次世代ガンマ線天文台 CTA 大口径望遠鏡初号機搭載に 向けた GHz 波形サンプリング回路の性能評価

土屋優悟

平成 27 年 3 月 13 日

概 要

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画は現行の望遠鏡よりも一桁以上高い感度で 20 GeV から 100 TeV 以上の従来よりも広い範囲の天体ガンマ線を観測する次世代の大規模チェレンコフ望遠鏡 群の国際共同建設計画である。CTA では大・中・小の口径の異なる 3 種類の望遠鏡を南北両半球に 設置して全天観測を行う。これまで検出された 150 天体を遥かに越える 1000 以上の天体が検出さ れると予想され、高エネルギーガンマ線天文学を飛躍的に発展させることが期待されている。チェ レンコフ望遠鏡は、地球大気に入射したガンマ線が作る空気シャワーからのチェレンコフ光を用い て元のガンマ線のエネルギーや到来方向を間接的に観測する。CTA 大口径望遠鏡は 20 GeV から 1 TeV の低エネルギー領域を観測するもので、口径 23 m で南北半球に 4 台ずつ建設される。焦 点面検出器として使用される光電子増倍管 (PMT)から得られるチェレンコフ光の信号は数 nsec 程度の短い時間幅を持ち、観測する際には同時に数百 MHz 程度のレートで夜光などのバックグラ ウンドが入射してくる。そこで波形サンプリングを GHz で行い、信号の積分時間を数 nsec 程度 まで短くすることがバックグラウンドとの分離のために求められる。しかし使用される PMT は 1 台あたり 1855 本にもなりカメラ内での発熱を考慮すると GHz サンプリングを消費電力の大きい Flash ADC 方式で行うことは非常に困難である。そこで我々の開発した読み出し回路ではアナロ グメモリの ASIC である DRS4 を用いて低消費電力での GHz サンプリングを達成している。

本修士論文では CTA 大口径望遠鏡初機への搭載に向けた読み出し回路の改良と回路シミュレーション、及び性能評価について報告する。読み出し回路の改良にあたり、中口径望遠鏡読み出し回路との仕様共通化に向けた電源系の変更を行った。入力電圧や出力電圧値の変更に向け、使用するデバイスの選定を行いテスト回路を用いて試験を行った。出力電圧値やノイズレベルを確認の上問題なしと判断して読み出し回路上に組み込んだ。回路シミュレーションではサンプリングスピードを変更した場合の波形積分値の誤差を確認し、PMT 信号に対しては1 GHz サンプリングでも積分値に影響が無いことを確かめた。また、読み出し回路帯域シミュレーションではメインアンプに接続する DRS4 を減らすことによって帯域が改善する傾向を確認した。読み出し回路の性能評価試験では、ノイズレベル ~0.09 光電子(RMS)、タイミングジッター 20 ps 以下、ダイナミックレンジ1~2000 光電子以上、小信号に対し帯域 300 MHz (-3 dB)、クロストーク 0.2%以下、1 光電子スペクトル S/N 比が 6.8、消費電力 2.7 W/PMT という結果が得られた。この他、アナログ方式とデジタル方式の両トリガ回路やスローコントロールボードなどの新たに改良された周辺機器との接続下における波形取得試験も行い、より望遠鏡搭載状況に近い環境での動作試験に成功した。

目 次

第1章	高エネルギーガンマ線天文学	1
1.1	宇宙線	2
	1.1.1 宇宙線スペクトル	2
	1.1.2 超高エネルギー宇宙線	2
	1.1.3 GZK カットオフ	3
1.2	ガンマ線発生機構....................................	4
	1.2.1 制動放射	5
	1.2.2 シンクロトロン放射	5
	1.2.3 逆コンプトン散乱	6
	1.2.4 パイオン崩壊	6
	1.2.5 対消滅	6
1.3	高エネルギーガンマ線天体.................................	6
	1.3.1 超新星残骸	7
	1.3.2 パルサー	7
	1.3.3 銀河中心	8
	1.3.4 活動銀河核 1	.3
	1.3.5 ガンマ線バースト 1	.3
	1.3.6 宇宙背景光 1	.4
	1.3.7 暗黒物質 1	.5
	1.3.8 ローレンツ不変性の検証 1	.5
第2章	TeV ガンマ線観測 1	9
2.1	空気シャワー	9
2.2	チェレンコフ光	20
2.3	チェレンコフ望遠鏡	21
2.4	イメージング法	21
2.5	ステレオ観測	22
2.6	現行のチェレンコフ望遠鏡 2	23
第3章	CTA 計画 2	8
3.1	CTA 概要 2	28
	3.1.1 狙うサイエンス	28
	3.1.2 目標性能	29
	3.1.3 望遠鏡デザイン	80
	3.1.4 望遠鏡配置と観測サイト	31
	3.1.5 日本の貢献 3	32
3.2	CTA-LST	32
	3.2.1 構造	32
	3.2.2 分割鏡	33

	3.2.3 光検出器 3.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1
第4章	CTA-LST 読み出し回路 40
4.1	
	4.1.1 回路構成 40
42	アナログメモリ DRS4 42
43	プロトタイプ読み出し回路 Ver 3 43
4.0	
4.4	4/11 Vor 3 からの空軍占 45
	4.4.9 雪酒系 46
	4 4 3 + 4 7 7 7 7 46
	4.4.4 DRS4 48
	4.4.4 DIG4 40
	4.4.5 ADC
4 5	4.4.0 FFGA 40 国江同收
4.0	同辺凹路 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
	4.5.1 1 1
	4.5.2 スローコントロールホート 49 4.5.2 トリギロBB
	4.0.3 トリカ凹崎
	4.5.3.1 テンダルトリカ 50
	4.5.3.2 アテロクトリカ
第5章	読み出し回路性能シミュレーション 56
5.1	サンプリングシミュレーション
5.2	Pspice による回路シミュレーション
第6章	読み出し回路性能試験 62
6.1	電源系試験
6.2	ノイズレベル測定
6.3	タイミングキャリブレーション
6.4	ダイナミックレンジ測定とチャージ分解能65
6.5	帯域測定
6.6	クロストーク測定
6.7	PMT 波形サンプリング試験
	6.7.1 1 phe スペクトル 取得試験
	6.7.2 波形平均測定
6.8	トリガ試験
	6.8.1 デジタルトリガ試験
	6.8.2 アナログトリガ試験
6.9	消費電力
笛ヶ辛	まとめと今後の詰み出し回路改自
お(早 71	あこのこっ夜の前の山口岡山区区 63 詰み出し其板 Vor 4 性能評価のキとめ 99
(.1 7.0	 がの山し至似 VCL4 注肥計画のよこの
1.2	- フタツ咖啡山 U 李攸以及又U 武歌 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ $\delta 0$

第1章 高エネルギーガンマ線天文学

天体から到来する高エネルギーを持ったガンマ線は地球大気による吸収を受けるため、地上での 直接検出は困難であり、X線天文学などの他のエネルギー領域にくらべ発展が遅れていた。直接的 な観測には高度 40 km 以上での気球観測や衛星を用いた観測が不可欠である。衛星を用いた観測で は 1967 年の OSO-3 衛星による初の天体からのガンマ線観測に端を発し、GeV 領域では 2008 年に 打ち上げられた Fermi 衛星に搭載された LAT 検出器によって 3000 以上の天体が検出され、目覚し い発展を遂げている(図 1.1)。一方、100 GeV 以上の超高エネルギー(VHE:Very High Energy) ガンマ線の観測は大気を検出器として地上の望遠鏡で観測するという手法が用いられる。1989 年 にWhipple チェレンコフ望遠鏡がイメージング法を用いて Crab Nebula からの TeV ガンマ線を 9.0 σ で観測して以来、世界各地でチェレンコフ望遠鏡を用いた VHE ガンマ線観測が行われるよ うになった [1]。現在では H.E.S.S.、MAGIC、VERITAS が稼動しており、154 個の VHE ガンマ 線天体が報告されているものの(1.2節)、この領域の観測はまだ発展の余地を大きく残している。 Cherenkov Telescope Arrey (CTA) 計画はこれら現行の望遠鏡に続く次世代の大気チェレンコフ 望遠鏡建造計画である。CTA 計画では 1000 以上の VHE ガンマ線天体の発見を見込んでおり、高 エネルギーガンマ線天文学を大きく進展させるものと期待されている。

この章では高エネルギーガンマ線天文学の導入として宇宙線について触れ、高エネルギーガンマ 線放射源となっている天体について述べる。



図 1.1: Fermi 衛星により検出されたガンマ線源 [2]



図 1.2: 現在までに発見されている VHE ガンマ線源。http://tevcat.uchicago.edu/より。

1.1 宇宙線

宇宙線に関する研究は、1911-12 年に行われた V.Hess による気球実験に始まる。この実験では 電離計を用いて、高度 1000 m より上空では高度が高いほど放射線強度が強くなることを示した。 W.Kolhörster によって"Hohen-strahlung" (高空放射線) と名づけられたこの放射線は依然として どこから飛来しているのか知られていなかったが、1925 年に R.A.Millikan が論文において宇宙か ら高いエネルギーを持った放射線がやって来ていると記述し、その中で始めて" cosmic rays" とい う言葉が使用された。宇宙線が発見されて現在まで 100 年が経過したが、起源や組成など依然とし て不明な点が数多く残されており、これらを明らかにすることは高エネルギーガンマ線天文学の目 標の一つでもある。

1.1.1 宇宙線スペクトル

宇宙線は宇宙空間を飛び交う高エネルギー粒子であり、その組成は電子やガンマ線、ニュートリ ノや鉄以上の重い原子核に至るまで様々であるが、主成分は陽子である。現在までに様々な実験 で観測されてきた宇宙線のスペクトルを図 1.3 に示す。宇宙線のエネルギー領域は 10²⁰ eV にも及 び、我々が地球上で人工的に生み出すことの出来る最高エネルギーを容易く超えている。10⁸ eV を超える領域ではスペクトルはエネルギーのべき乗で減少していくスペクトルが見られる。10¹⁵ eV 付近の Knee 領域ではスペクトルの勾配が急になり、10¹⁸ eV 付近の Ankle 領域では勾配が緩 やかになっている。Knee 領域以下のエネルギーを持つ宇宙線は銀河系内の超新星残骸での衝撃波 による加速が起源として有力視されている。また、Ankle 領域の折れ曲がりは観測されている宇宙 線が銀河系内宇宙線から銀河系外宇宙線へ遷移している領域であろうと考えられている。しかしな がらこれらの説も完全に実証されているわけではなく未解明な部分も多い。その理由として、荷電 粒子はわずかな星間磁場によっても進行方向が曲げられてしまい、10¹⁹ eV 以上のエネルギーを持 ちほとんど直進できる場合を除いて加速源を定めることが困難な点が上げられる [3]。

1.1.2 超高エネルギー宇宙線

先に述べたように宇宙線は 10²⁰ eV 程度のエネルギーまで観測がなされており、この起源が宇宙 において最も激しい物理現象と関わりがあることが想像されるが、いまだその放射原理も起源とな る天体も解明されていない。このエネルギー領域の宇宙線起源の解明にはエネルギースペクトルの 測定や宇宙線の組成、到来方向の正しい観測が必要である。これらを知るためにより多くの事象を



図 1.3: 宇宙線スペクトル [4]

観測する必要があるものの、エネルギーが高くなるほど宇宙線の到来頻度は急激に減少する。それ ゆえにこれらの観測を行う際には地上において数 km² という大面積をカバーできる大規模な観測 装置が必要となる。

1.1.3 GZK カットオフ

1966 年に、10²⁰ eV 以上の超高エネルギーを持つ宇宙線は 2.7 K 宇宙背景放射と核子共鳴を起こしエネルギーを失うために、50 Mpc より遠くからは到達することが出来ないという考えがなされた。

$p + \gamma \rightarrow n + \pi^+$

この考えは提唱した K.Greisen と G.Zatsepin、V.Kuzumin の頭文字をとって GZK カットオフと 呼ばれる。このため観測において GZK カットオフが確認されれば最高エネルギー宇宙線は銀河系 外起源であると考えられる。このカットオフの有無を確認するためにこれまでに様々な観測がなさ れている。日本の山梨県に設置された空気シャワー実験 AGASA では、約10年間の観測で 10²⁰eV 以上のエネルギーを持った宇宙線を 10 個以上も検出した。このため最高エネルギー宇宙線を放射 している起源天体は銀河系内の比較的近い場所にあると考えられた、このような天体は同定されて いない。それに対しアメリカの HiRes 実験では GZK カットオフの存在を示唆する観測結果が得ら れている。この結果の食い違いは核相互作用のモデルに起因すると考えられているが、GZK カッ トオフの有無はいまだ判然としていない(図1.4)。これらの実験のほかにも宇宙ステーションから 地球を観測することで 10²⁰ eV 以上の粒子を観測しようとする JEM-EUSO 計画 [5] などが進めら れており(図1.5)、最高エネルギー宇宙線は現代の天文学において注目のおける分野であると言 える。



図 1.4: 各観測機器による宇宙線スペクトル [6]。10²⁰ eV 以上で AGASA の結果と HiRes の結果 が食い違っている。HiRes のスペクトルに規格化してある。

1.2 ガンマ線発生機構

高エネルギー宇宙線の中でもガンマ線は電荷を持たず磁場によって曲げられることなく進むため、加速源となる天体を同定するための良い観測対象となりうる。この節ではガンマ線の主な発生 機構である制動放射、シンクロトロン放射、逆コンプトン散乱、パイオン崩壊、対消滅の5つの過 程について示す。



図 1.5: JEM-EUSO 計画による超高エネルギー宇宙線観測イメージ [5]

1.2.1 制動放射

移動する荷電粒子が原子核などの電場に加速度を受けることで光子を放射する現象を制動放射という。放射確率は粒子質量の二乗に反比例するために電子などの軽い粒子に影響を及ぼす。 典型的 なスペクトルは連続スペクトルとなり、元の荷電粒子のスペクトルに比例する。

1.2.2 シンクロトロン放射

荷電粒子が相対論的な速度で磁場中を進行すると、ローレンツ力により曲げられながら光子を放射する現象をシンクロトロン放射と言う。磁束密度 B の中を速度 β で進む単一の電子から放射されるシンクロトロン放射の強度は、ローレンツ因子 γ とトムソン散乱断面積 σ_T を用いると次のように表せる [7]。

$$P = \frac{4}{3}\sigma_T c\beta^2 \gamma^2 \frac{B^2}{8\pi}$$

シンクロトロン放射のスペクトルは、図1.6に示されるような連続的なべき乗型スペクトルとなる。



図 1.6: シンクロトロン放射スペクトル [8]。定数部分は規格化されている。

1.2.3 逆コンプトン散乱

高エネルギーを持った電子が低エネルギーの光子に衝突することで光子にエネルギーが与えられる現象を逆コンプトン散乱と呼ぶ。電子の速度が相対論的でトムソン散乱が適応できる場合、放射強度は光子のエネルギー密度を *U*_{ph} とすると次のようになる [7]。この場合、散乱光子のスペクトルは散乱前の光子のものとあまり変わらない。

$$P=\frac{4}{3}\sigma_T c\beta^2\gamma^2 U_{ph}$$

トムソン散乱が適応できないような場合は Klein-Nishina 領域と呼ばれ、衝突する電子のエネル ギーによって散乱光子のエネルギーが決まる。逆コンプトン散乱もべき乗型スペクトルを持つ。ま た、高エネルギーのガンマ線の生成モデルとしてシンクロトロン自己コンプトン(Synchrotron Self Compton Radiation、SSC)モデルがあげられる。これは、シンクロトロン放射によって荷電粒子 から放射された光子が、もとの高エネルギー荷電粒子と逆コンプトン散乱をすることでガンマ線を 生成するというものである。

1.2.4 パイオン崩壊

相対論的な陽子が星間ガス内の陽子や光子と衝突することで中性のパイオン π^0 が生成される。 生成された π^0 が崩壊して γ が放射される現象をパイオン崩壊と呼ぶ。放射されるガンマ線スペク トルの形はもととなる陽子のスペクトルを反映する。静止した π^0 の崩壊では、放射される光子は π^0 の静止質量の半分である 70 MeV 程度のエネルギーを持つ。

$$p + p \to \pi^0 + \pi^{\pm}$$
$$p + \gamma \to \Delta^+ \to p + \pi^0$$
$$\pi^0 \to 2\gamma$$

1.2.5 対消滅

粒子と半粒子が衝突すると対消滅を起こして光子が発生する。例えば電子と陽電子での対消滅の 場合以下のような反応が起こる。

 $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$

共に静止状態であったとすると 511 keV のエネルギーのガンマ線が放射される。

1.3 高エネルギーガンマ線天体

図 1.2 で示したようにこれまでチェレンコフ望遠鏡によって 150 個程度の天体が高エネルギーガ ンマ線天体として観測されている。放射されたガンマ線を観測することは天体の同定のみならず高 エネルギー天体の性質を知る手がかりともなりうる。この節では高エネルギーガンマ線観測の対象 となる天体やそこから分かるサイエンスについてまとめる。

1.3.1 超新星残骸

超新星残骸(Supernova Remnant、SNR)は大質量星が超新星爆発を起こした後に残る天体で ある(図1.7)。超新星爆発は白色矮星内部の核で炭素の核融合反応が爆発的に起こる(*I*_a型超新 星爆発)ことや、太陽質量の10倍以上の大質量星の重力崩壊が起こる(*II*型超新星爆発)こと によって起きる。超新星爆発において放出されるエネルギーは10⁵¹ergにも上る。この爆発の衝 撃波が星の周りの物質を加熱することで温度が上昇し光を放つようになったものがSNRである。 SNRは宇宙空間にエネルギーを放出し宇宙の進化を促すだけでなく、宇宙線の加速源としての役 割も果たしていると考えられている。藤原定家が残した明月記に記載されていることで有名なSNR SN1006の衝撃波面からシンクロトロンX線が放射されていることが観測されており、宇宙線電子 成分の加速現場であることが証明されている。また、SNRからはTeVガンマ線の放射も発見され



