甲南大学大学院 自然科学研究科 物理学専攻 修士論文 *N*o.205

イメージインテンシファイアを用いた チェレンコフ望遠鏡用高解像度高速撮像システムの開発

Development of high-resolution and high-speed camera system for the Cherenkov telescopes using image intensifiers

March 2003

多田 逸洋

甲南大学大学院自然科学研究科

平成15年5月12日

概要

イメージインテンシファイアと CCD カメラを用いることで既存の PMT カメラよりはるか に詳細なシャワーイメージ画像を高速で撮影可能なチェレンコフ望遠鏡用撮像システムの 開発状況を報告する。

近年、ガンマ線天体物理学では TeV のエネルギーをもつガンマ線の観測により成果を上 げて来た。しかし、このようなエネルギーのガンマ線が遠方より到来する場合には赤外線 背景放射の光子と相互作用をする確率が大きくなるため観測することが難しくなる。観測 空間領域や観測対象となる線源の数を増やすためには相互作用の確率の小さくなる 100GeV 以下のより低いエネルギー領域のガンマ線を観測する手段の確立が求められる。

現在の超高エネルギーガンマ線観測で主流にあるのがチェレンコフ望遠鏡による空気シャ ワーのイメージング観測である。低いエネルギーのガンマ線が作り出す空気シャワーは小 さくなる。小さな空気シャワーイメージを観測するためには既存のカメラよりはるかに解 像度を高くする必要がある。また、低エネルギーのガンマ線は事象頻度が高くなるため高 速で撮像可能であることも求められる。撮像素子としてイメージインテンシファイアを用 いることでその要求を満たす撮像システムの開発を行うことが本研究の目的である。シス テムはイメージインテンシファイアによる光量の増幅、CCDによる高速撮像、撮像タイミ ング生成のための高速トリガ回路から構成される。

浜松ホトニクス製直径 10cm(甲南大学 3m 望遠鏡での視野にして直径 2 度に相当) 大口径 イメージインテンシファイアと高速ゲートイメージインテンシファイアにより 2 段階の光 量の増幅を行う。高速ゲートイメージインテンシファイアと CCD へ与えるトリガ信号は 光電子増倍管で捕えたチェレンコフ光より高速トリガ回路を経て生成する。CCD カメラは ランダムトリガが可能であり、最大 250Hz で直接 PC 上のハードディスクに書き込むこと のできるシステムを用いた。上記システムを用いることにより現段階において 0.03 度の解 像度を達成した。

abstract

In recent years, great success has been achieved in TeV gamma-ray astrophysics. It is, however, difficult to observe TeV gamma rays which arrive from large distance because of the existence of interaction of the gamma rays with infrared background radiation. In order to extend an observation volume in universe and object number of gamma-ray sources, development of instruments to observe the gamma rays in the region less than 100 GeV where the interaction probability becomes small is required.

Observation of air showers by imaging Cherenkov telescopes is the mainstream of the present observation of very high-energy gamma rays. To observe small size images of the air showers produced by low energy gamma rays, it is necessary to make resolution better than the existing cameras. As the gamma-ray flux at low energies is expected to be large, high frequency data acquisition is also needed. For the above reason we developed a new camera with image intensifiers. The camera consists of an large aperture image intensifier with 10 cm diameter, a high-speed gated image intensifier, a high-speed CCD and a high-speed trigger circuit. A random trigger is possible for the CCD camera, and the system can record the CCD data directly onto hard disks of a PC with a maximum rate of 250Hz.

We measured this system by using a test pattern and found the angular resolution to be 0.03 degrees which is nearly 4 times better than the resolution of major Cherenkov experiment such as CANGAROO etc..

