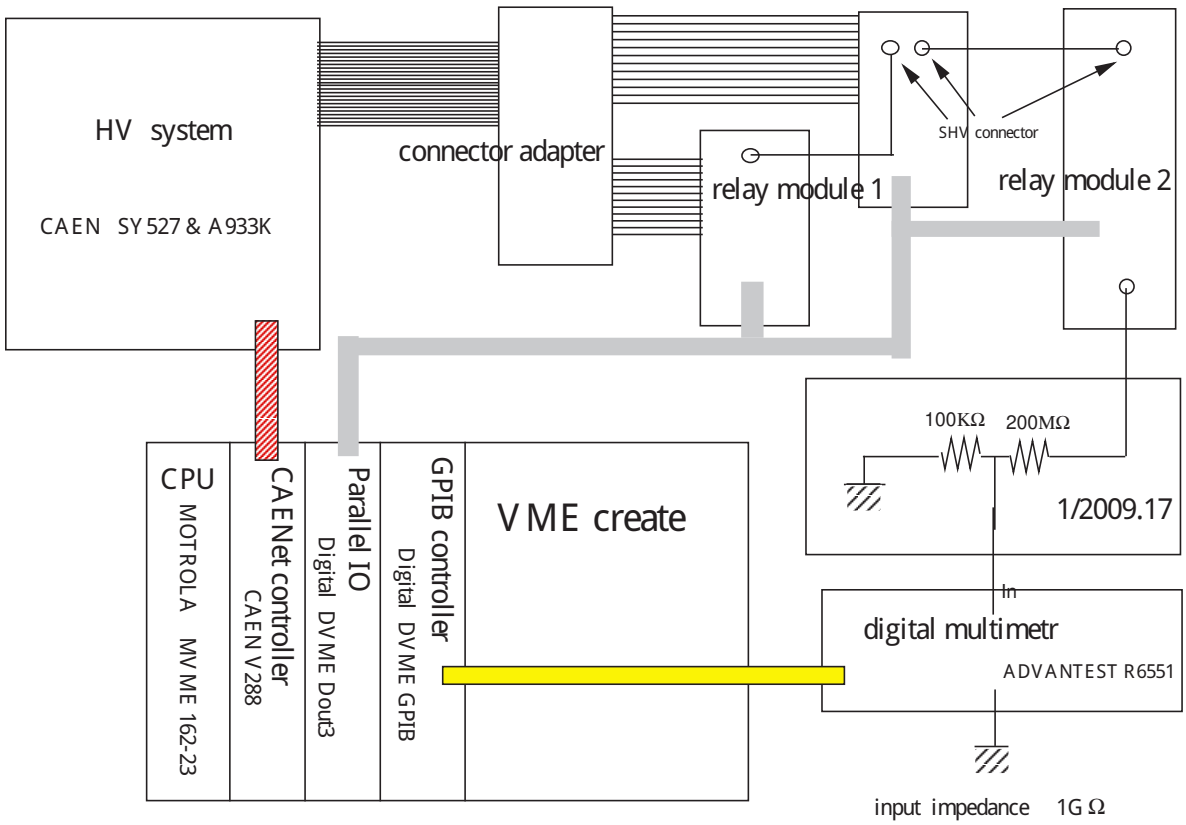

図 6.10: 精度測定テストセットアップ：ここで使用する VME システムは、節 6.3.1のシステムと同じシステムに、パラレル I/O[9]（デジタル社 DVME DOUT3）、GPIB インターフェースボード（デジタル社 DVME GPIB）を加えたシステムである。

6.5.2 高電圧出力の設定精度及びモニター精度のテスト

測定の手順は図 6.11の通りである。

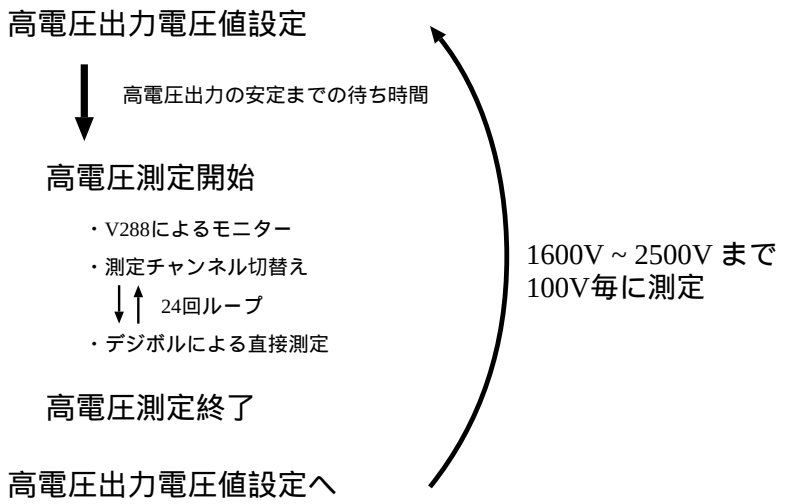

図 6.11: 高電圧出力の精度測定の手順

この手順で得られた高電圧出力の設定値、CAENet でのモニター値、デジタルメーターでの実測値を比較して電源出力の精度を求める。

精度測定の実験に入る前に、まず

- 高電圧電源出力の立ち上がり時間の測定
- リレーモジュールのリレー切替後の待ち時間の決定

を、行なった。これは、このテストのみならず実際に納入される本実験用の高電圧電源システムの精度チェックの際にも必要になる。

立ち上がり時間の測定

精度の測定に入る前に、高電圧出力が安定するまでの待ち時間を決めなければならない。そこで、各チャンネルごとにデジタルメーターを使って高電圧出力 on 時からの、出力値を測定した。(図 6.12)

その結果、全チャンネル 10 秒以内に安定な領域に達している。そのため、待ち時間は 10 秒以上ならいい。そのため、安全幅を十分にとって、10 倍の 120 sec (2 分) の待ち時間で測定を行なった。

