

大口径チェレンコフ望遠鏡に搭載する高速カメラの開発

著者	猪目 祐介
学位名	博士(理学)
学位授与機関	甲南大学
学位授与年度	令和4年度(2022年度)
学位授与番号	34506乙第51号
URL	http://doi.org/10.14990/00004573

甲南大学 博士学位論文

大口径チェレンコフ望遠鏡に搭載する
高速カメラの開発

甲南大学大学院

自然科学研究科 物理学専攻

2023年3月

猪目 祐介

甲南大学 博士学位論文

大口径チェレンコフ望遠鏡に搭載する
高速カメラの開発

甲南大学大学院
自然科学研究科 物理学専攻

猪目祐介

2023年3月

目次

第 1 章	Introduction	1
第 1.1 節	高エネルギーガンマ線天文学	1
第 1.2 節	解像型大気チェレンコフ望遠鏡	2
第 1.3 節	空気シャワー	3
第 1.4 節	イメージングチェレンコフ技術	4
第 2 章	Cherenkov Telescope Array(CTA)計画	7
第 2.1 節	CTA が観測する天体と貢献するサイエンス	10
第 2.2 節	Large-size Telescope (LST)	11
2.2.1	反射鏡	12
2.2.2	Active Mirror Control (AMC)	13
第 2.3 節	CAMERA	13
2.3.1	Camera 構造	13
2.3.2	焦点面検出器(Focal Plane Instrument : FPI)	14
2.3.3	光電子増倍管(Photomultiplier tube : PMT)	16
2.3.4	PMT 用高圧電源回路	18
2.3.5	前置増幅器	19
2.3.6	減衰回路	19
2.3.7	PMT 制御回路(SCB: Slow Control Board)	20
2.3.8	読み出し回路	20
第 2.4 節	集光器と photon budget	21
第 2.5 節	モジュールフレーム	27
第 2.6 節	2-4 号機用読み出し回路フレームの設計・制作	31
第 3 章	PMT-module 組立作業	33
第 3.1 節	LST1 号機用 Module 組立	33

第 3.2 節	振動試験	34
第 3.3 節	PMT module と、組立作業の変更点	35
第 4 章	PMT-module 品質管理 (Module QC)	36
第 4.1 節	LST1 号機用 PMT 較正と Module の品質管理	36
第 4.2 節	PMT 較正作業	36
4.2.1	動作試験結果	38
4.2.2	運用増幅率での印加電圧結果	38
4.2.3	F-factor	39
4.2.4	パルス幅	40
4.2.5	AfterPulse 発生確率	41
第 4.3 節	PMT Module QC	41
4.3.1	Module QC Setup	41
4.3.2	読み出し基板単体の試験	42
4.3.3	PMT-Module 全体の試験	43
第 4.4 節	Module QC 結果の活用	45
第 5 章	光源	47
第 5.1 節	校正用光源について	47
第 5.2 節	Pico second pulse laser	47
5.2.1	パルスレーザーの原理	47
5.2.2	光検出器キャリブレーションへの応用	53
第 5.3 節	考察	54
第 5.4 節	開発した性能評価セットアップの性能	55
第 6 章	まとめ	55
謝辞		57
Reference		58

第1.1節 高エネルギーガンマ線天文学

宇宙空間には様々な強さのエネルギーを持つ粒子が飛び交っている。この粒子のうち高いエネルギーを持つ粒子を宇宙線と呼ぶ。宇宙線は数 10 keV ($\text{keV}:10^3\text{eV}$) から 10 ZeV ($\text{ZeV}:10^{21}\text{eV}$) まで存在している(図 1.1)。 10keV 以上の高エネルギーを持つ光子はガンマ線と呼ばれるが、このガンマ線の放射過程は図 1.2 に挙げるように高エネルギー電子の制動放射、荷電粒子と光子の衝突による逆コンプトン散乱、磁場中の高エネルギー荷電粒子によるシンクロトロン放射、中性 π 中間子の崩壊の 4 通りがある。高エネルギーガンマ線が放射されているためにはそこで電子や陽子が高エネルギーになるまで加速されているはずである。

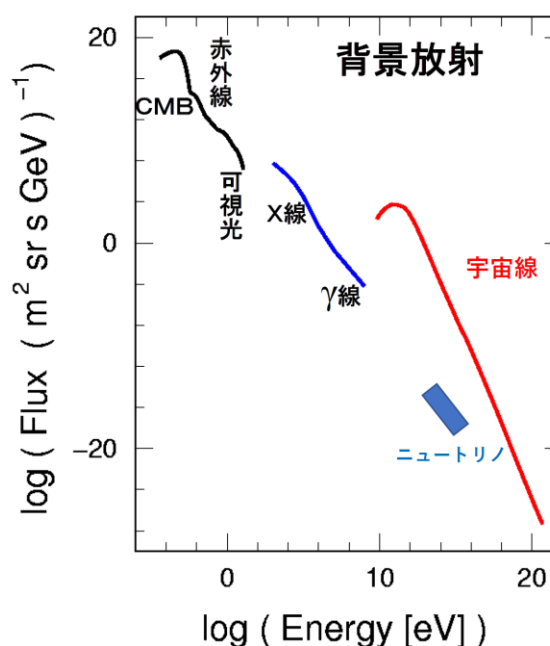


図 1.1 宇宙線の背景放射エネルギースペクトル[1-1]

宇宙線などの宇宙空間で生まれた荷電粒子は宇宙空間内の磁場との相互作用により進路が曲がり、到来方向から発生源の特定はできない。しかしガンマ線は中性粒子であるため磁場の影響を受けることなく到来するため、これを検出すれば宇宙で起こっている高エネルギー現象を観測できる。実際に超新星残骸(Super Nova Remnant, SNR)や活動銀河核(Active Galactic Nucleus, AGN)、ガンマ線バーストなど様々な天体から、 10^8eV くらいの電波から数十 TeV を越えるガンマ線まで様々なエネルギー範囲を持つ電磁放射が観測されている。ガンマ線領域の観測は今後発展が期待されている分野であり、天体からの新たな事象によるガンマ線が発見されている。新たな高エネルギー事象を観測することは、宇宙線の起源や粒子加速の物理などの未解決問題を解明する大きな足がかりとなることや、宇宙論や基礎物理学の発展に多大な貢献をもたらす可能性がある。

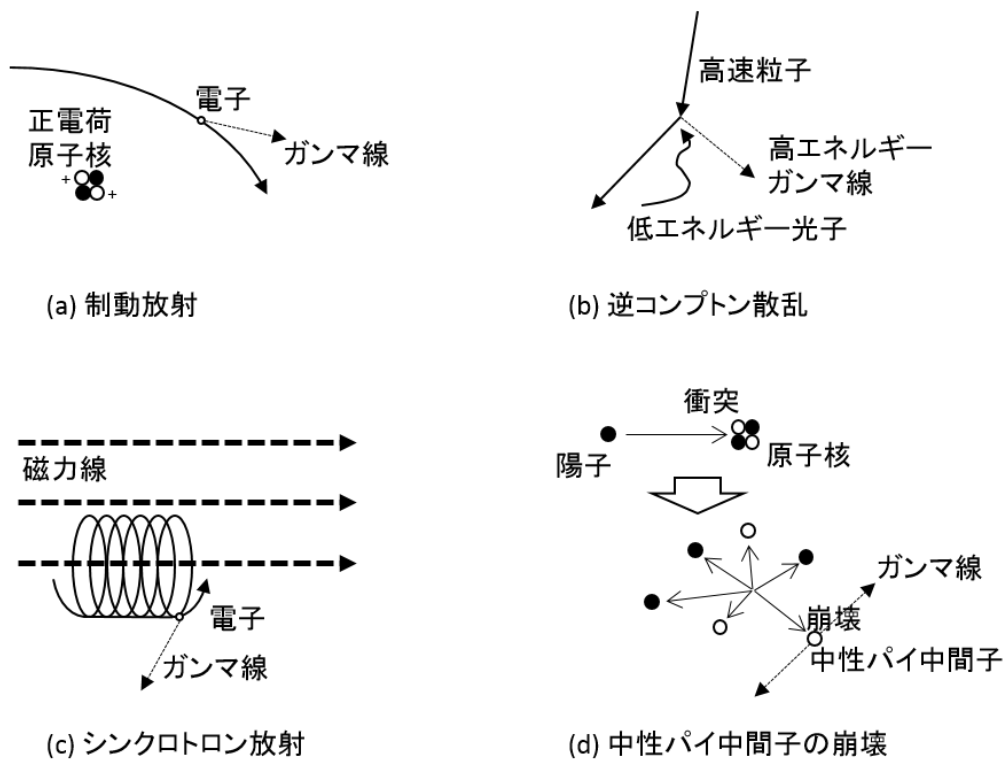


図 1.2 ガンマ線発生機構の模式図

第1.2節 解像型大気チェレンコフ望遠鏡

1989年に近傍の超新星残骸かに星雲からの高エネルギーガンマ線が検出されて以来、ガンマ線天文学は飛躍的な発展を続けている[1-2]。100MeV から数十 GeV の高エネルギー領域では人工衛星を用いた観測が行われている。この中でも 2008年に打ち上げられた Fermi 衛星は 20 MeV から 300 GeV のガンマ線に対して高い検出能力を持っており、精度と測定量の増大により 1800 個以上のガンマ線源を発見することに成功している。

1 TeV をこえる超高エネルギー領域でのガンマ線は到来頻度が低いため、ガンマ線を直接検出する人工衛星では観測有効面積が小さく観測できない。このため地球大気中で超高エネルギーガンマ線が生成する空気シャワーを検出することで巨大な有効面積を実現する解像型大気チェレンコフ望遠鏡 (Imaging Air Cherenkov Telescopes, IACT) により観測される。この IACT による観測の歴史は、1960年代に開発された Whipple 望遠鏡に始まる[1-2]。その後の技術的発展により観測の高精度化が進み、現在はカナリア諸島ラ・パルマに建設された MAGIC、ナミビアの H.E.E.S.、アリゾナの VERITAS 望遠鏡など最新の IACT(図 1.3)が世界各国で稼動しており、高エネルギーガンマ線天文学を牽引している。



図 1.3 世界各国の IACT: H.E.E.S.[1-3] (左上) MAGIC[1-4] (右上) VERITAS[1-5] (下)

第1.3節 空気シャワー

地球に到来した高エネルギーガンマ線は、地球大気中の分子と衝突して電子・陽電子対生成を起こし消滅する。これによって荷電粒子である電子と陽電子が生成されるが、これらの荷電粒子は図 1.2(a)の制動放射を起こして再びガンマ線を放出する。この放出されたガンマ線が再び分子と衝突して電子・陽電子対生成を起こし、再度ガンマ線を放出する。この過程で電子・陽電子とガンマ線の数は指数関数的に増加し、その分各粒子のエネルギーが小さくなる。電子・陽電子のエネルギーが大気の臨界エネルギー85 MeVを下回るとガンマ線生成がとまり、電子・陽電子はチェレンコフ光を放出しながらエネルギーを消費していく。このような現象を空気シャワーと呼んでおり、ガンマ線または電子が生成する空気シャワーを電磁カスケードシャワーと呼んでいる。

また空気シャワーはガンマ線以外の宇宙線からも発生している。宇宙線の陽子などと大気中の原子が強い相互作用を起こすことでパイ中間子が生成される。パイ中間子が電荷を持っているとき(π^\pm)、クーロン力により宇宙線の到来方向に対して広がりながら進みやがてミューオンとニュートリノに崩壊する。ミューオンの一部は電子に崩壊し電磁カスケードを生じる。パイ中間子が電荷を持っていないとき(π^0)このパイ中間子は図 2(d)のように2つのガンマ線に崩壊するため、このガンマ線から電磁カスケードシャワーに発展する。このように陽子などハドロンが起源となって発生する空気シャワーをハドロンカスケードシャワーと呼んでおり、ガンマ線起源の電磁カスケードシャワーと比べて粒子の分布が広がっている。

チェレンコフ光

空気シャワー中の電子・陽電子が十分なエネルギーを持つ場合、大気中の光速 c/n (c =真空中の光速度、 n =大気の屈折率) より高い速度を持つとチェレンコフ光を放出する。図 1.4 のようにチェレンコフ光の放出角 θ は粒子の速度 βc により以下の式で表される

$$\cos \theta = \frac{c/n}{\beta c} = \frac{1}{\beta n} \quad (1.1)$$

で与えられる。 n は波長に弱く依存し、波長=300nm、1 気圧での屈折率は約 1.00029 である。したがって 85MeV の電子が大気中で放射するチェレンコフ光の放射角は進行方向に対して約 1.3 度になる。

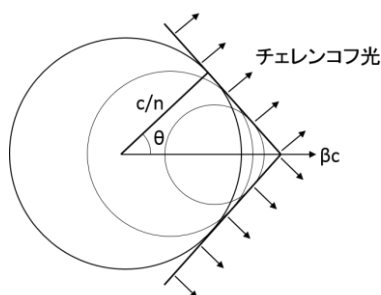


図 1.4 チェレンコフ光放射概略。速さ βc で進む荷電粒子に対して放射角 θ の方向に放射される。チェレンコフ光の放射に伴い粒子はエネルギーを失う。

空気シャワー中の荷電粒子は大気中を粒子の進行方向に垂直にパンケーキ状に薄く広がって進む。その厚さは空気シャワーの発達段階に依存し、上空の初期段階では電子成分が支配的で分厚く、地表に近く発達が進むとミューオン成分が優勢になるため薄くなる。地表での厚さは 1m 以下になる。空気シャワー中の荷電粒子から発せられるチェレンコフ光はシャワーの初期から地表まですべての発達段階で放射されたものが積み重なって望遠鏡に届く。初期に発せられたものは平面状に広がり、地表近くで発せられたものは曲率を持った分布になる。いずれにしても数 ns 程度の厚さの光のシートとして望遠鏡に届く。

第1.4節 イメージングチェレンコフ技術

地上付近の大気中において、電子・陽電子によって発生するチェレンコフ光は進行方向に対して 1 度程度の広がりしか持たないため、空気シャワーの発生方向に指向性を持っている。このため、チェレンコフ光の到来方向を測定すれば空気シャワーの形状：イメージを観測できる。図 1.5 のように地上に設置した複数の望遠鏡により検出することで、異なる

る角度からシャワーのイメージングを行う事が可能となり、空気シャワーを高精度で 3 次元再構築することが可能である。また図 1.6 に示すようなモンテカルロ(MC)シミュレーションによる到来方向毎に観測されるイメージを計算することにより、シャワー中の粒子分布の広がりなどから、バックグラウンドとなる陽子によるハドロンカスケードシャワーイベントを選別して排除することもできる。このように複数の望遠鏡で同一のイベントを観測し空気シャワーを立体的に再構築する技術をステレオ観測と呼んでおり、ガンマ線の到来方向やエネルギーを高精度で決定するために必要不可欠なものとなっている [1-6]。

空気シャワーから発生し望遠鏡に入射するチェレンコフ光は全体で 10ns 程度の時間的広がりを持つ。このチェレンコフ光のうち、上空で発生したものは比較的早く望遠鏡に届き、後から発生したものは遅れて到来する。このタイミングの違いは空気シャワーのイメージからその立体構造を再構築する際に有用である。解析で利用するためにはカメラ全体で検出器の応答時間が ns の精度で測定できていることが重要であり、そのための較正が不可欠になる。

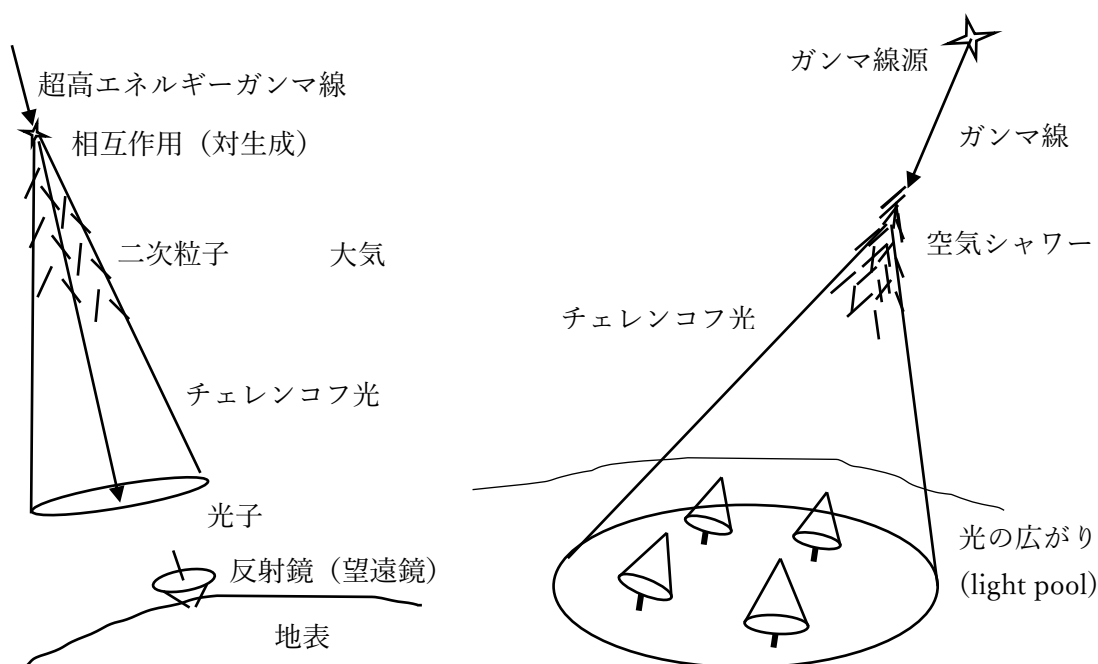


図 1.5 チェレンコフ望遠鏡によるチェレンコフ光撮像イメージ (左図) と、複数の望遠鏡によるステレオ観測イメージ (右図)

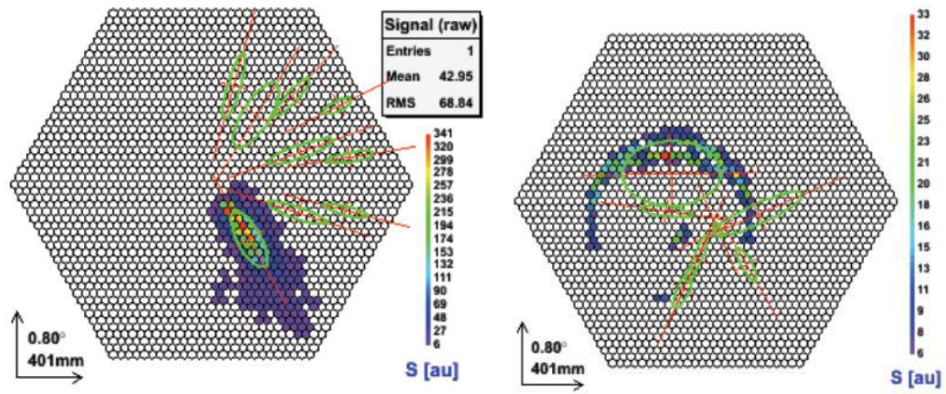


図 1.6 Monte Carlo(MC)シミュレーションによる電磁カスケードシャワーイメージ (左図) と、ハドロンカスケードシャワーイメージ (右図) [1-7]

第2章 Cherenkov Telescope Array(CTA)計画

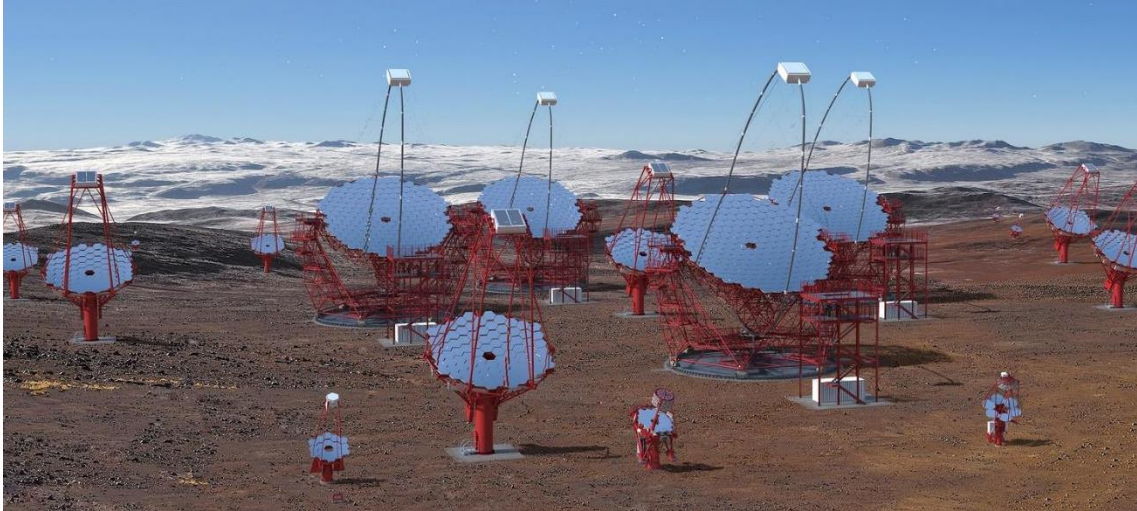


図 2.1 CTA 完成イメージ図[2-9]

この章では Cherenkov Telescope Array (CTA)計画の概要と LST の設計・開発について説明する。CTA 計画とは、これまで TeV 領域のガンマ線観測を牽引してきた MAGIC と H.E.E.S. の 2 グループが中心となって立案された次世代ガンマ線観測計画である。従来の 10 倍以上高い感度を目指し、20GeV から 100TeV 以上の広いエネルギー領域を観測可能な次世代高エネルギーガンマ線天文台を建設する国際共同研究である。

図 2-2 にガンマ線の感度曲線を示す。天体から飛来するガンマ線はエネルギーに対してべきが $-3 \sim -2$ のべき関数になっていることが多い。観測されるガンマ線の明るさはフラックス [$\text{s}^{-1}\text{m}^2\text{eV}^{-2}\text{sr}^{-1}$] で表される。フラックスは単位時間(1 秒)あたり、単位面積(1 m^2)あたり、単位エネルギー (例えば $E \sim E+1 \text{ eV}$ の間) あたり、単位立体角あたり(天体のような天光源の場合は考えない)に飛来するガンマ線の個数で表される。これをエネルギー流量、すなわちエネルギーフラックス、に直すにはフラックスに E をかければよい。例えばかに星雲からのフラックスは だいたいガンマ線のエネルギー E の -2.7 乗に比例する。つまりエネルギーが高くなると急激にフラックスが減る。したがって多数の望遠鏡を広い領域に並べて観測することにより感度をあげることができる。一方エネルギーの低いガンマ線は比較的フラックスは大きいが大気中で放出するチェレンコフ光が少ない。このため大口径の鏡を持った高感度望遠鏡が有効である。図 2-2 は横軸にガンマ線のエネルギー閾値をとり、縦軸にかに星雲のスペクトルを仮定したそのエネルギー以上の積分エネルギー閾値を取っている。点線は 50 時間観測で 5σ 以上の有意性で検出できる感度を示していて、実線により CTA の目指す感度を示している。MAGIC など現在稼働している望遠鏡とくらべて一桁以上の感度向上を目指している。

