解像型チェレンコフ望遠鏡のカメラの開発、設計、製作、及びその性能評価

東京大学 理学系研究科 修士論文
株木 重人

January 9, 2002

Abstract

CANGAROO-III 計画における 2 台目望遠鏡のカメラの開発、設計、製作、及びその性能評価について述べる。

CANGAROO-II カメラとのデザインの変更点の 1 つに、より大きな視野への変更がある。CANGAROO-II カメラでの視野は 2.7 ° であったが、今回は 4.0 ° に変更した。この変更はステレオの効率を上げるため、ON-OFF の同時観測を可能にするため、さらにより正確なシャワーイメージの取得を目的として考えられた。この変更によって、従来の観測時間を大幅に改善でき、解析の際に正確にシャワーイメージを用いることができる。

光電子増倍管 (PhotoMultiplierTube,PMT) サイズは 1/2 インチから 3/4 インチに変更した。これは 1/2 インチ光電子増倍管と 3/4 インチ光電子増倍管の口径と光電面の比を考慮すると、20 %の集光率が上がること、1/2 インチ光電子増倍管で視野 4.0 ° をカバーするとカメラの重量制限 (約 100kg) を越えてしまう可能性があることから、サイズの変更となった。ピクセルサイズは 0.115 ° から 0.168 ° となった。

光電子増倍管モジュールに関して、CANGAROO-III からは一つの光電子増倍管に対し、1 つのプリアンプ、1 つの HV チャンネルを用意することにした。この改良で、クロストークは 0.04 %になり、さらに個々の光電子増倍管の増幅率を揃え、一様な増幅率をもつカメラ面を作ることが可能になった。しかも個々の光電子増倍管の HV の制御により明るい光 (星光) の入る光電子増倍管は単体での OFF が可能になった。

さらに光電子増倍管一つ一つのデータをとり、光電子増倍管のデータベースを作った。この個々の光電子増倍管のテスト結果から、HV 値を調整することで増幅率を一様に揃えた。さらに目標とする 250-p.e. でのリニアリティの 10 %以内のずれを達成でき、このことから広いダイナミックレンジでの観測が容易になった。さらに、20-p.e. を入射した時の時間分解能は補正なしで 1ns 以内に収まり、より正確な高い精度でのキャリブレ− ションが可能であることがわかった。

光電子増倍管 427 本をカメラに設置した時の総合テストにおいて、カメラ面でのユニフォミティをテストした。入射光量 50-p.e. で± 11.1 %の範囲で一様であることを確認した。

ライトガイドのテストにおいて単体では光電子増倍管のユニフォミティが見えるもののシミュレ− ションと同じ傾向が現れた。さらにカメラの総合テストにおいての角度依存性もシミュレ− ションと同じ傾向が得られた。結果として、CANGAROO-II の時より 1.7 倍集光率が上がる。従って、エネルギー閾値を 1/1.7 倍に下げることが可能と予想される。

Contents

1 Introduction **7**
- 1.1 CANGAROO-III 計画 . . . 7
- 1.2 チェレンコフ望遠鏡による TeV 領域のガンマ線観測 . . . 9
- 1.3 CANGAROO-III 望遠鏡 . . . 17
  - 1.3.1 鏡 . . . 20
  - 1.3.2 エレクトロニクス . . . 21
  - 1.3.3 高解像撮像機 (カメラ) . . . 24

2 カメラの設計、開発 **26**
- 2.1 カメラ容器 . . . 26
- 2.2 カメラ面 . . . 28
  - 2.2.1 ライトガイド . . . 28
  - 2.2.2 ライトガイドの集光率測定 . . . 30
  - 2.2.3 カメラ面のデザイン . . . 34
- 2.3 光電子増倍管モジュ− ル . . . 36
  - 2.3.1 光電子増倍管 モジュ− ル デザイン . . . 36
  - 2.3.2 光電子増倍管の選択 . . . 38
  - 2.3.3 光電子増倍管のプリアンプ . . . 46
- 2.4 DC 変換ボ− ド . . . 49
- 2.5 高電圧供給 システム . . . 54
  - 2.5.1 高電圧 (HV) 供給 システム デザイン . . . 54
  - 2.5.2 HV コントロ− ル GUI プログラム . . . 56
- 2.6 ケ− ブル . . . 57

3 カメラの製作、評価 **58**
- 3.1 作業行程 . . . 58
- 3.2 個々の光電子増倍管のキャリブレ− ション . . . 59
  - 3.2.1 測定系 . . . 59
  - 3.2.2 HV 値の決定 . . . 61
  - 3.2.3 リニアリティ− . . . 62
  - 3.2.4 サチュレ− ション . . . 64

3.2.5 増幅率 vs HV 65
3.2.6 Time walk 補正 66
3.2.7 時間分解能 68
3.2.8 量子効率 69
3.2.9 個々の PMT の作業日程 73
3.3 全系テスト 74
3.3.1 Crosstalk 74
3.3.2 遮光テスト 79
3.3.3 キャリブレ– ション用の光源 80
3.3.4 増幅率のユニフォミティ 83
3.3.5 1-p.e. キャリブレ– ション 89
3.3.6 ライトガイドの集光率測定 91
3.3.7 LED キャリブレ– ションシステム 93
3.3.8 カンガル– 95

4 Discussion **96**
4.1 キャリブレ– ション 方法 96
4.2 For Next Camera 97

5 Conclusion **99**

A 量子効率、放射感度、陰極青感度、及び入射光のエネルギーの求め方 101

B PMT,R3479 についての諸特性 **104**

C LED の安定性について **106**

D ND フィルターの波長依存性について **108**

E カメラのエラーリスト **110**

List of Figures

1.1 Woomera 8
1.2 電磁カスケード 9
1.3 ガンマ線による空気シャワー 12
1.4 各過程ごとの大気の透過率 15
1.5 チェレンコフ光の透過率 15
1.6 シャワーシミュレーション 1 16
1.7 シャワーシミュレーション 2 16
1.8 CANGAROO-II 望遠鏡 17
1.9 ステレオ計画 18
1.10 望遠鏡 1 台と 2 台で S/N の比較 19
1.11 CANGAROO-II 鏡 20
1.12 Frontend module のディバイダー部分 21
1.13 Frontend module のディスクリ部分 21
1.14 Trigger 部分 22
1.15 CANGAROO-III 望遠鏡のエレクトロニクス 23
1.16 CANGAROO-II カメラ 25

2.1 カメラ容器-正面, 後面 27
2.2 ライトガイド 29
2.3 Winston cone 29
2.4 ライトガイドの集光率 30
2.5 Light Guide 効率テストのセットアップ 31
2.6 光電子増倍管の回転 31
2.7 Light Guide 効率 33
2.8 Nodding モード 34
2.9 カメラ面 35
2.10 CANGAROO 光電子増倍管モジュール 37
2.11 光電子増倍管の候補 39
2.12 光電子増倍管の構造 39
2.13 光電子増倍管選択のための Setup 40
2.14 1-p.e. のフィッティング 42
2.15 R3479 の 1-p.e のヒストグラム 43

2.16 光電子増倍管ダイナミックレンジ 44
2.17 TRA402s サチュレ− ション 47
2.18 プリアンプ リニアリティ− 47
2.19 プリアンプ ボ− ド回路 48
2.20 DC 変換ボードの温度変化テストのためのセットアップ 50
2.21 DC 変換ボードの温度変化 50
2.22 空冷ファンによるノイズ 51
2.23 DC 変換ボードにのるノイズ 52
2.24 DC 変換ボード 53
2.25 HV クレート 55
2.26 HV GUI 56

3.1 製作行程 58
3.2 光電子増倍管のテストのためのセットアップ 60
3.3 HV vs 増幅率 61
3.4 0-p.e. から 1000-p.e. までのリニアリティ− 62
3.5 リニアリティーのフィッティング曲線 63
3.6 サチュレ− ションポイント 64
3.7 Gain ns HV 65
3.8 入射光量によるタイミング分布 66
3.9 タイムウォ− ク補正 67
3.10 20-p.e. の時間分解能 68
3.11 量子効率の波長依存性 70
3.12 量子効率の skb 依存性 71
3.13 光電子増倍管 450 本分の 400nm 対する量子効率のヒストグラム 72
3.14 テスト行程 73
3.15 クロスト− ク テストのセットアップ 74
3.16 クロスト− クのヒストグラム 75
3.17 クロスト− ク マップ 75
3.18 中央のまわりのクロスト− クのヒストグラム 76
3.19 中央のまわりのクロスト− クマップ 76
3.20 グル− プごとのクロスト− クのヒストグラム 77
3.21 グル− プごとのクロスト− クマップ 78
3.22 遮光テスト時の RMS 79
3.23 CCD テストのセットアップ 80
3.24 光を直接入射した時の CCD イメ− ジ 81
3.25 LED にすりガラスをつけ、光入射した時の CCD イメ− ジ . . 82
3.26 ユニフォミティテストのセットアップ 83
3.27 光電子増倍管 マップ 84
3.28 すりガラスなしの時のユニフォミティ 85
3.29 すりガラスなしの時のカメラ面 86

3.30 すりガラスを付けた時のニフォミティ 87
3.31 すりガラスをつけた時のカメラ面 88
3.32 中心の光電子増倍管 (id 20) の 1-p.e. のヒストグラム 89
3.33 1p.e. の ADC チャンネル 90
3.34 カメラの角度依存性 91
3.35 カメラの角度変化による光量変化 92
3.36 LED システム 93
3.37 LED キャリブレーションシステム 94
3.38 カンガルー のカメラ面 95

A.1 青感度フィルター 103

B.1 R3479 のカタログ 104
B.2 PMT の波長依存性 105

C.1 LED の時間変動 106
C.2 LED の温度変動 107

D.1 ND フィルターの透過率 108
D.2 実験で用いた ND フィルターの透過率 109

List of Tables

1.1 ADC の特徴 22
1.2 光電子増倍管 (R4124 と R3479) の特性 24

2.1 カメラの形状 26
2.2 ライトガイド特性 28
2.3 光電子増倍管の候補の諸特性 45
2.4 アンプの候補 46
2.5 レギュレ− タ− の特性 53
2.6 DC フィルタ− の特性 53
2.7 HV システム 54
2.8 ケーブル類 57

5.1 カメラについてのまとめ 100

D.1 ND フィルターの透過率 109

E.1 エラ− リスト 110

Chapter 1

Introduction

1.1 CANGAROO-III計画

CANGAROO(Collaboration of Australia and Nippon for a Gamma Ray Obserbatory in the Outback) 計画とは、南天における天体からの超高エネルギーガンマ線を大気チェレンコフ望遠鏡を用いて検出することを目的とした計画である。このプロジェクトはオーストラリアと日本の国際共同研究であり、CANGAROO の観測は南オーストラリアの南緯 31° 06'、東経 136° 47'、海抜 160m の Woomera で行う。Woomera は晴天率が 80 % と非常によく、また光害も少なくチェレンコフ光の観測に非常に適している。さらに南天をカバーする唯一のイメージングチェレンコフ望遠鏡である。
CANGAROO-I 計画は 1992 年からスタートし、口径 3.8m のチェレンコフ望遠鏡を用いて既に超新星残骸やパルサーネビュラ等からの TeV 領域のガンマ線の検出に成功している。
CANGAROO-II 計画は 1999 年からスタートし, 口径 7m、焦点距離 8m のチェレンコフ望遠鏡を用いて観測を始め、2000 年には 10m に拡張した。CANGAROO-II 望遠鏡では 300GeV まで観測が可能になった。
CANGAROO-III プロジェクトは、この 10m の反射望遠鏡を 4 台建設し、ステレオ観測を行う計画である。さらに閾値も 100 ~ 150GeV に下げることを目指している。4 台でのステレオ観測は 2004 年開始を目標としている。

図 1.1: CANGAROO Project の観測地、南オーストラリア、Woomera。南緯 31 ° 06’、東経 136 ° 47’、 海抜 160m。

1.2 チェレンコフ望遠鏡による TeV 領域のガンマ線観測

宇宙ガンマ線はエネルギーが高くなるとフラックスが急激に減少するため衛星での観測には限界がある。また衛星は重量制限から、最大で $1m^2sr$ の有効面積しか稼げない。一方で検出に大気を用いた大気チェレンコフ光観測での有効面積はおよそ 10^5m^2 になるため衛星に比べ有用になる。以下に理由を述べる。高エネルギーガンマ線が大気に入射し、ガンマ線のエネルギーが数 10GeV を越えている場合、大気と相互作用し電磁シャワーを作る。このシャワーの出すチェレンコフ光を CANGAROO 望遠鏡で観測する。

ここで 1TeV のエネルギーのガンマ線が入射した場合を簡略化して考える。大気に入射したガンマ線は大気中の原子核との相互作用により電子、陽電子を生成する。さらに電子、陽電子は制動放射をして、新たにガンマ線を放射する。この過程を繰り返すことによりシャワーは発達し、電磁カスケードを形成する (図 1.2,[1],[2])。シャワーは制動放射と電離損失が等しくなるエネルギー (臨界エネルギー) まで、発達する。

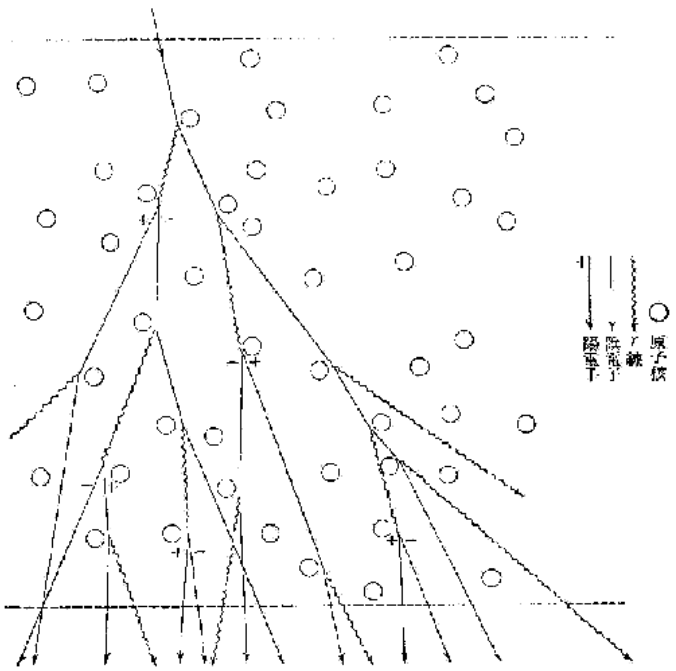

図 1.2: ガンマ線による電磁カスケードの模式図。

制動放射

制動放射の断面積は Bethe と Heitler によって計算されている [3]。

$$\begin{aligned}\sigma(E_e, v)dv &= 4\frac{Z^2e^2}{\hbar c}(\frac{e^2}{m_ec^2})\frac{dv}{v} \\ &\times \left[1+(1-v)^2-\frac{2}{3}\ln(184Z^{-\frac{1}{3}})+\frac{1}{9}(1-v)\right] \qquad (1.1)\end{aligned}$$

ここで E_e は入射する電子、陽電子のエネルギー、v は放射するガンマ線のエネルギー E_γ と E_e の比 $(\frac{h\nu}{E_e})$、Z は媒質の原子番号である。この式から長さ x 当たりのエネルギー損失は

$$-\frac{dE}{dx} \simeq \frac{E}{X_0} \qquad (1.2)$$

と表せる。ここで X_0 は放射長である。

$$\frac{1}{X_0} = 4\frac{Z^2e^2}{\hbar c}\frac{N}{A}(\frac{e^2}{m_ec^2})^2\ln(184Z^{-\frac{1}{3}}) \qquad (1.3)$$

A：媒質の原子量

N：媒質の数密度 (1.4)

$1/X_0 \propto Z^2$ の関係があり、上式から $(\frac{dE}{dx})_{brems} \propto Z^2$ であることがわかる。

電子対生成

制動放射の逆過程として、入射ガンマ線のエネルギーが電子の静止質量の 2 倍

$$2mc^2 \simeq 1.02MeV \qquad (1.5)$$

を越えると、原子核のクーロン場で陽電子と電子の対を生成することができる。制動放射の過程の相互作用と相似であるため、断面積の大きさはほぼ等しい。正確な断面積は Bethe と Heitler によって計算されていて [3]、極めて高いガンマ線による対生成の断面積は

$$\begin{aligned}\sigma(h\mu, u)du &= 4\frac{Z^2e^2}{\hbar c}(\frac{e^2}{m_ec^2})du \\ &\times \left[u^2+(1-u)^2+\frac{2}{3}(u(1-u))\right]\ln(184Z^{-\frac{1}{3}})-\frac{1}{9}u(1-u)] \qquad (1.6)\end{aligned}$$

で与えられる。ここで u は生成された電子、または陽電子のエネルギー E_e と、入射ガンマ線のエネルギー $h\nu$ の比で $u = E/h\nu$ である。物質 $1g/cm^2$ 当たりの電子対生成の確立は

$$-\frac{dE}{dx} \simeq \frac{7}{9}\frac{E}{X_0} \qquad (1.7)$$

となり 1 放射長当たり 1 回程度、対生成が起きることがわかる。

電離損失

荷電粒子が物質中を通過する際にクーロン力で物質やプラズマ中の電子を跳ね飛ばしエネルギーを失っていく。これを電離損失という。速度 β、電荷 ze の荷電粒子、I を束縛電子のイオン化ポテンシャルとしたとき、電離損失によるエネルギー損失 [2] は、

$$-(\frac{dE}{dx})_{ion} = 4\pi\frac{NZ}{A}(\frac{ze^2}{mc^2}\frac{mc^2}{\beta}\ln(\frac{mv^2}{I})) \tag{1.8}$$

ここで N はアボガドロ数である。$(\frac{dE}{dx})_{ion} \propto Z$ であることがわかる。

臨界エネルギー

制動放射では $(\frac{dE}{dx})_{brems} \propto Z^2$ の関係、電離損失では $(\frac{dE}{dx})_{ion} \propto Z$ の関係があるのでエネルギー損失はエネルギーの高いところでは、制動放射が支配的で、低エネルギー側では電離損失が支配的となる。両者が等しくなるエネルギーを臨界エネルギー E_c として

$$\frac{(\frac{dE}{d\xi})_{brems}}{(\frac{dE}{d\xi})_{ion}} \simeq \frac{(Z+1.2)E(100MeV)}{800} = \frac{E}{E_c} \tag{1.9}$$

ここで E_c をさらに簡略化し、

$$E_c \sim \frac{800MeV}{Z} \sim 100MeV \tag{1.10}$$

ここで大気の原子番号をおよそ 8 とした。

シャワーの最大発達点

シャワーの最大発達点は (T_{max}) は、シャワー理論 [1] によると、

$$T_{max} = ln\frac{E_0}{E} + \frac{1}{2} \tag{1.11}$$

と表せるので

$$T_{max} \simeq ln\frac{1000000}{100} = 2.3 \times 4 \sim 10X_0 \tag{1.12}$$

1 放射長は、およそ

$$1X_0 = 30g/cm^2 \tag{1.13}$$

であるから

$$T_{max} \sim 300g/cm^2 \sim 0.3atm \tag{1.14}$$

大気圧が約 0.3 気圧の高度は約 10km であるのでおよそこの高度でシャワーは最大になる (図 1.3)。

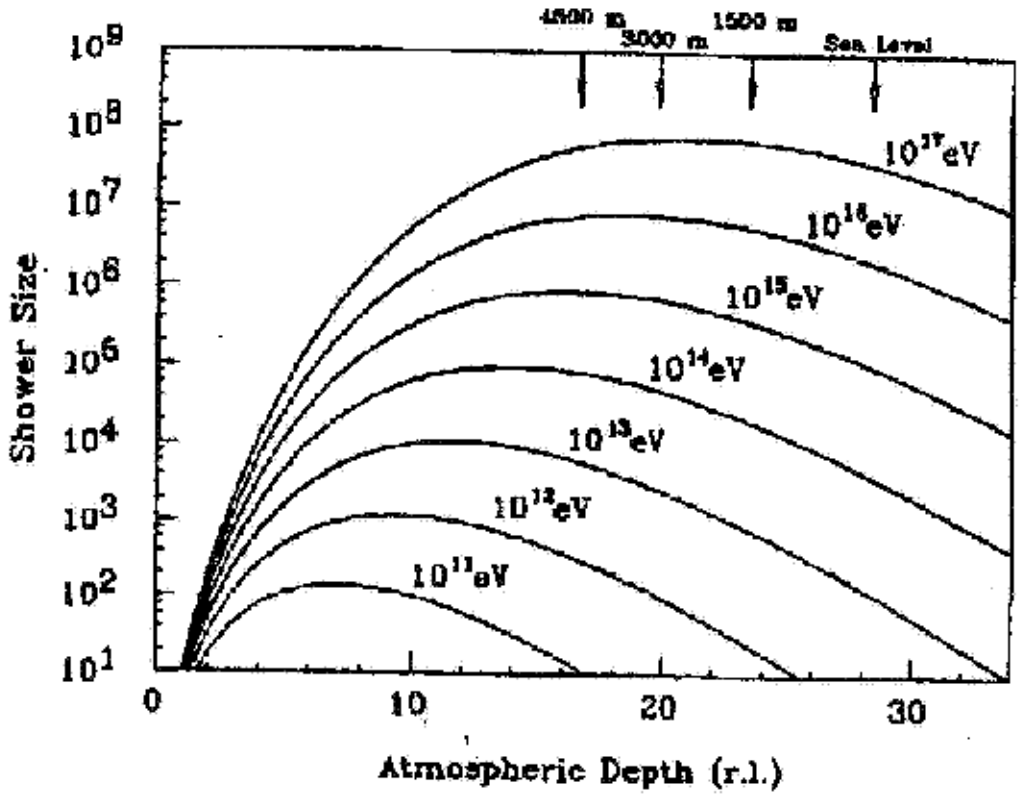

図 1.3: ガンマ線による電磁カスケードが最大になる [5]。縦軸が平均の荷電粒子数、横軸は放射長を単位とする大気上部からの厚さ。

チェレンコフ光

これらから、約 10km 程の高さで発生するチェレンコフ光を主に見ていることになる。チェレンコフ光は電磁波が屈折率 n の媒質中を高速で通過する際に電磁波を放出する現象で、

$$\cos\theta = \frac{1}{\beta n} \tag{1.15}$$

n：屈折率

と表せる。屈折率 [6] は、

$$n = 1.0 + 0.000296\frac{x}{1030g/cm^2}(\frac{T}{273.2K})^{-1} \tag{1.16}$$

チェレンコフ光の放射による荷電粒子の単位移動距離、及び単位角振動数あたりの粒子のエネルギー損失は、次式で表せられる。

$$-\frac{d^2E}{dxd\omega} = \frac{Z^2e^2}{c^2}(1 - \frac{1}{(n\beta)^2})\omega \tag{1.17}$$

$$n\beta > 1$$

ここで ω はチェレンコフ光の角振動数、Z は電荷素量 e を単位とした粒子の電荷である。さらに、距離 l を走った場合、λ_1 ~ λ_2 の波長域で発生する光子数 N は $\lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$ であるから、チェレンコフ光の個数は

$$\begin{aligned} N &= \int_{\omega_1}^{\omega_2} d\omega \int_0^l dx \frac{-\frac{d^2E}{dxd\omega}}{\hbar\omega} \\ &= 2\pi\alpha l Z^2(1 - \frac{1}{(n\beta)^2}) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{d\lambda}{\lambda^2} \\ &= 2\pi\alpha l Z^2(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2})(1 - \frac{1}{(n\beta)^2}) \end{aligned} \tag{1.18}$$

ここで $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$ は微細構造定数であるこれより、地上付近で β ~ 1 の電子が 1m 走行した場合、300nm ~ 550nm の波長域で約 40 個の光子を出す。

10km の空気に屈折率はおよそ、n ~ 1.0001 なので、チェレンコフ光の放出角度 θ_c は進行方向に対して、

$$\theta_c = \cos^{-1}(\frac{1}{n}) \tag{1.19}$$

と表せる。

$$\theta_c \sim 0.014rad \tag{1.20}$$

地上では

$$10km \times \theta_c \sim 140m \tag{1.21}$$

にリング状に広がる。したがって、観測面積は

$$S = \pi(140)^2 \sim 10^5 m^2 \tag{1.22}$$

となる。これは宇宙に $10^5 m^2$ の検出器を置いたことに相等する。地上に届いたチェレンコフ光は 5ns 程の時間的広がりを持つ。スペクトルは λ^2 に反比例するが、チェレンコフ光は大気中において、分子や微粒子からレーリー散乱、ミー散乱を受ける (図 1.4)。レーリー散乱は

$$\frac{dN_\gamma}{dl} = -\rho \frac{N_\gamma}{X_R} (\frac{400nm}{\lambda})^4 \tag{1.23}$$

ここで X_R は平均自由行程で波長 400nm の光に対して $2974\mathrm{g}/cm^2$ を持つ。散乱角分布は $\propto (1 + \cos^2\theta)$ である。ミー散乱は光の波長と同程度の大きさをもつ、ダストやエアロゾルに対して起こる。

$$\frac{dN_\gamma}{dl} = -\frac{N_\gamma}{L_M} e^{-h/H_M} \tag{1.24}$$

ここで H_M=1.2K はエアロゾル分布のスケールハイトである。L_M ~ 14km であり、散乱角分布は

$$\frac{d^2N}{dld\omega} = \frac{dN_\gamma}{dl} 0.8 e^{-\theta}/\theta_M \tag{1.25}$$

以上の吸収散乱を踏まえ、大気の散乱、吸収などのシミュレーションができるプログラム、MODTRAN(MODerate resoution TRANsmittnace) を用いて計算した結果を示す ([7]、[8], 図 1.4)。

この図からレイリー散乱による λ^{-4} は短波長側で効いてくるが、ミー散乱のオゾンや水蒸気、さらにその外側で効いてくる。よってチェレンコフ光は短波長側は大気による吸収を受けるため 300nm ~ 600nm のスペクトルを主に持つと考えて良い (図 1.5)。検出器には高い時間分解能を持ち、UV に感度があるという特性が要求される。以上のような特性を持つ検出器として適しているのは光電子増倍管である。さらに 1TeV の電磁シャワーはおよそ 4° に広がる (図 1.6,1.7)。チェレンコフ望遠鏡のカメラの視野はおよそ 4 ° 必要であることがわかる。

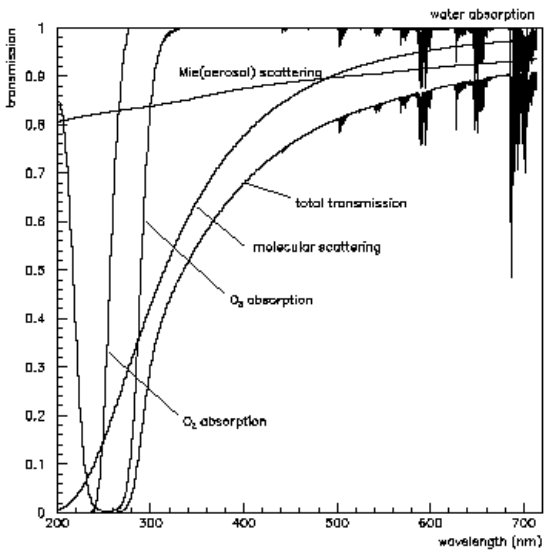

図 1.4: 各過程ごとの大気の透過率 [8]。酸素、オゾン、分子、エアロゾルの透過率がプロットされている。

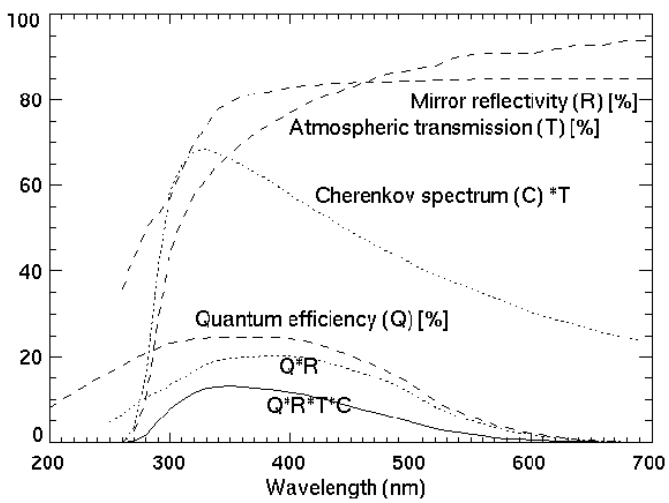

図 1.5: チェレンコフ光の透過率。ミラーの反射率、大気の散乱吸収、光電子増倍管の量子効率を含めたもの

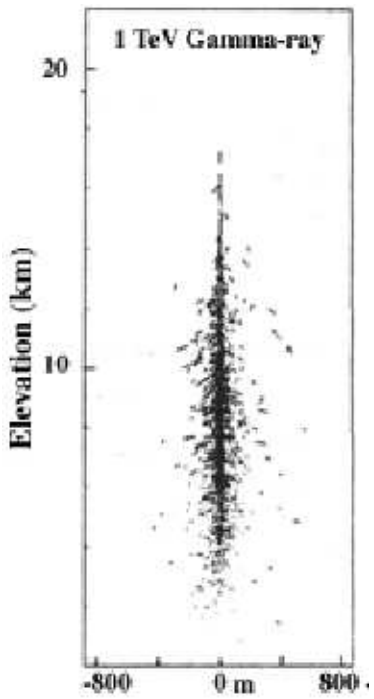

図 1.6: シャワーのシミュレ− ション [9]。1TeV のガンマ線が入射した時にシャワ− の発達。

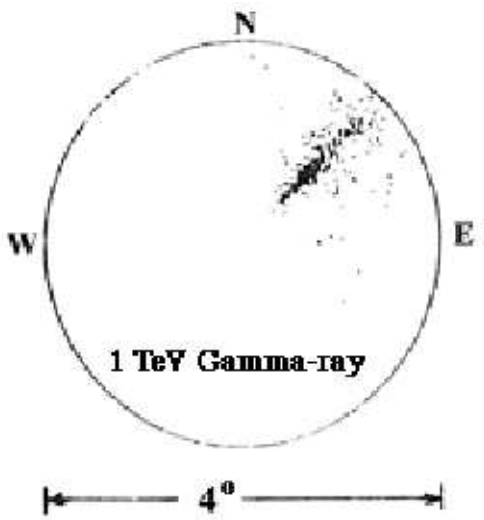

図 1.7: 図 1.6 を 4 ° の視野で捉えたもの。

1.3 CANGAROO-III 望遠鏡

CANGAROO-III 計画は CANGAROO-II 望遠鏡 (図 1.8) を含めて計 4 台でステレオ観測することを目的とする。

現在の衛星の観測は、EGRET 検出器が 30GeV までの観測結果を出している。大気チェレンコフ望遠鏡の観測領域は数 100GeV 以上というエネルギー領域で、未だ未開拓の分野である。この未だ埋まっていないエネルギー領域を埋めるべく、ステレオで観測することによって、100GeV 領域のγ 線の観測を行い、天体による高エネルギー 現象について研究する予定である (図 1.9)。2002 年には 2 台目の望遠鏡を建設する。