図 1.7: 超新星残骸 Tycho で観測された多波長スペクトル [9]。黒い点線がシンクロトロン放射、赤 い点線が逆コンプトン、緑の点線が制動放射、青い点線が π^0 崩壊を表す。

ており、SNR が高エネルギー宇宙線の放射源であることが分かっている。実際にチェレンコフ望 遠鏡 H.E.S.S. で観測された TeV ガンマ線を放射している SNR RXJ08520.0-4622 のカウントマッ プを図 1.8 に示す。その他にも H.E.S.S. 望遠鏡による観測で、SNR W28 が分子雲と衝突している 現場からの高エネルギー ガンマ線放射が観測されており(図 1.9)、高エネルギーガンマ線天体と して多くの研究がなされている。これらのガンマ線スペクトルは π^0 崩壊で説明でき、陽子起源を 支持するものであり、陽子加速の証明となると考えられている(図 1.7)。

しかしながら SNR で加速できる最高エネルギーや、加速された粒子がどのようにして SNR から抜け出して宇宙線となっているのかなど未解明となっている問題は多く残されている。更なる観測によっては新たな SNR の発見のみならず陽子成分加速の可能性などの探査が行えると期待されている。

1.3.2 パルサー

パルサーとは高速で自転している磁化した中性子星のことである。典型的なパルサーの場合自転の周期は数十 msec から数秒であり、10¹¹-10¹⁴ G の磁場を持つ。パルサーからの放射のエネルギー源は回転によるものであると考えられ、回転によって励起される電場によって粒子の加速が起こるとされる。その放射領域が中性子星の極付近で起こる(polar-cap モデル)ものなのか、磁



図 1.8: H.E.S.S. で観測された超新星残骸 RXJ08520.0-4622 からのガンマ線放射のカウントマップ (左図)とそのガンマ線スペクトル(右図)[10]。左図の白の等高線は ROSAT 衛星で観測された X線イメージ。

気圏の外側から起こっている(outer-gap モデル)ものなのか議論がなされていた。パルサー全体 の構造の概略図を図 1.10 に示す。2008 年には MAGIC 望遠鏡によって Crab パルサーからの 25 GeV のガンマ線放射が発見されており [12]、この観測から中性子星の表面から遠い、磁気圏の外側 から放射が起こっていることが明らかになった。このガンマ線放射のパルスとスペクトルを図 1.11 に示す。さらに MAGIC は 2012 年に Crab パルサーから 400 GeV という高エネルギーガンマ線 が放射されていることを確認し、さらにパルス幅が数 msec と非常に短い周期での放射が起こって いることを観測した [13]。高エネルギースペクトルには緩やかながらも指数関数的なカットオフが あるという従来の説に反し、高エネルギーの放射が確認されたことでこれまでの理解とは別の放射 機構の存在が明らかになった。この観測結果を説明するためのモデルがいくつか考えられ、今後の 観測においてこれらのモデルを検証していくことが必要とされている。パルサーからのスペクトル や放射の形状をさらに詳細に観測することによりパルサーでの電子陽電子の加速領域や最高エネル ギーを見積もることで、宇宙線電子陽電子の加速起源の解明につながると考えらてれる。

1.3.3 銀河中心

我々の地球がある天の川銀河の中心にはいて座 A*と呼ばれる天体がある。この付近の観測によっ て半径 120 天文単位の領域に太陽質量の数百万倍の質量が含まれることが分かっており、そのた めにいて座 A*は銀河中心に存在する超巨大プラックホールであると考えられている。いて座 A* からは強い電波の放射が確認されていたが、チェレンコフ望遠鏡の発展に伴い銀河中心領域におい て TeV ガンマ線の放射が確認された [14]。銀河中心方向のガンマ線強度を図 1.12 に示す。この放 射源としていて座 A*や SNR、ダークマターからの崩壊・対消滅ガンマ線など様々な説が出されて いるが結論は得られていない。この起源を特定するためには時間変動と広いガンマ線帯域でのスペ クトルを観測することが不可欠であり、今後より高精度な望遠鏡での観測が望まれている。その他 にも銀河中心にある巨大な分子雲による TeV ガンマ線が観測されている。分子雲単体ではこれほ ど高エネルギーな放射を行うことは出来ない。この解明には同じ分子雲で高エネルギー現象が観測 された X 線観測との共同研究が必要であり(図 1.13)、様々な波長帯での観測が銀河中心領域の放 射過程を知ることにつながると言える。



図 1.9: SNR W28 観測 [11]。白黒が X 線、赤と青が分子雲を表す。黄色は TeV ガンマ線、水色は GeV ガンマ線。



図 1.10: パルサーの全体像 [12]。極付近の赤い領域が polar-cap 領域、外側の橙色の領域が outer-gap 領域。

また、Fermi 衛星の観測により、銀河中心において銀河面から南北に±50°、東西に±20°に渡っ て広がる巨大な双極構造が発見された [17]。この構造は Fermi バブルと呼ばれ、銀河中心に付随す る構造であるとすれば全長約5万光年にも達する巨大なものである(図1.14)。これは過去に活動 的だった銀河中心の超巨大ブラックホールからのジェットによって形成されたのではないかと考え られている。Fermi バブルから得られたスペクトルは10 GeV でも有意な折れ曲がりは見えていな いため、更なる高エネルギー領域においても観測が期待されている。



図 1.11: MAGIC で観測された Crab パルサーからのガンマ線放射(上図)とそのスペクトル(下図)[12]。下図の橙の破線が polar-cap モデルで予想されたスペクトルである。



図 1.12: 銀河中心方向の VHE ガンマ線強度 (カラー)。緑色は電波強度を表す。[15]



図 1.13: H.E.S.S 望遠鏡による銀河中心の TeV ガンマ線観測結果 [16] (左)とすざく衛星による 中性鉄輝線 (6.4 keV) 画像(右)。矢印は X 線で時間変動を起こした いて座 B2 領域。



図 1.14: Fermi 衛星で観測された Fermi バブルの構造(上図)とスペクトル(下図の青線)[17]。 上図の色線は確認されているいくつかの構造。

1.3.4 活動銀河核

活動銀河核(Active Galactic Nucleus、AGN)とは非常に明るく光る銀河の中心領域のことであり、電波からガンマ線にいたるまで広い波長帯での放射が観測されている(図 1.15)。銀河の中



図 1.15: ブレーザー PKS2155-304 の多波長スペクトル [18]。スペクトルが TeV 領域以上まで続 いていることが分かる。左の山は電子のシンクロトロン放射で右の山はその電子による自己コンプ トン散乱の放射で説明できる。

心にある超巨大ブラックホールに物質が降着する際に解放する重力エネルギーを放射エネルギーに 変えることで、銀河全体に匹敵するほどの高度で輝いていると考えられている。電波などの非熱的 放射を行う電波銀河からは相対論的ジェットが上下に方向に放射されている(図1.16)。ジェット を真横から観測したものは電波銀河、真正面から観測したものはブレーザー、斜め方向から見たも のはクエーサーと呼ばれる。この中でもブレーザーは観測者方向に向かってくるものであるため ビーミング効果によって明るく、かつ時間変動が短く観測される(図1.17)。ジェットの放射領域 の特定が行われればジェットの構造や加速機構についても知ることが出来ると考えられる。また、 ブレーザーをガンマ線光源として観測することで可視・赤外領域の宇宙背景光を見積もることも出 来るため、この測定を通して星や銀河の宇宙論的進化を知ることが出来る(1.3.6 節)。

1.3.5 ガンマ線バースト

ガンマ線バースト (Gamma Ray Burst、GRB) はわずか数秒程度の間に 10⁵³ erg にも達するエ ネルギーを放射すると言う宇宙最大の爆発現象であり、さらにミリ秒以下の高速な時間変動を示 す現象でもある。また、Fermi 衛星によって赤方偏移 4.35 という GRB が見つかっており (GRB 080916C) [20]、遠方からの高エネルギーガンマ線が観測できる天体といえる。GRB については 宇宙論的な距離で起こることや数日以上かけて徐々に減光放射を伴うことが知られているが、その 元となっている天体やジェットの形成機構、粒子の加速機構など基本的なことさえ発見から 40 年 以上が経過した今なお解明されていない。GRB の放射の模式図を図 1.18 に、Fermi 衛星で得られ た GRB のライトカーブを図 1.19 に示す。GRB は突発的な現象であるために地上での望遠鏡観測 では Swift などの衛星からのアラートを受けて即時に GRB が発生した方向を向けることが必要で ある。後述する CTA-LST は 20 秒間で 180 °回転という高速な回転性能を持っているため放射が 始まってから即時観測開始が可能であり、Fermi 衛星では得られていない 10 GeV 以上の詳細なス ペクトルや時間変動を観測できると期待されている(図 1.20)。GRB について理解を深めること はローレンツ不変性の検証や重力波源の同定にもつながると考えられている。また、LST では赤



図 1.16: ハッブル宇宙望遠鏡で観測された活動銀河核 M87 中心角から伸びるジェットの可視光イ メージ (JAXA website http://www.isas.jaxa.jp/j/forefront/2011/lukasz/ より)



図 1.17: H.E.S.S 望遠鏡で観測された活動銀河核 PKS 2155 - 304 のガンマ線放射(E>200 GeV) の時間変動 [19]。5 分程度の短い時間変動が観測されている。

方偏移が6を超える遠方のGRBも観測できる可能性があるため、これらを検出することで宇宙背 景光測定に貢献できることも期待されている。

1.3.6 宇宙背景光

宇宙背景光(Extragalactic Background Light、EBL)とは銀河系外天体からの可視・赤外線領 域の光を足し合わせたものである。この直接観測は太陽系内の黄道光がEBLよりもはるかに明る く差し引きが困難であり、正確に測定することが難しい。そこで高エネルギーガンマ線を用いて間 接的に観測する方法が考えられている。EBLと高エネルギーガンマ線は相互作用を起こし電子陽 電子対をつくるため、高エネルギーガンマ線のもとのスペクトルを理解できればEBLによる吸収 量を見積もることが出来、間接的にEBLの強度を測定できる。近年ではチェレンコフ望遠鏡で観 測されたAGNのスペクトルを解析することによってガンマ線吸収成分を取り出すことに成功して いる。図 1.21 に MAGIC 望遠鏡で得られた間接的な EBL 強度分布を示す。このようにして高エ ネルギーガンマ線を観測することで EBL の強度を間接的に求め、宇宙の形成史の理解を深めるこ



図 1.18: GRB の放射模式図 [21]

とが出来る。EBL 強度をより精度良く求めるために、より高い性能を持ったチェレンコフ望遠鏡 による観測が必要となっている。

1.3.7 暗黒物質

Planck 衛星による宇宙マイクロ波背景放射の観測などにより、全宇宙のエネルギー密度に対する 原子などのバリオン物質の割合は5%程度でしかないことが明らかになっている。残りの約27%は 暗黒物質(ダークマター)と呼ばれる未知の物質であり、約68%はダークエネルギーという未知の エネルギーであるとされる。暗黒物質は光子との散乱をほとんど行わず、標準理論で知られる素粒 子では説明が出来ないため未知の素粒子がその候補としてあげられている。銀河中心のように密度 の大きな領域からのガンマ線を観測することによって、暗黒物質の対消滅・崩壊によって生成され るガンマ線(図1.22)を観測し、理論からの予言値と比較することによって暗黒物質の質量や対消 滅の断面積もしくは崩壊の寿命といった詳細な情報を得ることが出来る。近年 Fermi 衛星の観測 によって銀河中心から130 GeV 付近のガンマ線が観測されたという報告もあり、ダークマター起 源の可能性が議論されている。このエネルギー領域を観測する有効な手段として Fermi 衛星より もはるかに大きな有効面積を持つチェレンコフ望遠鏡での観測も期待されている。将来計画である CTA 望遠鏡ではこの領域を含み、かつ Fermi 衛星よりも高エネルギー領域にも感度を持つため、 より大きな質量領域の探査も行うことが出来る(図1.23)。

1.3.8 ローレンツ不変性の検証

GRB や AGN の観測を通して光速度不変性、つまりローレンツ不変性の検証を行うことが出来 る。超弦理論においてもローレンツ不変性が自発的に破れる可能性が指摘されており、この検証は いくつかの理論に強い制限を与えることが出来る。天体を同時に出た二つの光子の微小な速度差に よる地球に到達する時間の差を観測することで相対論の検証を行うことが出来るが、その時差が光 速度の違いによるものなのか天体固有のスペクトルの進化によるものなのかは原理的に判別するこ とが出来ない。この時差は距離に比例するため様々な距離の天体を観測して傾向を探ることが理想 的である。図 1.24 にチェレンコフ望遠鏡の観測による光子到着時間差の図を示す。このような観 測が出来る天体は限られており、現在でも十分なデータは得られていない。より高エネルギーの光 子を高い統計で観測できる機器があればローレンツ不変性の検証においてより強い制限を与えるこ とが出来る。このようにして高エネルギーガンマ線の観測からローレンツ不変性の検証を行うこと が出来、物理の基礎理論の発展にも影響を与えることが期待されている。



図 1.19: Fermi 衛星で得られた GRB 080916C (z=4.3) のライトカーブ [20]



図 1.20: シュミレーションによって得られた CTA で GRB 080916C を観測した場合に得られる 光 度曲線 (30GeV 以上) [22]



図 1.21: MAGIC 望遠鏡の活動銀河核 3C279 (z=0.536) 観測で求められた EBL の強度分布 [23]。 緑の線が上限値を表す。



図 1.22: 暗黒物質の候補である WIMP の対消滅によるガンマ線放射の概略図 [24]



図 1.23: ダークマターの対消滅断面積の上限値 [25]。黒の線は Fermi 衛星によるこれまでに得られ た上限値(実線)と将来の感度(点線)。色つきの線がシュミレーションによる CTA での結果で、 緑線は Segue 1、青線は Fornax Cluster、赤線は銀河八口を 100 時間観測で得られる曲線。



図 1.24: AGN と GRB で観測された光子の到着時差と天体の距離 [26]

第2章 TeV ガンマ線観測

ガンマ線は厚い大気に阻まれるために地上での直接検出は不可能であり、大気球や人工衛星によ る観測が不可欠である。しかし、ガンマ線はエネルギーが上がるにつれて到来頻度は急激に減少す るため、人工衛星等の限られたサイズでは十分な有効面積を達成することが出来ない。そこで TeV ガンマ線の観測においては地球大気を検出器として地上で検出する方法がとられる。この章では大 気とガンマ線との相互作用で発生する空気シャワーの物理と観測に用いられる大気チェレンコフ望 遠鏡 (Imaging Air Cherenkov Telescope、IACT)について紹介する。

2.1 空気シャワー

高エネルギー宇宙線が大気に入射すると大気中の原子核との相互作用により2次粒子が発生す る。この2次粒子もまた高いエネルギーを持つためにさらに新たな粒子を発生させ続け、粒子数 を増やしながら大気中を伝播していく。このような現象を空気シャワーと呼ぶ。初めに入射した粒 子がガンマ線であった場合、大気との相互作用で電子対生成を起こし2次粒子として電子が発生す る。発生した高エネルギー電子は制動放射を起こし再びガンマ線を放射することで、電子対生成と 制動放射と繰り返し、多数の電子とガンマ線からなる空気シャワー(電磁シャワー)を形成する。 シャワーの概念図を図2.1に示す。シャワーの初期段階では粒子数は急激に増加し、個々の粒子の



図 2.1: ガンマ線 (左) と陽子 (右) による空気シャワーの概念図 [27]

持つエネルギーは減少していく。このエネルギーが大気に対する臨界エネルギー¹*E*_C =81 MeV よ りも小さくなると電子が大気中に吸収され粒子数の増加は止まる [3]。電磁シャワーの縦方向の発 達曲線を図 2.2 に示す。

¹電離損失と輻射によるエネルギー損失が等しくなるようなエネルギー



図 2.2: 入射ガンマ線エネルギーごとの電磁シャワーの縦方向発展 [28]

電磁シャワーに対し陽子やヘリウム原子核などの宇宙線が作る空気シャワーをハドロンシャワー と呼ぶ。ハドロンシャワーでは地球大気に入射した原子核から生成される2次粒子はほとんどが パイオンである。そのうち π^0 は崩壊して光子を放射してハドロンシャワーの中で電磁シャワーを 起こす。 π^{\pm} は崩壊するとミューオンとニュートリノになる、ミューオンは電子とニュートリノに 崩壊するが、一部は崩壊することなく地面まで到達する。このようにしてハドロンシャワーは電磁 シャワーやミューオンを含む複合的なシャワーであることが分かる。特徴として、パイオンが生成 される際に運動量が横方向に向くために、電磁シャワーに対して横方向に発達したシャワーを形成 する。電磁シャワーとハドロンシャワーの横方向発達の様子を図 2.3 に示す。



図 2.3: 電磁シャワーとハドロンシャワーの横方向発達の違い [29]。左からガンマ線、陽子、鉄原 子核によるシャワー。

2.2 チェレンコフ光

真空中での光速 *c* としたとき、空気シャワー中の荷電粒子が屈折率 *n* の媒質中における光速(*c/n*) よりも早く運動するとチェレンコフ光を放射する。これは移動する荷電粒子が大気中の原子の近く を通ることによって引き起こされる双極子放射が元になっており、各双極子によって放射される波 面がある面に対してそろうためである。放射角度 *θ* は粒子の速度 *v* によって決定し、

