

修士論文

KASKA プロトタイプ検出器による
常陽原子炉からのニュートリノ検出の研究

東北大学大学院理学研究科
物理学専攻

田畑 裕史

平成19年

要旨

原子炉を稼働し炉内で核分裂反応が起きると大量の反電子ニュートリノが発生する。このニュートリノは弱い相互作用しか働かないため物質の透過力に非常に長けている。近年ニュートリノ振動に関する実験的研究は急速に発展しているが、ニュートリノを伴ったパラメータのうち、残る重要な課題の1つに未だ有限値が得られていない最後の混合 θ_{13} の測定がある。KASKA 実験は世界最大規模の発電量を誇る東京電力柏崎刈羽原子力発電所の付近において、原子炉内で核分裂して発生する反電子ニュートリノの欠損量を観測することによって θ_{13} を測定する実験である。

本実験ではガドリニウム入り液体シンチレータを用いる。原子炉から放出されたニュートリノは液体シンチレータ中の陽子と逆 β 崩壊反応をして陽電子と中性子を放出する。陽電子は電子と対消滅し2本の γ 線を放出する。放出された中性子は約 $30\mu\text{sec}$ でガドリニウムに吸収され、合計 8MeV の γ 線を放出する。二つの信号が $50\mu\text{sec}$ 以内にきた時の事象をニュートリノ事象とする。ニュートリノターゲットにガドリニウムを用いる理由は2つあり、1つは熱中性子捕獲断面積が安定な元素の中で最大であること、もう1つは捕獲の際に放出される γ 線のエネルギーが 8MeV と自然に存在する放射性同位体が出す γ 線よりも高いことである。

我々はプロトタイプ検出器として、直径1.2mのアクリル球を作成した。中にはガドリニウム入りの液体シンチレータを注入する。アクリル球の外側には16本の光電子増倍管を取り付ける。平成16年8月にはこのプロトタイプ検出器を茨城県大洗町にある高速実験炉「常陽」に移設し、翌平成17年12月まで測定をした。常陽は運転サイクルが 60days/cycle と短いため、原子炉ONデータと原子炉OFFデータの比較が容易である。

ガドリニウムの反応で限定されるエネルギーと反応の時間差、そしてチャージバランスによるニュートリノイベントセレクションを行い、S/Nは1/100になった。

このままだとバックグラウンド事象が多いので、さらにS/Nを良くするために反応位置によるカットを考えた。バックグラウンドの高速中性子は検出器の表面付近で起きるので、表面付近の事象であればカットする。またニュートリノ事象の多くは二つの信号間の距離が $<10\text{cm}$ で起こるので、距離が長ければバックグラウンド事象としてカットできる。反応位置を算出するアルゴリズムの評価と解析結果、そして今後の課題について述べる。

目次

第1章	常陽ニュートリノ検出実験	8
1.1	実験背景	8
1.2	実験の全体像	8
第2章	ニュートリノ検出原理	10
2.1	逆 β 崩壊反応	10
2.2	遅延同時計測	10
2.3	バックグラウンド事象	11
第3章	ニュートリノ源	13
3.1	高速実験炉常陽	13
3.2	ニュートリノフラックス	14
第4章	実験装置	16
4.1	実験装置概要	16
4.2	液体シンチレータ検出器	17
4.2.1	液体シンチレータ	17
4.2.2	光電子増倍管	18
4.2.3	μ メタル	21
4.3	バックグラウンドシールド	21
4.3.1	γ 線遮蔽	21
4.3.2	熱中性子遮蔽	21
4.4	宇宙線 veto カウンター	25
4.5	窒素パージ	25
4.6	データ収集システム	25
4.7	モニターシステム	30
第5章	測定結果	33
5.1	線源による測定	33
5.1.1	^{60}Co を用いた測定	33
5.1.2	Am/Be線源を用いた測定	33
5.2	原子炉 ON,OFF 時の測定結果	35
第6章	ニュートリノイベントセレクション	38
6.1	概要	38
6.2	選別条件	38

6.2.1	エネルギーによる選別	38
6.2.2	先発信号と後発信号の時間差による選別	38
6.2.3	Charge Balance による選別	40
6.3	選別結果	41
第7章	反応位置を用いた解析	45
7.1	概要	45
7.1.1	検証に使ったデータ	46
7.2	TDC 値を用いた vertex 位置算出アルゴリズム	48
7.2.1	アルゴリズム内容	48
7.2.2	評価	48
7.3	ADC を用いた vertex 位置算出アルゴリズム	53
7.3.1	アルゴリズム内容	53
7.3.2	評価	53
7.4	PD 反応間距離を用いたカット	58
7.4.1	背景	58
7.4.2	結果	58
7.5	S を用いたカット条件	58
7.5.1	背景	58
7.5.2	結果	58
7.6	動径方向のカット条件変更	59
7.6.1	結果	59
第8章	まとめと今後の課題	64
8.1	結論	64
8.2	今後の課題	64

目次

1.1	ウランとプルトニウムのエネルギースペクトル	9
1.2	実験の日程と原子炉稼働日程	9
2.1	遅延同時計測の反応模式図。逆 β 崩壊で放出された中性子がガドリニウムに吸収される。	11
2.2	主な Correlated バックグラウンドの模式図。左図は高速中性子、右図は μ 粒子の崩壊による反応	12
3.1	常陽外観	13
3.2	検出器設置場所	14
3.3	観測されるニュートリノのエネルギースペクトル	15
4.1	実験装置概要図	16
4.2	アクリル球に取り付ける光電子増倍管の位置	17
4.3	8 インチ PMT の概略図	18
4.4	8 インチ PMT を PMTハウジングに入れたところ	19
4.5	PMT 装着後の検出器	20
4.6	μ メタルを取り付けたところ	22
4.7	μ メタルをつけた時と外した時の先発信号の ADC 分布。 ^{60}Co 線源を使用。	22
4.8	鉛板を固定しているところ	23
4.9	アクリル球の下に置いている鉛ブロック	23
4.10	鉛配置図	23
4.11	パラフィン壁を固定しているところ	24
4.12	アクリル球の下に置いているパラフィンブロック	24
4.13	パラフィンブロック配置図	24
4.14	veto カウンター 1 の構造	26
4.15	veto カウンター 1	26
4.16	veto カウンター 2 の構造	27
4.17	veto カウンター 2	27
4.18	veto カウンター 3 の構造	28
4.19	veto カウンター 3	28
4.20	データ収集回路概要	29
4.21	モニターシステム	30
4.22	IP Power	31

4.23	IP Power の Web ブラウザの表示画面	31
4.24	有機ガスセンサー	32
4.25	酸素濃度センサー	32
4.26	温度湿度計	32
5.1	^{60}Co のエネルギースペクトル。横軸は ADC 値 [ch]、縦軸は 1 bin 当たりの事象数	34
5.2	Am/Be 線源の液体シンチレータ中での反応	35
5.3	Am/Be 線源有りの先発信号と後発信号のエネルギースペクトルの二次元プロット	36
5.4	Am/Be 線源無しの先発信号と後発信号のエネルギースペクトルの二次元プロット	36
5.5	原子炉 ON/OFF データのエネルギー分布の比較。黒が原子炉 ON データ。赤が原子炉 OFF データ。上段が先発エネルギー、下段が後発エネルギーの比較。右列は低エネルギーの領域。	37
6.1	AmBe 線源ありの Prompt-Delayed の二次元ヒストグラム。囲まれた部分が選別領域	39
6.2	中性子捕獲時間のヒストグラム。赤が Am/Be 線源有り、黒が Am/Be 線源無し。	40
6.3	Am/Be+Gd-LS データとバックグラウンド (No source + Gd-LS) データの先発信号の Charge Balance	42
6.4	Am/Be+Gd-LS データとバックグラウンド (No source + Gd-LS) データの後発信号の Charge Balance	42
6.5	中性子捕獲時間カット、先発エネルギーカットした後発信号のスペクトルに Charge Balance のカットをしたもの	43
6.6	Neutrino Window カット後の先発信号のエネルギーデポジット	43
6.7	原子炉 ON データと原子炉 OFF データの差をとったもの。赤が測定結果。黒は予想されるニュートリノ事象のスペクトル。	44
7.1	反応予想図	45
7.2	テスト図	46
7.3	TDC 値の位置再構成アルゴリズム概要図	48
7.4	中心で光らせた時の各 PMT の TDC 値の差の Mean ($t_{c-n} - t_{c-base}$)	49
7.5	LED の $-20\text{cm} < X < 20\text{cm}$ 、 $-20\text{cm} < Y < 20\text{cm}$ の範囲の Z 方向の分布と、 $-20\text{cm} < X < 20\text{cm}$ のときの Y-Z 分布。Z=20cm と Z=0cm と Z=-20cm の時	50
7.6	^{60}Co の $20\text{cm} < X < 20\text{cm}$ 、 $-20\text{cm} < Y < 20\text{cm}$ の範囲の Z 方向の分布と、 $-20\text{cm} < X < 20\text{cm}$ のときの Y-Z 分布。Z=20cm と Z=0cm と Z=-20cm の時	51
7.7	LED と ^{60}Co の S_{tdc} の比較	52
7.8	TDC による LED と ^{60}Co の校正曲線	52
7.9	立体角と ADC の関係の模式図	53

7.10	LED の $-20\text{cm} < X < 20\text{cm}$ のときの Y - Z 分布と、 $-20\text{cm} < X < 20\text{cm}$ 、 $-20\text{cm} < Y < 20\text{cm}$ の範囲の Z 方向の分布。 $Z=20\text{cm}$ と $Z=0\text{cm}$ と $Z=20\text{cm}$ の時	55
7.11	^{60}Co の $-20\text{cm} < X < 20\text{cm}$ のときの Y - Z 分布と、 $-20\text{cm} < X < 20\text{cm}$ 、 $-20\text{cm} < Y < 20\text{cm}$ の範囲の Z 方向の分布。 $Z=20\text{cm}$ と $Z=0\text{cm}$ と $Z=20\text{cm}$ の時	56
7.12	$Z=0\text{cm}$ の時の LED と ^{60}Co の S_{adc} の比較	57
7.13	ADC による校正曲線。	57
7.14	TDC 値の位置再構成アルゴリズムによる先発信号と後発信号の反応間距離の分布。赤が線源有り。	60
7.15	ADC 値の位置再構成アルゴリズムによる先発信号と後発信号の反応間距離の分布。赤が線源有り。	60
7.16	TDC の S の比較。赤が線源有り。	61
7.17	ADC の S の比較。赤が線源有り。	61
7.18	S と Charge Balance の関係	62
7.19	TDC アルゴリズムによる動径方向の分布の比較。赤が Am/Be 線源有り。	63
7.20	ADC アルゴリズムによる動径方向の分布の比較。赤が Am/Be 線源有り。	63

表 目 次

4.1	ガドリニウム入り液体シンチレータの組成	17
4.2	発光剤の特製	17
4.3	8 インチ PMT(R5912) の特性	19
6.1	各原子における中性子捕獲断面積	39
6.2	Neutrino Window	41
6.3	一日当たりの Neutrino Window 内事象	41
7.1	Absolute Optical Characteristic	47

第1章 常陽ニュートリノ検出実験

1.1 実験背景

近年ニュートリノ振動に関する実験的研究は急速に発展しているが、ニュートリノを伴ったパラメータのうち、残る重要な課題の1つに未だ有限値が得られていない最後の混合 θ_{13} の精密測定がある。この θ_{13} を精密測定する実験の一つに原子炉ニュートリノ振動実験がある。原子炉を稼働し炉内で核分裂反応が起きると大量の反電子ニュートリノが発生する。この反電子ニュートリノを数トンという巨大な Gd 入り液体シンチレータで検出することで θ_{13} を測定するのが原子炉ニュートリノ実験である。この実験の日本グループとして KASKA 実験がある。この KASKA 実験は世界最大規模の発電量を誇る東京電力柏崎刈羽原子力発電所からのニュートリノを測定することで、 θ_{13} を測定する実験である。

この KASKA 実験ではプロトタイプ検出器として、直径 1.2m の球状の約 1 t の大きさの液体シンチレータ検出器を作成し、数年前から本実験用検出器開発に向けた研究を行ってきた。平成 16 年 8 月にこのプロトタイプ検出器を茨城県大洗町にある高速実験炉「常陽」に設置し、翌平成 17 年 12 月まで測定をした。常陽は原子炉の稼働サイクルが短く、原子炉 ON データと原子炉 OFF データの違いを測定しやすいということを活かして世界初の高速炉からのニュートリノ検出を目指す。

常陽は高速炉であるため、放出されるニュートリノは主にプルトニウムが核分裂したあとの娘核種によるものである。一般的な発電用原子炉の軽水炉から放出されるニュートリノは主にウランによるものである。高速炉からのニュートリノを測定できれば、軽水炉でのニュートリノスペクトルのデータを組み合わせ、ウランとプルトニウムからのニュートリノスペクトルを別々に決定することができる。

1.2 実験の全体像

茨城県大洗町にある高速実験炉「常陽」に検出器を設置し、原子炉から放出される原子炉反電子ニュートリノを検出する。検出器本体は半径 60cm のアクリル球にガドリニウム入りの液体シンチレータを入れたものである。アクリル球の外側には 8 インチの光電子増倍管を 16 本設置する。鉄のフレームでプロトタイプ検出器を囲うように骨組みを作成し、そこに暗幕を 3 重に巻くことで遮光した。さらに S/N(Signal to Noise ratio) を向上させるためにシールドの強化が欠かせない。そのため、宇宙線カウンターを暗箱の天井面と 4 つの内側面に設置し、さらに中性子遮蔽のためにパラフィンブロックを、環境 γ 線の遮蔽のために鉛を設置した。以上の装置を炉心から 25m の地点に設置した。

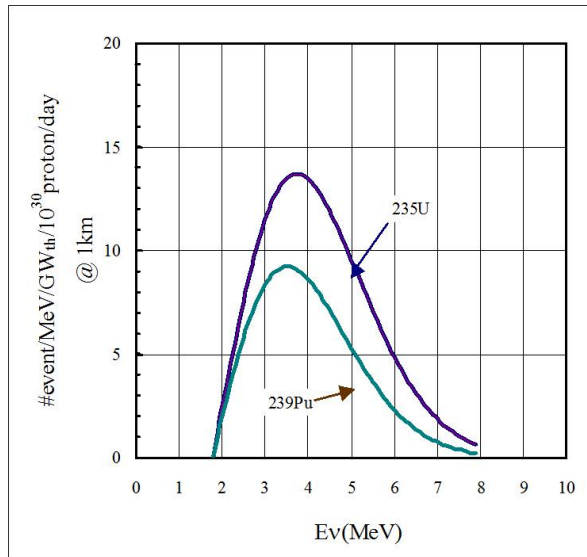


図 1.1: ウランとプルトニウムエネルギースペクトル

以下に測定期間と、原子炉の稼働状況の関係を示す。



図 1.2: 実験の日程と原子炉稼働日程

今回測定したデータ量

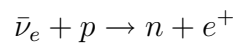
原子炉 ON 40日

原子炉 OFF 40日

第2章 ニュートリノ検出原理

2.1 逆 β 崩壊反応

液体シンチレータの主成分は有機溶媒であるため水素原子を大量に含んでいる。この水素原子中の陽子とニュートリノが反応すると逆 β 崩壊反応



を起こす。このとき発生した陽電子は電磁相互作用で運動エネルギーを落とし、さらに液体シンチレータ中の電子と対消滅反応を起こして2本の γ 線 ($0.511MeV$) を出すため、液体シンチレータで検出することができる。

2.2 遅延同時計測

常陽内の検出器設置地点においては、大量の宇宙線 μ 粒子及び環境 γ 線がバックグラウンドとなるため、陽電子による単一の信号だけではニュートリノ事象を同定することは不可能である。そのため遅延同時計測法 (Delayed Coincidence) を用いる。図 2.1 は検出原理の模式図である。

1. 陽電子は生成後すぐ ($t \sim 0$) に電子と対消滅を起こして2本の γ 線となって観測される。中性子へ反跳エネルギーはほとんど無視できるので、陽電子からの信号は反電子ニュートリノのエネルギーから逆 β 崩壊の閾値 ($1.8MeV$) を引き、対消滅で γ 線になった質量 ($1.022MeV$) を足したものになる。

$$\begin{aligned} E_{prompt} &= E_{\nu} - 1.8MeV(threshold) + 1.022MeV(annihilation) \\ &\sim E_{\nu} - 0.8MeV \end{aligned}$$

2. 中性子は液体シンチレータ中の陽子と衝突しながら、減速して熱中性子となる。熱中性子となった後は捕獲断面積の高いGdに吸収され、全エネルギー約 $8MeV$ の γ 線となって放出される。Gdの(n, γ)反応は1.)の過程で得られる陽電子信号から $t \sim 42\mu sec$ 後 (Gd0.05%の場合) に観測される。

$$E_{delayed} = \sum \gamma s \sim 8MeV$$

1.)の過程の陽電子の信号は先発信号 (Prompt signal) と呼ばれ、2.)の過程の中性子の信号は後発信号 (Delayed signal) と呼ばれる。このように2種類の信号を要求する遅延同時計測はバックグラウンドを格段に減らすことが可能である。

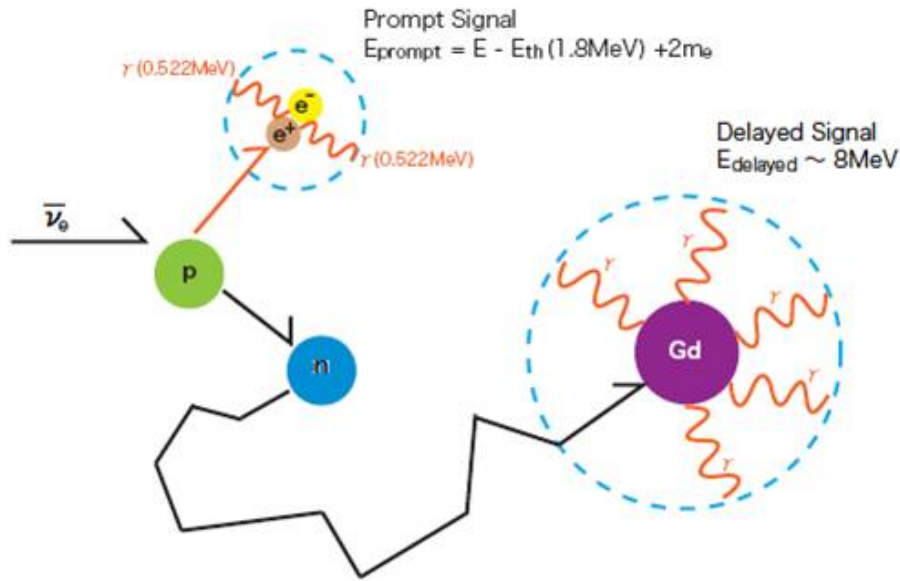


図 2.1: 遅延同時計測の反応模式図。逆 β 崩壊で放出された中性子がガドリニウムに吸収される。

2.3 バックグラウンド事象

本実験においてニュートリノ信号は前述の3つの条件を充たすものである。しかし、ニュートリノ以外でもこれら3条件を偶発的 (Accidental)、もしくは相関的 (Correlated) 理由で満たすバックグラウンドは存在し、以下のように2種類に分類される。

Accidental バックグラウンド

先発信号の様な信号と後発信号の様な信号がそれぞれ独立に起こり、偶発的に設定している時間幅に入ってくるバックグラウンドが Accidental バックグラウンドである。偽先発信号頻度 R_p (Hz)、偽後発信号頻度を R_d (Hz) とすると、設定時間幅 τ (sec) の間に Accidental バックグラウンドの起こる頻度は、

$$R = R_p \cdot R_d \cdot \tau$$

と表すことができる。主な偽先発信号は環境 γ 線である。また主な偽後発信号は検出器をかすめた宇宙線である。

Correlated バックグラウンド

先発信号の様な信号と後発信号の様な信号がある1つの原因で起こり、相関的な理由で設定している時間幅に入ってニュートリノ信号を疑似するものが Correlated

バックグラウンドである。このバックグラウンドは主に宇宙線に起因したものであり、以下の原因が考えられる。

1. 高速中性子

宇宙線 μ 粒子が地中や検出器中の原子核と核反応を起こして生成された高速中性子が、検出器内で陽子と衝突しながら熱化し、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偽先発信号となり、熱化した中性子が Gd に捕獲されて放出される γ 線が偽後発信号となる。

2. Michel electron

μ 粒子は電離によりエネルギーを失って最終的には、 $\tau \gg 2.2\mu\text{sec}$ の寿命で崩壊する。

$$\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e(\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_\mu(\nu_\mu)$$

μ 粒子が Veto されず ($\sim 1\%$) 偽先発信号となる。崩壊して出た陽電子 (電子) は最大 53MeV の連続スペクトルになり、 8MeV も含まれるため偽後発信号となる。

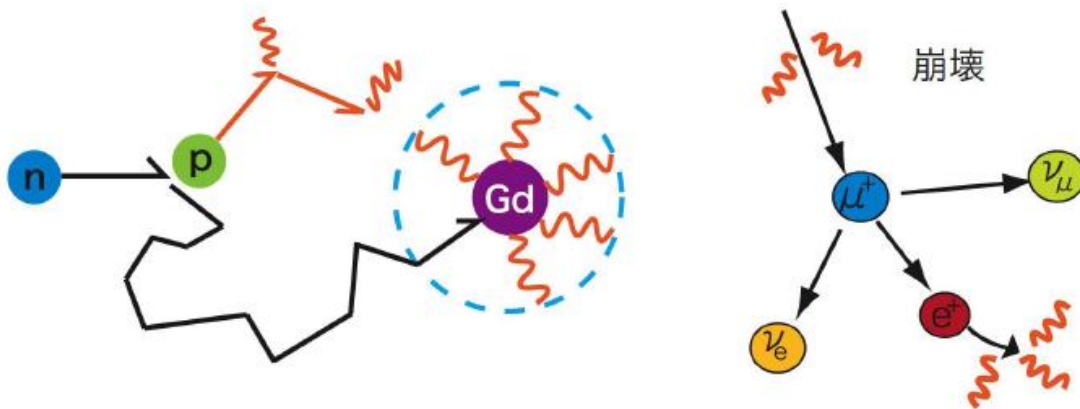


図 2.2: 主な Correlated バックグラウンドの模式図。左図は高速中性子、右図は μ 粒子の崩壊による反応

第3章 ニュートリノ源

3.1 高速実験炉常陽

高速実験炉「常陽」は茨城県大洗町にある。JAEA(Japan Atomic Energy Agency)が所有、運営している。常陽の写真を図 3.1 に示す。高速増殖炉の開発については原子力先進諸国は概ね実験炉 = 原型炉 = 実証炉の3段階を経て、商業用大型炉へと向かう開発方針をとっている。常陽はその第一段階の実験炉として建設された高速炉である。1970年に着工し、77年には臨界を達成している。現在常陽はおおよそ $60days/cycle$ で運転を繰り返している。そのため原子炉稼働時と停止時のデータを容易に測定できる。熱出力は $140MW_{th}$ で一般的な発電用原子炉に比べて $1/20$ 以下であるが、高速炉としては国内最大である。



図 3.1: 常陽外観

現在世界で稼働している発電炉の80%は軽水炉である。軽水炉では核分裂によって発生する中性子を水を使って減速させて使用している。水は中性子減速作用が大きいが中性子吸収作用も大きいため、燃料には濃縮ウランを用いて発生する中性子

の数を増やしている。また同時に水は冷却材としても使われている。一方、高速炉では核分裂によって発生する中性子を減速せずに、そのまま使用する（高速中性子）。そのため冷却材には中性子減速作用の大きい水は使えない。冷却材には中性子減速作用が小さく熱伝導率の良いナトリウムを使用する。高速炉の燃料には主に ^{239}Pu が用いられる。

