

2009年度修士学位論文

Double Chooz 実験用光電子増倍管のための
高電圧電源システムの構築

首都大学東京大学院理工学研究科物理学専攻

高エネルギー実験研究室

佐藤 文孝

学修番号 08879320

平成22年2月2日

概要

現在素粒子物理学の実験的研究において非常に重要な課題のひとつは、ニュートリノ振動角 θ_{13} の精密測定である。この θ_{13} は、他の二つの振動角 θ_{12} と θ_{23} に対し、唯一有限値が得られていないニュートリノ振動角であり、今のところ Chooz 実験において $\sin^2 2\theta_{13} < 0.15$ の上限値が得られているのみである。この最後のニュートリノ振動角を測定することは、CP 非保存パラメータの決定可能性、質量階層性の解決可能性とも深くかかわっており今後の素粒子物理学の発展、新たな理論の構築には避けて通ることができない。Double Chooz 実験はこの最後のニュートリノ振動角の精密測定を目指す国際共同実験である。

本実験では最終的に $\sin^2 2\theta_{13} < 0.03$ の精度での測定を目指しており、これは先の Chooz 実験の 5 倍の精度である。この過去最高精度での精密測定実現のためには実験サイトにおける種々のバックグラウンドの理解と排除、測定機器の安定性、また様々な不定性から生じる系統誤差の理解が必要不可欠である。本実験において日本グループは光電子増倍管 (PMT) 担当グループとして、これまでに個々の PMT の性能評価試験などを行ってきた。光電子増倍管には個体差があり、それを起源として系統誤差が生ずる恐れがあるため使用されるすべての光電子増倍管の性能を詳細に理解することは、測定器に起因する系統誤差の理解に非常に有用である。

本研究ではその光電子増倍管の検出器への設置時における性能測定、及び電圧印加を行う高電圧電源の性能評価を行った。この高電圧電源はニュートリノイベント検出用の PMT390 本とバックグラウンド同定用の PMT72 本の合計 462 本の PMT への電圧印加に用いられる。ここでも、先と同様に個々のモジュール、チャンネルの性能評価検査は精密測定には欠かせない試験の一つである。

また、本実験では PMT への電圧印加と PMT からの信号の読み出しを一つのケーブルで行うため、高圧電源由来のノイズが PMT からのシグナルにのってしまふ恐れがある。このために、高電圧電源の個々のチャンネルでのノイズの理解と削減は非常に重要である。本実験では高電圧電源としてイタリア CAEN 社製の SY1527 クレートと A1535 モジュールを使用することになっており、日本グループが購入し、性能評価試験を行った。またそれと同時に高電圧電源の制御のためのソフトウェアの開発も行った。

本修士論文では Double Chooz 実験で用いられる高電圧電源の性能評価とその制御システムの開発に関して記述する。

目次

第1章 序論	7
1.1 物理的背景	7
1.2 ニュートリノ振動	7
1.3 ニュートリノ振動実験	10
1.3.1 太陽ニュートリノ	10
1.3.2 大気ニュートリノ	11
1.3.3 加速器ニュートリノ	14
1.3.4 原子炉ニュートリノ	16
第2章 Double Chooz 実験	18
2.1 概要	18
2.2 原子炉ニュートリノ実験	19
2.2.1 Chooz 原子炉	19
2.2.2 原子炉からのニュートリノ	20
2.3 検出器	21
2.3.1 検出原理	22
2.3.2 ニュートリノターゲット	24
2.3.3 γ キャッチャー	24
2.3.4 Nonscintillating Buffer	25
2.3.5 光電子増倍管	25
2.3.6 Inner Veto	27
2.3.7 Outer Veto	27
2.3.8 検出器まとめ	28
2.4 バックグラウンド	29
2.4.1 Accidental バックグラウンド	29
2.4.2 Correlated バックグラウンド	30
第3章 PMT の検出器設置時における性能評価テスト	31
3.1 検出器への PMT 設置作業	32
3.2 PMT 性能評価最終テスト	33
3.2.1 一光電子スペクトル	33
3.2.2 Dark rate	34

3.3	PMT 設置直前テスト (Pre test)	34
3.3.1	一光電子スペクトル	35
3.3.2	Dark rate	35
3.3.3	Pre test まとめ	37
3.4	PMT 設置直後のテスト (Post test)	37
3.4.1	Dark rate	38
3.4.2	Post test まとめ	40
3.5	PMT 以外の異常	40
3.6	まとめ	41
第 4 章	Double Chooz 実験用高電圧電源の性能評価	43
4.1	CAEN 高電圧電源	43
4.1.1	SY1527LC	44
4.1.2	A1535P	44
4.2	出力電圧値測定	48
4.3	ノイズ測定	51
4.3.1	ダイレクトノイズ測定	52
4.3.2	CAEN での測定との比較	56
4.3.3	Splitter 回路を用いたノイズ測定	58
4.4	まとめ	62
第 5 章	高電圧電源制御システムの開発	63
5.1	概要	63
5.2	高電圧電源制御システムの構成要素	64
5.2.1	コントロールサーバ	64
5.2.2	モニタサーバ	65
5.2.3	オンラインモニタ、アラートサーバ	65
5.2.4	データベース	65
5.2.5	GUI	65
5.3	まとめ	69
第 6 章	まとめ	70

目次

1.1	Chooz 実験による $\sin^2 2\theta_{13}$ の排除領域	9
1.2	$\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$ としたときのニュートリノ振動の確率	11
1.3	太陽ニュートリノのスペクトル	13
1.4	スーパーカミオカンデ実験で得られたニュートリノの天頂角分布	14
1.5	K2K で得られたデータ	15
1.6	KamLAND で得られたニュートリノのエネルギースペクトル	16
1.7	加速器ニュートリノ・原子炉ニュートリノ実験における $\sin^2 2\theta_{13}$ 上限値の推移の予想	17
2.1	Chooz 原子炉	18
2.2	Double Chooz 実験で期待される $\sin^2 2\theta_{13}$ の上限値の時間推移	19
2.3	原子炉内での ^{235}U の崩壊過程	20
2.4	主な核子から生成されるニュートリノのエネルギースペクトル	21
2.5	Double Chooz 検出器	22
2.6	逆 β 崩壊後の Prompt Signal と Delayed Signal の模式図	23
2.7	原子炉ニュートリノのエネルギースペクトル	24
2.8	液体シンチレータの長期安定性。横軸が波長で縦軸が透過率。	25
2.9	低バックグラウンド 10 インチ PMT の波長特性 [22]	26
2.10	実際の 10 インチ PMT の写真	27
2.11	Inner Veto, Outer Veto を設置したときの高速中性子バックグラウンド量	28
3.1	後置検出機の建設状況	31
3.2	Buffer tank への PMT 設置作業	32
3.3	PMT 保存用コンテナ	33
3.4	テスト回路のブロック図	34
3.5	全 PMT の SPE スペクトルを Gaussian でフィットした時の標準偏差	35
3.6	JP1090 と JP0541 の SPE スペクトル	36
3.7	電圧印可 10 分後の Dark rate	36
3.8	更に 1 時間電圧印可を行った後の Dark rate	37
3.9	不安定な Dark rate が確認された GE0171	38
3.10	Post test 時の全 PMT の Dark rate.	39

3.11 事前の個別試験で得られた結果との比較	40
4.1 SY1527 crate	44
4.2 CAEN A1535 module	46
4.3 Patch panel	46
4.4 出力電圧値測定回路	48
4.5 Divider 回路	48
4.6 1400V 印可時の電圧値のずれ	50
4.7 2000V 印可時の電圧値のずれ	50
4.8 日本での電圧値測定	51
4.9 ノイズ測定の回路図	52
4.10 デイバイダー回路のシールド	53
4.11 ケーブルのシールド	53
4.12 ダイレクトノイズ in Saclay	53
4.13 ダイレクトノイズ in Saclay	54
4.14 日本での試験におけるダイレクトノイズ	55
4.15 各大学での試験のダイレクトノイズの Peak to Peak	55
4.16 CAEN でのダイレクトノイズ測定	56
4.17 France と CAEN でのダイレクトノイズ	57
4.18 日本と CAEN でのダイレクトノイズ	57
4.19 Splitter 回路	58
4.20 Splitter 回路の回路図	58
4.21 全てのチャンネルでの Splitter を通した後のノイズの Peak to Peak	59
4.22 ノイズの Peak to Peak 値のヒストグラム	60
4.23 Splitter を通した後のノイズ	61
4.24 日本の各大学での Splitter を通した後のノイズ	61
5.1 高電圧電源制御システムの構成の概念図	64
5.2 高電圧電源制御 GUI	66
5.3 全 PMT の設定値からのずれを表したヒストグラム	67
5.4 各チャンネルにかかっている電圧値の時間変動	68
5.5 PMT の位置に対応付けて電圧値の設定値からのずれを表示している画面	69

表 目 次

1.1	各ニュートリノ源におけるエネルギーと飛行距離、及び Δm^2 の感 度領域	12
1.2	様々な実験での太陽ニュートリノの観測結果	12
2.1	原子核崩壊における各核種の $\bar{\nu}_e$ の量と放出エネルギー	20
2.2	CHOOZ 実験と Double Chooz 実験の原子炉由来の系統誤差	21
2.3	10 インチ PMT の基本特性	26
2.4	Double Chooz 検出器の構造	28
2.5	CHOOZ 実験と Double Chooz の検出器由来の系統誤差	29
3.1	PMT 設置作業時のテストでの異常モジュール	42
4.1	CAEN SY1527 基本特性	45
4.2	CAEN A1535 基本特性	47

第1章 序論

1.1 物理的背景

ニュートリノは弱い相互作用のみをする中性レプトンで、1931年に Pauli によってその存在が予言され、1956年に Reines と Cowan によってその存在が確認された。ニュートリノは弱い相互作用しかしないために直接検出することが困難であり、その性質は長い間謎に包まれていた。

現在自然界の仕組みは標準模型により非常によく表されると考えられているが、その標準理論においてニュートリノの質量はゼロとされている。しかし1998年にスーパーカミオカンデ (SK) グループが大気ニュートリノの ν_e と ν_μ の混合比が予測値と違う、いわゆる大気ニュートリノ異常から、ニュートリノ振動を発見したことを発表した。このことは少なくともニュートリノの一種類に質量が存在するという、標準模型を超えた物理が存在することの証明となった。現在このニュートリノ振動の理解は標準模型を超える新たな理論の構築のために必要不可欠なものとして研究が行われている。

1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノ振動とは、3種類のフレーバー (e, μ, τ) を持つニュートリノがそのフレーバーを変化させる現象のことである。このことはニュートリノのフレーバー固有状態 (ν_e, ν_μ, ν_τ) が質量固有状態 (ν_1, ν_2, ν_3) の重ね合わせで表されることで理解できる。固有状態間の関係は MNS(牧-中川-坂田) 行列を用いて以下のように表される。

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{\text{MNS}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

また U_{MNS} は以下の式で表される。

$$\begin{aligned}
U_{\text{MNS}} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

ここで s と c はそれぞれ $\sin \theta, \cos \theta$ を表し、添字は混合角 θ の添字を表す。

このように、ニュートリノ振動のパラメータは3つの振動角 $\theta_{12,23,13}$ と CP 比保存パラメータ δ によって表される。これらのパラメータのうち θ_{12} に関しては KamLAND 実験 [1], 太陽ニュートリノ実験より $|\Delta m_{12}^2| \sim 8 \times 10^{-5} \text{eV}^2$, $\sin^2 2\theta_{12} \sim 0.8$ が得られており、SK(Super-Kamiokande)[2], K2K(KEK to Kamioka) 実験 [3] より、 $|\Delta m_{23}^2| \sim 2.5 \times 10^{-3} \text{eV}^2$, $\sin^2 2\theta_{23} \sim 1$ が得られている。

それに対し θ_{13} に関しては Double Chooz 実験 [4] の前身である CHOOZ 実験において $\sin^2 2\theta_{13} < 0.15$ の上限値が得られているのみであり [5]、有限値の測定されていない最後のニュートリノ振動角となっている。 θ_{13} の測定は CP 非保存パラメータ、質量階層性問題の決定可能性とも大きく関わっており、現在早急な測定が望まれている値の一つである。図 1.1 に縦軸に Δm_{13}^2 、横軸に $\sin^2 2\theta_{13}$ をとったときの CHOOZ 実験で得られた $\sin^2 2\theta_{13}$ の排除領域を示す。

二世代間ニュートリノ振動

質量固有状態 $|\nu_i\rangle$ の時間発展は Schrödinger 方程式に従って、

$$i \frac{d}{dt} |\nu_i\rangle = \mathcal{H} |\nu_i(t)\rangle \quad (1.1)$$

で表される。ここで \mathcal{H} は自由粒子のハミルトニアンである。(1.1) を解くと

$$|\nu_i(t)\rangle = e^{-i\mathcal{H}t} |\nu_i(0)\rangle = e^{-iE_i t} |\nu_i(0)\rangle \quad (1.2)$$

が得られ、これにより $t=0$ においてフレーバー固有状態 ν_α であったニュートリノが、時刻 t においてフレーバー固有状態 ν_β である確率は、

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = |\langle \nu_\beta | U_{\alpha i} e^{iE_i t} U_{\beta i}^* | \nu_\alpha \rangle|^2 \quad (1.3)$$

で表されることになる。

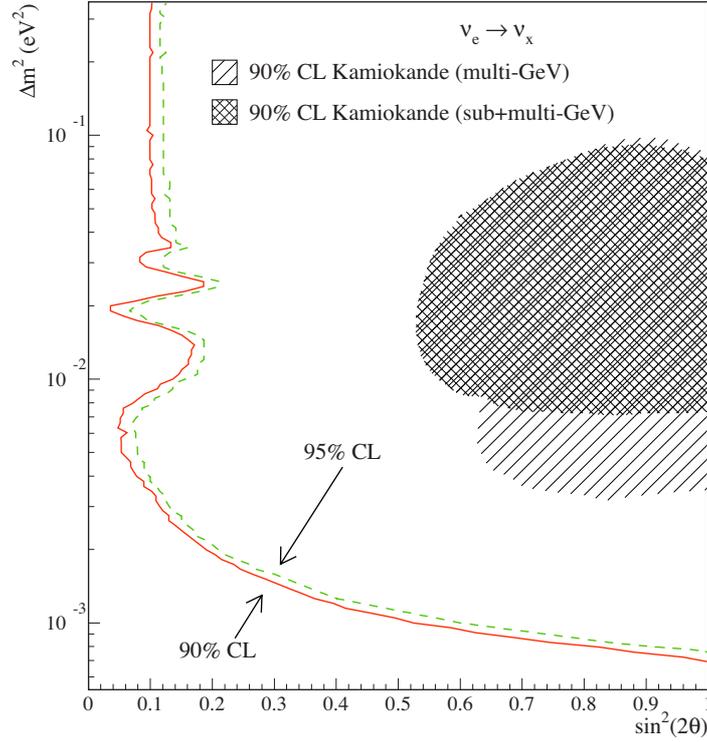


図 1.1: Chooz 実験による $\sin^2 2\theta_{13}$ の排除領域 [6]

今簡単のために二世代間の混合を考えると、

$$U = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

なので、これの U を用いて計算を行うと、あるニュートリノ α が時間 t 後にニュートリノ α である確率は、

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) = |\cos^2 \theta e^{-iE_1 t} + \sin^2 \theta e^{-iE_2 t}|^2 \quad (1.4)$$

となり、ニュートリノの質量は非常に小さく、相対論的な速度で運動しているとして、

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} = p + \frac{m_i^2}{2E} \quad (1.5)$$

の近似を行い、時間 t の間に走る距離を $L(L = t)$ とすると (1.6) のようになる。

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4E} \right) \quad (1.6)$$

ここで、 $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$ は二つのニュートリノの質量の 2 乗差である。 θ の次元が無いことに注意し単位を合わせると、

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{13}^2 (\text{eV}^2) L (\text{m})}{E (\text{MeV})} \right) \quad (1.7)$$

となる。(1.7)式より、発生時のニュートリノのエネルギーと質量の二乗差がわかっているならば、適当な距離でニュートリノ振動を測定することにより振動角 θ の値を測定することができる。

三代目におけるニュートリノ振動

実際のニュートリノは三代目があるのでMNS行列を用いて計算を行うと、反電子ニュートリノ $\bar{\nu}_e$ が距離 L 走った後に反電子ニュートリノ $\bar{\nu}_e$ である確率は、

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - 4c_{13}^2(c_{13}^2 s_{12}^2 c_{12}^2 \sin^2 \Phi_{21} + s_{13}^2 c_{12}^2 \sin^2 \Phi_{31} + s_{13}^2 s_{12}^2 \sin^2 \Phi_{32}) \quad (1.8)$$

で表されることになる。ここで $\Phi_{ij} = \Delta m_{ij}^2 L / 4E$ である。

現在までに行われてきた種々の実験の結果より $\Delta m_{23}^2 \simeq \Delta m_{31}^2 \gg \Delta m_{12}^2$ であることがわかっているため、 $\Phi_{13} = \pi/2$ ($L=1.5\text{km}$)付近では Φ_{21}, Φ_{32} を含む項の効果は Φ_{31} を含む項より十分に小さく、

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{13}^2 (\text{eV}^2) L (\text{m})}{E (\text{MeV})} \right) + O(10^{-3}) \quad (1.9)$$

となり、二世目の振動に近似できる。従って、この距離付近でのニュートリノの欠損を測定することにより θ_{13} の測定が可能となる。図1.2に、 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$ 、 $\Delta m_{13}^2 = 2.38 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ のときの $\bar{\nu}_e$ の振動確率と発生位置からの距離の関係を示す。

1.3 ニュートリノ振動実験

ニュートリノは我々の住む宇宙の至る所において生成され、至る所に存在する。現在までに行われてきたニュートリノに関する実験は対象とするニュートリノの生成場所により大まかに分類される。表1.1に各ニュートリノ生成場所におけるニュートリノのエネルギー、発生地点からの距離の関係を表したものを示す。本節ではこれまで行われてきたニュートリノ振動実験について簡単に紹介する。

1.3.1 太陽ニュートリノ

太陽内部の核融合反応で発生するニュートリノを観測し、理論計算値と比べることでニュートリノ振動を検出することを目的とする。標準太陽模型(SSM=Standard Solar Model)によると、太陽は主に水素原子核4つからヘリウム原子核1つと電子ニュートリノ2つ、及びエネルギーを生成するpp連鎖と呼ばれる核融合反応



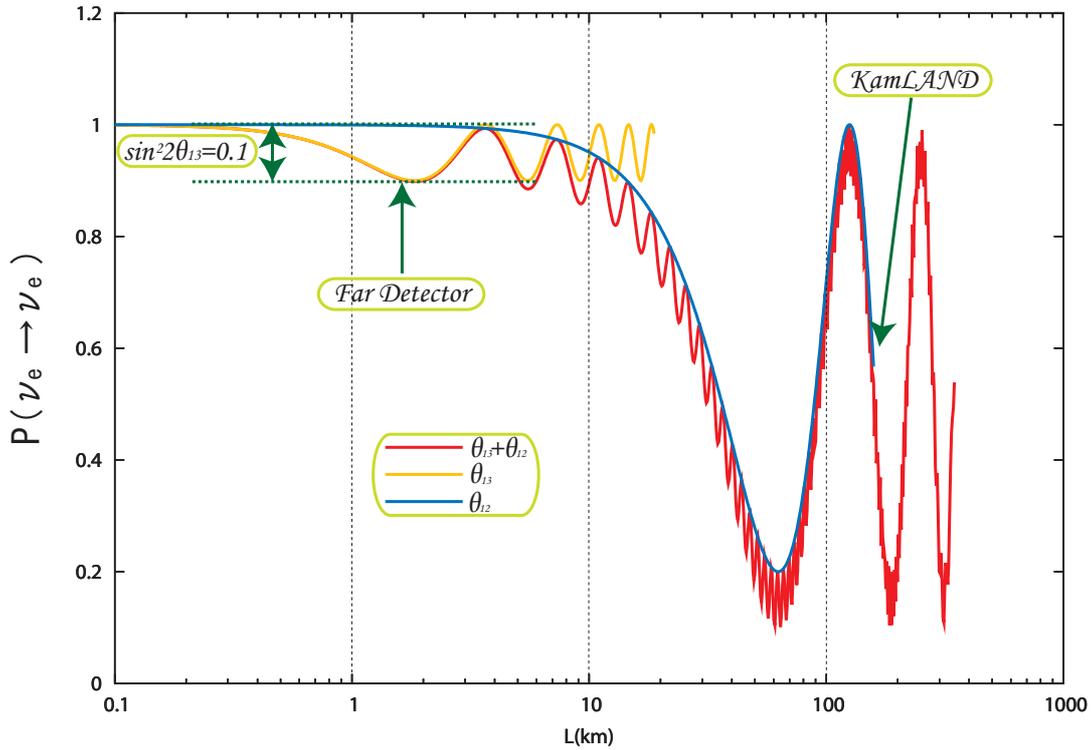


図 1.2: $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$ としたときのニュートリノ振動の確率黄線は θ_{13} のみの振動、青線は θ_{12} のみの振動、赤線は両方をたし合わせたときの振動。

により輝いているとされており、この反応により生じるニュートリノが太陽ニュートリノの大部分を占めている。他には CNO サイクルによるもの、 ^3He と ^4He によって生まれた ^7Be と陽子の衝突によって生じる ^8B が崩壊するときに生じるものなどがある。図 1.3 に太陽で発生するニュートリノの発生源とフラックスの関係を示す。

様々な実験グループが太陽ニュートリノの観測を行ったが、いずれの実験においても測定値は SSM による理論予測値より遥かに少ないものであった。表 1.2 に様々な実験で得られた太陽ニュートリノの量と SSM との比較の表を示す。

1.3.2 大気ニュートリノ

宇宙から地球に降り注ぐ宇宙線（主に陽子）は (1.11-1.12) の反応式のように大気中の原子核と衝突してパイ中間子やミュー粒子を生じる。大気ニュートリノ実験は、このパイ中間子やミュー粒子の崩壊によって生じるニュートリノを検出する実験である。

ニュートリノ源	エネルギー $E(\text{MeV})$	距離 $L(\text{km})$	$\Delta m^2(\text{eV}^2)$
太陽	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^8$	10^{-11}
大気	$1 \sim 10^2$	$10 \sim 10^4(\text{地球の直径})$	10^{-4}
加速器	$0.1 \sim 100$	$1 \sim 1000$	$10^{-3} \sim 100$
原子炉	$\sim 10^{-2}$	$0.1 \sim 100$	$10^{-3} \sim 10^{-1}$

表 1.1: 各ニュートリノ源におけるエネルギーと飛行距離、及び Δm^2 の感度領域

実験グループ	標的	単位	実験値	予測値	実験/SSM
Homestake[7]	^{37}Cl	SNU	2.56 ± 0.23	8.5	0.30 ± 0.03
SAGE[8]	^{71}Ga	SNU	66.9 ± 5.2	131	0.51 ± 0.04
GALLEX+GNO[9]	^{71}Ga	SNU	69.3 ± 5.5	131	0.51 ± 0.04
SK[2]	$e^- (\text{water})$	$106/\text{cm}^2/\text{s}$	2.35 ± 0.08	5.79	0.41 ± 0.02
SNO[10] pure D_2O CC	D_2O	$106/\text{cm}^2/\text{s}$	1.76 ± 0.11	5.79	0.30 ± 0.02
SNO salt NC	dD_2O	$106/\text{cm}^2/\text{s}$	5.21 ± 0.47	5.79	0.88 ± 0.08