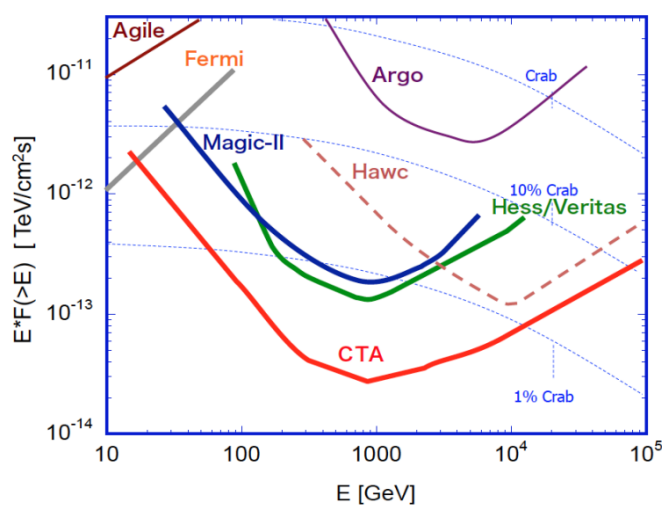


図 2-2 CTA の目標感度曲線[2-10]。縦軸は積分フラックス。かに星雲のスペクトルを仮定して 50 時間で 5σ の検出感度を示している。(本文参照)

表 2.1 望遠鏡の仕様[2-11]。エネルギー帯域を広げるため 3 種類の望遠鏡を使う。

	LST	MST	SST
口径	23m	10 – 12m	4.3m
観測エネルギー範囲	30GeV – 数 100GeV	100GeV – 10TeV	1TeV – 100TeV
反射面形状	Parabolic	Davies-Cotton of Schwarzschild-Couder	Davies-Cotton of Schwarzschild-Couder
鏡面積	400m ²	100m ²	37m ²
焦点距離	28m	15m	7m
視野	4.5°	6° - 8°	~10°

この検出感度を達成するために複数の種類の望遠鏡を組み合わせ、観測するエネルギー帯域を広げている。表 2.1 に計画された望遠鏡の仕様をしめす。に大口径望遠鏡(Large-sized Telescope, LST)、中口径望遠鏡(Medium-sized Telescope, MST)、小口径望遠鏡(Small-sized Telescope, SST)と 3 種類の大気チェレンコフ望遠鏡アレイを地上の北半球・南半球にそれぞれ建設することで全天観測を行う事を目指している。大口径望遠鏡は低エネルギー帯域を観測するためにチェレンコフ光の検出感度をあげ、小口径望遠鏡は高エネルギー帯域を観測するためガンマ線の観測有効面積を広げるように設計されている。CTA が稼動することで、新たに 1000 以上の超高エネルギーガンマ線源が発見される見込みで、高エネルギー現象に関する研究の更なる発展に貢献することが期待されている。

現在は北半球の CTA サイトとなるスペイン領カナリア諸島ラ・パルマ島にある標高 2,200m のロケ・デ・ロス・ムチャチョス天文台(Observatorio del Roque de los Muchachos, ORM)で望遠鏡群の建設が進められており、2018 年 10 月に 1 台目の LST が

完成している。LST は観測エネルギーを人口衛星でも観測可能な 30 GeV まで下げるために、光検出効率が高くなるように設計されている。LST の仕様を表 2.2 に示す。

LST はテスト観測・コミッショニングを続けており、2019 年にかに星雲からのガンマ線放射を検出し、さらに中心にあるパルサーからの 100GeV 領域ガンマ線放射も検出した。2020 年までに 10 個の高エネルギー天体からのガンマ線を検出している。近傍のブレーザー BL Lacertae が顕著なフレアを起こした時には 1.5 時間程度の観測で目標とする 20GeV のガンマ線検出に成功している。1 台での低エネルギーガンマ線の検出により 4 台建設すれば十分目標感度に到達できる見込みが立った[2-1]。日本グループは焦点面検出器（カメラ）、反射鏡、電源設備及び、データサーバー、ネットワークの開発を担当している。

表 2.2 CTA の目標観測感度[2-12]

Diff. sensitivity ($\text{erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	at 30 GeV	8×10^{-12}
	at 1 TeV	2×10^{-13}
	at 50 TeV	3×10^{-13} (South) 10^{-12} (North)
Collection area (m^2)	at 1 TeV	$> 10^4$
	at 10 TeV	$> 10^6$ (S) $> 5 \times 10^5$ (N)
Angular resolution	at 0.1 TeV	0.1 deg
	> 1 TeV	0.05 deg
Energy resolution	at 0.1 TeV	$< 25\%$
	> 1 TeV	$< 10\%$
Field of view	at 0.1 TeV	5 deg
	at 1 TeV	8 deg
	> 10 TeV	10 deg
Repointing time	< 0.1 TeV	20 s (goal) 50 s (max)
	0.1 – 10 TeV	60 s (goal), 90 s (max)

2024 年に 4 台の LST 完成し、20 年間の本格観測開始を目指している。現在、観測サイトの近くにある実験室で搭載機器の性能評価が行われている。

LST2-4 号機のカメラは、2019 年に日本国内で測定系の立ち上げとモジュールの組み立てや性能評価など一連の作業を開始している。現在はこの国内で行ってきた作業のフィードバックを反映させたうえで、LST 建設サイトの隣島であるカナリア諸島テネリフェ島内にあるカナリア天体物理研究所(The Instituto de Astrofísica de Canarias:IAC)の施設にて LST3 台分のモジュール組み立てと性能評価が行われている。

第2.1節 CTA が観測する天体と貢献するサイエンス

図 2.3 は高エネルギーガンマ線源の発見個数を時間の関数で示したものである。GeV 領域のガンマ線は X 線と同様に大気の吸収を受けるため地上では検出できず衛星を使って観測されている。衛星では検出器に入射したガンマ線がコンプトン散乱により生成する電子を検出することにより観測している。現在は Fermi 衛星が大きな成果をあげている。一方 100GeV 以上のエネルギー領域の高エネルギーガンマ線はフラックスが小さく衛星では検出面積が足りない。そのためガンマ線が地球大気に入射し生成する空気シャワーを利用して地上に設置したチェレンコフ望遠鏡により観測している。これまで口径 10m クラスのチェレンコフ望遠鏡を複数並べて、空気シャワーをステレオ観測する方法により成果を上げている。この方法で観測している装置が北半球の MAGIC II と南半球の HESS II である。CTA では、地球全天を観測対象とする大規模な望遠鏡アレイを地上に配置する事で得られる数 km² に及ぶ観測有効面積(effective area)によって、図 2.2 (右) のように現在稼動している大気チェレンコフ望遠鏡よりも約 10 倍の感度を達成すると同時に、観測可能なエネルギー領域を 20GeV から 100TeV 以上に拡大することで、1000 個以上の超高エネルギーガンマ線源の発見が期待されている。

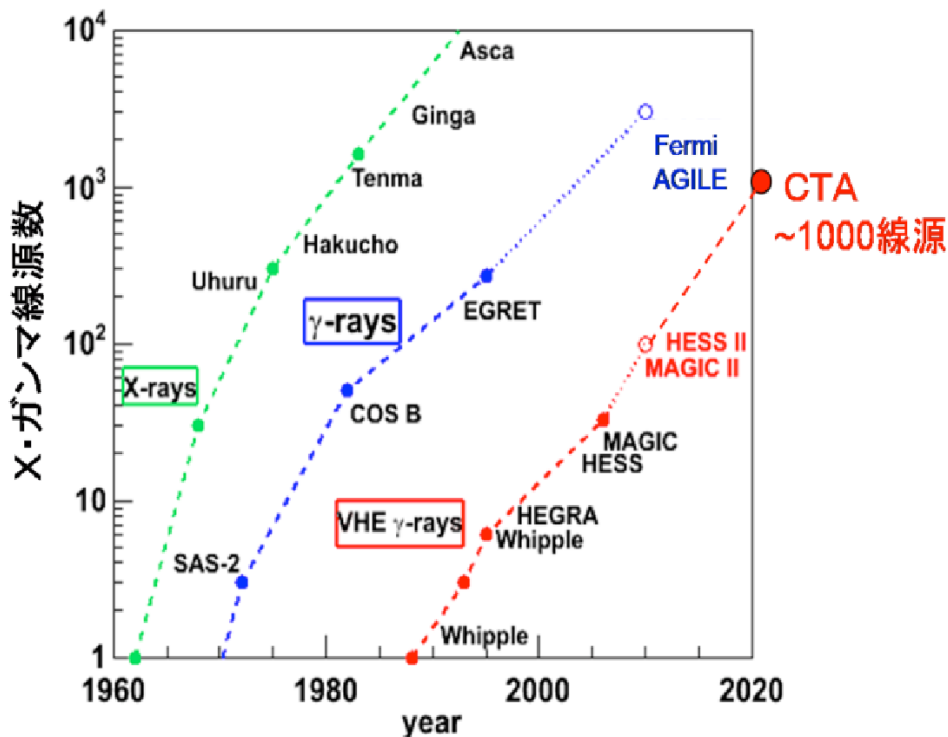


図 2.3 X・ガンマ線源発見個数の推移[2-13]. CTA は現行の望遠鏡より感度を一桁上げることにより、1000 個程度のガンマ線源の検出が見込まれている。

図 2.4 に示すような天体现象や、ガンマ線をプローブとした図 2.5 のようなテーマが、

CTA が狙うサイエンスである。

CTA により研究される課題を以下に挙げる。

- 超新星残骸、ガンマ線連星、銀河団、活動銀河中心核、ガンマ線バーストなど高エネルギー天体の探索と放射機構の解明
- 宇宙線の起源の探索
- 星形成史など爆発的な活動
- ローレンツ普遍性の破れによる光速度エネルギー依存など相対論の検証
- 銀河中心付近での輝線探索による暗黒物質の探索

超新星残骸は超新星爆発の名残であり、高エネルギー宇宙線の加速源と考えられている。ガンマ線連星はブラックホールや中性子星と大質量星が連星系を成しているもので、大質量星からの物質降着が発生し、大質量星からのエネルギー噴出が確認されている。銀河団では銀河同士の衝突・合体により高エネルギープラズマが放出されている。活動銀河核は銀河中心の超巨大ブラックホールが激しく活動しており、莫大なエネルギー放出が起こっている。また、ガンマ線バーストは 10^{53}erg (CGS 単位系におけるエネルギー・熱量の単位であり、 $1\text{erg}=10^{-7}\text{J}$) に及ぶ膨大なエネルギーを数秒から数十秒の間に開放してしまう爆発現象である。これら爆発的な現象は宇宙線起源の候補に挙げられている。しかし 10^{15} から 10^{18}eV までの宇宙線は銀河系内または近傍で発生していると考えられているが、その加速源は見つかっていない。さらに 10^{18}eV 以上の最高エネルギー宇宙線は候補天体との相関がみられず起源は謎のままである。

第2.2節 Large-size Telescope (LST)

CTA 計画で建設される 3 種類の望遠鏡のうち、低エネルギー側の 20GeV から 1TeV に感度を持つ望遠鏡が、大口径望遠鏡(Large-size Telescope, LST)である。LST は図 2.4 に示すように 3 種類の望遠鏡の中で最も大型であり、主鏡の直径は 23m、焦点距離は 28m になる。

LST が担うエネルギー領域では、銀河系内のパルサーや、銀河系外のガンマ線バースト (Gamma-ray Burst, GRB)、活動銀河核 (Active Galactic Nuclei, AGN) などがあり、これらを突発的天体現象とする。天文衛星やニュートリノ、重力波検出器で突発現象が検出されたとき、その特報をインターネット経由で自動受信し、できるだけ早く観測を開始することが求められる。そのため LST は全重量 100ton、焦点面先端に取り付けられるカメラユニットの重量のみでも 2ton の巨大望遠鏡でありながら、その架台の回転速度は 180deg/30sec 以上となるように開発されている [7]。

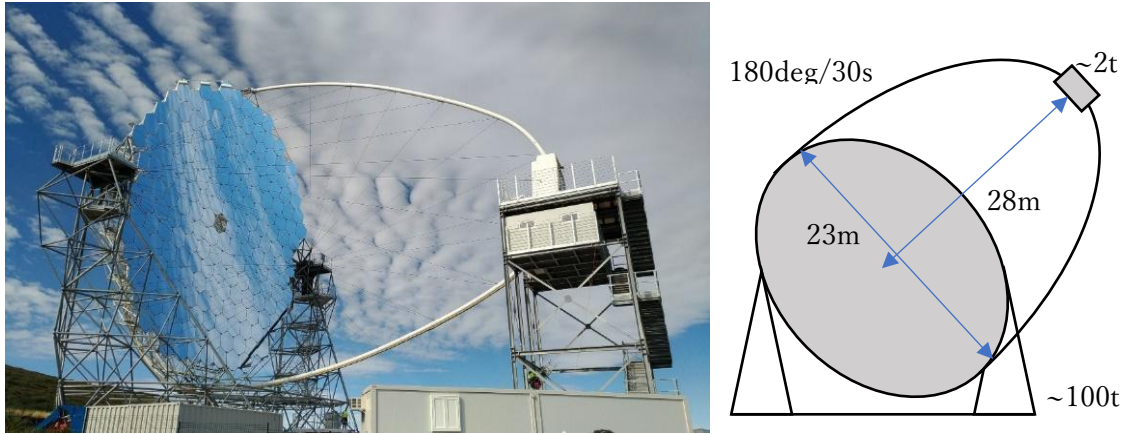


図 2.4 ORM に建設された LST 望遠鏡の初号機(左), LST の寸法(右)

東京大学宇宙線研究所(ICRR)や甲南大学など国内の研究機関により CTA-Japan consortium が組織され CTA の開発を国際協力により進めている。2018 年の 10 月に完成した LST 初号機への搭載機器の開発や性能評価を行ってきた。現在は北半球に建設予定である残りの 2-4 号機についてカメラの組み立てと性能評価を行っている。ここでは主に CTA-Japan グループが主導となって行っている LST の各装置開発について説明する。

2.2.1 反射鏡

LST に用いられる反射鏡は放物面型複合鏡と呼ばれ、放物面を持った分割鏡を約 200 枚合わせることで一枚の大きな反射鏡を形成する。この分割鏡の開発は全て日本グループが担当しており、茨城県つくばみらい市にある三光精衡所が製作を行った。LST には 1 台当たり 1.51m 分割鏡 (図 2.5) 205 枚が搭載される。焦点距離は 28m で焦点での距離はカメラに搭載されている光電子増倍管口径(40 mm)の 1/3 以下であることが要求されている。主鏡は放物面であるため、外側に行くほど焦点距離が長くなる。そこで製造した分割鏡の焦点距離や焦点での集光形状を全数測定してその特性によりグループ化している。そのため LST の構造からカメラに対して最適な分割鏡の配置を特性のグループごとに管理することで、最終的な微調整を行うことができている。すでに LST2 号機以降の分割鏡も製造が進められており、ICRR での特性測定を経て建設地であるラ・パルマ島に保管されている。



図 2.5 反射鏡[2-14]

2.2.2 Active Mirror Control (AMC)

望遠鏡は自重や風圧、温度変化などの様々な要因によって歪みが生じる。その歪みが焦点面のズレなどに影響しないようにすべての分割鏡の方向を常時制御できる設計になっている。図 2.6 に示すように分割鏡とミラー支持構造との間には分割鏡一枚当たり 1つのピボットと 2つの高精度アクチュエーターが取り付けられ、分割鏡本体には CCD カメラが取り付けられる。2つのアクチュエーターによって分割鏡の角度を 2次元的に個別制御することが可能となっており、分割鏡に取り付けられた CCD カメラと焦点面検出器上の校正用スクリーンに投影されたレーザー光を用いて分割鏡と焦点面とのズレを検出することで、それを補正するように分割鏡を動かすことが可能となるように設計されている。28m 先の焦点で 10 mm 程度のスポットサイズを実現するためには 0.02° 以下の精度が必要になる。このシステムは Active Mirror Control(AMC)と呼ばれている。

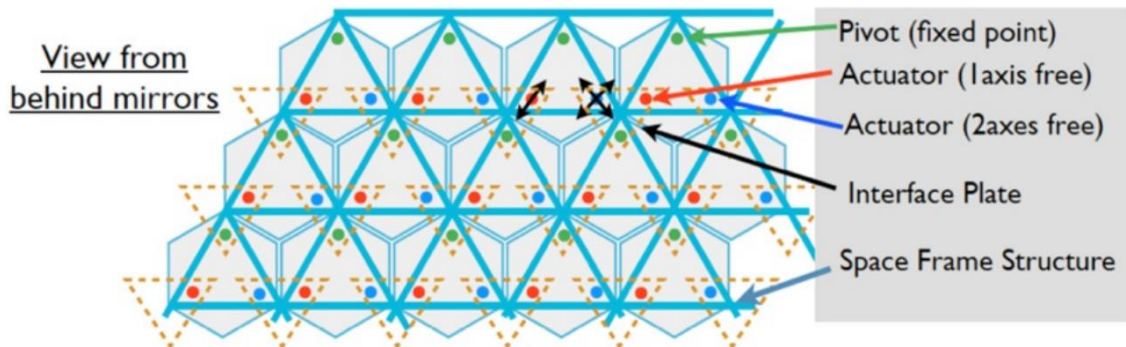


図 2.6 AMC を可能とする分割鏡支持構造とアクチュエーター[2-15]. 上図は分割鏡裏の支持構造を示している、青点が固定点(Pivot: fixed point)、黄点がアクチュエーター。左下図が固定点、右下 2つの図がアクチュエーターの外形を示している。

第2.3節 CAMERA

2.3.1 Camera 構造

主鏡のフレームにはカメラを固定するアルミ製のアームが取り付けられている。アームはワイヤーにより主鏡フレームに固定されており、カメラ支持体(Camera Support Structure:CSS)と呼ばれている。カメラをアームに固定するためのカメラフレームを図 2.7 に示す。このフレームに 30 mm 厚のアルミ製冷却板を固定している。この冷却板の位置はフレームに対して前後に調節できるようになっており、焦点面検出器の位置を決める基準になっている。このため冷却板に焦点面検出器を正確に装着する設計になっている。冷却板の内部には冷却水が循環しており、カメラで発生する熱はこの冷却水に集められ望遠鏡の土台に固定されている冷却装置に運ばれる。

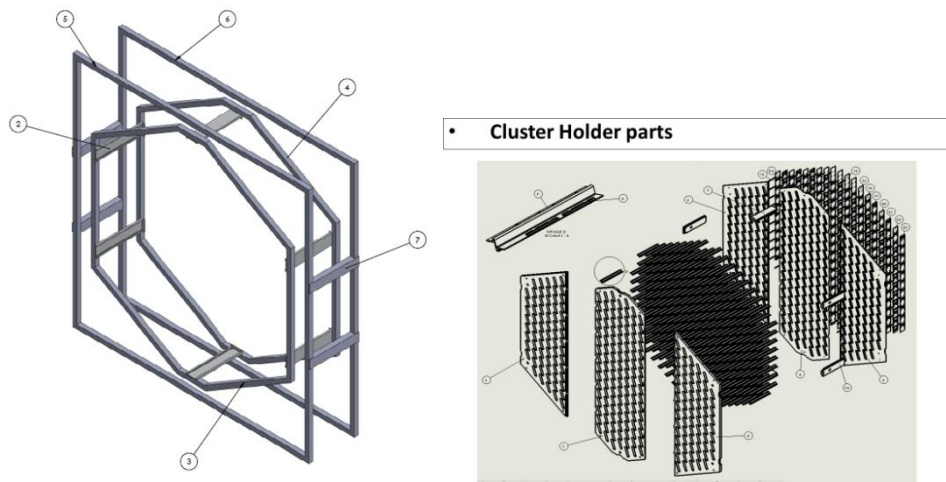


図 2.7 カメラフレームと冷却プレート、右図はカメラ構造体を前から見た図。一番左から 3 mm 厚アルミバックプレーン、フロントエンド回路用レール、30 mm 厚アルミ冷却版、PMT 支持棒の順番になっている。30 mm 厚冷却版が焦点面検出器の位置を決める基準になっている。[2-2]

2.3.2 焦点面検出器(Focal Plane Instrument : FPI)

LST の主鏡によって集光された光は焦点面に設置された焦点面検出器(FPI、図 2.8 に示す)に入射する。FPI は直径 2.25m の円形となっており、この中に検出素子として 1855 本の光電子増倍管 (Photomultiplier Tube, PMT) が配置されている。空気シャワーからのチェレンコフ光は焦点面で結像し、PMT により検出される。LST で使用する PMT は光電面が Head-on 型口径 40mm 半球形で筒状の端辺が入射窓なためカメラ素子として敷き詰めるのに都合が良い形状である(図 2.11)。しかし PMT 同士を完全に隙間なく配置することはできず、また入射窓を外部に向けて配置しただけでは主鏡による反射光以外の夜光や照り返しなどのバックグラウンド光も拾い易い状態となってしまう。そこでこの 2つの問題に対応するために、PMT 各々に対して入射窓を覆うように図 2.9 のようなライトガイドと呼ばれる光学部品を取り付けている。このライトガイドを取り付けることで集光面の隙間を無くす事ができると同時に、ある一定以上の入射角の光に対しては MT の入射窓まで光を届かないようにすることができる。このライトガイドの形状に関しては LST に最適となるよう設計・開発を行った。

1 本の PMT が 1 画素に対応し、7 画素分の集光部、光検出器とプリアンプ、それに対応した 7 画素分の制御基板と後段の読み出し (読み出し) 基板を 1 個の module として扱っており、PMT-module と呼ばれている。この PMT-module を図 2.10 に示す。FPI として 265 個の PMT-module が搭載され、全体で 1855 画素のイメージ検出器を構成している。

PMT のテストと PMT モジュールの構造設計、フレーム制作・組立、ライトガイド開発、冷却系設計、性能評価結果のデータベース構築などを甲南大学が中心になり行った。[2-3]