常陽の炉心は高さ 500mm、直径 800mm、容積が約 260ℓ である。常陽ではプルトニウムとウランの混合燃料を使っている。

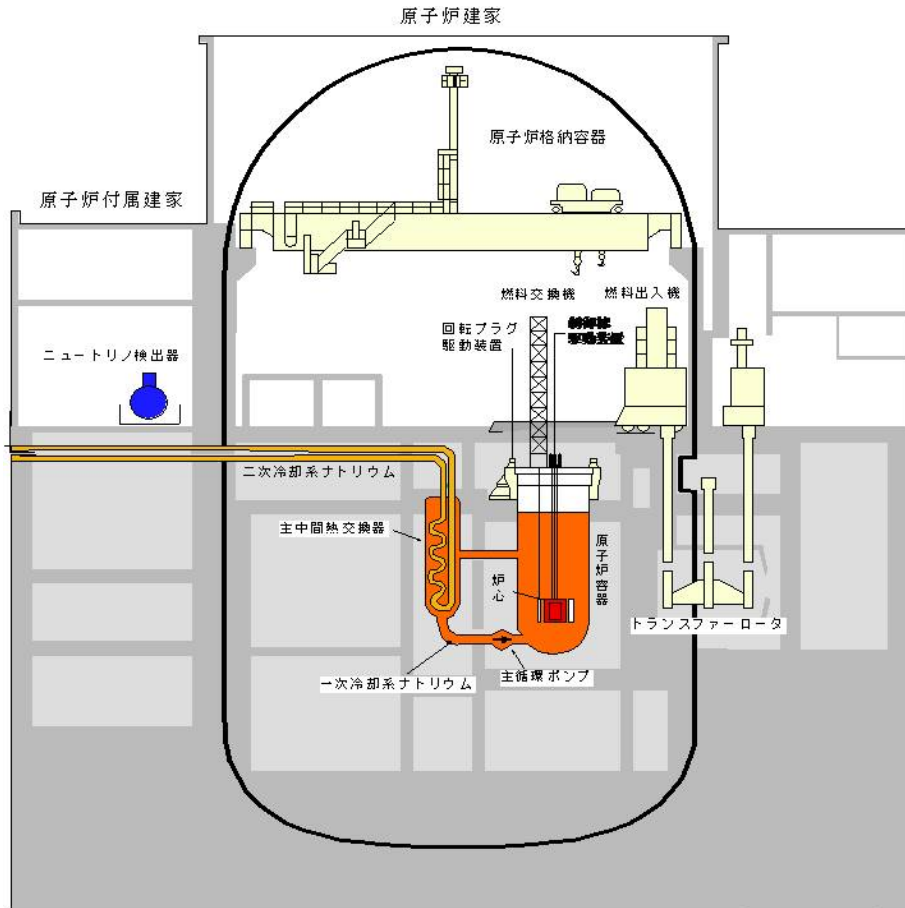


図 3.2: 検出器設置場所

3.2 ニュートリノフラックス

^{235}U や ^{239}Pu の核分裂によって放出されるエネルギーはともに 200MeV 程度である。 $1\text{MeV} = 4.45 \times 10^{-20}\text{kW}$ なので、一回の核分裂により放出されるエネルギーは

$$4.45 \times 10^{-20}(\text{kW}/\text{MeV}) \times 200(\text{MeV}) = 8.9 \times 10^{-18}(\text{kW})$$

に相当する。常陽の出力は 140MW_{th} なので一秒あたりの反応回数は

$$140(\text{MW}_{th}) / (8.9 \times 10^{-18}(\text{kW})) = 4.4 \times 10^{18}(\text{回}/\text{sec})$$

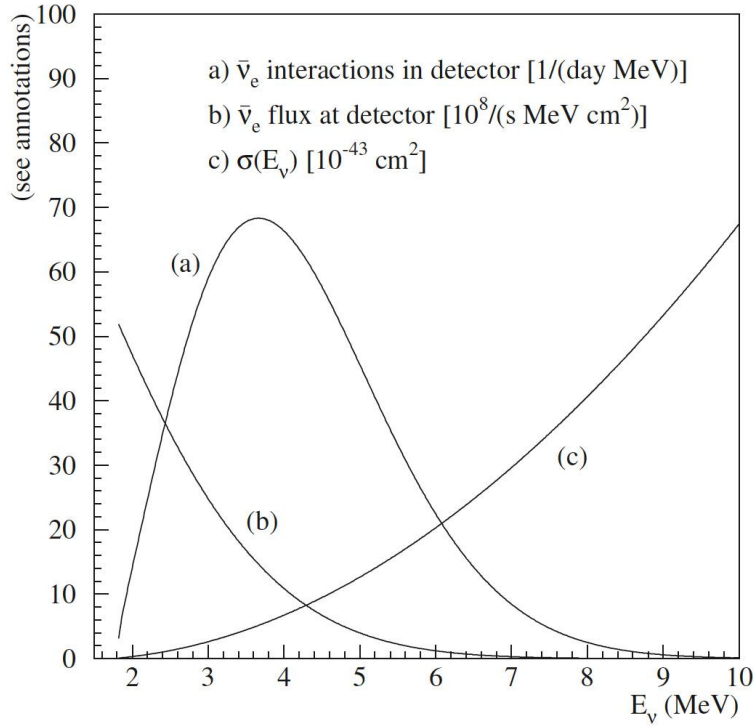


図 3.3: 観測されるニュートリノのエネルギースペクトル

となる。一回の反応あたり6個のニュートリノが発生するので、一秒あたり 2.6×10^{19} 個のニュートリノが炉心から放出される。検出器は炉心から 25m の位置に設置される。以上より検出器を通過するニュートリノのフラックスは、

$$2.6 \times 10^{19}(\text{個}/s) \times \frac{1.1m^2}{4\pi \times 25m \times 25m} = 3.6 \times 10^{15}(\text{個}/s)$$

となる。

逆 β 反応の閾値は $1.8MeV$ で、全断面積は放出される陽電子のエネルギー $E_e^{(0)}$ と運動量 $p_e^{(0)} = \sqrt{E_e^2 - m_e^2}$ を使って以下のように表わされる。

$$\sigma_{\nu p}^{(0)} = \frac{2\pi^2}{1.7152m_e^5\tau_n} E_e^{(0)} p_e^{(0)} = 9.6 \times 10^{-44} E_e^{(0)} p_e^{(0)} [cm]$$

ここで m_e は陽電子の質量、 τ_n は中性子の寿命である。図 3.3 に逆 β 反応で観測されるニュートリノのエネルギースペクトルを示す。約 $4MeV$ のニュートリノが最も観測されることがわかる。

全断面積に液体シンチレータに含まれる全陽子数と検出器を通過するニュートリノの数を掛け合わせると一日当たりの反応数を求めることができる。

$$9.6 \times 10^{-44} E_e^{(0)} p_e^{(0)} \times 3.6 \times 10^{15}(\text{個}/s) \times 5.90 \times 10^{28} = 187\text{event}/\text{day}$$

第4章 実験装置

4.1 実験装置概要

検出器本体は紫外線透過型のアクリル板を半球状に加工したものを2つ重ねて球状にしてねじ止めされている。アクリル球頭頂部には煙突が接着されており、この部分からチェックソースの出し入れを行う。内部はガドリニウム入りの液体シンチレータで満たす。アクリル球はアルミの支持台に固定されており、アルミの支持台は地面とアンカーで固定されている。アクリル球の周囲には8インチの光電子増倍管が16本設置されている。アクリル球の下にはオイルパンが設置されており、万一オイルが漏れた場合に備えている。このプロトタイプ検出器の周囲に暗箱を作成し、光漏れがないようにしている。暗箱の上部と側面部に宇宙線 veto カウンターを設置する。さらに側面と底面にパラフィンブロックと鉛を設置してバックグラウンドの遮蔽する。暗箱内部にはモニター用の酸素濃度センサー、温・湿度センサー、有機ガスセンサーを配置する。図 4.1 にプロトタイプ検出器の概略図を示す。

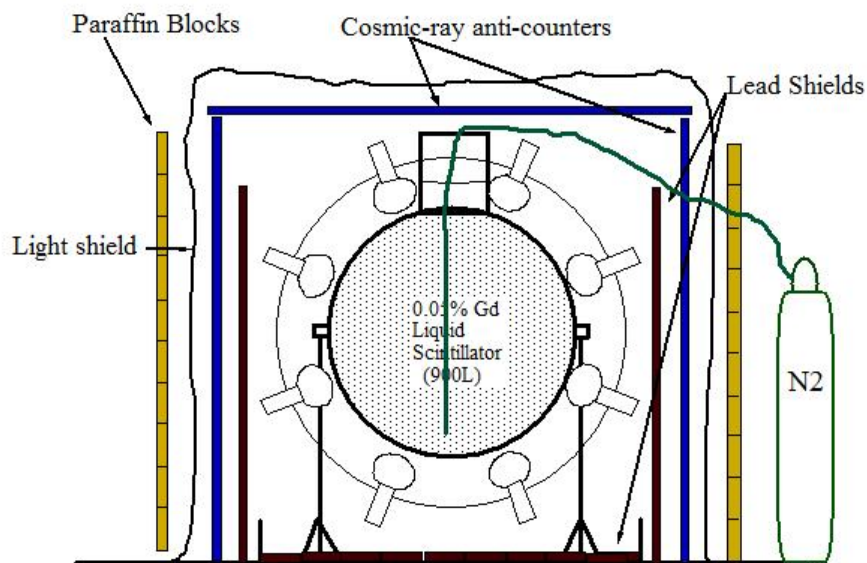


図 4.1: 実験装置概要図

アクリル球に取り付ける光電子増倍管の位置と、炉心との位置関係を示す。

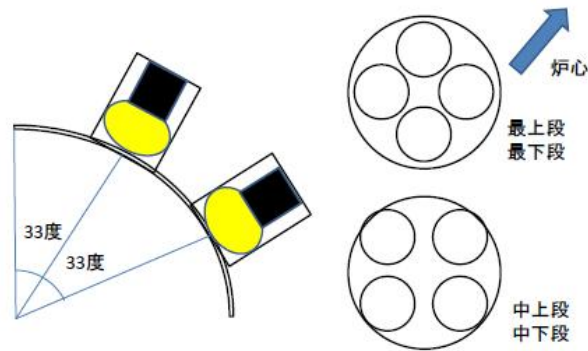


図 4.2: アクリル球に取り付ける光電子増倍管の位置

4.2 液体シンチレータ検出器

4.2.1 液体シンチレータ

放射線のエネルギーにより発光する溶液である。本実験では市販の Gd が 0.5% 含まれている液体シンチレータ (BC-521) を薄めて使った。BC-521 は市販品のため詳しい成分は企業秘密で分からない。本実験で用いた液体シンチレータの内容物とその化学式は以下の通りである。

BC-521 → 0.5 % Gd-LS

PC → C_9H_{12}

P850 → C_nH_{2n+2}

PPO → $C_{15}H_{11}NO$

bis-MSB → 1,4 ビス-(*o*-メチルスチリル) ベンゼン

内容物の配合比率と特性を示す。

-	密度	発火点	H/C	配合
BC-521	0.89	44	1.314	10%
PC	0.880	54	1.33	14%
P850	0.763	99	2.14	76%
PPO	-	-	-	1.5g/l
bis-MSB	-	-	-	0.2g/l

表 4.1: ガドリニウム入り液体シンチレータの組成

-	吸収波長	発光波長
PPO	303	370
bis-MSB	347	422

表 4.2: 発光剤の特製

4.2.2 光電子増倍管

検出器では浜松ホトニクス製の8インチ光電子増倍管 (R5172) を16本用いる。各々の光電子増倍管はアクリルで作成されたハウジングに入れられており、透明のシリコンゴム (信越化学工業: 型番 KE-103) で固定されている。8インチ PMT の特性を表 4.2 に、写真を図 4.4 を示す。このハウジングをアクリル球に接着されたアクリル製のリングにねじ止めする。PMT の取り付け位置はアクリル球を上から4段に分けて考え、1段につき4本ずつ取り付けた。PMT 16本を全て装着した後の検出器の写真を図 4.5 に示す。

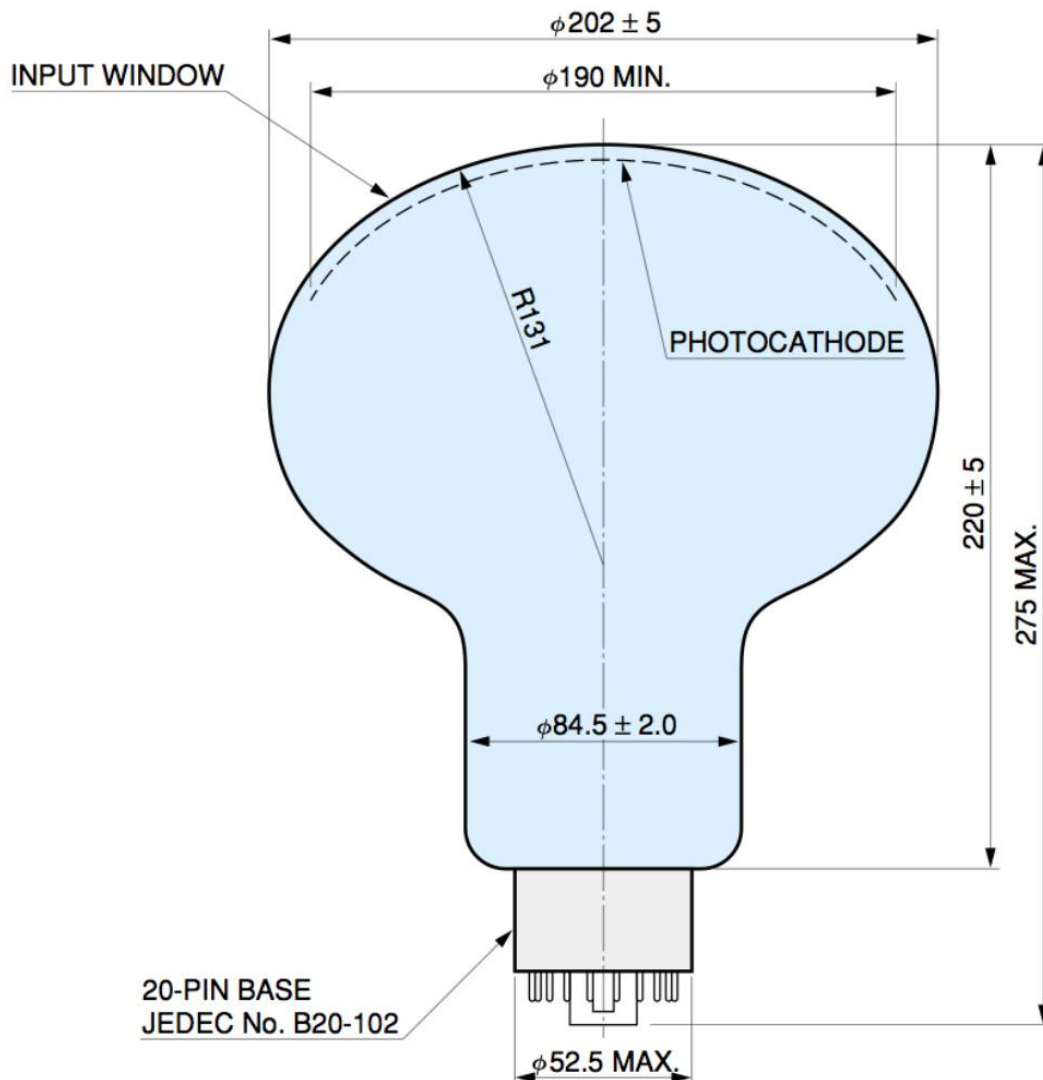


図 4.3: 8インチ PMT の概略図

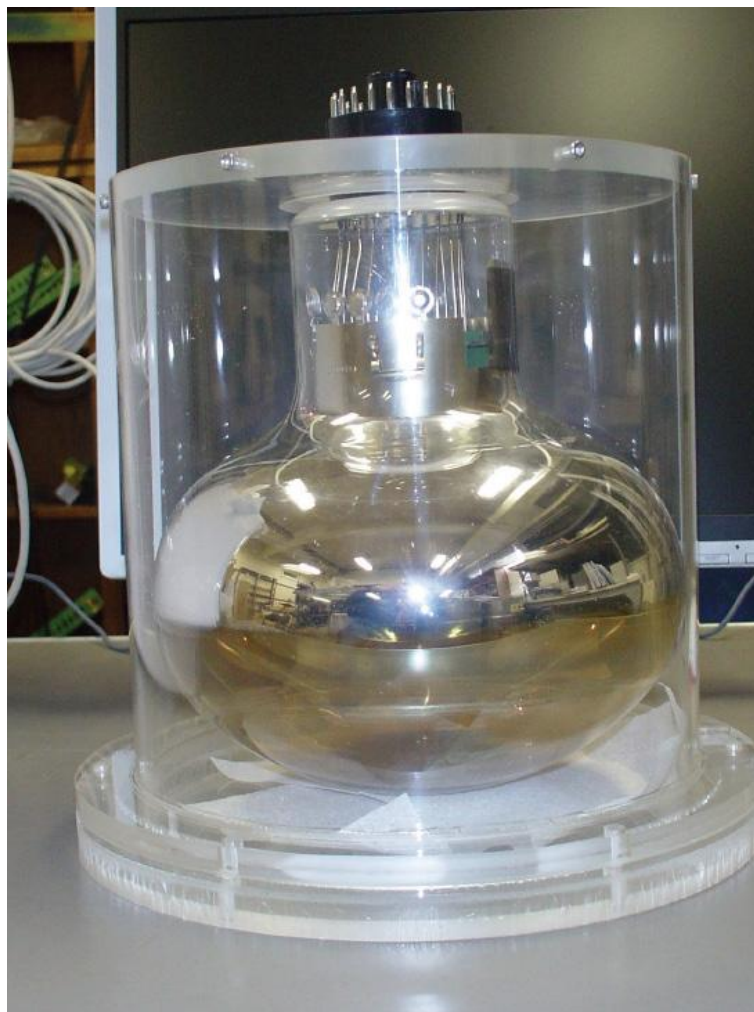


図 4.4: 8 インチ PMT を PMT ハウジングに入れたところ

Parameter	Typical	Maximum	Unit
Cathode Quantum Efficiency at 420 nm	22	-	%
Supply Voltage for Gain of 10^7	1500	1800	V
Anode Dark Current at 10^7 and $25^\circ\text{C} > 0.25\text{p.e.}$	50	700	mA
Transit Time Spread at 10^7 Gain (FWHM with 1p.e. detection)	2.4 -	- -	ns
Anode Pulse Rise Time	3.8	-	ns
Transit Time	55	-	ns
Peak to Vally Ratio	2.5	-	-
After Pulse(100ns ~ $16\mu\text{s}$ after Main Pulse)	2	10	%

表 4.3: 8 インチ PMT(R5912) の特性

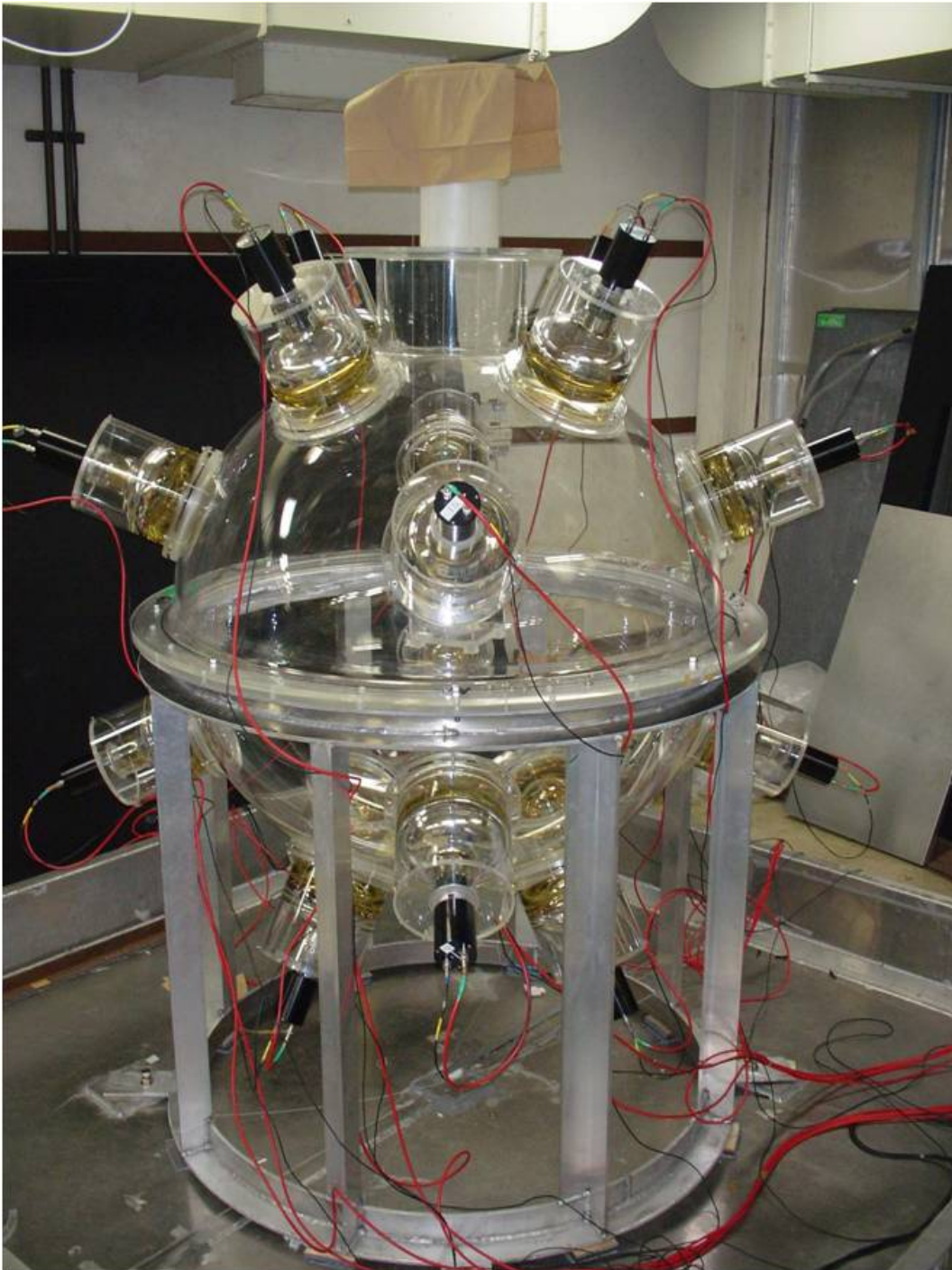


図 4.5: PMT 装着後の検出器

4.2.3 μ メタル

Fe-Ni合金にCrを加えたもので透磁率が大きく磁場が μ メタル内部を通るために、 μ メタルで囲まれた領域の磁場をキャンセルする効果がある。PMT近傍の磁場を消すために μ メタルをPMTの周りに設置した。ここで使用した μ メタルはKamiokande実験で使用されていたものと同タイプで20インチ用である。図4.7は μ メタルを取り付けた時と μ メタルを外した時の ^{60}Co 線源のデータを比べた結果である。光量に約10%の違いがある。 μ メタルの効果を確認できる。図4.6に取り付けの様子を示す。

4.3 バックグラウンドシールド

4.3.1 γ 線遮蔽

環境 γ 線のバックグラウンドを防ぐために鉛を設置する。暗箱側面に $90\text{cm} \times 180\text{cm} \times 2\text{mm}$ の鉛板を置く。また底辺部には $10\text{cm} \times 20\text{cm} \times 5\text{cm}$ の鉛ブロックを置く。以下に鉛の設置図を示す。