図 1.8: CANGAROO-III 計画の 1 台目の口径 10m 望遠鏡 (CANGAROO-II)。この他に 3 台建設する予定である。

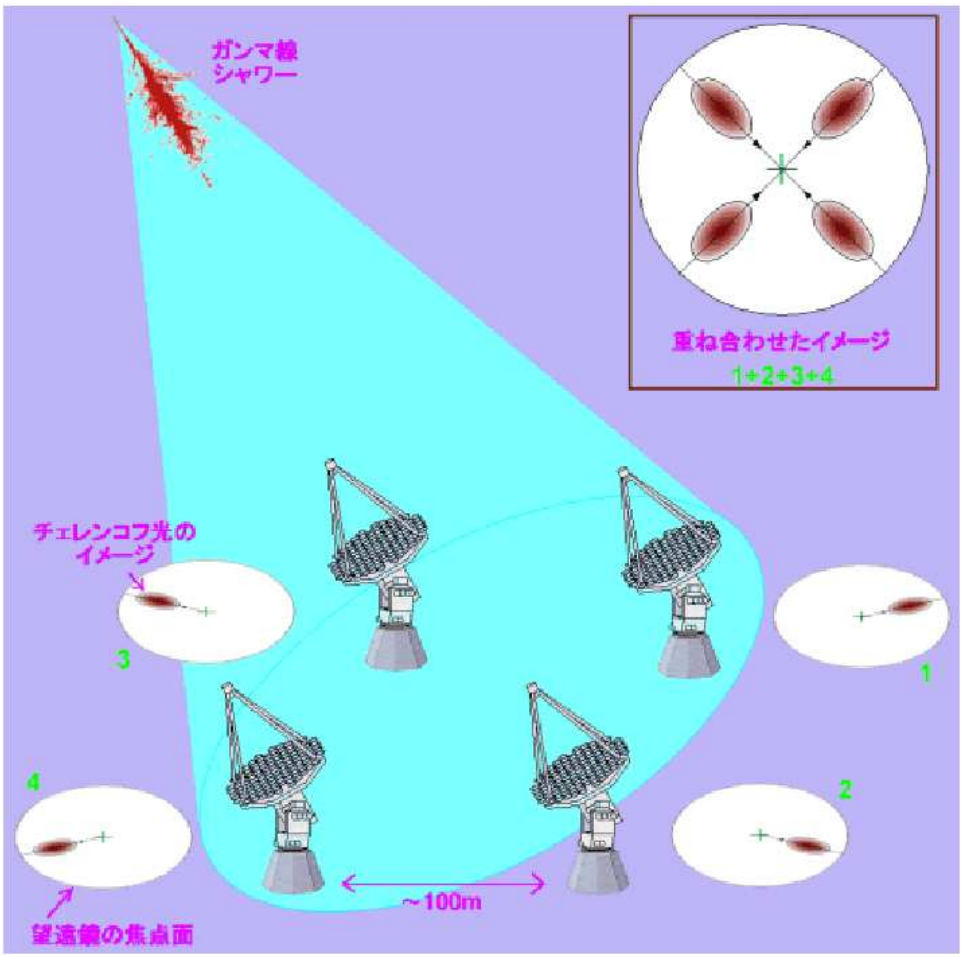

図 1.9: CANGAROO-III 計画、4 台のステレオ観測、シャワーイメージを 4 つ重ねると、到来方向、発生高度がイベントごとにわかる。

ステレオ観測は以下の特徴がある [10]。

- 1 台ではシャワー軸に対して、1 次元の到来方向の情報が, 2 台では 2 次元の情報となる。このため、イベントごとに到来方向を決定でき、角度分解能が向上する。シャワーの発生高度の逆算が可能なことから個々のガンマ線のエネルギー決定精度が向上する。天頂からのシャワーの場合、角度分解能は 200GeV で 0.2 ° になる予定である。
- ステレオ観測は 4 台の望遠鏡によるシャワ− イメージング情報の増加によりイメ− ジングの精度が向上し、バックグラウンドとの分離能力が向上する (図 1.10)。
- ステレオ観測は複数台の望遠鏡によるコインシデンスを必要とするため、1 台による観測と比べて有効面積が若干減少してしまう。2 台の望遠鏡を 100m 離した時の有効面積は $2.4\times10^4 m^2$ となる。

以上を踏まえ、目標として 100 ~ 200GeV のエネルギー領域の観測を目指して、さらに Crab100TeV の観測を可能にすることを目標に、今回の望遠鏡は設計されている。

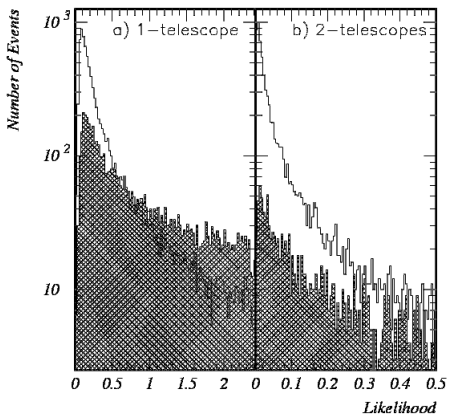

図 1.10: 望遠鏡 1 台と 2 台での S/N の比較。白の部分がガンマ線、網かけの部分が陽子。左図が 1 台の場合、右図は 2 台でステレオ時。S/N が良くなっていることがみてとれる。[10]。

1.3.1 鏡

現在、CANGAROO-II の主鏡は口径 10m で、114 枚の小型鏡 (図 1.11) を放物面上に並べた複合鏡となっている。放物面鏡は平面で光が入射した時、光路差によるずれが同じという特性のため、時間分解能が高い。10m 鏡は非常に大きいため、問題点の一つに自重による変形が上げられる。しかし、設置された小型鏡は丈夫な CFRP(Carbon Fiber Reinfoced Plastic、炭素強化繊維プラスティック) 製の鏡で、直径 80cm、5.3kg と非常に軽量である。表面はアルミシ− トを用い、さらにフッ素樹脂塗料のコーティングがしてある。反射率はおよそ 80 %である。小型鏡の焦点面での像の広がりは、平均で約 ~ $0^\circ.1$(FWHM) である。主鏡の全体による像の大きさは $0^\circ.14 \pm 0^\circ.01$ (FWHM) である。これは周差及び焦点距離のばらつきによる。

小型鏡の裏には 2 基のスッテッピングモータが付いており、主鏡の中心から見て、動経方向と動経方向に対し直角に動き、焦点の調整が可能である。

CANGAROO-III では GFRP(Glass Fiber Reinfoced Plastic) を用い、像の広がりは $0^\circ.08$ 以内に収まる予定である [11]。

図 1.11: CANGAROO-II で用いているミラー。反射率は 80 %を越えている。

1.3.2 エレクトロニクス

CANGAROO-III においてのエレクトロニクスについて説明する ([12],[13])。

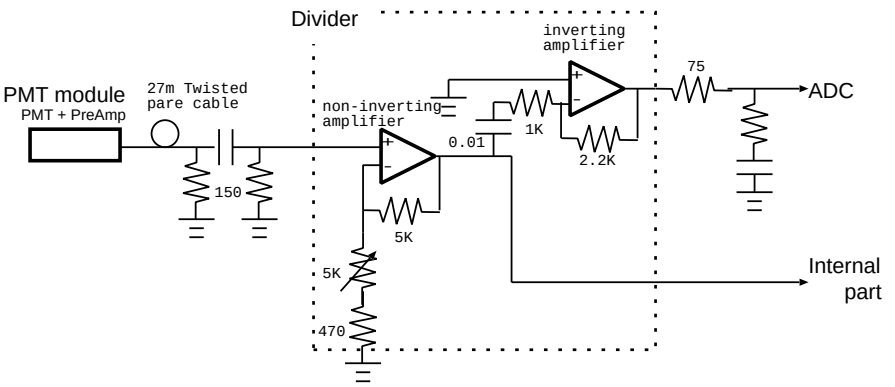

図 1.12: フロントエンドモジュー ルのディバイダー 部分。

光電子増倍管からの信号は PreAmp で増幅したのち 27m のツイストペアケー ブルでフロントエンドモジュー ルまで送る。このフロントエンドモジュー ルは 16 チャンネルの処理ができる。フロントエンドモジュー ル内では信号はディバイダー により 2 つにわけらる (図 1.12)。一つは ADC(表 1.1) へ送る信号を作り、もう一つは内部でさらに処理される (図 1.13)。内部にきた信号

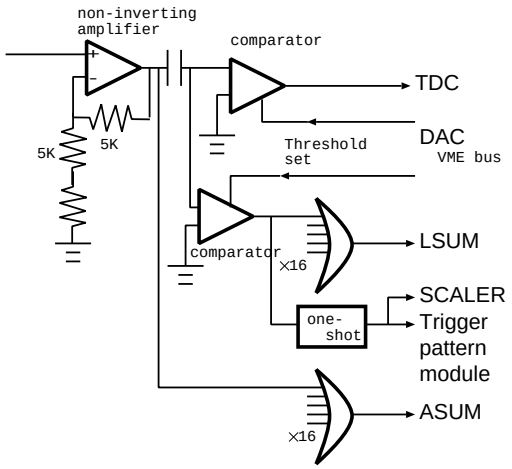

図 1.13: ディバイダー部分から先の回路図

はさらに 2 つに分けられる。一つは ASUM(Analog Sum) への信号で、これ

は 16 本分のアナログ信号の和をとる。もう一方の信号はもう一度 2 つに分けられ、一つは multi hit TDC への信号となる。TDC への信号は、コンパレー ター で閾値を DAC によって決めることができ、DAC 値は VME bus 経由で外部から読めるようになっている。もう一つは LSUM(Logic Sum), スケーラー、トリガーパターンモジュールへの信号となる。LSUM は同じく 16 本のロジック信号の足し合わせである。この信号はコンパレーターの閾値を越えた時に出力する信号である。そしてカメラ中心の光電子増倍管の LSUM を

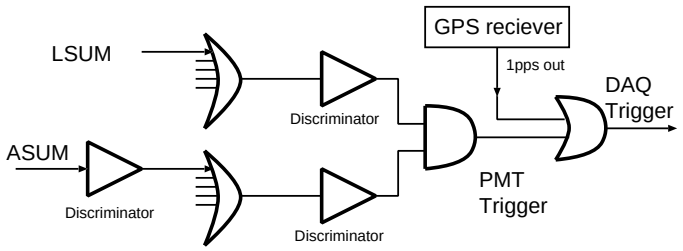

図 1.14: トリガー部分のブロックダイアグラム

足し合わせディスクリミネー ター に通す (図 1.14)。この情報は中心部のトリガー 領域においてチェレンコフ光を捉えた光電子増倍管が何本あったかを示す。さらに ASUM16 本分でディスクリミネーターに通し、この出力をさらに足し合わせディスクリミネーターにかける。これと、GPS トリガーとコインシデンスをとり DAQ トリガーとする (図 1.15,[14])。

Charge ADC
VME 9U size, A24D16/D32
16ch × 2/board × 14board
Internal 150ns delay line chip/ch
ADC chip 16bit /ch
読出し 1ch または 2ch 同時 (10-20μs/board)
0.09pC/ADC ch

表 1.1: ADC の特徴。[15]

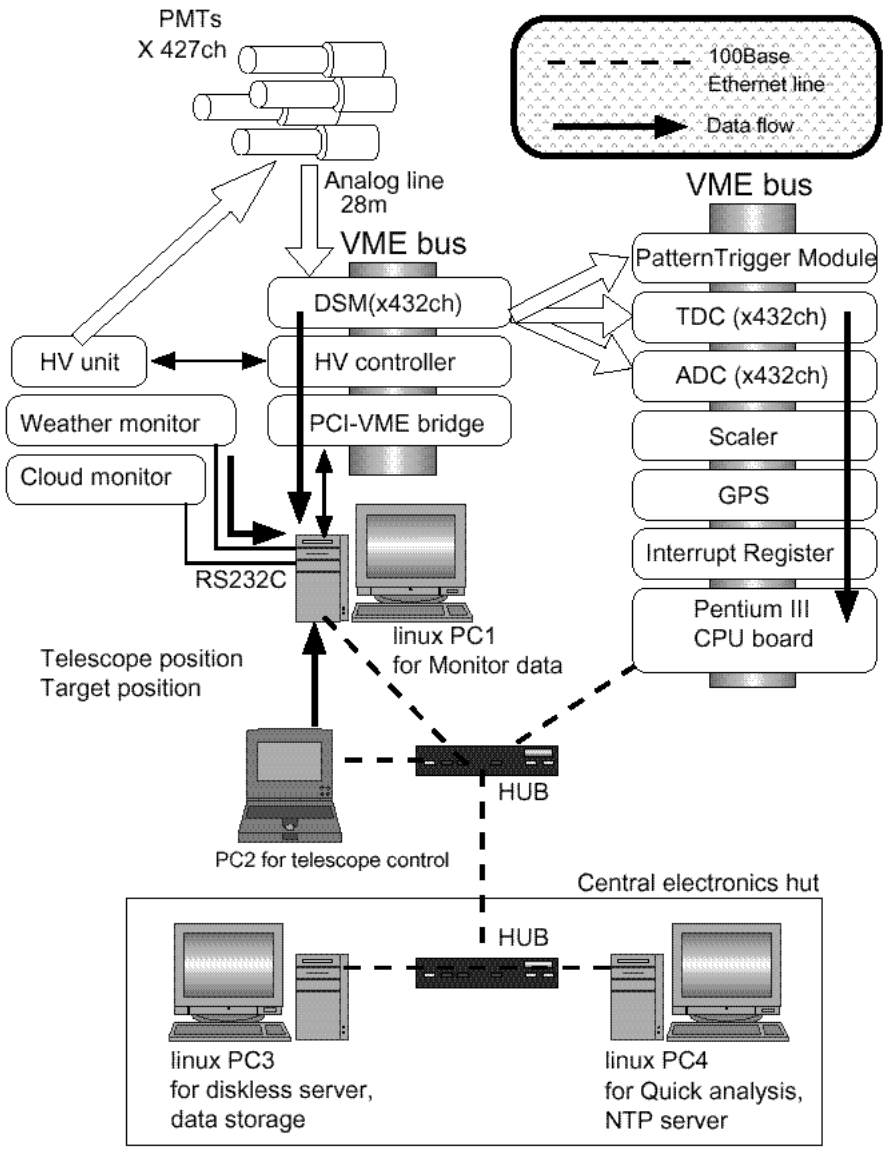

図 1.15: CANGAROO-III で用いているエレクトロニクスのダイアグラム。[13],[14]

1.3.3 高解像撮像機 (カメラ)

現在、CANGAROO-II のカメラは 1/2 インチ光電子増倍管 (R4124,HAMAMATSU) を 552 本用いている。この光電子増倍管はこのカメラの視野は 2.7° で、ピクセルサイズは 0.115 ° である (図 1.16)。R4124 は UV-window になっていて、紫外線の波長領域まで感度がある。そのため、300 ~ 350nm にピークがあるチェレンコフ光の検出に適している。チェレンコフ光は約 5ns の幅を持っているが、この光電子増倍管の電子の走行時間分散 (Time Transit Spread, 以下 T.T.S.) は 0.5ns で上昇時間 (rise time) は 1.1ns あり、十分な時間分解能をもっている。

CANGAROO-III のカメラは 3/4 インチの光電子増倍管 (R3479、HAMAMATSU)、427 本からなるカメラを用いて放物面鏡からの光を捉える。カメラは約 4 ° の視野を持ち、ピクセルサイズは 0.168 ° ある。R3479 もまた UV-window である。T.T.S は 0.36ns、rise time は 1.3ns で、R4124 と同様に時間分解能は十分にある (表 1.2)。

カメラには重量制限があり、ステイ (カメラを支える 4 本の柱、図 1.8) の歪みが数 mm 以下 (カメラピクセルサイズの約 1/10) という条件が要求される。これはカメラの重量が約 100kg 程度であれば良い。

光電子増倍管には集光率を上げるためにライトガイドをつけてある。これにより光電子増倍管間にできるデッドスペースを無くすために用意した。

本論文で示す内容は、上記の次に建設する 2 台目の望遠鏡のカメラ部分についての開発、設計、製作、性能評価である。次章から詳しく述べていく。

光電子増倍管 **R4124** と **R3479** の比較 [**16**]

Model	R4124	R3479
Window size	φ 13.5mm ± 0.5 (1/2 inch)	φ 18.6mm ± 0.7 (3/4 inch)
Photocathode material	Bialkali	Bialkali
Photocathode size	φ 10mmMIN.	φ 15mmMIN.
Window	UV	UV
Dynode structure	line	line
No. of stages	10	8
Rise Time	1.1ns	1.3ns
T.T(電子走行時間)	12ns	14ns
T.T.S	0.5ns	0.36ns
gain	1.1×10^6 at 1000V	1.7×10^6 at 1700V

表 1.2: R4124 と R3479 の諸特性。CANGAROO-II で用いている光電子増倍管 (R4124) と次期カメラの光電子増倍管 (R3479) の特性を比較した。どちらもラインフォーカス型で時間分解能が良く、光電面は紫外の波長まで感度がある UV window になっている。

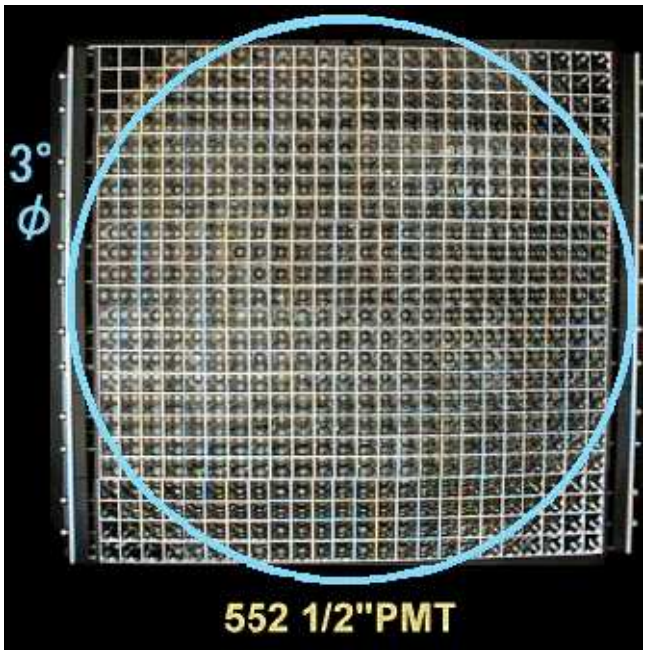

図 1.16: CANGAROO-II のカメラ面。建設当初は光電子像倍管 512 本のが入っていたが、4 隅を拡張して 552 本になった。

Chapter 2

カメラの設計、開発

2.1 カメラ容器

カメラのサイズは直径 800mm、長さ 1000mm(表 2.1) で、鏡から 8m の距離の所に設置する。カメラ容器のサイズの制限は、主鏡に対し光が垂直に入射した場合、カメラ容器によって遮られるためであり鏡の直径に合わせてカメラ面の直径は 800mm となっている。そのため、カメラ容器の真下に位置する鏡は設置されておらず、カメラのキャリブレ− ション用の青色 LED が設置してある。

カメラの重量制限についてであるが、この制限は重量によるステイの歪みが数 mm 以下という要請から決まる。この重量は設計上では約 100kg である。カメラ容器の材質はアルミ合金 (A5052) であり、容器に何も詰めていない時のカメラ容器そのものの重量は 46.2kg である。

カメラ容器には 427 本の光電子増倍管モジュールと 27 枚の DC 変換ボード、温度センサー等が設置される (図 2.1)。カメラ容器に全ての必要なものを設置した時の重量は 110kg(実測) となり、この重量は許容範囲である。

CANGAROO-III カメラ

材質	アルミ合金 (A5052)
重量 (容器のみ)	46.2kg
重量 (全体)	110kg
直径	800mm
長さ	1000mm

表 2.1: カメラ容器の特徴。

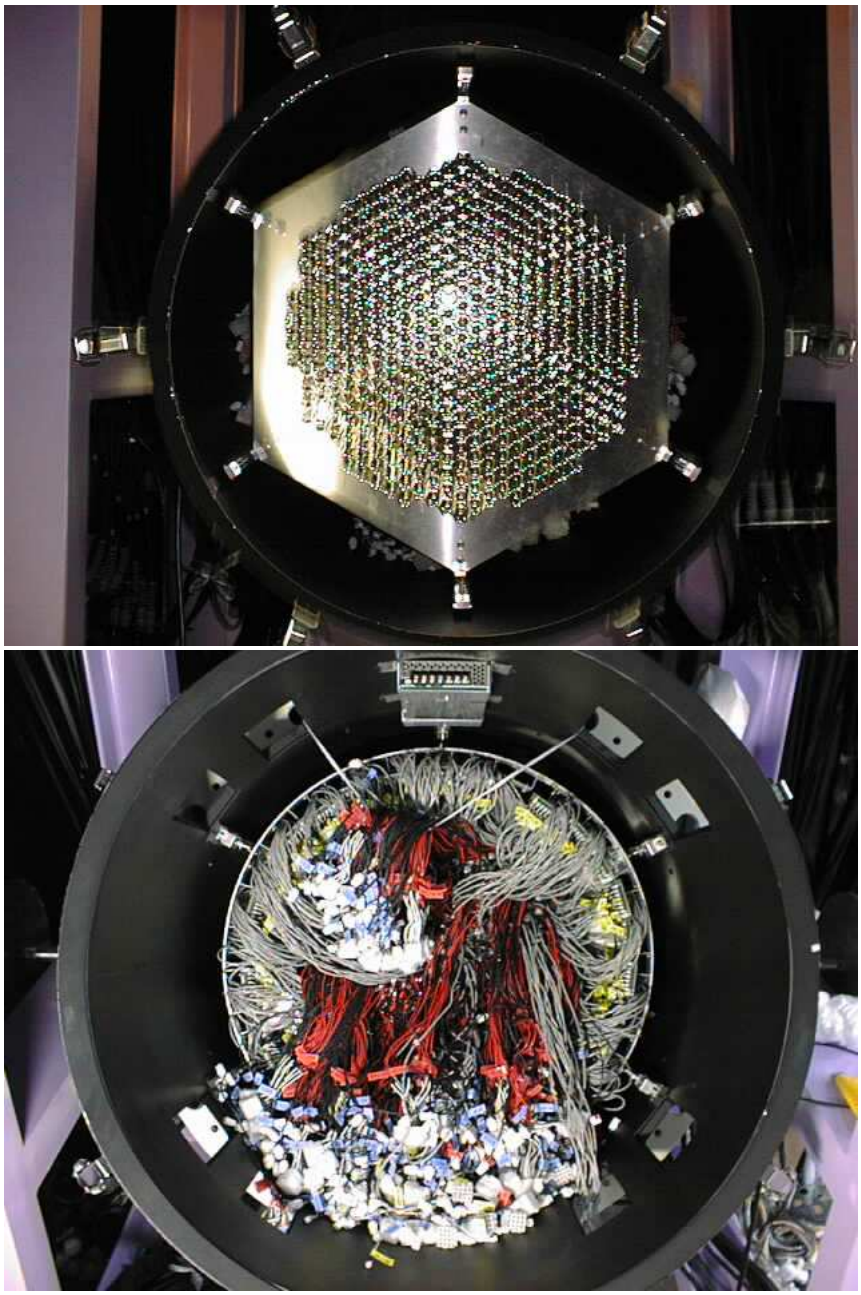

図 2.1: カメラ容器。上図：正面から見た写真、下図：後面から見た写真。

2.2 カメラ面

2.2.1 ライトガイド

カメラ面において光電子増倍管を敷き詰めた時に余ったスペースに降る光を光電子増倍管の光電面に集光させるため、ライトガイドを用意する (図 2.2, 表 2.2.1)。今回の設計では、光電子増倍管の光電面の面積とライトガイド上面の面積比を比べると 2.57 倍違う。材質は Polycarbonate plastic であり、内面をアルミ蒸着し、磨いた後、SiO でコーティングしている。このアルミ蒸着部の実測反射率はチェレンコフ光の主な波長域の 300nm ~ 400nm において約 80 %ある。今回用いるライトガイドは、Winston Cone[17][18][19] の形状である。今回設計したこの形状の特徴として、

- およそ 33 ° の角度以内で入射した光をほぼ 100 %集光する。
- 上記の角度以上で入射した光は反射を繰り返し全て外へ出ていく。

が挙げられる。この最大入射角以上で入射する光は外へ出ていくという性質から、主鏡より外から入射する光はカット出来る利点がある (図 2.3)。

ライトガイド 特性

材質	polycorbonate plastic
面積比 (上面/下面)	2.57
内面	アルミ蒸着 (SiO コーティング)
反射率 (300nm ~ 400nm)	約 80 %
反射率 (400nm >)	約 89 %
形状	Winston cone

表 2.2: ライトガイド特性。形状は Winston cone で、内面は反射率、80 ~ 89 %のアルミ蒸着が施してある。[17]

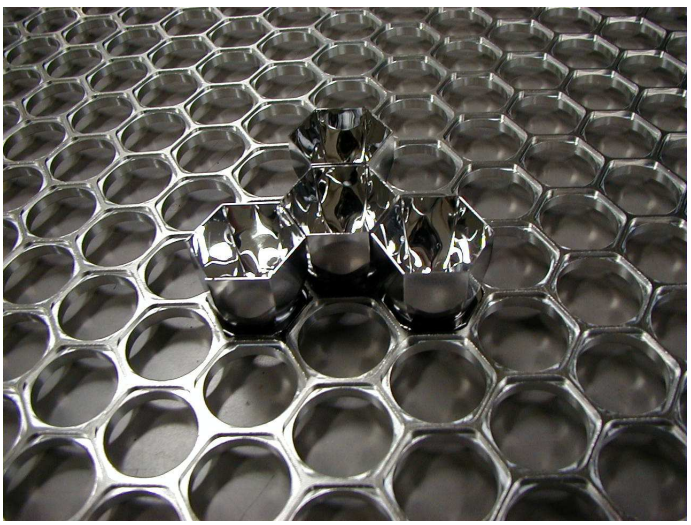

図 2.2: ライトガイド、ライトガイドは Winston Cone の形状をしており一定の角度以上の集光率が非常に高く CANGAROO-III 望遠鏡に良く適している。

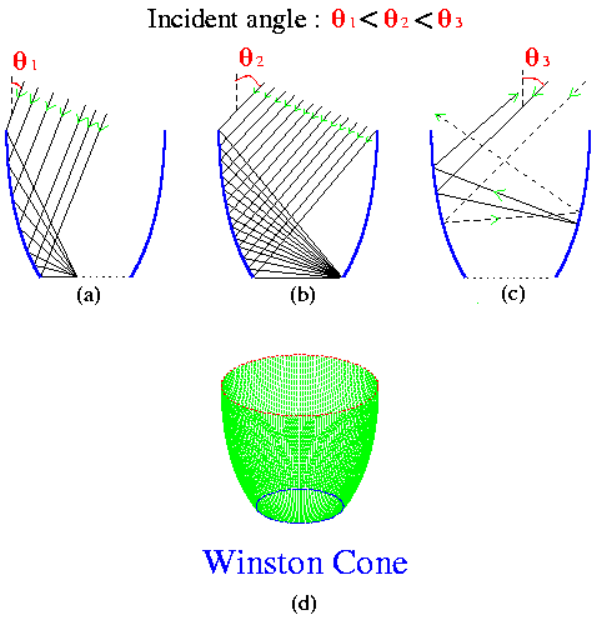

図 2.3: Winston cone[17]。この形状では θ_2 以下の入射光は全て集光する。(a)(b)(c)、Winston cone の断面。(d)Winston cone

2.2.2 ライトガイドの集光率測定

集光率の定義

前述のライトガイドの集光率の実測を行った。ここでライトガイドの集光率を以下のように定義する。

$$\text{Light collection efficiency(\%)} = \frac{\dfrac{\text{Measurement area(ideal)}}{\text{ADC with Lightguide}}}{\dfrac{\text{ADC without Lightguide}}{\dfrac{S_1}{S_2}}}$$

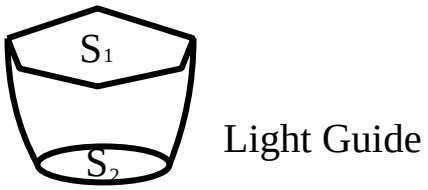

図 2.4: ライトガイドの集光率の定義 [17]。ライトガイドありの場合となしの場合の比を、上面と下面の面積比 (2.57) で割ったもの。

測定系

セットアップは図 2.5,2.5 に示してある。まず光電子増倍管にライトガイドを付け、ライトガイドの集光率の角度依存性をみるため、入射光に対して XY ステ− ジ上で− 50 ° ~ +50 ° まで 10 ° づつと± 3 5 ° の計 13 点で光電子増倍管を回転させることにした。

今回、集光率の測定に光電子増倍管を用いるわけであるが、光電面自体には量子効率の位置依存性 (ユニフォミティ) があるので、入射光の光電面への入射位置によって集光率が異なる。光電子増倍管の光電面の非ユニフォミティを踏まえ、光電子増倍管を光電面の中心に対し回転させた。今回の測定では、0 ° 、90 ° 、180 ° 、270 ° の 4 点を取ることにした。測定点は− 50 ° ~ +50 ° の各 13 点に対し、0 ° ~ 270 ° の 4 点をとり計 52 点の測定をした。入射光電子数は約 20-p.e. で行った。

