

超高速カメラ校正用ピコ秒レーザーの開発

甲南大学 自然科学研究科物理学専攻 宇宙粒子研究室

猪目 祐介

2015年1月29日

Abstract

宇宙空間には様々なエネルギーを持つ粒子が無数に存在しているが、その中でも数十 KeV (KeV: 103eV) を越えるエネルギーを持つ光子はガンマ線と呼ばれており、宇宙空間に存在するブラックホールや活動銀河核、ガンマ線バーストなどの様々な天体现象から放出されている。ガンマ線は中性粒子であるため、宇宙線のような荷電粒子と違って宇宙空間内の磁場との相互作用などによって捻じ曲げられることがなく、宇宙の奥深くまで見渡すことができるプローブとして注目されている。ガンマ線領域の観測は未だ多くの発展が見込める分野であり、近年でも次々と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を秘めている。こうした背景の中で、今まで個別に大気チェレンコフ望遠鏡を用いてガンマ線観測を行っていた各国のグループが手を組み、世界で唯一の次世代ガンマ線天文台を建設する Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画が立ち上がった。

この計画は地球の北半球と南半球にそれぞれ大規模な解像型大気チェレンコフ望遠鏡アレイを建設することで全天観測を可能とし、従来の望遠鏡から 10 倍近い感度向上を達成すると同時に 20GeV から 100TeV 以上にわたるきわめて広大なエネルギー領域でのガンマ線観測を目指す国際共同実験である。CTA 計画では観測対象となるエネルギー領域にあわせて大中小と 3 種類の大気チェレンコフ望遠鏡を建設する計画となっており、一番大きな大口径望遠鏡 (Large-sized Telescope, LST) には焦点面検出器の検出素子として約 2000 本の光電子増倍管 (Photo Multiplier Tube, PMT) が搭載される。LST は一号機となるプロトタイプの建設が 2016 年に予定されており、現在様々な搭載機器の開発や性能評価が行われている。我々も LST に搭載予定の PMT に対して、性能評価を高精度かつ迅速に行う事が可能な自動化された Calibration Setup を開発し、現在世界最高レベルの精度で性能評価を行っている。この Calibration Setup 開発において、高精度な性能評価を行うためには、大気チェレンコフ光と同様の光を出力できる高性能な光源を用意する必要があった。

そこで本研究では、PMT の性能評価用光源として要求される性能を満たした、発光時間幅がピコ秒オーダー (ピコ秒: 10-12 秒) の極めて高速な短光を、高精度で安定して出力可能であり、かつ安価で製造が可能となる事を目指して超高速パルサーの開発を行った。ピコ秒で回路を動作させる必要があるため、能動素子、受動素子共に様々な部品を吟味し、回路を設計した。また安価で製造を可能とするため、可能な限り一般的に流通している部品を使用して開発を行ってきた。

その結果、要求される性能を達成した超高速レーザーの開発に成功した。開発した超高速レーザーの開発過程と、その性能評価の結果について報告する。

目次

1. Introduction	1
1.1 高エネルギーガンマ線天文学	1
1.2 大気チェレンコフ望遠鏡	1
1.2.1 空気シャワー	3
1.2.2 チェレンコフ光	3
1.2.3 イメージングチェレンコフ技術	4
2. Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画	6
2.1 CTA が観測する天体と貢献するサイエンス	7
2.2 Large-sized Telescope (LST)	8
2.2.1 反射鏡	9
2.2.2 Active Mirror Control (AMC)	10
2.2.3 Focal Plane Instrument (FPI)	10
2.2.4 Photo Multiplier Tube (PMT)	12
3. PMT Calibration Campaign	13
3.1 Calibration Setup	13
4. ピコ秒レーザー	14
4.1 Pulser Configuration	14
4.1.1 パルス生成ボード	16
4.1.1.1 トリガー信号入力および波形整形回路	16
4.1.1.2 微分回路	16
4.1.1.3 大電力を高速に扱うためのスイッチング回路	17
4.1.1.4 バイアス電流調整機能 (粗調整)	18
4.1.1.5 パルス電圧調整機能 (微調整)	19
4.1.2 トリガー制御ボード	19
4.1.3 電源回路	19
4.1.4 半導体レーザー	20
5. Specification	21
5.1 Pulser Calibration Setup	22

5.1.1 短光強度の時間変動測定	22
5.1.2 短光幅の時間変動測定	23
5.1.3 パルサー信号の時間変動測定	23
5.2 Pulser Specification	23
6. Summary	26
付録	28
[A] PMT Calibration Campaign 用のデータベースについて	28
[B] パルス生成ボードに使用している能動素子の温度係数	31
[C] 光源として使用している半導体レーザーの温度係数	32

図目次

1.1	宇宙線のエネルギースペクトル	2
1.2	ガンマ線発生機構の模式図	2
1.3	世界各国の IACT、H. E. E. S. (左上)、MAGIC (右上)、VERITAS (下)	3
1.4	チェレンコフ光発生の概要図	4
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)	5
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、核カスケードシャワーイメージ (右図)	5
2.1	CTA 完成イメージ図	6
2.2	CTA が目標としている性能 (左図) と、CTA の目標感度曲線 (右図)	6
2.3	X・ガンマ線源発見個数の推移	7
2.4	CTA が観測する天体の例	8
2.5	CTA が貢献するサイエンス	8
2.6	LST 望遠鏡の建設イメージ	9
2.7	反射鏡	9
2.8	AMC を可能とする分割鏡支持構造とアクチュエーター	10
2.9	PMT に取り付けられるライトガイド	11
2.10	LST 用クラスター	11
2.11	光電子増倍管 (PMT) の増倍原理の模式図	12
2.12	LST に使用する浜松ホトニクス製 R11920 光電子増倍管	12
3.1	PMT Calibration Campaign の Setup 模式図	13
4.1	パルサー構成の概要図	15
4.2	パルサー外観 Ver. 1 (上図) 及び Ver. 2 以降前面 (左下図)、Ver. 2 以降背面 (右下図)	15
4.3	パルス生成ボード回路図	16
4.4	微分回路の動作イメージ	17

4.5	試作パルス生成ボード	18
4.6	光源として使用する 405nm 波長の半導体レーザー	20
4.7	光ファイバーの接続に用いる SMA905 端子	20
4.8	アルミ製の電気シールドで覆ったモジュール	21
4.9	パッケージングしたピコ秒レーザーの内部	21
5.1	短光の時間変動測定用セットアップ	22
5.2	パルサー信号の時間変動測定用セットアップ	22
5.3	短光測定時の Oscilloscope 波形	24
5.4	短光強度(バイアス ON)の時間変化	24

表目次

2.1	各望遠鏡の仕様	7
5.1	パルサー回路の仕様	25
5.2	出力短光の時間変化測定結果	25

1. Introduction

1.1 高エネルギーガンマ線天文学

数十 KeV ($\text{KeV}: 10^3\text{eV}$) を越えるエネルギーを持つ光子はガンマ線と呼ばれ、そのエネルギー領域は数百 TeV ($\text{TeV}: 10^{12}\text{eV}$) にも及ぶ (図 1.1)。このガンマ線の放射過程は図 1.2 に挙げるものが主となっている。ガンマ線の放射があるという事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という事であり、一種の加速器が存在していることを示している。また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相互作用を引き起こすことで進路が捻じ曲がり、地球近傍では本来の発生源とは全く違う方向から到来してしまうため発生源の場所の特定はできない。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、これを観測することで宇宙線の発元起源の解明に繋がると考えられている。実際に超新星残骸 (Super Nova Remnant, SNR) やブラックホールなどの活動銀河核 (Active Galactic Nucleus, AGN)、ガンマ線バーストなど様々な天体から、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。このようなガンマ線領域の観測は未だ多くの発展が見込める分野であり、近年でも次々と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を秘めている。

1.2 大気チェレンコフ望遠鏡

こうした背景の中でガンマ線天文学は今まさに飛躍的な発展を迎えており、100MeV 程度から数十 GeV 程度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 20MeV から 300GeV 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 1400 個以上のガンマ線源を発見することに成功している。

一方でそれ以上の超高エネルギー領域でのガンマ線観測においては、衛星で観測するには到来頻度に対する有効面積が小さいため最良な手段とは言えず、地球大気とガンマ線の反応を利用する事で大気自体を検出器とする大気チェレンコフ望遠鏡

(Imaging Air Cherenkov Telescopes, IACT) で観測される。この IACT による観測の歴史はまだ新しく、1989 年の Whipple 望遠鏡に始まる。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. S.、アリゾナの VERITAS 望遠鏡など最新の IACT (図 1.3) が世界各国で稼働しており、高エネルギーガンマ線天文学を牽引している。

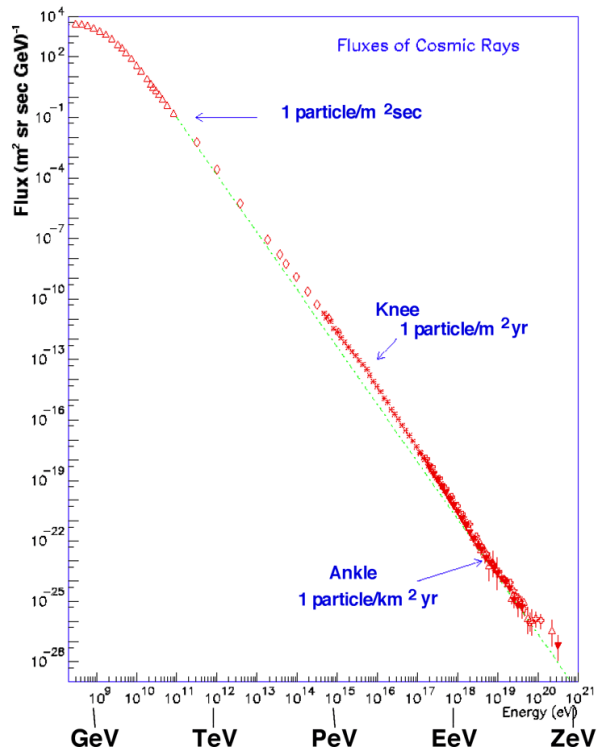


図 1.1 宇宙線のエネルギースペクトル[1]