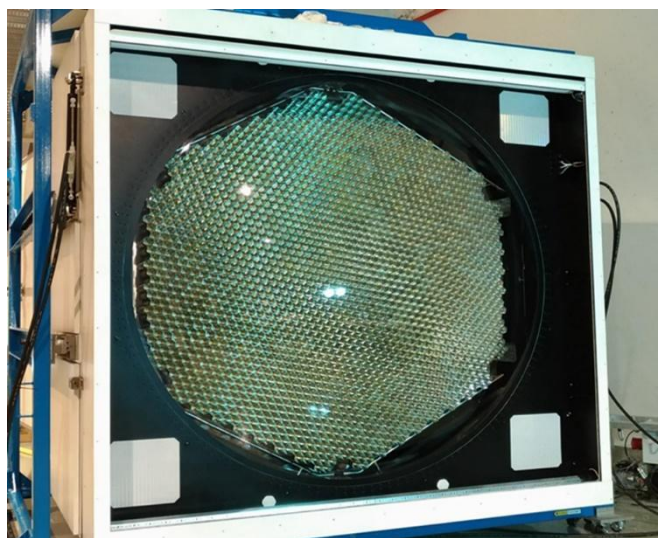


図 2.8 LST に搭載されている FPI。直径 2.25m の円内に 1855 本の PMT が搭載されている。



図 2.9 開発した PMT に取り付けられるライトガイド. 1つの module に 7 本の PMT が搭載され、このライトガイドを装着している。

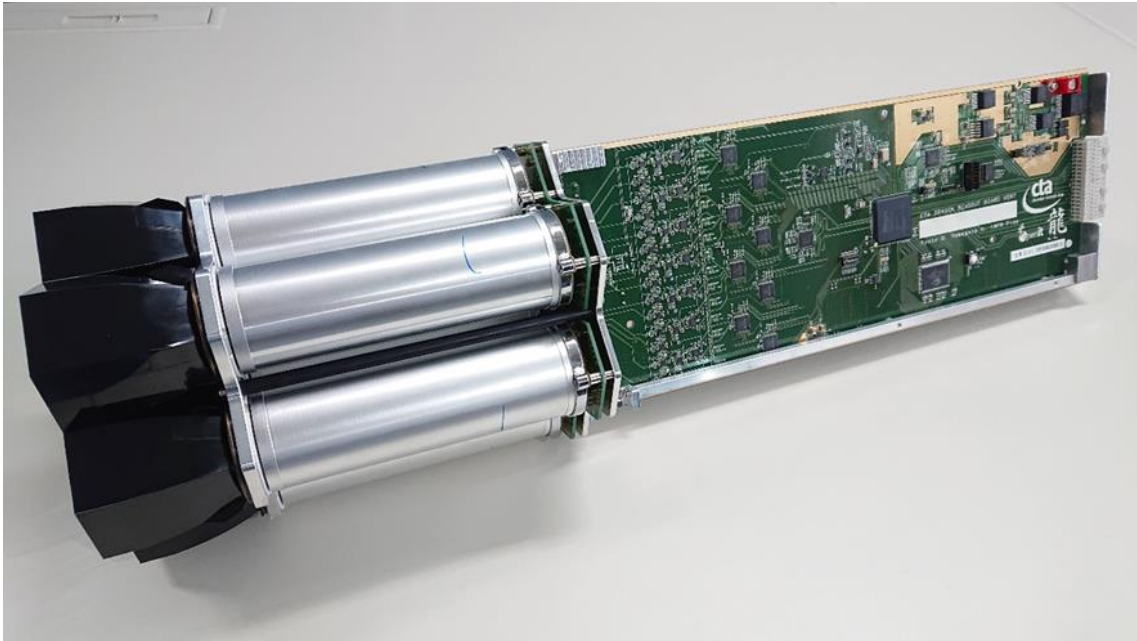


図 2.10 LST 用 PMT モジュール[2-4]。ライトガイド、PMT,フロントエンド回路で構成されている。

2.3.3 光電子増倍管(Photomultiplier tube : PMT)

光電子増倍管 PMT とは、光電効果を利用して光子を電子に変換し、さらにその電子を増倍させて大きな電気信号にする機能を持った高感度光検出器である。その増倍原理の模式図を図 2.11 に示す。

入射窓から入射した光は光電面に到達して、光電効果により光電子を放出させる。その光電子は集束電極によって電子増倍部に導かれ、そこで数百 V 程度の電圧が印加された複数段のダイノードに衝突する。各ダイノードでは加速された電子によって複数の二次電子がたたき出されるため、最終段のダイノードに到達する際には数十万倍から一千倍以上もの電子となった状態で信号電流として外部に取り出される。

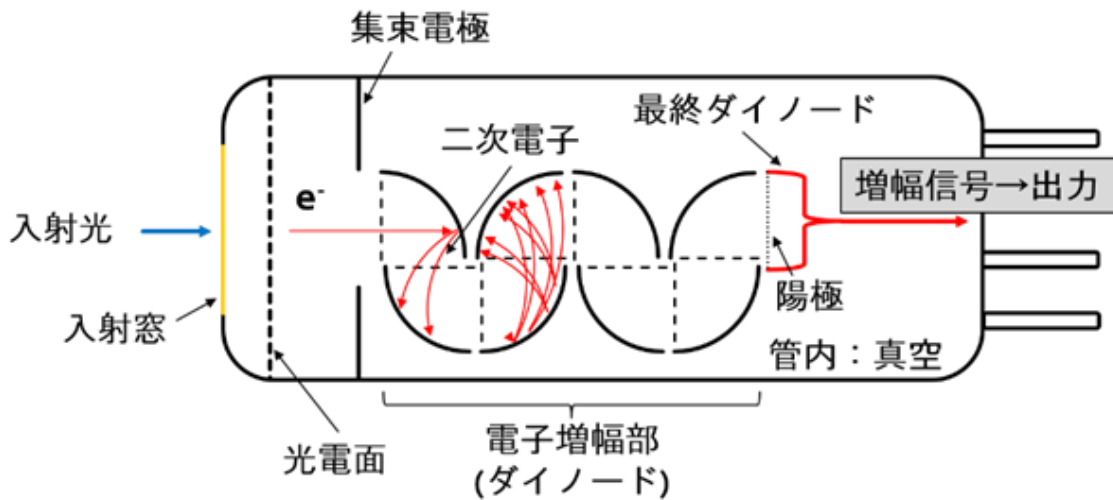


図 2.11 光電子増倍管(PMT)の増倍原理の模式図[5-4]

LST のカメラは光検出器には、ガンマ線観測用として浜松ホトニクスと共同開発した PMT を採用している。特に、光子を光電子に変換する量子効率 (Quantum efficiency, QE) は要求値 35%に対してピーク値で 36-45%という大変高い値を達成した。光電面にバイアルカリ金属を付与することにより効率をあげ、さらにその光電面を半球形にして表面をすりガラス状にした。この構造により、光電面で光電子に変換されなかった光子は散乱され、もう一度光電面に当たる確率が上がる。この効果で高い量子効率を達成した。

そのほか PMT の構造上の特徴の一つである、本来信号が入っていないにもかかわらず信号があるかのように振舞ってしまう After Pulse 現象の発生率を、要求値以下の 0.02%以下にした。この現象は PMT 内部にある気体分子により引き起こされる。気体分子に加速された電子が衝突すると、分子はイオン化され電場により光電面に引き寄せられる。光電面に到達すると光電効果により新たに光電子が発生し、本来の信号より遅れた信号を発生させる。この After Pulse は PMT 内の気体分子をなくすことにより減らすことができる。このため、PMT 内に入り込んだ気体分子を吸着するゲッターと呼ばれる部品を配置した。製造過程で PMT 内を真空に引いた後、ゲッターにより残った気体分子を取り除いている。ただし、大気中にある He 分子はガラスを通り抜けるため PMT 内に徐々に侵入する。この He 分子による経年変化は現在も調査が続けられている。

LST のカメラに搭載される PMT は LST 初号機用と 2-4 号機用で電子増幅を行うダイノードの数が異なっている。初号機用の PMT(Model: R11920)はダイノードが 8 段であるが、増幅率が予定より高くなった。増幅率が高いと PMT の陽極に流れる電子が多くなり、夜光に曝しながら観測するチェレンコフ望遠鏡で使用すると経年劣化が早くなる。このため、PMT に印可する高電圧を下げざるをえないが、そうすると応答速度が遅くなり信号のパルス幅が大きくなる。これを防ぐ為に後段の前知増幅回路で信号を減衰させている。後に製造された 2-4 号機用の PMT(Modeul:R12992)はダイノードが 7 段とした。このように意図的に増幅率を下げることで、LST カメラとして通常使用時の印加電圧を上げることで、パ

ルス幅を狭めて S/N 比を向上させることが可能となった。

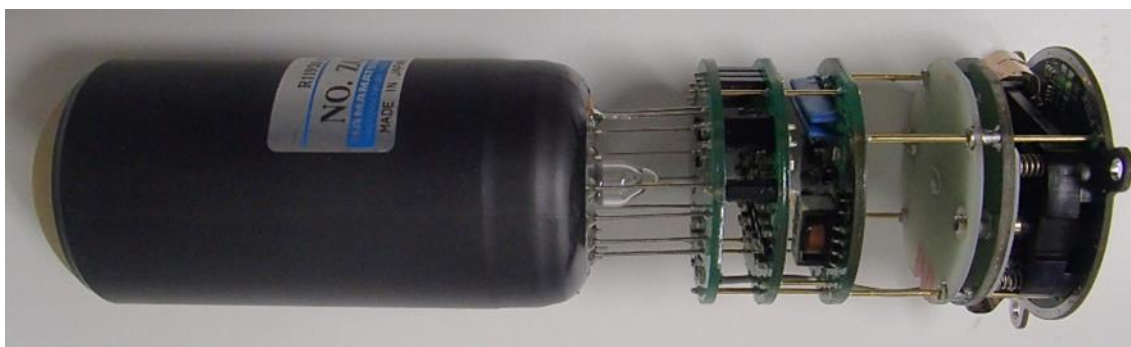


図 2.12 LST に使用する浜松ホトニクス製 R11920 光電子増倍管。左に磁気シールドがまかれた 40mm 口径 PMT があり、それが 3 枚の基板からなる高電圧生成回路に接続されている。右側に前置増幅器回路と後段の制御回路に接続するインターフェース回路がある。ばねが内蔵されており振動やゆがみを吸収する構造になっている。

各 PMT には高電圧電源回路があらかじめ取り付けられており、この回路によって PMT に印加する電圧(HV)を各 PMT で 850 V から 1500V まで任意に設定できる。PMT は観測中に入射する夜光により定常的に 200~300 MHz 程度の信号が発生し、信号はアノードを劣化させ 10 年程度の時間をかけて増幅率が下がってゆく。増幅率が下がった PMT は印加電圧をあげて使用することになる。すなわち PMT の増幅率が低下して、電源の最大値である 1500V をかけても LST の定格増幅率 40,000 倍を下回った時が PMT の寿命になる。このためできるだけ高電圧を下げて使いたいが、そうすると信号のパルス幅が広くなり、チェレンコフ光による信号時間幅がひろがることにより、夜光などのノイズが信号に入り込む確率が増える。このため 1 光電子に対する信号の時間幅は半値幅で 3ns 以下という仕様になっている。

2.3.4 PMT 用高圧電源回路

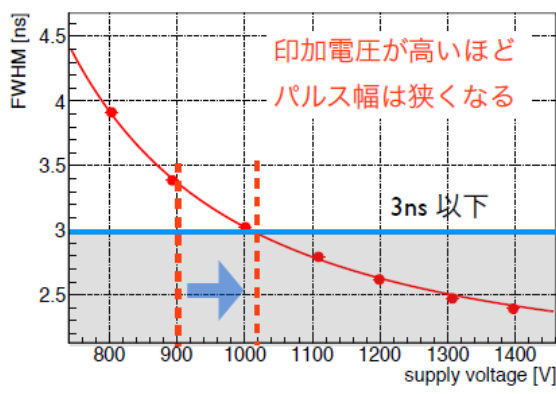
全ての PMT には 3 枚の基板からなる高電圧生成回路が取り付けられている。この回路は浜松ホトニクスにより開発され、PMT の磁気シールドと同様に納品の段階で取り付けられている。回路は Cockcroft-Walton (CW)方式による高電圧生成を採用している。DC6V を入力電圧とし高周波を発生し、ダイオードとコンデンサからなる回路により高周波を使って、制御回路から与えられた低電圧を 1000 倍に昇圧する。小さい回路基板により比較的 low noise の安定した高電圧が得られるが、高周波発生回路が周辺に高周波を放出する欠点もある。

2.3.5 前置増幅器

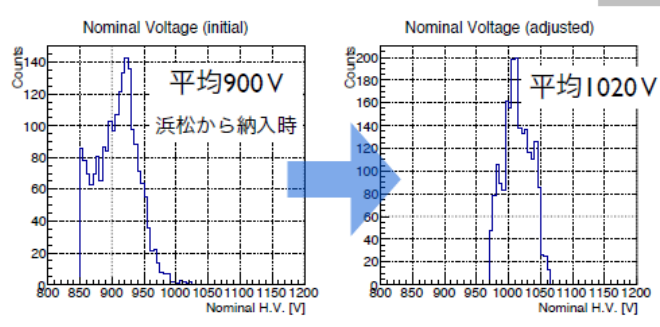
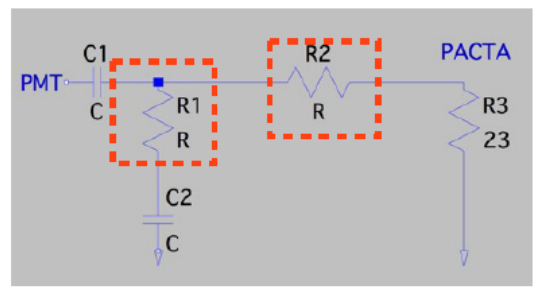
各 PMT には高電圧生成(CW)の基板が完成段階で取付けられているが、そこに土台部品をはんだ付けして前置増幅器の基板を取り付けて、そのあとコネクタや固定のためのインターフェース基板が着く構造となる(図 2.12)。前置増幅器は焦点面検出器システム全体での最大消費電力が決められていることから、低電力、低ノイズでなければいけない。このために PACTA(PreAmp for CTA)と呼ばれる増幅回路を採用している[2-5]。PACTA はバルセロナ大で開発された専用設計の IC(ASIC)によるインピーダンスアンプで、 50Ω の入力インピーダンスに対して、 $1.2k\Omega$ と 73Ω の2つの増幅回路により $1.2k/50=24$ 倍と $73/50=1.46$ 倍の増幅率になる。どちらのチャンネルも伝送経路でのノイズを軽減させるため差動出力になっており、2本ずつ合計4本の信号を出す。

2.3.6 減衰回路

前述したように、夜光によるノイズを避け S/N 比を向上させるため、PMT から出力されるパルス幅は FWHM で 3ns 未満という要求値が設定されている。PMT のゲインは個体差があり、運用時の定格として定めている増幅率 40,000 になるように印加高電圧を調節すると高電圧が低くなりすぎて 3ns を超えてしまう個体もあった。PMT の個体差に合わせた高電圧自体がカメラ全体で 200V 以上のばらつきがあり、信号が後段回路のトリガーに入るタイミングのずれが大きいという懸念があった。そのため PMT から前置増幅回路の間に抵抗分割による信号減衰回路を入れて(図 2.13 右上)、PMT の増幅率を上げた状態で一定の割合の信号を捨てることにより、後段から見た増幅率を下げることにした。減衰率を 3通り(に $1/1$, $1/2.5$, $1/3.5$)設定することにより(図 2.13 右下)、カメラ全体での高電圧の差が 100V 以内に収まり(図 2.13 左下)、かつ信号幅は 3ns 未満(図 2.13 左上)という要求値を達成することができた。



PMTをゲイン毎に3グループに分けて、それぞれにあう減衰率を用意



R1[Ω]	R2 [Ω]	減衰
69.8	154	1/3.5
100	76.8	1/2
open	27	1

図 2.13 PMT の応答関数と高電圧の関係、前置増幅器に入れた減衰回路、減衰回路を入れる前後の基準高電圧値。減衰回路の後で増幅率が 40,000 となる高電圧を基準にしている(本文参照)。[2-6]

2.3.7 PMT 制御回路(SCB: Slow Control Board)

PMT には前述のように個別に高電圧生成回路と前知増幅器が取り付けられているが、これらの電源と制御のために SCB(Slow Control Board)と呼ぶコントロール基板が装着されている。7本のPMTを1枚のSCBで管理している。各PMTはノイズ対策のためのアルミの筒に格納されたうえで、SCBの中央に1本と外周に6本の構成で配置される。またSCBはPMTと後段の読み出し回路とのインターフェースになっており、全ての信号はこのSCBを通して読み出し回路に送られる。さらに、PMTのシリアル番号読み出しや基盤の温度のチェック、高電圧の制御などがおこなわれる。読み出し回路から送られてくる指令をSCBのCPLDがシリアル通信により受け取りPMTモジュールを制御する。PMTに印可する高電圧は、SCBにある12bit DACにより0-1.5Vのコントロール電圧を0.37mV刻みで生成しインターフェース基盤を通じてCW回路に送られ制御されている。

2.3.8 読み出し回路

それぞれのPMTの信号は前置増幅回路で高低2種類の増幅率で増幅され、それぞれが差動信号として送られる。すなわちPMT1本あたり4本の信号線が出力される。7本のPMTから送られる28本の信号線はSCBを通して読み出し回路へ送られる。読み出し回路

ではまずメインアンプにより増幅され、トリガー用の回路とデジタル化回路それぞれに送られる。トリガーはアナログサム法を採用しており、7本のPMTからの信号を足し合わせてローカルなトリガーを生成する。各PMTモジュールからのローカルトリガーをもとに望遠鏡全体のトリガーが生成される仕組みになっている。もう一方のデジタル化用信号は高低増幅率の信号14系統あり、それぞれDomino Ring Sampler (DRS) と呼ばれるASICにより波形データに変換される。このASICではまず信号が指定したサンプリング速度でコンデンサに入れられる。1つのコンデンサが1サンプリングに対応する。通常は1GHzでサンプリングされる。すなわち1ns毎にスイッチングされ、リングバッファーとして波形が一定時間保管される。トリガーが発生すると、40サンプリング、40nsの波形が12bit ADCによりデジタル化され、後段のネットワークに送られる。

第2.4節 集光器と photon budget

集光器(Light Guide: LG)はPMTモジュールの部品の一つであるが、甲南大学で詳細な研究と開発が行われてきたためここで詳細に解説する。

PMTの光電面は直径40mmの半球殻になっておりPMT間の間隔はそれぞれの中心から50mmになっている。この隙間を埋めるためにLGが必要になる。LGは一定の入射角以下で入射した光をPMT光電面に導く光学部品である。このLGは甲南大学が中心になって開発した。

カメラ中心(焦点)から見て鏡は約 ± 25 度の範囲にある。図2.14にカメラ中心から見た分割鏡の方向分布を示している。焦点面検出器の一番外側にあるPMTから見るとこの分布は27度くらいまで広がる。2度程度の余裕をとって、LGは ± 29 度の範囲の光をPMTに届け、それより外の光を反射する設計になっている。

LGの反射面には一般的に放物面を組み合わせたWinston coneが採用されている。この設計だと入口と出口の大きさを固定すると自由度がなく、視野が調節できない。また入口が円形なら理想的な性能になるが、六角形にすると集光率が下がる難点がある。そこでLGの鏡面はBezier曲線を採用している[2-7]。LGの入射面の大きさは対辺50mmの六角形に決まっているが、視野を広げるためには出口を大きくしなければいけない。出口の大きさはPMTの口径により制限されていて、口径40mmより小さくしなければいけない。そこで、図2.15に示すようにPMTの管面をLGの中に入れる設計にした。

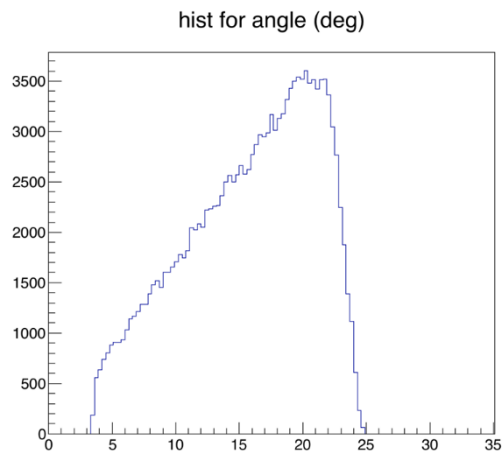


図 2.14 カメラ中心から見た分割鏡の方向角度分布。[2-7]