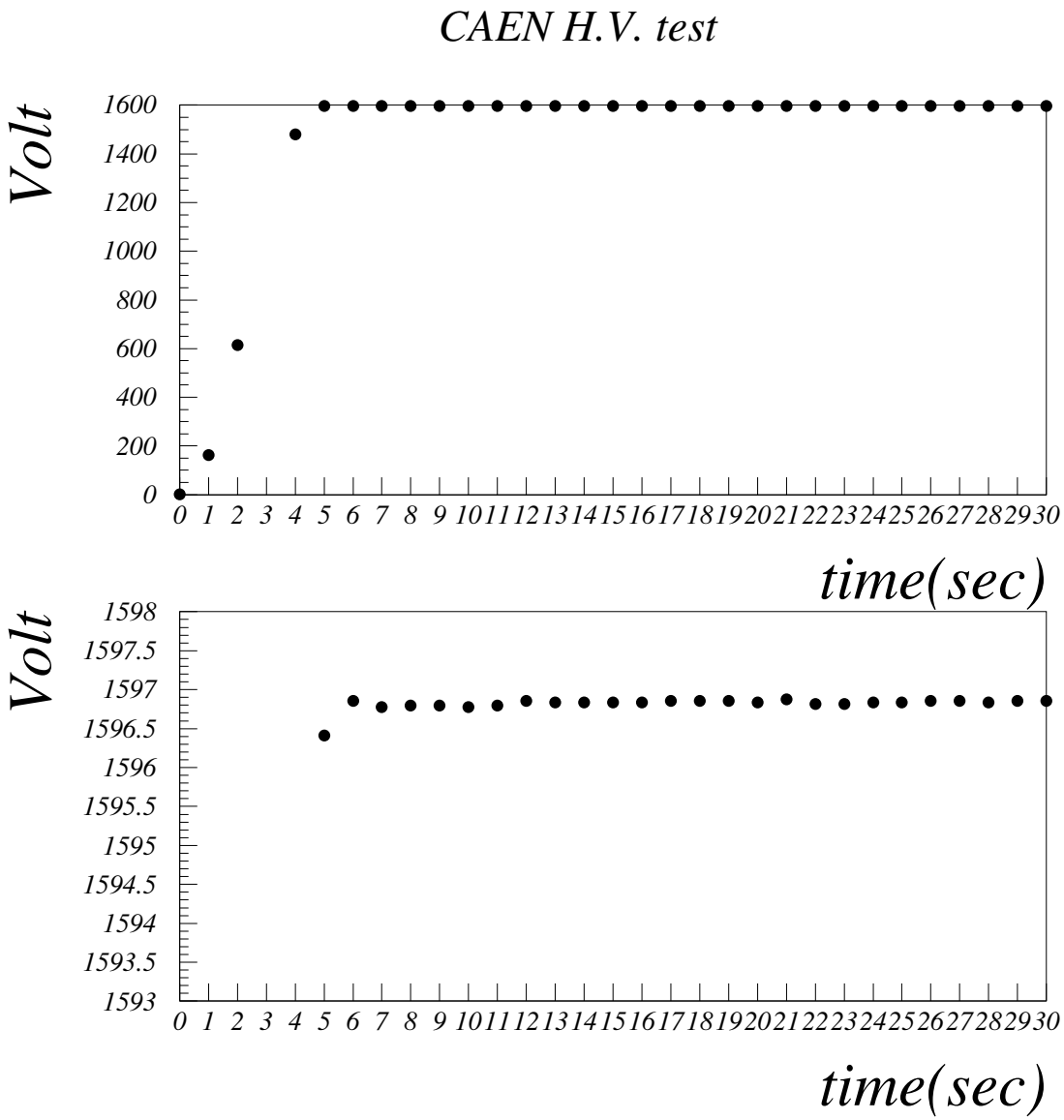

図 6.12: 立ち上がり時間の測定:横軸が高電圧出力 on 時からの経過時間、縦軸がデジタルメーターによる実測値。下のグラフは上のグラフの拡大図

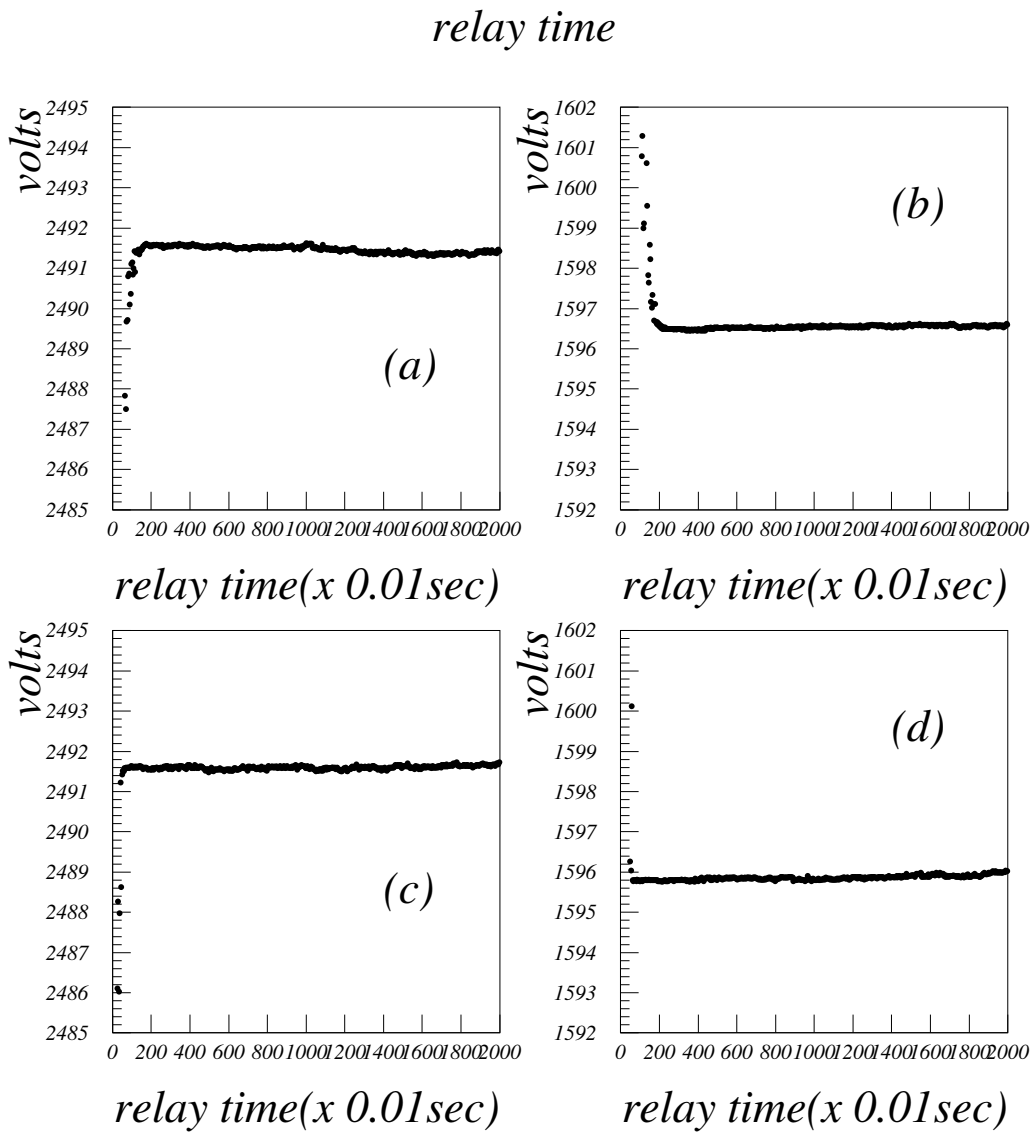

図 6.13: リレー切替後の待ち時間のグラフ : (a) は測定チャンネルが 2500 V で、前のチャンネルが 1600 V に設定。 (b) は 1600 V → 2500 V 。(c) は 2500 V → 2500 V 。(d) は 1600 V → 1600 V 。