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

が成り立つ($\beta = v/c$)。このため電子がチェレンコフ光を放出するエネルギーの下限値は屈折率に よって決まり、大気中においては約 21 MeV である。荷電粒子が単位距離あたりに放射するチェレ ンコフ光の量 N は微細構造定数を $\alpha \simeq 1/137$ とし、観測する波長の領域を λ_1 から λ_2 とすると、

$$N = 2\pi\alpha \int_{\lambda 1}^{\lambda_2} \left(1 - \frac{1}{\left(\beta n\left(\lambda\right)\right)^2}\right) \frac{d\lambda}{\lambda^2}$$

で与えられる。チェレンコフ光の数は波長の2 乗に反比例するが、地上にたどり着くまでにオゾン による吸収などを受けることによって実際に観測されるのは 300-500 nm の波長帯になる。チェレ ンコフ光の横方向分布はエネルギーによらず、地上では半径 150 m ほどの円盤状(ライトプール) として観測される(図 2.4)。



図 2.4: チェレンコフ光密度の横方向分布 [29]

2.3 チェレンコフ望遠鏡

地上でのチェレンコフ光を観測することでガンマ線を捉えようとする望遠鏡をチェレンコフ望 遠鏡という。チェレンコフ望遠鏡にむけた研究は 1960 年代から行われてきたが宇宙線陽子などの バックグラウンドイベントの除去が困難であり、実際にガンマ線イベントを観測出来たのは 1989 年になってからであった。この年アリゾナに設置された Whipple 大気チェレンコフ望遠鏡はかに 星雲からのガンマ線信号を検出することに成功した。このとき用いた方法はイメージング法と呼ば れる(後述)。この望遠鏡は 10 m の口径を持ち、焦点面には 37 本の光電子増倍管(PMT)を使 用していた。イメージング法が確立されると、世界各地でチェレンコフ望遠鏡が建設されるように なり高エネルギーガンマ線の地上観測が本格的に行われるようになった。

2.4 イメージング法

空気シャワー現象への理解が進むにつれてガンマ線によるシャワーとバックグラウンドとなるハ ドロンなどのシャワーの形状の違いが区別できるようになった。シャワーによって出来るイメージ の違いはシャワーの粒子の相互作用に伴う広がりの違い等があげられる。得られるチェレンコフ光



図 2.5: Whipple 望遠鏡。http://veritas.sao.arizona.edu/whipple-10m-topmenu-117 より。

のイメージの違いに基づいてガンマ線シャワーとバックグラウンドを識別する手法をイメージング 法と呼ぶ。この手法ではチェレンコフ光の像をいくつかのパラメータで捉える。このパラメータは それぞれ length、width、distance、alpha と呼ばれる。これらはそれぞれチェレンコフ光イメー ジを楕円としてとらえたときの長軸方向の長さ、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を表す。これらのパラメータは Anthony M. Hillas によっ て考案されたものであり、Hillas パラメータと呼ばれる。チェレンコフ光イメージとイメージング 法に用いられる Hillas パラメータを表した図を図 2.6 に示す。バックグラウンド事象との分別を行 うことがガンマ線イベントの観測には不可欠であるが、これらのパラメータを用いて粒子分別を行 うことによってほとんどのバックグラウンド事象を除くことが出来る。望遠鏡で得られる粒子ごと のシャワーイメージを図 2.7 に示す。

2.5 ステレオ観測

望遠鏡1台だけによる観測ではガンマ線の到来方向は一意に決定することが出来ない。そこで1 つのガンマ線によるチェレンコフ光を複数の望遠鏡で観測し、それらで得られたイメージを重ね合 わせることでシャワーの到来方向を再構成するステレオ観測という手法を用いることで高い角度分 解能で到来方向を決定することが出来る。前述のように空気シャワーから放射されるチェレンコフ 光はライトプールという半径150 m の広がりをもってほぼ一様に地上に到来する。そこで望遠鏡 をこのライトプール内に収まるように配置することでステレオ観測が可能である(図2.8)。

図 2.9 にステレオ観測において得られるガンマ線イメージを示す。それぞれの望遠鏡で得られた 楕円の長軸を延長したものの交点を取ることでガンマ線の到来方向やシャワーの発生高度をを定め ることが出来る。ステレオ観測は宇宙線バックグラウンドとの区別にも有効に働く。また、宇宙線 中のミューオンが望遠鏡近くを通ることによって局所的にチェレンコフ光が入射してガンマ線によ るチェレンコフ光イベントと似た形状のイメージを作る現象もこのステレオ観測によって排除する ことが出来る。ステレオ観測を用いている H.E.S.S 望遠鏡や MAGIC 望遠鏡ではバックグラウン ド宇宙線によるイベントを 99.99% 程度の確率で除くことが出来る。

2.6 現行のチェレンコフ望遠鏡

現在稼動しているチェレンコフ望遠鏡はH.E.S.S.、MAGIC、VERITAS の3 つである。H.E.S.S (図 2.10)は南半球のナミビアに設置されており、12 m 口径 4 台と世界最大となる 28 m 口径の チェレンコフ望遠鏡を含めた 5 台の望遠鏡を備え、銀河面サーベイによって約 50 個もの高エネル ギーガンマ線天体を発見するなどの成果を挙げている。MAGIC(図 2.11)は 17 m 口径の望遠鏡 2 台からなり、スペインのカナリア諸島に設置されている。アナログ Sum トリガ(後述)という トリガ方式を導入し、1.3.2 で述べたような成果を達成している。VERITAS(図 2.12)はアリゾナ の Whipple 天文台に設置されており、12 m 口径望遠鏡 4 台からなる。

これら現行のチェレンコフ望遠鏡をさらに高感度化し、チェレンコフ望遠鏡観測の決定版となる ことが期待されているのが CTA 計画である。次章においてチェレンコフ望遠鏡の将来計画である CTA 計画について紹介する。



図 2.6: チェレンコフ望遠鏡を用いた空気シャワーのイメージング法と、シャワーイメージ及びそのパラメータ [30]



図 2.7: 望遠鏡シミュレーションで得られた粒子ごとの観測されるシャワー像 の違い。ミューオン(左) 、ハドロン(中) 、ガンマ線(右)によるイベント。 http://www.isdc.unige.ch/cta/images/outreach/image_shapes.jpeg より。



図 2.8: ステレオ観測 [22]



図 2.9: ステレオ観測で見た場合のガンマ線到来方向の決定。それぞれの望遠鏡で得られた楕円イ メージの長軸を伸ばして交点を求める。[22]



図 2.10: H.E.S.S. 望遠鏡。https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/pages/about/ より



図 2.11: MAGIC 望遠鏡。http://magic.scphys.kyoto-u.ac.jp/About/about.html より。



図 2.12: VERITAS 望遠鏡。http://veritas.sao.arizona.edu/ より

第3章 CTA 計画

1990年代から行われてきた地上でのVHE ガンマ線観測はH.E.S.S.、CANGAROOやMAGIC、 VERITAS が次々と新天体からのガンマ線観測に成功し、この十年ほどでめまぐるしいほどの発展 を遂げ、新たな天文学の分野を切り開いてきた。これらの望遠鏡によって確立されてきた IACT の 観測技術と成果を継承し、これまでにない台数・検出面積を達成することでガンマ線天文学の新た なる飛躍を目指す次世代のガンマ線天文台建設計画が Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画で ある。CTA では大・中・小と口径の異なる望遠鏡を南北両半球の2サイト合計で100台以上配置 することで広いエネルギーレンジと検出面積をカバーし、現行の望遠鏡よりも一桁以上高い感度で 20 GeV から 100 TeV 以上のガンマ線観測を行うことを目標としている(図 3.1)。

CTA は現在では 29 か国の 200 の研究機関から 1200 人を超える研究者が参加する巨大プロジェ クトとして進められており、2015 年からの建設開始、2017 年の部分観測開始、2020 年の全望遠鏡 によるフル観測開始に向けて研究開発が行われている(図 3.2)。この章では CTA 計画の概要を示 し、CTA-Japan グループが力を入れて取り組んでいる大口径望遠鏡(LST)のデザインについて 述べる。



図 3.1: CTA 完成イメージ [22]

3.1 CTA 概要

3.1.1 狙うサイエンス

広いエネルギーレンジを持つ CTA が観測対象とするものは多岐にわたる。20 GeV から 100 GeV 程度までの低エネルギー領域では AGN やパルサー、GRB が主たるターゲットであり、100 GeV から 10 TeV の領域では銀河系内及び近傍銀河系外ガンマ線源の広視野深宇宙探査を行う。 10 TeV 以上の高エネルギー領域では銀河宇宙線源の探索が主たる目標となる。これらの観測を通して CTA が狙うサイエンスとしては、銀河宇宙線の起源及び加速原理の解明、宇宙ジェットの構造解明と間接的な EBL 測定による星形成史の理解、ダークマター探査やローレンツ不変性検証といった基礎物理の研究があげられる。これらのほかにも、CTA にはガンマ線のみならず X 線や電



図 3.2: 発見された X 線源、GeV ガンマ線源、VHE ガンマ線源の数。2020 年にフル観測が開始 される CTA では 1000 以上の VHE 天体の観測を目標としている [22]。

波天文学の専門家などが参加しており、他領域の観測機器とのコラボレーションによる多波長・多 粒子観測によって多種多様なテーマについての理解を深め進展させていくことが期待されている。

3.1.2 目標性能

感度

全てのエネルギー領域で現行の約 10 倍の感度を、特に 300 GeV から 3 TeV のエネルギー領域で は 50 時間観測によって 1 mCrab $(10^{-14} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$ の感度を達成する。これが達成されれば 銀河系内の Crab 程度の明るさの定常天体は 30 kpc まで観測が可能となる。図 3.3 に CTA の 50 時間観測で得られる感度曲線である。CTA の感度を制限している主たる要因は、検出されるガン マ線数・バックグラウンドに対するガンマ線の統計的有意度・バックグラウンドの不定性による系 統的な誤差の 3 つである (図 3.4)。

エネルギーレンジ

大・中・小の異なる口径の望遠鏡を使用することで 20 GeV から 100 TeV の広いエネルギーレン ジでの観測を行う。このうち 20 GeV から 100 GeV の低エネルギー領域観測では前述の感度を決 める要因のうち系統的な誤差が支配的になり観測感度は大きく制限される。しかしこの領域はガン マ線で見通すことの出来る宇宙の深さが急激に変わる領域であり、エネルギー閾値を 20 GeV 程度 まで下げることで初めて宇宙論的な距離にある天体が観測可能となる科学的に重要な領域とされて いる。CTA はこの領域において Fermi 衛星とのオーバーラップを持ち、2018 年に運用期間の終 わる Fermi 衛星を後継することが出来る。また Fermi の運用延長がなされた場合も、ブレーザー などの変動を持つ天体の同時観測による放射起源解明や cross-calibration によるそれぞれの装置信 頼性を向上できるというメリットを得ることが出来る。

1 TeV 以上の高エネルギー領域においては検出されるガンマ線数によって観測が制限されている。しかし 100 TeV という上限エネルギーを達成することによって、銀河系内にある 10¹⁵eV まで 宇宙線を加速する起源天体の同定が可能となる。

角度分解能



図 3.3: モンテカルロシュミレーションによる CTA 50 時間観測によって達成される各望遠鏡の感 度曲線(左図)[31]と、他のガンマ線観測実験との感度比較(右図)[22]。左図の縦軸はかに星雲 からのガンマ線強度を1としてある。

チェレンコフ望遠鏡のステレオ観測技術の発達により現行の望遠鏡でも角度分解能が向上し6 arcmin 程度を観測できるようになったが、この値は他波長での観測観測に比べ劣っている。CTA ではよ り多くの望遠鏡で一つのガンマ線イベントを捉えることによって、1 TeV において 2 arcmin 程度 と言う高い角度分解能を達成できる。シミュレーションによる CTA の銀河面サーベイ結果を図 3.5 に示す。CTA の高い角度分解能によってより多くのガンマ線天体が詳細に観測されることが期待 される。

時間分解能

MAGIC など現行の望遠鏡によって、2,3 分程度の時間変動を持つガンマ線天体が観測されている (図 3.6)。 CTA は広い検出面積と高い感度によって時間変動を持つ天体に対し 10 秒程度と言う高 い時間分解能を持つことになる。遠方の AGN や GRB からのガンマ線の飛来時間のエネルギー依 存性を観測することローレンツ不変性などの基礎物理法則の検証が可能になる。

3.1.3 望遠鏡デザイン

CTA では前述のように広いダイナミックレンジを達成するため大・中・小口径の三種類の望遠 鏡を建設する。大口径望遠鏡 (Large Size Telescope, LST) は 23 m の口径を持ち、南北両半球に 4 台ずつ建設される (図 3.7)。LST は 20 GeV から 1TeV の低エネルギー領域を観測する。口径 比¹ f/d は 1.2 という値を持つ。到来光子の同時性を高めてチェレンコフ光の信号幅を短く保つこ とで夜光の影響を小さくするために、反射面には放物面が使用され(図 3.8)、エレクトロニクスに は GHz での高速波形サンプリングが要求される。集光面のピクセルサイズは 1855 個とされ、ピ クセルサイズは 0.1°、視野は 4.5°となっている。GRB などの突発天体を観測するために 20 秒で 180°回転し、天球上の全ての場所に向けられるように設計される。そのため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)を使用することで全体での重量を 100 トン程度に 軽量化を行っている。

中口径望遠鏡(Middle Size Telescope, MST)は12m 口径を持ち、南北両半球に合計で40台 程度建設される(図3.9)。MSTは100 GeVから10 TeVというCTA において主要な中間のエネ ルギー領域を観測するため機能として単純さ・頑丈さ・信頼性・メンテナンスの容易さが重要とさ

¹ 焦点距離を口径で割ったもの。これを大きくすると視野も広くなるが、構造体として不安定になる。



図 3.4: シュミレーションによる CTA 望遠鏡アレイの感度(青線)及び感度を決める要因[32]。赤 線は宇宙線電子によるバックグラウンド、緑線は宇宙線ハドロンによるバックグラウンド、紫線は 系統的なバックグラウンドの不定性、黒線はガンマ線のカウントレートによるもの。

れる。全天スキャンを効率よく行うために、視野を出来るだけ広げて一様なイメージを得るために Davies-Cotton 光学系² というデザインとなっており、口径比 f/d は 1.3 、視野は 8°という値を 持つ。しかし時間的な同時性は高くなく、MST において同時に入射した光では FWHM で 4 nsec 程度の広がりを持つ。

小口径望遠鏡(Small Size Telescope, SST)は4.3 m 口径を持ち、南半球のみに70 台が建設さ れる。観測領域は1 TeV から 100 TeV の低エネルギー領域を観測する。SST の構造について はSST-1M、ASTRI、GCT という3種類が考案されている。このうち SSR-1M は Davies-Cotton 光学系に基づいており完全なデジタル読み出しを行う(図 3.11、左図)。しかし従来の Davies-Cotton 光学系においては望遠鏡が小さくなってもカメラにはある程度の画素数が求めらるために 装置全体の費用を下げるのが困難であり、到来頻度の少ない高エネルギーガンマ線を捉えるために 必要台数の多い SST に用いるのは困難があると考えられた。そこで ASTRI と GCT においては Schwarzshild-Couder 光学系[35] という主鏡と副鏡の2つの鏡を用いた Dual-mirror 方式の光学系 が用いられている(図 3.11、右図)。この光学系では副鏡の使用により焦点面での画像を縮小し、 マルチアノード PMT や SiPM などの光検出器を使用することでカメラの費用を低減することが出 来る。どの構造も視野はおよそ 9°程度で高視野を達成している。

3.1.4 望遠鏡配置と観測サイト

限られた予算のなかで望遠鏡をどのように配置すれば最適な性能を達成することが出来るか、モンテカルロシュミレーションを用いた検討が行われている。Super Configuration とよばれる 275 台の望遠鏡を仮定し、そのなかに含まれるサブアレイごとに性能が評価され、CTA の感度を最適化できる望遠鏡配置を決定した。結果として得られた望遠鏡配置図を図 3.12 に示す。

また、この配置に加えて南半球には SCT と呼ばれる中口径の Schwarzshild-Couder 光学系を用 いた望遠鏡を 36 台設置することが考えられており、最終的に配置される望遠鏡台数は南北合わせ て 154 台にも上る(図 3.13)。

²元は太陽炉において太陽光を集光するためのものとして考案された [34]。



図 3.5: H.E.S.S. による銀河面サーベイ結果(上)とシミュレーションによる CTA 銀河面サーベ イ結果(下)[22]

これらの望遠鏡を設置するサイトも重要な問題である。CTA には 20 GeV から 100 TeV のガ ンマ線観測に最適な高度 1000-3000 m に平らな 1 km² (北半球)・10 km² (南半球)の敷地が必要 となる。その他にも、空気が乾燥していて夜間晴天率が 60%以上であり、夜光が十分に低いこと などが求められている。これに加えてアクセスやインフラ、政治的安定性などを加味し、北半球の 候補地として、カナリア諸島やメキシコ、アリゾナが上げられている。南半球の候補地としては、 ナミビアとチリが選択されており、2015 年中にはサイトが決定し建設が開始される。これに先立 ち、LST プロトタイプ1号機はカナリア諸島に建設されることが決まっている。

3.1.5 日本の貢献

CTA-Japan は 2009 年の CTA 会議において正式に参加が承認され、現在では約 100 人が参加し ており CTA 全参加者の 10%近くを占める大きなグループとなっている。CTA-Japan では PHYS (物理)、MC (モンテカルロ)、FPI (カメラ)、ELEC(エレクトロニクス)、MIR (鏡)、CAL (キャ リブレーション) というワーキングパッケージごとに研究開発を進めている。各望遠鏡の中でも特 に LST の研究開発においてリーダシップをとり成果を挙げてきた。

