

# XMASS実験のための新しい Flash ADCシステムの開発

神戸大学理学部物理学科  
粒子物理学研究室

0713181s

北村 拓己

2011年3月

# 目次

<b>第 1 章 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 暗黒物質の存在 . . . . .	1
1.2 暗黒物質の候補 . . . . .	2
<b>第 2 章 XMASS 実験</b>	<b>3</b>
2.1 検出原理 . . . . .	3
2.2 液体キセノン (Xe) . . . . .	4
2.3 バックグラウンド . . . . .	5
2.3.1 外部バックグラウンド . . . . .	5
2.3.2 Xe 内部バックグラウンド . . . . .	6
<b>第 3 章 Flash ADC</b>	<b>9</b>
3.1 Flash ADC とは . . . . .	9
3.2 XMASS 実験における Flash ADC . . . . .	9
3.3 本研究で用いた Flash ADC . . . . .	9
<b>第 4 章 Flash ADC システムの開発</b>	<b>10</b>
4.1 神戸大での試験システムの開発 . . . . .	10
4.2 神岡での FADC システムの開発 . . . . .	10
<b>第 5 章 データ解析</b>	<b>12</b>
5.1 ノーマルラン中のデータ解析 . . . . .	12
<b>第 6 章 まとめ</b>	<b>16</b>
6.1 まとめ . . . . .	16
<b>謝辞</b>	<b>17</b>

# 第1章 Introduction

## 1.1 暗黒物質の存在

暗黒物質の存在は、銀河の回転曲線によって予言された。球対称な質量分布を考えると、距離  $r$  の位置での回転速度は重力と遠心力の釣り合いから、

$$v^2 = \frac{GM(r)}{r} \quad (1.1)$$

で与えられる。ここで  $G$  は重力定数、 $M(r)$  は半径  $r$  内の質量の和である。従って回転曲線を観測する事で質量分布  $M(r)$  を決定できる。図 1.1 は渦巻銀河の回転角速度を中心からの距離の関数として表した回転曲線である。仮に銀河が輝く物質のみで構成されているとすると、回転曲線は距離  $r$  とともに減少するはずであるが、実際は図 1.1 のように、回転曲線は距離  $r$  が大きくなっても減少せず一定の値である。この結果は輝かない物質、つまり暗黒物質の存在を示す証拠である。

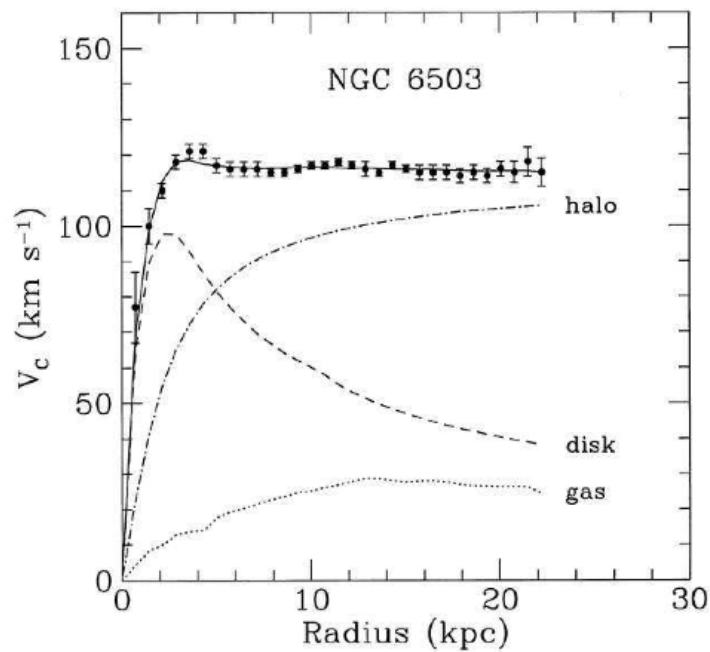


図 1.1: 渦巻銀河 NGC6503 の回転曲線 [1]

プロットは銀河の中心からの距離  $r$  の関数として測定された角回転速度である。破線、点線は disk, gas による寄与で、点-破線は dark halo による寄与である。

## 1.2 暗黒物質の候補

暗黒物質はバリオン候補と非バリオン候補の二つに大きく分けられる。バリオン候補は主に白色矮星、中性子星、ブラックホールなどを指す。これらを総称して MACHO(MAssive Compact Halo Objects) と呼ぶ。MACHO は確かに暗黒物質の候補ではあるが、これらの質量は観測結果から、ダークハローの質量の 3% 以下であるという事が判明している。従って、暗黒物質の主な要素は非バリオン候補である。非バリオン候補は平衡状態から分離される時に相対論的な候補である”Hot”と非相対論的な”Cold”に分けられる。

### ”Hot”暗黒物質

”Hot”暗黒物質の候補はニュートリノが挙げられる。ニュートリノは、SuperKamiokande の大気 neutrino 観測 [2] や、太陽ニュートリノ観測 [3] から質量があることが確認されている。これらのニュートリノ振動解析の結果から、 $\Delta m^2$  は、 $7 \times 10^{-5} eV^{-2} < \Delta m^2 < 3 \times 10^{-3} eV^{-2}$  程度の値となる。もしニュートリノの質量が 1-50eV の範囲内であれば、暗黒物質の大きな要素となり得る。しかし、tritium decay から質量の上限は 2.8eV である。よってニュートリノは暗黒物質の一部ではあるが、主な要素とは言えない。