リレー切替後の待ち時間の決定

次に、リレーで測定チャンネルを切替える際に、チャンネルを切替後どのくらい待てば良いかを決めるために、リレー切替後の待ち時間を変化させて測定した (図 6.13)。

その結果、どの精度までを要求するかによるのだが、全チャンネルの設定値を一律にして測定する場合、2 秒で十分である。したがって、今回の測定はリレー切替後の待ち時間を 2 秒にして行なった。

高電圧出力の精度

実際の測定だが、図 6.11の手順で、全チャンネルを一律の電圧に設定し、高電圧出力の立ち上がりの待ち時間を 2 分、リレーの切替え後の待ち時間を 2 秒で測定を行なった。その結果を、表 6.2、表 6.3、図 6.14に示す。

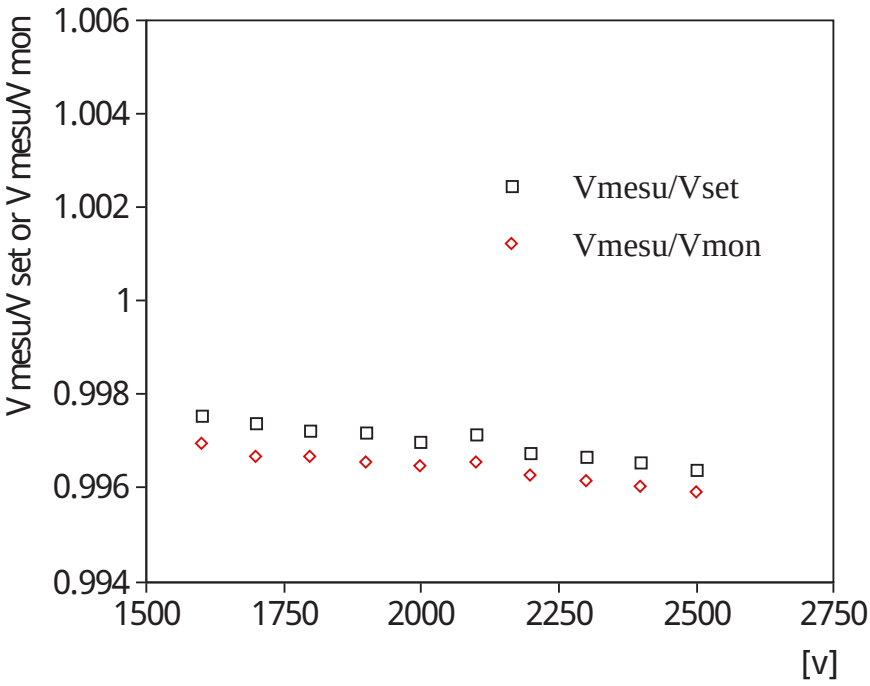

図 6.14: 精度のグラフ ： Vset は設定電圧値、Vmon はモニター電圧値、Vmesu は実測電圧値。それぞれの値の比は $\pm 0.2\%$ に入ってなければならない。

これらの結果を見ると、デジタルメーターによる測定値は高電圧出力設定値及びモニター値に対して $0.3 \sim 0.4\%$ 低い。この結果から、この電源システムの高電圧設定精度及びモニター精度は仕様の $\pm 0.2\%$ を満たしていない。しかし、この点については、CAEN 側の電圧較正か我々の電圧較正が違っているので、更に詰めなければならない。

チャンネル#	設定値 $[V]$	モニター値 $[V]$	実測値 (リレー使用) $[V]$
00	2500.00	2501.20	2490.94
01	2500.00	2501.80	2490.41
02	2500.00	2501.40	2490.04
03	2500.00	2501.40	2490.90
04	2500.00	2500.60	2489.81
05	2500.00	2500.60	2489.14
06	2500.00	2500.20	2489.27
07	2500.00	2501.00	2488.18
08	2500.00	2501.00	2488.71
09	2500.00	2500.80	2488.11
10	2500.00	2501.00	2489.83
11	2500.00	2500.20	2489.71
12	2500.00	2501.00	2488.38
13	2500.00	2500.00	2489.95
14	2500.00	2500.80	2491.04
15	2500.00	2500.60	2490.16
16	2500.00	2501.00	2491.31
17	2500.00	2500.40	2489.56
18	2500.00	2500.40	2488.32
19	2500.00	2500.60	2489.94
20	2500.00	2500.60	2489.02
21	2500.00	2500.60	2490.21
22	2500.00	2501.20	2491.00
23	2500.00	2500.60	2489.60
親電源	2550.00	2549.40	モニター電流 $11.60(\mathrm{mA})$

表 6.2: 高電圧出力精度の測定 1 : 全チャンネルの設定値を $2500\ \mathrm{V}$ にした場合。

設定値 $[V]$	モニター値 $[V]$	実測値 (リレー使用) $[V]$
1600.00	1601.00	1596.07
1700.00	1701.20	1695.52
1800.00	1801.00	1794.97
1900.00	1901.20	1894.62
2000.00	2001.00	1993.95
2100.00	2101.20	2093.38
2200.00	2201.00	2192.80
2300.00	2301.20	2292.28
2400.00	2401.20	2391.67
2500.00	2501.20	2490.94

表 6.3: 高電圧出力精度の測定 2 : ch 0 の 1600 V ∼ 2500 V での結果

6.5.3 電流計の精度のテスト

電流計の精度については、節6.5で測定したデータを用いて評価した。具体的には、CAEnet でモニターした電流値と、高電圧出力につないだロード抵抗の値とデジタルメーターで測定した電圧値から予想される電流値を比較した。ただし、予想電流値を計算するさいに、ボードの内部抵抗 (図 6.15) を考慮しなければならないので、次の計算式 (6.1) を用いた。

$$I_L = \sum_{i=0}^{23} \left(\frac{V_{outi}}{5.6M\Omega} + \frac{V_{outi}}{66.2M\Omega} \right) \tag{6.1}$$

ここで、I_L : 予想電流値、V_{outi} : i ch の出力電圧である。

1600 V ~ 2500 V での電流のモニター値及び予想値[10]は表 6.4、図 6.16 の様になった。

この結果を見る限り電流計に関しては仕様の $\pm 5\%$ を十分に満たしている。

6.6 長期安定性のテスト

高電圧出力の長期安定性のテストは精度の測定のセットアップ (図 6.10) と同じセットアップで行なった。

測定の手順は図 6.17のように、おこなった。また、節 6.5.2の精度測定のテストと同様に、全チャンネルを一律の電圧に設定し、高電圧出力の立ち上がりの待ち時間を 2 分、リレーの切替え後の待ち時間を 2 秒で測定を行なった。