表 1.2: 様々な実験での太陽ニュートリノの観測結果
いずれの実験も SSM に対して欠損が見られる。

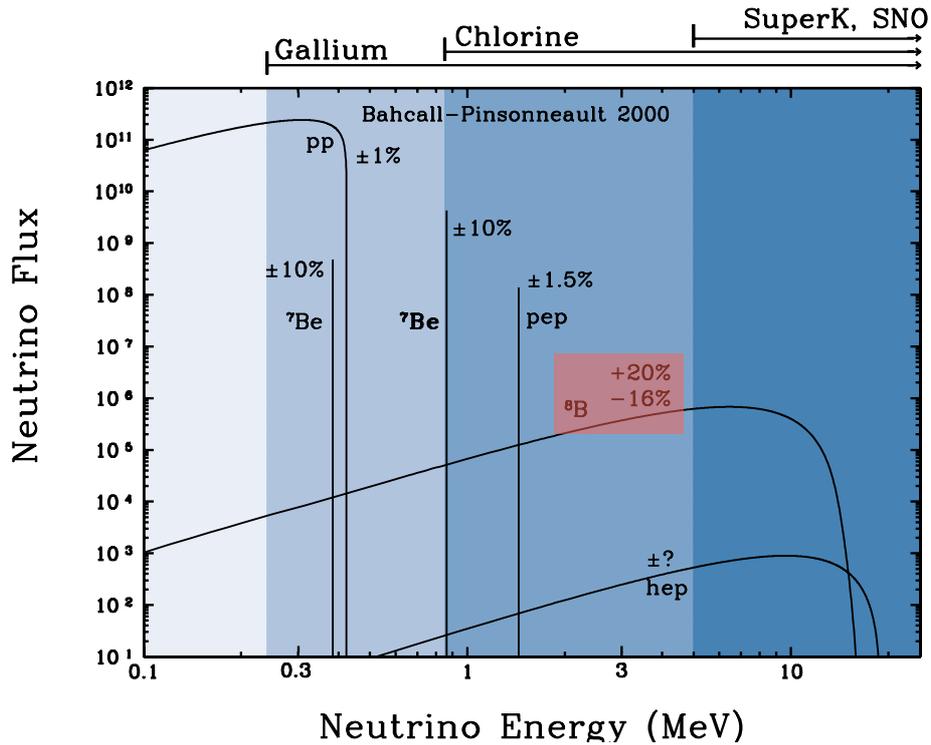
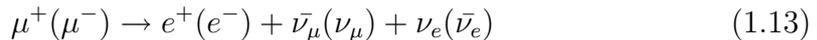


図 1.3: 太陽ニュートリノのスペクトル [11]



1998年スーパーカミオカンデ(SK)グループは、大気ニュートリノの中で地球の裏側から飛んでくるミューニュートリノが理論の期待値の半分程度に減っているという結果を発表した。

スーパーカミオカンデは神岡鉱山内の地下1000 mに設置された50 ktの大型水チェレンコフ検出器であり、



などの反応で生じた荷電粒子が水中を走る際に発するチェレンコフ光をとらえその光量、時間情報、チェレンコフリングの形状などから粒子の種類、運動方向、エネルギーを決定する。

図 1.4 に SK で得られたニュートリノの天頂角分布を示す。 ν_μ の欠損は、 ν_μ が長い距離（地球の裏側からの場合 12800 km）を移動する間に、他の種類のニュートリノに変化したものとして理解できる。

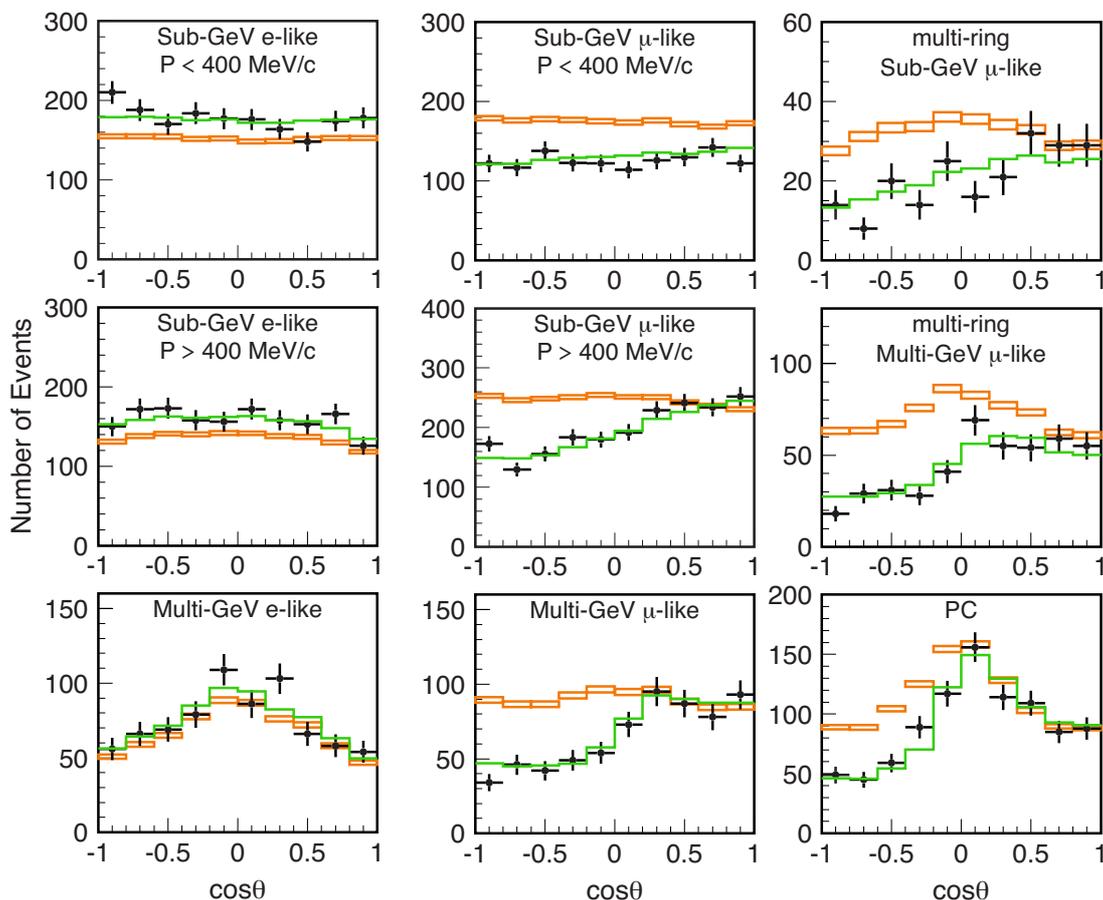


図 1.4: スーパーカミオカンデ実験で得られたニュートリノの天頂角分布。オレンジの四角は振動が無いときのモンテカルロシミュレーションで、緑の実線はニュートリノ振動を仮定したときのデータのベストフィットである。このとき、 $\sin^2 2\theta_{23} = 1.0$, $\Delta m^2 = 2.1 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ となっている。

1.3.3 加速器ニュートリノ

加速器ニュートリノ実験では、陽子加速器によって加速された陽子を二次粒子生成標的に当てることにより π 中間子を大量に生成し、この π 中間子の崩壊によって生成された ν_μ を用いる。加速器ニュートリノ実験は、太陽ニュートリノ実験、大気ニュートリノ実験などではフラックスや発生位置からの距離に不定性が残ってしまうのに対しそれらを正確に設定することができるという利点がある。主な実

験としては K2K, MINOS[12], OPERA[13] などがあり、次世代の実験として T2K 実験 [14] が計画されている。

K2K 実験は高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の 12 GeV 陽子シンクロトロン (PS) の陽子ビームを Al ターゲットに衝突させ、平均 1.3 GeV の ν_μ ビーム生成し、KEK にある前置検出器、および 250 km 離れた SK 検出器で観測する実験である。前置検出器と SK 検出器で得られる ν_μ による事象数とそのエネルギースペクトルを比較することでニュートリノ振動を検証し、2004 年にニュートリノ振動が 99.995% の確率で起きていることを確認した。図 1.5 に K2K で得られた結果を示す。

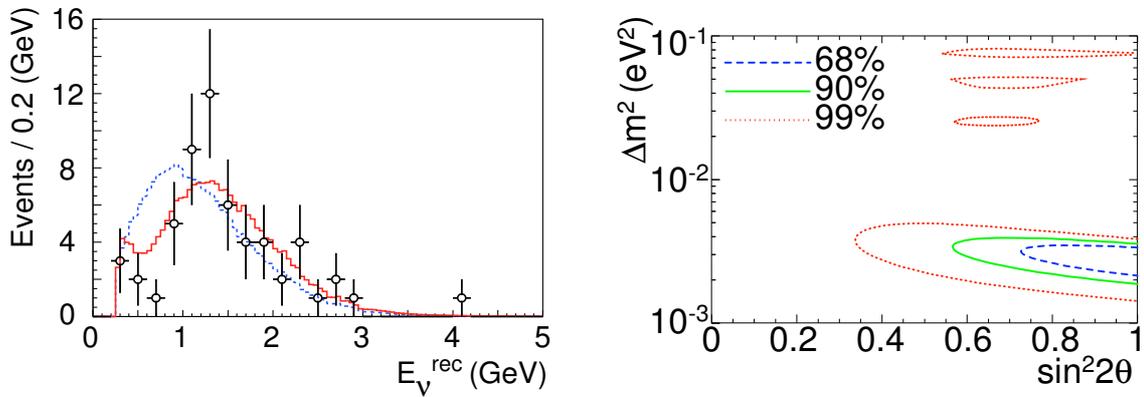


図 1.5: K2K で得られたデータ。(左) 青線は振動が無い場合、赤線は $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動のベストフィット。(右) K2K 実験での振動パラメータの許容領域

K2K 実験においても、大気ニュートリノの測定と矛盾のない結果が得られており、90% C.L. で

$$\sin^2 2\theta_{23} \sim 1 \quad (1.18)$$

$$1.9 \times 10^{-3} < \Delta m^2 < 3.6 \times 10^{-3} \quad (\text{eV}^2) \quad (1.19)$$

が得られている。

T2K(from Tokai to Kamioka) 実験は K2K 実験の次期計画で、茨城県東海村の大強度陽子加速器施設施設 J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex) の 50 GeV シンクロトロンからの陽子ビーム (ビーム強度 750 kW) をグラフィック的に当てることにより ν_μ ビームを生成する。これを 280 m 先の前置検出器と 295 km 離れた SK 検出器で $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 事象を検出することによりニュートリノ振動を測定する次期ニュートリノ振動実験である。世界最大のニュートリノビーム強度を持ち、K2K の約 50 倍のニュートリノフラックスが期待され、約 5 年間の測定で $\sin^2 2\theta_{13}$ に対する感度は $\Delta m^2 = 3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ において 90% C.L. で $\sin^2 2\theta_{13} \sim 0.006$ まで到達できると期待されている。

しかし、原子炉ニュートリノ実験は CP 比保存パラメータ δ に依らない純粋な $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$ 振動が測定できるのに対して、加速器実験では $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau \rightarrow \nu_e$ 振動を測るために δ の効果が入ってきてしまい、純粋な θ_{13} の測定にはならない。また、実験期間が長く現在 J-PARC のビーム強度が目標値に届いていないなどの問題が在り、早期の θ_{13} の発見という意味では Double Chooz 実験での測定が期待される。

1.3.4 原子炉ニュートリノ

原子炉ニュートリノ実験としては CHOOZ, KamLAND (Kamioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector), などがあり、原子炉で発生するニュートリノを検出する実験である。これも加速器実験同様、発生時のニュートリノの情報がわかっているのにより正確な測定が行える、また、既存の原子炉を利用するので加速器実験に比べ安価で実験を行える。

KamLAND 実験では、前カミオカンデ検出器跡地に設置された 1000 t の液体シンチレータ検出器により日本中の原子炉で発生するニュートリノを検出し、その減少量からニュートリノ振動を測定する。図 1.3.4 に KamLAND で得られた結果を示す。

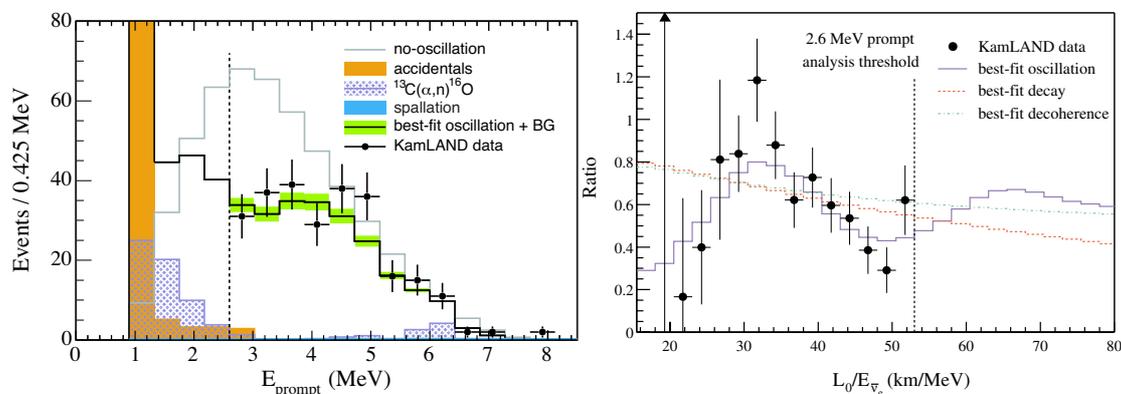


図 1.6: KamLAND で得られたニュートリノのエネルギースペクトル。(左) 灰色の線が振動無い場合。黒線が振動有りのベストフィット。(右) 横軸を L/E にしたもの。

ニュートリノ振動が無いことを仮定したものに比べ、ニュートリノのエネルギースペクトルに明らかな減少が見られる。また、振動の様子も確認でき、KamLAND

実験では

$$0.75 < \sin^2 2\theta_{12} < 0.89 \quad (1.20)$$

$$7.4 \times 10^{-5} < \Delta m_{12}^2 < 8.5 \times 10^{-5} \text{ (eV}^2\text{)} \quad (1.21)$$

が得られている。次世代の実験として Double Chooz, DayaBay[15], Reno[16] 実験があり、日本では KASKA 実験 [17][18] が計画されている。

このように現在まで様々なアプローチでニュートリノ振動に関する実験が行われてきており、またこれからも様々な次期計画が予定されている。 θ_{13} の精密測定を目的とするこれらの次期計画で得られると期待される $\sin^2 2\theta_{13}$ の上限値の時間推移を図 1.7 に示す。

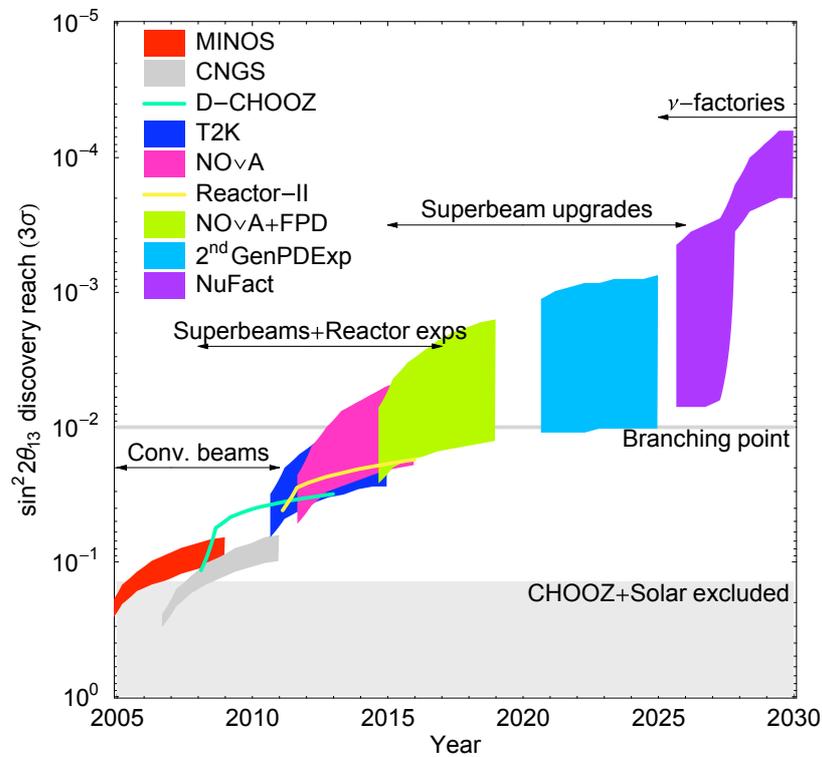


図 1.7: 加速器ニュートリノ・原子炉ニュートリノ実験における $\sin^2 2\theta_{13}$ 上限値の推移の予想 [19]。

第2章 Double Chooz 実験

2.1 概要

Double Chooz 実験はフランスの Chooz 原子炉で生成されたニュートリノを観測することによりニュートリノ振動角 θ_{13} の精密測定を目指す、世界 8 カ国の協力で行われる国際共同実験である。

現在 θ_{13} に関しては上限値のみが得られているのみであるので、今後はより高精度の測定が要求される。Double Chooz 実験ではフランスとベルギーの国境付近にある Chooz 原子炉にある二基の原子炉 (4.27 GW \times 2) から発生した反電子ニュートリノを二つの液体シンチレータで満たされた前置検出器 (炉心から 400m) と後置検出器 (炉心から 1.05 km) で検出する。この二つの検出器のデータからニュートリノフラックスの欠損を測定することによってニュートリノ振動を測定することができる。

図 2.1 に Chooz 原子炉付近の写真を示す。



図 2.1: Chooz 原子炉

Double Chooz 実験では 2010 年 4 月より後置検出器でのデータ取得を予定しており、後置検出器のみのデータで 1 年半後には $\sin^2 2\theta_{13} < 0.06$ (90% C.L.) の精度での測定が見込まれている。さらに後置検出器でのデータ取得開始の 1 年半後には前置検出器でのデータ取得が開始され、二つの検出器のデータを比較することにより、ニュートリノフラックスの不定性や検出器由来の系統誤差を大幅に削減することができ、 $\sin^2 2\theta_{13} < 0.03$ (90% C.L.) での測定が見込まれている。図 5.4 に Double Chooz 実験で得られる $\sin^2 2\theta_{13}$ に対する感度の時間推移のグラフを示す。

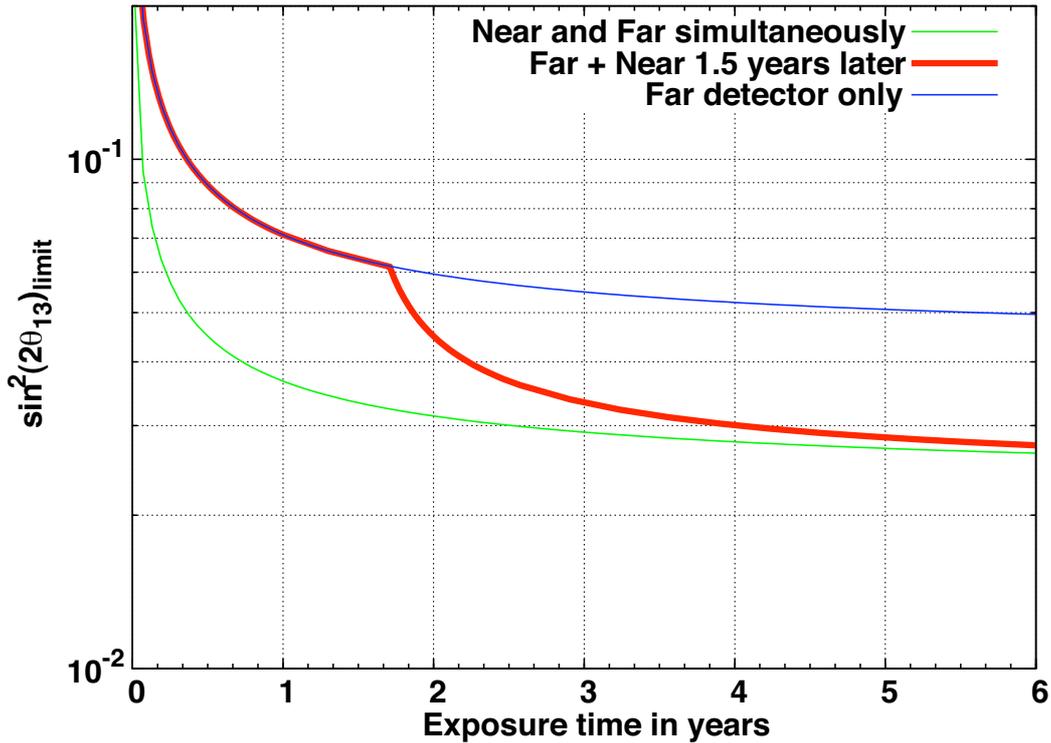


図 2.2: Double Chooz 実験で期待される $\sin^2 2\theta_{13}$ の上限値の時間推移。赤線が実際の時間推移予定。青線が Far 検出器のみ。緑線が Far 検出器と Near 検出器が同時に稼働したときの時間推移。

2.2 原子炉ニュートリノ実験

2.2.1 Chooz 原子炉

Chooz 原子力発電所は二基の改良型沸騰水型原子炉 (ABWR : Advanced Boiling Water Reactor) からなり、出力はそれぞれ 4.2 GWth(熱出力) である。これらの原子炉はフランスとベルギーの共同利用で、EDF(the French company Electricite de France) によって運転されている。またこの発電所は日本の柏崎刈羽原子力発電所と姉妹提携をしている。

	比率	$\bar{\nu}_e$ の数/1崩壊	エネルギー放出/1崩壊 (MeV)
^{235}U	55.6%	1.92 ± 0.036	201.7 ± 0.6
^{238}U	7.1%	2.38 ± 0.048	205.0 ± 0.9
^{239}Pu	32.6%	1.45 ± 0.030	210.0 ± 0.9
^{241}Pu	4.7%	1.83 ± 0.035	212.4 ± 1.0

表 2.1: 原子核崩壊における各核種の $\bar{\nu}_e$ の量と放出エネルギー

2.2.2 原子炉からのニュートリノ

原子炉ではウランやプルトニウムが中性子を吸収し、二つの原子核に分裂することでエネルギーを発生する。核分裂で生じた原子核は中性子過剰なため、 β 崩壊を繰り返して、安定した原子核になる。1回の β 崩壊により1個の反電子ニュートリノが生成され、1個の核燃料原子核は安定になるまでにおよそ6回程度の β 崩壊をするため、一回の核分裂で平均6個の反電子ニュートリノが発生する。図2.3に ^{235}U の崩壊過程を示す[20]。

実際の原子炉からのニュートリノは4つの主な放射性同位体 (^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu) の β 崩壊により生成され、これらのニュートリノのエネルギー分布は図2.4のようになることがわかっている。表2.1に原子核崩壊における各核種の $\bar{\nu}_e$ の数と放出エネルギーを示す。

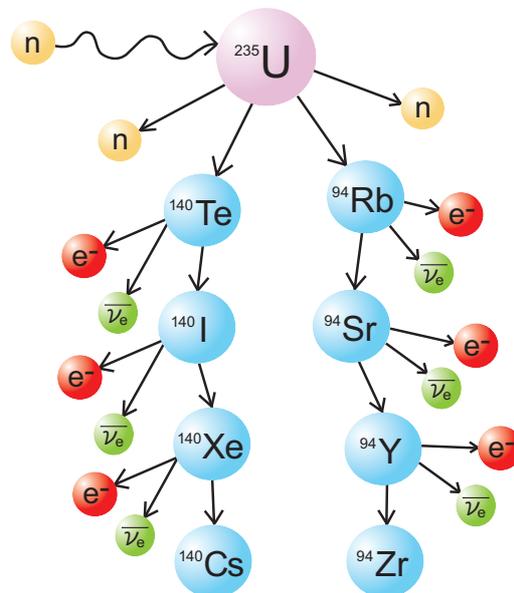


図 2.3: 原子炉内での ^{235}U の崩壊過程

	CHOOZ	Double Chooz
Reactor Power	~ 2%	negligible
Energy per fission	0.6%	negligible
$\bar{\nu}_e$ /fission	0.2%	negligible
ニュートリノ断面積	0.1%	negligible

