

CANGAROO-III 3号機、4号機望遠鏡の  
カメラの開発、設計とその性能評価

東京大学大学院 理学系研究科  
物理学専攻 修士課程2年  
黒坂 亮治

January 7, 2004

## 概要

CANGAROOは、宇宙から到来するガンマ線を観測して、天体での高エネルギー現象の解明を目的とした日本とオーストラリアの共同研究組織である。現在CANGAROOグループは4台の大気チェレンコフ望遠鏡を用いてステレオ観測を行なう計画(CANGAROO-III)が進行中で、今年度中に4台目の望遠鏡が完成して4台の望遠鏡によるステレオ観測が始まる予定である。CANGAROO-IIIグループで使用しているカメラは、主に427本の光電子増倍管(浜松ホトニクス社製、H8820)と光電子増倍管の間のdead spaceを減らす為のライトガイドで構成され、視野は約4度となっている。光電子増倍管一本一本に、それぞれ独立に高電圧を印加することが出来、これによりゲインにおいて十分なユニフォミティを達成している。本修士論文では、3号機と4号機の望遠鏡に使用するカメラの光電子増倍管の一本一本のキャリブレーション(リニアリティ、時間分解能、ゲインの高電圧依存性)の結果とカメラ全体での性能(ユニフォミティ、光の入射角度に対する出力の変化、出力の時間変化など)について実験したので、検討、議論を行なう。

またデータ取得に際して、夜光などのノイズかガンマ線由来の信号かどうかを判定する手段として、出力があるThreshold以上の光電子増倍管の本数をトリガー条件として採用しているが、これは現在アンプの加算回路を使用してアナログ的に処理しているが、これをデジタル的に処理できる様なモジュールをVME規格で製作したので、このモジュールの実用性なども検討してみる。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>宇宙線研究の歴史と意義</b>	<b>7</b>
1.1	宇宙線研究の歴史 . . . . .	7
1.2	宇宙線・ $\gamma$ 線研究の意義 . . . . .	7
<b>第 2 章</b>	<b><math>\gamma</math>線とその観測方法</b>	<b>10</b>
2.1	$\gamma$ 線発生のプロセス . . . . .	10
2.2	観測方法 . . . . .	12
2.2.1	電磁シャワー . . . . .	12
2.2.2	チェレンコフ光 . . . . .	14
<b>第 3 章</b>	<b>CANGAROO-III 望遠鏡のカメラ</b>	<b>17</b>
3.1	CANGAROO-III 望遠鏡のカメラ . . . . .	20
3.2	Design . . . . .	20
3.3	光電子増倍管 (PMT) . . . . .	22
3.4	ライトガイド . . . . .	24
3.4.1	Winston cone . . . . .	26
3.5	DC regulator board . . . . .	28
3.6	High Voltage Supply Unit . . . . .	31
3.7	3号機カメラからの改善点 . . . . .	32
<b>第 4 章</b>	<b>PMT calibration</b>	<b>35</b>
4.1	測定系 . . . . .	35
4.2	結果 . . . . .	39
4.2.1	HV 値の較正 . . . . .	39
4.2.2	時間分解能 . . . . .	41
4.2.3	ゲインの HV 依存性 . . . . .	44
4.2.4	リニアリティ . . . . .	46
4.3	PMT calibration の再現性 . . . . .	48

4.4	2号機、3号機、4号機のカメラに使用しているPMTの比較	48
<b>第5章</b>	<b>3号機のカメラの性能評価</b>	<b>50</b>
5.1	ゲインのユニフォミティ	50
5.1.1	宇宙線研究所でのテスト	50
5.1.2	現地のキャリブレーションシステムでのテスト	55
5.2	ライトガイドの角度依存性	58
5.3	gainのHV依存性	62
5.4	時間変動	64
5.5	Kangaroo	66
<b>第6章</b>	<b>VME Moduleの性能評価</b>	<b>67</b>
6.1	Trigger Module	67
6.1.1	目的	67
6.1.2	仕様	68
6.1.3	回路内部	72
<b>第7章</b>	<b>Discussion</b>	<b>76</b>
<b>第8章</b>	<b>Summary</b>	<b>78</b>
8.1	カメラの基本的な構造	78
8.2	4号機カメラの製作	78
8.3	3号機の基本性能	79
8.4	4号機の基本性能	80
8.5	VME module	80
8.6	PMT calibration testの信頼性	80
8.7	2、3、4号機に使用するPMTのcalibration testの比較	81
<b>付録A</b>	<b>4号機の性能評価</b>	<b>84</b>
A.1	ユニフォミティ	84
A.2	LED calibration system	88
A.3	ADC CONSTANTのHV依存性	90
A.4	ライトガイドの角度依存性	92
A.5	ゲインの時間変動	94
<b>付録B</b>	<b>ADC CONSTANTのユニフォミティとHVの相関</b>	<b>95</b>

# 目次

1.1	宇宙線積分スペクトル	8
2.1	電磁シャワーの発達の模式図	13
2.2	シャワーの発達の様子	15
2.3	カメラのイメージ	15
2.4	チェレンコフ光の波長依存性	16
3.1	観測場所 Woomera	18
3.2	CANGAROO 4号機望遠鏡の建築作業	19
3.3	完成間近の CANGAROO 望遠鏡	19
3.4	CANGAROO-III カメラ-側面	21
3.5	カメラ-前面	21
3.6	カメラ-後面	21
3.7	望遠鏡に取り付けられたカメラ-その1	21
3.8	望遠鏡に取り付けられたカメラ-その2	21
3.9	CANGAROO 望遠鏡で使用している光電子増倍管	22
3.10	プリアンプ MAX4107	23
3.11	CANGAROO 望遠鏡で使用しているライトガイド	25
3.12	ライトガイドの図面	25
3.13	ライトガイドの性能。	25
3.14	Winston cone について	26
3.15	3号機から採用している DC regulator board	29
3.16	DC regulator board の cross talk チェック	30
3.17	High Voltage Supply Unit 前面	31
3.18	High Voltage Supply Unit 後面	31
3.19	3号機のカメラで使用しているパネルとケーブルエントリー	33
3.20	4号機のカメラで使用しているパネルとケーブルエントリー	33
3.21	4号機カメラにおける DC regulator board の取付方法	34

3.22	4号機カメラにおけるPMTの固定方法	34
4.1	PMT calibration testのセットアップ	37
4.2	PMT calibration testの際のpulse generatorと部屋の温度変化	38
4.3	PMT キャリブレーションテストの最中の出力の変動のヒストグラム	38
4.4	入射光量 $1p.e.$ 、ゲイン $1.2 \times 10^7$ の時の出力信号をADCで10000count測定した時のヒストグラム	40
4.5	PMTモジュールに $1.2 \times 10^7$ のゲインを与える電圧値のヒストグラム	40
4.6	4号機のカメラで使用しているPMTの427本の時間分解能	41
4.7	3号機のカメラで使用しているPMTの427本の時間分解能	41
4.8	4号機のカメラで使用しているPMTの427本の時間分解能のヒストグラム	42
4.9	3号機のカメラで使用しているPMTの427本の時間分解能のヒストグラム	43
4.10	PMTのゲインのHV依存性	44
4.11	PMTのゲインのHV依存性-べき $\alpha$ のヒストグラム	45
4.12	ゲインのリニアリティ	46
4.13	リニアリティの飽和点のヒストグラム	47
5.1	3号機に使用しているPMTのゲインのヒストグラム-I	53
5.2	3号機に使用しているPMTのゲインのヒストグラム-II	53
5.3	PMTのゲインのユニフォミティの二次元分布。入射光量 $1p.e.$	54
5.4	PMTのゲインのユニフォミティの二次元分布。入射光量 $50p.e.$	54
5.5	LED光反射スクリーン	55
5.6	現地のcalibrationシステムで測定したADC値とphoto-electron数の変換係数の2号機と3号機の全PMTの比較	56
5.7	現地のcalibrationシステムで測定したADC CONSTANTの2号機と3号機のヒストグラムの比較	57
5.8	入射光の角度依存性実験のセットアップ	58
5.9	入射光の角度依存性実験の結果	60
5.10	カメラ容器によるshadow	61

5.11	3号機カメラの gain の HV 依存性-入射光量 $7p.e.$ . . . . .	62
5.12	各入射光量に対しするゲインの HV 依存性 . . . . .	63
5.13	出力信号の時間変動 (3号機のカメラ) . . . . .	65
5.14	出力信号の時間変動 (4号機のカメラ) . . . . .	65
5.15	3号機で取ったカンガルーの絵 . . . . .	66
6.1	伝搬遅延時間 . . . . .	69
6.2	16ch トリガーマジュールの回路図 . . . . .	70
6.3	ADDRESS READ WRITE DATA のタイミング。 . . . .	71
6.4	2ビット 2進数変換回路 . . . . .	72
6.5	ノイズ除去前の入力 $n$ チャンネル、threshold が $(n+1)$ チャンネルの時の出力。 . . . . .	75
A.1	ADC CONSTANT の入射光量によるばらつき . . . . .	85
A.2	4号機のカメラの ADC CONSTANT のユニフォミティ-その1 . . . . .	86
A.3	4号機のカメラの ADC CONSTANT のユニフォミティ-その2 . . . . .	87
A.4	4号機の LED キャリブレーション . . . . .	89
A.5	4号機のカメラの ADC CONSTANT の HV 依存性 . . . .	91
A.6	4号機のカメラのライトガイドの入射光の角度依存性 . . .	92
A.7	4号機のカメラのライトガイドの入射光の角度依存性-その2 . . . . .	93
A.8	4号機のカメラのゲインの時間変動 . . . . .	94
B.1	ADC CONSTANT のユニフォミティ . . . . .	96
B.2	ADC CONSTANT の平均値からのずれと HV 値の相関。 . .	97

# 表 目 次

3.1	PMT モジュール H8820 の規格。	23
3.2	ライトガイドの主な特性	25
4.1	PMT のキャリブレーションの再現性	48
4.2	2号機、3号機、4号機で使用している PMT の比較	49
6.1	トリガー回路の仕様	68
6.2	74283 の真理値表	73
A.1	4号機 LED キャリブレーションの結果	88



# 第1章 宇宙線研究の歴史と意義

## 1.1 宇宙線研究の歴史

宇宙線とは、一般的に説明すると宇宙から地球に絶えず光速で降り注いでいる原子核や素粒子の総称である。ほとんどが核子であり、電子がその1/100程度であり、わずかに $\gamma$ 線などの高エネルギー電磁波が含まれる。宇宙線は、1912年 Victor Hess らの空気の電離度を調べるための気球実験により発見された。1940年代までは、宇宙線は地上の実験室では実現できないような高エネルギー粒子の提供源として発展してきた。例えば、1935年湯川秀樹が中間子論を発表して1947年パウエルによって $\pi$ 中間子が宇宙線の中に発見されたのが有名である。1948年米カリフォルニア大の Gardner らがシンクロサイクロトロンを使って人工的に $\pi$ 中間子生成に成功すると、素粒子の生成は主に加速器によってなされ、以降宇宙線はさらなる高エネルギー現象や宇宙線起源の探求に重きが置かれるようになった。

実際の宇宙線の観測の方法であるが、これはエネルギー領域や対象とするものによって異なる。低エネルギー領域では人工衛星を使用して宇宙線を直接的に観測し、高エネルギー領域では宇宙線が作り出すシャワーからのチェレンコフ光を利用して間接的に観測している。高エネルギー側では人工衛星を利用できないのだが、それは図1.1で表される様に宇宙線の強度は、ほぼエネルギーの冪乗に従って落ち、高エネルギー側程強度が小さいからである。またもともと高エネルギー放射線は透過力が強く、高エネルギー領域の観測は人工衛星に搭載するには現実的でない程大きな検出器を必要とするからである。

## 1.2 宇宙線・ $\gamma$ 線研究の意義

先にも述べたように宇宙線研究の意義として、宇宙線起源の探求や高エネルギー獲得の過程をさぐる事である。さらに陽子や電子などの荷電

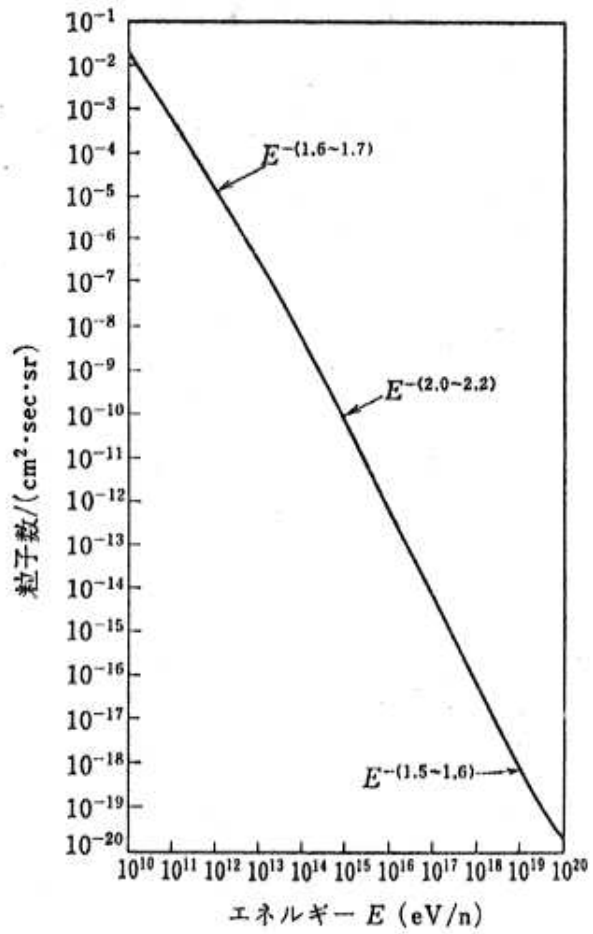


図 1.1: 宇宙線積分スペクトル。

粒子が磁力線に巻きついて到来方向の情報を失うのに対して、高エネルギー宇宙線の $\gamma$ 線は宇宙を直進するため、宇宙空間の色々な情報を含む。このため $\gamma$ 線は宇宙を探るための探針となりうる。つまり宇宙とは何かという一種の哲学的な問題に科学的な見地を与える所に $\gamma$ 線研究の意義があると言える。

## 第2章 $\gamma$ 線とその観測方法

この章では宇宙線の1つである $\gamma$ 線のことについて述べる。

### 2.1 $\gamma$ 線発生のプロセス

宇宙線物理学において、 $\gamma$ 線を研究する長所として、磁力線に巻きついて運動する荷電粒子と異なり、磁場の影響を受けず直進するために到来方向を推察できるというところにある。つまり $\gamma$ 線を研究する事によって、宇宙線の起源を探ることが可能となる。よってここからは $\gamma$ 線の発生過程を述べることにする。 $\gamma$ 線の発生過程は主にシンクロトロン放射、制動放射、 $\pi^0$ の崩壊、逆コンプトン散乱などが挙げられる。シンクロトロン放射は、運動している電子が磁場によってその移動方向が曲げられる時に放射される電磁波である。特徴としては、電子の速度と磁場の強さにもよるが主に電波からX線までの連続スペクトルである事、電子の進行方向に偏光している事などが挙げられる。

制動放射 (Bremsstrahlung) は電子ないし陽電子が原子核のクーロン場で力を受ける際の放射であり、断面積は Bethe と Heitler によって計算され、以下の式で表される [1]。

$$\begin{aligned} \sigma(E_e, \nu) d\nu &= 4 \frac{Z^2 e^2}{\hbar c} \left( \frac{e^2}{m_e c^2} \right)^2 \frac{d\nu}{\nu} \\ &\quad \times \left[ \left\{ 1 + (1 - \nu)^2 - \frac{2}{3}(1 - \nu) \right\} \ln(184Z^{-1/3}) + \frac{1}{9}(1 - \nu) \right] \end{aligned} \quad (2.1)$$

ここで、 $E_e$  は入射する電子または陽電子のエネルギー、 $\nu$  は放射する電磁波のエネルギー  $E_\gamma$  と  $E_e$  との比 ( $\frac{E_\gamma}{E_e}$ )、 $Z$  は媒質の原子番号であり、その他の定数は物理で一般的に適用される物理量を表す。ここでは、衝突係数  $b$  が  $b_{max} = \frac{1}{137} \frac{\hbar}{mc} \frac{1}{z^{1/3}}$ 、 $b_{min} =$  原子核半径 の範囲内でのみ有効

であるという仮定を与えている。 $b_{max}$ の制限は、電場が、核外電子によってデバイ遮蔽される効果による。式2.1より $\sigma \propto \frac{Z^2}{m^2}$ であることから、この反応は質量の軽い電子のときに重要な過程であると言える。制動放射によるエネルギー損失を求めると、

$$E \propto e^{-\frac{x}{X_0}} \quad (2.2)$$

で表される。ここで $X_0$ (radiation length)は

$$X_0 = \frac{1}{4 \frac{z^2 e^2}{\hbar c} \frac{N_0}{A_0} \left(\frac{e^2}{mc^2}\right)^2 \ln(184Z^{-1/3})} \quad (2.3)$$

であり、物理的には制動放射によってエネルギーが $1/e$ に減少するまでに荷電粒子が媒質中を走行する距離である。 $Z, A$ はそれぞれ媒質を構成する原子核の原子番号と質量数である。この制動放射は $\gamma$ 線が大気に入射して空気シャワーを作り出す際に非常に重要な過程である。

次に $\pi^0$ の崩壊であるが、 $\pi^0$ は質量が $135MeV$ の中間子でアップクォークと反アップクォークもしくはダウンクォークと反ダウンクォークから成る。平均寿命はおよそ $8 \times 10^{-17}sec$ で $\gamma$ 線に崩壊する。

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma \quad (2.4)$$

$\pi^0$ は、宇宙では宇宙線プロトンと星間物質プロトンとの衝突によって生成される。

$$p + p \rightarrow \pi^0 + X \quad (2.5)$$

地球ではハドロンが一次宇宙線として大気に入射したときに出来るハドロンカスケードによっても生成される。

最後に逆コンプトン散乱について、これは高エネルギー電子が光子と散乱して光子にエネルギーを与える現象である。Lorentz変換して電子静止系で考えるとふつうのコンプトン散乱と同じ議論になる。電子光子の散乱断面積はKlein-Nishinaの公式を用いて以下のように表される[2]。

$$\sigma_{K-N} = \pi r_0^2 \frac{1}{\varepsilon} \left\{ \left(1 - \frac{2(\varepsilon + 1)}{\varepsilon^2}\right) \ln(2\varepsilon + 1) + \frac{1}{2} + \frac{4}{\varepsilon} - \frac{1}{2(2\varepsilon + 1)^2} \right\} \quad (2.6)$$

$r_0$  は古典電子半径、 $\varepsilon$  は  $mc^2$  を単位とした光子のエネルギーである。詳しい計算は省くとして散乱後の光子のエネルギー  $\varepsilon'$  は

$$\varepsilon' = \frac{4}{3}\gamma^2\varepsilon \quad (2.7)$$

となって、散乱前よりエネルギーが  $\gamma^2$  倍になる。 $\gamma$  は実験室系での電子のローレンツ因子である。

## 2.2 観測方法

この章では  $\gamma$  線を観測する方法を述べる。 $\gamma$  線は地球大気に入射すると、大気中の原子核と電磁相互作用によって電子と陽電子の対生成を起こし、これらが制動放射によって  $\gamma$  線を放射し、そのまた  $\gamma$  線が電子と陽電子の対生成を起こし…と、対生成と制動放射によって 2 次宇宙線はねずみ算式に増殖していき電磁シャワーを形成する。このシャワーを形成する粒子が放射するチェレンコフ光を検出することによって間接的に  $\gamma$  線を研究することが出来る。

### 2.2.1 電磁シャワー

ここでまず電子対生成について説明する。この反応は当然、電磁波のエネルギー  $E$  が  $E \geq 2m_e c^2$  を満たす必要があるがこの他に外場があって初めて成立する。外場がないとエネルギー保存則と運動量保存則を同時に満たすことが出来ないからである。断面積は、Bethe と Heitler によって以下の様に計算された。

$$\begin{aligned} \sigma(h\nu, \mu) &= 4 \frac{Z^2 e^2}{\hbar c} \left( \frac{e^2}{m_e c^2} \right)^2 \\ &\quad \times \left[ \{ \mu^2 + (1 - \mu)^2 + \frac{2}{3} \mu(1 - \mu) \} \ln(184Z^{-1/3}) - \frac{1}{9}(1 - \mu) \right] \\ \mu &\equiv \frac{E}{h\nu} \end{aligned} \quad (2.8)$$

$E$  は電子のエネルギーである。 $1 - \mu$  は陽電子の ( $h\nu$  で規格化された) エネルギーである。物質中で電子対生成が 1 回おこるのに期待される距離は  $X_p$  は

$$X_p \sim \frac{9}{7} X_0 \quad (2.9)$$

$X_0$  は式 2.3 で表されるような radiation length であり、制動放射も電子対生成も 1 回の反応における長さの単位は  $X_0$  でほぼ同じである。よって電磁シャワーは制動放射の radiation length を基本的な長さの単位として発達していく。この際、エネルギーは電子、陽電子にほぼ等分されていき、1 radiation length 当たりの電離損失と制動放射による損失量が等しくなった所でシャワーの発達は減衰し始める。1 radiation length 当たりの電離損失を臨界エネルギーと呼び、空気ではおよそ  $80\text{MeV}$  である。

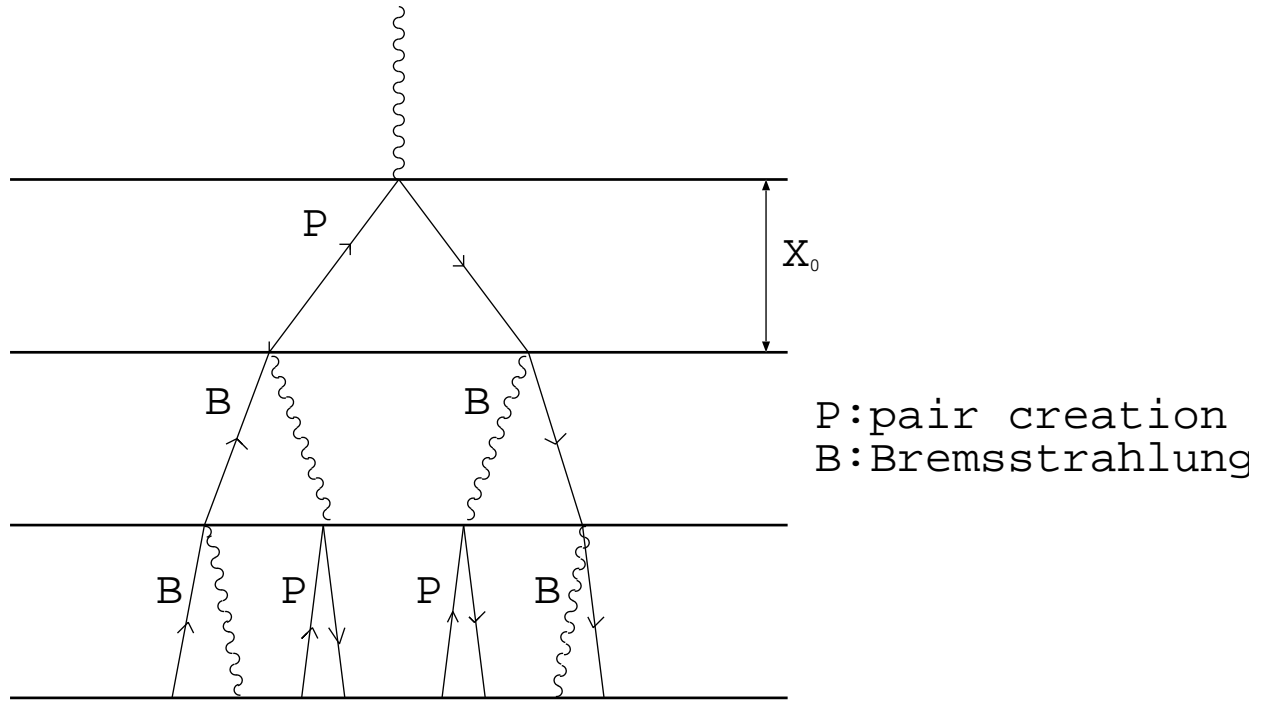


図 2.1: 制動放射と電子陽電子対生成による電磁シャワーの発達の模式図。

またシャワーの極大になる地点は、シャワー理論によると入射  $\gamma$  線のエネルギーを  $E_0$ 、臨界エネルギーを  $E_c$  とすると以下の式で表される。

$$X_{max} \sim X_0 \left( \ln \frac{E_0}{E_c} + \frac{1}{2} \right) \quad (2.10)$$