3.2 CTA-LST

3.2.1 構造

LST の基本的な構造や概念は MAGIC 望遠鏡の 17 m 口径望遠鏡のそれと同じである。しかし、 MAGIC のものよりも大型化した望遠鏡を 8 台建設することを踏まえた高いコストパフォーマン スの実現や、長期運用に向けた信頼性を得るための様々な改良がなされている。LST の構造図を 図 3.14 に示す。Alt-Azimuth 望遠鏡構造のモデルが採用されており、大きく分けて望遠鏡下部構 造、ドライブ、光学マウントシステムの 3 つからなる。望遠鏡の構造には 20 秒で 180°回転するた めの軽量化や、回転後でも望遠鏡が揺らがず観測が行えるよう慣性モーメントを出来るだけ小さく することなどが求められている。軽量化のためミラーやカメラの支持構造の主な部分には CFRP が用いられている。より耐久性の求められる望遠鏡下部構造などはスチールチューブが用いられて いる。これらの素材を用いることによって慣性モーメントが MAGIC 望遠鏡を単純に 23 m 構造に 拡大したものと比べて約 30 %ほど減らすことが出来ている。望遠鏡下部構造は 6 つの台車によっ て支えられ、この台車が 23.9 m 直径のレール上を動くことで望遠鏡全体が回転する。


図 3.6: MAGIC で観測されたエネルギーごとの Mrk501 のフレアーのライトカーブ [33]。横軸は 1 ビンで 4 分を表す。

ミラーの支持構造は207枚の分割鏡を独立に保持できる構造となっており、実際には200枚の 六角形分割鏡が放物面をなすように支持構造上に配置される。このミラー支持構造は四面体構造を とる2段のスペースフレーム構造からなっており、五面体構造からなるMAGIC望遠鏡のものよ りもはるかに強固な構造となっている。この他、カメラの支持構造アーチ部分は最大2500kgにな るカメラを支えることが出来る十分な強度を必要とする。

3.2.2 分割鏡

分割鏡は先に述べたようにLST 一台あたり 200 枚が配置される。このためLST 全体では 1600 枚もの鏡が必要となるため安価かつ効率よく生産でき無くてはならない。20 GeV から 1 TeV の 低エネルギー領域の観測において十分なチェレンコフ光量を得るために鏡には、カメラ本体や支持 構造が作る影を考慮した上で 330m² 以上の有効面積と、波長 300-550 nm の範囲で反射率 85%以 上であること、望遠鏡への荷重を減らすため重量が 20 kg/m² 以下であることが求められている。 分割鏡は三光精衡所の協力の下で製作が進められている。作成には Cold Slump 法という、曲率が ついた鋳型に鏡の土台となるガラスとアルミハニカムを押し付けて曲率をうつしとる手法で出来た 土台に、スパッタリングコーティングを施すという手順が用いられる。アルミハニカムを土台とす ることで分割鏡の軽量化(43 kg)が達成され、スパッタリングコーティングにより強固な膜によ る高い耐候性と紫外線領域での反射率向上(93%以上)が達成された。図 3.15 に開発された分割 鏡とその配置を示す。形状は辺と辺の間の長さが 1.5 m の六角形状である。実際に配置された鏡の 位置は望遠鏡の持つたわみによってずれるため、鏡の向きをその状態に応じて補正することが必要 である。この補正はミラー支持構造とミラーの間に高精度アクチュエータを挟み、オンラインで制 御することによって行われる。この様なシステムは Active Mirror Control と呼ばれ、MAGIC 望



図 3.7: LST 望遠鏡 [22]



図 3.8: LST ミラー支持構造 [22]

遠鏡によって実用化されている。鏡の向きは望遠鏡中央に設置されるレーザーとそれぞれの鏡に取り付けた CMOS カメラによって確認される。

3.2.3 光検出器

鏡で反射され、集光されたチェレンコフ光は焦点面に設置される光検出器によって電気信号へと 変えられる。低エネルギー領域の観測には高い量子効率低いアフターパルスレートが求められる。 その他長期運用のための長い寿命も必要となる。LST ではこの検出器として浜松ホトニクス社製 の1.5 インチ PMT (R11920-100-20)を用いる。この PMT は Cockcroft-Walton (CW)型の高圧 回路とプリアンプ回路 (PACTA)をセットにしたモジュールとなる。CW 回路は 5V 電源で動か し、後述するスローコントロールボード回路上の DAC 値を 0-1.5 V の間で設定することで PMT に 0-1.5 kV の負高圧を与えることが出来る。プリアンプにはスペインで開発された PACTA チッ プ v1.4 が IC として使用されている。図 3.16 にこの PMT モジュールを示す。 PMT の性能はピ クセルサイズ 0.1°でピクセル数は 1855、ピーク量子効率平均 41% (図 3.17)、アフターパルスレー ト 2 × 10⁻⁴ 以下、パルス幅約 3 nsec ³ (FWHM) となっている。 PACTA チップは CTA の光 検出器用に開発された高帯域な差動出力のトランスインピーダンスアンプ⁴ である。High Gain と

³パルス幅は印加電圧に依存し、高圧になると細くなる。

⁴電流信号を電圧に変換して出力するアンプ



図 3.9: MST 望遠鏡 [22]



図 3.10: Dual-mirror 光学系 [32]。主鏡と副鏡二枚の鏡でチェレンコフ光を集光する。

Low Gain の二系統の Gain を持ち、それぞれのトランスインピーダンスゲイン(TIG)⁵は1200 Ω と 80 Ω である。HG の TIG の測定結果を図 3.18 に示す。

PMT をカメラモジュールとして使用する際隣接させて配置することになるが、入射窓は半球状 をであるために PMT 同士の間に隙間が出来る。ここに入射したチェレンコフ光は検出することが 出来ないために実質的な有効面積が減少し、感度が減少することになる。この隙間を低減するた め、ライトガイドと言う光学部品をとりつける。理想的なライトガイドの形状は Winston cone と いい、チェレンコフ光を効率よく集め、大きい入射角から PMT に入ろうとする夜光を防ぐことが 出来るようになっている。ライトガイド本体は ABS 樹脂で出来ており、大量生産が出来るよう金 型射出方式で作成する。コーン内面には反射材を張ることになるが、既存の望遠鏡で使用されてい るアルミの反射材ではなくより高い反射率(約 99%)を持つ誘電体多層膜の反射材を用いること が検討されている。

⁵入力電流で出力電圧を割ったもの。インピーダンスの次元を持つ。



図 3.11: SST-1M 望遠鏡 [36] (左図) と Schwarzschild-Couder(SC) 望遠鏡 [37] (右図)



図 3.12: 最適化された望遠鏡配置図 [22]。左が南半球で右が北半球サイトの配置。SST は南半球だけに設置される。

サイト	LST	MST	SCT	SST	≣†
南半球	4	25	36	70	135
北半球	4	15		\square	19

図 3.13: 各望遠鏡の設置台数



図 3.14: LST 構造



図 3.15: 開発された分割鏡(左図)とその配置図(右図)



図 3.16: R11920-110-20 と Cockcroft-Walton 高圧回路、プリアンプ回路 (PACTA) で構成され る PMT モジュール



図 3.17: R11920-100-20 の量子効率 [22]



図 3.18: PACTA HG TIG 測定結果。横軸は入力した電流値で、縦軸は出力された電圧値。この傾 きが TIG である。



図 3.19: IACT に搭載されるライトガイド概略図 [38] と試作されたライトガイド [22]

第4章 CTA-LST 読み出し回路

焦点面カメラでチェレンコフ光子が電気信号に変えられ、プリアンプ回路で増幅されて読み出し 回路に入力される。入力されたアナログ信号をデジタル変換し、データとしてストレージに送り出 すことが読み出し回路としての役目である。しかしこれまでに述べたように夜光バックグラウンド と数 nsec の短い時間幅を持つチェレンコフ光による信号を効率よく分離して観測するためには、 GHz でのサンプリングが必須となる。

しかし一般的な Flash ADC 方式でのサンプリングではサンプリングスピードを上げると消費電 力も大きく上がるなどの欠点も多い。そこで CTA-Japan ではアナログメモリを搭載することで低 消費電力での GHz サンプリング回路を開発してきた。本章ではまず読み出し回路に要求される性 能を示し、アナログメモリの特徴と機能について述べる。そしてこれまでに開発されてきた読み出 し回路及び接続される周辺回路の構成についてまとめる。

4.1 読み出し回路目標性能

これまでも述べてきたように、IACT での地上観測ではチェレンコフ光だけでなくノイズとして 夜光バックグラウンドが入射してくる。観測場所や観測条件にもよるがおよそ 300 MHz 程度にな る。するとチェレンコフ光の信号幅が 3 nsec だったとするとチェレンコフ光信号の中に 0.9 個の 夜光が入射することになる。この数は当然電荷積分をする時間幅が長ければ長いほど大きくなるた めに観測できるエネルギー下限が制限されることになる。そこでサンプリングする周波数を高速化 し、出来る限り夜光を含まない部分のみを積分することが必要になる。このことから LST の読み 出し回路には GHz での波形読み出しが要求される。

また、電気回路であるために当然電気的なノイズも観測の障害となる。そこで読み出し回路のノ イズレベルは 0.2 photoelectron (phe)以下であることが求められる。さらに、1855 本という多く の PMT からの信号を読み出す必要があるため、LST 全体として消費電力は膨大になり発熱量も 非常に大きくなることが考えられる。そのため消費電力は 3 W/ch 以下に抑えることが求められて いる。この他広いエネルギー領域を観測するために 2000 phe というダイナミックレンジ、数 nsec 幅のチェレンコフ光信号を測定するための 300 MHz の帯域、1%以下のクロストーク、3.5 µsec 以 上のメモリ深さ¹ などの性能が要求されている。

4.1.1 回路構成

図 4.1 に読み出し回路のブロック図を示す。図の緑枠で囲まれた読み出し回路基板 1 枚に対して PMT 7 本が接続されて 1 クラスタを構成する。PMT 7 本からの信号がプリアンプによって High Gain、Low Gain の 14 組の差動ペアに分けられて入力される。その信号はメインアンプに入力さ れ、High Gain、Low Gain、トリガラインの信号として出力される。High Gain と Low Gain 出力 は DRS 4 においてサンプリングが行われ、ADC でデジタル化されてから FPGA 内に一度格納さ れた後、ギガビットイーサネット通信により外部のストレージに転送され、数値データとして処理 が出来る形で保存される。このデータ通信とは KEK で開発された SiTCP[39] というハードウェ

¹サンプリングを止めずにメモリの中に電荷情報を保存しておくことの出来る時間の長さ

アによる TCP/IP/Ethernet 通信を行うためにプロセッサを FPGA に実装して行われる。FPGA 内でハードウェア的に並列処理を行えるために高速 (950 Mbit/sec) でデータ転送が行える。

周辺機器としてはスローコントロールボード、トリガ生成回路(mezzaine、バックプレーン)が 接続される。周辺回路については 4.5 節に後述する。読み出し回路と PMT 及び周辺回路を接続し たクラスタの写真を図 4.2 に示す。



図 4.1: 読み出し回路のブロック図



図 4.2: 読み出し回路 Ver.4 クラスタ。サイズは 52 cm × 14 cm。



図 4.3: 周辺回路を含めた信号の流れ

4.2 アナログメモリ DRS4

前述のように LST では GHz での高速波形サンプリングと低消費電力の両方を実現させる必要 がある。Flash ADC を用いた方法は A/D 変換を行った後にリングバッファメモリに記録を行う ために長時間のメモリ深さを達成できるなどの利点もあるが、1 チャンネルあたりでの消費電力が 数 W と大きく値段も高価になるために使用する光検出器の多い CTA-LST には望ましくない。そ こでこれらの要求を達成する方法として読み出し回路にアナログメモリを使用している。

アナログメモリとは、複数のキャパシタを並列に並べて、それらの入出力部分をスイッチとして の役割をなすトランジスタで接続したものである(図 4.4)。このスイッチを高速なスピードで切



図 4.4: アナログメモリの簡単な回路図

り替えることで入力された波形情報をアナログ信号のまま保存することが出来、同時にデジタル変換を行わないためにこの切り替えスピードをそのままサンプリングスピードとすることが出来る。 アナログメモリはそれぞれのキャパシタに出力用のスイッチも接続され、これを切り替えることで 各キャパシタに保存された電荷を順次出力することができる。一般にこれをADC につないでデジ タル変換を行うが、出力のスイッチングのスピードを低速に設定することで、ADC の変換スピー ドも低速に抑えることが出来る。 LST 用の読み出し回路において使用するアナログメモリは、スイスの PSI 研究所が MEG 実験² 用に開発された DRS4 という ASIC を使用する(図 4.5)。サンプリングスピードは 700 MHz から



図 4.5: DRS4 ブロック図 [40]

5 GHz で可変であり、REFCLK に与えるクロック周波数を f Hz とするとサンプリングスピード f_{Sampl} は 2048f Hz として与えられる。9 つの差動入力チャンネルを持っており、それぞれのチャ ンネルで 1024 個のキャパシタが並ぶ。入力レンジは peak to peak で 1 V、950 MHz の帯域を持 ち、差動出力を直接 ADC 接続できる。2GHz サンプリング時には 17.5 mW/ch と低消費電力であ り、0.35 mV 以下という低ノイズである。Domino Wave Circuit というインバータを連結させた 回路上を流れるパルス信号が各入力スイッチを切り替えていくことで、波形をサンプリングするこ とが出来る。キャパシタはリング状に連結しており、0-1023 番目までのキャパシタにサンプリン グが行われると一周して再び 0 番目のキャパシタに電荷情報が保存されるようになる。そのため 1 チャンネルあたりのメモリ深さは 1024/ f_{Sampl} sec となるが、1 周するごとに波形のサンプリング を行うチャンネルを切り替えることで、チャンネルの数だけメモリ深さを増やすことが出来る。こ のような手法をチャンネルカスケードと言う。

サンプリングされた電荷情報の読み出し方は読み出しを行いたいチャンネルの 1024 個のキャ パシタ全てを読み出す Full Readout Mode と、読み出したい数のキャパシタのみ読み出しを行う Region of Interest (ROI) Read out Mode の二通りが選択できる。LST 読み出し回路では、サン プリング速度 1-2 GHz、チャンネルカスケード 4 チャンネル、読み出し時間幅 30 nsec、出力周波 数 33 MHz で使用される。

4.3 プロトタイプ読み出し回路 Ver.3

前述の目標性能を達成するため、LST 用読み出し回路として Dragon (Domino Ring Acquisition with Gigalink Over Network) が開発されてきた。プロトタイプ読み出し基板 Ver.3 を図 4.6 に示 す。この基板は京都大学の今野さんの修士論文において開発された [41]。この読み出し基板に対し、 PMT 信号からトリガを生成するための回路や電源供給等を行うための回路 (バックプレーンと言う)が別途接続される。電源としてバックプレーン上から 12 V が入力され、バックプレーンに配置された DC/DC コンバータで読み出し回路及びその周辺回路上の各素子で使用される電圧値に 調整され、読み出し回路上に送られる。入力された PMT からの信号はメインアンプを通して増幅 された後 DRS4 でサンプリング (Ver.3 の試験においては 2 GHz サンプリング) され、ADC に よってデジタル変換される。デジタル化された信号は FPGA で処理された後、バックプレーン上

²ミュー粒子の電子転換過程を探索するための実験

のRJ45 コネクタを通してイーサネットでストレージに送られる。Ver.3 においてはPMT からは シングルエンド信号を受け取るようになっており、入力された信号がメインアンプによって、High Gain、Low Gain、トリガラインの3 つの Gain の異なる系統にごとに出力される。これは、波高 値の低い入力信号はHigh Gain で大きく増幅された出力をサンプリングすることによって良いSN 比で波形取得を行い、波高値の大きい入力信号に対しては低い増幅率でDRS4 の入力範囲を超え ないよう調整することで広いダイナミックレンジを確保することが目的である。

読み出し回路 Ver.3 について行われた試験で得られた性能値について表に示す。



図 4.6: 読み出し基板 Ver.3.。基板サイズは 136 mm × 289 mm。

測定項目	要求値	Ver.3 性能					
ノイズレベル	0.2 phe	0.1 phe					
ダイナミックレンジ	2000 phe	3900 phe					
帯域幅	300MHz	280MHz (High Gain), 200 MHz (LowGain)					
クロストーク	1%	最大 1.6%					
消費電力(PMT クラスタ、トリガ回路含む)	3 W/PMT	2.4 W/PMT					

表 4.1: これまでの試験で得られていた Ver.3 の性能 [41]

4.4 読み出し回路 Ver.4

4.4.1 Ver.3 からの変更点

LST 望遠鏡初号機搭載に向けて新たに開発された読み出し回路 Ver.4 を図 4.8 に示す。読み出 し回路 Ver.4 は京都大学の畑中さんの修士論文で開発され [42]、電源系の変更は土屋が担当した。 Ver.3 から Ver.4 での大きな変更点がいくつかあげられる。まず、入力された電源電圧から読み出 し回路で使用する電圧に変換するためにバックプレーン上に配置されていた DC/DC コンバータを 読み出し基板上に吸収したことである。さらに供給される電源電圧が 24 V に変更され、DC/DC コンバータから出力する電圧値も変更された (4.4.2 節に後述)。これは実際の望遠鏡搭載に向け た MST 用読み出し基板 との仕様共通化のためである。また、プリアンプ から読み出し回路へ出 力される信号が差動信号とに変更されたために、メインアンプが差動入力へと変更された。さら に PMT に接続されるプリアンプにおいて High Gain と Low Gain の二つの増幅率の異なる系統 を出力することになったため (図 4.7)、読み出し基板は 7 チャンネル × 2 系統 × 2 (プラスとマ イナスの差動信号) で合計 28 個の信号を PMT から受け取ることになった。プリアンプの High Gain 出力は読み出し基板メインアンプの High Gain とトリガラインに、プリアンプの Low Gain は読み出し基板メインアンプの Low Gain にそれぞれ接続される。その他コネクタの変更なども行 われ、望遠鏡初号機搭載に向けたデザインに変更されている。