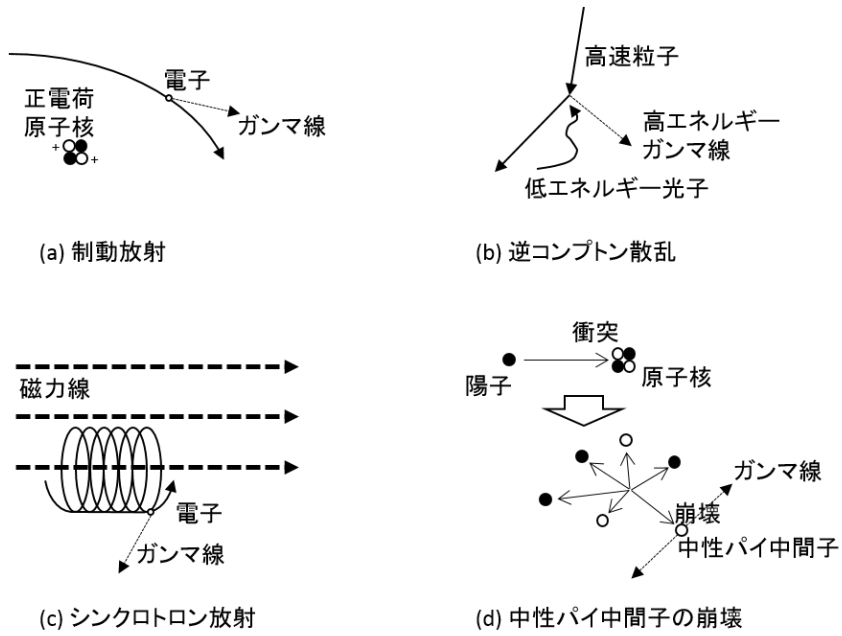


図 1.2 ガンマ線発生機構の模式図



図 1.3 世界各国の IACT、H. E. E. S. (左上)、MAGIC (右上)、VERITAS (下) [2][3][4]

1.2.1 空気シャワー

地球に到来した高エネルギーガンマ線は、地球大気中の原子と衝突して電子・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原子と衝突して電子・陽電子対生成を起こし、再度ガンマ線を放出する。この過程が、電子・陽電子のエネルギーが大気の臨界エネルギーを下回るまで繰り返される事で粒子数は増加するが、その後減少に転じてやがては収束する。このような現象を空気シャワーと呼んでおり、このようにガンマ線が起源で発生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相互作用を引き起こすことでパイ中間子が生成され、このパイ中間子は図 1.2(d)のようにすぐさま2つのガンマ線に崩壊するため、このガンマ線から空気シャワーに発展する。このようにガンマ線以外の宇宙線が起源となって発生する空気シャワーをハドロン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大きく広がることがわかっている。

1.2.2 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、 n =大気の屈折率) より速く走ることによってチェレンコフ光を放出す

る。チェレンコフ光放射の条件は、図 1.4 のように粒子の速度を βc 、チェレンコフ光の放出角を θ とすると、

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

より、

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{1}{\beta n} \right) \quad (1.2)$$

で与えられる。 n は波長に弱く依存するため、ここで波長=300nm で考えた場合は 1 気圧での屈折率が約 1.00029 となり、進行方向に対して約 1.3 度の放射角で地表に放出される事がわかる。

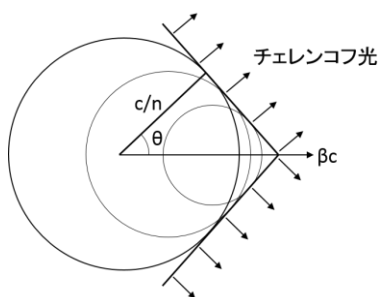


図 1.4 チェレンコフ光発生 の 概要図

1.2.3 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対して指向性を持っていると言える。この光を図 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、異なる視点からシャワーのイメージングを行う事が可能となる。同一のシャワーに対して複数の点からイメージを取得することでシャワーイベントを高精度に立体視することが可能であり、また図 1.6 に示すような MC シミュレーションによる起源毎のイメージングの違いを用いることで、バックグラウンドとなる核カスケードシャワーイベントやガンマ線以外の宇宙線（電子や陽電子、パイ中間子を由来とするもの）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 [5]。

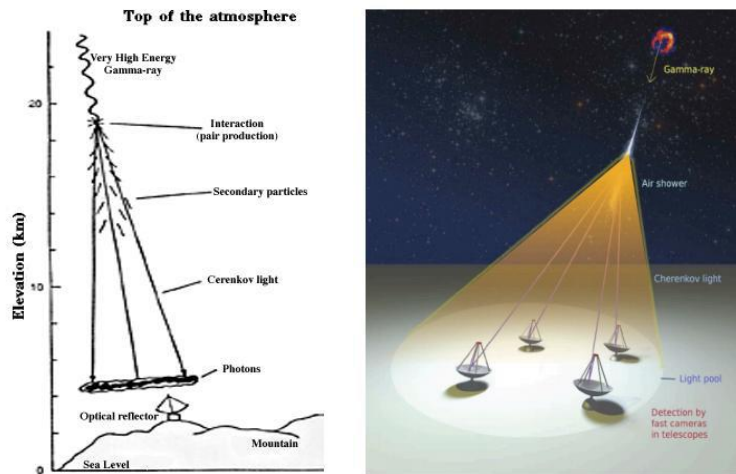


図 1.5 チェレンコフ望遠鏡によるチェレンコフ光撮像イメージ（左図）と、複数の望遠鏡によるステレオ観測イメージ（右図） [6][7]

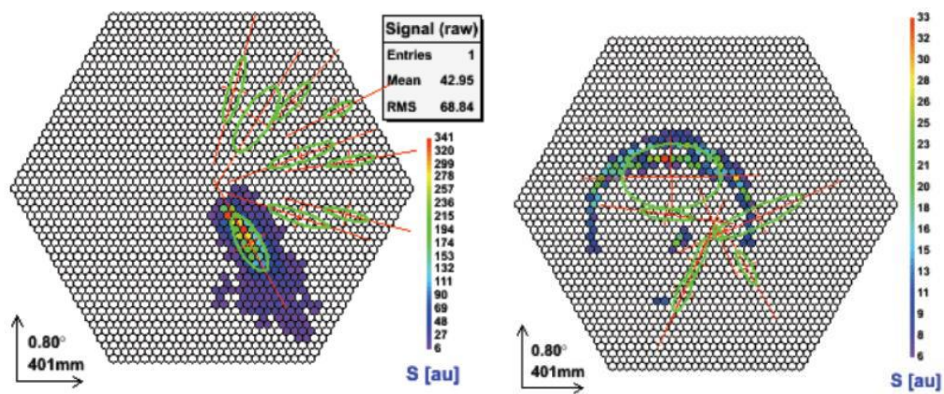


図 1.6 Monte Carlo(MC)シミュレーションによる電磁カスケードシャワーイメージ（左図）と、核カスケードシャワーイメージ（右図） [7]

2. Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画

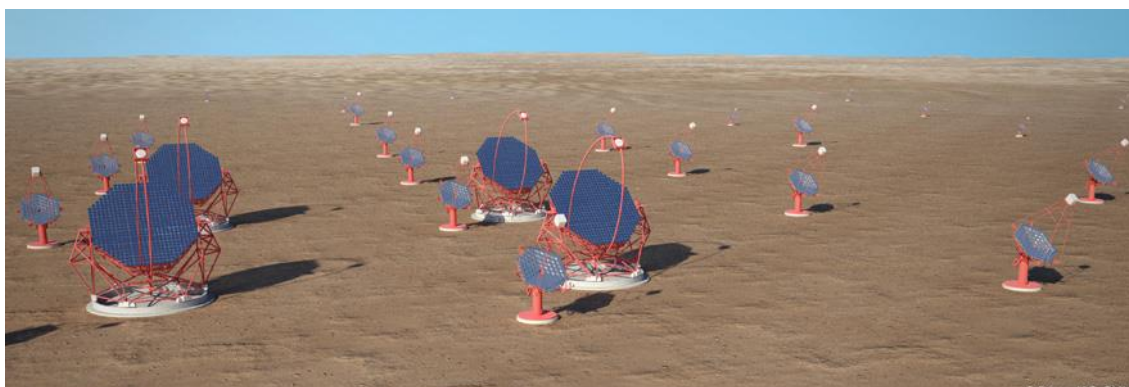


図 2.1 CTA 完成イメージ図[8]

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画とは、これまで TeV 領域のガンマ線観測を率いてきた H. E. E. S. と MAGIC の 2 グループが中心となって、従来の 10 倍高い感度を達成し、20GeV から 100TeV 以上の広大な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。CTA では図 2.1 及び表 2.1 のように大口径望遠鏡 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、全天観測を行う事が可能となっている。CTA が稼動することで、新たに 1000 以上の TeV ガンマ線源が発見される見通しであり、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。

図 2.2 に挙げる性能を目標としており、現在は 2020 年から 20 年間の本格観測開始を目指して搭載機器の開発や性能評価が行われている段階である [7]。

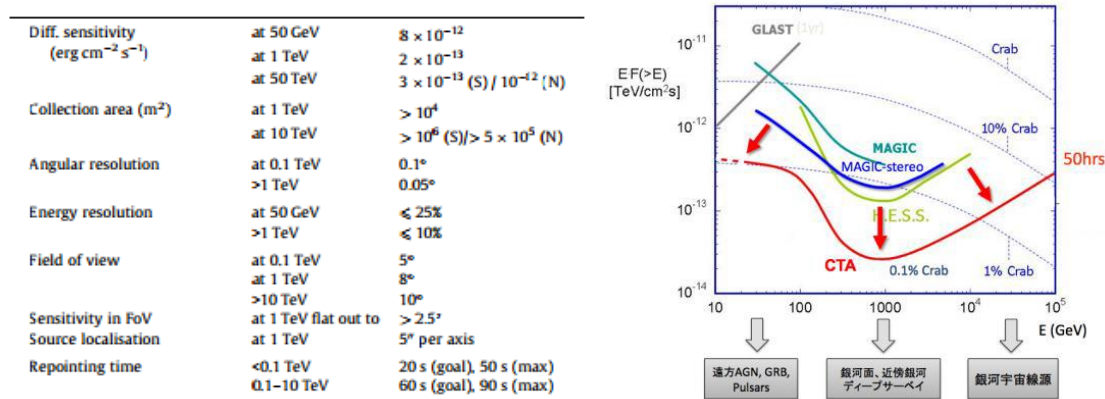


図 2.2 CTA が目標としている性能 (左図) と、CTA の目標感度曲線 (右図) [7]