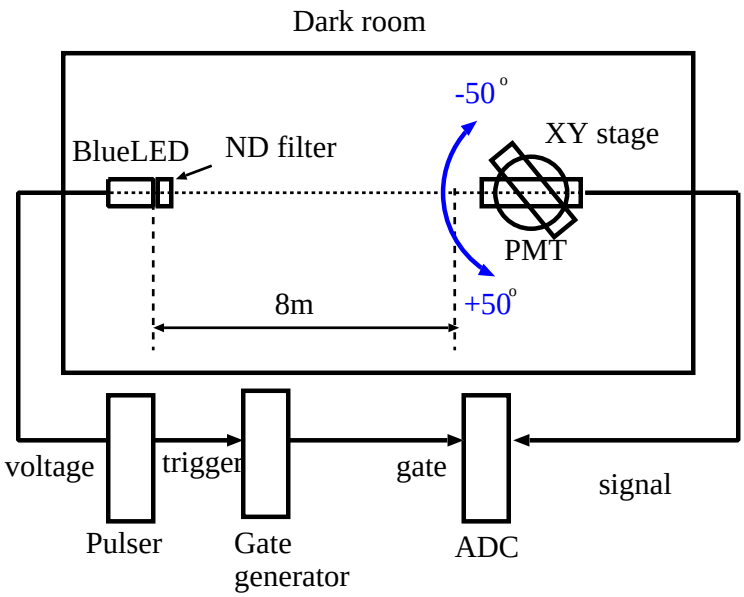

図 2.5: Light Guide を光電子増倍管にとりつけた状態での角度依存性を測定するためのセットアップ。光の入射角に対して、− 50 ° ~ +50 ° を 10 ° づつと± 35 ° の計 13 点で測定した。

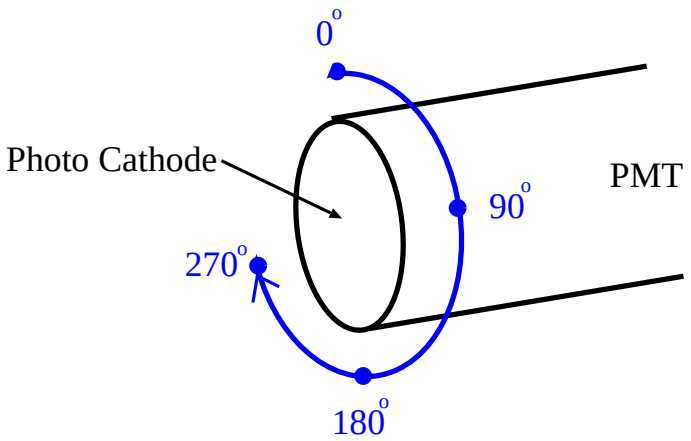

図 2.6: 光電子増倍管の光電面には量子効率の位置依存性があるので、0 ° 、90 ° 、180 ° 、270 ° の 4 点で測定した。

図 2.7 の上図は甲南大学でのシミュレ− ションの結果 [17] である。これは実測に合わせ、LED の主波長を 470nm、内面反射率を 89 %としている。図 2.7 の下図からわかるように測定結果には光電子増倍管の光電面の非ユニフォミティが現れている。このユニフォミティのばらつきは、量子効率の場所依存性によるものと考えられる。

この 4 つの角度のデ− タの平均をとり、シミュレ− ションの結果と比べると± 10 %の範囲で一致している。ユニフォミティのばらつきを考慮するとよく一致しているといえる。

この集光率がカメラ面全体で適用できるなら、現在の CANGAROO-II より 1.7 倍もライトガイドの集光率が向上し、エネルギー閾値が 1/1.7 下がることになる。次は光電子増倍管単体ではなく、カメラ全体でこのテストを行う必要がある。これについては 第 3.3.6 節で説明する。

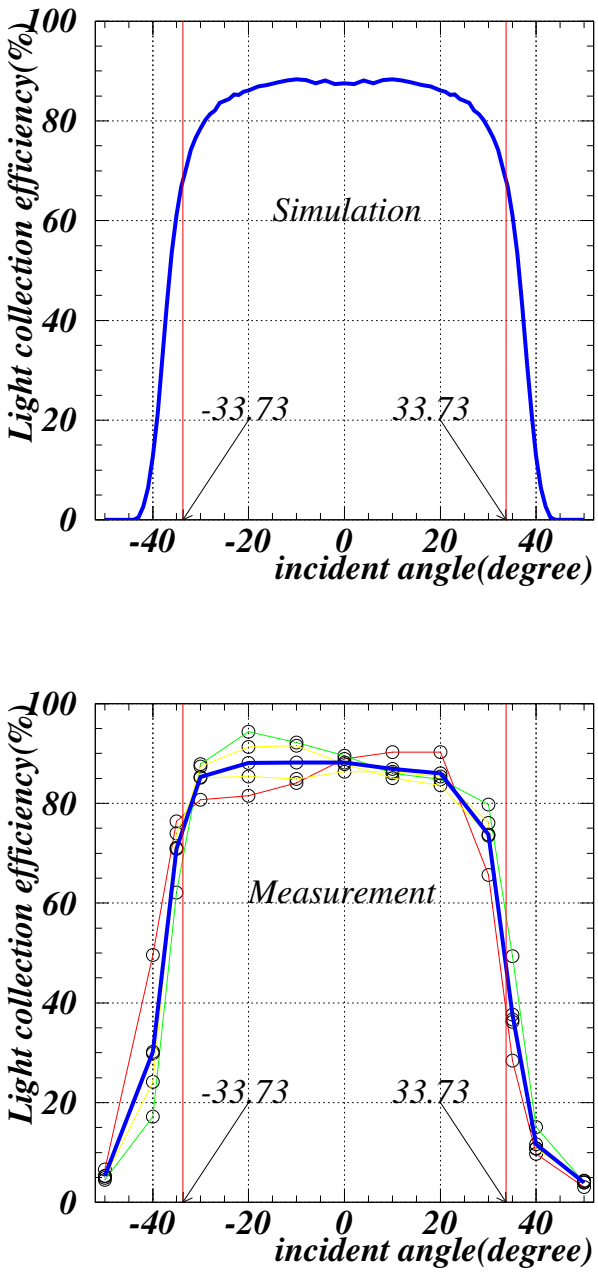

図 2.7: Light Guide を光電子増倍管にとりつけた状態での角度依存性。上図：シミュレー ション [17]、下図：光電子増倍管を用いての実測、青いラインが平均。

2.2.3　カメラ面のデザイン

一般にガンマ線のシャワーイメージの重心は目標天体よりも半径約 1 ° 以内 ($\theta = 0.014rad \sim 0.7°$) にあるため、CANGAROO-II の視野 2.7 ° でα 分布 [20] をとることは容易である。しかし次のカメラでは視野をさらに広げ、4.0 ° にすることにした。これには以下のような理由が挙げられる [10]。

始めに、視野が 2.7 ° ではシャワーの縦方向の広がりを押え切れてないないため、シャワーがカメラの端できれてしまい、正確な値をとれないことがあるため視野を広げこの値を正確に取る (図 1.7)。

次に現在、CANGAROO-II では一つの天体に対して、ON ソース、OFF ソースと 2 つのデータを別々の時間帯に、数時間をかけて観測している [21]。この方法は ON ソースとして、観測する天体とその天体が正中する時間帯を選び、OFF ソースとしてその前後の時間帯で ON ソースのバックグラウンドをとる。OFF ソースは ON ソースと同じ赤緯 (Declination) を選び、赤経 (Right Ascension) をずらして同じ天球上の軌跡を描くように観測している (Long ON/OFF モ− ド)。しかしこの場合時間的な効率が良くない。そこで、CANGAROO-III では広い視野を利用して、目標天体を視野の中心からずらし、OFF ソースを ON ソースと同時に同じ視野で取るプランが考えられる。具体的には以下のような観測手順が考えられる。一つの視野内で、ON と OFF の座標をとり、その座標間を 30 分おきにデータをとる (図 2.8)。

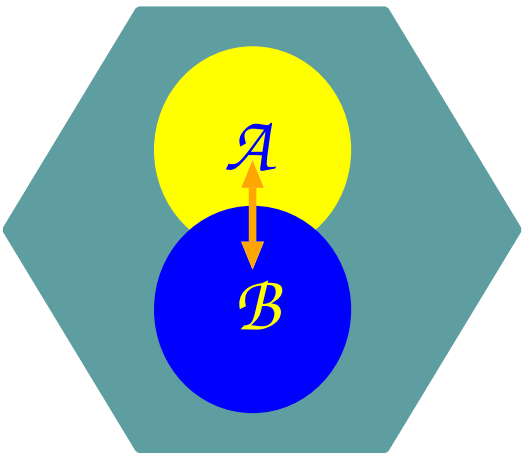

図 2.8: 30 分おきに ON の座標、OFF の座標にポインティングする。こうすることによって、無駄な時間を極力減らすことが可能になる。こうした観測モードをノッディングモードという。

光電子増倍管のサイズも 1/2 インチから 3/4 インチに変更することにした。理由として、3/4 インチ光電子増倍管の口径に対する光電面の面積比と比べ、1/2 インチのそれでは、3/4 インチ光電子増倍管の方が光電面の占める割合が大きい。具体的には、1/2 インチ光電子増倍管は 13.5mm 口径で、10mm 口径の光電面であるので、その比は 54.9 %になる。3/4 インチの光電子増倍管では 18.6mm の口径、15mm 口径の光電面をもつので、その比は 65.0 %に増加し、約 20 %集光率が上がる。

さらに、小さいピクセルで、4.0 ° をカバーすると、カメラ全体の重量が増加し、望遠鏡の重力変形の許容値からくる制限である約 100kg をオーバーしてしまう。このため、3/4 インチ光電子増倍管を選択した。

更に CANGAROO-II では立方格子構造で光電子増倍管を詰めているが、光電子増倍管をより少ないデッドスペースで詰めていくために六方最密構造で詰めている。隣接する光電子増倍管の中心間の距離は 24mm となっていて、光電子増倍管間の、デッドスペースは、ライトガイドによってカバーされる。このライトガイドは六方形になっており、この形は Winston cone の効果が四角形に比べてさらに発揮できる形状である。

図 2.9 は、今回 製作設計されたカメラ面である。ライトガイドを付けることによりデッドスペースがほとんど無いことがわかる。

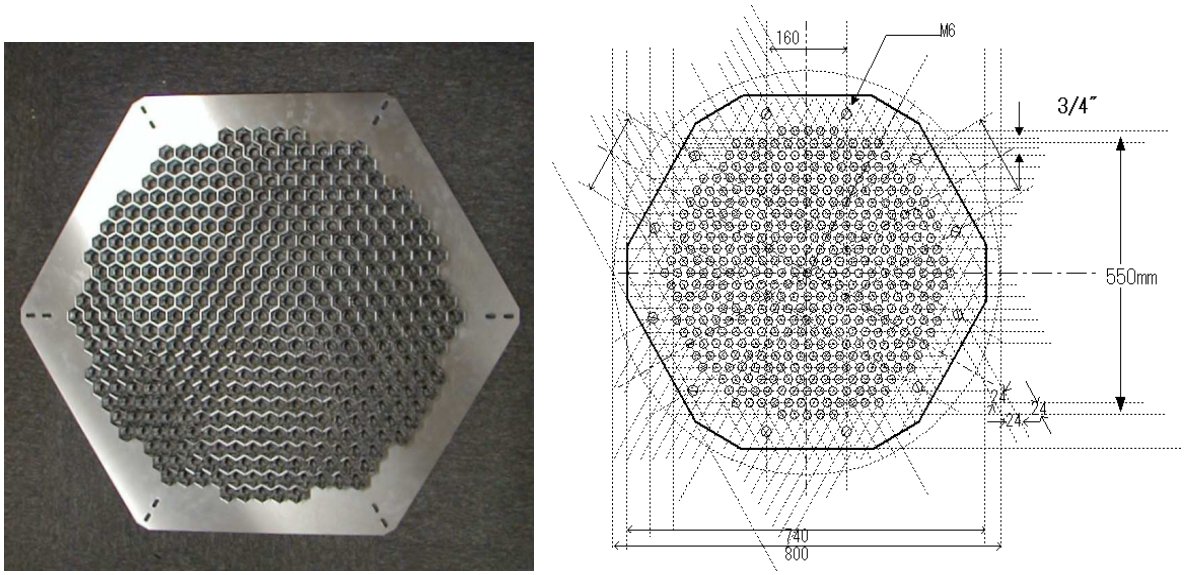

図 2.9: カメラ面、六方最密で光電子増倍管を詰めるために最も無駄の少ない配置になっている。左図：実際のカメラ面、ライトガイドが付いている。右図：設計図。

2.3 光電子増倍管モジュ− ル

2.3.1 光電子増倍管 モジュ− ル デザイン

この節では光電子増倍管モジュールの基本的なデザインについて述べる。この節以降で、今回設計したモジュールの動作テストの結果について述べていくことにする。

CANGAROO-II で用いているカメラは 1/2 インチ光電子増倍管 (R4124、HAMAMATSU) 552 本を用いている。光電子増倍管 4 本に対し 1 つの 4 チャンネル前置増幅回路 (プリアンプ) で信号を増幅し、16 本の光電子増倍管に対し 1 つの印加高電圧 (HV) チャンネルを用意している。この光電子増倍管モジュールは 4 チャンネルボード、16 チャンネルボックスとなっていてアクセスが容易であるが、問題点もある。この光電子増倍管モジュールの問題点はプリアンプボードの中での光電子増倍管 4 本の間でのクロストークがあり、更に 16 本分の光電子増倍管に対し同じ電圧をかけるため、全ての光電子増倍管の増幅率を揃えることが出来ないことが挙げられる (図 2.10)。これは CANGAROO-II 建設当時、予算が制約ために、このデザインになった。

そこで CANGAROO-III では、3/4 インチ光電子増倍管一本に対し 1 チャンネルのプリアンプと HV チャンネルを与えるように設計した。これより、光電子増倍管のプリアンプボード内でのクロストークの問題は解消される。さらに全ての光電子増倍管に対し HV 値を調整することにより、光電子増倍管の増幅率を揃えることが可能になり、一様な増幅率を持つカメラ面が可能になる。

CANGAROO-II では度々、放電現象が確認されている。これは HV の負電圧を用い、陽極接地型になっているためで、光電面の電位は負になっている。このため、ライトガイドと光電面との間に起こる放電が起きる [22]。そこで CANGAROO-III では HV は正電圧を与えることにした。これは陰極接地型のため、光電子増倍管の光電面の電位がグラウンドになる。このため、ライトガイドと光電面との間で放電現象は起こらない。

光電子増倍管には多量の光が入ってしまうと、ダイノードで 2 次電子を多量に生成してしまい真空が悪化するため、一時的に光電子増倍管は増幅率を落してしまう。この現象は光電子増倍管に 3 ~ 4 等星以上の光が集光する時に顕著に現れる。CANGAROO-II では 30 分程増幅率が落ちたままになっていることが確認されている。さらに頻繁にこの状態が続くと光電子増倍管は劣化してしまう。このため個々の光電子増倍管に星光が入ってしまう場合、本来、その星を避けるように望遠鏡の位置を調整する。しかし、今回の設計では個々の星光の入る光電子増倍管の HV を落すことにより方向を変えなくとも、光電子増倍管にダメージを与えることなく観測できる。

さらに今回はμ メタルシールドを加えた。このため、地磁気効果の影響をふせぎ、さらにはノイズを落すことが可能になる。

図 2.10: CANGAROO-II と CANGAROO-III の光電子増倍管モジュール。左図 : CANGAROO-II 光電子増倍管モジュール。このモジュールには 4 本の光電子増倍管 の信号を増幅するプリアンプ ボードが 4 枚ささっており、計 16 本の光電子増倍管をモジュール化している。右図 : CANGAROO-III 光電子増倍管モジュール。 一本にまとめているので、427 本分個々の光電子像倍管に対して増幅率を調節可能である。また、星光が入る光電子増倍管の HV を落すことができる。

2.3.2 光電子増倍管の選択

光電子増倍管のサイズを 3/4 インチにした理由は第 2.2.3 節で述べた。これに加え、光電子増倍管を選ぶ上で特に光電子増倍管対し要求する点は、以下の 4 点が挙げられる [22]。

- 高い増幅率 :
  一般にチェレンコフ光は非常に弱いため、増幅率が小さければノイズに紛れてしまう。さらに低い HV で予定の増幅率が得られれば HV による弊害の恐れが無くなる (放電等)。

- 広いダイナミックレンジ :
  ダイナミックレンジが広ければエネルギースペクトルも正確に測定することが可能である。特にエネルギーの高いガンマ線のスペクトルは大変重要であり、例として Crab pulsar のの High energy cut off をしるためにはダイナミックレンジ 100-p.e. が必要である。

- 時間分解能 :
  シャワーのチェレンコフ光は 5ns 程の広がりをもつ。このため光電子増倍管は時間分解能に優れていなければならなく、これより十分小さい値をもつ光電子増倍管が必要である。

- コンパクトかつ軽量 :
  望遠鏡の構造設計からくるカメラの重量制限は約 100kg である。この重量より重いとカメラを支える柱が歪む可能性がある。このため、なるべく軽量であることが望まれる。

今回、光電子増倍管を選ぶにあたって、候補に上げた光電子増倍管は R5611、R3479、R1450(HAMAMATSU) の 3 種である (図 2.11)。この 3 つは T.T.S $<$ 1ns、 増幅率 $> 10^6$ の基準を満たすものである。特徴として、R1450、R3479 は一般的な光電子増倍管でラインフォーカス型の光電子像倍管である。R5611 はサーキュラーケ− ジ型の光電子増倍管で非常に増幅率が高くコンパクトな光電子増倍管である (図 2.12)。

図 2.11: 光電子増倍管の候補。 一番上が R5611 でサーキュラーケ- ジ型、中央が R3479 でラインフォーカス型 8 段、下が R1450 ラインフォーカス型 10 段。

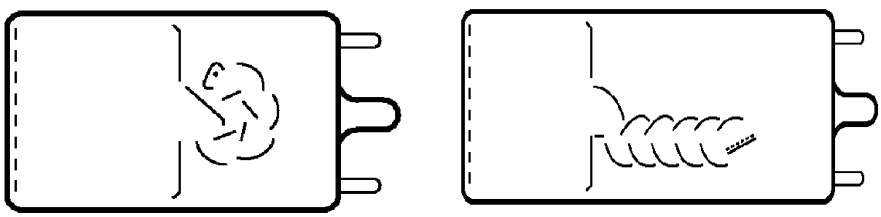

図 2.12: 光電子増倍管 の構造 [16]。左側がサーキュラーケ- ジ型、アノードは棒状になっている。右側がラインフォーカス型。アノードは面状になっている。

この 3 つ光電子増倍管のダイナミックレンジを調べるに図 2.13 のようなセットアップを行った。

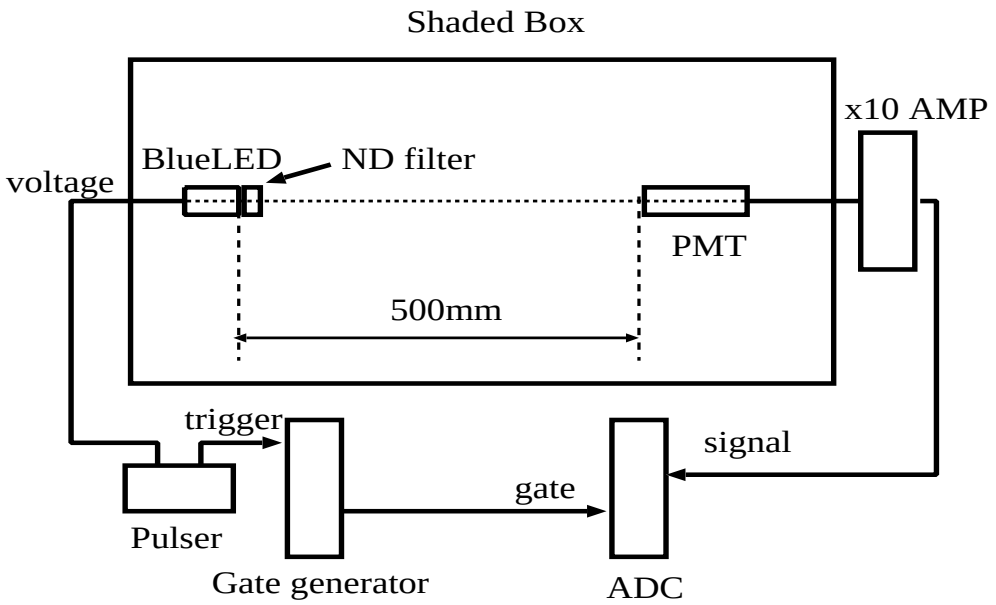

図 2.13: 光電子増倍管のダイナミックレンジを調べるためのセットアップ。

このセットアップでまずダイナミックレンジを調べた。まず青色 LED(第 C 章) でパルス光を出し、その光の光量を Neutral Density(ND) フィルターで調節した。ND フィルター 0.2 %を用意し、このとき 1-p.e. になるように光量を調節、さらに光電子増倍管の増幅率を 8×10^5 になるように HV 値を調節した。この後、ND フィルターを交換していくことにより入射光量を増加させた。

ポアソン分布のフィッティング

1-p.e. 分布はポアソン分布を多重ガウス分布でフィッティングをして求めた。多重ガウス分布でフィッティングというのは図 2.14 のように考える。

1-p.e. 程度の光量の LED から光電面への照射した場合、必ずしも 1-p.e. が光電面から放出されるとは限らない。というのは、LED が必ずしも一定の波長ではないこと、光電面も波長依存性をもつため、あるばらつきをもって、光電子は放出される。つまり光量は必ずしも ADC のゲート幅の間に 1-p.e. が来ているとは限らず、0-p.e. だったり、2-p.e.、もしくは 3p.e. であったりする。これは対象とするものが本質的にこのような分布をもっていて、こ

の分布で記述できるような物理量を測定していることを表す。この分布をポアソン分布という。

さらにポアソン分布であるので、離散的な値を持つヒストグラムが現れるはずであるが、ダイノードで電子を多量に生成し信号を増幅させる光電子増倍管の性質上、または各実験機器のノイズがのったりするため、必ずしも正確な光電子数のポアソン分布のヒストグラムが作られるわけではない。実際には各光電子数に対応するガウス分布ができ、このガウス分布の重ね合わせが我々の実験で得るヒストグラムになると推測できる (図 2.14)。

$$F_{pois} = F_{pois,0pe} + F_{pois,1-p.e.} + F_{pois,2-p.e.} + ... = 1 \tag{2.1}$$

$$\Rightarrow \quad F_{pois} = F_{gauss,0-p.e.} + F_{gauss,1-p.e.} + F_{gauss,2-p.e.} + ... = 1 \tag{2.2}$$

ここで $F_{gauss,n-p.e.}$ は n-p.e. の時の各ガウス分布の全体に占める面積はポアソン分布の各入射光電子の占める面積と一致するはずであるので、この時のガウス分布は、

$$\begin{aligned} & F_{pois,n-pe} = F_{gauss,n-p.e.} \\ \Leftrightarrow \quad & S\frac{e^{\mu}\mu^{n}}{n!} = F_{gauss,n-p.e.} \\ F_{gauss,n-p.e.} \quad = \quad & S\frac{e^{\mu}\mu^{n}}{n!} \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp(-\frac{(x-X_n)^2}{2\sigma_n^2}) \end{aligned} \tag{2.3}$$

ここで、S はヒストグラム全体の面積 (イベント数)、μ は平均の入射光電子数、X_n はこのガウス分布の平均、σ_n はこのガウス分布の標準偏差である。X_n は以下のように表せる。

$$X_n = n \times (X_1 - X_0) + X_0 = n \times \Delta X + X_0 \qquad n \neq 0 \tag{2.4}$$

さらに σ_n も

$$\sigma_n = \sqrt{n} \times \sigma \qquad n \neq 0 \tag{2.5}$$

と表せる。これらから、

$$\begin{aligned} F_{pois} \quad = \quad & F_{gaiss,0-p.e.} + F_{gaiss,1-p.e.} + F_{gaiss,2-p.e.} + ... \\ = \quad & Se^{\mu} \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} \exp(-\frac{(x-X_0)^2}{2\sigma_0^2}) \\ + \quad & S\frac{e^{\mu}\mu^{1}}{1!} \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\cdot\sqrt{1}\sigma} \exp(-\frac{x-X_0-1\cdot\Delta X^2}{2(\sqrt{1}\sigma)^2}) \\ + \quad & S\frac{e^{\mu}\mu^{2}}{2!} \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\cdot\sqrt{2}\sigma} \exp(-\frac{x-X_0-2\cdot\Delta X^2}{2(\sqrt{2}\sigma)^2}) \\ + \quad & S\frac{e^{\mu}\mu^{3}}{3!} \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\cdot\sqrt{3}\sigma} \exp(-\frac{x-X_0-3\cdot\Delta X^2}{2(\sqrt{3}\sigma)^2}) \\ + \quad & ... \end{aligned} \tag{2.6}$$

この式に現れるフィッティングに用いるパラメータは、まず、このポアソン分布を形作る平均の入射光量 (μ)、次にペデスタルの ADC の平均値 (X_0) と標準偏差 (σ_0) である。さらに 1-p.e. の ADC チャンネルとペデスタルの ADC チャンネルの差 (ΔX), ポアソン分布の標準偏差 (σ) の計 5 つである。この式を無限大まで足し合わせれば原理的にはどんな入射光量に対してもたった 5 つパラメータでフィッティングが可能である。今回は 1-p.e. を求めるので、20-p.e. まで足し合せわせフィッティングを行った。図 2.15 は 1-p.e. のヒストグラムとそのフィッティングの結果である。

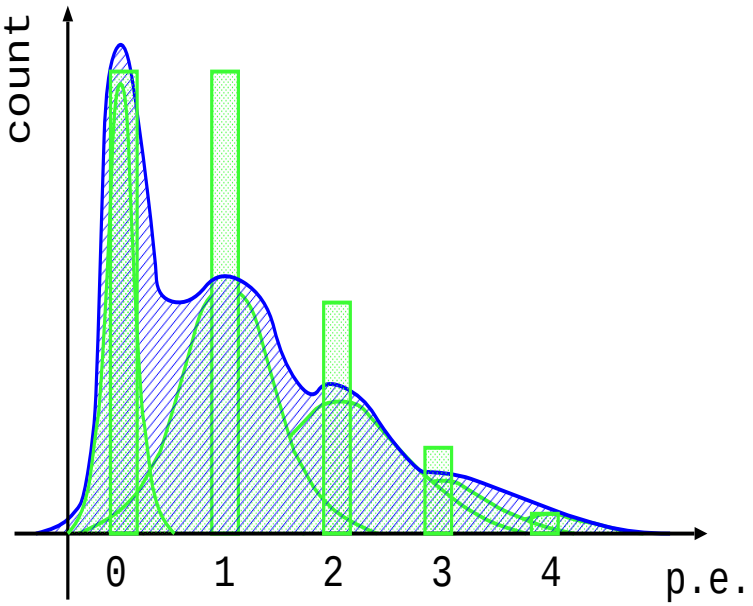

図 2.14: 多重ガウス分布でフィッティングをする。

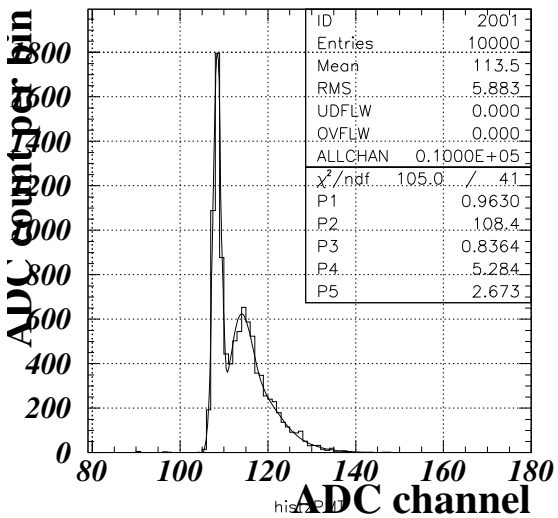

図 2.15: R3479 の 1-p.e. ヒストグラム。1-p.e. のヒストグラムに対して多重ガウス分布でフィッティングをしたもの。

この結果、最もダイナミックレンジが広いのは R1450 であり、最もダイナミックレンジが小さいのは R5611 となった (図 2.16)。この結果から R5611 は増幅率は良いが、ダイナミックレンジが小さいため候補から外した。サーキュラケ– ジ型の光電子増倍管は基本的に増幅率が高いが、ダイナミックレンジが小さい。この理由はアノードはラインフォーカス型の面状のアノードで電子を受け止める構造と違い、棒状のアノードで受け止める形になっているため、アノードの手前で、多量の電子が集中することにより、電場が飽和状態 (スペース チャージ リミテーション) になってしまう (図 2.12)。このためダイナミックレンジが他と比べ小さくなっている。ただし、時間が許せば改善は可能であろう。

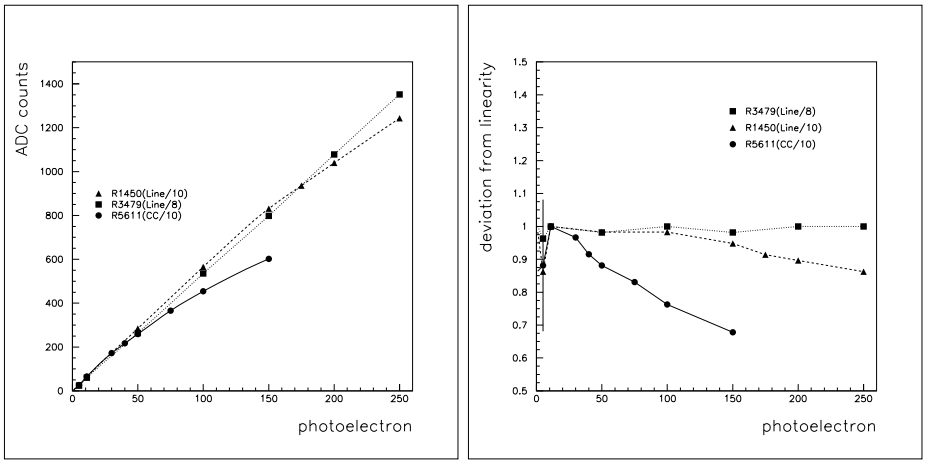

図 2.16: 光電子増倍管のダイナミックレンジ [22]。R5611 は他の光電子増倍管よりダイナミックが劣る。

R1450 と R3479 の選択であるが、重量が R1450 の方が 1 本あたり 4g 重いため、427 本で 1.7kg ほど重くなってしまう。さらに R3479 の方がコンパクトなのであることから R3479 を選ぶことにした (表 2.3)。

光電子増倍管 の候補

Type No.	× R1450	○ R3479	× R5611
Dynode structure	Line	Line	CC
No. of stages	10	8	8
Weight(g)	19	15	9
Length(cm)	8.8	6.5	3.0
High Voltage(V)	1170	1500	780
Rise time(ns)	1.8	1.3	1.5
Transit time(ns)	19	14	17
T.T.S. FWHM(ns)	0.76	0.36	0.8
Dynamic Range(p.e.)	150	150	50