目 次

第1章	序論
1.1	研究目的
1.2	背景
	1.2.1 ガンマ線天体観測の現状
1.3	甲南大学チェレンコフ望遠鏡
	1.3.1 集光系
	1.3.2 撮像系
第2章	高解像度撮像システム
2.1	撮像系
	2.1.1 ラインペア 10
	2.1.2 ファイバオプティックプレート
	2.1.3 大口径イメージインテンシファイア 11
	2.1.4 大口径イメージインテンシファイアの残光時間
	2.1.5 高速ゲートイメージインテンシファイア
	2.1.6 CCD
	2.1.7 解像度の調査
	2.1.8 解像度の上限
2.2	トリガ系
	2.2.1 AMP ディスクミネータ
	2.2.2 LVDS to TTL $\ldots \ldots 2^{2}$
	2.2.3 ロジック回路
	2.2.4 One-shot パルスジェネレータ \dots 2.4 One-shot パルスジェネレータ \dots 2.4
	2.2.5 トリガ系結合テスト 24
第3章	結果 28
3.1	撮像装置とトリガ回路
3.2	参考:空気シャワー模式図の撮影
	3.2.1 1TeV のガンマ線相当のとき 30
	3.2.2 100GeV のガンマ線相当
第4章	結論 38
4.1	性能
4.2	今後の課題

第1章 序論

1.1 研究目的

既存のチェレンコフ望遠鏡用撮像システムより高い解像度のシステムを開発することで ガンマ線天体物理の観測領域を広げることを目的とする。

1.2 背景

1.2.1 ガンマ線天体観測の現状

高エネルギーガンマ線は、地球の大気に入射すると大気中の原子核と衝突して電磁カス ケードシャワーを発生させる。このシャワー中の荷電粒子が大気中の光速より速い速度で 走るとチェレンコフ光が放出される。チェレンコフ光は大気中ではシャワーの進行方向に 集中(約1度)しているため、元のガンマ線の到来方向の情報が保たれている。つまりシャ ワーの形からガンマ線の到来方向、シャワーの大きさや明るさからガンマ線のエネルギー が判別できるのである。地上での高エネルギーガンマ線天体物理はチェレンコフ光を捕え ることで成立している。

これまでの観測事実から TeV ガンマ線発生のメカニズムがある程度事実として解明され てきた。CANGAROO グループによって超新星残骸、SNR 1006 でE 1.8TeV のガンマ 線の放出が始めて観測されたが、これは超新星残骸の中で衝撃波加速が電子を~100TeV ま で加速するという今までの推測を実験的に証明した。ROSAT や ASCA により発見された X線領域のシンクロトロン放射(SR)との関係から、~100TeV 電子が主に 2.7K 宇宙背景 輻射 (CMB) が逆コンプトン散乱 (IC) されて叩き上げられたものが TeV ガンマ線である が解ってきた。一例としてカニ星雲の場合、高エネルギー粒子(電子や陽子など)はパル サー風から供給される。この場合、エネルギーの供給源はパルサーの回転エネルギーであ る。パルサー風で運ばれた高エネルギー粒子は星雲の中で衝撃波加速を受け 100TeV 領域 にまで加速される。このようにして生まれた星雲の磁場によって高エネルギー電子はシン クロトロン放射を起こして X 線を生み、IC によって TeV 領域のガンマ線を放つ。

しかし、パルサー星雲での TeV ガンマ線の発生のメカニズムは、その理解の糸口が見つ かっただけで、まだまだ解明されなければならないことが多い。CANGAROOでのカニ 星雲の観測は、7TeV から 50TeV までガンマ線微分エネルギースペクトルのベキが = -2.5 と一定で変わらず伸びている。カニ星雲の磁場が 300 µ G と大きいことを考えると親 粒子が電子だけでは説明できない。星雲での陽子の加速か、他の要因の可能性もある。

現在考えられているモデルとしては高エネルギー粒子は最初はSR 領域でシンクロトロン放射を行うが、一定の時間をかけてIC領域に拡散し、主にIC領域でCMBとのIC作用によりTeVガンマ線の放出を行うとするものである。このモデルでは、X線領域のシンクロトロン放射をする高エネルギー粒子とTeVガンマ線放出をする高エネルギー粒子は異な

る。これを確かめるには、TeV ガンマ線発生場所をさらに精度よく決める必用があり、望 遠鏡の方向決定精度の向上が求められる。

また、観測対象となる天体の絶対数を増やすことで理論の確からしさをより高めたい要求がある。

しかしながら高いエネルギーのガンマ線は100Mpcより遠方よりは到来しがたい。宇宙背 景赤外線との衝突により電子陽電子対生成をおこない減衰するためである。高エネルギー になるほどガンマ線発生頻度も下がるため地球に到達しづらい。逆にエネルギーが低いと 線源が一気に増える。



