CANGAROO-III望遠鏡の新しいトリガーシステムの開発

粉間 和葉

平成 13 年 3 月 29 日

概 要

CANGAROO は、南天の天体からのγ 線の検出を目的とする日豪共同研究グループである。γ 線のエネルギー領域は $10^6eV \sim 10^{20}eV$ と非常に広範囲に渡っており、エネルギー領域によって観測方法が異なるが、人工衛星による観測の上限値が約 30GeV であるのに対し地上での観測の閾値は約 200GeV であり、この間のエネルギー領域は観測が実現されていない。このエネルギーの穴を埋めるために、多くの研究グループが低閾値実現のための次世代型のチェレンコフ望遠鏡の開発に着手しており、われわれ CANGAROO グループも 4 台の望遠鏡によるステレオ観測 (CANGAROO-III) 開始の第一歩として、来年度内にも新しい形状の解像型カメラを搭載した 2 台目の望遠鏡の建設を開始する予定である。そこで本研究では CANGAROO-III でより低いエネルギー閾値を実現するための新しいトリガーシステムの開発を目的とし、いくつかのトリガーパターンによる検出効率等のシュミレーションと、PLD(Programmable Logic Device) によるトリガーシステムの実装について研究を行った。

トリガーパターンの候補は、any タイプと adjucent タイプの二つとし、それぞれ 1 イベント中の『閾値を超えた信号をもつ PMT の本数』、『閾値を超えた PMT が作るクラスターの大きさ (PMT の本数)』をパラメータとして変化させている。これらの内、夜光によるトリガーレートが 1kHz 以下で、低エネルギー側でγ 線検出効率が高いトリガーパターンを選択した。シミュレーションの結果、any タイプトリガーはγ 線検出効率が低いため適当でなく、adjacent タイプトリガーの T2a(閾値を超える 2 本以上の PMT がクラスタリングしている) が最も検出効率が良い事が分かった。

またパターントリガーの実装には多チャンネルの信号を 1 台で高速な処理が可能な PLD を使用することを考え、シミュレーションと実際のデバイスを使ったテストを行った。ファーストトリガーデバイスとしての条件は、信号が入力してからトリガー信号を生成するまでに要する時間が 60ns 以内であることに加えて、チャンネルごとの PLD 内での遅延時間の差が 20ns 以内になることである。これは遅延時間の差が信号幅以上になることで、トリガー条件を満たす条件で入力した信号が、トリガー条件を満たさないと判断される事のないようにするための条件である。シミュレーションの結果、ALTERA 社の EPF10K130EBC356-1 が処理時間 32ns 以内、遅延の差 17ns 以内であり、両条件を満たす事が分かった。ただし、将来のトリガー方式変更等に備えてデバイスに余裕を持たせるために 2 台の PLD に信号を分けることにしている。また実際のデバイスがシミュレーション結果を再現することを確かめるために、PLD の評価版を用いたテストを行ったところ、実験結果はシミュレーション結果と一致し、われらの要求を満たすデバイスであることが確認できた。

目 次

第 1 章　序論 **6**

1.1　高エネルギー宇宙物理学 6

1.2　γ 線天文学 6

1.3　γ 線の発生機構 6

1.4　γ 線観測 7

1.4.1　人工衛星によるγ 線観測 8

1.4.2　地上でのγ 線観測 9

第 2 章　高エネルギーγ 線観測原理 **13**

2.1　空気シャワー 13

2.2　チェレンコフ光 14

2.3　イメージング法 16

第 3 章　CANGAROO 実験 **19**

3.1　CANGAROO 実験概要 19

3.2　CANGAROO-I 20

3.3　CANGAROO-II 20

3.3.1　主鏡 20

3.3.2　イメージングカメラ (解像型カメラ) 22

3.3.3　データ収集システム 22

3.3.4　CANGAROO-II のトリガー 23

3.4　CANGAROO-III 24

3.4.1　CANGAROO-III 計画 24

3.4.2　イメージングカメラ 25

3.4.3　データ収集システム 25

第 4 章　シミュレーション **29**

4.1　観測におけるバックグラウンド事象 29

4.1.1　夜光 29

4.1.2　宇宙線原子核によるシャワー 29

4.2　トリガー 29

4.3　トリガー条件候補 30

4.4　シミュレーション 31

4.4.1 プログラム 31
4.4.2 夜光の見積もり 31
4.4.3 シミュレーション条件 32
4.5 シミュレーション結果 32
4.6 シミュレーション結果の考察 33

第 5 章 トリガーデバイス **51**
5.1 候補となるデバイス 51
5.1.1 PLD 51
5.1.2 DSP 51
5.2 トリガーデバイスとしての条件 52
5.3 シミュレーション 53
5.4 実験 55

図 目 次

1.1 γ 線の発生機構 7
1.2 1965 年以降の発見されたγ 線天体数の増加の様子 8
1.3 CGRO の概観 9
1.4 EGRET の検出器の概観 10
1.5 BATSE によって検出された GRB 11
1.6 EGRET で検出されたγ 線源 (third EGRET catalog) 12

2.1 入射γ 線のエネルギーによる空気シャワー発達の違い 13
2.2 γ 線シャワーとプロトンによるシャワー 14
2.3 チェレンコフ光モデル図 15
2.4 イメージパラメータ 17
2.5 イメージパラメータの分布の違い 18

3.1 CANGAROO 実験 19
3.2 CANGAROO3.8m 鏡の概観 20
3.3 CANGAROO-II 拡張前の 7m 鏡。 21
3.4 CANGAROO-II 望遠鏡 (10m 拡張工事後) の鏡面 21
3.5 拡張前のカメラ (左) と拡張後のカメラ (右) 22
3.6 CANGAROO-II で使用している PMT の概観と分光曲線 23
3.7 CANGAROO-III 計画スケジュール 24
3.8 CANGAROO-III 完成後の予想図 (合成) 25
3.9 CANGAROO-III 望遠鏡概観予想図 26
3.10 CANGAROO-III 望遠鏡 (2 台目) のイメージングカメラの概観 27
3.11 CANGAROO-III で使用する PMT 27
3.12 CANGAROO-III で使用するライトガイド 28
3.13 CANGAROO-III のデータ収集システム 28

4.1 Txa(x=3) を満たすイメージの例。図はカメラの一部。 30
4.2 any-x(x=3) を満たすイメージの例。図はカメラの一部。 30
4.3 夜光 170photons/event の時のトリガーレート 35
4.4 夜光 250photons/event の時のトリガーレート 36
4.5 夜光 350photons/event の時のトリガーレート 37
4.6 夜光 170p.e./event;T.h.3p.e. でのトリガーシミュレーションの結果 38

4.7 夜光 170p.e./event;T.h.4p.e. でのトリガーシミュレーションの結果 39
4.8 夜光 170p.e./event;T.h.5p.e. でのトリガーシミュレーションの結果 40
4.9 夜光 250p.e./event;T.h.3p.e. でのトリガーシミュレーションの結果 41
4.10 夜光 250p.e./event;T.h.4p.e. でのトリガーシミュレーションの結果 42
4.11 夜光 250p.e./event;T.h.5p.e. でのトリガーシミュレーションの結果 43
4.12 夜光 250p.e./event;T.h.6p.e. でのトリガーシミュレーションの結果 44
4.13 夜光 350p.e/event;T.h.4.p.e. でのトリガーシミュレーションの結果 45
4.14 夜光 350.p.e./event;T.h.5p.e. でのトリガーシミュレーションの結果 46
4.15 夜光 350p.e./event;T.h.6p.e. でのトリガーシミュレーションの結果 47
4.16 夜光 170photons/event のときの各閾値での検出効率 48
4.17 夜光 250photons/event のときの各閾値での検出効率 48
4.18 夜光 350photons/event のときの各閾値での検出効率 49
4.19 T2a(左),T3a(右) の検出効率 50

5.1 トリガー信号生成までの流れ 52
5.2 入力パルスのずれ 53
5.3 全信号を 1 台の PLD で処理したケースの遅延時間の分布 55
5.4 全信号を 2 台の PLD に分けて処理したケースの遅延時間の分布 57
5.5 PLD テストの概観 58
5.6 EPM7256SRC208-10(左) と EPF10K130EQC240-3(右) の遅延時間分布 58
5.7 EPF10K130EQC240-3 評価ボードの概観 58

表 目 次

1.1 近年の主なエアーシャワーアレイ観測 10
1.2 近年の主なチェレンコフ望遠鏡 11

4.1 夜光量見積もりに使用したパラメータ 32
4.2 シミュレーションパラメータ 32
4.3 トリガーレート 1kHz 以下のトリガー 33

5.1 ALTERA 社の PLD 52
5.2 FLEX10KE ファミリのデバイスのオプションピン数 52
5.3 PLD シミュレーションの条件 54

第1章　序論

1.1　高エネルギー宇宙物理学

天文学は数学とともに長い歴史をもつ科学である。1609 年にガリレオが初めて望遠鏡を天体観測に用いて以来、長いことその研究領域は可視光のみにとどまっていたが、20 世紀後半に電波技術の飛躍的な進歩とともに"電波の窓"が開け、電波天文学が急速に進展を遂げた [42]。その後、ロケットや人工衛星の実現、また放射線観測技術の向上により全波長の天文学が確立された。

その中で高エネルギー宇宙物理学が研究対象とするのは、主に X 線以上の領域で生起している宇宙空間の高エネルギー現象である。可視光領域の光子の典型的なエネルギーが約 1eV であるのに対して、高エネルギー物理学が対象とするのはそれより 3 桁以上も大きいエネルギー領域であり、これらの現象の観測とその理論的な理解は極限状態の物理過程を解明する手がかりとなると考えられている。

1.2　γ 線天文学

γ 線はこれまで観測されて来た天体からの電磁波の中でもっとも短い波長領域に位置している。宇宙空間に由来するさまざまなエネルギー領域の現象は、中性原子、分子、電離プラズマなどさまざまな状態にある物質が引き起こしており、通常それらの状態は熱平衡状態で記述される。しかし、(高エネルギー) γ 線は、それよりはるかに高いエネルギー領域の電子や陽子から放出される。

宇宙線として知られる天体からの高エネルギー荷電粒子は 50 年以上の研究の歴史がある。MeV,GeV 程度の低いエネルギー領域においては、宇宙線の伝播等の様子は比較的良く理解されて来ている。しかしながら、$10^{12}eV$ 以上の宇宙線の加速に関しては長年の研究にも関わらずはっきりと解明されていない。宇宙線のほとんどは電荷を帯びているため、宇宙空間を伝播して来る際に磁場の影響を受け、発生源の正確な位置情報を保持していない。さらに、同様の理由で、到達距離にも限界がある。対照的にγ 線は電荷を持っていないので、磁場で曲げられること無く発生源を直接指し示すため、宇宙線の起源の解明に大きな鍵となる。

1.3　γ 線の発生機構

観測されるγ 線の発生機構は以下のようなものがある (図 1.1)[47]。

- 中性パイオンの崩壊：宇宙線と星間物質との衝突の際、核反応で多数の中間子が生成される。この内中性パイオン (π ^{0} 中間子) は寿命が 10^{-16}sec 程度で 2 つのγ 線に崩壊する。π ^{0} 中間子の静止質量は電子の約 264 倍であり、エネルギーに換算すると約 134MeV となる。崩壊して生成されたγ 線は約 67MeV 付近にピークを作る。1952 年、早川によってこの機構によるγ 線観測の可能性が指摘された。

- 制動放射 (Bremsstralung)：宇宙線中の電子は星間ガスの原子核の近傍を通ると、クーロン力によって軌道が急激に曲げられ、エネルギーおよび運動量を保存するためにその電子のエネルギーの一部を電磁波として放出する。この機構で発生したγ 線のスペクトルは親の電子と同じ冪型をしている。
- 逆コンプトン効果 (Inverse Compton)：電磁波が電子をはね飛ばしてエネルギーを失うコンプトン効果の逆の現象で、電子が電磁波に衝突し、高いエネルギーにはねあげる現象を逆コンプトン効果という。
- シンクロトロン放射 (synchrotron emission)：高エネルギーの電子が磁場中で起動を曲げられると、シンクロトロン放射で電波や光を放出する。極めて強い磁場の中で高エネルギー電子が運動した場合はγ 線を放出するが、通常の空間では電波領域の放射となることが多い。

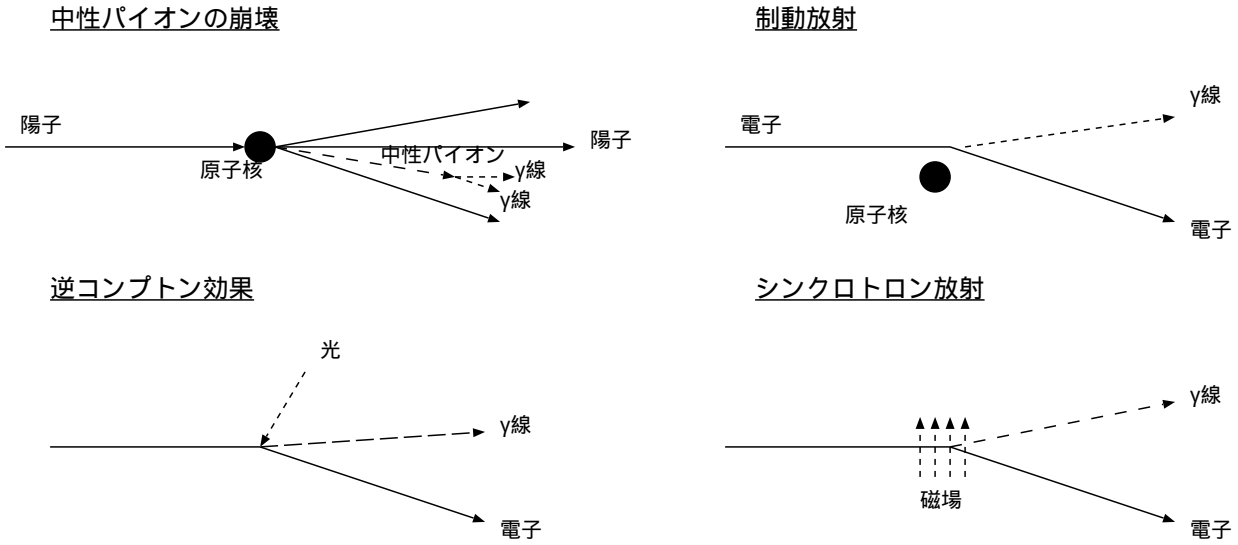


図 1.1: γ 線の発生機構

1.4 γ 線観測

図 1.2 に、1965 年以降の発見されたγ 線天体数を示した。近年のγ 線観測技術の発展は目覚しく、他波長との比較が可能になった。

γ 線のエネルギー領域は 10^6eV ~ 10^{20}eV と非常に広範囲に渡っており、その観測方法もエネルギー領域によって異なる。大きくは人工衛星による観測と地上での望遠鏡による観測に分けられ、地上での観測はチェレンコフ望遠鏡を用いた観測と、空気シャワーアレイでの観測がある。

γ 線はそのエネルギーの増加とともに急激に flux が減少する。そのため高いエネルギー領域ではより広い検出面積を実現できる地上観測が受け持つこととなる。人工衛星による観測は約 30GeV 程度が上限値で

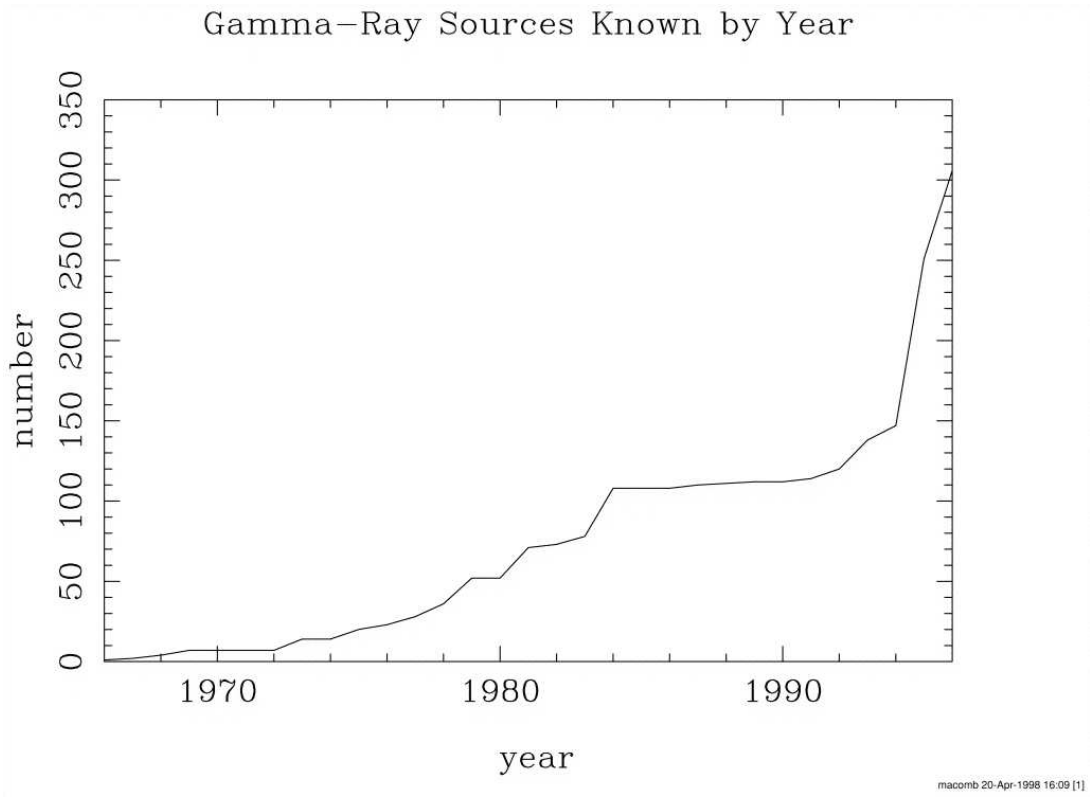


図 1.2: 1965 年以降の発見されたγ 線天体数の増加の様子
主要なγ 線天体検出器の稼働により、大きな増加が見られるのが良く分かる。

あり、地上での観測とはエネルギー的に「穴」が存在する。現在地上での観測の下限値は百 GeV 領域で、我々の CANGAROO-II では約 300GeV という下限値を実現している。この「エネルギーの穴」を埋めるために、人工衛星ではより高いエネルギー領域を観測することが、地上ではより低いエネルギー閾値で観測を行うことが求められている。

1.4.1 人工衛星によるγ 線観測

1950 年代の始めに早川らによって観測の可能性が指摘されていた銀河系内のγ 線観測が実現したのは、γ 線検出器が搭載された OSO3 が打ち上げられた 1967 年であった。1972 年には SAS-2 が、1975 年には COS-B がそれぞれ打ちあげられ、初めて全天のγ 線マップを描くことに成功した。特に COS-B は予想された 2 年の寿命をはるかに超えて、スパークチェンバーのガスが無くなるまでの約 7 年間観測を行い、その結果銀河系内のγ 線の強度分布が得られた他、25 個のγ 線点源が発見されるなど大きな成果をあげた。しかし角度分解能が約 1° と大きく、Crab,Vela などの一部の天体を除いてγ 線源を同定することはできなかった。