4.3.2 熱中性子遮蔽

遅延同時計測を用いてニュートリノ観測を行う際に correlated なバックグラウンドになるのが高速中性子である。高速中性子が液体シンチレータの中に入ると熱化されるまで周りにある陽子を弾性散乱を繰り返す。このとき反跳された陽子が液体シンチレータにエネルギーを落とし、液体シンチレータが発光する(先発信号)。その後、熱化された中性子は中性子捕獲断面積が大きいガドリニウムに捕獲される(後発信号)。このバックグラウンドを抑えるためにパラフィンブロックを暗箱の4つの外側面に設置した。パラフィンブロックは1つが $10\text{cm} \times 20\text{cm} \times 5\text{cm}$ の大きさで、これを積み重ねて厚さ $1\text{m} \times 1.5\text{m} \times 5\text{cm}$ の鉄製のフレームに入れる。これを数ユニット作成し側面に設置した。パラフィンブロックは熱中性子を捕獲する性質がある。途中ボロン(ホウ素)入りのパラフィンブロックを320個分追加した。ホウ素の同位体のうち ^{10}B は非常に大きな中性子吸収断面積をもつので、更に多くの中性子を防ぐことができると考えられる。以下にパラフィンブロックの設置図を示す。

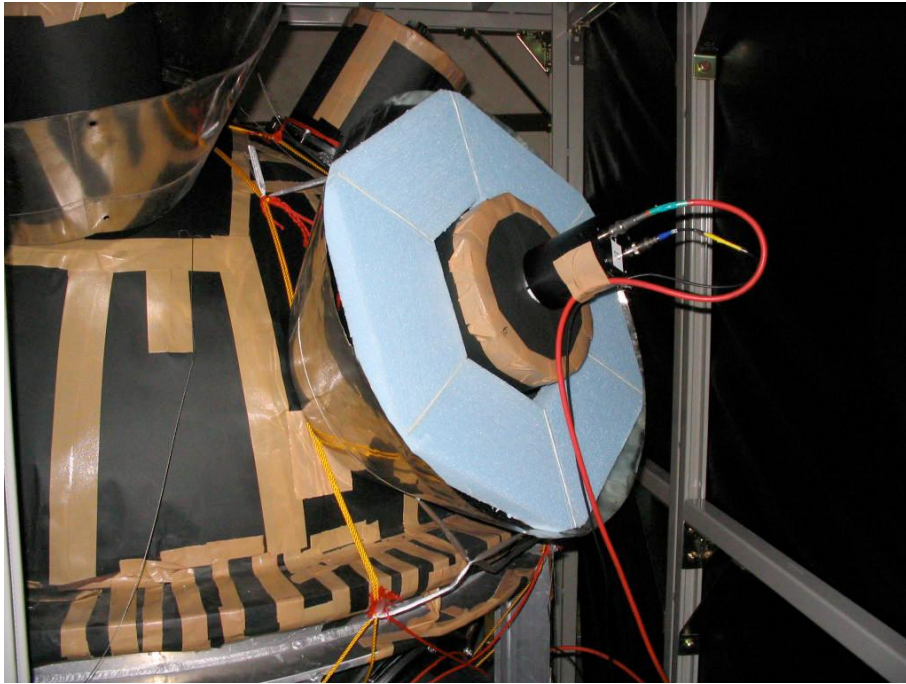


図 4.6: μ メタルを取り付けたところ

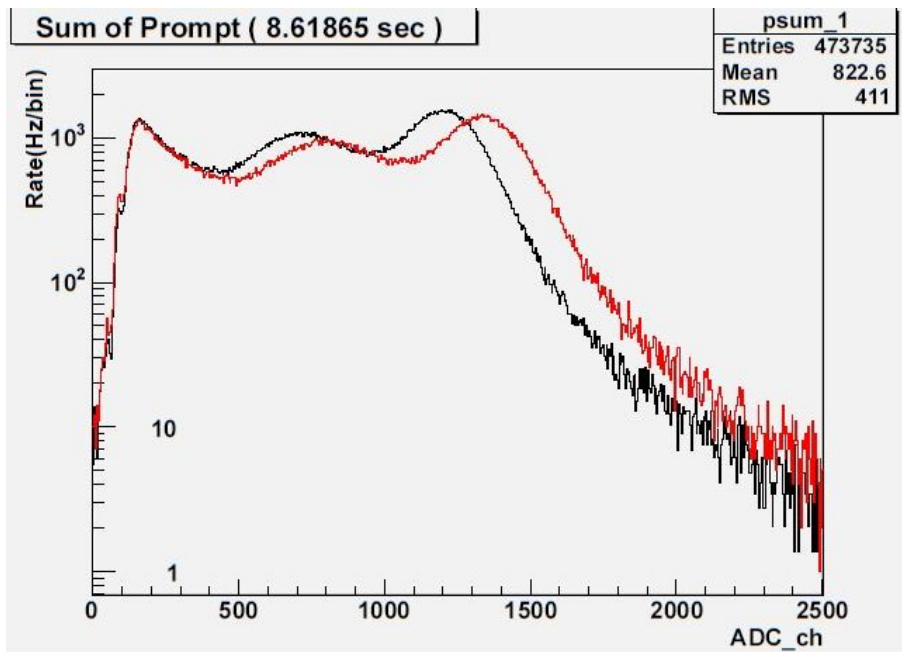


図 4.7: μ メタルをつけた時と外した時の先発信号の ADC 分布。 ^{60}Co 線源を使用。



図 4.8: 鉛板を固定しているところ

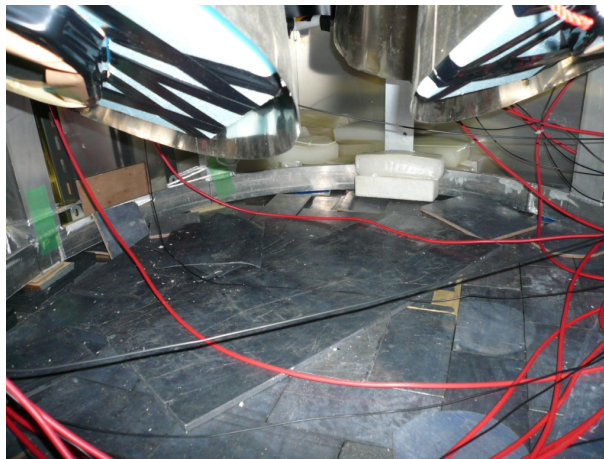


図 4.9: アクリル球の下に置いている鉛ブロック

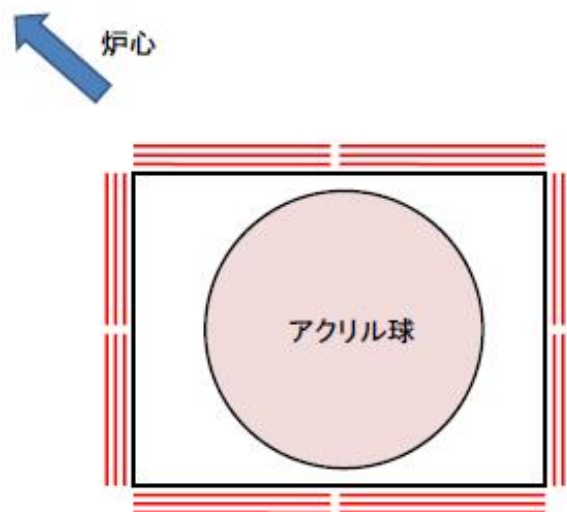


図 4.10: 鉛配置図

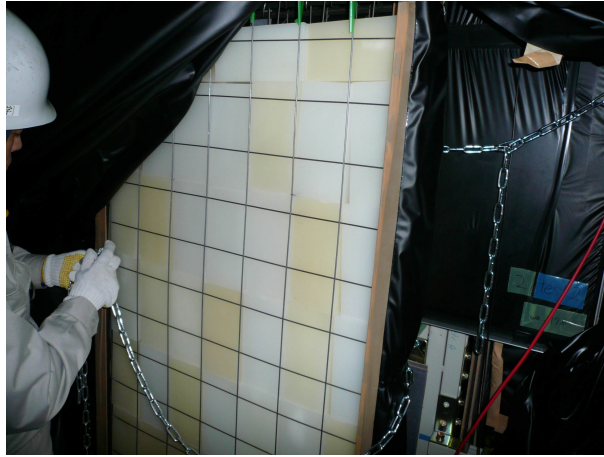


図 4.11: パラフィン壁を固定しているところ



図 4.12: アクリル球の下に置いているパラフィンブロック

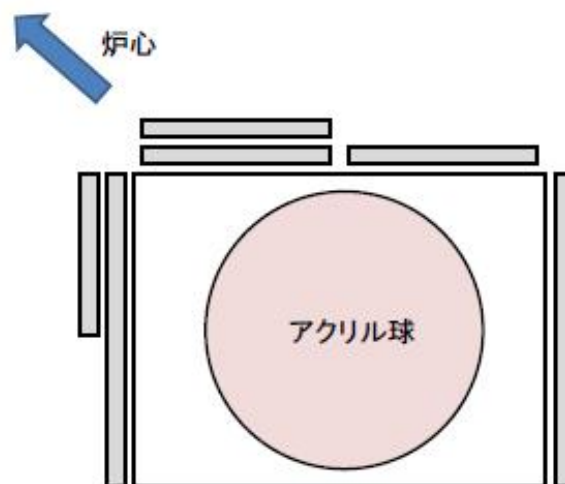


図 4.13: パラフィンブロック配置図

4.4 宇宙線 veto カウンター

宇宙線カウンターは暗箱の天井面と4つの内側面に設置した。天井面に設置したものは $1m \times 1m \times 0.6cm$ のプラスチックシンチレータを2枚重ねたもので、それぞれのシンチレータの2つの側面には波長変換バーが接着してある。写真を図4.15に示す。2本の波長変換ファイバーの終端には1.5インチのPMTが設置されており、上下のシンチレータで同時計測をすることができる。天井面にはこれが4ユニット並べてある。暗箱を上から見て左右の側面には $2.5m \times 1m \times 0.8cm$ のプラスチックシンチレータを2枚重ねたものが設置されている。そのシンチレータの短い方の側面には波長変換バーが接着されている。その波長変換バーの片側に1.5インチPMTが設置されており、上下のシンチレータで同時計測をすることができる。写真を図4.17に示す。暗箱を上から見て上下の側面には $2.3m \times 1.7m \times 5cm$ のステンレス製の箱が設置されている。これは Telescope Array グループが使用しているものである。内部には $1.5m \times 1m \times 1.2cm$ のプラスチックシンチレータが、中央部にPMT設置間隔を15cm空けて2枚重ねて設置されている。各プラスチックシンチレータには2cm毎に溝が切っており、そこに波長変換材入り光ファイバーが設置されている。設置されている光ファイバーの終端は並んでいるシンチレータ2枚毎にまとめられて、1インチPMTに設置されている。この2本のPMTにより、上下のシンチレータで同時計測をすることができる。写真を図4.19に示す。

4.5 窒素パージ

n/γ Pulse Shape Discrimination (波形弁別) 用に窒素パージを行い、光量をあげてエネルギー分解能を良くする。

一般に液体シンチレータにおける発光では、入射粒子の単位長あたりのエネルギー損失の大きさ (dE/dx) で発光時間が異なる。 dE/dx の大きい中性子や α 線などは発光時間が長く、 dE/dx の小さい γ 線などは発光時間が短い。

4.6 データ収集システム

16本の8PMTからの信号をAmpモジュールで増幅し、analog sumモジュールで足しあわしてからdiscriminatorモジュールに入れる。この16本の足し合わせ信号がトリガーとなる。遅延同時計測による制限から、

- Prompt Energy $> 3.5MeV$
- Delayed Energy $> 2.5MeV$
- $dt(t_{Prompt} - t_{Delayed}) < 100\mu sec$

の信号が来たときにデータを保存する。

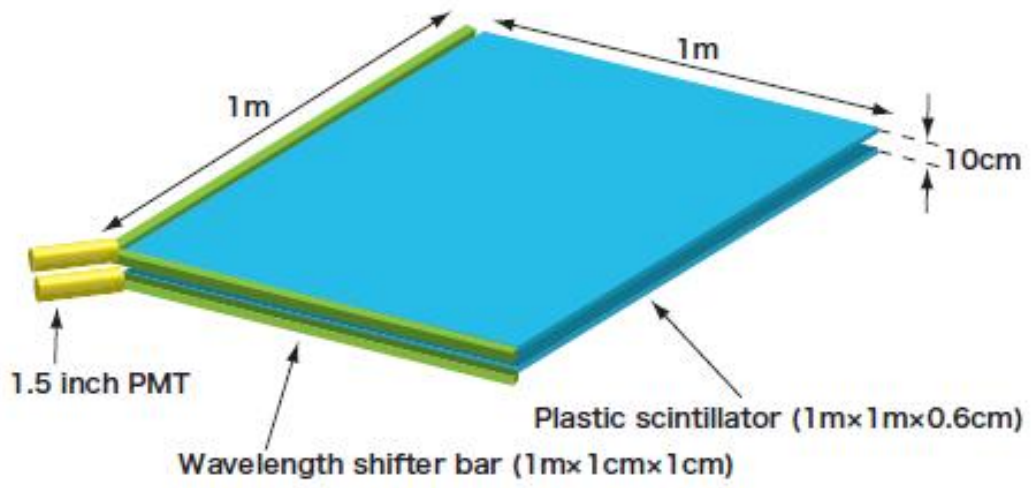


図 4.14: veto カウンター 1 の構造

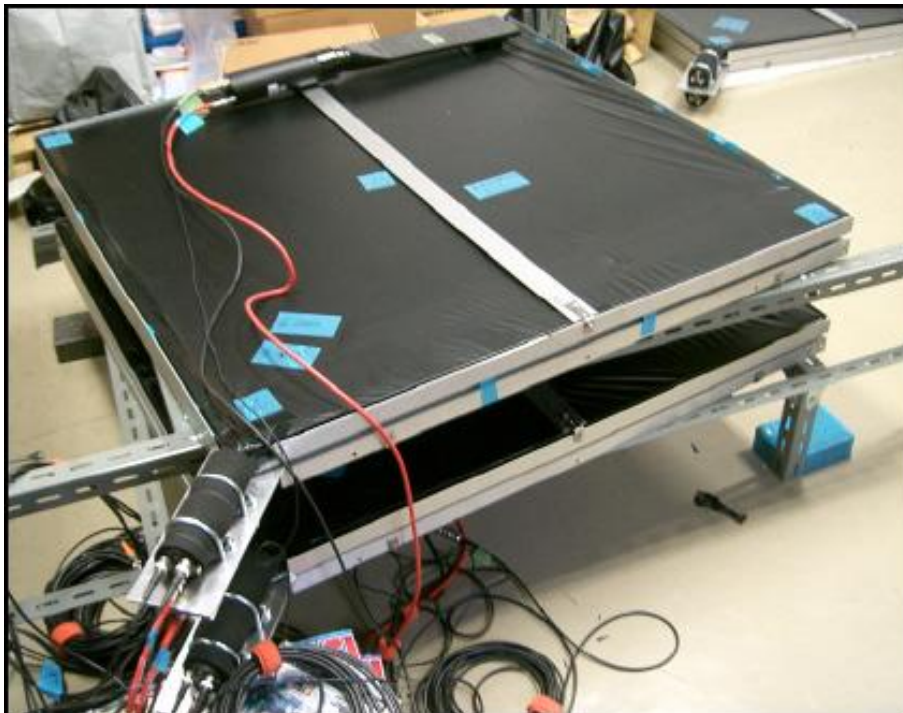


図 4.15: veto カウンター 1

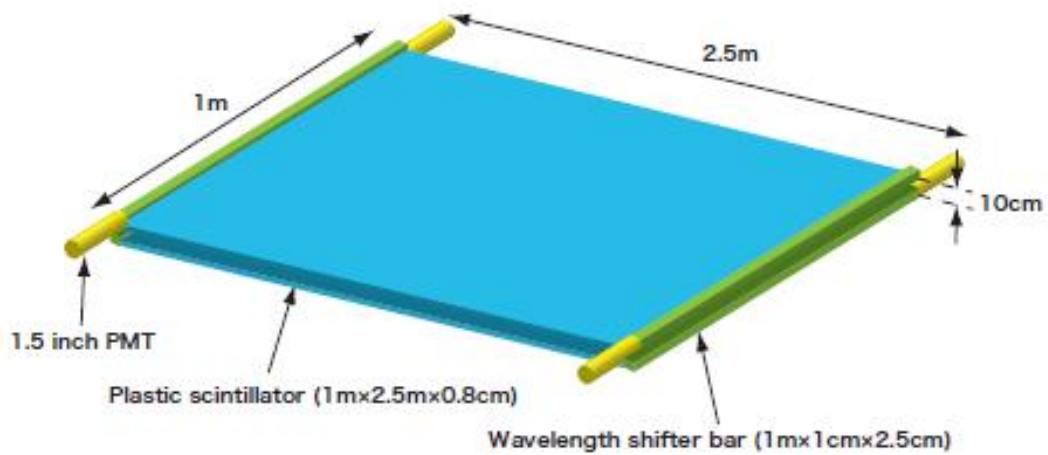


図 4.16: veto カウンター 2 の構造

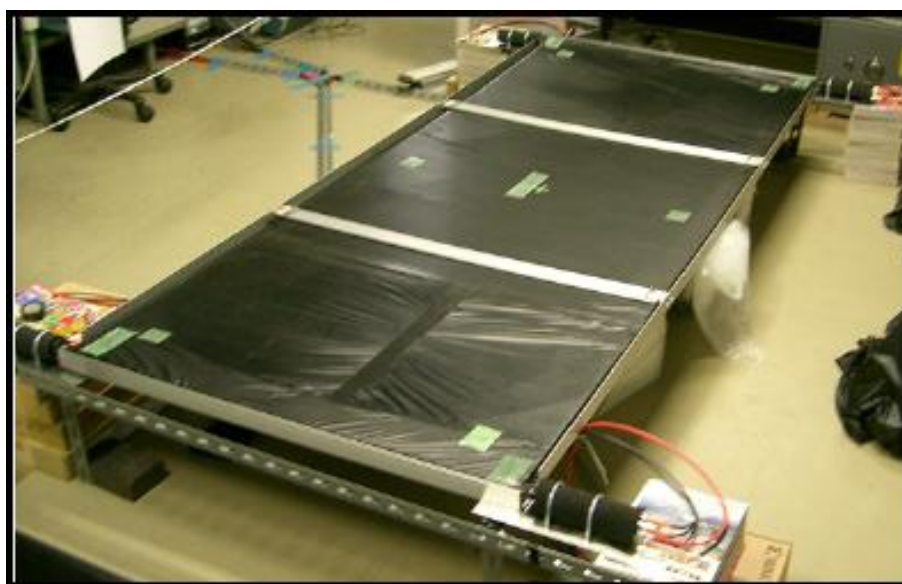


図 4.17: veto カウンター 2

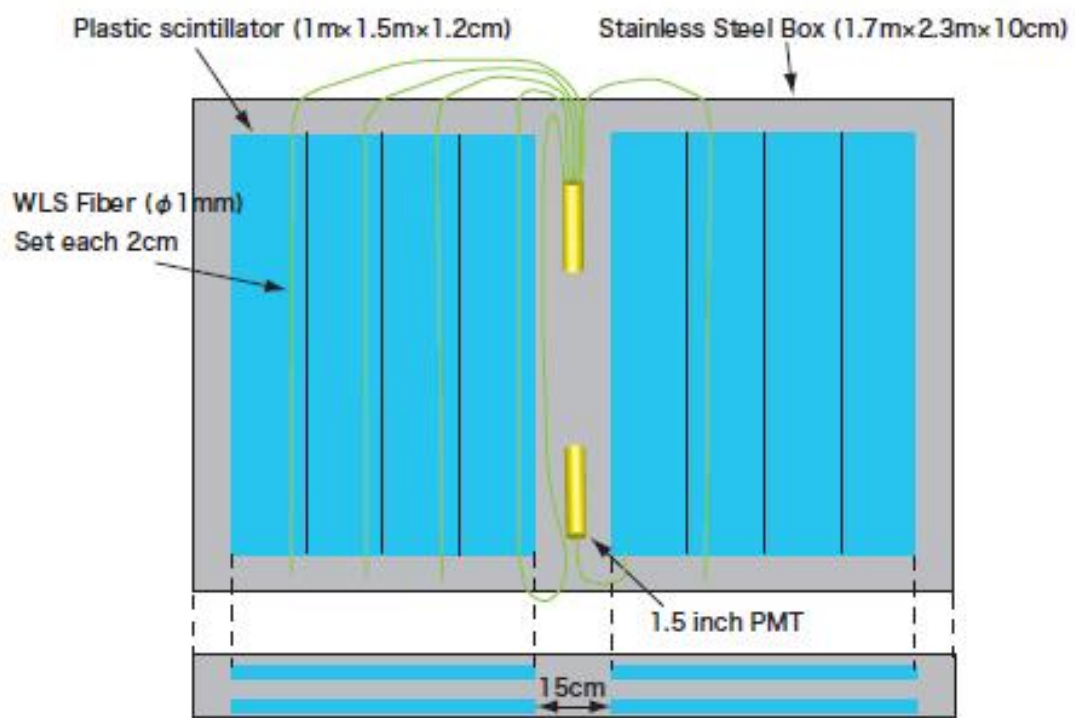


図 4.18: veto カウンター 3 の構造



図 4.19: veto カウンター 3

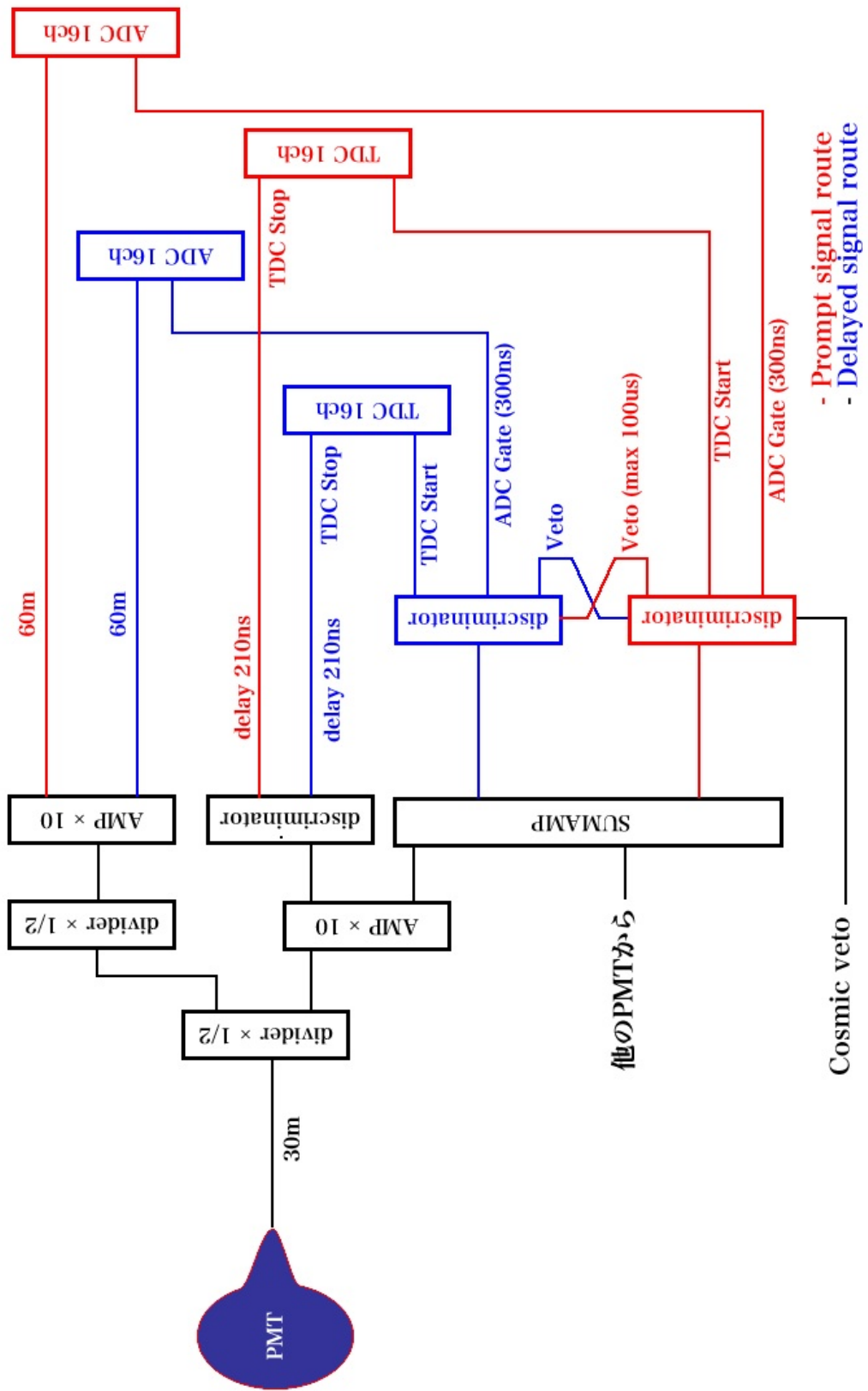


図 4.20: データ収集回路概要

4.7 モニターシステム

本実験装置は大学から離れた所にあるために、人が常駐することができない。そのためネットワークシステムに問題が起きた時や実験装置に問題が起きた時に、離れた場所においてもすぐに知る必要がある。