### ”Cold”暗黒物質

”Cold”暗黒物質の候補には、Weakly Interacting Massive Particle(WIMP) とアクシオンが挙げられる。アクシオンは 1977 年に Pecci,Quinn[4] によって、強い相互作用での CP 不変性の破れを標準モデルの最小限の拡張で解決するのに提案された粒子である。もう一方の WIMP 型の中の、ニュートラリーノが暗黒物質の候補として最も有力視されている。ニュートラリーノは超対称性理論 [5] で存在が予言されている超対称性粒子の中で最も質量が軽い粒子 (LSP:Lightest supersymmetric particle) である。LSP は R-parity 保存のため安定であり、暗黒物質として残存する事ができる。

## 第2章 XMASS実験

XMASS 実験とは、暗黒物質の直接検出を目的とする液体キセノン (Xe) シンチレーターを用いた低バックグラウンド実験である。低バックグラウンド環境を実現するため神岡鉱山内の地下研究施設で行われている。この章では XMASS 実験の特徴について述べる。

### 2.1 検出原理

暗黒物質の最有力候補である WIMP に分類されるニュートラリーノは、Xe 原子核とごく稀に弾性散乱する。その際、ニュートラリーノはエネルギーを落とし、そのエネルギーに比例して液体 Xe がシンチレーション光を放出する。本実験では、そのシンチレーション光を液体 Xe の周りを取り囲む 642 本の光電子増倍管 (PMT) で検出することによって暗黒物質の探索を行う。期待されるイベントレートは数 keV 数十 keV の領域で  $10^{-2}$  event/kg/day/keV 以下のイベントレートである事がこれまでに行われた他の実験結果から判明している。そのため低エネルギー閾値、低バックグラウンド環境、大質量検出器の条件が必要となる。図 2.1 は検出器のイメージ図である。

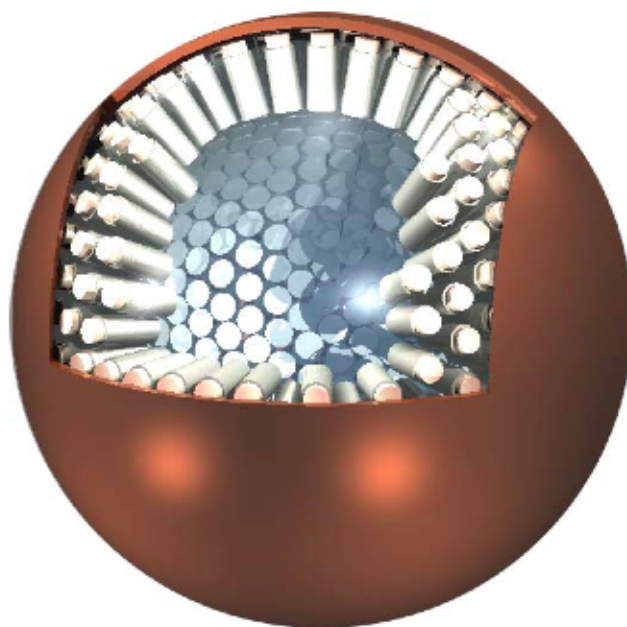


図 2.1: XMASS 検出器のイメージ図

直径約 80cm の球形で、約 800kg の液体 Xe の周囲を 642 本の PMT が取り囲んでいる。

## 2.2 液体キセノン (Xe)

XMASS 実験ではターゲットに液体 Xe を用いている。暗黒物質の探索において、液体 Xe には多くの利点がある。この節では、暗黒物質探索に対する液体 Xe の有効性をいくつか紹介する。

### 1. 高発光量シンチレーター (42,000[photons/MeV])

WIMP の運動エネルギーは数 keV 数十 keV 程度であるため、Xe 原子核との弾性散乱により落とされるエネルギーは非常に小さい。従って、その事象を測定するには発光量の大きいシンチレーターが必要になる。液体 Xe は 42,000[photons/MeV] の発光量で無機シンチレーター NaI(Tl) と同程度の高発光量を持つ。従って、閾値を低エネルギーに設定でき、WIMP シグナルの同定に有利である。

### 2. 長波長なシンチレーション光 (178nm)

Xe シンチレーション光の波長ピークは 178nm と、他の希ガスシンチレーターと比べて長波長である。そのため、波長変換剤を用いる事なく PMT での直接検出が可能である。

### 3. 液体相が比較的高温度 (165K at 1atm)

Xe の液体相は 1 気圧下で 165K、2 気圧下で 170K~180K と、他の希ガスと比べ高い温度で扱える。

### 4. 高密度 (約 $3g/cm^3$ )

液体 Xe は約  $2.96g/cm^3$  と高密度なため、800kg で直径 80cm と実験装置をコンパクトにする事ができる。図 2.2 に Xe の温度と密度の関係を示す。

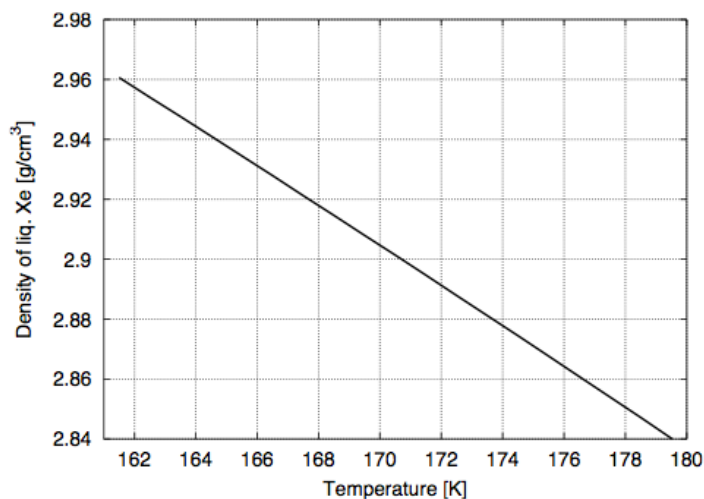


図 2.2: Xe の温度と密度の関係

### 5. 大きい原子番号 ( $Z = 54$ )

Xe の原子番号は  $Z = 54$  と大きいため、放射長が 2.77cm と短い。そのためバックグラウンドとなる  $\gamma$  線は Xe 内に入ると急速に減衰する。この現象を自己遮蔽と呼び、この自己遮蔽能力を利用する事が XMASS 実験の中心のアイデアである。大きな質量の液体 Xe を用意する事で、外来  $\gamma$  線は液体 Xe の外側で止まり、中心付近は WIMP の探索に適した  $\gamma$  線バックグラウンドフリーな環境が実現できる。