$E_0$  を  $1\text{TeV}$ 、 $E_c$  を  $100\text{MeV}$  と考えると  $X_{max}$  はおよそ  $10X_0$  となって、大気の radiation length ( $X_0$ ) は  $37\text{g/cm}^2$  であるので、シャワー極大は  $370\text{g/cm}^2$  となって、これはおよそ高度  $8\text{km}$  に相当する。

### 2.2.2 チェレンコフ光

チェレンコフ光は、屈折率  $n(n > 1)$  の媒質中を荷電粒子が (その媒質中の) 光速を超える速度で運動する時に放射される衝撃波である。これは、荷電粒子の作る電場によって引き起こされる媒質中の分極が荷電粒子の通過後に元に戻る時に放射される電磁波として説明される。放射される方向は荷電粒子の進行方向と放射される電磁波の方向のなす角度を  $\theta$  として

$$\theta = \text{Arccos}\left(\frac{1}{n\beta}\right) \quad (2.11)$$

で表される ( $\beta$  は荷電粒子の速度)。大気の屈折率はおおよそ次式で表される。

$$n = 1 + 0.000296 \times \frac{x}{1030g/cm^2} \left(\frac{T}{273k}\right)^{-1} \quad (2.12)$$

$x$  は大気の深さ [ $g/cm^2$ ] である。ここでシャワー極大地点でチェレンコフ光を考えるため大気の深さを  $370g/cm^2$  とすると屈折率はおおよそ 1.0001 となっており、チェレンコフ光の放射角度は、式 2.11 に代入しておおよそ  $\theta = 0.8^\circ$  となっている。チェレンコフ光の地上での拡がりにはシャワーを構成する荷電粒子の分布にチェレンコフ光の放出角度を考慮したものである。電磁シャワーの横方向の拡がりには、クーロン散乱を考えなければ横方向運動量で電子の質量の約半分程度である。一方、ハドロンカスケードの横方向の拡がりには  $\pi^0, \pi^+, \pi^-$  などの 2 次生成粒子の小さくない横方向運動量 ( $0.3GeV/c$ ) によるものであり、この影響のため電磁シャワーの拡がりに比べ大きい。図 2.2 に  $\gamma$  線由来のシャワーと核子由来のシャワーの発達の様子を示す。電磁シャワーの方がシャープに発達しているのがわかる。放出される光子数は Tamm-Frank の理論によって計算され [3]

$$N(\nu)d\nu = \frac{2\pi Z^2 e^2}{\hbar c} \left(1 - \frac{1}{n^2 \beta^2}\right) d\nu \quad (2.13)$$

$$\propto Z^2 \frac{d\lambda}{\lambda^2} \quad (2.14)$$

で表される。このようにチェレンコフ光は短波長側に強いが、検出される光は、この他レイリー散乱 (散乱断面積  $\propto \frac{1}{\lambda^4}$ ) やミー散乱などによる大気の透過率や、鏡の反射率、光電子増倍管 (PMT) の量子効率などの波長依存性が加味される。



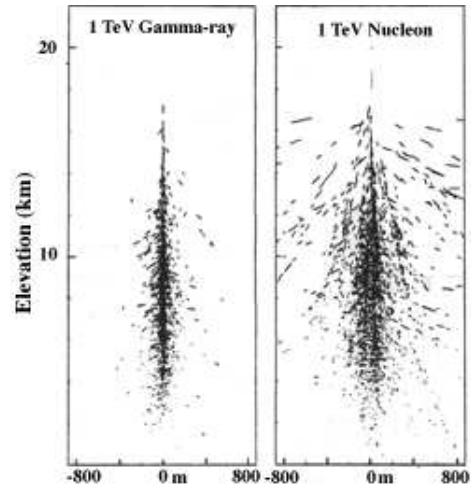


図 2.2: シャワーと発達の様子 [4]。左が  $1\text{TeV}$  の  $\gamma$  線が入射した時で、右が  $1\text{TeV}$  の核子が入射した時である。

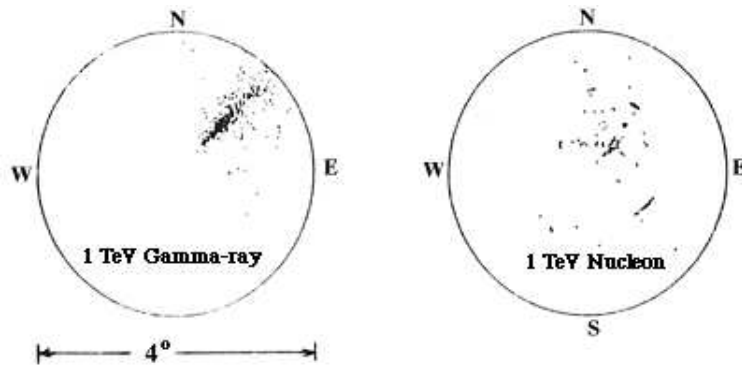


図 2.3: 視野4度のカメラにおけるシャワーのイメージ。

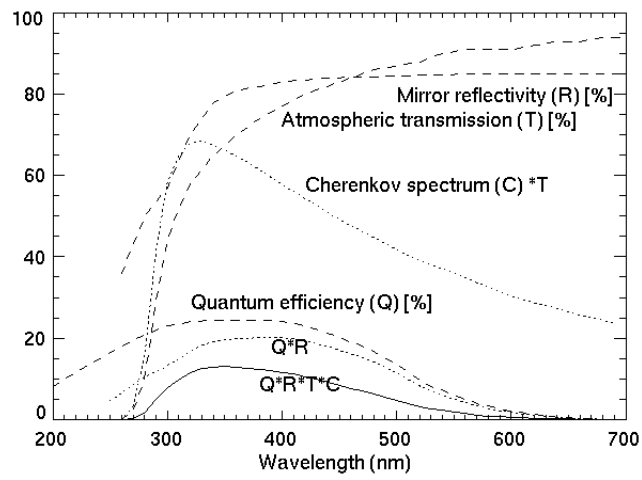


図 2.4: チェレンコフ光、鏡の反射率、PMT の量子効率の波長依存性。

# 第3章 CANGAROO-III望遠鏡のカメラ

CANGAROOとは Collaboration of Australia and Nippon for a Gamma Ray Observatory in the Outback の頭文字をとった造語で宇宙からの超高エネルギー $\gamma$ 線の存在と性質の解明を目指した日本とオーストラリアの共同研究プロジェクトである。望遠鏡は、東経 $136^{\circ}47'$ 、南緯 $31^{\circ}06'$ に位置するオーストラリアのWoomeraという砂漠地帯に設置されている。ここでは、 $\gamma$ 線源が数多く存在するとされている銀河中心をほぼ天頂で観測でき、また晴天率80%と天候がよく、またチェレンコフ光検出に障害となる町の人工光の影響が少ない利点がある。CANGAROOは1991年に始まり、CANGAROO-I、CANGAROO-IIを経て今現在CANGAROO-III計画が進行中である。この計画は4台の大気チェレンコフ望遠鏡を用いてステレオ観測する事を目的としている。ステレオ観測することによって、角度分解能が向上し、観測できるエネルギーのthresholdを100GeV程度まで下げることが出来るからである。2003年に3台目の望遠鏡が完成し、3台の望遠鏡によるステレオ観測を行っている。4台目の望遠鏡は2003年度末に完成して、2004年3月から4台の望遠鏡によるステレオ観測が始まる予定である。



図 3.1: 観測場所 Woomera。東経  $136^{\circ} 47'$ 、南緯  $31^{\circ} 06'$ 、海拔  $160m$  に位置する。



図 3.2: CANGAROO 4号機望遠鏡の2003年7月の建築作業風景。



図 3.3: 完成間近のCANGAROO望遠鏡。4台目の望遠鏡は2004年3月に完成予定である。

### 3.1 CANGAROO-III 望遠鏡のカメラ

この章では CANGAROO-III で使用しているカメラについて説明する。カメラは、シャワーからのチェレンコフ光などの光子を高速電気信号に変換する高感度光センサであり、望遠鏡の焦点面に位置する。視野は約  $4^\circ \phi$  であり、1ピクセルあたり  $0.168^\circ \phi$  となっている。カメラには浜松ホトニクス社製の 3/4 インチ光電子増倍管 (PMT) を 427 本使用しており、六方最密に敷きつめている。重量は全体で約  $120kg$ 、サイズは  $80cm\phi \times 100cm$  である。この重量は、カメラを支えるステイのカメラ自身の重さが引き起こす歪みによるカメラの降下を無視できる範囲内に抑えられる様に凡そ  $100kg$  という制限がかけられている為、その制限を大きく超えない値になるように設計されている。カメラの前面には図 3.11 のようなライトガイドが付けられている。これは、PMT 間の dead space を減らして光量を増やし、また鏡の外からやって来る夜光などの外遊ノイズの除去の為に  $33^\circ$  より大きい角度で入射して来る光をカット出来るという特徴を持つ [5]。

### 3.2 Design

前述の通りカメラ容器のサイズは  $80cm\phi \times 100cm$  である。アルミニウム合金製 (A5052) であり、カメラ容器単体では重さは凡そ  $34kg$  である。カメラ内壁は光の反射を防止するためにつや消しの黒色の処理が施されている。前から  $55cm$  の所に厚さ  $1.5cm$  のフランジが取り付けられており、このフランジの部分でボルト、ナット、スプリングワッシャによってステイに固定される。3号機からは、カメラのフランジ面とステイのフランジ面とを密着させずに固定している。これは、ボルトの長さを利用してステイのフランジ面に対してカメラを移動させることが出来るので、PMT 面を焦点面に合うように微調整させる事が出来る。



図 3.4: CANGAROO-III カメラ-側面

図 3.5: カメラ-前面

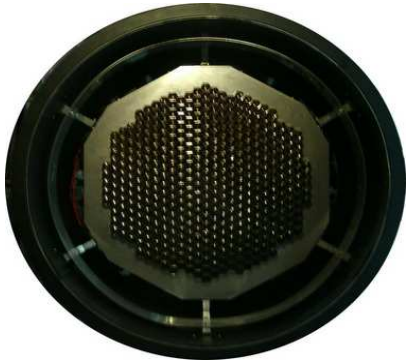


図 3.6: カメラ-後面

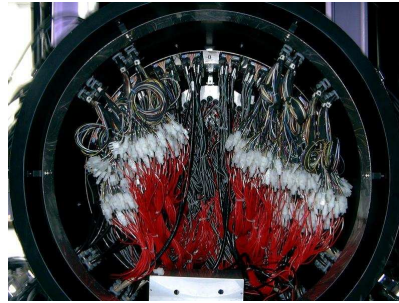
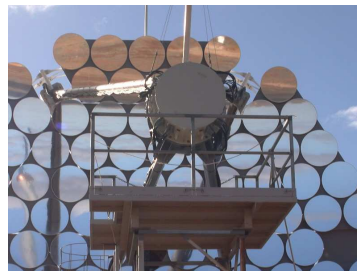


図 3.7: 望遠鏡に取り付けられた  
カメラ-その 1



図 3.8: 望遠鏡に取り付けられた  
カメラ-その 2



### 3.3 光電子増倍管 (PMT)

CANGAROO-IIIで使用しているPMTについて説明する。PMTは浜松ホトニクス社と共同開発したH8820を使用していて、これはR3479という光電子増倍管の部分とMAX4107(300MHz)というプリアンプを使用した非反転増幅回路が一体化したモジュール型となっている。非反転増幅回路の部分の増幅率は約60倍となっている。PMTの光電面には大気チェレンコフ光のスペクトルのピークである300nm～400nmに感度の強いバイアルカリ(UV window)を使用している。この光電面には曲率を持たせており時間分解能を上げる工夫がなされている。またダイノードは8段のラインフォーカス型を採用している。このタイプは時間分解能とリニアリティに優れている。これらによりTransit time spread(T.T.S.)は0.36nsecとシャワーからのチェレンコフ光の時間的な拡がりであるおよそ5nsec比べてと高い時間分解能を達成している。PMTの主な特性を表3.1にまとめる。



図 3.9: CANGAROO 望遠鏡で使用している光電子増倍管



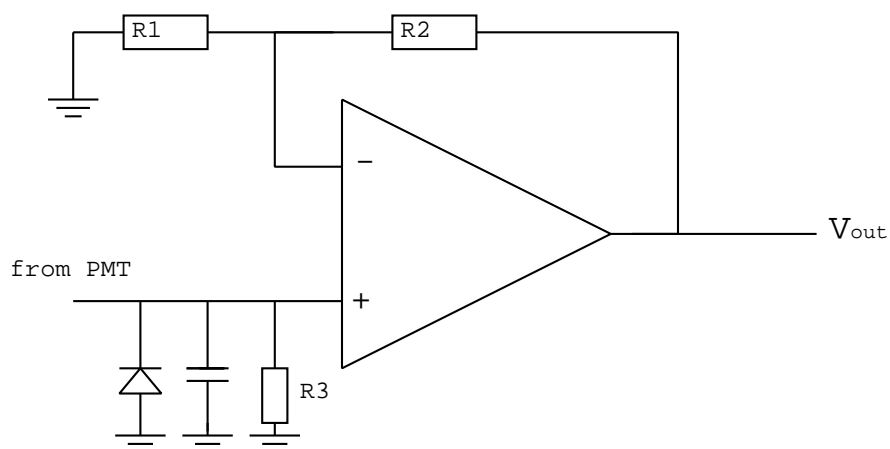


図 3.10: プリアンプ MAX4107。非反転増幅回路の増幅率は  $R2/R1$  で求められる。  $R1 = 30\Omega$ 、  $R2 = 2k\Omega$  よりおよそ 60 倍である。

#### PMT モジュール H8820 の主な規格 [6]

項目	数値などの特性
外形	$\phi 20.4^{+0.4mm}_{-0.7mm}$ (3/4 インチ) $\times$ (174 $\pm$ 3)mm 86g(ケーブル、コネクタ含む)
入射窓材	UV ガラス
光電面材質	バイアルカリ
光電面サイズ	$\phi 15mm$
ダイノード	ラインフォーカス型
段数	8 段
量子効率	25 % (for 400nm の入射光)
Rise time	1.3nsec(R3479)
Transit time	14nsec(R3479)
Transit time spread(T.T.S.)	0.36nsec(FWHM)(R3479)

表 3.1: PMT モジュール H8820 の規格。大気チェレンコフ光のスペクトルは 300~600nm なので、この波長域に感度をもつ PMT が採用されている。

### 3.4 ライトガイド

断面が円形の PMT を六方最密に敷きつめると PMT の間に dead space が生じる。さらに光電面のサイズは外形より小さくなっている。この dead space を減らすため図 3.11 のようなライトガイドを採用している。これはポリカーボネイト製で内面をアルミ蒸着の後 SiO でコーティングしている。ライトガイドの入口の面積は出口の面積に対し 2.57 倍の為、PMT の前面にライトガイドを敷きつめていないときに較べて理想的には 2.57 倍集光出来るはずであるが、実際には内面の反射率が波長にも依存するが 80% 程度であるため、およそ 1.9 倍である。さらこのライトガイドは Winston cone 型を採用しており、 $33^\circ$  以上の入射角度を持つ光をカットできる性質がある。これら確かめるために以下の実験を行なった。LED からの光を PMT に入射させるに際して PMT を回転台の上に乗せて回転させることによって PMT に対して光が入射角度を持つようにする。光の入射角度が  $5^\circ$  刻みで  $-50^\circ$  から  $50^\circ$  までをライトガイドを付けたときと外したときの両方で光を入射させ、出力を ADC で測定した。結果は図 3.13 に示されている。横軸が光の入射角度であり、縦軸が入射光量である。ライトガイドを付けてないときの  $0^\circ$  の値を 100 に規格化している。図から分かるようにライトガイドをつけた方が入射角度が  $0^\circ$  付近では光量が 1.9 倍に増加し、また入射角がおよそ  $\pm 33^\circ$  付近で光量が急激に落ち込んでいるのが分かる。よってこの実験よりこのライトガイドは

- dead space を減らす事により光量をおよそ 1.9 倍に増加させる。
- 入射角度約  $33^\circ$  以上の光をカットできる。

という性質を持つ。この  $33^\circ$  という値は端の鏡から焦点面にやって来る光の最大入射角度が約  $33^\circ$  である事による。

### ライトガイドの特性 [7]

項目	数値などの特性
材質	ポリカーボネート
内壁	アルミ蒸着の後 SiO コーティング
面積比	2.57
形状	Winston cone
反射率 (300nm ~ 400nm)	約 80%
反射率 (400nm ~)	約 89%

表 3.2: ライトガイドの主な特性。

図 3.11: CANGAROO 望遠鏡で 図 3.12: ライトガイドの図面。  
使用しているライトガイド。

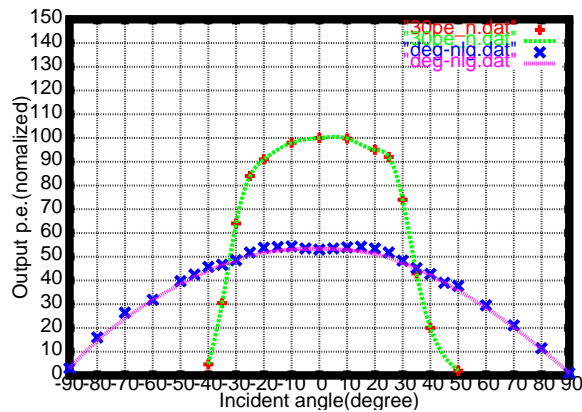
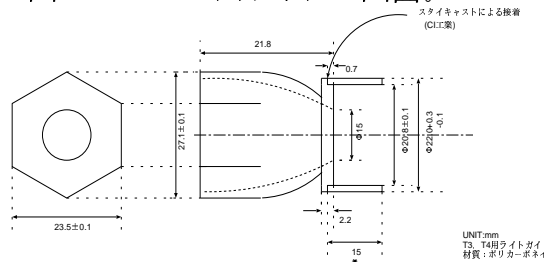


図 3.13: ライトガイドの性能。緑色がライトガイドを付けたときでピンク色はライトガイドを付けないときである。横軸が入射光量、縦軸が出力で  $0^\circ$  の時の値を 100 に規格化してある。光量が凡そ 1.9 倍に増え、光の入射角度が約 33 度以上の光をカットしていることが分かる。

### 3.4.1 Winston cone

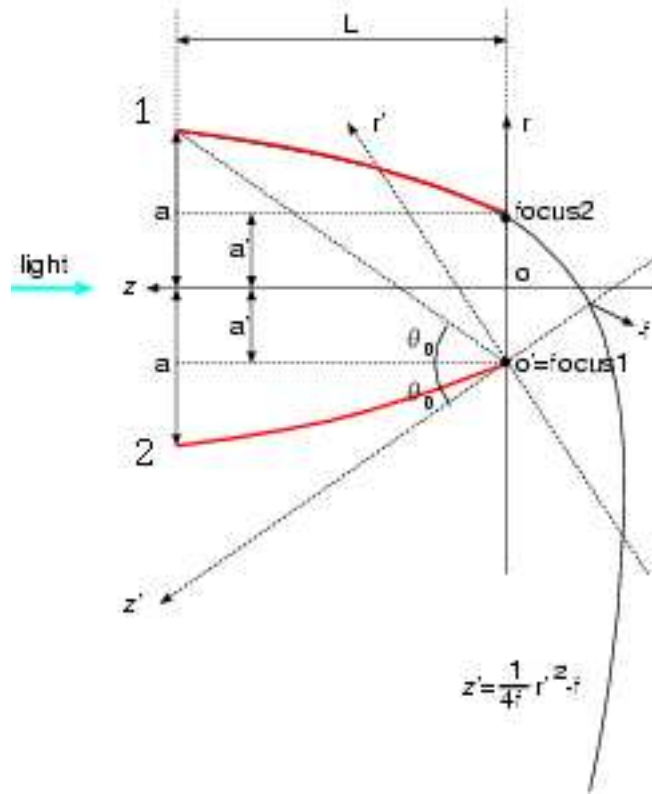


図 3.14: Winston cone について。

CANGAROO-IIIで使用しているライトガイドは中心軸を通るどの断面も Winston cone 型をしている。Winston cone 型の特徴として、ある角度以内の入射角度を持つ光を集光し、それ以上の光は全て反射させる。図 3.14 を用いて Winston cone を説明すると、Winston cone は 2 つの放物線を組み合わせたもので、一方の放物線の焦点が、もう一方の放物線上の出口に位置している。放物線 1 の任意の線上に角度  $\theta_0$  で入射する光 (つまり  $z'$  と平行) は全て放物線の性質から焦点  $o'$  に集まる。また入射角  $\theta < \theta_0$  の光は全て出口を通過する。一方入射角  $\theta > \theta_0$  の時は、放物線 2 の  $(z', r')$  座標にて  $z' > 0$  の領域でさらに反射する。これは Winston cone の形状において、入射角度が  $\theta > \theta_0$  のときには焦点には辿り着かず、他方の放物線にて再び反射するという事を示すものであり、この時の反射光の入射角は  $\theta_0$  より大きいため、2 回以上反射する光、つまり入射角度

が  $\theta_0$  より大きい光は、出口にでて来ず、何回かの反射を経て入口から外へ出て行く。つまり  $\theta_0$  を閾値として、集光、除去の2つに分かれる。なお、この  $\theta_0$  は入口と出口の中心までの距離の差で決定されるものであり、簡単な幾何学から

$$\theta_0 = \text{Arcsin}\left(\frac{a'}{a}\right) \quad (3.1)$$

で表される。CANGAROO-III 望遠鏡で使用しているライトガイドは入射面が六角形で出口が円であり、中心を通る全ての断面で Winston cone 形状が実現している。入口が六角形のため、 $a$  の距離は場所によって異なる (6 回軸)。 $2a$  の最大距離は  $27\text{mm}$  で  $2a'$  は  $15\text{mm}$  より入射光をカットしはじめる最小角度  $\theta_0$  は

$$\theta_0 = \text{Arcsin}\left(\frac{15}{27}\right) = 33.7^\circ \quad (3.2)$$

となる。実際に CANGAROO-III 望遠鏡のカットオフ角度はこれに PMT の入射窓材の屈折率や光電面のサイズとライトガイドの底面から光電面までの距離を考慮する必要がある。