表 2.3: 候補に上がった光電子像倍管の諸特性。サーキュラー ケ– ジの R5611 はダイナミックレンジが極端に小さい。

2.3.3 光電子増倍管のプリアンプ

現在、CANGAROO-II 望遠鏡のカメラでは、光電子増倍管からの信号をその場でプリアンプを通し増幅してからエレキハットに送っている。これには 3 つの理由がある。

- 光電子増倍管を高い増幅率で使用した場合、星の光が入ることによりダイノードから二次電子を多量に生成し前述のような光電子増倍管の劣化を引き起こす。したがってある程度の増幅率までにしか増幅できない。これを補うためにプリアンプを必要とする。
- 長いケーブルを通すとノイズが加わり、信号とはっきり区別するためにプリアンプを必要とする。
- カメラ内に ADC 等のエレクトロニクスを置くにもカメラには約 100kg の重量制限があり、さらにスペ− スの制限のため置くことができない。

CANGAROO-III 望遠鏡カメラでも同様の理由で、プリアンプを使用する必要がある。CANGAROO-II で用いているアンプは LeCroy 社製の TRA402s であるが、これは現在生産中止となっており、またこのアンプは 4 チャンネルが 1 チップに集積されているがこのアンプを用いたプリアンプボードはクロストークが問題となっている。さらにこのアンプはダイナミックレンジが非常に小さい (図 2.17)。

今回はこのような 4 チャンネル一体型のプリアンプではなく、1 チャンネルのアンプを開発することにした。アンプの選択であるが、ノイズが少なく、増幅率が高く、かつリニアリティに優れていることが要求される。候補として選んだアンプは以下の 3 つである。選んだ基準は高速、広帯域であること、増幅率が高いこと、さらにダイナミックレンジが広いことの点で選んだ (表 2.4)。

アンプの候補

	model	maker
○	MAX4107	MAXIM
×	μ PC1664c	NEC
×	CS510	Clear pulse

表 2.4: 光電子増倍管モジュール用アンプの候補。

CS510 は TOPAZ のバーテックス チェンバー [23] で用いられているプリアンプで、増幅率は非常に高いが、decay time が 50ns と遅いうえリニアリティが良くない (図 2.18)。μ PC1664c は汎用であり基本的には問題はないが、

MAX4107 ほどに増幅率が高くない。さらにダイナミックレンジも MAX4107 が一番優れていることがわかる。

この中でもっとも上記の条件に適したアンプは MAX4107 であったので、このアンプを用いてプリアンプのデザインをした。図 2.19 はその回路図である。

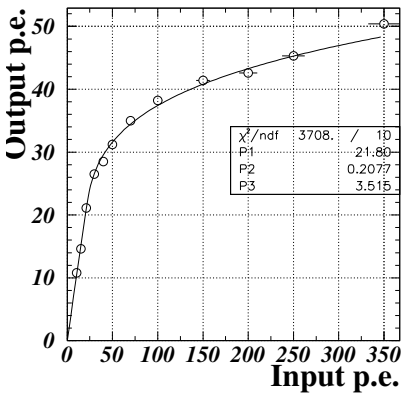

図 2.17: TRA402s のリニアリティー 、20-p.e. 程でリニアリティー がなくなる。

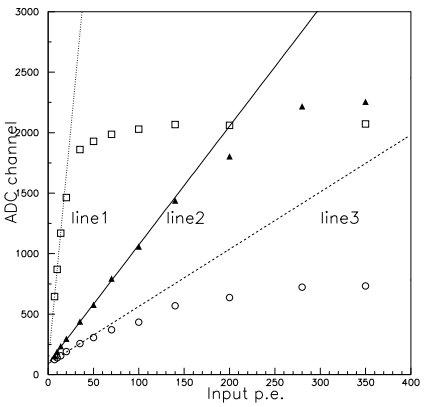

図 2.18: プリアンプ のリニアリティ。line1 が CS510、line2 が MAX4107、line3 がμ pc1664c CS510 は増幅率は非常に良いがダイナミックレンジが狭い。この中では MAX4107 が増幅率、ダイナミックレンジ共に優れている。

このプリアンプで用いたフィー ドバック抵抗は 2K Ω。信号ケーブル 27m を通すと、1nsec の立上りが 5nsec に” 劣化” してしまう。このことを想定して、プリアンプでは MAX4107 に信号を入れる直前にコンデンサー 47pF と抵抗 100 Ω をいれ、立上りを 5nsec にしてある。こうすると、低い電圧増幅率で高い電荷増幅を稼ぐことができ (ADC は電荷を検知する)、効率が良い。

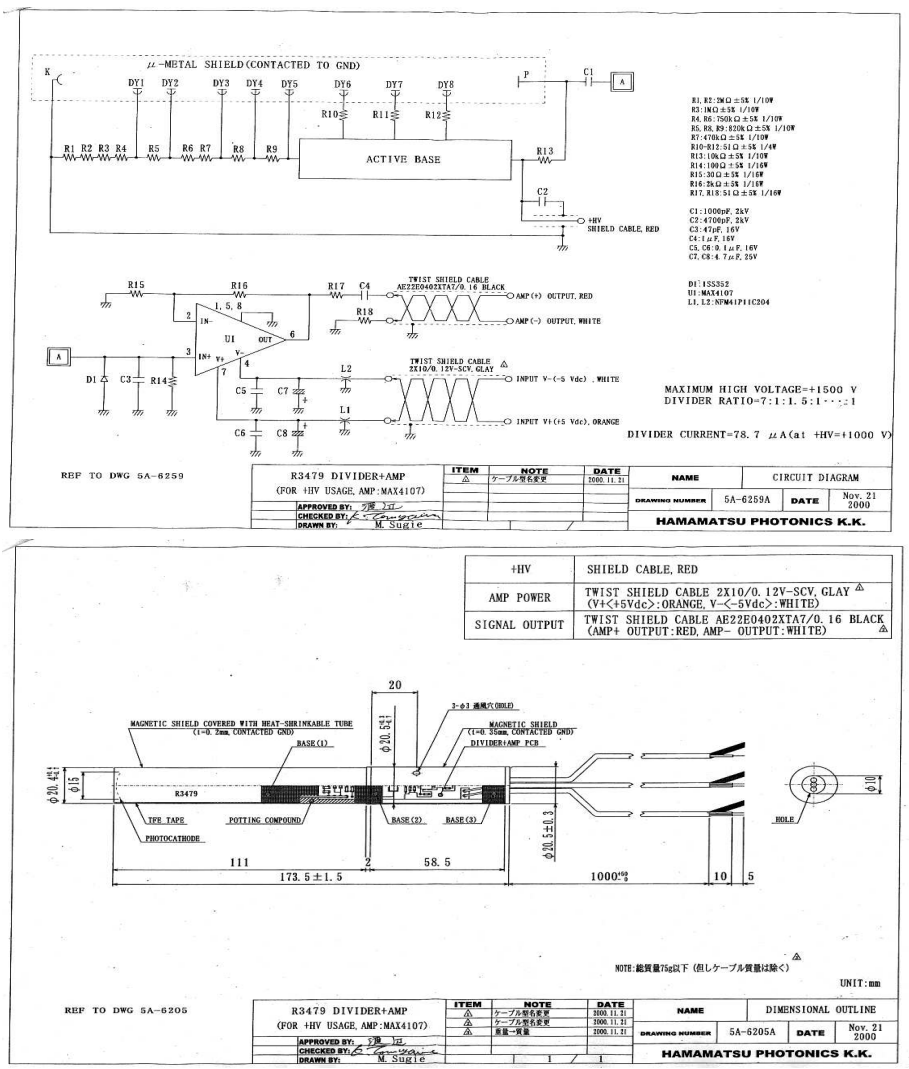

図 2.19: プリアンプ board の設計図。上図； フィードバック抵抗を 2K Ω にしてある。下図：実際の寸法：光電子増倍管の直径 (19mm) に全ての素子が入っている。

2.4 DC 変換ボード

光電子増倍管のプリアンプを用いるためには DC ± 5V の電圧を必要とする。しかしこの電圧は 27m のケーブル (第 2.6 節) を通すと電圧降下により下がってしまう。16 本の光電子増倍管モジュールの DC 電圧は 1 本のケーブルによって供給される。プリアンプ (MAX4107) の供給電流は最大値で 19mA、16 本の並列回路として、19mA × 16 = 304mA、ケーブルの抵抗は 247 Ω /Km なので、247 Ω /km × 27 × 10^{-3}km=6.7 Ω 、これらから電圧は 6.7 Ω × 304mA ~ 2V ほど落ちてしまう。さらに大きな信号が入力した場合、パルス的な電圧降下が起き、全体のプリアンプにフィードバックが起こり、ノイズ、発振等の原因となる。

そこで、予め大きな値の電圧を送りレギュレーターを用いて± 5V に調節する変換ボードをカメラ内部に設置することにした。このレギュレーターを 16 本分の光電子増倍管に用意する DC 変換ボードを設計することにした。今回用意したレギュレーター (+:MC7805, − :MC7905) は Input Voltage が± 7 ~ ± 20V の時、Output Voltage が± 5V で出力される。このレギュレーターの前後でヒューズを設けた。手前では、16 チャンネル分の 1A のヒューズ、後ろには 16 チャンネルに分けて、1/4A ヒューズを変換ボード上に設けた。これは、1 つのチャンネルに過電流が流れ、壊れてしまった時に他のチャンネルに影響を及ぼさないように設置した。

発熱について

まず、このレギュレーターがどの程度発熱するかを調べた (図 2.20)。光電子増倍管 16 本をつなぎ、HV を 1000V かけた。プリアンプに電圧をかけ、そして温度センサーをレギュレーター部分に設置し、1 分おきに温度変化を取った。この場合、1 時間で 20 ° 近く上昇してしまうことがわかる (図 2.21)。そこで冷却用ファンを用意しテストした。90cm 角のファンを 15cm 程離して回した所、5 ° くらいまでしか上昇しなかった。

実際の所はこのファンを設置してもケーブルが邪魔をしても風を送れないことがわかったので小型のファンをこのボード一つ一つに接着することにした。

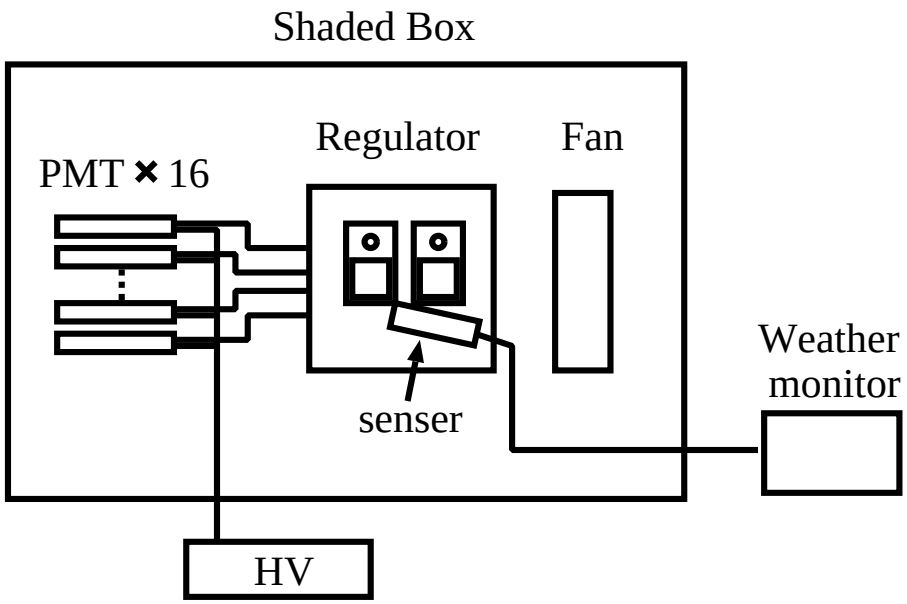

図 2.20: DC 変換ボードの温度変化テストのためのセットアップ。温度センサーはレギュレーター部分に密着させた。

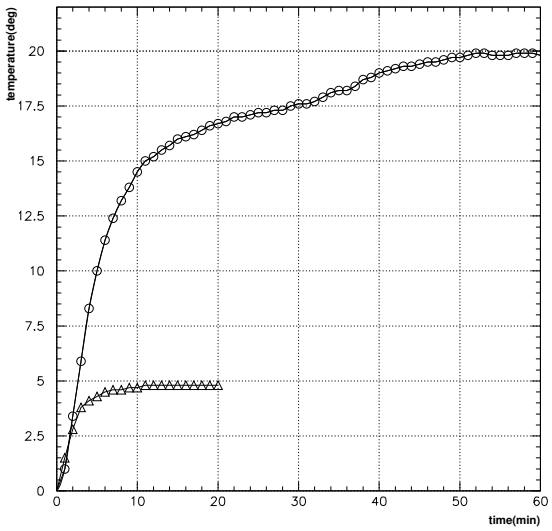

図 2.21: DC 変換ボードの温度変化。図は室温から温度変動。DC 変換ボードのレギュレーター部分は非常な発熱を伴う。室温から測定してりる

ファンによるノイズ

ここで用いたファンはDCのブラシ型ファンである。ブラシ型のファンはノイズが懸念されるため、このファンが光電子増倍管に与える影響を調べた。この90cm角のファンを光電子増倍管 モジュールに対して接触させ、信号をADCにいれ、ペデスタルを取った。

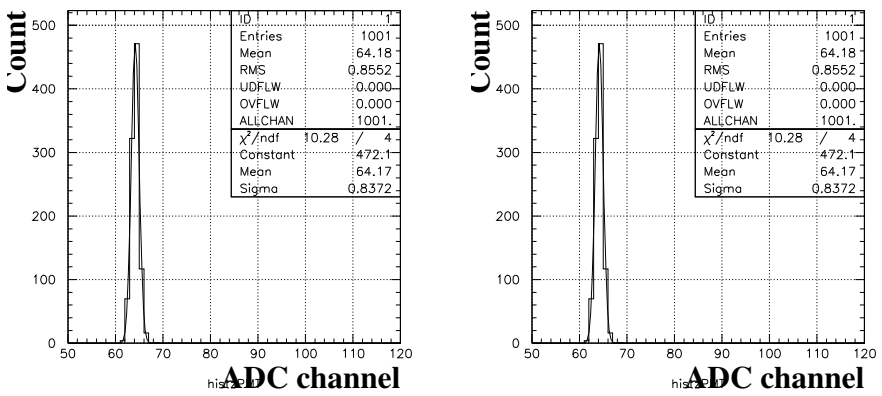

図 2.22: 空冷ファンによるノイズ。左図：ファンを使用してない時のペデスタル。右図：ファンを使用している時のペデスタル。

図2.22からファンを使用していない時のヒストグラムのσ は0.83チャンネル。ファンを使用している時のσ は0.84チャンネル。この結果から空冷ファンが光電子増倍管モジュールに及ぼす影響はほとんどないと考えられる。

レギュレーターによるノイズ

このレギュレーター (表 2.5) にはもうひとつ大きな問題があった。光電子増倍管を 12 本以上つなぐと 3MHz のノイズ (図 2.23) が出ることがわかった。これはケーブル長のフィードバックの発振の周波数に相当する。小さい波高 (± 1mV) ではあるが、ADC には顕著にこの症状が現れる。

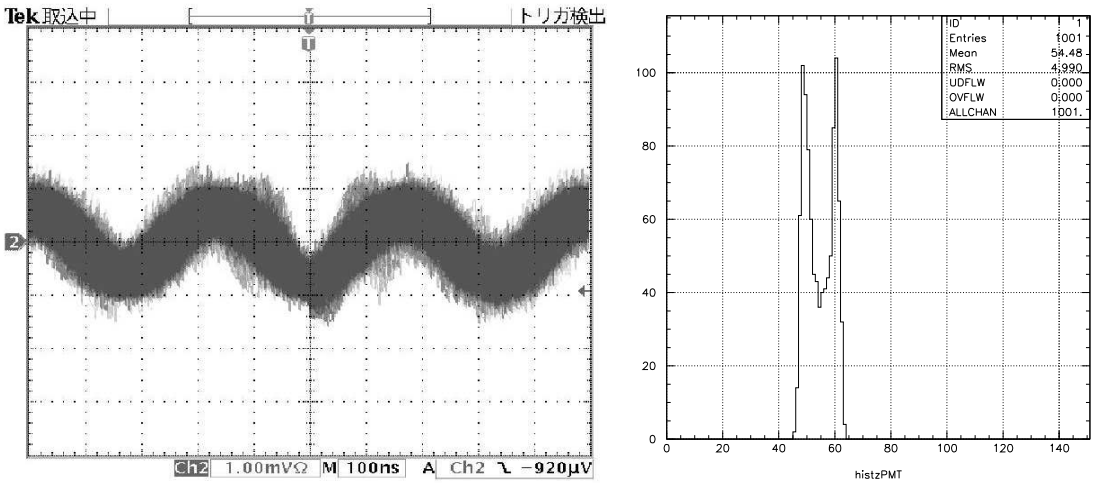

図 2.23: DC 変換ボードにのるノイズ。左図：オシロでみると 3MHz でのっていることがわかる。右図：このノイズは ADC のペデスタルが大きく二つに分かれる。

当初、このノイズは数分過ぎると現れるため、レギュレーター部分の温度上昇が問題だろうと推測された。このため、前述 DC ボードのヒートシンクに加えてこのボードと同じ大きさの放熱板を取り付けた。が、このノイズは収まらなかった。

これに加え、シグナルケーブルのグラウンド等、全てのグラウンドをチェックしてノイズは半分に減ったが、まだ残った。

次に DC ノイズフィルターを交換した。元々、レギュレーター部分のノイズ対策に、TDK のノイズフィルター (ZJK5103-05) を用いてノイズ対策をしていたが、このフィルターのノイズ減衰特性周波数範囲は 7 ~ 300MHz であるので、ノイズ減衰特性周波数範囲が 1MHz ~ 200MHz のノイズフィルター (ZJK51R5-00) を用いてテストした (表 2.6)。その結果、3MHz のノイズがなくなった。このため、全ボードの DC フィルターの交換を行い、念のため、放熱板も取り付けた (図 2.24)。

Voltage Regulator

Model	Polarity	Input Voltage(V)	Output Voltage(V)	maker
MC7805	positive	+7 ~ +20	+5V	FAIRCHILD
MC7905	negative	-7 ~ -20	-5V	FAIRCHILD

表 2.5: レギュレ− タ− の特性。± 7 ~ ± 20V の入力電圧を± 5V にして出力する。

DC filter

	Model	定格電圧 (V)max	定格電流 (A)max	減衰特性周波数	maker
×	ZJK5103-05	50	3	7 ~ 300MHz	TDC
○	ZJK51R5-00	50	0.5	1 ~ 200MHz	TDC

表 2.6: DC フィルタ− の特性。減衰特性周波数が 1 ~ 200MHz のフィルターを採用した。

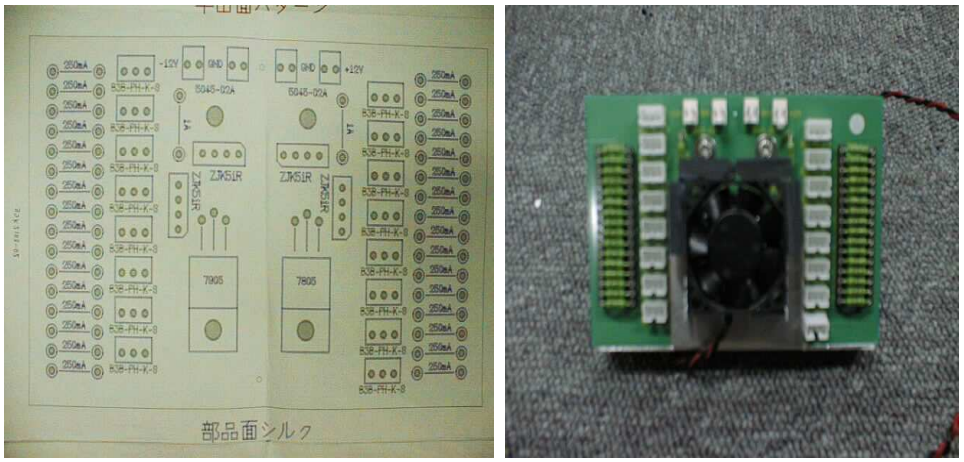

図 2.24: DC 変換ボードの回路図と写真。16 本分の光電子増倍管の± 5V を供給する。

2.5 高電圧供給 システム

2.5.1 高電圧 (HV) 供給 システム デザイン

CANGAROO-II で用いられている HV システムは LeCroy 製であるがこのモデルは現在生産中止となっている。そこで新たに HV システムを選ぶことになった。今回採用した CAEN の HV システム (表 2.25、図 refhv-システム) は Super KAMIOKANDE で使われている HV システムと同様のものである。さらに、この HV システムは LeCroy の HV に比べノイズレベルは 1/10 以下である。

HV システムは前述の通り、個々の光電子増倍管に対して HV をかけることを目的としてデザインされているので、計 427 以上のチャンネルが用意されている。光電子増倍管 427 本分の HV を供給するために、10 スロットのクレートを 2 つ、25 チャンネルのボードを 20 枚用意した。25 チャンネル目がプライマリーボルテージチャンネルであり、このチャンネルが ON されないとボード全体に電圧は供給されない。

全体で 480 チャンネルの HV をコントロールできる。光電子増倍管に供給出来る HV は 0 ~ 2550V で、この HV システムは VME interface でコントロールする。この interface はオペレートするのに十分早く、星をトラッキングするに十分である。

各光電子増倍管 427 本に対して自由に HV 値を与えられるので、HV 側で全ての光電子増倍管モジュールの増幅率が 1.2×10^7 になるように個々のチャンネルで HV 値を調整する。

更に、明るい星の光が入るようであれば、その光が入る光電子増倍管を HV の OFF できるようにする。CANGAROO-II の経験によれば 3 等星が光電子増倍管に入った後、約 30 分は光電子増倍管の増幅率が劣化するということが分かっている。

HV システム

name	number	spec	model
VME interface	1		CAEN Mod. V288
CRATE	2	10 slot	CAEN Mod. SY 527
BOARD	20	24 channel	CAEN Mod. A932AP

表 2.7: CAEN の HV システム。計 480 チャンネルを用意した。

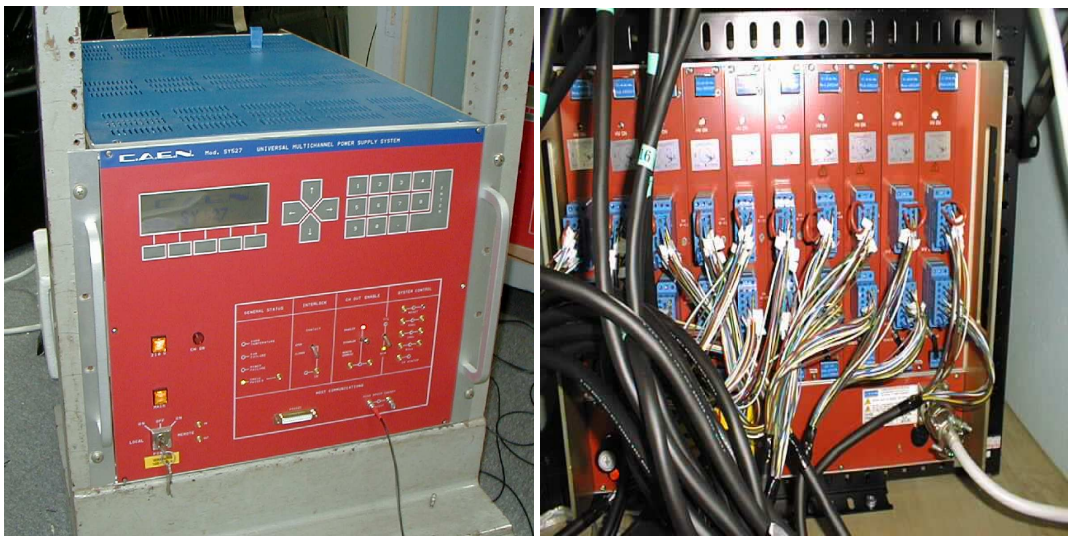

図 2.25: HV システム；左図：正面から見た図。右図：背面から見た図ボードが 10 枚ささっているのがわかる。このボード一枚で 24 チャンネルの HV が調整できる。

2.5.2 HV コントロ– ル GUI プログラム

HV システムを使用する際にあたって、実際には視覚的に分かりやすいように GUI(Tcl/Tk+C) で現在の状態が表示されるようにプログラムした。視覚に訴える Display は実験にとって常に重要である。

この図 (2.26) をみるとわかるように正常に電圧、電流が供給されているときは緑のサインが出る。星光の影響を受けそうな光電子増倍管は HV を OFF している。望遠鏡のが経緯台式であるため、天体のトラッキングに合わせて、視野内の星はトラッキング方向を中心に回転するので 10 分置きにモニターをし、星光の入る光電子増倍管の HV を自動的に落すようになっている。このモニターは、まず望遠鏡のトラッキングの位置は望遠鏡制御プログラムから受け取り、その座標を用いて SAO(Smithonian Astrophysical Observatory) カタログから現在の星の位置を読みだすようになっている。さらに異常があればビ– プ音を出して警告をするようになっている。

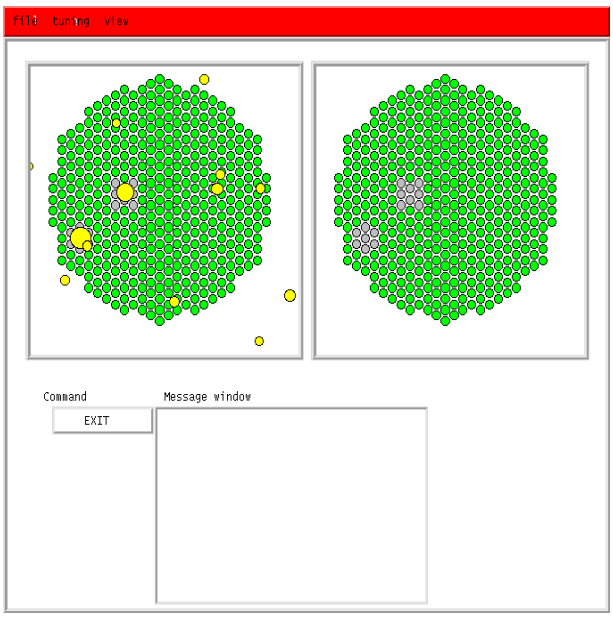

図 2.26: Tcl/Tk を用いて HV の操作を GUI で出来るようにした。左のウインドウは電圧、右のウインドウは電流をモニターしている。種々の操作を手軽に行える。3 等星より明るい星の周りは HV を OFF していることが一目でわかる。星は等級によって大きさが変わる。星の下の光電子増倍管の HV は OFF してある。HV トラッキングは SN1006 の NE リムをシミュレートしている。

2.6 ケ– ブル

シグナルケーブルの長さは 27m あり、1 本に 16 チャネル分の信号ケーブル、さらにアンプの電源用に、正× 1、負× 1、 GND × 2 本の計 20 のツイステッドペアケーブルが入っている。このような細いケーブルを使用した理由は、ケーブルの自重により、ステイが歪まないようにするためである。導体抵抗は 247Ω /km 以下となっていて、それぞれのペアケーブルにシールドがあり、さらに全体にシールドがある。信号ケーブル 27m を通すと、実は 1nsec の立上りが 5nsec に” 劣化” してしまう。このことを想定して、プリアンプでは任意的に立上りを 5nsec にし、立上り時間をなます部分が組み込まれている。こうすることによって、ADC でデータを取る際にゲート全体に広がった信号をとることができるようになり、ダイナミックレンジが広くとれる。

HV ケーブルの長さは 33m あり、1 本に 24 チャネル分のケーブルが入っているものを特注した。

他に用意したケーブルはテスト用同軸ケーブル、クラウドモニター、カメラ内の温度モニター用のイーサネット、作業用電源ケーブルに AC100V と 240V 用意した。

今回用いたケーブルについて表 2.8 にまとめた。

ケーブル

name	number	m
シグナル	29 (2 本予備)	27
HV	20 (2 本予備)	33
同軸 (58C)	4	30
同軸 (174/U)	6	30
イーサネット	1	30
AC100V	1	30
AC240V	1	30

表 2.8: カメラ容器に外から入るケーブル類

Chapter 3

カメラの製作、評価

3.1　作業行程

実際のカメラの製作は幾つもの過程を経ている。大まかにはカメラのデザイン、テスト光電子増倍管モジュールの製作、試験。この後の章で述べる、個々の光電子増倍管テストの試験、カメラの組み上げ、カメラの総合テスト等が上げられる。図 3.1 に示しているのはカメラ製作の行程表である。

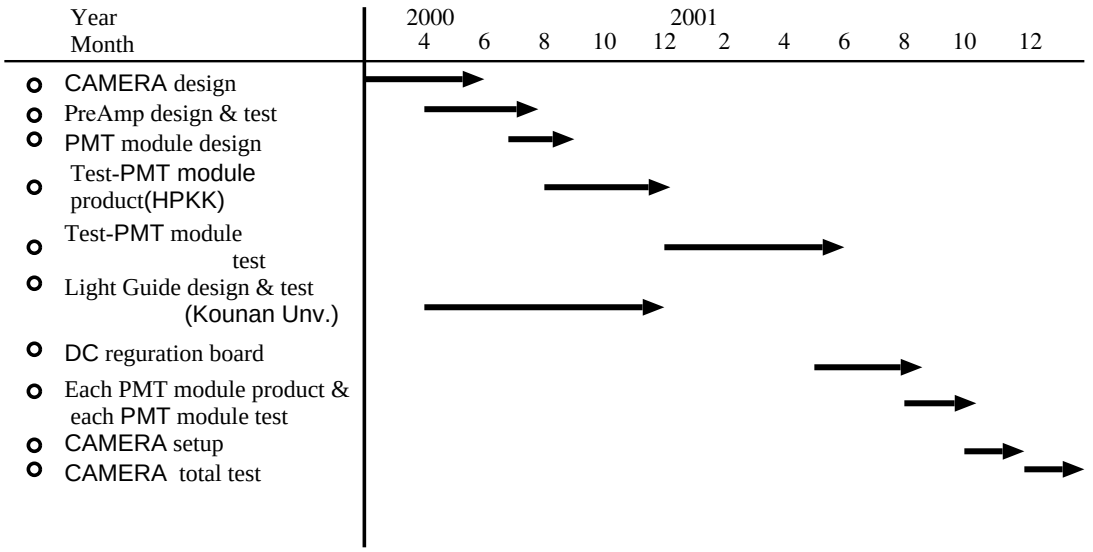

図 3.1: カメラの行程表。

3.2 個々の光電子増倍管のキャリブレ– ション

3.2.1 測定系

CANGAROO-III で用いる光電子増倍管は 427 本である。この個々の光電子増倍管の特性を調べることはカメラの基本的な特性を調べる上で非常に重要である。これからは 450 本、個々の光電子増倍管の特性について調べていくことにする。