### 5. 相変化が容易

Xe は液相、気相の両方で扱う事ができるため、循環が可能である。検出器のシステム内に純化装置の

ラインを組む事で Xe 中に含まれる放射性物質を除去する事が可能であり、Xe の純度を維持したまま長期測定ができる。Xe の相図を図 2.3 に示す。

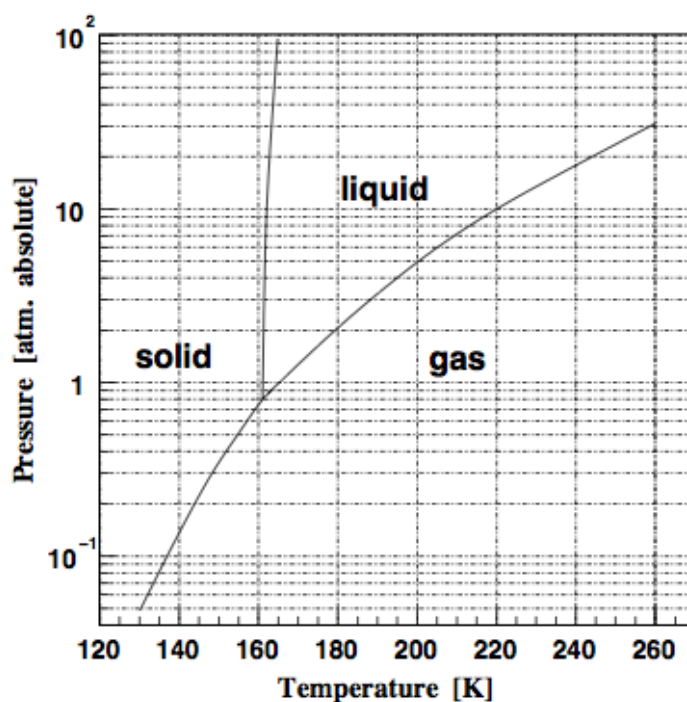


図 2.3: Xe の相図

## 2.3 バックグラウンド

暗黒物質探索において、バックグラウンドが観測データに及ぼす影響の見積もりは WIMP シグナルの同定に不可欠である。この節では XMASS 実験で想定される主なバックグラウンドを挙げる。

### 2.3.1 外部バックグラウンド

#### 1. 宇宙線

ミューオン等の宇宙線は WIMP 探索の大きなバックグラウンドとなる。しかし、XMASS 実験は神岡鉱山内地下 1000m で実験が行われているので、地上と比較して宇宙線の影響を約  $10^{-5}$  倍にする事ができる。

#### 2. 環境 $\gamma$ 線

検出器周辺の岩盤及び検出器の素材に含まれる放射性物質も本実験のバックグラウンドとなる。このような周囲の環境から発生する  $\gamma$  線は、検出器の周囲を水で満たすこと、及び液体 Xe の自己遮蔽能力によって遮蔽できる。

### 3. 環境中性子

周辺の岩石で発生する中性子によるバックグラウンドも、検出器の周囲に設置した直径 10m、高さ 11m の純水シールドで減少させる事ができる。

### 4. ラドン (Rn)

神岡鉱山内は Rn 濃度が高く、地上と比較して最大 100 倍程度になる事もある。そのため、純水シールド周囲の空気を Super Rn Free Air(空気中の Rn を活性炭で取り除いたもの) で満たす。これによって地上よりも Rn 濃度が低い環境で測定する事が可能である。また、脱気装置により Rn 除去を行った純水をシールド用に用いる。

## 2.3.2 Xe 内部バックグラウンド

2.3.1 で挙げたバックグラウンドは検出器周辺環境及び検出器由来のバックグラウンドである。この他に、Xe 内部バックグラウンドが存在する。このバックグラウンドは遮蔽体によって防ぐ事ができないため、十分に純化しておく必要がある。検出器設計の際には、これらのバックグラウンドを減らすため、あらかじめ低い放射能の部材を用いる等、細心の注意を払って設計されている。主な Xe 内部バックグラウンド源を以下に挙げる。

#### 1. U 系列

$^{238}\text{U}$  は  $4.468 \times 10^9$  year という長い半減期を持ち、安定な核種になるまで図 2.4 のように連鎖的に崩壊する。この崩壊系列を U 系列と呼ぶ。

#### 2. Th 系列

$^{232}\text{Th}$  は  $1.405 \times 10^{10}$  year の長い半減期を持ち、安定な核種になるまで図 2.5 のように連鎖的に崩壊する。この崩壊系列を Th 系列と呼ぶ。