次いで 1991 年 5 月にスペースシャトル Atlantis によって"Compton Gamma Ray Observatory (CGRO

)"が軌道に打ち上げられ、γ 線観測は急速な発展を遂げる事になる。

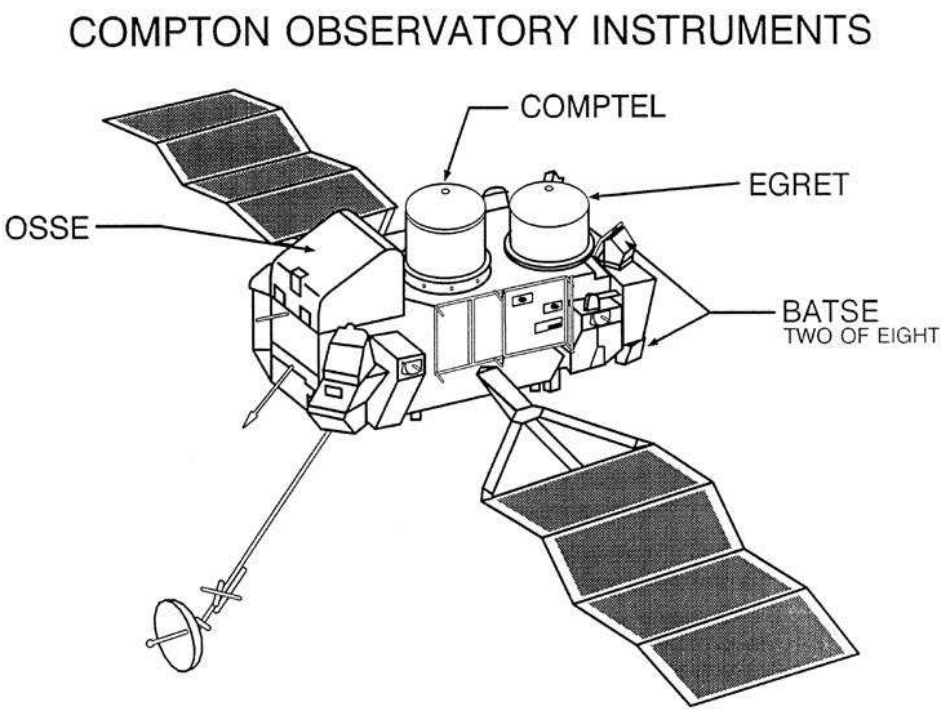


図 1.3: CGRO の概観

CGRO には BATSE,OSSE,COMPTEL,EGRET の 4 つの検出器が搭載されており、それぞれ異なったエネルギー領域をカバーする。中でも EGRET は最も高いエネルギー領域を受け持っており、約 20 ~ 30GeV までの領域を観測することが可能であった。図 1.4 に示すように EGRET の検出器はスパークチェンバーシステムになっており、入射したγ 線によって発生した電子対生成の飛跡を観測し到来方向を決定することができる。1991 年 5 月に観測が開始され、50 以上の活動銀河核 (AGN) と 6 つのパルサーからのγ 線を検出した。

BATSE は CGRO の全天サーベイモニターであり、衛星の 8 箇所に取り付けられた NaI 検出器で主にγ 線バースト (Gamma Ray Burst;GRB) を監視している。2000 年までに約 2000 の GRB を観測した。(図 1.5)

EGRET は 2000 年にその役目を終え、人工衛星による観測は現在のところ、大きな検出面積を持った次世代の観測衛星"GLAST"の打ち上げを待っている状況である。打ち上げは 2005 年を予定しており、成功すれば 10MeV ~ 100GeV 領域を観測できるはずである。

1.4.2 地上でのγ 線観測

地上でのγ 線観測は、γ 線が地球大気層に入射した際に大気中の原子核との相互作用によって発生する"空気シャワー"と呼ばれる現象を利用して行われる。可視光や赤外線領域での観測では常に大気層での吸収

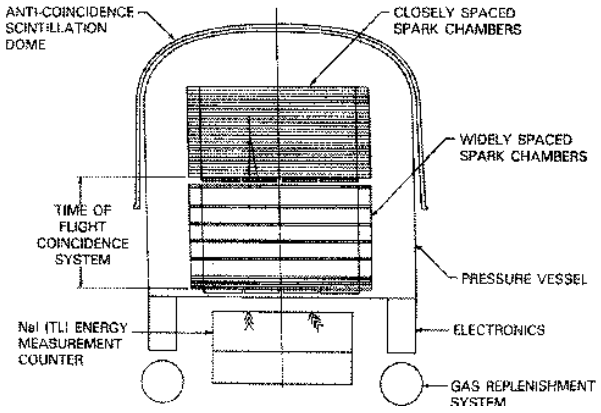


図 1.4: EGRET の検出器の概観

が大きな問題となるが、γ 線以上の領域ではこのようにして、逆にこの大気層を検出器の一部のようにして利用している。地上におけるγ 線観測もそのエネルギー領域によって大きく二つに分けられる。

一つは二次粒子を多数のシンチレーションカウンター等で検出し、入射粒子のエネルギーや到来方向を決める"エアーシャワーアレイ"と呼ばれる方法で、これは二次粒子が直接地上に到達できる PeV 領域のγ 線の検出に用いられる。この観測方法は約 40 年以上の歴史があり、長く宇宙線の性質の研究に用いられて来たが 1959 年に Cocconi が初めて超高エネルギーγ 線の検出の可能性を提唱し、γ 線検出に用いられるようなった。初期のエアーシャワーアレイを用いた観測のエネルギー閾値は 1PeV 程度であったが、近年建設された検出器ではその閾値を約 100TeV にまで下げて来ている。この分野のパイオニア的存在なのはチャカルタヤ山で初めてエアーシャワーアレイの実験を行った Bolivian-American グループである。以後 Cygnus,CASA-MIA,Tibet,EAS-TOP,HEGRA などのグループが追随し、成果をあげている (表 1.1)。

表 1.1: 近年の主なエアーシャワーアレイ観測

Group	Location	Array area (m^2)	No. detectors	E_{peak} (TeV)	Event rate (s^{-1})	Years operational
CASA-MIA	Dugway,Utah	230400	1089	10	20	1991-96
CYGNUS	Los Alamos,New Mexico	86000	204	50	5	1986-96
HEGRA EAS-PDA	La Palma,Cnary Island	41000	257	50	12	1992-
Millagrito	James Mts,New Mexico	1500	225	1	300	1997-98
SPASE	South Pole	10000	24	100	1	1987-92
Tibet	Yangbajing,Tibet	8000	49	8	5	1990-93

一方、二次粒子が地上に到達する前に減衰してしまい直接観測できないような TeV 領域の観測は、チェレンコフ望遠鏡で空気シャワー中で荷電粒子が発生する"チェレンコフ光"を観測し、γ 線を検出する。初期のチェレンコフ望遠鏡での観測は、約 3 桁も大きい宇宙線原子核などのバックグラウンド事象の除去方法が確立されておらず、対象天体の視野通過に伴うトリガーレートの変化でγ 線の到来を判別していた。このため約 1° という大きい角度分解能しか持っておらず、十分な成果を挙げられずにいた。しかし 1980 年代

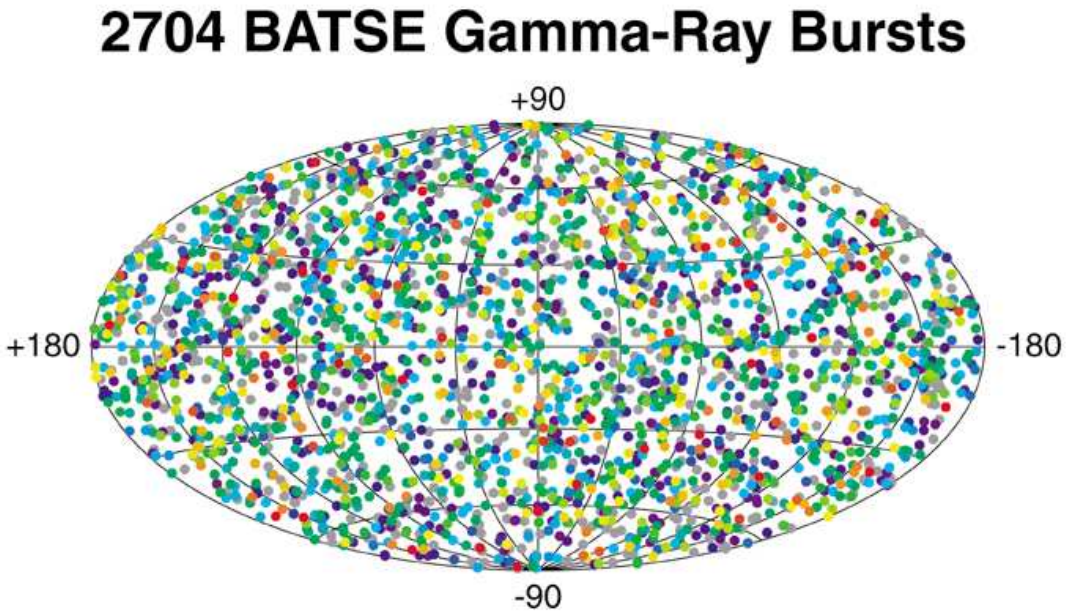


図 1.5: BATSE によって検出された GRB

の終りにアメリカ合衆国のスミソニアン研究所の Whipple グループがチェレンコフ光の像の差異によってバックグラウンド中からγ 線候補事象を検出する"イメージング法"(後述) を開発して、この領域にブレークスルーが起こった。

表 1.2: 近年の主なチェレンコフ望遠鏡

Experiment	Location	Pixel Size	Field of View	Threshold
CANGAROO	Woomera,Australia	0.19 °	3 °	300GeV
Whipp00le-10m	Mt.Hopkins,Arizona	0.25 °	3 °	250GeV
CAT-Imager	Themis,France	0.12 °	3 °	250GeV
Durham-MK VI	Narrabri,Australia	0.25 °	4 °	300GeV
HEGARA-Imagers	La Palma,Canary Island	0.25 °	3.25 °	500GeV
Telescope Array	Dugway,Utha	0.25 °	4.5 °	600GeV
CAO-GT-48	Ukrine,Crimea	0.4 °	3 °	1000GeV
TACTIC	Mt.Abu,Indis	0.31 °	3.2 °	1000GeV
Labedev-SHALON	Tien Shan,Kazahkstan	0.6 °	8 °	1000Gev

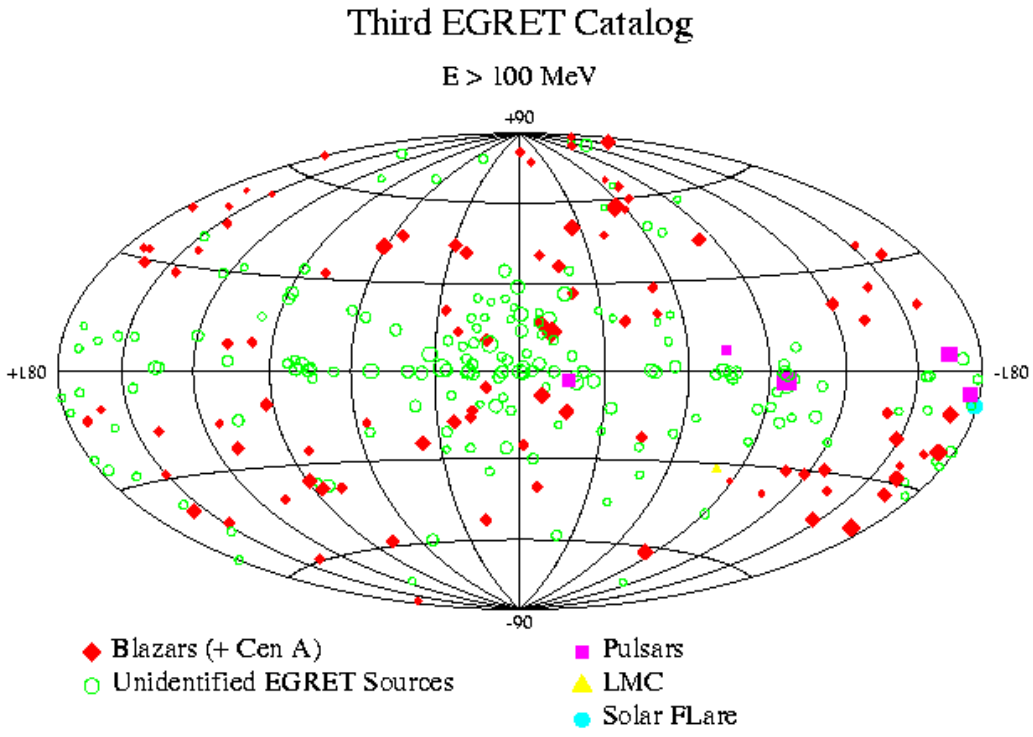


図 1.6: EGRET で検出されたγ 線源 (third EGRET catalog)

第2章　高エネルギーγ 線観測原理

2.1　空気シャワー

大気中に高エネルギーγ 線が入射すると大気の分子と相互作用を起こして、大気の上層約 $10 \sim 15\mathrm{km}$ 付近で二次粒子を大量に発生する"空気シャワー"と呼ばれる現象を起こす。ここで生成された電子, 陽電子がさらに電磁カスケードを起こし、さらにこの電子, 陽電子が制動放射でγ 線を生成する。このように電子, 陽電子対の生成と制動放射が繰り返されて行くうちにγ 線, 電子, 陽電子が増殖されて行く訳である。この増殖は制動放射の際のエネルギー損失によって電子のエネルギーがその臨界エネルギー (約 $85\mathrm{MeV}$) に達するまで続き、その後荷電粒子は大気中の分子, 原子に吸収され指数関数的に減少して行く (図 2.2)。

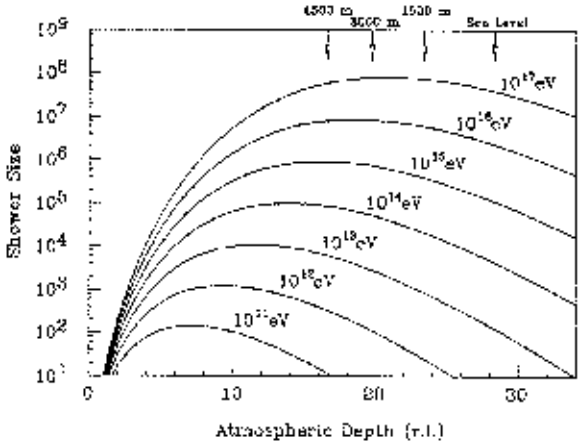


図 2.1: 入射γ 線のエネルギーによる空気シャワー発達の違い

一方、γ 線観測の際バックグラウンドとなる原子核が入射した場合は, 電磁カスケードと同時に核カスケードを起こす。この核カスケードによっては多数のπ 中間子が生成されるが、このうち約 $1/3$ を π^0 が占める。π^0 はその寿命が約 $0.83 \times\ 10^{-16}\mathrm{sec}$ と非常に短く、直ちに 2 つのγ 線に崩壊する。

$$\pi^0 \rightarrow 2\lambda$$

このγ 線は先程と同様に電磁カスケードシャワーの発達に寄与する。また $\pi^{\pm}$ の寿命は $2.603 \times 10^{-8}\mathrm{sec}$ であるが相対論的効果により寿命が延びるため、エネルギーの高い $\pi^{\pm}$ は崩壊前に次の衝突を起こす可能性が高く、核カスケードの発達に寄与する。核カスケード中の $\pi^{\pm}$ の一部と、エネルギーの低くなった $\pi^{\pm}$ は

$$\pi^{+} \rightarrow \mu^{+} + \nu_{\mu}$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \overline{\nu_\mu}$$

のように崩壊して μ,ν_μ を生成する。π 中間子は横向きの運動量が大きいため、原子核によって生じたシャワーは、γ 線起源のシャワーに比べて大きく横に広がった形となる (図 2.2)。また原子核起源のシャワーの発達に寄与する π^0 のエネルギーは全体のエネルギーの約 $1/3$ にあたることから、同じ規模のシャワーを発生させるためには原子核はγ 線の約 3 倍のエネルギーを持っていなければならない。さらに原子核はγ 線に比べ大気中の原子核との衝突距離が長いため、空気シャワーの発達は大気の下部層になってより盛んになる。

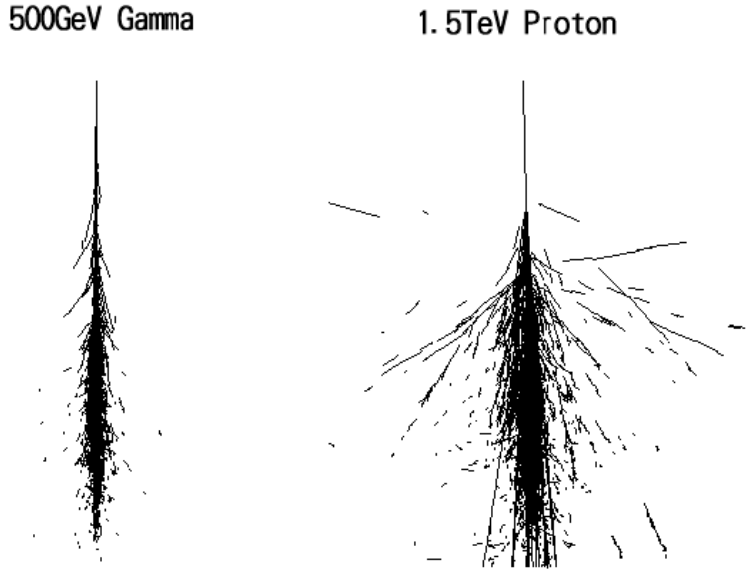


図 2.2: γ 線シャワーとプロトンによるシャワー

2.2 チェレンコフ光

以上のように、大気に入射した高エネルギーγ 線は大気中の原子と相互作用を起こし、空気シャワーを発生させるため、地上では直接γ 線を観測することは出来ない。そこで、地上における高エネルギーγ 線の検出は、γ 線によって発生したシャワー中の荷電粒子が放出する"チェレンコフ光"を観測することによって行う。

荷電粒子が速さ v で誘電体中を進むと、その軌跡の近くの媒質は粒子の電荷が作る電界によって分極する。粒子の速さが遅い時は、媒質の分極は粒子を中心とする対象の分布をしているが、粒子の速度が媒質中の光速を超えると、媒質の分極は粒子の進行方向に対して非対称分布をして電気双極子とみなせるようになる。

粒子の進行とともに分極は戻って行くが、粒子の速度が速く分極全体が電気双極子とみなせるような場合には、分極が一斉に戻る際に放射される光の位相が揃い、観測可能な光となる。

このような過程で放射される光を Cherenkov が発見し、Frank と Tamm が理論的に電磁気学により証明した。この光をチェレンコフ光という。

γ 線によるシャワー中の荷電粒子によるチェレンコフ光をγ 線検出に利用するメリットには以下のような点がある [3]。

1. チェレンコフ光の継続時間は ~ 10ns と非常に短いため、ゲート幅を狭くしノイズを落すことが出来る。
2. 地上で観測されるチェレンコフ光の放射角は約 1 ° と小さいため、チェレンコフ光の到来方向はγ 線源の天体の方向とほぼ一致する。
3. 観測されるチェレンコフ光の光量は、シャワー中の粒子数に比例し大気による吸収も少ないことから、光量から入射粒子のエネルギーを見積もることが出来る。

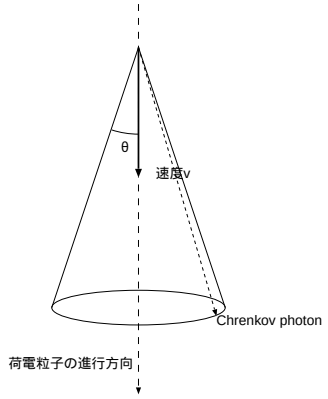


図 2.3: チェレンコフ光モデル図

チェレンコフ光の放出される方向は粒子の速さに依存する。粒子の進行方向とチェレンコフ光の放射方向とのなす角をθ 、粒子の速度を v、媒質の屈折率を n とすると放射の方向は

$$\cos\theta = \frac{1}{\beta n}, \beta = \frac{v}{c}$$

で表され、$\beta n \geq 1$ が満たされると、遠くまで達する光として観測される。$\beta n < 1$ の場合は光は観測されない。

荷電粒子が媒質を dl(cm) 進んで Cherenkov 光を放射して失うエネルギー dW は、ω = 放射される光の振動数、ze=入射粒子の電荷、とすると

$$-\frac{dW}{dl} = -\frac{z^2e^2}{c^2}\int(1 - \frac{1}{b^2n^2})\omega d\omega$$

である。粒子が媒質中を L(cm) 通るときに放射するチェレンコフ光の光子の数 N は、波長 λ_1 ~ λ_2 で以下のように与えられる。

$$N = 2\pi\alpha z^2 L(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1})sin^2\theta$$