その結果は、図 6.18の様になった。この図 6.18から、仕様の 1 週間 $\pm 1V$ の安定性は満たされている。この図で見られる 3 ~ 4 日に見られるズレは他のチャンネルのグラフでも見られている。これは、実験場 (長島研大部屋) の温度変化に依る効果だと思われる。

[10]ロード抵抗は J 規格であるのでそれぞれは $\pm 5\%$ の精度であるが、24 チャンネルあるのでガウス型を仮定するとその 1/5 程度 ($\pm 1\%$) の精度で予想できる

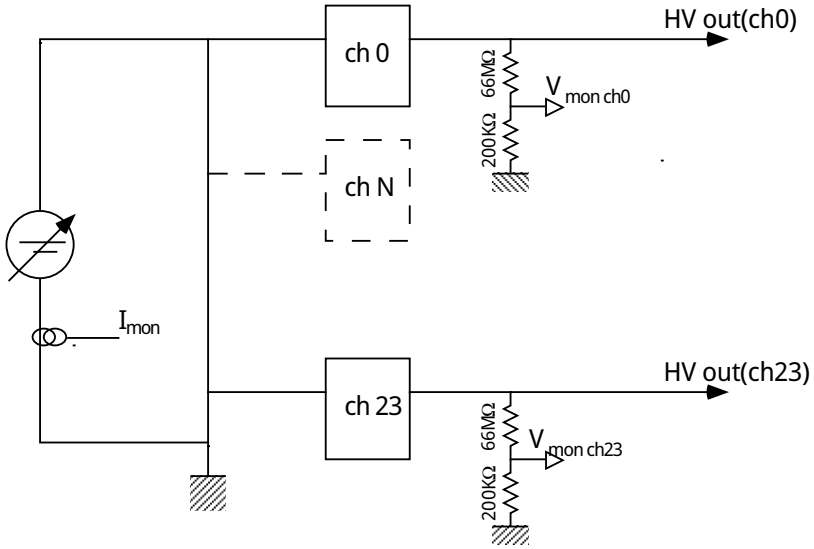

図 6.15: 電源の内部抵抗の概略図：$V_{mon\ ch\ n}$ は n チャンネルの電圧値のモニター、I_{mon} は電流値のモニター

電圧値 $[V]$	モニター値 $[mA]$	予想値 $[mA]$
1600.00	7.464	7.416
1700.00	7.929	7.878
1800.00	8.395	8.340
1900.00	8.862	8.802
2000.00	9.328	9.246
2100.00	9.794	9.726
2200.00	10.261	10.188
2300.00	10.728	10.650
2400.00	11.193	11.111
2500.00	11.660	11.573