### 3.5 DC regulator board

DC regulator board の役割は以下の 2 つである。

- PMT モジュールに内蔵されたオペアンプ MAX4107 に安定した DC 電圧  $\pm 5V$  を供給する。
- PMT からの信号 16 チャンネル分をフラットケーブルに媒介する。

MAX4107 に安定した電圧を供給するため、この DC regulator board は 3 端子レギュレーター 7805(+5V)、7905(-5V) を使用している。この 3 端子レギュレーターの特徴は、必要とされる電圧より入力電圧が約 2.5V 以上大きいならば出力側の電流がどんなに変化しても、一定の定格電圧を供給出来るところにある。この素子を使用する理由としては

1. Ground loop を防ぐ。
2. 望遠鏡の計測機器が置いてある部屋(エレキハット)から 5V を供給すると、ケーブルの抵抗による電圧降下 ( $247\Omega/Km \times 27m \times 304mA \sim 2V$ ) を生じ、5V を供給できない。ここで  $247\Omega$  はケーブルの抵抗値、 $27m$  はケーブルの長さ、 $304mA$  はプリアンプへの供給電流である。
3. 大きな信号がプリアンプに入力したとき、先ほどのケーブルによる電圧降下が上昇するので、プリアンプに供給する電圧が変化して、PMT のゲインが不安定になる。

などが挙げられる。またこの 3 端子レギュレーターは消費電力が大きいので、ある程度の発熱を伴う。よってこの 3 端子レギュレーターの上にファンを取り付け、温度上昇を防いでいる。この 3 端子レギュレーターの入力段には一個の 1A のヒューズを出力段には各チャンネルに 250mA ヒューズを取り付け、プリアンプが故障したとき、board16 チャンネル全体に影響が及ばないようにしている。また、この DC regulator board は PMT からのシグナル 16 チャンネル分を統括して、16 本の信号線を内蔵した 1 本のフラットケーブルに引き渡す。PMT から信号を受け取る際には、モジュラープラグ、コネクタを使用し、シグナルケーブルに引き渡す際にはフラットコネクタを採用している。これらは、DC regulator board からの脱着が容易であり、PMT のチェックやシグナルケーブルのチェックなどのメンテナンスが容易に行なえる。この DC regulator board に信

号線は16本走っており多層基板になっているため互いの信号間のキャパシタンスを減少させているが、現実的には隣のチャンネルの信号線の近傍を走っている場所があるので、微妙な浮遊容量による相互インダクタンスを持つ。その結果静電誘導によるクロストークが存在する。このクロストークの大きさを確かめる為に以下の実験を行なった。まず16チャンネル全てのPMTに高電圧とプリアンプに $\pm 5V$ を与える。そして、あるチャンネルに信号を入れないときとおよそ $100p.e.$ に相当する光を入射したとき他の光を全く入れていない15チャンネルの出力がどのように変化するかをADCで測定した。あるチャンネル(Xチャンネル)に $Np.e.$ に相当する光を入射して、ADCで $1000count$ 測定したときのADCの平均を $A_{mean}(X, N)$ として、その時のほかのチャンネル(Yチャンネル)の出力のADCの平均値を $B_{mean}(X, Y, N)$ と置くと、Yチャンネルのクロストーク $C_Y$ は以下で表される。

$$C_Y = \frac{B_{mean}(X, Y, N) - B_{mean}(X, Y, 0)}{A_{mean}(X, N) - A_{mean}(X, 0)} \quad (3.3)$$

式3.3を使ってクロストークを求めた結果が図3.16である。結果はクロストークはいずれのチャンネルも1%以内に収まっており、クロストークの影響は無視できると言える。

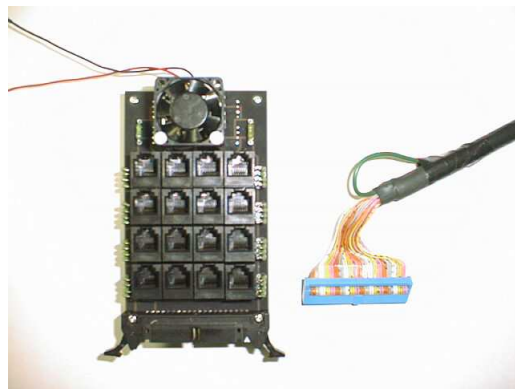


図 3.15: 3号機から採用している DC regulator board

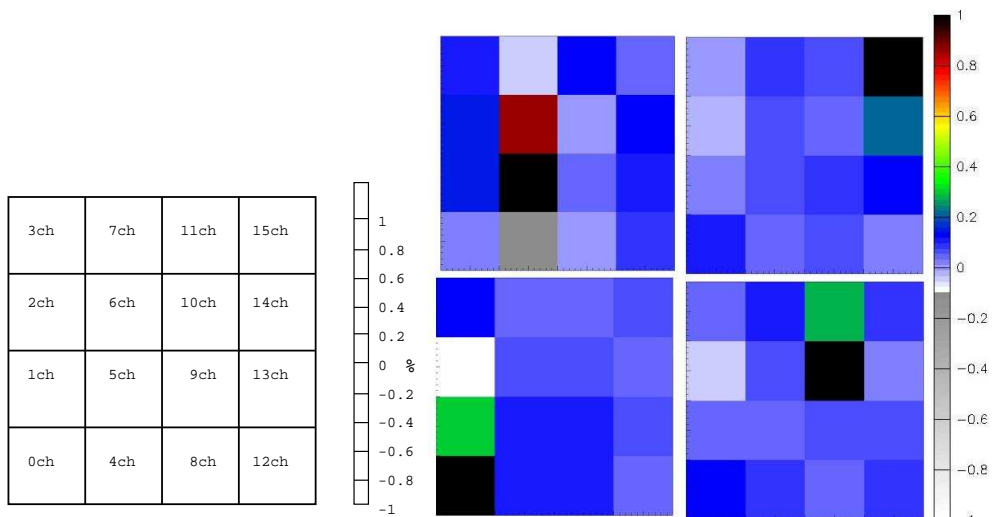


図 3.16: DC regulator board の cross talk チェック。左下から時計回りに 0ch、5ch、15ch、10ch に  $100p.e.$  に相当する光を入射した時 (黒いマスの PMT に光を入射している)、他のチャンネルがどのくらい影響を受けるかを色で表している。全てチャンネルにおいて cross talk が 1% 以内であり、cross talk は無視できる程小さいということが分かる。



### 3.6 High Voltage Supply Unit

CANGAROO-III望遠鏡の2台目以降のカメラからは427本全てのPMTのゲインを揃えるため、427チャンネル独立に高電圧を与えることが出来る高電圧供給ユニットを必要とする。図3.17はそのHigh Voltage Supply Unitである。(CAEN Model SY527)このHigh Voltage Supply Unitには以下の特徴がある。

- 1台(1クレート)につき10スロットを有し、1スロットあたり24チャンネル分の高電圧を独立に与える事が出来る。つまり1クレートで240チャンネル分の高電圧を与えることが出来る。
- 1つのスロットにつき1つのプライマリーチャンネルを持つ。このプライマリーチャンネルがONにされない限り、個々のチャンネルはONに出来ない。
- VME規格のinterface(CAENET)を使って、パソコンからVME経由で操作出来る。またRS232C端子を持っているのでパソコンからkermitで操作できる。
- クレート前面にremote端子が付いており、クレートの立ち上げそのものを外部制御できる。

また、PMTに高電圧が供給された状態で3等星より明るい星からの光が入射するとトリガーレートが極度に上がるので星の軌道に合わせてHVをカットするようにしている。

図 3.17: High Voltage Supply Unit 前面。PMT427チャンネル  
図 3.18: High Voltage Supply Unit 後面。1クレートにつき  
個々に独立に高電圧を印加できる 240ch 扱える。



### 3.7 3号機カメラからの改善点

4号機のカメラを製作するに当たって、以下のような改善を行なった。

- シグナルケーブル、HVケーブルをカメラ容器の外部に引き出す部分(パネル)に使用しているケーブルエントリーのフィードスルーコネクタが3号機では経年変化や防水性に問題があったので経年劣化に強いコネクタを使用することにした。
- DC regulator boardで使用しているフューズ交換などのメンテナンスのためにDC regulator boardを外せるようにした。
- PMTが前面に落下するのを防止するのに使用しているバネがDC regulator boardなどの素子面に落ちてショートしないようにした。

まずケーブルエントリーの変更についてであるが、図3.19が3号機で使用していたものである。これはポリアミド製(ナイロン)のフィードスルーコネクタである。ナイロンの特徴としては日光などの紫外線に弱く、劣化してしまうという事が挙げられる。これはナイロンのC-C結合の解離感度がおよそ $300nm$ で強く、紫外線の波長域が $200nm \sim 380nm$ であることによる。よって今回はナイロン製のフィードスルーコネクタを辞めて亜鉛ダイガスト製のボックスコネクタをケーブルエントリーとして使用することにした。(図3.20参照)

次にDC regulator boardの取り外しについて述べる。DC regulator boardに内部回路保護用にヒューズを取り付けている。このヒューズが切れたら、導通チェックの後ヒューズを交換することになるのだが、この一連の作業をカメラ容器の内部で行なうのは非常に繁雑である。3号機まではこのboardはリングにネジによって止めているので簡単には外せなかった。4号機ではこのboardを外してからこれらの作業が行えるように工夫をした。概略を図3.21に示す。具体的には、埋め込み型のひねるタイプのコンセントと首振り型のプラグを使用して固定する。プラグは直接DC regulator boardにつけるとそこを中心として余計なモーメントを生じ、負荷となるので、プラグは緩衝板に付けた。これによって比較的容易にDC regulator boardを取り外せ、メンテナンスが容易になると期待される。

最後にPMTの固定方法についてである。PMTはPMT固定容器の材質であるポリフェノールフォーム(ネオマフォーム)の摩擦力により落ちるという心配は少ないが、より固定を強固にするため、バネによる復元

力によってPMTを後から支持することにした。具体的には径方向に弾力のあるストッパー(材質:デルリン)をPMTの後部に装着しておき、固定容器とストッパーの間にステンレス製のバネを入れておく。バネには定常的に復元力が働く様な長さを選定している。PMTが前にずれようとする、バネの復元力によりPMTは最初の場所に戻される。結果PMTは前に落ちないというわけである。ここで1つ心配なのが、PMTの交換などの作業によりバネがカメラ容器の中におちて、DC regulator boardの素子面でショートする可能性があるという事である。これを防ぐために、ヒモを固定容器にくくりつけておき、バネの中にそのヒモを通す。ヒモの他端にはねじりっこをとりつけバネの半径より大きい輪っかを作っておきPMTのケーブルに結びつけておく。こうしておく事で、バネはPMTの交換の際に飛びだしてきても、ねじりっこの所で止まるというわけである。概略を図3.22に示しておく。

図 3.19: 3号機のカメラで使用しているパネルとケーブルエントリー  
 図 3.20: 4号機のカメラで使用しているパネルとケーブルエントリー



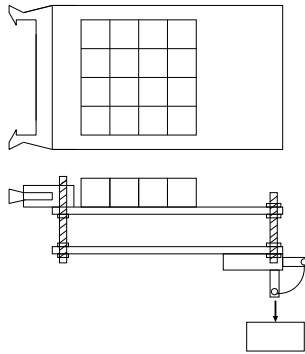


図 3.21: 4号機カメラにおける DC regulator board の取付方法。DC regulator board の下に板を取り付け、それに首振型のプラグをボルトで固定し、リングに固定されたひねるタイプのコンセントに付ける。取りだすときはこのプラグをコンセントから外す。

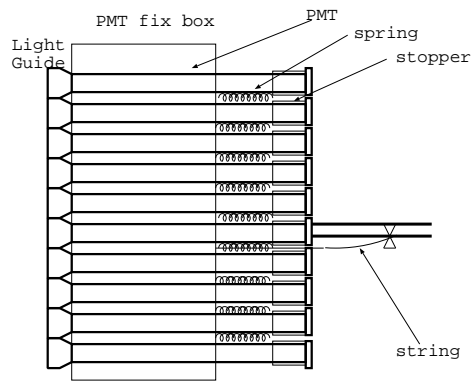


図 3.22: 4号機カメラにおける PMT の固定方法。PMT の後部にストッパーをはさみ、PMT 固定容器とストッパーの間にバネを入れ、そのバネの復元力によって PMT が前にずれるのを防いでいる。

## 第4章 PMT calibration

4号機のカメラに使用するPMT450本のキャリブレーションを2003年の7月から9月にかけて宇宙線研究所で行い、個々のPMTの性能をデータベース化した。この章では、キャリブレーションの結果を述べる。

### 4.1 測定系

まずは実験のセットアップについて述べる。PMTと光源となるLEDをジュラルミンケースの中に入れる。光源は日亜化学工業の青色発光ダイオード (NSPB510S) を用いた。このLEDは指向性が $30^\circ$ 、光度が $0.65cd$ の高光度、高色純度の量子井戸構造型LEDである。このNSPBの種類LEDの特徴は、光度-周囲温度特性が良い事、時間特性が良い事、発光スペクトルに関して $450nm \sim 500nm$ に強度を持つ事が挙げられる。この波長域はPMTの感度に一致しているので、PMTの性能を調べるのに都合が良い。このLEDにパルスジェネレーターから電圧を与える。LEDに与える電圧はおよそ $-3.5V$ 、 $20nsec$ である。一般にLEDはおよそ $-2.5V$ 程度から光り始めるが、この領域では、パルスジェネレーターの温度変化による微小な電圧の変化の影響をLEDが比較的大きく受けてしまうので、パルスジェネレーターの微小な電圧変化の影響を受けにくい $-3.5V$ 程度で実験を行った [8]。光量の調整は、LEDの直後に置かれたNDフィルターによって行う。これによってLEDに与える電圧を変える事なく、 $1p.e.$ から $1000p.e.$ まで確実に精度良く光量を調整することが出来る。ジュラルミンケースの中でPMTに光を入射して、信号をDC regulator boardを経由してフラットケーブルに送り、CAMACのADCとTDCで信号の大きさや時間情報を測定した。セットアップを図4.1に示しておく。各PMTで測定した項目は以下の4点である。

1. PMTに $2 \times 10^5$ (PMTモジュール全体で $1.2 \times 10^7$ )のゲインを与えるような電圧値。

2. 入射光量 30p.e. での時間分解能
3. ゲインの HV 依存性
4. 出力信号の入射光量に対するリニアリティ

また 1 本の PMT のキャリブレーションの最中に同じ入射光量に対して出力が変動していないか確かめるため、最初、途中、最後の合計 3 回 10p.e. の光を入力し、出力をモニターした。また室温やパルスジェネレーターの温度をチェックして測定環境を調べた。その結果が図 4.2 である。パルスジェネレーターの温度変化を  $5^{\circ}\text{C}$  以内に抑えると PMT からの出力の変動が 6% で収まるということが分かっている [8]、それを目安にして全本のキャリブレーションの最中で温度変化がおおよそ  $5^{\circ}\text{C}$  以内であることを確認している。また PMT の出力の変動を調べた結果を図 4.3 に示す。横軸は測定開始時点の 10p.e. の出力と測定終了直前の 10p.e. の出力の変動を % で表したもので縦軸が PMT の本数を示している。出力の変動の平均は  $0.2 \pm 1.8\%$  となった。つまり PMT キャリブレーションは同じ入射光量に対して約 2% の精度を持っている事が分かる。

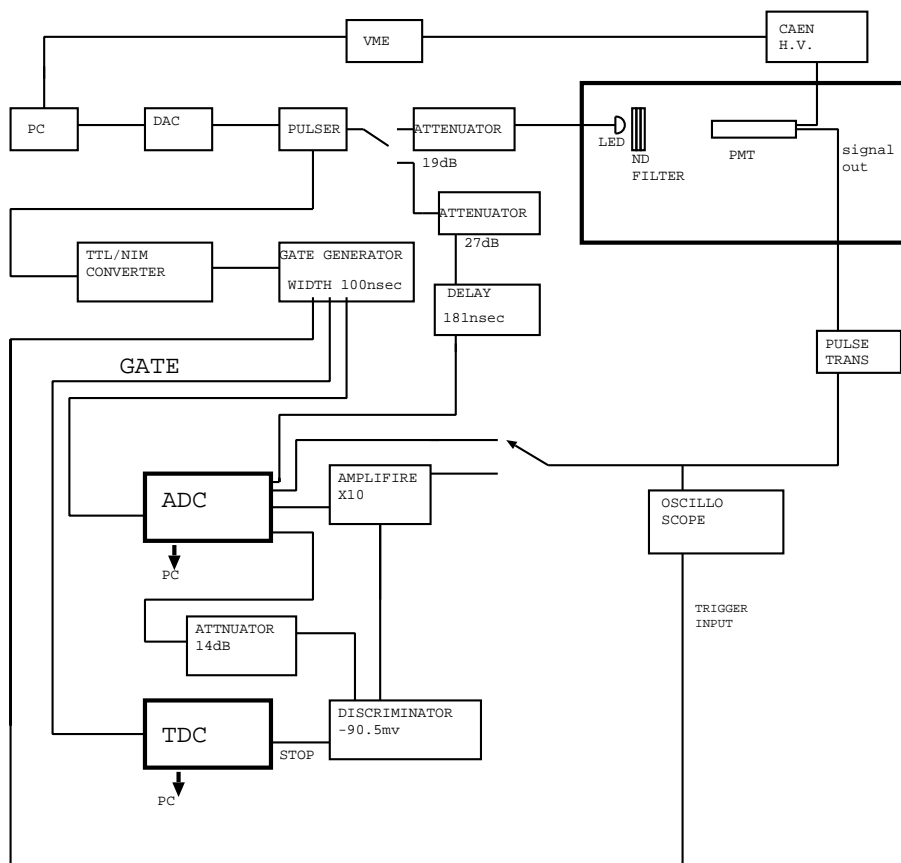


図 4.1: PMT calibration test のセットアップ。

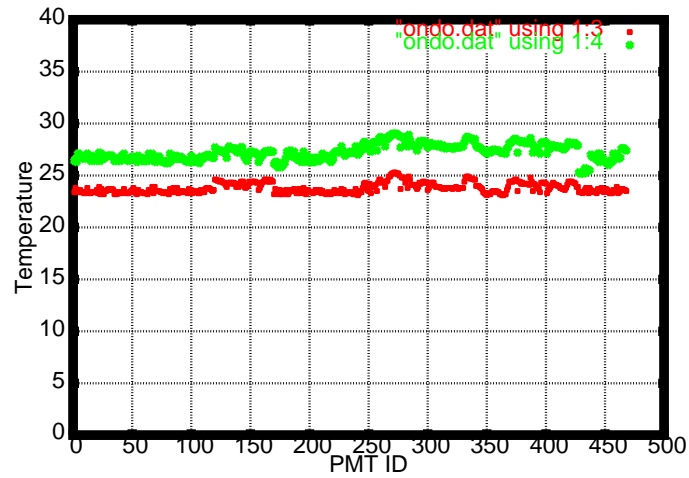


図 4.2: PMT calibration test の際の pulse generator と部屋の温度変化。それぞれ、緑は Pulse generator の外壁、赤色は部屋の温度を表す。

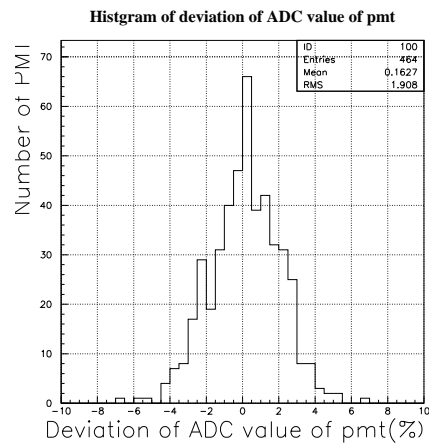


図 4.3: PMT キャリブレーションテストの最中の出力の変動のヒストグラム。横軸は測定開始時点の  $10p.e.$  の出力と測定終了直前の  $10p.e.$  の出力の変動を % で表したものの。



## 4.2 結果

### 4.2.1 HV 値の較正

2号機以降のカメラではPMTモジュールのゲインを $1.2 \times 10^7$ に揃えている。各PMTに対してそのようなHV値を決定する。方法は、LEDから1*p.e.*に相当する光を入射する。1*p.e.*でゲインを測定しているのは出力をADCで10000*count*測定した時、ペDESTALと1*p.e.*のピークがはっきり頭れるからである。ゲインはペDESTALと1*p.e.*のピークの差であり、ADCのチャンネル数(*CH*)に換算すると、使用したCAMACのADCは0.244*pc/ch*であるので、

$$CH = \frac{1.2 \times 10^7 \times 1.6 \times 10^{-19}}{0.244 \times 10^{-12}} = 8ch \quad (4.1)$$

となり、ピークの差を8*ch*になるまでHV値を調整した。実際には $\pm 2.5\%$ の精度で決定している。ペDESTALと1*p.e.*のピークの差の決定の仕方であるが、光が光電面に入射したときに出て来る光電子がPoisson分布に従っている事、またその後電子が多段ダイノードで増幅される際に増幅のされ方がGauss分布に従っている事を利用して、Poisson-Gaussianの畳み込み関数でフィッティングしてゲインに相当するパラメータから求めた。図4.4は典型的な1*p.e.*、8*ch*のヒストグラムである。結果は図4.5に示されており、全本の平均が $1099 \pm 73V(1\sigma)$ となった。

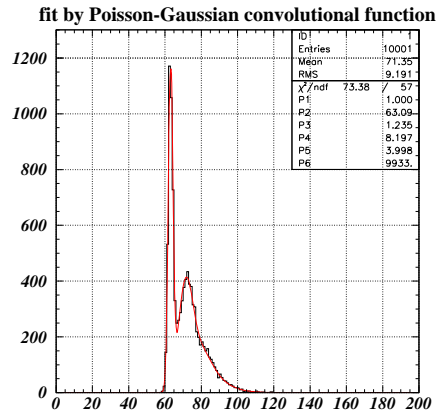


図 4.4: 入射光量  $1p.e.$ 、ゲイン  $1.2 \times 10^7$  の時の出力信号を ADC で  $10000count$  測定した時のヒストグラム。 $1p.e.$  に相当する光を入射した時ペDESTALと  $1p.e.$  のピークが見える。このヒストグラムに Poisson-Gaussian 関数でフィッティングしたのが赤い曲線である。