図 4.7: 変更されたプリアンプ及び読み出し回路メインアンプの概略図。赤い線は差動線を表す。



図 4.8: 読み出し基板 Ver.4。基板サイズは 136 mm × 350 mm。

4.4.2 電源系

電源系の変更は土屋が担当した。読み出し回路 Ver.3 において電源は+12 V が供給されバック プレーン上に置かれた DC/DC コンバータで変換していたが、MST との仕様共通化や冷却系実装 に向けて Ver.4 では入力電圧を+24 V³ に変更し、DC/DC コンバータを読み出し基板上に移動さ せるという変更を行うことになった。また、PMT 用高圧回路へ送る電圧も+5 V から+6 V へ変 更された。Ver.3 と Ver.4 の電源系の概略図を図 4.9 に示す。トリガバックプレーン上から供給さ



読み出し回路Ver.3

読み出し回路Ver.4

れる+24 V は、読み出し回路上の DC/DC コンバータにより+6 V と \pm 3.3 V に変換される。この 変換においては高効率を達成するため DC/DC コンバータとしてスイッチングレギュレータが用 いられる。読み出し回路ではこの他 IC 用電源として+2.5 V と+1.8 V、+1.2 V が必要であるた め、リニアレギュレータを用いて+3.3 V から変換される。

この電源系変更に伴い、本論文において、Ver.4 で使用する DC/DC コンバータのデバイスの選定や、周辺部の抵抗及びコンデンサの値の決定等の電源系回路開発を行った。デバイスの選定に当たっては、Ver.3 で使用していたものとピン互換性を持つことや、Ver.4 で使用する入出力電圧値に対して電力消費を抑えるために変換効率が出来るだけ高いデバイスを使用することを考慮に入れて選んだ⁴。また、実際に Ver.4 回路図に組み込む前に、Ver.3 用のバックプレーン上のデバイスを交換することで電源系変更後の出力電圧値とそのノイズレベルの確認も行った。これらの試験結果については後述の 6.1 節で詳しく示す。

4.4.3 メインアンプ

高速オペアンプは負帰還される量が電圧なのか電流なのかによって電圧帰還型と電流帰還型(図 4.10)の二つに分けられる。このうち電圧帰還型のオペアンプは周波数帯域を f_{close} とするとゲイ ン帯域幅積 f_T 、ゲイン $1/\beta$ として、 $f_{close} = f_T \times \beta$ という式が成り立つ。そのためゲインを大 きくすると f_{close} が小さくなり周波数帯域が悪くなる。それに対し電流帰還型アンプはきわめて広 い帯域幅と高いスルーレートを持つ。そこでメインアンプでは Analog Devices 社の電流帰還オペ

図 4.9: 読み出し回路 Ver.3 の電源系 (左) と Ver.4 の電源系 (右)

³入力電圧の範囲は DC/DC コンバータに依存し、データシートより+12 V ~+36 V である

⁴+24 V から+6 V への変換効率 90%、+24 V から+3.3 V への変換効率 82%



図 4.10: 電流帰還型アンプの等価回路図 [43]

アンプ ADA4927 を用いており、High Gain、Low Gain、トリガラインの 3 つの異なる Gain の系 統を持つ。

本論文において Gain の調整を行い、High Gain と Low Gain はダイナミックレンジ 2000 phe が達成でき、デジタル変換の際に ADC1 カウントあたりの電圧値を出来るだけ小さくすることでエ ネルギー分解能を極力下げないよう設計した。また、電流帰還型のオペアンプの特性としてフィー ドバック抵抗 R_f を大きくしすぎるとゲインが下がり、小さくするとフィードバック電流が大きく なることで回路が安定でなくなるため、 R_f の最適値を考慮して入力抵抗値などを決めた。ダイナ ミックレンジ 2000 phe は 1000 phe に変更される可能性があるが、Low Gain 周辺の抵抗を付け替 えることによって Gain の修正が簡単に行える。

High Gain は1つのオペアンプにおいて Gain を上げすぎると帯域が制限されるため、前段と後 段の2回に分けて増幅し、後段アンプを2つ用いて計4つの出力をDRS4に接続する。Low Gain は1つの ADA4927 から信号を4つに分けてDRS4に接続している。出力が4つ必要なのはDRS4 を4 チャンネルカスケードするためのものである。High Gain 後段に ADA4927 を2つ用いてい るのは、1つのアンプの出力線を4つに分けると電流値が減少し、DRS4 を高い帯域を保って駆動 させることが困難になるためである。DRS4 接続数による帯域の変化については後述の 5.1 で詳し く述べる。Low Gain に入射される PMT 信号は phe 数の多い信号であり信号幅が High Gain に 比べて広がるために高い帯域は要求されない。そのため Low Gain は1つの ADA4927 から DRS4 4 チャンネル分の信号を出力させる。



図 4.11: メインアンプブロック図。ゲインはダイナミックレンジ 2000 phe 用に調整されたもの。

4.4.4 DRS4

読み出し回路上の DRS4 では4 チャンネルカスケード用に1 つの信号が4 つのチャンネルに入 力される。DRS4 は1 チップにつき9 個のチャンネルを持っているため2つの PMT からの信号を 入力することが出来る(残りの1 チャンネルは FPGA からのクロック信号を受け取れるようにす ることでキャリプレーションに用いる)。そのため読み出し基板上には High Gain 用として4 個、 Low Gain 用として4 個、合計8 個の DRS4 チップが搭載されている。

DRS4 は各キャパシタにバッファがついており、出力に数十 mV 程度のオフセットが乗ること が分かっている。このオフセットの値は各キャパシタごとに固有であるために信号を入力していな い状態での DRS4 の出力を調べることによって補正値を求めることが出来る。DRS4 のオフセッ トの一例を図 4.12 に示す。



図 4.12: DRS4 のオフセット。5GHz サンプリングで測定時。DRS4 データシートより。

4.4.5 ADC

DRS4 から出力された信号は ADC に入力されてデジタル変換される。ADC には Analog Devices 社の AD9222 が用いられる。これは 8 チャンネルの入力を持つため 1 チップで全ての DRS4 から の出力をデジタル変換できる。12 bit の ADC であり、DRS4 からの出力信号を 33 MHz で変換し て 8 チャンネル分の信号を並列に FPGA に送ることが出来る。

4.4.6 FPGA

FPGA (Field Programmable Gate Array)とはハードウェア記述言語を用いて内部にハード的 にロジックをプログラムすることの出来る半導体デバイスである。マイコンなどと違いハードウェ アとして内部を書き換えることが出来るために動作が高速であり、ASIC などと違い専用の回路を そのつど構成することが出来て開発の時間も短縮できる。読み出し回路 Ver.4 においては FPGA として Xilinx 社の Spartan-6 を用いている。DRS4 のコントロールや ADC から入力してくるデー タの処理、データ通信や各 DAC 値の設定などが行える。

4.5 周辺回路

4.5.1 バックプレーン

読み出し回路 Ver.3 のカメラ後方に接続されるバックプレーンは京都大学で製作されており [44](図 4.13)、イーサネット用の RJ45 コネクタと、トリガバックプレーンを接続するためのコネクタが配

置され、その他にも電源供給やテストパルスを使用したテスト用のトリガ入力が出来るようになっていた。バックプレーンに供給された+12 V からこの基板上に配置された DC/DC コンバータで ± 3.3 V と+5 V に変換され、読み出し基板上に電源が供給される。

読み出し基板 Ver.4 では DC/DC コンバータを読み出し基板上に吸収し、イーサネットケーブ ルはトリガバックプレーン上に配置されることになった。



図 4.13: Ver.3 で用いられるバックプレーン。トリガ回路を接続する面(左)と読み出し基板と接続する面(右)。

4.5.2 スローコントロールボード

スローコントロールボードはプリアンプ基板を介して 7 本の PMT が接続され、PMT と読み出 し基板をつなぐ役割を果たし、PMT に与える高圧の設定や PMT のアノードカレントモニタ、テ ストパルスの生成機能等を持つ。基板上には CPLD が設置され、読み出し回路の FPGA とシリ アル通信を介してこれらの機能を制御できるようになっている。生成できるテストパルスの波高 値は読み出し回路のダイナミックレンジの幅に調整されており、この機能を用いて読み出し回路の キャリブレーションが行われる予定である。PMT にあたえる高圧は 12 bit の DAC によってコン トロールされ、0 V から 1.5 V までを約 0.37 mV 刻みで設定することができ、DAC で発生させ た電圧の 1000 倍の電圧が、Cockcroft-Walton 回路によって生成される。

4.5.3 トリガ回路

チェレンコフ光からのイベントと夜光によるノイズのイベントを切り分け、チェレンコフ光のイ ベントのみを選択的に取得するためにトリガ回路が用いられる。IACT においては入射した波高 値がスレッショルドを超えたどうかというような単純なトリガではなく、シャワーから得られるイ メージを利用することを考える。つまり、単一のピクセルのみでなく隣り合うピクセルが同時に信 号を検出したかどうかでトリガをかけることが必要である。LST ではこのようなシャワーイメー ジを利用したトリガ回路としてデジタルトリガ方式とアナログトリガ方式の2 通りのトリガ回路 が開発されている。どちらの方式においても mezzanine と呼ばれる読み出し回路上に小亀基板と して設置される基板と、トリガバックプレーンと呼ばれる読み出し回路後方(PMT 接続側に対し て反対側)に接続される基板の2 つが使用される。トリガバックプレーン上のコネクタを介して 他のクラスタとも接続することが出来、他クラスタからのトリガ通信の役割もになう。また、前述 のようにトリガバックプレーン上にはイーサネットのコネクタが配置され、読み出し回路でサンプ



図 4.14: スローコントロールボード V2 。 左が PMT 接続面で右が読み出し基板接続面。右の画像 中央の素子が CPLD。

リングされた波形データの通信も行う。トリガ回路への要求としては、トリガの判定を数百 nsec 程度で行うことが出来、100 kHz のトリガに耐えうることなどが要求されている。

4.5.3.1 デジタルトリガ

デジタルトリガの信号の流れを表すブロック図を図 4.15 に示す。デジタルトリガ方式では、L0 トリガ mezzanine 回路と L1 トリガ バックプレーンと言う 2 つの基板が用いられる(図 4.16)。各 チャンネルのメインアンプのトリガラインからの出力を受け取り、その信号がコンパレータの閾値 を超えていた場合、そのチャンネルに関する Level 0 (L0) トリガを生成する。各チャンネルについ て生成された L0 トリガをバックプレーン上に送り、トリガ通信で隣り合うクラスタから送られて くる L0 トリガも含めて最大 49 個の L0 トリガを受けて n NN (Next Neibor) ロジックという方 法で Level 1 (L1) トリガを生成するか否か判断する。n NN ロジックとは、n 個の隣り合う PMT チャンネルから L0 信号が生成されていたらバックプレーン上の FPGA から L1 トリガを生成する というロジックである。この n の値は FPGA で設定を変更することが出来る。L0 トリガの時点 でデジタル信号として処理できるために信号が扱いやすく、ロジックも回路も単純であるために非 常に扱いやすい。

L0 トリガの各チャンネルのコンパレータの閾値は読み出し回路の FPGA で設定することが出来 る。L1 トリガを待たずに L0 トリガのみで波形取得を行うことも出来、どちらのトリガを用いるか という設定も FPGA で変更可能である。また、L1 トリガ基板には外部からクロックを入力するこ とが出来、望遠鏡としての運用時には同期したクロック信号が全クラスタに送られることになる。

4.5.3.2 アナログトリガ

アナログトリガ回路の全体での信号の流れを図 4.17 に示す。アナログトリガ方式では、L0 トリ ガ mezzanine 回路と L1 トリガ mezzanine 回路、トリガバックプレーンの 3 つの回路が用いられ る。L0 トリガ mezzanine 回路のブロック図を図 4.18 に、L1 トリガ mezzanine 回路のブロック図 を図 4.19 に示す。 最新のトリガ回路では、独自に開発された L0 ASIC チップ と L1 ASIC チッ プがそれぞれの mezzanine に設置されている。

L0 トリガには Sum 方式と Majority 方式の二通りがあり、L0 ASIC 上のレジスタに対して読み 出し基板の FPGA からシリアル通信を行うことで変更可能である。L0 Sum 方式では、メインア



図 4.15: デジタルトリガのブロック図。トリガバックプレーンを介して隣り合う6 つのクラスタ 全てとつなげられる。自クラスタと隣接クラスタで生成された L0 トリガをバックプレーン上の FPGA に集め、n NN ロジックで判断し、L1 トリガを自クラスタと隣接クラスタの読み出し基板 上の FPGA に送る。

ンプのトリガラインから出力されたトリガ信号を L0 mezzanine 上の ASIC 内部のアテネータで減 衰させて PMT 間の信号レベルを調整し、クリッピングをした後、1 クラスタの7 本の PMT 信号 全てをアナログ信号のまま足し合わせ、L0 信号として出力する(図 4.20)。クリッピングとはあ る閾値以上の電圧値を切り落とし、閾値以下の電圧値のみが出力されるようにする処理のことであ る。アフターパルスなどの大きな信号が1 ピクセルのみに入射しても、クリッピング機能があれば 閾値以上の電圧を切ることでトリガがかからないように調整できる。Sum 方式は MAGIC におい て使用実績があり、エネルギー下限値を下げることに貢献している。一方、L0 Majority 方式では トリガラインからの信号それぞれをコンパレータに通し、出力された信号をアナログ的に足し合わ せる。つまり足しあわされた信号の波高値はコンパレータの閾値を越えた本数に比例することにな る。この信号を L0 信号として出力する。

出力された L0 信号はトリガバックプレーンに送られ、周囲のクラスタに分配される。その後周 囲のクラスタからの L0 信号と共に L1 トリガ mezzanine に送られる。入力された L0 トリガは定 めされたパターンにそって足し合わされ、足しあわされた信号の波高値がコンパレータの閾値を 越えていた場合 L1 トリガ信号が出力される。足し合わせるパターンやコンパレータの閾値は L1 ASIC チップのレジスタに書き込む値によって定めることが出来、L0 ASIC と同様に読み出し回路 の FPGA から変更することが可能である。出力された L1 信号はトリガバックプレーンを通して 望遠鏡全体に送られ、各読み出し回路の FPGA によって受け取られ、波形の読み出しが行われる。 アナログトリガにおいては波形をアナログ的に足し合わせるために、PMT からの出力信号の到



図 4.16: 最新版のデジタルトリガ回路。 左が L0 トリガ mezzanine。 右が L1 トリガバックプレーン。



図 4.17: アナログトリガ回路における信号の流れ。入力された各チャンネルの信号(緑の矢印) が L0 mezzanine 回路に入ってから最終的に L1 トリガ信号として読み出し回路の FPGA に入り (Readout に向かう橙の矢印)、信号読み出しが行われる。LST Review (2013) スライドより。

着タイミングが一致していなければならない。そのため L0 トリガ mezzanine には入力波形を遅延 させるための回路が実装されており、0.25 nsec 刻みで信号の到着タイミングの微調整が可能であ る。この遅延時間も読み出し回路の FPGA から設定することが出来る。また、それぞれの回路の 写真を図 4.21、4.22 に示す。

クラスタ間でのアナログトリガ通信の概略図は図 4.23 のようになる。クラスタの位置によって L1 トリガ信号が送られる方向が決まっており、望遠鏡内のあるピクセルで生成された L1 トリガ信 号が一度中央のクラスタに送られた後、カメラ全体へと分配されていく。クラスタの配置される位 置によって L1 トリガ信号が到着する時間に差があるため、読み出し回路からトリガバックプレー ンにコマンドを送り各クラスタごとに遅延を設定することで同時に L1 トリガ信号が到着するよう 調整する。



図 4.18: Analog L0 ASIC mezzanine ブロック図。上図が L0 mezzanine 全体を表し、下図は ASIC 内部での信号の流れを表す。クリッピングされた 7 本の PMT 信号が Sum されて一つの L0 信号 となる



図 4.19: Analog L1 ASIC mezzanine のブロック図。各クラスタの L0 mezzanine で生成された L0 信号がトリガバックプレーンを通して隣接クラスタに分配される。それらの信号が L0 mezzanine 上で定められたパターンに ADDER で足し合わされ、コンパレータで閾値と比較される。閾値を 越えていた場合、L1 トリガ信号が出力され、トリガバックブレーン上に送られ、望遠鏡の全クラ スタに分配される。



図 4.20: L0 トリガ mezzanine で行われるクリッピングと足し合わせのイメージ図。閾値以上の信号は閾値までの電圧値のみが出力され、閾値以下の信号はそのまま出力される。その後出力波形を足し合わせたものを L0 信号として出力する。実際にはこの操作が 7 本の PMT 波形全てに行われ、7 つの信号が足し合わされたものが L0 トリガ信号として出力される。



図 4.21: 最新版のアナログトリガバックプレーン



図 4.22: Analog Trigger ASIC mezzanine。 左が L0 mezzanine で右が L1mezzanine。 L1 は開発 中のものであり、コネクタ基板に接続して用いる。