CANGAROO-II では個々の光電子増倍管のカメラ容器に設置する前のデータベースが無い。このテストの目的は全光電子増倍管の主要な測定データを取り、これをデータベースとして構築することにある。

一本ずつテストしていくセットアップは図 3.2 に示す。まず光源として青色 LED を用いることにした。この LED は日亜の製品 (NSPB510s) で主波長 470nm、光度が 1.3-cd で、指向性が 30 ° あるとされている。これは量子井戸型ポテンシャルを利用した HiTech LED で日亜の特許である。光量が大きいことと安定性から、信号機の青信号にも使用されている。これを選定した理由はタイミング特性が速く、光電子増倍管の感度に一致した波長の光を放射するからである。さらに温度特性や、往年変化にもすぐれている (Appendix C、[25])。この LED をパルスジェネレータ (AVI-V-C-N、AVTECH) を用いて 20ns 幅のパルス電圧を用いて光らせた。このパルス電圧は CAMAC の DAC を通して制御できる。パルスジェネレータの TTL 出力のトリガーを NIM に変換し、ゲートジェネレータ (N104、HOSHIN) に入れる。このゲートジェネレータから 100ns 幅のゲートを生成し ADC(c0009、HOSHIN) にいれる。ADC は CAMAC 規格で 12bit、分解能 0.244pc のものを用いた。

光量の調節には ND フィルター (吸収型：MAN-52、シグマ光機) を組合せ行った (Appendix D)。

今回は一本づつテストするにあたって、作業を円滑化するために幾つか工夫をした。まず光電子増倍管であるが、光電子増倍管は HV をかけてから一定時間は不安定である。そこで今回は光電子増倍管 2 本を暗箱の中に入れ、1 本がテストしている間、他の 1 本は予め HV をかけておくことにした。

更に光量調節の際、ND フィルター交換のため暗箱を開閉する。この時に光電子増倍管にかける HV を落さなくても良いように光電子増倍管は円筒型の筒にいれ、筒の先にシャッターを用意した。暗箱を開ける際には ND-フィルターの交換のためシャッターを閉じて HV を落さなくても光電子増倍管に光が入らないようなセットアップにした。

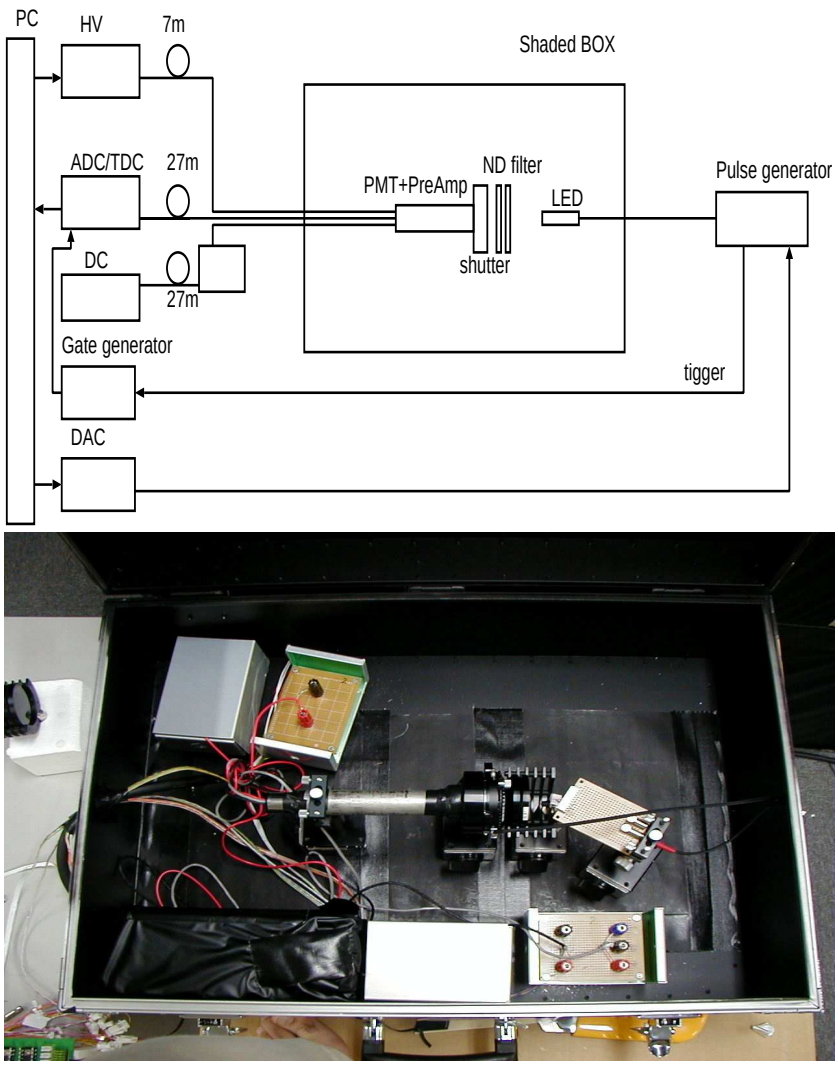

図 3.2: 光電子増倍管テストのためのセットアップ。上図；測定系、下図；実際に用いた暗箱と測定機器。

3.2.2 HV 値の決定

まずこれから必要となる光電子増倍管モジュールの増幅率を $1.2\times\ 10^7$ になるように HV 値を調整する。これは上記のセットアップで ND フィルターを 0.1 %にし、DAC を変え LED の光量を調整する。1-p.e. のポアソン分布を多重ガウス分布として、フィッティングする (第 2.3.2 節)。この時ペデスタルと 1-p.e. のピークが 8 チャンネルになるように HV 値を調整する。ADC は 1 チャンネル、0.244pc なので、8 チャンネルになるということは増幅率 (gain) は、

$$gain = \frac{8ch \times 0.244pc}{1.6 \times 10^{-19}} = 1.2 \times 10^7 \tag{3.1}$$

となる。プリアンプがおよそ 60 倍なのでこの値は光電子増倍管のそのものの増幅率はおよそ $2\times\ 10^5$ である。光電子増倍管とプリアンプはモジュール化されていて取り外しはできない。これから測定する値は光電子増倍管とプリアンプこみの値である。

図 3.3 は HV 値のヒストグラムである。値は $1230\mathrm{V}\pm\ 125\mathrm{V}(1\,\sigma\ )$ である。ここで大きくばらついたものは観測には使用しないため、その基準を決めた。1600V 以上は光電子増倍管の MAX 電圧を超えるため使用しないことにした。900V 以下も大きく平均からずれるため、同様に使用しないことにした。

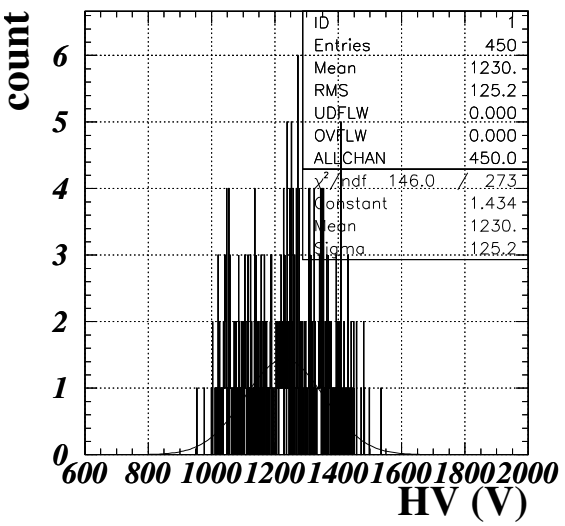

図 3.3: 縦軸は光電子増倍管の数、横軸は HV 値、ゲインを $1.2\times\ 10^7$ に調整した時の各光電子増倍管の HV 値。

3.2.3 リニアリティー

次に光電子増倍管モジュールの増幅率の線形性 (リニアリティー) を求める。このテストでは 1000-p.e. までのダイナミックレンジで測定した。これは Crab を 1TeV から 100TeV まで観測するために必要なダイナミックレンジである。

測定の流れであるが、ND フィルターを LED の正面に据える。こうして 1-p.e. を求め、ND フィルターの透過率を変えていくことにより、入射光量を変化させる。今回は 1 ~ 1000-p.e. までの入射光量を調節出来るように、始めの ND フィルターの透過率を 0.1 %として測定した。さらに ND フィルターの波長依存性も考慮して解析を行った (Appendix D)。測定点は 1,10,50,100,210,280,350,500,700,1000 -p.e. の 11 点をとった。

図 3.4 は 450 本分のデータを重ね合わせたものである。

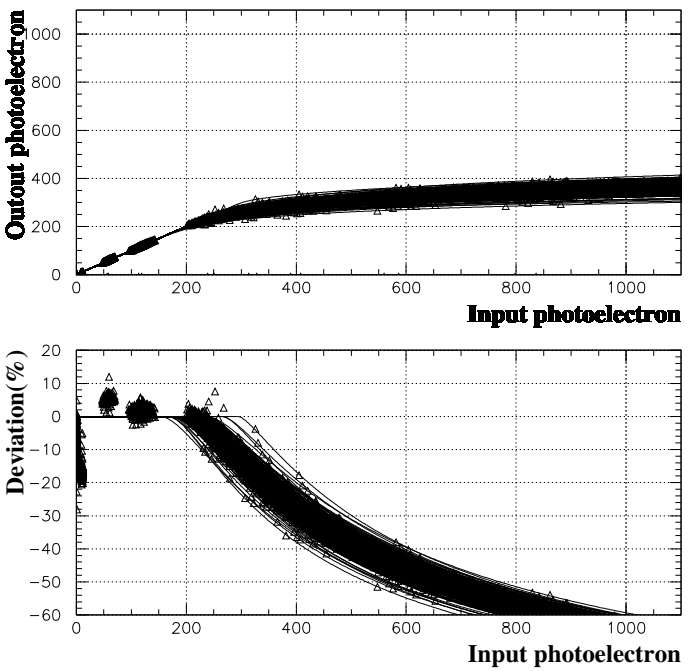

図 3.4: 0-p.e. から 1000-p.e. までのリニアリティー。上図：linearity、横軸：入射光量、縦軸：出力光量。下図：deviatioon、横軸：入射光量。

このデータをフィッティングするにあたって以下の関数を用いた (図 3.5)。

$$F(x) = \begin{cases} x & (x \leq a) \\ \frac{((x-a+c)^b - c^b)}{b} c^{(1.0-b)} + a & (x > a) \end{cases} \tag{3.2}$$

この式のパラメータは図 3.5 にあるような意味を持つ。
パラメータ a :折れ曲がりのポイント。
パラメータ b :曲線のベキ
パラメータ c :曲線部の原点からのずれ。
パラメータ a まで、直線で x = a 以降は曲線の式を用いる。

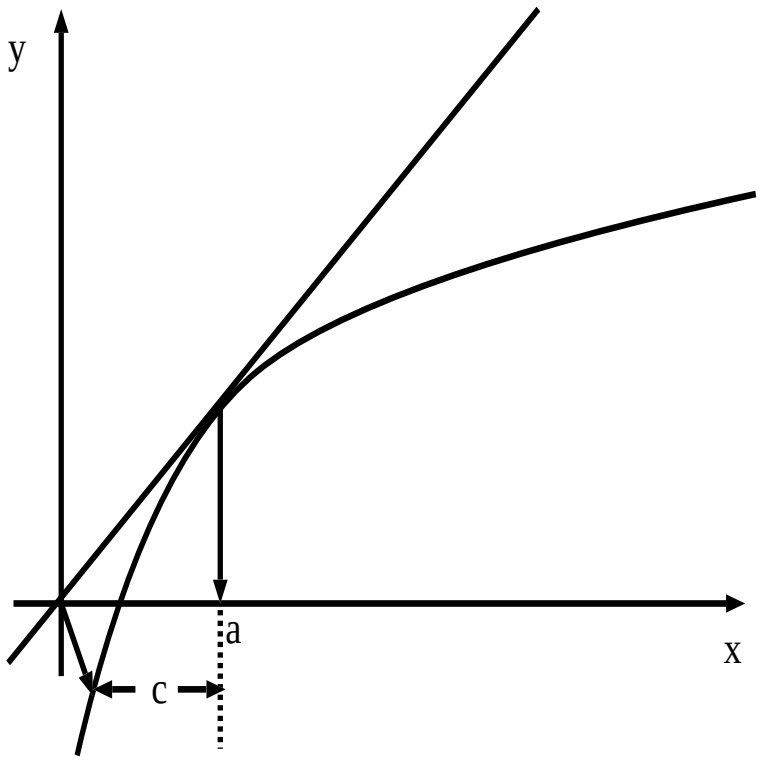

図 3.5: リニアリティーのフィッティング曲線。x = a まで直線、x > a から曲線でフィッテイングする。

3.2.4　サチュレ− ション

先程求めたリニアリティーのサチュレ− ションのポイント (図 3.5), パラメ− タ a のヒストグラムは左図のようになる。このポイントは 202.1 ± 12.7(1 σ) p.e. となった。

この値で 150-p.e. より早い段階で折れ曲がる光電子増倍管は使用しないことにした。

カメラでは入射光量が 250p.e. の時に 10 %以内に非線形性をおさえることを目標としてデザインしている。これは Crab をエネルギー 100TeV まで観測することから要請される値である。測定結果は、− 5.2 ± 2.0(1 σ) %ずれている (右図)。これはこのキャリブレ− ション データにより、十分に補正できる範囲内と考えられる。

ここで− 20 %より値が下まわる光電子増倍管は使用しないことにした。

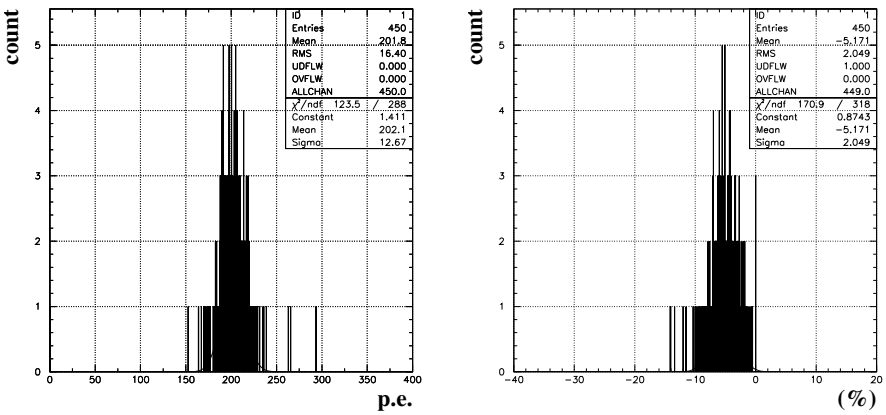

図 3.6: 左図、縦軸：カウント、横軸、入射光電子数。リニアからの折れ曲がりの ポイントは 202.1 ± 12.7(1 σ) である。この点までは十分にリニアであるといえる。右図：縦軸：カウント、横軸：リニアからのずれ (%)。入射光量が 250p.e. の時のリニアからのずれを表す。値は-5.2 ± 2.0 %。

3.2.5 増幅率 vs HV

光電子増倍管の増幅率と HV の関係は一般に次のように表せられる。

$$gain = K\{Voltage\}^{\alpha} \tag{3.3}$$

この式にしたがって、1100、1200、1300、1400、1450V の 5 点を測定しプロットした。対数でプロットしているのでα はこの直線の傾きを表し、K は y 切片を表す (図 3.7、左図)。

前述のα の値をヒストグラムにした (右図)。α の値が 5.25 以上の光電子増倍管、4.5 以下の光電子増倍管を仕様から外すことにした。

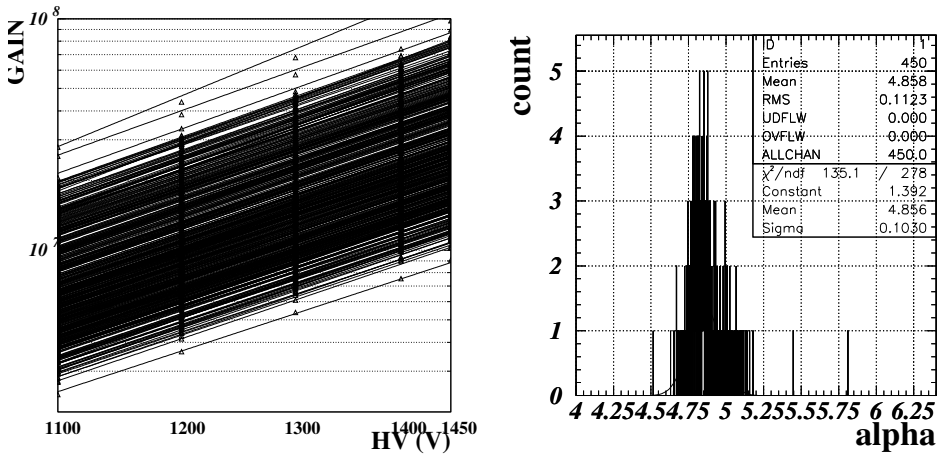

図 3.7: 光電子増倍管の増幅率と HV 値の関係。左図；縦軸が増幅率、横軸が HV 値。右図；横軸にα の値をプロットした。

さらにこのデータを使用することにより、光電子増倍管の増幅率の変更が可能になる。こうして、増幅率を変えることでガンマ線のエネルギー スケールを変更することが可能になる。例えば、spectrum cut off がある天体観測の場合、十分にダイナミックレンジがある HV 領域選び、その天体を自由に観測することができるようになる。

3.2.6 Time walk 補正

チェレンコフ光の到達時間の差は ~ 5nsec のオーダーなので 1nsec 時間分解能で測定することで、1 つの望遠鏡での集光面上でシャワーの到来方向を決定できる。現 CANGAROO-II ではこれは達成できていない。これを測定するために以下のテストを行った。

一般に入射光量によって、時間的なばらつきが生じるがそれを補正することにより、ディテクターの時間分解能を高めることができる。

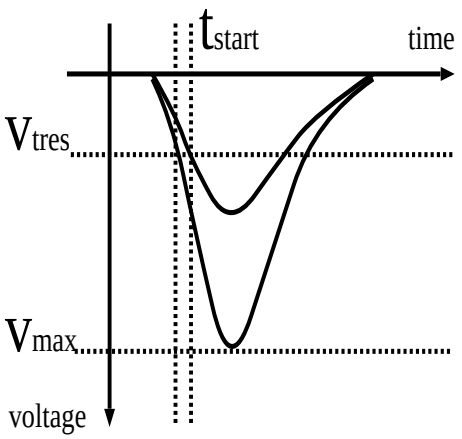

図 3.8: 閾値を越えた時の時間分布は光量によって違う。そのため、光量によってタイミング分布が変わってくる。

以下の式にしたがって補正をする。これは実際の波形をガウス分布の形に近似している (図 3.8)。

$$V = V_{max}\exp(-at^2) \tag{3.4}$$

$$\begin{aligned}
\exp(-at_{start}^2) &= \frac{V_{thres}}{V_{max}} \qquad (3.5)\\
t_{start} &= \sqrt{-\frac{1}{a}\ln(\frac{V_{thres}}{V_{max}})}\\
&= \sqrt{-\frac{1}{a}\ln(\frac{V_{thres}}{bx})}\\
V_{max} = bx&\\
&= \sqrt{-\frac{1}{a}\ln(\frac{c}{x})}\\
\frac{V_{thres}}{b} = c&
\end{aligned}$$

$$= \sqrt{-\frac{1}{a}(\ln(c) - \ln(x))} \tag{3.6}$$

$$t_{start} = \sqrt{\acute{a}\log(x) - \acute{b}} \tag{3.7}$$

この式を用いて、タイムウォーク補正をすると、時間分解能は全レンジで 1ns を切ることが図 3.9 よりわかる。この TDC は 24.4picosec/ch なので

$$Time - resolution = 24.4ps/ch \times TDCrms = 24.4 \times 37.71 = 0.92nsec$$

これよりチェレンコフ光に対する時間分解能は十分にあるといえる。

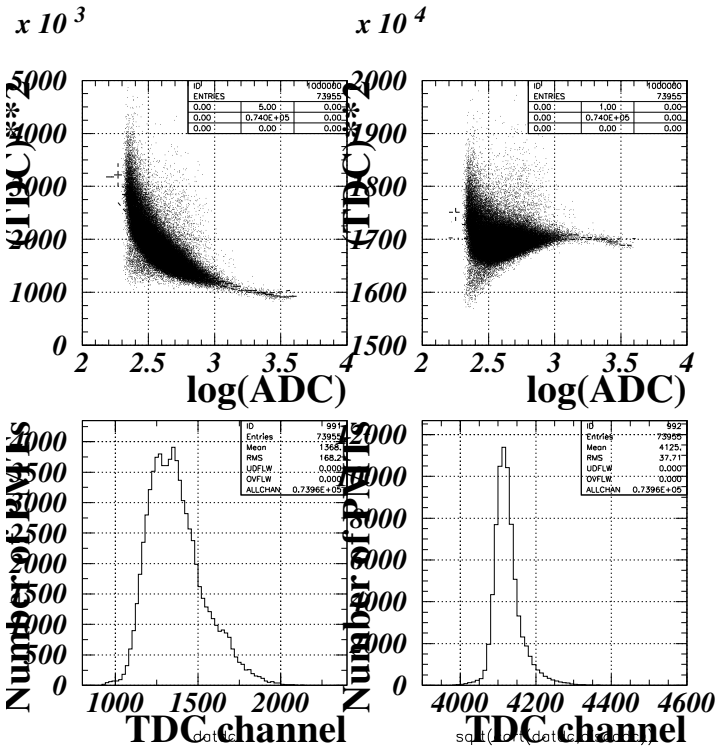

図 3.9: 左列が補正前、右列が補正後、補正後のヒストグラムの時間分解能は 1nsec をきる。

3.2.7　時間分解能

前述の補正をみると約 1ns の時間分解能をもつことがわかる。この事実を参考にして補正なしで約 1ns の時間分解能をもつ入射光電子数を調べると、約 20-p.e. を入射したときに時間分解能は 1ns の値をもつことが分かった。そこで 450 本全部に 20-p.e. を入射したときの時間分解能をみることにした。

この値で 1.2ns を越えるものは除いた。結果をみると 27m ものツイステッドペアケーブルを用いていることにより信号の立上り時間が 5nsec に劣化するにも係わらず、1ns 以内 (Δ t = 0.96 ± 0.09(1 σ)nsec) の時間分解能が全ての光電子増倍管に対して得られることが実証された (図 3.10)。

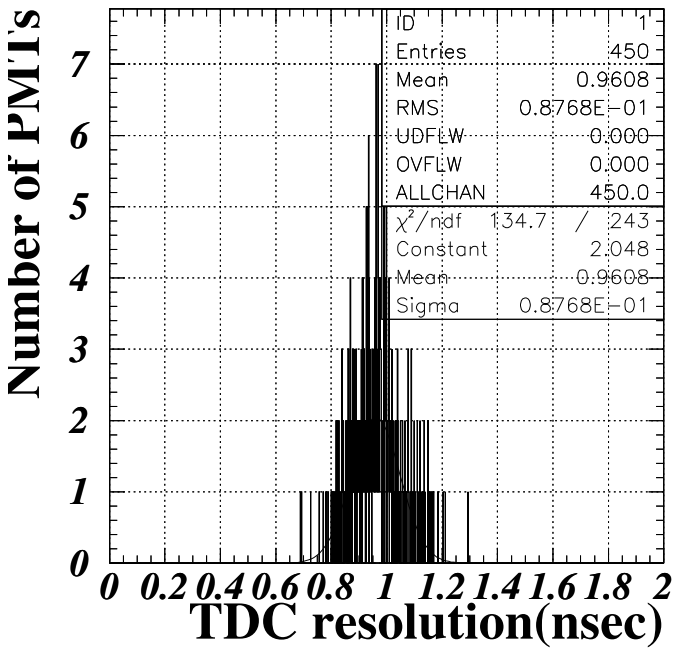

図 3.10: 縦軸はカウント、横軸は TDC 値、入射 20-p.e. で 1nsec を切っている。

3.2.8 量子効率

光電子増倍管によって測定された光のエネルギーを計算するときに、光電子増倍管のフォトカソードの感度を知る必要がある。代表的なものには量子効率 ($Q.E.$)、放射感度 Sk、青感度指数 Skb がある。以下特徴を挙げる (Appendix A、[16])。

- 量子効率、$Q.E.$[%]
  光電面から出る光電子数を入力光子数で割ったもの。Q.E. のデータは光電子増倍管がアセンブリされる前にとられる。今回、アセンブリされた光電子増倍管を使用するため値は分からない。

- 放射感度、Sk[A/W] ある波長における入射光量を放射エネルギーで示し、その時の光電面からの電流を放射エネルギーで割った値。Sk は 2856K 温度分布のタングステンランプの黒体輻射に対しての光電子増倍管の感度。必ずしも UV 光の対しての感度を測っているわけではない。

- 陰極青感度指数、Skb[μ A/lm]
  Skb はタングステンランプを光源として用い、コーニング社製のフィルター (CS-5-58 を 1/2 に研磨したもの) を光電子増倍管の直前に置いた時の光電子増倍管の感度。約 400nm の波長域。

基本的に Skb は入射光が 400nm のときの光電子増倍管の感度で他波長に対する感度を知ることはできないが Q.E. に比べコストはかからない。この Skb から 450 本の光電子増倍管の感度の波長依存性を調べるために以下の考察をした。

Skb のみでは他波長の感度を知ることはできないが、光電子増倍管 10 本分の Q.E.(浜松ホトニクス社に依頼) と 450 本分の Skb(同社により測定) から 450 本分の Q.E. に換算する。まず光電子増倍管 10 本分の量子効率と波長の関係をプロットする (図 3.11 の上図)。

図 3.11 から次のことが分かる。

- Q.E. のばらつきが小さい。

- それぞれのラインは殆んど同じ形をしている。

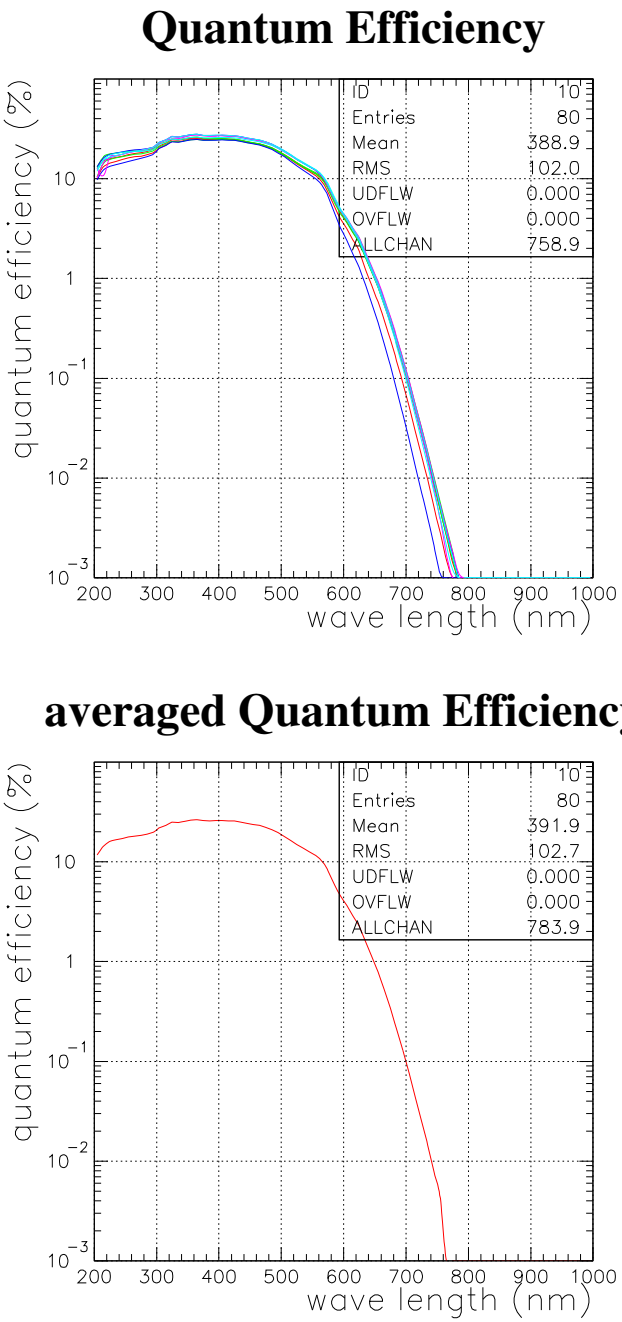

図 3.11: 量子効率の波長依存性。上図：光電子増倍管 10 本分について示している。ほとんど同じ形をしている。下図：光電子増倍管 10 本分の平均をプロットしたもの。

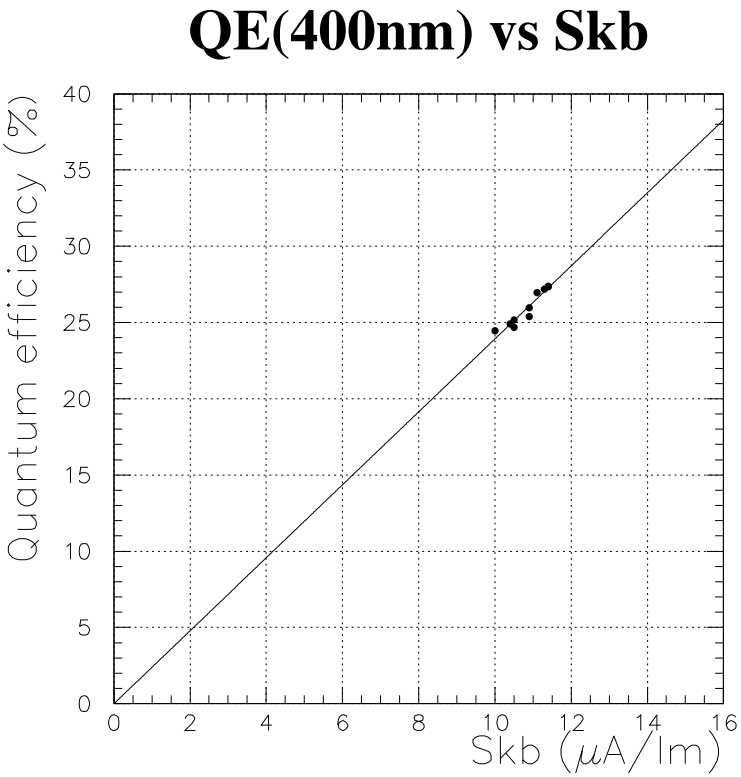

図 3.12: 入射光の波長が $400nm$ のときの量子効率の陰極青感度 (Skb) 依存性。光電子増倍管 10 本分をプロットし、原点を通る直線でフィッティングしている。