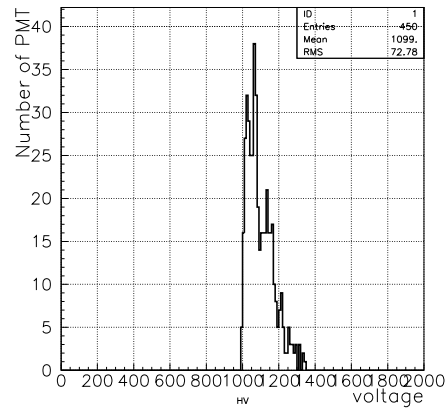


図 4.5: PMT モジュールに  $1.2 \times 10^7$  のゲインを与える電圧値のヒストグラム

## 4.2.2 時間分解能

1回のガンマ線に由来するチェレンコフ光の光子群はおよそ $\pm 5nsec$ の中にパルス状に到来する。この時間情報を正確に検出するために、PMTには $1nsec$ 程度の時間分解能が必要とされる。実験では約 $30p.e.$ に相当する光を入射してアンプ、discriminatorを通した後、TDCにて時間情報を測定した。この際thresholdは約 $3p.e.$ に設定している。TDCでは、パルスジェネレーターからのゲート信号をスタート信号として、discriminatorを経た後の信号をストップ信号に入れている。時間分解能は、TDCで $10000count$ 測定した時のヒストグラムのrmsに $0.0244nsec/ch$ を乗じた値で求める。PMT全本の結果を図4.6に表す。時間分解能は入射光量の大きさにも依存するため、同時に測定した際の入射光量もプロットして2次元分布として表している。横軸が入射光量、縦軸が測定した時間分解能である。全本1つの滑らかな曲線の近傍に存在している事が分かる。参考のため3号機に使用しているPMTの時間分解能の同様の2次元分布を載せておく。

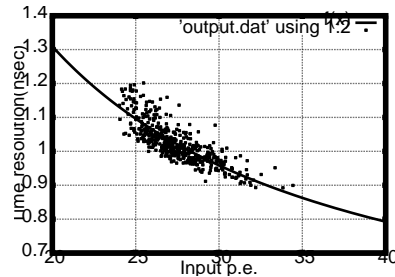


図 4.6: 4号機のカメラで使用しているPMTの427本の時間分解能

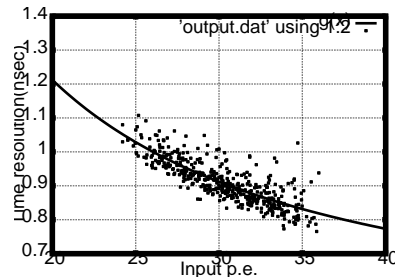


図 4.7: 3号機のカメラで使用しているPMTの427本の時間分解能

次に時間分解能のヒストグラムを図4.8に示す。この際、先ほど述べた通り時間分解能は入射光量に依存するため、先ほどの曲線を利用して30p.e.に較正し直し、入射光量による時間分解能のばらつきを除いてある。結果は $0.97 \pm 0.036(1\sigma)nsec$ である。先ほどと同様に3号機のPMTの結果を図4.9に示す。3号機のPMTの時間分解能の平均は $0.91 \pm 0.038(1\sigma)nsec$ であった。時間分解能が3号機のPMTに比べて多少悪くなったが、これはPMTに与えるHV値が3号機より4号機の方が低い値で済んでいるため、PMTの光電面直後の第1ダイノードまでの電子に与える収束力が相対的に弱くなっている事に起因する。一般にPMTの時間特性は供給されるHV値の平方根に反比例する。しかしいずれも1nsec程度の時間分解能を有しているので問題ないと言える。

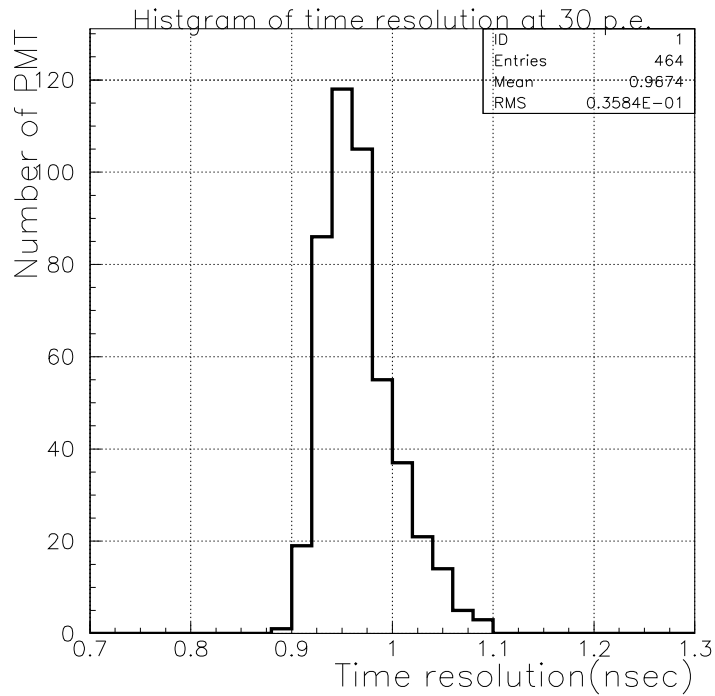


図 4.8: 4号機のカメラで使用しているPMTの427本の時間分解能のヒストグラム

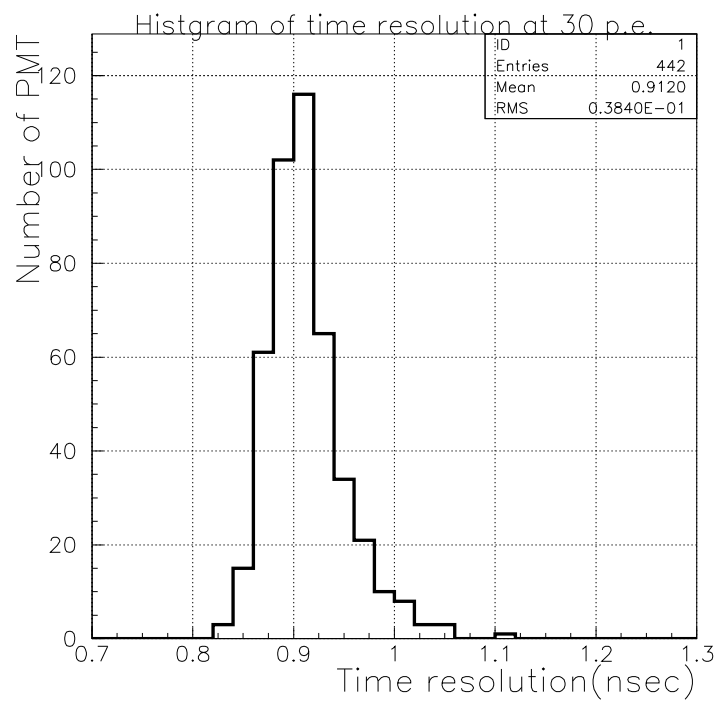


図 4.9: 3号機のカメラで使用している PMT の 427 本の時間分解能のヒストグラム

### 4.2.3 ゲインのHV依存性

次にゲインの電圧依存性の結果について述べる。PMTのゲインは

$$Gain \propto (HV)^\alpha \quad (4.2)$$

として与えられる電圧値のべき乗に比例する。これはダイノードでの2次電子放出比がかかる電圧値のべき乗に比例していることによる。結果を図4.10と4.11で示す。図4.10の横軸がPMTに与える電圧、縦軸がゲインである。縦軸はlogスケールで表している。全PMTが同じ特性を示しているのが分かる。図4.11はそのべきのヒストグラムである。平均が $4.9 \pm 0.1(1\sigma)$ であり、揃っているのが分かる。

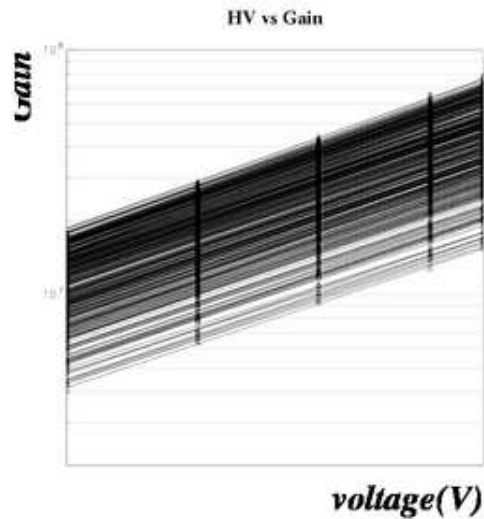


図 4.10: PMT のゲインの HV 依存性

$$\text{Gain} = K \cdot (\text{HV})^{**} \text{Alpha}$$

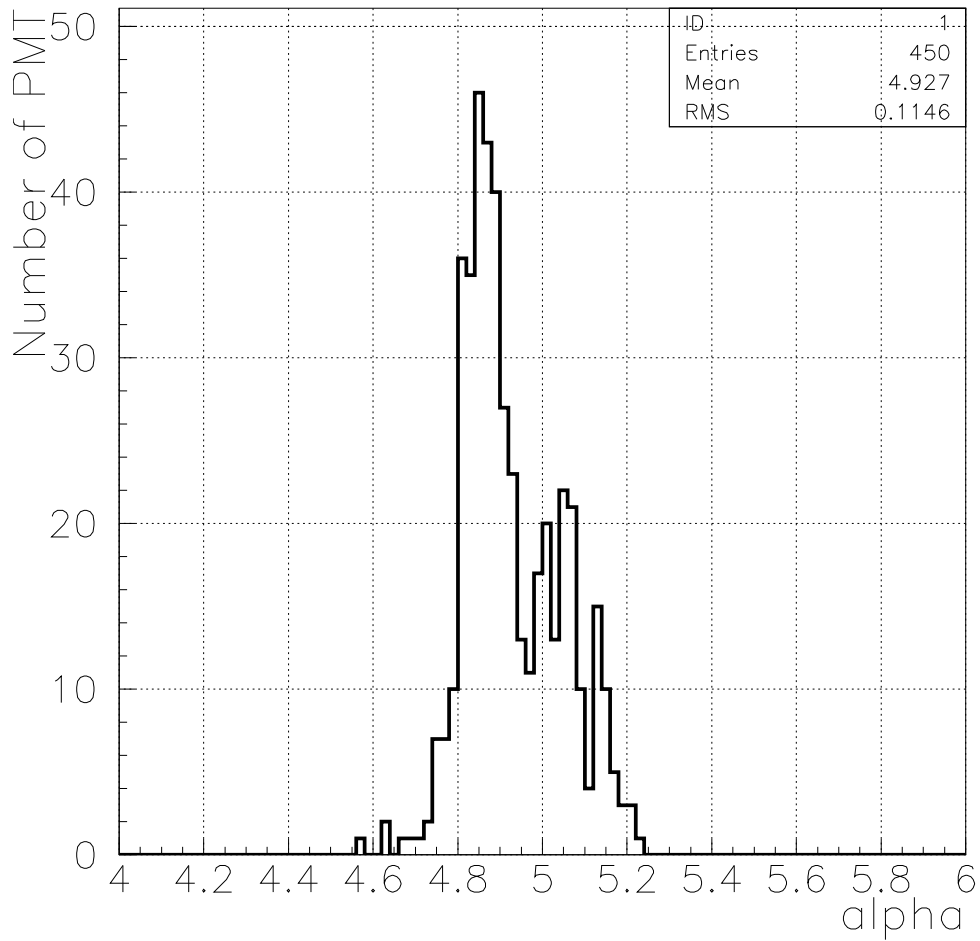


図 4.11: PMT のゲインの HV 依存性-べき  $\alpha$  のヒストグラム

#### 4.2.4 リニアリティ

最後にゲインのリニアリティについて述べる。CANGAROO-III 望遠鏡のカメラは Crab を  $1\text{TeV}$  から  $100\text{TeV}$  のエネルギー領域まで観測するので、 $100\text{TeV}$  のガンマ線から生成されるチェレンコフ光の光子数 ( $\sim 300p.e.$ ) までのゲインの一様性が保障されている必要がある。 $100\text{TeV}$  あたりは超新星残骸による粒子の加速限界と考えられているので物理として非常に面白い領域である。そこでゲインのリニアリティについて実験した。方法は LED から  $1p.e.$  から  $1000p.e.$  に相当する様々な光を PMT に入射し出力を ADC で測定した。入射光量は、LED 直後に置いてある ND フィルター (1%、10%、20%、30%、50%、70%) を適宜交換して変化させた。結果を 4.12 に示す。このデータからリニアリティを求める。方法は各入射光量で測定した出力光電子数を以下の式 4.3 でフィッティングする。

$$f(x) = \begin{cases} x & (x \leq a) \\ \frac{((x-a+c)^b - c^b)}{b} c^{(1-b)} + a & (x > a) \end{cases} \quad (4.3)$$

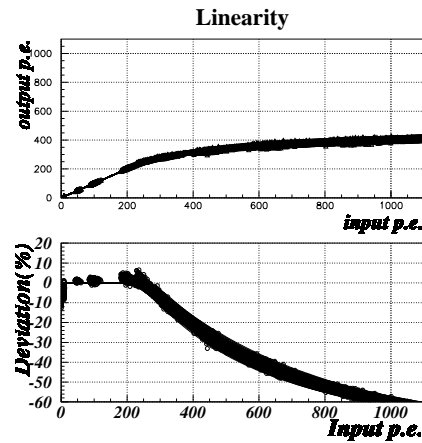


図 4.12: ゲインのリニアリティ。横軸が入射光量、縦軸が出力光電子数である。下は線型性からのずれの大きさを表す。

この式でパラメータ  $a$  が線型性から外れる飽和点である。この飽和点のヒストグラムを図 4.13 に示す。平均は  $220 \pm 10(1\sigma)p.e.$  となった。また  $250p.e.$  での線型性からのずれは平均  $-1.7\%$  となり Crab を  $100\text{TeV}$  のエネルギー領域で充分有意に観測出来るカメラであると言える。



## Saturation point

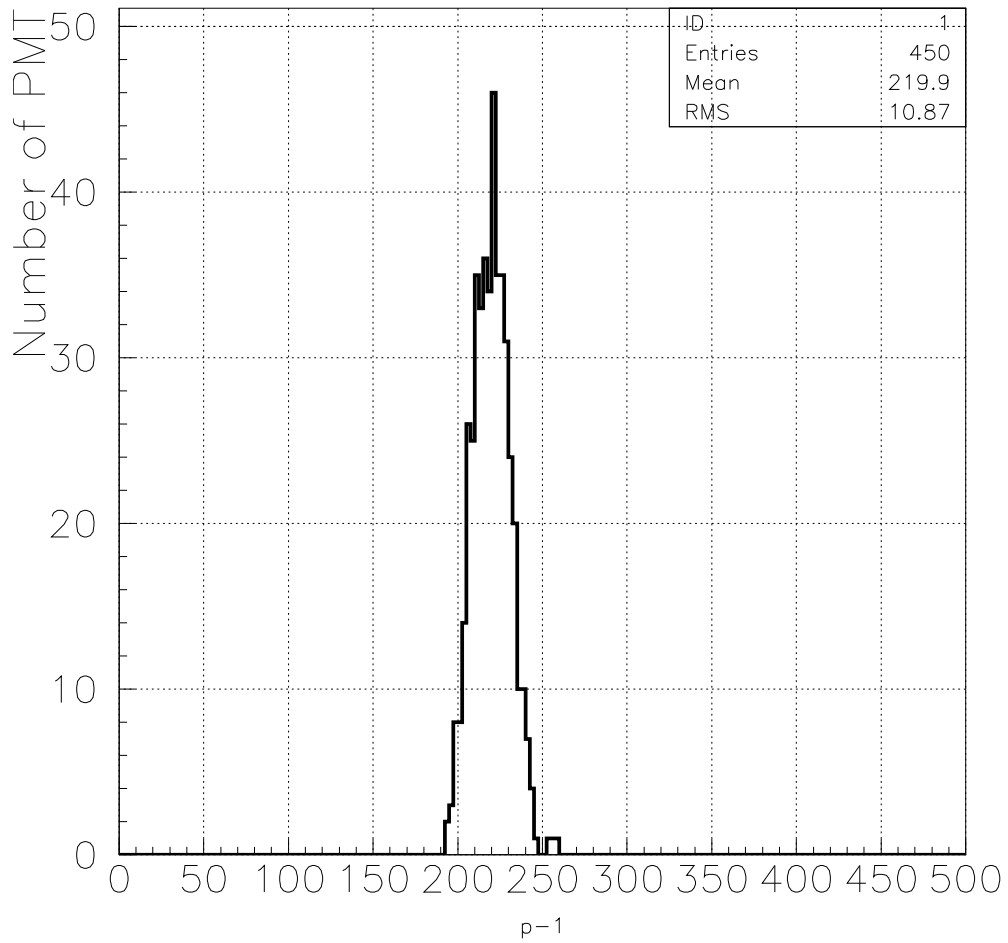


図 4.13: リニアリティの飽和点のヒストグラム

### 4.3 PMT calibrationの再現性

キャリブレーション作業はPMT 1本につき1回行う時間しかなく、その値を信頼することになっている。従ってその値の再現性というものが考慮されなければならない。そこで2002年に3号機のカメラに使用しているPMTの中からランダムに2本抽出してそれぞれに約10回ずつ同じキャリブレーションを行った。結果は以下の通りである。

	HV(V)	時間分解能 ( $ns$ )	Linearity( $p.e.$ )	$\alpha$
PMT A	1107±13(1%)	0.91±0.02(2%)	228±16(7%)	4.9±0.1(1%)
PMT B	1335±14 (1%)	0.90±0.02(2%)	223±10(4%)	4.8±0.1(1%)

表 4.1: PMT キャリブレーションの再現性

HV 値を例にとって考えてみると、HV とゲインの関係は  $Gain \propto (HV)^\alpha$  より

$$\frac{\Delta HV}{HV} \sim \frac{1}{\alpha} \frac{\Delta Gain}{Gain} \quad (4.4)$$

となり、ゲインとHVの誤差は、統計誤差に関して相関をもつ。ゲインの統計誤差は±2.5%により、これを上式の4.4に代入すると、 $\sim \pm 0.5\%$ となる。表4.1よりHV値の決定誤差は、およそ1%となっている。これは、今の統計誤差の他にHV値の決定精度が±5Vである事、パルスジェネレーターの温度依存性によるゲインの誤差などの系統誤差が含まれている。総合すると、リニアリティ以外に関してはおよそ±1%の精度で決定でき、リニアリティに関しては4%から7%の精度で決定できる事が分かる。

### 4.4 2号機、3号機、4号機のカメラに使用しているPMTの比較

3台のカメラに使用しているPMTの性能を比較する。1台目のカメラのPMTは他の3台の異なるため比較からは外す。表4.2に示されているのが、キャリブレーションの結果による性能の比較である。2号機から3号機にかけてHV値やリニアリティや $\alpha$ など性能の向上が見られる。

時間分解能は入射光量や HV 値に依存し特に HV 値とトレードオフの関係にあるので、単純には比較できない。またばらつき具合を評価してみると 3、4号機は ( $\sigma$ /平均) が小さくなっており各 PMT 間の性能のばらつき具合は少く、性能に関して揃っていると言える。

	HV(V)	時間分解能 (ns)	Linearity(p.e.)	$\alpha$
T2[450 本]	1230 $\pm$ 125(10%)	0.96 $\pm$ 0.09(9%)	202 $\pm$ 16(8%)	4.9 $\pm$ 0.1(2%)
T3[446 本]	1144 $\pm$ 72 (7%)	0.91 $\pm$ 0.04(4%)	227 $\pm$ 13(6%)	5.0 $\pm$ 0.1(2%)
T4[468 本]	1099 $\pm$ 73 (7%)	0.97 $\pm$ 0.04(4%)	220 $\pm$ 11 (5%)	4.9 $\pm$ 0.1(2%)

表 4.2: 2号機 (T2)、3号機 (T3)、4号機 (T4) で使用している PMT の性能の比較。[ ] の中は予備も含めた PMT の本数である。平均  $\pm 1\sigma$  で表している。括弧の中は ( $\sigma$ /平均)  $\times 100$  でばらつき具合を表す。時間分解能は 2号機 (T2) は 20p.e.、3号機、4号機は 30p.e. の入射光量で測定した。

# 第5章 3号機のカメラの性能 評価

この章ではカメラ全体での性能評価を行う。

## 5.1 ゲインのユニフォミティ

### 5.1.1 宇宙線研究所でのテスト

PMT のキャリブレーションの際、ゲインを  $\pm 2.5\%$  の範囲で  $1.2 \times 10^7$  に決定したが、実際にカメラを組み上げてみてピクセルごとのゲインがどのくらい揃っているかを2つの方法で測定した。

1. カメラに  $1p.e.$  に相当する光を入射して、ADC で  $10000count$  測定し、各 PMT において出来たヒストグラムを Poisson-Gaussian の畳み込み関数でフィッティングして、ゲインに相当するパラメータから求める。
2. カメラにおよそ  $50p.e.$  に相当する光を入射して、ADC で  $1000count$  測定してでき上がったヒストグラムを Poisson 分布と仮定して、ゲインを求める。

最初の方法は PMT のキャリブレーションの方法と同じなので2について説明する。一般に Poisson 分布は以下の確率密度関数 ( $p(x)$  と置く) で書ける。

$$p(x) = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\mu^j}{j!} e^{-\mu} \delta(x - j) \quad (5.1)$$

$\mu$  は (後でわかるが) 1 次のモーメントである。ここでモーメント母関数を以下の様に定義する。

$$M(\xi) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} dx e^{\xi x} p(x) \quad (5.2)$$

この時  $n$  次のモーメント ( $m_n$ ) は

$$m_n = \int_{-\infty}^{\infty} dx x^n p(x) = \left. \frac{d^n M}{d\xi^n} \right|_{\xi=0} \quad (5.3)$$

である。分散はこれらの式を使って

$$\sigma^2 = \left. \frac{d^2 M}{d\xi^2} \right|_{\xi=0} - \left( \left. \frac{dM}{d\xi} \right|_{\xi=0} \right)^2 \quad (5.4)$$

$$= m_2 - (m_1)^2 \quad (5.5)$$

で表される。  $\int_{-\infty}^{\infty} dt f(t) \delta(t-\tau) = f(\tau)$  を利用して計算すると  $m_2 = \mu^2 + \mu$ 、 $m_1 = \mu$  となり分散は

$$\sigma^2 = \mu^2 + \mu - (\mu)^2 = \mu \quad (5.6)$$

でこれより分散と平均は等しい事が分かる。入射光量  $50p.e.$  から得られる ADC ヒストグラムが Poisson 分布と近似して光電面直後の光電子数の平均を  $\mu_{p.e.}$ 、分散を  $\sigma_{p.e.}^2$ 、ADC の平均を  $\mu_{ADC}$ 、分散を  $\sigma_{ADC}^2$  と置くと先ほどの考察より

$$\frac{\mu_{p.e.}}{\sigma_{p.e.}} = \frac{\mu_{ADC}}{\sigma_{ADC}} \quad (5.7)$$

$$\frac{\mu_{p.e.}}{\sigma_{p.e.}} = \sqrt{\mu_{p.e.}} \quad (5.8)$$

より、以下の式が成立する。

$$\mu_{p.e.} = \left( \frac{\mu_{ADC}}{\sigma_{ADC}} \right)^2 \quad (5.9)$$

ゲインは  $Gain \propto \frac{\mu_{ADC}}{\mu_{p.e.}}$  と式 5.9 より求められ

$$Gain \propto \frac{\sigma_{ADC}^2}{\mu_{ADC}} \quad (5.10)$$

よってゲインのユニフォミティを調べるに当たって式 5.10 を使用した。なおペDESTAL の値はすでに差し引かれているものとして考えている。両者による結果をそれぞれ図 5.1 と図 5.2 に示す。それぞれ横軸がゲイン、