表 6.4: 電流計の評価

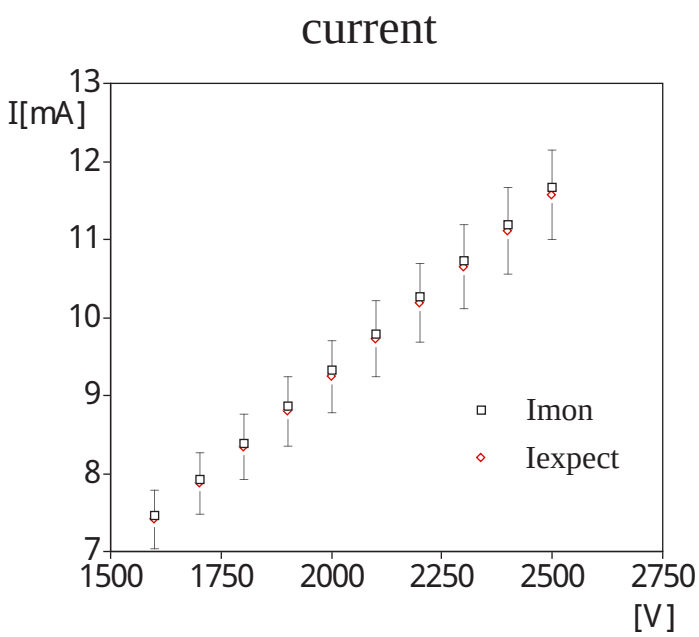

図 6.16: 電流モニターの評価：エラーバーは電流の予想値に対して ±5% で、仕様の許す範囲を示している。

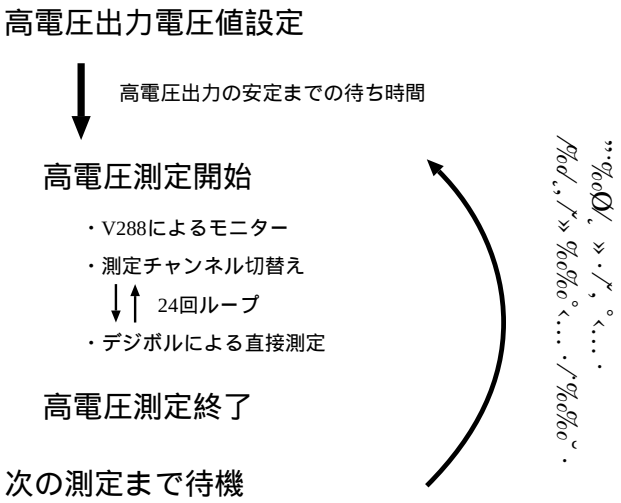

図 6.17: 長期安定性のテストの手順

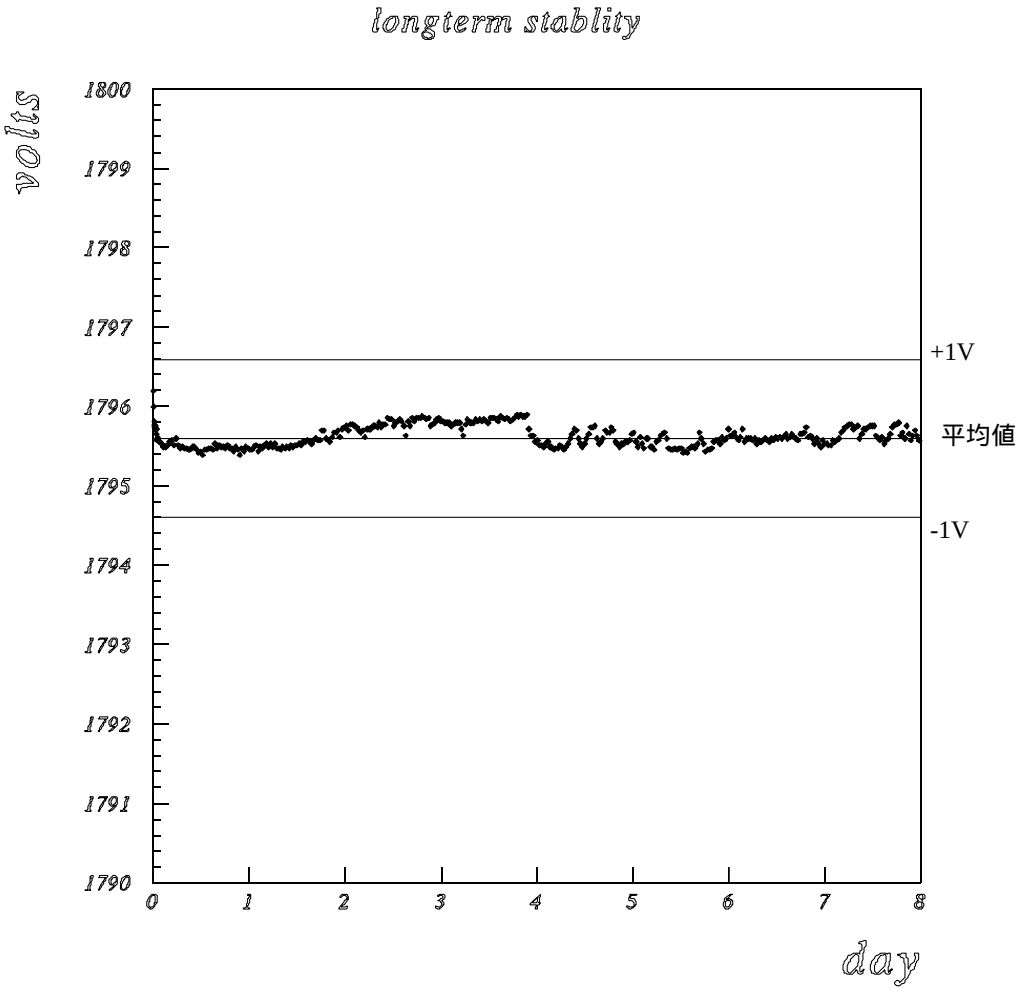

図 6.18: 長期安定性のグラフ

6.7 過電流に対するテスト

このテストの目的は節 5.5に述べた通り、データの信頼性と実験場の安全性の確保のためである。

このテストは、節 6.5と同様に図 6.10のセットアップで、図 6.9のモジュールの 0Ω 接地の部分を使って、テストを行なった。

手順は、まず高電圧出力を on して、その後 20 秒程度待ち、0Ω で接地する。これを各チャンネルに対して、10 回づつ繰り返した。また、この時の電圧設定値は全チャンネル 2,500 V である。

結果は、全チャンネルとも問題なく親電源がトリップし、２４チャンネルが同時に出力 0 V となった。また故障や発火など危険な挙動は見られなかった。

6.8 スーパー神岡用 PMT & ATM モジュール(Analog Timing Module)を繋いでの総合ノイズテスト

6.8.1 目的

このテストは ICRR においてスーパー神岡実験用の PMT と ATM モジュールを使って行なったものであり、仕様書における総合テストに対応している。

6.8.2 セットアップ

このテストは、図 6.19の様に、TKO クレート、TKO の電源、CAEN の高電圧電源システムを同じラックにマウントして行なった。また、 TKO クレートは計算機につながっており、トリガーの閾値を変えてトリガーレートを計数器で測定することも出来る。PMT と ATM 、電源システムとの接続は図 3.11のコネクターを使っておこなった(図 6.21)。ただし、このテストの経過の上で、 HV ケーブルと HV へのグランドケーブルをツイストした方がノイズが少なくなるという結果が得られた。これは電波に対するケーブルのアンテナ効果が減少したためと推定される。スーパー神岡実験ではどうするかは決まっていないが、少なくともこの接続方法でノイズが少なくなることが、わかったので、以降はツイストしてノイズを測定した(図 6.20)また、PMT への印加電圧は 500V である。この理由は、この電圧だと、宇宙線や PMT の暗電流の影響が十分小さく、また、リップルが電圧に依存しなかったことからも判るように、ノイズ源は電圧に依存しないと考えられるためである。

6.8.3 テスト

まずは、ATM 内部の 100 倍の増幅器の出口の部分にプローブを繋いでオシロスコープでシグナルを見た(図 6.22)。また、この電源システムとの比較のために、シリーズレギュ

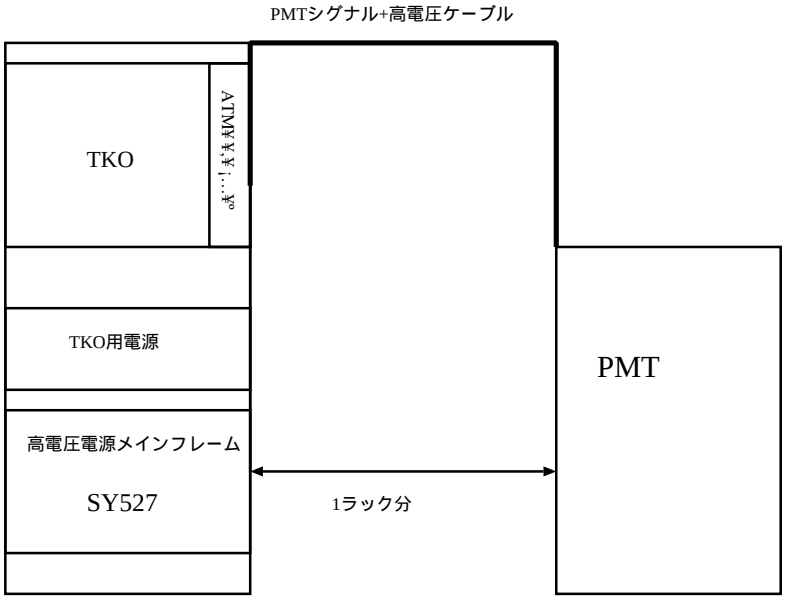

図 6.19: 東大宇宙線研における” 総合テスト” のセットアップの概要図。

図 6.20: グランドケーブルのセットアップによる違い。左の写真は。HV ケーブルと HV へのグランドケーブルをツイストせず。右の方の写真はツイストして測定。