表 2.2: CHOOZ 実験と Double Chooz 実験の原子炉由来の系統誤差

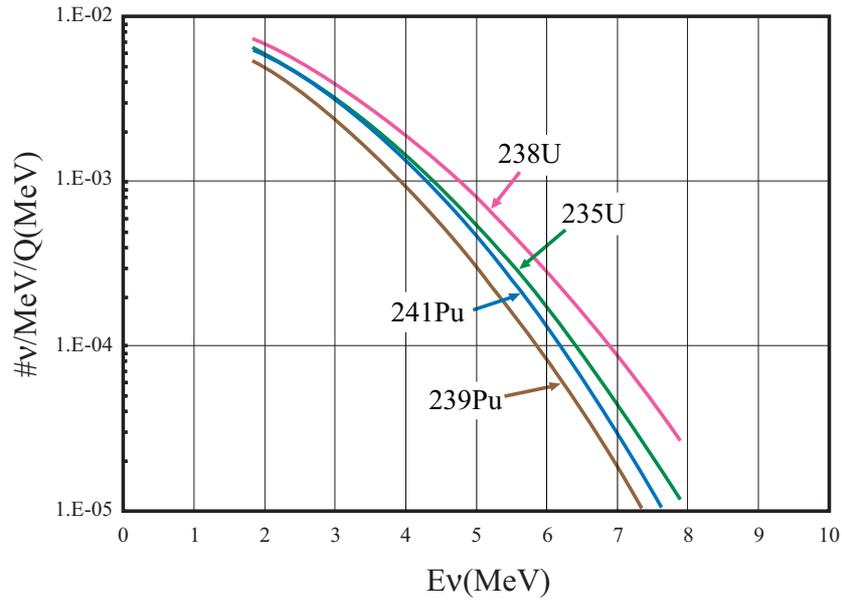


図 2.4: 主な核子から生成されるニュートリノのエネルギースペクトル

2.3 検出器

Double Chooz 実験では全く同じ構造で同じ作りを持つ二つの検出器でのデータ取得により、系統誤差を大幅にカットすることができる。表 2.2 に CHOOZ 実験と比較した原子炉由来の系統誤差を示す。図 2.5 に検出器の概略図を示す。また、検出器自体も CHOOZ 実験からアップグレードされており、より精度の高い測定を可能にしている。本節ではこの Double Chooz 検出器に関して述べる。

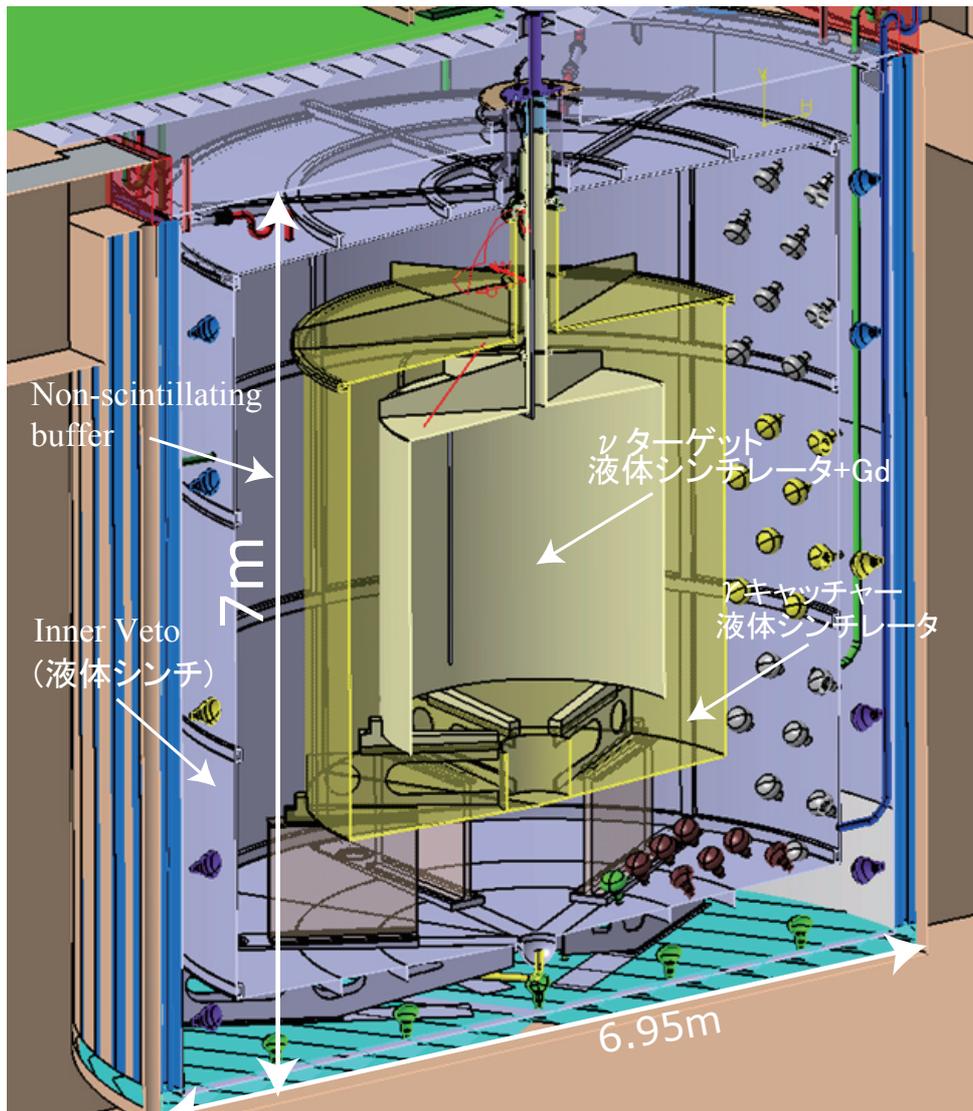


図 2.5: Double Chooz 検出器

2.3.1 検出原理

Double Chooz 実験ではニュートリノ信号を遅延同時計測法 (Delayed Coincidence) を用いて識別する。

まず CHOOZ 原子炉で発生した反電子ニュートリノは、ガドリニウム (Gd) を 0.1%含んだ液体シンチレータで満たされた検出器内の陽子と反応し、逆 β 崩壊を起こす。



この反応の閾値は 1.8MeV である。これにより陽電子と中性子が生成されるが、陽電子はすぐにターゲットタンク内の電子と対消滅反応をおこし、二本の γ 線を放出

する (Prompt Signal)。一方中性子は逆 β 崩壊から平均 $30\mu\text{sec}$ 後にターゲット内のガドリニウムに捕獲され、合計 8MeV の γ 線を放出し遅延信号を形成する (Delayed Signal)。この二種類の信号のエネルギーと時間差によりニュートリノシグナルとする。自然放射線で 8MeV を超えるものは無いため、この遅延同時計測法によってバックグラウンドを大幅に除くことができる。

また、この逆 β 反応では中性子の質量は陽電子に比べて十分に大きいため、ニュートリノのエネルギーのほとんどを陽電子が持ち去ることになる。よって Prompt Signal のエネルギーからニュートリノのエネルギーを見積もることができ、ニュートリノのエネルギーは

$$E_{\bar{\nu}_e} = E_{\text{prompt}} + 1.8(\beta_{th}) - 1.022(2m_e) \quad (\text{MeV}) \quad (2.2)$$

で表されることになる。

図 2.6 に検出原理の模式図を示す。また図 2.7 にはこの反応で検出されるニュートリノのエネルギー分布を示す。検出されるニュートリノは原子炉ニュートリノのエネルギー分布と逆 β 崩壊の反応断面積の関係より 4MeV 付近で多く観測される。

prompt signal

$$E_{\text{prompt}} = E - 1.8\text{MeV}(\text{threshold}) + 2m_e(1.0\text{MeV})$$

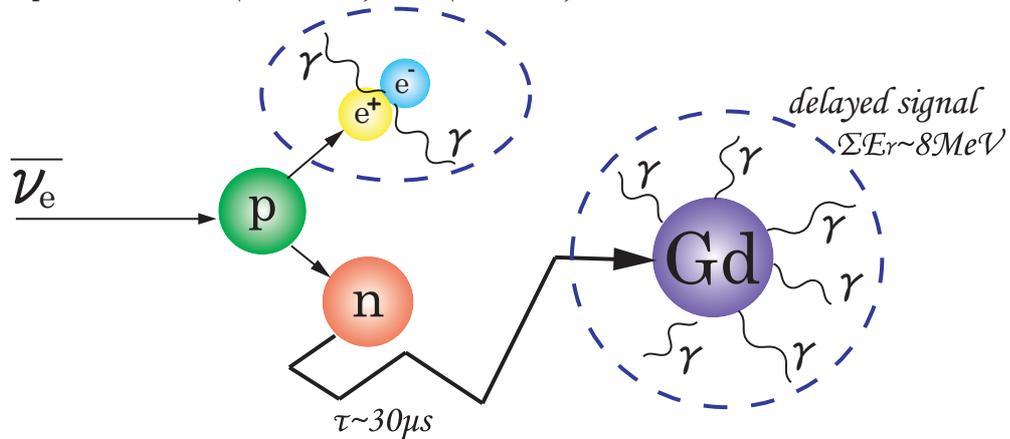


図 2.6: 逆 β 崩壊後の Prompt Signal と Delayed Signal の模式図

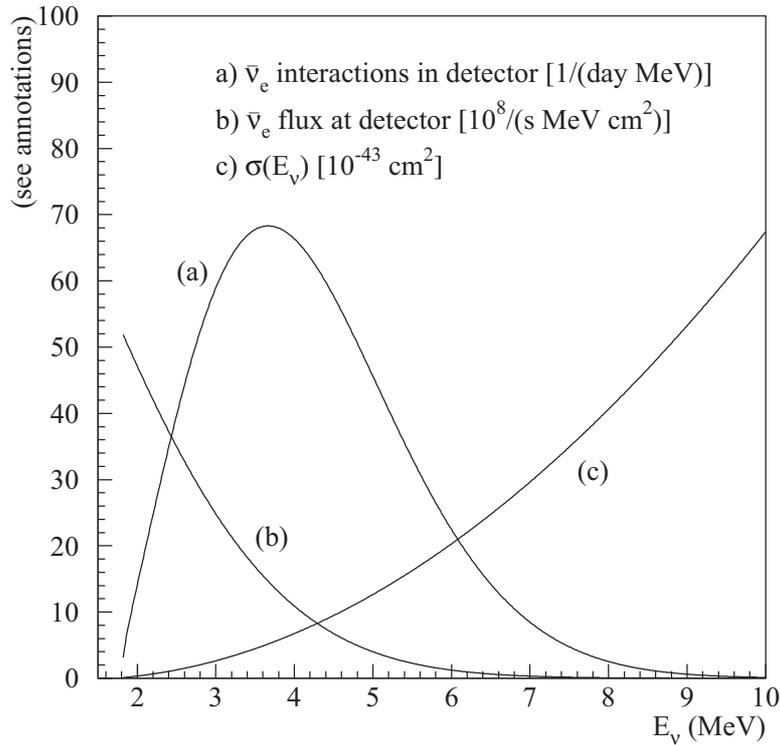


図 2.7: 原子炉ニュートリノのエネルギースペクトル。[21](a) 観測されるニュートリノのエネルギースペクトル (b) 原子炉ニュートリノのエネルギースペクトル (c) 逆β崩壊の反応断面積

2.3.2 ニュートリノターゲット

ニュートリノターゲット層は0.1%のガドリニウムを含む10.3m³の液体シンチレータで満たされている。液体シンチレータはPXE (phenyl-xylylene) とドデカン (C₁₂H₂₆) を20:80の割合で混合し、波長変換剤にbis-MSB、発光剤にPPOを用いたもので、発光量は約6000 photons/MeVである。

2.3.3 γキャッチャー

γキャッチャー層はターゲット層と同様の、22.3m³の液体シンチレータによって満たされておりガドリニウムを含まない。これによりターゲット層より逃げたγ線を確実に液体シンチレータでとらえることができる。γキャッチャーとターゲット層の容器はともに波長が400 nmを超える紫外光と可視光を透過するキャストアクリルでできている。このアクリル容器と液体シンチレータ間の化学的適合性が要求され、少なくとも実験が続く5年間は化学的に安定である必要がある。液体シンチレータの長期安定性はドイツのMPIKとイタリアのGran sasso研究所で

の測定が行われており、398日の測定において十分安定しているという結果が得られている。MPIK と Gran sasso で得られたデータを図 reffig:sinchi に示す。

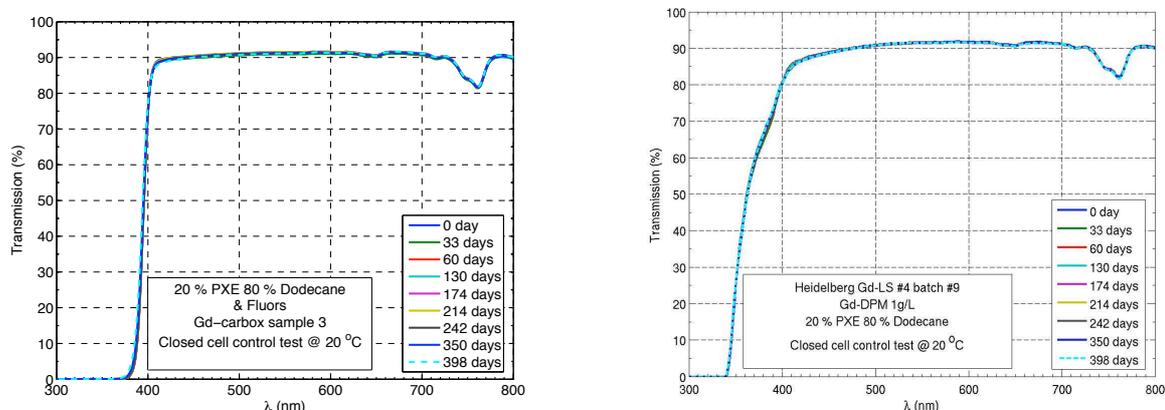


図 2.8: 液体シンチレータの長期安定性。横軸が波長で縦軸が透過率。

2.3.4 Nonscintillating Buffer

シンチレーション光を出さない 105 cm 厚のミネラルオイルで満たされた領域 (114.2 m³) は、主に PMT のガラスや、ブリーダー回路に含まれる放射性物質が起源のアクシデンタルバックグラウンド (2.4.1 節参照) の量を減らすためのものである。この領域があることで、ニュートリノターゲットと γ キャッチャー部の Prompt like background のシングルレートを 10 Hz 以下に保つことができると見積もられている。390 本のニュートリノイベント検出用の PMT はこの Buffer 層の外壁に取り付けられている。

2.3.5 光電子増倍管

Double Chooz 実験では、低バックグラウンド 10 インチ PMT を用いる。この PMT は南極大陸で行われている、宇宙から来る高エネルギーニュートリノを観測するための IceCube 実験において採用され、ここ数年大量に生産されているものである。大口径の光電子増倍管は全て手作りであるため、生産過程で諸特性が変化するという短所があるが、10 インチの場合は先に生産中であつたため、このような諸特性の変化量が少ないと見込まれている。また、検出器内の光電子増倍管には一本一本に μ メタルの磁気シールドを被せ外部磁場による PMT への影響をカットしている。

表 2.3 に R7081-Assy の基本特性を、図 2.9 に概観図と波長特性を示す。

項目	特性
波長領域	300nm～650nm
PhotoCathode	バイアルカリ (Sb-Rb-Cs)
ピーク波長	420nm
直径	φ253mm
Dynode 数	10
重量	約 1150g

表 2.3: 10 インチ PMT の基本特性 [22]

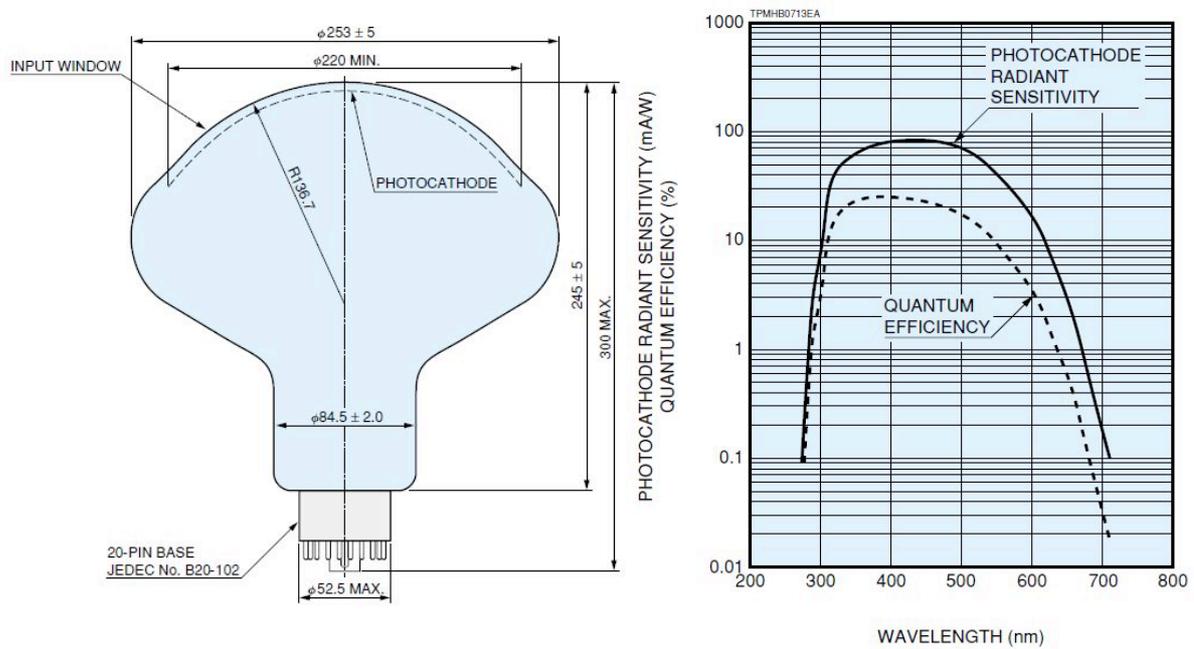


図 2.9: 低バックグラウンド 10 インチ PMT の波長特性 [22]



図 2.10: 実際の 10 インチ PMT の写真

2.3.6 Inner Veto

Inner Veto は $90m^3$ の液体シンチレーターで満たされた 50 mm 厚のバックグラウンド排除領域である。外壁は 170 mm の含有放射性物質の少ないスチールシールドで、検出器周りの岩盤からの自然放射線をカットする。またここには 78 本の 8 インチ PMT が設置されており、宇宙線ミュオン、それによる高速中性子など検出器外部からのバックグラウンドの同定のために用いられる。

2.3.7 Outer Veto

Outer Veto は検出器上部に 14.1×7.2 m、またトンネルの上部にも 3.2×6.4 m の広さで配置されたプラスチックシンチレーターストライプで、宇宙線ミュオンや、それによる高速中性子、核破砕反応で生じるバックグラウンドの同定のために用いられる。図 2.11 に Inner Veto, Outer Veto を用いることにより見込まれる高速中性子バックグラウンドの量の推移を示す。

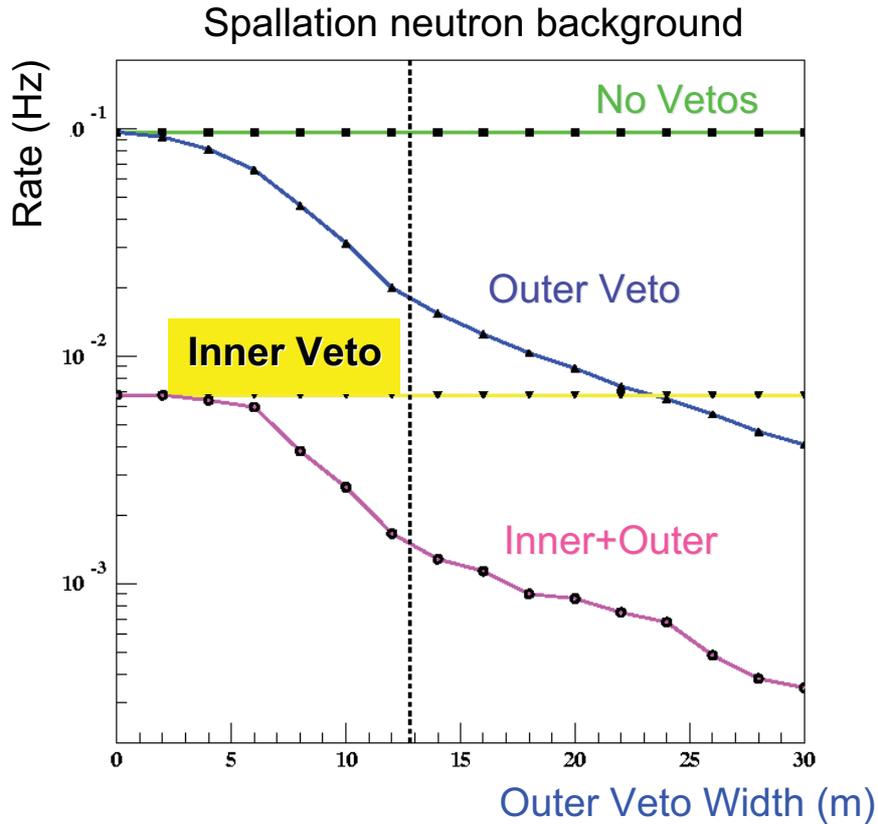


図 2.11: Inner Veto, Outer Veto を設置したときの高速中性子バックグラウンド量

2.3.8 検出器まとめ

表 2.4 に検出器の構造を、表 2.5 に検出器由来の系統誤差を CHOOZ 実験と比較してまとめる。

Inner Detector	Inner Diameter(mm)	Inner Height(mm)	厚さ (mm)	構成物	体積 (m^3)	質量 (tons)
Target	2300	2458	8	GD-LS	10.3	0.35
γ -Catcher	3392	3578	12(-15)	LS	22.6	1.1-1.4
PMTs	-	-	-	-	-	-
Buffer	5516	5674	3	オイル	114.2	7.7
Veto	6590	6640 \pm 100	10	LS	90	20
Shielding	6610	6660 \pm 100	170	Steel	-	300
Pit	6950	7000	-	-	-	-

表 2.4: Double Chooz 検出器の構造

			CHOOZ	Double Chooz
Reactor		Solid Angle	-	0.2%
Detector	H nuclei in target	Volume	0.3%	0.2%
		Fiducial Volume	0.2%	0
		Density		0.1%
		H/C	0.8%	0
Detector	Electronics	Deadtime	-	0%
Particle Identification	Positron	Escape	0.1%	0
		Capture	0	0
		Identification Cut	0.8%	0.1%
Particle Identification	Neutron	Escape	1.0%	0
		Capture(Gd)	0.85%	0.3%
		Identification Cut	0.4%	0.1%
Particle Identification	Antineutrino	Time Cut	0.4%	0.1%
		Distance Cut	0.3%	0
		Unicity	0.5%	0
Total			1.5%	0.5%

表 2.5: CHOOZ 実験と Double Chooz の検出器由来の系統誤差

2.4 バックグラウンド

Double Chooz 実験は過去最高精度での θ_{13} の測定を目指しており、そのためにはバックグラウンドの理解と除去が必要不可欠である。先にも述べたように Double Chooz 実験では遅延同時計測法によってニュートリノイベントを識別するが、バックグラウンドの中には、遅延同時計測法のカット条件を満たし、疑似ニュートリノシグナルとなりうるものがいくつか存在する。

前 CHOOZ 実験のデータから、Chooz site 付近でのバックグラウンドはある程度理解されており、以下ではその代表的なものについて述べる。

2.4.1 Accidental バックグラウンド

バックグラウンドの中には、遅延同時計測法の疑似 Prompt Signal になり得るものと、疑似 Delayed Signal になり得るものがあり、その二つが偶然に遅延同時計測法で設定した時間幅の中に入ってくることによってニュートリノ信号として認識されてしまうものがある。これを Accidental バックグラウンドと呼ぶ。