縦軸が PMT の数である。1 での測定では平均が  $1.35 \times 10^7$  でユニフォミティは

$$\frac{0.881 \times 10^6 \times 100}{0.135 \times 10^8} = 6.5\%$$

となり、2 での測定では平均が  $1.83 \times 10^7$  でユニフォミティは

$$\frac{0.994 \times 10^6 \times 100}{0.183 \times 10^8} = 5.4\%$$

となった。2 の方法では平均が  $1.2 \times 10^7$  よりだいぶ大きくなっているが、これは式 5.10 より、ゲインが分散  $\sigma_{ADC}^2$  に比例しており、分散の誤差の影響を大きく受けてしまう。ノイズなどで分散が大きくなればその分ゲインが大きくなる。従って 2 の方法ではゲインは総じて高くなる傾向にあると言える。また PMT キャリブレーションと同じ方法で測定した 1 でも平均で約 10% ほど高くなっているのが分かる。いずれにせよどちらの方法でもゲインのユニフォミティは 6% 程度であり、ゲインは許容範囲内で揃っている事が分かった。CANGAROO-III 望遠鏡のカメラはユニフォミティの許容範囲を 10% 以下に掲げている。もちろん 0% が最も好ましいのだが、これは前回 CANGAROO-II 時代に製作した望遠鏡のエネルギー fluctuation がおよそ 15% であったので、CANGAROO-II 望遠鏡より改善させるという意味でユニフォミティの許容範囲を 10% に設定している。

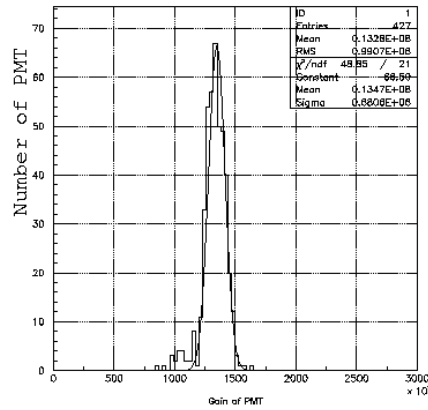


図 5.1: 3号機に使用している PMT のゲインのヒストグラム-I。平均光量が  $1p.e.$  の光を入射して  $10000count$  測定した時に得られるヒストグラムに Poisson-Gaussian 関数を fitting した時の Gain に相当するパラメータから求めた。

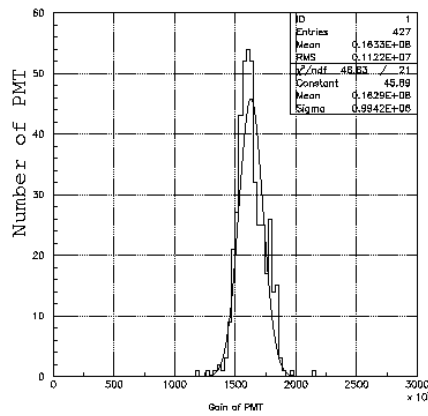


図 5.2: 3号機に使用している PMT のゲインのヒストグラム-II。平均光量が  $50p.e.$  の光を入射して  $1000count$  測定した時に得られるヒストグラムを Poisson 分布と仮定して Gain を求めた

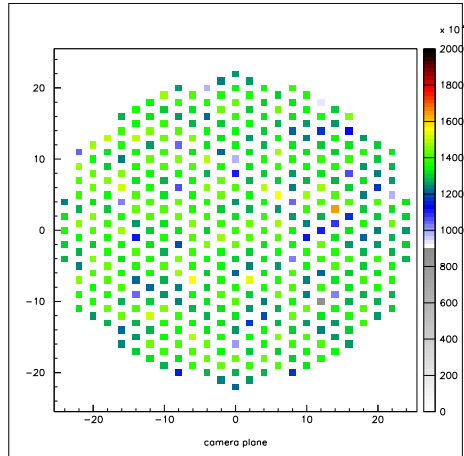


図 5.3: PMT のゲインのユニフォミティの二次元分布。入射光量  $1p.e.$ 。

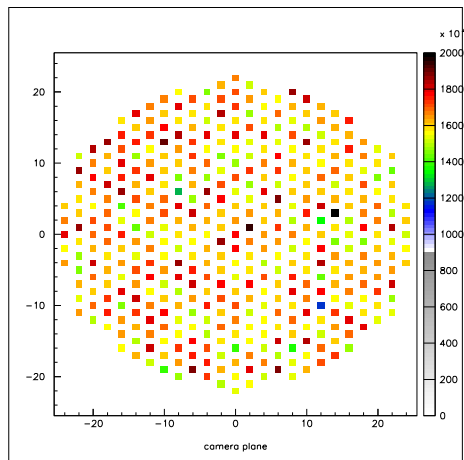


図 5.4: PMT のゲインのユニフォミティの二次元分布。入射光量  $50p.e.$ 。



### 5.1.2 現地のカリブレーションシステムでのテスト

ここでは現地 Woomera にカメラをインストールした後に行ったユニフォミティに関するテストについて述べる。現地では観測前にカメラのカリブレーションを行っているのだが、その方法としてカメラ内に設置された LED とカメラ蓋に設置された LED 光反射スクリーンを使用してカメラに一樣な光を当てて較正している。スクリーンはカメラに一樣な光が当たるように白から黒までの濃淡が施されている。図 5.5 はその反射スクリーンである [9]。この LED と反射パネルを使ってカメラに 10p.e. 程度の光を入射させて実際に観測の際データ収集に使っているエレクトロニクスを使用して測定した。結果を図 5.6 と図 5.7 に示す。測定当時、3 号機のカメラの PMT は故障が多かった為、ADC CONSTANT (ADC 値と photo-electron 数の変換係数) が極端な値が 20 本程度見られるのだが、それらを除けば、ADC CONSTANT は 100 で揃っていることが分かる。特定の要因は考えにくいだが、2 号機から 3 号機にかけての少しずつの改善がこの結果に結びついている。なお、この故障は日本からオーストラリアに輸送する最中にカメラや望遠鏡の駆動装置が破損するという被害を受けたために多くの PMT が真空洩れを起こしたことによる。

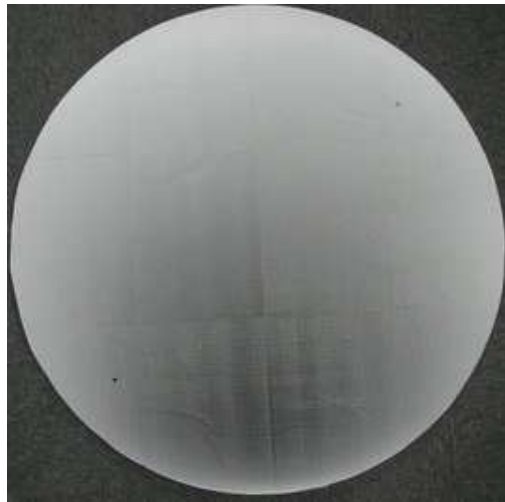


図 5.5: LED 光反射スクリーン。カメラに一樣光が当たるようにグラデーションがかかっている。

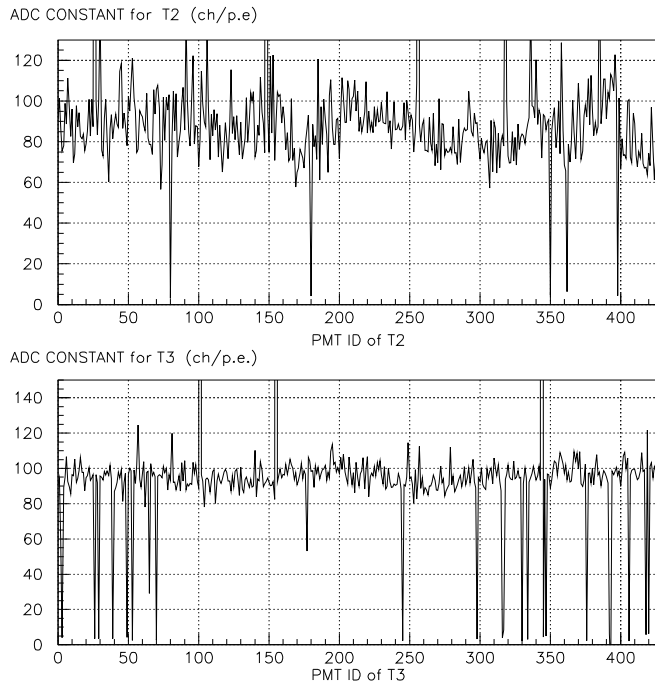


図 5.6: 現地の calibration システムで測定した ADC 値と photo-electron 数の変換係数 (ADC CONSTANT) の 2 号機と 3 号機の全 PMT の比較。横軸が PMT ID で縦軸が ADC CONSTANT。上が 2 号機、下が 3 号機のカメラである。bad チャンネルを除いて、3 号機の方が ADC CONSTANT が揃っているのが分かる。

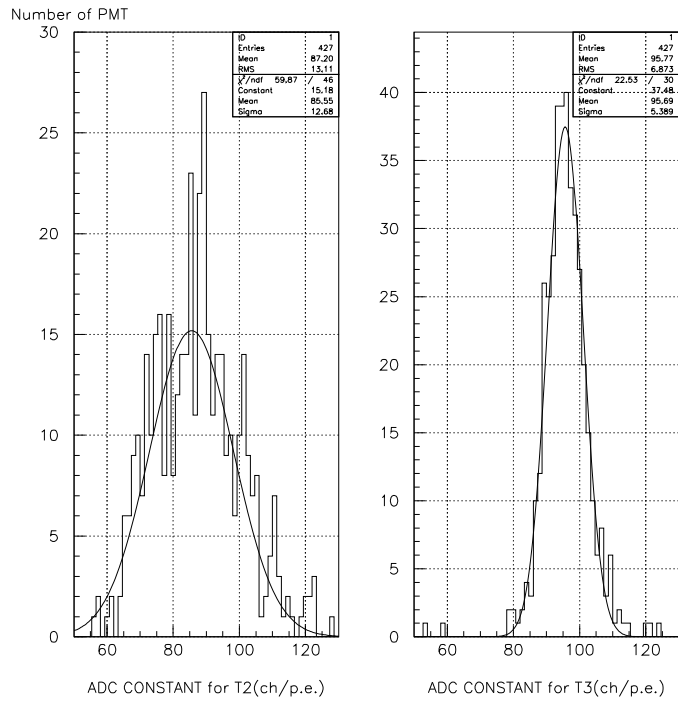


図 5.7: 現地の calibration システムで測定した ADC CONSTANT の 2 号機 (左) と 3 号機 (右) のヒストグラムの比較。2 号機においては  $\sigma = 12.7$ 、3 号機においては  $\sigma = 5.4$  と 3 号機の方が ADC CONSTANT が揃っている。

## 5.2 ライトガイドの角度依存性

ライトガイドの性能はすでにカメラの章で述べた通りだが、組み上げた時のカメラ全体の性能という観点からライトガイドの入射光に対する角度依存性を検証してみる。セットアップを図5.8に示す。光源をカメラから8m離れた場所に設置し、光源の直後にはdiffuserを置き一様な光にする。カメラはフランジ面を軸に5°刻みで回転させ、PMTからの出力をADCで測定した。LED、diffuser、カメラは暗室の中に設置してLED以外の光がカメラに入射しないようにしている。入射光量は3p.e.、7p.e.、10p.e.、20p.e.、60p.e.、100p.e.の6パターンで行った。

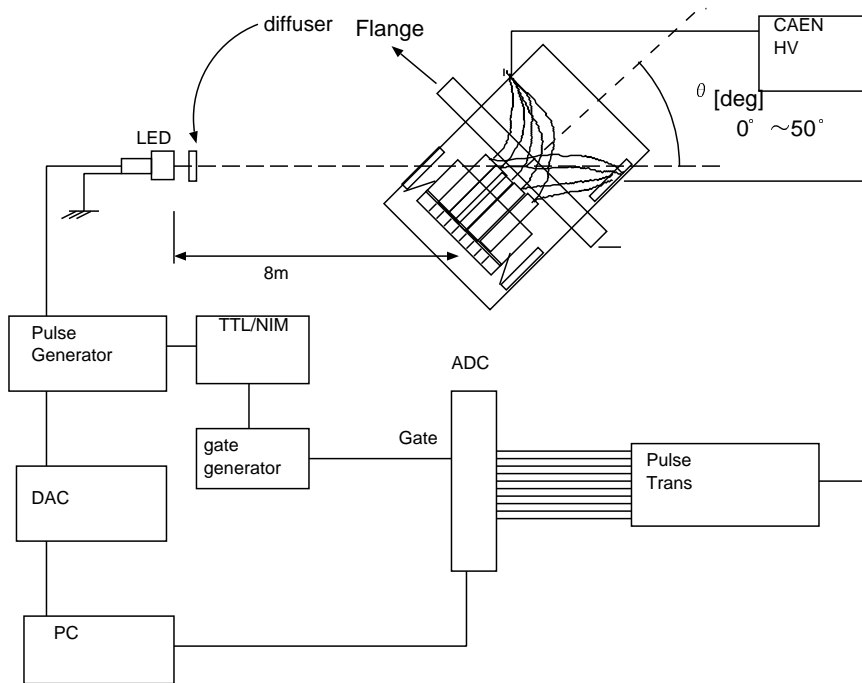


図 5.8: 入射光の角度依存性実験のセットアップ

結果を図 5.8 に示す。各入射光量に対して、横軸は入射角度、縦軸は ADC で 1000count 測定した時の ADC mean である。入射角度が  $0^\circ$  の時の ADC mean を 100 に規格化しており、これらを PMT427 本全てに対して行ったので平均  $\pm 1\sigma$  で表し、カメラ全体での光の入射角度依存性を示している。各入射光量ともに  $30^\circ$  くらいで急激に落ち始め  $32 \sim 33^\circ$  で半分にまで ADC 値が落ち込んでいるのがわかる。ここで印を説明すると●はカメラ中央の PMT、■はカメラ上部の PMT(shadow)、▼はカメラ下部の PMT を表す。カメラを下に傾けたので PMT 上部がカメラ容器に隠れるかどうかを考えてみる。図 5.10 より、六方最密に敷きつめられた PMT でカメラ容器の縁に一番近い PMT は六角形の頂点に配置された PMT である。ライトガイドの入射面は入口から 190mm、六角形の頂点に属した PMT のライトガイドの端に一番近い部分は端から 117mm のところにある。この 2 つから、影響を受け始める角度を求めると

$$\theta = \text{Arctan}\left(\frac{117}{190}\right) = 32^\circ \quad (5.11)$$

となる。これは Winston cone の入射角度 threshold とほとんど同じため、カメラ容器の shadow による効果はほとんど考えなくて良いことになる。実際 shadow 側の存在する PMT の入射光量変化は他の中央の PMT と shadow 側では無い PMT の入射光量変化とほとんど変わらない。

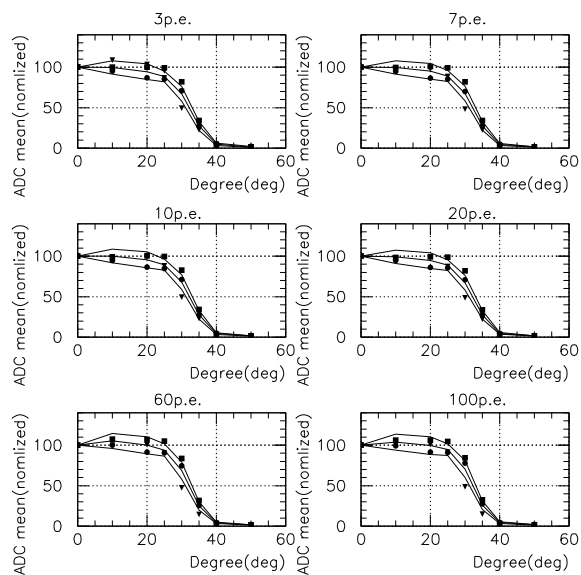


図 5.9: 入射光の角度依存性の実験の結果。カメラに対して LED からの光の入射角度を  $0^\circ$  から  $50^\circ$  まで変化させた時の出力の変化を様々な入射光量で ADC で PMT427 本測定した。  $0^\circ$  の時の出力を 100 に規格化し、全本の平均と  $1\sigma$  を表す。●はカメラ中央の PMT、■はカメラ上部の PMT (shadow)、▼はカメラ下部の PMT を表す。

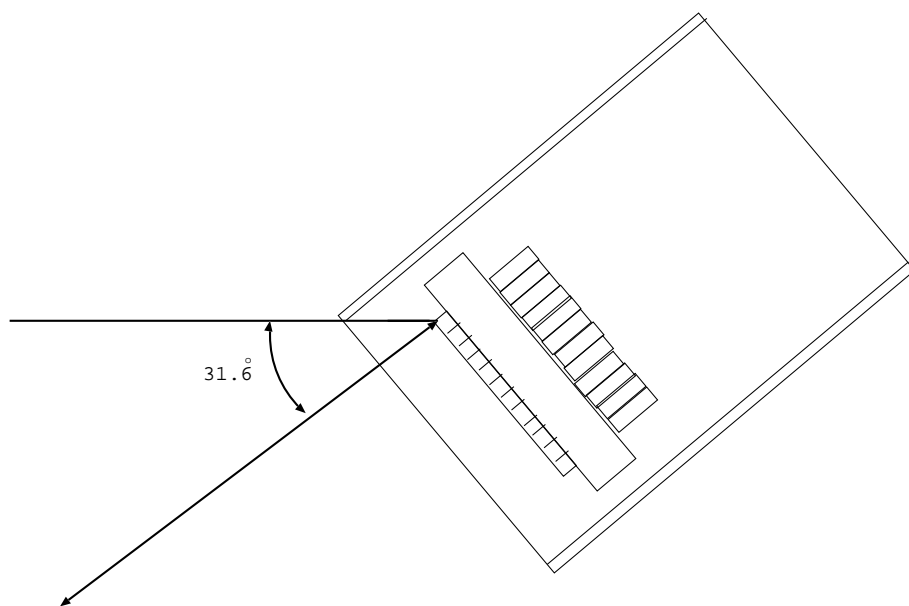
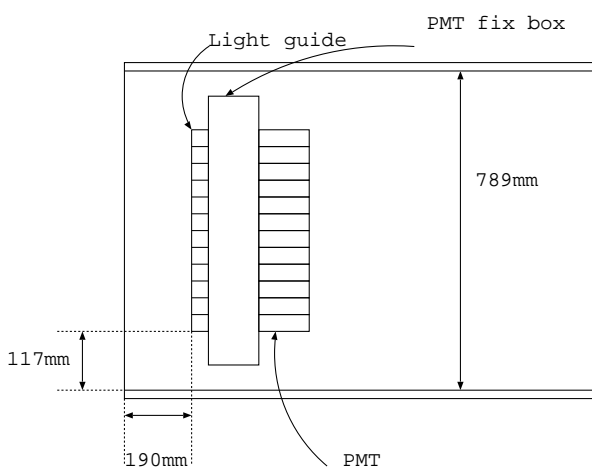


図 5.10: カメラ容器による shadow。六方最密に敷きつめられた PMT で一番最初に影響を受けるのは六角形の頂点に配置された PMT で、影響を受けるのは約  $32^\circ$  以上である。

### 5.3 gain の HV 依存性

次にゲインの HV 依存性について述べる。PMT キャリブレーションの際にも行ったが、これがカメラを組み立てた後でも行ってみる。各 PMT に 1000V、1100V、1200V、1300V、1400V の電圧を与えて、出力を ADC で 1000count 測定して ADC mean を求め、各電圧で ADC mean がどの程度変化するかを調べた。図 5.11 は 7p.e. に相当する光を入射した時の式 4.2 のべき  $\alpha$  の全 PMT のヒストグラムである。  $4.8 \pm 0.2(1\sigma)$  となって、キャリブレーションの時に比べて僅かに小さくなっているのが分かった。

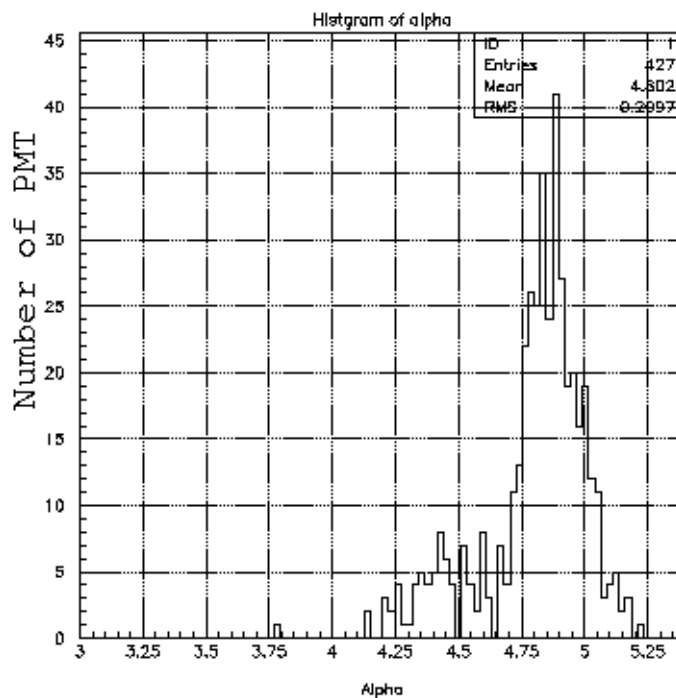


図 5.11: 3号機カメラの gain の HV 依存性-入射光量 7p.e. の時の  $\alpha$  のヒストグラム



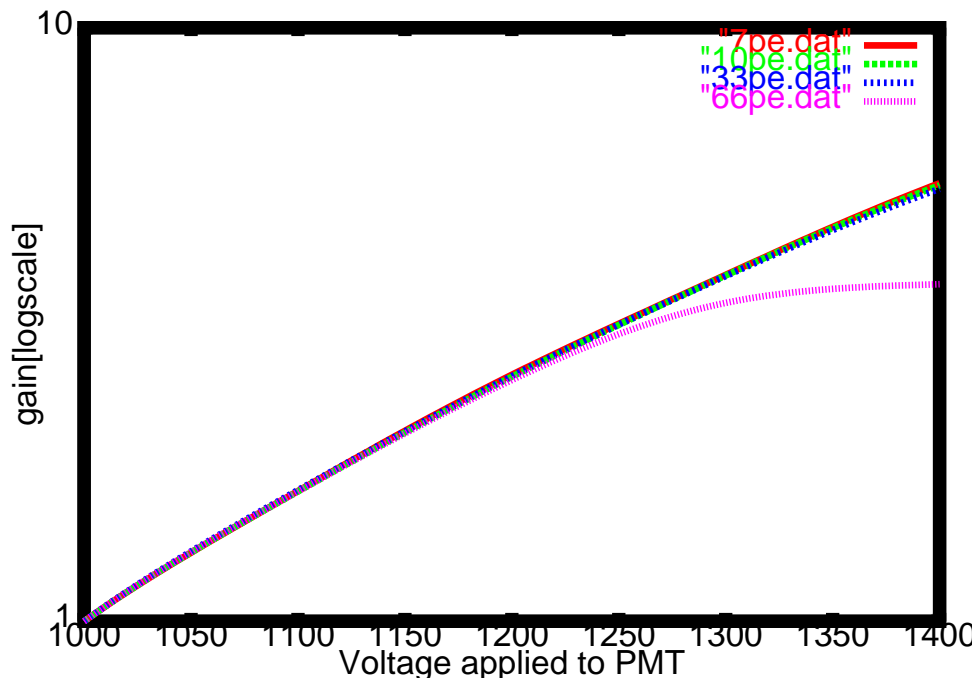


図 5.12: 各入射光量に対するゲインの HV 依存性。7p.e.、10p.e.、33p.e.、66p.e. の入射光量で行った。66p.e. では 1250V あたりから、飽和しているのがわかる。1000V でのゲインを 1 に規格化している。