本実験では検出器に温湿度センサー（Picotech社 RH-02）、有機ガス濃度センサー（扶桑理化製品株式会社 FU-3U型トルエン警報器）、酸素濃度センサー（ジコー社 JKO-25SII）を設置した。温湿度センサーで得られる情報は解析に用いる。有機ガス濃度センサーはアクリル球が割れて中の液体シンチレータが万が一にも漏れたことを知るために設置した。また我々は液体シンチレータの発光量を多くするために液体シンチレータに窒素パージを行っていた。酸素濃度センサーは暗室内に窒素が充満して、暗室内での作業が危険でないか知るために設置した。

常陽は原子力施設であり、内部で得られる情報は厳重に管理される必要がある。しかし実験で得られるデータを現場のPCに貯め続けることは非現実的である。そのため常陽と東北学院大学をVPN(Virtual Private Network)でつないだ。VPNにより東北学院からのみ常陽内部の我々のPCを操作することが可能になった。

有機ガス濃度と酸素濃度が変化するのは異常事態であるので、すぐに知る必要がある。我々は各センサーに異常が発生した時にメールを自動的に送るシステムを作った。モニターシステムの概要を示す。

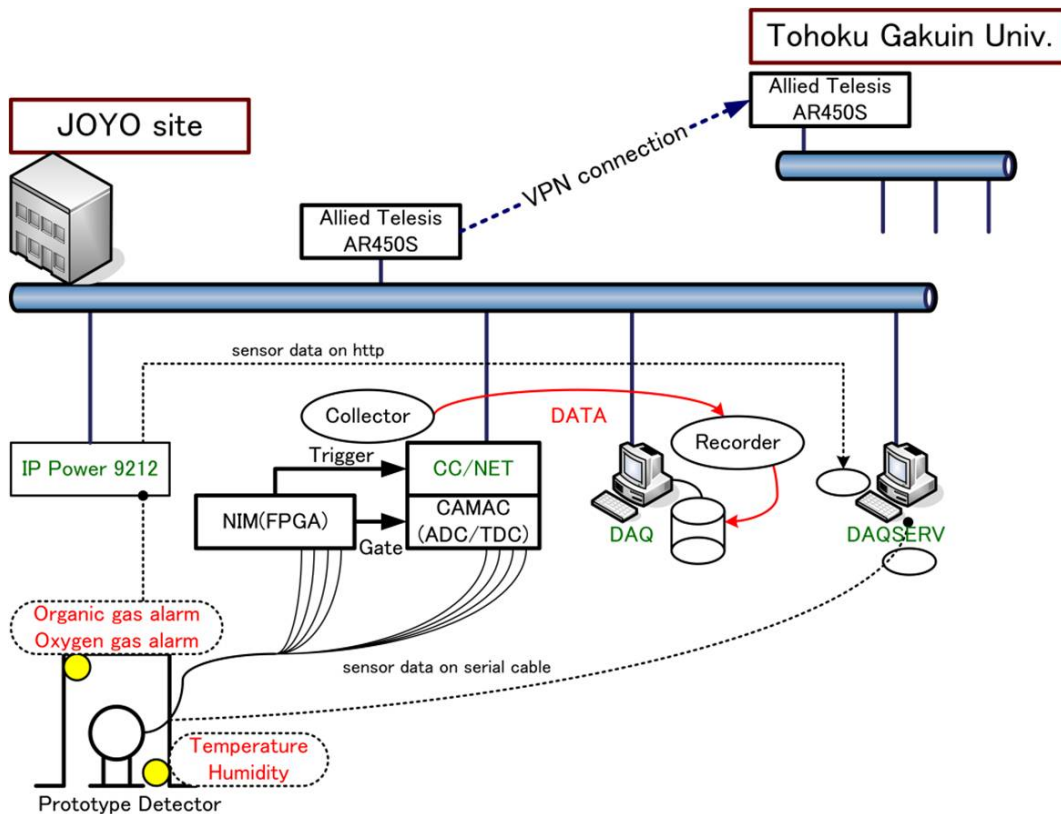


図 4.21: モニターシステム

この仕組みにより我々は最低限必要な情報をすぐに見ることができ、また異常が発生した場合はすぐさまメールが送られるので、素早い対処が可能になった。本実験ではさらにデータ収集システムの稼働状況、常陽と東北学院大学間の通信速度、センサーの接続が外れていないかを監視している。

実験現場の装置等を監視する機構は本実験のように、人間の常駐できない場所での実験において非常に重要である。

本実験では IP Power (Aviosys 社 IP Power 9212) という機器を使用した。本製品はネットワーク経由での電源の ON/OFF の制御、監視ができる。本実験では監視機能を使用した。酸素濃度センサーと有機ガス濃度センサーの外部出力端子は、閾値を超えると抵抗が無限大になる。IP Power では抵抗値の変化、もしくは電圧値の変化を読み取り、その閾値を超えた場合、変化したことを表示する。以下に IP Power と Web ブラウザ上での表示画面を示す。

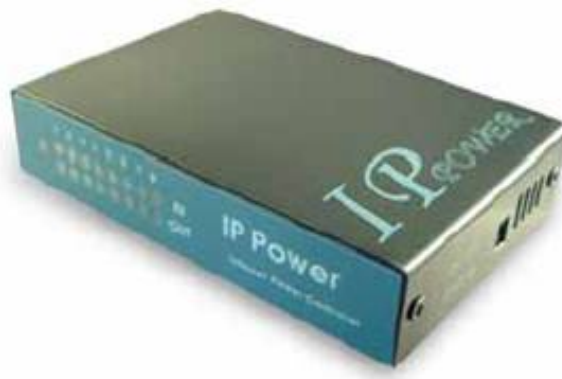


図 4.22: IP Power

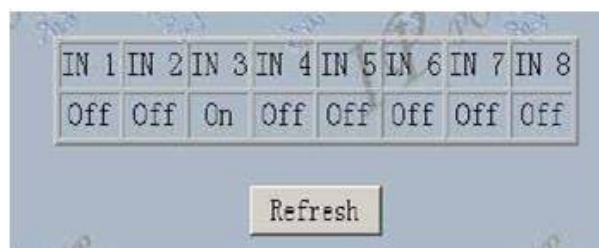


図 4.23: IP Power の Web ブラウザの表示画面



図 4.24: 有機ガスセンサー



図 4.25: 酸素濃度センサー

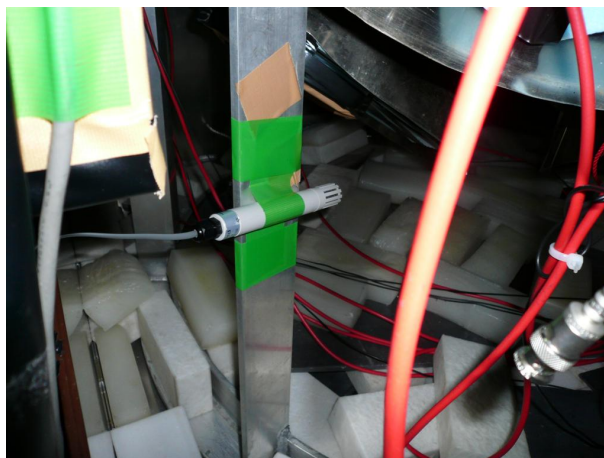


図 4.26: 温度湿度計

第5章 測定結果

5.1 線源による測定

プロトタイプ検出器に設置された光電子増倍管からの ADC SUM 値をエネルギーデポジットに変換するためにエネルギーキャリブレーションを行う。 γ 線源である ^{60}Co を用いて ADC 値 からの電荷を見る。この節では未知の事象のエネルギーデポジットを知るためにニュートリノ検出器のエネルギースケールとエネルギー分解能を決定する。また、擬似ニュートリノ信号として Am/Be 線源のスペクトルを示す。

5.1.1 ^{60}Co を用いた測定

^{60}Co のエネルギースペクトルを図 5.1 に示す。スペクトルの中に全吸収 Peak があることが分かる。この全吸収 Peak は線源から放出された γ 線が全てのエネルギーを落とし、検出器内部で全て吸収されることによって形成される。この Peak は光電効果、または Multi Compton 散乱によって引き起こされる。エネルギー校正直線は ^{60}Co の Peak を gaus fit してその Mean 値を使って作成する。その関係は以下の式で表される。

$$Energy(\text{MeV}) = 0.00181 \times ADCch$$

得られたスペクトルの全吸収 Peak のに基づいて液体シンチレータのエネルギー分解能を求めると、 $\sigma(E)/E(\text{MeV}) \sim 20\%$ であった。

5.1.2 Am/Be 線源を用いた測定

擬似ニュートリノ信号

Am/Be 線源は γ 線源及び、中性子線源として使用される。Am/Be 線源の液体シンチレータ中での反応を図 5.2 に示す。

Am/Be 線源内ではアメリシウム (Am) が崩壊して α 粒子が放出される。この α 粒子をベリリウム (Be) が吸収し、中性子を放出し、励起状態の $^{12}\text{C}^*$ に変わる。この $^{12}\text{C}^*$ は 4.43MeV の γ 線を放出して基底状態に戻る。この γ 線が先発信号になる。一方 Be から放出された中性子は熱中性子になるまで陽子と弾性散乱を繰り返し、Gd に捕獲される。中性子を捕獲した Gd は合計で 8MeV の γ 線を放出する。この γ 線が後発信号になる。以上の理由により、本実験では Am/Be 線源を疑似ニュートリノ源として使用する。

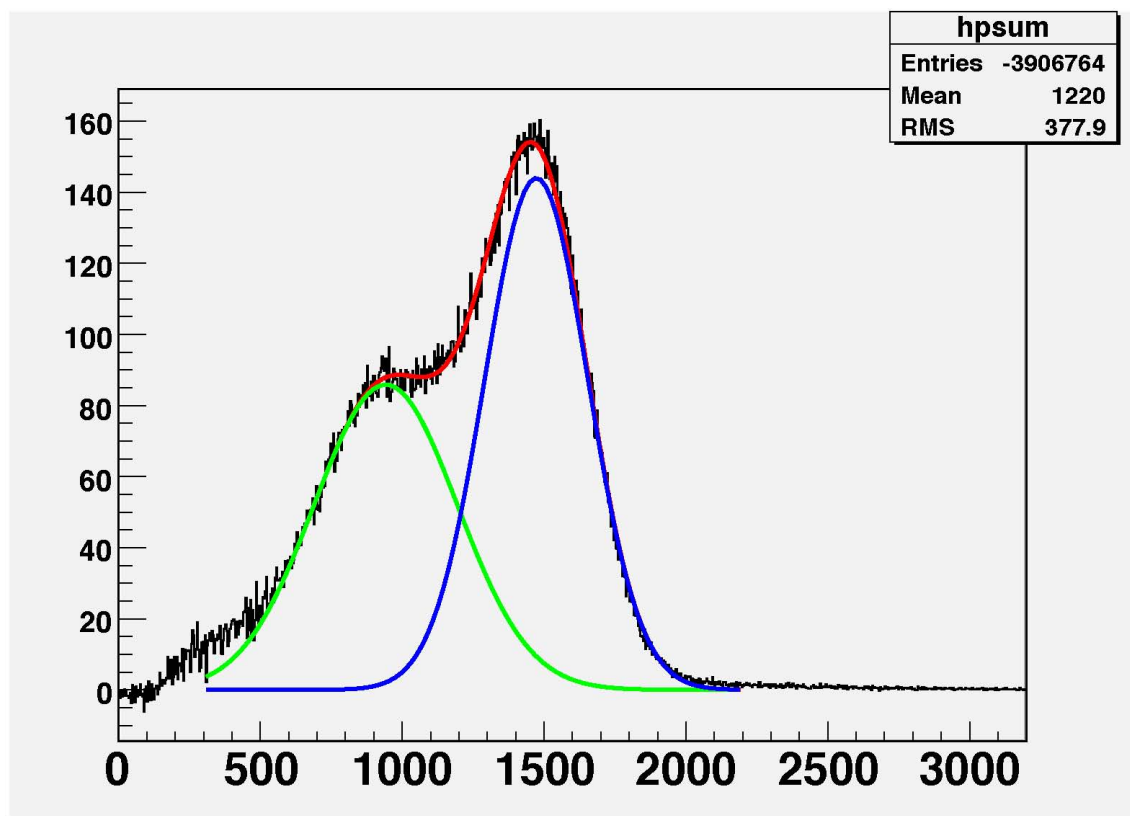


図 5.1: ^{60}Co のエネルギースペクトル。横軸は ADC 値 [ch]、縦軸は 1 bin 当たりの事象数

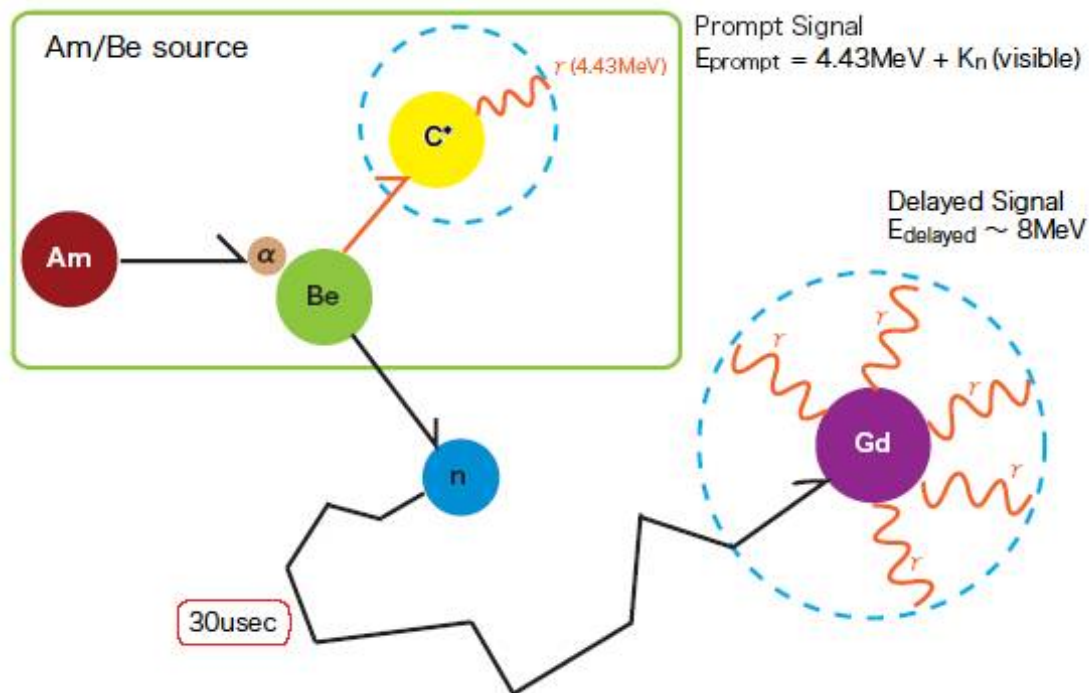


図 5.2: Am/Be 線源の液体シンチレータ中での反応

Am/Be 線源の測定結果

Am/Be 線源をアクリル容器に入れアクリル球の中心に来るように吊るし測定する。原子炉 OFF 時における Am/Be 線源有り と無し の結果を示す。先発エネルギーが 5MeV 、後発エネルギーが 9MeV 付近で事象が多くなっていることがわかる。

5.2 原子炉 ON,OFF 時の測定結果

原子炉 ON データは原子炉 OFF データにニュートリノの信号が追加されている。

- 原子炉 ON データ → ニュートリノ事象 + バックグラウンド事象
- 原子炉 OFF データ → バックグラウンド事象

ON データと OFF データを比較することによりニュートリノ信号を取り出すことができる。

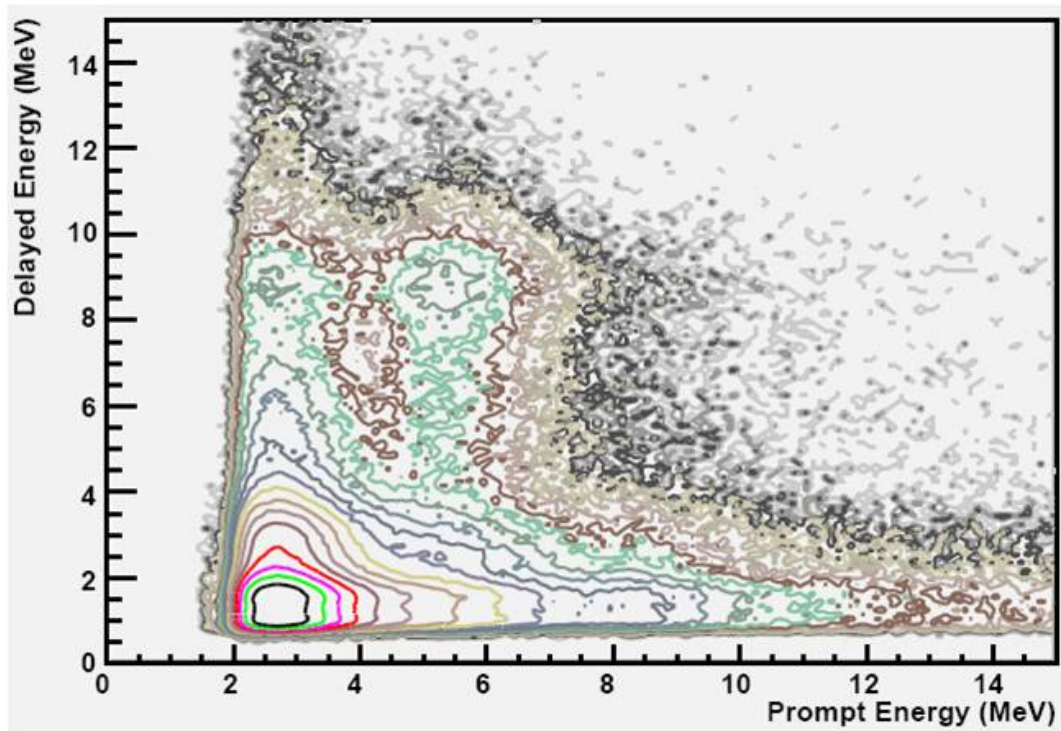


図 5.3: Am/Be 線源有りの先発信号と後発信号のエネルギースペクトルの二次元プロット

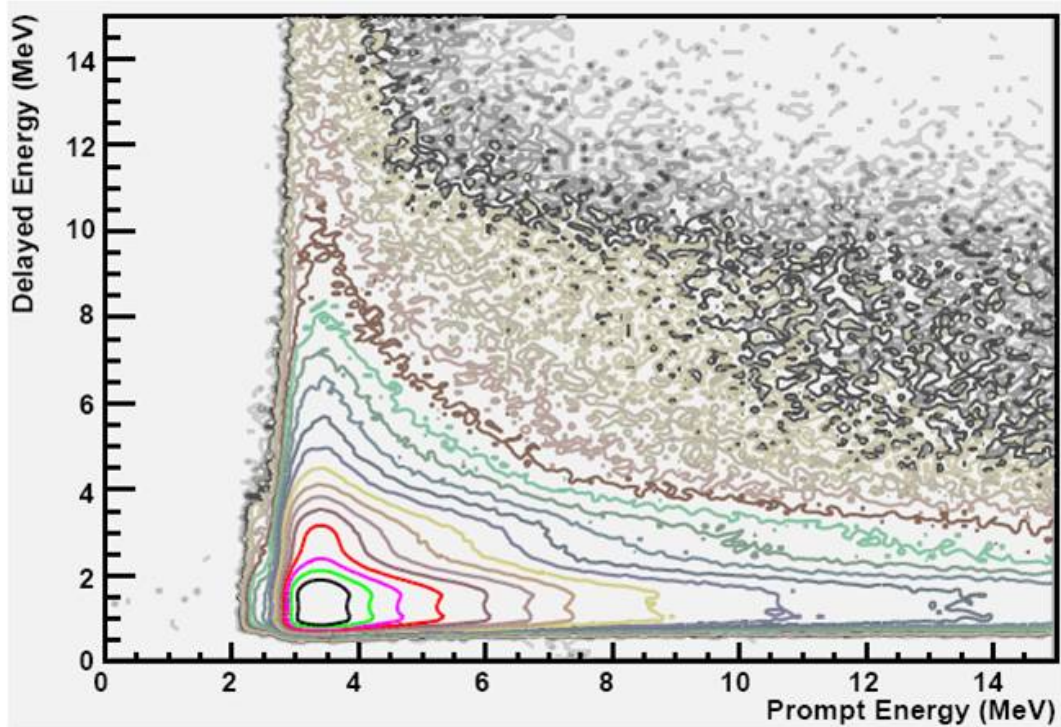


図 5.4: Am/Be 線源無し先発信号と後発信号のエネルギースペクトルの二次元プロット

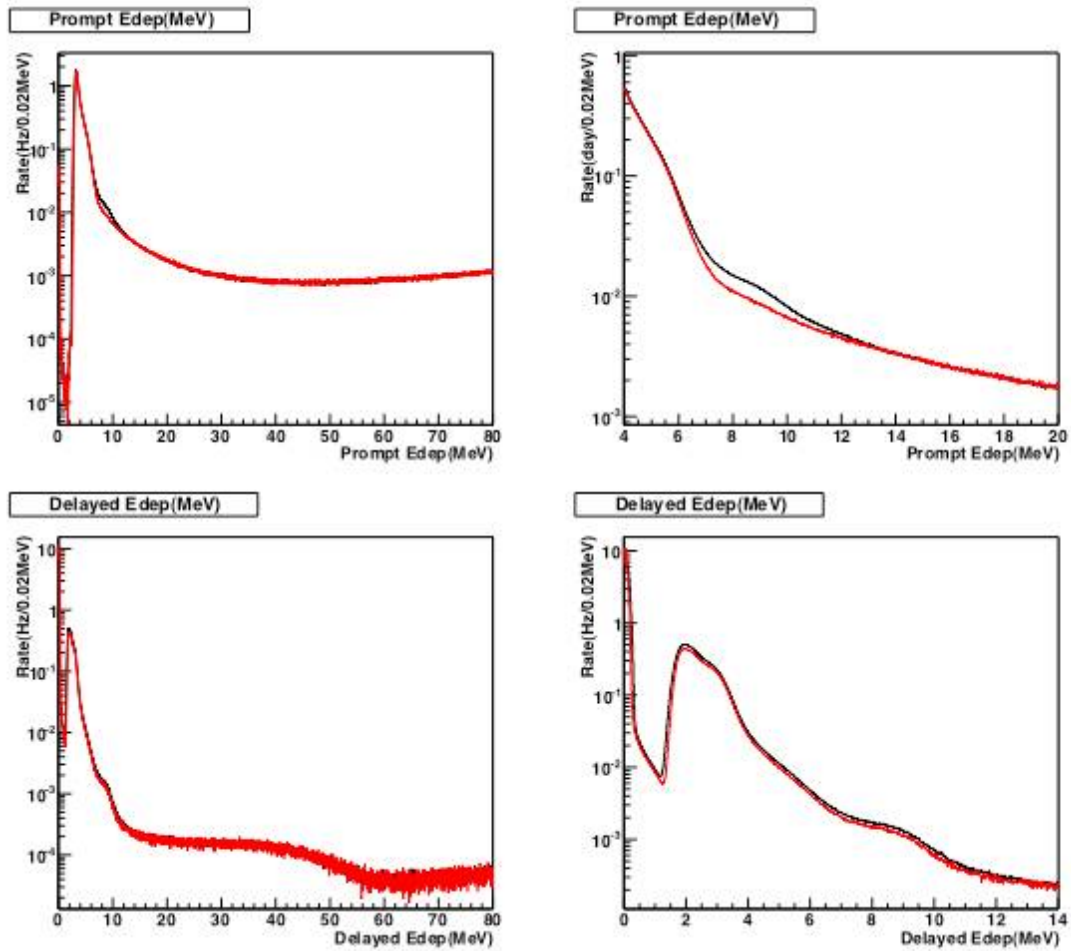


図 5.5: 原子炉 ON/OFF データのエネルギー分布の比較。黒が原子炉 ON データ。赤が原子炉 OFF データ。上段が先発エネルギー、下段が後発エネルギーの比較。右列は低エネルギーの領域。