ここから、$\beta = 1$ の電子が大気中を 1m 進んだときに放射するチェレンコフ光による光子の数は、350 ~ 550nm の波長帯で約 27photon である。このようにチェレンコフ光は非常に微弱であることから、肉眼での観察はもとより、明るい街の光のある場所での観測や月の出ている時間帯の観測は不可能である。空気シャワー中の荷電粒子の大部分は電子または陽子であり、そのほとんどがβ =1 であることから空気シャワーに伴うチェレンコフ光の総量は、空気シャワー中の荷電粒子の数にほぼ比例する。

2.3 イメージング法

チェレンコフ光の観測においては、バックグラウンドの除去が非常に重要となる。宇宙線原子核のフラックスはプロトンのみを考えても約 $10^{-8}cm^{-2} \cdot sec^{-1} \cdot str^{-1}$ と見積もられるが、これに対してγ 線天体のなかでも大きな強度をもつ Crab からの TeV γ 線のフラックスはこのプロトンのフラックスよりも 3 桁程も小さい値しか持たない。先に述べたように、初期のγ 線観測ではこの膨大なバックグラウンドの除去法が確立されておらず、十分な成果を上げることが出来なかった。

シャワーによる候補事象のカメラ上のイメージは、シャワーの発達の違いを反映する。前節で述べたように、γ 線起源のシャワーは発生高度が比較的高く、シャワー軸に対して横方向に広がる運動量が小さいことから、カメラ上のイメージは小さくまとまった楕円形となる。また、カメラはγ 線発生起源と思われる天体の方向を向けるため、楕円の長軸はカメラ中心から放射状に広がるはずである。

一方バックグラウンドとなる宇宙線原子核によるシャワーは、シャワー軸から横方向に広がる運動量が大きく、発生高度がγ 線に比べて低いため、チェレンコフ光の放射角も大きくなる。これによって、カメラ上のイメージはγ 線起源のシャワーに比べて、分散した不規則なものになる。

このイメージの差異をバックグラウンド除去に用い、イメージング法を確立したのが Whipple グループである。初期の試みでは、イメージの形状と到来方向の違いを AZWIDTH パラメータのみで判定していたが、後に、楕円の幅 (WIDTH) と長さ (LENGTH)、長軸がカメラ中心軸に対してなす角 (ALPHA) の違いをカットの条件として用いるようになった。カットの条件は Monte Carlo シミュレーションを繰り返しながら確立されて来た。現在ではもっとも違いの顕著なアルファパラメータがγ 線選別において最重要なパラメータとなっている。各パラメータは以下のように定義されている (図 2.4)。

- Alpha:楕円の長軸とカメラ中心軸のなす角
- Width:楕円の短軸方向のイメージの広がり (標準偏差)
- Length:楕円の長軸方向のイメージの広がり (標準偏差)
- Distance:楕円の中心とカメラ中心との距離
- Azwidth:カメラの水平軸方向のイメージの広がり (標準偏差)
- Concentration:もっとも光量の多い PMT2 本 (もしくは 3 本) のイメージ全体の光量に対する割合

図 2.5 にモンテカルロシミュレーションによって生成したγ 線とプロトンの主なイメージパラメータの分布を示した。これまでに述べたように、γ 線によるカメラ上の像はプロトンに比べて、小さくまとまった楕円形になる。イメージパラメータもこれを反映して、γ 線の方が、Length,Width は小さく、Concentration

は大きい値を示す。また望遠鏡を向けている天体からγ 線が到来している場合には、γ 線によるシャワー軸が望遠鏡の向いている方向と一致するため、カメラ上のチェレンコフ光の像は視野中心から放射状に分布するため、Alpha は 0 ° にピークを持つようになる。それに対してプロトンによるシャワーは一様な方向からカメラに入射するため Alpha 分布も一様なものになる。

これらのイメージパラメータに違いを利用して、バックグラウンドとなるプロトンを除去する。

このイメージング法の開発により、S/N 比が飛躍的に向上した。

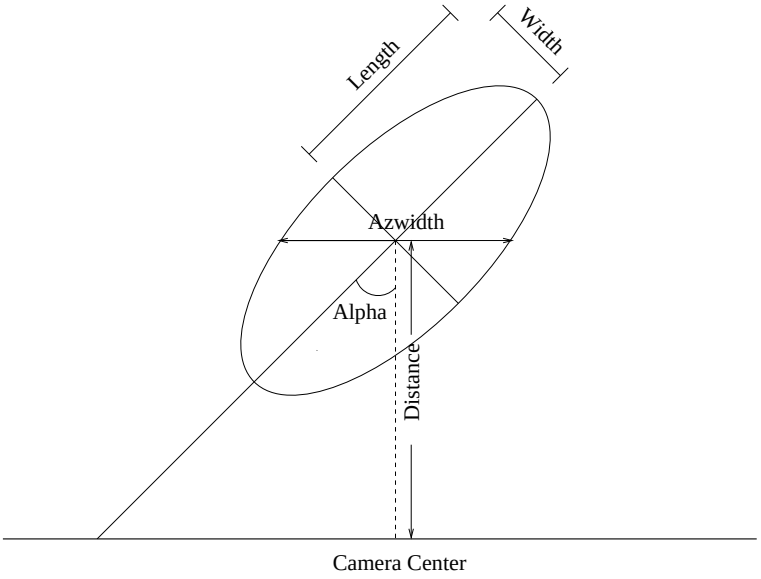


図 2.4: イメージパラメータ

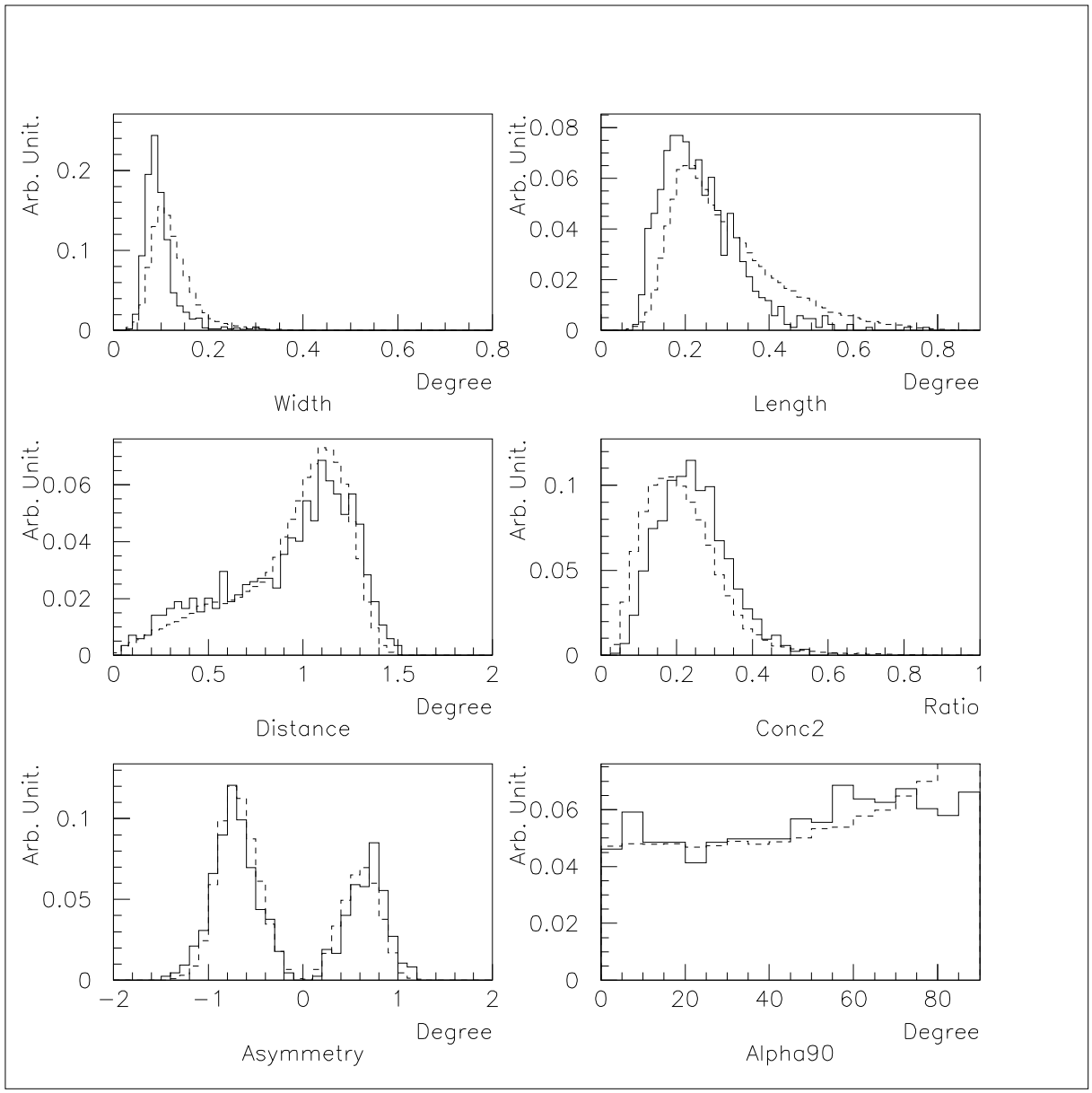


図 2.5: イメージパラメータの分布の違い

第3章　CANGAROO実験

3.1　CANGAROO実験概要

CANGAROOとは”the Collaboration of Australia and Nippon for a GAmma-Ray Observatory in the Outback”を略した造語で、南天の天体からのγ線の検出を目的とする日豪共同研究プロジェクトである。研究には、東海大学、東京大学宇宙線研究所、東京工業大学、茨城大学、理科学研究所、宇宙科学研究所、名古屋大学、山形大学、山梨学院大学、アデレード大学、オーストラリア国立大学他、多くの大学、研究機関が参加している。南オーストラリア州ウーメラ (南緯31°6’, 東経136°47’、海抜160m：図3.1) に設置した口径10mの解像型チェレンコフ望遠鏡を用いて観測を行っている。晴天率が~80%と気候条件が良く、周囲に微弱なチェレンコフ光観測の妨げとなる明るい都市が無い事、南半球での観測は銀河内天体の観測に有理であるなどの理由でこの場所が選ばれている。また、南天のAGNからのγ線を検出出来る可能性があり、期待が寄せられている。

図3.1: CANGAROO実験

3.2 CANGAROO-I

1992 年に観測が開始された CANGAROO-I 望遠鏡 (図 3.2) は、直径 3.8m, 焦点距離 3.8m の回転放物面鏡を持つ経緯台式チェレンコフ望遠鏡で、焦点面には 256 本の光電子増倍管 (photo-multiplire tube; 以後 PMT) からなる解像型カメラが取り付けられている。PMT は浜松フォトニクス製 R2248 で、形状は 10mm × 10mm の四角形、光電面の大きさは 8mm × 8mm であり、12mm 間隔で PMT が並べられている。視野はおよそ 3 ° である。

図 3.2: CANGAROO3.8m 鏡の概観

3.3 CANGAROO-II

3.3.1 主鏡

CANGAROO-I に続いて 1999 年 3 月に建設された CANGAROO-II は、建設当初、小型鏡 60 枚からなる直径 7m の複合放物面鏡であったが (図 3.3)、2000 年 3 月にさらに 52 枚の小型鏡が追加され直径 10m に拡張された (図 3.4)。チェレンコフ望遠鏡は光学望遠鏡程の分解能は必要でなく、観測で必要とされる焦点面における精度は 0.1 ° 程度であるため、小型球面鏡を並べることで大型化を実現している。

この鏡は表面にはアルミ蒸着の代わりに厚いアルミ箔を張ったもので、ガラス製に比べ重量が 2/5 以下と大幅な軽量化に成功したことによって 10m という大口径を実現できた。

また、従来のガラス鏡は面精度は高いものの、保護膜をつけても耐用年数が数年と反射面の耐久性に問題があった。そこで CANGAROO-II では、三菱電器と共同で開発した"炭素繊維強化プラスチック製小型球面鏡"を用い、耐久性の面でも大幅に向上させることに成功した。

小型鏡の向きの調整には、それぞれの鏡面裏側に取り付けられたステッピングモーター (オリエンタル

モータ製 PX533MH-A) で行い、遠隔操作が可能である。

小型鏡をとりつけるフレームの形状の特徴としては、球面形状ではなく回転放物面を採用していることが挙げられる。回転放物面を用いることにより、入射光子の経路長が等しくなり、チェレンコフ光のより正確な到来時間の情報を得ることが出来るため、パルスの時間情報を解析に利用できる。入射光子の到来時間の差が無くなることから、データ収集の最初の段階のゲート幅を短くすることが出来ることも、バックグラウンドとなる夜光の減少につながる。

図 3.3: CANGAROO-II 拡張前の 7m 鏡。

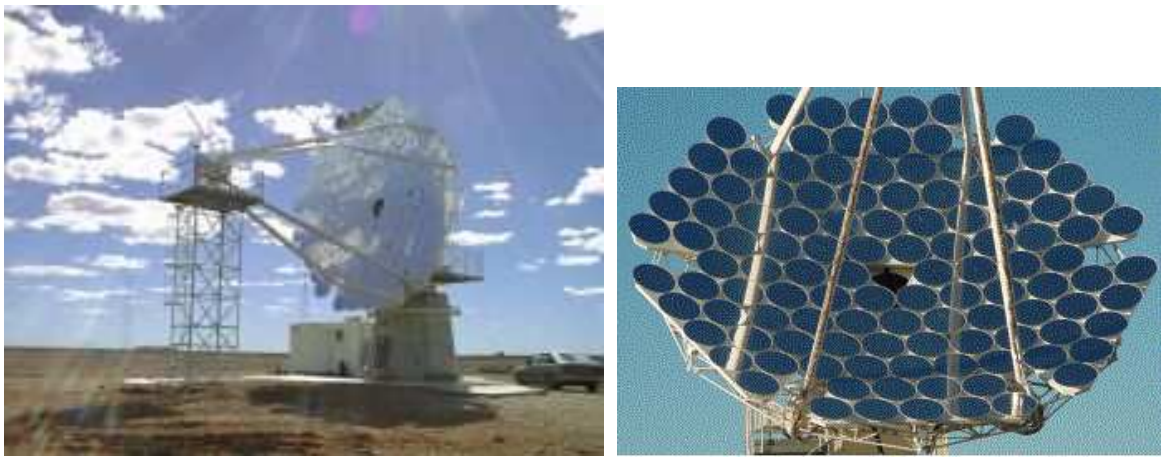


図 3.4: CANGAROO-II 望遠鏡 (10m 拡張工事後) の鏡面

3.3.2 イメージングカメラ (解像型カメラ)

鏡の焦点面にはPMTを並べた解像型カメラが取り付けられている。10m鏡への拡張の際にPMTも4隅に40本が追加され、より円形に近い形状となった。(図3.5)。

PMTは浜松フォトニクス製R4124UVであり、パルスの立上り時間が1.1nsと非常に短い。形状は直径13.5mmφの円筒形、光電面は10mmφである。概観と分光曲線は図3.6に示す通りで、光電面での量子効率は280 ~ 450mmで20%以上になっている。光電面はバイアルカリである。

各PMTの間には多少の隙間が生じているが、カメラの前面にライトガイドをつけることで集光率を上げている。これにより1ピクセルの集光率約85%と見積もられている。ライトガイドの形状は、PMTに接する側が10mmの円形でカメラ前面 (鏡面に近い側) は16mm四方の四角形になっている。ひとつのライトガイドが張る視野は0.115° × 0.115°で、カメラ全体の視野はおよそ3°である。

PMTは4 × 4の16本ごとにBOXという単位を構成しており、BOXごとに共通の電圧が印加される。

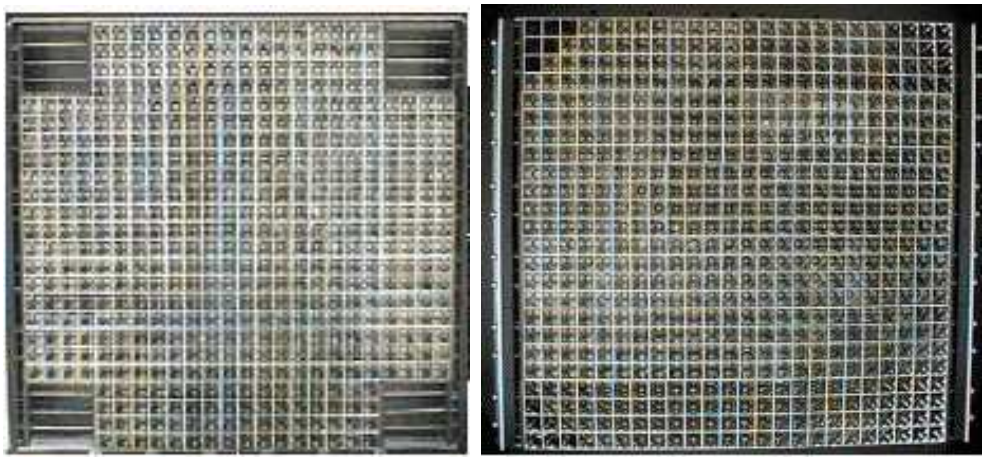


図 3.5: 拡張前のカメラ (左) と拡張後のカメラ (右)

3.3.3 データ収集システム

各PMTからの信号はおよそ30mのツイストケーブルを介して望遠鏡横にある電子回路室に送られる。最初に信号を処理するのはTKOモジュールである。TKOモジュールはTKO(TRISTAN-KEK-Online box system) 規格のモジュールで、1つのモジュールで32ch、すなわち2BOX分の信号を処理する事が可能であり、ここで信号の増幅、整形が行われる。ついでディスクリミネーター、スケーラー、加算回路で内部処理されて以下の信号を出力する。

- PMT16本 (1BOX分) 分の加算パルス (Analog-sum)。
- 閾値を超えたPMTの数に比例した波高のパルス (Logical-sum)。
- TDC[1]スタート用の信号 (TDCの閾値を超えた信号についてのみ)。

[1] Time to Digital Converter; パルスの立上り、立ち下がりの時間情報をデジタルで取得するCAMACモジュール。

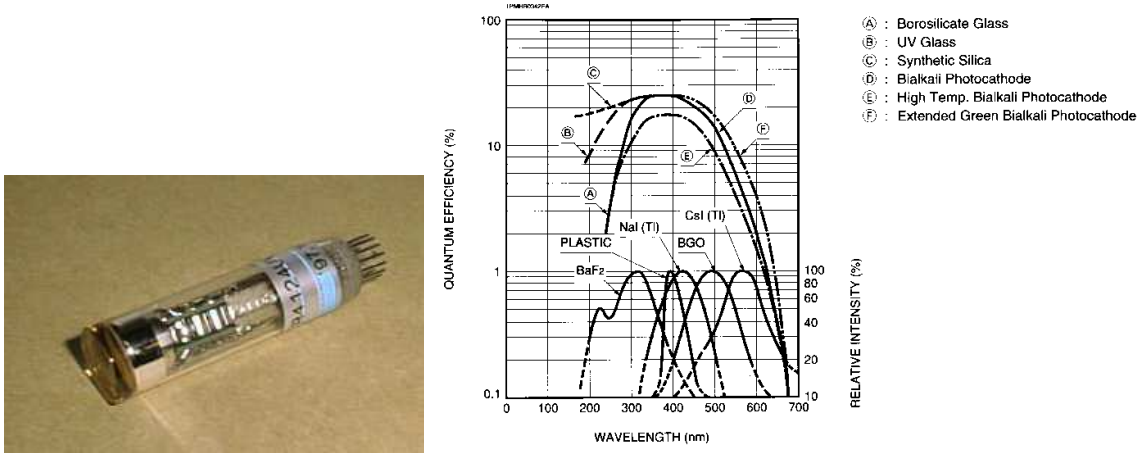


図 3.6: CANGAROO-II で使用している PMT の概観と分光曲線

TKO モジュールで生成された上記の信号はさらに以下の処理を施される。

Analog-sum 信号は 3 つに分けられ、一つは ADC に通され BOX 毎の電荷量の情報が取得される。もう一つは、nbox ディスクリと呼ばれるモジュールに入力し、このモジュールでいくつの BOX が"BOX の閾値"を超えたかを判断するのに使われる。残りの一つの信号はオシロスコープにつながれ、信号のモニターに使われている。