表 2.1 各望遠鏡の仕様[9][10]

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

2.1 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り、Fermi 衛星はそれ以前のコンプトン衛星である EGRET 検出器から飛躍的にガンマ線源の発見個数を増やした。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用いる事で得られる広大な有効面積や、数 km² をカバーする地表面積によって、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。

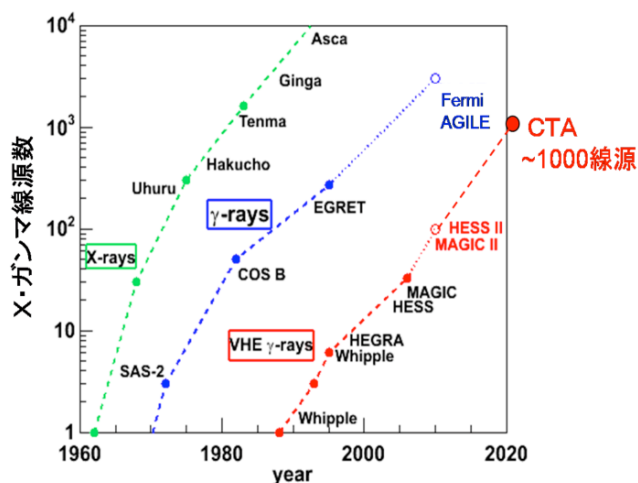


図 2.3 X・ガンマ線源発見個数の推移[7]

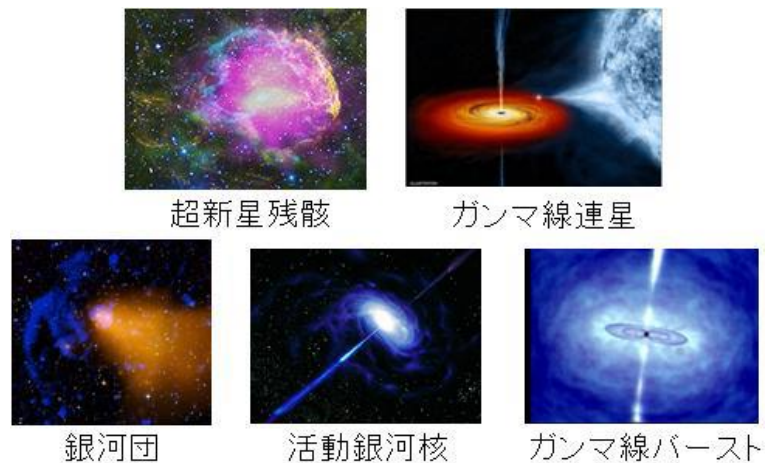


図 2.4 CTA が観測する天体の例[11][12][13][14][15]

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。超新星残骸は超新星爆発の名残であり、ガンマ線の加速源の一つと考えられている。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、ブラックホールからエネルギーが噴出しているのがわかる。銀河団では銀河同士の衝突・合体が起きている。活動銀河核は銀河中心に超巨大ブラックホールを持つと考えられており、そこから何らかの形でエネルギーが加速されて放出されている。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。



図 2.5 CTA が貢献するサイエンス[16][17][18][19][20]

2.2 Large-sized Telescope (LST)

CTA 計画で建設される 3 種類の望遠鏡のうち、最も低エネルギー側の 20GeV から 1TeV に感度を持つ望遠鏡が、大口径望遠鏡 (Large-sized Telescope, LST) である。LST は図 2.6 のように 3 種類の望遠鏡の中で最も大型であり、反射鏡の直径は 23m、焦点距離は 28m にもなる。

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、これらの突発的天体现象をいち早く捉える必要がある。そのため LST は全重量 70ton、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 を想定している巨大望

遠鏡でありながら、その架台の回転速度は 180deg/20sec となるように開発されている [7]。

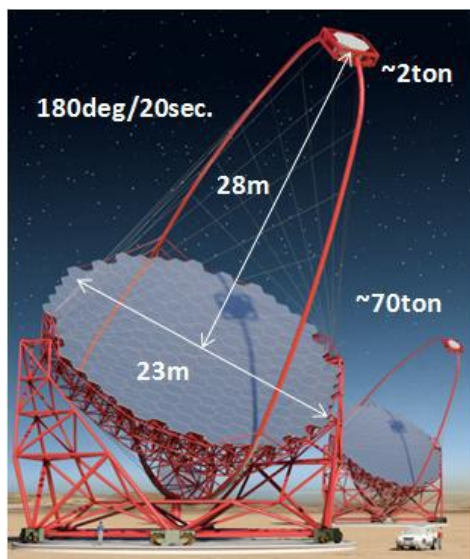


図 2.6 LST 望遠鏡の建設イメージ[9]

CTA 計画に携わっている日本の研究グループは主に LST 開発に関わっており、現在は 2016 年に建設が開始される予定のプロトタイプである 1st-LST 開発に向けて、搭載機器の開発や性能評価を行っている最中である。ここでは主に日本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、わずかな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ている。現在、実際に LST に搭載するものと同様の 1.51m 分割鏡 (図 2.7) が 30 枚以上生産されており、表面の精度や耐久性などの評価を行っている。



図 2.7 反射鏡[9]

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、図 2.8 に示すように分割鏡とミラー支持構造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、分割鏡本体にはレーザーが取り付けられる。これらアクチュエーターによって分割鏡の角度を 3 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レーザーを用いて歪みを検出することで、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。このシステムは Active Mirror Control (AMC) と呼ばれており、MAGIC ですでに実用化され導入されている。

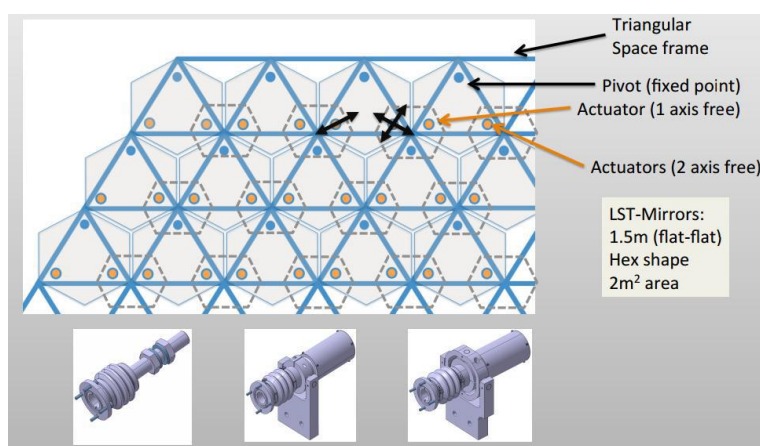


図 2.8 AMC を可能とする分割鏡支持構造とアクチュエーター[9]

2.2.3 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 (Focal Plane Instrument, FPI) に入射する。FPI の集光面は直径 2.25m の円形となっており、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。これらの PMT を 1 画素と考えてカメラとし、空気シャワーを結像する。LST で使用する PMT は Head-on 型と呼ばれる高速対応が可能なものであり、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。しかしそれでも 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広い易い状態になってしまう。そこでこの 2 つの問題に対応するために、LST の集光面では 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が取り付けられる事となった。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その形状により PMT 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 に最適となるよう開発が行われている。

集光面では7本のPMTを1つのクラスターとして束ねて運用しており、図2.10のようにPMTの後段に1クラスター単位で搭載されるプリアンプ、読み出し回路、電源供給や通信用バックプレートといった各部分の開発が進められている。またこのクラスター及びFPI全体を効率よく冷却可能な冷却システムの開発も行われている。



図 2.9 PMTに取り付けられるライトガイド[9]

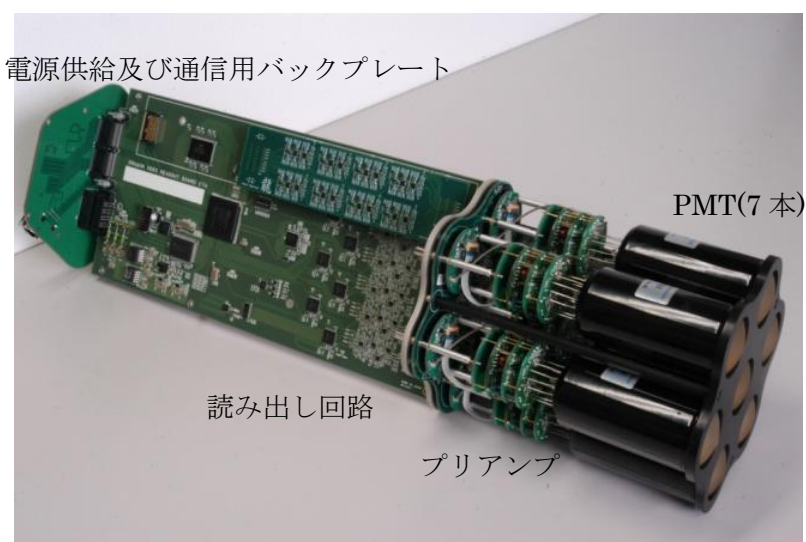


図 2.10 LST用クラスター[9]

2.2.4 Photo Multiplier Tube (PMT)

光電子増倍管 (Photo Multiplier Tube, PMT) とは、光電効果を利用して光エネルギーを電気エネルギーに変換し、さらにその電子を増倍させる機能を付加させ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。各ダイノードでは衝突した光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。