図 1.1: 5 つの天体の銀河間赤外線背景放射によるガンマ線吸収の様子。戸谷氏による。z は redshift。z が1を越える天体では100GeVを越えるガンマ線は大幅に吸収される事が解る。

以上のことからより低エネルギーのガンマ線を観測する必要性がある。

しかし、低いエネルギーのガンマ線のつくり出す空気シャワーイメージは最大発達高度 は高くその電子総数は小さいためチェレンコフ望遠鏡にできるシャワーイメージは小さい。 もしも撮像部の画素数を増やすことができればいままで情報元となり得なかった小さなシャ ワーの詳細なイメージをとらえることが可能となる。そのためには高解像度化が不可欠で ある。

1.3 甲南大学チェレンコフ望遠鏡

チェレンコフ望遠鏡とは 地球に入射したガンマ線が大気中の原子核と衝突して空気シャ ワーを引き起こしチェレンコフ光の青い光を放出する。この光を反射鏡で集光し、焦点面 に結像させカメラで撮像する。撮像したシャワーイメージの形から到来方向やエネルギー がわかる。また、シャワーイメージの解析よりバックグラウンドとなる陽子との識別をお



図 1.2: 甲南大学チェレンコフ望遠鏡





図 1.3: シャワーイメージの略図。ガンマ線の場合チェレンコフ光のイメージは視野中心 (線源)を向き、陽子の場合ランダムになる。

チェレンコフ望遠鏡は大別して以下3つの部分に分けられる。

- 集光系
- 撮像系
- 解析系

以下甲南大学チェレンコフ望遠鏡の概略を述べる。



図 1.4: チェレンコフ望遠鏡の概略図

1.3.1 集光系

18枚の分割鏡からなる直径3mの主鏡

ダブル焦点:18枚の鏡内、12枚をイメージインテンシファイア撮像用に6枚をトリガ用 PMTに向けて焦点を合わせる。今回の論文では実際には撮像システムは望遠鏡には搭載 していない。



図 1.5: 甲南大学チェレンコフ望遠鏡の分割鏡の配置図中 14番から 19番の鏡は PMT にむ けて焦点を合わせる。

1.3.2 撮像系

既存の撮像システム

光電子増倍管のアレイによるもの

100GeV 程度のガンマ線による空気シャワーの観測を考えたとき1ないし2chの光電子増 倍管でしかイメージが捕えられない場合が想定される。さらなる高解像度化が望まれる。

高解像度撮像システム

2002年甲南大小田氏の研究により、望遠鏡の分解能と撮像系の解像度を高くするこ とでエネルギー閾値の低下と角度分解能の改善が期待できることがわかった。光電子増倍 管では1ピクセルに収まってしまうような小さな空気シャワーもイメージインテンシファ イアの用いることで撮像が可能になる。



図 1.6: エネルギーが 20GeV から 100GeV のガンマ線による空気シャワーを直径 10m の望 遠鏡を用いる条件で行われたチェレンコフ光イメージの撮像シミュレーション図。左図: 高解像度撮像システム (画素数に制限を設けない場合)。右図:光電子増倍管 (576ch を想定 した場合)。

第2章 高解像度撮像システム

本章より開発した高解像度高速撮像システムについて述べる。撮像システムは大別して実際に空気シャワーのチェレンコフ光イメージを撮像する撮像系と撮像タイミングを検出し 撮像系を駆動させるトリガ信号を生成するトリガ系の2つの部分からなる。

撮像系については解像度の調査に注目し、トリガ系はトリガ生成に要する時間に注目 した。

2.1 撮像系

撮像システム全体はイメージインテンシファイアと CCD を用いた撮像装置とトリガ回路 に分けられる。イメージンテンシファイは直径 10cm の入射面を持つ大口径イメージインテ ンシファイアと高増幅率高速ゲートイメージインテンシファイアをファイバオプティックプ レート (FOP) で接続して用いる。大口径イメージインテンシファイアは常にイベント、夜 光の区別なく光量の増幅を行っている。高速ゲートイメージインテンシファイアの 10 %残 光時間は 1msec と長いため、バックグラウンドの影響を下げるためにイベントの有ったと きにだけ露光するようにトリガ信号を受け取ってから作動するようになっている。