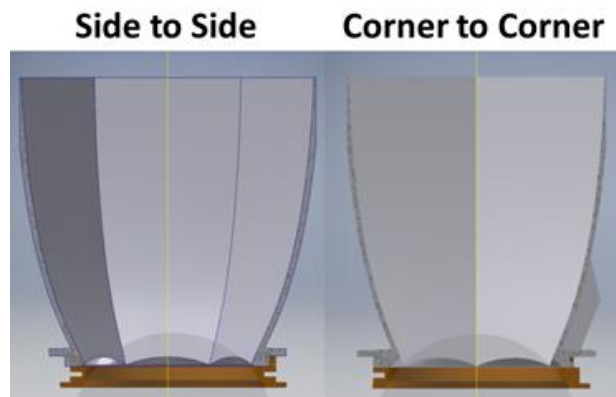


図 2.15 集光器の構造. LG の縦方向断面を示している。上から見ると対辺 50 mm の六角形で、入射した光を直径 40mm の半球形の光電面に導く。

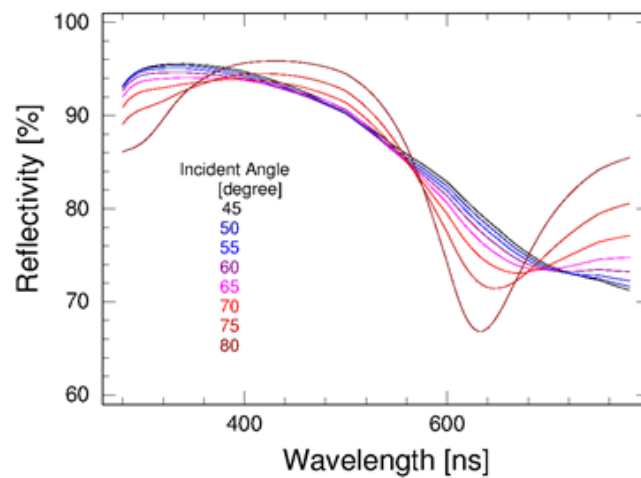


図 2.16 光学シミュレーションで計算した鏡面の反射率を波長と入射角の関数で示している。理想的な平面に蒸着した場合の反射率を波長と入射角の関数で示している。

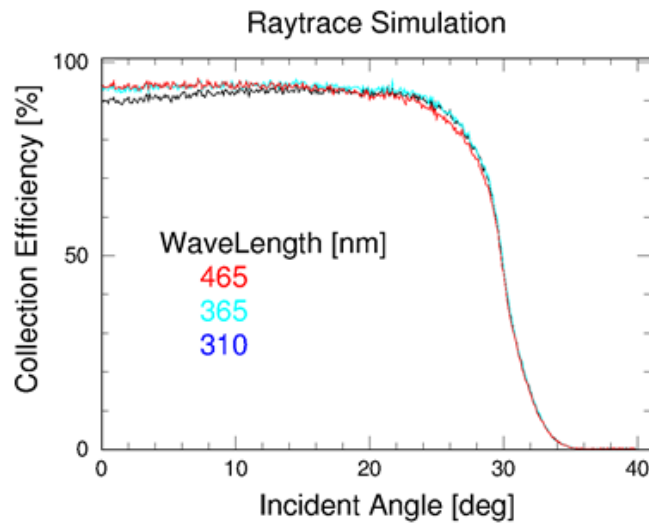


図 2.17 ROBAST Ray trace パッケージを使ったシミュレーションにより集光効率を計算した結果。入射角の関数で 3 波長プロットしている。

この集光器は ROBAST Ray trace [2-7] を使ったシミュレーションにより形状を最適化して視野角が前述の 29 度になるように設計した。その後、切削加工により試作を繰り返し、さらに金型を制作し射出成型による樹脂加工で制作している。反射面の鏡面精度を含め改良のため 3 度金型を作り直している。

LG の鏡面は 120nm 厚のアルミ、80nm 厚の SiO₂、22nm 厚の Ta₂O₅ を低温蒸着した 3 層の増反射コートになっている。反射率は波長と入射角の関数で、光学シミュレーション TFCalc により光の吸収を入れて計算した [2-8]。図 2.16 に示すように 広い入射角で 320nm の短波長の光に対して反射率が上がるように設計した。この計算では鏡面に対する入射角が 45 から 80 度まで計算されているが、以下の計算では 0 から 45 度までと、80 度から 90 度までは反射率が変わらないと仮定している。このシミュレーションは理想的に滑らかなで平らな面に蒸着した場合であり、plastic の曲面に蒸着した場合はこれより低い反射率になる。

この反射率の値を ROBAST ray-trace シミュレーションに入れて、LG の集光効率を計算した。図 2.17 はこのシミュレーションで計算した集光効率を入射角の関数で示している。310, 365, 465 nm の 3 波長の計算結果を示している。このシミュレーションでは、LG の出口に到達した光子数を計算しており、PMT の管面の構造等は考慮していない。実際は PMT の管面は球形で LG の内部に入っている。また管面は 1000V 程度の高電圧がかかっており、アルミ鏡面との接触は避けなくてはならない。このため、PMT と LG 出口の間には 1.5 mm の隙間が空く設計にしており、この隙間に入った光子の一部は PMT 管面に届かない。

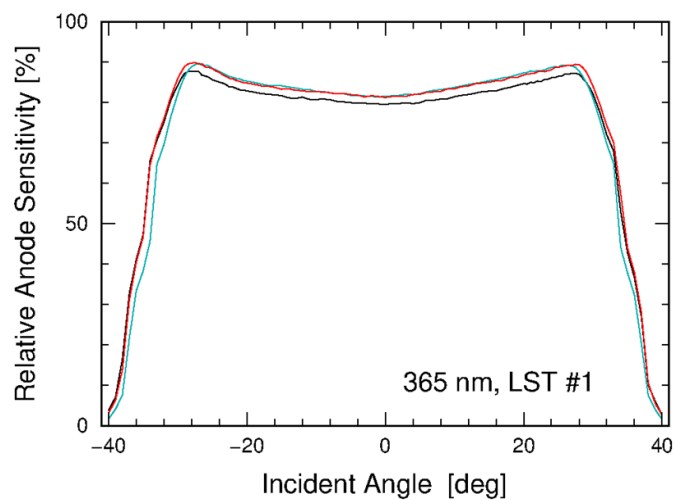


図 2.18 集光器の集光効率測定結果。365 nm の測定を 3 例しめしている。測定の再現性も LG の個性も数%程度である。

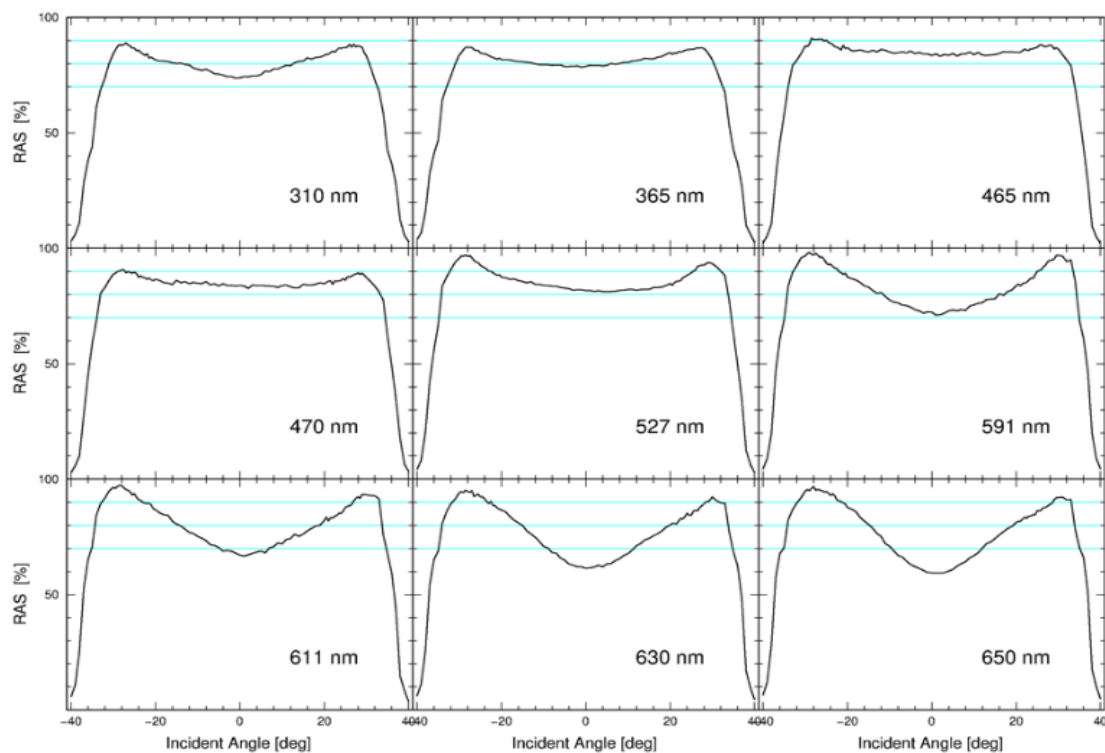


図 2.19 集光器の集光効率測定の結果。310~650 nm の波長での測定を 1 例ずつしめしている。

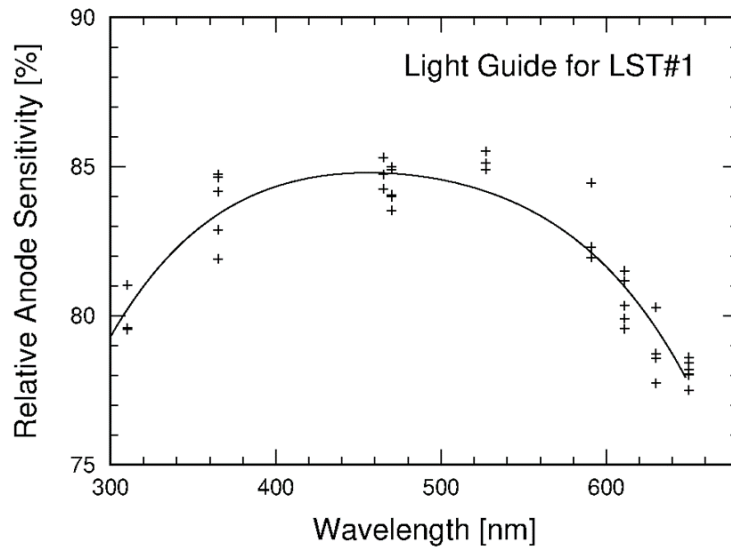


図 2.20 集光効率の測定結果を波長の関数で表している。

図 2.18 は実際に LST #1 のために製造された LG の実測値である。この測定の詳細については詳細がまとめられた paper[2-7]にて報告されている。測定は茨城大学に設置した暗室で行われた。この測定では、シミュレーションと違い、LG の出口と PMT 管面の構造を含めた集光効率の測定になっている。図 2.19 と比べると実測では入射角 0 度で集光効率が低く入射角 26 度付近で集光率が高くなっている。これは LG により PMT 管面への入射角が大きくなり量子効率が高くなるためと考えられる。この PMT の量子効率の角度依存性や管面の位置による違いはシミュレーションに入れて計算することが難しく実測により求めることになる。この測定値をカメラ中心から見た分割鏡の角度分布(図 2.14)で重みをつけて平均を計算した結果が図 2.20 である。

この測定結果を 5 次べき関数 $f(x \text{ [nm]})$ により入射光の波長と集光効率の関係を数化した。以下のようにパラメータを仮定する。

$$f(x) = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4$$

推定されたパラメータの値は以下ようになる。この結果は図 2.20 に示している。

$$a = -79.39, \quad b = 1.281, \quad c = -3.817 \times 10^{-3}, \quad d = 5.187 \times 10^{-6}, \quad e = -2.729 \times 10^{-9}$$

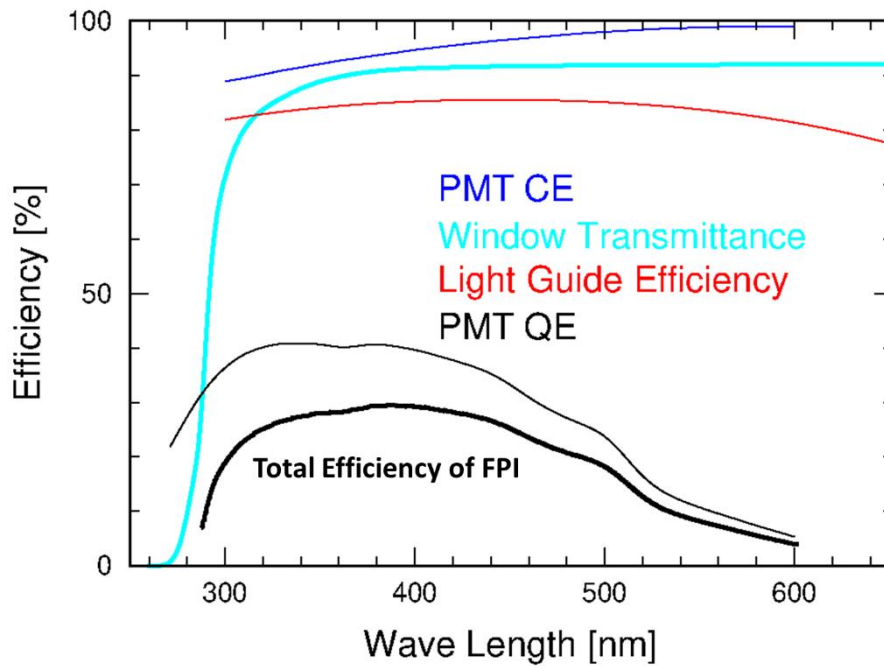


図 2.21 カメラの集光効率を入射光波長の関数で表している。

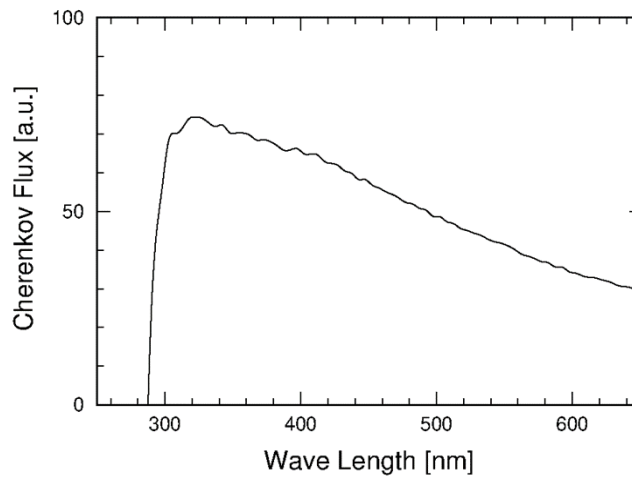


図 2.22 望遠鏡に飛来するチェレンコフ光のスペクトル。大気中で発生するチェレンコフ光は -4 乗のべき関数のスペクトルを持つが、それが大気による吸収・散乱を受けてから望遠鏡に飛来する。

この結果からカメラ全体の集光効率をもとめる。図 2.21 に望遠鏡の光学部品の集光効率を示している。望遠鏡に入射した光は窓ガラス → LG → PMT と進み 電気信号として検出される。カメラの集光効率はこれら各部品の効率の掛け算になる。このカメラの集光効率は図に太線で示している。この集光効率に大気中で発生し大気を通り抜けて望遠鏡に飛来するチェレンコフ光のスペクトルで重みをつけて積分し最終的な集光効率を求める。チェレンコフ光のスペクトルを図 2.22 に示す。その結果、窓透過率 89.5%、LG 集光効率 84.6%、PMT 量子効率 33.8%、PMT 光電子収集効率 94.6%となり、掛けるとカメラ全体

で 24.0%となる。窓透過率は 10 年で 98.2%の劣化が見込まれており 10 年後にはカメラ全体で 23.6%程度になる見込みである。

CTA の仕様書には以下のような記述がある[2-1]

=====

CTA_-PROD_TEL-115 B-TEL-1170 Photon Detection Efficiency

The average efficiency of the focal plane detectors (i.e. conversion efficiency from photons to photoelectrons), weighted by the reference Cherenkov spectrum (see figure) in the wavelength range 300-550 nm, including dead-space and the efficiency of any focal plane optics/windows etc, must be >20 %.

=====

要求値の 20%と比べて 3.6%高い値となった。望遠鏡全体の集光効率は鏡の反射率とカメラやアームによる影領域を入れて 10%程度の減少になる。このため現在の大口径望遠鏡集光効率は 21.6%程度と見積もられる。

第2.5節 モジュールフレーム

カメラは“カメラ構造”の節で説明したフレームにより望遠鏡の先端に固定されている。このフレームに 3 cm 厚のアルミ冷却板が固定されており、このアルミ冷却板が焦点面検出器の位置の基準になる。アルミ板は数 100 μ m の精度の平面に加工されており、各 PMT モジュールが高精度で固定されるように設計されている。この PMT モジュールの構造設計・制作は甲南大が担当し、私も読み出し基板 Dragon v7 用の設計を行った。

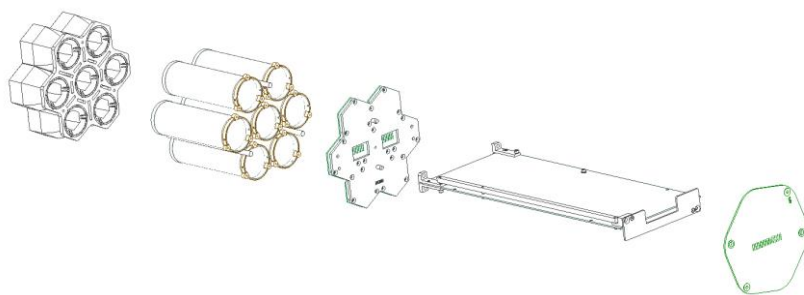


図 2.23 PMT モジュールの構成図。左から LG、PMT、SCB、読み出し基板(Dragon)、バックプレーンへと組み合わされる。

図 2.23 は PMT モジュールの構造を示している。7つのライトガイドを 5mm 厚のアルミ板に装着したものを、3 本の $\phi 6$ アルミ支柱を介して SCB 側の 3mm 厚のアルミ板に固定している。その間にアルミチューブに入れた PMT が入る。この 3mm 厚のアルミ板が前述のカメラフレーム側の冷却板に装着され位置が決まる。この 3mm 厚には図 2.24 に示すよ

うに 2 本のガイドピンが圧入されており、このガイドピンが冷却板に開けているガイド穴に入ることにより位置が正確に決まる。

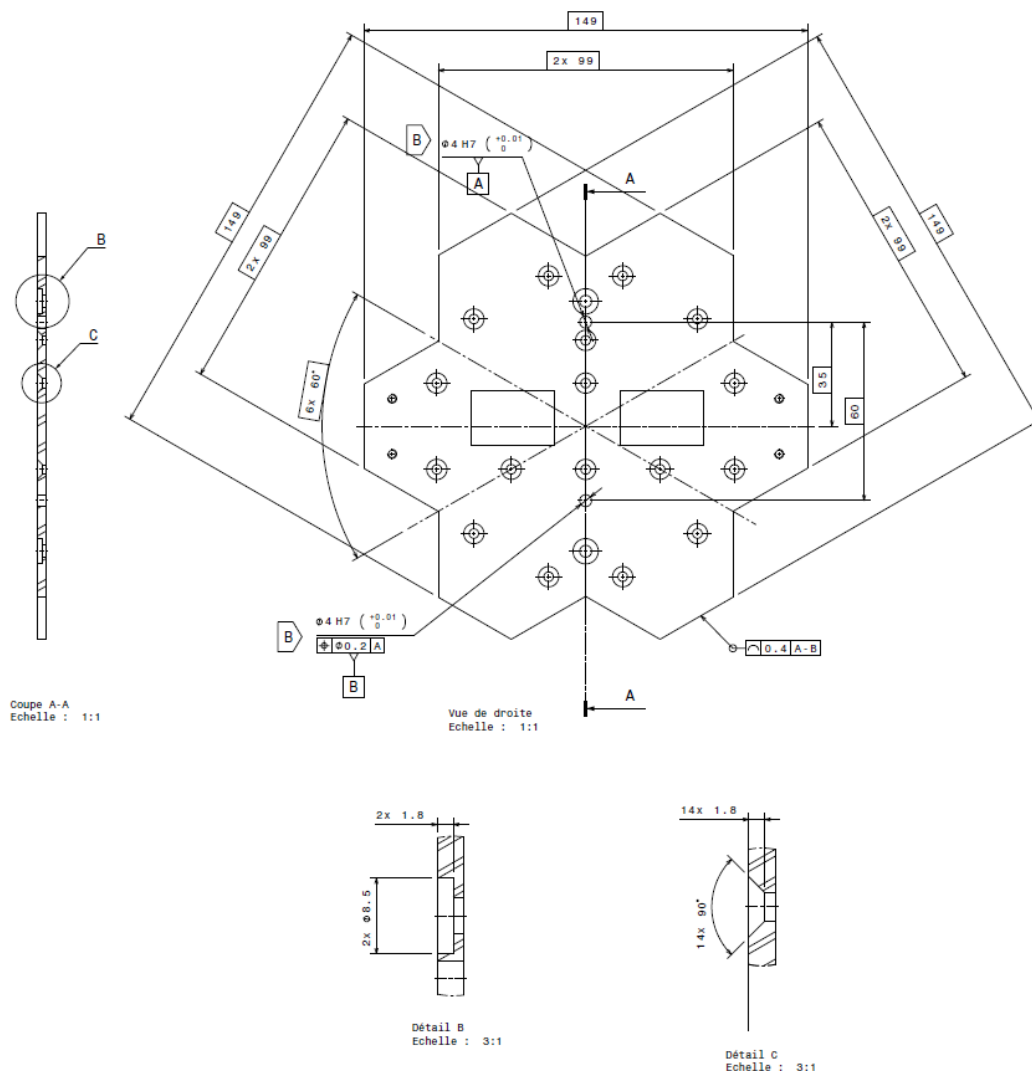


図 2.24 SCB アルミ板の図面。冷却版の設計・制作をバルセロナのチームが担当し、PMT モジュールの設計・制作を日本チームが担当している。上の図は日本との合意に基づきバルセロナのチームが制作し、アルミ板はこの図から設計を変えないように制作した。

図 2.24 は SCB アルミ板の設計を示している。これは 3mm 厚のアルミ板でありその上に SCB が装着され、さらに図 2.25 に示す PMT が 7 本装着される。PMT には前述の高圧電源回路、プレアンプ、インターフェースを対応させる基板が装着されている。この基板にはバネが取り付けられ、振動や加速に耐え常にライトガイドに正確に押し付けられる構造になっている。