Logical-sum 信号はカメラ中心部の 16BOX 分の信号が全て足し合わされ nhit という信号が作られる。この信号から何本の PMT が閾値を超えているかを判断することが出来る。

TDC への信号はトリガーが掛かると、"その時刻から 256ns さかのぼった時刻"から"トリガーが掛かった時刻"までに入った信号の時間情報が取得される。

トリガーが掛かった事象は VMEbus を通して、GPS による時刻情報、ADC[2],TDC によるパルスの電荷、時間情報をワークステーションのハードディスクに記録する。同時に望遠鏡のトラッキングに関する情報も TCP/IP を経由してハードディスクに記録される。取得された情報は、モニター用の PC で常に監視されている。

3.3.4 CANGAROO-II のトリガー

トリガーの概念については 4 章で詳しく述べるが、ここでは CANGAROO-II におけるトリガー信号生成までの流れを簡単にまとめておく。「夜光事象を落し、シャワー事象らしいもののみを取り込む」という要求を満たすために、

1. カメラ全体である一定レベル以上の光量を持ち、なおかつ
2. それらが散在せず、ある程度固まったイメージを持つ

[2] Analog to Digital Converter; 入力信号の電荷量をデジタル化する CAMAC モジュール

という 2 条件を同時に満たすような事象のみを取り込む。まず 1 を満たすものを nhit ディスクリで選別し、2 を満たすものを nbox ディスクリで選別する。それぞれのディスクリモジュールからの信号のコインシデンスを取ることで、上記の 2 つの条件を同時に満たすような事象を選び出しているわけである。このコインシデンス信号と、GPS からの 1sec に 1 回の信号の両方がトリガー信号として使われる。GPS からの信号をトリガー信号として使うのは、トリガーレートが何らかの理由ではね上がり DAQ に取りこぼしが起こった際に、GPS 信号をチェックすることで不感時間の校正を可能にするためである。

3.4 CANGAROO-III

3.4.1 CANGAROO-III 計画

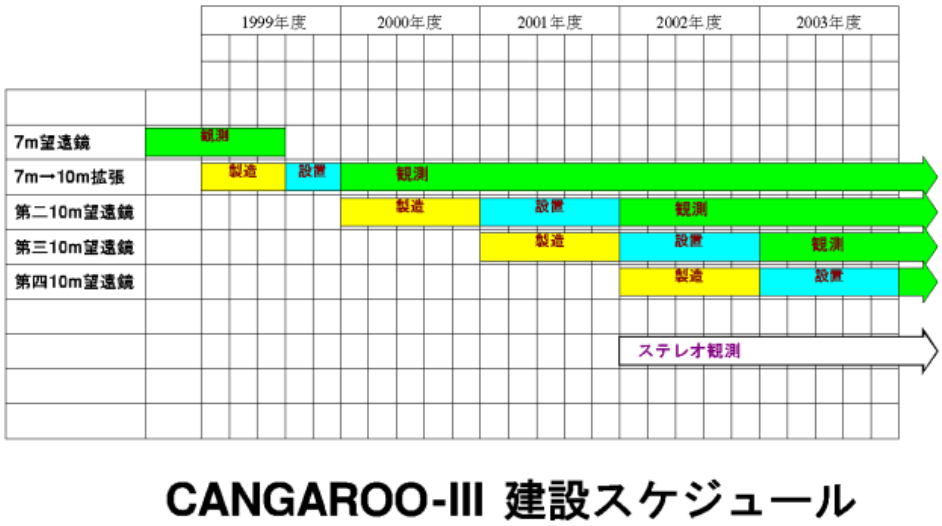


図 3.7: CANGAROO-III 計画スケジュール

チェレンコフ望遠鏡を用いた地上での高エネルギーγ 線観測は近年著しい発展を遂げており、世界中の研究グループが、より高い感度とより低いエネルギー閾値を実現するべく、次世代型の望遠鏡の建設を計画している。われわれ CANGAROO も最終的には 2004 年から 4 台の 10m 鏡でのステレオ観測を目指し、来年度からはじまる 2 台目の 10m 鏡の建設のために準備を進めている。ステレオ観測の実現によってγ 線の到来方向をより高い精度で決定することが出来る他、複数の天体を同時に観測することも可能である。3 台目以降の望遠鏡に関する詳細は未定であるが、ここでは現在準備が進行している 2 台目の望遠鏡について紹介する。

図 3.8: CANGAROO-III 完成後の予想図 (合成)

3.4.2 イメージングカメラ

CANGAROO-III で使用するイメージングカメラは、CANGAROO-II よりもより隙間無く PMT を並べることが出来、円形に近い六角形の形状になる (図 3.10)。PMT472 本からなり、カメラ全体の視野は 3.9 ° である。PMT は浜松フォトニクス製 R3479 で、これは R3478 に UV ガラスをつけたものである。10m 鏡の建設時のシミュレーションによると、γ 線の像をとらえるカメラのピクセルサイズは 0.16 ° 程度が最適である。そこでピクセルサイズ 0.16 ° に対応する直径 19mmϕ の円筒形の PMT(図 3.11) を使用する。パルスの立上り時間は 1.3ns と速く、重量も 15g と軽量で、パルスの線形性が高い事からこの PMT が採用されている。分光曲線は図 3.6 で、低エネルギー側で UV、それ以上の領域では Bialkali の特性を表す。カメラ前面にはこれまでと同様にライトガイドを取り付けることによって PMT のすき間を埋める。ライトガイドは 6 角形で、内面はウィンストンコーンの形状となっており、これにより集光率を約 77%に上げることが出来る。

3.4.3 データ収集システム

各 PMT からの情報は、カメラ内で増幅されたのち 27m のツイストペアケーブルを介して望遠鏡横のベランダに設置された電子回路室に送られ、ディスクリ · アンプ · サムモジュールに入力される。これは新規開発された TKO 規格モジュールで、閾値以上の信号を論理信号にしてその数をスケーラーで係数する。同時に CANGAROO-II の Analog-sum と Logical-sum に相当する信号を出力する。1 つのモジュールで 16 チャンネル分を処理することが出来る。論理信号の信号幅は、入力信号の波高の対数に比例するように整形され、これを VME 規格のマルチヒット TDC でデジタル化する。閾値を超えた信号のレートは TKO バスを通じて適宜読み出され、カメラ視野内の恒星の通過などをそのレートの変化から知ることが出来る。

Analog-sum は各信号の波高値の補助として ADC で測定される他、カメラ全体の和を取ることも可能である。

デジタルデータは VME 規格の CPU ボードによって読み出され、ハードディスクに記録されると同時に、オンラインでモニターされる。また、簡単なイメージ解析を行い、γ 線強度が高い場合にはその場でγ 線の検出を知ることが出来るようにする。

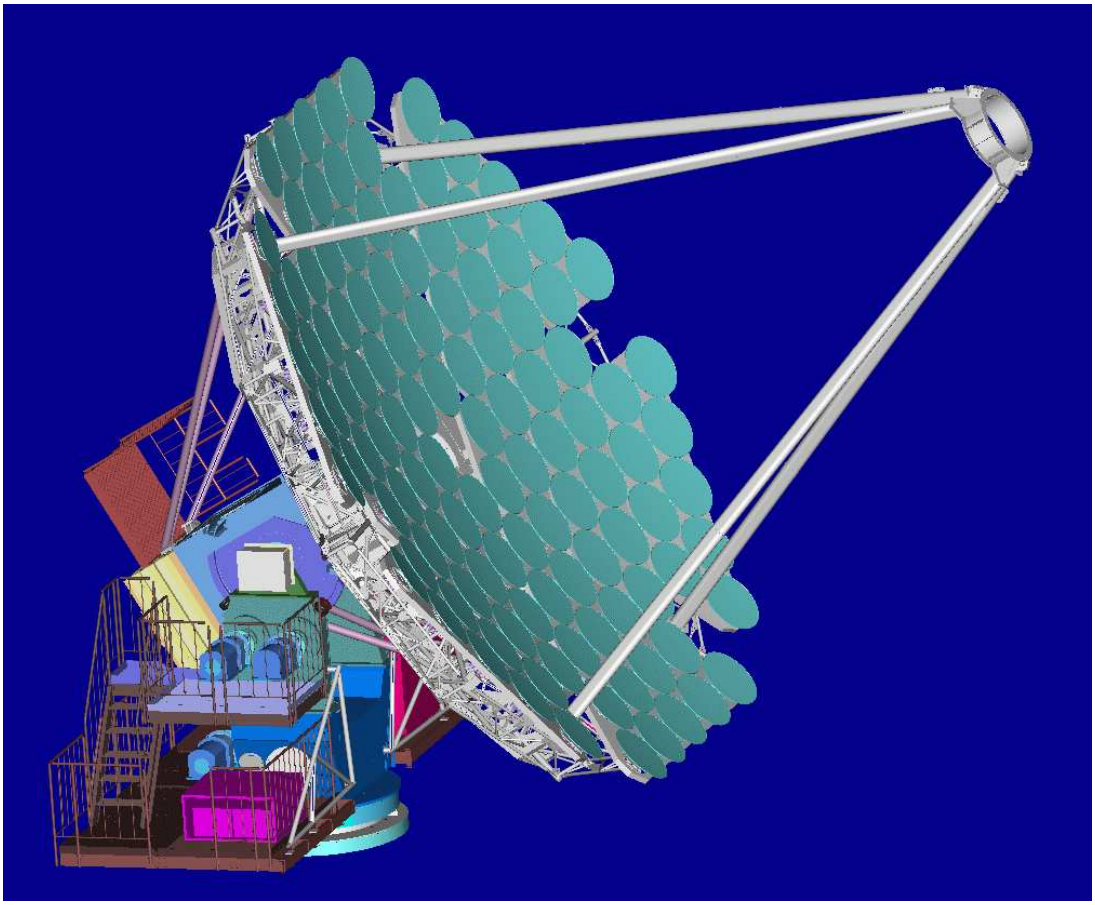


図 3.9: CANGAROO-III 望遠鏡概観予想図

ただし上記のデータ収集システムは、現時点では計画段階であり、変更の可能性もある。
トリガーについては次章で詳しく述べる。

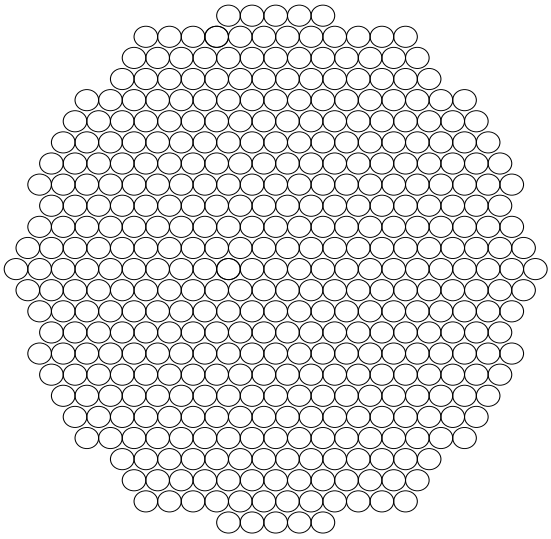


図 3.10: CANGAROO-III 望遠鏡 (2 台目) のイメージングカメラの概観

図 3.11: CANGAROO-III で使用する PMT

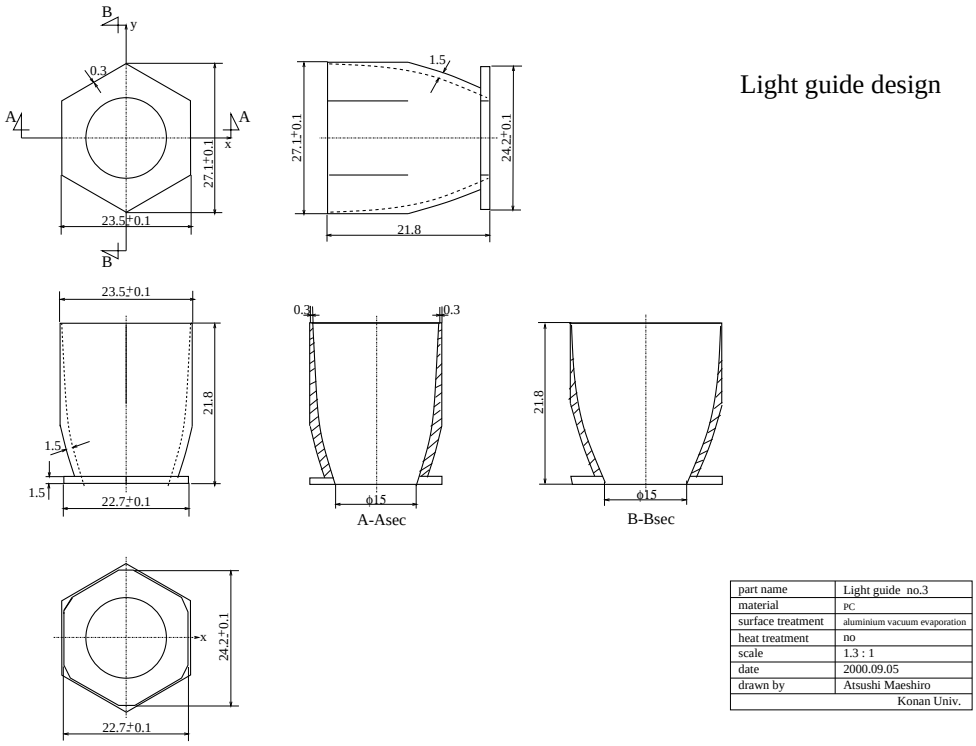


図 3.12: CANGAROO-III で使用するライトガイド

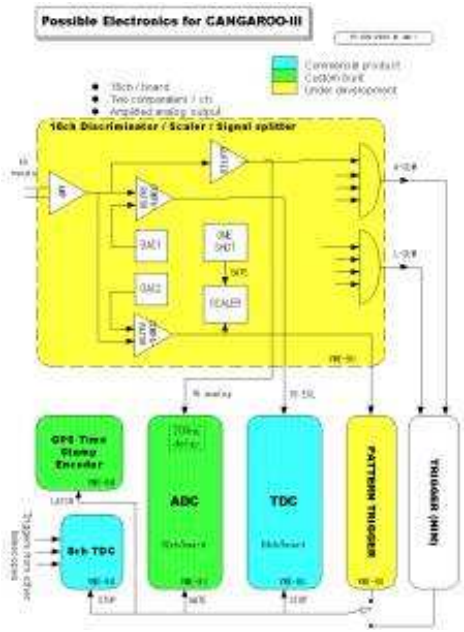


図 3.13: CANGAROO-III のデータ収集システム

第4章　シミュレーション

4.1　観測におけるバックグラウンド事象

地上における高エネルギーγ 線観測では、取得したいγ 線による事象をいかに効率良くバックグラウンド事象から選別するかが非常に重要になる。バックグラウンドは大きくわけるとプロトンによるシャワー事象と、夜光事象による 2 種類が存在し、それぞれの性質を踏まえた上で適切な方法で除去する。

4.1.1　夜光

月や明るい街の光が無いところでも、完全に夜空が暗くなることは無い。これは"夜光 (Night Sky Background)"と呼ばれる背景放射があるためで、その原因は星や星雲、銀河による光と空気分子でのその散乱光である「星夜光」、その他に「黄道光」「大気光」がある。

黄道光は、太陽系の黄道面に広がる塵などが太陽光を散乱することによって発生する放射光を指し、大気光とは、大気上層部での化学反応が原因で大気自身が発する光であり、その原因は主として、太陽紫外線による地球上層大気の原子, 分子の励起であると考えられている。

4.1.2　宇宙線原子核によるシャワー

前述の様に期待されるγ 線 flux は非常に小さく、それよりもはるかに多い 1 次宇宙線によるバックグラウンド事象に埋もれている。このプロトンによる事象はデータ取得時のパターントリガーによる判別は困難である。そこでデータ取得時には、プロトンによるものも含めるシャワー事象を全て取り込み、プロトンによるシャワー事象のリダクションはオフラインでイメージング法を用いることにより行う。

4.2　トリガー

データ取得の際にバックグラウンドをある程度除去し、データ取得のレートを押えるために、ある条件を満たしたイベントのみデータ取得を行うことを「ある条件でトリガーをかける」という。CANGAROO では、レートの上昇に最も寄与しているのが夜光事象であるため、カメラ上の像の違いを利用して、この事象をシャワー事象と識別し、夜光事象のみのイベントはデータとして取り込まないようにしたい。先に述べたようにγ やプロトンによるシャワー事象がカメラ上に作る像は、夜光事象に比べて光量が多く、ある程度まとまった形をしている。そこでこの像の違いを利用し、夜光事象を除去する。

4.3 トリガー条件候補

これまでの CANGAROO のトリガーは、全体の光量と BOX 閾値を超えた BOX の数をトリガー条件として課していた。次期望遠鏡での観測に当たって、より低いエネルギー閾値を実現するためにはトリガー条件を緩め、より多くのイベントデータを取得すれば良いが、これまでの方式でトリガー条件を緩めると視野の拡大に伴って増加した夜光によりレートが暴走すると予想される。そこで新たなトリガー方式として"パターントリガー"を採用することを考える。

"パターントリガー"とは、文字通りイメージのパターンに注目し、条件を満たすパターンをもつイメージを含むイベントのみをデータとして取得するトリガーで、イーメージング法を開発した Whipple グループも同様のパターントリガーを採用している。ここでは夜光事象のみのイベントを取り込まないようにするために、シャワー事象による典型的なカメラ上のイメージがクラスタリングしていることを利用して、閾値を超える信号を持つ PMT が一定本数以上並んでいるイベントのみをデータとして取得する”adjacent トリガー” についてシミュレーションを行った。「閾値を超えた PMT が x 本以上並んでいる (クラスタリングしている)」ようなパターン (例:図 4.1) をふくむイベントをとりこむトリガーを”Txa トリガー"と呼ぶことにする。シュミレーションによってこのトリガーの検出効率とトリガーレートを求め、最適なトリガーパターンを選択する。adjacent トリガーとの比較のために、「閾値を超えた PMT がカメラ全体で x 本以上ある」という”any トリガー” の"any-x トリガー"(例:図 4.2) についても同様のシュミレーションを行った。

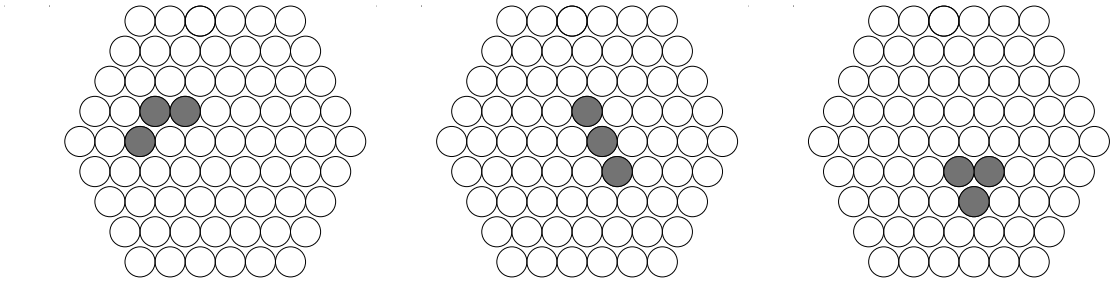


図 4.1: Txa(x=3) を満たすイメージの例。図はカメラの一部。

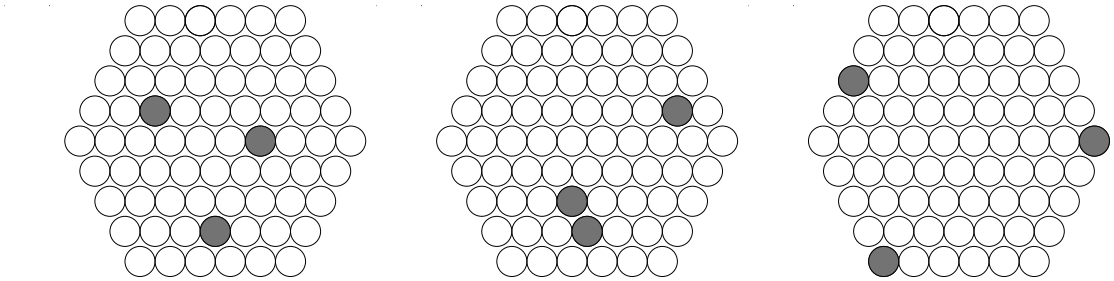


図 4.2: any-x(x=3) を満たすイメージの例。図はカメラの一部。

4.4 シミュレーション

4.4.1 プログラム

シュミレーションに用いたプログラムは、昨年開発されCANGAROOグループが解析およびシミュレーションに用いているプラグラム"full"をベースに適宜変更を加えたものである。カメラ部分は2台目のCANGAROO-IIIで採用される六角形のカメラを組み込んだ。