図 2.1: 撮像システムの構成図



図 2.2: 撮像システムの写真

2.1.1 ラインペア

lp/mm(lines pare/mm)とは黒白のラインの組が何組 1mmの間に含まれているかで表される解像度の指標。

2.1.2 ファイバオプティックプレート

微細な光ファイバを溶融して一体化されたファイバ束で一方の端に入射したイメージを もう一方の端から2次元のイメージを損なわずに光解像度で伝搬させる。今回用いたファイ バオプティックプレートを構成するファイバ径は6µmmであり、解像度は102lp/mmであ る。大口径イメージインテンシファイアの出力面と高速ゲートイメージインテンシファイ ア入力面を光学的に接続する。大口径イメージインテンシファイアの出力面直径20mmに 対し、高速ゲートイメージインテンシファイア入力面の直径が18mmと大きさが違う。そ の口径の大きさを合わせるため、テーパーファイバと呼ばれる両端の口径のサイズがテー パ状に異なるものを用いる。円柱形のファイバオプティックプレートの中央部を加熱し砂 時計状に引き延ばすことでテーパーを持たせる。

2.1.3 大口径イメージインテンシファイア

直径 10cm とイメージインテンシファイアとしては非常に大きな受光面を持つ。入射面 にはファイバオプティックプレートが用いられており、入射面に結像したイメージを損なう ことなく光電面に入射光が導かれる。光電面より打ち出された光電子は 16kV の高電圧で 加速され陽極側の蛍光面に打ち込まれることにより、100 倍の光子数の蛍光を発する。特 長は

大口径イメージインテンシファイア 浜松ホトニクス製 V4440U-01x/MOD 光電面有効径 直径 100mm 量子効率 430nm で 20 % 使用蛍光面 P-46 出力波長 530nm 増幅率 100 倍 解像度 入力面換算で 12lp/mm となっている。



図 2.3: 大口径イメージインテンシファイアの動作原理入射光は光電面で電子を叩きだし、 陽極へ向けて 16kV の電位差で電子を加速、蛍光面に打ち込むことで光量を増幅する







図 2.5: 大口径イメージインテンシファイアの出力波長分布。

2.1.4 大口径イメージインテンシファイアの残光時間

出力パルス幅が 32psec、波長 415nm のパルスレーザー (浜松ホトニクス製 PLD-02)を 光源に用いて大口径イメージインテンシファイアの残光時間を測定した。残光時間の定義 は入射光が途絶えてからの出力光量のピーク値から 10 %の出力になるまでの時間である。 大口径イメージインテンシファイアの出力フランジに 2 インチの光電子増倍管を設置し、 PMT 出力を Tektoroniks 製オシロスコープで 512 回の平均をとり、その読みとり値から測 定した。その結果大口径イメージインテンシファイアの 10 %残光時間は 107nsec であるこ とが解った。



図 2.6: 大口径イメージインテンシファイア残光時間測定装置配置図



図 2.7: 大口径イメージインテンシファイア残光時間を測定したオシロスコープの出力ハー ドコピー。図中赤い線の間の時間が残光時間。図中下側の青線が出力の最大値図中上側の 青線が出力の最大値の 10 %にあたる。



大口径イメージインテンシファイア残光時間

図 2.8: 図 2.7 から 8nsec ごとに 16 点読み取り、出力比のデータ点をプロットしたもの。図 中赤いラインはデータ点に $\exp(t/\tau)$ を最小自乗方でフィットしたもの。 $\tau=50$ nsec となった。

2.1.5 高速ゲートイメージインテンシファイア

光電子増幅にマルチチャンネルプレートを用いた高増幅率のイメージインテンシファイ ア。トリガ信号を受け付ける事でバックグラウンドの影響を少なくすることと、露光時間 のコントロールが可能である。 浜松ホトニクス製 C4078-01MOD 使用蛍光面 P-43(残光時間 1msec) 量子効率 530nm で 25 % 解像度 入力面換算で 32lp/mm 増幅率 200 ~ 1500000 倍 (可変) トリガ遅延 35nsec