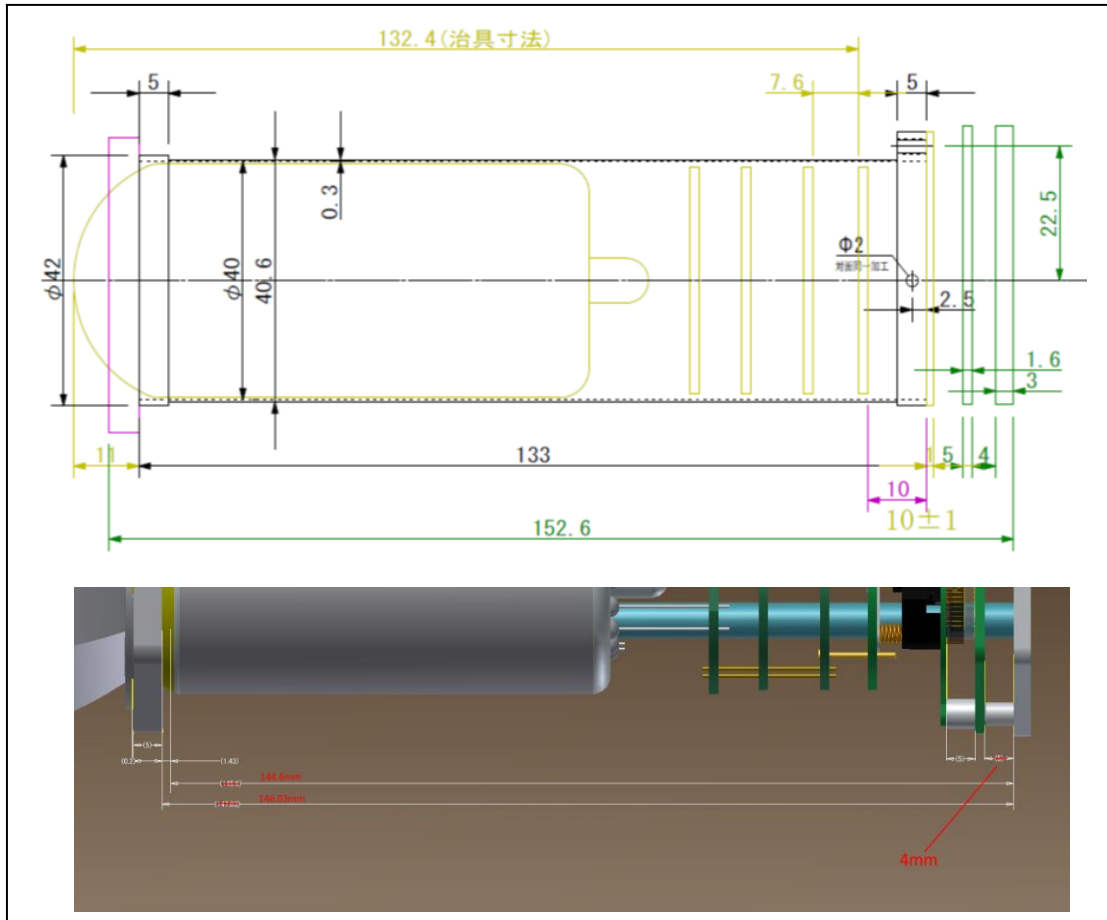


図 2.25 PMT 部の構造。左から LG, LG を載せるアルミ板、PMT, 3 枚の CW 高圧電源、1 枚のプレアンプ、インターフェースボード、SCB、SCB アルミ板の順で組み立てられ、さらにアルミパイプで囲んでいる。

図 2.26 は 3mm 厚のアルミ板の後ろの構造を示している。冷却板に固定される 3mm 厚のアルミ板にフロントエンド読み出し回路基板が取り付けられる。この基盤にはデータの読み出しサンプリングに Domino Ring Sampler Ver4 (DRS4) という ASIC が搭載されており、Dragon ボードと呼ばれている。この基盤にアルミフレームを取り付け保護している。さらにその後ろにカメラサーバーとのインターフェース、電源、ネットワークを担当する回路バックプレーンボード (BP) が置かれている。この BP は 5mm 厚アルミ板モジュールホルダーに固定されているが、衝撃や加速による回路の破損を防ぐため読み出し回路とモジュールホルダーの間には 1.75mm の隙間を開けている。

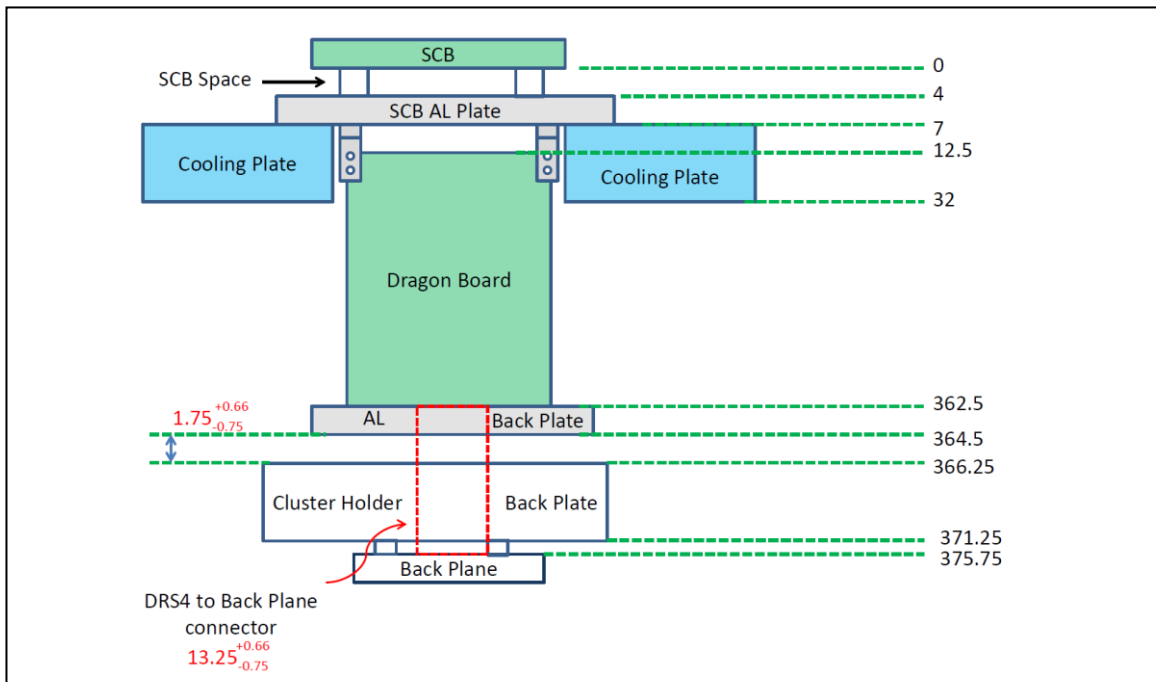


図 2.26 PMT モジュールの固定方法。

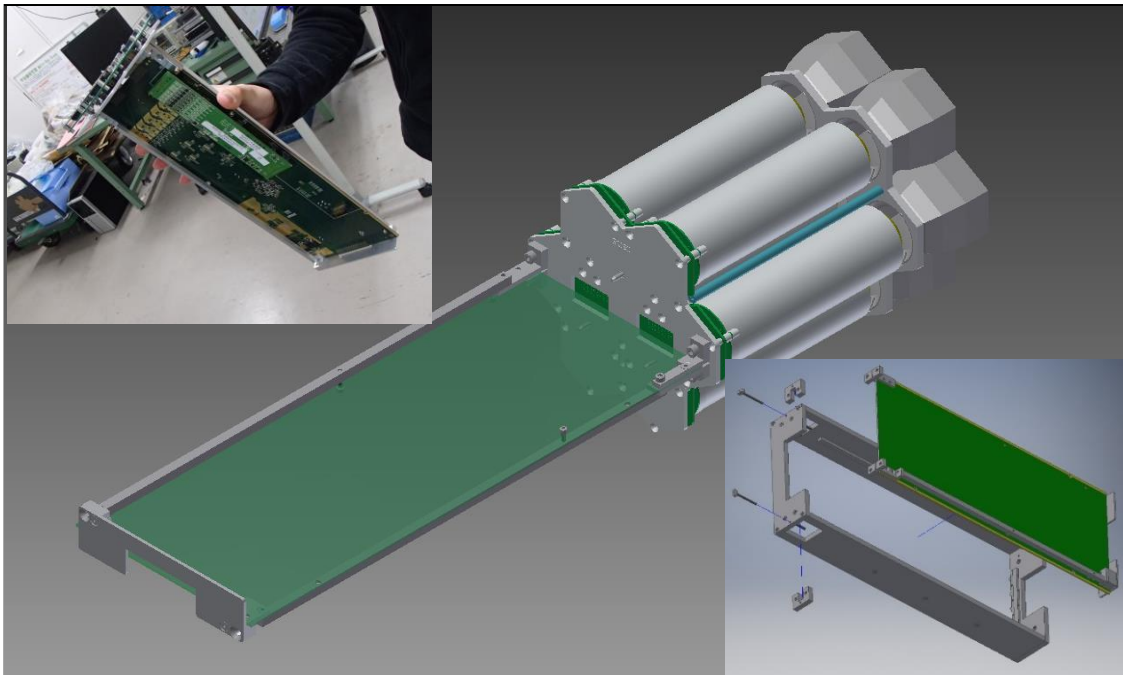


図 2.27 PMT モジュールフレームの設計と取り付け治具の構造。緑色で示されている Dragon ボードに対して両端にアルミ棒のフレームをつけている。

第2.6節 2-4 号機用読み出し回路フレームの設計・制作

読み出し基板(Dragon board)を保護しカメラに固定するためにフレームを取り付けている。このフレームの設計を図 2.26 と図 2.27 に示す。読み出し基板が初号機で用いた Dragon v5 から v7 へアップグレードされる事に伴って、モジュール全体のフレームデザインの最適化を同時に行うために Dragon の開発を担当している京都大学のグループと v7 用 (LST の 2 号機以降に搭載される予定) のフレーム設計について、以下の様に仕様を決めた。

- 初号機用のホルダーに収めても問題なく使用できるように、機械的・電氣的に互換性を持たせること。
- v5 用フレームでは基板が先に完成していたこともあり、フレーム設計の自由度が少なく部品の点数・種類が多かった。また基板上に必要な領域が確保できず導通部分をアルミ製フレームが跨ぐ構造となってしまう、その部分のフレーム部品を非導通とするためのアルマイト処理やカプトンテープによる保護など工数が増大する要因もあった。そのため v6、v7 と基板のアップグレードが行われる際にあらかじめフレーム固定のための領域を確保し、部品の共通化や、組立て時の位置決めが簡単になるように設計の変更を行って部品点数・種類の削減と組立て方法の改善を行った。

v5 用フレームを組み立てるための治具のデザイン考案や次章の Module Assembly で実際の組み立て作業等による経験をもとに、そこで得られた知見もフィードバックする形で LST2-4 号機用の v7 用フレームの設計を行った。

この設計に際して注意した点として、

1. ネジにより組付けられる部品同士の接合軸をそろえることで引っ張り方向に強い構造とすること
2. 各部品の組付け時にねじれが生じないように必ずどこか 1 面は両部品の面が連なる様にする
3. 部品の共通化を行い部品点数の削減とそれによる低コスト化や管理の簡略化を狙ったこと

である。

1.については、まず PMT-module の固定方法がカメラホルダーに差し込んでツバとなる部分の引っ掛かりと背面からのネジによる固定と決められており、フレームには常に引張方向に力がかかる方式であった。にもかかわらずその引張方向と垂直な向きにネジで固定する部位があり、いかに強く固定されていたとしても穴寸法の都合による隙間から時間とともに伸びが生じてしまう可能性が高かったことや、部品同士の当たり面が小さいために小激や強い力がかかり続けると変形していく欠点を改善する必要がある。

2.については、v5 用フレームでは部品同士が 0.5mm 単位で段差が生じているなどで精密

に対応した治具がないと組み立てが行えず、組立作業で Module を保守できるよう環境を改善した。またネジで固定するという都合上、ネジを強く締めていくと部品の接合部が捻じれてしまうリスクがある。そこで v7 用フレームには 10 点以上の部品がネジによって組み合わされているが、それぞれ接合している場所では部品どうしのどこか 1 面は必ず面が連なるようにデザインした。これによって例えば専用の治具がない状況でも作業台のような平らな面があれば捻じれなく組み立てることが可能となり、組み立てる順番を誤らなければ原理的には完成したフレームの位置関係は一意に決まることとなるため個体差を少なくすることができる。

3.については、Dragon のフレームデザインとして基板の左右端にアルミフレームが沿う形となるが、v5 用では左右部品共有の物がほぼなく、一見同じに見えても微妙に穴位置などが違うため組み立て時に万が一混ざると比較して確認するという手間があった。

そこで可能な限り左右対称としてデザインしなおすことで、左右で 10 個あるフレーム部品のうち異なるものは 1 組み合わせの 2 個のみと最低限にした。

そのほかに、Dragon 上にあるコンデンサがカメラホルダーへの差し込み時にホルダーと当たって破損してしまう事を防ぐための保護部品があるが、v5 ではフレーム設計が終わった後にこの問題が顕在化したため保護部品を直接基板上に接着剤で貼り付けるという手段をとっていた。

v7 では固定方法を簡単にして基板へのダメージも少なくするため、フレームを取り付けるネジを利用してネジ固定できるように変更した。

第3章 PMT-module 組立作業

前章でのべたように、LST の焦点面検出器は光子検出効率を向上させながら測定精度を維持するように設計されている。この設計にしたがって、1 台あたり 1855 本の PMT からなる検出器を組み立(Assembly)て、その品質を確認、管理、維持しなくてはならない。数多く作業人数が多いため、作業の効率化とマニュアル化が重要になる。本章ではこの組立を述べ、次章で品質管理(Quality Control: QC)について説明する。

LST 初号機のための Module 組立では、2016 年中までに日本国内で組み立て用治具の評価なども含めた試験的な少数の試験的組立が行われた。ここで組み立てられた Module を振動試験にかけて強度の評価を行い、試験用のミニスケールカメラホルダに搭載して各種機能の動作確認を行い問題なく動作することを確認した。その後 2017 年に LST 建設サイトがあるスペイン領カナリア諸島内のテネリフェ島にある研究機関 IAC の作業エリアを借りて、現地で約 9 カ月かけて Module 組立と次章の Module-QC を行った。ここで組み立てた PMT Module はその後 LST 建設サイトの麓にある倉庫でカメラ筐体へのインストールが完了し、2018 年より LST1 号機に搭載されて各機能の調整をはじめとした運用が開始されている。その後、LST2-4 号機のための Module 組立についてはこの初号機用組立作業で得られた知見をもとに作業の流れをより効率化した。また PMT module を構成する部品の品質についても、第 2 章で説明したように、業者への発注時の製造方法や品質のすり合わせ・品質の改善なども LST2-4 に向けて行うことができた。例えば、PMT の外周に取り付けられるアルミチューブは約 2000 本の購入に対して 600 本以上が外縁部を中心にバリがひどく、現地で Assembly 前に追加加工を行ったためスケジュールを圧迫してしまった事例などがあり、2 号機以降での改善を行った。

第3.1節 LST1 号機用 Module 組立

2013 年中までに PMT を光センサーとしてその電源や制御機構、信号取得と伝達などの機能を備えた PMT7 本単位で管理できる装置(第 2 章にあるもの、以下 PMT-module)のおおまかな設計がまとまった。その構造設計やフレームの制作については甲南大学が担当であり、最終的には LST のカメラに搭載するためにそれを同じ品質で 300 台組み立てる事が決まった。これについて自身や参加する他の研究者・大学院生や職員の手で制作する事となったため、誰が組立てても品質を一定にするための治具や資料作成、工具の選定が必要となった。この一連の組み立て作業を”Module Assembly”と称して行ってきた。

2017 年の 1 月より実際に LST 初号機が建設されるラ・パルマ島の隣にあるテネリフェ島で IAC(Instituto de Astrofísica de Canarias、カナリア天体物理研究所)の作業エリアを利用して、LST1 号機用の Module 組立が行われた。これには第 4 章で述べる Module QC も連携して行われるようスケジュールを組み、どちらも流れを理解している上で主に

Module 組立を行う人員と Module QC を行う人員を常に配置して円滑な作業が行えるようなシフト及びスケジュールに沿って進められ、2018年9月に予定数の組立作業とQCがすべて完了した。



図 3.1 組み立て中の PMT module と、組み立てや Module QC を行っているエリア

第3.2節 振動試験

時系列は 3.1.1 と前後するが、国内で組み立てた PMT module の 1 台を用いて JIS で定める輸送時のプロファイルによる振動試験を行い、試験前後での機械的な変化や取得信号の変化に差が生じないかを検証した。試験は日立物流テクニカルセンタ(千葉県松戸市)で 2015 年 9 月 7 日に行った。条件はトラック 2000 km の陸路輸送の加速試験に相当する JIS Z2022:2013 を参考とし、ランダム試験を実施した。振動数は最大 200Hz、加速レベルは最大 $0.012 \text{ G}^2/\text{Hz}$ とし、加振加速 $0.59 \text{ G}_{\text{rms}}$ の上限運動を 60 分ずつ、縦、横、奥行き方向に行っている。試験により PMT モジュールの構造にいくつかマイナーな問題が見つかり、設計の変更を行っている。また同じ場所で恒温槽を使い分割鏡の温度加速試験も行っている。費用は数 100 万円である。



図 3.2 振動試験装置にミニスケールのカメラフレームを固定して、そこに PMT module を 1 台搭載して試験した。

第3.3節 PMT module と、組立作業の変更点

最後に PMT モジュールとその組立作業について変更・改善された事項をまとめておく。

- 搭載される PMT のダイノード段数を 8 段から 7 段へ変更
→比較的低ゲインでもパルス幅を短くでき、寿命の改善を見込める
- 読み出し回路に、時刻校正のためのサイン波生成回路を追加
- 供給電圧および温湿度のモニタリング機能を追加
- モジュール間でのトリガー信号の時刻ばらつきを抑えるため、信号経路にバイパスラインを追加
- PMT があらかじめ現地に直接納品されていたため、LST1 では別作業として事前に行っていた PMT のシリアル登録を現地での組立作業へ組み込み
- Dragon 基板のフレームと SCB のプレートについては国内で事前に取り付け作業を行ったうえで発送するよう変更
- モジュールフレームの設計変更による治具と手順の変更と読み出し基板上のバイパスコンデンサーなどの突起物を保護する部品の設計の変更
- LST1 号機用の基板フレームで接着剤固定をしていた箇所があったが、LST2-4 用の基板フレームではネジ固定に修正

第4章 PMT-module 品質管理 (Module QC)

これまでに LST に搭載されている焦点面検出器の開発について説明してきたが、この検出器を開発し CTA 計画に提供してきたグループとして、その品質管理と維持・メンテナンスは計画のなかで重要な役割であり義務である。ここでは主に 2019 年から行われている LST2-4 号機用の Module QC について述べるが、その前に 2018 年まで行われてきた LST 初号機用カメラの性能評価について簡単に述べる。

第4.1節 LST1 号機用 PMT 較正と Module の品質管理

LST の初号機に搭載されたカメラの開発については以降に続く LST2-4 号機のための手順確立という側面もあり、PMT Module として組み立てた後の性能評価だけでなく、受光素子となる約 2000 本の PMT について個別に性能評価の試験を行った。これらの結果は MySQL を使いデータベース化した。

第4.2節 PMT 較正作業

PMT について個別に性能評価を行った試験を我々は“PMT calibration campaign”と称して組織的に行った。2000 本の PMT の較正を 1 本あたり 1 時間かけたとすると 2000 時間が必要になり、1 日 8 時間作業しても 250 日かかることになる。できるだけ短時間で効率的に必要なデータを収集することを目指し、2013 年より CTA-LST の国内カメラグループに所属している修士学生を中心に立ち上げて 2016 年ごろまで試験を行ってきた。この試験は Module として組み込む前に性能の個体差を把握することで、カメラへの配置などの最適化のためには不可欠である。さらに、Module として後段の読み出し基板上にあるメインアンプやサンプリング用の回路を通した後でも同様の結果が正しく得られているかを検証する必要もあった。また各 PMT は製造元である浜松ホトニクスからデータシートが発行されるが、我々の用意したパルス光源[4-1]による性能評価試験のセットアップで得られた結果と照らし合わせて再現性の確認を行う必要もあった。

またこの試験データの保存のために SQL サーバーを立ち上げ、測定の自動化と結果の共有や確認が円滑に行える環境の整備も並行して行った。

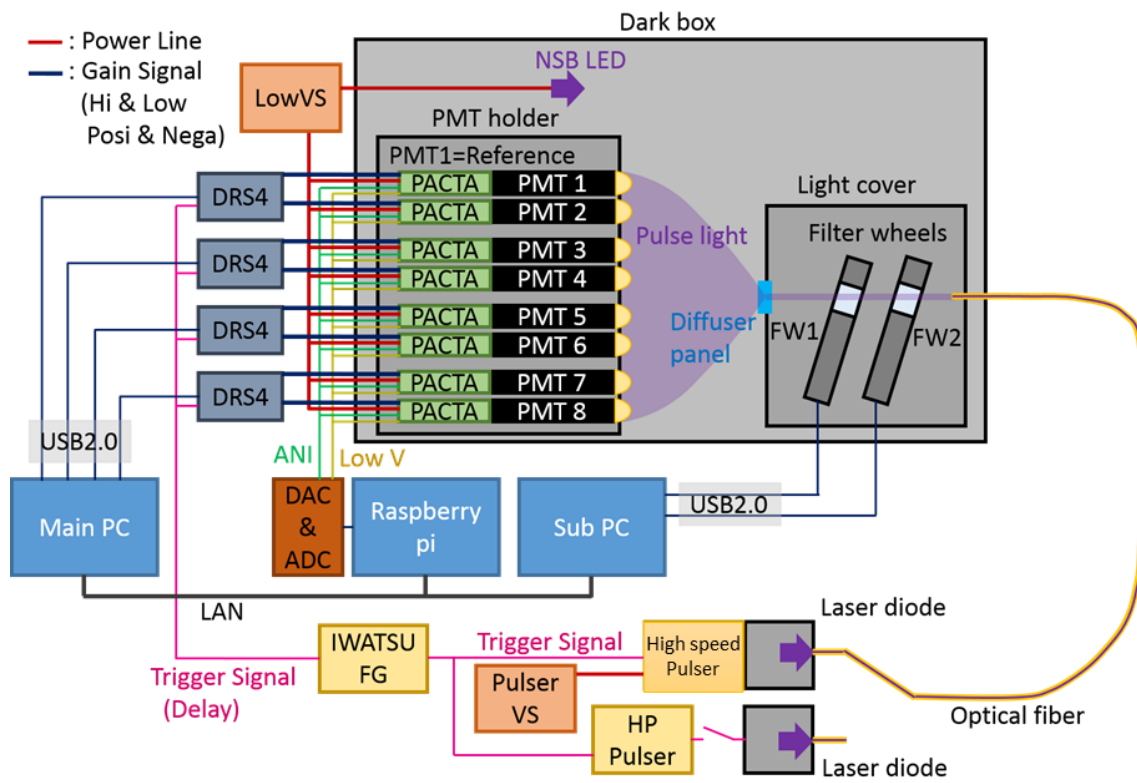


図 4.1 PMT 校正装置の測定セットアップ模式図

この PMT 校正作業（通称“PMT calibration campaign”）の測定セットアップ(図 4.1)として 4 本及び 8 本の PMT が入るホルダーを設けた暗箱を用意して、それらに光が当たるように 1 台の光源を設置する。この光源からは発光時間幅 1ns 程度のパルス光を出力し、その光は遠隔操作可能な減光フィルターを通し光強度を制御したうえで PMT に向けて拡散板を経て照射する。[4-2]

このセットアップで行われる測定の流れは以下の通りである。

1. PMT の印加電圧(HV)値に対するゲインの相関 (Gain vs. HV)
2. 1 光電子照射時の出力波形 (Single Phe response)
3. PMT の印加電圧(HV)値に対する出力波形のパルス幅 (Pulse width vs. HV)
4. PMT による疑似的なパルス発生率 (Afterpulse rate)