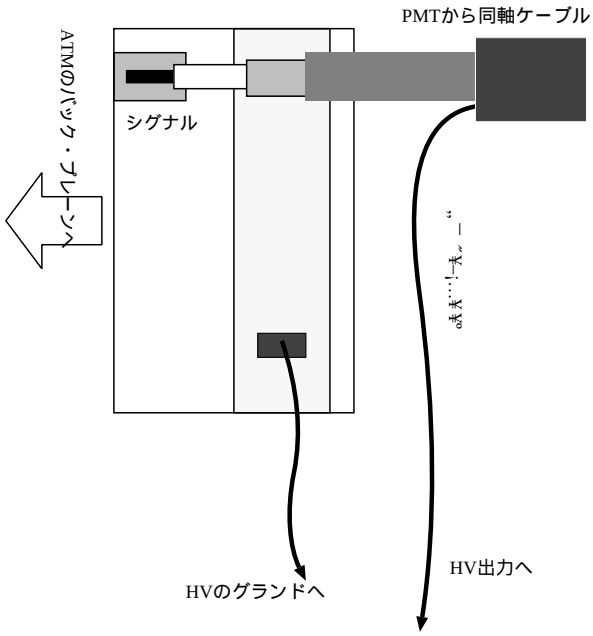

図 6.21: PMT と ATM 、HV の接続

レーターの電源 (power designed inc. 製 MODEL 1570A) を繋いだ場合の写真も載せる。図 6.22の写真を見比べてみると解るように、CAEN の電源システムを繋いだ場合、シリーズレギュレーターの電源では見られない、$30\,\mu sec$ 周期で波高 $\sim 100mV$ のスパイクノイズが見られる。この周期は 33KHz で 電源のスイッチング周波数に等しい。次に、トリガーの敷居値を変えて計数器でトリガーレートを計測し、電源のノイズによるトリガーレートが十分小さくなる (1 Hz 以下) トリガー敷居値を調べた。その結果は、$-140\,mV$ であった。

第 4章のシミュレーションの結果からの要請では、ノイズは 0.4 p.e. (100 倍増幅の後で 120mV) 以下でなければならない。この結果から、この高電圧電源システムは仕様の総合ノイズテストに対して不合格である。そのため、ノイズ成分を下げるための改良を行なった。

6.8.4 改良

前節で見られたノイズを押えるために、図 6.23のように A933 K の高電圧出力の出口にコイルを取りつけた[11]。このコイルのインダクタンスは $100\mu H$ である。

この改良後の電源に対して、リップルのテスト及びノイズのテストを行なった。

[11]実際の実験で使う電源に対して全く同じ改良を行なうとは限らないが、１つの改良例として行なった

図 6.22: 向かって右が CAEN のシステム、左が MODEL-1570A

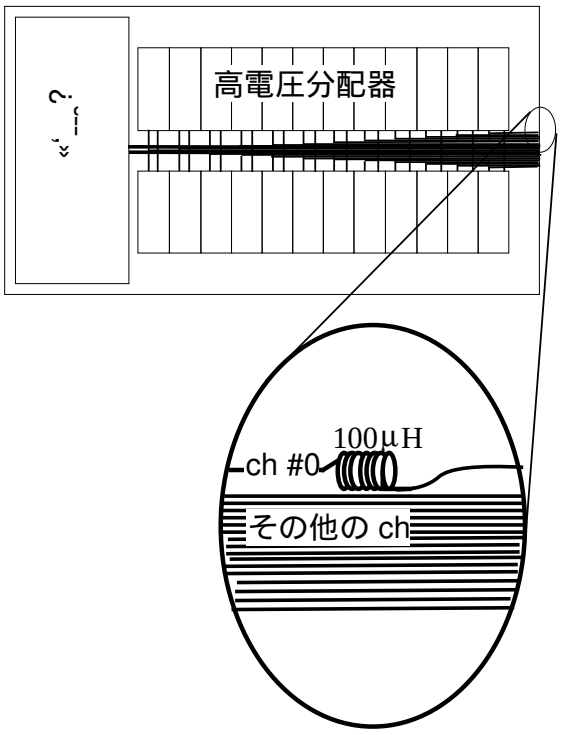

図 6.23: A933K に対する改良：コイルのインダクタンスは $100\mu H$ である

改良後のリップル

節 6.4と同様に高エネルギー研で同様の回路 6.5を使って、周波数特性を測定した。その結果は図 6.24の写真である。

図 6.24: 改良後のリップルのスペクトルアナライザーに依る測定 : 右が高電圧出力 on 時で、左が off 時である

図 6.8では 33 kHz の成分が $-48db$ なのに対して、図 6.24では $-59.4db$ となり、図 6.23の改良によって、リップルの 33 Khz の成分 (スイッチングの成分) が約 $10db$ 下がった、つまり波高が約 $1/3$ になっている。

改良後のノイズテスト

節 6.8.2のセットアップで測定を行なった。測定結果は図 6.25のようになった。図 6.25の写真では 33KHz のノイズが見えなくなっている (他のノイズと比較して見えない)。この写真で見られる、$2.5\mu sec$ 周期のノイズは TKO の電源のスイッチング (周波数 400 KHz) によるノイズと思われる。また、電源のノイズによるトリガーレートが十分小さくなる (1 Hz 以下) トリガー敷居値は $-65mV$ であった。

最終的に、グランドの取り直しなどシステムのノイズを下げる作業を行なった後、結局、トリガー敷居値は $-55mV$ 迄下げることが出来た。また、この状態で CAENet による電圧及び電流モニターを行なっても有為にノイズが乗ることはなかった。

図 6.25: 改良後のノイズテストの写真

6.8.5 結論

CAEN 社の高電圧電源システムの試作器は、0.4 p.e.(100 倍に増幅後で 120 mV) 以下を満たすものではなかった。しかし、少なくとも出力出口にコイルを取り付けるという簡単な方法で、ノイズレベルを 0.2p.e.(100 倍に増幅後 60 mV) 以下に落し、物理的要請を満たすことがわかった。これより、低レベルノイズは高電圧電源以外のノイズが多くなり、高電圧電源からのノイズを特定出来なかった。

この結果は CAEN 社においてフィードバックされ、最終的な電源システムが、現在 CAEN 社で製作中である。

第 7 章

スーパー神岡実験における高電圧出力モニターシステム

第 6章 でテストを行なった CAEN の高電圧電源システムの改良版が、スーパー神岡実験で使用される予定である。この章では、スーパー神岡実験において高電圧電源の出力のモニターをどのように行なうかを簡単に述べる。

7.1 モニターシステムの必要性

スーパーカミオカンデ検出器のような型の水チェレンコフ型検出器は、前にも述べた様に事象のトリガー及び再構成に水中の PMT で得た電荷時間情報を用いるため、PMT の状態を常に正確に知っておく必要がある。

PMT 利得などの較正は、検出器を完全につき抜ける μ 粒子の情報や、１ヶ月に１度程度行なわれるレーザー光源、10 MeV 程度の電子線形加速器を使って取ったデータ (キャリブレーションラン) で行なわれる。しかし、もっと時間の短いスケールでの印加電圧の変化や PMT の内部抵抗の変化などは、この様なキャリブレーションランでは押え切れない。そこで必要になるのが、PMT への印加電圧及び供給電流を常にモニターし、その変化を短時間で調べるシステムである。