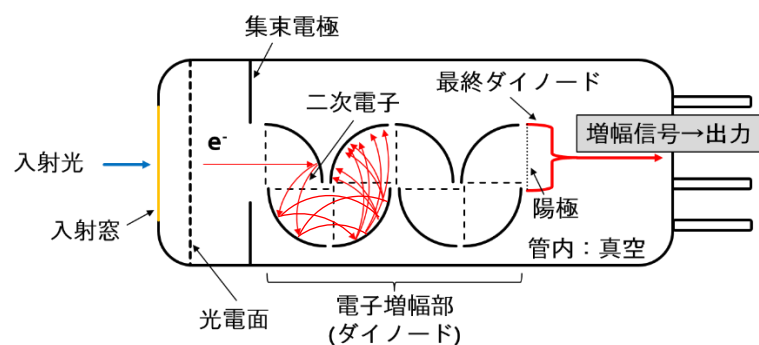


図 2.11 光電子増倍管 (PMT) の増倍原理の模式図

LST で使用される PMT は日本の浜松ホトニクスが製造を手がけており、すでに LST1 台に搭載する R11920 光電子増倍管 (図 2.12) 2000 本以上の生産が完了している。この PMT は開発段階から浜松ホトニクスと打ち合わせや協議を行っており、その結果、量子効率 (Quantum efficiency, QE) は要求値 35% に対してピーク値で 36 - 45% を達成し、PMT 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ように振舞ってしまう AfterPulse 現象の発生率についても、要求値以下の 0.02% 以下に抑えられているなど、世界最高水準の PMT が用意されている。

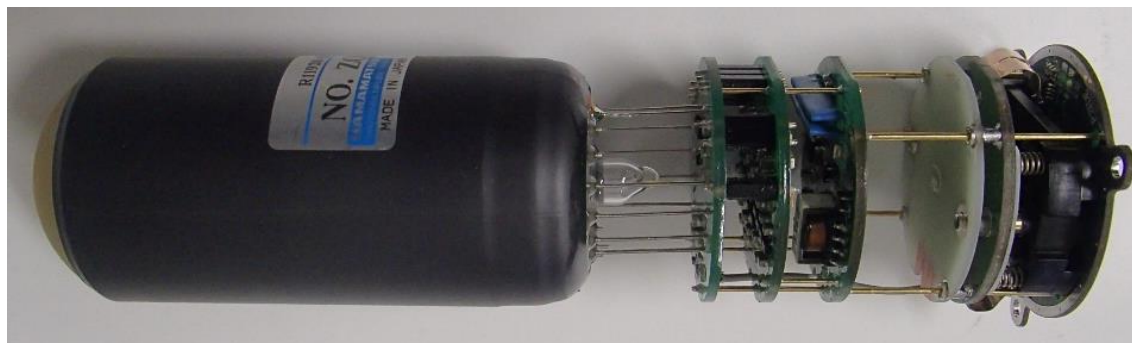


図 2.12 LST に使用する浜松ホトニクス製 R11920 光電子増倍管

3. PMT Calibration Campaign

現在までに生産されている 2000 本の PMT について、LST の要求性能を達成させるために Gain をはじめとする性能評価を行い、全 PMT のデータベースを作成する必要がある。このデータベースが、実際に LST に搭載されて運用される際の補正パラメータの決定や配置などに大きく関わるため、高精度のセットアップを用いて性能評価を行う事が望ましい。2000 本もの PMT の測定を行うためには長期間の測定作業が必要であると予想されることから、我々は従事者の負担軽減及び測定の効率向上と測定環境の統一などによる高精度化を目的とした自動化されたセットアップを準備し、数ヶ月に及ぶ PMT の性能評価(PMT Calibration Campaign)を行う事とした。また今回のデータを効率よく活用するため、新たにデータベースサーバー[付録, A]を立ち上げ、Calibration が終了した PMT についてはすぐに結果が反映されると共に、ネットワークを通じてどこに居てもデータベースにアクセスを可能とした。

3.1 Calibration Setup

2000 本もの PMT を同様の条件で測定するため、可能な限り人為的測定誤差が発生しないようにコンピュータ制御による自動化されたセットアップを製作した。その構成を図 3.1 に示す。

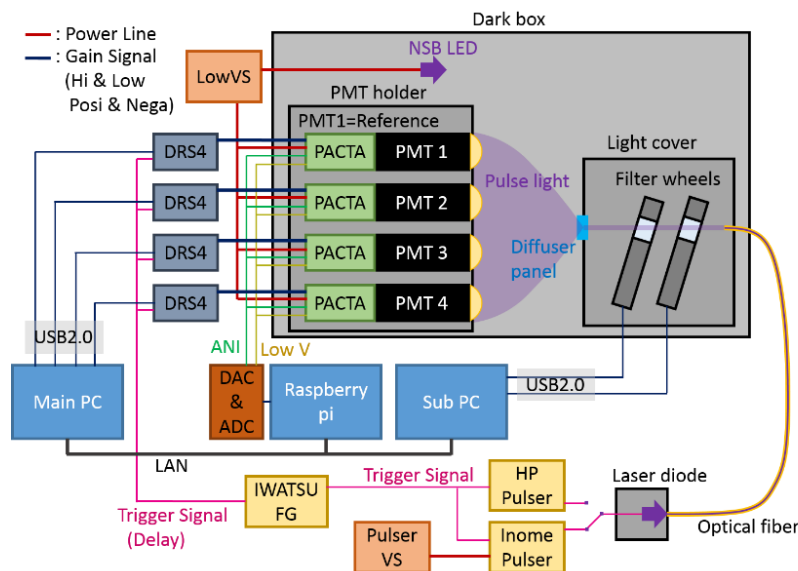


図 3.1 PMT Calibration Campaign の Setup 模式図

このセットアップでは、以下のようなシステム構築を行う事で測定項目のほとんどを自動化することに成功している。PMT からの信号の取り扱いについては、各 PMT に取り付けられたプリアンプを経由した後、USB でコンピュータと接続された DRS4

(Domino Ring Sampler) で波形として読み込まれる。この際 PMT の高圧電源制御及びプリアンプの電源供給は Raspberry-Pi と 4096 レベルの DAC を接続した高精度のコントロールボードによって行われる。光源については今回の PMT Calibration Campaign に合わせて開発した、大気チェレンコフ光と同様の 400nm 波長で出力可能なピコ秒レーザーを使用し、光量調整にはシリアル通信でコンピュータと接続された 36 段階の Filter wheel が用いられる。この Filter wheel は 6 段階のフィルターがセットされたものを 2 台併設して使用しており、完全に真横を向けて運用すると 2 台の間で反射した光が再び PMT に入射する恐れがあるため、角度をつけて平行に設置されている。外部からのノイズの影響を軽減させるため、PMT にはプリアンプから管面まで全て金属製のシールドで覆っており、ノイズの伝搬源となりやすい光源についても、暗箱の外に設置したレーザーを光ファイバーで引き込むことで暗箱内に設置しないようにしている。

現在、すでに 1000 本以上の PMT の Calibration が完了しており、1st-LST 建設に向けて着実に成果を上げているという。

また今回の Calibration Setup 立ち上げに際して、可能な限り既存の装置などを用いることで高精度でありながら安価で準備が可能であるという事が求められた。それを実現したものの一つに、今回開発を行ったピコ秒パルスレーザーが挙げられる。これは特殊な装置や高価な部品を極力使わず、一般的に手に入る部品のみで構成することを目的として開発した。以下にその詳細を述べる。

4. ピコ秒レーザー

4.1 Pulser Configuration

今回、PMT Calibration campaign のために開発を行ったパルサーは、電源装置や駆動に必要なトリガー信号を外部に依存せず、単体でも動作可能なものとした。そのための構造 (図 4.1) 及び外観 (図 4.2) を次に示し、その各部位の働きを下記に示す。

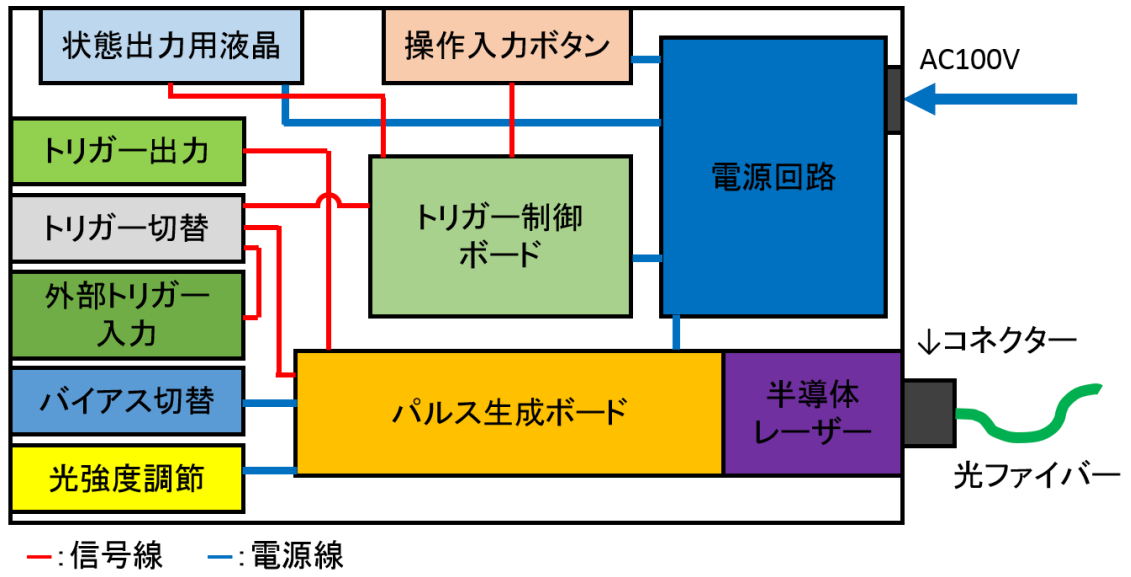


図 4.1 パルサー構成の概要図

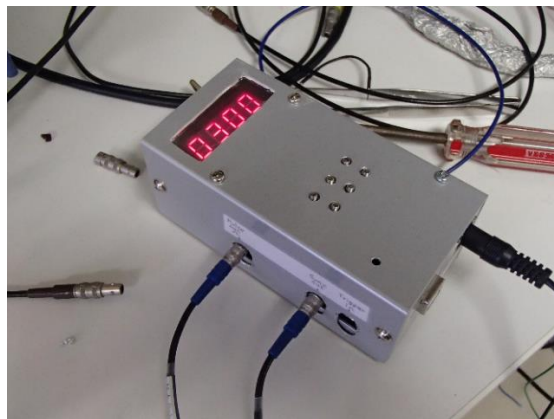


図 4.2 パルサー外観 Ver. 1 (上図)
及び Ver. 2 以降前面 (左下図)、Ver. 2 以降背面 (右下図)

