CTA 大口径望遠鏡焦点面検出器の構 造設計

甲南大学 自然科学研究科 物理学専攻 宇宙粒子研究室

掃部寛隆

2016年 2月17日

目次 第1章 Introduction 1.初めに ・・・4 1.1 宇宙線について ・・・4 1.2 宇宙線の発見 ・・・4 1.3 宇宙線の成分 ・・・5 2.現代に残る謎 ・・・6 1.2 超高エネルギー宇宙線源 ・・・6 1.2 宇宙線の加速機構8 3.空気シャワー ・・・8 1.3.1 空気シャワー発光メカニズム・・・9 3.1.1.1 制動輻射・・・9 3.1.1.2 シンクロトロン放射 ・・・10 3.1.1.3 大気蛍光 ・・・11 3.1.1.4 チェレンコフ光 ・・・12 第2章 CTA 計画 ・・・13 2.1 宇宙ガンマ線の観測方法 ...13 2.1.1 イメージング法...14 2.1.2 ステレオ観測...15 2.2 現在の宇宙線観測事情...16 2.3 CTA 計画概要...19 2.3.1 CTA が目指すもの...20 2.3.2 望遠鏡の配置。...21 第3章 LST 焦点面検出器.....22 3.1 LST の性能・・・・22 3.2.CTA LST 焦点面検出器の構造・・・23 3.3 LST 焦点面検出器の部位・・・24

3.3.1 カメラ box・・・・24 3.3.2 冷却システム・・・2 6

3.3.3 PMTモジュール・・・26

3.3.4 光電子増倍管(photomultiplier tube、PMT)・・・・27

3.3.4.1 量子効率・・・28

3.3.4.2 F/ファクター 28 3.3.4.3 アフターパルス・・・29 3.3.5 プリアンプ(PACTA) 30 3.3.5 PMTユニット 31 3.3.6 Light Guide(LG) 32 3.3.7 Slow Control Board 33 3.3.8 Back Plane 34

第4章 LST 焦点面検出器の構造設計 35

4.1 大口径望遠鏡焦点面検出装置の要求精度 35 4.2 SCB 側 AL プレートの設計 35 4.3 PMT module の位置決め 374.4 Light Guide Plate(LGP) 39 4.4.1 射出成形 40 4.4.2 LGP 初期案 404.4.3 LGP 強化案 41 4.4.4 シミュレーション条件 434.4.5 目標とされる変位 43 4.4.6 シミュレーション結果 45 4.4.7 強化案その2 46 4.4.8 シュミレーション結果2 484.4.9 LGP シミュレーションの成果 49 4.5 PMT Module の長さの設計 50 4.5.1 PMT モジュールの各部位 50 4.5.2 コネクタ 534.6 試作と完成品 55 4.7 接続試験 57 4.8 振動試験 58 4.9 ミニカメラの製作 59 4.10 今後の展望 60

謝辞 60

参考文献 引用画像 60

0

第1章 Introduction

1.初めに

人間は有史以来宇宙に興味を抱き続けてきた。宇宙には神が住んでいると考えられていた 時代も長く、星の並びに神秘的な伝説を思い浮かべもしていた。

人間が宇宙に進出し、太陽系や銀河の事が少しずつ分かってきた現代であっても、宇宙は その神秘性を失ってはおらず、むしろ謎を深めているといっても過言ではない。神秘に満 ちた宇宙をより深く理解するため我々は宇宙線観測を行っている。

1.1 宇宙線について

宇宙線とは一言で言い表すと「宇宙空間を行きかう高エネルギーの放射線」の事である。

宇宙は高エネルギーの宇宙線で満ちている。現在人間の作り出せる最高のエネルギーは 2008 年 9 月に稼動を開始した世界最大の加速器である大型ハドロン衝突型加速器(Large Hadron Collider、略称 LHC)で最大重心系衝突エネルギーは約 14TeV。実験室系に変換す ると 10¹⁷ eV ほどとなっている。しかし、宇宙線の最大エネルギーは実験室系で約 10²⁰ eV であり人類の作り出せるエネルギーと比べて非常に大きなエネルギーを持っている。

また弱い宇宙線は常に宇宙から降り注いでおり、人間は常に宇宙線により被曝している ともいえる。

1.2宇宙線の発見

宇宙線の発見の歴史は 1909 年までさかのぼる事ができる。当時大気の電離現象が知られ ており、その原因は地球内部からの放射線、土壌に含まれる放射性元素が原因であると考 えられていた。1909 年フランスのテオドール・ウルフ (Father Theodor Wulf) はエッフェ ル塔の頂上(地上300m)で電離箱の電離率を調べた。地球内部からの放射が原因である ならば、放射線は大気に吸収され上空に行くほど電離率は低くなるはずである。しかし、 結果は土壌から放射された放射線が空気に吸収されると予想した場合の電離の6倍の電離 が確認された。これにより大気の放射線吸収量が予想されているよりはるかに小さいか、 上空にも放射線源が存在する事が示唆された。続く 1912 年、オーストリアの科学者ヴィク トール・フランツ・ヘス(V.F. Hess)は気球実験で 1070m までの電離分布を測定、放射線強 度は地上と変わらないことを導き出した、続く 1921 年へスらは気球に電離箱と共に気球に 乗り高度 5350m までの気体の電離度を測定、800m 付近から電離率は増加し始め、高度約 5000m 付近では電離率は地上の約9倍になる事が明らかになった。結果地球外から放射線 が飛来している事が示唆された。この功績によりヘスは 1936 年、ノーベル物理学賞を受 賞した。ドイツでは飛来してくる放射線を「高所放射線」「ヘス放射線」「超放射線」など の名将で呼ばれたが、英米では「宇宙線」と呼ばれ現在に定着している。



図1:気球にのるヘス

1.3 宇宙線の成分

- 地球には宇宙から数々の放射線が降り注いでいる。おもな主成分は陽子であり、X線、ガン マ線などの電磁波の他、電子、ニュートリノなども宇宙線に含まれている。
- 飛翔してくる放射線の正体はほとんどが陽子(水素原子核)であり、実に宇宙線の90%を 占めている。残りの9%がアルファ粒子(ヘリウム原子核)であり、残りの少量にリチウ ム、ベリリウム、ホウ素、鉄などの原子核やX線、ガンマ線などの電波が含まれている。

2. 現代に残る謎。

宇宙線にはまだまだ解明が待たれている謎が多く残っている。

まずひとつは発生源どこかという問題である。

また宇宙線は非常に高いエネルギーを持っており、その加速源も謎に包まれている。

2.1 超高エネルギー宇宙線源

- 現在人間の作り出せる最高エネルギーは上記で述べたとおり重心系衝突エネルギーで約 14TeV。実験室系に変換すると10¹⁷ eV であり、これらと比較すると観測された宇宙線の 最大エネルギーは10²⁰ eV とかなり高いものになっている。しかしその起源、加速機構は いくつかの候補があるが、未だに解明されていない。
- 宇宙線の発生源の候補は超新星爆発(ガンマ線バーストなど)、超新星残骸、パルサー、周辺のガスを吸い込んでいるブラックホール(ブラックホール連星など)活動銀河核のような候補(図2.)はいくつかあるものの、明確な答えはまだ出ていない。



パルサー星雲

超新星残骸

ブラックホール連星(想像図)



活動銀河核

γ線バースト(想像図)

図1.2 宇宙線源候補群

また荷電粒子である宇宙粒子は銀河系の磁場からローレンツ力を受ける事により直進できず、銀

河系内にとらわれる。しかしエネルギーが大きくなると閉じ込め切れえずに銀河系外に漏れ出す。 この銀河系外から到来する宇宙線は高いエネルギーを持っていると考えられている。