空気シャワーの発生部分には、CERN Libraryの"GEANT"が組み込まれている。GEANTは高エネルギー物理学実験の分野で広く使われいるプログラムライブラリであり、各種粒子の相互作用の様子が十分な精度で計算される。

4.4.2 夜光の見積もり

γ線のシミュレーションと同時に夜光についても同様のトリガー条件でシミュレーションを行い、トリガーレートを算出した。1イベント中にカメラに入射する夜光の光量(光電子数)を算出するためにJelly[2]の値を用いると、波長領域430 ~ 550nsでの夜光による光電子数は、

$$\frac{d^3W}{dSdtd\Omega} = 2.55 \times 10^{-4} erg \cdot cm^{-2} \cdot sec^{-1} \cdot str^{-1}$$

であり、これを単位波長あたりの光量にすると

$$\frac{d^4W}{dSdtd\Omega d\lambda} = 2.125 \times 10^{-6} erg \cdot cm^{-2} \cdot sec^{-1} \cdot str^{-1} \cdot nm^{-1}$$

となる。よって波長λ_1 ~ λ_2での光電子数は

$$\frac{d^3N}{dSdtd\Omega} = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{d^4W}{dSdtd\Omega d\lambda} (\frac{hc}{\lambda})^{-1} d\lambda = \frac{\lambda_2^2 - \lambda_1^2}{2hc} \cdot \frac{d^4W}{dSdtd\Omega d\lambda}$$

であり、PMTの感度領域である波長域280 ~ 450nmについては

$$\frac{d^3N}{dSdtd\Omega} = 7.04 \times 10^7 cm^{-2} \cdot sec^{-1} \cdot str^{-1} (photon)$$

と計算される。この値に、反射鏡の面積S_{10}, 鏡面の反射率E_{10}, ライトガイドの集光率$E_{l.g.}$,PMTの量子効率$E_{q.e.}$, イメージングカメラの視野Ω_θ, ゲート幅Δ t を掛け、1イベントあたりのカメラ全体の夜光事象による光量を概算する。表4.1のパラメーターを概算に用いると

$$\frac{dN}{dt} = \frac{d^3N}{dSdtd\Omega} \times S_{mirror} \times \varepsilon_{mirror} \times \Omega_\theta \times \varepsilon_{l.g.} \times \varepsilon_q \times \Delta t = 170.7 (potons/event)$$

となり、1イベントあたりの夜光量はカメラ全体で約170photonとなる。反射率、ライトガイド集光率、ゲート幅等は現CANGAROO-IIでの値を参考にし、不確定な要素に対しては小さめに見積もっている。現時点では正確な夜光量はエレクトロニクスによるノイズ等が未確定であるため見積もることが難しく、気象条件等によってもfactor2程度の揺らぎがあることから([27])170,250,350を夜光事象による光量の概算値として採用し、その値を中心にガウス分布で揺らがせた光量を入射させた。250,350はゲート幅がそれぞれ1.5倍,2倍になったときを想定した場合の1イベントあたりの夜光量である。

表 4.1: 夜光量見積もりに使用したパラメータ

小型鏡の直径	80cm
小型鏡の枚数	114 枚
鏡面の反射率 E_{10}	70%
ライトガイドの集光率 $E_{l.g.}$	70%
PMT の量子効率 $E_{q.e.}$	20%
イメージングカメラの視野 Ω_θ	3.9 °
PMT ゲート幅 Δ t	10ns

表 4.2: シミュレーションパラメータ

入射粒子	γ 線 index	2.0 , 2.2 , 2.5 , 3.0
	1 イベントあたりの夜光量 (NSB)	170 , 250 , 350photon
トリガー条件	PMT 閾値 (t.h.)	1.0 , 2.0 , 3.0 , 4.0 , 5.0 , 6.0 photon
	トリガーパ ターン (adjacent)	T2a ~ T6a
	トリガーパターン (any)	any3 ~ any10

4.4.3 シミュレーション条件

シミュレーションでは、adjacent トリガーとして T2a ~ T6a、any トリガーとして any3 ~ any10 までを採用し、これらについて、夜光事象のトリガーレート、およびシャワー事象 (γ 線、陽子) の検出効率をシミュレーションした。シャワー事象には、夜光による photon もかぶせてあり、実際の観測に近い形を再現してある。

また Txa,any-x を核としてシュミレーションを行う上で、x の他に、PMT 閾値とカメラ全体の夜光量もパラメータとして変化させ (表 4.2)、トリガーレート及び検出効率を調べた。

4.5 シミュレーション結果

望ましいトリガーは、夜光事象によるトリガーレートが低く、γ 線のシャワーの検出効率が高いものである。トリガーレートが高すぎるとデータ収集の処理速度を超え、大きな dead-time を生ずる。これを避けるためにトリガーレートは 1kHz 以下に押えたい。またγ 線の検出効率は、エネルギー閾値を下げるために、低いネルギー領域の検出効率を上げることが重要となる。これら 2 点を踏まえて最適なトリガーを選択する。まず any トリガーと adjacent トリガーのトリガーレートの違いを図 4.3,4.4,4.5 に示した[1]。白抜きの十字が any トリガー (any x) によるトリガーレート、*印が Adjacent(Txa) トリガーによるトリガーレートを表している。

これらのうち、「トリガーレート 1kHz 以下」を満たしているトリガーを表 4.3 にまとめた。これらのトリガーレート上限値の条件を満たしているトリガーについて、γ 線の検出効率を求めた。NSB 変化毎の各トリガーパターンによるγ 線検出効率の違いと、トリガーイベントのエネルギースペクトルを図 4.6 ~ 4.15

[1] これ以降示すシミュレーション結果は全て、γ 線 index2.2 の場合についてのシミュレーション結果である。

に示した。検出するγ 線領域は数 TeV までであるが、エネルギー増加とともにγ 線イメージの光量は大きくなりトリガーされやすくなる。また新トリガーで実現したいのは「エネルギー閾値を下げる」、すなわち、低エネルギー側での検出率を上げることであるので、シミュレーション結果のうち 500GeV までの結果をここでの議論の対象とした。

表 4.3: トリガーレート 1kHz 以下のトリガー

夜光	PMT 閾値	adjacent	any
170p.e./event	1p.e.	-	-
	2p.e.	-	-
	3p.e.	T5a ~	-
	4p.e.	T3a ~	any6 ~
	5p.e.	T2a ~	any3 ~
250p.e./event	1p.e.	-	-
	2p.e.	-	-
	3p.e.	T6a ~	-
	4p.e.	T4a ~	any8 ~
	5p.e.	T3a ~	any4 ~
	6p.e.	T2a ~	any3 ~
350p.e./event	1p.e.	-	-
	2p.e.	-	-
	3p.e.	-	-
	4p.e.	T4a ~	-
	5p.e.	T3a ~	any5 ~
	6p.e.	T2a ~	any3 ~

4.6 シミュレーション結果の考察

シミュレーション結果を検討すると、any トリガーは adjacent トリガーと比較して PMT 閾値を上げなければトリガーレートを押えることが出来ない傾向がみられる。夜光量 170photons/event の場合でみると、adjacent トリガーで閾値 3p.e. からトリガーレート上限値を下回るのに対して any トリガーは閾値を 4p.e. に上げなければトリガーレート上限値を下回ることが出来なかった。夜光量が変化した場合も同様で、いずれの場合も adjacent トリガーよりも PMT 閾値を高くしなければトリガーレートを押えることが出来なかった。さらに検出効率について見てみると、夜光量 170photons/event,PMT 閾値 4p.e. の時、adjucent トリガーで最も検出効率が高かった T3a による 100GeV でのγ 線検出効率が約 25%であるのに対して、any トリガーで最も検出効率が高かった any6 による 100GeV でのγ 線検出効率は約 5%程度で、adjucent トリガーの 1/5 程度の検出効率しか上げられていない。500GeV 領域でも、adjacent トリガーでの検出効率約 95%に対して any トリガーでの検出効率は 80%と低い。閾値、夜光量が変化した場合でも any トリガーの検出効率が低いという傾向は変わらず、adjacent トリガーと比較して常に約 9/8 ~ 1/5 倍の検出効率しか上

げていない。つまり any トリガーより、adjacent トリガーの方が、トリガーレートは低く、γ 線検出効率は高くなっており、より望ましいトリガーであることが分かった。

そこで adjacen トリガーの中で最適なトリガーパターンを選択するためにまず夜光量 170photons/event の場合に注目してみる。各閾値に於いて最も検出効率が高かったトリガーパターンの検出効率を比較すると図 4.16 の様になる。大きな差は無いが、PMT 閾値 3p.e. で T5a の時、100GeV でのγ 線検は PMT 閾値 5p.e. で T2a の時のγ 線検出効率の 80%程度となっており閾値を高くし小さいクラスターを取り込むようなトリガーの方が、やや検出効率が高くなる傾向がある。500GeV では検出効率にはほとんど差は見られないようである。夜光量が増えた場合も同様な結果が出ている (図 4.17,4.18)。図 4.19 に T2a,T3a の検出効率をまとめた。ほぼ同程度であるが、100GeV での T2a の検出率の平均が約 25%、T3a では平均約 21%となっており T2a が若干高い検出効率を示した。500GeV では T2a の検出効率が平均約 90%、T3a が平均約 88%で大きな差は見られない。プロトンについても同様のシミュレーションを行ったが、T2a,T3a で有意な差は出ておらずトリガーパターン選択に当たっての参考にはならなかった。

以上のシミュレーションの結果、実際に望遠鏡に入射する夜光量やエレクトロニクスノイズ等未確定な部分があるため暫定的な結論ではあるが、T2a をトリガーパターンとして採用し、閾値を上げることによってトリガーレートを調整する方法が最も望ましいようである。