4.1.1 パルス生成ボード

今回開発を行ったパルサーの中心部といえるボードであり、入力されたトリガー信号から、光源を発光させるための時間幅の狭い高速なパルス信号を生成する回路である。高速動作が要求されているが、光源には要求電流値が数十から数百 mA 程度と比較的大きな半導体レーザーを想定している。大電流かつ高速な動作が可能なパルサーとするために、入力されるトリガー信号から、微分回路を通す事で極めて時間幅の狭い高速なパルス信号を生成するという回路の設計思想[21]に創案を得て、開発を行った。

次に、パルス生成ボードの現段階での回路図（図 4.3）を示し、各部位の解説を行う

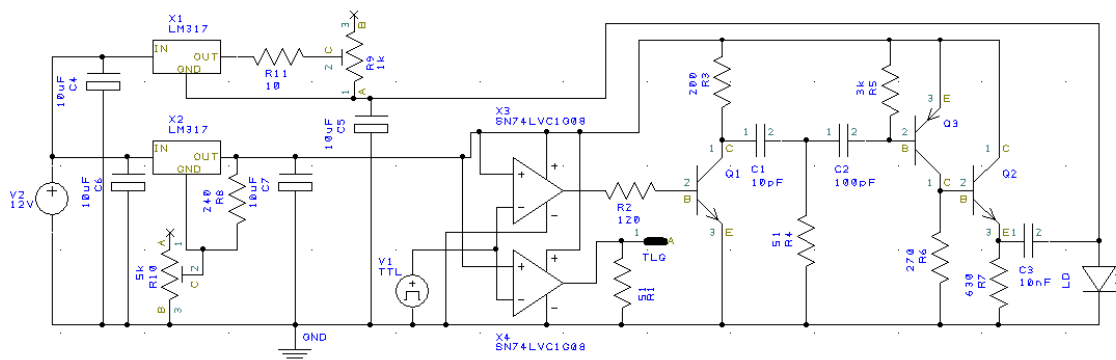


図 4.3 パルス生成ボード回路図（パソコン等は省略）

4.1.1.1 トリガー信号入力および波形整形回路

トリガー源(V1)からの TTL 波形を想定したトリガー信号を受け取り、その信号を高速な Comparator (X3)（入力された電圧に応じて 0 もしくは 1 を返す素子）を通すことで再整形する回路である。トリガー信号は伝送途中で減衰や反射を起こしてしまい想定した波形と異なっている場合がある。そのような信号を微分回路に入力するとパルスの時間幅に大きな影響を及ぼしてしまうため、本回路で一度トリガー信号を整えている。

使用する Comparator 素子については後段に渡される信号の大本であるため、出力信号の立ち上がり及び立ち下り時間が速い必要がある。そこで電源電圧 5V 時に信号の立ち上がり及び立ち下り時間が 2ns 前後の、極めて速い素子を使用した。

4.1.1.2 微分回路

回路中の C1 及び R4 からなる単純な CR 回路であり、Comparator (X3) を通って再整形されたトリガー信号の立ち上がり及び立ち下り時間を電氣的に微分することで極めて時間

幅の狭いパルス信号を生成することが出来る。この微分回路から出力されるパルスによって最終的な短光の時間幅が決定されるため、ここでの時定数が大きく性能に関する事となる。後述する性能要求値に対応させるためには出力されるパルス信号が1ns以下の時間幅である必要がある。

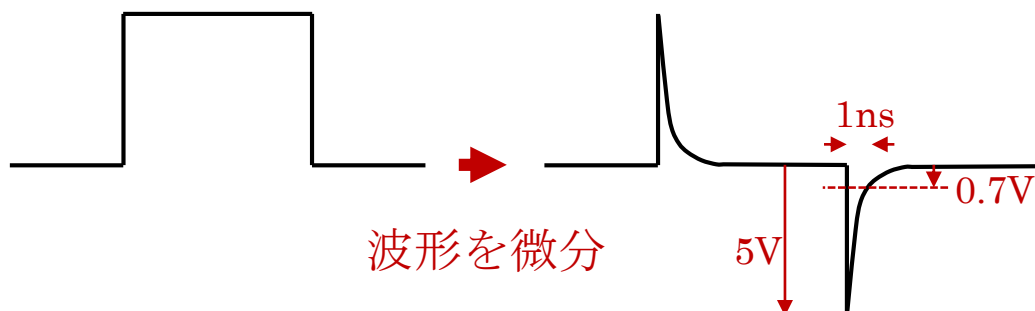


図 4.4 微分回路の動作イメージ

後段のコレクタ接地された PNP トランジスタ (Q2) にスイッチングを行わせるためには、ベースに入力される微分回路からのパルス信号の電圧 (ベース電圧) がエミッタ電圧より 0.7V 以上低くなる必要がある。電源電圧 (パルスのピーク電圧となる) V_0 を 5V とし、図 4.4 のように微分回路で V_0 から 0.7V になるまでの時間幅を 1ns と設定したいため、微分回路の時定数を以下のように計算した。

微分回路のパルス応答時間を求める計算式

$$V(t) = V_0 \cdot e^{-\frac{1}{CR}t} \quad (4.1)$$

より、回路の時定数 CR は

$$CR = -\frac{t}{\ln\left(\frac{V(t)}{V_0}\right)} \quad (4.2)$$

となる。

$V(t)$ は $t=1\text{ns}$ 時の電圧を示すため 0.7V となる。全てに数値を入力して計算を行うと

$$CR = -\frac{1 \times 10^{-9}}{\ln\left(\frac{0.7}{5}\right)} = 5.09 \times 10^{-10} \quad (4.3)$$

となった。

よって時定数が約 510ps 以下であれば微分回路からの出力電圧が 1ns より速く 0.7V まで下がるのが求められた。そこで $C1=10\text{pF}$ 、 $R4=51\Omega$ (時定数=510) として設定した。

4. 1. 1. 3 大電力を高速に扱うためのスイッチング回路

この最終段階は消費電力の大きな半導体レーザーを発光させるために不可欠な回路であり、前段までは微弱な電流で取り扱っていた高速なパルス信号を、高速かつ大

電力を取り扱える素子でスイッチングさせることが目的である。広帯域で動作可能であり数百 mA 程度の比較的大きな電流を扱えるトランジスタは無線通信などにも需要があるため、半導体メーカーによって細かい性能が異なるものが多数販売されている。そのため、1GHz 以上のクロックで動作し、100mA 程度の電流を扱うことが可能であることを条件に、スイッチング素子の選定を行った。また最終段のスイッチングを行う NPN 型トランジスタに関しては、光源として接続される半導体レーザーの要求する大電流に対応できるよう、電流利得をもたらすコレクタ接地方式にて駆動するよう回路を構成している。

パルス生成ボードは以上のような構成となっている。上記で解説を行った回路以外に関しても高周波を扱う事を前提に設計しており、パルス生成ボードで使用している受動素子のパッケージサイズは全て寄生容量が少なく高周波特性の良い 0402 (1.0mm x 0.5mm) を使用しており、ノイズの混入を抑えるためのアース線の強化や可能な限りの回路小型化を行った。また本パルサー内部でも特に電氣的ノイズの影響を受けやすい部分であるため、このボードはアルミ製のシールドで覆いノイズを遮断するようにしている。このように開発を行った試作パルス生成ボードを図 4.4 に示す。

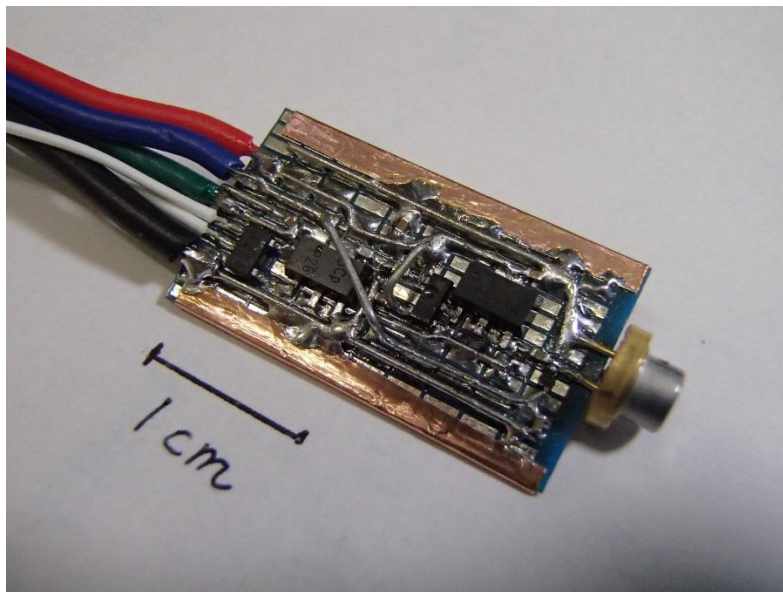


図 4.5 試作パルス生成ボード

本パルス生成ボードは 2 種類の異なった方式による出力パルス強度 (光量) 調節機構を備えている。以下でその 2 種類の機構に関する解説を行う。

4.1.1.4 バイアス電流調整機能 (粗調整)

この回路の特徴として、光量調節に DC 成分のバイアス電流を用いることが挙げられる。パルス幅は短くなるほど光源に供給できる電力が小さくなるため、光源として使用

を予定している半導体レーザーを大出力で発光させる事が難しくなる。

そこで出力を調節可能なバイアス電流をパルス信号と別に光源に与えることで、発光に必要な電力を補う役割を持たせることができる。しかし半導体レーザーは1mA以下の極めて微弱な電流であっても発光してしまうため、バイアス電流を与えている間はパルスが与えられていない間も、光源が常に弱く発光した状態が続く事となる。強度の強い短光のみに反応する受光素子などに対して用いる場合は大きな問題にはならないが、CTAで使用しているような1光子を読み取り可能な光電子増倍管(PMT)に与える光源として用いる場合は、このバイアス電流による連続した発光がノイズとなってしまう、本来の短光からの信号取得を妨げる原因となる。

そこで短光をフィルターや光ファイバーに通して減衰させて運用する方法や、次に示すパルス電圧調整のみで光源を発光させる事でバイアス電流による電力補正を用いない方法なども選択可能となっている。

4.1.1.5 パルス電圧調整機能（微調整）

パルス生成ボードに供給する電源電圧を変化させることで、ボードの最終段においてスイッチング素子に供給される電圧も調整することができる。これにより、出力されるパルス信号の電圧を調整可能としている。前述のバイアス電流とは違い、単純にパルス信号の電圧を調整することが可能であるため、直流成分が介入することはない。しかしながらスイッチング素子が流すことのできる電力には限度があるため、短光の発光強度はあまり強くすることはできない。