疑似 Prompt Signal になり得るものは、検出器内部での PMT やタンクからの γ 線、 β 線、および中性子などがあげられる。疑似 Delayed Signal は宇宙線ミュー

オンによる中性子が検出器内部やその周辺の土壌内の原子核と核反応を起こして生成される高速中性子が熱化しガドリニウムに捕獲されることによる。

この Accidental バックグラウンドは、Far 検出器が置かれる場所では CHOOZ 実験で 45 ± 2 /h と既に測定されている。この結果から、中性子イベントレートが Double Chooz 実験では 83 /h と見積もられている。

2.4.2 Correlated バックグラウンド

Accidental バックグラウンドに対し、疑似 Prompt Signal と 疑似 Delayed Signal が一つの物理過程から発生し、遅延同時計測法のタイムスケールに入ることによって疑似ニュートリノ Signal となるものを Correlated バックグラウンドと呼ぶ。理由は主に以下の二つが挙げられる。

高速中性子

宇宙線起源のミュオンが地殻の原子核などと反応をして生成される高速中性子が、検出器中心部のガドリニウムを含む液体シンチレータ（ニュートリノターゲット）内に進入する。この中性子が、液体シンチレータ中の陽子と衝突することでエネルギーを失い、最終的に Gd に捕獲された場合、Correlated バックグラウンドとなる。

高速中性子により衝突された陽子がシンチレータ中で発光し Prompt Like 信号となり、熱化した熱中性子が Gd に捕獲されて放出される γ 線が Delayed Like 信号となる。

核破碎反応

宇宙線ミュオンが、液体シンチレータ中で核破碎反応を起こし生成された不安定な原子核が崩壊し、 β 線や γ 線と共に中性子を放出した場合、 β 線や γ 線が疑似 Prompt 信号となり、中性子が熱中性子化した後に Gd に捕獲され疑似 Delayed 信号となる。これらにより、核破碎反応は Correlated バックグラウンドとなる。ただし、Correlated バックグラウンドの条件を満たす事象は主に以下の二つで、その他は崩壊はミュオン Veto や遅延同時計測のイベントセレクションによりカットすることが出来る。

- ${}^8\text{He}(t_{1/2}=119\text{ms}) \rightarrow n + e^- + {}^7\text{Li}$
- ${}^9\text{Li}(t_{1/2}=178\text{ms}) \rightarrow n + e^- + {}^8\text{Be}$
 ${}^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$

第3章 PMTの検出器設置時における性能評価テスト

Double Chooz 実験では 2010 年春のデータ取得開始を目指し後置検出器の建設作業が進行中であり、2009 年 11 月に検出器へのニュートリノターゲット層のアクリルタンクまでのインストール作業が完了した (図 3.1)。

先にも述べたように、DoubleChooz 実験において日本グループは光電子増倍管 (PMT) を担当している。PMT は浜松ホトニクス株式会社により一本一本手作業で生産される。そのため、個体差を持っており、精密測定実験で使用するにあたりその個体差を知っておく必要がある。現在までに日本グループは実験で使用するニュートリノ検出用の PMT 800 本のうち 400 本を購入し 1 本ずつ性能評価試験を行ってきた [23]。本章では 5 月～7 月にかけて行われた検出器への PMT の設置作業とその際行われた PMT の最終的な性能評価試験について述べる。

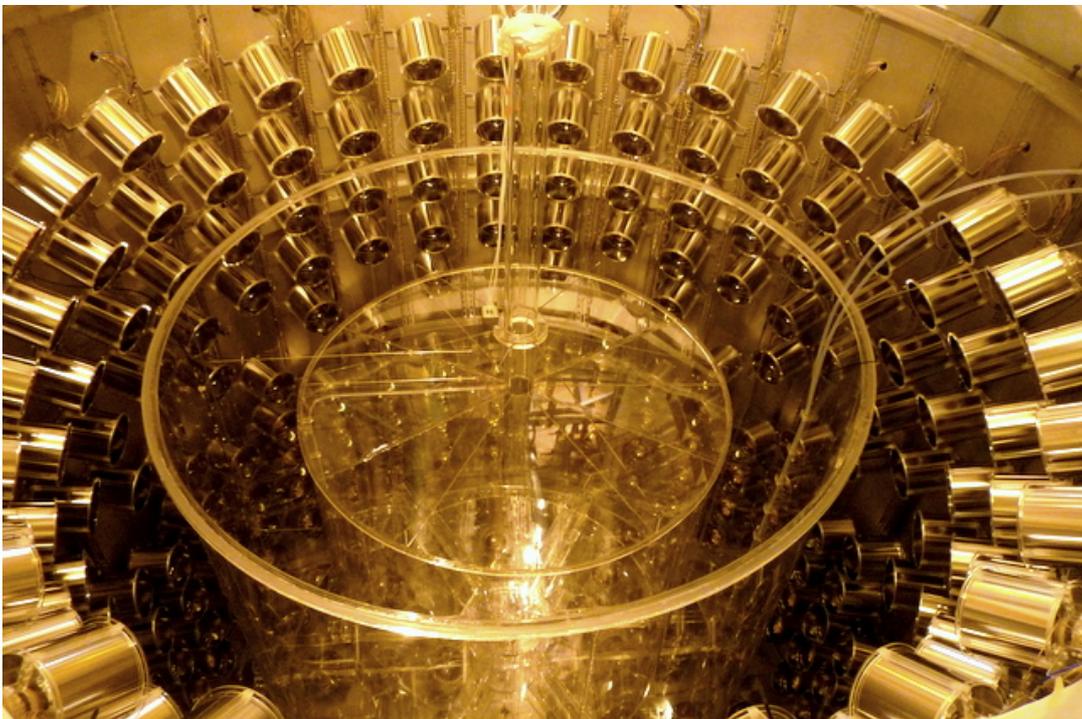


図 3.1: 後置検出機の建設状況

3.1 検出器へのPMT設置作業

2009年の5~7月にかけて後置検出器へのPMT設置作業が行われた。ここでは、ニュートリノイベント検出用のPMTのうち検出器の底と壁の部分に設置する330本のPMTの設置が日本グループ主導により行われた。後置検出器は原子炉の炉心から約1050mの地下に位置し、約150mのトンネルを通り検出器のある場所へと向かう。

PMT設置作業時に気をつけなくてはならないことはサイト内の清潔さを保つことである。そのため、一日二回以上の掃除機でのクリーニングを行い、検出器のあるテント内では常に空気清浄機が稼働していた。また、人がテント内に入るときは必ずクリーンウェア、クリーンシューズを着用することが義務づけられており、検出器のテント内をISO6[24]に保つことが要求された。他にトンネル内は湿度が常時90%以上と非常に高く、電子機器類を守るためにも常時除湿器を運転させていた。図3.2にPMT設置作業の様子を示す。

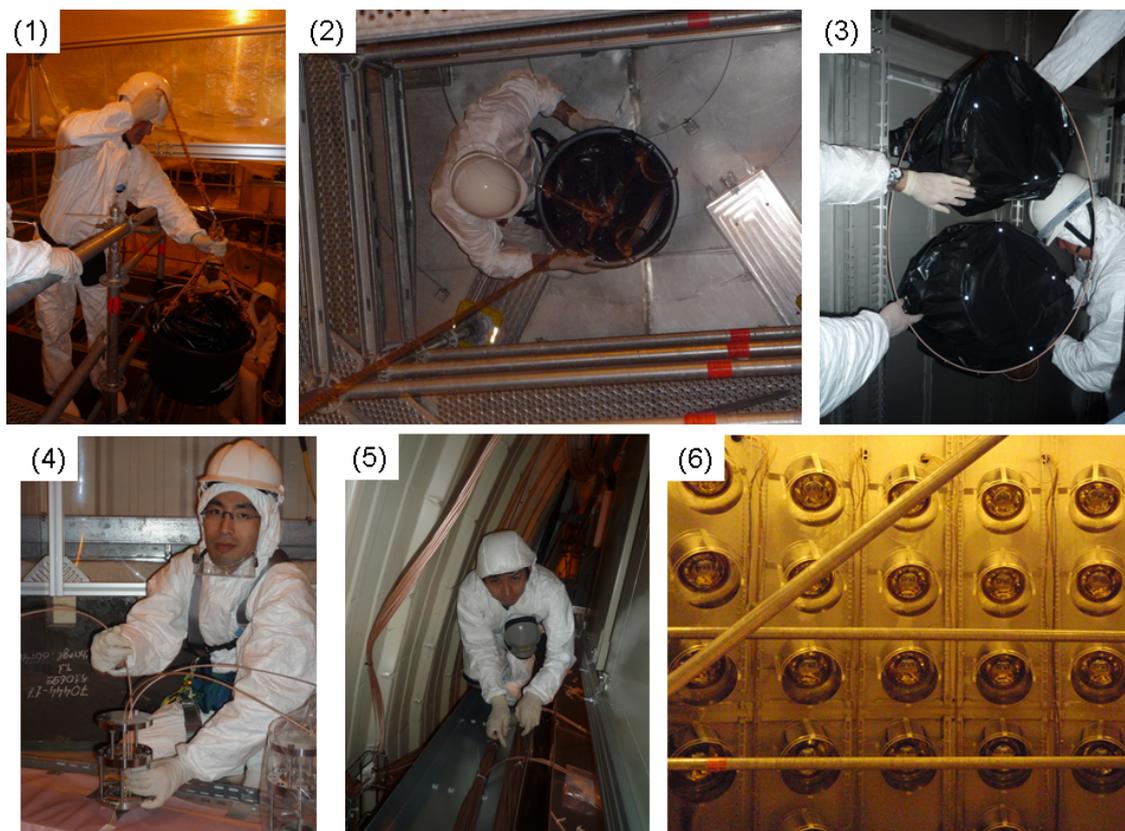


図 3.2: Buffer tank への PMT 設置作業。(1)PMT をバケツに入れ、Tank 内へおろす。(2)Tank 内で PMT を受け取る。(3)PMT を設置。(4) ケーブルをフランジへ通す。(5)Splitter box へのケーブルリング (6) 設置された PMT。

3.2 PMT 性能評価最終テスト

DoubleChooz 用 10 インチ PMT はドイツグループ、日本グループで各 400 本ずつ購入し、事前にそれぞれのグループで性能評価試験を行い、ドイツのハイデルベルク市にある MPIK(Max Prank Institute fur Kernphysik) に保管されていた。そこから Chooz 原子炉へと移され、PMT 設置作業までは屋外に置かれたコンテナの中に保管されていた (図 3.3)。この間の輸送や保管中におきた破損や異常を検出器への PMT 設置作業前に再度試験し確認しなくてはならない。

ここでは、PMT 設置直前に再度 PMT 一本ずつに高電圧を印加し、破損や異常を検査する。検査項目は、ADC による 1 光電子のスペクトルと、Dark noise rate である。

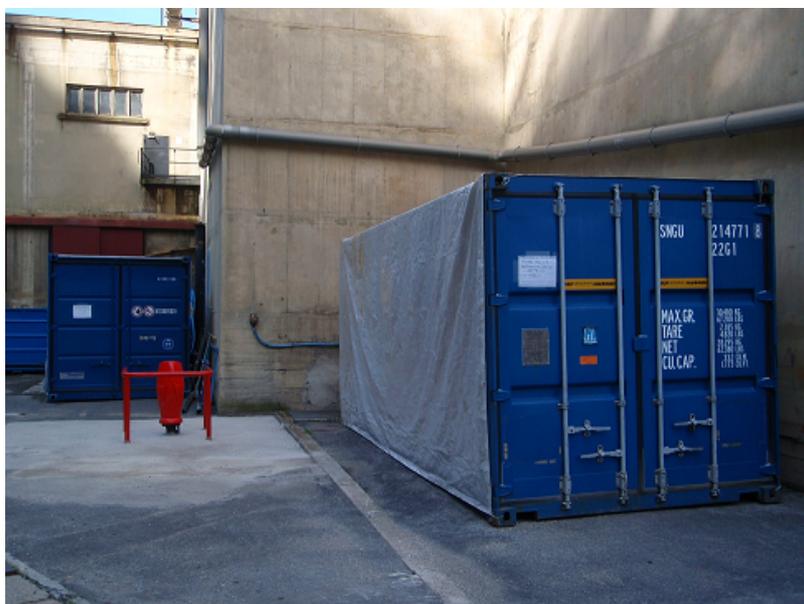


図 3.3: PMT 保存用コンテナ

3.2.1 一光電子スペクトル

DoubleChooz 実験では一光電子レベルのシグナルを十分に測定できる分解能が求められる。本測定では光源は使用せず、電圧印可後の PMT からのダークノイズを 1/4 光電子レベルを Threshold として ADC を用いて一光電子のスペクトルを取得する。また、同時にランダムトリガーによりペDESTAL のスペクトルを取得し、これらを Gauss 関数で fit し、 σ の値を評価することにより PMT の性能評価とした。

3.2.2 Dark rate

PMTは、光が入射していない状態でも、光電面やダイノードからの熱電子放出、管内の残留ガスのイオン化による電流などといった原因から、常に電流が流れている。これを暗電流と呼ぶ。微弱光を扱うPMTにおいては、これらはバックグラウンドとなり、実験結果に影響を及ぼす可能性がある。その為、個々のPMTがどれだけ暗電流を発生させるかを知る必要がある本測定は1/4光電子レベルをThresholdとしScalerを用いてダークノイズのレートを測定した。

図3.4に本測定における回路図を示す。

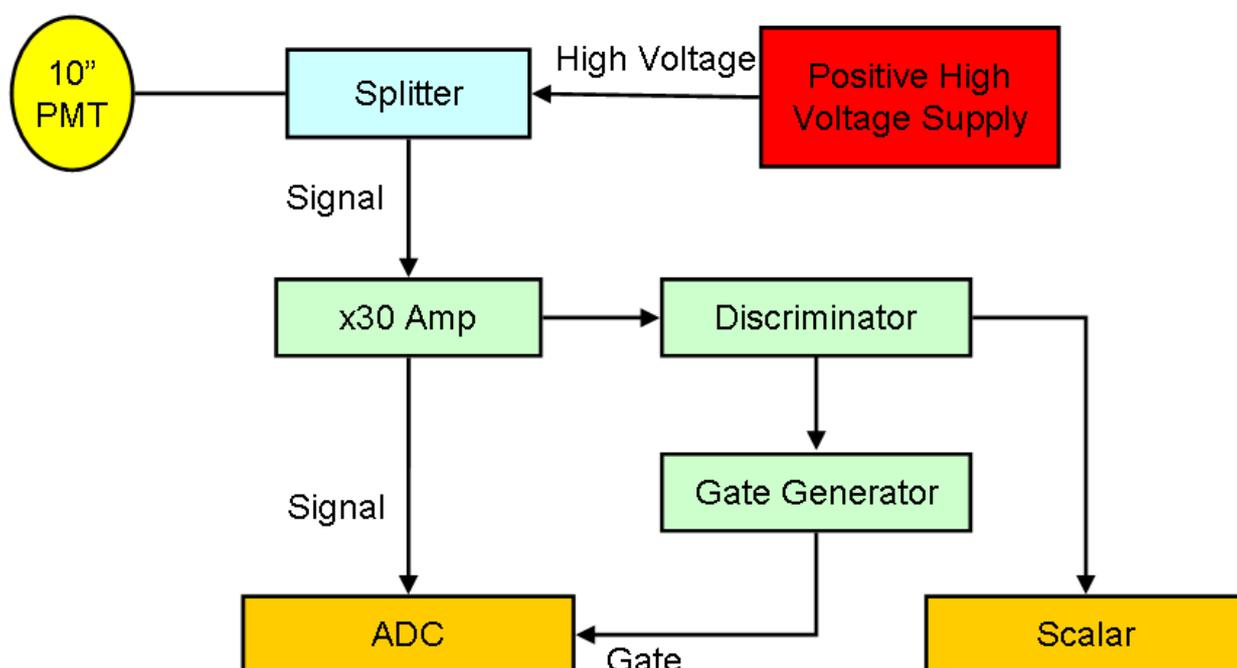


図 3.4: テスト回路のブロック図。ADC と Scaler で同時に測定する。

3.3 PMT 設置直前テスト (Pre test)

Pre test では PMT の設置直前の輸送や保存中の破損による不良の確認を簡単に行う。本測定では、PMT 一本ずつに事前の性能評価試験で得られた 1×10^7 のゲインが得られる電圧値を印加し、約 10 分間放置した後の ADC カウント値、Dark noise rate の値を評価する。測定において低い分解能や高い Dark noise rate を示したのものに関しては更に長時間の電圧印加を行いその後の振る舞いを確認した。

3.3.1 一光電子スペクトル

図 3.5 に全 PMT の ADC により得られた一光電子のピークを Gaussian で fit したときの σ の値のプロットを示す。この中で、一つの PMT (JP1090 図 3.6) で他の PMT に比べ分解能の悪いものがあり、実験での使用からの除外を決定した。

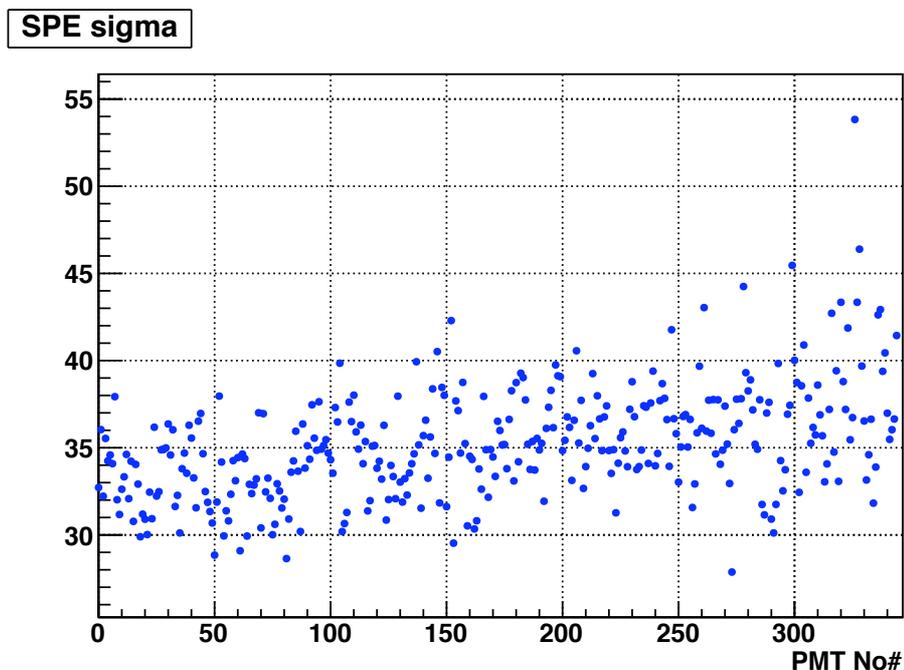


図 3.5: 全 PMT の SPE スペクトルを Gaussian でフィットした時の標準偏差

3.3.2 Dark rate

図 3.7 に全 PMT の 10 分後の Dark count rate のプロットを示す。この中で比較的 Dark rate の高かったものに関しては更に 1 時間の電圧印加を行い、振る舞いを確認した。その結果、3 本の依然として高い Dark rate を見せていた PMT が確認され、スペア PMT として保持することが決まった。(図 3.8)

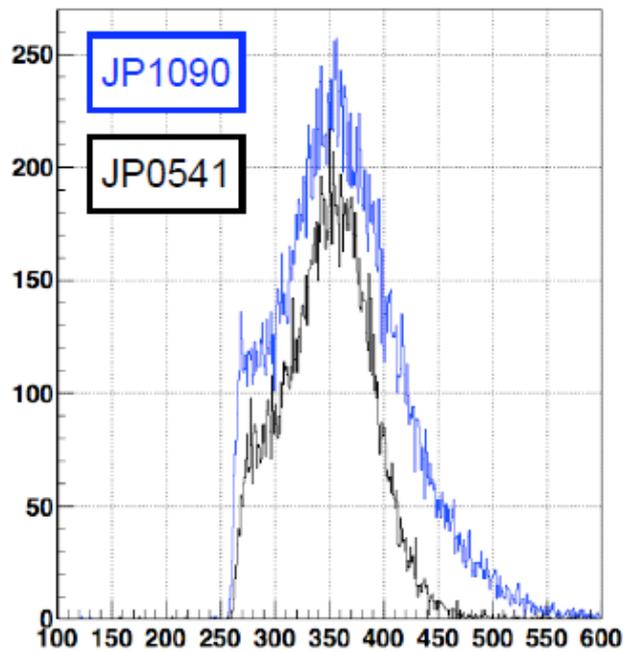


図 3.6: (青)JP1090 の SPE スペクトル (黒) 比較の為に JP0541

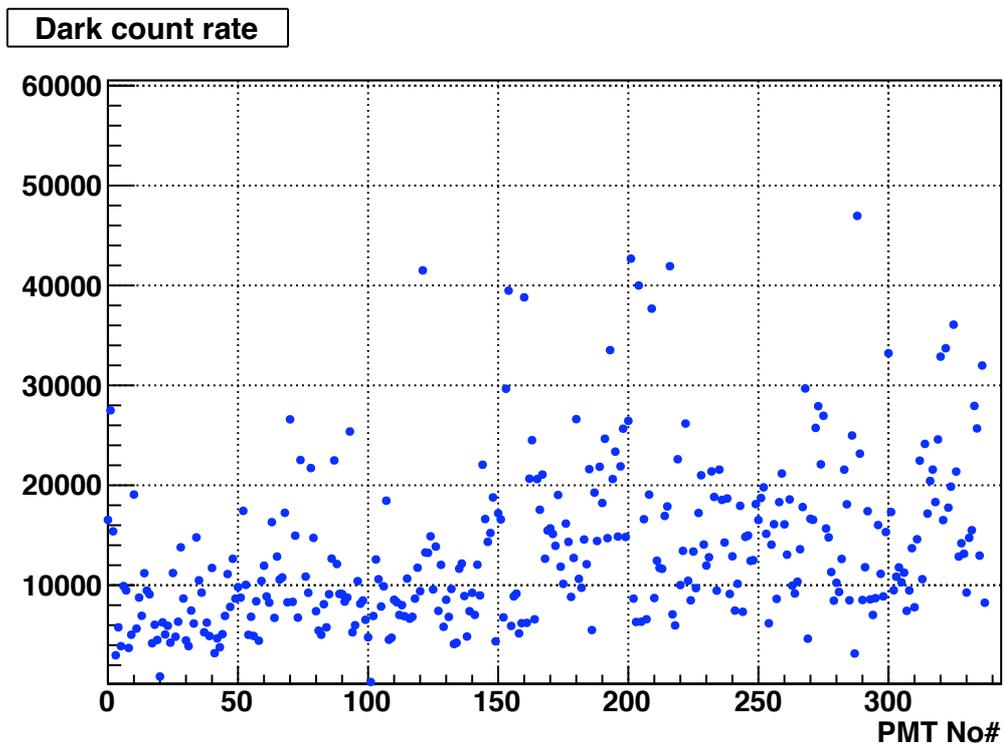


図 3.7: 電圧印可 10 分後の Dark rate。高いものに関しては更に 1 時間の電圧印可
を行い確認。

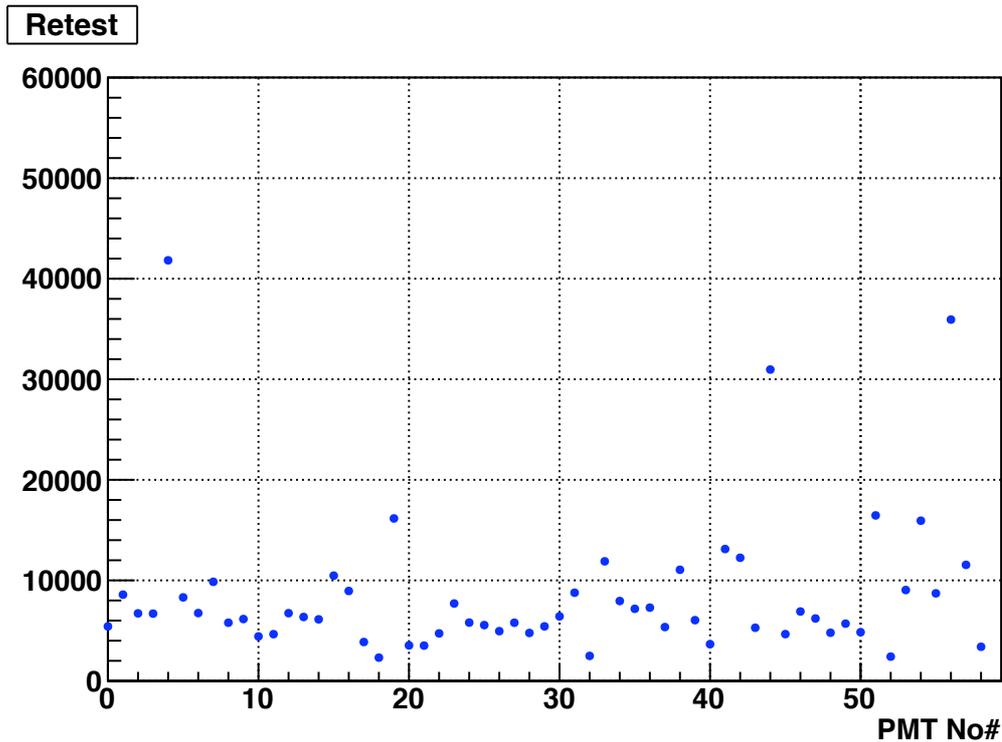


図 3.8: 更に 1 時間電圧印可を行った後の Dark rate。30kHz を超えている 3 本に関してスペア PMT として保持を決定。

3.3.3 Pre test まとめ

ADC の一光電子のスペクトルの評価から、1 本の PMT を実験での使用から除外した。Dark count rate の高さから 3 本の PMT をスペア PMT として保持することが決まった。