次に入射光が 400nm のときの Q.E. と Skb の関係を 10 本分プロットする。図 3.12 から分かるように Q.E. と Skb の関係は非常によい比例関係にあることがわかる。この比例係数は 2.39 ± 0.04 である。

$$Q.E. \propto Skb \tag{3.8}$$

以上から 450 本分の光電子増倍管の感度の波長依存性 (Q.E.) を求めることができる。まず、ある光電子増倍管の Skb から上式を用いて 400nm のときの Q.E. が求める。その値を図 3.11 の下図の 400nm の位置にプロットする。量子効率と波長の関係はどの光電子増倍管でもほぼ同じ形をしているので、このプロット点を通り図 3.11 の下図と同じ形のグラフがその光電子増倍管の Q.E. ということになる。

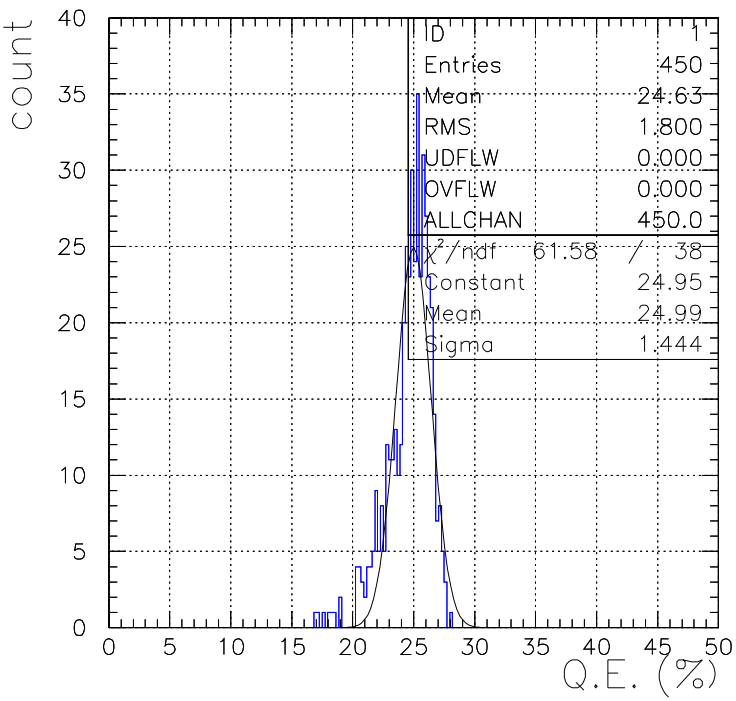

図 3.13: 光電子増倍管 450 本分の 400nm 対する量子効率のヒストグラム。ガウシアンでフィッティングしている。

具体的にはある光電子増倍管の量子効率を $Q.E.(\lambda)$、$Q.E._{average}(\lambda)$ とすると、

$$Q.E.(\lambda) = Q.E._{average}(\lambda) \times \frac{Q.E.(400nm)}{Q.E._{average}(400nm)} \tag{3.9}$$

となる。先の比例係数を用いて光電子増倍管 450 本分の $Q.E$(入射光量が 400nm での値) を図 3.13 に示す。結果は平均量子効率約 24.6%で、ばらつきは中心値に対して約 7.3 %であることがわかる。これは 450 本の光電子増倍管の感度が非常に揃っているといえる。

3.2.9 個々の PMT の作業日程

図 3.14 に示しているのは個々の光電子増倍管のテストの行程表である。8 月中旬から今まで述べた光電子増倍管のテストを開始した。この一連の光電子増倍管の特性を調べる作業は、ほぼオートマティックに行った。その結果、1 本の測定におよそ 40 ~ 50 分かかった。この作業を交替制で、1 日に 8 ~ 15 までの本数をテストした。

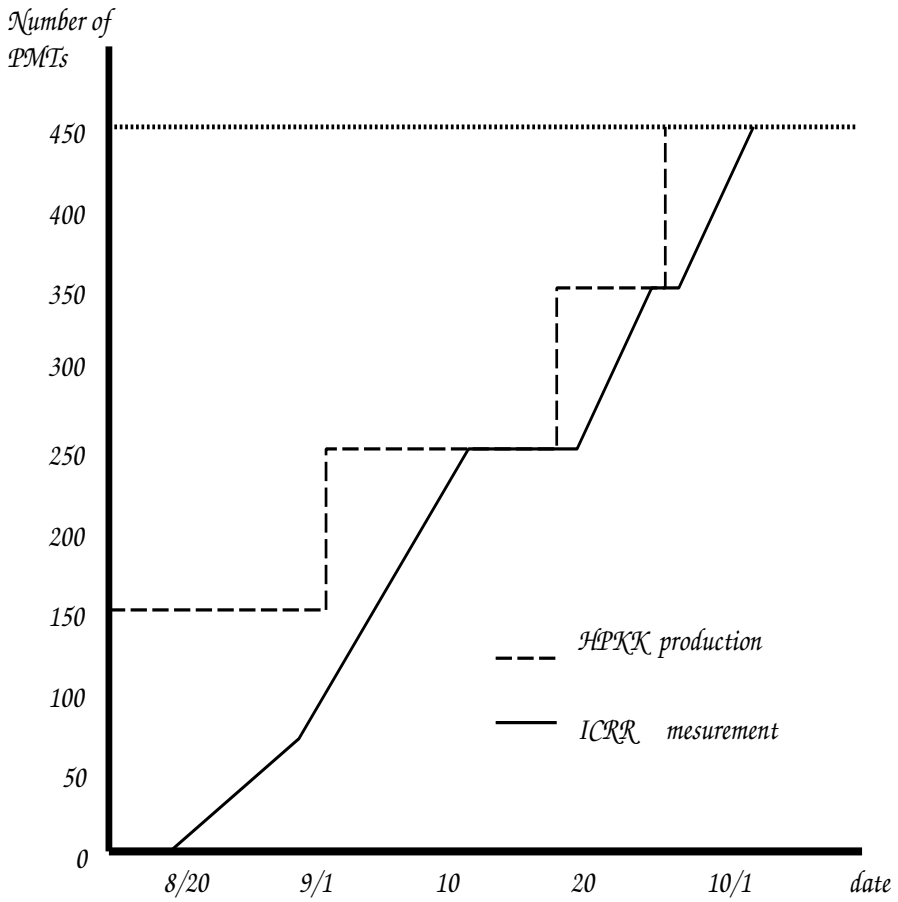

図 3.14: 個々の光電子増倍管を時のキャリブレ− ションの行程表。実線が宇宙線研究所でのテスト、破線は浜松ホトニクスから光電子増倍管の入荷曲線。

3.3 全系テスト

3.3.1 Crosstalk

これから全系テストの準備をしていく。全系テストをする前にクロストーク影響がどれくらいかを調べた。

CANGAROO-III カメラ では個々の光電子増倍管でのモジュール化をはかり、基本的に、光電子増倍管 1 本の系はフロントエンドモジュールまで独立している。このためクロストークは非常に小さいはずである。今回、この全部が組上がった状態で、どれ程クロストークが起きるのか調べた。セットアップは以下の様になっている。

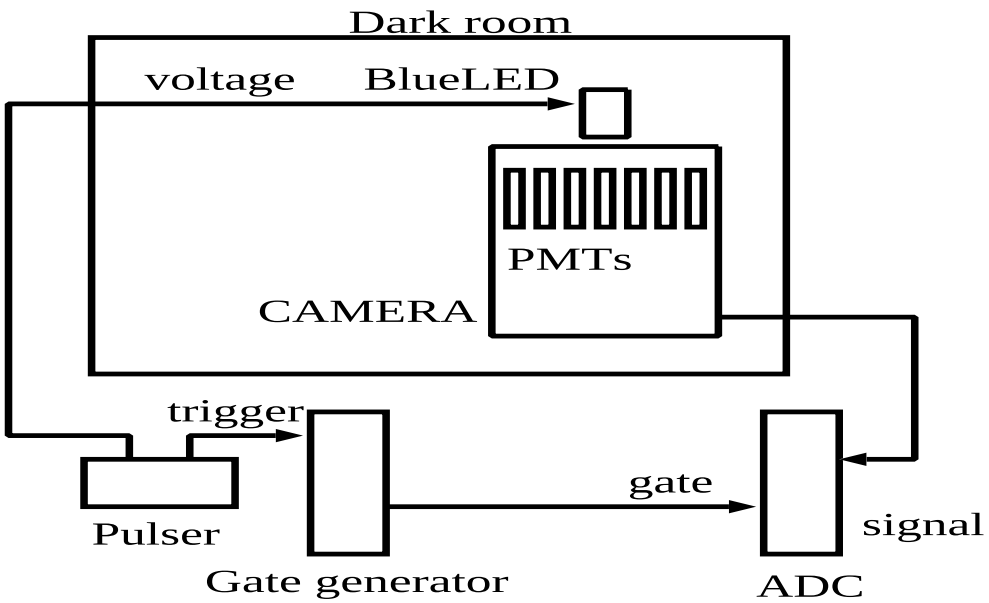

図 3.15: クロストークを調べるためのセットアップ

今回テストした光電子増倍管は、Group-id の 0 ~ 3 の 3 つのグループ、1 グループ 16 チャンネルあるので、計 48 チャンネルについて調べた。この 1 グループ 16 チャンネルをまとめて、1 つのシグナルケーブルで信号を送っている。

まず光を入射するカメラの中心の光電子増倍管のみに HV をかけ、そのまわりの光電子像倍管のシグナルを ADC でとることにした。現実的に光電子増倍管同士のクロストークよりも、プリアンプ間、もしくはケーブル間においてクロストークが起こるので、中央の光電子増倍管以外には HV をかける必要がない。入射光は 100-p.e. レベルのパルス光とし、この時にどれだけ他の光電子増倍管がクロストークを持っているか調べた。

全体の 47 本の PMT のクロスト− ク

入射光の ADC 値はペデスタルを差し引いて 1020 チャンネルであった。これはおよそ 100p.e. に相当する値である。この入射光量に対し、他の光電子増倍管を 1000 イベントでデータを取ることにした。

結果は図 3.16 と 3.17 に 示した通りである。この時の、ADC 平均値の変化は- 0.37 チャンネルであることがわかる。48 本分のクロストークは入射光量に対し 0.04 %以内に収まり非常に小さい。

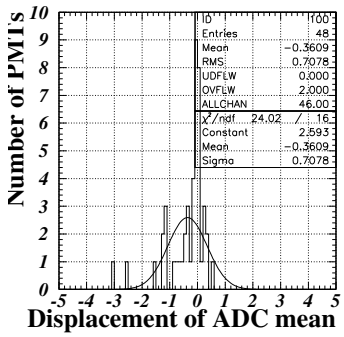

図 3.16: 1 本の光電子増倍管のまわりの 47 本のクロストークによる ADC 平均値の変化のヒストグラム、入射光量に比べ、非常に小さい。

下図はそのクロストークマップである。

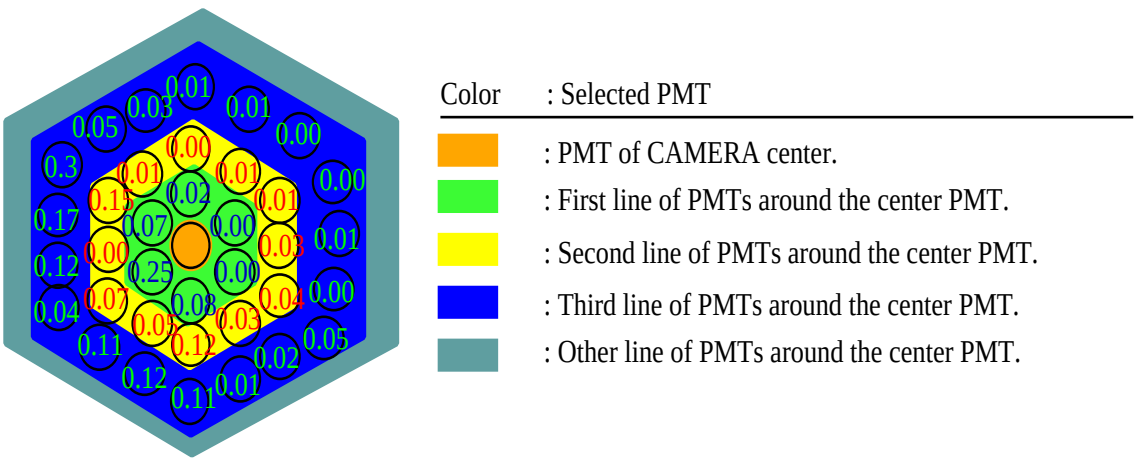

図 3.17: クロストークマップ。図中の数字は入射光量 (100-p.e.) の ADC 値に対する、他の光電子増倍管の ADC 平均値変化の割合。

円周まわりの PMT のクロスト− ク

少し解析を進め、どこでクロストークが起きているのかを調べた。まずプリアンプから起きているのではあれば中央の光電子増倍管のまわりが一番大きなクロストークが見えるはずである。下図は中央の光電子増倍管に最も近い光電子増倍管のクロストークのヒストグラムである。図 3.19 は今回調べた光電子増倍管マップである。この 3 つ比べる限り有意な差は感じられない。

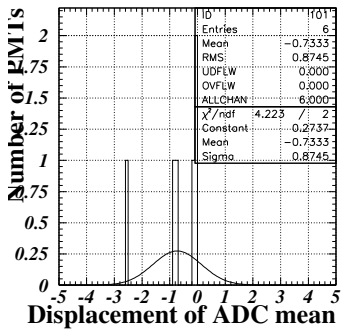

図 3.18: 中心の光電子増倍管のまわりの一列のクロストークヒストグラム

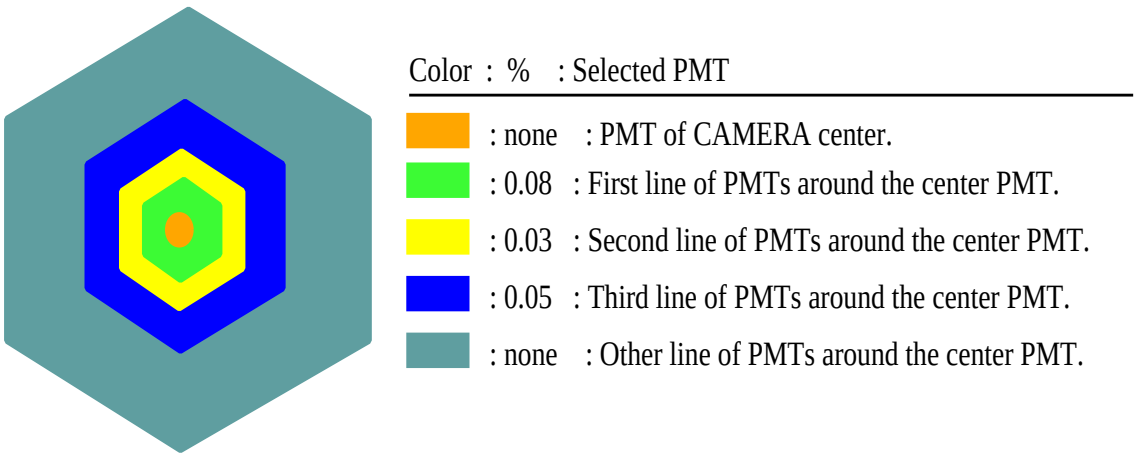

図 3.19: 中央のまわりのクロストーク分布特に有意な差は感じられない。

グル– プごとの PMT のクロスト– ク

次にグループごとにクロストークが生じてないか調べた。光電子増倍管はグループごとにシグナルケーブルでまとめられ、フロントエンドに送られる。この 27m のシグナルケーブルでクロストークが起きているか調べた。図 3.20 の上図と下図は 100-p.e. の入射をされいる光電子増倍管が含まれていないグループ。中段の図は 100-p.e. の入射をされている光電子増倍管が含まれているクロストークのヒストグラム。明らかにこの中段のヒストグラムは他とくらべクロストークが起きている。しかし値は、– 1.03 チャンネルなので入射光の 0.1 %になり問題にならない。

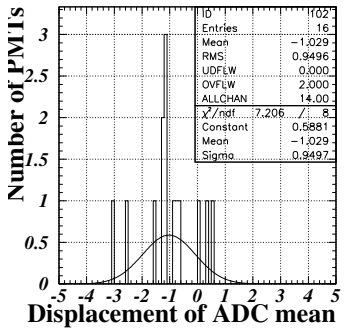

図 3.20: 中心の光電子増倍管が含まれる Group-id 0 のクロストークヒストグラム

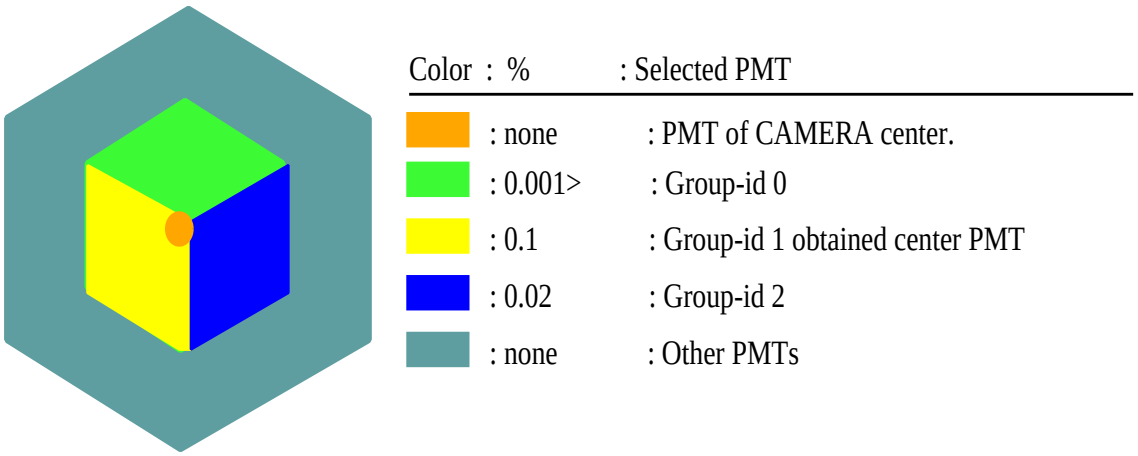

図 3.21: グループごとのクロストーク分布。100-p.e. を入射しているグループにクロストークが認められるが、非常に小さい (0.1 %)。

3.3.2　遮光テスト

現地で蓋を閉じて、月の出ている時間帯でも、昼間でも、遮光がしっかりいていれば、光電子増倍管にダメージを出さずにカメラ容器の中でキャリブレーション用のデータをとることができる。

観測時間を潰さずに種々のキャリブレ− ションまたはテストを行うことが可能であることを意味する。今回はカメラ box がどれほど遮光できるのかを調べた。カメラ容器に蓋をし、周りからの入射光もないとした場合と、カメラ容器に蓋をし、30cm 上からの蛍光灯の明りで容器を照らした場合でテストをした。

まずオシロスコープで確認した際には多少、光洩れの効果があった。このため ADC でペデスタルを取り、どれだけばらついているかを調べた。下図はその結果である。

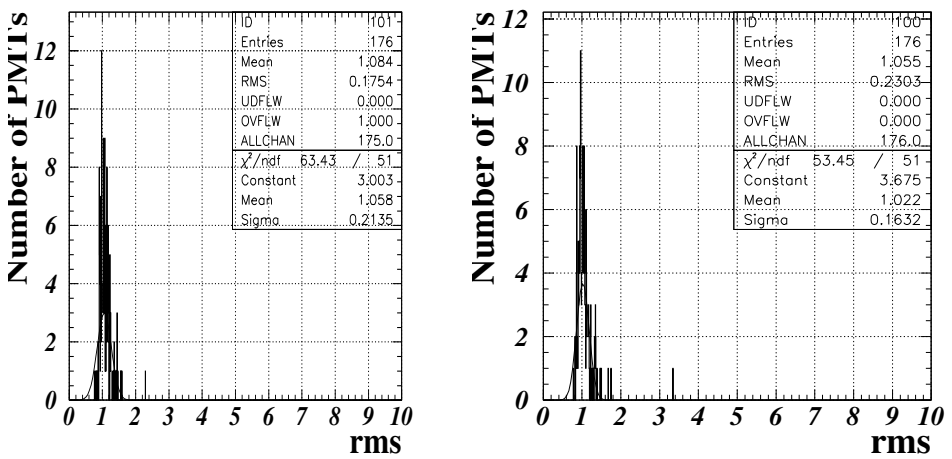

図 3.22: 遮光した時の各光電子増倍管の ADC ペデスタルの rms 。右図：外部が暗い時、左図：外部が明るい時。

一般に日常の光は DC 光としてゲートのタイミングに対してランダムな光量を入射する。今回のエレクトロニクスは AC カップリングになっているため、もれた光の効果は ADC の平均値ではわからない。そのため。rms の広がりで洩れた光の効果を調べることにする。

こういった場合、この rms の平均値は光をいれる前と後では変わらない。実際のキャリブレ− ションに問題にはならないであろう。

3.3.3 キャリブレ– ション用の光源

実際に現地でのキャリブレーションを行っていく上でカメラ面での入射光のユニフォミティは重要な問題となる。カメラに入射する光は前述の青色 LED を用いるが、テストをする前にその光源の出す光の位置による光量分布を知る必要がある。一般に LED そのものは光を分散させるべくレンズがついている。

今回、使用する日亜の LED(NSPB510S) は指向性が 30° であるとされている。指向性のテストは実際の望遠鏡のミラーからカメラまでの距離と同じ、8m を LED とカメラの間にとり、カメラの正面に用意した直径 80cm のスクリーンに映った光の像を CCD でとることにした (図 3.23)。CCD は SBIG 社製 ST-5C を用いた。

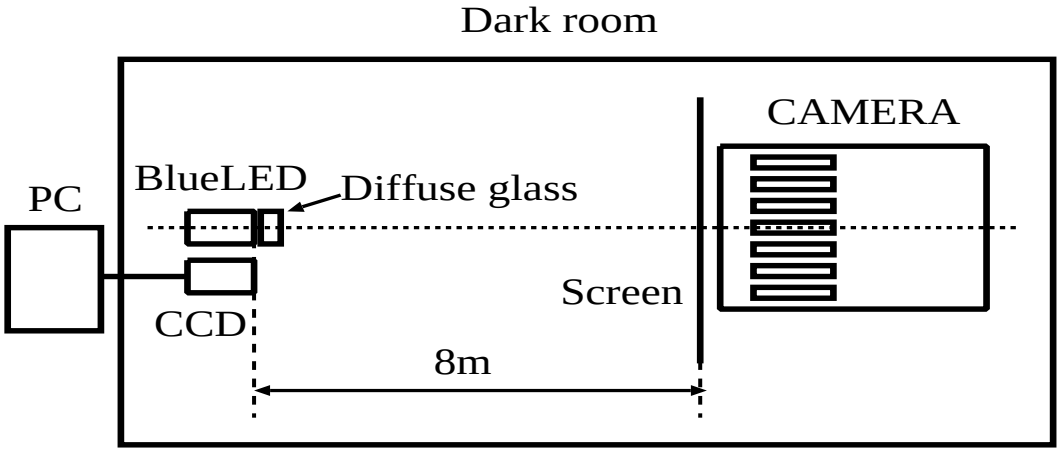

図 3.23: CCD でのユニフォミティテストのセットアップ。

すりガラスなしの場合

まず始めに LED からの光を直接スクリーンに当てて、位置による光量分布をみることにした。LED には 4V の電圧をかけて光らせ、CCD では 60 秒の露出を行って撮像した。

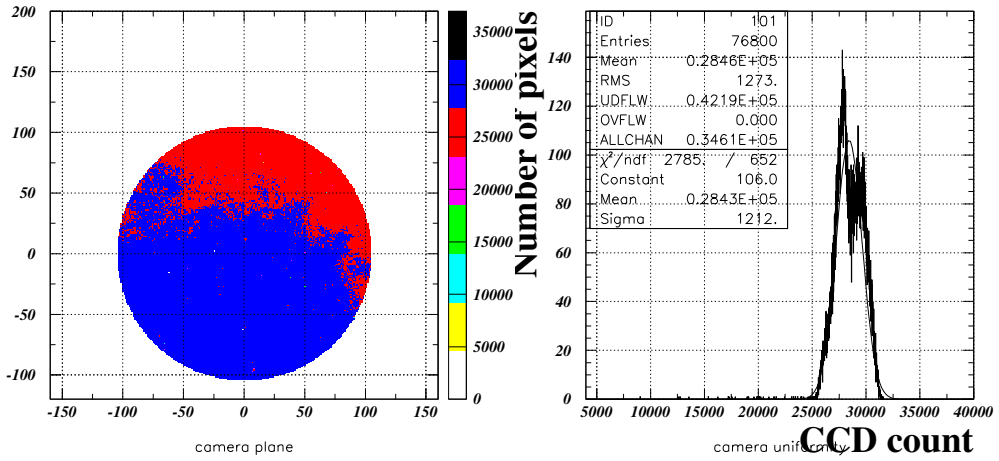

図 3.24: CCD image,LED からの光を直接入射し、スクリーンに投影したもの. 左図：約 4 ° の視野部分の CCD イメージ。局所的に光が入射していることがわかる。右図：左図における CCD のカウントのヒストグラム。局所的な構造がヒストグラムでも確認できる。

図 3.24 の左図には局所的な構造がみえている。これは右図のヒストグラムにも現れていて、2 つのピークを確認できる。図 3.24 の右図からσ は 1212 チャンネルである。ばらつきは 4.23 % である。これより発光ダイオ− ドの指向性は除き切れていないことがわかる。

すりガラスありの場合

このLEDの位置による光量の分布の構造を消すためLEDの前にすりガラスをいれ、光を拡散させCCDで画像を撮った。前回と同様に、LEDには4Vの電圧をかけて光らせ、CCDでは60秒の露出を行って撮像した。

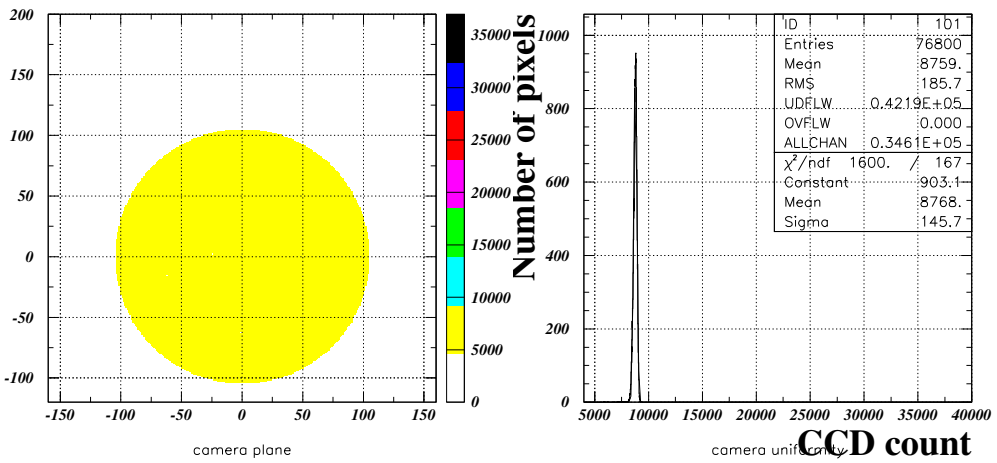

図 3.25: CCD image,LEDからの光をすりガラスで拡散させ、スクリーンに投影したもの. 左図 : 視野約4°でのCCDイメージ。局所的な構造は消えていることがわかる。右図 : 左図におけるCCDのカウントのヒストグラム。σの値が小さいことから、カメラ面全体に一様に光が入射していることがわかる。

図3.25をみると、図3.24に比べ光量が落ちている(31 %)が、見えていた局所的な構造がなくなり、カメラ面に一様な入射光を確認できる。図3.25の右図から、σは145.7でばらつきは1.66 %である。すりガラスを付けた状態と比べ、非常にユニフォミティが良いことが確認できた。

そこでこの状態を光電子増倍管でユニフォミティが確認できるか次節以降にテストしていく。

3.3.4 増幅率のユニフォミティ

全系テストに入る。全光電子増倍管をカメラにインストールした状態で、光を中央に入射しカメラ面でどれだけユニフォミティがあるかを調べた。

これは個々の光電子増倍管に対しては増幅率が 1.2×10^7 になるようにテストし、HV 値を調整したが、全光電子増倍管がインストールされた状態でどれだけカメラ面でユニフォミティがあるかを確かめるために行った。

測定方法は 8m 離した LED 光源から中心の光電子増倍管に 50-p.e. を入射した時のカメラ面でのユニフォミティを測定した (図 3.26)。

パルサー制御の出力電圧を用いて LED の光量を調整しているが、パルサーの出力電圧は CAMAC の DAC を用いて PC で調整した。入射光量は ND フィルター (透過率 2 %) を付け中心の光電子増倍管への入射光電子がフィッティング (第 2.3.2 節) して 1-p.e. になるように DAC の値を調整し、その後 ND フィルターをはずし 50-p.e. にした。イベント数は 1000 イベントとした。