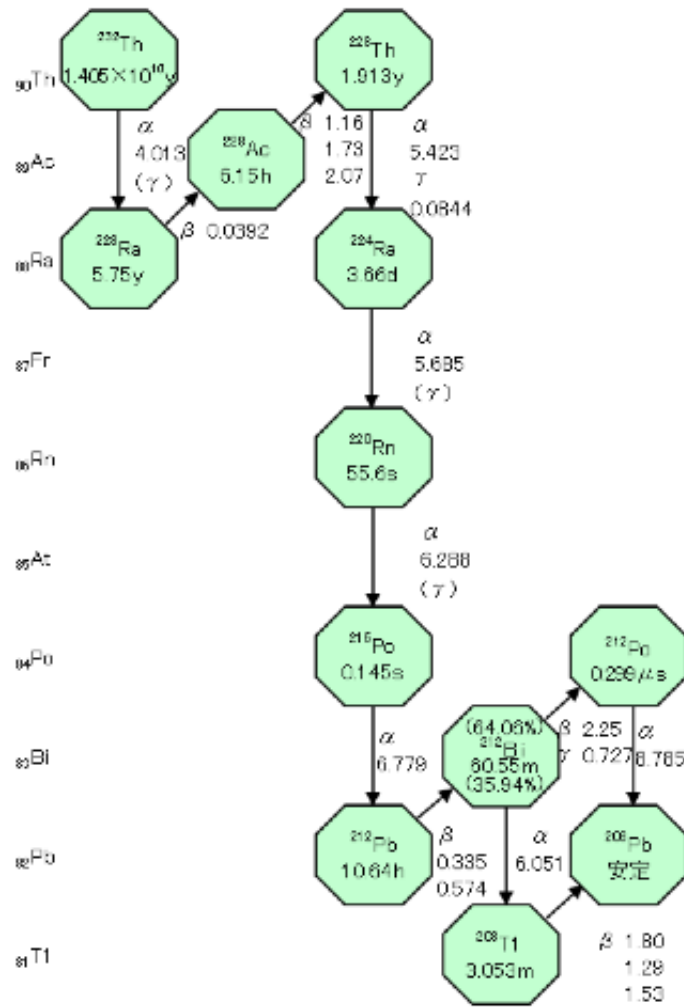


图 2.5: Th 崩壊系列

# 第3章 Flash ADC

## 3.1 Flash ADC とは

Flash ADC とは、アナログ入力信号を連続的にデジタル信号に変換するモジュールである。量子化レベルの数だけコンパレータ (比較器) を並列に配置してすべて同時に動作させる方式である。通常の ADC と比較して高速処理が可能である。

## 3.2 XMASS 実験における Flash ADC

XMASS 実験において、考えられるバックグラウンドの一つに Th 崩壊系列の自然放射能がある。このシグナルは約 300ns と非常に短いタイムスケールで、ビスマス ( $^{212}Bi$ )、ポロニウム ( $^{212}Po$ ) の連続パルスを生じる。この波形を確認するために、本実験では時間分解能の良い Flash ADC が用いられている。しかし、現在 XMASS 実験で用いられている Flash ADC は、他の実験で使用されていた物の再用品品であるため、老朽化しており、消費電力が大きくノイズが乗りやすい。そのため消費電力を約  $\frac{1}{10}$  に抑えることのできる新しい Flash ADC を導入する計画がある。本研究ではこの新しく導入される Flash ADC の動作試験及びシステム開発を行い、XMASS 実験にて使用可能であるかの検証を行った。

## 3.3 本研究で用いた Flash ADC

本研究で用いた Flash ADC は CAEN-V1721 で、主な性能を表 3.1 にまとめる。また Flash ADC と通常の PC を接続するために、A2818 PCI カードと V2718 optical link bridge というモジュールを用いた。

sampling rate	500MHz
resolution	8bit
full scale range	$\pm 0.5V$
input ch	8ch

表 3.1 CAEN V1721 の主な性能

上記の Flash ADC のブロックダイアグラムを図 3.1 に示す。

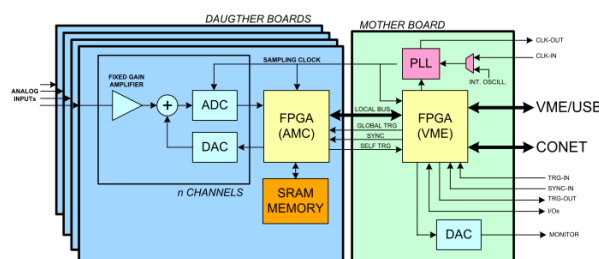


図 3.1: Flash ADC のブロックダイアグラム

## 第4章 Flash ADC システムの開発

この章では、本研究で構築したシステムについて述べる。本研究では、まず神戸大にて1枚の Flash ADC モジュールを用いて動作試験を行った。その後、神岡鉱山内の地下実験施設に搬送し、8枚の Flash ADC モジュールを用いて動作確認、及びデータ収集を行った。

### 4.1 神戸大での試験システムの開発

神戸大で試験的に組んだ回路の概略図を図 4.1 に示す。まず、VME バスに optical link bridge と Flash ADC を取り付けた。次に用意したパソコンに PCI カードを挿入し、optical link bridge と PCI カードを光ケーブルで接続した。その後、デバイスドライバーをインストールして動作確認を行った。Flash ADC の入力信号としてパルスジェネレーターを用いた。データ収集用のプログラムは、同 Flash ADC に付属されていたサンプルプログラムを用いた。