3.4 PMT 設置直後のテスト (Post test)

Post test では PMT 設置作業中に起きた事故による破損や設置ミスなどの確認を目的としている。電圧印可時間は Pre test とは異なり、測定の前日に全ての PMT に 1×10^7 ゲインの得られる電圧値を印加し一晩放置し、10 時間以上経過した後の状態での測定となる。測定項目は Pre test と同様である。

また、本測定では検出器のフタの部分を閉じることができなかつたため、電圧印可中の PMT への強い光が入射するのを防ぐため、検出器の上部をブラックシートで覆い、実験サイトの全ての照明を落とし 8 本のシグナルケーブルを用いて 8 本の PMT の測定を同時に行った。

また、本測定で使用した高電圧電源、Splitter box は本実験で使用するものを用いており、それらの検査も兼ねている。

3.4.1 Dark rate

Dark rate において不安定な振る舞いを示すものが見つかった。(図 3.11) この不安定な振る舞いは Pre test 時には見られなかったもので、PMT 設置作業中による何らかの破損があったものと思われる。この PMT は別の PMT への取り替えが行われた。

図 3.10 異常 PMT を取り替えた後の Post test 時の Dark count rate 全 330 本のプロットを示す。電圧を印可して 10 時間以上経過しているのに全ての PMT で Dark rate は 2kHz 程度以下にまで減少しているのが見て取れる。

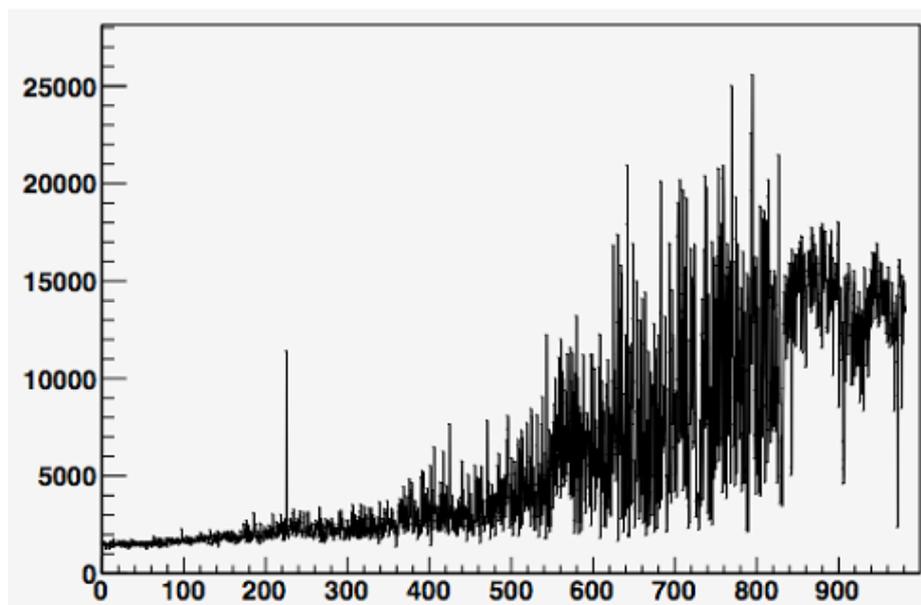


図 3.9: 不安定な Dark rate が確認された GE0171

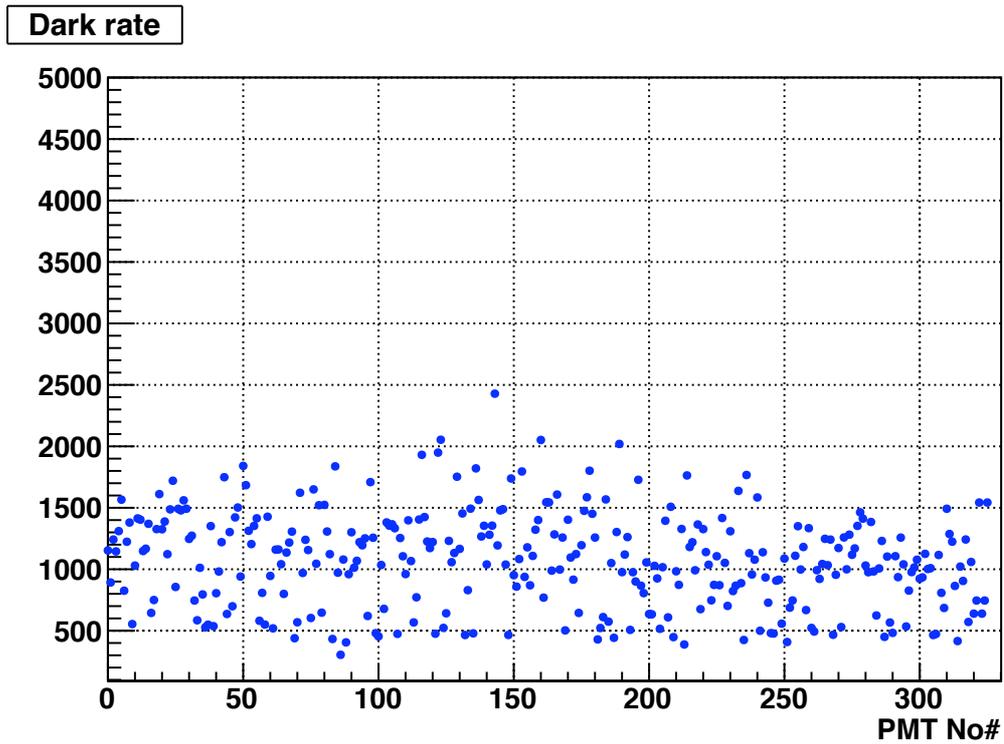


図 3.10: Post test 時の全 PMT の Dark rate。

また、図??には事前の個別性能評価試験で行なわれた 10 時間の電圧印可後の Dark rate の値との比較を示す。ここで見られるように、事前の個別試験よりも低い Dark rate であるという結果が得られた。これは実験サイトはトンネル中の地下であるため外部ノイズが少ないこと、個別試験時の室温よりも実験サイト内がわずかではあるが低温であることなどが考えられる。いずれにせよ検出器内に設置された PMT からのデータ取得に問題が無いことが確認できる。

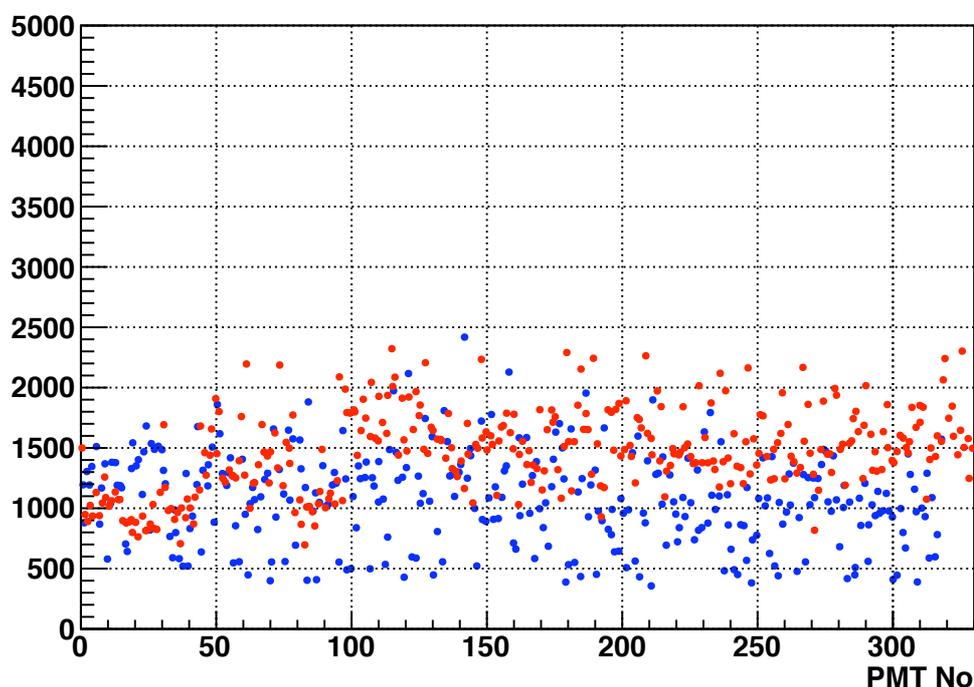


図 3.11: 事前の個別試験で得られた結果との比較。赤が事前個別性能評価試験、青が Post test

3.4.2 Post test まとめ

ADC による一光電子のスペクトル評価において異常を示す PMT は確認されなかった。1 本の PMT を不安定な Dark count rate のため実験での使用から除外した。その他のものに関しては事前の性能評価試験で得られている結果との相関が確認できたので、本実験での使用は問題ないと判断した。

3.5 PMT 以外の異常

Post test においては PMT の異常の確認以外にも実験で使用することになっている高電圧電源モジュール、Splitter box の異常が見つかった。高電圧電源モジュールに関して、コネクタ部分のピンに破損があるものが見つかり複数のモジュールの特定のチャンネルで印可電圧が不安定になるものが確認され、1つのモジュールでは全く電圧を印加することができなくなった。これらの異常は事前に行われた性能評価試験では確認されていなかったものである。

コネクタピンの破損については輸送中の破損であると思われる。電圧印加不可、電圧値の不安定さに関しては Post test での使用の直前には異常が確認されず、Post test 中、Post test 終了後に異常が確認された。原因として、当時の実験サイト内は3台の除湿器を常に稼働させ続けサイト内の湿度を約60%前後に保っていた。しかし、サイトテントの外やトンネル内に出ると湿度は90%を超えるほどのものであり、この中に数日高電圧電源を保持されていた期間があり、その間にダメージがあったものと思われる。

その他、ペDESTルの幅が広い Splitter box が確認され、取り替え作業が行われた。

3.6 まとめ

表3.1に Pre test, Post test 時に見つかった異常モジュールのリストを示す。2本のPMTを実験での使用から除外し、1つのSplitter boxの異常を確認した。また、3本のPMTを予備PMTとして保持することを決め、5つのHVモジュールの異常を確認し、修理を依頼した。

高電圧電源モジュール16モジュール中、実に5モジュールで異常が見られた問題については、主に実験サイトでの使用中において起きたものであると思われるため、実験サイトでの保管の方法を再検討する必要があると思われる。

全体として初めて実験サイトにおいて検出器内に設置されたPMTからのシグナル取得を実験で使用するSplitter box、高電圧電源と共に行いそれぞれの実験での使用に問題が無いことが確認できた。

PMT	JP1090	SPE resolution	除外
	GE0171	不安定 Dark rate	除外
	JP0856	初期 High Dark rate	予備として保持
	GE0615	初期 High Dark rate	予備として保持
	GE1149	初期 High Dark rate	予備として保持
HV module	127	コネクタピンの破損	修理を依頼
	145	1800V 付近で電圧が不安定	修理を依頼
	178	電圧印加不可	修理を依頼
	324	複数チャンネルが不安定	修理を依頼
	328	複数チャンネルが不安定	修理を依頼
Splitter box		wide pedestal	除外

表 3.1: PMT 設置作業時のテストでの異常モジュール

第4章 Double Chooz 実験用高電圧電源の性能評価

Double Chooz 実験ではニュートリノイベント検出用に Buffer Tank 内に 390 本の 10 インチ PMT を、宇宙線や高速中性子バックグラウンド同定用の Inner Veto 層に 78 本の PMT を設置する。日本グループはこれらの PMT への電圧印加のための高電圧印加電源を担当している。

本実験で使用する高電圧電源は CAEN 社製の、メインフレームは SY1527LC[25] を、モジュールには A1535[26] を使用することになっている。現在日本グループでクレート 4 台とモジュール 19 枚を購入し、1 クレート 16 モジュールはフランスの Saclay 研究所において、3 クレート 3 モジュールは日本において新潟大、東京工業大学、首都大学東京でそれぞれ 1 クレート 1 モジュールずつ性能評価試験を行った。

本章では CAEN 高電圧電源とその性能評価試験の結果について報告する。

4.1 CAEN 高電圧電源

本実験で使用する高電圧電源に求められる性能としては、

- 多チャンネル電源
- 最高 1600V 程度の電圧印加が可能
- 低ノイズ
- 安定性
- 信頼性

などがあげられる。これらの要求を満たす物として、Double Chooz 実験でははイタリアの CAEN 社製の SY1527LC フレーム、A1535P モジュールの使用を決めた、CAEN 社の高電圧電源は LHC などの種々の高エネルギー実験で使われている実績を持つ。講演用電源の詳細を以下の節で述べる。

4.1.1 SY1527LC

SY1527LC は高電圧電源モジュールのためのメインフレームである。このフレームには最高で 16 個のモジュールを設置する事が出来る。メインフレーム自体に CPU を搭載しており、メインフレームに直接キーボードやディスプレイを接続する事ができ、それにより設置されたモジュールを CAEN 独自の OS で操作、モニタリングすることができる。モニターできる量としては、印加電圧値、電流値等である。また、ネットワークインターフェイスとして Ethernet、RS232、CAENET が使用することができ、外部のコンピュータと通信することによりプログラマブルに高電圧値を操作する事も可能である。

このメインフレームは電圧 100~230 V, 周波数 50~60 Hz の電源で使用することができ、すなわち、日本でもフランスでも変圧器無しで使用できる。

図 4.1 に SY1527CL の写真を示す。表 4.1 に基本性能表を示す。



図 4.1: SY1527 crate

4.1.2 A1535P

A1535P モジュールは SY1527LC にスロット形式で取り付けるモジュールである。グラウンドは共通で一つのモジュールには 24 チャンネルの出力があり、これにより SY1527 クレート一つあたり 384 チャンネル分の電圧出力を得ることができ

Packing	-19" wide,8U-high Euro-mechanics rack; -Depth:720mm
Weight	-Mainframe:24 kg
Power requirements	Voltage range: 100/230 V Frequency:50/60 Hz Power: 3400W
Max number of boards per crate	16
Max number of power supply units per crate	3
Max out put power	2250W
Operating temperature	From 0°C(dry atmosphere) to +40°C
Storage temperature	From -20°C(dry atmosphere) to +50°C

表 4.1: CAEN SY1527 基本特性

る。Double Chooz 実験では一つの検出器あたり 2 クレート、20 モジュールを使用することになっている。

A1535P モジュールの印加最高電圧値は 3.5 kV で、最高電流値は 3 mA/ch である。また、電圧印加の上昇、下降の速度を 1 ~ 500 V/sec の幅で設定することができる。個々のチャンネルで印可電圧、電流値をモニターでき、印可電圧の最高値はフロントパネル部分にあるポテンショメータでモジュール単位で設定可能で、ソフトウェア的にも設定することができる。また、電流の最高値はソフトウェア上で設定可能で、過電流時には自動で電源が落ちるか一定の電流を保つようにするかを選ぶことができる。

A1535 モジュールの出力には Radial 社製 52 pin コネクタが使われており、patch panel 図 (4.3) と呼ばれる変換 box を用い 24 チャンネルの SHV コネクタへ変換している。

図 4.2 に A1535P モジュールの写真、表 4.2 に基本特性を示す。



图 4.2: CAEN A1535 module



图 4.3: Patch panel

Polarity	Positive
Output Voltage	0~3.5 kV
Max. Output Current	3 mA
Voltage Set/Monitor Resorution	0.5 V
Current Set/Monitor Resorution	500 nA
Hardware Voltage Max	0~3.5 kV
Hardware Voltage Max accuracy	± 2 % of Full Scale Range
Software Voltage Max	3.5 kV
Software Voltage Max accuracy	1 V
Ramp Up/Down	1 ~ 500 V/sec, 1 V/sec step
Voltage Ripple	<20 mV typical; 30 mV max
Voltage Monitor vs. Output Voltage Accuracy	typical: ± 0.3 % ± 0.5 V max: ± 0.3 % ± 2 V
Voltage Set vs. Voltage Monitor Accuracy	typical: ± 0.3 % ± 0.5 V max: ± 0.3 % ± 2 V
Current Monitor vs. Output Current Accuracy	typical: ± 2 % ± 1 μ A max: ± 2 % ± 5 μ A
Current Set vs. Current Monitor Accuracy	typical: ± 3 % ± 1 μ A max: ± 2 % ± 5 μ A
Maximum output power	8W(per channel, soft ware limit)
Power consumption	310 W @ full power

表 4.2: CAEN A1535 基本特性

4.2 出力電圧値測定

CAEN A1535 モジュールは1V単位でソフトウェア上で出力電圧値を設定でき、モニター機能の分解能は0.5Vである。ソフトウェア上で設定した電圧値が正しく出力されているかどうか、またモニターできているかを100V単位で確認した。試験の回路の概念図を図4.4に示す。また使用したディバイダー回路の写真を図4.5に示す。印可電圧値測定試験は、日本での試験では高圧プローブを用いて測定を行った。Saclayでのテストでは高圧プローブが用意できなかったために、1/1000ディバイダー回路を用いて実際に印可されている電圧の1/1000の値を読み取ることで測定を行った。

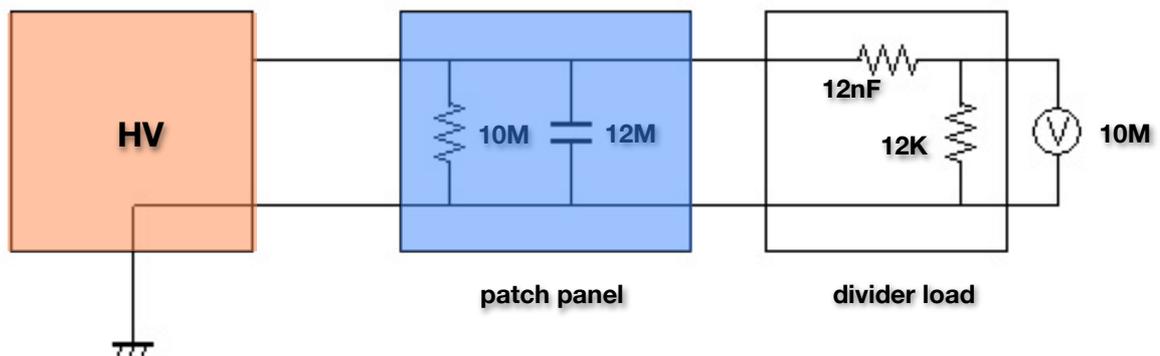


図 4.4: 出力電圧値測定回路



図 4.5: Divider 回路

フランスにおける性能評価試験

本性能評価試験はフランスの Saclay 研究所の協力の下、16 台のモジュールに対して行われた。測定は 16 モジュール全てを SY1527 クレートにセットし、全てのチャンネルに等しい電圧を印可して測定した。ただし、パッチパネルに接続されているモジュールは測定中の一台のみでその他のモジュールは何にもコネクタされていない。

図 4.6、図 4.7 に電圧のモニター値、測定値のプロットを示す。この測定において 2 つのチャンネルが設定値から大きくずれていることが確認され、この二つのモジュールに関しては CAEN 社へ返送し、修理を依頼した。その他のチャンネルに関してはモニター値と測定値の差は最大で 4V、平均値は測定値がモニター値に対して +1V であった。光電子増倍管の増幅率 μ は

$$\mu = AV^\alpha \quad (4.1)$$

で与えられ、これにより電圧が ΔV だけ変化したときの増幅率 $\Delta\mu$ は、

$$\mu + \Delta\mu = A(V + \Delta V)^\alpha \quad (4.2)$$

$$\approx A(V^\alpha + \alpha V^{\alpha-1} \Delta V) \quad (4.3)$$

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = \alpha \frac{\Delta V}{V} \quad (4.4)$$

と表されることになる。

Double Chooz 実験で使用する 10 インチの光電子増倍管では増幅率が 10^7 となる電圧を印加し、そのときの印加電圧は約 1300~1600V であり α は約 8 なので [23]、印加電圧が設定値から 4.0 V 変化した場合、増幅率の変化は約 2 パーセントに相当し、1 V では 0.5 パーセントの変化に相当する。共同研究者等により光電子増倍管の増幅率の変化が全体として 2.5 % 以下であればエネルギー較正において問題が無いとの study がなされており [27]、本測定の値は実験での使用に関して十分小さい値であると言える。