更に、PMT 内部のブリーダー抵抗等には変化がないが、放電を起こして発光する PMT (生き光球) などが、オンラインの解析で見つかった場合、リモートでその PMT への高電圧の印加を止めることが出来なければならない。そのため、高電圧電源系を集中制御するシステムが必要になる。

7.2 モニターシステム

高電圧電源システムは節 3.5で述べたように、タンクの上部に設置される外側の４つのハット (図 3.12) に置かれる。高電圧電源システムは、１つのハットに１２台のメインフ

レームが置かれ、各メインフレーム間はレモ規格のケーブルによるデージーチェーンで結ばれる。(図 6.2)

高電圧電源システムをコントロールする、VME システムは図 3.12 の真中のハットに置かれ、そこから CAENet を使ってコントロールを行なう (図 7.1)。

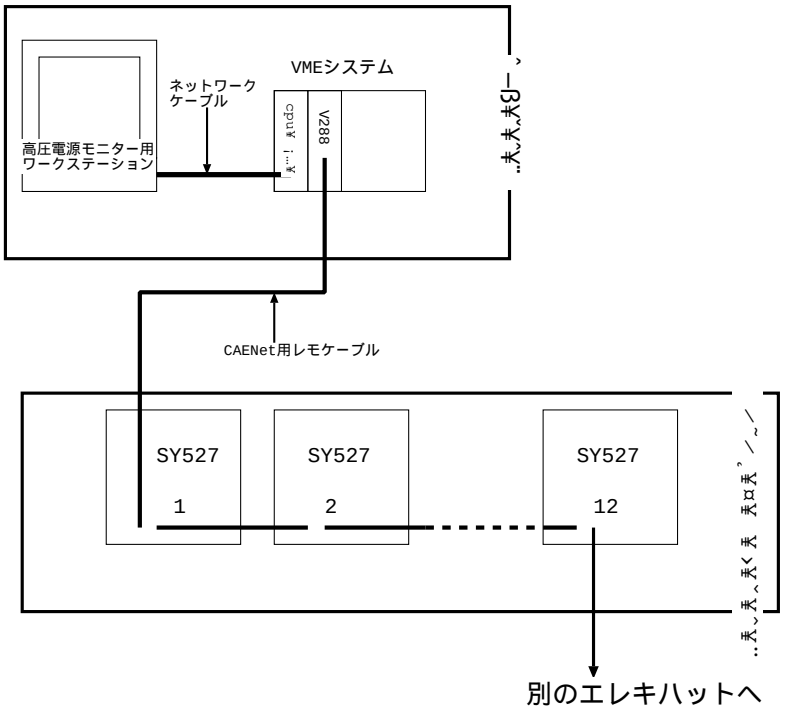

図 7.1: 高電圧システムのコントロール概略図

高電圧出力値及び出力電流値は、定期的 (数時間に 1 度程度) に自動的に、もしくは不定期にシフトメンバーによってモニターされる。CAENet をへて得られたデータは、NFS[1] を使って、ワークステーション上のハードディスクに書き込まれ、オンラインのワークステーションからのアクセスを可能にする。さらに、計算機上で設定値とモニター値の比較を行ない、異常を発見した場合、オンラインのワークステーション上にその情報を送る。

また、コントロールはスーパー神岡実験のデータ収得用のワークステーションからのリモートプロセスによって行なわれる。

これらの、システムは、現在、構想中であり、データ収得のプログラムの担当者と協議の上、今後作成していく。

また、過電流や光球等による 24 チャンネル単位での高電圧出力の off は自動もしくはリモートで可能だが、最終的には原因となった 1 チャンネルを特定しなければならない。そ

[1]Network File Service : これによって、ネットワークを使って、別のマシンのハードディスクを自分のハードディスクの様に扱えるようにすることが出来る

のため、今年度中に、24 チャンネル (1 ボード) の内の 1 チャンネルを短時間 (30 分程度) で判別出来る、ハンディな装値を製作する予定である。

第 8 章

結論

今回、太陽ニュートリノ解析シミュレーションを行ない、スーパー神岡実験用高電圧電源システムに対して、ノイズレベルの上限値を決定し、更に実際の高電圧システムの試作器に対して色々なテストを行なった。

スーパー神岡実験での 3 年間の観測に相当する、太陽ニュートリノとそのバックグラウンドとなる Rn からの低エネルギー電子事象を発生させたシミュレーションの結果から、現行のカミオカンデでの Rn 濃度に対して エネルギー閾値: $E_{thre} = 6.5$ MeV で太陽ニュートリノの解析を行なうためには、ノイズを 0.4 p.e.(100 倍に増幅後で 120 mV) 以下にしなければならないことが分かった。$E_{thre} = 6.5$ MeV で解析が行なわれれば、太陽ニュートリノの MSW 効果の解と考えられている、非断熱解 (図 2.5、2.6の (a)) と、準真空解 (図 2.5、2.6の (b)) を十分でわけることが出来る。そのため、高電圧電源のノイズレベルは 0.4 p.e. 以下であることを要求した。また、 Rn 濃度を予定どおり 1/100 に減らすことが出来れば、ノイズが 0.4 p.e. でも E_{thre} がプロポーザルに示された 5 MeV まで下げられることが分かった。

また、スーパー神岡実験用のエレクトロニクスと PMT(光電子増倍管)を繋いで、CAEN 社の高電圧電源システムの試作器に対してノイズのテストをおこなった。その結果、この高電圧電源システムからのノイズは 0.4 p.e. 以下を満さなかったが、安価で簡単な改良に依って 0.2 p.e. 以下までノイズを下げることが可能になり、高電圧電源システムは、シミュレーションの結果から要請されるノイズベルより十分低くノイズを抑えられることに成功した。

高電圧出力等の制御などの基本性能については、出力の設定精度[1]を除けば全て仕様を満たしている。また、今回のテスト結果から、図 6.9のモジュールと図 6.10のシステムを使うことで、24 チャンネルの出力に対して、電圧設定、電圧モニター、電流モニターの精度の測定及び出力短絡テストが $\simeq$ 15 分 で行なえることが分かった。このことから、11,200 チャンネル分に対しては 7,000 分 ($\simeq$ 120 時間) で行なえるため、スーパーカミオカンデに取り付ける前に全チャンネルの精度の測定を行なうことが可能である。また、1995 年中

[1]出力の設定精度については CAEN 社の結果と食い違っているため、現在原因を追求中であるが簡単に結果が出ると思われる。

に 24 チャンネルの PMT の中から、1 チャンネルの故障した PMT を同定するハンディな装置を製作せねばならない。

付録 A

シュミレーションプログラム

この章では、4章で使ったスーパーカミオカンデ用シュミレーションプログラムについて簡単に説明する。[15]