## 5.4 時間変動

次に出力信号の時間変化を調べた。方法は、まず HV を印加した瞬間の時間を  $t = 0min$  としてある一定の入射光量を与える。その時の出力を ADC で 1000count 測定して ADC mean を求める。それから 30 分おきに同じ入射光量で出力信号を ADC で PMT 全本測定した。結果を図 5.13 に示す。図の横軸は時間で縦軸は出力の変化を表している。なお入射光量は  $10p.e.$  である。この図から分かるように測定開始から、出力が徐々に下がり始めおよそ 3 時間で最初の 94% 程度になった。3 時間では依然として出力が安定していない。3 号機では時間変化を 3 時間しか測定していないが 3 時間以降の変化も把握する必要があると判断して 4 号機では観測が最長 10 時間に及ぶため 10 時間にわたって時間変化を測定した。なお、4 号機では PMT 全本ではなく PMT 16 本で測定したので、エラーバーが 3 号機のそれに比べて大きい。結果は図 5.14 である。傾向は 3 号機のとおりであり、3 時間以降の出力の変化は大して見られずおよそ 93% で推移しているのがわかる。結果として同じ光量を入射した時、HV 印加直後は出力が大きく、その後 3 時間かけてゆっくり 93% 程度まで落ち込んでそのあとはずっと 93% 程度で推移する。

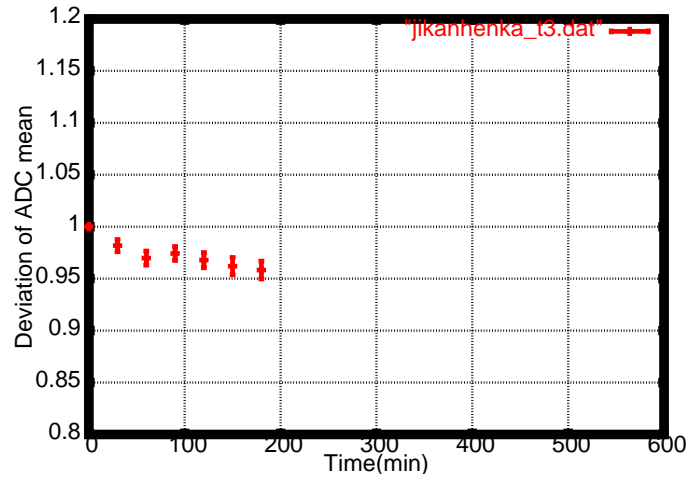


図 5.13: 出力信号の時間変動 (3号機のカメラ)。平均光量が  $10p.e.$  の光を入射して 30 分おきに ADC で  $1000count$  測定した。

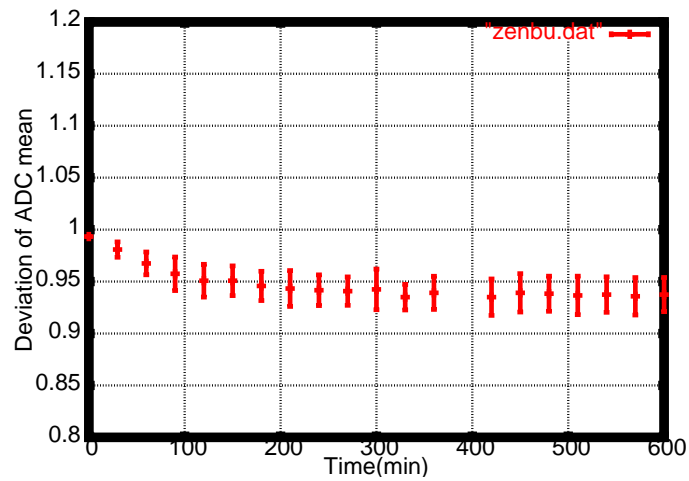


図 5.14: 出力信号の時間変動 (4号機のカメラ)。平均光量が  $30p.e.$  の光を入射して 30 分おきに ADC で  $1000count$  測定した。

## 5.5 Kangaroo

最後にこのカメラにカンガルーのマスクをして  $1p.e.$  に相当する光を入射した。図 5.15 は ADC で  $10000count$  測定した時の平均出力である。カンガルーの絵が浮かびあがっているのが分かる。

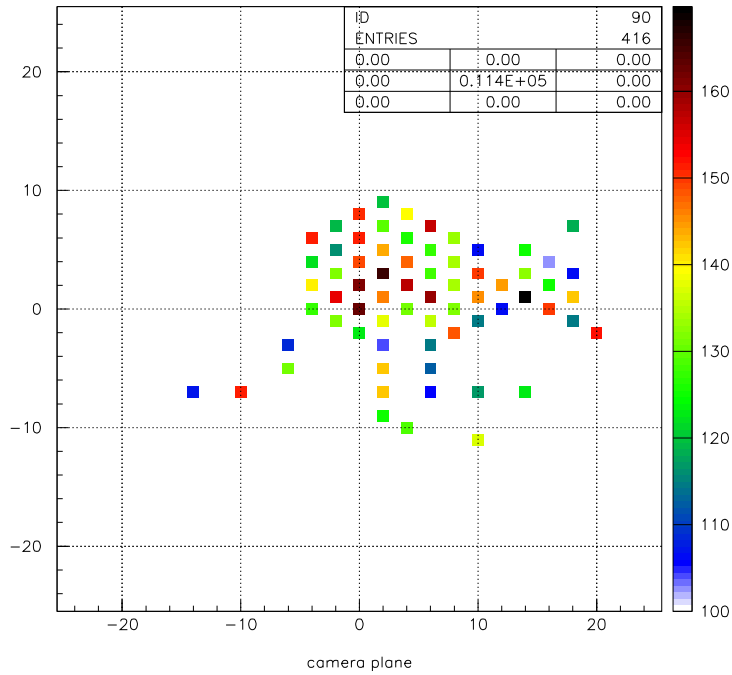


図 5.15: 3号機で取ったカンガルーの絵。  $1p.e.$  の光をカンガルー型のマスクをした間から入射して、ADC で  $10000count$  測定した。カンガルーらしき絵が浮かびあがっているのが分かる。

# 第6章 VME Moduleの性能 評価

## 6.1 Trigger Module

### 6.1.1 目的

現在 CANGAROO-III 望遠鏡のデータ取得システムでは、トリガー条件としてある threshold (lsum discri level) 以上の信号を出力している PMT の本数と PMT 16 チャンネル単位 (1Box) で信号を足しあわせ、その足しあわされたアナログ信号がある threshold (CAMAC discri level) を超える Box 単位の信号の2つを利用している。このヒットした PMT の本数と BOX の本数はアンプの加算回路を使用してアナログ的に足され、波高として表されている。例えばヒットした PMT が1つなら  $20mV$  の信号を出力し、2つなら  $40mV$  の信号を出力するといった具合である。このヒットした PMT の本数を表す信号とヒットした BOX の数を表す信号の2つをそれぞれ別の discriminator (nhit discri と nbox discri) にかけて、最終的にこの2つのコインシデンスをとってトリガーとして採用している。(GPS トリガーなどは省略する。) 理想的には例えば nbox discri の threshold を  $360mV$  から  $380mV$  に変えてもデータ取得レートが変化することは無いのだが現実にはこのような threshold の変更であってもレートが変わってしまう。これは両者ヒットした本数は discriminator にかける前でアナログ信号に変換されているため、ノイズ等の影響を受けやすいというところに原因がある。そこでヒットした本数をデジタルにカウント出来れば、このようなノイズに受ける影響は少くなると考え、VME 規格で同時に入力されたチャンネル数をデジタルに算出し、パソコンで設定した自然数の閾値以上ならば、トリガー信号を出すという回路を製作してみた。この回路では入力、出力ともに TTL 信号を扱っており、入力は16チャンネルである。

## 6.1.2 仕様

このトリガー回路は、ある瞬間にいくつ入力されたかを2進数で並列処理していき、threshold以上の入力があれば、トリガー信号を出力する回路である。ある程度長い有限な時間幅の中での入力数でなく、 $nsec$ オーダーでの瞬間の入力を数え上げるのは、チェレンコフ光が一般には $10nsec$ の時間幅でパルス的にやって来るからである。仕様は以下の通りである。データラインは threshold を READ/WRITE するのに使用する。16チャンネルの入力に対し threshold は1から15までの任意の自然数に設定できる。よって本モジュールでは4ビット使用することにした。トリガー信号は設定された threshold 以上の TTL 信号の入力があれば、出力される。なお信号が入力されてからトリガー信号が出力されるまでの伝搬遅延時間はおよそ $60nsec$ となっている。主な仕様を表6.1に、またこのトリガー回路の回路図を図6.2に示しておく。

トリガー回路の仕様

項目	数値などの特性
Address	24ビット
Data	4ビット
Input	16ch 40極Dサブコネクタ
Output	1ch LEMOコネクタ
Signal	TTL規格
Propagation delay	約 $60nsec$
Threshold	1から15の任意の自然数

表 6.1: トリガー回路の仕様。

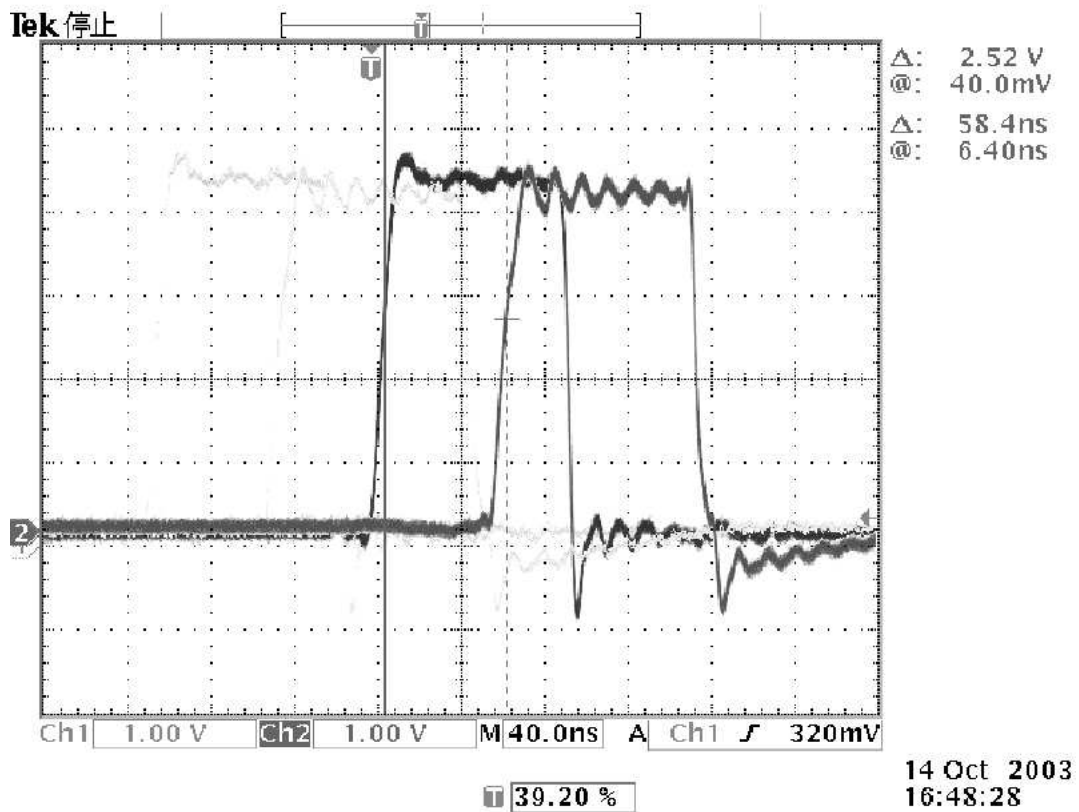


図 6.1: 伝搬遅延時間。入力のパルスからおよそ  $60\text{nsec}$  後にトリガーパルスが出力されているのが分かる。レンジは  $40\text{nsec}$  に設定してある。

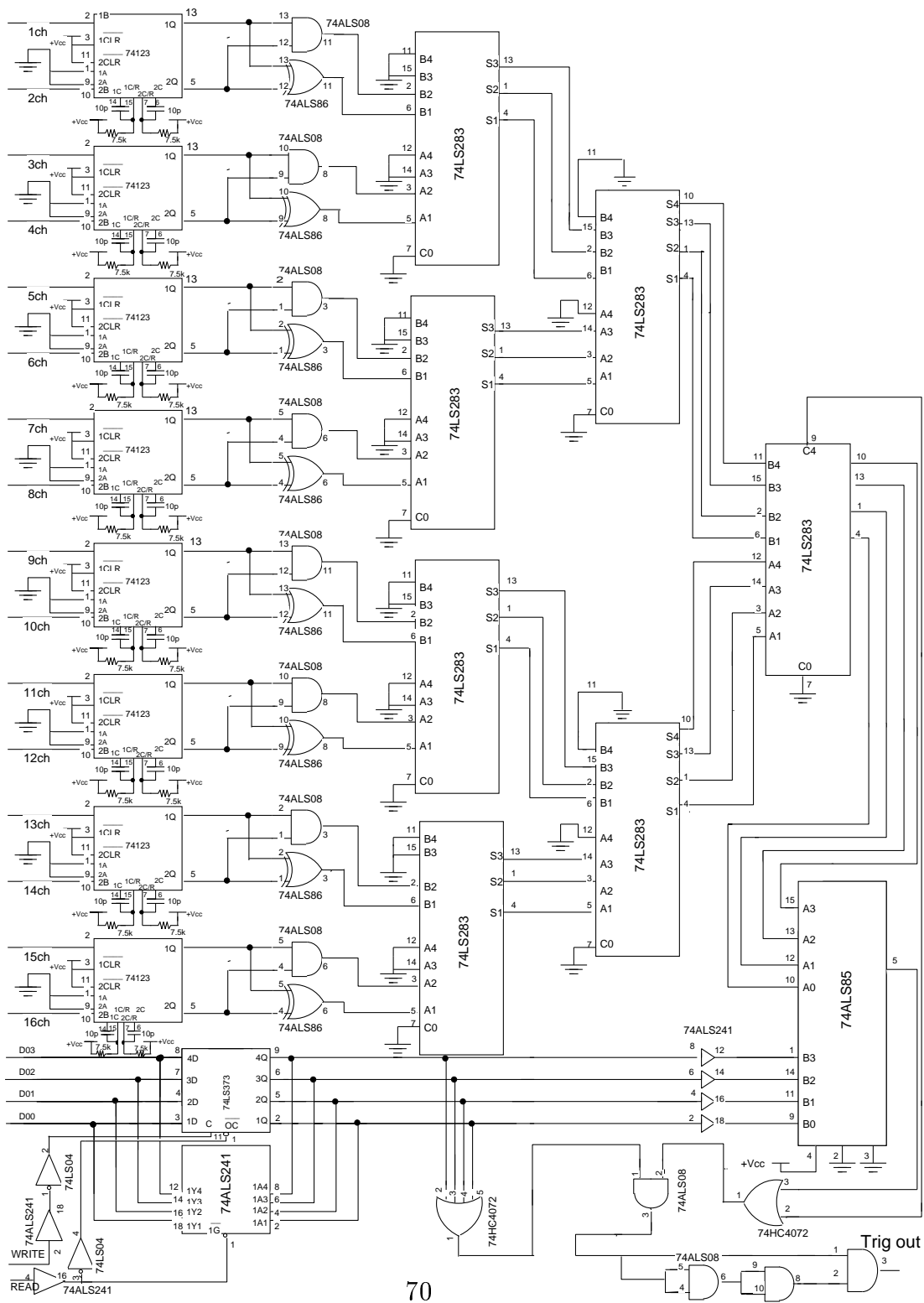


図 6.2: 16ch トリガーモジュールの回路図。



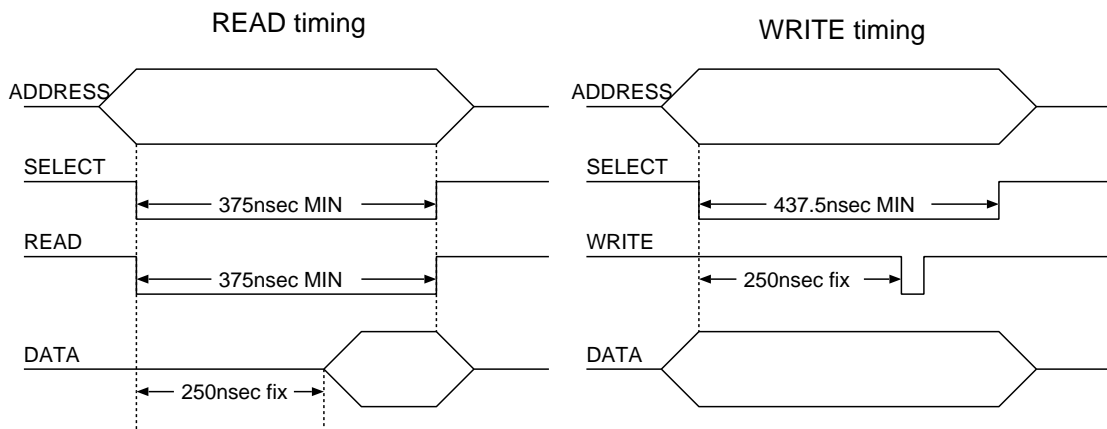
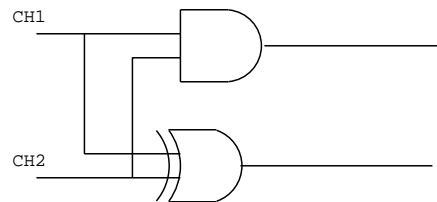


図 6.3: ADDRESS READ WRITE DATA のタイミング。[10]

### 6.1.3 回路内部

#### 入力段

回路の入力段について説明する。まず各チャンネル LS74123 という one shot に入力してパルス幅を調整しているが、これは後の各チャンネルの経路の長さの違いにより同時に入力された信号が同時であるとみなされなくなるのを防ぐためである。しかしあまりに長いとチェレンコフ光と夜光の区別が出来なくなってしまうので伝搬遅延時間の倍程度 ( $\sim 100nsec$ ) のパルス幅にしてある。パルス幅を調整した後、各チャンネル 2 分割されてそれぞれ AND 素子と EXOR 素子に入力している。この 2 つの素子を使用して、入力を 2 チャンネル毎に区切っていき、2 チャンネルのなかで入力はいくつあるかを 2 ビットの 2 進数に変換している。図 6.4 はその 2 進数変換回路である。AND からの出力が  $2^1$  の位、EXOR からの出力が  $2^0$  の位である。真理値表から入力信号数が 2 ビットの 2 進数に変換されているのが分かる。



INPUT NUMBERS	CH1	CH2	AND	EXOR
2	H	H	H	L
1	H	L	L	H
1	L	H	L	H
0	L	L	L	L

図 6.4: 2 ビット 2 進数変換回路。下は AND と EXOR の真理値表。AND が  $2^1$  の位、EXOR が  $2^0$  の位を表す。

#### 算術演算回路

次に中段の算術回路について述べる。

## 1. 加算回路

入力段で2チャンネル分を2ビットの2進数に変換したので、入力段後には8つの2ビット2進数が存在している。中段では、この8つの2ビット2進数を足し合わせるために、全加算型IC74283を使用する。これは2つの4ビット2進数の入力(A1-A4とB1-B4)を足し合わせ、先見桁上りを含めた5ビット2進数の出力(C4とS1-S4)を行う。表6.2にLS74283の真理値表を示す。なおC0は桁上り入力、C2は内部桁上りである。例えばAに2(LLHL)をBに1(LLLH)が入力されれば表6.2の10列目と1列目よりS1-S4から(LLHH)が出力されるわけである。この74283という素子を使用して全部足し合わせ、4ビット2進数にする。

INPUT				OUTPUT			OUTPUT		
				WHEN C0=L/C2=L			WHEN C0=H/C2=H		
A1/A3	B1/B3	A2/A4	B2/B4	S1/S3	S2/S4	C2/C4	S1/S3	S2/S4	C2/C4
L	L	L	L	L	L	L	H	L	L
H	L	L	L	H	L	L	L	H	L
L	H	L	L	H	L	L	L	H	L
H	H	L	L	L	H	L	H	H	L
L	L	H	L	L	H	L	H	H	L
H	L	H	L	H	H	L	L	L	H
L	H	H	L	H	H	L	L	L	H
H	H	H	L	L	L	H	H	L	H
L	L	L	H	L	H	L	H	H	L
H	L	L	H	H	H	L	L	L	H
L	H	L	H	H	H	L	L	L	H
H	H	L	H	L	L	H	H	L	H
L	L	H	H	L	L	H	H	L	H
H	L	H	H	H	L	H	L	H	H
L	H	H	H	H	L	H	L	H	H
H	H	H	H	L	H	H	H	H	H

表 6.2: 74283の真理値表。[11]

## 2. 比較回路

加算回路を経て入力信号数は4ビット2進数に変換されたわけだが、これを比較素子(コンパレータ)である7485に入力する。これは2つの4ビット2進数の大小を比較する素子である。つまりこの7485に入力信号数である4ビット2進数とコンピュータから設定できる4ビット2進数(threshold)を入力してthreshold以上ならばHighレベルの信号が出力される。なお16チャンネル全てに信号があるときは(LLLL)となって桁上り出力がHになるのであるが7485には(LLLL)が入力されるため7485からはHighレベルの信号が出力されない。しかしこの場合いかなるthresholdよりも大きく必ずトリガー信号を出さなければいけないので、最終的にはこの桁上り出力と先ほどの7485の出力のORを取って、(ノイズを取り除く前の)トリガー信号にする。

### threshold の READ/WRITE

thresholdは4本のデータラインを使ってREAD/WRITEを行う。WRITEには、3状態DタイプラッチのSN74373を使用した。READには、3状態バッファを使用する。3状態素子は、制御部分がHighレベルの時は能動状態で、Lowレベルの時は非能動状態で出力はハイインピーダンス状態になる素子である(実際には、制御部分は負論理であるため能動状態にするにはLowレベルの信号を入れる。)。ハイインピーダンス状態をもつ素子を使用する理由は、この4本のデータラインは、thresholdのREADとWRITEの両方に使用している為、例えばthresholdをWRITEしている時は、READに使う素子をハイインピーダンスにしておかないと正確に書きこめない。又バスラインは他のモジュールとも共通のため3状態素子は必須である。

## ノイズカット回路

本来はこの部分をいれるつもりはなかったが、 $n$ チャンネルに High レベルを入力して、threshold を  $(n + 1)$  チャンネルにしたとき図 6.5 のようなノイズが発生したので、トリガー信号を 2 つに分けて、一方をおよそ  $20 \sim 30\text{nsec}$  遅らせてから、AND を取ることで  $10\text{nsec}$  程度のパルス幅の短いノイズを消す事が出来た。これらのノイズは、素子間の伝搬遅延時間の微妙な違いのために生じるものである。入力段でパルス信号はおおよそ  $100\text{nsec}$  程度に整形してあるので  $20 \sim 30\text{nsec}$  程度のパルス幅の減少は問題ない。