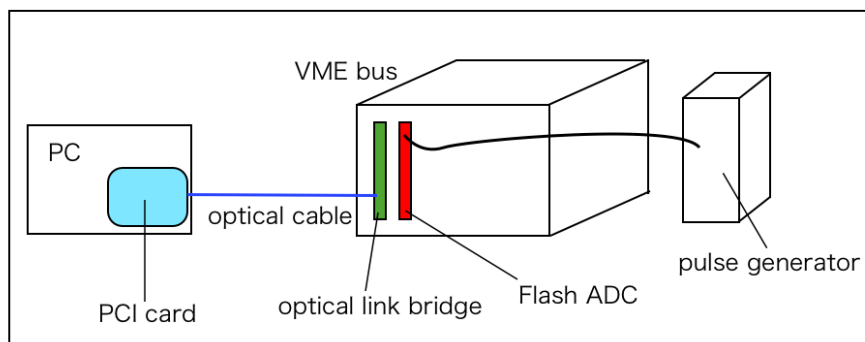


図 4.1: 神戸大での試験システム

### 4.2 神岡での FADC システムの開発

神戸大での試験で正しく動作していることを確認し、新しくデータ収集用プログラムを開発した。その後、神岡鉱山内の地下実験施設に搬送し、XMASS 検出器タンク上部にあるエレクトロニクスハットのクレートに設置した。図 4.2 は実際に設置したモジュールの写真である。神戸大での試験は Flash ADC モジュール一枚についてであったが、神岡では Flash ADC モジュールを 8 枚用いてシステムを構築した。神岡で組んだ回路の概略図を図 4.3 に示す。入力信号は PMT のアナログ信号を 12 本分まとめた、PMTSUM 信号である。この PMTSUM 信号を Flash ADC モジュール 8 枚、計 60 チャンネルに接続した。その他、データ収集時のコンディションを表 4.1 にまとめた。

Flash ADC モジュールの数	8 枚
PMTSUM 入力信号ケーブルの本数	60 本
データ取得幅	16ksample/event(32 $\mu$ s)
scale range	+0.1V $\sim$ -0.9V

表 4.1 データ収集時の主なコンディション

また解析の際に使用するチャンネル番号の定義を表 4.2 に示す。ここで Board No は図 4.2 の写真の左から 2 番目のボードを No,0 とし、左から順に 0,1,2,...,7 と定義した。なお、一番左のボードは optical link bridge である。CH No はボード毎に 8 チャンネルあり、上から 0,1,2,...,7 となっている。本研究では PMTSUM ケーブルの本数が 60 本しかなかったため、表 4.2 での 60~63 のチャンネルにはケーブルが接続されていない。

CH No	Board No							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	8	16	24	32	40	48	56
1	1	9	17	25	33	41	49	57
2	2	10	18	26	34	42	50	58
3	3	11	19	27	35	43	51	59
4	4	12	20	28	36	44	52	60
5	5	13	21	29	37	45	53	61
6	6	14	22	30	38	46	54	62
7	7	15	23	31	39	47	55	63

表 4.2 チャンネル番号表

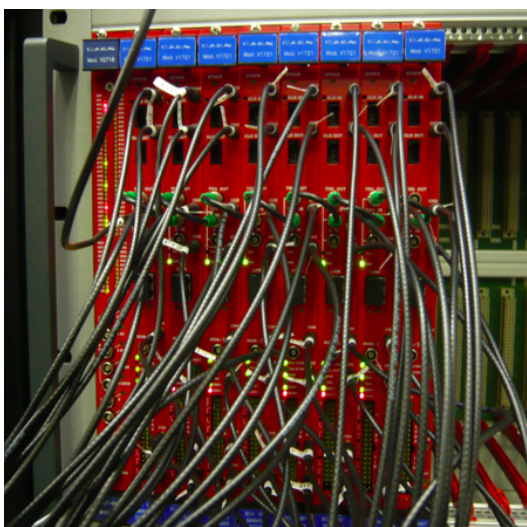


図 4.2: 実際の Flash ADC モジュール

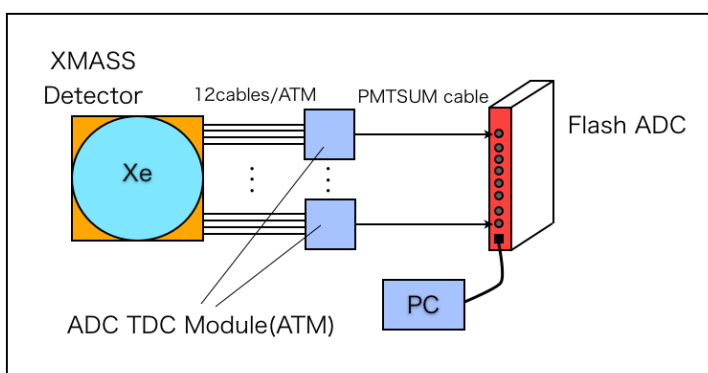


図 4.3: 神岡で組んだ回路

## 第5章 データ解析

### 5.1 ノーマルラン中のデータ解析

#### 1. 各チャンネルの動作確認

まず Flash ADC が正常に動作し、各チャンネルでデータを取得できているか確認を行った。図 5.1 は CH[1] から CH[4] までの 4 チャンネルで得られた波形である。縦軸が ADC カウント、横軸がサンプリング番号である。表 3.1 で示した通り、本研究で使用した Flash ADC は 500MHz のサンプリングレートなので、1 サンプリング番号が 2ns となる。トリガーはサンプリング番号 8192 の位置になるよう設定した。このような図を全 60 チャンネル分作成し、すべてのチャンネルで波形が確認できたことから、データを取得できていると判断した。