到来する宇宙線のエネルギースペクトルはボルツマン分布に従いエネルギーの低いものほど頻繁に到来している。(図1)低いエネルギーの宇宙線ならばこうしている間にも常に私達の体を通り抜けているほどである。しかし高エネルギーの領域に行くと地球に到来する頻度は低くなってくる。



図1.3: 宇宙線エネルギースペクトルと到来頻度(フラックス)

- 図 1.3 のエネルギースペクトル分布には2点の折れ曲がっている点がありそれぞれ人間の下半 身に例え、それぞれ Knee(「膝」の意味 10^{15.5} eV 付近)、Ankle(「くるぶし」の意味 10^{18.5} eV 付近)と呼ばれる。Knee 以下のエネルギー領域の宇宙線は銀河系内の超新星や衝撃波の加 速が起源であるという見方が有力視されている。
- 2.2 宇宙線の加速機構

- 高エネルギー粒子の有力な加速候補としてエンリコ・フェルミ(Enrico Fermi、1901-1954) によって提唱された Fermi 加速があげられる。
- ただし、現在この Fermi 加速のみでは宇宙線のエネルギーの説明では不十分であり 他の加速理論も提唱されている。
- 運動量 p_0 の粒子が存在していたとする。この粒子が β_f (光速の単位)の速さを持つ電子雲の前面部の壁に衝突すると
- $p_1 = p_0(1 + \beta_f)^2$ になる。次に β_b の速度を持つ電子雲の壁に衝突すると
- $p_2 = p_1 (1 + \beta_b)^2 = p_0 (1 + 2\beta_f) (1 + 2\beta_b)$
- となり徐々にエネルギーを増していく。これがフェルミ加速の原理となっている。



図 1.4 フェルミ加速イメージ

3.空気シャワー

宇宙から入射する高エネルギーの宇宙線は地球大気で反応を起こす。

地球大気の原子核に衝突し二次粒子を発生させる。その際発生させた二次粒子も非常に高 いエネルギーを持っているため他の原子核と相互作用を起こし、鼠算式に粒子を生み出 していく現象が発生する。この現象が空気シャワーである。発生した二次粒子は寿命が 短いものはすぐに崩壊してしまうが、寿命が長く安定しているものは地上でも観測する ことができる。また入射したものが粒子かガンマ線などの電波かの種類の違いにより起 こる反応も異なる。



図 1.5 空気シャワーイメージ

図 1.5 の空気シャワーイメージは左側が γ線が大気に入射した時の空気シャワーイメージ であり、右側は陽子が入射した時の空気シャワーのイメージとなっている。

3.1 空気シャワー発光メカニズム

3.1.1 制動輻射

荷電粒子は加速度を受けると進行方向に光を発生させる現象が知られている。

大気中に入射した荷電粒子が大気粒子により形成する電場によって減速、曲げられるなど 加速がかかった際、進行方向に光を発するという現象。連続スペクトルを持つのが特徴で ある。

媒質中を進行の荷電粒子が原子核の電場よりクーロン力を受け、進行方向がかわった際に 光を発光させる。この放射確率は荷電粒子の加速度の二乗に比例する。そのため主に質量 の軽い電子やミューオンなどの荷電粒子に対して特に重要になる。放射光子のエネルギー は入射電子と原子核の衝突パラメータに依存するが、衝突パラメータが電子の軌道半径よ り大きいと原子核のクーロン力が軌道電子により打ち消される遮蔽効果が働く。 原子核の原子番号 Z、原子の質量 A, 1 cm³ あたりの原子の個数 N、電子質量me、古典電子の 半径 r₀、微細構造定数 α を用いて、エネルギーEeの入射電子の制動放射面積 σ_{brems}は

$$\sigma \text{ brems} = \alpha Z^2 r_0^2 (4 \log \frac{2E_2}{m_e C^2} - 1.3) (遮蔽が無視できる場合)$$

$$\sigma_{\text{ brems}} = \alpha Z r_0^2 (4 \log \frac{183}{\sqrt{Z}} - 0.88) (遮蔽が完璧な場合)$$
で表され、制動放射による放射長 X₀は
$$X0 = \frac{A}{N} \frac{1}{\alpha Z^2 r_0^2} \frac{1}{\log(\frac{1}{\alpha \sqrt{Z}})}$$
で与えられる。



図 1.6 制動輻射イメージ

3.1.2 シンクロトロン放射

シンクロトロン放射は制動輻射の一種として扱われる。

制動輻射では原子核の電場が荷電粒子に加速度を与えていたが、シンクロトロン放射では 磁場によって加速度を与えられ螺旋運動をする際に放出される現象である。

シンクロトロンの特性としては輝度が高い。指向性が大きい。偏光している。ことがあげ られる。シンクロトロン放射は荷電粒子の進行方向周りに狭い角度で放射され、速度が 高速になるにつれ狭くなっていく。 単一電子からの単位時間当たりのシンクロトロン放射強度 W は、電子ローレンツ因子 γ 、 磁束密度 B、電子の速度 v、トムソン散乱断面積 σ_T 、を用いて、 $\beta = \frac{v}{c}$ と電子の速度と高速 との比を定義し

 $\frac{\mathrm{d}W_4}{\mathrm{d}t^3}\sigma_{\mathrm{T}} C \frac{\mathrm{B}^2}{8\pi}\gamma^2 \beta^2$

と表すことができる。



図1.7 シンクロトロン放射

3.1.3 大気蛍光

宇宙線の荷電粒子によって大気分子が励起し、元バンドに戻る際発光現象を行うもの。 空気シャワーの向きに関係なく放射される。



図1.8 大気蛍光

3.1.4 チェレンコフ光

真空中を亜光速で飛行する素粒子が屈折率nの媒質に入射する際、素粒子が媒質中の光速 (c/n)を超えると進行方向にチェレンコフ光と呼ばれる光を発生させる。

真空中での光速はどんな場合でもどのような観測者が見ても一定の速度 C で伝播する事は 広く知られている。しかし媒質に入射した光は C より遅くなる。屈折率 n の媒体に入射し た光の速さは C/n の速さとなる。例を挙げると水に入射した光は 0.75C の速さしか持つこ とが出来ない。しかし粒子は粒子加速器などによりこの速度を超える事が可能となってい る。

チェレンコフ光はイメージとしては衝撃波(ソニックブーム)を想像すると良いかもしれ ない。音速を超える物体から放たれた音波は音波の元となる物質から離れる事ができない ため、運動している物体周りに衝撃波面が形成される。

媒質中を光速で動く粒子にも同じ事が言え、亜光速で飛行中の粒子の周りに電磁波の衝撃 波面が形成される。



図、1.9 チェレンコフ光の放射イメージ ソニックブームとよく似ている。

図 1.9 では赤矢印の方向に粒子が屈折率nの媒質中を Vp (Vp>>c/n) で運動しているとす る。粒子が媒質に入射すると速さ Vem=c/n となるチェレンコフ光(図では青い矢印) が放出 される。三角形の左の頂点は t=0 の時点での粒子の位置を表しており、ある時間における 粒子の位置は

$$Xp=Vpt=\beta ct \qquad (\beta = \frac{v}{c})$$

と表すことができる。

時間 t でのチェレンコフ光の到来位置はというと

$$Xem = Vemt = \frac{c}{n}t$$

と表記できる。

ゆえにチェレンコフ光として放射するチェレンコフ光の放射角度をθ、大気中を進む粒子の速度をvと定義した場合θは以下の式で決まる。

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

放射されるチェレンコフ光の強度は波長の二乗に反比例する分布を持つ。しかしオゾン層やレイ リー散乱により短波長側の光子は吸収される。地表に到達できるチェレンコフ光のスペクトル分 布は違うものとなり、地上に届く波長のピークは300nm~500nm領域となる。