行ったテストは

- LED に対しすりガラスを付けずに、カメラ面でのユニフォミティをみる。
- LED に対しすりガラスを付けて、カメラ面でのユニフォミティをみる。

の 2 点である。

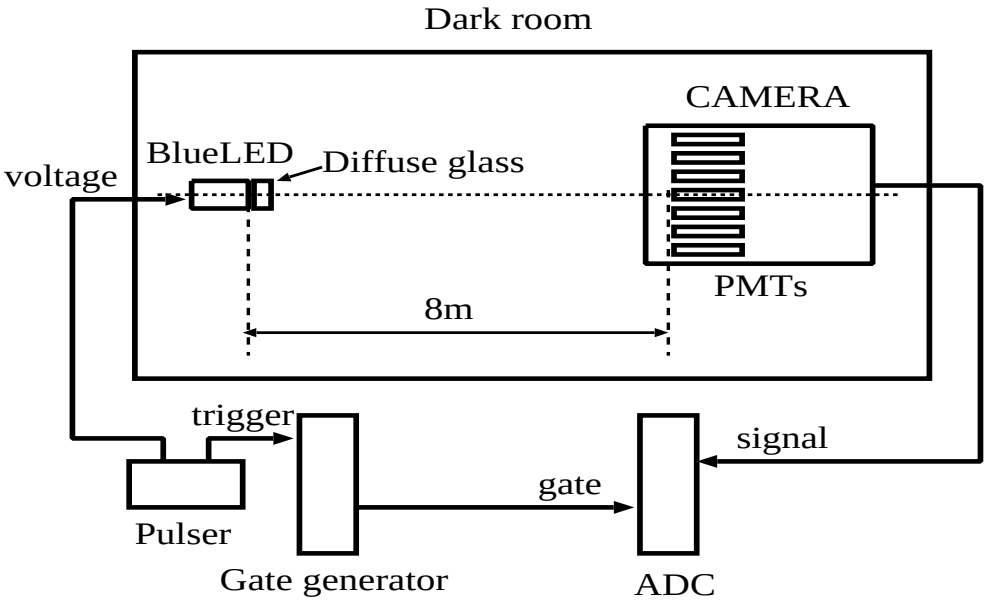

図 3.26: ユニフォミティテストのセットアップ

ユニフォミティをテストする際に、カメラ面での光電子増倍管の位置依存性を調べるために、カメラ面での光電子増倍管の位置関係を図 3.27 に示す。

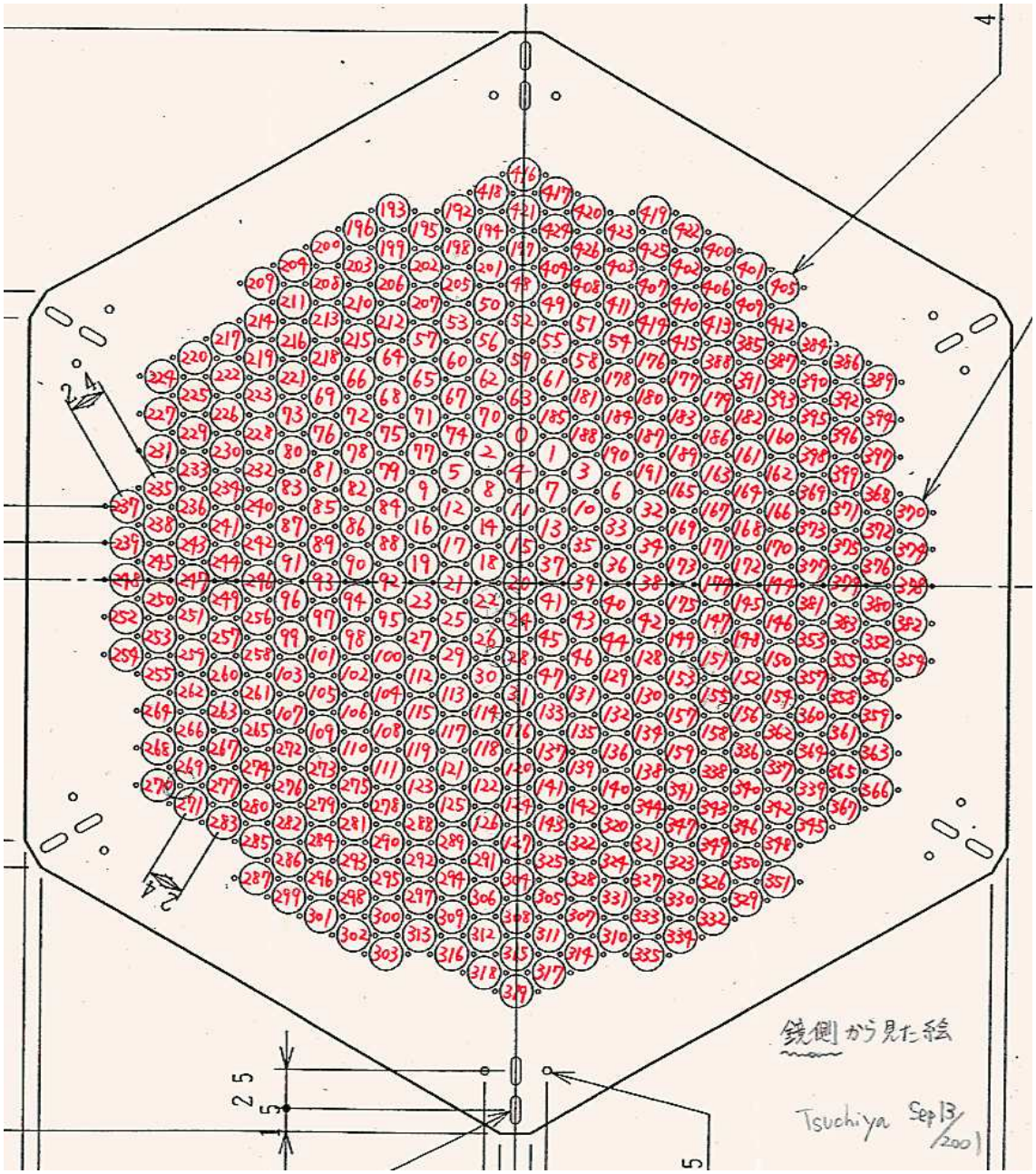

図 3.27: 光電子増倍管 マップ。カメラ面上での光電子増倍管の配置を示してある。

すりガラスなしの場合

始めに、すりガラスを使用せずに直接 LED の光を光電子増倍管に入れることにした。これは 3.3.3 節で示したが、CCD には光の構造が見えている。この時の各光電子増倍管の ADC の平均値のプロットし、さらにそのばらつきを表すヒストグラムは図 3.28 にある。σ は 5.7 で、この ADC の値には各光電子増倍管の量子効率を考慮した値を用いた。今回の測定では 1-p.e. を求めてから光電子増倍管の増幅率を求め、1.2×10^7 になる HV 値を採用していた。しかし、この場合は 1-p.e. から求めるため量子効率を考慮にいれる必要がなかった。しかし、多量の入射光電子がある場合には光電面の量子効率を個々の光電子増倍管について考慮にいれていかなくてはいけない。その理由で ADC/Skb をプロットした。

結果は下図である。ばらつきは 12.4 %となった。このばらつきには LED の光のユニフォミティも含まれている。

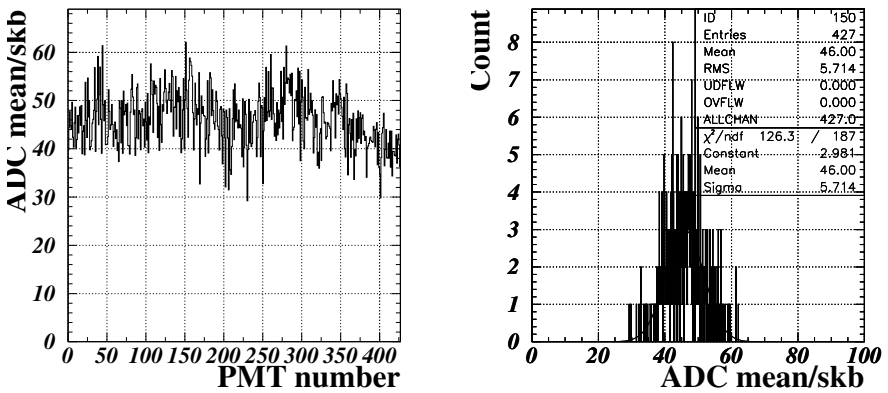

図 3.28: すりガラスなしのときのユニフォミティ。右図：光電子増倍管-ID vs ADC の平均値、光の構造が見える。左図：ADC の平均値のばらつき。20 %以内に収まっていることがわかる。

しかし、この図では光電子増倍管 ID ごとのユニフォミティはわかるが、光電子増倍管の位置依存性がある。この位置依存性を調べるため、各光電子増倍管の ADC mean を 2 次元プロットをした。この時のカメラ面でのユニフォミティは図 3.29 を見るとわかるように、CCD と同じように光の構造がカメラ面に見えている。

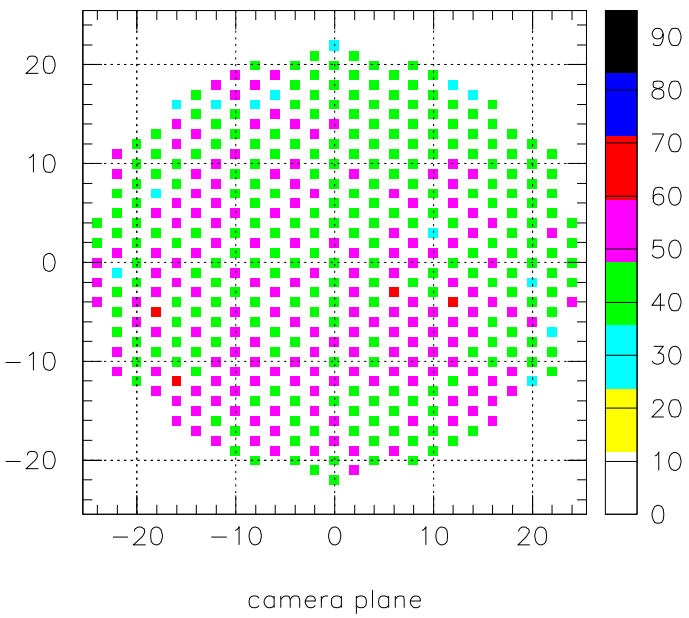

図 3.29: すりガラスを使わず, LED の光を直接入射した時のカメラ面でのユニフォミティ。CCD で確認した非ユニフォミティが確認できる。

すりガラスありの場合

次に LED の正面にすりガラスをつけ、あらかじめ指向性を無くしテストした。この時の各光電子増倍管の ADC の平均値をプロットしたものが図 3.30 である。すりガラスなしの時と比べばらつきは減って 11 %になった。σ は 4.8 である。位置依存性は図 3.31 に示す。位置依存性もすりガラスなしの時と比べ無くなっていることがわかる。

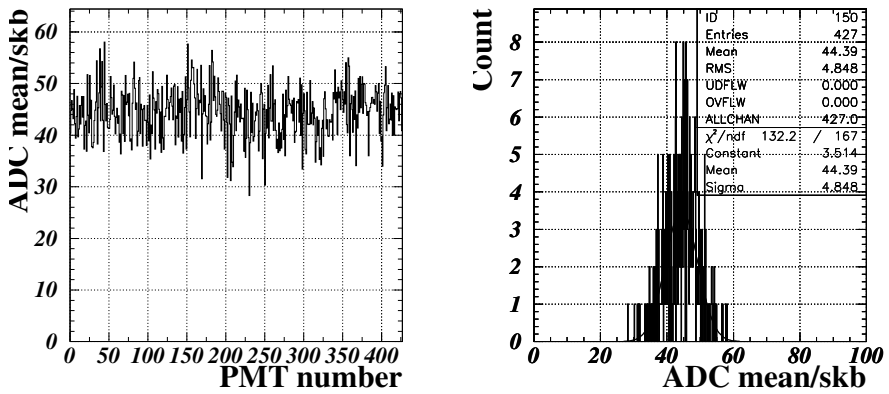

図 3.30: すりガラスを付けた時のユニフォミティ。右図 : 光電子増倍管-id vs ADC-mean、ばらつきがすりガラスなし時より減っている。左図 : ADC-mean のばらつき。前回求めた値よりへっている。

これらのテストから非常に光源がほぼ 10 %程度で一様であることがわかる。CANGAROO-II で使用している光源と同等のものを使用しているので現在もデータのキャリブレ− ションは十分な精度を持って行われていることが分かった。

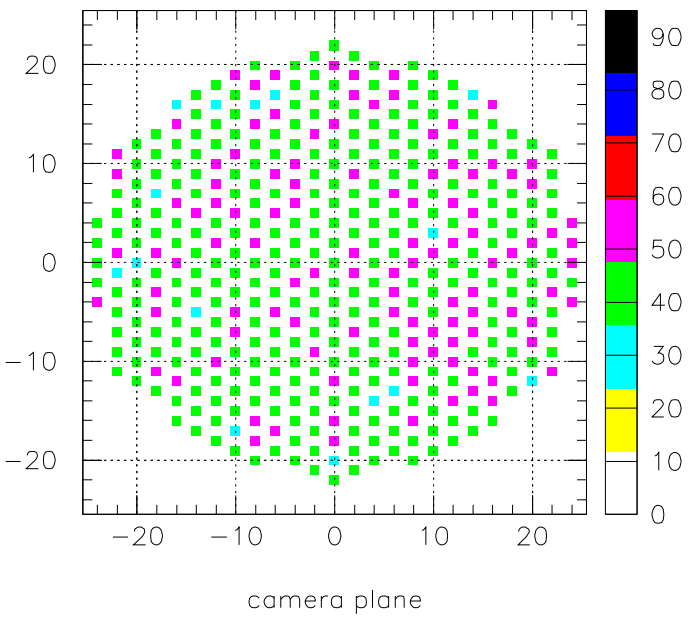

図 3.31: すりガラスを使用した時に、LED の光を入射した時のカメラ面でのユニフォミティ。ユニフォミティが確認できる。

3.3.5 1-p.e. キャリブレ− ション

今回の光電子増倍管 427 本をカメラ容器に詰めた状態において、以前の一本ずつ測定した時と比べ同じ性能テストの再現性があるかを調べなくてはならない。このためにはカメラの中心の光電子増倍管に 1-p.e. を入射し、その光量でのカメラ面の光電子増倍管全本のデータを取得した。1-p.e. のデータをとるにあたって前回のユニフォミティのテストにおいて、50-p.e. の光量を入射し 1000 イベントでデータをとったことに対し、今回は 10000 イベントでデータをとることにした。

カメラの中心の光電子増倍管のヒストグラムは図 3.32 のようになっている。光電子増倍管を全本詰めた状態でもはっきりと 1-p.e.peak が確認出来る。同様にどの光電子増倍管モジュールでもでも確認できた。

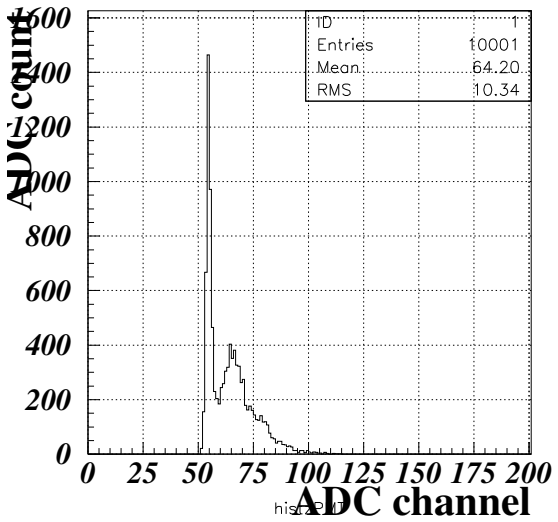

図 3.32: 中心の光電子増倍管 (id 20) の 1-p.e. のヒストグラム。縦軸、ADC-count、横軸、ADCchannel。

以前のデータと比べるため、フィッティングをかけパラメータを比較する。フィッティング関数は 2.3.2 節で説明した通りである。どれだけ 1-p.e. のデータがとれたかを、図 3.33 の左図に示す。この図は横軸にフィッティングして得た入射光量のデータのヒストグラムである。平均値をみると 0.995 と非常に良い値を示している。σ は 0.172 であり、ほとんどの光電子増倍管が中心の光電子増倍管の入射光量をもつことがわかった。この値は個々の光電子増倍管のテストで得た値と変わらない。

光電子増倍管の増幅率 1.2×10^7 は ADC channel で 8 チャンネルになる。これは ADC が 0.244pc/ch なので

$$8ch \times 0.244pc/ch/(1.6 \times 10^{-19}c) = 1.2 \times 10^7$$

となる。

図 3.33 の左図は 1-p.e. フィッティングのパラメータのうちで入射光電子数を表す値である。横軸が各光電子増倍管の入射光電子数である。この値は 0.96 ± 0.17(1 σ) で、カメラ面では一様に 1-p.e. を受けていることがわかる。ただし、1-p.e. フィッティングの結果にも 10 %程度の誤差があると考えられている。

右図は 1-p.e. のピークの ADC チャンネルからペデスタルの ADC チャンネルを引いた値である。今回は 8.99 チャンネルとなった。σ は 0.663 である。本来は 8 チャンネルになるように HV 値を決めたので、全体的にみても今回の方が総じてゲインが高くなっていることがわかった。

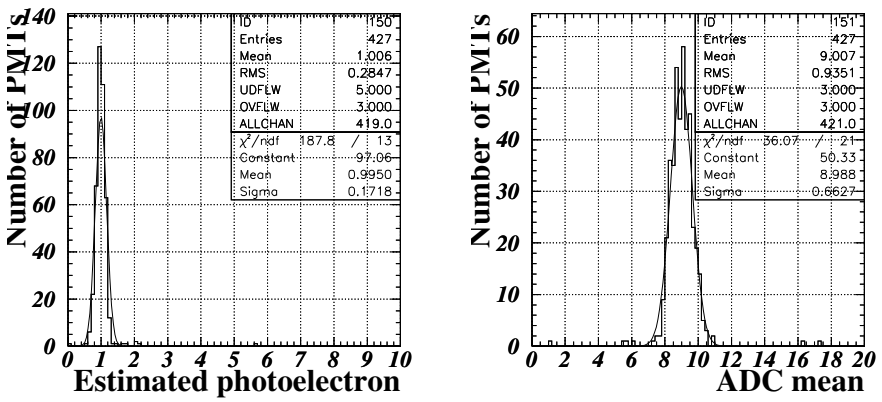

図 3.33: 左図：光電子増倍管に対しての入射光量。横軸：フィッティングした時の入射光量の値。右図： 横軸：ADC チャンネル、この値が 8 チャンネルになるように調整したはずであったが、今回は 9 チャンネルになった。

3.3.6　ライトガイドの集光率測定

カメラ面にはライトガイドが敷き詰められているが、このライトガイド単体での角度依存性はすでに求められている [17]。これは 2.6 節で示した通りである。この節ではカメラ全体での角度依存性を求める。

　カメラの角度変化と全ライトガイドの集光率の関係を調べた。今回の測定では鏡からカメラへの角度は最大で、32° になるので、まず 0°、10°、20°、30°、40°、50° とカメラの角度を変えていくことにする。基本的なセットアップはユニフォミティを調べたセットアップ (図 3.26) と同様で、カメラを傾けて測定をした (図 3.34)。

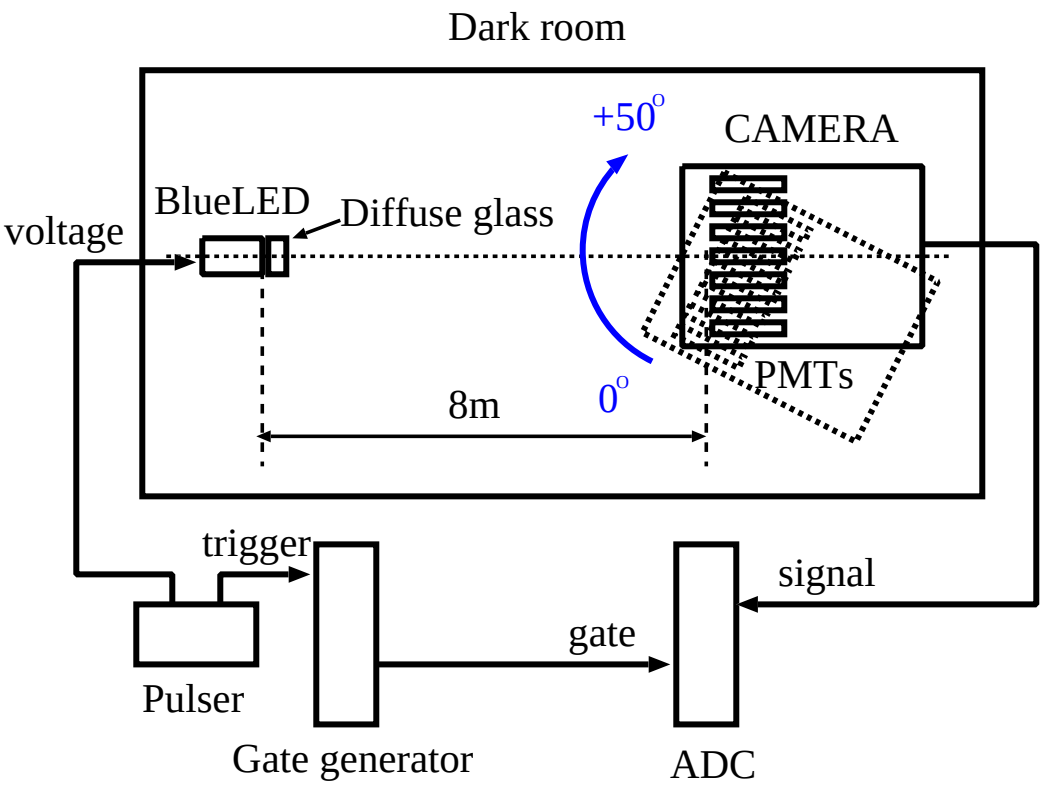

図 3.34: カメラの角度依存性を調べるためのセットアップ。

実験結果は図 3.35 のようになる。現状ではライトガイドを外してこのテストをすることはできないため、この図は 0° の所での値を甲南大学のシミュレ− ション [17] に揃えてプロットした。

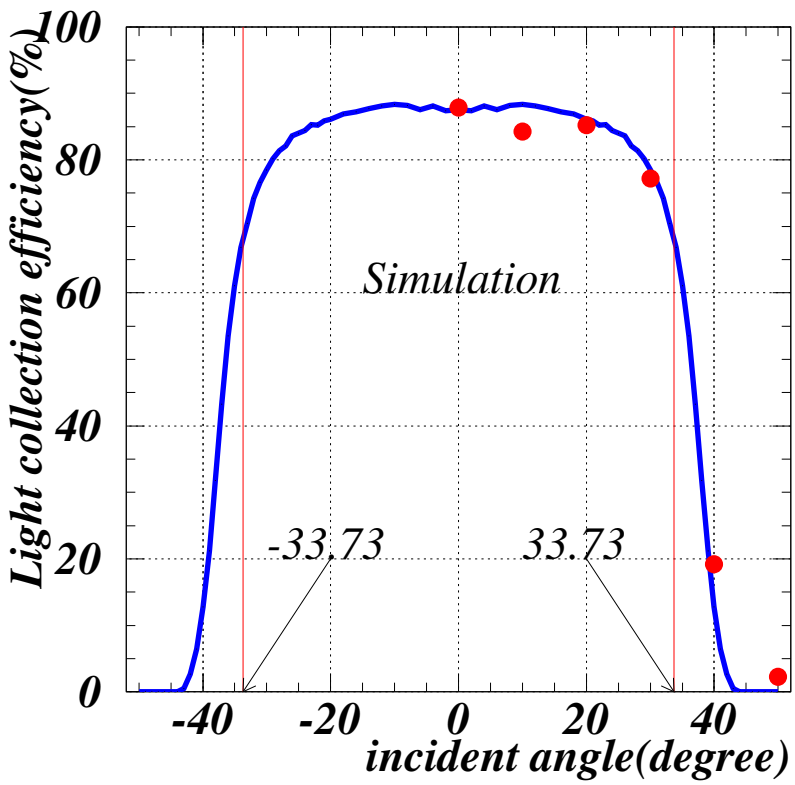

図 3.35: カメラの角度変化によるライトガイドの集光率。 測定値が赤いドット、シミュレーションが青のライン。この結果は甲南大学の結果 [17] と一致している。

グラフをみるとこの結果は非常によく一致している。このことからライトガイドはシミュレ− ション通りの結果をもっていることがわかる。つまり現在稼働している CANGAROO-II よりも 1.7 倍も Sensitivity が上がっていることになる。これはすなわちエネルギー閾値を 1/1.7 に下げることが可能になることを意味している。

3.3.7 LED キャリブレ– ションシステム

山形大学と京都大学で設計、開発されたデータ収集システムを用い、甲南大学で設計、開発した LED キャリブレーションシステムでデータを取った。これは蓋をした状態でもカメラ面全体に光を入射できる仕組みになっている (図 3.36)。

LED box をカメラ容器の右下に設置し、そこからカメラの蓋に取り付けたスクリーンに光を反射させカメラに入射する。スクリーンは LED box からカメラ面までの光の経路を考えて、黒のグラデーションで配色されており、LED box に近い部分が最も濃くなっている。こうすることにより、LED box の経路による指向性を無くすようにしている。

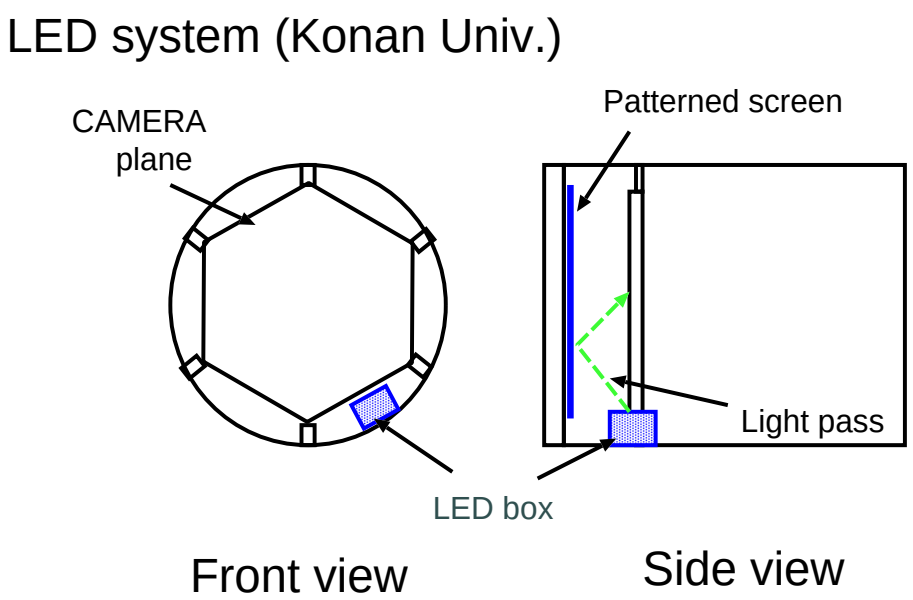

図 3.36: 甲南大学で開発した LED システム [24]。蓋をした状態でカメラ面全体に光を入射できる。

このシステムは以下のような計算をして各光電子増倍管への入射光量を見積もる。ポアソン分布は一般に μ を平均として、

$$f(x) = \frac{e^{(-\mu)}\mu^x}{x} \tag{3.10}$$

ポアソン分布での標準偏差 σ は

$$\sigma = \sqrt{\mu} \tag{3.11}$$

と表せるので、

$$\frac{\sigma_{p.e.}}{\mu_{p.e.}} = \frac{\sqrt{\mu_{p.e.}}}{\mu_{p.e.}} = \frac{\sigma_{ADC}}{\mu_{ADC}} \tag{3.12}$$

となる。この関係を用いて、

$$\mu_{p.e.} = (\frac{\mu_{ADC}}{\sigma_{ADC}})^2 \tag{3.13}$$

となる。上式を用いてカメラのキャリブレ− ションをする。

ばらつきは 12.3 %になった (図 3.37)。これは LED システムそのものがもつ指向性が除ききれていないためであり (LED Box は右下に設置されている。図 3.36)、考慮するとさらに小さい値になる。

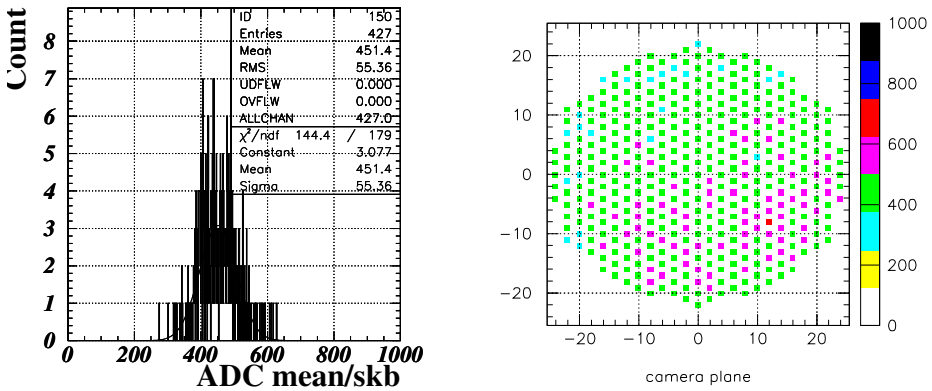

図 3.37: LED キャリブレーションシステムからの入射光をデ− タ収集システムで取得したデ− タ。左図 ; 12 %の ADC 平均値/Skb のヒストグラム。右図 ; ADC 平均値のカメラ面上でのプロット。LED システムの光源の側が入射光量が多いことがわかる。

3.3.8　カンガルー

最後にカメラ全体におよそ 50-p.e. の光の入射をし、データ収集システムでデータを取った。この際、カンガルー の形をしたマスクをカメラに付けた。図 3.3.8 をみてわかるようにカンガルー の形をしたデー タが取れている。

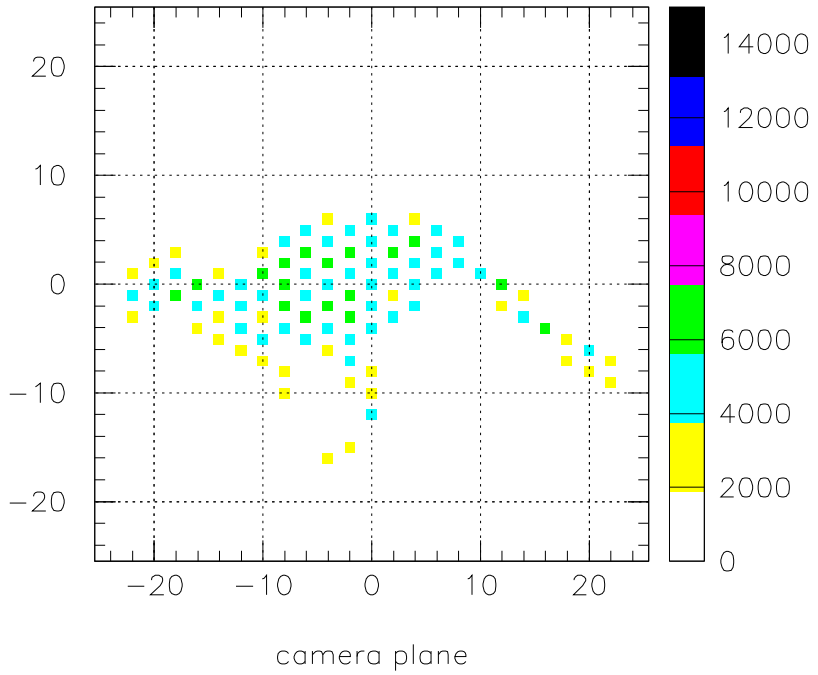

図 3.38: カンガルー のカメラ面。カメラにカンガルー のマスクをしてデー タを取った。

Chapter 4

Discussion

4.1 キャリブレ– ション 方法

ここまで 種々のテストをしてきたが、このテストをふまえ、どのようなキャリブレ– ションが現地で必要であるかを考える。

現在、CANGAROO-II では主鏡の中央に用意した青色 LED を光らせ、8m 先のカメラ容器で光を受けてキャリブレ– ション用のデータを取得している。今回の一連のテストも現地と同様に 8m 先 LED を設置して行った。このテスト結果から青色 LED の前にすりガラスを設置すれば、十分にフラットな光源が得られることがわかっている。これらを踏まえ、現在、CANAROO-II で行っている ON ソ– スと OFF ソ– スの間に取得するキャリブレ– ションデ– タは十分に精度良くとれる。この場合は夜光の効果が入るため、観測に即したキャリブレ– ションデ– タがとれる。