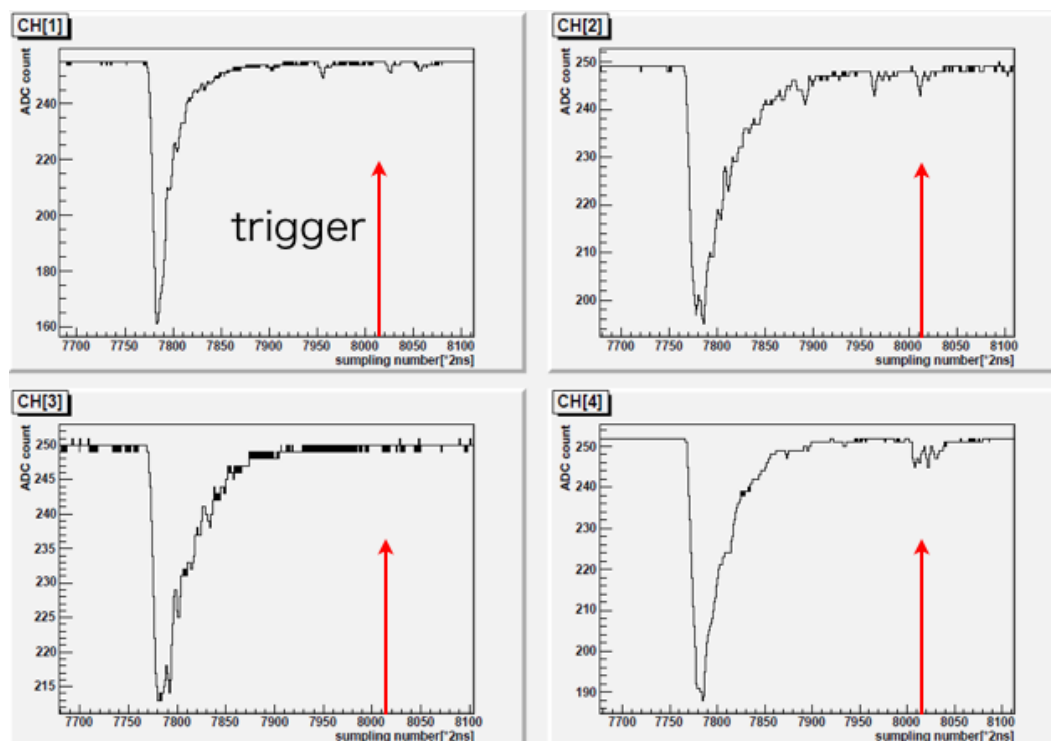


図 5.1: 各チャンネルで得られた波形

## 2. 各チャンネルのデータ収集能力の確認

全チャンネルで波形が見えたものの、チャンネル毎に得られたイベント数に大きな違いがあれば、データ収集システムが正常に動作しているとは言えない。そのため、チャンネル毎のデータ収集能力に大きな差異がないかを確認した。本測定では、イベントをある程度選別するため閾値を ADC カウント = 200 に設定し、各チャンネルで最小の ADC カウントが 200 を下回ったイベントのみを対象とした。図 5.2 はイベント選別の例を示している。図中の青線の様なイベントは数えず、黒線の様に閾値を下回ったイベントの数を調べた。

結果を図 5.3 に示す。縦軸は 10000 イベント中の閾値を超えたイベントの数であり、横軸はチャンネル番号である。図のように、チャンネル間で多少の差異はあるが特別に平均から離れた値をとるチャンネルはなかった。

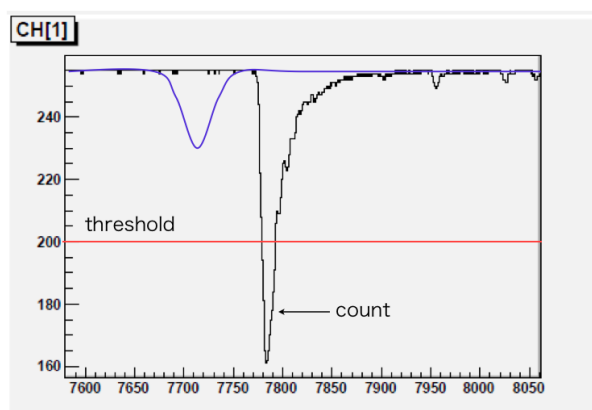


図 5.2: イベント選別の例

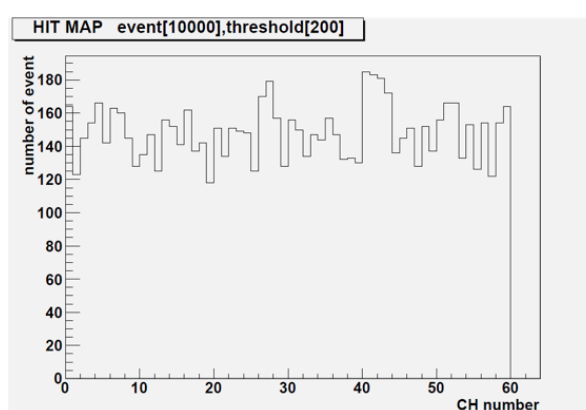


図 5.3: 各チャンネルで得られたイベント数

## 3. ノイズレベルの確認

まずペDESTALをサンプリング番号 6000~7000 での ADC カウントの平均と定義した。そして全時間領域をスキャンし、最小の ADC カウントを記録した。このペDESTALと最小 ADC カウントの差を pulse height と定義する。図 5.4 は pulse height の定義の例である。この pulse height を横軸にし、縦軸をイベント数としてヒストグラムを作成したものが図 5.5 である。