図 4.23: アナログトリガ通信の概略図。望遠鏡上では各クラスタのトリガバックブレーンがそれぞれの隣接するクラスタと接続される(上図)。

第5章 読み出し回路性能シミュレーション

読み出し回路のサンプリング速度の決定、LST帯域要求性能の達成に向けた回路改良に向けてシ ミュレーションを行った。この章ではそれらのシミュレーションで得られた結果についてまとめる。

5.1 サンプリングシミュレーション

メモリ深さを確保するために読み出し基板のサンプリングスピードを以前まで想定されていた 2 GHz ではなく、1 GHz で行うこととなった。要求されるメモリ深さは 3.5 μ sec であるが、これを 達成することが可能なサンプリングスピードは 4 ch カスケードの場合キャパシタが 4096 個並ぶこ とになるので最大 4096 / 3.5 μ = 1.17 GHz までである。

サンプリングスピードをこれまで想定していた速度の半分に落とすことによる影響や、1 GHz と 1.1 GHz のような 0.1 GHz 程度のサンプリングスピードの違いによってどの程度波形の再現に影 響が出るのかを確認するため、簡単なサンプリングシミュレーションを行った。まず、PMT から 出力される波形平均¹ (0.2 nsec 刻み)を数値データとして取り出し、スプライン関数を用いて連 続な関数として補完する。その関数上で乱数を用いて始点を定め、ある時間間隔 T 毎に波形の終 点まで関数上に点を取っていく。そうして得られたデータ点を 1/T Hz でサンプリングを行った場 合に得られる波形として、時間について積分し電荷量を得る。これを始点乱数を変えながら 10 万 イベント繰り返し、電荷量の分布を見た。PMT 波形の FWHM を 4 nsec, 2 nsec, 1 nsec とした場 合それぞれに対し、サンプリングスピードを 2 GHz から 1 GHz まで 0.1 GHz ずつ変化させたと きのシミュレーション結果をそれぞれ図 5.1, 5.2, 5.3 に示す。

最上段の左図は使用した PMT 波形、中の図の赤点が1 GHz、右図の青点が2 GHz でサンプリングを行ったときの一例である。ヒストグラムの横軸は

 \frac{nGHz} サンプリングでのチャージ 連続パルスでのチャージ

で得られた値であり、100 をかけたものは真の電荷からの誤差 (%) である。この結果より FWHM 2 nsec よりも太い波形に対しては 1~2 GHz の間のサンプリングスピードの変化では得られる電 荷量の誤差は $10^{-2\%}$ 以下であり、有意な差はないことが確認された。一方、FWHM 1 nsec の細 い波形ではサンプリングスピードを下げていくと誤差が徐々に大きくなっていき、1 GHz サンプ リングでは±10%程度の誤差が現れることが分かった。

CTA で使用される PMT 波形の FWHM は最小でも 2 nsec 程度までであるため、サンプリン グスピードを 1 GHz に変更しても波形積分によって得られる電荷量に影響を与えないことが分 かった。

5.2 Pspice による回路シミュレーション

数 nsec 程度の幅の信号を測定するために読み出し回路には-3 dB で 300 MHz という帯域幅が 求められている。しかし、読み出し回路 Ver.3 では High Gain の周波数帯域が 250 MHz [41] と要

¹CTA 望遠鏡シミュレーションで使用されているデータを用いた



図 5.1: FWHM 4 nsec 波形入力時のサンプリングスピードごとの波形積分値の真値からのずれ。最 上段の左図は使用した PMT 波形、中の図の赤点が1 GHz、右図の青点が2 GHz でサンプリング を行ったときの一例。二段目左上から最下段の右下にむけて2 GHz から1 GHz まで 0.1 GHz 刻み でサンプリングスピードを変化させた。どのサンプリングスピードにおいても最大誤差は 10⁻⁴% 程度。

求値よりも低い帯域となっていたため、帯域改善のために読み出し回路 Ver.4 ではメインアンプに 4.4.3 節で述べたように、メインアンプの High Gain の後段にオペアンプ ADA4927 を二つ使用し て、一つあたりに接続する DRS4 の数を減らすという 変更が加えられた。実際にこの変更が帯域 にどのような影響を与えるのか、回路シミュレーターである Pspice を用いて読み出し回路 Ver.4 のメインアンプ及び DRS4 の等価回路を再現し、AC 解析² を行うことで読み出し回路の帯域シ ミュレーションを行った。DRS4 の等価回路としてはデータシート上の入力容量と入力インピーダ ンスを参照した(入力容量 11 pF、入力インピーダンス 6.3 k Ω/f_{SAMP} [GHz])。

まず、アンプ直後に接続する DRS4 チップの接続チャンネル数が帯域にどれほどの影響を及ぼ すか確かめた。その際に用いた回路図を図 5.4 に、得られた帯域シミュレーションの結果を図 5.5 に示す。

この結果より、接続する DRS4 のチャンネル数を 4 チャンネルから 2 チャンネルに減らすこと で 100 MHz 程度の帯域改善が期待出来ることがわかった。Ver.3 の High Gain の帯域が 250 MHz であったことから、今回の変更により、Ver.4 では帯域の要求値である 300 MHz を達成できるこ とが期待される。

次に、DRS4 のサンプリングスピードによる帯域の変化を確認する。DRS4 の入力インピーダン スは $6.3 k\Omega / f_{SAMP}$ [GHz] でありサンプリングスピードに依存しているため、帯域に影響を及ぼす

²ネットワークアナライザのように周波数特性を測定するためのもの。



図 5.2: FWHM 2 nsec 波形入力時のサンプリングスピードごとの波形積分値の真値からのずれ。最 上段の左図は使用した PMT 波形、中の図の赤点が1 GHz、右図の青点が2 GHz でサンプリング を行ったときの一例。二段目左上から最下段の右下にむけて2 GHz から1 GHz まで 0.1 GHz 刻み でサンプリングスピードを変化させた。どのサンプリングスピードにおいても最大誤差は 10⁻³% 程度。

ことが考えられる。DRS4の入力インピーダンスが1GHz、2GHz、5GHzの場合になるように 変化させ、それぞれの場合の帯域シミュレーションを行った際の結果を図5.6に示す。この結果よ りDRS4で取りうる1~5GHzの間のサンプリングスピードの変化は帯域には影響を及ぼさない ことがわかった。



図 5.3: FWHM 1 nsec 波形入力時のサンプリングスピードごとの波形積分値の真値からのずれ。 最上段の左図は使用した PMT 波形、中の図の赤点が1 GHz、右図の青点が2 GHz でサンプリン グを行ったときの一例。二段目左上から最下段の右下にむけて2 GHz から1 GHz まで 0.1 GHz 刻みでサンプリングスピードを変化させた。1 GHz サンプリングにおいては 10%程度の最大誤差 が出る。



図 5.4: シミュレーションに使用した、DRS4 等価回路を1 チャンネル接続した回路図。赤枠内が DRS4 等価回路であり、これを接続する数を変えながら AC 解析を行う。



図 5.5: Pspice シミュレーションによる DRS4 の接続 ch 数ごとの帯域



図 5.6: Pspice シミュレーションによるサンプリングスピードによる帯域の変化。

第6章 読み出し回路性能試験

この章では開発された読み出し回路 Ver.4 に対して行われた性能評価試験の結果についてまとめる。特に記載のない場合、サンプリング速度は 1 GHz 、チャンネルカスケードは行わずメモリ深さ 1 µsec で測定を行っている。

6.1 電源系試験

読み出し回路 Ver.3 から Ver.4 への改良にあたり、MST 読み出し回路との仕様共通化に向けて 電源系について 4.4.2 節に述べたような変更が行われる。Ver.3 で使用されていた DC/DC コン バータは最大入力電圧が+20 V であったために+24 V 入力が可能な素子に変更する必要がある。 電源系の変更を行うにあたって Ver.3 用のバックプレーン 上の DC/DC コンバータと周囲の抵抗 を変更予定のものに取替えて出力電圧の測定を行い、変更前後で出力ノイズレベルの比較を行っ た。試験時点で+24 V 入力が可能な読み出し基板 Ver.4 は完成していなかったため読み出し基板 には接続せず、バックプレーン単体で測定している。測定の際に用いたセットアップの概略図を図 6.1 に、測定によって得られた変更前後での出力電圧のノイズレベルの変化を図 6.2 に示す。この 結果、 ± 3.3 V 出力は変更前と同程度のノイズレベルであったが+6 V 出力部は変更後のノイズレ ベルが p-p 50 mV まで増加することがわかった。



図 6.1: 読み出し回路 Ver.4 用電源回路試験セットアップ概略図。LMZ は使用した DC/DC コン バータ。

電源系変更前の+5 V 出力時のノイズ波形と変更後の+6 V 出力のノイズ波形を図 6.3 に示す。図 より+6 V 出力波形には周期 20 µsec 程度のリップルノイズが乗っていることが確認された。 しか

	+12V(ver3) ⇒+5V	+24V(ver4) ⇒+6V	+12V(ver3) ⇒+3.3V	+24V(ver4) ⇒+3.3V	+12V(ver3) ⇒-3.3V	+24V(ver4) ⇒-3.3V
р-р	~20mV	~50mV	~20mV	~20mV	~20mV	~20mV
RMS	~5mV	~11mV	~5mV	~7mV	~5mV	~6mV





図 6.3: +5 V 出力時ノイズ(左)と+6 V 出力時ノイズ(右)。DC 成分は除いている。

し使用した DC/DC コンバータ (スイッチングレギュレータ) は低負荷時にリップルノイズが大き くなることが知られており、バックプレーン単体ではなく読み出し回路に接続した場合負荷の増加 によってノイズが減少することが期待され、また、+6 V 出力は PMT に送られる際スローコント ロールボード上のリニアレギュレータで+5 V に降圧されるものであるため影響は無いと判断し、 今回改良した電源系を読み出し回路 Ver.4 に組み込んだ。読み出し回路 Ver.4 完成後に+6 V 出力 を確認したところ、リップルノイズは無くなりノイズは 10 mV 程度まで減少していることが確認 できた。

6.2 ノイズレベル測定

読み出し回路に入力される PMT 信号は、プリアンプによって増幅された後でも High Gain に おいて 1phe で 2.65 mV 程度と非常に小さな信号である。この微小な信号を測定するためには読み 出し回路のノイズレベルは十分に小さくなくてはならない。LST においてノイズレベルの要求値 は 0.2 phe 以下であり、この値が達成されているか測定を行った。測定を行うにあたり、4.4.4 節 で述べた DRS4 上のキャパシタごとに固有なオフセットを補正する必要がある。まず、信号を入 力しない状態でデータのサンプリングを1万イベント行い各キャパシタごとの平均を求めオフセッ トテーブルを作る。このオフセットはサンプリングスピードにはよらないが、温度に依存するため 実際のデータを測定する際のサンプリングスピードで数分間テストランを行うことが望ましい。作 成したオフセットテーブルを用いて各キャパシタの補正を行った際のある1イベントのノイズの分 布を図 6.4 に示す。1万イベントの平均をとるとノイズレベルは~0.09 phe (RMS) となり、要求 値である 0.2 phe を満たしているといえる。



図 6.4: オフセット補正後の 1024 個のキャパシタのノイズ分布 (High Gain)。横軸は ADC 値。

6.3 タイミングキャリブレーション

DRS4 は連結したインバータからなる回路であるために、各キャパシタをつなぐインバータごと に異なる時間特性 (fixed pattern jitter) を持つ。例えば 1 GHz (正確には 1.034 GHz) で サンプ リングを行った場合、このとき本来は隣り合うキャパシタがサンプリングされる時間差は 0.97 nsec であるはずが、この値が各DRS4チップのキャパシタIDごとに固有のズレを持つことになる。正 しい波形を得るためにはこの値を測定して補正を行う必要がある。この時間特性を測定するため に、読み出し回路上の FPGA で生成したクロック信号を DRS4 に入力しサンプリングを行う。ま ず、ある1イベントにおいて入力された1つの矩形波に着目し、実際の信号幅とサンプリングされ た信号幅で比較を行い、時間のズレを At とする。矩形波に含まれていたキャパシタの数が N 個で あったとすると、それらのキャパシタは本来の時間差から $\Delta t/{
m N}$ だけズレた値を持つと考えるこ とが出来る。同様に、矩形波に含まれていなかったキャパシタは本来の時間差から - Δt / (1024-N) だけズレれた値を持つといえる。この補正を1イベントに含まれる矩形波全てに対して行い、最初 の1イベントの補正が行われた状態を初期値として次のイベントに対しても補正を行っていく。こ のような操作を1000イベント分繰り返して、最終的な各キャパシタごとの時間差をfixed pattern jitter としてタイミングキャリブレーション用のテーブルを作成した。このときに使用したクロッ ク波形とキャリブレーションのイメージを図 6.5 に、得られた fixed pattern jitter をプロットした ものを図 6.6 に示す。 各セルの fixed pattern jitter のグラフを見ると明らかに各キャパシタごと に異なる値を持っているが平均値取ると 0.97 nsec となり、確かに 1 GHz サンプリングが行われて いるということがわかる。図 6.6 のグラフはあくまでもこのとき測定した 1 つの DRS4 チップに対 してのみあてはまるものであり、異なる DRS4 チップに対して意味を成さない。また、タイミン グキャリブレーションはサンプリング速度毎に行わなくてはならないことや温度によっても依存性 を持つことに注意が必要である。

次に、作成した fixed pattern jitter のテーブルを用いて正しい補正が行われることを確認するた めに読み出し回路に 502.4 nsec 間隔でパルスを入力し、パルスピークの間隔がタイミングキャリ ブレーション前後でどのように変化するかを測定した。測定結果の分布を図 6.7 に示す。補正前で は RMS 4.7 nsec であったのに対し、補正後では RMS 0.98 nsec となっており、今回作成したテー ブルで正しくタイミングキャリブレーションが行われていることが確認できた。図 6.7 の下図を見 ると、各キャパシタ固有の値である fixed pattern jitter を補正した後でもいくらかの時間的なば らつきを持っていることが分かる。各セルの持つ変動する jitter(random pattern jitter) をみるた



図 6.5: タイミングキャリブレーションに用いたクロック波形(66MHz) とキャリブレーション のイメージ。一つ一つの矩形波について入力波形とサンプリング波形の時間幅の変化を補正して いく。

め、先ほどよりも短いパルス間隔 (20.08 nsec) でパルスをいれて 10 万イベントサンプリングを 行い、ピーク間隔のばらつきから各キャパシタごとの時間間隔を測定し、その時間間隔の最大値と 最小値の差を random pattern jitter とした。結果を図 6.8 に示す。この結果より各キャパシタの 持つ random pattern jitter は 20 psec 以下であり 20 キャパシタを積分した場合のジッターは 0.4 nsec 以下に収まることが分かる。

6.4 ダイナミックレンジ測定とチャージ分解能

LST は 20 GeV という低エネルギー閾値の達成を目標としているが、より大きな信号にも対応で きるようにすることで MST とのオーバーラップ領域を広く確保することが出来、高エネルギー領 域に対する観測精度を高めることが出来る。読み出し回路に対する要求値は 2000 phe であるが、 要求値が 1000 phe に変更された場合にも Low Gain アンプの抵抗値を付け替えるだけで対応でき るよう、二種類の Gain を決定した。ダイナミックレンジを過剰に広げずメインアンプの Gain を 調整して要求値に近づけることで ADC 1 カウントあたりの電圧値を下げ、エネルギーの分解能を 高めることが出来る。ダイナミックレンジを測定するために読み出し回路にテストパルスを入力 し、波形をサンプリングして入力波高値とサンプリングされた波形の波高値を測定していく。入力 波高値を変更していき、サチレーションを起こす値まで測定する。低波高値測定においてはパルス ジェネレータの出力下限値が 100 mV 程度であったため、アッテネータを通して減衰させた信号 を用いて測定を行っている。この際、アッテネータの減衰率による誤差が含まれるのを防ぐため事 前にキャリプレーションして得た減衰率を使用している。入力波高値はメインアンプ手前を差動プ ロープを用いて測定し、出力波高値はピーク ADC 値を 1000 イベントで平均化して測定した。

測定結果として得られたダイナミックレンジのグラフを図 6.10、図 6.9 に示す。読み出し回路 High Gain に入力される 1 phe の波高値を 2.65 mV として横軸の入力波高値を phe に変換してい る。得られたプロットを一次関数でフィットした結果の傾きよりそれぞれの Gain は、High Gain が 5.96 倍、Low Gain は 2000 phe 用のセットアップでは 4.85 倍、1000 phe 用のセットアッ プでは 9.17 倍となっている。 それぞれの図の下のグラフはフィッティングした一次関数との残差 であり、1 phe からそれぞれの目標ダイナミックレンジの値まで残差 5%以内でありリニアリティ が保たれているといえる。2000 phe 用に設計したメインアンプにおいては残差 5%に収まる範囲か ら、High Gain は 120 phe、Low Gain は 2200 phe がダイナミックレンジといえる。ダイナミッ クレンジ測定で得られた各 phe 数に対する測定誤差から読み出し基板単体でのチャージ分解能を 求めたものを図 6.11 に示す。図に示した赤い実践は PMT やプリアンプも含めたカメラモジュー



図 6.6: 読み出し基板 Ver.4 上のある DRS4 チップで得られた fixed pattern jitter (1 GHz サンプ リング時)。下は各セルの fixed pattern jitter。上はその積算値である。

ル全体を通してのチャージ分解能の要求値であり、読み出し回路単体ではこの要求値を十分に満た していることが分かる。しかし分解能として大きく影響するものとして PMT の過剰雑音係数 (F 値)などが考えられるため、カメラモジュール全体を接続した上でのチャージ分解能測定が重要で あると言える。