第6章 ニュートリノイベントセレクション

6.1 概要

測定結果から原子炉 ON データもほとんどが BG 事象であることがわかるので、解析により事象を選別しニュートリノ事象を選別しなければならない。遅延同時計測の条件から先発エネルギーと後発エネルギー、中性子捕獲時間 dt による選別を行った。さらにバックグラウンド事象はアクリル球の表面付近で起こっていると思われるので、Charge Balance(エネルギーの標準偏差)による Fiducial Volume カットを行った。解析方法の説明とその結果について述べる。

6.2 選別条件

6.2.1 エネルギーによる選別

ガドリニウム入りの液体シンチレータを用いた遅延同時計測で観測されるエネルギーは、先発エネルギーは約 $4MeV$ であり後発信号は約 $8MeV$ である。擬似ニュートリノ信号を出す Am/Be 線源を用いた結果を使い、ニュートリノ事象を選別するエネルギーの範囲を決定する。図 6.1 は Am/Be 線源ありの Prompt-Delayed の二次元ヒストグラム、実際に Am/Be 線源ありの先発信号は $4MeV$ 付近、後発信号は $8MeV$ 付近の事象が多くなっていることがわかる。 $4.0MeV < \text{先発エネルギー} < 6.0MeV$ 、 $7.5MeV < \text{後発エネルギー} < 9.5MeV$ の信号をニュートリノ事象として選別する。

6.2.2 先発信号と後発信号の時間差による選別

ガドリニウムによる中性子捕獲時間はガドリニウムの濃度によって決まる。ガドリニウムがないとき、中性子は全て水素に吸収され、その中性子捕獲時間 τ_H は $200\mu sec$ と分かっている。水素とガドリニウムの捕獲断面積をそれぞれ ρ_H 、 ρ_{Gd} 、単位体積当りの密度をそれぞれ σ_H 、 σ_{Gd} 、崩壊幅をそれぞれ Γ_H 、 Γ_{Gd} とすると、水素の中性子捕獲時間は

$$\tau_H = \frac{A}{\rho_H \sigma_H} = \frac{A}{\Gamma_H} = 200\mu sec (A : const)$$

と表され、ここで水素とガドリニウムの崩壊幅の比 R を、

$$R \equiv \frac{\Gamma_{Gd}}{\Gamma_H} = \frac{\rho_{Gd} \sigma_{Gd}}{\rho_H \sigma_H}$$

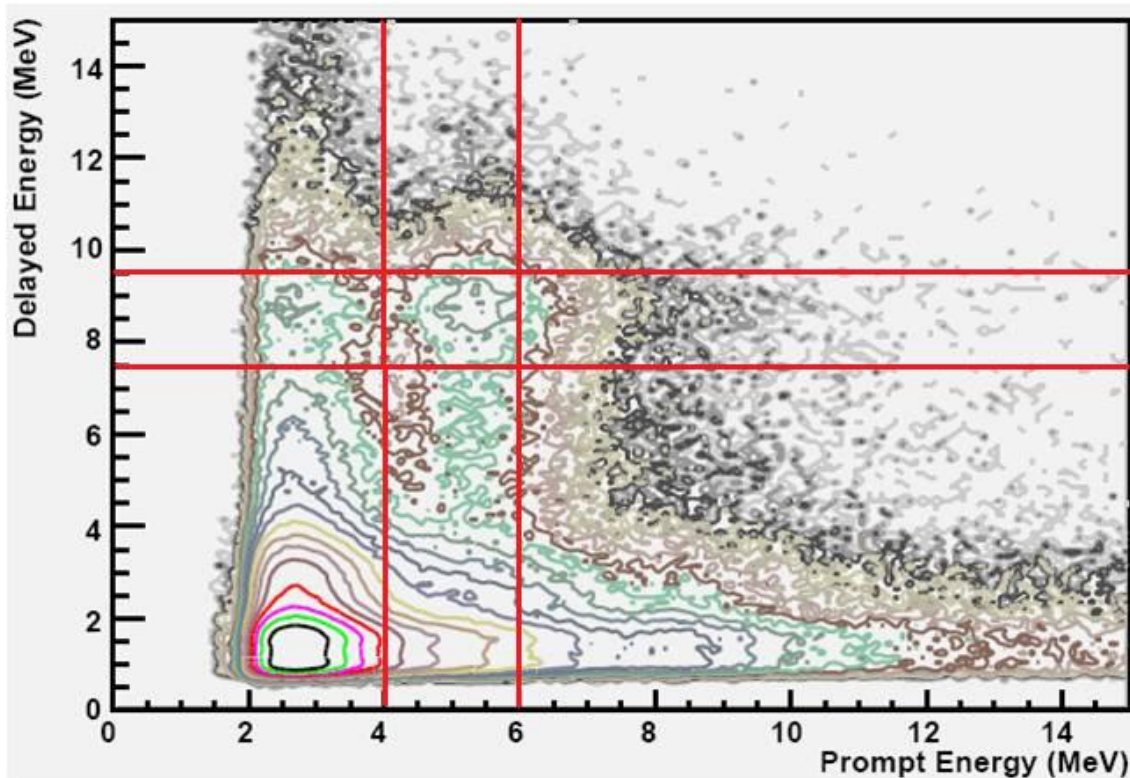


図 6.1: AmBe 線源ありの Prompt-Delayed の二次元ヒストグラム。囲まれた部分が選別領域

と定義する。するとガドリニウムが 0.05% のときの中性子捕獲時間 τ_{H+Gd} は以下の式で表される。

$$\tau_{H+Gd} = \frac{A}{\Gamma_{Gd} + \Gamma_H} = \frac{A}{\Gamma_H} \times \frac{1}{1 + R} = 200 \times \frac{1}{1 + \frac{\rho_{Gd}\sigma_{Gd}}{\rho_H\sigma_H}}$$

各原子における中性子吸収断面積を表 6.1 に示す。KASKA で使用する液体シンチ

Element	Q value(MeV)	Abundance(%)	cross section(b)
^1H	2.2	99.985	0.3326 ± 0.0007
^{155}Gd	8	14.80 ± 0.05	60900 ± 500
^{157}Gd	8	15.65 ± 0.03	254000 ± 800
Gd Average			48800 ± 400

表 6.1: 各原子における中性子捕獲断面積

レータ (Gd:0.05%) 中の各原子の数の比は

$$\#H : \#C : \#O : \#Gd = 1.85 : 1 : 0.018 : 0.000045$$

である。

$$\tau_{H+Gd} \sim 42\mu\text{sec}$$

と求めることができる。そこで中性子捕獲時間が $50\mu\text{sec}$ 以内の事象を選択する。図 6.2 に中性子捕獲時間のヒストグラムを示す。

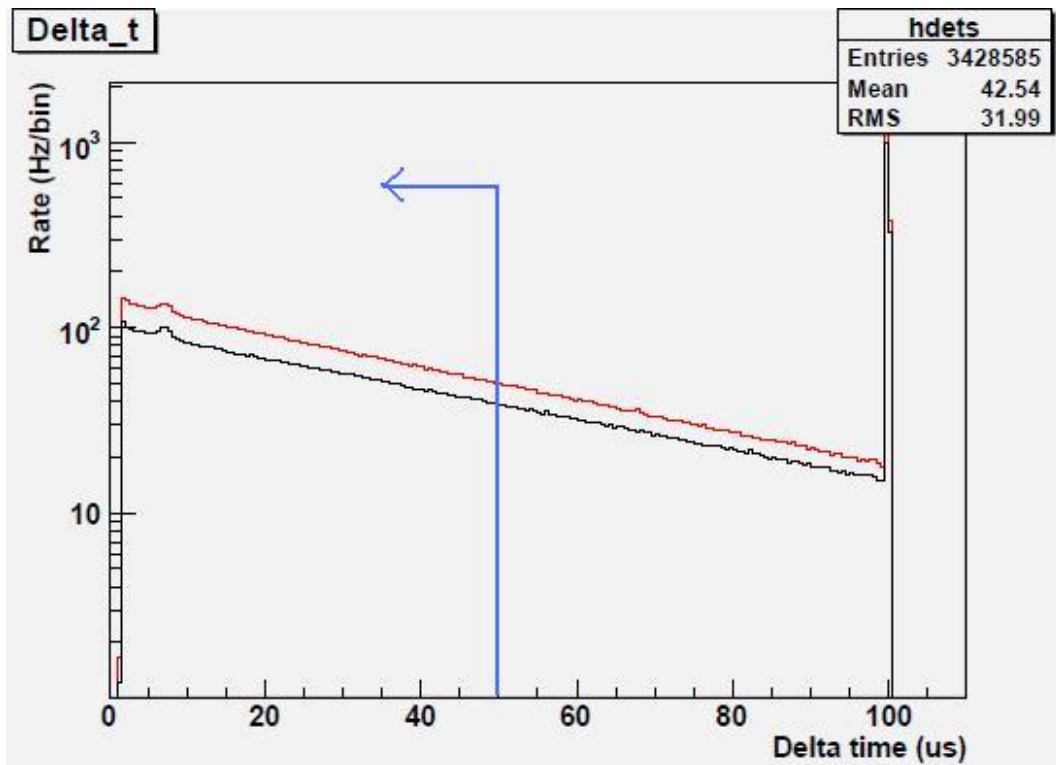


図 6.2: 中性子捕獲時間のヒストグラム。赤が Am/Be 線源有り、黒が Am/Be 線源無し。

6.2.3 Charge Balance による選別

さらに S/N を上げるために Charge Balance を使う。検出器の主なバックグラウンドイベントは環境 γ 線と宇宙線である。 γ 線はエネルギーが最大 2.6MeV であり、検出器の表面付近で止まってしまふ。また宇宙線は検出器内の通過距離によってエネルギーデポジットが決まるため、エネルギーカットで残った宇宙線のイベントは数 cm の通過距離になり、こちらも表面付近の事象となる。

アクリル球の中心で起きる事象は各 PMT に同数程度に光子が到達する。そのため各 ADC 値のばらつきが少ない。逆にアクリル球表面で起きた事象は ADC 値のばらつきが大きい。そこでアクリル球表面での事象を Charge Balance によってカットする。

Charge Balance を PMT16 本の ADC 値の標準偏差で定義する。定義式は

$$\sigma = \sqrt{1 - \frac{\sum_{k=1}^{16} a_k^2}{(\sum_{k=1}^{16} a_k)^2}}$$

で表される。アクリル球中心付近で起きる事象は標準偏差の値が小さくなり、表面付近で起きる事象はこの値が大きくなる。図 6.3 に Am/Be+Gd-LS データとバックグラウンド (No source + Gd-LS) データの先発信号の Charge Balance を示す。図 6.4 に Am/Be+Gd-LS データとバックグラウンド (No source + Gd-LS) データの後発信号の Charge Balance を示す。

この図より、この後の解析では比の値が大きくなる先発信号の Charge Balance で 0.75 以下の事象を選択する。中性子捕獲時間カット、先発エネルギーカットした後発信号のスペクトルに Charge Balance のカットをしたものを図 6.5 に示す。

スペクトルの形が明確になったことが分かる。これをガドリニウムからの γ 線のスペクトルと考える。

6.3 選別結果

AmBe 線源を用いた結果で決定した Neutrino Window を表 6.2 に示す。原子炉

	Cut region
Prompt Energy	4.0~6.0MeV
Delayed Energy	7.5~9.5MeV
dt	2 μ sec ~50 μ sec
Charge Balance	Prompt<0.75,Delayed<1.0

表 6.2: Neutrino Window

ON データと原子炉 OFF データを用いて実行する。Neutrino Window のカットで

	Total Event	Accidental BG	Correlated Event
Reactor OFF	150 \pm 3	15 \pm 0.01	135 \pm 3
Reactor ON	163 \pm 3	21 \pm 0.01	142 \pm 3
ON-OFF	13 \pm 4	6 \pm 0.01	7 \pm 4

表 6.3: 一日当たりの Neutrino Window 内事象

は S/N \sim 1/20 の結果を得た。

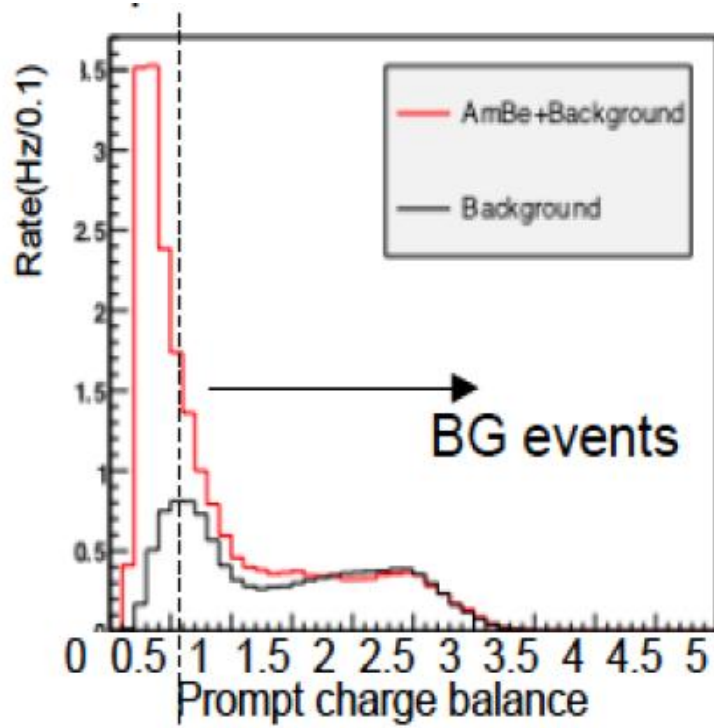


図 6.3: Am/Be+Gd-LS データとバックグラウンド (No source + Gd-LS) データの先発信号の Charge Balance

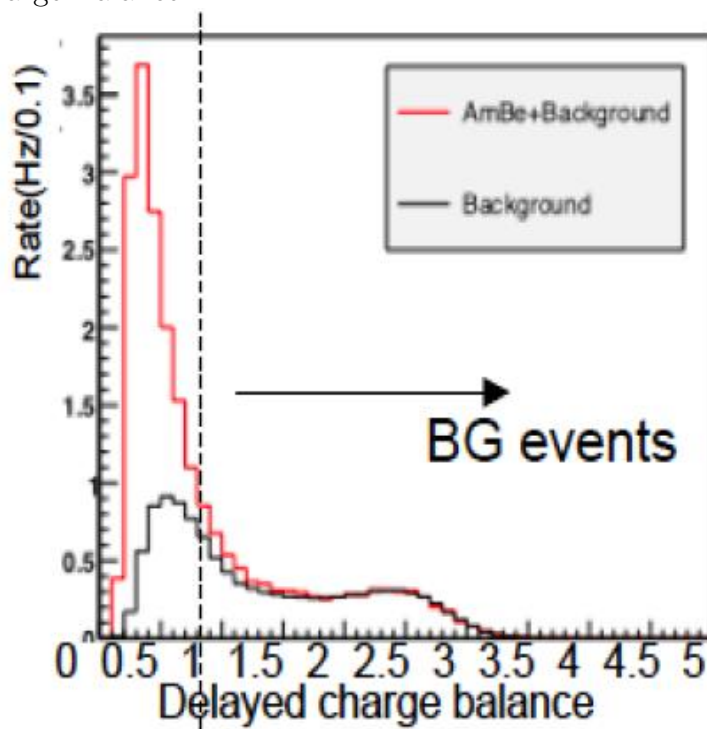


図 6.4: Am/Be+Gd-LS データとバックグラウンド (No source + Gd-LS) データの後発信号の Charge Balance

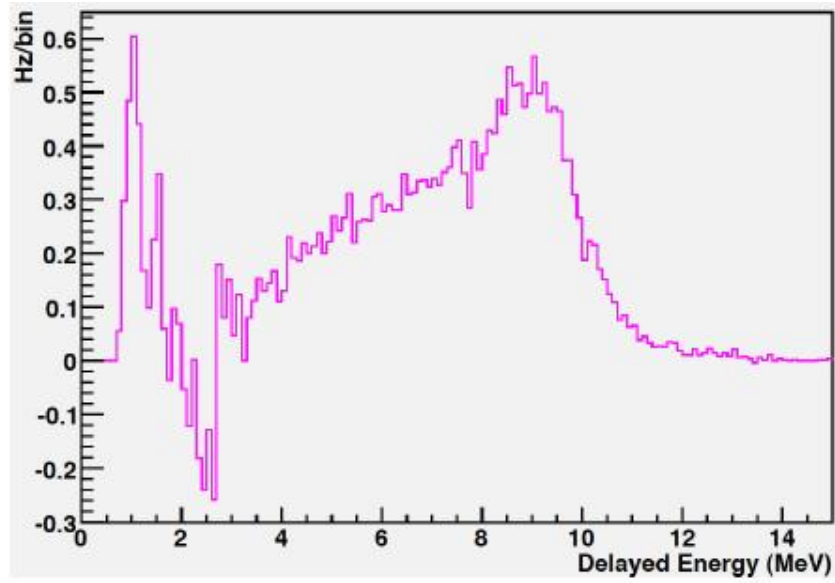


図 6.5: 中性子捕獲時間カット、先発エネルギーカットした後発信号のスペクトルに Charge Balance のカットをしたもの

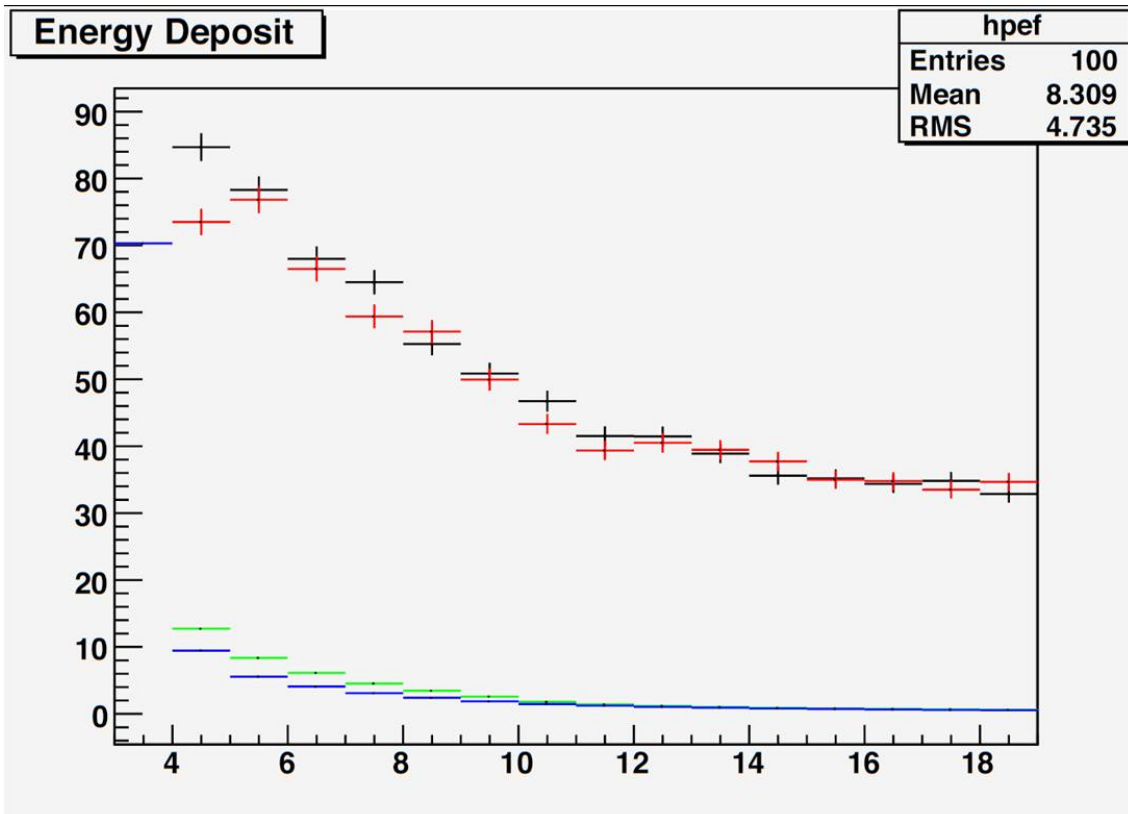


図 6.6: Neutrino Window カット後の先発信号のエネルギーデポジット

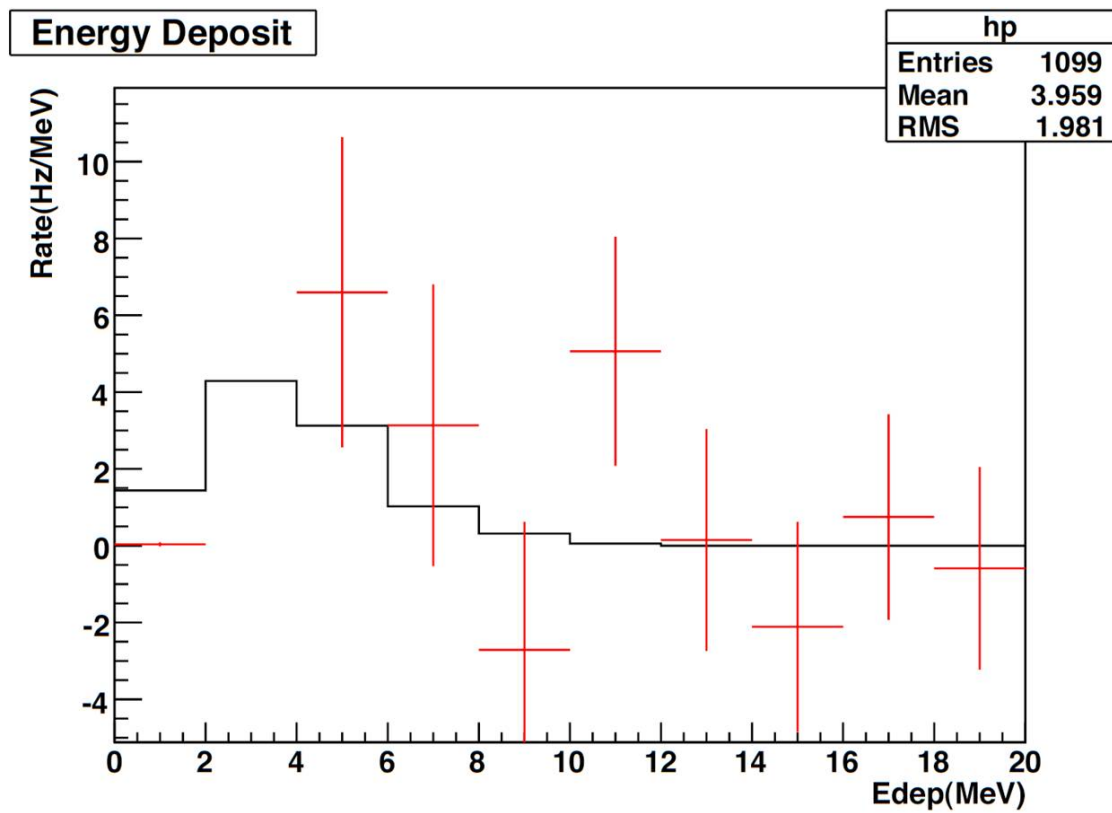


図 6.7: 原子炉 ON データと原子炉 OFF データの差をとったもの。赤が測定結果。黒は予想されるニュートリノ事象のスペクトル。

第7章 反応位置を用いた解析

7.1 概要

Neutrino Window カットの後も残っているバックグラウンド事象は高速中性子と環境 γ 線であると考えられる。バックグラウンド事象を分離するためには新しい選別方法が必要である。