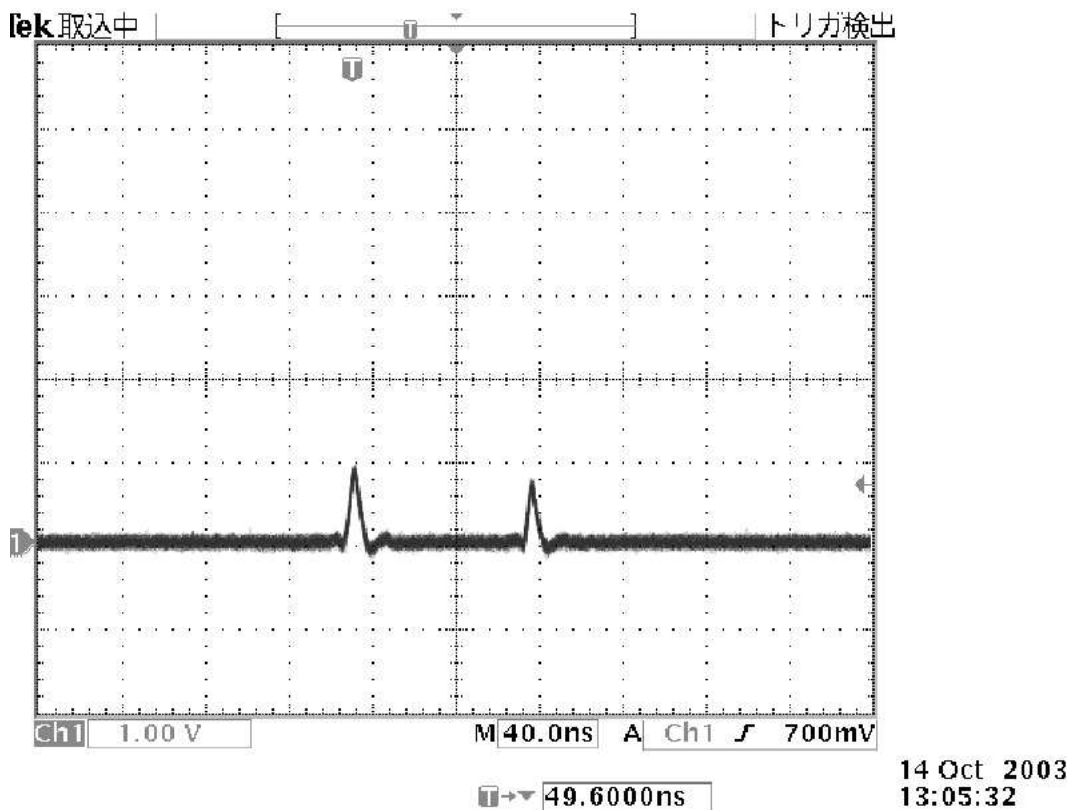


図 6.5: ノイズ除去前の入力  $n$  チャンネル、threshold が  $(n + 1)$  チャンネルの時の出力。  $10\text{nsec}$  程度のノイズがのっているのが分かる。

## 第7章 Discussion

- 現在 CANGAROO-III で稼動している 4 台の望遠鏡では、1 号機の望遠鏡が他の 3 台の望遠鏡と比べて、設計、性能が大きく異なる。例えばカメラに関して言えば、使用している PMT の種類、本数、配置、ライトガイドの形状、視野が異なる。その結果 1 号機のガンマ線に対するエネルギー threshold は  $450\text{GeV}$  で 2 ~ 4 号機は、 $250\text{GeV}$  となっている。そのため 4 台の望遠鏡でイベントのコインシデンスを取るといった事に対して足をひっぱる可能性がある。よって 1 台目のカメラを他の 3 台と同じにすることによってステレオ観測のさらなる向上が見込まれる。もし 1 台目のカメラを製作することになったら、設計、性能はほとんど同じにしてそれ以外のカメラの軽量化などの改善をはかる必要がある。軽量化を目指す理由として、カメラ自身の重さによる重力降下による影響ををさらに小さくしたいという事と、カメラを望遠鏡にとりつける作業は基本的に手作業なためその手作業による労力をすこしでも軽くするという 2 つが挙げられる。
- VME 規格のパルサーは、設計、製作から一年が経過したが、今現在システムに組みこまれていない。これは、このパルサーを現地でインストールした際、フロントエンドや TDC などに悪影響を及ぼした経緯があるからである。単体では仕様通りの動作を確認済みだが、他のいくつかのモジュールが組み入れられた状態でうまく動作しない可能性がある。原因は現在追及中であるが、消費電力が大きすぎたり、他のモジュールと共通のバスライン周辺に原因があると考えられる。例えばデータを書きこむ時に SN74373 という 3 状態ラッチを使用しているが、この素子はバスラインと直結しているが常に能動状態である (制御端子を High レベルにプルアップしてハイインピーダンス状態を使用していない) ことが原因として考えられるかもしれない。これに関しては今後調査する必要がある。

- 現地で LED による PMT のキャリブレーションを行う際、数年前に製作された日亜化学の量子井戸型青色 LED である高輝度、高時間分解能の NSPB510S を使用している。この LED は最近と同じ型番であるが、高輝度開発の方向が向けられており、時間分解能が落ちている。これは、以前と製品番号が同じであるにもかかわらず、rise time が同じであるが ( $R.T. = 43nsec, F.T. = 60nsec$ ) 電圧を与えてから光始めるまでの時間が以前に比べてばらつきが大きくなったことによる。よって現在の同じ型番の LED は使用できない可能性がある。予備として使用できる高輝度、高時間分解能の LED を調べる必要がある。
- 来年度は望遠鏡が 4 台完成して時間的な余裕があるため次世代の PMT の開発に着手出来る。例えば、今 CANGAROO-III で使用している PMT の光電面はバイアルカリであるが、これを GaAs に変更出来るかもしれない。この GaAs 光電面は量子効率 40% と現在使用しているバイアルカリの約 1.6 倍である。これは鏡の集光面積を約 1.6 倍にしたのと同じ価値があり、さらにエネルギー閾値を下げられる可能性がある。また光電面の life が短いという致命的な欠陥が報告されている。しかしこれは半導体であり、強い光をあてると内部でガスが発生して真空度が悪くなるという可能性もある。また夜の強い光、昼の蓋をとじた状態での 1photon といった昼夜の変化の繰り返しによる経年変化などの実用性も考慮しなければならない。

## 第8章 Summary

本修士論文の結論は以下の通りである。

### 8.1 カメラの基本的な構造

CANGAROO-III 望遠鏡で使用しているカメラの基本的構造は次の通りである。カメラは主に光電子増倍管 (PMT)427 本から構成され、光電面が望遠鏡の焦点距離 8m に来るように設計されている。PMT は六方細密に敷きつめられており、カメラの視野は約 4 度、1 ピクセルあたりでは 0.168 度となっている。PMT の前面には PMT 間の dead space を減らすため、さらに鏡の外からやって来る夜光などの外遊ノイズの除去の為にライトガイドが付けられている。PMT の直後には 60 倍プリアンプが付けられており、これらにはフロントエンドから供給される 12V を DC regulator board で 5V に落としてから与えている。この方法を採用しているため、ノイズやケーブルによる電圧降下の影響に強いという長所を持つ。信号は、光電面で光電効果によって電子に変換され、PMT のなかの多段増巾回路、プリアンプで増巾されたあと、凡そ 30m のケーブルをへて、トリガー回路、ADC、TDC、に入力される。

### 8.2 4号機カメラの製作

- 4号機のカメラに使用する PMT427 本のキャリブレーションを行った。
  - PMT に  $2 \times 10^5$  の gain (PMT module 全体で  $1.2 \times 10^7$  の gain) を与える HV 値は  $1099 \pm 73(1\sigma)$  V となった。
  - 出力信号の入射光量に対する線型性 (リニアリティ) の飽和点は  $220 \pm 11(1\sigma)$  p.e. となり、CANGAROO 望遠鏡で要求されるリニアリティを達成している事がわかった。



- 時間分解能を平均入射光量  $30p.e.$  で測定し、 $0.97 \pm 0.04(1\sigma)nsec$  であり、1回のシャワーにおけるチェレンコフ光の時間幅約  $5nsec$  に較べて充分小さく、チェレンコフ光観測に適した PMT である。
- 3号機からの改善 4号機は基本的な構造は3号機と変わらないが、メンテナンスの観点から多少の改善を施した。
  - 3号機では、DC regulator board はカメラ内部のリングにネジ止めして固定してあるが、修理ないし交換を行なう時には、この board をリングから外さなければならないが、この作業が非常に面倒である。よって DC regulator board がリングから外れにくく外しやすい機構にした。具体的には、埋め込み型ひねるタイプのコンセントと首振り型のプラグを使用して固定する。プラグは直接 DC regulator board につけるとそこを中心として余計なモーメントを生じ、負荷となるので、プラグは緩衝板に付けた。
  - 3号機ではケーブルをカメラ容器内部から外部に出すパネルに、フィードスルーコネクタを使用してケーブルエントリーとしてケーブルを補佐している。しかしこのコネクタは、一年中強い日差しに晒され、紫外線による経年劣化がある。そのため4号機では、経年変化に強い亜鉛ダイガスト製のボックスコネクタと亜鉛メッキ帯鋼製の防水用の蛇腹(ケイフレックス)を使用する事にした。

### 8.3 3号機の基本性能

3号機、4号機のカメラのエレクトロニクス込みでの基本的な性能は以下の通りである。

- photo-electron を ADC ch に換算した値である ADC CONSTANT のユニフォミティは3号機は約7%となっており、充分な一様性を有している。
- DC regulator board 部分でのクロストークは1%以下であり無視できる範囲である。

- 入射光の入射角度の依存性であるが、およそ  $33^\circ$  (FWHM) で急激に入射光量が落ちる。これはライトガイドの効果である。
- 同じ入射光量に対する出力信号の時間依存性であるが、pedestalの時間に対する変化率は1%、信号の時間に対する変化率は5%以下であり無視できる範囲である。

## 8.4 4号機の基本性能

4号機のカメラは2003年12月に完成して、総合テストを行った。以下に初期性能の結果を述べる。

- ADC CONSTANTは、 $1p.e.$  ピークの分布に Poisson-Gaussian 分布をフィッティングした時に得られるパラメータから求めると  $97 \pm 7(ch/p.e.)$  でユニフォミティは7%、また数十  $p.e.$  以上の光を入射した時に得られる分布を Poisson 分布と仮定して式5.10から求めると  $108 \pm 6(ch/p.e.)$  となってユニフォミティは5%となった。
- 入射光の入射角度の依存性であるが、3号機の時と同様におよそ  $33^\circ$  (FWHM) で急激に入射光量が落ちる。
- ADC CONSTANTの時間依存性であるがHVをPMTに印加した直後から徐々に落ち始め、およそ3時間で94%程度になり、その後はあまり変化はしない結果となった。

## 8.5 VME module

- Trigger module:16chのTTL入力信号の入力数を並列計算して2進数として算出して、コンピューターで設定したthreshold(1から15の任意の自然数)以上ならトリガー信号をTTLで出力する。伝搬遅延時間は凡そ  $60n.sec$  である。

## 8.6 PMT calibration test の信頼性

PMTのcalibrationのテストの信頼性を測るため、同じPMTに対して凡そ10回程度日にちを変え、室温を変え、calibrationを行なった。結

果、HV 値、リニアリティ、時間分解能など様々な測定値に対して、ほぼ 4% 以内の誤差で収まり、calibration の結果は 4% 以内の精度で期待できるという事が分かった。

## 8.7 2、3、4号機に使用するPMTのcalibration testの比較

2、3、4号機のカメラで使用しているPMTのcalibration testの比較を行なった。特に注目すべきはPMTに $2 \times 10^5$ のゲインを与えるHVの全本数の平均値である。同じゲインを与えるのに段々小さい値になってきていることがわかる。つまりPMTそのものの性能が良くなっている事がわかる。また、3号機に較べて時間分解能の平均値が悪くなっているが、これはPMTに与えるHV値が相対的に3号機に較べて4号機が小さい値である為、光電面直後で電子にかかる集束力が弱まっている為であると考えられる。この事から時間分解能が悪くなる事は、HV値が小さくなる事とトレードオフの関係にあるという事が分かる。

## 関連図書

- [1] W.Heitler, The Quantum Theory of Radiation,Oxford Univ.Press (1954)
- [2] M.S.Longair,High energy astrophysics,Cambridge Univ.Press (1981)
- [3] Jelley, J.V., Cerenkov Radiation and Its Application(1958) Pergamon
- [4] NASA/Goddard Space Flight Center,  
[http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/how\\_12/cerenkov.html](http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/how_12/cerenkov.html)
- [5] S.Kabuki et al.,NIM-A,astro-ph/021025
- [6] 浜松ホトニクス, 光電子増倍管 第2版 (1998)
- [7] 株木重人 修士論文 ( 東京大学 2002 )
- [8] 内田直志 修士論文 ( 東京大学 2003 )
- [9] 林慎一郎 修士論文 (甲南大学 2002)
- [10] GND 社、VME UNIVERSAL BOARD 取扱説明書
- [11] TEXAS INSTRUMENTS 社、<http://www.ti.com/>

## 謝辞

本修士論文を作成するにあたり、2年間、辛抱強くご指導して頂いた指導教官の榎本良治助教授に深く感謝いたします。科学のみでなく歴史、文学、哲学、政治、経済と幅広い知識を授けて頂きました。宇宙線研究所スタッフ森正樹教授、河内明子助手には実験に対するアドバイスを頂きました。どうも有難うございました。また、宇宙線研究所CANGAROOグループの研究者、学生の方々には日ごろより数々の助言を頂き、くだらない質問にも真剣に相談にのって頂きました。どうも有難うございました。CANGAROOグループの皆様には平素より浅学甚だしい私に対して御指導、御鞭撻を賜りました。どうも有難うございました。カメラ製作にあたって、CI工業の後藤昌幸様、林栄精器の梅澤圭様、芝川製作所の花上正美様、高槻無線の富沢利明様その他多くの皆様に数々のご高配を賜りました。どうも有難うございました。最後に私と関わった全ての方々に感謝致します。

# 付録 A 4号機の性能評価

2003年12月に宇宙線研究所で4号機の望遠鏡に使用するカメラとエレクトロニクスで総合テストを行った。Appendixではその結果に沿って4号機のカメラの性能を述べる。

## A.1 ユニフォミティ

ゲインのユニフォミティを3号機の性能評価の時と同じく2つの方法で求めてみる。まず1p.e.の入射光量の時のADC分布にPoisson-Gaussianの畳み込み関数でフィッティングした時のADC CONSTANTに相当するパラメーターから求めてみた。また様々な入射光量で、ADC CONSTANTを測定した。分布がPoisson分布に従っていると仮定して式は5.10を使用した。結果を図A.2と図A.3に示す。1p.e.の分布から得られるADC CONSTANTの平均は $97 \pm 7$ となりユニフォミティは7%となった。また図A.3では左上から右下に向かって、入射光量が3p.e.、6p.e.、30p.e.、60p.e.、90p.e.、160p.e.の時の各PMTごとのADC CONSTANTとPMT全本のADC CONSTANTのヒストグラムを表す。ユニフォミティは5%である。やはりPoissonゆらぎから決定する方法がADC CONSTANTが高くなる傾向が3号機の時と同じように見られる。また、90p.e.まではADC CONSTANTはほぼ $108 \pm 6(ch/p.e.)$ で入射光量に依存していない。実際各チャンネル毎に様々な入射光量によるADC CONSTANTのばらつきを求めてみると図A.1となって、入射光量によるADC CONSTANTのばらつきはおよそ2%となった。これは、

$$\mu_{p.e.} = \left( \frac{\mu_{ADC}}{\sigma_{ADC}} \right)^2 \quad (A.1)$$

$$ADC_{constant} = \frac{\sigma_{ADC}^2}{\mu_{ADC}} \quad (A.2)$$

という関係によるもので、上式から分かるようにADC CONSTANTは、入射光量の絶対値によらないことがわかる。これは得られるADC分布と

LEDからの入射光が Poisson 分布である場合に成立する。

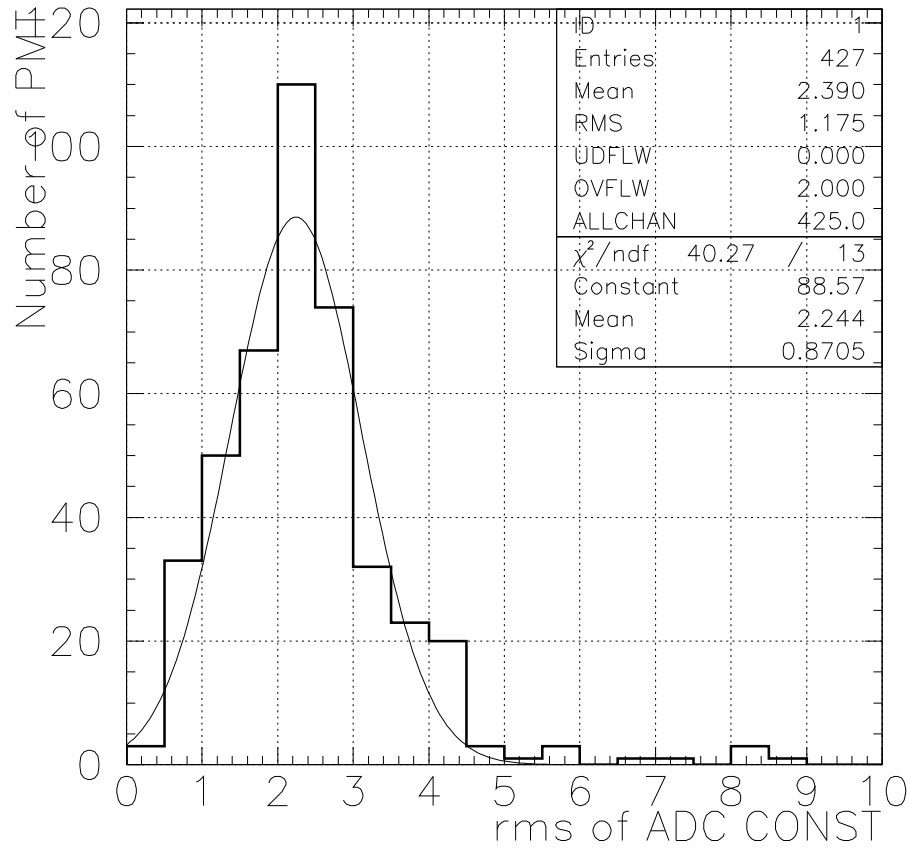


図 A.1: ADC CONSTANT の入射光量によるばらつき。各 PMT に対して様々な入射光量における ADC CONSTANT を求め、その rms を求めた。入射光量による ADC CONSTANT のばらつきは 2チャンネルとなり、変動はおよそ 2%となる。

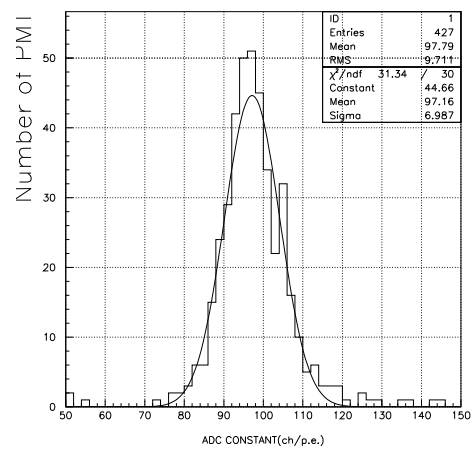


図 A.2: 4号機のカメラのユニフォミティ。入射光量が $1p.e.$ の時のADC分布にPoisson-Gaussian畳み込み関数でフィッティングしたパラメータから求めた。



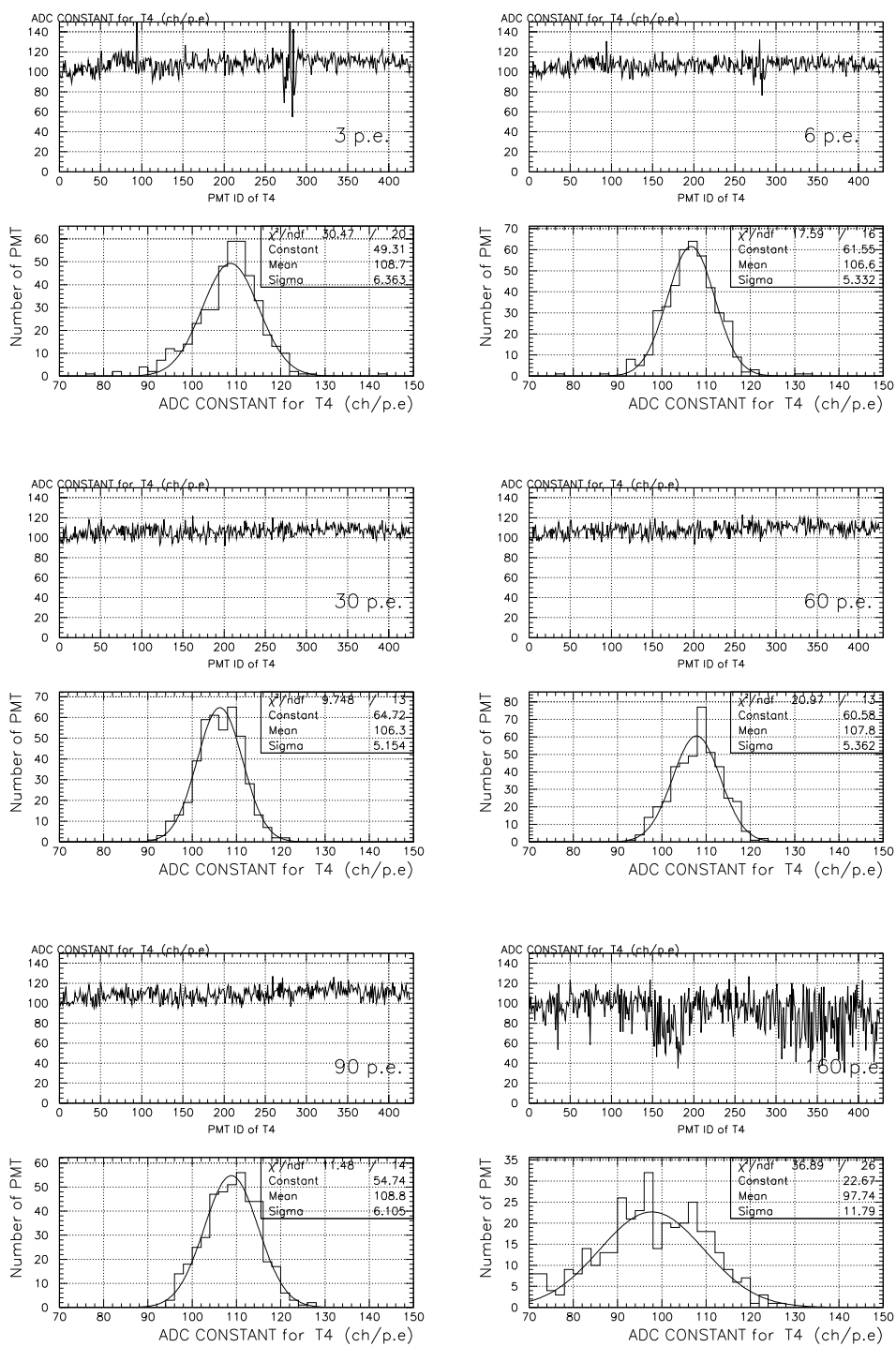


図 A.3: 4号機のカメラのユニフォミティ。様々な入射光量に対して、得られるADC分布をポアソン分布と仮定してADC CONSTANTを求めた。

## A.2 LED calibration system

3号機のカメラの性能評価の章でも述べたが、4号機のカメラ内にもLEDと反射スクリーンを取り付け、蓋をとじた状態でLED光によるキャリブレーションを行えるようにした。実験ではパルスジェネレーターからLEDに与える電圧を $-5V$ から $0.1V$ 間隔で変えていき、入射光量ならびに入射光のユニフォミティがどの様に変化するかを調べた。結果を表A.1と図A.4に示す。入射光量が $10p.e.$ 以上では13%程度のユニフォミティが保障される事が分かった。