6.5 帯域測定

2.2節などで述べたように、PMT から出力されるチェレンコフ光による信号は数 nsec 程度の短 い時間的広がりを持つため狭い帯域幅では信号が減衰され正しい波形を読み取ることが出来ない。 そのため読み出し回路 High Gain には要求値として-3 dB となる周波数で 300 MHz 以上の帯域 が求められている。また、PMT のアナログ波形データを元にトリガ信号を作るアナログ LO Sum トリガには 350 MHz の帯域が求められており読み出し回路 上のトリガ用アンプはそれ以上の帯 域を求められている。Ver.3 においては High Gain の帯域が 250 MHz となっており帯域の要求性 能を達成できていなかった。そこでメインアンプに 4.4.3 節で述べたような変更を加え、2000 phe というダイナミックレンジ要求値を達成可能なよう Gain の調整を完了した上での読み出し回路の 帯域測定を行った。パルスジェネレータから波高値が一定になるよう周波数を調整したサイン波を 読み出し回路に入力し、1GHz でサンプリングを行った波形をフィットして波高値を求めて測定し たイベント数で平均値を求める。平均化されたサンプリング後の波高値と入力波高値から Gain を 求め、周波数ごとにプロットをすることで帯域を測定した。帯域測定時のセットアップ概略図を図 6.12に示す。トリガラインの波形は DRS4 でサンプリングを行うことが出来ないため、アンプ入力 部と出力部を差動プローブで測定することで帯域を測定した。測定においては読み出し基板 Ver.4 単体での High Gain、Low Gain、トリガライン、及び PACTA プリアンプとスローコントロール



図 6.7: タイミングキャリブレーションによる補正結果。上図が補正前. 下図が補正後。横軸の単位 は nsec である。



図 6.8: 各セルの random pattern jitter。最大で 18 psec (セル番号 190)。

ボードと読み出し基板を接続したカメラモジュールとしての状態での High Gain、Low Gain の帯 域を測定した。PACTA プリアンプに信号を入力する際は PMT 信号を入力する際に使用している E.FL という規格の同軸ケーブルと E.FL-SMA 変換を行うためのコネクタ (HRMP-E.FLJ)を使 用した。帯域の測定結果を図 6.13 に示す。測定結果から、読み出し回路単体の帯域は-3 dB にお いて、High Gain が 350 MHz、Low Gain が 170 MHz、トリガラインが 500 MHz という結果が 得られた。この結果より、読み出し基板は帯域要求値を達成できていることが確認された。High Gain と Low Gain ともに帯域があがるにつれて一度 Gain が上昇する傾向が見られるが、これは DRS4 チップの帯域に見られる傾向である。このような傾向は 5.2 節で行った DRS4 の等価回路を 用いた帯域シミュレーションにでは見られない傾向であるため、この際用いたものが完全に DRS4 チップの等価回路として再現されていたとは言い難いが、読み出し基板 Ver.3 と Ver.4 の DRS4 接 続チャンネル数の変更によって 100 MHz 程度帯域が改善されるという実測値と同じ傾向を示して おり、高周波領域における傾向としては、行ったシミュレーションは大きく間違ったものではない と考えられる。

また、PACTA プリアンプとスローコントロールボードと読み出し基板接続状態においては、High Gain が 300 MHz、Low Gain が 170 MHz という結果となった。読み出し基板単体での帯域に比 ベカメラモジュールといての状態において High Gain の帯域が少し悪化している。これは PACTA プリアンプの帯域 (-3 dB において 484 MHz)による減衰も含まれることにもよるが、300 MHz



図 6.9: 2000 phe 用メイアンプでのダイナミックレンジ測定結果。下はフィットした直線との残差。

以降で読み出し基板帯域は急激に悪化するため、単体とカメラモジュールとしての帯域に有意な差 はないと考えられる。 次に、サンプリングスピードによる帯域の変化を確認した。読み出し回路 単体での測定を図 6.12 のセットアップで、サンプリングスピードのみを 2 GHz に変更してサンプ リングを行い、High Gain の帯域を比較した。その結果を図 6.14 に示す。この結果より 5.2 節で シミュレーションを行ったのと同様に、サンプリングスピードの変更による DRS4 の入力インピー ダンスの変化は帯域に大きな影響は与えないことが分かった。

Low Gain の帯域について要求値は定められていないが、これは Low Gain には phe 数の大き な PMT 信号が入力されるために信号幅が High Gain のものに比べて広くなると考えられるため である。Low Gain の周波数帯域 170 MHz において十分であるかどうかを確かめるため、パルス ジェネレータから PMT に似せた波形 (FWHM 3 nsec 程度)の波形を読み出し基板の Low Gain に入力し、波形の FWHM の変化を追った。メインアンプ前後の波形を図 6.15 に、読み出し回路 で 5 GHz でサンプリングされた波形を平均化したものを図 6.16 に示す。それぞれの FWHM は、 メインアンプ入力前が 3.02 nsec、メインアンプ出力後で 3.04 nsec、サンプリングされた波形では 3.26 nsec となった。メインアンプ部ではほぼ入力波形は広がらないものの、サンプリングされる と FWHM が 7%ほど広がっていることが分かった。実際に Low Gain に入力される波形は 3 nsec よりもさらに太いものであると想定されているので、今回の測定よりもパルスの広がりは抑えられ 実際の PMT 信号の測定において大きな影響は無く、帯域は十分であると考えられる。


図 6.10: 1000 phe 用メインアンプでのダイナミックレンジ測定結果。下はフィットした直線との 残差。

6.6 クロストーク測定

読み出し回路においてスローコントロールボードからの信号入力部やDRS4 チップ入力部など の信号線が密集している領域においてはクロストークが起こりやすい。クロストークが大きくな るとシャワーイメージを正しく測定できなくなり、イメージングによる解析に悪影響を及ぼす。読 み出し回路 Ver.3 においては最大で1.6%程度のクロストークが起こることが分かっており、Ver.4 への改良に当たってスローコントロールボードとのコネクタの変更などによるクロストークの軽減 策がとられた。クロストークを測定するために読み出し回路の1つのチャンネルにパルスジェネ レータから250mV 程度の大きな波高値の信号を入力し、その際に他のチャンネルに現れる波高値 のピークの平均を測定した。クロストークの大きさは入力したパルスの波高値を100%として、他 のチャンネルに現れるクロストークの波高値の割合で表す。測定を行って得られた各チャンネルの クロストークを図 6.17 に示す。

図の 1-7 が High Gain の 0-6 チャンネルに、8-14 が Low Gain の 0-6 チャンネルにそれぞれ対応しており、横軸のチャンネルi (1-14) に入力した際に 1-14 の他のチャンネルに現れるクロストークを縦軸にプロットしている。信号は入力したチャンネルは当然入力信号がそのまま見えるので、100%となっている。この結果より、クロストークは全ての組み合わせに対して 0.2%以下となって



図 6.11: 読み出し基板単体でのチャージ分解能。赤いプロットが High Gain、青が Low Gain (2000 phe)、緑が Low Gain (1000 phe)の測定値を表す。赤い実線は LST カメラモジュールへの分解能 要求値、黒い点線は最終的な目標値である [45]。

おり、要求値である1%にかなり近い性能が達成されている。特徴として、入力したチャンネルに 隣り合ったチャンネルに最も高いクロストークが現れているといえる。しかし、チャンネル1に入 力した際は隣り合うチャンネル 2 に大きなクロストークが起こるが、チャンネル 2 に入力した際 は隣り合うチャンネル1に大きなクロストークが見られないように、入力チャンネルに対してクロ ストークが対称になっていないことが分かる。この傾向には次のような理由が考えられる。図 6.18 に読み出し基板 High Gain の DRS4 チップ入力部の回路図を示す。 チャンネル 1 にパルスを入力 すると図の DRS4 入力箇所3~10までにパルスが入力される。この試験を行った際はチャンネル カスケードを行っておらず、チャンネル2においてサンプリングをされるは入力箇所11、12から 入力された信号であるので、 パルスを入力したチャンネルと配線が近くなり、クロストーク大き くなる。一方、チャンネル2 にパルスを入力すると図の DRS4 入力箇所 11~18 までにパルスが入 力される。このときチャンネル1 においてサンプリングされるのは入力箇所 3、4 から入力された 信号であるために、パルスを入力したチャンネルから配線が離れており、大きなクロストークが起 こらないと考えられる。このような考察より、クロストークの主たる要因は DRS4 入力箇所にあ ると言える。更なるクロストークの低減のためにはサンプリングを行う DRS4 内の入力箇所が他 のチャンネルの配線と隣り合わないよう Shift Register の値を調整することが考えられるが、この 手法はチャンネルカスケードを行う際には用いることが出来ない。



図 6.12: 帯域測定に用いたセットアップ概略図



図 6.13: 帯域測定結果。トリガラインは設計値の Gain で、それ以外は 1 MHz 入力時の Gain で 規格化している。



図 6.14: サンプリングスピードの違いによる帯域の変化



図 6.15: メインアンプ Low Gain 入力前 (左図)と後 (右)の波形比較



図 6.16: Low Gain でサンプリングされた波形の波形平均。横軸は TimeSlice で 1 Slice で 0.197nsec



図 6.17: 各チャンネルに対するクロストーク測定結果。単位は%。



図 6.18: HG ch1,ch2 DRS4 入力箇所

6.7 PMT 波形サンプリング試験

ダイナミックレンジと帯域が要求値を達成していることを確認したうえでメインアンプのゲイン を確定し、それを用いて PMT 信号のサンプリング試験を行った。試験においては、ダイナミック レンジ 2000 phe を達成できるよう Gain の調整を行った読み出し基板 Ver.4 の High Gain を使用 し、PMT は Gain が 4×10^4 となるよう付加する高圧値を調整して行った。PMT からの信号を 読み出し基板でサンプリングした際に得られる PMT 波形の例を図 6.19 に示す。



図 6.19: 読み出し回路 High Gain 1 GHz でサンプリングされた PMT 波形の例。FWHM 3 nsec 程度の波形をサンプリングできている。

6.7.1 1 phe スペクトル取得試験

1 光電子を測定に十分なだけノイズと分離してサンプリングできることを確認するため、1 phe スペクトルの取得試験を行った。ノイズとの分離性能を表す指標としては S/N 比が用いられ、1 phe の電荷平均値をペデスタルの分散で割ったもので与えられる。LST における要求性能は PMT の Gain 4 × 10⁴ において S/N 比 5 以上である。測定においては光源としてレーザーダイオード (NDV4212)をパルサーを用いて発光させ、パルサーから出力されるトリガ信号を用いて波形取得 を行った。スペクトルを得るための波形積分においては積分幅を調整することで最大の S/N を得 られるようにしている。取得されたヒストグラムを図 6.20 に示す。このとき積分幅 6 nsec として あり、S/N 比 6.79 と言う値が得られた。PMT の Gain やサンプリングスピードなど実際の観測に 近い条件において LST 要求性能を達成することが出来た。

6.7.2 波形平均測定

読み出し基板上の High Gain 系メインアンプから出力される 1 phe の波形平均を測定した。実際に読み出し回路でサンプリングされる波形の波高値や FWHM などの正確な形状を知ることは 望遠鏡シミュレーションなどにおいて非常に重要なことである。サンプリングスピードが読み出し 基板の帯域に影響しないことが測定により確認されているので、この測定においてはより正確な 1 phe 信号を得るために 5 GHz (正確には 5.199 GHz) でサンプリングを行った。PMT にかけてい る HV 値は 1100 V で、Gain 4 × 10⁴になっている。ペデスタルや 2 phe 以上の波形を除き 1 phe のみの波形平均を得るため、1 phe ヒストグラムを作る際に用いたイベントのうち、積分によって 得られる電荷量が 1 phe の平均から 1 シグマ以内のイベントのみを選択し、波形のピーク位置を



図 6.20: 1 GHz サンプリング時の 1 phe ヒストグラム

合わせて平均化を行うようにしている。また、PMT 信号はスローコントロールボードを通さず、 プリアンプからの出力信号をケーブルを通して読み出し回路に入力している。そうして得られた1 phe 波形平均を図に示す。

今回得られた波形平均では FWHM2.15 nsec、波高値 14.4 mV と言う値が得られた。1 phe 波 形のピークの後ろにコブのような構造が見えており、PMT 単体での波形においてはこのコブは確 認されていない。このような構造から読み出し基板メインアンプの入力インピーダンスが想定して いる値(50 Ω)からわずかにずれてしまい反射が起きている可能性がある。今回の測定では PMT 信号をケーブルを用いて入力しているが、スローコントロールボードを通して入力した場合信号線 の経路が短くなることでコブの位置はより信号のピーク付近に近づくことで確認されなくなると考 えられる。



図 6.21: 測定によって得られた読み出し基板によってサンプリングされる 1 phe 波形平均。横軸は Time Slice であり、1 Slice が 0.19 nsec に相当する。PMT と読み出し回路を SMA ケーブルで接 続して測定している。

6.8 トリガ試験

LST 用のトリガ回路単体の試験は開発したそれぞれの国で行われているが、今回は読み出し回路 Ver.4 との接続下での動作試験と、トリガ回路から出力されるトリガ信号を用いての波形取得試験を行った。

6.8.1 デジタルトリガ試験

デジタル方式のトリガ回路(Digital L0 mezzanine DESY ver.1、Digital L1 Trigger Backplane DESY)を用いた波形取得試験を行うにあたり、まず1つクラスタの3つのチャンネルに同時にテストパルス(FWHM 3.1 nsec)を入力し、L0 信号と 3NN ロジックを用いた L1 信号の出力を確認した。4.5.3.1 節で述べたように入力したパルスが L0 トリガメザニンの各チャンネルにおいて設定された閾値を超えると L0 信号が出力され、3NN ロジックにおいては隣り合った3つのチャンネルにおいて同時に L0 信号が出力されると L1 信号が出力される。測定のセットアップの概略図を図6.22 に、プローブを用いて確認した L0、L1 信号を図 6.23 に示す。入力された閾値を超える波高値のパルスに対して L0 信号が出力され、3チャンネルからの L0 信号を受けて L1 信号が確かに出力されていることが確認された。信号入力から L1 信号出力までにかかった時間約 100 nsec であり、トリガの要求性能である 100 kHz を十分に達成できる。確認された L1 トリガ信号を用いて



図 6.22: デジタルトリガ試験セットアップ(上)と入力部(下)。下図の左下

波形取得試験を行った。読み出し回路でサンプリングされた波形を図 6.24 に示す。3NN ロジック で出力された L1 トリガ信号を用いて読み出し回路での波形取得を確認できた。

次に、3 つのクラスタにそれぞれ1 チャンネルずつテストパルスを入力して 3NN ロジックを用 いた波形取得試験を行った。4.5.3.1 節で述べたように、各 L0 トリガメザニンで生成された L0 信



図 6.23: プローブによって確認された L0,L1 トリガ信号. 赤が L0 信号 (シングルプローブで確認)。 緑が L1 信号 (差動プローブを用いて確認)。

号はL1トリガバックプレーン上のコネクタを通して隣り合うクラスタに送られる。自身のクラス タと隣り合うのクラスタ送られてくるL0信号を受け取り、入力されたパターンが3NNロジック に当てはまっている場合、L1信号が出力されることとなる。この試験を行った際のセットアップ を図 6.25に、3つのクラスタL1トリガ信号を用いてサンプリングされた波形を図 6.26に示す。こ の結果より読み出し基板 Ver.4 とデジタルトリガの3クラスタ接続状態で、隣接クラスタとのトリ ガ通信を行ってL1トリガ信号を生成し、波形取得が行えることが確認できた。

6.8.2 アナログトリガ試験

アナログ方式のトリガ回路 (Analog L0 ASIC mezzanine、Analog L1 ASIC minimezzanine、 Analog Trigger Backplane v2)を用いて波形取得試験を行う。4.5.3.2 節で述べたように、アナロ グ L0ASIC メザニンのレジスタに書き込む値によって Majority トリガーと Sum トリガーを切り 替えることが出来る。今回の測定では Sum トリガ機能を使用した。まず、3 つのチャンネルに対 してテストパルスを入力し、L0 トリガのクリッピングレベルと減衰率及び L1 トリガの閾値を調整 して L0 信号と L1 信号が出力されることを確認した。その際のセットアップを図 6.27 に、プロー ブで確認された L0、L1 信号を図 6.28 に示す。アナログ的に足しあわされた信号の波高値が設定 された閾値を越えることで L1 トリガが出力されることが確認できた。信号入力から L1 トリガ信 号出力までにかかった時間約 150 nsec であり、トリガの要求性能である 100 kHz を十分に達成で きる。

次に、確認された L1 トリガ信号を用いて波形取得試験を行った。読み出し回路でサンプリング された波形を図 6.8.2 に示す。試験の結果、入力された波形に対して生成された L1 トリガ信号を 用いて入力波形のサンプリングを正しく行うことが出来た。



図 6.24: 1 クラスタでのデジタル L1 トリガを用いた信号波形取得試験においてサンプリングされた波形

6.9 消費電力

Ver.4 において 4.4.2 節で述べたような電源系の変更が行われた。消費電力は読み出し回路とバッ クプレーンのみで待機時 12.3 W/board、データ取得時 14.3 W/board という実測値が得られた。 トリガ回路を含めると、アナログトリガ使用時で 2.72 W/PMT、デジタルトリガ使用時で 2.71 W/PMT となる。消費電力の要求値は 3 W/PMT であり、要求値を達成することが出来ている。 Ver.3 での消費電力(2.4 W/PMT)に比べて 0.3 W/PMT 程度増加しているが、これはメインア ンプ部の変更で使用するオペアンプが増えたことによる。しかしカメラモジュールの冷却方式が MST とのシステム共通化に向けて、当初予定されていた水冷方式から、水冷と空冷のハイブリッ ト方式に変更されることが決まっているため、現在の電力消費値による発熱を十分に冷却が出来る かについては今後試験が必要であり、その試験結果によって更なる消費電力削減が必要となること も考えられる。