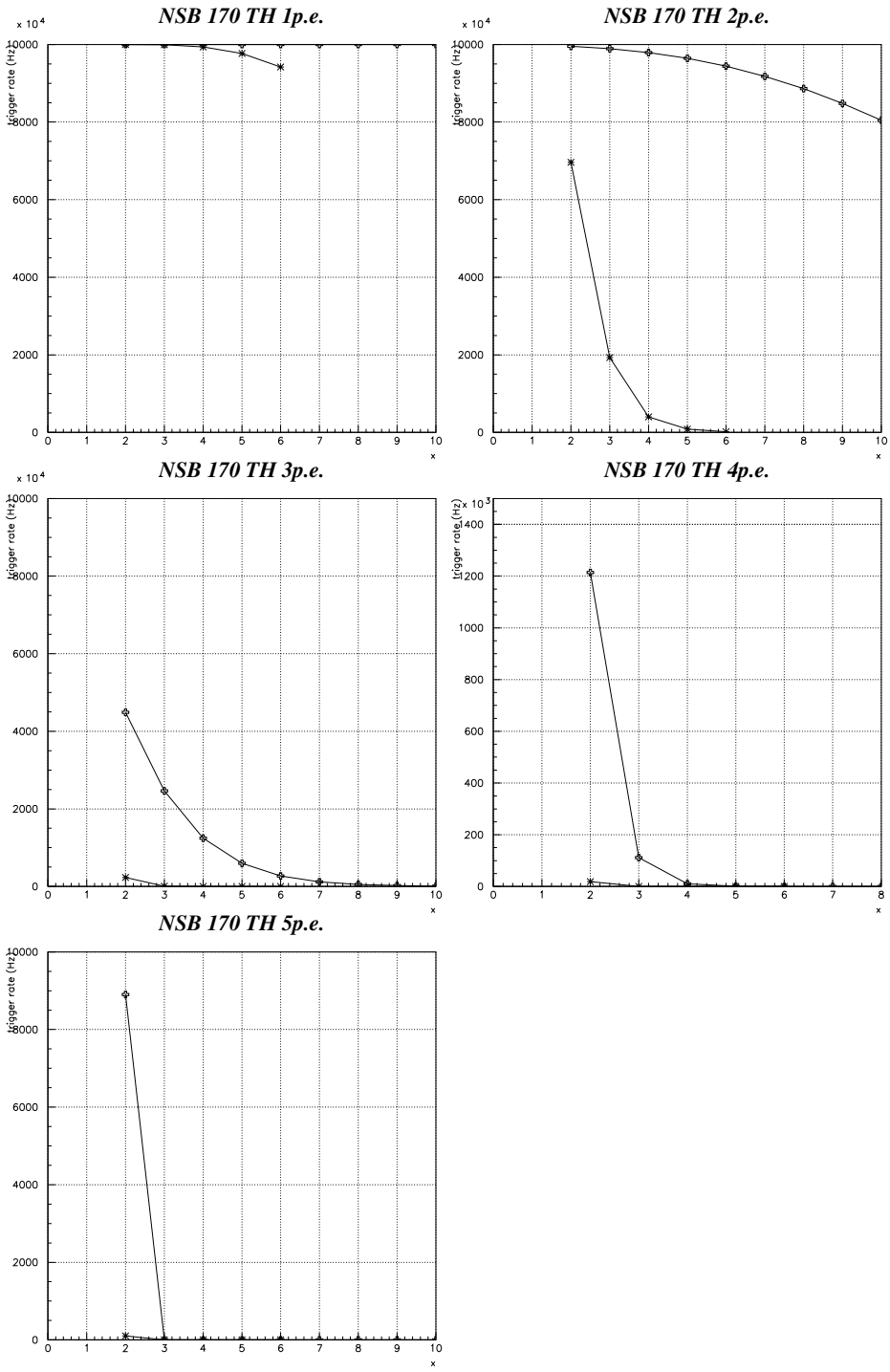


図 4.3: 夜光 170photons/event の時のトリガーレート

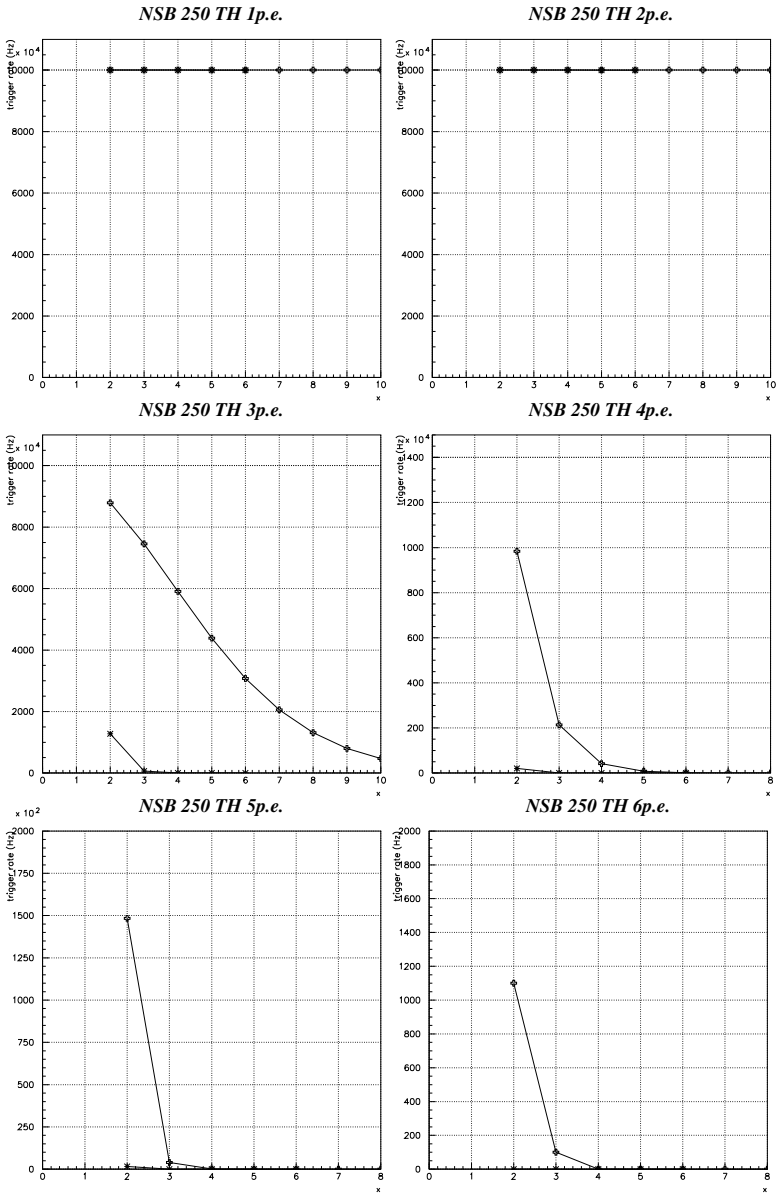


図 4.4: 夜光 250photons/event の時のトリガーレート

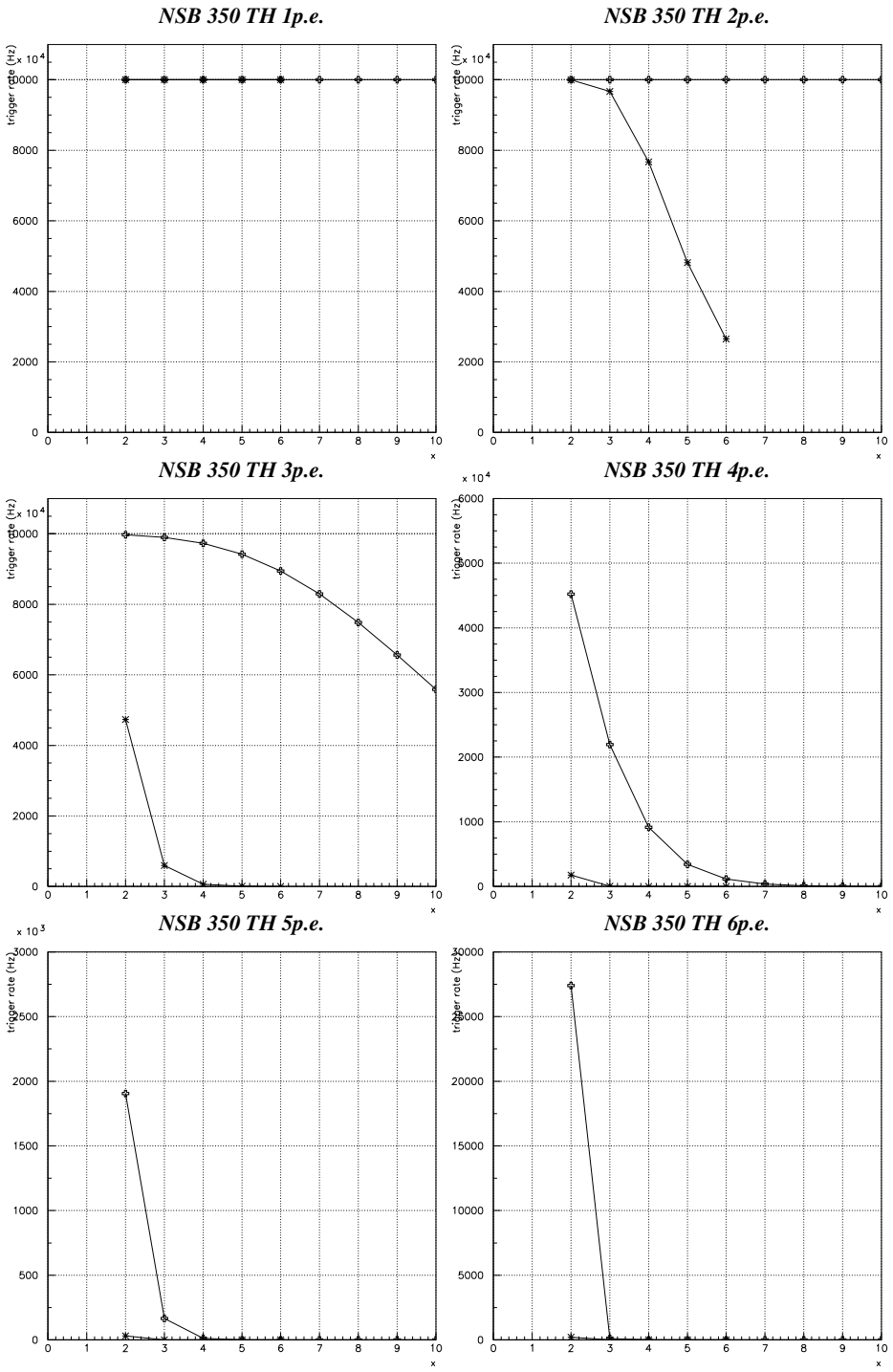
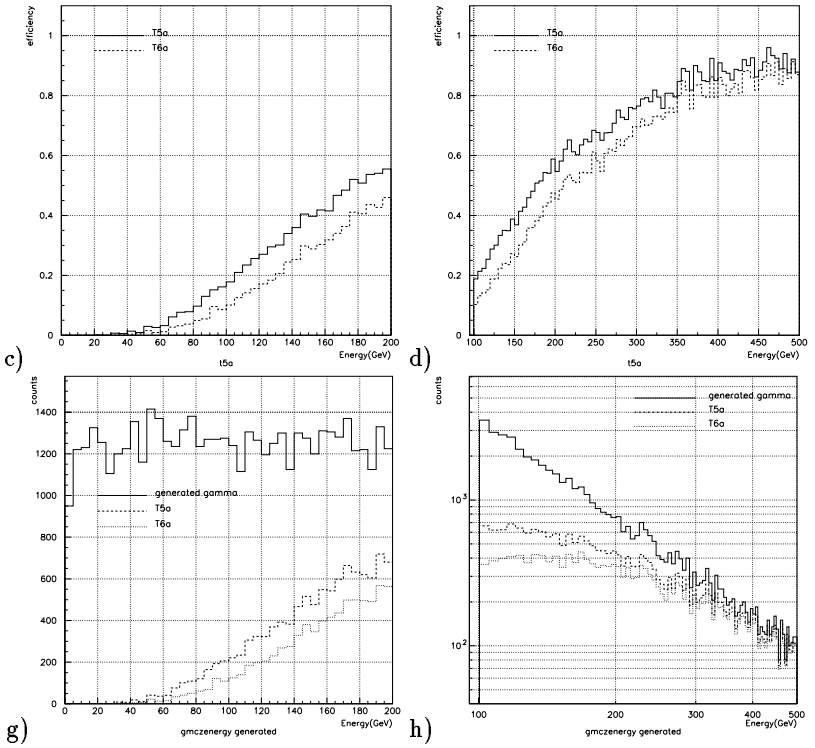


図 4.5: 夜光 350photons/event の時のトリガーレート



c) d) g) h)

図 4.6: 夜光 170p.e./event;T.h.3p.e. でのトリガーシミュレーションの結果

以後シミュレーション結果の図は

a)0-200GeV:any トリガーでのγ 線検出効率

b)100-500GeV: 〃

c)0-200GeV:Txa トリガーでのγ 線検出効率

d)100-500GeV: 〃

e)0-200GeV:any トリガーでのγ 線検出スペクトル
(生成したγ 線スペクトルはフラット)

f)100-500GeV: 〃
(生成したγ 線スペクトルはべき 2.2)