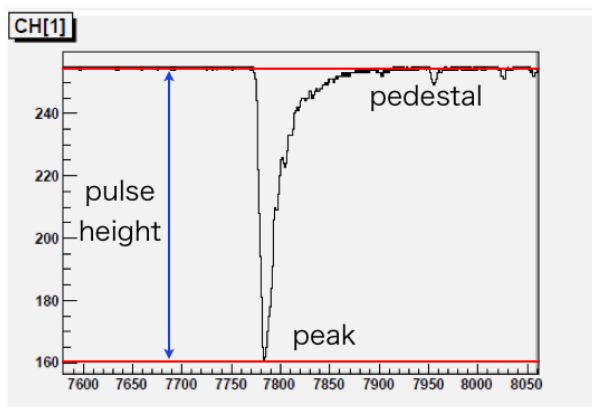


図 5.4: pulse height の定義

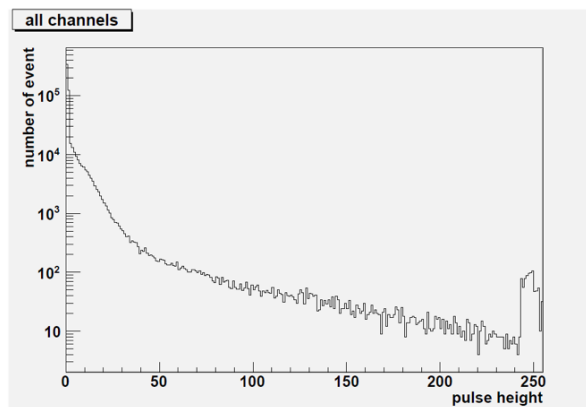


図 5.5: イベント数 vs pulse height

図 5.5 の結果より、pulse height < 3 のイベントが非常に多い。本研究では、pulse height < 5 のイベントはノイズであると判断し、以降の解析ではこれらのイベントは除外した。

#### 4. 各チャンネルのシグナルタイミングの確認

各 Flash ADC モジュールのトリガーは daisy chain で接続されているため、シグナルのタイミングにずれが生じる事が予想できる。図 5.6 は daisy chain で接続されたモジュールの写真である。そのモジュール間シグナルタイミングのずれを確認し、一定の値になるよう補正をおこなった。図 5.7 は横軸に各チャンネルの最大 pulse height のピークのタイミングをとり、縦軸にイベント数をとったヒストグラムである。そのヒストグラムをガウス関数でフィットし、その平均値を各チャンネルのシグナルタイミングとした。

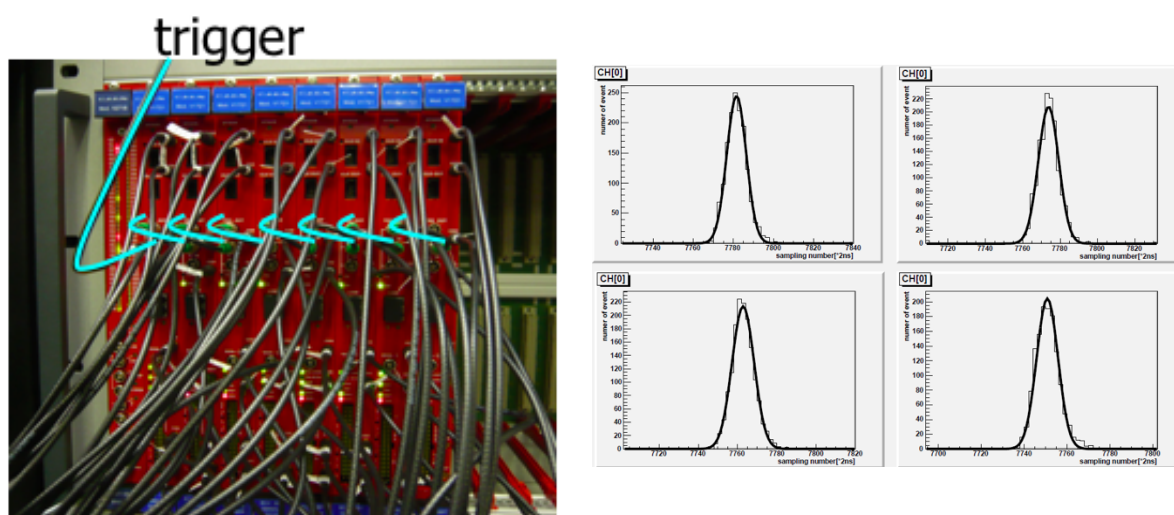


図 5.7: フィットした各チャンネルのヒストグラム

図 5.6: モジュール間 daisy chain の正面写真

図 5.7 のようなヒストグラムを 60 チャンネル分作成し、チャンネル毎のシグナルタイミングをプロットしたものを、図 5.8 に示す。横軸がチャンネル番号、縦軸がサンプリング番号である。

図 5.8 から、モジュール間で一定のずれがある事が見て取れる。どのモジュール間もおおよそ 10 サンプリング番号、つまり 20ns ずつ遅れる事が確認できた。これは実際にオシロスコープで波形をみて確認した値と一致している。また同モジュールのチャンネルにおいてもずれがある事が分かる。全チャンネルでシグナルタイミングを等しくするため、全てのチャンネルでシグナルタイミングが 8192 になるよう補正を行うことにした。