1.の測定では光強度一定で PMT 側の印加電圧を変化させて測定した Gain vs. HV のプロットからカメラ運用時の基準 Gain である $\text{Gain}=4.0 \times 10^4$ 時の印加電圧値を導出する。

2.の測定では各 PMT を $\text{Gain}=4.0 \times 10^4$ となる電圧を印加した状態で光強度の平均値を single Phe レベルとした光源からパルス光源を照射し、PMT の single Phe 波形を測定する。

3.の測定では、照射する光パルスの平均強度を 0.03p.e.レベルから 3000p.e.レベルまで変化させ信号変化量の直線性を測定した。

4.の測定では発光強度がより高いパルス源に変更して PMT に強い光を照射し、メインパルス以降に現れる AfterPulse レートの測定を行う。

以上でひとつの測定行程が完了する。

この測定行程について 1 回で最大 8 本の PMT を測定することができるが、測定ごとの変動などをモニタするために、較正作業全体を通して交換せず取り付けられたままの PMT が 2 本あるため、実際には 1 行程で 6 本の PMT を測定している。

ここで測定した結果から、PMT における光電面への入力光子数に対する PMT からの出力電荷量の比 (F-factor と呼ぶ) を算出した。このデータはゲインの較正や経年劣化の基準値として用いている。

製造元の浜松ホトニクスから提供された各 PMT のデータシートと照らし合わせて再現性の評価を行い、おおむね 10%未満の誤差に納まっていることが分かった。この差の理由として使用している光の種類にあると考えられる。浜松ホトニクスは連続光で試験を行っており、我々の測定ではより LST で運用される現実の環境に近いパルス光で試験を行ったためである。またこの差が全ての PMT で一様ではなく個体ごとのばらつきについては PMT の性能個体差が連続光とパルス光で異なるととらえることができる。

そのため我々はこの PMT を搭載したカメラで観測したい事象となるパルス光を基準として、我々が行ったパルス光による校正作業の結果をこれ以降の基準値として用いることとした。

4.2.1 動作試験結果

セットアップを使用して正常に動作したかどうかの判定などを行った結果は以下の通り

- ・試験対象 PMT 数：2015 本
 - ・破損あり：7 本
 - ・動作不良：3 本
 - ・自己発光¹：7 本

4.2.2 運用増幅率での印加電圧結果

LST で運用される際の PMT の増幅率(Gain) は 4.0×10^4 が標準として想定されているため、その Gain になる印加電圧を較正作業の結果から導出した。この印加電圧の結果(図 4.2)は以下の通りとなった。

- ・印加電圧の平均±標準偏差：1061V ±29V
- ・3 本の PMT を除き 980-1157V に分布
- ・リファレンス PMT の繰り返し測定による誤差は約 4V

¹ 光を照射していない状態でも信号を出してしまう PMT、カメラには使用しない

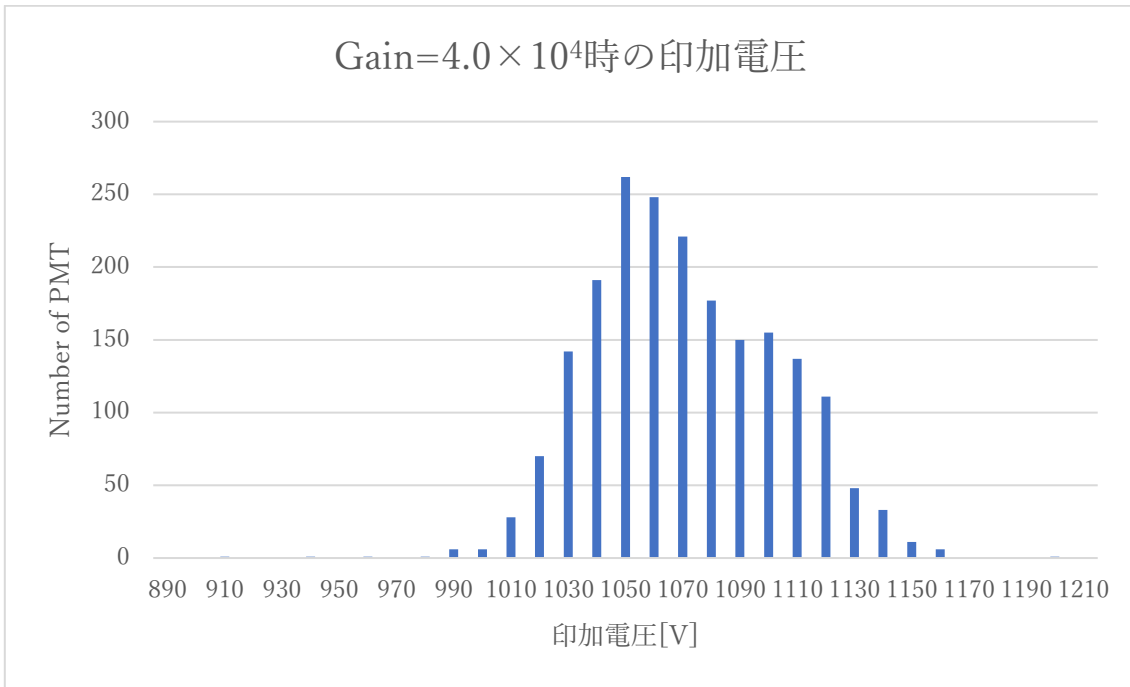


図 4.2 Gain=4.0×10⁴時の印加電圧の分布

4.2.3 F-factor

測定結果から得られた F-factor 分布を図 4.3 に示す。

- F^2 平均値 : 1.22
- F^2 標準偏差 : 0.02
- 繰り返し測定による誤差は 1% で、仮に誤差 $\Delta F^2=0.04$ とすると、電荷量決定精度は

$$\Delta Q/Q = ((\Delta F^2 / F^2)^2 + F^2 / Q)^{1/2} = 78\% @ 2p.e.$$

$$4.8\% @ 1000p.e.$$

→望遠鏡の要求値である < 100% @ 2p.e. と < 10% @ 1000p.e. をどちらも満たしている。

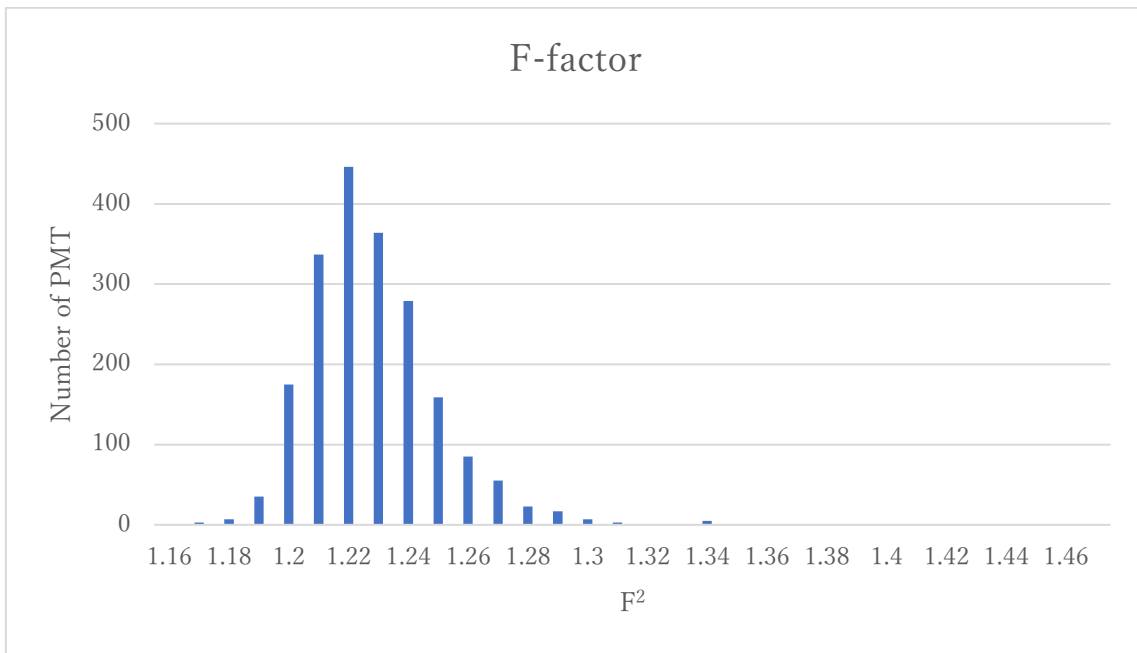


図 4.3 F-Factor 分布

4.2.4 パルス幅

測定結果から得られた信号のパルス幅の分布を図 4.4 に示す。

- ・ FWHM 平均値：2.72ns
- ・ 望遠鏡の要求値である 2.5 – 3ns を満たしている PMT の数は 93%
- ・ 繰り返し測定による測定誤差は約 0.03ns

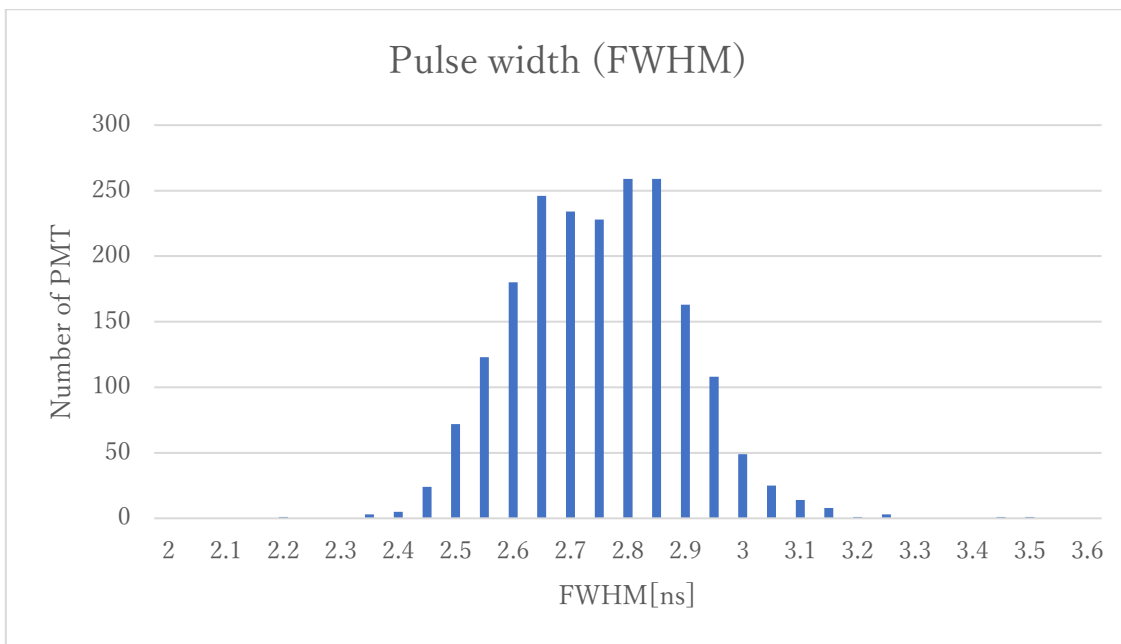


図 4.4 PMT から出力される信号のパルス幅の分布

4.2.5 AfterPulse 発生確率

- ・測定に時間を要するため、ランダムで約 10%の本数だけを測定した。[4-3]
(浜松ホトニクスから得られているデータシートにも発生確率は含まれているため、未測定 PMT については本測定での実測値とデータシートの値から補正を行った)
- ・平均発生確率 : 0.003%/p.e.
- ・統計誤差 : 0.0008%/p.e.

望遠鏡の要求値である<0.02%を 99.8%の PMT が満たしており、要求値より十分低い発生率に抑えられていることが確認できた。[4-4]

第4.3節 PMT Module QC

PMT Calibration campaign でパルス光源を用いた性能評価を経たあと、モジュールとして組み立てた後も PMT の再現性を維持しているか、データ取得が問題なく行えるかを継続して評価試験した。ここで PMT 単体の測定については PMT calibration campaign として日本国内で行い、モジュールの性能評価は Module QC として、日本国内で試験的にセットアップ(図 4.5)を構築して測定手順や改善点などを洗い出した後、その測定系やモジュールを構成する部品を全て LST 建設予定地の隣島であるカナリア諸島テネリフェ島の IAC に輸送して、IAC でモジュールの組み立てや性能評価試験を行った。また全モジュールの性能評価完了後はスペイン・バルセロナで LST 初号機用カメラ筐体を用いたハードウェア試験が行われ、その後建設予定地であるラ・パルマ島のふもとで全モジュールのインストールと動作試験を経て建設予定地へ輸送、LST 初号機に搭載されるという流れをたどった。

4.3.1 Module QC Setup

LST2-4 用のカメラに対する要求値から、それを満たすカメラの細分化された要求性能値が設定されており、その要求性能値が満たされていることを確認するために以下の測定項目が決められ、そのための暗箱や光源といった測定系のセットアップ開発を私が担当して制作した。

要求値

- ・ノイズレベル：18ADC カウント (0.2 光電子相当)
- ・PMT 運用電圧：Gain=4.0×10⁴時に全体の差が 100V 以下
- ・S/N 比：4 以上
- ・パルス時間幅：平均 3ns 以下
- ・アフターパルス発生率：0.02%以下

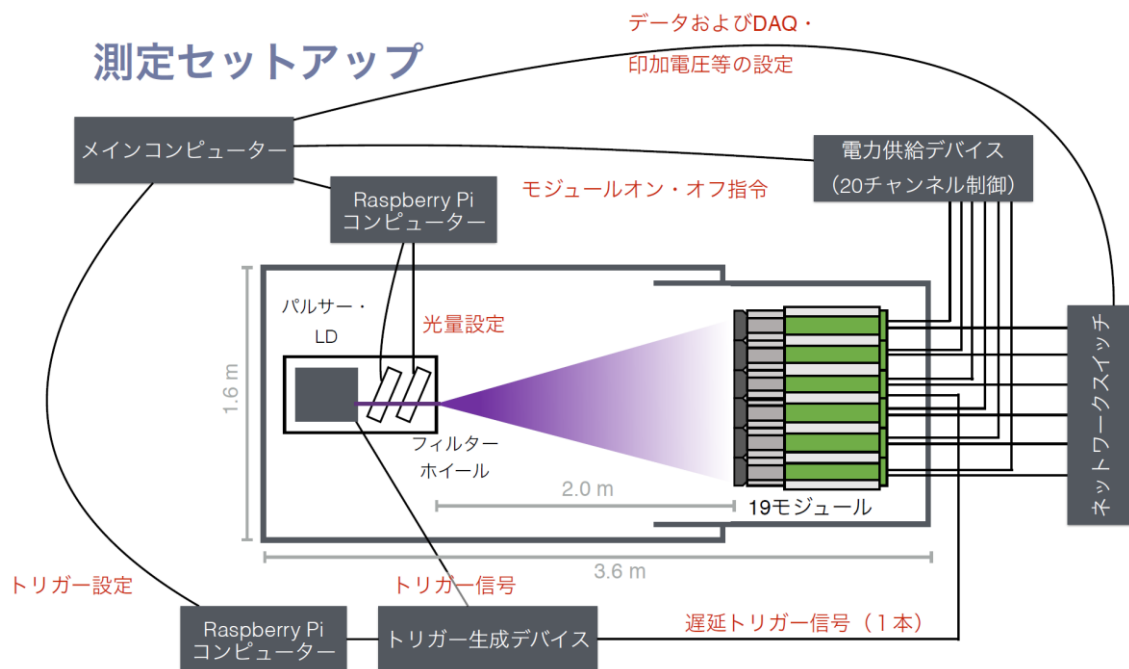


図 4.5 LST2-4 用の Module-QC セットアップ図。LST1 用もほぼ同様。

LST1 と LST2-4 用での主な変更点は、光源からの光路が光源→反射鏡→モジュールへと間接照射としたこと。光源→モジュールへの直接照射としたこと。

また QC データをデータベース管理するために甲南大学 SQL サーバーを立ち上げた。クライアントソフトを持たない共同研究者も閲覧できるように php で web 閲覧サービスを用意した。

4.3.2 読み出し基板単体の試験

PMT からの信号を処理してデータとして後段のコンピュータに伝達させる読み出し基板の試験に当たっては PMT は使用せず電氣的に回路を切り離し、あらかじめセルフテスト用に Module 内に搭載しているテストパルス機能を使用した。

以下の項目について測定評価を行った。[4-5]

- ・ PMT-Module を構成する各基板との通信
- ・ 信号サンプリングに用いる回路(DRS4)の個体ごとのばらつき、オフセット値の取得
- ・ ノイズレベル
- ・ 信号サンプリング時のタイミングのズレ(Timing Jitter)
- ・ 信号の直線性
- ・ 信号のパルス幅
- ・ チャンネル間のクロストーク
- ・ 内蔵した温湿度計、正弦波生成回路

4.3.3 PMT-Module 全体の試験

PMT-Module としてセンサーから測定回路、筐体まで組み立てたカメラ装置について、以下の項目について測定評価を行った。

- ・ Single Phe 測定
- ・ Multi Phe 測定
- ・ PMT の印加電圧(HV)値に対するゲインの相関 (Gain vs. HV)
- ・ 信号の直線性
- ・ 信号のパルス幅
- ・ AfterPulse 測定

これらの測定結果から、以下の Module QC 結果を得ることができた。[4-5]
読み出し基板の測定結果

- ・ PMT オフ状態での単体試験でノイズレベル、平均 15.9 ± 2.3 ADC カウント

PMT module 単位での測定結果

- ・ Gain= 4.0×10^4 時の PMT 印加電圧の平均±標準偏差： $1136V \pm 33V$
- ・ 1phe 以下の微弱光量を照射た際の S/N 比 5.6 ± 0.6

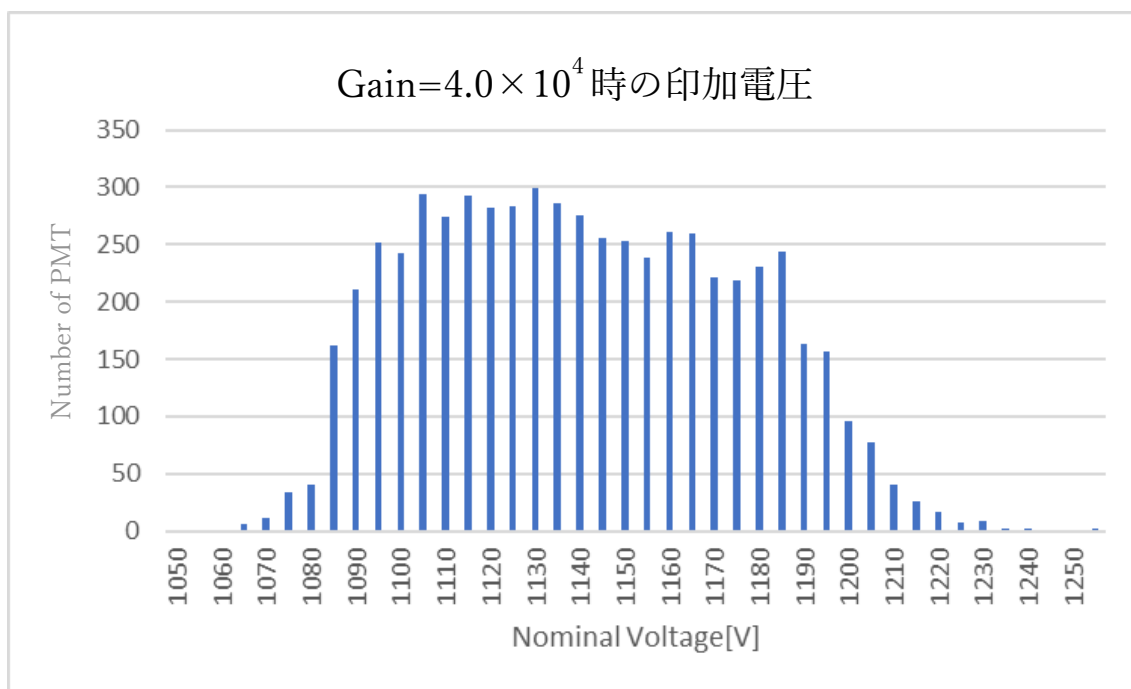


図 4.6 LST2-4 の PMT 運用電圧の分布

LST1 と LST2-4 では PMT のダイノード段数を変更されており、Gain= 4.0×10^4 時の PMT 印加電圧分布(図 4.6)の平均値が 1066V から 1136V に上がっている。