A.1 プログラムの構成

スーパーカミオカンデ用シュミレーションは次の 3 つの部分から構成されている。

1. 粒子の種類、発生位置、エネルギー、入射方向等を決める。
2. 粒子の検出器内での運動や発生するチェレンコフ光を水中で追跡し、PMT で検出する。
3. PMT の時間及び電荷分解能を考慮して、実際に出力され、記録されるデータを求める。

また、検出器内での粒子の振舞いについては GEANT を使用し、PMT の反応については現行の神岡実験で得られたデータを用いている。

A.2 検出器内での粒子の振舞い

粒子のスーパーカミオカンデ検出器内での運動をシュミレートする際に決めるべきことは、

- 検出器の形状、媒質、PMT の形状、PMT の配置等の決定
- 粒子の媒質との反応

である。検出器の形状等は建設予定の数値をすれば良いが、粒子の媒質との反応について GEANT を 以下の様に設定した。

γ 線　　電子対生成、コンプトン散乱、光電効果

$e^{\pm}$　　制動放射、δ 線生成、陽電子消滅、電離損失、多重散乱

$\mu^{\pm}$ 粒子　μe 崩壊、δ 線生成、制動放射、電離損失、多重散乱

また、それぞれの粒子に対して、扱う下限のエネルギーを、γ 線については $100KeV$ 、$e^{\pm}$、$\mu^{\pm}$ 粒子についてはチェレンコフ光の閾値 (表 3.1) とする。

また、粒子の運動はプログラム上、有限の距離のステップに切って粒子を追跡するのだが、そのステップの長さは、各粒子の進行に対して、上で示した反応の内でもっとも早く反応が起こるまでの距離とし、各ステップ毎にシュミレートする。

A.3　チェレンコフ光

発生するチェレンコフ光の光子数は式 3.2を積分して

$$N = \frac{2\pi\alpha x}{c}(\nu_1 - \nu_2)\left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2}\right) \tag{A.1}$$

である。ここで、x は粒子が進んだ距離である。 はまた波長の範囲は PMT の量子化効率の有効範囲 ($300 \sim 700nm$) を用いる。

チェレンコフ光の水中での振舞いについては、散乱及び吸収が考えられるが、透過率については、カミオカンデでは現在評価中であるので、文献 [16][17] の値を用い (図 A.1)、散乱と吸収の割合については、波長が $300 \sim 500nm$ の範囲に関しては半分吸収、半分散乱とし、$500 \sim 700nm$ の範囲では全て吸収とした。

A.4　光電子増倍管の荷電及び時間分解能

最終的に、発生させたチェレンコフ光を、スーパー神岡実験用 PMT の光量と時間の分解能で鈍らせてデータを記録する。光子が 1 つの場合の光量の分解能に関しては、文献 [13] に示された図 3.8の結果を使い、時間分解能に関してはカミオカンデで得られた結果 (図 A.2) を使った。

図 A.1: 水の透過率の波長依存性：プロットは SNO グループが測定したデータ。実線がシミュレーションで設定した透過率。

図 A.2: カミオカンデにおける電荷量と時間の関係

参考文献

[1] K.S.Hirata et al.,PRL B220(1989)308

[2] K.S.Hirata et al.,PR D44(1991)2241

[3] K.S.Hirata et al.,PRL 58(1987)1490

[4] J.N.Bahcall et al. Rev.Mod.Phys. 64(1992)885

[5] K.lande,in Proceedings of 25'th International Conference on High Energy Physics, Singapore, 1990.edited by K.K.Phua and Y.Yamaguchi(World Scientific Singapole,1991)

[6] The SAGE collaboration, talk presented by A.Gavrin, to appear in the proceedings of the 26th International Conference on High Energy Physics, Dallas, U.S.A., August 1992

[7] P.Anselmann et al., PL B327(1994)377

[8] S.P.Mikheyev and A.Yu.Smirnov,Sov.J.Nucl.Phys. 42(1985)913;
L.Wolfenstein, PR D17(1978)2369; D20(1979)2634

[9] Georgi H and Glashow S L, PRL 32(1974)438

[10] P.Langacker, Physics Report 72,No4(1981)185

[11] Becker-Szendy et al.,PR D42(1990)2974

[12] P.J.O'Donnell et al.,Phys.Lett.B316(1993)121

[13] A.Suzuki et al.,NIM A329(1993)299

[14] 吉本 明平、1992 年度修士論文、大阪大学理学研究科物理専

[15] 小汐 由介、1993 年度修士論文、東大宇宙線研

[16] A.Morel et al.,Limnology and Oceanography 22(1077)709

[17] SNO proporsal, "SUDBURY NEUTRINO OBSERVATION",(1985)

謝辞

本論文を終えるに当たり、まず、研究の機会を与えてくださり、また、高エネルギー物理の基礎から指導してくださった長島順清教授に感謝の意を表します。滝田正人助手は私が大学４年生の時から現在に至るまで実験の初歩から、物理学のあらゆることに渡り丁寧に指導してくださり、また、実験や解析時の指針を示していただきました。本論文は滝田助手の指導がなければ完成しなかったといっても過言ではありません。

また、KAMIOKANDE 実験の創始者である小柴昌俊先生がいらっしゃらなければこの論文はなかったことでしょう。心から感謝します。

東大宇宙線研究所の戸塚洋二先生、中村健蔵先生、鈴木洋一郎先生、その他の先生方には様々な助言、協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

KEK の 佐々木修先生には、KEK で実験をする際に、的確な指導、助言を頂きまして、本当にありがとうございました。

また、中畑先生、井上先生には、神岡現地において、計算機について様々な助言を頂きました。感謝しています。

東大宇宙線研究所の早川さん、石野君には、東大宇宙線研究所でのテストの際に色々御迷惑をかけました。有難うございました。また、小汐さんにはシュミレーションの際に色々お世話になりました。有難うございました。

その他の、KAMIOKANDE の共同実験者の方々には、実験中大変お世話になりました。有難うございます。

また、長島研究室においては、山中助教授、幅助手、羽澄助手には講義、ゼミ、研究室のミーティングの際に様々な助言を頂きました。ここに、感謝の意を表します。

金子先生、尾西先生、回路室の水田先生には回路、コンピューターのことで色々お世話になりました。感謝します。

続木さんには、事務等の様々なことでお世話になりました。有難うございます。

中家さん、花井さんには物理全般について色々な助言を頂きました。感謝します。

また、同じ神岡グループである原さんには、神岡でも長島研でも相談にのって頂き有難うございました。

辰巳さん、八木さんには失礼なことや、迷惑なことを色々しましたが、様々な面でおせわになりました。

同じ修士２年の 足立君、川崎君、辻君、花垣君や修士１年の加藤君、貞本君、千代君、卒業された、山本さん、松宮さん、来住さんには色々御迷惑をかけました。有難うございました。