図 2.9: 高速ゲートイメージインテンシファイアの動作原理入射光は光電面で電子を叩きだし、マルチチャンネルプレートで電子数を増幅蛍光面に打ち込むことで光量を増幅する。



図 2.10: 高速ゲートイメージインテンシファイアのゲイン



図 2.11: 高速ゲートイメージインテンシファイアのゲイン

2.1.6 CCD

CCD で撮像された画像データは HDD に直接取り込まれる。取り込まれたデータからは tiff,bmp,jpg など各種画像ファイルやテキスト形式への変換が可能であり、テキスト形式の 画像(1ピクセルごとの CCD Digital Number を出力)を用いる。CCD は Dalas 製 CA-D6 (544 x 511)27 万画素を用い、計算機への画像の取り込みには Video Sabant 4 を用いた。画 像は CCD から画像入力用ボードを経由して PC のメモリを経ることなく直接 SCSI ハード ディスクの RAID 中に確保された独自フォーマット領域に書き込まれる。このため、大量 の画像を最大 250Hz で高速撮影が可能である。一般の高速取り込み可能な CCD システム は PC への入力ボード上や PC のメモリへの画像書き込みは高速 (1000Hz 以上で取り込み 可能なものもある) に行われるが、ハードディスクへの書き込みは遅延書き込みされ、連続 取り込み画像数の上限値がメモリのサイズとなる。チェレンコフ望遠鏡で用いる場合、夜 間に数時間に渡る観測に耐え得るデータレートが要求される。本研究で用いる CCD シス テムは取り込み可能な画像の総量はハードディスクの容量で決まるため、メモリ書き込み 型の CCD システムより適している。

2.1.7 解像度の調査

大口径イメージインテンシファイア、高速ゲートイメージインテンシファイア、CCD を 接続し、大口径イメージインテンシファイア受光面に透明なシートに印刷したテストチャー トを密着させ LED の光を入射して CCD で撮像した画像を評価する。テストチャートは 4mm 間隔,3mm 間隔,2mm 間隔 (それぞれ 2mm、1.5mm、1mm、の幅の白黒の線が交互に 並んだもの) のラインのパターンを用いた。入射光量は撮像がはっきりするよう十分与え た。結果として 3mm 間隔のラインが判別可能である。ラインペアで換算すると 0.67lp/mm になる。



図 2.12: テストチャート



図 2.13: 解像度調査のための装置配置図



図 2.14: 図中上側から 2mm、3mm、4mm 間隔のラインの組。3mm 間隔 (0.67lp/mm) が判 別可能である。図は CCD で捕えた画像に明度、コントラストの強調の処理をほどこした。 CCD 出力グラフ撮影したテストチャートの CCD での読み取り値を数値出力し、グラフ 化した。



図 2.15: 図中のライン上での CCD 読み取り値をグラフ化した。



図 2.16: 解像度調査の結果

撮像システム全体の解像度の上限は大口径イメージインテンシファイアの入力面がどの ような大きさで CCD に結像するかで決まる。大口径イメージインテンシファイアの入力 面の有効面の直径は 100mm であり、これがほぼ CCD 全面に収まる。10mm づつの目盛の ついた図を透明なシートに印刷し、大口径イメージインテンシファイアの入力面に張り付 け十分な光量を与えて撮影し、10mm が CCD のピクセル数にして何ピクセルに相当する か測定した。



図 2.17: 大目盛10mm、小目盛5mmのついたテストチャート。図中赤いラインの間が10mm。 この10mmの間隔がCCDの画素数では何ピクセルに相当するか大口径イメージインテン シファイア入射面に張り付けて測定する。