これら2種類の調整機能を持たせることで、様々な測定に光源として用いることが可能であり、また光源となる半導体レーザーやLEDなどを変更したい場合でも幅広い光源に応用が可能なように設計している。

4.1.2 トリガー制御ボード

パルサーが自前でトリガーを生成するための機能を持たせたボードであり、制御には安価なAVRマイコンであるATmega328PATmega328P (Atmel, ATmega328P. (2014))を用いる。トリガー周波数は1 - 999Hzまで設定可能である。それ以外に操作入力ボタンによる周波数操作と、状態出力用液晶を用いたトリガー周波数やトリガーソースなどの各種情報表示を行う。

4.1.3 電源回路

前述のボード（回路）に電力を供給する回路である。電圧レギュレーターを用いて各回路の要求電圧に合わせた電源電圧を生成する。レギュレーターを用いた変圧では不要な電圧が熱となって消費されてしまうため電源の効率は良くないが、ノイズの発生が少なく安定しているため、本パルサーのように電源の安定性が求められる環境では最適な電源素子であると言える。パルサー内部の回路は最大で15Vの電圧を印加することが可

能であるが、今回使用する光源の仕様から電源入力に AC アダプター接続で 12V 入力とし、可変レギュレータによって変圧を行うことで調節する方法とした。

4.1.4 半導体レーザー

本パルサーでは光源となる半導体レーザー(図 4.5)は、前述のパルス生成ボードに直接取り付けられている。



図 4.6 光源として使用する 405nm 波長の半導体レーザー

バイアス電流が与えられている間は半導体レーザー自体が発熱してしまい、自身の熱で特性が変化してしまうため、これを抑える為にパルス生成ボードのシールドの一部を半導体レーザーと熱伝グリスを介して密着させることで、バイアス電流印加時の発熱を逃がす放熱板として使用している。また半導体レーザーの発光面には SMA905 型の光ファイバー端子(図 4.6)が装着されており、発光させた短光を直接遠方まで伝達することが可能なように設計している。



図 4.7 光ファイバーの接続に用いる SMA905 端子

上記のパルス生成ボードに半導体レーザーを取り付けたものを、図 4.6 の SMA905 コネクタに対応したアルミ製シールドで覆いモジュール[図 4.7]とした。このモジュールを図 4.8 のようにトリガー制御ボードや電源回路などとあわせてパッケージングし、以降の測定に使用した。

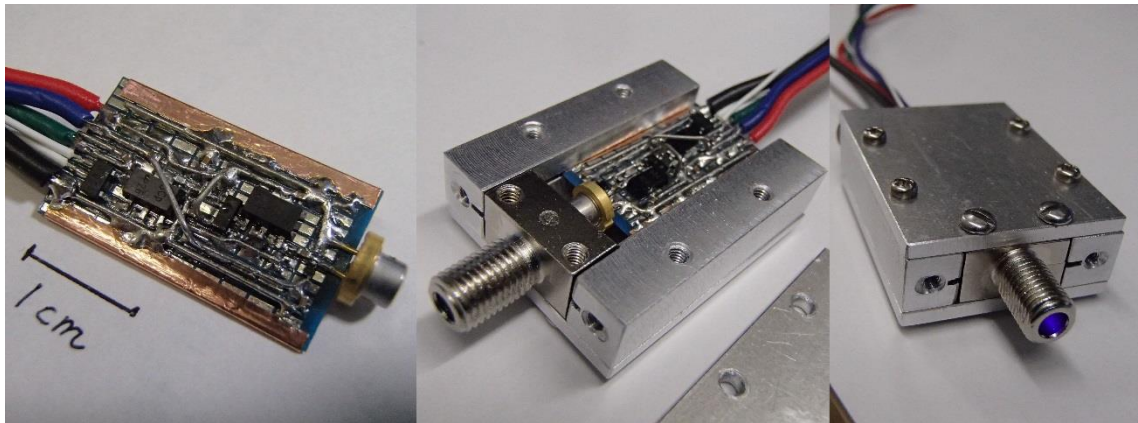


図 4.8 アルミ製の電気シールドで覆ったモジュール

右側がモジュール内に組み込むパルス生成ボードと半導体レーザーである。基板サイズは高周波特性を追求して表面実装用ユニバーサル基板でありながら 2cm x 1cm 程度の大きさに納めている。

また熱源となる半導体レーザーは、冷却版の役割も担う電気シールドとシリコングリスを塗布して密着させており、熱伝導率を高めて冷却効率を上げている。



図 4.9 パッケージングしたピコ秒レーザーの内部

ケース奥の中央に見える金属部分が、SMA905 コネクタとアルミ製シールドに覆われたパルス生成ボードである (SMA905 コネクタは背面に出ている)。

5. Specification

開発したパルサーの性能については、CTA 計画及び LST (Large-sized Telescope) の観測対象である大気チェレンコフ光より高速である必要があり、また本パルサーを使用予定

の光電子増倍管(PMT)の性能評価は1行程を1時間かけて行う予定であったため、次に示すような要求値を設定して開発を行った。

・パルサー開発における性能要求

1. 時間幅が 1ns (FWHM) 以下の短光を出力可能である事。
2. 光量を 2000phe 以上まで任意に変更可能である事。
3. 60 分間連続稼働させた時の光量変化が 5%以内に収まり、安定している事。
4. 大気チェレンコフ光と同波長帯である 400nm 前後の光を出力可能である事。
5. 安価で製造が可能である事。

5.1 Pulser Calibration Setup

開発したパルサーが前述の性能要求を満たしているか確認するため、短光の時間変動測定(図 5.1)とパルサー信号の時間変動測定(図 5.2)を行う2種類のセットアップを用意して性能評価を行った。

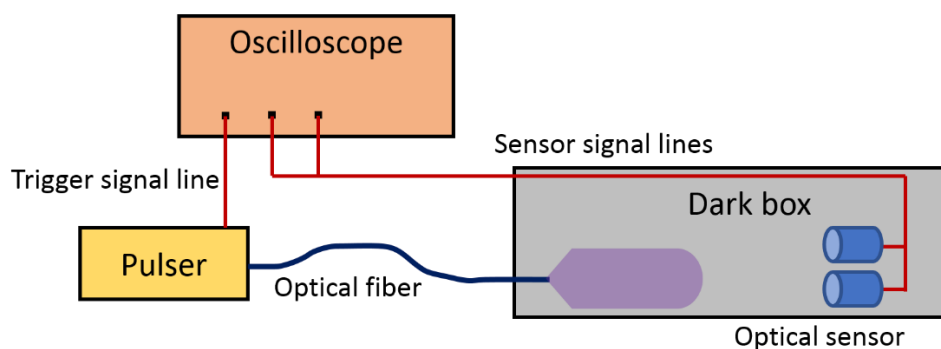


図 5.1 短光の時間変動測定用セットアップ

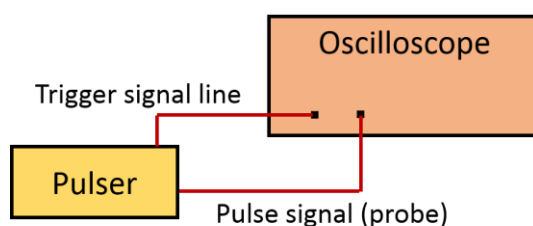


図 5.2 パルサー信号の時間変動測定用セットアップ

パルサーの光源として使用する半導体レーザーについては、大気チェレンコフ光とほぼ同波長での発光が可能である「日亜化学製 NDV4212」を使用した。この半導体レーザーの発光波長は 405nm である。

5.1.1 短光強度の時間変動測定

外部からの光を遮断した暗箱(Dark box)内の片方に光検出器(Optical sensor)を設置して、もう片方にパルサーからの短光を伝達する光ファイバー(Optical fiber)

を設置する。光検出器によってパルサーからの短光を 60 分間測定することで、短光強度の時間変動を測定した。この測定において、光ファイバーから光検出器までの距離は 50cm とした。ここで使用する光検出器には、LST で使用予定の光電子増倍管である「浜松ホトニクス製 R11920-100」を使用する事とした。観測された光量変動の要因が光源によるものか光電子増倍管によるものかを切り分けるために、一つの光源に対して観測を行う光電子増倍管は 4 本としている。

測定にあたっては、パルサー・光電子増倍管ともに電源投入直後は温度変動などによって安定しないため、30 分間の暖機運転を行ってから測定を開始した。

5.1.2 短光幅の時間変動測定

測定のセットアップは(図 5.1)と同様であるが、光検出器として高速な APD(Avalanche photodiode)を用いる。今回はこの APD に「浜松ホトニクス製 S2381」を使用している。この APD は有効受光面積が 0.03mm^2 と極めて小さいため電子の走行距離及び素子の持つ電気容量が小さく、高速な光を観測する事が可能である。遮断周波数は 1GHz となっている。これを 1. の測定と同様に 30 分間暖気させた後、60 分間短光を測定することで、短光幅の時間変動を測定した。

5.1.3 パルサー信号の時間変動測定

光源となる半導体レーザーにパルサー内部で供給されるパルス信号を、回路を変更して直接取り出し Oscilloscope に接続する。これによってパルス信号を観測することが可能となる。これを 60 分間測定することで、パルス信号の強度と幅の時間変動を測定する。