LST2-4 の PMT では印加電圧は 1060V から 1240V に分布しているが後段の遅延回路が

持つトリガー時間の調整可能幅に収まっているため、タイミングを揃えられる。

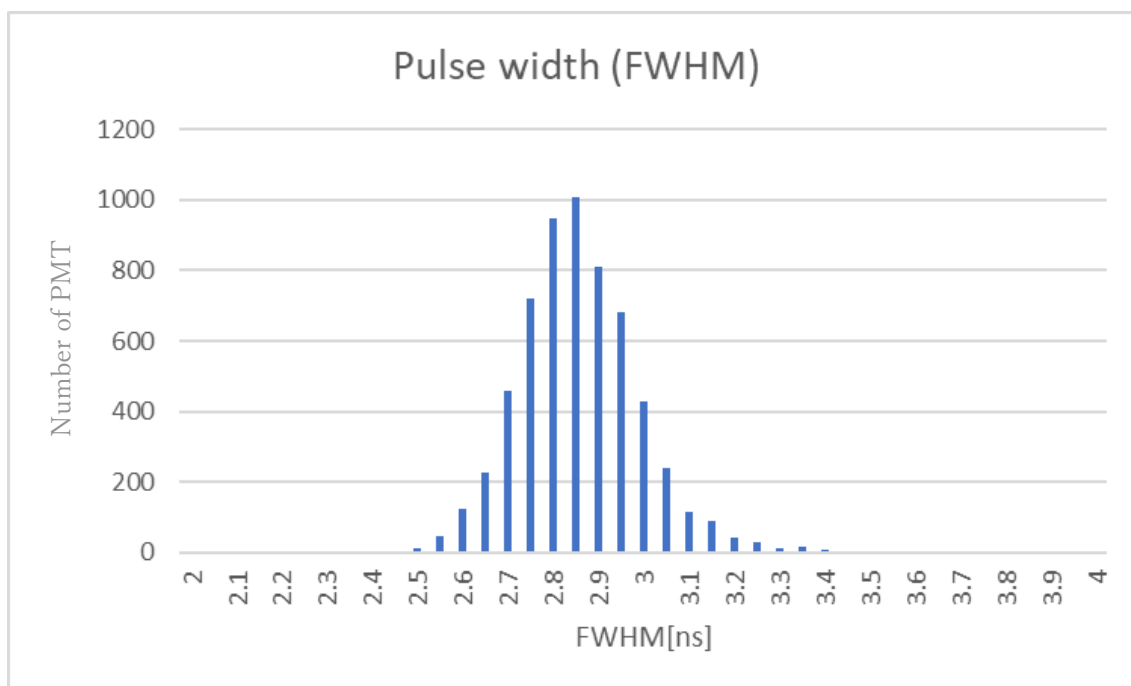


図 4.7 LST2-4 の PMT から出力される信号幅の分布

信号のパルス幅(Pulse width)は、LST で想定される約 300MHz で 1Phe が入射する夜光バックグラウンドの影響を抑えるために重要となる。

約 80ps のパルス光を照射して測定した多数のイベント(図 4.7)を平均した波形をガウス関数でフィットし、標準偏差を FWHM に変換した結果、

- ・平均±標準偏差：2.8ns ±0.2ns、
- ・分布：2.4ns から 3.4ns 平均 3ns 以下

という要求を満たしている。

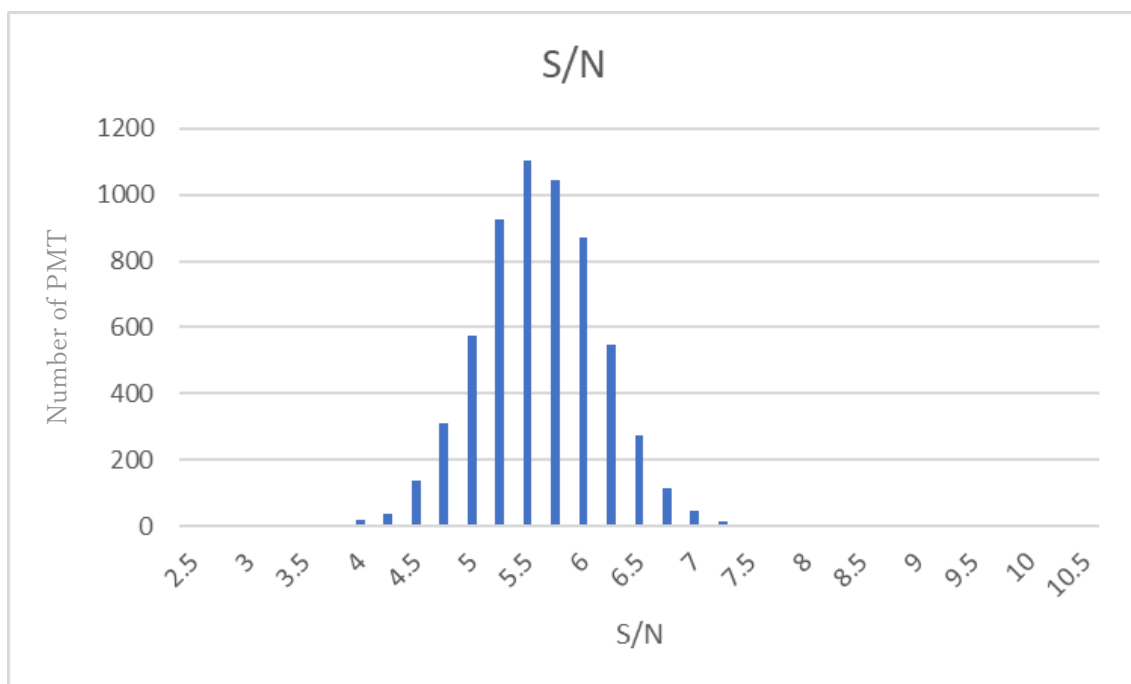


図 4.8 LST2-4 の S/N 比

光量が 1Phe/パルス以下の微弱なパルス光を照射して 1Phe に対するシグナル/ノイズ (S/N)比を測定した結果(図 4.8)、

- ・ S/N 測定結果の平均±標準偏差：5.6 ±0.6

と、概ね要求値の S/N>4 を満たしている。

第4.4節 Module QC 結果の活用

前述の PMT 較正作業と PMT Module QC により、LST に搭載するカメラとしての要求性能を満たしているか判定するための詳細な測定を行った。これにより個別の PMT や PMT module に対する詳細なデータが得られたため、今後 LST として運用が開始された後に定期的に行われる較正の結果から性能劣化の程度を見積もることや、感度向上への活用も可能となった。具体的には PMT 運用電圧時の出力信号幅が得られたため、LST のカメラとして運用されている場合にこの出力信号幅の差とカメラ領域中での位置の関係が影響を及ぼすのかシミュレーションによる検証が LST1 用の較正結果を用いて行われた[4-6]。このシミュレーション結果では、各ピクセルでの PMT の出力信号幅については、カメラ領域の中央部分に信号幅の狭いもの・外周部に幅の広いものを配置した際と、ランダム配置で検証した場合ではランダム配置のほうがガンマ線イベントに対するトリガー数が 1%ほど向上することが分かった[4-6, p.38]。

PMT からの出力信号幅は印加電圧に相関を持つため、カメラとして運用する際の PMT の運用電圧分布はランダムである方が好ましいという結果が得られた。

しかしながら PMT の QE については、カメラ領域の中央部分に QE の高いもの、外周部に QE の低いものを配置した時のほうがランダム配置よりも 8%程度ガンマ線イベントのトリガー数が増加している結果[4-6, p.37]となり、QE については領域を指定して並べて配置、運用電圧についてはランダム配置となるよう管理することとなった。

ここで一つ気がかりとなったのが隣接する PMT 同士の運用電圧差である。運用電圧は 100V 以上のばらつきが発生することもあり、信号の遅延や幅にも 100ps 単位で影響が発生するだけでなく、電位差によるスパークの可能性も考慮しなければならない。

そこで隣接する PMT はどこをとっても運用電圧差が 100V を超えないようにという努力義務を決定した。そのために運用電圧のリストから差が 100V 以内に収まっている PMT 群と 100V を超えている PMT 群をリストアップした。PMT module の組み立てで 7 本の PMT を取り付ける際に、図 4.9 のように見た場合、中央 (1 番) の PMT は 100V を超えている PMT 群から、その周囲 (2-7 番) の PMT は 100V に収まっている PMT 群からそれぞれ取り付けることとした。

これにより、PMT module 単位でカメラ内での移動や取り換えが発生しても、隣接する PMT 間では運用電圧差が 100V を超えないようにすることができた。

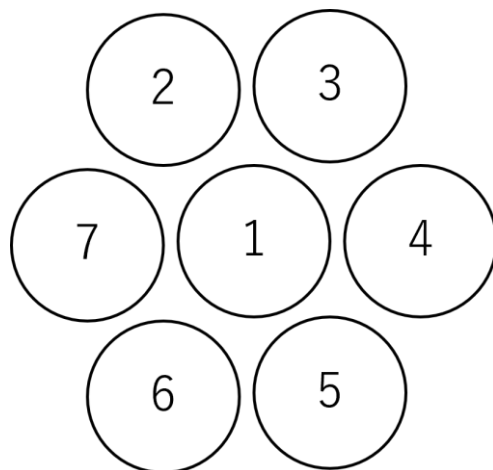


図 4.9 PMT module での PMT 配置図、1 番は運用電圧が全体の分布から 100V を超えて高いものか低いもの、外周の 2-7 番は 100V を超えないものからそれぞれ取り付ける。

第5章 光源

本章では、私が開発してきたパルス光源について、開発経緯やその要求性能、性能を実現するための設計について述べる。また完成後の他の用途への応用についても紹介する。

第5.1節 校正用光源について

Module の開発にあたり QC のために性能を調整した光源が必要であったため、私は光検出器の性能評価に利用できるパルスレーザー光源の開発[5-1]を行った。以下に、開発した光源の概要[5-2]を示し、これを基にして本 Module QC のために作成した光源の変更点と性能を示す。また本 Module QC のための光源装置として、USB 接続で遠隔操作可能な減光フィルターと拡散板を取り付けた照射口を備える筐体を製作した。これにパルスレーザーを組み込んで運用が容易となるようにし、減光フィルターの組み合わせにより 5 桁の範囲で光の強度の調整が可能である。

第5.2節 Pico second pulse laser

ここでは、これまで私が開発してきた光検出器の校正に利用できるパルスレーザー光源について説明する。この光源は半値全幅(FWHM)でパルス幅 70ps のパルスレーザーを出力可能であり、光源となる半導体レーザー(Laser Diode:LD)とそれを駆動させるための制御回路により構成されている。これは LD が印加された電気パルスの 1/10 のパルス幅のレーザービームを発生させるという特性を利用しており、このための制御回路は単純な波形整形回路を基本的な構成として一般的に流通している電子部品を用いることで、価格を大幅に下げることができる。また装置自体も数立方センチメートル程度と小型にすることができ、光源波長や発光強度などにもよるが、概ね 10 万円以下で制作できる。

また発光時間幅は回路の抵抗及びキャパシタによる時定数で変更が可能であり、発光波長は光源となる LD を適切に選択すればよいので、光源製造時の発光時間幅や発光波長の設定が容易であるという利点がある。

5.2.1 パルスレーザーの原理

LD に電流を流すと電荷キャリア（電子と正孔）が PIN 構造の P 領域と N 領域に送り込まれ、その電荷キャリアの再結合もしくは消滅により引き起こされる自然放出によって、i 領域で光子が生成される。

電流を増やすとキャリア密度 n が増加するため、光子密度 S は自然放出により徐々に増加してゆく。光子は誘導放出を刺激して、追加の光子を生成してキャリアを消費する。

ここで LD の S と n の関係は以下の方程式で表される。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{J}{ed} - \frac{n}{\tau_c} - g \cdot n \cdot S \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = C \frac{n}{\tau_c} - \frac{S}{\tau_p} + g \cdot n \cdot S \quad , \quad (2)$$

ここで J は適用される電流密度を表し、 e は電気素量、 d は有効領域の厚さ、 τ_c はキャリアの寿命を表す。同様に τ_p は光子寿命、 C は自然放出係数、 g は誘導放出の光利得を表す。両方程式の右辺第 3 項は誘導放出の効率を表している。 τ_c はダイオードの PIN 構造に依存しており、通常は数ナノ秒となる。 τ_p はキャビティの特性によって決まり、次の方程式で表すことができる。

$$\tau_p = \frac{\eta}{c} \left\{ \alpha + \frac{1}{L} l \mu \frac{1}{R} \right\}^{-1} \quad , \quad (3)$$

μ は有効領域の屈折率を、 α は光子崩壊係数、 l はキャビティの長さ、 R はキャビティの内部反射率を表す。

{ } 内の第 2 項はキャビティの内部吸収に対応しており、約 $\frac{1}{4}$ mm の値を取る。したがって光子の寿命は数ピコ秒程度となり、キャリアの寿命よりも短くなる。

$$\tau_c \gg \tau_p$$

この特性は LD の重要な機能であり、強度変調器の高速応答を担う。

(1) と (2) に基づいて計算した J, n, S の時間変動を図 5.1 に示す。このシミュレーションでは、電流 J をステップ関数とした。

電流は空洞内に電荷キャリアを供給してキャリア密度 n を増加させる。(2) の右辺第 1 項で表されるように、キャリアは自然放出によって光子を生成する。方程式は、 S が自然放出によって n に比例して増加し (第 1 項)、空洞での吸収と散乱によって S に比例して減少する (第 2 項) ことを示している。さらに n に比例して S が増加することから、 S は誘導放出によって S の 2 乗に比例して増加する (第 3 項) ことを示している。

初期には第 2 項で示される損失が支配的であるが、 n と S が増加するにつれて最終的には誘導放出が損失を補い、光子が有効領域を満たすようになる。

このときアバランシェ現象により誘導放出が支配的となる結果、 S は指数関数的に増加して (1) 式により n は急速に減少する。このとき S は n が小さくなるため、(2) 式第 2 項により減衰時間 τ_p とともに急激に減少して鋭いレーザーパルスが発生させ、 S が減少した後に電流を流すと再び n が増加してこの過程が繰り返される。この繰り返しを緩和振動と呼ぶ。この発振の後、光子密度 S はある値に収束していく。

ここで緩和振動を利用して、最初のレーザーパルスを取り出す手法について説明する。誘導放出が始まった後に J をかけ続けると、 n が励起され続けて増加することになり、光子の放出強度が持続するため、緩和振動の最初のパルスの幅が大きくなってしまう。

したがって、最初の緩和振動によるレーザーパルスが発振された後に J をとめる事で短いレーザーパルスを作り出すことができる。またより短いレーザーパルスを得るためには、誘導放出が増加したらすぐに J を減少させる必要がある。そのため、印加する電流のパルス幅は 1ns 以下であることが望ましい。

短パルスを得るためには、パルスの積算電流密度が $n_{th} \times e$ より少し大きいことが必要で

ある。また、LD に常時印加するバイアス電流は 0 にする必要がある。

この構成で、600ps の電気パルスを印加した場合のシミュレーション結果を図 2 に示す。

図 2 に示すように電気パルスの振幅を調整することで、電気パルスのピーク後に放出される最初のレーザーパルスを取り出すことができる。この方法により、シミュレーションでは FWHM で 60ps のシングルシャープパルスを持つ光子密度 S がえられた。印加する電気パルスの強度を上げると、上述したように 2 番目のレーザーパルスが発生する。

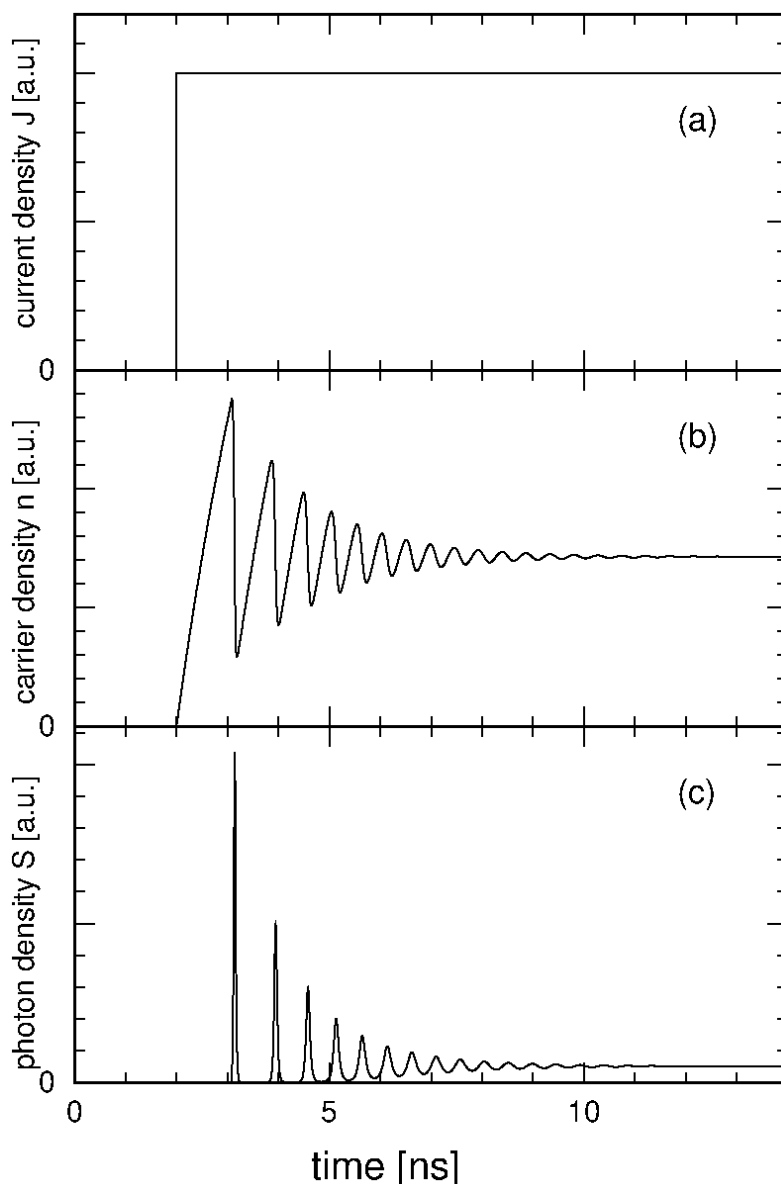


図 5.1 LD からのレーザー発振のシミュレーション。電流密度 J (a)、キャリア密度 n (b)、光子密度 S (c) を時間の関数として示している。このシミュレーションでは、電流密度 J にステップ関数を用いた電流を適用している。

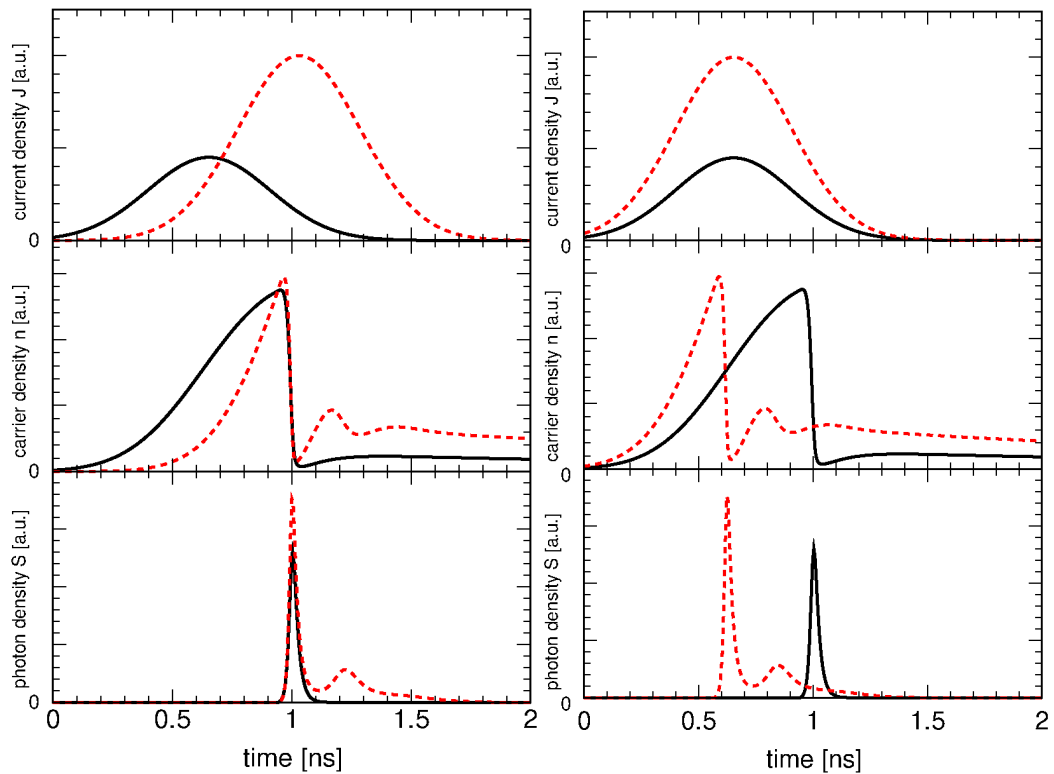


図 5.2 図 5.1 に示した LD のシミュレーション。電流密度 J に対して、FWHM が 600ps の電気パルス
を印加した。実線：電気パルスのピーク後にレーザーパルスが誘起されるようにパルス強度を調整し
た。破線：パルスの高さを 2 倍にした。その結果、1 つ目のレーザーパルスの後に 2 つ目のピークが
現れる。左図はパルス S を基準にプロットしたもの。右図は同じ結果を、電流密度 J を基準にプロッ
トしている。

パルス生成回路

開発した短パルスレーザーの設計について述べる。

設計の基本的な考え方は、先行研究[5-3]から導き出したものである。

前述のようにパルスレーザーは電気パルス発生器と LD で構成される。電気パルスの高さは整形回路で生成できて調整可能で、幅は 1ns 以下であることが必要となる。

1ns 以下の電気パルスを発生させるために、図 5.3 に示すような 2 重の差動回路を採用した。

1 つ目の差動回路は、以下の 3 つの機能を持つ。

1. トリガー信号を受信し、矩形波に変換する。
2. 矩形波を短パルスに変換する。
3. 短いパルスを 2 番目の差動回路に転送する。

外部からのトリガーパルス (5V のロジック信号) はコンパレータ (図 5.3 中 U1) に入力されてパルスを立ち上がり・立下りの鋭い矩形波に変換する。この矩形波の立ち上がり時間は最終的に出力される電気パルスの幅に直接影響するため、短くする必要がある。また、矩形波のパルスの高さは、後続のトランジスタを駆動するのに十分な大きさが必要で

ある。

そこで U1 には数ナノ秒以内のスイッチングが可能なコンパレータを使用した。

矩形波は図 5.3 Q1 の NPN トランジスタのコレクタを通過して入力矩形波を反転させた後、反転した信号は C1 と R4 からなる RC で微分される。この微分回路の時定数は $51\Omega \times 10\text{pF} = 510\text{ps}$ であり、コンパレータの立ち上がり時間に比べて十分に短い。微分されたパルスは C2 を通り、Q2 の PNP トランジスタで正パルス除去して負パルスを反転させる。Q2 によって反転される正のパルスの幅は約 1ns であり、この幅は初段のコンパレータの応答時間によって制限される。この 1ns のパルスは Q3 の NPN トランジスタを入口に持つ 2 番目の差動回路に送られる。

2 番目の差動回路は、電気パルスをさらに狭めることが目的であり、C3 と R8 で構成される RC 回路の減衰定数が $10\Omega \times 10\text{pF} = 100\text{ps}$ と 1 番目の差動回路から時定数が 1/5 になっている以外は、第 1 回目の回路と同様である (図 5.3 参照)。