結果として 10mm = 60.8 ピクセルであることがわかり、1mm あたり 6.08 ピクセルに なるので 1 ピクセル 0.16mm になる。ラインペアで換算すると撮像系の解像度上限値は 3.1lp/mm となる。高速ゲートイメージインテンシファイアと CCD を結ぶリレーレンズの 比率やテーパーファイバの縮小率がことなるものといれかえるとこの値は変わる。これは 大口径イメージインテンシファイアから CCD までの間で画像の劣化が全くないと想定し た場合の上限値である。実際にはファイバプレートのカップリングなどで像は滲んで劣化 しているはずであり、3.1lp/mm を下回る。現段階で撮像システムの解像度は 0.67 である ので上限まで 4.6 倍の性能比がある。



図 2.18: 図中赤いラインの間が 10mm。CCD のピクセル数で 60.8 ピクセル。1mm あたり 6.08 ピクセルになるので 1 ピクセル 0.16mm になる。ラインペアで換算すると撮像系の解 像度上限値は 3.11p/mm。

2.2 トリガ系

トリガ系はチェレンコフ光が入射した PMT から出力信号を元に高速ゲートイメージイン テンシファイアと CCD を作動させるタイミングとゲート幅を生成するための電子回路群で ある。単機能のモジュールを組み合わせる事でトリガを生成する。機能を分割することで 変更が容易に行うことができる。大口径イメージインテンシファイアの残光時間が 107 nsec であるため、ゲート幅を 100 nsec とした。PMT、高速ゲートイメージインテンシファイア を除いたトリガ系の遅延は 50 nsec 程と非常に高速である。



図 2.19: トリガシステム

PMTの出力は電流信号なので電圧に変換、増幅するためAMPへと接続される。入射光 量の閾値を越えるかどうか判別するためDiscriminatorを経る。ここで信号はデジタル化 される。ロジック回路でトリガ条件を決定する。64chのPMTがトリガ用に用意されてお り、シャワーイメージからトリガ条件を設定する。今回は4chのOR回路を用意した。

ディスクリミネーター出力の時間幅はAMP出力が閾値を越えていた時間と同じである。 高速ゲートイメージインテンシファイアの露光時間は入力したゲート時間と等しいのでOneshot パルスジェネレータを用いて任意の時間幅のゲート信号を出力する。今回は100nsec のゲート幅とした。

2.2.1 AMP ディスクミネータ

G.N.D 社製 AMP ディスクリミネータモジュール GND-060 使用チップ Sony 製 CXA3183QTGCASD

もともとは ATLAS Thin gap chamber 用に開発された IC であり、高速なチャージアンプ とディスクリミネータを内蔵した 4 回路入り LSI。撮像システム全体が望遠鏡の先端に取 り付けられることを考え、それぞれの素子には小型な物が求められる。今回の AMP ディ スクモジュールはその要求を十分満たす大きさである。 チャージアンプゲイン 0.8V/PC

遅延 16nsec

LVDS 出力

LVDS とは Low Voltage Differencial Signaling の略で+350mV と-350mV(100Ωで終端した 場合)の差動出力にすることで信号の劣化を防ぎ高速通信を可能にした規格。

2.2.2 LVDS to TTL

デジタルのロジック回路群は TTL で構成されている。AMP の出力が LVDS であるので これを TTL に変換してから OR 回路に入力する。G.N.D 社製 GNN-190(K)(改) 遅延 10nsec

2.2.3 ロジック回路

ロジック IC TC74HC4072 を用いた 4chOR 回路。入力は 64ch あるが、今回はまず 4ch を用意した。

2.2.4 One-shot パルスジェネレータ

DALLAS セミコンダクター社製 DS1040 を用いて遅延 8nsec、パルス幅 100nsec の oneshot パルスジェネレータを作成した。One-shot パルスジェネレータ以前の信号幅は全て、 PMT の出力の閾値電圧を越えた信号時間幅と同じである。高速ゲートイメージインテン シファイアの露光時間は入力されるトリガ信号の時間幅と等しくなるため、One-shot パル スジェネレータで 100nsec のトリガ信号を生成する。

2.2.5 トリガ系結合テスト

トリガ系各モジュールの遅延時間は。PMT 遅延 (25nsec)、AMP ディスクリミネータ遅 延 (16nsec)、LVDS to TTL 遅延 (10nsec)、OR 遅延 (10nsec)、One-shot パルスジェネレー タ遅延 (8nsec) 合計遅延時間 72nsec。これに高速ゲートイメージインテンシファイアの内 部遅延 35nsec が加わった 107nsec が PMT に入射光が入ってからトリガ信号が生成される までの時間となる。