5.2 Pulser Specification

前述の性能評価を行った際の結果について、グラフにしたものを図 5.3, 図 5.4 に示す。

約 70 分間の連続稼働を行って短光の時間変化を測定した行程では室温を一定にするために設定温度 24 度でエアコンを使用しており、室温も同時に測定を行っていた。

その結果、室温については 70 分間で最大 2.5 度以内の変動であったことが確認できている。

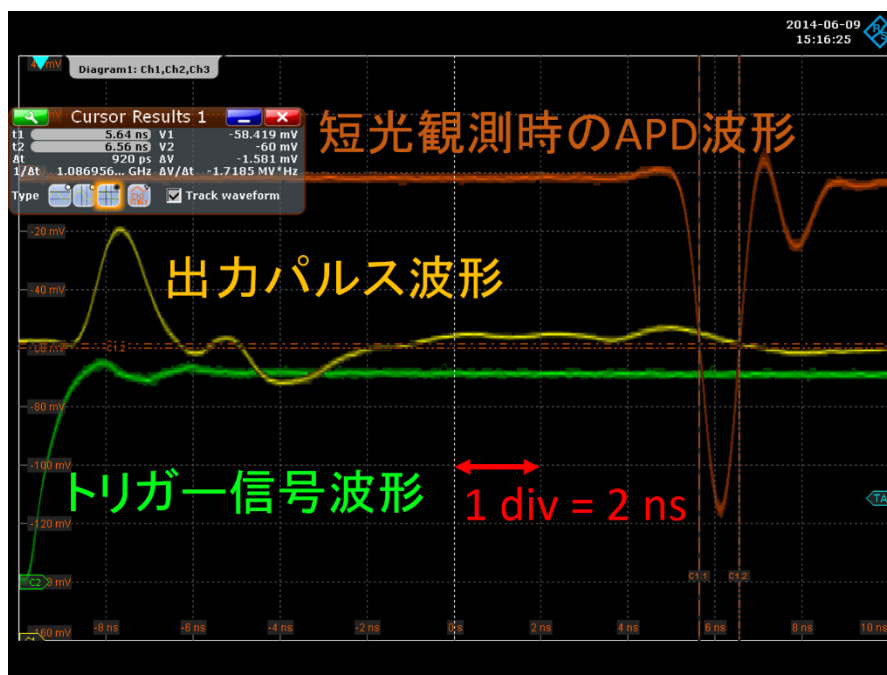


図 5.3 短光測定時の Oscilloscope 波形

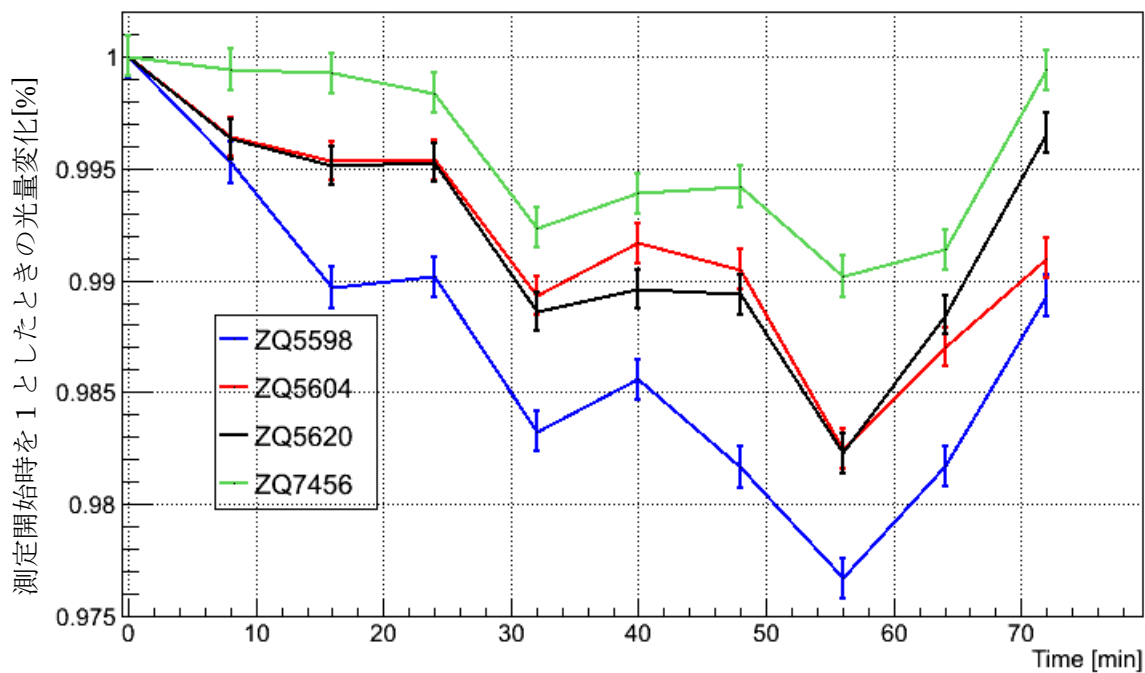


図 5.4 短光強度(バイアス ON)の時間変化

これらの結果から、今回開発したパルサー回路の仕様を表 1 に示し、前述の性能評価を行った結果を次の表 2、表 3 に示す。

表 5.1 パルサー回路の仕様

項目	値
動作電圧	9 - 12 V
消費電流	500mA 以下
対応トリガー信号	TTL (Max = 5.5 V) / 2.5kHz
出力 Sync 信号	TTL 準拠 (5 V)
トリガー入力	内部&外部入力対応
内部トリガー周波数	1 - 999 Hz

表 5.2 出力短光の時間変動測定結果

項目	値
短光時間幅 (60 分平均)	8.0×10^2 ps (FWHM)
短光立上り時間 (60 分平均)	6.0×10^2 ps (10% - 90%)
短光強度 (バイアス OFF)	1 - 20 phe
短光強度 (バイアス ON)	100 - 3000 phe 以上 (DC 成分含む) ※素子の最大出力光量 = 100mW
トリガー信号からの遅延	< 10 ns
短光光量幅変動 (60M) (ジッター) (60M)	2.5% 1.3% (± 50 ps)

短光強度の時間変化について最大 2.5% の変化が現れた要因としては、パルス生成ボードを構成している部品の温度依存性が考えられる。構成部品は大きく分けて、抵抗・コンデンサ等の受動素子、トランジスタ・コンパレータなどの能動素子、そして光源となる半導体レーザーの 3 種類が時間変化に関わっていることが考えられる。

受動素子については部品選定の時点で温度係数が 100ppm/°C (ppm:Parts per million, 100 万分の 1/°C) の物しか使用しておらず、受動素子の温度依存性はほぼ無視できると考えられる。

トランジスタ等の能動素子についても、[付録, B]にあるように使用素子の温度係数がとても低いものを使用しており、多く見積もっても hfe(電流増幅率)で 5000ppm/°C 程度である。

一方半導体レーザーは[付録, C]にあるように大変温度依存性が高く、 1.9×10^5 ppm 程度の温度係数であることが分る。

これより、短光の時間変動に大きく寄与する要因は半導体レーザーであると思われる。

6. Summary

前述の性能評価の結果から、当初の性能要求値との比較を次に示す。

1. 発光時間幅が 800ps と極めて高速な短光を出力可能である。
2. 2 系統の光量調整を用いる事で、1 - 20phe 及び 100phe 以上の光量に調節が可能である。
3. 60 分連続稼働時の短光の変動が全体を通して 2.5%以下と極めて小さい。
4. 様々な光源を使用可能であるため、今回使用したように大気チェレンコフ光とほぼ同様の波長帯を出力可能な光源を使用可能である。
5. 製造コストに関しても使用部品をすべて含めて 5 万円以下である。

この結果より、当初の性能要求を全て満たしたパルサーの開発に成功したと言える。

今回開発したパルサーには、スイッチング素子として Q1 及び Q2 に NXP Semiconductors 製の BFQ591 を、Q3 に同じく NXP Semiconductors 製の BFT92 を用いている。最終段となる Q2 は光源への電源をスイッチングしているため、次に示す複数のトランジスタを用いて回路を試作し、テストを行った。その結果先に挙げた BFQ591 が最も今回の用途に合った性能を示したため採用した。

以下に Q2 で使用したトランジスタを示す。

- BFQ591
NXP Semiconductors 製、 $V_{ce0}=15V$ 、 $I_c=200mA$ 、 $f_T=7GHz$ 、 $P_{tot}=2.25W$
- BFG591
NXP Semiconductors 製、 $V_{ce0}=15V$ 、 $I_c=200mA$ 、 $f_T=7GHz$ 、 $P_{tot}=2W$
- BFG21W
NXP Semiconductors 製、 $V_{ce0}=4.5V$ 、 $I_c=500mA$ 、 $f_T=18GHz$ 、 $P_{tot}=600mW$
- NE664M04-T2-A
CEL 製、 $V_{ce0}=5V$ 、 $I_c=500mA$ 、 $f_T=20GHz$ 、 $P_{tot}=735mW$
- NE46134-T1-AZ
CEL 製、 $V_{ce0}=15V$ 、 $I_c=250mA$ 、 $f_T=5.5GHz$ 、 $P_{tot}=2W$
- START499
STmicroelectronics 製、 $V_{ce0}=4.5V$ 、 $I_c=600mA$ 、 $f_T=5GHz$ 、 $P_{tot}=600mW$

謝辞

自分が行ってきた研究をこうして論文として書く事ができたのも、私を支えてくださった数多くの方々のおかげであるとあらためて思いました。まず何より、この2年間指導教官となってくださいました山本常夏教授には研究内外を問わず様々な面でご指導頂き、どれだけ私が至らずとも常に解決へ繋がるように導いていただき、誠にありがとうございました。日々ご迷惑とご心配をおかけしてしまい、申し訳ありませんでした。梶野文義教授には学部の頃から様々な質問に乗っていただき、回路に関しても行き詰った際には頂いた助言によって解決することができました、誠にありがとうございます。東京大学宇宙線研究所の林田将明助教、中嶋大輔特任助教には、私が修士課程に進んですぐの頃から研究についてとても丁寧に教えていただき、また知らなかった様々な知識や対処方法を教えて頂きました事を心から感謝いたします。大岡秀行技術専門職員には、回路設計をはじめ技術的な分野で大変お世話になりました。頂きました数々のご助言がなければ、このような結果を出せていなかったと思います。他にも、東京大学宇宙線研究所の手嶋政廣教授をはじめ、CTA-Japanの皆様には教えていただいた事全てが合わさって私自身を成長させてくださったおかげで、このような結果を出すことができました。

また共に研究を進めてきた院生や学部生の皆様にも、大変お世話になりました。特に Calibration チームの皆様には、私の至らなさや失敗で足を引っ張ってしまったことも多々あったと思いますが、それでも時には厳しくお互いの成果を検証し合い、時には楽しく成果を喜び合えた事を心から感謝しております。

その他にも、ここに書ききれないほどの多くの方々が私の支えとなってくださり、研究を行う事ができたのだと感じました。皆様から頂きました様々な経験が、今の私に欠かすことのできない大切なものとなっています。この場を借りて、深く感謝いたします。