図 7.1 に、考えられるニュートリノ事象と高速中性子バックグラウンド事象の模式図を示す。

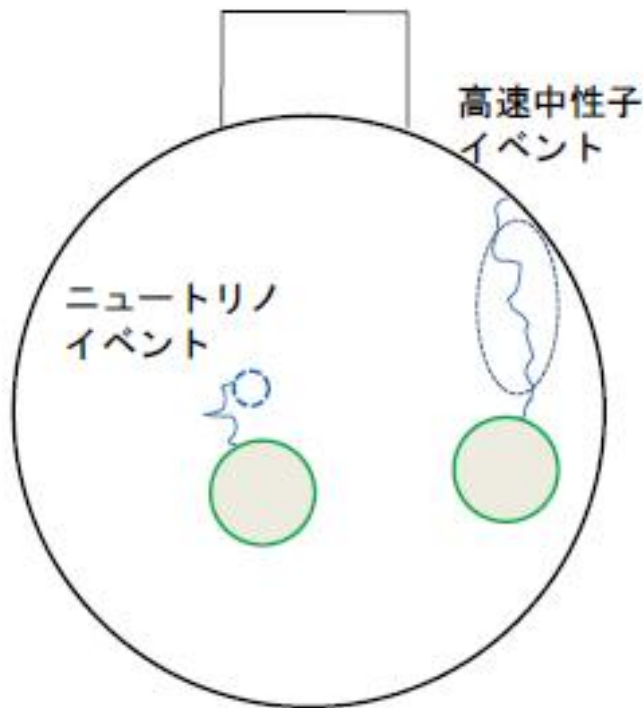


図 7.1: 反応予想図

ニュートリノ事象では先発信号と後発信号の反応間の距離は10cm以下である。しかしバックグラウンド事象ではもっと離れていると考えられる。よって反応間の距離を求めればバックグラウンドをカット出来る。また先発信号をみると、高速中性子事象では反応に "広がり" があると考えられるので、"広がり" を表す値を定義し、その値によってバックグラウンド事象を減らしたい。また反応位置を求める事が出来れば Charge Balance よりも効率のよいカットができる。

そのため反応位置を算出する ADC 値と TDC 値を使ったアルゴリズムを作った。アルゴリズムの検証とそれをを用いたイベントセレクションについて述べる。

7.1.1 検証に使ったデータ

アルゴリズムの検証には紫外線 LED と ^{60}Co を使った。アクリル球の中心を原点とし、Z 軸上を -50cm から 50cm まで 10cm 間隔で動かして測定した。その結果を使い、線源位置と再構成位置の関係を求める。図 7.2 に設定した座標とアクリル球の関係を示す。

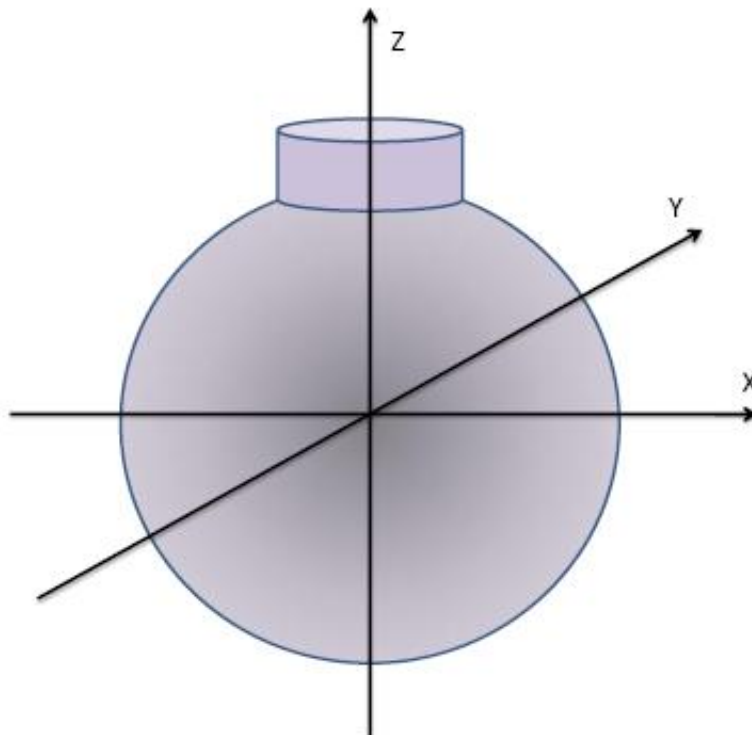


図 7.2: テスト図

紫外線 LED

紫外線 LED を発光させ、その光を光ファイバーで検出器の中心まで送る。光ファイバーは紫外線を伝える石英芯のものを使った。また紫外線 LED は発光波長が約 400nm の SANDER 社製 SDL-3N4CUV を使った。

液体シンチレータの吸収波長付近なので光ファイバーから出た光はすぐに吸収され、シンチレーション光を放出する。ニュートリノ事象の先発信号のような反応の ” 広がり ” の小さなモデルの検証をする。

表 7.1 に使用した LED の性能を、

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Forward Voltage	V_F	-	3.6	4.0	V
Radiant Flux	P	6	10	-	mW
Peak Wavelength	λ_p	395	400	405	nm
Halfwidth	λ_d	-	26	-	nm
Reverse Current	I_R	-	-	100	μA
Viewing Angle	$2\theta_{1/2}$	-	30	-	deg

表 7.1: Absolute Optical Characteristic

^{60}Co

^{60}Co は 2 本の γ 線を出すので、高速中性子事象の先発信号やニュートリノ事象の後発信号のように反応の "広がり" が大きいモデルの検証をする。

7.2 TDC 値を用いた vertex 位置算出アルゴリズム

7.2.1 アルゴリズム内容

TDC 値は反応からの時間情報なので、反応位置から各 PMT への距離情報に換算できる。各 PMT からの距離を用いて反応位置を算出する。実験で用いた TDC は $1\text{ch}=25\text{psec}$ である。また液体シンチレータの屈折率は 1.5 であるので、液体シンチレータ中の光速は $20\text{cm}/\text{nsec}$ となる。以上より TDC 値を距離に変換すると $1\text{ch}=0.5\text{cm}$ である。

$$S_{tdc} = \sum \left(\sqrt{((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2)} - c(tdc - t_0) \right)^2$$

S が最小になる x_0, y_0, z_0, t_0 を求める。そのときの (x_0, y_0, z_0) が反応になる。 t_0 はトリガーのかかった時間である。

各 TDC のケーブル長などによる Delay は、同時に PMT に光子が飛び込む状況を作れば求める事が出来る。各 PMT の tdc が一定になるのは、反応点から PMT までの距離が一定のときである。アクリル球の中心で等方的に光が発生したデータを用いればよい。今回は紫外線 LED のデータを使った。

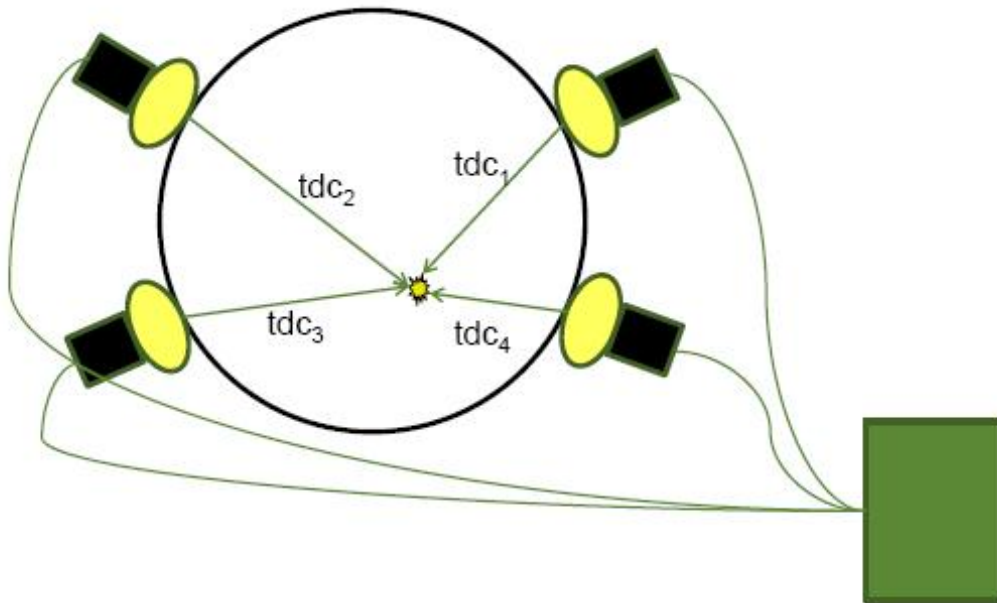


図 7.3: TDC 値の位置再構成アルゴリズム概要図

7.2.2 評価

LED の分布

図 7.5 に $Z=-20\text{cm}, 0\text{cm}, 20\text{cm}$ の結果を示す。左図は $-20\text{cm} < X < 20\text{cm}, -20\text{cm} < Y < 20\text{cm}$ の範囲の Z 方向の分布である。右図は $-20\text{cm} < X < 20\text{cm}$ のときの $Y-Z$ 分布である。

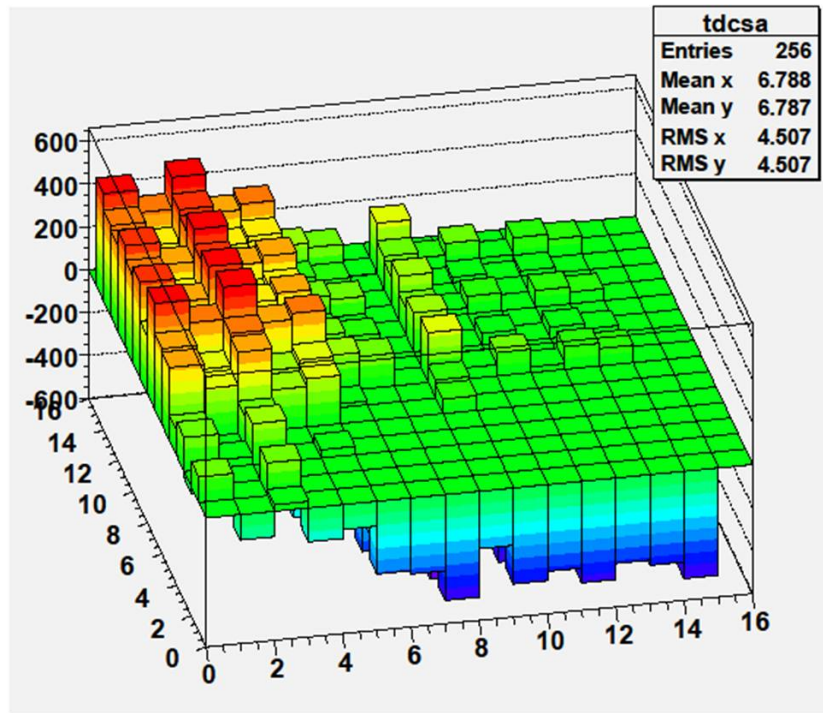


図 7.4: 中心で光らせた時の各 PMT の TDC 値の差の Mean ($t_{c-n} - t_{c-base}$)

gauss fit した結果、Z=-20cm のとき Mean=-40.7 で Sigma=12.7。Z=0cm のとき Mean=0.84 で Sigma=10.5。Z=20cm のとき Mean=43.4 で Sigma=12.8。

^{60}Co の分布

図 7.6 に Z=-20cm,0cm,20cm の結果を示す。Z=-20cm のとき Mean=-35.5 で Sigma=16.7。Z=0cm のとき Mean=-2.00 で Sigma=23.3。Z=20cm のとき Mean=36.1 で Sigma=23.2。LED と同じような位置に来ているが LED に比べて拡散したような結果になった。

S_{tdc} の比較

最小の S_{tdc} の分布は図 7.7 のようになった。点光源模型に近い LED は delta の値が小さく、広がりも小さい。 ^{60}Co の反応はふくらみがあるので S_{tdc} の値は大きく、また広がりが大きい。予想通りの結果が得られた。

校正曲線

以上の結果から測定点と算出点の関係をまとめると図 7.8 のようになった。理想的な傾きの 1 から大きく外れているが LED の傾きは 2.1 と求まった。この結果から、

$$\text{TDC 反応点 (X,Y,Z)} = \text{算出点 (X,Y,Z)} \div 2.1$$

が求まった。

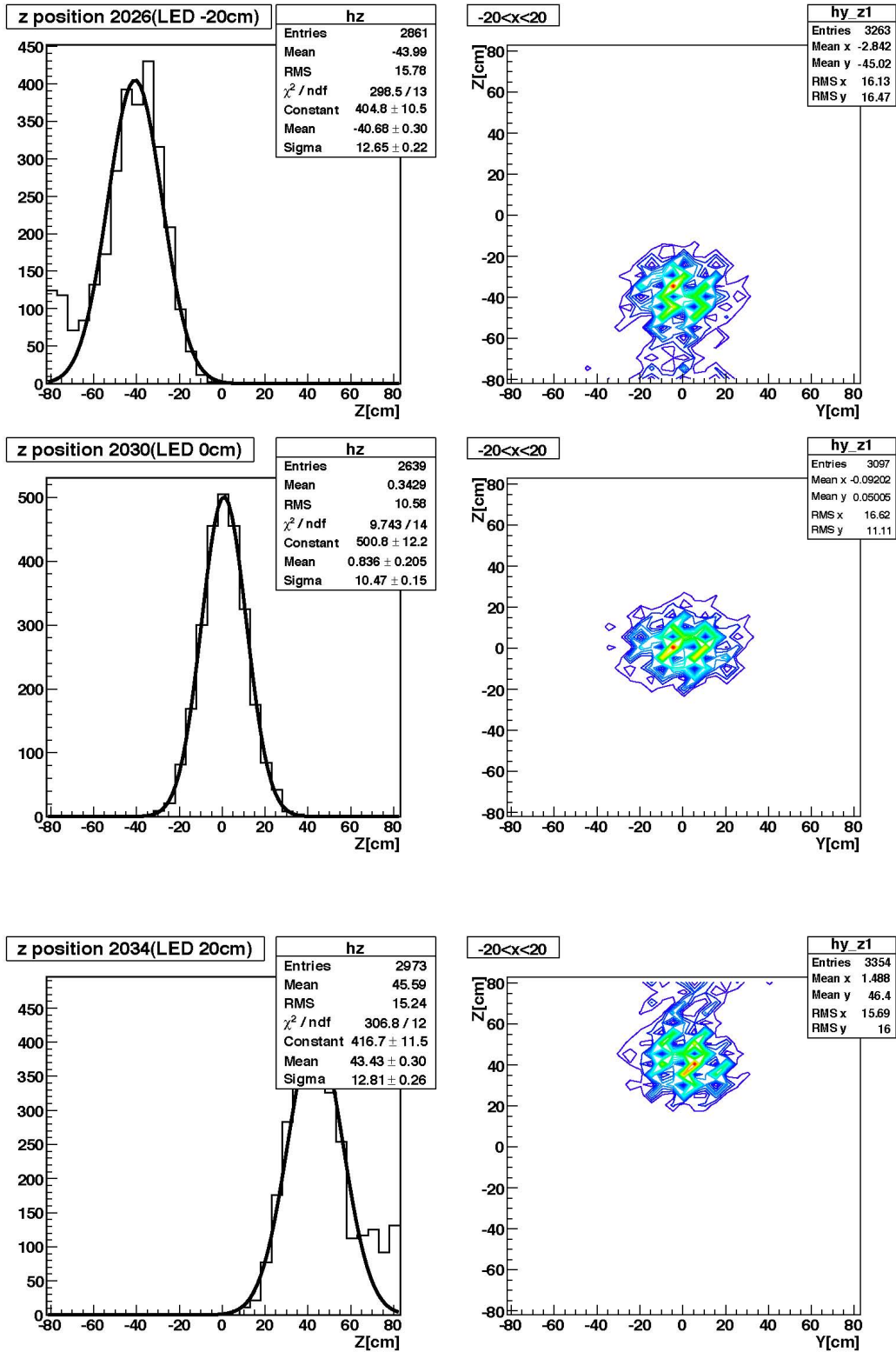


図 7.5: LED の $-20\text{cm} < X < 20\text{cm}$ 、 $-20\text{cm} < Y < 20\text{cm}$ の範囲の Z 方向の分布と、 $-20\text{cm} < X < 20\text{cm}$ のときの Y-Z 分布。Z=20cm と Z=0cm と Z=-20cm の時

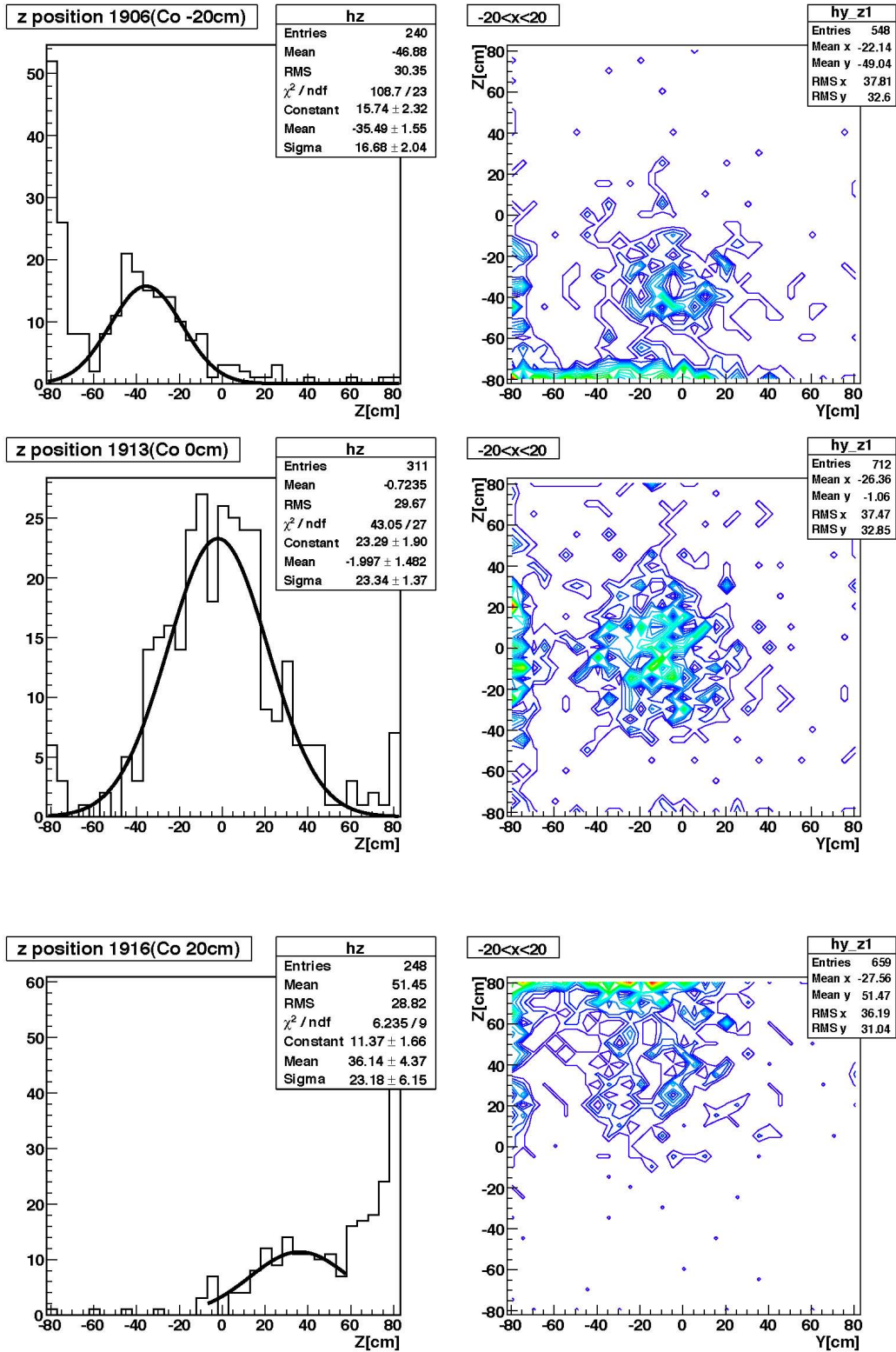


図 7.6: ^{60}Co の $20\text{cm} < X < 20\text{cm}$ 、 $-20\text{cm} < Y < 20\text{cm}$ の範囲の Z 方向の分布と、 $-20\text{cm} < X < 20\text{cm}$ のときの Y-Z 分布。Z=20cm と Z=0cm と Z=-20cm の時