第2章 CTA 計画

2.1 宇宙ガンマ線の観測方法

ガンマ線を観測する方法としてはどのような方法があげられるのだろうか。

ガンマ線は大気に吸収されやすく、通常の光のように地上で観測する事は出来ない。その 為大気に吸収される前のガンマ線を観測するために人工衛星を打ち上げ高度40km以上 から観測する方法が挙げられる。しかし人工衛星では設置できる観測装置の大型化に制限 と限界があり、100keV~100GeVより高いエネルギーでは観測が難しくなる。しかし一方で ガンマ線はエネルギーが高くなるにつれ大気との相互作用でチェレンコフ光を発するよに なる。このチェレンコフ光を地上で検出する大型観測装置を使用すれば地上からでもガ ンマ線を観測する事が可能となる。地上チェレンコフ望遠鏡はフェルミ衛星などと比べて高 エネルギー帯のガンマ線を観測する装置として運用されている。また単機ではガンマ線の到 来方向は特定できず、複数台設置する必要がある。



図 2.1 測定方法一覧

2.1.1イメージング法

また地上チェレンコフ望遠鏡でγ線に由来するチェレンコフ光とそれ以外の光を区別する 方法があり、それら識別する方法をイメージング法と呼ぶ。

ガンマ線チェレンコフ光を観測する場合、バックグラウンドとなるハドロンシャワーとの 区別をつける必要がある。これらを区別する為にはシャワーの粒子の相互作用に伴う広が りの違いを利用する。この違いを利用して信号を識別する手法はイメージング法と呼ばれ ている。



図2.2 イメージング法の例

図2.2では望遠鏡に現れた信号を表している、

左からミューオン、ハドロン、γ線となっており、入射する宇宙線の種類によって信号の 形が違っている。

2.1.2 ステレオ観測

- 地上チェレンコフ望遠鏡単機では y線の到来方向は特定できない。到来方向を特定するためには 複数台設置する必要がある。
- 望遠鏡にチェレンコフ光が入射すると楕円のシグナルが現れるのはイメージング法で述べ たが、チェレンコフ光、しいてはy線はこの楕円の長軸側を伸ばした方向からやってく る。
- このような識別方法であるため、望遠鏡一台ではチェレンコフ光がどの方角からやってく るかの特定はできない。一つのチェレンコフ光に対して複数の望遠鏡で観測を行い、イ メージの重ねあわせによって到来方向を特定する方法がとられている。これをステレオ 観測と呼ぶ。



図2.3 ステレオ観測によりγ線の到来方向が特定できる。

この様に各シグナルの長軸を伸ばした交点からチェレンコフ光、しいてはガンマ線が到来 してくる事がわかる。この楕円のパラメータはそれぞれ「length、width、distance、alpha」 と呼ばれる部位で構成されている。これらはそれぞれの長軸方向の長さ、短軸方向の長さ、 楕円の中心点と視野中心との距離、楕円の長軸と視野中心方向のなす角に対応している。



図2.4 望遠鏡に現れるイメージの名称



図 2.5 望遠鏡に現れる y線のイメージ

2.2 現在の宇宙線観測事情

- 現在 0.1~30GeV 程度の y 線は人工衛星を用いての観測が行われている。1991 年に打ち上げ られたコンプトンガンマ線観測衛星 (Compton Gamma Ray Observatory CGRO) では全天で 数百程度もの天体を観測した。しかし姿勢制御用のジャイロスコープの一基が故障、制 御不能脳まま地上に落下し被害が出る事が懸念された。この為 2000 年 6 月 4 日に発令さ れた指令により地球に落下させて消滅した。次世代のフェルミガンマ線宇宙線望遠鏡は 2008 年 6 月 1 1 日、NASA によって打ち上げられ、8 月から運用が開始された。当初予定 されていた 2013 年 8 月 11 日に5 年間の観測ミッションを終了した。この期間の内に 1200 以上のガンバ線バースト、500 回以上の太陽フレアを観測し、全天 1800 を超える天体を 検出する事に成功している。また現在は 2018 年まで観測を続ける延長ミッションに移行 している。このフェルミ衛星はガンマ線だけでなく、X 線を含めた高エネルギー宇宙線物 理学を牽引してきた。この劇的な観測の質と量の増大により、これにより既存の観測装 置より詳細かつ大統計、新種のガンマ線の発見が続いている。
- 一方、数10GeV~TeVの超高エネルギー領域のガンマ線天文学は地上に設置されたチェレンコフ望遠鏡によって観測されている。その歴史は1989年、かに星雲からのガンマ線をWhipple 望遠鏡が検出した事から始まる。同グループが宇宙線とガンマ線をイメージ映像の違いから識別する方法が開発された事により、ガンマ線天文学は急速に発展を見せる事になった

現在稼動しているチェレンコフ望遠鏡は南半球に H. E. S. S、北半球に MAGIC、VERITAS など が挙げられる。ステレオ観測技術、高感度光センサー、超光速電子回路などのハイテク技 術に支えられた次世代地上ガンマ線望遠鏡であり約25年の間に150以上の TeV ガンマ線 天体を発見している。



図 2.6 観測された TeV 源のスカイマップ



図 2.7 上から MAGIC VERITAS HESSの望遠鏡



図 2.8 :H.E.S.S.望遠鏡による TeV ガンマ線を用いた銀河面(天の川)の天空図

現在、GeV 領域はフェルミ衛星が強力に牽引しており、発展の余地が少ない事に対し、地上 チェレンコフ望遠鏡は今まで蓄積された技術を発展させ、大規模な観測装置軍を配置する ことにより感度を大幅に向上させる余地がある。(図 2.9 参照)以下の点よりこれまで地上 チェレンコフ望遠鏡の分野をリードしてきた H.E.S.S、MAGIC の 2 つのグループが中心とな っている。国際共同プロジェクトである、大規模なチェレンコフ望遠鏡アレイ CTA 計画 (Cerenky Telescope Array)計画が提案された。



図 2.9 CTA で期待される検出感度

2.3 CTA 計画概要

CTA 計画は大、中、小口径(大口径23m 中口径10-12m 小口径4.3m)(以下LST、MST、 SST と呼ぶ)の3種類の望遠鏡郡を北、南半球合わせて50~100 台設置することにより、 既存のガンマ線観測の精度を向上させようという計画である。

建設場所は北半球ではスペイン領のラパルマ島、南半球では地理のパナラルに決定してい る。

表 2.1 各望遠鏡の仕様[9][10]				
	LST	MST	SST	
口径	23m	10 - 12m	4. 3m	
観測エネルギー範囲	数10GeV - 1TeV	100GeV - 10TeV	1TeV - 100TeV	
		Davies-Cotton	Davies-Cotton	
反射面形状	Parabolic	of	of	
		Schwarzshild-Couder	Schwarzshild-Couder	
鏡面積	$400 \mathrm{m}^2$	100m^2	$37 \mathrm{m}^2$	
焦点距離	28m	15m	7m	
視野	4.5°	$6^{\circ} - 8^{\circ}$	$\sim \! 10^{\circ}$	