最後に、私をこのような素晴らしい大学にめぐり合わせてくださった私の両親に最大限の敬意を表します。誠に、ありがとうございました。

付録

[A] PMT Calibration Campaign 用のデータベースについて

Ubuntu14.04LTS への MySQL インストール

Ubuntu は標準で MySQL が入っているが、ネット上では一度削除して再インストールを勧めているサイトがあったので、そのように行った。

まず初期状態で入っている MySQL サービスを削除する。

```
$ sudo apt-get remove mysql-server* mysql-common
```

```
$ sudo apt-get autoremove
```

```
$ sudo rm -r /etc/mysql <- すでに存在しなかった
```

```
$ sudo rm -r /var/lib/mysql <- すでに存在しなかった
```

次に MySQL を再インストール。一応これは新たに端末を開いて行った。

```
$ sudo apt-get install mysql-server
```

ここで root アカウントのパスワードを指定するように言われるので、"_____" と設定した。入力画面は確認のためか 2 度出る。

Root のパスワードを設定後、インストールが完了するまで待つ。

完了したら

```
$ sudo mysql -u root -p
```

と入力すると、sudo のパスワードを聞かれた後（前回の sudo 後すぐであれば聞かれない）先ほど設定した MySQL の root パスワードを聞かれるので、どちらも入力すると MySQL にログインできる。

```
mysql > show databases;
```

などを入力して MySQL が正常に動作していることを確認すると、

```
mysql > exit;
```

と入力して一旦ログアウトする。

その後、PC 起動時に mysql-server が自動起動するように新しい端末を開いて

```
$ sudo update-rc.d mysql defaults
```

と入力する。これで自動起動設定が完了した。

ユーザーアカウント自体には LAN 内からのアクセス許可を与えても、PC のネットワークの問題で標準設定のままでは LAN 内からアクセスできない。これは ubuntu-server の設定を変更する必要がある。

→my.cnf を編集することで解決する。

```
$ sudo emacs /etc/mysql/my.cnf
```

でパスワードを入力し、

```
[mysqld]
```

項目の

`bind-address=127.0.0.1`

を#でコメントアウトする。

ubuntu を再起動。

これで LAN 内の PC から接続可能となった。

※SSH でログインした再のエラーについて

SSH を ubuntu にインストールした後、LAN 内のほかの PC から SSH で接続して MySQL の root アカウントにログインしようとするすると'ERROR 2002'(socket 通信系エラー)が出る。

一度このエラーが出るとそのアカウントは停止してしまうので、再起動させる必要がある。

エラーが出る原因は、まず上記の `my.cnf` を編集していない場合 LAN 内のほかの PC から参照できないため、それ以外に root アカウントは標準で `localhost(127.0.0.1、その PC 内部から)`のみアクセスを受け付けるように設定されているからである。

この root アカウントの設定は変更できるが、セキュリティ上変更しない事が望ましいと思われる。

また、LAN 内部から MySQL クライアント(`sequel pro` 等)を使ってアクセスした場合も発生してしまうので、注意が必要である。

これについてはグローバル IP をサーバー PC に付与した上でグローバル IP をターゲットホストに指定してアクセスすると起こらない模様。

SSH で root アカウント以外にアクセスする場合は、下記のように `-h` のあとアクセス対象サーバーの IP アドレスを入力する。(今回の例では `192.168.10.162` にアクセスした)

```
$ sudo mysql -h __.__.__.__.__ -u CTA_cal -p
```

これによって socket 通信経由ではなく TCP/IP 通信として接続できるので、アクセス対象のアカウントが `localhost` のみに限定されていない場合は問題なくアクセスが可能となる。

※たぶん不要だが、改善されない場合、エラーが出るディレクトリ(例：`/var/run/mysqld` 等)にエラーが出ているファイル(`mysql.sock`)が有る確認し、無い場合は作成することでエラーが消えるかもしれない。 その場合再起動を忘れないこと。

データ移行

MySQL の前運用していたサーバーから各データベースをバックアップし、今回セットアップしている新しい MySQL サーバーにインポートを行った。

まず database を作り直す。

```
mysql > create database calibration default character set utf8;
```

```
mysql > create database CTA_Mirror default character set utf8;
```

次にアカウントを作成する。

```
mysql > grant all privileges on calibration.* to CTA_cal@"%" identified by  
' _____';
```

```
mysql > grant select on calibration.* to CTA_cal_R@"%" identified by  
' _____';
```

```
mysql > grant all privileges on CTA_Mirror.* to CTA_mir@"%" identified  
by ' _____';
```

```
mysql > grant all privileges on CTA_Mirror.* to CTA_mir_R@"%"  
identified by ' _____';
```

これでバックアップデータをインポートする準備が完了するので

```
$ mysql -u root -p calibration < backup_data.sql
```

でバックアップしていた.sql ファイルを calibration データベースにインポートする。

SSH

Ubuntu は標準で SSH サーバーが入っていないのでインストールする。

```
$ sudo apt-get update
```

```
$ sudo apt-get upgrade
```

```
$ sudo apt-get install ssh
```

で、インストール完了。SSH デーモンを走らせておかないと使えないので

```
$ sudo /etc/init.d/ssh start
```

で SSH デーモンの起動も完了。これで問題なく SSH を使用できる。

※SSH を使って別 PC の mysql にログインする場合、mysql のエラー項目にも書いてあるが、-h と Ip アドレスの指定が必要となるので注意する。

これを忘れると最悪の場合再起動が必要となる。

ネットワーク設定

今回の MySQL サーバーに関してグローバル IP の設定とポート開放を申請した結果、グローバル IP=____.____.____.____、使用可能ポート=__となったので、下記のように設定。

設定 -> ネットワーク設定 -> 有線 -> オプション -> IPv4 タブ

→手動を指定

アドレス=____.____.____.____、ネットマスク=____.____.____.____、ゲートウェイ

→=____.____.____.____

DNS サーバー=____.____.____.____

この接続を完了するには IPv4 アドレス化が必要となりますにチェック確認。

MySQL サーバーとして動かす場合の注意

甲南大学の指定で、開けることが許されるポートは限られてる。

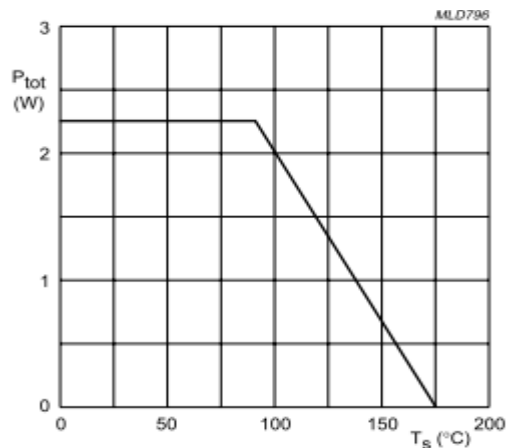
今回はポート__をあけることにしたので、LAN 内部で 3306 に戻さなければならない。そこで、PC 起動時に下記コマンドを実行する必要がある。

```
$ sudo iptables -t nat -A PREROUTING -p tcp -dport __ -j REDIRECT --to-port 3306
```

これによってポート__で受信した通信を PC 内部では 3306 として扱えるため、mysql に問題なく渡すことができる。

[B] パルス生成ボードに使用している能動素子の温度係数

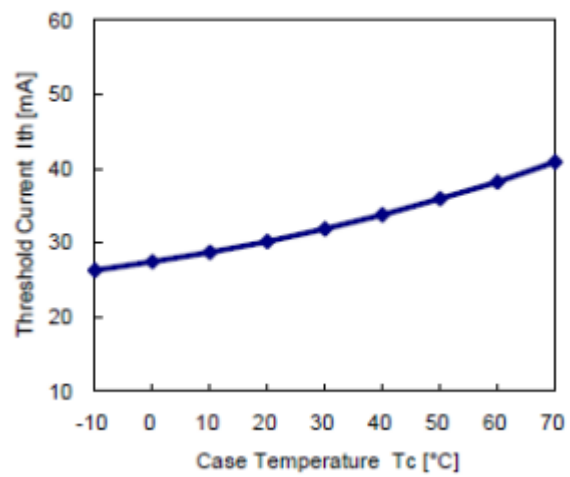
図 1. BFQ591 の温度/電力関係



Power derating curve.

[C] 光源として使用している半導体レーザーの温度係数

図 1. 半導体レーザーの温度/電流関係



Reference

- [1] <http://asd.gsfc.nasa.gov/archive/owl/intro.html>
- [2] <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/>
- [3] <https://magic.mpp.mpg.de/>
- [4] <https://veritas.sao.arizona.edu/>
- [5] W. Hofmann et al., 1999, *Astroparticle Physics*, 12, 135-143.
- [6] http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/how_12/cerenkov.html
- [7] CTA-Japan コンソーシアム:CTA 計画書, <http://cta.scphys.kyoto-u.ac.jp/index.html>
- [8] <http://www.cta-observatory.org/>
- [9] 手嶋政廣:物理学会 CTA 報告 58:全体報告(2013, 9, 20)
- [10] B. S. Acharya et al., 2013, *Astroparticle Physics*, 43, 3-18.
- [11] http://www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/news/supernova-cosmic-rays.html#.Uvxc3fl_tA1
- [12] http://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/multimedia/cygnusx1.html
- [13] <http://chandra.harvard.edu/photo/2010/a3376/>
- [14] http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/know_12/active_galaxies.html
- [15] http://www.nasa.gov/mission_pages/swift/bursts/oddball_burst.html
- [16] <https://www.mppmu.mpg.de/~rwagner/sources/>
- [17] William F. Hanlon: The energy spectrum of ultra high energy cosmic rays measured by the high resolution Fly's Eye observatory in stereoscopic mode. PhD thesis, University of Utah, 2008
- [18] <http://science.nasa.gov/astrophysics/focus-areas/how-do-stars-form-and-evolve/>
- [19] <http://www.nature.com/>
- [20] http://subarutelescope.org/Pressrelease/2007/01/07/j_index.html
- [21] Wilfried Uhring, Chantal-Virginie Zinta & Jeremy Bar-tringer: A low cost high repetition rate picosecondlaser diode pulse generator. Proc. SPIE 5452, *Semi-conductor Lasers and Laser Dynamics*, 1 September 2004