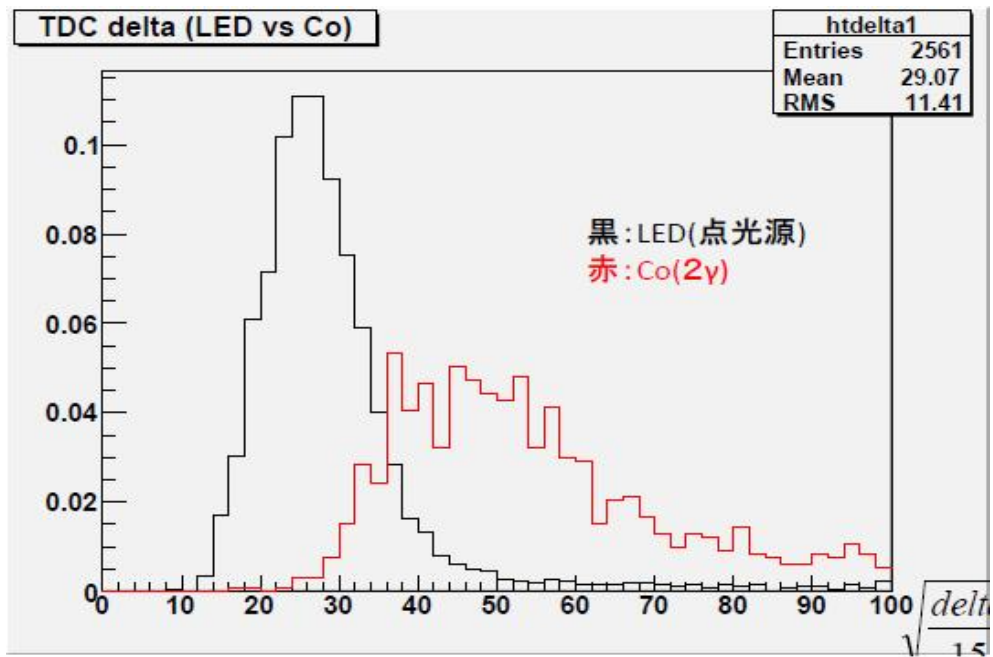


図 7.7: LED と ^{60}Co の S_{tdc} の比較

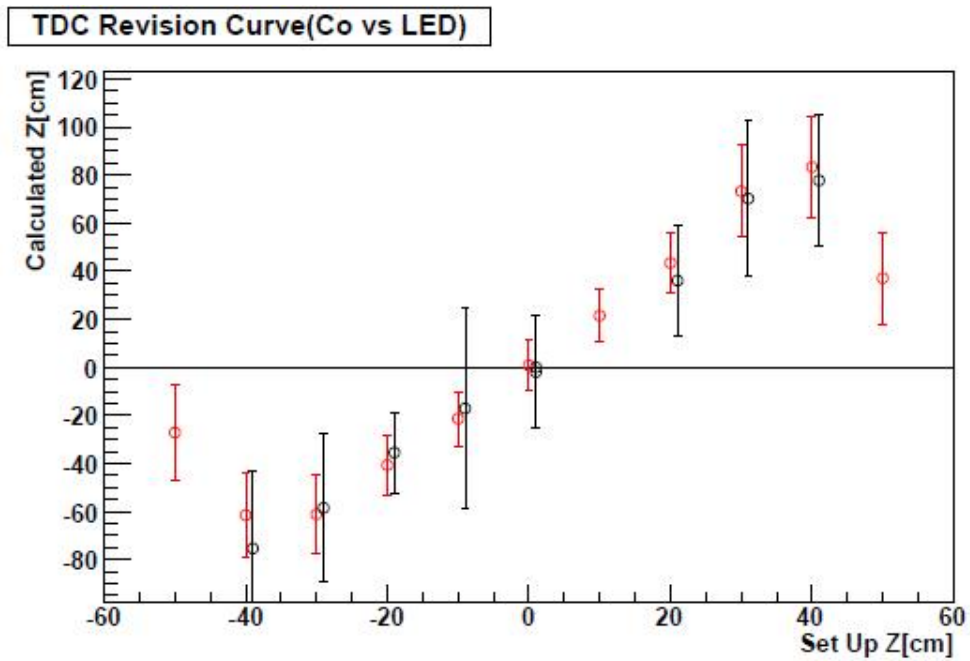


図 7.8: TDC による LED と ^{60}Co の校正曲線

7.3 ADC を用いた vertex 位置算出アルゴリズム

7.3.1 アルゴリズム内容

ADC 値の比は反応位置からの立体角の比と同じになる。それを用いて ADC 値の比から反応位置を算出することができる。半径 60cm のアクリル球の内部で 5cm 間隔の格子点を考える。その各格子点からの立体角を計算により求める。各立体角を Ω_{ch} 、各 ADC 値を a_{ch} とすると

$$S_{adc} = \sum_{k=1}^{16} \left(\frac{a_k}{\sum_{i=1}^{16} a_i} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{16} \Omega_i}{\Omega_k} - 1 \right)^2$$

において S_{adc} が最小になる位置が反応位置になる。

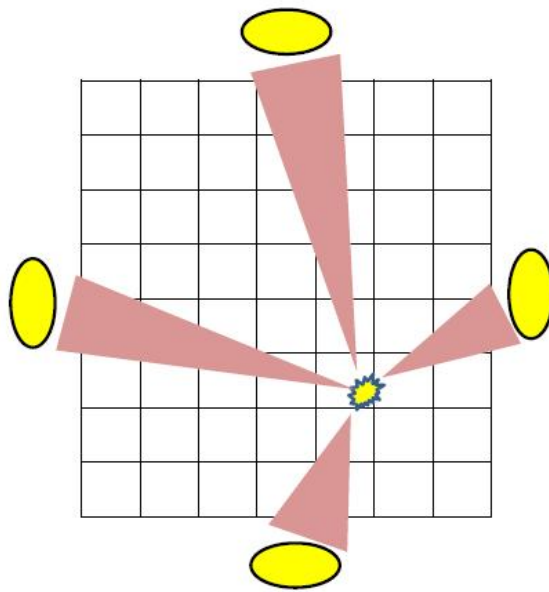


図 7.9: 立体角と ADC の関係の模式図

立体角の求め方について述べる。アクリル球の PMT の位置に円盤を仮定し、各格子点から粒子を等方的に飛ばす。円盤を通過した粒子数を飛ばした全粒子数で割れば近似的に立体角が求まる。精度を上げるために全粒子数を 100000 にした。

7.3.2 評価

アルゴリズムの評価方法として算出点と測定点の違いをみる。以下に LED での結果と ^{60}Co の結果を示す。左図は $-20\text{cm} < X < 20\text{cm}$ のときの Y-Z 分布である。右図は $-20\text{cm} < X < 20\text{cm}$ 、 $-20\text{cm} < Y < 20\text{cm}$ の範囲の Z 方向の分布である。Z 方向の分布から位置分解能を求める。

LED の分布

図 7.10 に $Z=-20\text{cm}, 0\text{cm}, 20\text{cm}$ の結果を示す。gauss fit した結果、 $Z=20\text{cm}$ のとき $\text{Mean}=11.2$ で $\text{Sigma}=2.6$ 。 $Z=0\text{cm}$ のとき $\text{Mean}=-4.0$ で $\text{Sigma}=2.2$ 。 $Z=-20\text{cm}$ のとき $\text{Mean}=-16.4$ で $\text{Sigma}=2.4$ 。

^{60}Co の分布

図 7.11 に $Z=-20\text{cm}, 0\text{cm}, 20\text{cm}$ の結果を示す。gauss fit した結果、 $Z=20\text{cm}$ のとき $\text{Mean}=22.2$ で $\text{Sigma}=12.2$ 。 $Z=0\text{cm}$ のとき $\text{Mean}=0.07$ で $\text{Sigma}=13.4$ 。 $Z=-20\text{cm}$ のとき $\text{Mean}=-17.8$ で $\text{Sigma}=11.2$ 。 LED に比べて極端に分解能が悪くなった。

S_{adc} の比較

前出の方法で求めた最小の S_{adc} の分布は下図のようになった。予想したように点光源模型に近い LED は S_{adc} の値が小さく、広がりも小さい。 ^{60}Co の反応はふくらみがあるので S_{adc} の値は大きく、また広がりが大きい。予想通りの結果が得られた。

校正曲線

以上の結果から測定点と算出点の関係をまとめると図 7.13 のようになった。理想的な傾きの 1 から少しずれているが LED の傾きは 0.854、 ^{60}Co の傾きは 0.857 であり同じような結果が得られた。この結果から、

$$\text{ADC 反応点 } (X, Y, Z) = \text{算出点 } (X, Y, Z) \div 0.85$$

が求まった。

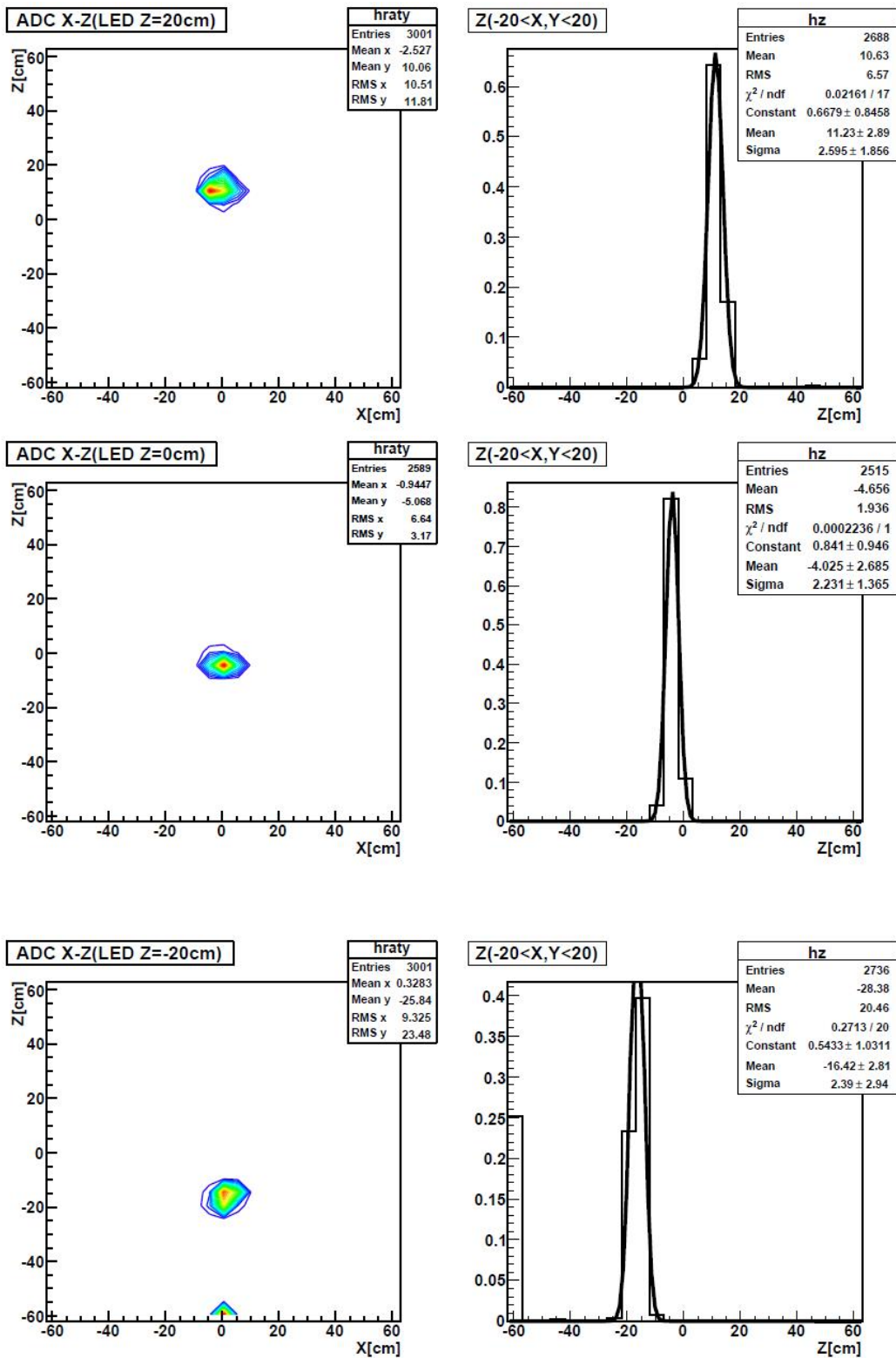


図 7.10: LED の $-20\text{cm} < X < 20\text{cm}$ のときの Y-Z 分布と、 $-20\text{cm} < X < 20\text{cm}$ 、 $-20\text{cm} < Y < 20\text{cm}$ の範囲の Z 方向の分布。Z=20cm と Z=0cm と Z=-20cm の時

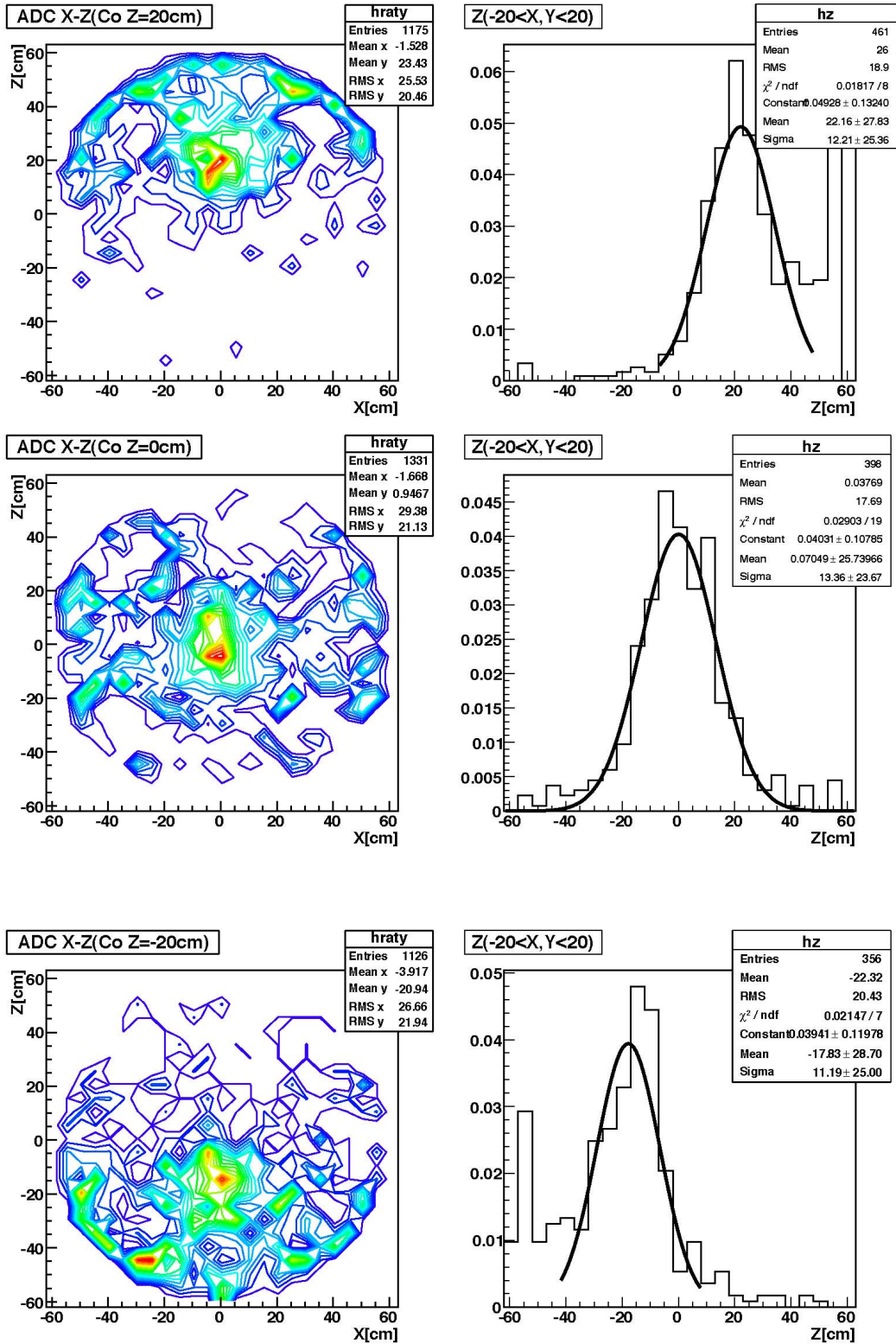


図 7.11: ^{60}Co の $-20\text{cm} < X < 20\text{cm}$ のときの Y-Z 分布と、 $-20\text{cm} < X < 20\text{cm}$ 、 $-20\text{cm} < Y < 20\text{cm}$ の範囲の Z 方向の分布。Z=20cm と Z=0cm と Z=-20cm の時

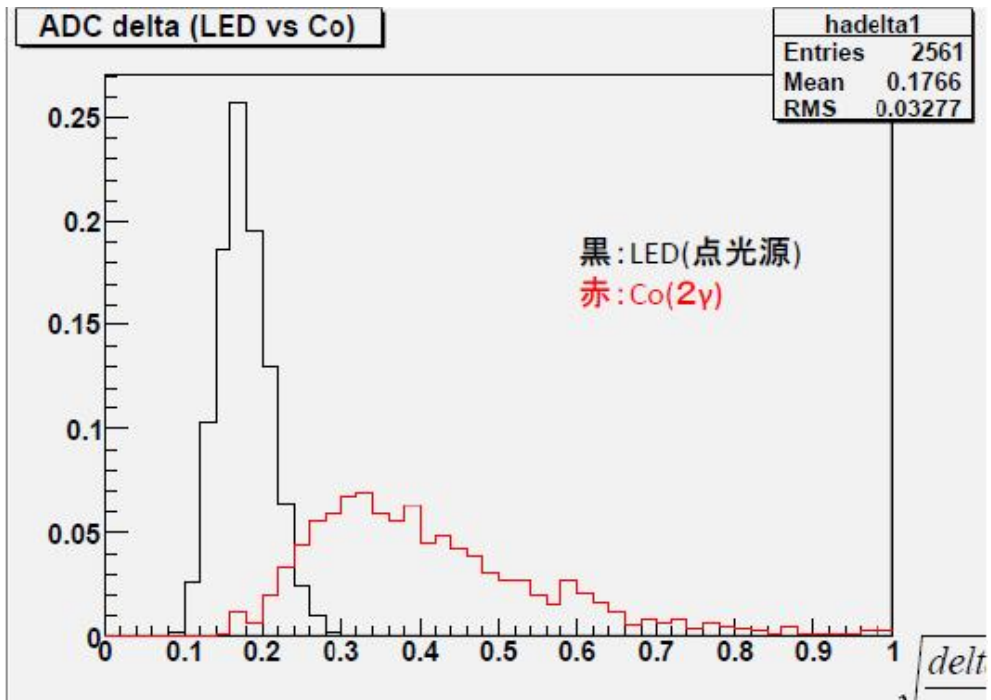


図 7.12: Z=0cm の時の LED と ^{60}Co の S_{adc} の比較

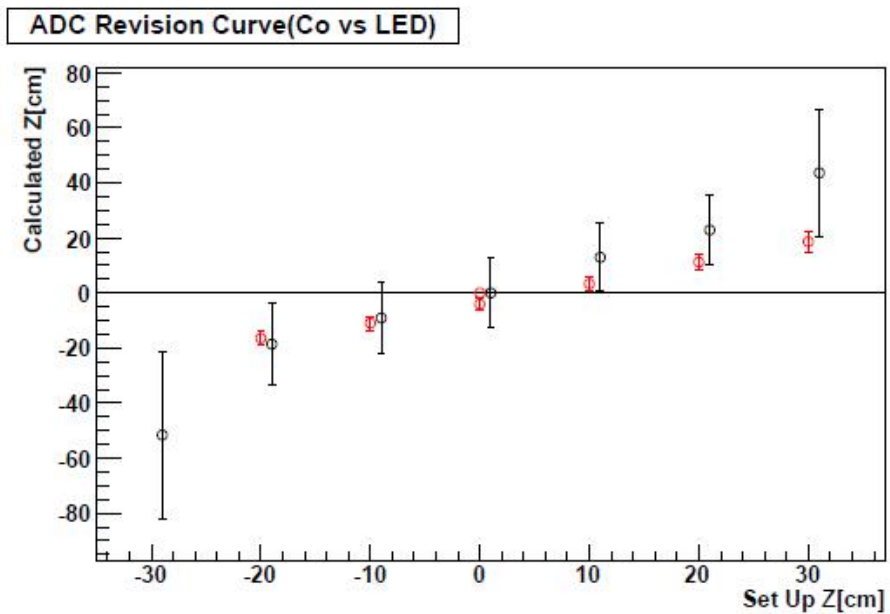


図 7.13: ADC による校正曲線。

7.4 PD 反応間距離を用いたカット

7.4.1 背景

ガドリニウム入り液体シンチレータを用いた遅延同時計測では、先発信号から後発信号までの時間は約 $42\mu\text{sec}$ であり、その値を dt として既にカット条件に用いている。ニュートリノ事象では先発反応と後発反応の距離の関係が求められている。距離の関係を出すことにより、ニュートリノ事象と BG 事象を区別することができる。

7.4.2 結果

Am/Be 線源有りのデータと Am/Be 線源無しのデータで比較した。ニュートリノカットは全てかけてある。ほとんど重なっていて今回の結果では区別することは難しい。

7.5 S を用いたカット条件

7.5.1 背景

ADC と TDC によるアルゴリズムでは S が最小になるときの位置を、反応位置として採用する。 S は点光源からのずれを表すので反応によって異なる。 S の値によって反応を区別することができる。ニュートリノ事象の先発信号では陽電子はすぐに対消滅して 2 本の γ 線を出す。反応時間が短いので点光源に近いと考えられる。バックグラウンド事象の高速中性子は陽子にぶつかりながら減速し、ガドリニウムに吸収されるまでの時間が長いので点光源からのずれが大きいと考えられる。

7.5.2 結果

評価方法として ADC アルゴリズムと TDC アルゴリズムそれぞれで、Am/Be 線源有りのデータと Am/Be 線源無しのデータを比較した。TDC アルゴリズムと ADC アルゴリズムで、線源有りのデータが S が少し小さいという結果が出た。ただし重なっている部分が多いので、今回の結果では効率的なカットは難しいと思われる。

S と Charge Balance の関係

中心付近では S も Charge Balance も値が小さくなる。また中心から離れると S も Charge Balance も値が小さくなる。実際に S と Charge Balance にどの程度の相関があるか調べる。原子炉 OFF データに Neutrino Window カットをかけ、 S と Charge Balance を比較したのが図 7.18 である。反応点と PMT の位置関係で同じ表面付近でも Charge Balance は違った値をとる。そのためある程度の広がりをもった分布になった。

7.6 動径方向のカット条件変更

宇宙線バックグラウンドはアクリル球の表面付近で反応すると考えられる。このため球の表面付近と中心付近の事象を区別することができれば、バックグラウンド事象を減らすことができる。今までは Charge Balance カットで同様のことを行っていた。実際の反応場所を求めることができれば、Charge Balance カットよりも効率のよいカットを行える。

7.6.1 結果

Charge Balance の代用として使えるかの検証なので、Charge Balance 以外のカットをかけた Am/Be 線源有り無しで比較した。TDC アルゴリズムは分布が重なっているため分離できない。ADC アルゴリズムでは中心付近で線源有りのデータが多くなっているため中心付近とそれ以外といったカットはできる。ADC アルゴリズムでは反応位置がアクリル球内で定義されていて、表面付近の事象は再現できていない。