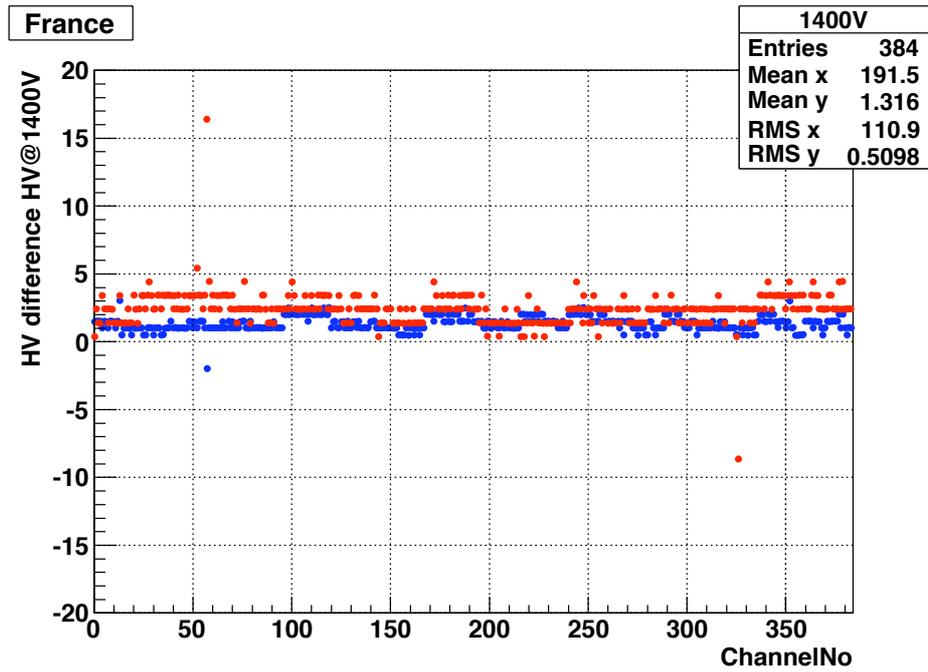


図 4.6: 1400V 印可時の電圧値のずれ。青はモニター値、赤はテスターでの測定値

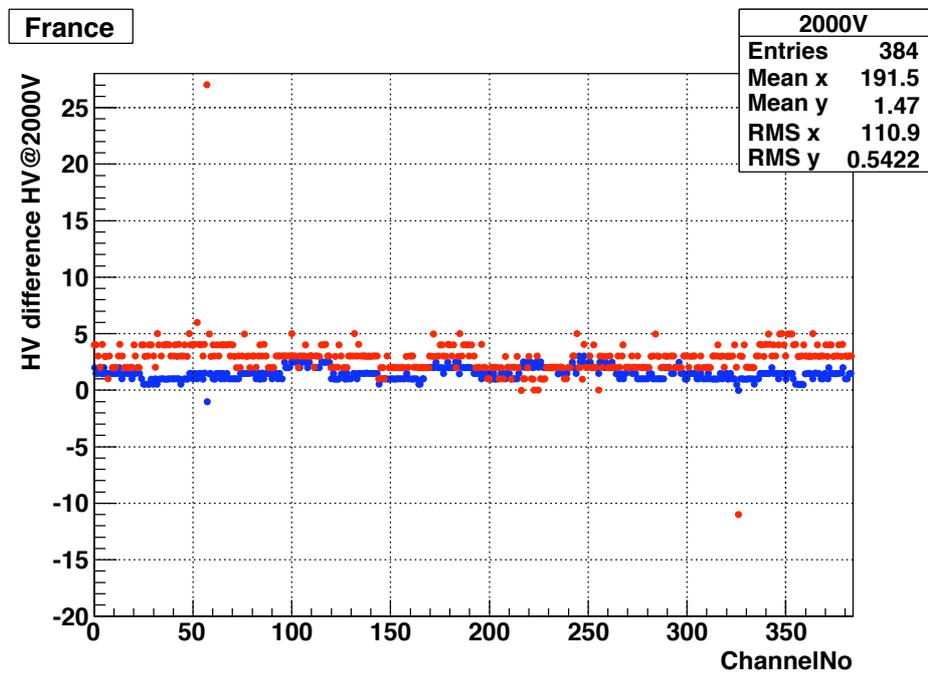


図 4.7: 2000V 印可時の電圧値のずれ。青はモニター値、赤はテスターでの測定値

日本における性能評価試験

日本での試験は新潟大、東京工大、首都大において、それぞれ1クレート1モジュールずつ高圧プローブを用いて測定を行った。各測定結果を図4.8に示す。この3クレート3モジュールに関してはモニター値と測定値のずれは4 V以内に収まっており、大きなずれを持つものは確認されなかった。

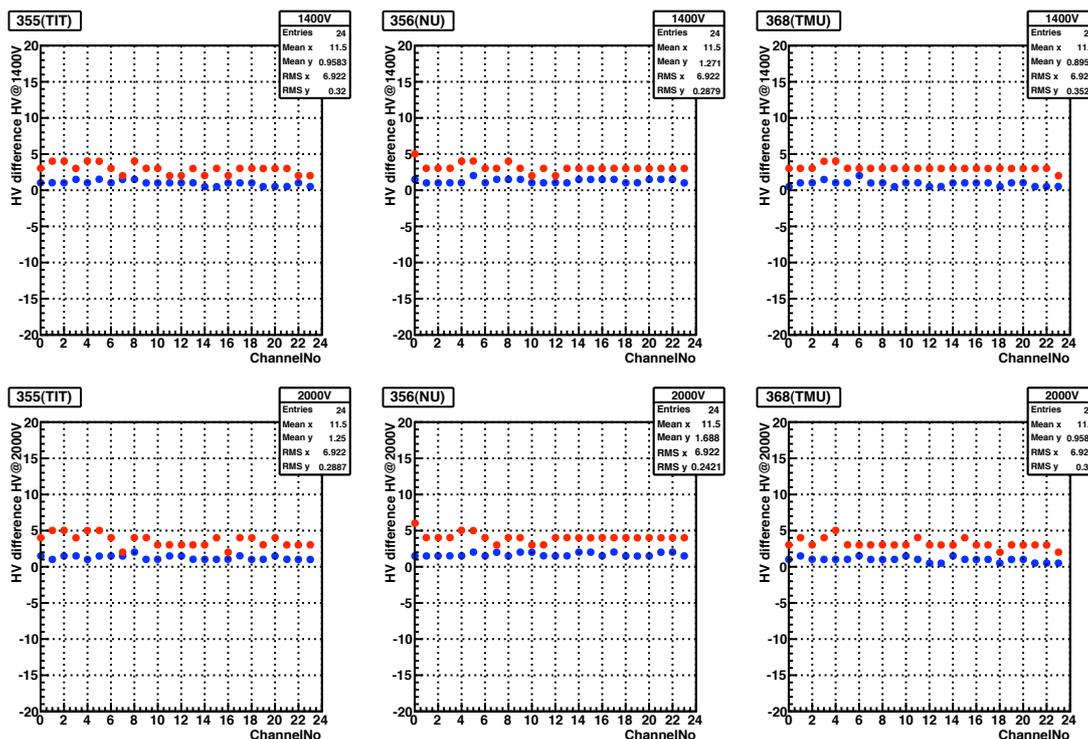


図 4.8: 日本での電圧値測定。青はモニター値、赤はテスターでの測定値。上段は 1400 V 印加時、下段は 2000 V 印加時

4.3 ノイズ測定

本実験で使用する 10 インチ PMT は電圧印可とシグナルの読み出しを同一のケーブルで行い、Splitter box を用いてそれらを分離して測定する仕組みをとっている。理由は検出器内での Dead volume を減らせること、検出器からのケーブルの本数が少なくすむこと、高電圧電源とシグナルケーブル間のグラウンドループの影響をおさえられることなど様々だが、これにより高電圧電源由来のノイズが PMT からのシグナルに混ざってしまうことが十分に考えられる。

また Double Chooz 実験では PMT からのシグナルを 1/4 SPE (Single Photo Electron) レベルの Threshold をもって検出するので、高電圧電源由来のノイズが本実

験で使用する上で十分小さいものであるかどうかを検査する必要がある。
 本測定は電圧値測定と同様、フランスの Saclay 研究所と日本の各大学で行われた。

4.3.1 ダイレクトノイズ測定

ダイレクトノイズ測定の回路を図 4.9 に示す。基本性能表 [表 3.2] にもあるように CAEN A1535 モジュールの Voltage Ripple は基本的には 20 mV 以下、最高でも 30 mV であるとなっている。

本試験では高電圧電源由来のノイズをデカップリング回路を通した後、オシロスコープで波形を取得し、ノイズ波形の Peak to Peak 値を評価した。使用したパッチパネル、デカップリング回路、各ケーブル、またそのコネクタ部分はアルミ箔で覆い、外部からのノイズの影響を極力減らした。図 4.10 4.11 ダイレクトノイズ測定では CAEN 高電圧電源が要求性能を満たしているかを評価することになる。

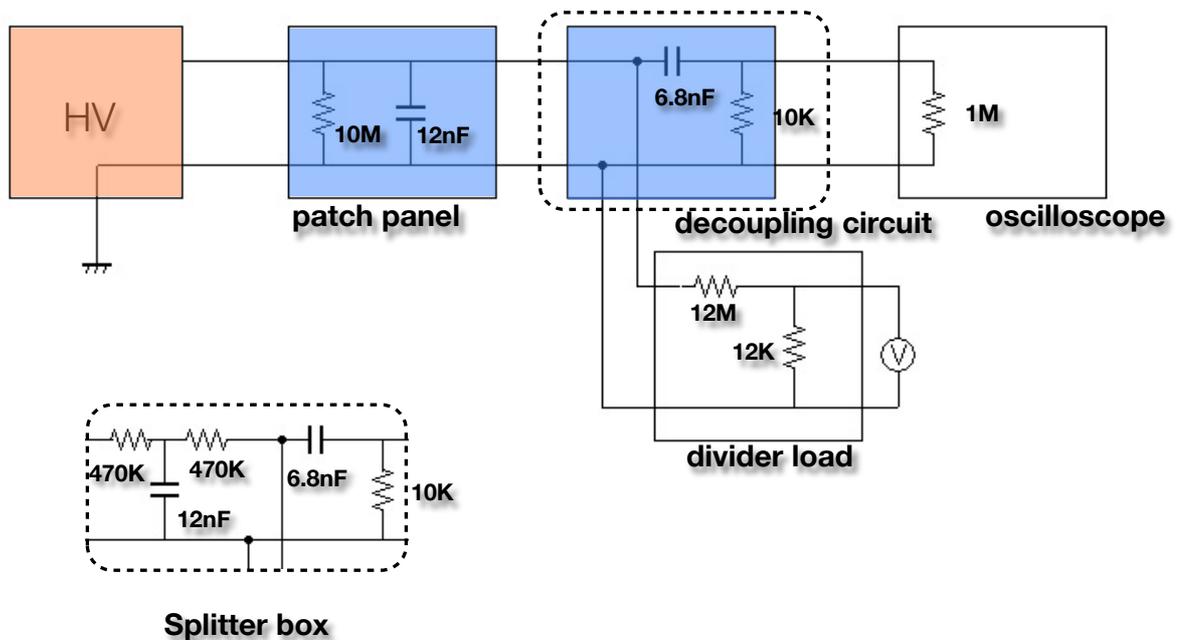


図 4.9: ノイズ測定の回路図。回路はダイレクトノイズ測定時、Splitter 回路を用いたノイズ測定時には点線部分が左下の Splitter 回路に置き換わる。

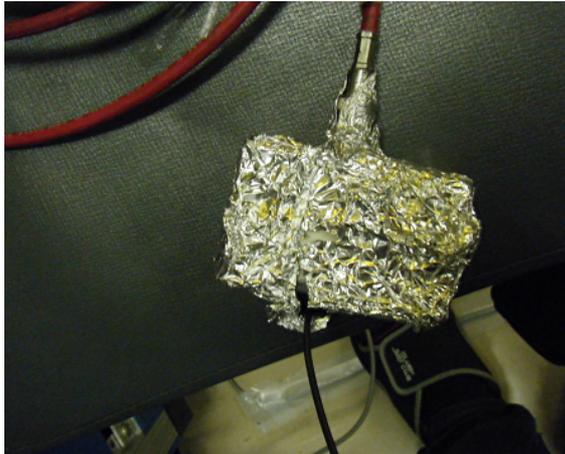


図 4.10: デイバイダー回路のシールド

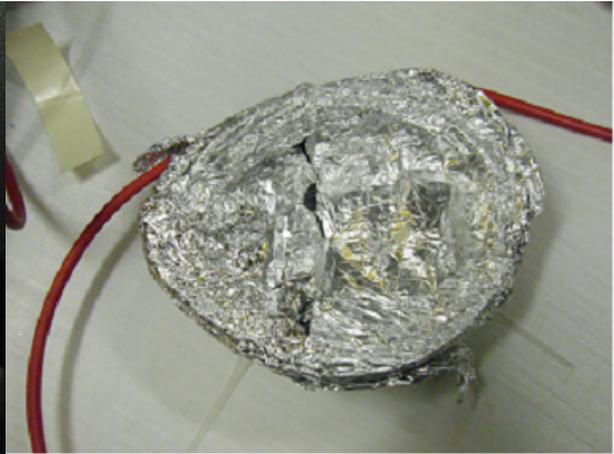


図 4.11: ケーブルのシールド

フランスでの性能評価試験

本測定は電圧値測定と同様、16 モジュール全てをクレートへセットし、全てのモジュールに 2000 V の電圧を印可して測定を行った。2000 V とは CAEN 社が独自に行った性能評価試験と同様の条件である。図 4.12 にノイズ波形の一例を、図 4.13 に全てのチャンネルで得られたノイズの Peak to Peak 値のプロットを示す。

この測定において、全 384 チャンネル中 72 チャンネル (19%) においてノイズが 30 mVpp を上回る結果が見られた。測定は二週間かけて行われ、外部ノイズの遮断、グラウンドの強化などの努力を続けたが、ノイズがこの結果以下になるまでには至らなかった。

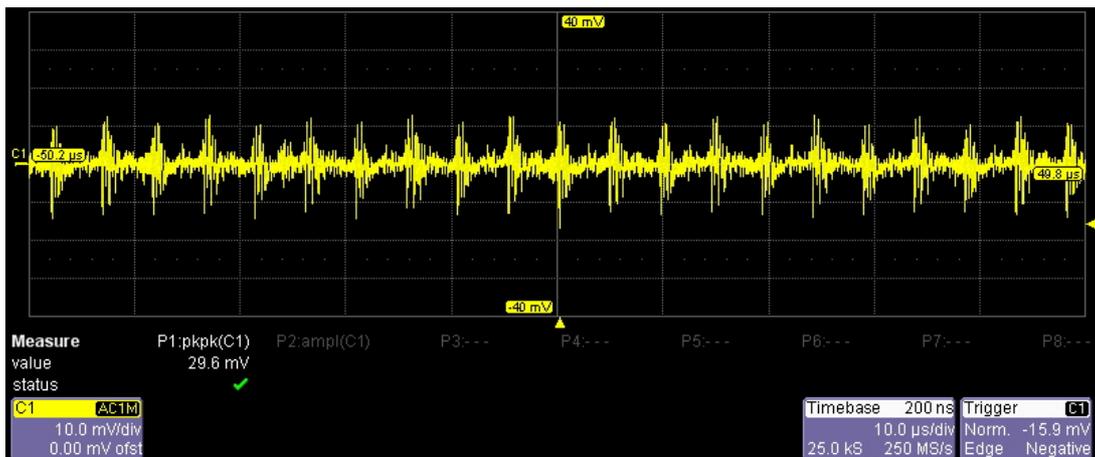


図 4.12: ダイレクトノイズ in Saclay

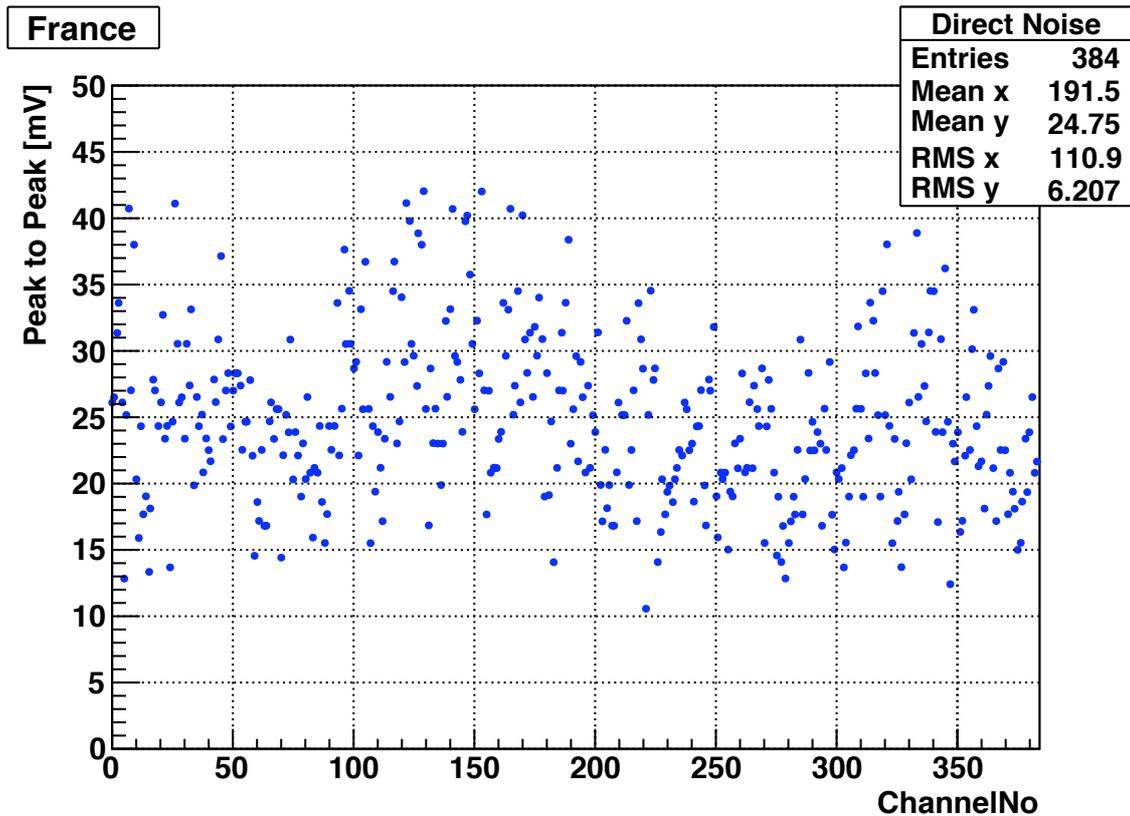


図 4.13: ダイレクトノイズ in Saclay

日本での性能評価試験

日本でのテストも Saclay でのテスト同様 2000 V を印加し行った。各大学で得られた結果を図 4.15 に示す。

依然として 30 mVpp を超えるノイズが確認された。全体としては Saclay の結果よりもノイズが小さくなっているように見えるが、これは日本でのテストではモジュールを一台しか使用していないために、他のモジュールからの影響によるノイズが少ないためであると考えられる。モジュール全てに電圧を掛けると 1 台のみに掛けたときに比べノイズが増加することは Saclay での測定でも見られていた。

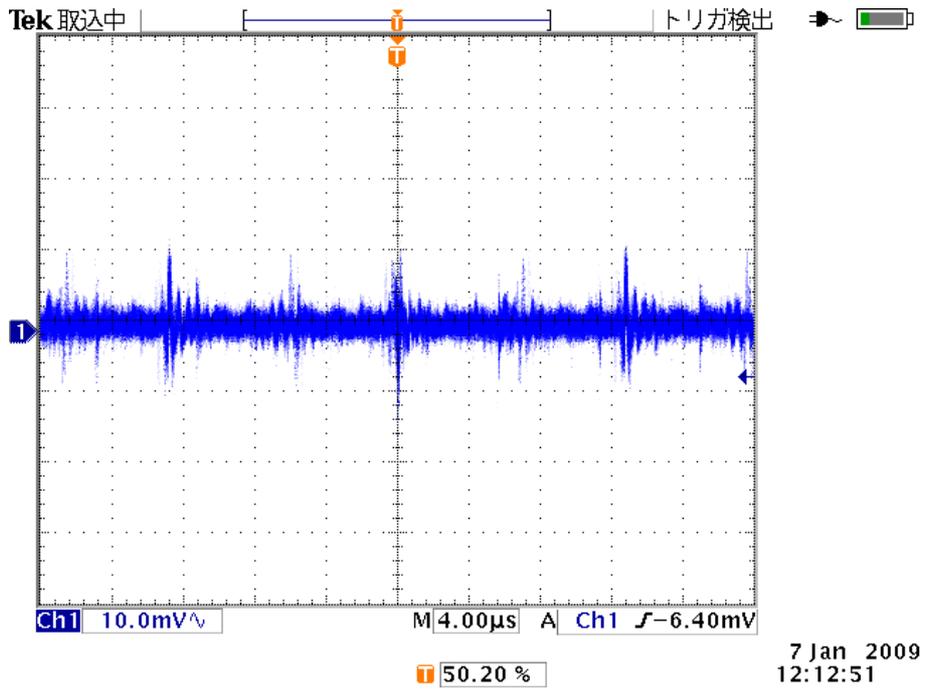


図 4.14: 日本での試験におけるダイレクトノイズ

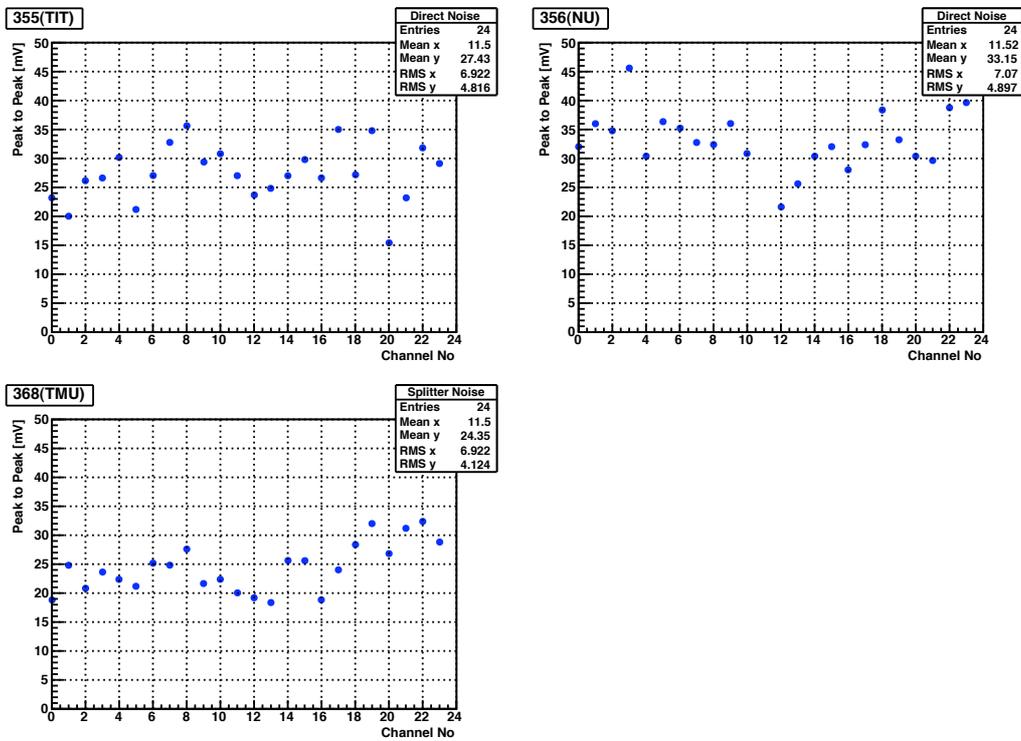


図 4.15: 各大学での試験のダイレクトノイズの Peak to Peak

4.3.2 CAENでの測定との比較

ダイレクトノイズの測定試験はCAEN社でも行われており、そこで得られた試験結果との比較を行った。図4.16はCAENでの測定のノイズの一例であり、図4.17、図4.18には今回行った測定とCAENでの測定結果を並べてプロットした。ここで見るように、今回の測定とCAENでの測定の間になんか相関が見られる。ノイズが十分に減らすことができなかった原因としては、日本、フランスでの測定では安定したグラウンドが無かったこと、外部ノイズのシールドが不十分であったなどの測定環境の不完全さによるものであると思われる。