図 2.10 各望遠鏡の仕様



図 2.11 CTA 計画予定地

大、中、小口径それぞれピークを持つ波長があり、LST は低エネルギー側、SST は高エネル ギー側に感度ピークを持っている。各望遠鏡の仕様は図 2.12 を参考

2.3.1 CTA が目指すもの

CTA が目指すサイエンスの目的としては

- 宇宙線の起源を探る
- ・ 宇宙の高エネルギー現象の研究
- ・ 暗黒物質対消滅からの γ 線の捜索
- が挙げられる。 γ線は電波であるため、磁場による影響を受けず直進するため高エネルギーγ 線源の解明に繋がるのではないかと期待されている。

2.3.2 望遠鏡の配置。



図 2.13 各望遠鏡の配置の感度

望遠鏡の配置にも各波長に合わせた配置方法がある。(図 2.12 図 2.13 参照) 宇宙線のフラックスは図 1.3 にある通り、高エネルギーのものほど小さくなる傾向がある。 よって高エネルギー領域の宇宙線を観測しようとするのならば、小さい範囲に望遠鏡を密 集させずに、広い範囲に望遠鏡を分散配置し、観測面積を増やす必要がある。対して低領 域側の宇宙線はフラックスも高い、しかし信号そのものは高エネルギー比較して弱くなる ため感度のよい観測装置が必要となる。すなわち望遠鏡の配置候補としては

・Bは大口径望遠鏡の回りの狭い領域に望遠鏡を密集させた配置となっている。

この配置では低エネルギー帯の領域に感度が高くなっている。

- ・Cは広い領域に望遠鏡を分散配置し、高エネルギー側に感度を持たせたものとなる。
- ・EはB,C両方の配置をとり全体として感度の高い配置を目指している。

の以上の候補が挙げられる。

CTA では E の配置が採用されている。E 案では配置中央に4 台の大口径望遠鏡を配置、その 周に中口径望遠鏡を23台、さらに外側を32台の小口径望遠鏡が覆う配置になってい る。



図 2.15 CTA 想像図

第3章 LST 焦点面検出器の構造設計

3.1 LST の性能

大口径望遠鏡(Large Size Telescope, 以下 LST)は北、南半球にそれぞれ4台建設される。 LST 中、小口径の望遠鏡と比較し低エネルギー側の観測を行う。これは低エネルギー領域側 は高エネルギー領域に比べて、到達頻度が多いが信号が弱いため検出するためには大規模 で高感度の観測機が必要なためである。

チェレンコフ光の信号幅を短く保ち夜光の影響を小さくするために反射面は放物線が使用 されている。突発的な天体現象を観測するために20秒で全天全ての場所に向けられる高 速旋回性が必要であり、その為に望遠鏡構造の主要部分にはカーボンファイバー強化チ ューブ(CFRP)を使用している。これにより全体の重量を100t程度に抑える事に成功 している。カメラの重さはは 900kg であり、カメラの幅は 2.894m、カメラの高さは 2.894 m、カメラの奥行きは 1.400mとなっている。

性能項目	性能		
旋回速度	全天を20秒		
口径	23m		
焦点距離	28m		
口径比(f/d)	1.2		
観測エネルギー領域	$20 { m GeV} \sim 1 { m TeV}$		
全体の重量	100 t		
稼動可能気温	0∼70°C		

図 3.1 LST の性能

3.2 CTA LST 焦点面検出器の構造

大口径望遠鏡焦点面検出器は以下のような構造になっている。



図 3.2 LST の階層構造

焦点面にはカメラボックスが設置されており、その中に冷却プレートと1855 画素のカメラ (図 3.2 で光センサー・光電子増倍管と呼ばれる装置)が設置されている。

3.3 LST 焦点面検出器の部位

3.3.1 カメラ box

焦点面検出器+カメラ構造体はカメラ BOX に装着される。この時、焦点面検出器の位置が 前後に調節できる設計になっている。カメラ BOX は望遠鏡の土台に固定されているマスト に固定されている。またカメラ BOX の前には窓がある。このカメラ BOX により密閉構造 になっており、カメラ内は外気から遮断されている。窓の外には可動式スクリーンとシャ ッターが取り付けられ、リモートから制御できるようになっている。この構造により、装 置の故障を減らしメンテナンスの必要が無いようにしている。

窓には紫外透過アクリルである水微視レイヨン社製の Acrylite#000 を採用する。窓は 2.2m 口径と通常の規格より大きくなっている。厚さは 6mm で、風や加速によるたわみで焦点面 検出器を壊さないように、鏡の方向に曲率をつけている。中心付近では 20cm 程度のたわみ を持たせている。1G+20m/s の風に耐える強度になっている。また観測サイトでの暴露試 験や熱、紫外線による耐久加速試験も行っている。写真は直径 1.3m のアクリルを試験加工 したものである。現在直径 2.2m のアクリルを加工する方法を開発している



図 3.4 窓の紫外線通過アクリル



図 3.5 カメラ box の構造

3.3.2 冷却システム

焦点面検出器の周りには cooling plate と呼ばれる冷却システムが装着される。この装置に より焦点面検出器の内部を空気が循環し回路から発生する熱を吸収する。空気に吸収され た熱は水冷式の熱交換機により吸い上げられ冷却水によりカメラ外部に運ばれる。

また読み出し回路を cooling plate から取り出す際、正面には LG や PMT が取り付けられ ており、精度を維持するため直接触ったり、これらをもって取り出す事もボックスにはめ る事も出来ない。

この為 PMT モジュールをボックスから取り出す際は BP 側からネジで取り付ける構造になっている。

3.3.3 PMT module

インストールとメンテナンスを用意にするために7本のPMTユニットを束にしてひとつの読み出し回路につないだものをひとつのPMTモジュールとしている。

図 3.2 で「光センサー・回路」と紹介した部分に当たる。

PMT モジュールには高圧ブリーダー、高速プリアンプ、読み出し回路および制御・モニタ ーエレクトロニクスなどが取り付けられている。



☑ 3.6 PMTmodule

PMT *module*は Light Guide(LG)、光電子増倍管(photomultiplier tube、PMT)やなどの 各部品が設置されており、読み出し回路(Dragon V5)との接続の仲立ちの形で Slow Control Board(SCB)がなどが設置されている。そして最後尾に電源供給装置で ある Back Plane(B P)が用意されているといった構造になっている。

3.3.4 光電子增倍管(photomultiplier tube、PMT)

光電子増倍管(photomultiplier tube、PMT 以下 PMT と表記)とは光電効果を利用した光増 幅装置である。宇宙線観測では非常に小さな光を検出するために使用されている。PMT の 光電面に光が入射すると光電効果を起こし光エネルギーは電気エネルギーに変換される。 この際変換前の光エネルギーと変換後の電気エネルギーの変換効率は量子効率と呼ばれて いる。このように PMT は光電効果を利用しているので、各 PMT によって感度のよい光の 波長は異なる。



図 3.7 光電子増倍管(PMT)の内部構造

PMT が光を増倍するメカニズムは以下のようになる(図 3.7 参照)

- ・入射光によって光電面から電子が励起する。この際光エネルギーと電気エネルギーの変換効率を量子効率と呼ぶ。 これは PMT の感度を決める重要なファクターである。
- ・励起した電子は電子増幅部(ダイノード)に掛かっている引掛電圧により信号が増倍される。
- ・増倍された光電子がさらに別のダイノードで増幅される