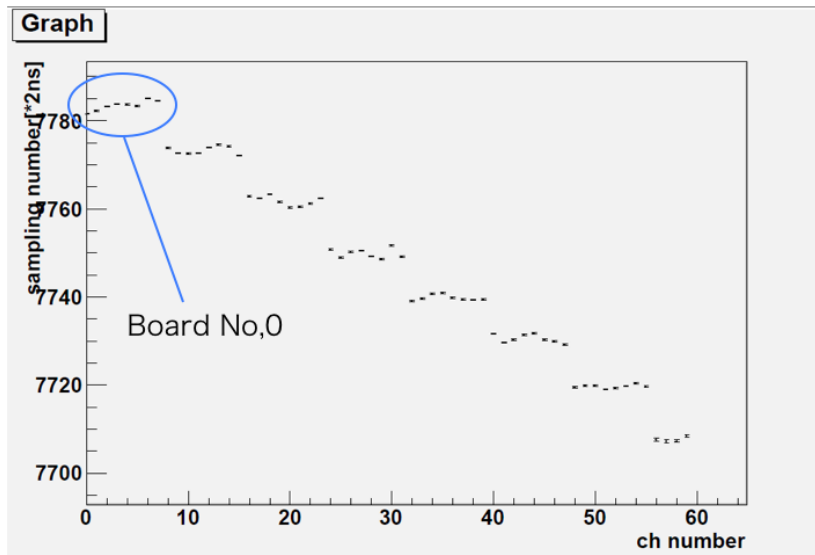


図 5.8: 各チャンネルのシグナルタイミング

## 5. ピークサーチ試験

シグナルタイミングの補正を行った後、簡単なピークサーチを行った。本試験ではペDESTALから6 ADC カウント以上離れてから、4 ADC カウントに戻るまでを1ピークと定義した。図5.9の右下のグラフはピークのカウントの例である。図5.9左上のグラフは1イベント中のピークの数を示す。左下のグラフは、各ピークの pulse height を示している。また、右上のグラフは各ピークのタイミングを示している。この際、サンプリング番号-3000 付近にピークが見える。これは、現在の XMASS 実験のデータ収集系が各トリガーの後、6  $\mu$  sec の長さで veto をかけており、最初にトリガーがかからなかったイベントが、その後のアフターパルスで0  $\mu$  sec 付近にトリガーをかけて見えていると考えられる。

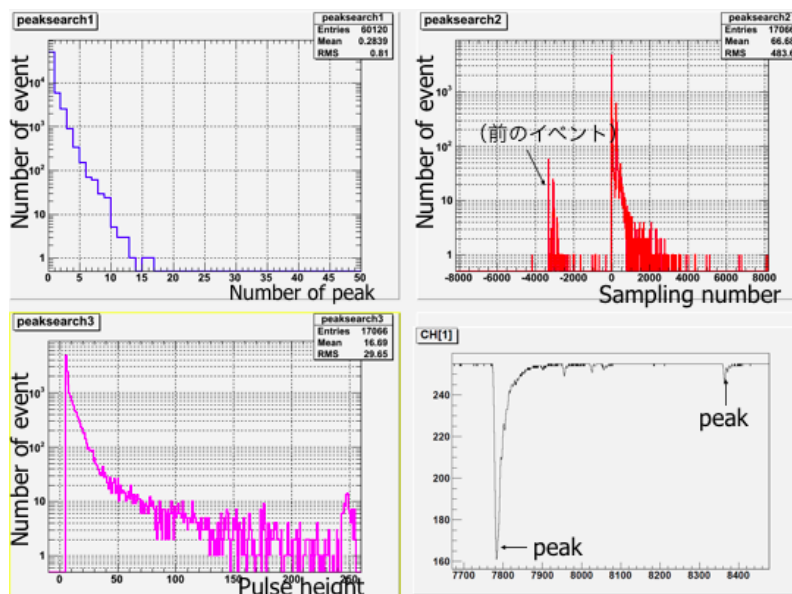


図 5.9: ピークサーチ試験

## 第6章 まとめ

### 6.1 まとめ

本研究では、データ収集可能な Flash ADC システムの開発を行った。実際に XMSS 検出器からの信号を入力し、データ収集を行った。収集されたデータの解析結果から、本研究で用いた Flash ADC で正しいデータが取得できている事が確認できた。また、XMASS 実験での Flash ADC の用途であるビスマス ( $^{212}\text{Bi}$ )、ポロニウム ( $^{212}\text{Po}$ ) の連続パルスの有無の確認に向けて、簡単なピークサーチを行った。

今後の課題として、ピークサーチの精度を高めて、より詳細に解析する必要がある。また、キャリブレーションラン中や、XMASS 検出器内部にある LED を点灯した、LED ラン中のデータ収集も行っており、これらのデータの解析を行う必要がある。

## 参考文献

- [1] K.G. Begeman, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. 249(1991)219t.
- [2] Y. Fukuda et al., (Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Rev. Lett.81(1998)1562.
- [3] S.Fukuda et al.,(Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Rev. Lett.86(2001)5651.
- [4] R.D.Peccei and H. R. Quinn, Phys. Rev. Lett.38(1977)1440.
- [5] G.Jungman et al., Supersymmetric Dark Mater Physics Rep. 267(1996)195.
- [6] 穂坂純也, 東京大学大学院理学系研究科修士論文 (2005)
- [7] 南野彰宏, 東京大学大学院理学系研究科修士論文 (2004)

# 謝辞

本研究を遂行するにあたり、多くの方のお世話になりました。指導教官である竹内康雄教授には、本研究の全般にわたっての丁寧な指導に、深く感謝致します。東京大学宇宙線研究所神岡施設の小林兼好特任助教には、神岡現地での実験、解析に関する指導をしていただきました。また粒子物理学研究室の川越清以教授、藏重久弥教授、原俊雄准教授、山崎祐司准教授、鈴木州助教、越智敦彦助教には適切な指導、助言をいただき、深く感謝致します。同研究室の先輩である岡田勝吾氏、矢野孝臣氏、早川俊氏、西山知徳氏、吹田航一氏、谷和俊氏、徳永香氏、宮崎一樹氏、大塚康平氏、岸本巴氏、小西拓也氏、鈴木雄太氏、細川佳志氏、また同研究室の同期である江戸勇樹氏、宮岡直広氏、村田亜紀氏、森永真央氏、山口貴弘氏、渡辺一平氏にも多くの助言を頂き、深く感謝致します。ありがとうございました。最後に、陰ながら大学生生活を支えてくれた家族に深く感謝致します。