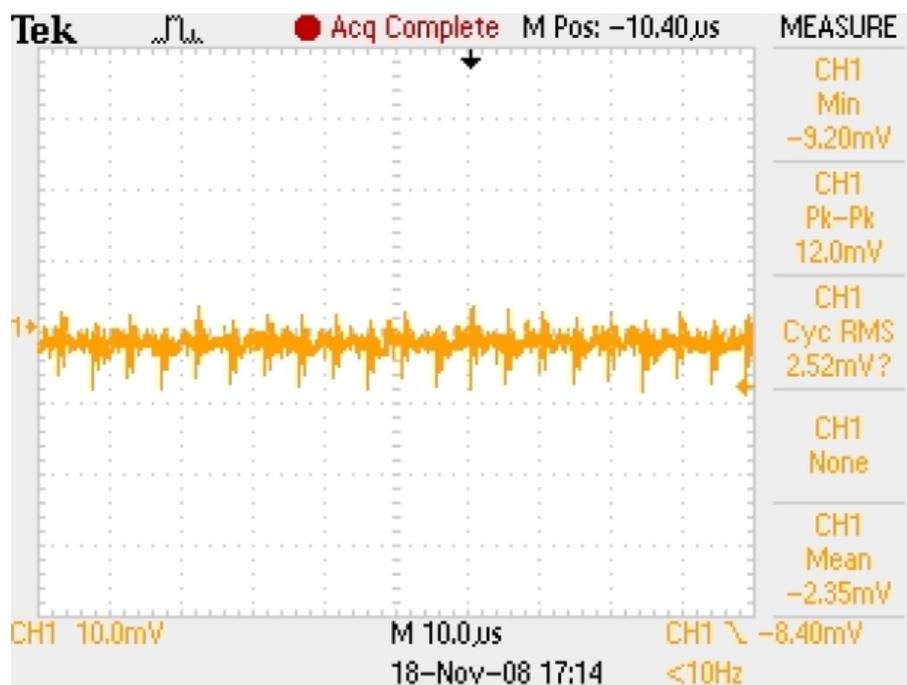


図 4.16: CAEN でのダイレクトノイズ測定

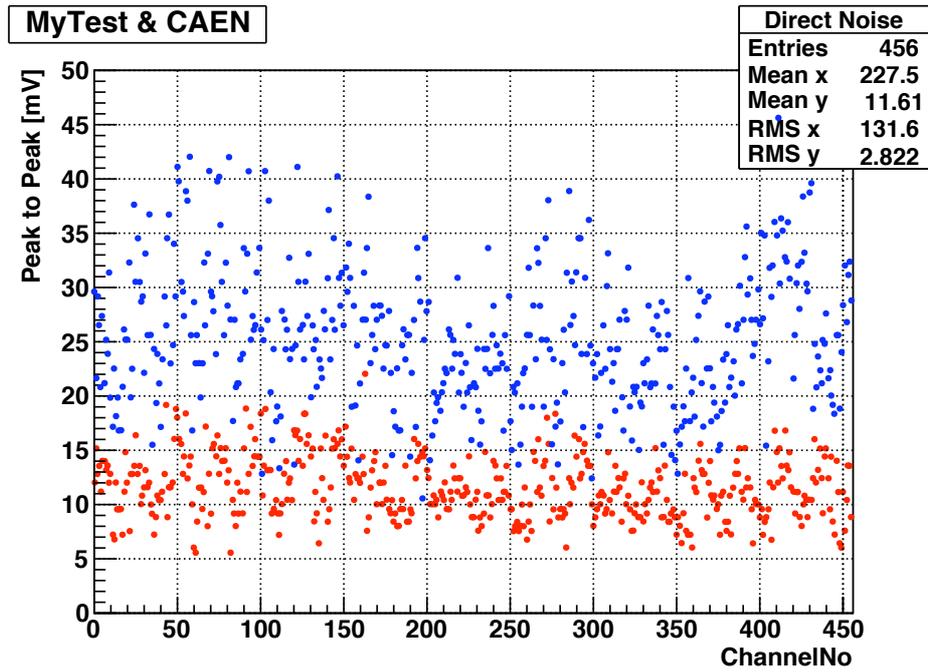


図 4.17: France と CAEN でのダイレクトノイズ。青が France での測定、赤が CAEN での測定

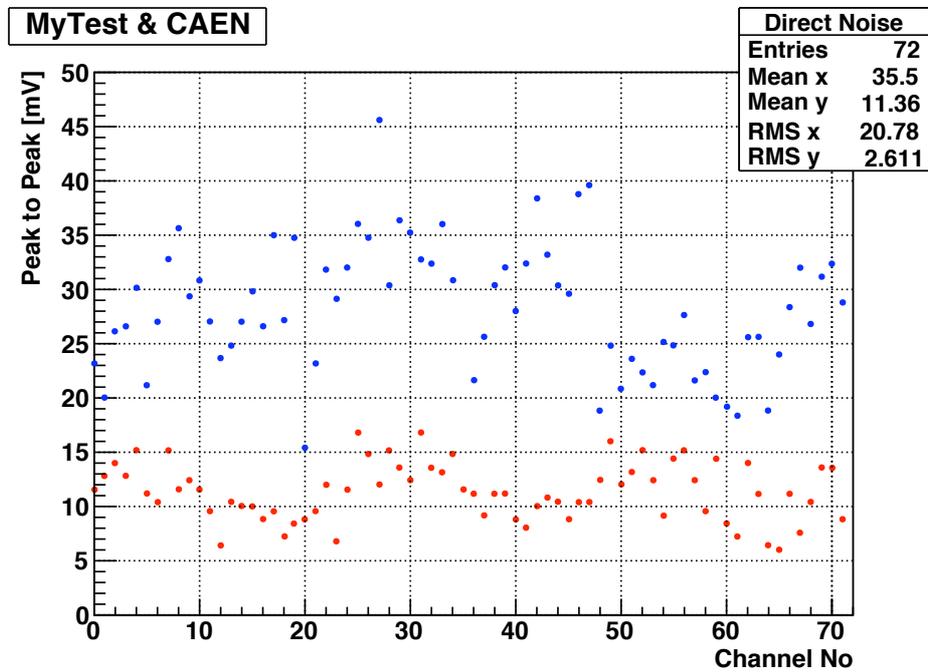


図 4.18: 日本と CAEN でのダイレクトノイズ。青が日本での測定、赤が CAEN での測定

4.3.3 Splitter 回路を用いたノイズ測定

先にも述べたように Double Chooz 実験では PMT への電圧印可とシグナル取得を 1 本のケーブルによって行っており、それぞれの信号を Splitter 回路を用いて分離する。Splitter 回路の写真と回路図を図 4.19 に示す。

図 4.20 にあるように、高電圧電源は DC なので電圧は PMT のみにかかり、PMT からのシグナルは AC なので 6.8nF のコンデンサーを通りシグナルアウトプットより出力される。また、回路に並列に配置された 12nF のコンデンサーは low pass filter となり、高電圧電源由来のノイズ高周波ノイズをカットする働きをする。一般的に図のような最もシンプルな RC 回路による low pass filter では

$$f \geq \frac{1}{2\pi RC} \quad (4.5)$$

の周波数成分をフィルターすることができる。この Splitter 回路で言えば、 $R=470k\Omega$ 、 $C=6.8nF$ なので、50Hz 以上の周波数成分をカットできることが期待される。

ここでは、実際の実験で使用する Splitter 回路を用いて先ほどのノイズがどれほど小さくできるかを確認する。本実験では 1 光電子パルスの 1/4 で Threshold を設定するので要求性能としてはそれ以下になっている必要がある。この値は約 1.5mV である。

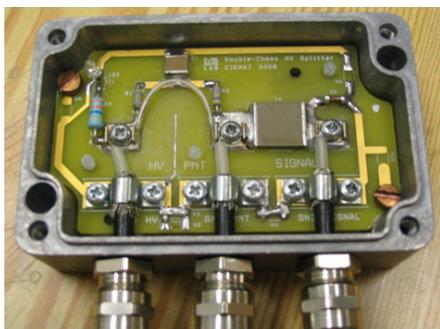


図 4.19: Splitter 回路

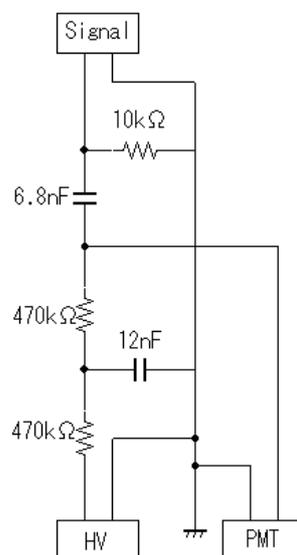


図 4.20: Splitter 回路の回路図

フランスでの性能評価試験

本試験はダイレクトノイズ試験と同様、全てのモジュールをクレートにセットし、全てのモジュールに2kVの電圧を印可し測定を行った。図4.21に全てのチャンネルでのノイズのPeak to Peak値のプロットを示す。全てのチャンネルでノイズのPeak to Peakが2mV程度に減っていることが確認できる。

また高電圧電源のスイッチを切った状態でのノイズと、オシロスコープに何もつないでいない状態で得られたノイズのPeak to Peak値のヒストグラムを図4.22に示す。図4.22の上図は電圧を掛けたときのSplitterを通った後のノイズのPeak to Peak値、左下図は高電圧電源の電源を切った状態でのノイズのPeak to Peak値、右下図はオシロスコープに何も接続しないときにオシロスコープで見えるノイズのPeak to Peak値のヒストグラムである。

このヒストグラムから、本測定のアシロスコープ上で確認されているノイズはアシロスコープ、もしくは外部環境由来のものであり、Splitter回路によって高電圧電源由来のノイズは十分にカットできていると判断することができる。

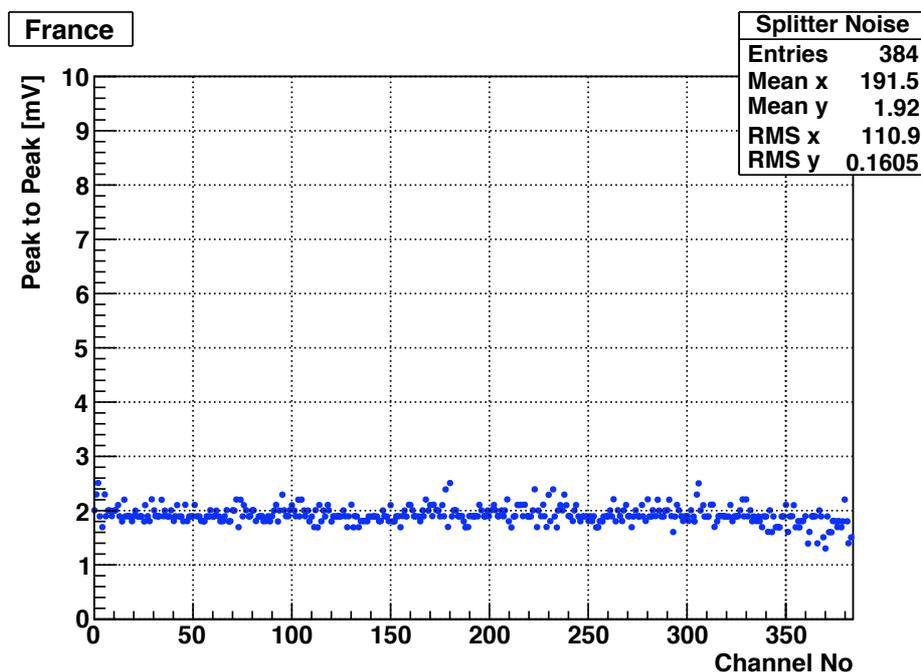


図 4.21: 全てのチャンネルでのSplitterを通した後のノイズのPeak to Peak

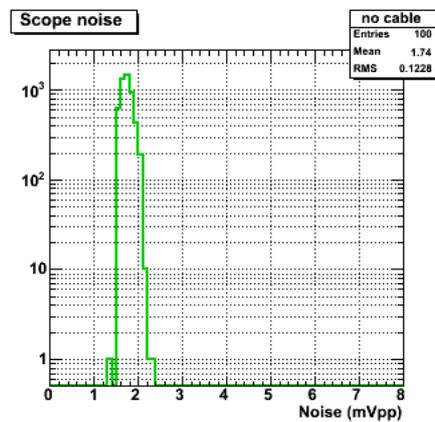
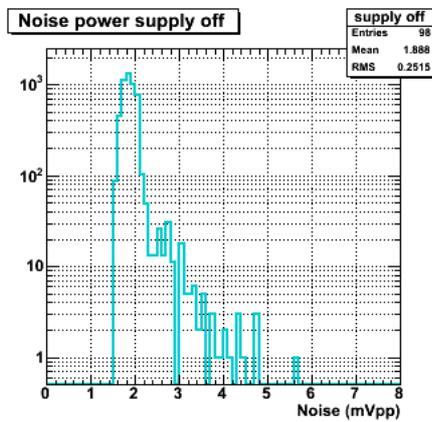
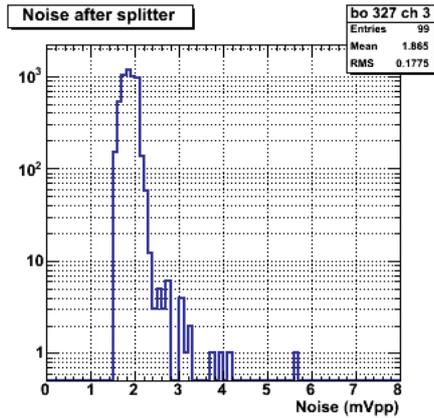


図 4.22: ノイズの Peak to Peak 値のヒストグラム。(左上) 電圧を掛けている状態 (左下) 電源を入れていない状態 (右下) オシロスコープに何もつないでいない状態

日本での性能評価試験

日本の各大学での試験結果を図 4.23 に示す。Saclay での試験と同様に、Splitter 回路を通すことによりノイズは十分小さくなっていることが確認できる。ここで見えている波形も高電圧電源への接続していないオシロスコープ上でも同様に確認でき、高圧電源由来のノイズは Splitter 回路により十分落とすことができていると判断できる。

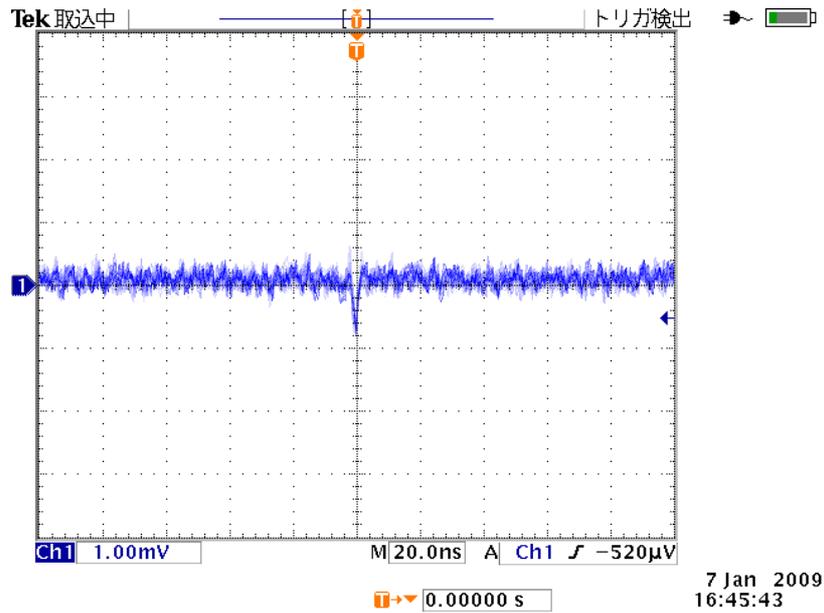


図 4.23: Splitter を通した後のノイズ

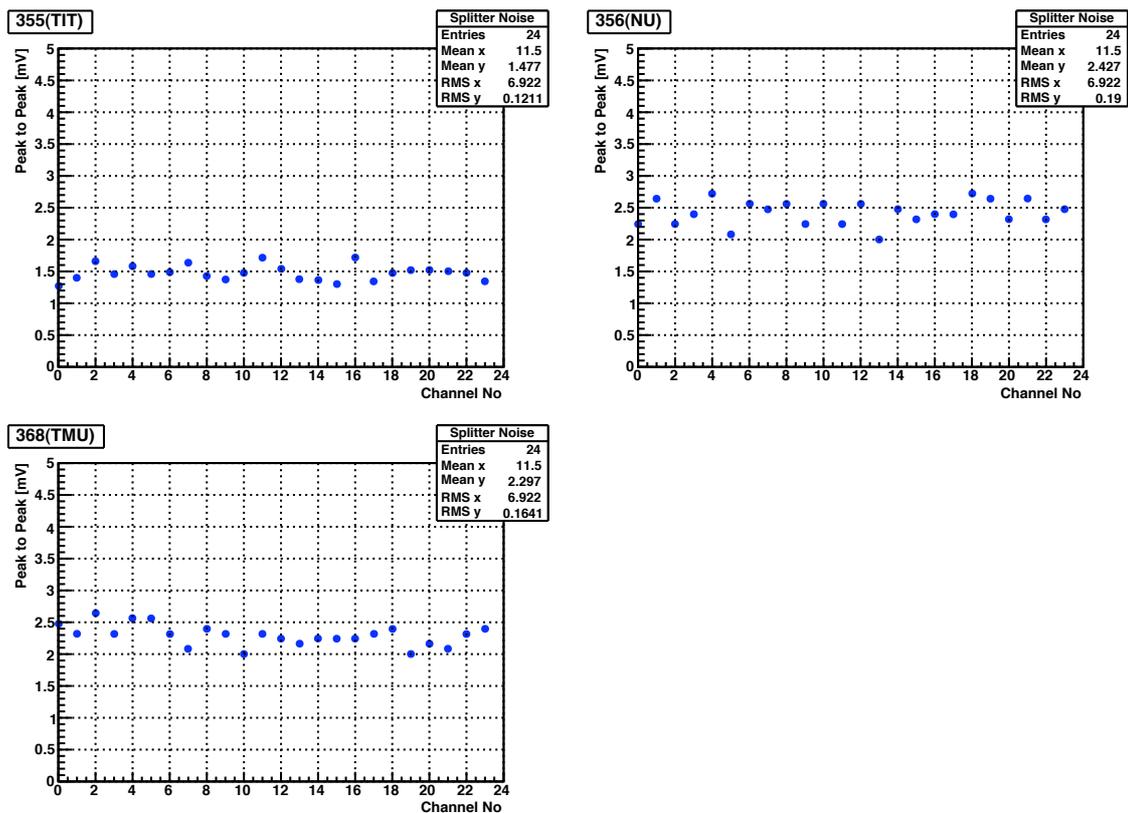


図 4.24: 日本の各大学での Splitter を通した後のノイズ。(左上) 東工大 (右上) 新潟大 (左下) 首都大

4.4 まとめ

電圧値設定試験において、二つのチャンネルにおいて設定値から大きく異なる出力を確認し、CAEN への修理を依頼した。その他のチャンネルではモニター値からのズレは $\pm 4V$ 以内に収まっており、これはPMTのGainにして2%に相当し、問題にならないレベルであると判断した。

ダイレクトノイズの測定において要求性能を満たさないチャンネルが数多く確認された(19%)。これは測定を行った実験室のグラウンドの不安定さや外部環境からくるものであると思われる。

しかし Splitter box を通すことにより全てのチャンネルにおいて高電圧電源由来のノイズは十分にカットできていると判断できるため、CAEN 高電圧電源 SY1527, A1535 モジュールの本実験での使用を決定した。

第5章 高電圧電源制御システムの開発

第4章で述べたように、CAEN 高電圧電源フレーム SY1527 は外部との通信のために Ethernet, RS232, CAENET[25] などのインターフェイスを持っており、外部のコンピュータからリモートでのソフトウェア的な制御が可能である。本実験での使用にあたり、高電圧電源の制御システムの開発を行った。

本章では高電圧電源の制御システムの開発に関して述べる。

5.1 概要

Double Chooz 実験において CAEN 高電圧電源 (SY1527) はニュートリノイベント検出用の 390 本の PMT と、バックグラウンド同定用の Inner Veto 層の 78 本の PMT への電圧印加に用いられる。使用する高電圧電源は、これらの計 468 本の PMT それぞれに固有の電圧値を印加しなくてはならない。また、印加電圧値の変化は PMT の Gain 値に直接影響し、すなわちエネルギー再構成等に影響を及ぼすため、個々の PMT への印加電圧値の変化は随時把握する必要がある。その他、システム制御などの操作はユーザに対し直感的に混乱無く行えるものである必要がある。

高電圧電源制御システムは、高電圧電源の操作を行うコントロールサーバ、オンラインモニタへのデータ転送を行うモニターサーバ、MySQL データベース、そして実際にユーザが操作するための Java GUI(Graphical User Interface) から構成される。それぞれの詳細は以下の節で述べる。

制御システムは C++ 言語を用いて開発を行い、GUI の部分に関しては Java 言語を用いて開発を行った。

図 5.1 に高電圧電源制御システムの構成の概念図を示す。

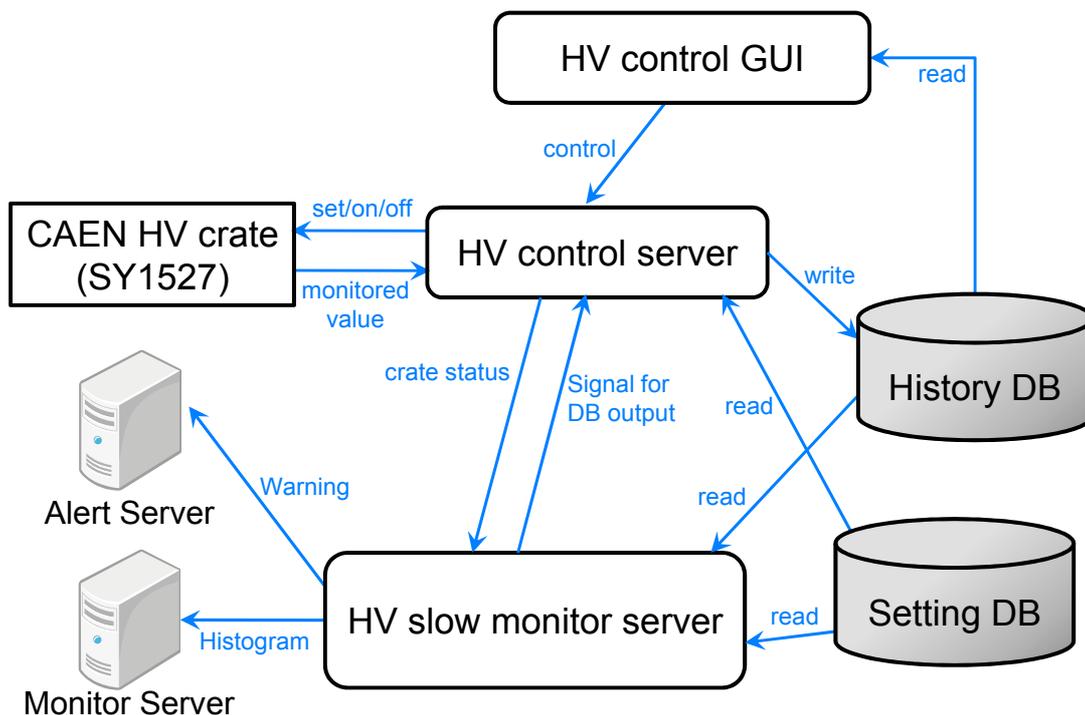


図 5.1: 高電圧電源制御システムの構成の概念図
 高電圧電源専用のプロセスとして3つ存在しており、ソケット通信により通信を行う。[各要素の詳細は 1.2 節]

5.2 高電圧電源制御システムの構成要素

5.2.1 コントロールサーバ

コントロールサーバは GUI からのコマンドを受け取り、高電圧電源の操作を TCP/IP 通信を用いて行う。高電圧電源を制御するためのライブラリは CAEN 社から C 言語で記述されたものが配布されており、コントロールはこのライブラリを用いて行うことになる。

現段階で実装した機能は電圧の印加と電圧値設定である。電圧値の設定は各チャンネルの値を個別に変更できる。またデータベースから値を読み込むことが可能であり、個々のチャンネルに独自の電圧値を一斉に設定することもできる。また、コントロールサーバはモニター値をデータベースに書き込む働きも持つ。

5.2.2 モニタサーバ

モニタサーバは高電圧電源の状態 (電圧値、電流値) をデータベースへ書き込むための命令をコントロールサーバへ送ると同時にその値をデータベースから読み、オンラインモニタへのデータ転送を行っている。このプロセスはスレッドを用いて実装されており、他のプロセスの遅延時間に依存せず動作する。データベースへのモニター値の書き込みは毎分行われる。また、電圧値、電流値からの異常を判断し、アラートサーバへのエラー出力も行っている。