これらの一連の工程を経て光信号が増幅されている。

CTA 大口径望遠鏡には浜松フォトニクスが開発した PMT(R11920-100-20)を採用している。 これは CTA 用に開発された PMT で、光電面はスリガラスで40 Фの球状になっている。 この構造では光電面で拡散した光が再び光電面を通過しやすいようになっており、光電効 果をより発生しやすくしている。この PMT に分圧回路、上昇回路、増幅回路を取り付けた 物をひとつの Pixel ユニットとしている。このユニット七台に Slow Control Board と読み 出し回路をつなげた物をひとつの PMT Module としている。LST の焦点面検出器には 265 個 の PMT Module が設置されており、合計で1855個の PMT が設置されている。

3.3.4.1 量子効率

PMT は上記の通り光電効果を利用して光信号を増幅させている。これは確率過程であり、 光や PMT の性質に依存する。量子効率とは励起した電子エネルギー/入射する光エネルギ ーの値である。CTA 大口径望遠鏡で使用されているこの PMT は波長 400nm の紫外線に対 する量子効率は平均 40.8%という高い値を実現している。







図3.9 量子効率の要求値と実数値

3.3.4.2 F/ファクター

noise excess factor とも言う。

ある個数の光電子に対しての PMT の応答は一定ではない。F ファクターは光源の揺らぎ幅を 出力電荷の揺らぎ幅で割った値である。F ファクターは第一段ダイノードで放出される電子 の数が重要になってくる。その理由は一段目のダイノードと比べると他の段では電子数が 多くなっているので統計的な揺らぎは小さくなっていく。よって統計的に一段目の寄与が 最も大きくなる。

Fファクターを測定する目的は、観測時にカメラの矯正に使うためである。Fファクター

分かっているのならば、電荷分布の幅から光電子数を求めることができ、電荷量から光量 への変換係数を導くことが可能になる。

なお、このFファクターはPMTのみならずマイクとスピーカーの入出力比である雑音指数を計る測定方法などにも使われている。

3.3.4.3 アフターパルス

信号パルスが入射された際、信号パルスとは別に少し送れて擬似パルスが検出される事 が

ある。PMTほぼ真空であるが、内部には残留ガスが存在している。光電面から電子が飛び出し、ダイノード部分へと照射される過程で PMT 内の残留ガスと衝突し、陽イオンが形成される。陽イオンは電場により光電面に向かって移動するイオンフォード現象と呼ばれる現象がおこる。イオンフォード現象により光電面に達した陽イオンが発生させる光電効果により、光電子由来の信号とは別に少し送れた(約数百 n s ~数μs)信号(アフターパルス)が発生する。このアフターパルスはノイズであるために PMT の閾値の劣化を生じる。 アフターパルスが主信号から遅れてくる時間は

 $t = \int_{s0}^{L0} \frac{1}{v(s)} ds$

L₀:光電面の位置 s₀:イオンが電離した位置 v(s):イオンが光電面に向かう速度

で決まってくる。

またこの式をエネルギー保存則の方面から考えてみよう。

mion:イオンの質量

q:イオンの電荷

と定義し、エネルギー保存の式に代入すると

$$\frac{1}{2}m_{ion} v(L_0)^2 = \frac{1}{2}m_{ion} v(s)^2 + q V(s)$$

$$V(s)^{2} = \frac{2q}{mion} (V(s_{0}) - V(s))$$

が導き出される。

この式を上記の積分式に代入すると

$$t = \sqrt{\frac{\min}{2q}} \int_{s_0}^{L0} (V(s_0) - V(s))^{-\frac{1}{2}} ds$$

これがアフターパルスが本信号より遅れてくる時間である。

3.3.5 プリアンプ(PACTA)

PMTの下部には Cockroft Walton 型の高電圧回路と前置増幅器 (プリアンプ)が設置れている。このプリアンプはCTAのためのプリアンプなのでPACTA(パクタ)と呼ばれている。

PMTは10年稼動でゲインの劣化率20%以下にする事を実現するため4×10⁴という 極めて低ゲインを基本動作に要求されている。その為信号を強化するためにPMTの増 強率とは別に信号を増強するプリアンプが必要となってくるのである。現在CTA、LS Tで持ちいれられているプリアンプボードはMini-Circuits 社LEE-39+ という市販品のIC を用いたものである。

ノリアンノが個に9~さ要求任様			
パラメータ	要求值		
ダイナミックレンジ	1~1000 p.e.		
周波数带域	> 300 MHz		
低ノイズ	0.2 p.e. (S/N = 5 @1 p.e. 測定時)		
消費電力	~ 150 mW (モジュール全体:2 W /ch)		

プリアンプが満たすべき要求仕様

さらに PACAT には PMT と回路を 4本のばねで Light Guide に押し付ける構造になっていて、 望遠鏡が旋回したときでも常に光学系の精度が保たれるようになっている。

図 3.10 プリアンプが満たすべき要求仕様



⊠ **3.11** PACTA

3.3.5 PMTユニット

PMTに高圧・ブリーダー、PACTAを設置し7本束にしたものをPMTユニットと呼んでいる。



図 3.12 PMT ユニット

PMT ユニットは PMT、高圧電源・前置増幅器 がひとまとめにした装置の事である。

3.3.6 Light Guide(LG)

PMT 光電面に取り付けられるライトガイド(Light Guide 以下 LG)の設置目的は主に焦点 面検出器の集光効率を向上させるために設置される



図 3.13 LG の役割 Dead Space を埋める役割を果たす

各 PMT は円柱状のためそのまま配置すると光電面がない空所が出来てしまい集光効率 が非常に悪くってしまう。この際 LG を PMT に設置すると効率よく PMT に光を集め る事ができる。

PMT モジュールには PMT が7本設置され、その上に LG が設置されるのは先に述べた とおりであるが、効率のよい集光システムを構築するには各 LG が動かないように固定する 必要が出てくる。隙間なく空所を埋めるため LG の構造は六角形の形をしており、その形状 は Winston Cone が一般的である。



図 3.14 Winston Cone の形状の代表例

Winston Cone はある θ (これは Winston Cone の焦点距離に依存する)以内で入射した光は LG を 通過するように設計されており、また θ 以上の角度で入射してきた光は反射を繰り返しLG外 にだされ集光しないという特性を持っている。この LG は 45°の視野を持っている。



🗵 3.15 LG

3.3.7 Slow Control Board

Slow Control Board (以下 SCB) は光電子増倍管で構成された光検出器部分とデジタル回路 を接続する。1つの SCB に光電子増倍管7本を束にしてカメラモジュールを形成する。 SCB の主な役割は

- ① PMT からのチェレンコフ光の高速信号をデジタル回路に伝達する
- ② PMT にかかる高電圧の制御
- ③ PMT や電流、電圧、温度のモニター
- ④ カメラモジュールの固定

などが上げられる。これらの機能は読み出しボード内にインターフェイスを持てばいいの だが、開発段階の当時、高速回路の候補は複数あり、インターフェイスの規格が統一され ていなかった。読み出し回路と PMT を個別に開発する中で規格に合った中間のボードが必 要とされた。これが Slow Control Board が必要となった最大の理由である。

3.3.8 Back Plane

主に PMT モジュールの電源供給を担当している。

Back Plane (以下 BP)には1 2V が入力され、BP に設置された DC/DC コンバータによって、
 読み出し回路および回路周辺に使用される電圧値に調節される。(±3.3 V と+5 V)
 BP にはネットケーブルとトリガ回路が接続されている。モジュール間での通信信号やイー
 サネットによる PC(もしくはハブ)との接続が行われている。