図 6.25: 3 クラスタでの L1 デジタルトリガ信号を用いた波形試験セットアップ概略図



図 6.26: デジタル L1 トリガによって得られた波形



図 6.27: アナログトリガ試験セットアップ



図 6.28: プローブで確認された L0 信号 (左)と L1 信号 (右)



図 6.29: 1 クラスタでのアナログ L1 トリガを用いた信号波形取得試験においてサンプリングされた波形

第7章 まとめと今後の読み出し回路改良

7.1 読み出し基板 Ver.4 性能評価のまとめ

本修士論文ではLST 初号機搭載に向けた改良版である読み出し回路 Ver.4 の読み出し回路シミュ レーションと電源系の変更とダイナミックレンジ要求値の達成に向けたメインアンプ抵抗値の決 定、回路の性能評価を行った。回路シュミレーションではメインアンプの構造変更に伴う帯域の変 化や、サンプリングスピードの変更による帯域及び波形積分値の変化を見積もった。電源系変更に おいては MST との仕様共通化に向けた電源電圧と出力電圧値の変更、及びそのための使用デバイ スの選定を行った。出力波高値やノイズレベルを確認し、問題なしと判断して読み出し回路 Ver.4 の電源回路として組み込んだ。

性能評価試験では DRS4 内部のキャパシタごとのオフセット補正後で読み出し回路単体でのノ イズレベルが 0.09 phe、タイミングキャリブレーションの補正後でタイミングジッターが最大で 20 psec/cell という値が得られた。ダイナミックレンジは 2200 phe (Ver.3 では 3900 phe) で、 帯域幅は-3 dB となる周波数が High Gain で 350 MHz (Ver.3 では 280 MHz) Low Gain が 170 MHz (Ver.3 では 200 MHz)、クロストークは最大 0.2% (Ver.3 では最大 1.6%) であり、読み出 し回路 Ver.3 で達成されていなかった要求値についても Ver.4 においては達成できていることが確 認できた。Low Gain 帯域は悪化しているが、これはメインアンブ Low Gain 系統の倍率を大きく 上げたため(Ver.3では1倍、Ver.4では4倍)であると考えられ、この帯域悪化によって波形が ゆがむことは無いことも確認できた。 また、ダイナミックレンジ内におけるチャージ分解能も回 路単体では要求値を達成できている。今後 PMT などの周辺回路と組み合わせた上でチャージ分解 能測定を行う必要がある。 $1 \mathrm{phe}$ の波形取得試験では $\mathrm{PMT}~\mathrm{Gain}~4 imes 10^4$ で $\mathrm{S/N}$ 比6.8 という値 が得られ、1 GHz での波形サンプリングで要求値を達成できている。カメラとして動作するため のトリガ回路との接続試験も行い、デジタルトリガを用いた試験では3クラスタ間でL1トリガ信 号を分配して波形取得が行えることが確認できた。アナログトリガを用いた試験では、1 クラスタ において Sum トリガを用いて L0 信号の出力を確認し、L1 トリガ信号による波形取得を行った。 トリガ生成にかかる時間はデジタルトリガで約 100 nsec、アナログトリガで約 150 nsec であり、 トリガ要求性能である 100 kHz を十分に達成できることが確認出来た。今後はアナログトリガを 用いた複数クラスタ試験も行う必要がある。トリガ回路や PMT クラスタを接続した上での消費電 力は、アナログトリガ使用時で 2.72 W/PMT、デジタルトリガ使用時で 2.71 W/PMT となった。 Ver.3 での消費電力 (2.4 W/PMT) に比べて 0.3 W/PMT 程度増加しているが、これはメインア ンプ部の変更で使用するオペアンプが増えたことによるものであり、最終的な消費電力は要求値以 内に収まっている。以上の試験結果より、LST 読み出し回路としての性能要求値を十分に達成で きており、LST 初号機搭載読み出し回路として採用できるものとなっている。LST 性能要求値と 試験で得られた結果を表 7.1 にまとめる。

7.2 今後の読み出し基板改良及び試験

LST 初号機搭載用読み出し回路として Ver.4 は十分な性能が得られたが、量産にあたりさらに 改良を加えた読み出し回路 Ver.5 が 2014 年 12 月に開発された。改良点としていくつかのデバイ

測定項目	要求値	試験結果
ノイズレベル	<0.2 phe	0.09 phe (読み出し回路単体)
タイミングジッター		最大 20 psec/cell
ダイナミックレンジ	>2000 phe	2200 phe
帯域幅	>300 MHz	350 MHz (High Gain), 170 MHz (Low Gain)
クロストーク	<1%	最大 0.2%
1 phe スペクトル S/N 比	>5	6.8
消費電力 (PMT クラスタ含む)	<3 W/PMT	2.72 W/PMT (アナログトリガ使用時)
		2.71 W/PMT (デジタルトリガ使用時)

表 7.1: 各性能試験結果と LST 要求値まとめ

ス変更が上げられ、具体的にはイーサネット通信用の物理層チップ(製造中止となってしまうた め)やADC(性能を落とさずに低消費電力化が可能なため)などである。さらに放熱効果を挙げ るために電源系付近やアンプ、DRS4、ADC付近のGNDベタ上のレジストをはがすなどの変更 が加えられており、冷却系の実装に向けた改良が施されている。性能に影響する部分の変更は無い ため Ver.4 と同じ性能が得られるはずであるが、同様の試験を Ver.5 に対しても行う予定である。 また、追加の試験としてアナログトリガを用いた複数クラスタ通信試験やカメラモジュール全体で のチャージ分解能測定試験などが必要であり、2015年中に量産が開始されるされる Ver.5を用い た数十台規模でのミニカメラ試験も実地される予定である。カナリア諸島で 2015年中に建設開始 される LST 初号機への搭載向けてより望遠鏡搭載環境に近い形での試験が進められている。

謝辞

本修士論文を執筆するにあたり、本当に様々な方にご助力いただきました。宇宙線研究室准教授 の窪秀利先生には、最初から最後までご迷惑をおかけしましたが、研究・実験というものについて 多くを教わりました。ミーティングなどにおいては多くの鋭いご指摘を頂き、研究を進展させるこ とが出来ました。助教の齋藤先生はつらいときも明るくフレンドリーに話しかけていただき大変 助けていただきました。同じ研究室の CTA グループの偉大な先輩である今野さんは CTA につい て、回路について、何も知らない僕をいつも手助けしてくださいました。今野さんのお力なくして は僕の研究は立ち行かないものであったと常々感じています。また、一つ上の先輩の畑中さんは僕 が質問に行くと優しく対応してくださり大変感謝しています。別グループではあるものの研究室の 同期の小田君、高田君、松村君はみんな個性的で面白い人たちでした。彼らと同期で大学院に入学 できて心から良かったと思っています。CR の皆様はいつも明るく研究に取り組んでいて、同じ研 究室での生活がとても充実したものになりました。他大学でも同じ CTA グループの皆さんは、本 当にいつも真面目で研究の励みとなりました。飲み会では時に羽目をはずしたりもしながらもとて も楽しい時間をすごさせていただきました。そして何より、CR の同期であり、同じCTA グルー プであった増田君。増田君のおかげで僕はこの修士論文を書き上げることが出来たといって間違い はないでしょう。同期でありながら彼には教わることばかりで本当に迷惑をかけっぱなしでした。 彼は博士課程に進み今後も研究を続けることになりますが、陰ながら応援をさせていただきます。 辛いながらも何かしら実り多き大学院生活であったと感じられる2年間でした。本当にありがとう ございました。

参考文献

- [1] T.C. Weekes et al. The Astrophysical Journal, Vol. 342, pp. 379–395, 1989.
- [2] The Fermi-LAT Collaboration. Fermi large area telescope third source catalog. arXiv preprint arXiv:1501.02003, 2015.
- [3] 井上一・小山勝二・高橋忠幸・水本好彦 [編]. シリーズ現代の天文学 17 宇宙の観測 iii. 2008.
- [4] William F Hanlon. The energy spectrum of ultra high energy cosmic rays measured by the High Resolution Fly's Eye observatory in stereoscopic mode. ProQuest, 2008.
- [5] JH Adams Jr, S Ahmad, J-N Albert, D Allard, M Ambrosio, L Anchordoqui, A Anzalone, Y Arai, C Aramo, K Asano, et al. An evaluation of the exposure in nadir observation of the jem-euso mission. *Astroparticle Physics*, Vol. 44, pp. 76–90, 2013.
- [6] M Nagano. Search for the end of the energy spectrum of primary cosmic rays. New Journal of Physics, Vol. 11, No. 6, p. 065012, 2009.
- [7] Alan P. Lightman George B. Rybicki. Radiative processes in astrophysics.
- [8] 槙野文命. 宇宙放射線の観測. 宇宙航空研究開発機構, 2012.
- [9] F Giordano, M Naumann-Godo, J Ballet, K Bechtol, S Funk, J Lande, MN Mazziotta, S Rainò, T Tanaka, O Tibolla, et al. Fermi large area telescope detection of the young supernova remnant tycho. *The Astrophysical Journal Letters*, Vol. 744, No. 1, p. L2, 2012.
- [10] F Aharonian, et al. Detection of tev gamma-ray emission from the shell-type supernova remnant rx j0852. 0-4622 with hess. arXiv preprint astro-ph/0505380, 2005.
- [11] R. et al. ANakamura. *PASJ*, 2014.
- [12] E Aliu, H Anderhub, LA Antonelli, P Antoranz, M Backes, C Baixeras, JA Barrio, H Bartko, D Bastieri, JK Becker, et al. Observation of pulsed γ-rays above 25 gev from the crab pulsar with magic. *Science*, Vol. 322, No. 5905, pp. 1221–1224, 2008.
- [13] J Aleksic, EA Alvarez, LA Antonelli, P Antoranz, M Asensio, M Backes, JA Barrio, D Bastieri, J Becerra González, W Bednarek, et al. Phase-resolved energy spectra of the crab pulsar in the range of 50-400 gev measured with the magic telescopes. Astronomy and Astrophysics, Vol. 540, p. 69, 2012.
- [14] F Aharonian, AG Akhperjanian, K-M Aye, AR Bazer-Bachi, M Beilicke, W Benbow, D Berge, P Berghaus, K Bernlöhr, O Bolz, et al. Very high energy gamma rays from the direction of sagittarius a*. Astronomy & astrophysics., Vol. 425, No. 1, pp. L13–L17, 2004.

- [15] J Albert, E Aliu, H Anderhub, P Antoranz, A Armada, M Asensio, C Baixeras, JA Barrio, M Bartelt, H Bartko, et al. Observation of gamma rays from the galactic center with the magic telescope. *The Astrophysical Journal Letters*, Vol. 638, No. 2, p. L101, 2006.
- [16] F Aharonian, AG Akhperjanian, AR Bazer-Bachi, M Beilicke, Wystan Benbow, David Berge, K Bernlöhr, C Boisson, O Bolz, V Borrel, et al. Discovery of very-high-energy γ-rays from the galactic centre ridge. *Nature*, Vol. 439, No. 7077, pp. 695–698, 2006.
- [17] Meng Su, Tracy R Slatyer, and Douglas P Finkbeiner. Giant gamma-ray bubbles from fermilat: active galactic nucleus activity or bipolar galactic wind? *The Astrophysical Journal*, Vol. 724, No. 2, p. 1044, 2010.
- [18] F Aharonian, AG Akhperjanian, G Anton, U Barres De Almeida, AR Bazer-Bachi, Y Becherini, B Behera, K Bernlöhr, C Boisson, A Bochow, et al. Simultaneous observations of pks 2155–304 with hess, fermi, rxte, and atom: Spectral energy distributions and variability in a low state. *The Astrophysical Journal Letters*, Vol. 696, No. 2, p. L150, 2009.
- [19] F Aharonian, AG Akhperjanian, AR Bazer-Bachi, B Behera, M Beilicke, W Benbow, D Berge, K Bernlöhr, C Boisson, O Bolz, et al. An exceptional very high energy gamma-ray flare of pks 2155–304. *The Astrophysical Journal Letters*, Vol. 664, No. 2, p. L71, 2007.
- [20] Aous A Abdo, M Ackermann, M Arimoto, K Asano, WB Atwood, M Axelsson, L Baldini, J Ballet, DL Band, G Barbiellini, et al. Fermi observations of high-energy gamma-ray emission from grb 080916c. *Science*, Vol. 323, No. 5922, pp. 1688–1693, 2009.
- [21] P Mészáros and Gamma-Ray Bursts. Accumulating afterglow implications, progenitor clues, and prospects. *Science*, Vol. 291, pp. 79–84, 2001.
- [22] CTA-Japan コンソーシアム. Cherenkov telescope array loi. 2014.
- [23] Jordi Albert, E Aliu, H Anderhub, LA Antonelli, P Antoranz, M Backes, C Baixeras, JA Barrio, H Bartko, D Bastieri, et al. Very-high-energy gamma rays from a distant quasar: how transparent is the universe? *Science*, Vol. 320, No. 5884, pp. 1752–1754, 2008.
- [24] Edward A Baltz, B Berenji, G Bertone, L Bergström, E Bloom, T Bringmann, J Chiang, Johann Cohen-Tanugi, J Conrad, Y Edmonds, et al. Pre-launch estimates for glast sensitivity to dark matter annihilation signals. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, Vol. 2008, No. 07, p. 013, 2008.
- [25] M Doro, Jan Conrad, D Emmanoulopoulos, MA Sanchez-Conde, JA Barrio, E Birsin, J Bolmont, P Brun, S Colafrancesco, SH Connell, et al. Dark matter and fundamental physics with the cherenkov telescope array. *Astroparticle Physics*, Vol. 43, pp. 189–214, 2013.
- [26] John Ellis, Nick E Mavromatos, and Dimitri V Nanopoulos. D-foam phenomenology: dark energy, the velocity of light and a possible d-void. *International Journal of Modern Physics* A, Vol. 26, No. 13, pp. 2243–2262, 2011.
- [27] Masahiro Aono. Master's thesis. Kyoto University, 2012.
- [28] F Aharonian, J Buckley, T Kifune, and G Sinnis. High energy astrophysics with groundbased gamma ray detectors. *Reports on Progress in Physics*, Vol. 71, No. 9, p. 096901, 2008.

- [29] Konrad Bernlöhr. Simulation of imaging atmospheric cherenkov telescopes with corsika and sim_telarray. Astroparticle Physics, Vol. 30, No. 3, pp. 149–158, 2008.
- [30] Michael Thomas Rissi. Detection of pulsed very high energy Gamma-rays from the Crab Pulsar with the MAGIC telescope using an analog sum trigger. PhD thesis, Citeseer, 2009.
- [31] BS Acharya, M Actis, T Aghajani, G Agnetta, J Aguilar, F Aharonian, M Ajello, A Akhperjanian, M Alcubierre, J Aleksić, et al. Introducing the cta concept. Astroparticle Physics, Vol. 43, pp. 3–18, 2013.
- [32] M Actis, G Agnetta, F Aharonian, A Akhperjanian, J Aleksić, E Aliu, D Allan, I Allekotte, F Antico, LA Antonelli, et al. Design concepts for the cherenkov telescope array cta: an advanced facility for ground-based high-energy gamma-ray astronomy. *Experimental As*tronomy, Vol. 32, No. 3, pp. 193–316, 2011.
- [33] Jordi Albert, E Aliu, H Anderhub, P Antoranz, A Armada, C Baixeras, JA Barrio, H Bartko, D Bastieri, JK Becker, et al. Variable very high energy γ-ray emission from markarian 501. *The Astrophysical Journal*, Vol. 669, No. 2, p. 862, 2007.
- [34] John M Davies and Eugene S Cotton. Design of the quartermaster solar furnace. Solar Energy, Vol. 1, No. 2, pp. 16–22, 1957.
- [35] V Vassiliev, S Fegan, and P Brousseau. Wide field aplanatic two-mirror telescopes for ground-based γ-ray astronomy. Astroparticle Physics, Vol. 28, No. 1, pp. 10–27, 2007.
- [36] G Pareschi, T Armstrong, H Baba, J Bähr, A Bonardi, G Bonnoli, P Brun, R Canestrari, P Chadwick, M Chikawa, et al. Status of the technologies for the production of the cherenkov telescope array (cta) mirrors. In SPIE Optical Engineering+ Applications, pp. 886103– 886103. International Society for Optics and Photonics, 2013.
- [37] Kevin J Meagher. Schwarzschild-couder telescope for the cherenkov telescope array. In SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation, pp. 914533–914533. International Society for Optics and Photonics, 2014.
- [38] Akira Okumura. Optimization of the collection efficiency of a hexagonal light collector using quadratic and cubic bézier curves. Astroparticle Physics, Vol. 38, pp. 18–24, 2012.
- [39] T.Uchida. Hardware-based tcp processor for gigabit ethernet. IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 55, NO. 3, JUNE 2008.
- [40] S. Ritt. Development of high speed waveform sampling asics.
- [41] Yusuke Konno. Master's thesis. Kyoto University, 2013.
- [42] Kennichiro Hatanaka. Master's thesis. Kyoto University, 2014.
- [43] トランジスタ技術. 2004 年 5 月号.
- [44] Yusuke Awane. Master's thesis. Kyoto University, 2013.
- [45] K.Bernlöhr J.Hinton. Lst requirements. 2012.