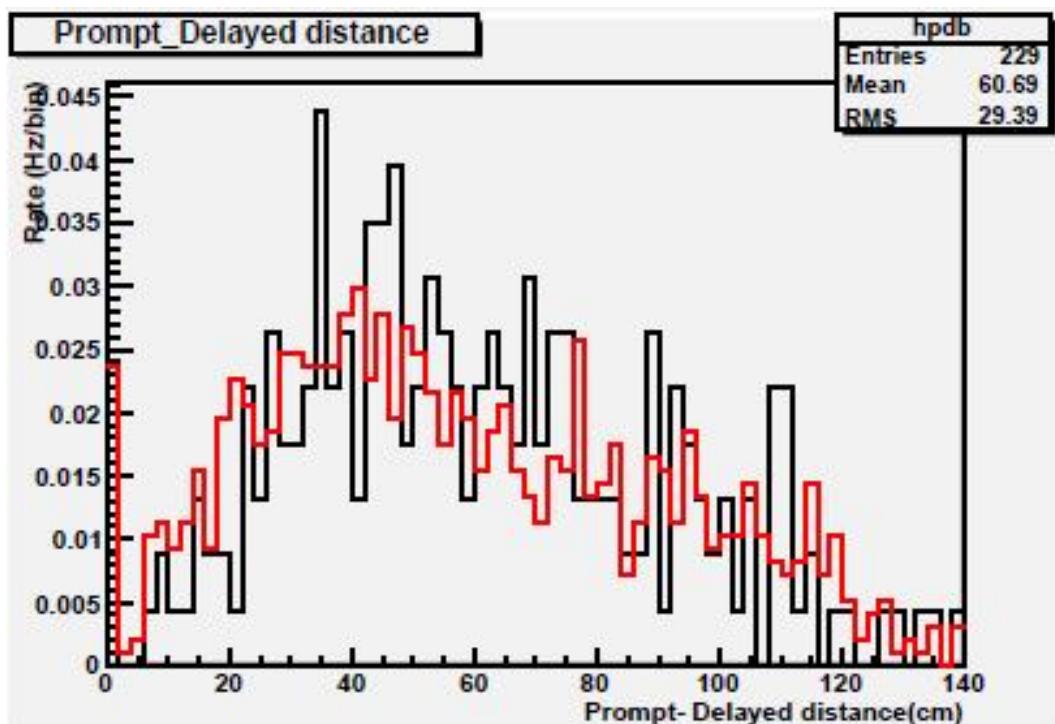


図 7.14: TDC 値の位置再構成アルゴリズムによる先発信号と後発信号の反応間距離の分布。赤が線源有り。

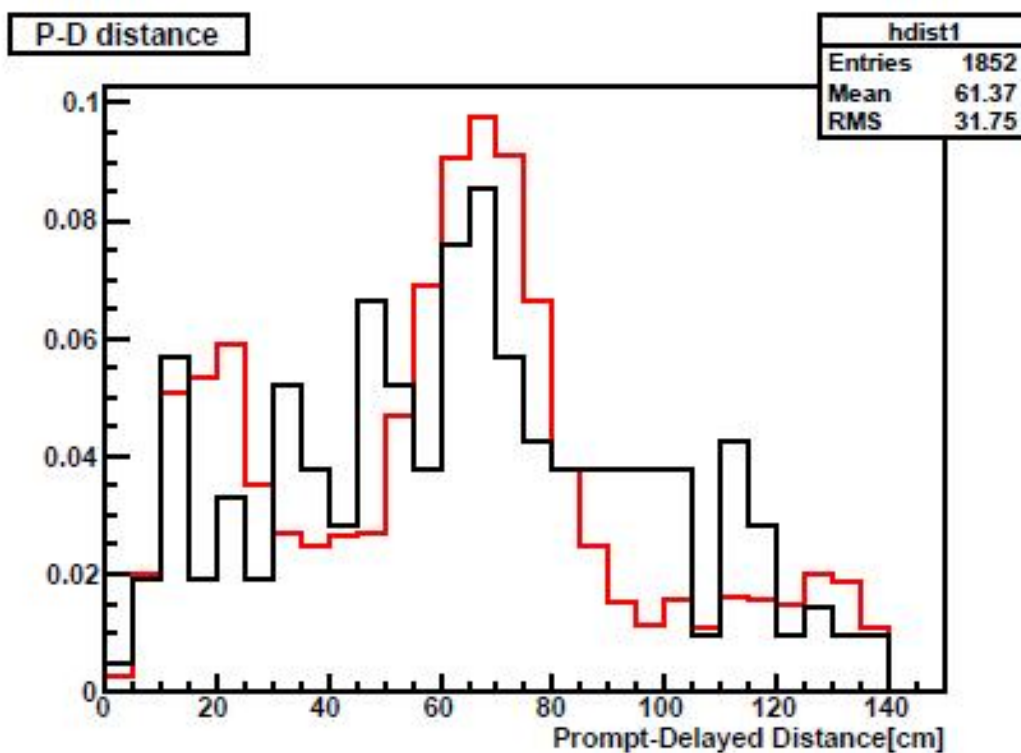


図 7.15: ADC 値の位置再構成アルゴリズムによる先発信号と後発信号の反応間距離の分布。赤が線源有り。

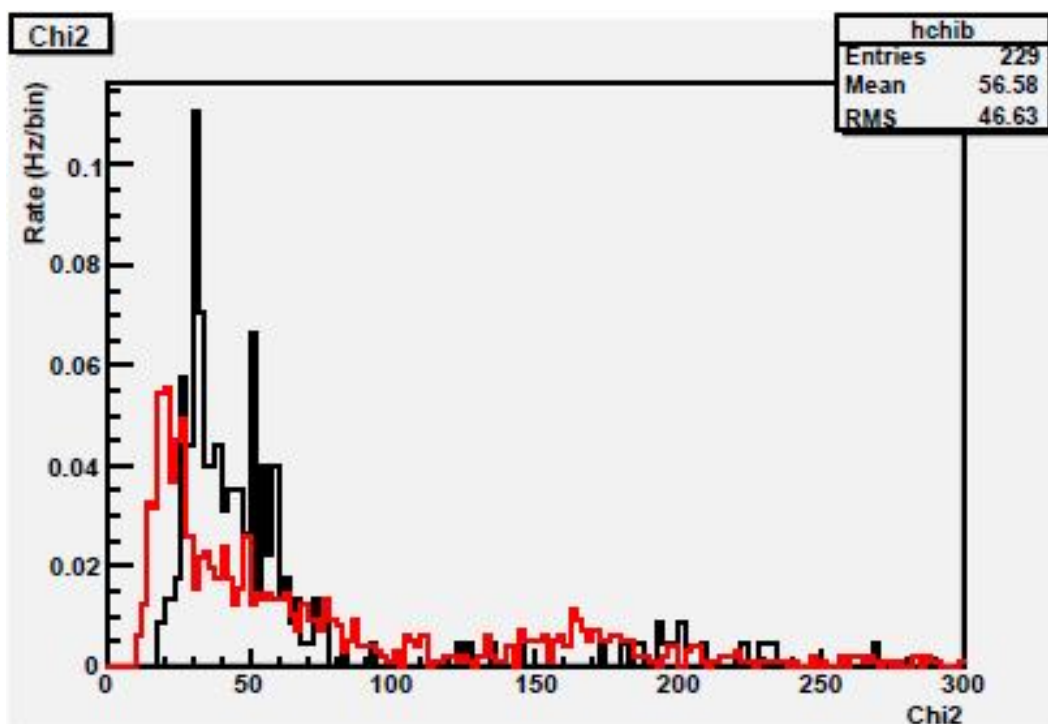


図 7.16: TDC の S の比較。赤が線源有り。

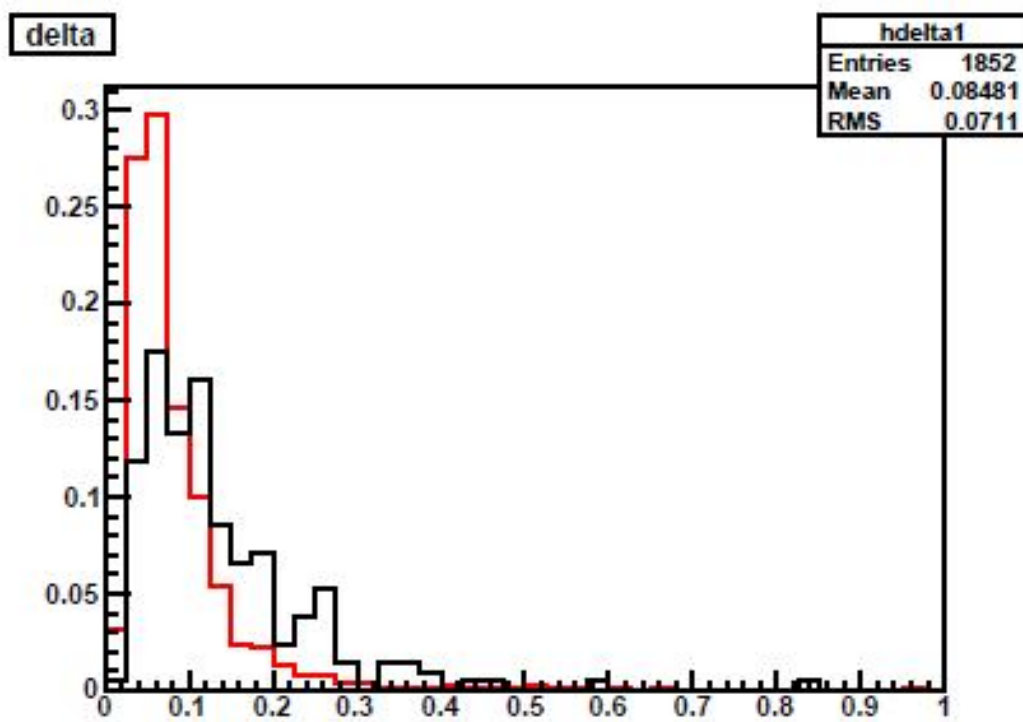


図 7.17: ADC の S の比較。赤が線源有り。

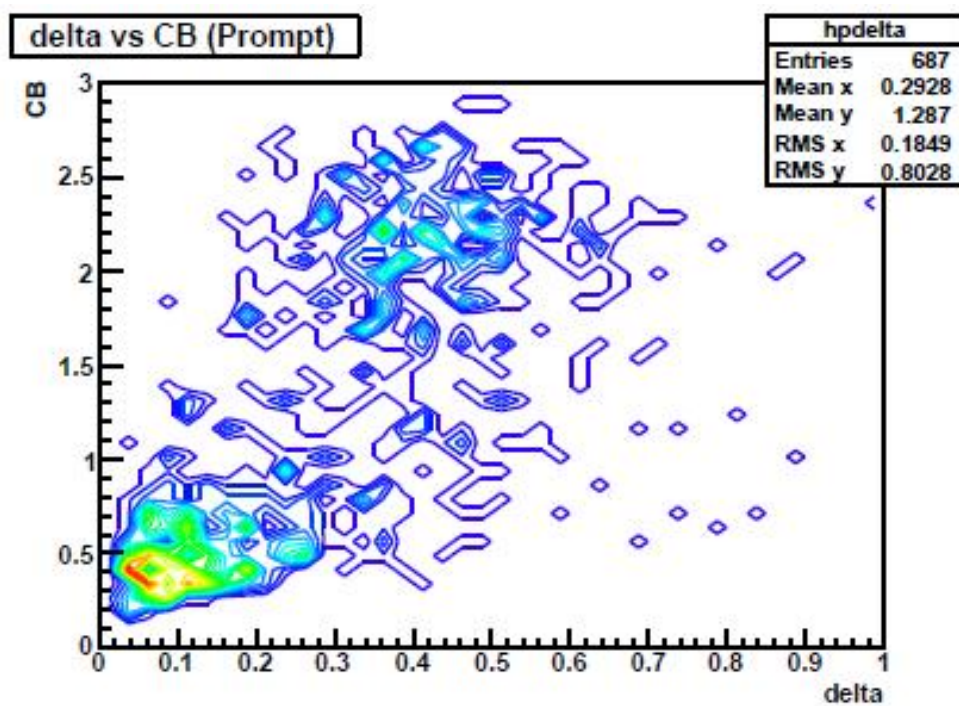


図 7.18: S と Charge Balance の関係

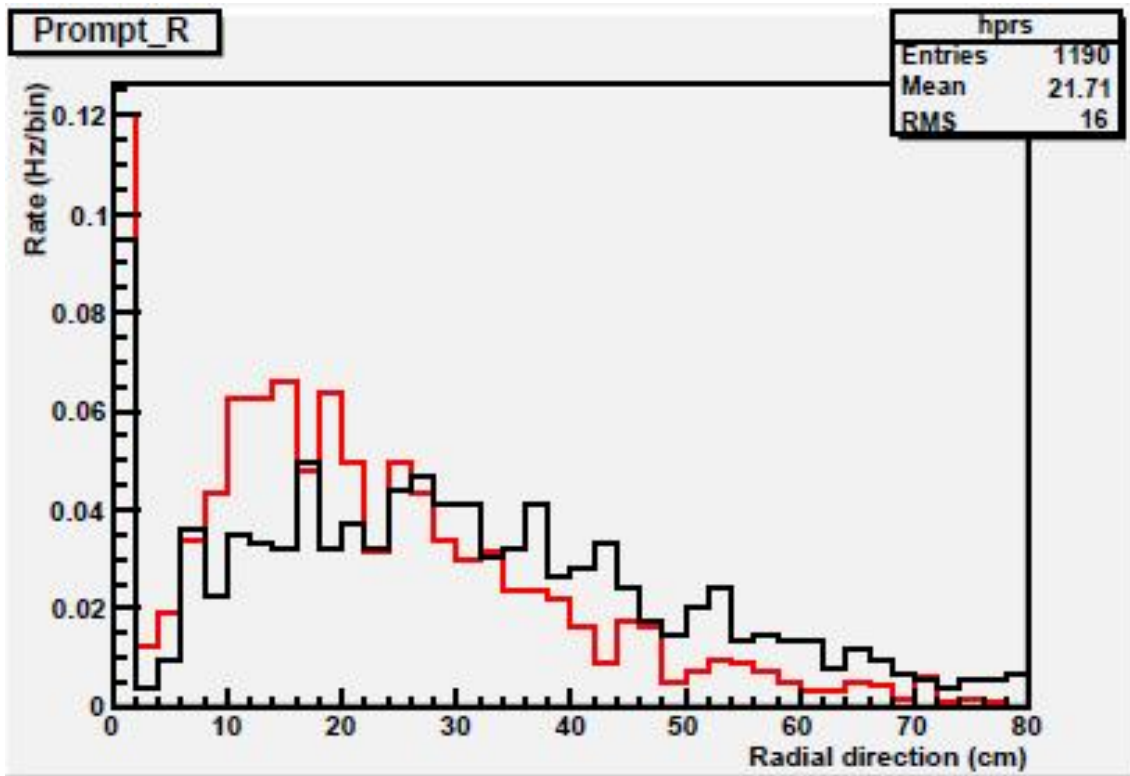


図 7.19: TDC アルゴリズムによる動径方向の分布の比較。赤が Am/Be 線源有り。

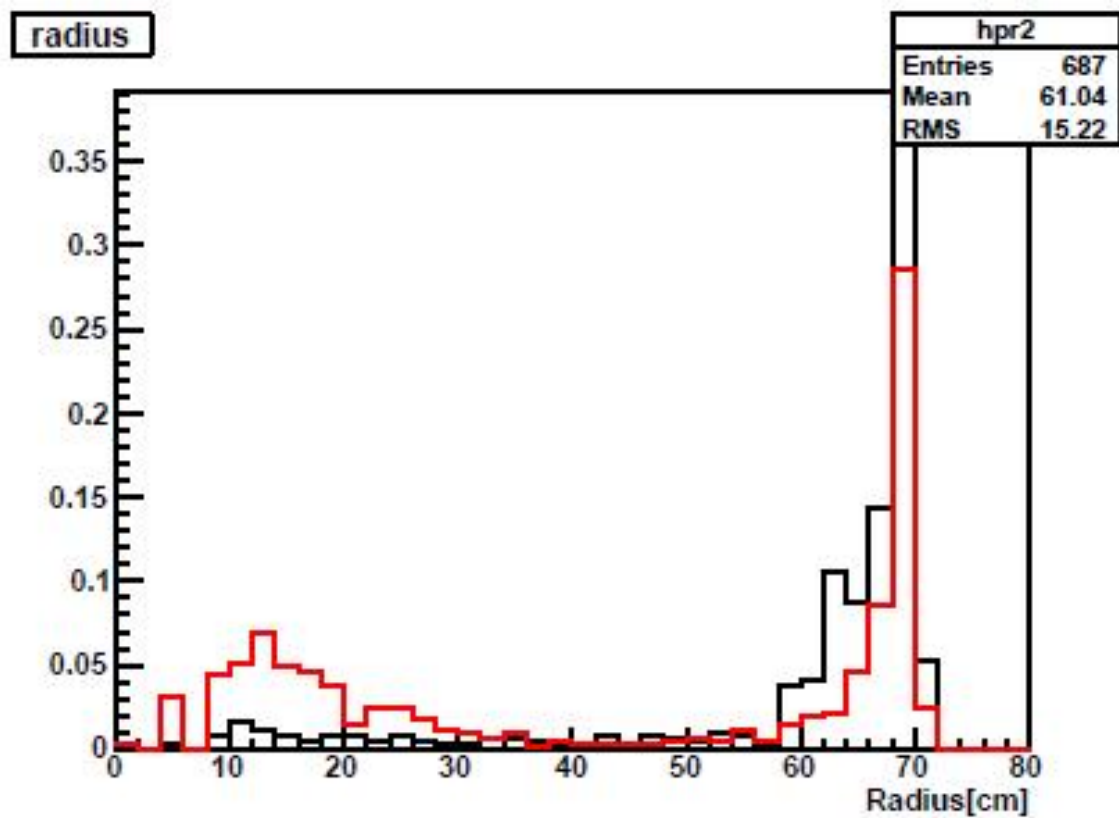


図 7.20: ADC アルゴリズムによる動径方向の分布の比較。赤が Am/Be 線源有り。

第8章 まとめと今後の課題

8.1 結論

本研究ではKASKA 検出器のプロトタイプ検出器を作成し、高速実験炉「常陽」で世界で初めての高速炉ニュートリノの検出を目指し測定を行った。 ^{60}Co 線源を用いることによりエネルギースケールを確定すると共に、エネルギー分解能 $\sigma(E)/E(\text{MeV}) \sim 20\%$ を得た。擬似ニュートリノ信号を出す AmBe 線源の信号を遅延同時計測することにより、

先発エネルギー (4.0MeV ~6.0MeV)

後発エネルギー (7.5MeV ~9.5MeV)

中性子捕獲時間 (2 μsec ~50 μsec)

Charge Balance (Prompt<0.75,Delayed<1.0)

を Neutrino Window として採用した。原子炉 ON データと原子炉 OFF データに Neutrino Window カットをかけることで、 $S/N=1/20$ を得た。さらに S/N を良くするために、ADC と TDC による位置算出アルゴリズムの試作版を作った。LED と Co を使った検証では、測定点と算出点に違いがあったので校正曲線を求めた。中心付近では直線で近似した。今回の解析では定数は動径方向に一律に使えるとする。

ADC 反応点 (X,Y,Z) = 算出点 (X,Y,Z) \div 0.85

TDC 反応点 (X,Y,Z) = 算出点 (X,Y,Z) \div 2.1

PD 反応間距離を用いたカットでは分離できなかった。S を用いたカットでは、Am/Be 信号とバックグラウンド信号の分布の違いが見えた。しかし重なる部分が多いため、今のところ効率のよいカットにならない。動径方向のカットでは ADC アルゴリズムで Am/Be の先発信号が中心付近に多くあることが、見えた。

8.2 今後の課題

今後さらに S/N を向上させるためにはアルゴリズムの改良、新しい解析方法の導入が必要になる。使用したアルゴリズムは試作版なので、今後さらなる改良が必要になる。ADC 値を併用した光量の補正が必要である。また PSD(波形弁別) の導入も検討している。

関連図書

- [1] 土屋泰, KASKA プロトタイプによる原子炉ニュートリノ検出の研究, 修士論文, 東北大学大学院理学研究科物理学専攻, 2006
- [2] 関根隆, 前田幸基, 青山卓史, 有吉昌彦, 「常陽」MK-炉心における性能試験計画と結果, 日本原子力学会和文論文誌, Vol.4, No.4, 2005
- [3] M. Apollonio *et al.*, Search for neutrino oscillations on a long base-line at the CHOOZ nuclear power station, 2002
- [4] K. Schreckenbach *et al.*, Determination of antineutrino spectrum from ^{235}U thermal neutron fission products up to 9.5 MeV, *Physics Lett. B*, Vol.160, pp. 325 - 330, 1985.
- [5] A. A. Hahn *et al.*, Reactor antineutrino spectra from ^{241}Pu and ^{239}Pu thermal neutron fission products, *Physics Lett. B*, Vol. 218, pp. 365 - 368, 1989.
- [6] P. Vogel *et al.*, Reactor antineutrino spectra and their application to antineutrino induced reactions. II, *Physics Rev. C*, Vol. 24, pp. 1543 - 1553, 1981.
- [7] <http://www.tepco.co.jp/nu/kk-np/index-j.html>
- [8] M. Aoki *et al.*, (KASKA Collaboration), Letter of Intent for KASKA, e-Print, hep-ex/0607013, 2006.
- [9] 末包文彦, KASKA - 原子炉による精密 13 測定計画, 高エネルギーニュース, Vol.23-3, pp. 157 - 173, 2004.
- [10] M. Apollonio *et al.*, (CHOOZ Collaboration), Limits on neutrino oscillations from the CHOOZ experiment, *Physics Rev. D*, Vol. 466, pp. 415 - 430, 1999.
- [11] 酒井和幸, ニュートリノ振動実験 KASKA のための液体シンチレータの研究, 修士論文, 新潟大学大学院自然科学研究科, 2006.
- [12] 前田順平, 原子炉ニュートリノ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.
- [13] H. Furuta *et al.*, (KASKA Collaboration), On-site underground background measurements for the KASKA reactor-neutrino experiment, e-Print, hepex/0607015, 2006.

- [14] 古田久敬, 原子炉ニュートリノ実験におけるガンマ線バックグラウンドの解析, 修士論文, 東京工業大学大学院理工学研究科, 2006
- [15] 佐久間清美, 原子炉ニュートリノ振動実験 (KASKA) における宇宙線バックグラウンドの考察, 修士論文, 東京都立大学大学院理学研究科, 2006.
- [16] <http://www.jaea.go.jp/04/o-arai/joyo/indexs.htm>

謝辞

修士課程2年間の研究生活と修士論文執筆において多くの方々にお世話になりました。この場を借りて感謝の意を表します。

末包文彦准教授には指導教官として多くの実験技術や知識を教えていただきました。また迷惑をかけることが多くありましたが、根気強く指導していただきました。ホームパーティという今までしたことのない経験もさせてもらえました。

東北学院大学の坂本泰伸准教授には特にモニター関係について指導していただきました。ある程度の知識が身に付くまではとてもご迷惑をおかけしました。飲み会に度々誘っていただいたことで、新しい人との出会いも経験しました。

東京工業大学の古田久敬さんは常陽での実験の中心で、一緒に装置を作り上げていく中で多くの時間を一緒に過ごしました。解析方法や実験について多くの知識をいただきました。また、修士論文を書くにあたり細かく指導していただきました。

新潟大学の田村詔生教授には Collaboration Meeting で、解析方法について教えていただき、理解が深まりました。グループに参加したところにはいろいろとご迷惑をおかけしました。

東北大学の土屋泰さんには研究における助言はもちろんのこと、規則正しい生活の大切さを背中であげて教えていただきました。元木正和助教、太田裕之さん、田所秀徳さんには東北大学での研究活動を円滑に進める上でお世話になりました。

東京工業大学の久世正弘准教授、新田和範研究員、前田順平さん、船木好子さん、松原綱之さん、田中浩基さん、吉野亜弥さん、今野智之さんには常陽での実験を始め、解析等の助言をいただきました。久世研メンバーの中に一人混じっても違和感のないくらい、馴染んでいました。

首都大学東京の住吉孝之教授、春名毅さん、遠藤裕介さん、新潟大学の宮田等准教授、川崎健夫助教、勝亦正明さん、酒井和幸さん、中島伸敬さん、山崎玄太さん、堀内太一さん、神戸大学の原俊雄准教授、田村直樹さん、宮城教育大学の福田善之准教授、高エネルギー加速器研究機構の石原信弘教授、広島工業大学の長坂康史准教授、KASKA 実験グループの皆様には本研究について多くの協力をしていただきました。常陽での作業を手助けしていただき、また Collaboration Meeting では助言をいただきました。

日本原子力研究開発機構の高松操さんや伊藤主税さんをはじめ常陽産業の方々には、大変お世話になりました。検出器の設置から撤収に至るまで、多くの時間を我々のために割いていただきました。また、学会発表の前には助言もいただきました。

ニュートリノセンターではスタッフの方々には実験や出張を滞りなく進めるように、手助けしていただきました。学生には運動不足になりがちな研究活動において、スポーツ大会に出たりと多くの刺激をもらいました。

そのほか大学院生活でお世話になった方々に感謝します。最後に学生生活を支えてくれた家族に感謝します。