5.2.3 オンラインモニタ、アラートサーバ

オンラインモニタはモニタサーバからのデータをグラフやヒストグラムにして表示させる働きをし、アラートサーバはモニタサーバからのエラーや警告を受け取り、ポップアップウィンドウを表示させてシフトに知らせる働きをする。これらのシステムは他の共同研究者によって開発され、高電圧電源に限らず全てのコンポーネントがこのシステムを用いる。

5.2.4 データベース

Double Chooz 実験ではデータベースシステムとして MySQL データベース [28] を用いることになっている。MySQL はサン・マイクロシステムズ [29] からオープンソースとして配布されており、現在世界で最もシェアのあるオープンソース・データベースであり、検索などを高速で行うことができ、使いやすく信頼性も高い。

また、様々な言語によるアクセスのためのライブラリも用意されており、本システムで使用している C/C++、Java でのアクセスも可能となっている。

高電圧電源制御システムでは電圧値等を随時書き出していく History DB と設定値を保存しておく Setting DB の二つのデータベースを使用する。History DB に保存された高電圧電源のデータは今後の解析にも使用される。

5.2.5 GUI

最終的に制御システムはグラフィカルなインターフェースとしてユーザーが直感的に操作しやすいものでなくてはならない。GUIの部分に関しては Java 言語を用いて開発を行った。図 5.2 コントロール部分の GUI の写真を示す。

GUI画面の左側には操作ボタンが配置されており、右側の格子状のブロックは各クレートの個々のチャンネルの状態を表している。正常に電圧がかかっている場合は青、異常時は赤というようにブロックの色が変わり、ユーザーは直感的に各チャンネルの状態を理解することができるようになっている。更に右側にあるポップ

アップウィンドウは電圧の印加、電圧値設定の際に現れる。設定は、クレート単位、モジュール単位、チャンネル単位で行うことができる。

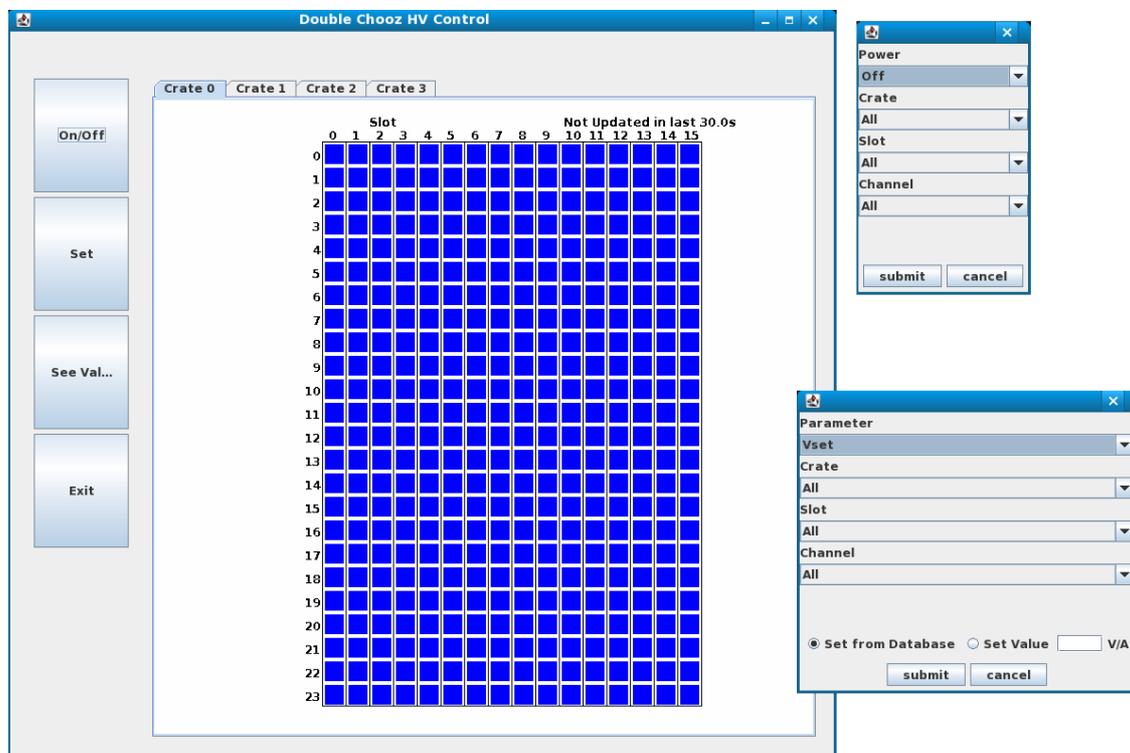


図 5.2: 高電圧電源制御 GUI。左側のボタンは基本操作ボタン、格子状のブロックは各チャンネルの状態を表している。右側のポップアップウィンドウで電圧値の設定、電圧の On/Off を行う。

図 5.3～5.5 にモニタリング GUI のスクリーンショットを示す。モニタリングに関して、全 468 本もの PMT の情報をどのようにシフターがわかりやすく詳細にモニタリングできるかということを考えて実装を行った。

まず、設定されていなければいけない電圧値、そしてその電圧値から計算される電流値と、クレートから得られる実際に印加されている電圧値、電流値とのズレをヒストグラムにして表示するようにした(図 5.3)。青い縦線は許容領域を示している。この画面では全ての高電圧電源のチャンネルの状態を大まかに確認することができる。

次に図 5.4 に示した画面では、一つのタブにつき一つのモジュール(24 チャンネル)の全チャンネルの印可電圧値の時間変化のグラフを表示しており、これにより個々のチャンネルの時間変化の詳細を確認することができる。また、図 5.5 では検出器内での PMT の位置に対応付けて電圧値のずれを確認することができる。この図を用いることによって特定の箇所の PMT に問題のあるチャンネルが集まっている

ないか確認することができ、また異常チャンネルの位置から異常の状況や原因を推測することが期待できる。

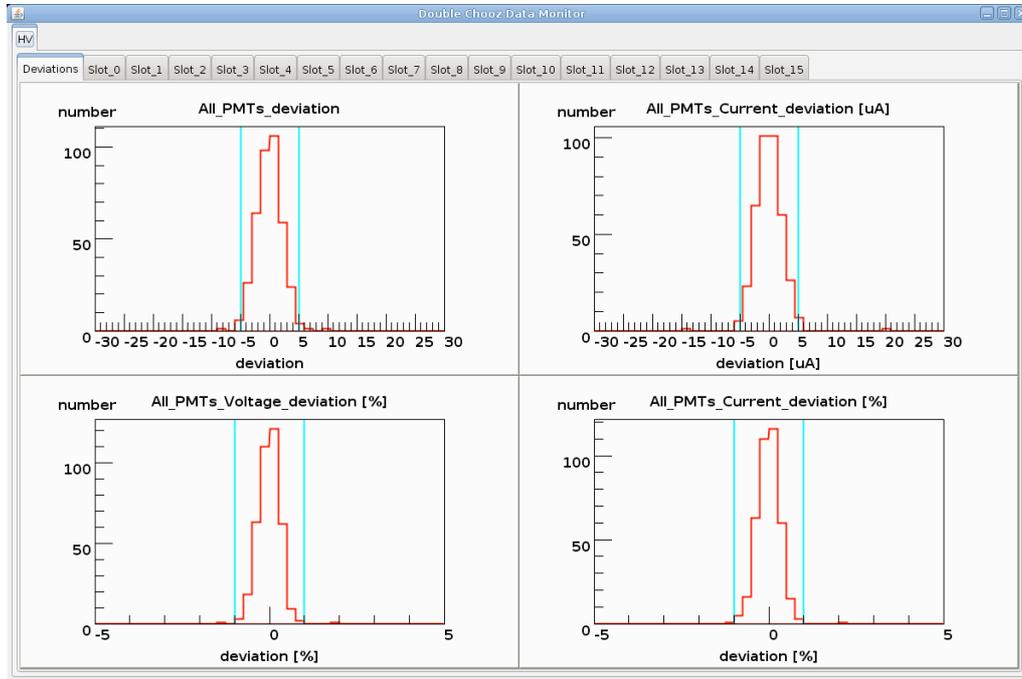


図 5.3: 全 PMT の設定値からのずれを表したヒストグラム。横軸は設定値からのずれ、左は電圧値、右は電流値、上段は絶対値、下段はパーセント表示。

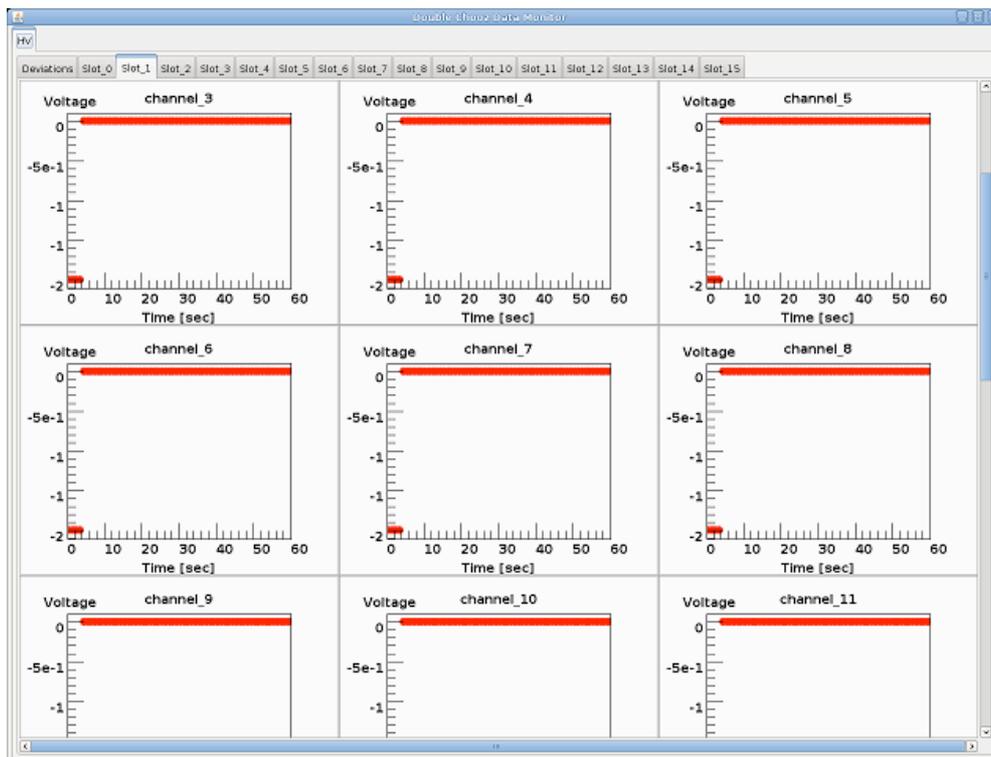


図 5.4: 各チャンネルにかかっている電圧値の時間変動。各グラフの縦軸は設定値からのずれ、横軸は時間を表す。

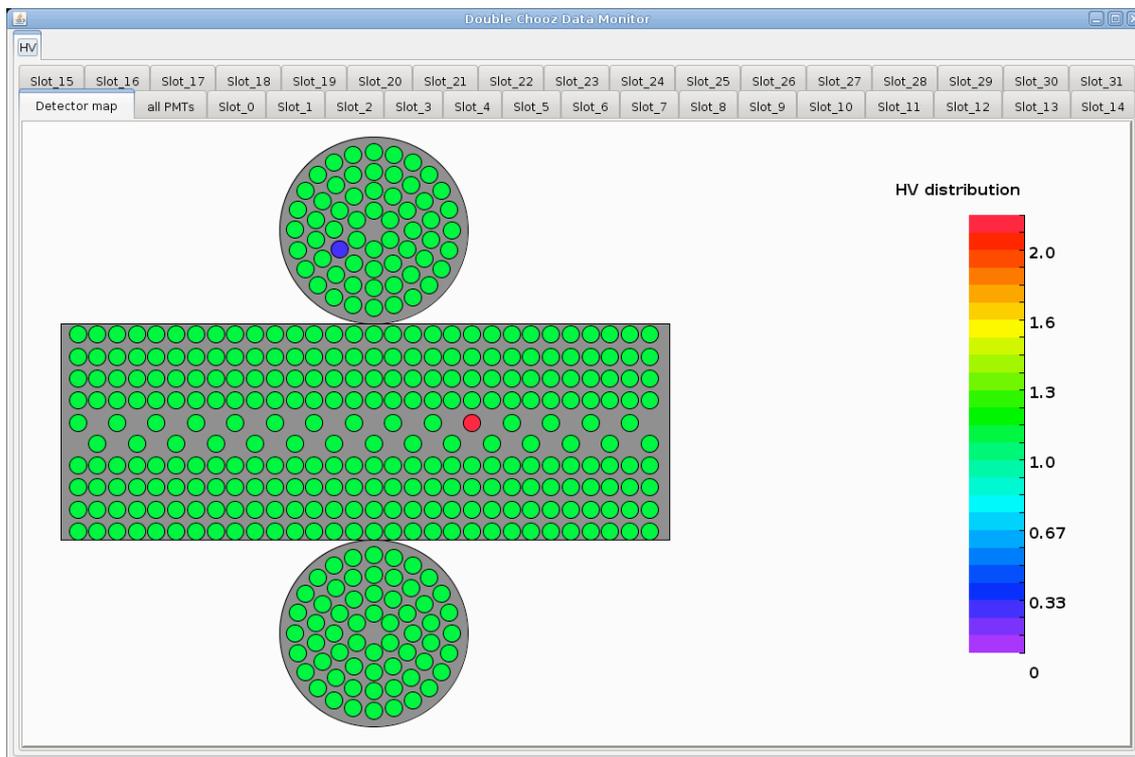


図 5.5: PMT の位置に対応付けて電圧値の設定値からのずれを表示している画面

5.3 まとめ

高電圧電源の制御システムのためのソフトウェア開発を行った。コントロール、モニターに関しての最低限の機能を整え、実際の高電圧電源と共に動作確認も行った。これらのシステムは今のところ最低限の機能を持ったものができた段階で、更なる改良が必要であり、現在も進行中である。

今後は高電圧電源制御システムの更なる機能向上とともに、他のシステムとの統合環境の中での性能試験も行う必要がある。2009年1月より、実験サイトへのデータ取得システムのインストールが始まる予定であり、春以降のデータ取得開始に向け更なる調整を行っていくことになる。

第6章 まとめ

Double Chooz 実験において光電子増倍管への電圧印加に使用する高電圧電源の性能評価試験を行い、制御システムの開発を行った。

高電圧電源はイタリアのCAEN社製SY1527クレートとA1535モジュールの使用を予定している。性能評価で求められるものは印加電圧の正確さと電源装置由来のノイズの大きさである。印可電圧値の測定において二つのモジュールで設定値と大きくかけ離れた値を示すものを発見し、事前に修復を行った。また高電圧電源のノイズ評価を行い、Splitter回路を使用することによって高電圧電源からのノイズは十分にカットすることができることが確認され、実験での使用において問題が無いことがわかった。さらに検出器へのPMT設置時の性能評価試験の際には、実験で使用するPMTへの電圧印加を行い、実際のデータ取得への影響も無いことが確認できた。しかし、PMT性能評価試験での使用の際には多くの高電圧電源モジュールの故障が確認され、運搬や保管の際には細心の注意を払わなくてはならないことを認識した。2010年1月からは実験で使用するエレクトロニクス類の実験サイトへ搬入作業が行われる予定であり、運搬に細心の注意を払うこと、実験サイトの環境の整備などが求められることになる。

また高電圧電源の制御システムの開発を行い、高電圧電源のコントロール、モニタリング、そしてこれら二つのビジュアル化の機能を実装した。コントロール、モニタリング、他のサーバとの通信などはC++言語を用いて実装し、ユーザーインターフェースの部分に関してはJava言語を用いて実装を行った。開発したシステムは実験で使用する高電圧電源と共に、また他の共同研究者の開発したシステムとも共に正常動作することも確認した。制御システムは最低限の機能が実装完了した段階であり、今後更なるアップデートを行っていく予定である。

謝辞

本修士論文を執筆するにあたり、様々な方々の協力、ご指導、ご鞭撻をいただきました。この場を借りて感謝の意を述べさせていただきたいと思います。

まず指導教官である住吉孝行教授には Double Chooz 実験に参加させていただき、実験手法から研究者としてのあり方まで様々なことを教えていただきました。未熟な自分に様々な体験をさせていただき、そのどれもが自分にとって大きな刺激となりました。心より感謝申し上げます。そしてこれからも宜しくお願い申し上げます。

研究室のスタッフでは、浜津客員准教授にはソフトウェアの基礎を非常に丁寧にご指導いただきました。スキー旅行にも同行させていただき、共にお酒を飲んで楽しい時間を過ごさせていただきました。千葉助教、汲田助教には研究室生活で様々なアドバイスをいただき、また研究室生活に彩りを与えていただきました。前田特任研究員には研究者としてのあり方や海外のコラボレータとの戦い方を学びました。

自分の2年間の研究室生活があったのは皆様のお陰です。心より感謝申し上げます。

他大学の共同研究者では東北大学の古田特別研究員とはフランスで毎週川沿いのカフェに出かけ、実りのある議論を持つことができました。田所氏とはほとんど物理の話をすることはありませんでしたが、違った人生観を学ぶことができました。新潟大学の宮本氏には自分が新潟大学へ出張した際に学内の案内や、実験の手伝いまでしていただきました。

Double Chooz Japan グループにおいて、新潟大学の田村教授、宮田教授、川崎助教、東北大学の末包准教授、東北学院大学の坂本准教授、東京工業大学の久世准教授、石塚助教、神戸大学の原准教授、広島工業大学の長坂准教授には実験グループミーティングでたくさんの意見、アドバイス等をいただきました。また、海外出張時には英語の不慣れな自分を様々な面で助けていただきました。実験グループの学生では、東工大の松原氏、田中氏、吉野氏、今野氏、東北大学の田畑氏、太田氏、新潟大学の山崎氏、三品氏、重森氏、小林氏とはミーティング、その他様々な共同作業を共にし、時には助けてもらい、時には意見交換を行い、時には実験と関係の無い付き合いを持ったりと、非常に良い刺激を受けることができました。

研究室生活においては先輩の遠藤氏、佐久間氏、荒川氏、植木氏、同期の石川氏、香山氏、黒田氏、後輩の五十嵐氏、岩田氏、棚田氏、下島氏、高垣氏、田村氏、塚越氏、渡辺氏、には2年間の高エネルギー実験研究室生活に様々な彩りを与えていただきました。皆様のお陰で修士課程の2年間は非常に楽しいものでした。

また、海外の共同研究者として高電圧電源制御システムの開発を共にしたマサチューセッツ工科大学の Dr. Lindley Winslow 氏には、英語の不出来な自分に対し暖かく、わかりやすい英語で接していただきました。

Dr. Mathieu Bongrand 氏にはフランス Saclay 研究所での高電圧電源性能評価試験でお世話になりました。また、PMT インストレーションの際の現場でのリーダーシップはとても頼りになりました。その他にバーベキューを多く開催していただき、楽しい時間を過ごすことができました。

テネシー大学の Brandon White 氏には PMT 設置作業時の Pre test , Post test でご指導いただきました。

その他 PMT 設置作業でその他 PMT 設置作業を共に行った各国の共同研究者の皆様には幼稚な英語しか扱えない自分に暖かく接していただき非常に感謝しています。

これらの方々の、またその他様々な方々のご支援無くしては本修士論文の執筆はあり得ませんでした。ここに再度深く御礼申し上げます。皆様本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] T. Araki *etal.* (KamLAND Collaboration), Measurement of Neutrino Oscillation with KamLAND: Evidence of Spectral Distortion, Phys, Rev. Lett., Vol. 94, 081801, 2005
- [2] Y. Fukuda *etal.* (Super-Kamiokande Collaboration), Measurement of atmospheric neutrino oscillation parameters by Super-Kamiokande I, Phys, Rev. D, Vol 71, 112005, 2005
- [3] E. Aliu, *etal.* (The K2K Collaboration), Evidence for Muon Neutrino Oscillation in an Accelerator-Based Experiment, Physics Rev. Lett. Vol 94, 081802, 2005
- [4] Double Chooz: A Search for the Neutrino Mixing Angle θ_{13} , hep-ex/0606025, 2006.
- [5] Apollonio, *etal.*, Search for neutrino oscillations on a long base-line at the CHOOZ nuclear power station, Eur. Phys. J. C27 (331-374), 2003.
- [6] M.Apollonio et al. (CHOOZ Collaboration), Limits on neutrino oscillations from the CHOOZ experiment, Physics Lett. B, Vol 466 (415-430), 1999.
- [7] Homestake result, sterile neutrinos, and low energy solar neutrino experiments P. C. de Holanda and A. Yu. Smirnov Phys. Rev. D 69, 113002 (2004)
- [8] Measurement of the solar neutrino capture rate with gallium metal Authors: SAGE Collaboration Phys.Rev.C60:055801,1999
- [9] Implications of the GALLEX Source Experiment for the Solar Neutrino Problem Authors: Naoya Hata, Wick Haxton Phys.Lett. B353 (1995) 422-431
- [10] The Sudbury Neutrino Observatory Authors: The SNO Collaboration Nucl.Instrum.Meth.A449:172-207,2000
- [11] John N.Bahcall and Carlos Pena-Garay : Journal Apj,621,L85,astro-ph/0412440(2005).

- [12] Milind V. Diwan. Status of the MINOS experiment, arXiv:hep-ex/0211026 , 11 Nov 2002.
- [13] M. De Serio (for the OPERA Collaboration).The OPERA experiment: on the way to the direct observation of $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ oscillation, arXiv:0910.0337.
- [14] OlgaMena. Getting the most from NOvA and T2K, arXiv:hep-ph/0609031v1, 2006.
- [15] F. Ardellier et al. (Double Chooz Collaboration), arXiv:hep-ex/0606025, 2006.
- [16] M.Goodman, Low Energy Neutorinos, presented to the ICFA workshop in Daegu South Korea, 28 Sep 2005,
http://www.hep.anl.gov/mcg/goodmankorea.ppt.
- [17] M. Aoki *etal.* (KASKA Collaboration), Letter of Intent for KASKA, e-Print, hep- ex/0607013, 2006.
- [18] 末包文彦, KASKA - 原子炉による精密 θ_{13} 測定計画, 高エネルギーニュース, Vol. 23-3, pp. 157-173, 2004.
- [19] M.G. Albrow, et al., Physics at a Fermilab Proton Driver, hep-ex/0509019, 2005
- [20] 前田順平, 原子炉ニュートリノ振動実験のための宇宙線飛跡検出器の開発, 修士論文, 東京工業大学大学院理工学研究科, 2006.
- [21] Carlo Bemporad *etal.*, Reactor-based Neutrino Oscillation Experiments, arxiv: hep- ph/0107277, 2001.
- [22] 浜松ホトニクス, 光電子増倍管その基礎と応用, 第三版, 2005/8/1
- [23] 春名 毅, 原子炉ニュートリノ振動実験 Double Chooz のための10 インチ光電子増倍管性能評価システムの開発, 修士論文, 首都大学東京大学院理工学研究科物理学専攻, 2007.
- [24] International Organization for Standardization 14644-1 - Cleanrooms and associated controlled environments.
- [25] MOD. SY 1527 UNIVERSAL MULTICHANNEL POWER SUPPLY SYSTEM USER ' S MANUAL REV.15
- [26] MOD. A1535 24 CH 3.5KV/3mA COMMON FLOATING RTN BOARD, Technical Information Manual Revision n.5 4 December 2008.

[27] Tsunayuki Matsubara, Simulation study of DC calibration requirements for the first analysis, November 12, 2009

[28] <http://www.mysql.com/about/>

[29] <http://www.sun.com/>