3.16 Back Plane

第4章 LST 焦点面検出器の構造設

4.1 大口径望遠鏡焦点面検出装置の要求精度

大口径望遠鏡焦点面検出装置を設計する上で、以下のスペックが要求されている。

望遠鏡設計の要求	要求值
光軸に対し直角方向での焦点面の精度	0.06°以上
カメラ全体の視野直径	4.4°以下
一画素の視野角直径	0.11以下
カメラの大きさ	2. 894×2. 894×1. 400 m
焦点面検出器の重さ	2.5 t
カメラの重さ	500kg(クーリングプレート500kg)
画素数	1 855
カメラ全体に対する1画素あたりの値段	800€以下(2016年2月現在約10万円)
焦点面での集光効率	96%
各検出器の軸方向の歪み	0.3°未満
光検出器の量子効率	要求 17% (実際は平均41%を達成)
PMT の位置ずれ	0.5mm以下

図 4.1 望遠鏡の設計に要求される精度

光軸に対しての角度が非常に厳しい要求となっており、精密な設計が必要とされている。

4.2 SCB 側 AL プレートの設計



図 4.2 SCB と SCB 側 AL プレート

SCB アルミプレート、右側の白い板が AL プレートであり、緑の板が SCB となっている。



- **図 4.3** SCB 側 AL プレートと LG の固定の相関関係。SCB 側 AL プレートは LG を固定す る役割もある。
- SCB は PMT と読み出し回路をつなぐ役割を果たしており、それに応じて柔軟に設計を変 更する必要がある。その為 SCB に隣接する SCB 側 AL プレートも柔軟に設計を変更し なければならない。



またカメラボックスに PMT モジュールをはめ込む際、位置を決めるための位置決めピンの 穴が設置されているのもこの SCB 側 AL プレートである。



図 4.6 固定される cooling plate[一部分] 唯一 SCB 側 AL プレートとのみ直接接続されている。

設計の上で重要な役割を果たしており、LG~読み出し回路までの部品が直接カメラボック スと繋がっているのは SCB 側 AL プレートのみとなっているため、PMT のずれ 0.5mm未 満、PMT の軸のずれ 0.3°未満をこのプレートで調整せねばならず、位置決めは大変に厳 しい精度が要求されている。

なお BP だけは直接 cooling plate に固定されている。

4.3 PMT module の位置決め



図 4.7 位置決めを行うピン

SCB 側 AL プレートは図の二点のピンを使い、cooling plate と PMT Module 固定する役 割も担っている。なお、このピンは LST のために専用に作った特注品となっている。



図 4.8 cooling plate 側の位置決めピン用の穴

Cooling plate の位置決め穴は円と楕円の二個の穴が存在しており、(図 4.8 参照)それぞれ ピンの直径に対して 0.01mmの余裕を持たせて設計している。

この cooling plate にピンをはめる順序は

① 円の穴でピンを止め、上下左右の PMTModule の自由度を打ち消す、

② 楕円の穴にピンを止め回転方向の自由度を打ち消す

といったコンセプトで設計を行った。

①で位置止めピンを入れた事により、上下左右の直線方向の自由度がなくなり、PMTModule は cooking plate に対して回転方向の自由度しか持たなくなる。

②のピンを入れれた事により回転方向の自由度を打ち消す事ができる。

この際、②の穴が楕円になっているのは、楕円の長軸方向への自由度は①の穴が打ち消

しているので、上下方向での製作誤差に対応するためである。

これにより、ネジの製作誤差である 0.01mm単位での位置決めが可能となった。 位置決めピンの位置から PMT の先端までの距離は 146.579mm であるので 0.01mmの精度で 位置決めを達成できれば PMT の角度の歪みを 0.0039°以下に抑える事が可能になった。 歪みの許容範囲は 0.3°未満が要求値なので、この設計だとかなりの精密さで PMT を固定で きる。

4.4 Light Guide Plate(LGP)

Light Guide Plate(以下 LGP)とは LG を支えるプラスチック上のプレートの事である。 LG は設計上この板に固定されている。強力な力が LG に掛かり変形してしまうと望遠鏡の 感度や精度に深刻な問題が出る。このプレートの役割は LG や PMT を固定し、曲がらない ようにするという補強具の役割を持っている

LGP を作成するにあたり、我々はプラスチックで作成する事を考えた。

金属を使用した場合、製作コストが多くかかってしまう事と、PMT とスパークを起こさないか懸念されたためである。

プラスチックでどのような構造にすれば変形を最小限に抑えられるかをシュミレーション する。



図 4.9 PMT と LG、中央のプレートが LG を固定する LGP この LGP はシミュレーション前のもの

4.4.1 射出成形

プラスチックの部品を加工する際には射出成型と呼ばれる方法を用いる。加熱し軟化し たプラスチックを金型に流し込み形を形成する方法である。この方法は金属の鋳造法とよ く似ているが、この方法の大きな違いは、成型圧と温度の違いにある。鋳造は金属を対象 としているため、融点の低いアルミニウムでも約700℃の温度に達してしまう。これと 比較して射出形成は低温(180 - 450℃)で行われる。また射出圧 (10 - 3000kgf/c) をと いう高圧を加えて形を作る。この製法では素材の厚みが 3mm以上のものは出来な いという制限が掛かってしまっている。

4.4.2 LGP 初期案

甲南大学で LGP の作成される前は茨城大で作成とシミュレーションが行われていた。 その際、PMT に LGP を取り付けると曲がってしまうというシミュレーション結果が出て いたので、どのような構造にすれば LGP の変位が少なくなるかを甲南大学で模索した。 LGP の作成はプラスチックで行われ、制作方法は射出形成を用いられる。この際に射出形 成では厚さ 3mmまでの物しか作成出来ないという弱点がある。よって作成する際は(ここ で図 4.10)のように厚い部分を肉抜きし、厚さが 3mmを越えないようにしなけれ ばならない



図 4.10 茨城大から送られてきた初期案の LGP



図 4.11 茨城大から送られてきた LGP の寸法

茨城大の初期案ではLGPの内部が肉抜きされており、これによって厚さを調節していた。 しかし満足のいく強度を保つ事が出来なかった。

そこで我々は圧力がかかった時も出来る限り変位をしない構造を模索したシミュレーションを行った。

4.4.3 LGP 強化案

甲南大学の LGP の初期強化案は以下のものとなっている。



図 4.12 PMT 側、LGP の外周を囲むように梁を形成している。厚さは 2.025mm



図 4.13 LG 側、LGP の内部、肉抜きをした裏側に、LGP の厚さが3mmを超えないように雪の結晶のような形で内側に梁をつける。梁の厚さは3mm

この様(図 4.12 図 4.13)に表側、裏側にそれぞれ PMT、LG にそれぞれ干渉しないように 梁を設置し強度を上げる計画を立てた。(図の番号)の外側の梁が取り付けられている部分 は PMT 側であり、内側の梁が取り付けられている(図の番号)側が LG 側である。 梁の詳しい条件は

・外側(PMT 側)の梁の厚さは 2.025mm

・内側(LG 側)の梁の厚さは 3.0mm

と設定している。

4.4.4 シミュレーション条件

シミューションには Auto Simulation Multiphysics 2013 を使用した。 使用方法については別途記載している。このシミュレーションソフトを使用し、どの構造

のLGPがもっとも変形しないのかを調べた。 今回のシミュレーション条件は以下の通り

- ・PMT の穴全体に700N の力をかける(ひとつの穴にかかる力は100N)
- ・メッシュサイズは50%
- ・指定した LGP の素材は Plastic-ABS
- ・LGP と SCB をつなぐ三点のポールの位置を固定

という条件を課した。

700Nという圧力をかけた理由だが、PACTAの項目で述べたが、PACTAにはPMTを LGPに押し付けるバネが4本ついている。バネ定数1.1471[N/mm]の長さ5mmのバネで このバネ4本から掛かる圧力は