図 2.20: トリガシステム写真



図 2.21: AMP ディスクリミネータ写真





図 2.22: LVDS to TTL 写真



図 2.23: トリガ系各モジュールの遅延時間タイムテーブル。PMT 遅延 (25nsec)、AMP ディ スクリミネータ遅延 (16nsec)、LVDS to TTL 遅延 (10nsec)、OR 遅延 (10nsec)、One-shot パルスジェネレータ遅延 (8nsec) 合計遅延時間 72nsec。これに高速ゲートイメージインテ ンシファイアの内部遅延 35nsec が加わった 107nsec が PMT に入射光が入ってからトリガ 信号が生成されるまでの時間。



図 2.24: PMT を除いたトリガ系の遅延時間を測定したオシロスコープのハードコピー。 AMP ディスクリミネータモジュールにテストパルスを与えて測定。図中赤い線の間の時 間 (68.8nsec) より測定のためのケーブルの遅延 (12nsec) を差し引いた値が実際の遅延時間 56.8nsec

第3章 結果

前章で撮像システムの各要素の説明および評価結果を述べた。本章では撮像系とトリガ系 を組み合わせての結果を述べる。また、参考として空気シャワーも模式図を撮像したもの を紹介する。

3.1 撮像装置とトリガ回路

今回開発した撮像システムは甲南大学望遠鏡での解像度で0.03度、焦点面において1.5mm の識別が出来得ることが解った。また、トリガ系全体の遅延時間は107nsecであることが 解った。大口径イメージインテンシファイアの10%残光時間が105nsecであることから撮 像システム全体のタイムテーブルは次のようになる。

LED を光源に用いて光電子像倍管とトリガ回路で生成したトリガ信号を高速ゲートイ メージインテンシファイアと CCD に入力してテスト用のチャートを撮影した画像は図 3.2 のようになる。



図 3.1: タイムテーブル。図中青い領域の大口径イメージインテンシファイア出力を高速 ゲートイメージインテンシファイアにて受光する。



図 3.2: 時間幅 200nsec で LED 光を入射

3.2 参考:空気シャワー模式図の撮影

1TeVと100GeVのガンマ線を直径10mの望遠鏡を用いて6400ch(解像度0.05度)のカメ ラで撮影するという条件で行われたシミュレーション図を元に空気シャワーのイメージの 模式図を作成した。レーザープリンタで透明なシートに模式図を印刷し、理想的な光量の元 模式図を大口径イメージインテンシファイアの受光面に密着させた。高速ゲートイメージ インテンシファイアはトリガをかけずに開放状態で撮影する。撮影した画像を処理し64ch、 256ch、512ch、1024ch、6400ch相当の画像を作成、解像度の違いによるシャワーイメージ の参考とする。

3.2.1 1TeV のガンマ線相当のとき

1TeV のガンマ線を直径 10m の望遠鏡を用いる仮定で行われたシミュレーション図をも とに作成した模式図を撮影。撮影した画像を処理し 64ch、256ch、512ch、1024ch、6400ch 相当の画像を作成した。



図 3.3: 1TeV のガンマ線を直径 10m の望遠鏡を用いる仮定で行われたシミュレーション図。 左:6400ch(解像度 0.05 度)のカメラの場合。右:256ch(解像度 0.25 度)のカメラの場合。



図 3.4: 図 3.3 を元に作成した空気シャワーの模式図



図 3.5: 図 3.4 を透明なシート (OHP フィルム) に印刷し、大口径イメージインテンシファ イアの受光部分に密着させた。十分な光量で撮像したものを明るさ、コントラストの調整 を行った。





図 3.7: 図 3.5 を 256ch 相当に画像処理したもの



図 3.8: 図 3.5 を 512ch 相当に画像処理したもの



図 3.9: 図 3.5 を 1024ch 相当に画像処理したもの



図 3.10: 図 3.5 を 6400ch 相当に画像処理したもの

3.2.2 100GeVのガンマ線相当

1TeV のガンマ線を直径 10m の望遠鏡を用いる仮定で行われたシミュレーション図をも とに作成した模式図を撮影。撮影した画像を処理し 64ch、256ch、6400ch 相当の画像を作 成した。