このデータとは別に、カメラそのものの経年変化などをチェックするにはカメラに夜光が入ってしまうことは問題となり、日中または、月が沈むまでテスト出来ないため、観測時間を削らなくてはいけないことも問題になる。CANGAROO-III では甲南大学の LED-キャリブレ– ションシステム [24] よりカメラの蓋を閉めた状態でテストが出来るようになった。これは観測の始まる時間前に光電子増倍管のテストが出来る。このシステムで入射光を 50-p.e. 程度いれ、各光電子増倍管ごとにポアソン分布を仮定すると、

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

の関係から平均の入射光量を出す。ここから、光電子増倍管の増幅率を知ることが出来る。このテストを月に一度のペースで行うことによって光電子増倍管の増幅率変化を知ることが出来る。

蓋を閉めての 1-p.e. のキャリブレ– ションもできるので光電子増倍管の基本的な特性の変化を把握しておくために 3ヵ月に 1 度くらいのペースでデータを取り増幅率を調べる。

4.2 For Next Camera

今回、CANGAROO-III のカメラ製作に終えて、幾つかのポイントを 3 台目、4 台目の望遠鏡を建設する際に見直していかなくてはいけない。そのポイントについて以下から議論していく。

コネクタ

光電子増倍管モジュールから DC 変換ボード、シグナル、HV ケーブルへ配線されていくわけであるがこの配線はコネクタを経由して行われる。今回採用したコネクタはプラスティックの軽量なものを選んだが、このために生じた問題点がある。

シグナルコネクタ (光電子増倍管側) に関しては、光電子増倍管からの信号線が細く、かしめた所からケーブルが作業の際、切れてしまうという点が問題になった。

HV コネクタに関しては光電子増倍管モジュールのデザイン上では 1 本づつのモジュールで、故障した時も一本づつ交換できるはずであるが、HV コネクタは 12 本ひとまとめになっているため、交換の際は HV ピンを抜工具が必要になる。 この作業が大変である。

DC コネクタに関しても、シグナルケーブルと同様に、かしめた所から切れていってしまう。さらにあまりにコネクタが小さく指のアクセスが容易ではない。

ライトガイド

ライトガイドをカメラ面に固定する際に、取り付け用の機構を用意したわけでなく、接着剤 (スタイキャスト) を用いて固定した。当初、接着剤がはみ出ないように少量で固定した。このため、多少の圧力がかかると取れしまった。現在ではライトガイドにカメラ面との固定用針金を巻き付け、さらにはカメラ面には多量の接着剤を使用した。次のカメラでは考慮する必要がある。

DC 変換ボ– ド

当初用意した DC フィルターでは 3MHz のノイズは落せなかった。次からは現在取り付けて直した DC フィルターを設計の中に入れるようにする。さらに今回は小型ファンを接着した。DC コネクタの問題もあり、DC 変換ボードは大きく設計変更の必要がある。

カメラ容器

CANGAROO-III では CANGAROO-II と同じ設計のカメラ容器を使用しているが、視野の変更に伴い、光電子増倍管の取り付けてある位置も前回より

も広くなった。このため、30 ° 付近からの角度を持って入射する光をカメラ容器の縁が遮ってしまうことがわかった。今回はこの部分を切り落したが、次回の設計では予め考慮に入れる必要がある。さらに、カメラ容器の中ではカメラプレーンの位置を自在に決めることができるように、このプレーンをレールで移動できるようになっていたが、現在は、レールの長さが完全に足りてはいない。このレールも伸ばさなくてはいけない。

自動開閉

現在では、カメラの蓋を人が開け閉めしている。CANGAROO-III ではステレオ観測を行っていくわけであるが、この際、4 台の望遠鏡がそれぞれ 100m 離れており、しかも砂地であるため、それぞれに出かけていって蓋の開閉をすることは非常に効率がわるい。現在では蓋の自動開閉の機構を取り付けてはいないが将来的には重要になるので、これを考慮した設計が必要である。

以上を踏まえてのまとめ

以上のことを考慮し、次のカメラの設計に活したい。今回のこの研究、開発は CANGAROO-II においての経験を踏まえ、さらなる向上をはかり、十分にカメラにおいて活かされたが、次のカメラの製作では、上記を踏まえれば、この一連の作業は非常に円滑に進むことが予想される。

Chapter 5

Conclusion

CANGAROO-III 望遠鏡のカメラについてまとめる (表 5.1)。

カメラ容器は円柱状でサイズは直径 800mm の長さ 1000mm である。焦点距離 8m の位置に 4 本のステイにてカメラを設置するという構造のため重量制限がある。このステイの歪みを数 mm 以内に押えるためにカメラ容器に光電子増倍管等を詰めた状態で、約 100kg であれば良い。これはカメラを支えているステイと呼ばれる 4 本の柱が数 mm 以内に歪む重さで約 100kg とされている。完成した際の実測でカメラ 容器は 110kg になった。

視野を 2.7° から 4.0° に変更した。この改良により、今までシャワーの縦方向の広がりを正確に捉えることができるようになった。さらに ON と OFF のデータを同時に取れるようになり、データの取得効率が大幅に上がると考えられる。

光電子増倍管のサイズを 1/2 インチから 3/4 インチに変更した。これは、光電子増倍管の直径に対して光電面の占める面積の割合が 3/4 インチ光電子増倍管の方が大きく、1/2 インチ光電子増倍管とくらべ、20 %の集光率が上がることが見込まれたから、さらに 1/2 インチ光電子増倍管で 4° の視野をフォローすることは重量制限を考えると得策ではないことから、3/4 インチ光電子増倍管を採用した。これから 1 ピクセル、0.168° になった。

この 3/4 インチ光電子増倍管をより少ないデッドスペースにするため六方最密に詰めていくことにした。さらにライトガイドより光電子増倍管間のデッドスペースをより減らしている。ライトガイドは Winston cone 型で入射角 30° 以内の光を集光する。

CANGAROO-II の光電子増倍管モジュールを CANGAROO-II では 4 チャンネルをまとめて信号の増幅をし、さらに 16 チャンネルまとめて HV をかけていたが CANGAROO-III からは一つの光電子増倍管に対し、一つのプリアンプ、一つの HV を用意することにした。この改良で、クロストークの心配はななり、さらに HV システムで個々の光電子増倍管の増幅率の調整、3 ~ 4 等星の星の光が入る光電子増倍管の HV を落せるようになった。

450 本の光電子増倍管のテスト結果から、個々の光電子増倍管のデータ

ベース化ができた。この結果から、目標とする 250-p.e. でのリニアリティの 10 %以内のずれは達成できたことがわかった。このことから広いダイナミックレンジでの観測が容易になった。さらに、20-p.e. を入射した時の時間分解能は 1ns 以内に収まった。これからより高い精度での calibaration が可能になった。

光電子増倍管 427 本をカメラに設置した時の総合テストにおいて、クロストークのチェックを行った結果、0.1 %程度のクロストークがシグナルケーブルの中で起きていることが確認できた。これは無視できるレベルのクロストークである。

すりガラスを付けた状態では入射光量が 50-p.e. では± 11.1 %の範囲で一様であることが確認された。中心からの位置依存性もなく非常に一様なカメラ面を確認できた。

ライトガイドのテストでは単体では光電子増倍管のユニフォミティが見えるもののシミュレ− ションと同じ結果がでた。さらにカメラ容器にセットした 427 本の光電子像倍管でテストした所、角度依存性はシミュレ− ションと同じ結果が得られた。これによりエネルギー閾値が 1/1.7 倍も下がる。

カメラについてのまとめ

項目	内容	設計及び測定結果
カメラデザイン	カメラ容器	直径 800mm、長さ 1000mm、重さ 110kg
	カメラ面	FOV 4.0 °、六方細密構造、0.168 °
	光電子増倍管	3/4inch R3479
	PreAmp	MAX4107ESA 300MHz
	HV システム	427 チャンネル制御
光電子増倍管テスト	ゲイン 1.2×10^7 の時の HV 値	1230 ± 125V
	リニアリティ	202.1 ± 12.7-p.e.
	250-p.e. のサチュレーション	-5.2 ± 2.0 %
	時間分解能	0.96 ± 0.09ns
	HV vs ゲイン (α)	4.8 ± 0.1
	量子効率	25. ± 1.4 %
全系テスト	クロストーク	0.1 %以下
	遮光	1 %以下
	ユニフォミティ	11.1 %
	エネルギー閾値	1/1.7

表 5.1: カメラについてのまとめ

Appendix A

量子効率、放射感度、陰極青感度、及び入射光のエネルギーの求め方

量子効率、放射感度、陰極青感度及び入射光のエネルギーの求め方について説明する [16]。

量子効率 (QE) について

量子効率について説明する。光電面内の電子が入射してきたフォトンを吸収するとエネルギーが励起される。それが真空レベル (フェルミエネルギー+仕事関数) を越えるとその励起された電子は真空中に放出されることがある (外部光電効果)。このときある波長の入射フォトン数 (n_p) に対する放出電子数 (n_e) の割合を量子効率 $(\eta(\lambda))$ と言う。

$$\eta(\lambda) = \frac{n_p}{n_e} \times 100(\%)$$

この量子効率を測定するにはモノクロメーターを用いて各波長ごとの光電面の感度を測る。図 3.11 は各波長ごとに測定しその結果をプロットしたものである。量子効率は光電面の材質に依存することから、CANGAROO 実験では約 300nm ~ 600nm にスペクトルの ピークを持つチェレンコフ光を観測するため、使用する光電子増倍管の光電面は約 300nm ~ 650nm に感度を持つバイアルカリでできている。又、入射フォトンのエネルギ–は波長に依存するので量子効率は波長にも依存する

放射感度 (Sk) について

放射感度について説明する。放射感度を $Sk(\lambda)$、光電子増倍管への入射光量を $L(W)$、光電効果によって流れる電流を $I(A)$ とすると放射感度は

$$Sk(\lambda) = \frac{I(A)}{L(W)}$$

と定義される。式から分かるようにこれは量子効率をエネルギーで表示したものである。従って両者には次の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} Sk(\lambda) &= \frac{I(A)}{L(W)} \\ &= \frac{n_e \times e/t}{n_p \times h\nu/t} \\ &= \frac{1}{100} \cdot \frac{e\lambda}{hc} \times \eta(\lambda) \\ &= 8.1 \times 10^{-6} \cdot \lambda \cdot \eta(\lambda) \end{aligned}$$

ここで e は電子の電荷 $(1.6 \times 10^{-19} C)$、h はプランク定数 $(6.6 \times 10^{-34} J \cdot s)$、$c$ は光速 $(3.0 \times 10^8 m \cdot s^{-1})$ である。

この放射感度、量子効率の測定法には精密に値付けをされた標準光電子増倍管、または半導体素子を二次標準として用いている。

陰極青感度 (Skb) について

陰極青感度について説明する。光電子増倍管の感度測定用の光源として分布温度 2856K のタングステンランプを用い光電子増倍管とその光源の間に青フィルタ (コーニング社製、CS-5-58 を半分の厚さに研磨したもの) を入れる。このときの入射光量 $(L(lm))$ に対する陰極側出力電流 $I(A))$ の比を陰極青感度 Skb と呼ぶ。

$$Skb = \frac{I(A)}{L(lm)}$$

(lm はルーメン。但し青フィルターを通しているので正確にはルーメンでは表せない。) このフィルターの透過率は $400nm$ にピークを持っている (図 A.1)。

入射光のエネルギーの求め方

入射光のエネルギーの求め方について説明する。以上の感度と光電子増倍管によって増幅された電流を測定して入射光のエネルギーを得ることができる。つまり入射光のフラックスを $f(\lambda)$、フォトカソード面の感度を $Sk(\lambda)$、一次ダイノードによる電子の増幅率を $\delta(\lambda)$、二次以降のダイノードによる増幅率を M とすると光電子増倍管からの出力電流 I は

$$I = \int f(\lambda) \cdot Sk(\lambda) \cdot \delta(\lambda) \cdot M d\lambda$$

と表せこれから逆に入射フラックスが分かる。

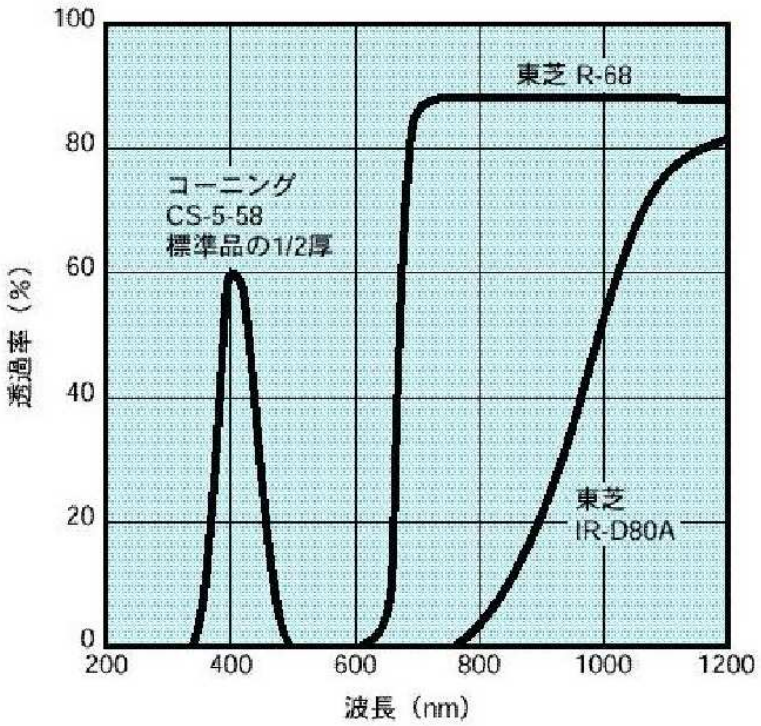

図 A.1: コーニング社製、CS-5-58 を半分の厚さに研磨した青感度フィルターの透過率。

Appendix B

PMT,R3479についての諸特性

R3479 についての基本パラメータを用意した。

Type	Curve code	Range	Peak Wave length	Photo-cathode material	Window Material	Dynode stucture	Maximum		CathodeSensitivity	
							Anode to Cathode Voltage	Average Anode Current	Luminous	
									Min	Typ.
R3479	400U	300 to 650 (nm)	420 (nm)	BA	K	L/8	1800 (V)	0.1 (mA)	70 (uA/lm	115 (uA/lm)

Cathode Sensitivity			Anode to Cathode supply Voltage	Anode Characteristic						
				Anode Sensitivity			Gain	Anode Dark Current (ater 50mim)		Tiime responce
Blue Sensitivity index	Red/ White Ratio Typ.	Radiant Typ		Luminous		Radient Typ.				Rise Time	T.T.S
				Min.	Typ.						
11.0	-	88	1700 (V)	100 (A/lm)	200 (A/lm)	$1.5*10^{5}$	$1.7*10^{6}$	10 (ns)	300 (ns)	1.3 (ns)	14 (ns)

図 B.1: R3479 のカタログ値。

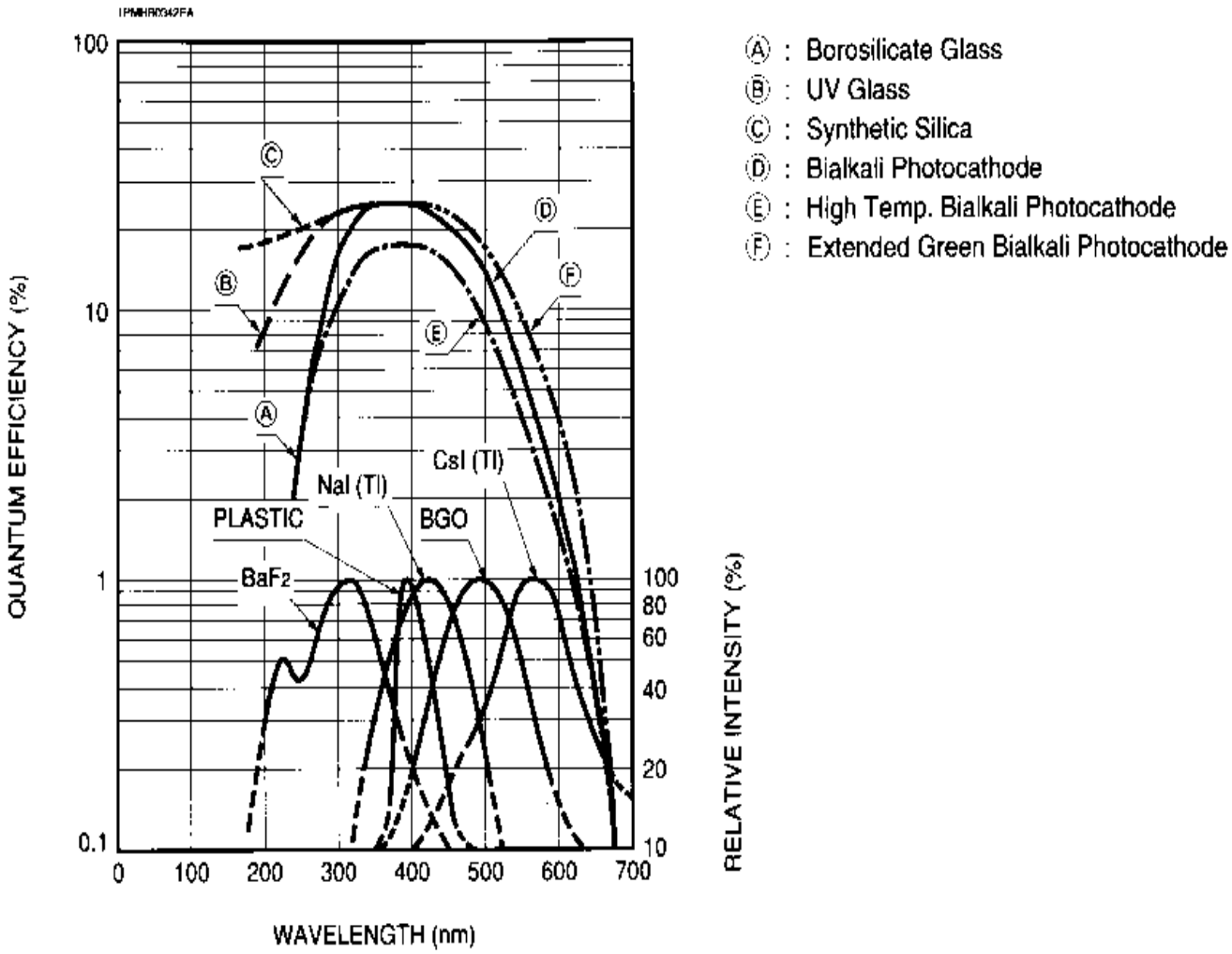

図 B.2: PMT の波長依存性

Appendix C

LEDの安定性について

今回、実験にもちいたLEDは日亜のNSPB510sである。主波長は470nmで、光度が1.3-cd、指向性が30°ある。このLEDと同シリーズのLEDについての安定性は[25]に述べられている。LEDの時間変動は98.0 ± 0.4 %で安定(図C.1である。LEDの温度依存性についても温度変化に対し、$\exp(\alpha T)$でフィッティングをした際に、α ~ -0.003 ± 0.09 % /°Cである(図C.2)。

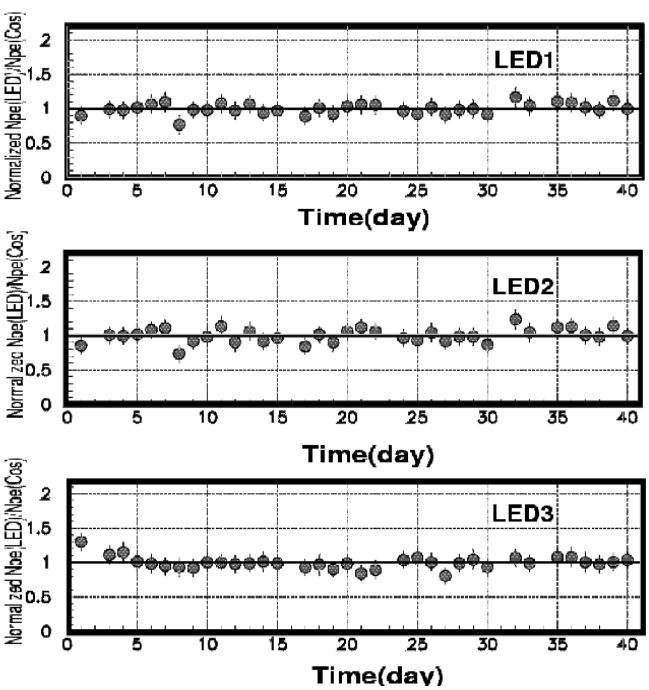

図 C.1: LEDの時間変動について

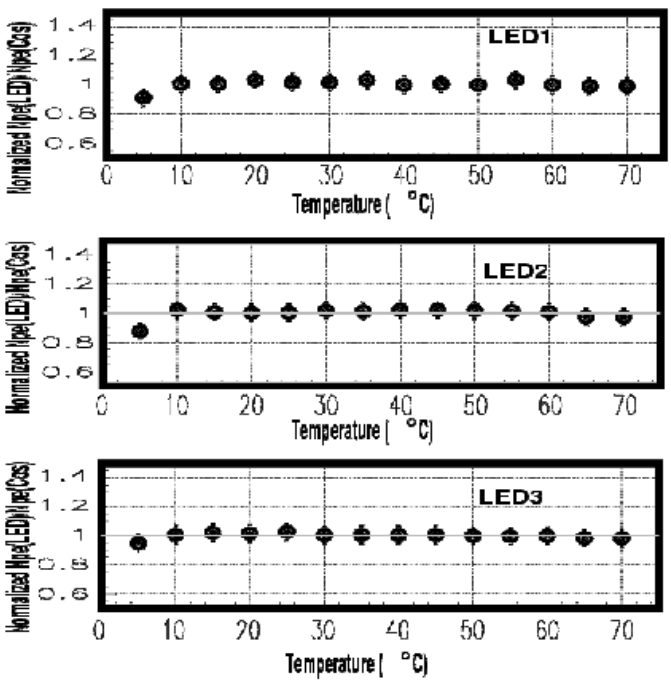

図 C.2: LED の温度変動について

Appendix D

NDフィルターの波長依存性について

ND フィルターの波長依存性について調べた。調べた ND フィルターは 1、10、20、30、40、50、70 の 7 種類である。この時の透過率は下図のようになった。青色 LED(NSPB510s) 主波長の 470nm では、ほぼ透過率は保たれていることがわかる。

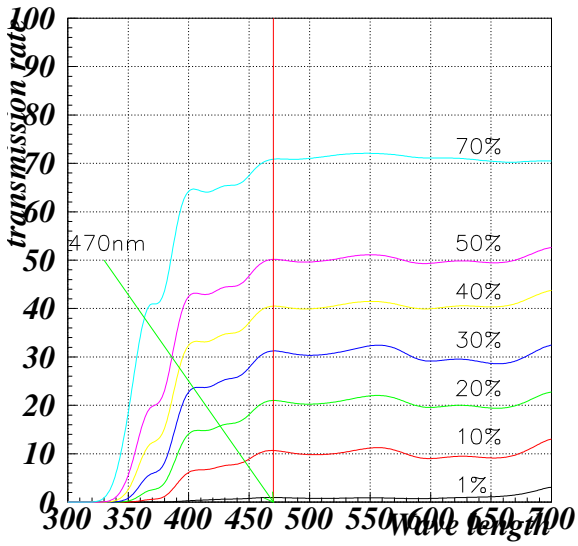

図 D.1: ND フィルターの透過率について。0,10,20,30,40,50,70 %フィルターの透過率

次に実験に用いた ND フィルターの透過率を調べた。下図は各波長において、透過率と LED の光量の積を正味の光量としプロットしたもの。LED の光量は平均 $\mu = 470nm$ の $\sigma = 18nm$ のガウス分布とした。各フィルターの LED に対する正味の透過率は表 D.1 のようになった。

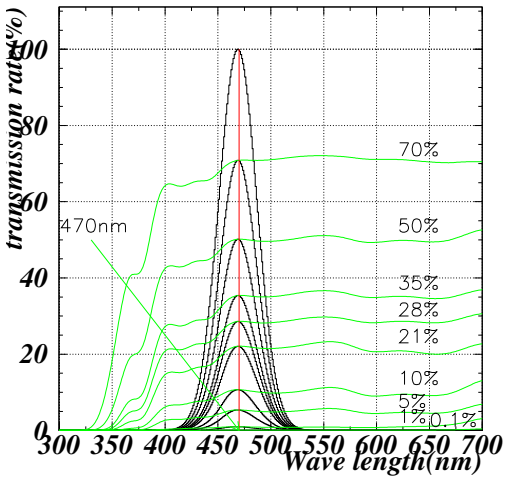

図 D.2: 実験で用いた ND フィルターの透過率について。緑のラインが各 ND フィルターの透過率。黒のラインが LED の光量に ND フィルターの透過率をかけたもの。

ND フィルターの透過率

ND フィルター (%)	透過率 (%)
0.1	0.08
1.0	0.87
5.0	4.99
10.	9.95
21.	20.9
28.	27.4
35.	34.1
50.	49.0
70.	69.9

表 D.1: ND フィルターの透過率

Appendix E

カメラのエラーリスト

カメラにおけるエラーをまとめた。

エラーリスト

項目	内容	エラー (%)
PMT モジュール	光電面の量子効率による位置依存性	10
	PreAmp の温度依存性	1．
	サチュレーションポイントのばらつき	6.4
	リニアからのずれ	4.6
	Gain vs HV (α)	2.0
	量子効率のばらつき	7.3
全系	クロストーク	0.1
	カメラ面のユニフォミティ	11.1
	1-p.e. フィッティング時のばらつき	17.3
	増幅率のばらつき	7.3

表 E.1: カメラにおけるエラー リスト

謝辞

本研究にあたり直接の御指導して頂いた榎本良治助教授に深く感謝致します。榎本先生には研究者としての心構えを始め、物理学の基礎、本研究に対する数多くの御指導、助言を頂きました。この 2 年間、種々至らない私に対し辛抱強く御指導頂き心から感謝致します。また、森正樹助教授には本研究に対する助言等、広い範囲にわたり御指導を頂きました。深く感謝いたします。木舟正教授には、直接この研究室に来るきっかけを与えてくれただけでなく、研究者としての姿勢を教わり深く感謝致します。福来正孝教授にはお忙しい中、実験の細部に渡り助言を頂きました。心から感謝致します。

河内明子助手には本研究に対しての一般的な理解、直接的な助言を頂きました。深く感謝いたします。奥村公宏博士には、主にコンピュータ全般に対する助言、さらに HV システムのプログラムにおいて、種々の基本的なデザインから、ソフトウェアのチェックに至るまで多くの助言を頂き、深く感謝いたします。

京都大学の櫛田 淳子さん、西田大輔君、渡部至緒さん、甲南大学の真栄城敦さん、林慎一郎君には実験の直接的な協力をして頂きました。深くお礼申し上げます。

D2 の伊藤千枝さんにはカメラ容器のデザインについて多くの御指摘を頂きました。深く感謝いたします。本研究において、最も近くで本研究に対し助言を頂いた D 1 の土屋兼一さんに深く感謝いたします。土屋さんには光電子増倍管の選定や、カメラのことだけではなくこの 2 年間、実験全般に渡り様々な助言を頂きました。また、D 1 の片桐さんにはプログラムに対する様々な助言を頂いたことを感謝したします。同期になる津野尾君には HV プログラムや、ケーブルの選定など、多方面に渡ってお世話になり、深く感謝いたします。同じ M2 の大石理子さんには、鏡全般に対する基礎知識を教わりました。深く感謝いたします。カメラのテストの際、様々な手伝いをしてくれた M1 の内田直志君に深く感謝いたします。

最後にいつも支えてくれている家族に感謝いたします。

Bibliography

[1] Nishimura,J., Hand bd Phys. XLV1/2, Springer-Velag, 1967

[2] 小田 稔, 宇宙線物理学, 朝倉書店、 1983

[3] Heitler,W., The Quantum Theory of Radiation, Oxford Univ. Press(1954)

[4] Thomas K.Gaisser, Cosmic Rays and Particle Physics, Cambridge University Press 1990

[5] Rene A. Ong et al., Physics Reports., 305(1998)93-202

[6] Hillas,A.M. et al., J.Phys.G8,p1475(1982)

[7] 津野尾 肇 修士論文 (東京大学 2002)

[8] 津野尾 肇 CANGAROO Group 内部レポート、Nom 16, 2000

[9] http://imagine.gsfc.nasa.gov/

[10] Enomoto, R. et al., Astropart. Phys., 16(2002)235

[11] 大石 理子 修士論文 (東京大学 2002)

[12] 郡司 修一 CANGAROO Group 内部レポート、May 17, 2000

[13] Kubo, H. et al., ICRC Proceedings,2001

[14] 浅原 明広修士論文 (京都大学 2001)

[15] 櫛田 淳子 CANGAROO Group 内部レポート、Oct 31, 2000

[16] 浜松ホトニクス, 光電子増倍管、第 2 版 (1998)

[17] 真栄城 敦 修士論文 (甲南大学 2001)

[18] Winston,R.,Welford W.T.,1989 “High Collection for Nonimaging Optics” ,Academi Press

[19] Winston,R.,1991, 日経サイエンス、日経サイエンス社 86

[20] Weekes,T.C. et al., Astrophys. J., 342(1989)37

[21] Kifune, T. et al., Astrophys. J., 438(1995)L91

[22] 土屋 兼一 修士論文 (東京大学 2001)

[23] Enomoto, R. et al., Nucl. Instr. and Meth. A300(1991)575-580

[24] 林 慎一郎 修士論文 (甲南大学 2002)

[25] Enomoto, R. et al., Nucl. Instr. and Meth. A413(1998)201-212