$1.1471[N/mm] \times 5[mm] \times 4 = 22.942[N]$

である

少なくとも約 20N の力が掛かっているので、不測の事態を考え、シミュレーションは約5 倍の100N の力で行った。

4.4.5 目標とされる変位

LGP の変形をどの程度まで抑えるかの目安だが、

試しにシミュレーションを行った結果、ポールを固定した部分が変位が抑えられ、その地 点から離れるほど変位が高くなる傾向があるのがわかった。



図 4.14 テストシミュレーション結果の例 茨城大の原案そのままのモデル。 固定点の変位が抑えられており、その地点から離れるほど変位が大きくなる なっているのがわかる

特に変位が大きいのは LGP の端の部分である。

LGP 中心から歪みがもっとも大きい部分までの距離は 73.07mmとなっている。(図 4.11 参 照)PMT の軸方法に対する歪みは 0.3°未満に抑えなければならないので、ここでは最大 変位の歪みが 0.3°未満になる構造を模索する。



```
図 4.15 角度のずれを 0.3° に抑えるための変位 B の許容範囲
```

許される角度のずれは 0.3°未満

 $\tan(0.3^{\circ}) \doteq 0.005236$

すなわち

 $\frac{B}{73.03} < 0.005236$ B<0.382385[mm] 最大変位(B)が 0.38mmまで許される。

なお、SCB 側の位置決めピンによる誤差は設計上約 0.004°と非常に小さいためこのシミ ュレーションでは無視している。

シミュレーションの内容は外側、内側のみ梁をつけた時、また梁を両方つけた時梁の高 さを1~6mmまで伸ばした場合どのように変形に影響がでるかの比較検証を行う。 なお、当シミュレーションでは重力や望遠鏡の旋回についてのパラメータは考慮に入れて いない。





内側にのみ (梁の長さ[mr	、 (変位[mm]) m])		外側にのみ (梁の長さ[mm])	(変位[mm])
0	10.17178		0	10.17178
1	9.806093		1	7.119764
2	9.479202		2	6.947824
3	9.233179		3	6.070896
4	8.977539		4	4.82397
5	8.662229		5	5.675908
6	8.405505		6	5.327576
内、外両側 (梁の長さ[mm])			(変位[mm])	
			10 17179	

(梁の長さ[mm])	(复位[mm])
0	10.17178
1	9.944238
2	6.918412
3	6.320434
4	4.899029
5	4.890663
6	4.552823
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	

図 4.16 シミュレーション結果

最も変位が少なかったものは内、外両側に 6mmの梁をつけたものだったが、許容変位の 0.38[mm]よりはるかに大きい結果となってしまった。

4.4.7 強化案その2

圧力がかかった際の変位を梁の長さ5mm以上にする事で、梁の無い状態での変位を約50%に抑える事に成功したが、目標の数値まで遠く及ばなかった。さらに修正案として各 PMT をつなぐ梁を設置する事を甲南大学では提案した。



図 4.17 各 PMT の穴をつなぐ梁、初期案と比較、高低差によって色分けしている。

初期案と比較して肉抜きの部分を大幅に増やす(図4.17の緑色の部分)かわりに各PMTの穴をつなぐ梁を設置、この設計での変位状況のシミュレートを行う

さらに上で記した各 PMT の穴をつなぐ梁は PMT 同士の一番大きなデットスペースをカ バーしきれていない。この案と同時にデットスペースにさらに梁を加えるアイデアとして LGP のデザインをもう一式提案した。



図 4.18 各パーツを高低差にあわせて色付けしたもの。 先ほどの梁に加え、大きなデットスペースに三角形状の梁を組み込んだ。

これら案では大きな変化は RMT 側のみであり、LG 側には図 4.13 の梁を取り付けている事 以外は大きな変更を施していない。

4.4.8 シミュレーション結果2

今回のシミュレーションは先ほどのシミュレーションで期待される数値に到達しなかった ので、外側(図 4.17 と図 4.18 での赤色の梁)と内側の梁(図 4.13)を初めから 5mmの高さに 設定しシュミレーションを行った。



図 4.19 シミュレーション(図 4.17 モデル)の結果



外側の梁の高さ 5mm (肉抜きしてない場所「PMT周り」 までの長さ)

内側の梁の高さ 3mm

内側の接続部分の厚さ <u>5mm(PMT周りの厚さと同じ高さ</u>)

PMT周りの厚さ 5mm

肉抜きした部分 3mm

図 4.19 シミュレーション(図 4.18 モデル)の結果

4.4.9 LGP シミュレーションの成果

シミュレーションを重ねた結果、プラスチック製のLGPでは必要精度を満たせないことが わかった。

同じシミュレーションをアルミニウムを使い図 4.11 の型(アルミニウムは射出形成で作成 しないので肉抜きはしない)で行った所。図 4.20 の結果が得られた



図 4.20 アルミニウム製 LGP の変形

最大許容変位 0.38(mm)の中に十分納まっており(最大変形、約 0.13mm)LGP はプラスチ ックではなく、アルミニウムで作成される事が決定した。

4.5 PMT Module の長さの設計

焦点面検出器を製作するためには PMT Module を作る事が不可欠である。



図 4.21 PMT Moduleの設計、 これらを組み立てるための固定具の設計を行う。

PMT Module のインターフェイスの長さと各部品の制作誤差をうまく吸収できるように PMT Module の全体設計を行う

4.5.1 PMT Module の各部位の誤差許容値

実際に部品を作る場合、どのように作っても設計図どおりの長さに作ることは不可能で ある。よって規格の長さぴったりに設計してしまうと、実際に実物を作成した時に引っか かったり、長さが少し足りなくなることがある。この様な失敗をしないためにも tolerance(許容誤差)を把握し、設計に取り入れる事が非常に重要である。

例を挙げると、太さ3mmのポールがある場合、ポールをはめる穴太さも3mmにしてし まうと、制作誤差の影響でポールが穴に入らない可能性も出てくる。その場合ポールに対 して 3.2mmの穴を設計するように位少し大きめに作り作成誤差を吸収する必要がある。 同じように PMT Module の設計を行う際も各パーツの許容誤差を把握し、どこかでその誤 差を吸収しなければならない。

Dim ID	Dimension	Tolerance	Material	Description
1	4,5	0,05	Al	Backplane Spacer
2	5	0,2	Al	Cluster Holder Backplate
3	334,25	0,2	Al	Extruded Tower
4	25	0,2	Al	Cluster Holder Frontplate
5	3	0,11	Al	Cluster Interface Plate
6	4	0,1	Al	SCB Spacer
7	12,5	0,1	Plastic	DRS4 to SCB Connector
8	350	0,2	Fiber Glass	DRS4 lenght
9	12,5	0,1	Plastic	DRS4 to Backplane Connector
10	2	0,1	Al	Cluster Back Plate

図 4.22 各部位の長さと材質指定、そして tolerance(単位は mm)
 全体の長さは Dim ID①~⑥+⑩もしくは⑦~⑩の合計値 375.75mm
 各 tolerance の最高値の合計は±0.86mm



DRS 4 to Back Plane connector

図 4.23 各 Dim ID 部分と PMT Module の比較





図 4.24 3D モデルによる ID の部位との比較

この寸法を基に私達は PMT Module も全体の設計を行った

4.5.2 コネクタ

SCBから読み出し回路、読み出し回路から DPにはコネクタが接続されている。 このコネクタがかみ合った時の長さを考慮に入れて設計を行う必要がある。 各コネクタの部位は図 4.23 と図 4.25 の赤の四角い点線の部分になっている。 コネクタ自体にも長さがあり、DRS4とSCBもしくはBPの長さを0mm、つまり密 接させてしまうと、コネクタがかみ合わない。よって適切な長さを設定する必要がでてく る。