LEDに与える電圧と平均入射光量の関係

LEDに与える電圧 (V)	平均入射光量 (p.e.)	光源のユニフォミティ (%)
-5	$39 \pm 5.6$	14
-4.9	$34 \pm 4.4$	13
-4.8	$26 \pm 3.1$	12
-4.7	$18 \pm 2.4$	13
-4.6	$12 \pm 1.6$	13
-4.5	$6.7 \pm 1.3$	19
-4.4	$2.5 \pm 1.4$	56

表 A.1: 4号機LEDキャリブレーションの結果。

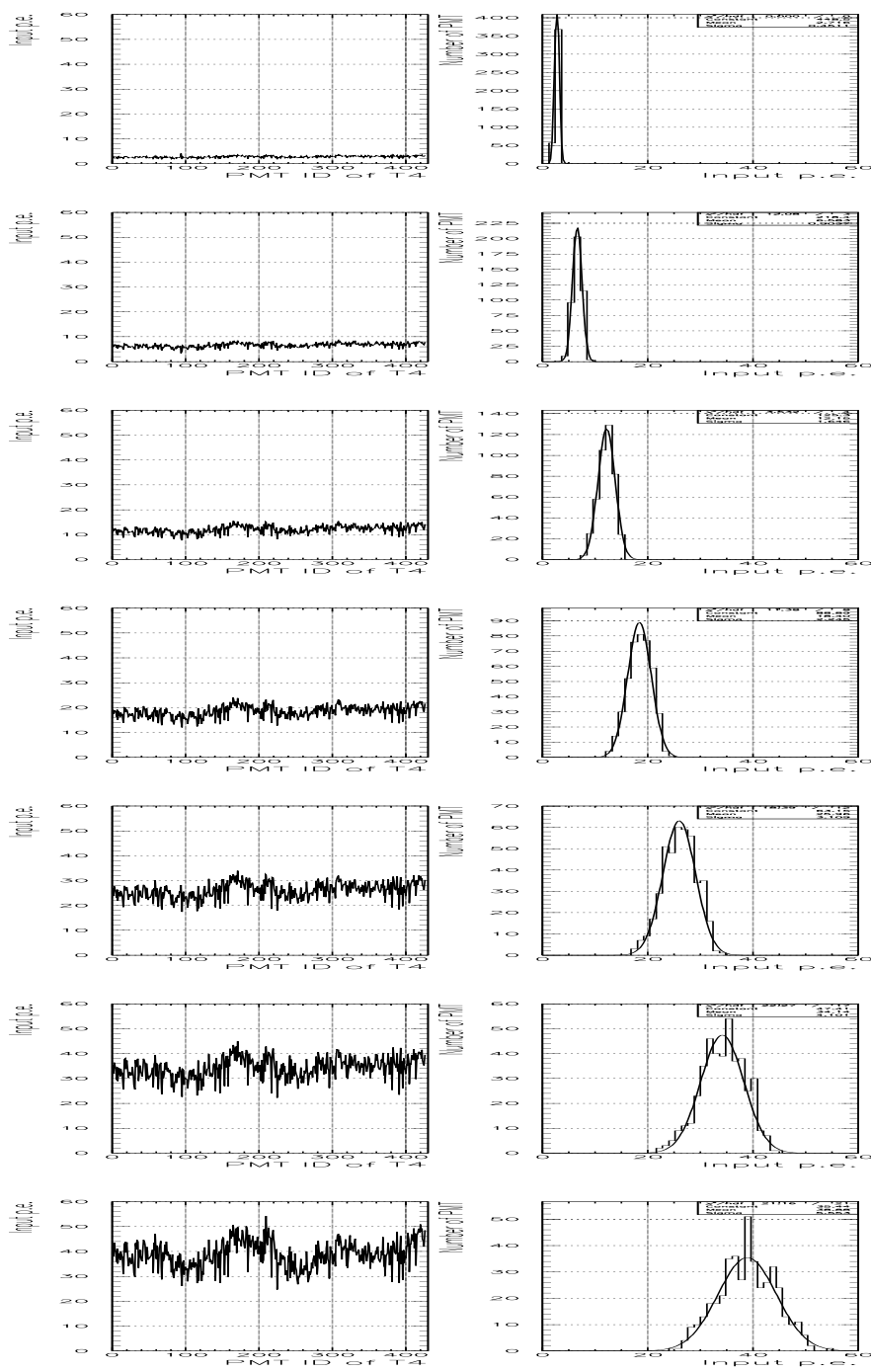


図 A.4: 4号機のLEDキャリブレーション。上からパルスジェネレーターからLEDに与える電圧が4.4V、4.5V、4.6V、4.7V、4.8V、4.9V、5.0Vである。左が各PMTごとの入射光量で、右が入射光量のヒストグラムである。

### A.3 ADC CONSTANTのHV依存性

次に ADC CONSTANT の HV 依存性を各入射光量で調べた。HV 値は 1000V から 1450V までを 50V 刻みで変化させ、PMT からの出力を ADC で測定して ADC CONSTANT を求めた。結果を図 A.5 に示す。横軸は PMT に印加した電圧、縦軸は ADC CONSTANT(logscale)、上から 6*p.e.*、10*p.e.*、30*p.e.* の入射光量である。この図から分かるように ADC CONSTANT は HV 値の冪乗に比例して増加している。また、与える電圧が低い領域では入射光量によらず ADC CONSTANT は変わらず、30*p.e.* の入射光量では 1350V 付近から ADC CONSTANT の増加の仕方が鈍っている事が分かる。これは、PMT 内部の空間電荷効果による PMT の Saturation とプリアンプの Saturation によるものである。

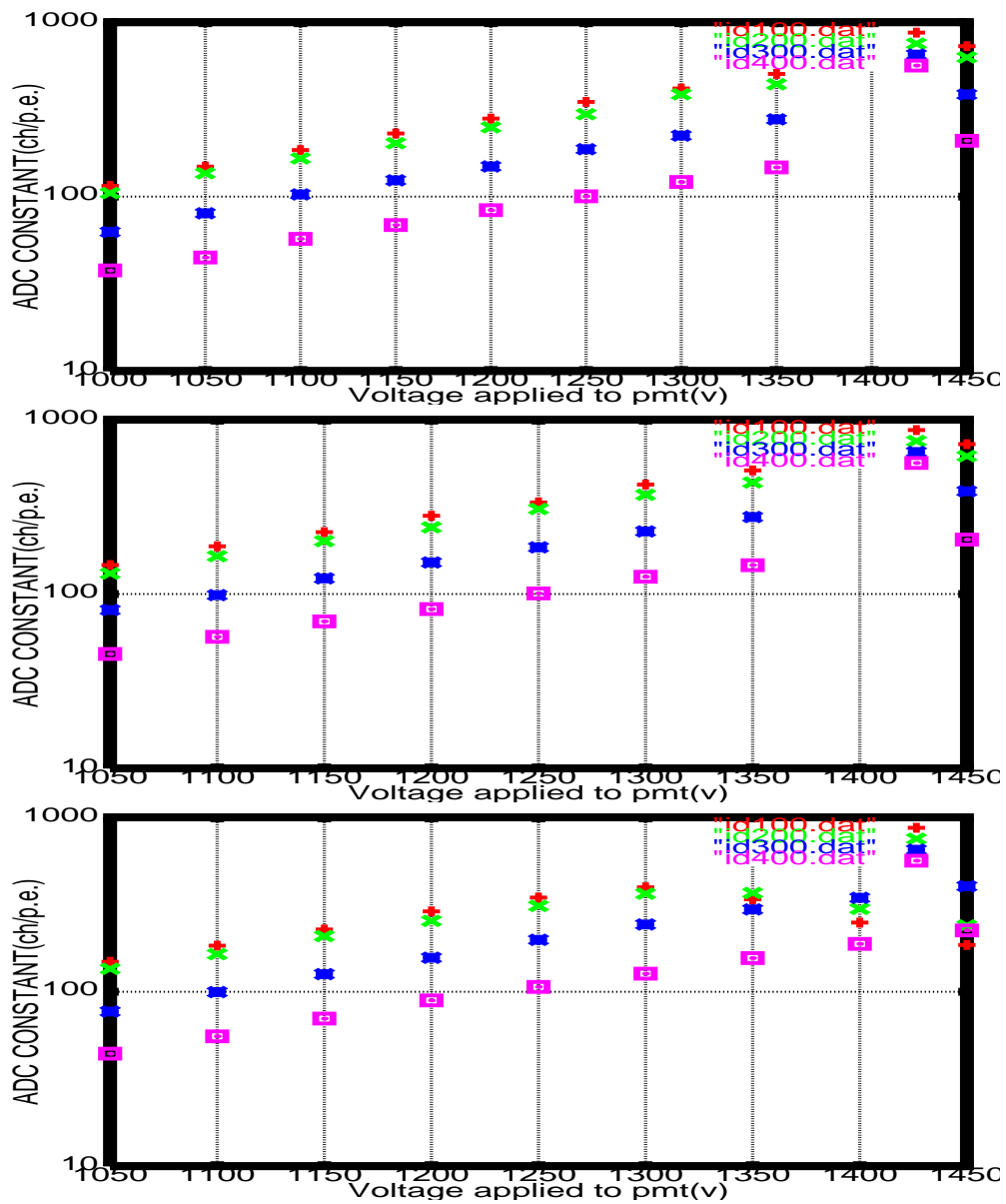


図 A.5: 4号機のカメラの ADC CONSTANT の HV 依存性。横軸は PMT に印加した電圧、縦軸は ADC CONSTANT、上から 6p.e.、10p.e.、30p.e. の入射光量で測定した。代表として4本の PMT を抜粋した。

## A.4 ライトガイドの角度依存性

ライトガイドの性質として入射角度  $33^\circ$  以上の光をカットする性質を持つ。これを確かめる為に3号機の時と同様に光に対してカメラを傾け、入射光量がどう変化するかを確かめた。結果を図 A.6 に示す。入射光量が上は  $10p.e.$ 、下は  $30p.e.$  である。縦軸は PMT 全本の入射光量の平均を示している。この図から、 $30^\circ$  前後から光量が落ち始め、入射光をカットする角度は半値幅でおよそ  $33^\circ$  である事を確認できた。また図 A.7 はカメラの中の PMT の位置によって角度依存性に変化が無いかを調べるため、カメラにおいて中央、上、下、左、右の PMT の入射光量の変化を調べた結果である。どこの場所の PMT もほぼ同じように推移しているのが分かる。

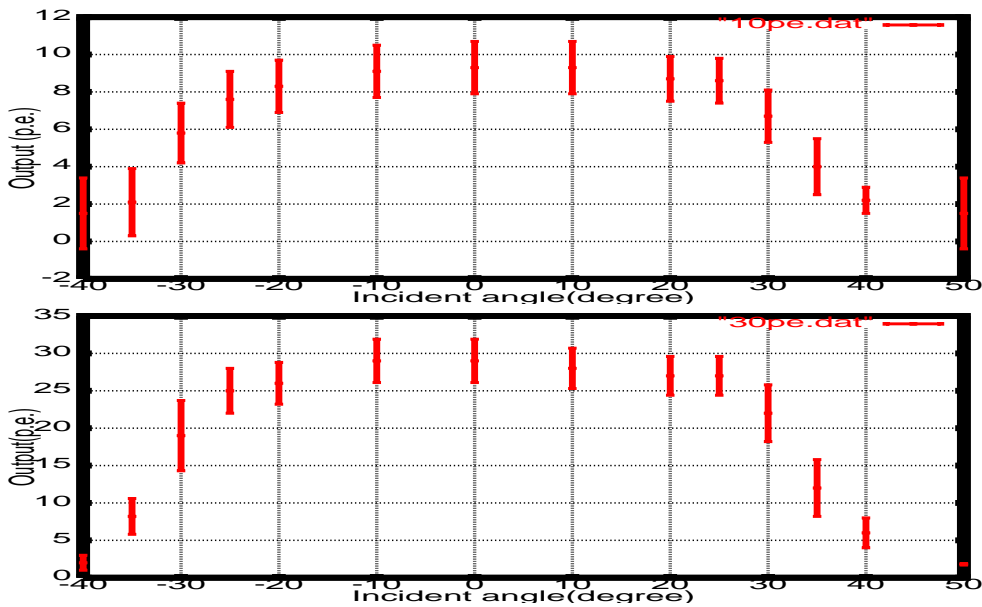


図 A.6: 4号機のカメラのライトガイドの入射光の角度依存性。横軸がLEDからの光の入射角度、縦軸が平均入射光量である。

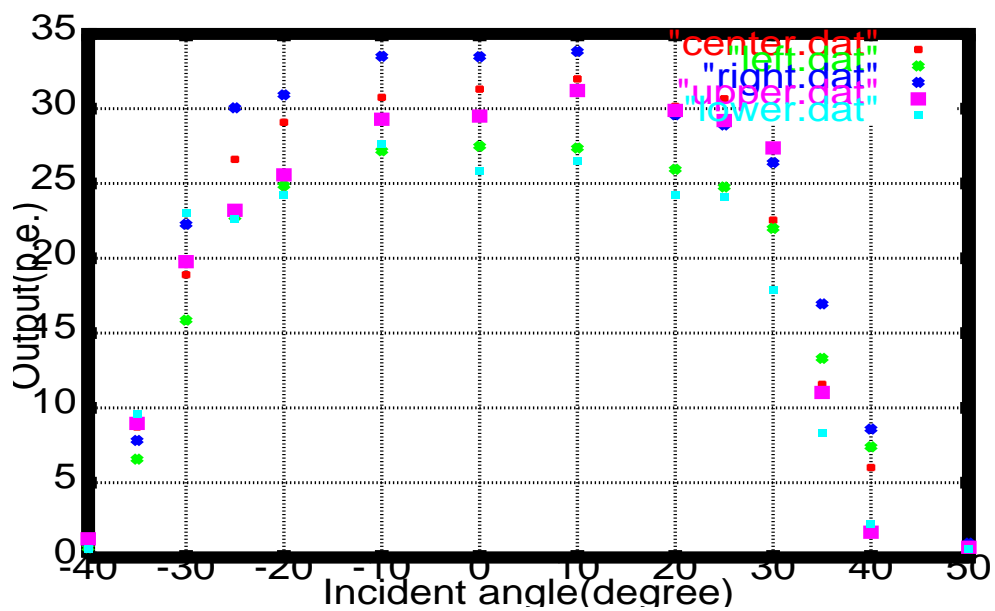


図 A.7: 4号機のカメラのライトガイドの入射光の角度依存性。カメラの中央、上、下、左、右のPMTについて入射角度に対する入射光量の変化を調べている。横軸がLEDからの光の入射角度、縦軸が入射光量である。

## A.5 ゲインの時間変動

ゲインの時間変動について述べる。3号機の実験の時と同じようにHVをPMT全本に印加した瞬間を $t = 0min$ として $10p.e.$ に相当する光を入射する。その時の出力をADCで $10000count$ 測定して、2時間までの各点でPMT全本に渡ってADC CONSTANTを調べた。0分の時のADC CONSTANTを1に規格化して変動を求めた。その結果を図A.8に示す。やはり3号機の時と同じように0分から徐々に落ち始め120分後に95%程度になった。

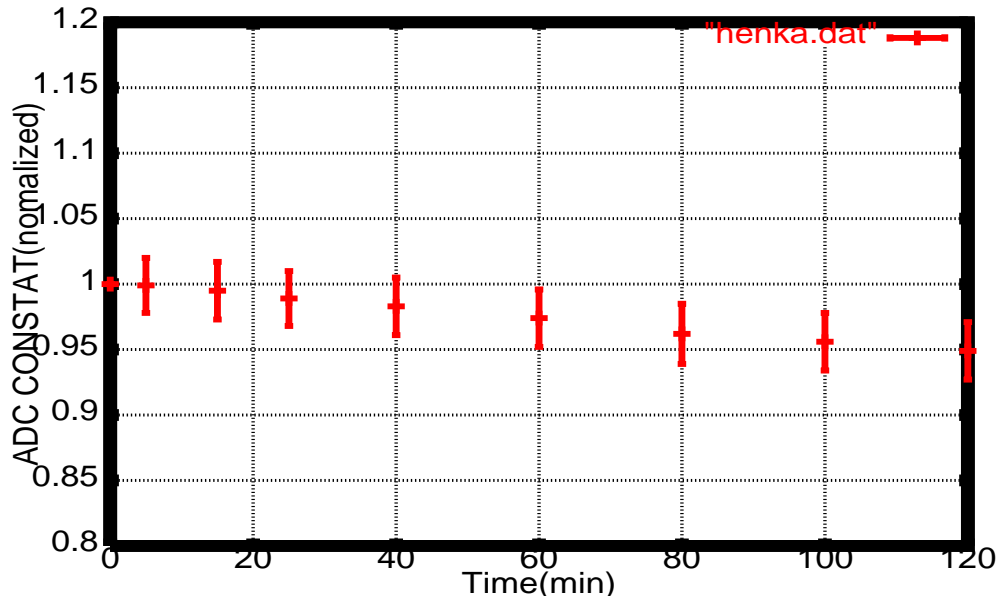


図 A.8: 4号機のカメラのゲインの時間変動。横軸がHVをPMTに印加した瞬間を0分とした時間経過、縦軸はPMT全本のADC CONSTANTの平均である。0分の時の値を1に規格化してある。



## 付録B ADC CONSTANTの ユニフォミティとHV の相関

ADC CONSTANTは先ほども述べたように本来ならキャリブレーション後なのでPMTのキャリブレーションのゲインの許容範囲3%になるはずであるがユニフォミティがおよそ5%(図B.1)になった原因を探りたい。このADC CONSTANTの平均値からのずれが何かのパラメータに有意な相関を持つかという事を考えてみると、時間分解能やリニアリティなどは無相関と思われ、相関する可能性のあるものはPMTに与えるHV値が考えられる。そこでHV値がユニフォミティに有意な相関を与えているかを相関係数 $r$ で考えてみると図B.2のように $r = 0.01$ となって、無相関である事がわかった。PMTの個々テストでゲインを3%の範囲内に抑えたが、5%に悪くなる理由は、ライトガイドを装着しているため、反射率の個体差によるものであろうと思われる。

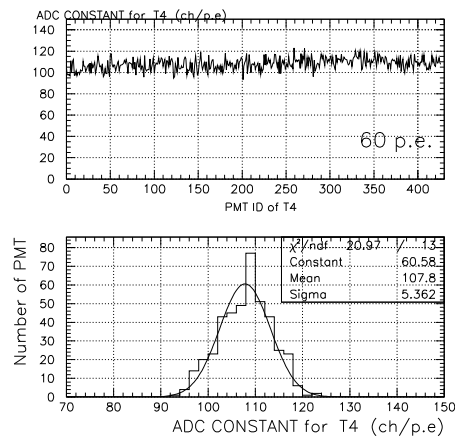


図 B.1: ADC CONSTANT のユニフォームリティ。

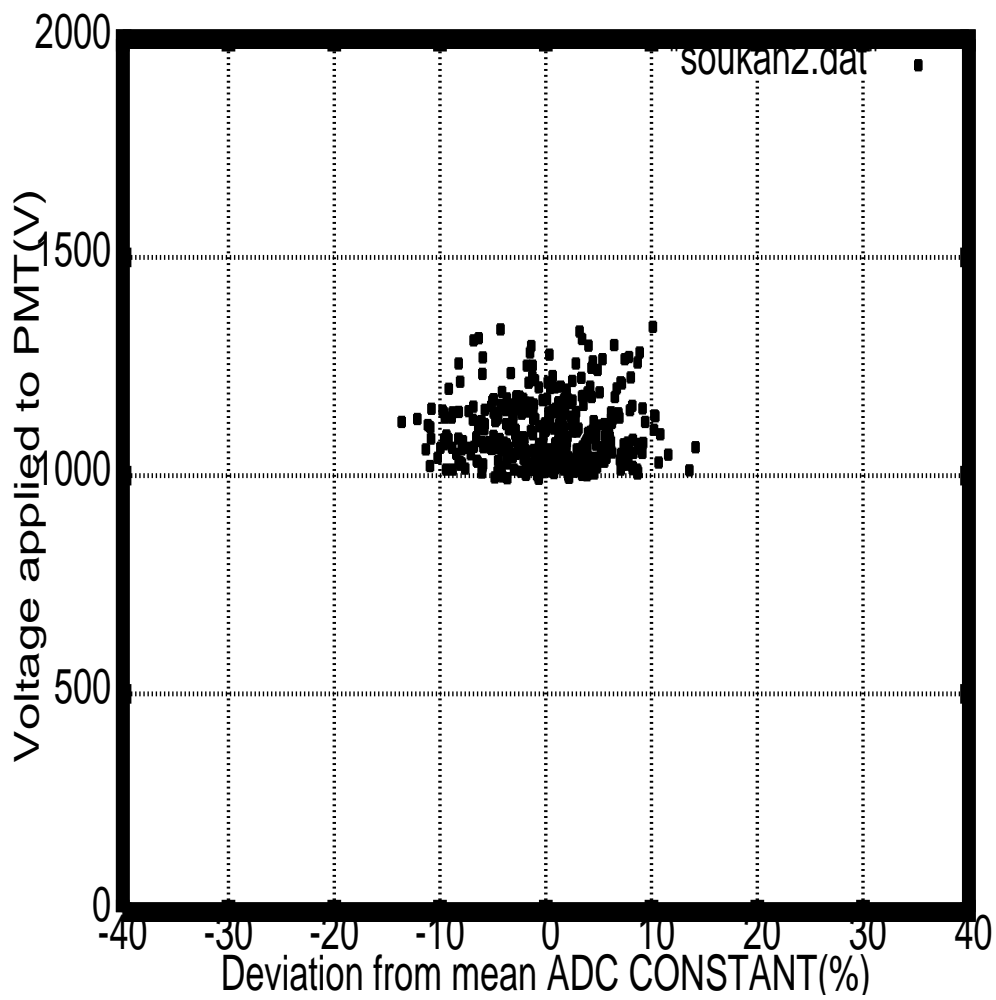


図 B.2: ADC CONSTANT の平均値からのずれと HV 値の相関。