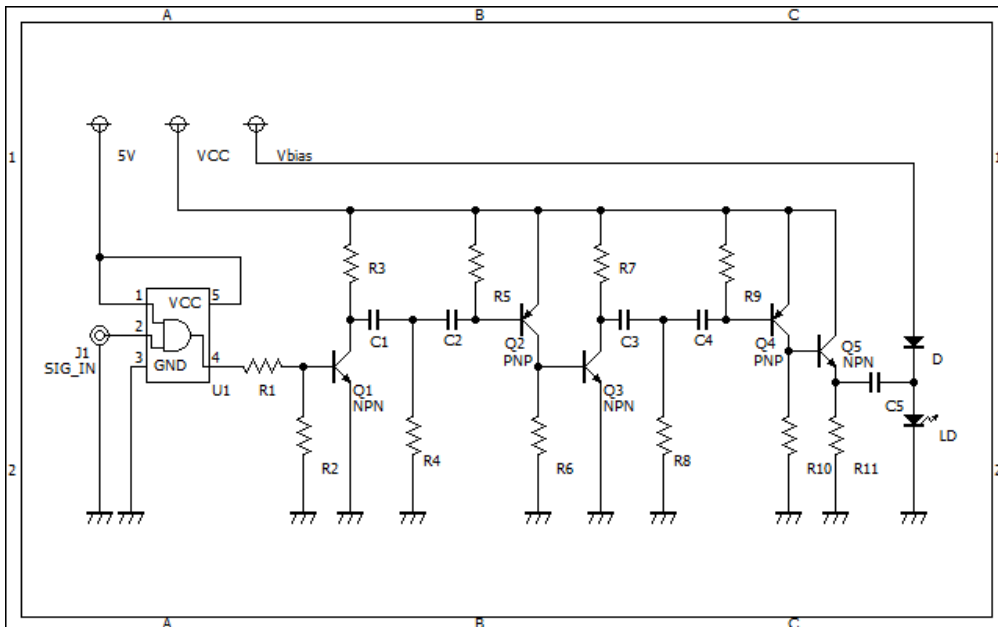


図 5.3 パルスレーザーにおける波形整形回路の模式図。外部からのトリガー信号は、"SIG_IN"と表示されたコネクタで受信する。トリガー信号は、LD に印加する短パルスに波形整形する必要がある。短い電気パルスの高さは、入力電圧 (Vcc) とバイアス電圧 (Vbias) を調整することで変化させることができるがこれはレーザー発振や光軸調整時に使用しており、基本的に光源として使用している間は Vbias を使用せず $1\text{k}\Omega$ 程度の抵抗で GND に落としている。

この 2 番目の差動回路で整形された電気パルスの半値幅は 600ps 程度となる。Q4 からの短い電気パルスは、Q5 の NPN トランジスタに送られたあとにコレクタ・エミッタ間電圧 (最大 2W) で電気パルスを増幅して LD を駆動する。この際の電気パルスの高さは電圧 Vcc を変化させることで調整することができる。

LD には NDV4212 (日亜化学工業株式会社 (Datasheet UTZ-SC0134_3)) を光源として採用した。波長 405nm、発光強度は最大で 120mW である。前述の通り LD は波長や出力

特性などの目的に応じて交換することができる。

LD によっては高速なパルス発光を行わせるためにバイアス電流が必要な場合がある。その場合は図 5.3 にある V_{bias} からバイアス電流を印加できる。

ここで実際に開発したパルスレーザーを図 5.4 に示す。電気回路は $55 \times 15 \text{mm}^2$ のプリント基板をアルミの箱に収め、熱伝導のためにシリコングリスを介し LD に接触させている。またこのボックスには SMA905/906 コネクタの光ファイバーが接続されるように設計している。



図 5.4 パルスレーザーの写真。パルス整形回路と LD は、熱伝導を考慮した小さなアルミの箱の中に入っている。アルミボックスは光ファイバーと接続できるように設計している。

LD からのレーザーパルス形状を時間分解能 2ps のストリークカメラ (HAMAMATSU, C5680) を用いて測定した。このカメラで得られたパルス形状を図 5.5 に示す。

先に説明したように V_{cc} を変化させることで電気パルスの印加電圧を調整しており、最も波形が 1 パルスだけの形状となる最適な V_{cc} は 7.1V であった。またレーザーパルスの FWHM の幅は 70ps で、パルス強度は約 10^{-12}J であった。印加する電気パルスが増加すると、レーザーパルスの強度が緩和振動をしながら増加することがわかる。

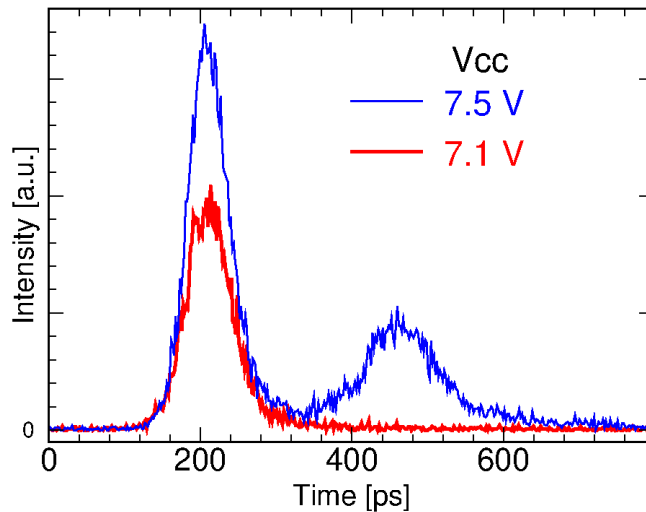


図 5.5 時間分解能 2ps のストリークカメラで測定したレーザーパルスの Light curve。印加する電気パルスの値は V_{cc} で調整でき、ここでは 2 つの V_{cc} 値に対する結果を示している。7.1V は緩和振動を起こさずに最初のパルスを取り出すために必要な最適電圧である。この V_{cc} では、FWHM で 70ps のパルス幅が達成される。より高い V_{cc} を印加すると、緩和振動を伴いながらより高い強度のパルスが放射される。

5.2.2 光検出器キャリブレーションへの応用

開発したパルスレーザーを使用して、PMT (HAMAMATSU R12992-100-20)、MPPC (HAMAMATSU S10362-33)、およびバイプラナー光電管 (HAMAMATSU R1328U) の 3 つの光検出器の電子走行時間(Transit time:T.T.)を測定した。ここで T.T.とは光子が光電面に到達してから信号パルスのピークとなるまでの時間を表す。

PMT では光電子が多段のダイノードで増倍されるため T.T.は当初の信号幅よりもはるかに長くなる (直径や構造にもよるが、R11920 と同方式の直径 52mm の PMT で 16-50ns ほど[5-4]) [5-5]。MPPC ではアバランシェ現象によって光電子が増倍されるが、このアバランシェ領域の厚さは数十マイクロメートルであるため、MPPC の T.T.は PMT の場合よりもはるかに短くなる。光電管では光電子の増幅は行われず、光電面と陽極の間隔はおよそ 2mm である。今回使用したバイプラナー光電管の T.T.は 100 ps 未満であり、これはパルスレーザーの発光時間幅程度となる。

これら 3 つの光検出器を暗箱内に入れてそれぞれの光電面をレーザーから同じ距離に配置して同一のパルス光を測定した。信号は帯域幅 2 GHz、サンプリングレート 10GHz のオシロスコープ R&S RTO1024 を使用して、プリアンプは使用せずにオフライン分析でケーブル長差を修正した。

図 5.6 はこれらの光検出器の 1000 イベントの平均信号波形を示している。最初のピークはバイプラナー光電管(Phototube)からの信号である。この応答時間はレーザーのパルス幅に等しいため、レーザーパルスの測定される幅はオシロスコープの帯域幅によって決まる。開始時間 (光子が光電面に到達する時間) は光電管からの信号の Transit time(T.T.pt)から

レーザーパルスの立ち上がり時間、およびオシロスコープの帯域幅を用いて推定される。この T.T.pt はピークの 10% から 90% までの立ち上がり時間の 1/0.8 倍であると想定される。言い換えれば、開始時間は、光電管からの信号のピーク前の T.T.pt として推定できる [5-6]。

この推定に基づいて、MPPC と PMT の通過時間はそれぞれ 2.4ns と 17.6ns と測定された。系統的な不確かさは 100ps であった。

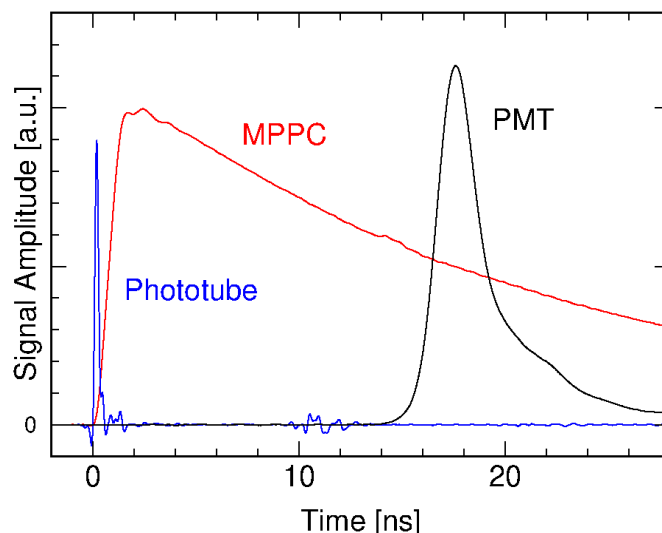


図 5.6 本研究で開発したパルスレーザーを用いて測定した光子検出器の信号波形（1000 イベントの平均波形）。最初のピーク（青線）は光電管からの信号を表す。2 番目のピーク（赤線）は MPPC から、3 番目のピーク（黒線）は PMT から発生したもので、1400V の HV がかかっている。

第5.3節 考察

このように成形回路と LD を使用して、FWHM で 600ps の電気パルスを生成するパルスレーザーを開発した。これは電気パルスが LD に印加されて LD にレーザー振動が誘導されると、印加電流によってキャリア密度が増加し、誘導放出（光子によって誘導）によってキャリア密度が減少し、光子の寿命はキャリアの寿命よりもはるかに短いために光子の強度は特定の値に収束するまで振動する（緩和振動）が印加電流をパルス状にすることでこの振動から最初の波を抽出し、短いパルスのレーザービームを生成した。緩和振動は最初の波に続くが、レーザーの発光強度は電気パルスの強度を増加させることで増加させることができる。

開発したレーザーを使用した光子デバイスの性能評価に対する利用性を実証するために、光子検出器の電子走行時間(T.T.)を測定した。一般に高エネルギー実験の主な目的は光パルスの測定であり、光検出器の時間特性の性能評価は重要となる。

複数の検出器を使用して単一の現象を測定する場合は相対的な時間応答と波形を較正する

必要があり、今回開発したパルスレーザーは価格・拡張性・安定性など以下のような結果から、このような校正の光源として使用するのに適していると言える。

- レーザーパルスの幅は FWHM で 70ps であるため、応答時間が 1ns を超えるデバイスではデルタ関数のような短時間の発光と見なすことができる。
- 本研究で開発したパルスレーザー光源はコンパクトで発光量が安定しており、低コストで使用できる。
- 拡張性があり、実験室での発光量、発光時間、パルス間隔などの変更も容易である。
- レーザーパルスの放射をトリガー信号で制御できる。

第5.4節 開発した性能評価セットアップの性能

第4章で述べた PMT-module 品質管理では、PMT 単体での測定・Module 単位での測定の両方で、本章で述べた光源装置の性能を調整したうえで基準光源として採用した。試作・開発と光源としての組み込み利用を並行して行ってきたため年代ごとにパルス幅や光強度の変化が生じているが、最終的に性能評価セットアップとして運用している光源部分の性能を以下に示す。

表 5.1 開発した評価用光源の性能

発光波長	405nm \pm 5nm
発光時間幅	70ps (FWHM)
最大発光強度	約 10^{-12} J
光強度変更幅	100% - 0.0001%(6桁調光)、0.00001%(Dark)
タイミング安定性(Jitetr)	100ps 以下

第6章 まとめ

次世代高エネルギーガンマ線観測計画 CTA の大口径望遠鏡 LST は現在スペイン領カナリア諸島ラ・パルマ島にある標高 2,200m のロケ・デ・ロス・ムチャーチョス天文台 (Observatorio del Roque de los Muchachos, ORM) で望遠鏡群の建設が進められている。本論文では LST の焦点面検出器の開発について詳述した。

LST 1 号機および LST2-4 号機用の焦点面検出器開発においてフレーム設計や性能評価測定のセットアップ考案・設計開発や組立ての手順確立・指導など主導的な役割を担い、その開発に貢献してきた。特に性能評価についてはセットアップ内に組み込む高い速度性能や安定性を兼ね備えた評価用光源を安価に開発してプロジェクトに大きく貢献するとともに、PMT だけにとどまらず今後主流となってくるとされる半導体検出器にも応用可能

なピコ秒オーダー光検出器の応答への研究開発を行ってきた。現在この光源は CTA-LST 用の評価用光源だけでなく、SiPM 測定や神岡で行われる水チェレンコフ装置実験に関連した測定でも利用されている。

そしてこれら自身の手掛けた性能評価測定によって、LST に搭載される PMT や読出し回路などの要求値の達成状況の把握や、運用状態での特性を個別に詳細に測定したデータベースの活用などで望遠鏡の維持や性能向上に活用できることを示した。

2018年10月に1台目のLSTが完成している。LSTはテスト観測・コミッショニングを続けており、図6-1のようなチェレンコフ光イメージの信号を観測している[6-1]。2019年にかに星雲からのガンマ線放射を検出し、さらに中心にあるパルサーからの100GeV領域ガンマ線放射も検出した。2020年までに10個の高エネルギー天体からのガンマ線を検出している。近傍のブレーザーBL Lacertaeが顕著なフレアを起こした時には1.5時間程度の観測で目標とする20GeVのガンマ線検出に成功している。1台での低エネルギーガンマ線の検出により4台建設すれば十分目標感度に到達できる見込みが立った[2-1]。日本グループは焦点面検出器(カメラ)、反射鏡、電源設備及び、データサーバー、ネットワークの開発を担当している。さらに、2024年に4台のLST完成し、20年間の本格観測開始を目指している。現在、観測サイトの近くにある実験室で搭載機器の性能評価が行われている。

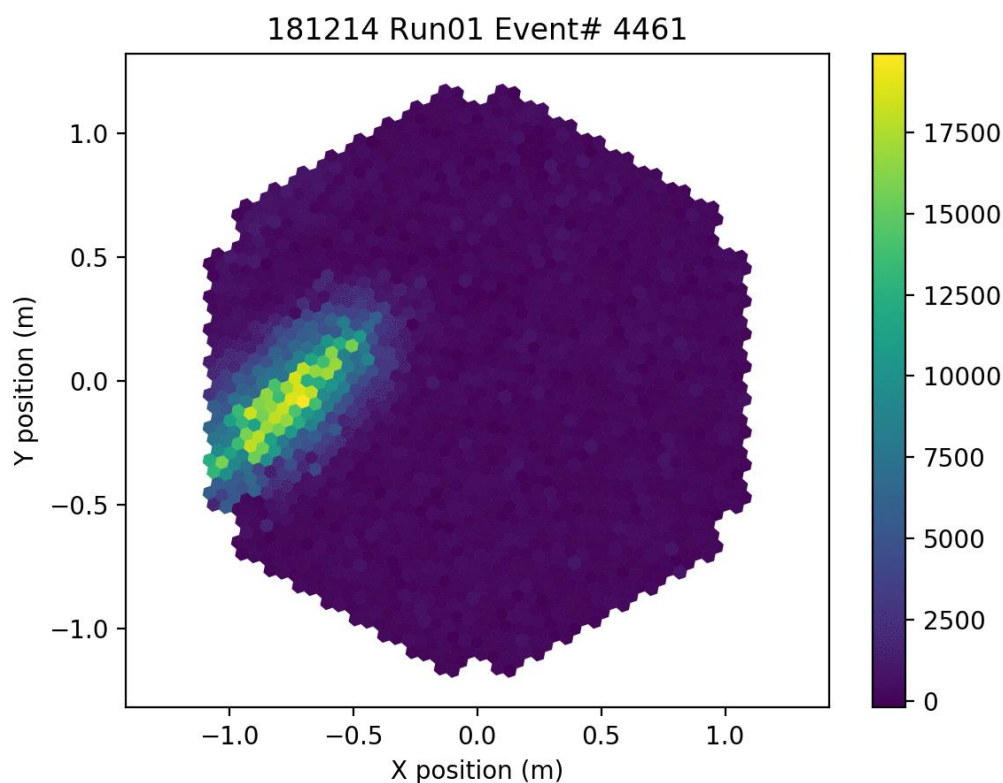


図 6-1 LST 初号機で観測される宇宙線からのチェレンコフ光信号

謝辞

本研究は甲南大学 自然科学研究科 物理学専攻 宇宙粒子研究室にて行ってきたものです。本研究を行うにあたり、多くの方にご指導ご鞭撻、またご協力を頂きました。

甲南大学 理工学部物理学科 山本常夏教授には本研究だけにとどまらず私の学生時代より指導教官として終始適切なご指導を賜りました。ここに深謝の意を表します。

同学科教授 秋宗秀俊先生並びに同学科准教授 田中孝明先生には、本論文の作成にあたり、副査として適切なご助言を賜りました。感謝申し上げます。

東京大学 宇宙線研究所 チェレンコフ宇宙ガンマ線グループ教授 手嶋政廣先生、助教 齋藤隆之先生並びに名古屋大学 宇宙地球環境研究所 基盤研究部門 宇宙線研究部 特任助教 高橋光成先生には、本研究の初期段階から多大なご指導、ご協力を賜りました。深く感謝申し上げます。

学生時代より同研究室にて多くのご指導を賜りました甲南大学 理工学部 物理学科の梶野文義先生にも感謝申し上げます。

また本研究の遂行にあたりご助言、ご指導を頂いた、甲南大学自然科学研究科 物理学専攻 宇宙粒子研究室、埼玉大学 理学部物理学科 宇宙物理実験研究室、CTA-Japan をはじめとした本研究に関わった全ての皆様に感謝いたします。

最後に、東京大学 宇宙線研究所 チェレンコフ宇宙ガンマ線グループの皆様には、本研究の遂行にあたり多大なご助言、ご指導を頂きました。ここに誠意の意を表します。

本研究にあたっては、その一部について東京大学宇宙線研究所の共同利用研究プロジェクトの援助を得ました。

Reference

- [1-1] T. Yamamoto et. al, *Astropart. Phys.*, 20 (2004) 405-412
- [1-2] T.C. Weeks, et al. *ApJ*, 342 (1989), p.379
- [1-3] Retrieved from <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/>
- [1-4] Retrieved from <https://magic.mpp.mpg.de/>
- [1-5] Retrieved from <https://veritas.sao.arizona.edu/>
- [1-6] W. Hofmann et al. , *Astropart. Phys.*122(1999), 135-143
- [1-7] CTA-Japan コンソーシアム:CTA 計画書(2014), p.93
- [2-1] Science with the Cherenkov Telescope Array, arXiv:1709.07997
- [2-2] 山本常夏, et.al, “CTA 大口径望遠鏡のカメラ開発(2)”, 日本天文学会 2013 年秋季年会
- [2-3] 猪目祐介, et.al, "CTA 大口径望遠鏡初号機用カメラの最終デザイン", 日本天文学会 2016 年秋季年会
- [2-4] 齋藤隆之, et.al, 日本天文学会 2020 年秋季年会
- [2-5] A. Sauny, D. Gascon, et.al, “Wideband (500-MHz) 16-bit dynamic range current mode preamplifier for the CTA cameras (PACTA)”, *JINST* 7 (2012) C01100, DOI: 10.1088/1748-0221/7/01/C01100
- [2-6] 中嶋 大輔 et.al, CTA 報告 79, 日本物理学会 2014 年秋季大会
- [2-7] A. Okumura, et al, "Prototyping hexagonal light concentrators using high-reflectance specular films for the Large-Sized Telescopes of the Cherenkov Telescope Array", 2017 *JINST* 12 P12008, DOI: 10.1088/1748-0221/12/12/P12008
- [2-8] HULINKS, <https://www.hulinks.co.jp/software/crystal/tfcalc>
- [2-9] CTA-Japan 計画概要
- [2-10] CTA-Japan コンソーシアム:CTA 計画書(2014), p.89
- [2-11] Stefano Vercellone, *astro-ph.HE*, DOI:10.1016/j.nima.2014.04.015
- [2-12] 野崎誠也 et.al, 日本物理学会 第 77 回年次大会(2022)
- [2-13] CTA-Japan コンソーシアム:CTA 計画書(2014), p.5
- [2-14] 馬場浩則 et.al, 日本物理学会 第 68 回年次大会(2013)
- [2-15] 深見哲志 et.al, 日本物理学会 第 70 回年次大会(2014)
- [4-1] 猪目祐介, et.al, “光電子増倍管較正試験のための高速パルスレーザーの制作”, 日本物理学会 第 70 回年次大会
- [4-2] 猪目祐介, et.al, "CTA 大口径望遠鏡 焦点面検出器のキャリブレーションシステム 開発", 日本天文学会 2015 年秋季年会
- [4-3] 高橋光成 et al., CTA 報告 169, 日本物理学会 2020 年秋季大会
- [4-4] 永吉勤 et.al., CTA 報告 60, 日本物理学会 2013 年春季大会

- [4-5] 野崎誠也 次世代ガンマ線天文台大口径望遠鏡用波形サンプリング回路の性能評価
- [4-6] 松岡俊介 モンテカルロ計算を用いたガンマ線天文台 Cherenkov Telescope Array
大口径望遠鏡のカメラ感度の向上
- [5-1] Y. Inome, et.al, “Development of a Hundred-Picoseconds Pulse Laser as a
Calibration Source,” in Proc. IEEE Nuclear Sci. Symp. Med. Imag. Conf.
(NSS/MIC). Oct. 2017, pp. 1–2. doi: 10.1109/NSSMIC.2017.8533096.
- [5-2] Yusuke Inome et.al, "A 100-ps Pulse Laser as a Calibration Source" in IEEE
TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL.66, NO.8, p1993-1997,
AUGUST 2019, doi: 10.1109/TNS.2019.2928800
- [5-3] W. Uhring, et.ak, “A low cost high repetition rate picosecond laser diode pulse
generator,” Proc. SPIE, Semicond. Lasers Laser Dyn., vol. 5452, pp. 123–135, Sep.
2004. doi:10.1117/12.545038.
- [5-4] 光電子増倍管 その基礎と応用 - Hamamatsu Photonics
[https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-
photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/PMT_handbook_v4J.pdf](https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/PMT_handbook_v4J.pdf)
表 4-3
- [5-5] Photomultiplier Tubes, Basics and Applications, Hamamatsu Photonics K.K.,
Japan, 1994.
- [5-6] M. Takahashi et al., “A technique for estimating the absolute gain of a
photomultiplier tube,” Nuclear Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A, Accel.,
Spectrometers, Detect. Associated Equip., vol. 894, pp. 1–7, Jun. 2018.
- [6-1] 運用を開始したばかりの CTA 大口径望遠鏡がチェレンコフ光信号を初観測,
ICRR 2018.12.28