Rev M

15 of 21

図 4.25 コネクタの寸法

コネクタを接続するとブラシがしっかりとピンと噛んだ場合の長さは14.00mm~ 15.41mmの長さとなる。しかし、このコネクタは部品内部の1.5 mm食い込んでいるので のその差分を引いた。12.50mm~13.91mm(その差1.41mmの猶予)の長さになっている時、 安定した通信が出来る。

図 4.22 では制作誤差をこのコネクタの 1.41 の猶予で吸収することを考えた。



図 4.27 Tolerance 吸収

AL Back Plate と Cluster Holder Back Plate の間は他のパーツと違い、パーツでつながっ ておらず、接続器具も存在していない。よってこの間は 1.75mm の隙間が空いているので、 +0.66mm -0.75mmの変化にも適応できるように設計を行った。(合計±1.41mm)

4.6 試作と完成品

設計が一通り終了した後、甲南大学では試作品の制作を行った。



図 4.28 甲南大学で作成した PMT Module の試作品

最初期の試作品なので読み出し回路と SCB はアクリル板で代用している。

3D モデルだけでなくアクリル板を使い試作品を作り、問題が無かったので量産体勢に移 行した



図 4.29 完成した PMT Module (PMT つき)



図 4.30 設計を基に作成した PMT Module (PMT、BP なし)

4.7 接続試験

各インターフェイスが正しく接続されているかを確認する目的で接続テストを行った。 実験の方法はの試作品 cooling plate に作成した PMT Module をセットし、SCB に信号をい れ読み取り回路に応答が入るか見るというものである。





図 4.31 制作した PMT Module のインターフェイスの様子。問題なく接続している。

各種数値を取るものではなく、入力があるかないかを調べるだけの簡単なテストであった が、インターフェイスは問題なく接続されている事が確認された。

4.8 振動試験





図 4.32 日立物流の施設で行った振動試験

作成した PMT モジュールは振動試験を日達物流テクニカルセンタで行い、実験では砂利道を 2000 kmトラックで走行したと想定した実験を行った。 結果、十分な強度のある設計になっていることを確認している。

4.9 ミニカメラの製作

現在 PMT Module 単体の信号テストは終了しており PMT モジュールを 19 本束ねたミニカメラで PMT のキャリブレーションテストを行っている。







図 4.33 1 9 Module のミニカメラ

4.10 今後の展望

振動試験と入力テストが終了し、カメラの生産に移行している。 2015 年 10 月 9 日、LST 第一号望遠鏡の着工記念式典が行われスペインのラパルマ島で LST 第一 号機の建造が始まっている。



図4.34 スペイン、ラパルマでの建設予定地

2017年から更なる望遠鏡の建設にかかる予定になっている。

謝辞

たくさんの人たちに支えていただいてこうして修士論文が完成いたしました。この様な国 際共同研究に参加し研究を行う場を与えていただいて感謝の気持ちでいっぱいです。 特に学部生の時代から面倒を見ていただいた山本常夏教授はご迷惑をかけて申し訳なく思 っています。学部生の頃から学習など多方向に渡り大変お世話になりました。研究でも至 らない点が多々ありそのたびに熱心にご指導いただいたことは忘れません。また研究室で は普段出来ないような経験、体験をさせていただき感謝しております。またした。梶野文 義教授は研究でのアドバイスはもちろんの事、学習面でも面倒を見ていただき、宇宙線研 究のアドバイスを丁寧にしていただきとてもお世話になりました。CTA メンバーの皆様、 東京大学の宇宙線研究室で Calibration に参加させていただきましてありがとうございま した。至らない所ばかりでしたが、またとない経験をさせていただきとても感謝しており ます。

大谷 林田 中島 京都大学(斉藤)

参考文献、引用画像

[1] CTA パンフレット [CTAJAPAN 編 日本語 第2版 2015年5月]

[2] http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=16-02-01-02

[3] http://www.jps.or.jp/books/50thkinen/50th_07/001.html

[4] http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/CR/research/gamma/

[5]<u>https://www.google.co.jp/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&sqi=2&ved</u> =0ahUKEwiqzuvtts7JAhXDupQKHa55CiQQFggbMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.h amamatsu.com%2Fresources%2Fpdf%2Fetd%2FPMT_handbook_v3aJ.pdf&usg=AFQj CNHlClez14755eQSRSXjLUADkyWr-Q&bvm=bv.109332125,d.dGo&cad=rja

[6] http://www.isas.ac.jp/ISASnews/No.201/micro.html

[7] 修 士 学 位 論 文次世代超高エネルギーガンマ線天文台 CTA のための分割鏡動 的制御システムの開発¥Development of the Active Mirror Control System for the Next Generation Very High Energy Gamma-Ray Observatory CTA″ 平成 27 年 2 月 4 日 東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻 吉越研究室 学籍番号 35136040 小島 拓実

[8] http://www.isas.jaxa.jp/j/forefront/2013/uchiyama/

[9] 2013 年度第 43 回天文・天体物理若手夏の学校 CTA 計画に向けた大口径望遠鏡のトリ ガー開発・試験および望遠鏡シミュレーション

增田周(京都大学大学院理学研究科)、他 CTA-Japan Consortium

- [10] 次世代大気チェレンコフ望遠鏡のための高感度光検出器 PPD の基礎特性評価東海大学 大学院理学研究科物理学専攻西嶋研究室修士2年 7ASNM025 水村好貴
- [11] 東海大学大学院理学研究科物理学専攻西嶋研究室修士2年 7ASNM025 水村好貴
- [13]https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%81%E3%82%A7%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%B3% E3%83%95%E6%94%BE%E5%B0%84
- [14] http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/about/cosmicray.html
- [15]http://www.google.co.jp/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0ahUKEw j_zbzb_c3JAhWIipQKHYg-AxYQFggzMAM&url=http%3A%2F%2Fwww.ritsumei.ac.jp%2F^{mor} im%2FProc%2Fheapa2000.pdf&usg=AFQjCNEietmcthUAyWfuQM_Gg04leGAscA&bvm=bv.1093 32125,d.dGo
- [16] CTA 報告 96: 全体報告
- [17]<u>https://www.google.co.jp/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&sqi=2&ved</u>= 0ahUKEwiqzuvtts7JAhXDupQKHa55CiQQFggbMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.hamamatsu.com %2Fresources%2Fpdf%2Fetd%2FPMT_handbook_v3aJ.pdf&usg=AFQjCNH1Clez14755eQSRSX jLUADkyWr-Q&bvm=bv.109332125, d.dGo&cad=rja
- [18] 東京大学理学系研究科物理学専攻 宇宙線研究所チェレンコフ宇宙ガンマ線グループ 高橋光成 修士論文
- [19] 次世代ガンマ線天文台 Cherenkov Telescope Array 大口径望遠鏡初号機の光電子増倍管の較正試験永吉勤
- [20] 修士学位論文次世代 TeV ガンマ線天文台 CTA 用プリアンプの性能評価及び
 SiTCP を用いたガンマ線カメラ γ I(ガンマアイ) 用読み出しシステムの開発
 2012 年度(平成 24 年度)茨城大学大学院理工学研究科 理学専攻 梅原克典
- [21] 修士論文 次世代ガンマ線天文台 CTA のためのアナログメモリ DRS4 を用いた高速波形サンプリング回路の改良 今野裕介 2013 年1 月 28 日