g)0-200GeV:Txa トリガーでのγ 線検出スペクトル

h)100-500GeV: 〃

を表す。

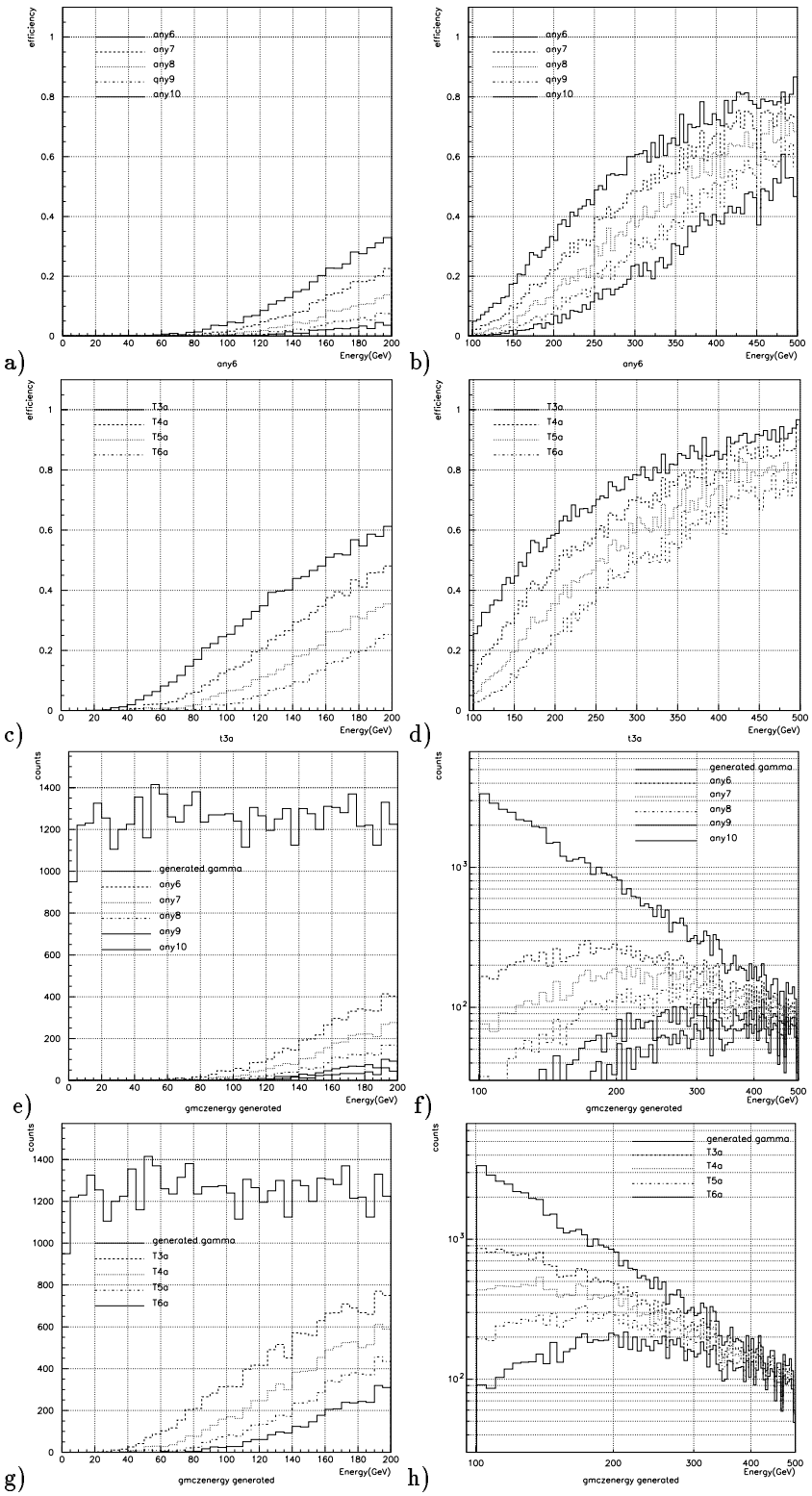


図 4.7: 夜光 170p.e./event;T.h.4p.e. でのトリガーシミュレーションの結果

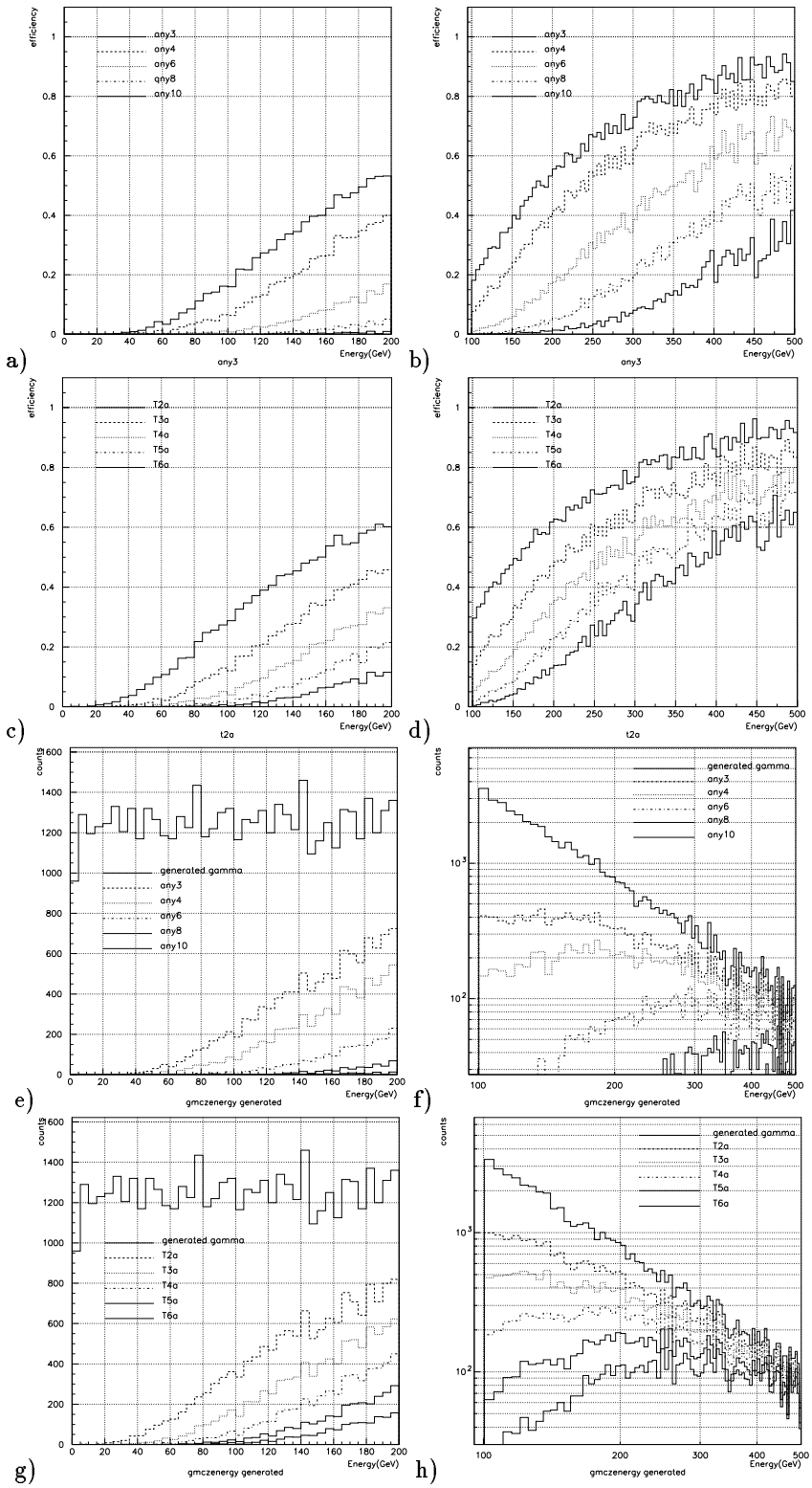


図 4.8: 夜光 170p.e./event;T.h.5p.e. でのトリガーシミュレーションの結果

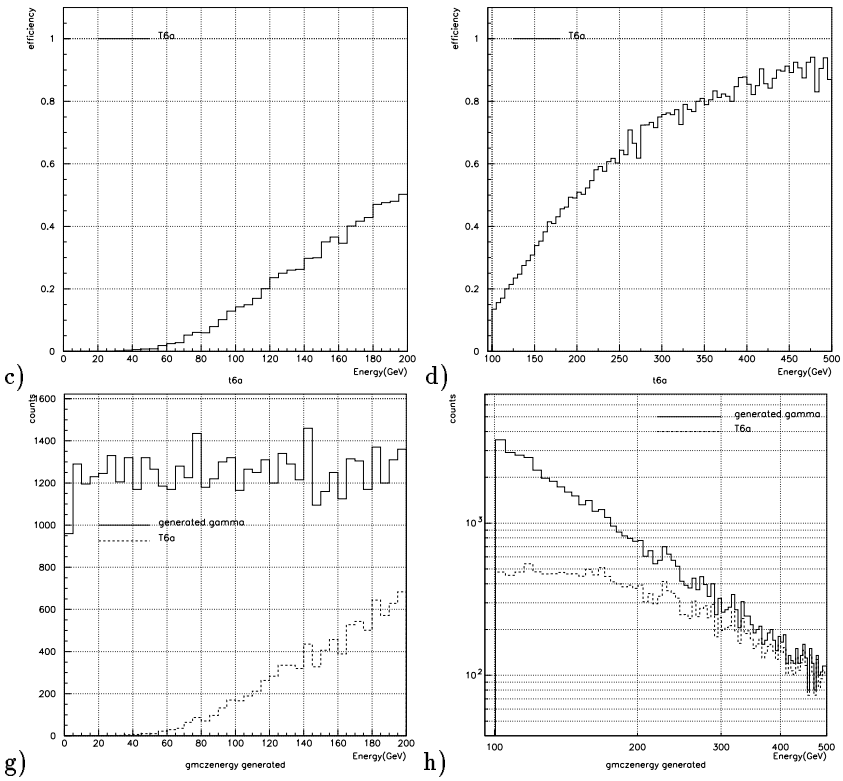


図 4.9: 夜光 250p.e./event;T.h.3p.e. でのトリガーシミュレーションの結果

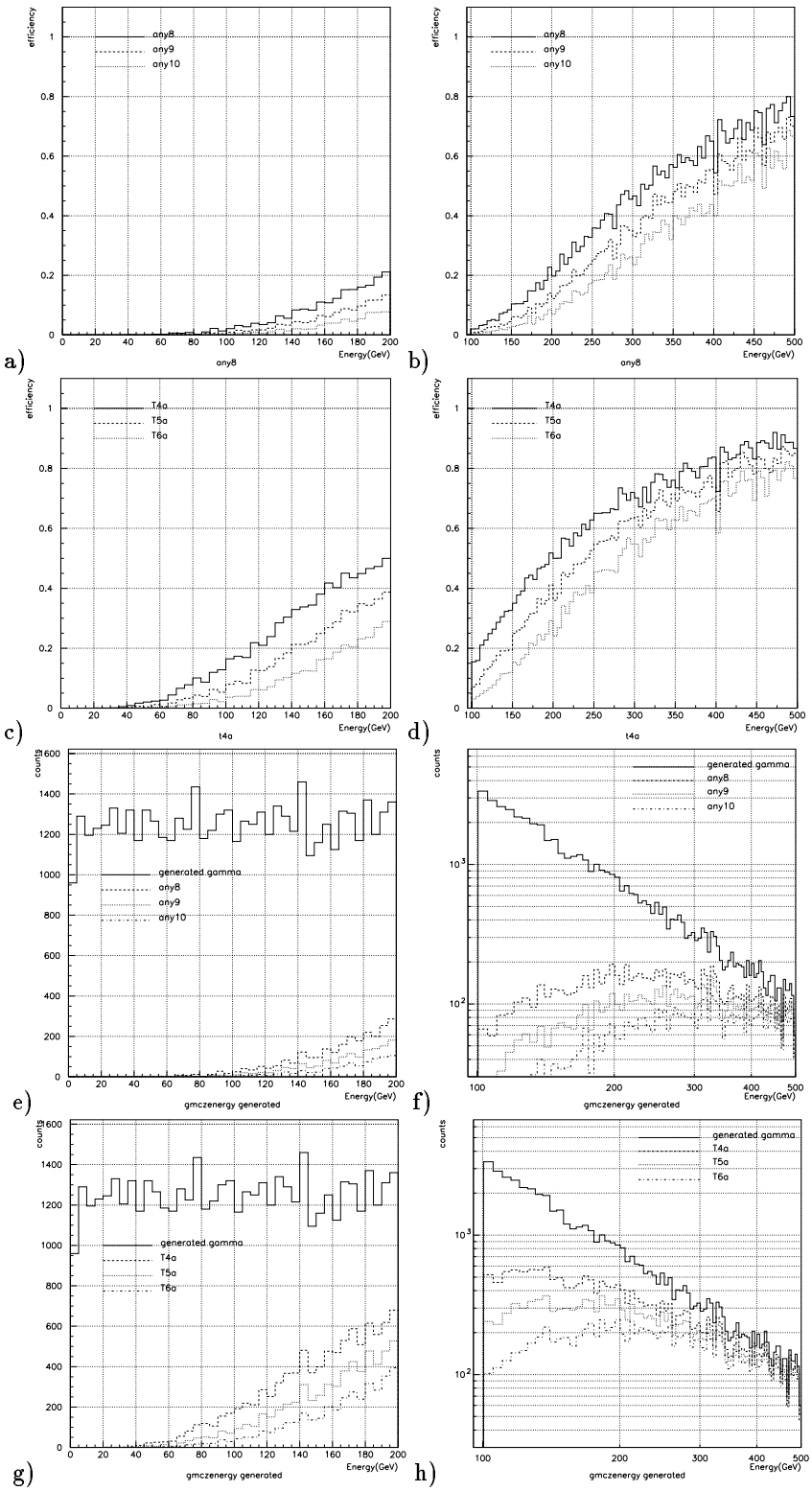


図 4.10: 夜光 250p.e./event;T.h.4p.e. でのトリガーシミュレーションの結果

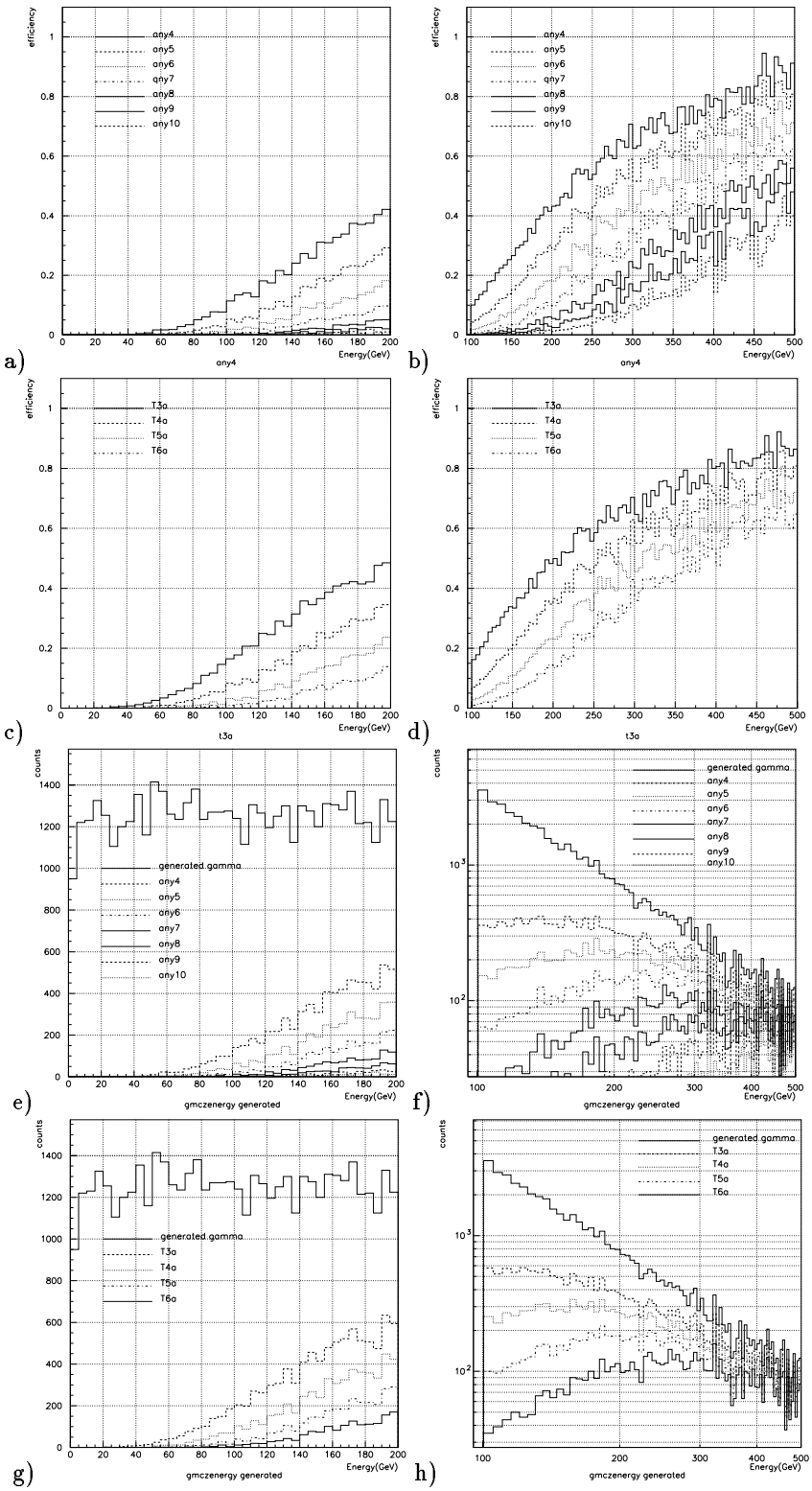


図 4.11: 夜光 250p.e./event;T.h.5p.e. でのトリガーシミュレーションの結果

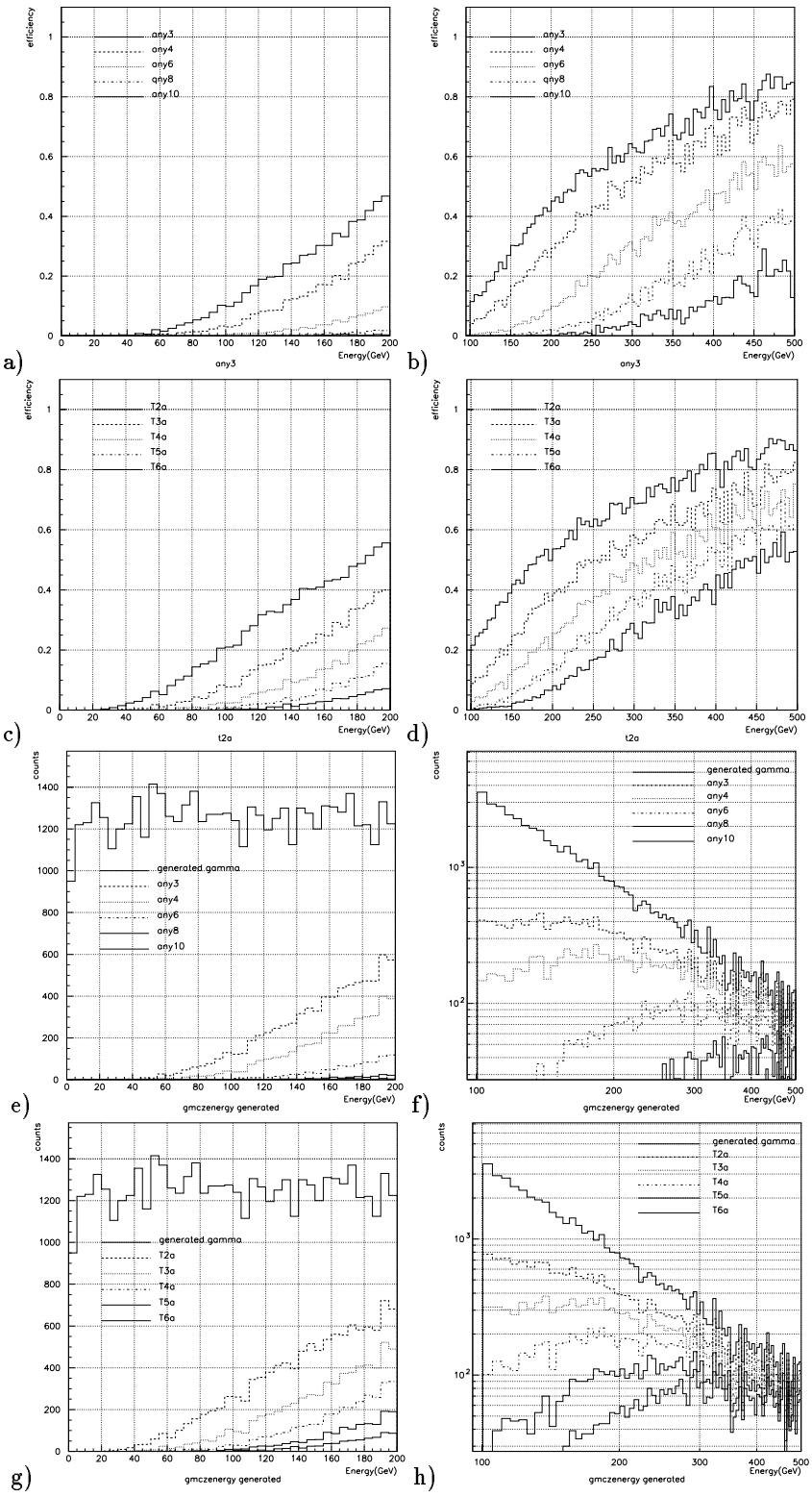


図 4.12: 夜光 250p.e./event;T.h.6p.e. でのトリガーシミュレーションの結果

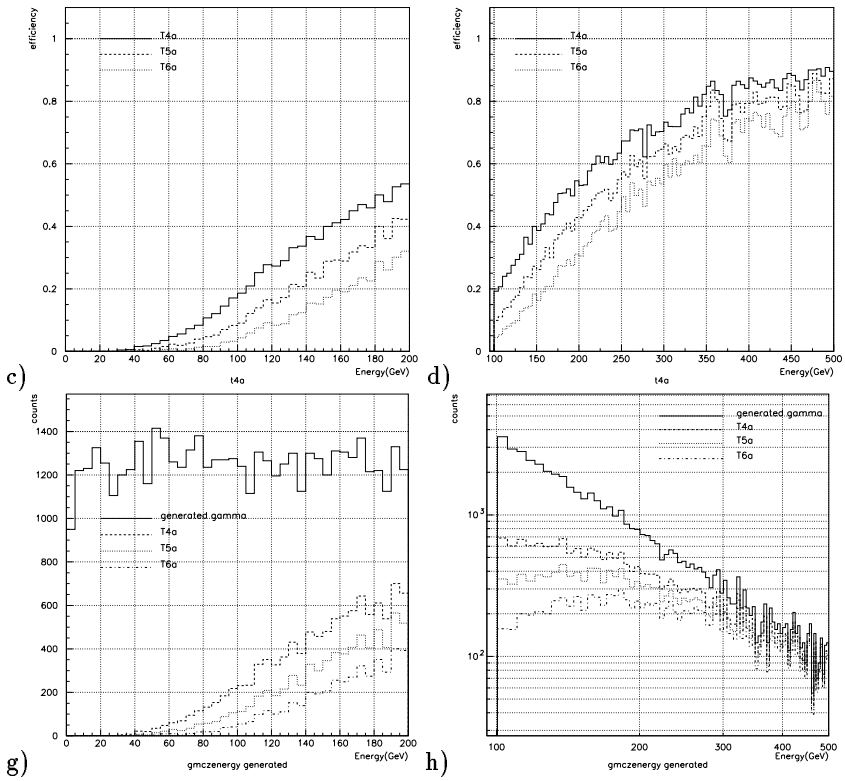


図 4.13: 夜光 350p.e/event;T.h.4.p.e. でのトリガーシミュレーションの結果

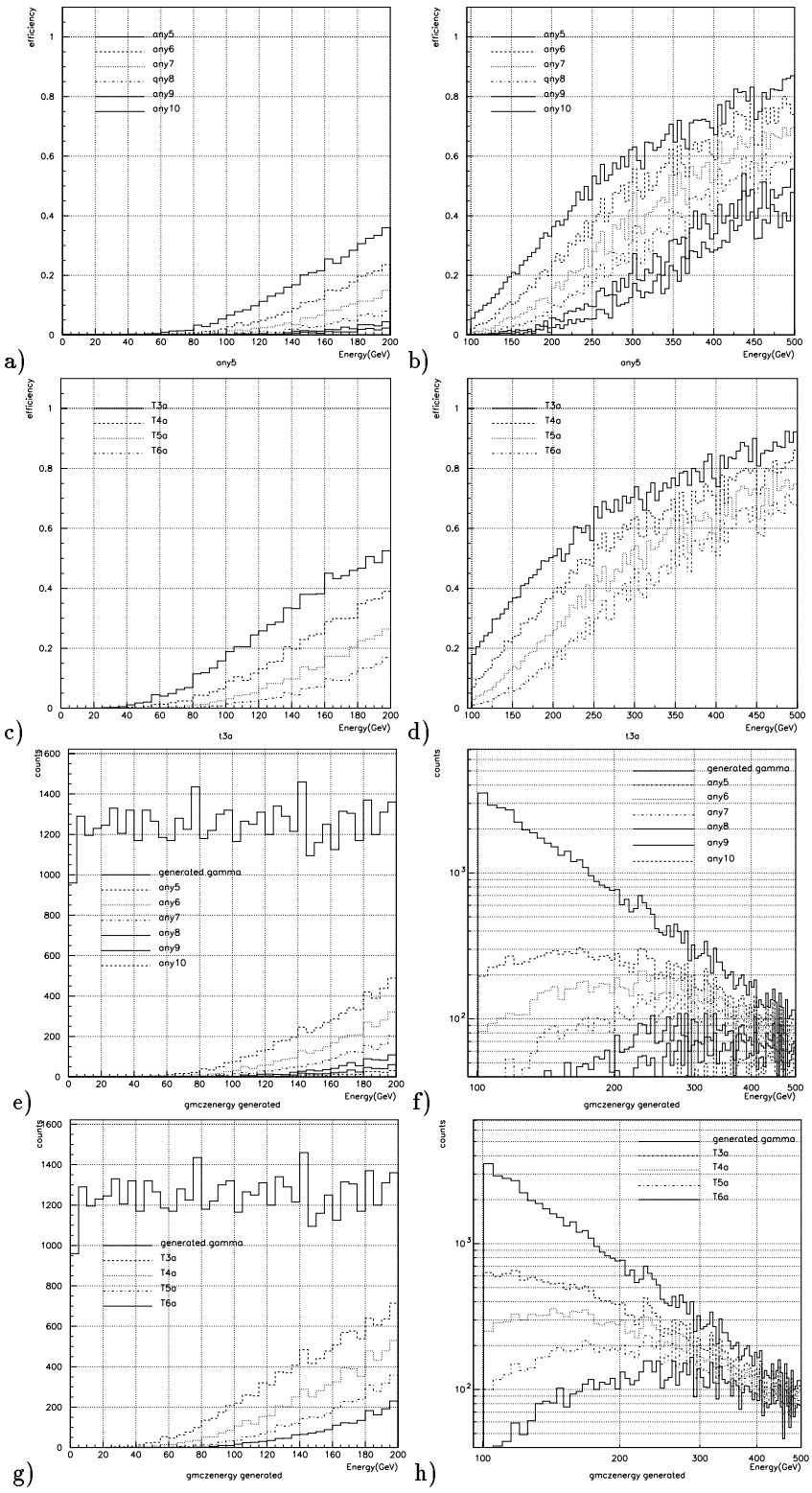


図 4.14: 夜光 350.p.e./event;T.h.5p.e. でのトリガーシミュレーションの結果

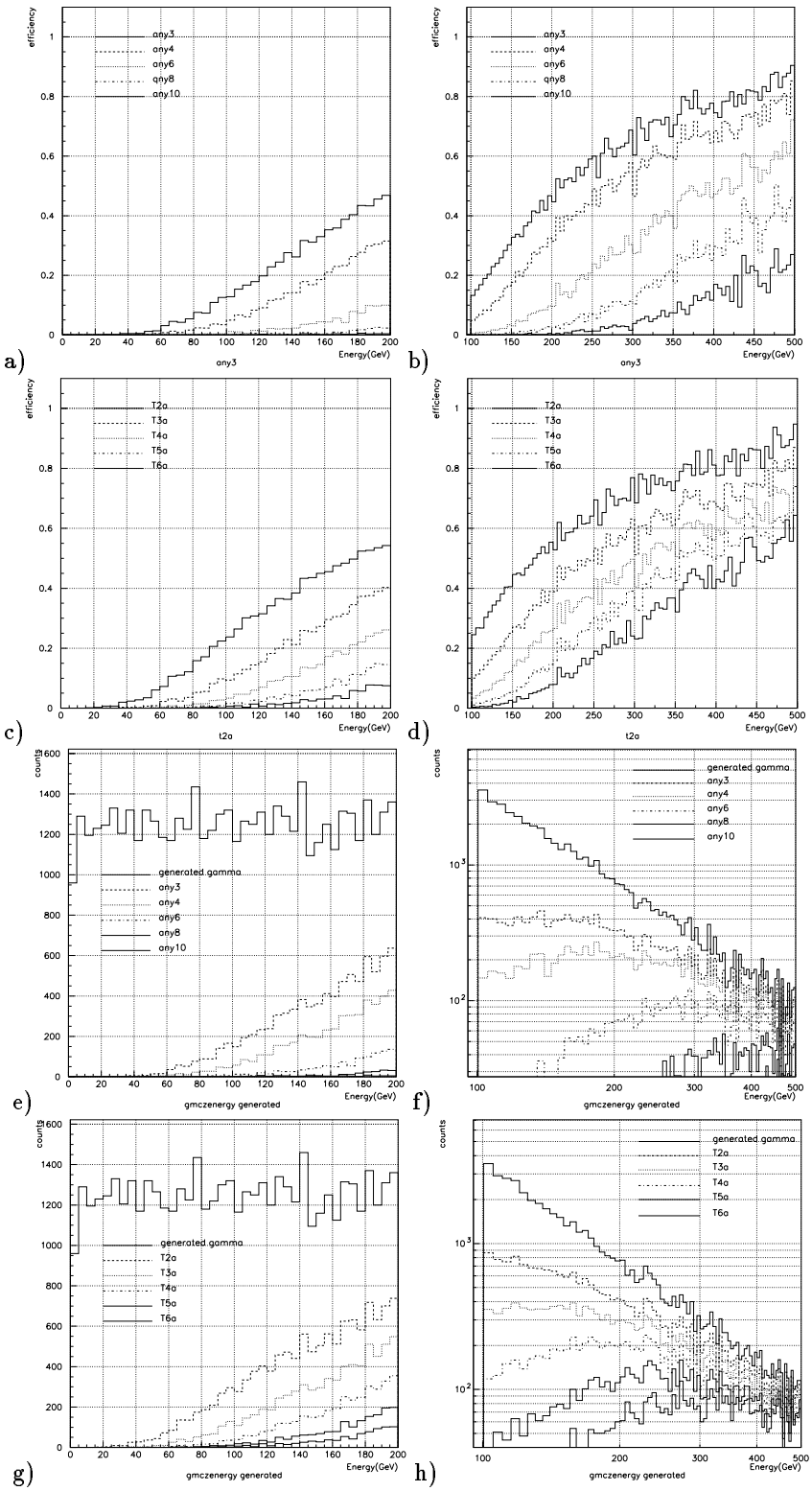


図 4.15: 夜光 350p.e./event;T.h.6p.e. でのトリガーシミュレーションの結果

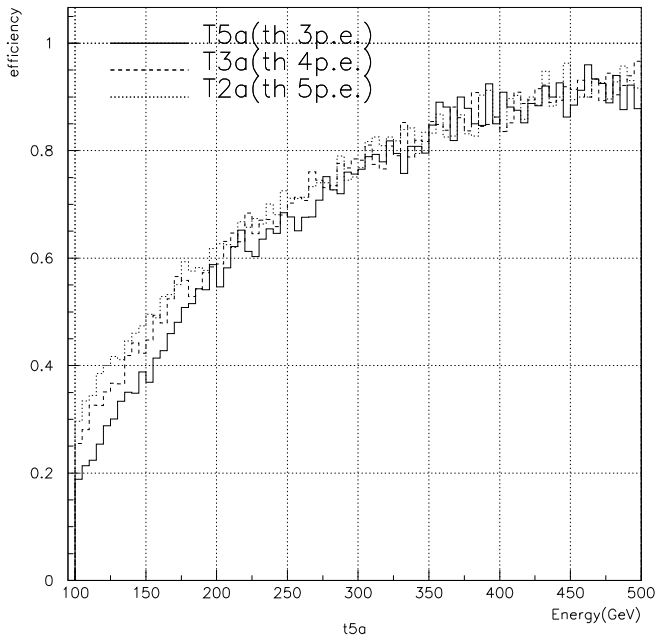


図 4.16: 夜光 170photons/event のときの各閾値での検出効率

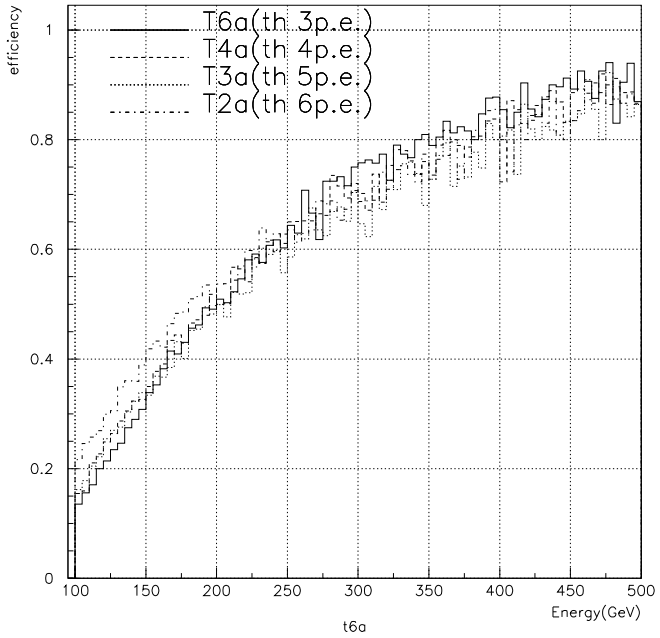


図 4.17: 夜光 250photons/event のときの各閾値での検出効率

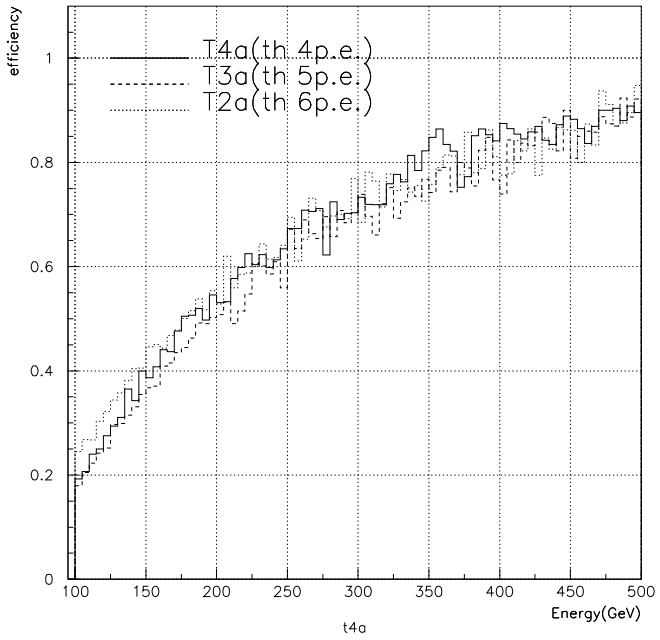


図 4.18: 夜光 350photons/event のときの各閾値での検出効率

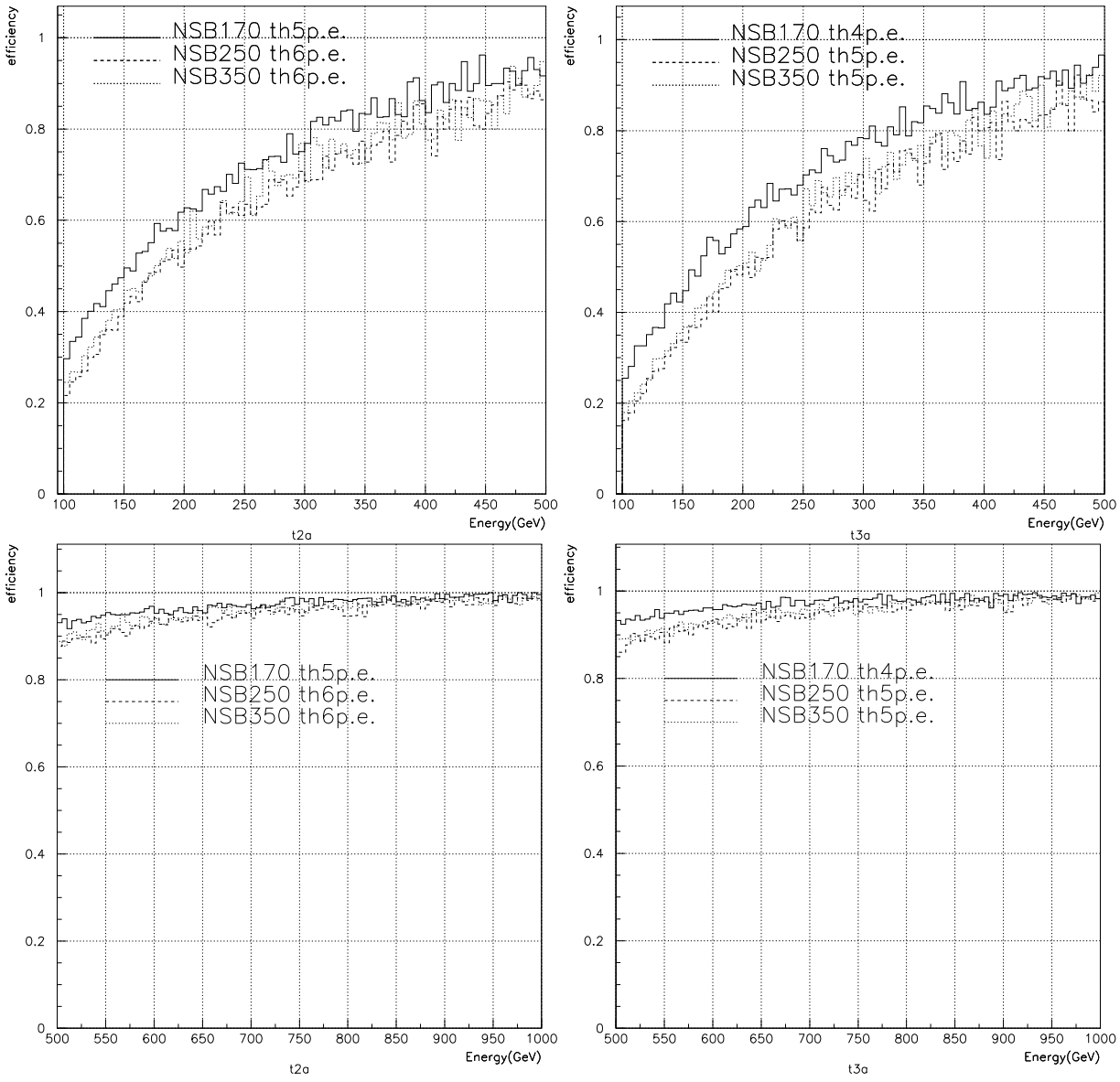


図 4.19: T2a(左),T3a(右) の検出効率
上段は 100 ~ 500GeV, 下段は 500 ~ 1TeV までの検出効率。

第5章　トリガーデバイス

adjacent トリガーを新たなトリガーパターンとして採用するべきであるというシミュレーション結果を受けて、ここではどのようなデバイスで実現するかを考える。現在のような CAMAC モジュールの組合せでこのようなパターン判別の必要なトリガーを実現するには膨大な数のモジュールが必要になる上、1PMT からの信号を数百に分けなくてはならなず、現実的でない。また PC による処理では処理時間がかかりすぎ、ファーストトリガーとして採用できない。そこで、一度に多チャンネルの信号を高速で処理することが出来、パターン判別に有用であると思われる 2 種類のデバイスについて、その利用の可否を考えてみたい。なおトリガーパターンは T2a に確定はしていないため、より複雑な回路となる T3a に対応できるかを調査した。

5.1　候補となるデバイス

5.1.1　PLD

PLD とは Programable Logic Device の略称で、ハードウェア記述言語 (HDL、AHDL) 等を用いて自由に論理回路を設計することが出来るデバイスである。信号処理時間が非常に早いため、ファーストトリガーデバイスとして使用する上で有利であると思われるが、非同期で用いることにより信号処理の途中で生ずるタイミングのずれが問題になる可能性がある。

使用を検討している PLD は ALTERA 社のもので、処理速度、入力ピン数、ゲート数、ロジックセル数、などの異なるさまざまなファミリのデバイスが存在する (表 5.1)。CANGAROO-III では、処理速度が早く、400 以上という多入力信号に対応できる FLEX10KE ファミリを使用する。このデバイスファミリのデバイスタイプごとのオプションピン数を表にまとめる。

ALTERA 社の PLD は、専用開発ソフト"MAX+plusII"で、開発、シミュレーション、デバイスへの書き込みが可能である。

5.1.2　DSP

DSP とは Digital Signal Processor の略で入力信号について演算を行うデバイスである。同期させながら信号を処理して行くため PLD のような信号のタイミングのずれの問題は生じないが、処理に時間が掛かるためファーストトリガーデバイスとして用いるのは困難である。そこで、今回 DSP は、PLD の使用が不可能であった場合の予備的存在とし、シミュレーションおよびテストは PLD を中心に進めることとする。

表 5.1: ALTERA 社の PLD

デバイスファミリー	テクノロジー	ユーザブルゲート	最大ピン数
MAX7000/S/A/B	EEPROM	600-10,000	256
MAX9000A	EEPROM	6,000-12,000	356
FLEX6000/6000A	SRAM	5,000-24,000	256
FLEX10K/10KV	SRAM	10,000-130,000	503
FLEX10KA	SRAM	10,000-250,000	600
FLEX10KE	SRAM	30,000-200,000	672
ACEX	SRAM	10,000-100,000	484
APEX20K/E	SRAM	30,000-1,500K	1,024

表 5.2: FLEX10KE ファミリのデバイスのオプションピン数

デバイス	パッケージオプションピン数
EPF10K30E	144pin,208pin,256pin,484pin
EPK10K50E	144pin,208pin,240pin,256pin,356pin,484pin
EPF10K100E	208pin,240pin,256pin,365pin,484pin
EPF10K130E	240pin,356pin,484pin,600pin,672pin
EPF10K200E	599pin,600pin,672pin

5.2 トリガーデバイスとしての条件

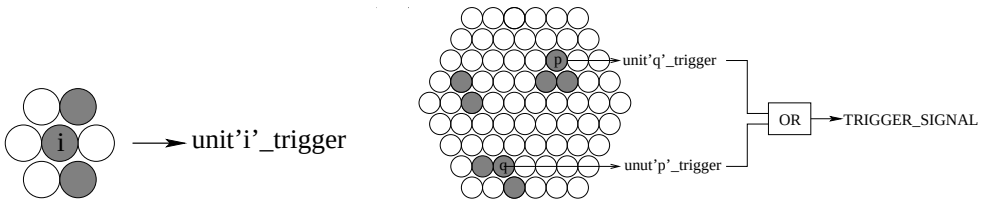


図 5.1: トリガー信号生成までの流れ

まずファーストトリガーデバイスとして使用するデバイスが満たすべき条件について述べる。

T3a を満たすようなパターンを判別するために、すべての PMT に関してその PMT を中心とするような 6 角形の unit を考える。その 6 角形のなかで中心の PMT(ラベル'i' とする) を含む 3 本以上から信号が来ていれば、unit'i' についてトリガー信号 (unit_trigger) を出力する (図 5.1 左)。これを全ての unit に対して繰り返して、最後のそれらをひとつのトリガー信号にまとめる (図 5.1 右)。すなわち、信号処理は大きく分けて

1. unit_trigger を生成する段階
2. それらの OR をとって、一つの信号にまとめる段階

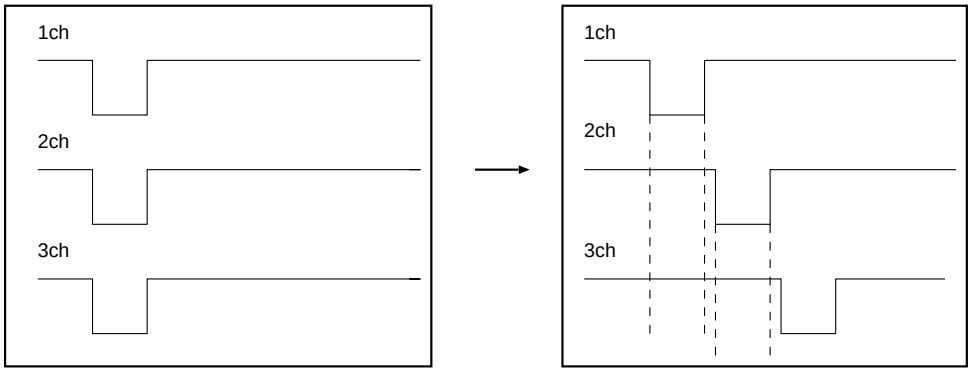


図 5.2: 入力パルスのずれ

の 2 段階の信号処理がある。