図 3.11: 100GeV のガンマ線を直径 10m の望遠鏡を用いる仮定で行われたシミュレーション図。25600ch(解像度 0.03 度) のカメラの場合。





図 3.13: 図??を透明なシート (OHP フィルム) に印刷し、大口径イメージインテンシファ イアの受光部分に密着させた。十分な光量で撮像したものを明るさ、コントラストの調整 を行った。



図 3.14: 図 3.13の画像を 64ch(解像度 0.25 度、甲南大学望遠鏡で PMT カメラを用いたとき) 相当に画像処理したもの



図 3.15: 図 3.13の画像を 256ch(解像度 0.12 度, CANGAROO 望遠鏡) 相当に画像処理した もの



図 3.16: 図 3.13の画像を 6400ch(解像度 0.03 度) 相当に画像処理したもの

CANGAROO 望遠鏡の解像度 0.12 度程度にピクセル数を落した場合、1TeV 相当では形 が解りやすいが 100GeV のガンマ線の作り出すシャワーイメージはあまり形が解らない。 それに対して高解像度撮像システムの場合、構造がはっきり見える。光量等実際の空気シャ ワーの観測とは条件が大きく異なるためこれらの図のような結果が得られるわけではない。 しかし、光電子像倍管では達成が難しい 1000ch を越える詳細な画像が得られそうである。

第4章 結論

4.1 性能

今回イメージインテンシファイアを用いて高解像度撮像システムを開発した。透明なシートにテストパターンを印刷して解像度を測定した結果、0.67lp/mmの解像度を持つことを確認した。これは主鏡3mの望遠鏡では視野角にして0.03度、ピクセル数では6400ch相当である。

よってチェレンコフ望遠鏡の発展に大きく貢献できる可能性あることが解った。

4.2 今後の課題

トリガ生成時間の短縮することで高速ゲートイメージインテンシファイアの受光量を増やす。または大口径イメージインテンシファイアの後段に更にもう一段光量を増幅する機構をもうけることで光量を確保する。

謝辞

指導主任の梶野先生には実験、修士課程の全ての局面で導いていただきました。ありがと うございます。山本先生には常に物理的な意義の在処を示していただきました。坂田先生 には私が迷走するときじっくりと筋道を見つけ出していただきました。崔銀珠さんには徹 底した議論の重要性を教えていただきました。D3の林さんには細かな質問にも真剣に答え ていただきました。M2の鷲尾さんとは同じ望遠鏡の開発にあたり、幾度と無く助けてい ただきました。M1の植村君、山岡君、泉君には実験の手助けありがとうございました。 学部生の山田君にはイメージインテンシファイアの基礎データ収集に大いに活躍してもら いました。阪大の中村秀仁さんにはロジック回路のことでいろいろ相談にのってもらいま した。すべての研究室の方たちに支えられてきました。ありがとうございます。このよう な充実した2年の時間をくれた両親に感謝します。

関連図書

[1] 小田享史, 甲南大学大学院自然科学研究科修士論文 (2002)

- [2] F.Kajino"High-Resolution Cherenkov Telescopes for the Observation of High-Energy Gamma Rays"
- [3] H.Quintana,"5@5-a5GeV energy threshold arrary of imaging atmospheria Chrenkov telescopes at 5 km altitude" (2000)
- [4] B.Funk et al.,"An Upper Limit on the Infrared Background & Density from HEGRA data on Mkn501", Astro-ph(1998)
- [5] The TA Collaboration, The Telescope Array Project: Design Report(2000)
- [6] K.Watanabe," The DIFFUSE GAMMA-RAY BACKGROUND FROM SUPERNOVA"
- [7] 高野朋也,山形大学大学院理工学研究科修士論文(2001)
- [8] 小田稔, 宇宙線, 裳華房
- [9] P.M.Chadwick, Geomagnetic Effects on the Performance of Atomosphric Cherenkov Telescope.