入力した信号は、トリガーパターン判別の回路で処理にそってされて行くうちに遅延が生ずる。この遅遅延が全ての入力信号について一定であれば、トリガー信号出力が遅くなる事以外に問題は発生しないが、実際には信号入力ピンの位置や割り当てられたロジックセル等の違いによって、それぞれの PMT の遅延に差が生ずる。次期望遠鏡での入力信号の幅は 30ns 程度であると考えられるが、この「信号遅延の差」が信号幅を超えると図 5.2 に示すように、トリガー条件を満たす状況で入力したパルスが、トリガー条件を満たさないと判断される場合が出て来る。このような取りこぼしが生ずるなら PLD をトリガーデバイスとして採用することは出来ない。

また、ADC ゲートを開くタイミングとの問題で PLD 内の処理 (信号が入力してからトリガー信号を出力するまでの時間) は 60ns 以内でないとファーストトリガーデバイスとして使用できない。

つまり上記の条件をまとめると

1. 入力信号同士の相対的な遅延時間 (相対遅延時間) が入力信号幅 (30ns) 以内であること。
2. PMT に信号が入力してから最終的なトリガー信号を出力するまでの時間 (絶対遅延時間) が 60ns 以内であること。

という 2 つの条件が、ファーストトリガーデバイスが満たすべき条件ということになる。ただし条件 1 に関しては余裕を見て約 20ns 以内という条件にしておく。

5.3 シミュレーション

シミュレーションは"MAX+plusII"を用いて行った。MAX+plusII はアルテラ社の全てのデバイスファミリを開発可能な開発ツールであり、回路図, 開発言語 (AHDL),Verilog,VHDL の入力形態で設計が可能である。設計した回路はデバイスを指定して行うコンパイル時に論理圧縮され、使用効率を高めることが可能となっている。また、コンパイル後は 2 種類のシミュレータによって設計した回路をチェックすることが出来る。

"ファンクショナル・シミュレーション"は、規定されたデザイン情報を使用して、遅延ゼロを仮定した論

理機能シミュレーションを行う。また、"タイミング・シミュレーション"は、論理合成および最適化されたデザインの論理機能と、ワースト・ケース・タイミングを 0.1ns の分解能でテスト出来る。

入力信号数は CANGAROO-III カメラのピクセル数である 427 の input を想定したが、遅延時間や将来のトリガーパターン変更の可能性を考慮し、複数台を使用してゲート数に余裕を持たせる方法も検討した。427ch を複数台の PLD で処理する場合、T3a パターンを取りこぼす領域が発生しないように、境界線の部分に、重複して複数の PLD に信号を入力するチャンネルがあることに注意しなければならない。重複部分を考慮すると 2 台の PLD に信号を分散させる場合は 1 台分の入力信号数が約 250 となり、3 台に分散させる場合は 1 台分の入力信号数は約 200 となる。

候補となるデバイスファミリは入力数、ゲート数ともに十分大きく処理速度の速い FLEX10KE ファミリとし、このファミリに属するデバイスをシミュレーションの対象とした。T3a パターン判別の回路 (すなわち、隣り合った 3 本以上のピクセルから信号が来たとき trigger 信号を出力するような回路) を AHDL で記述し、それぞれのデバイス[1]について、ファンクショナル・シミュレーションによる論理機能のチェックと、ゲート使用率のチェック、タイミング・シミュレーションによる信号入力から trigger 信号出力までの時間のチェックを行った。使用したデバイスと入力信号数の組合せを表 5.3 にまとめた。

表 5.3: PLD シミュレーションの条件

Case No.	入力信号数	デバイス
1	430	EPF10K200EGC559-1
2	250	EPF10K50EFC484-1
3	200	EPF10K30EFC484-1
4	430	EPF10K200EFC672-1
5	250	EPF10K100EBC356-1
6	250	EPF10K100EFC484-1
7	250	EPF10K130EBC356-1
8	250	EPF10K130EFC484-1
9	250	EPF10K200EGC599-1
10	250	PEF10K200EFC672-1

Case1 ~ 3 は、PLD 使用台数がそれぞれ 1 ~ 3 台であるときに MAX+plusII 最適と判断したデバイスでのシミュレーションである。

まず 1 台の PLD で全ての信号を処理するケースについて考える。MAX+plusII が選択したデバイスでの信号の遅延時間分布を図 5.3(左) に示した。信号のばらつきは 25ns 以上であり、条件を満たさない。そこで FLEX10K で最も大きなデバイスを使って同様のシミュレーションを行ってみた (Case4, 図 5.3 右)。しかしこのケースでも遅延時間のばらつきが大きく条件を満たさなかった。この結果から、全ての PMT からの信号を 1 台の PLD で処理すると相対遅延が大きくなりトリガー判別が正確に行われなくなる恐れが大きいため避けた方が良いという結論を得、2 台以上の PLD を使用する場合についてさらにシミュレーション

[1] デバイス名はファミリ識別、デバイスタイプ、パッケージタイプ、動作温度範囲、ピン数、スピードグレード、の順で記述されている。例えば EPF10K130EQC240-3 なら、FLEX10K ファミリで 130E タイプのデバイスであり、ピン数は 240、スピードグレードは 3 であることを示している。パッケージタイプ、動作温度範囲が異なっても機能はほとんど変化が無いため、シミュレーションではこの 2 点には注意を払っていない。

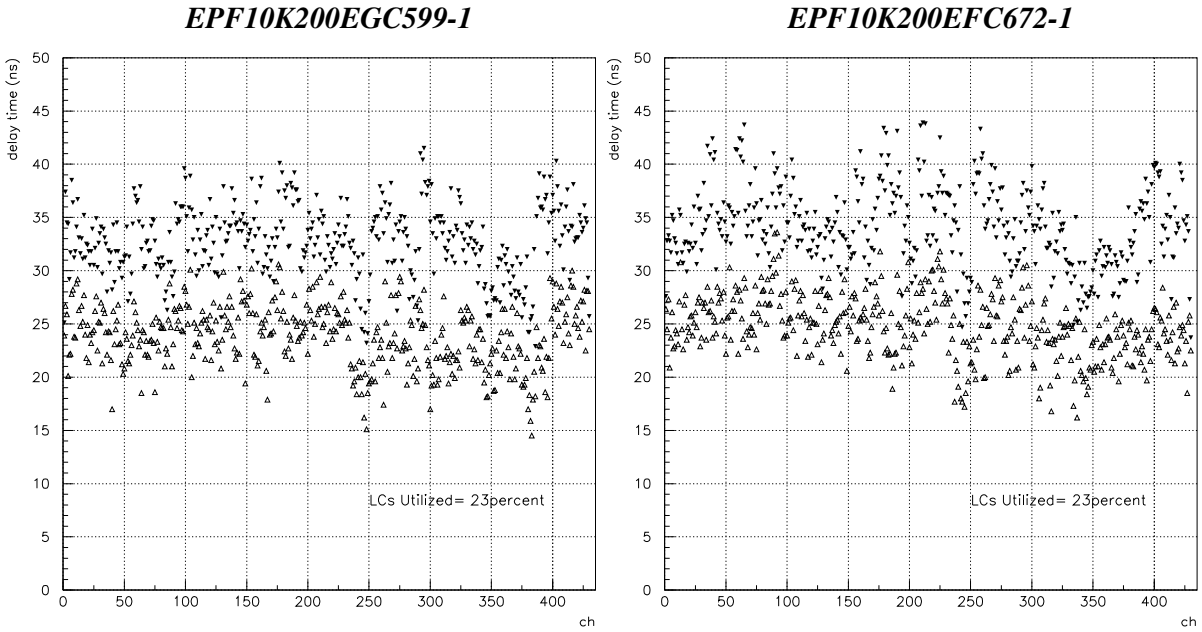


図 5.3: 全信号を 1 台の PLD で処理したケースの遅延時間の分布

を行った。

図 5.4 に入力信号数を 250 にし、使用デバイスを変えた 6 つのケースについて遅延時間分布を示した。MAX+plusII が選択した EPF10K50EFC484-1 は条件は満たしているものの、ロジックセル (LCs) の使用率が 45%とやや高く、今後トリガーの変更があった場合に同じデバイスで対応できなくなる可能性が高い。そこでこのデバイスよりもロジックセル数の多いデバイスでシミュレーションを行った。このシミュレーションの結果、デバイスタイプが同じならピン数が変化してもロジックセルの使用率はほぼ同じであり、大きなデバイスタイプ程ロジックセル使用率は低くなるものの、遅延時間のばらつきは大きくなる傾向が見られた。条件はシミュレーションを行った全てのデバイスがクリアしている。最適なデバイスは、ロジックセル使用率をどこまで許すかによるが、20%と見れば Case7 の EPF10K130EBC356-1 が最適なデバイスとなる。2 台の PLD からの信号は外部の 2hold-OR ゲートで取りまとめれば問題が無い。この処理に掛かる時間はおよそ 10ns であり、この時間を考慮してもファーストトリガーデバイスとしての条件は満たしている。

使用する PLD の台数は出来るだけ少なくしたいため、上記の PLD を採用し 2 台の PLD に分けて全信号を処理するのが最適であるという結論を得た。

5.4 実験

シミュレーションが実際のデバイスの動作と一致することを確認するために、実際に 2 種類の評価版デバイスを使用してテスト実験を行った (図 5.5)。実験はクロックジェネレーターで生成した NIM 信号を TTL に変換した信号を、デバイスのさまざまなピンから入力させ、出力信号をオシロスコープで観察することで行った。テスト実験に用いたデバイスは MAX7000 ファミリの EPM7256SRC208-10 と FLEX10K ファ

ミリの EPF10K130EQC240-3 である。

EPM7256SRC208-10 では、入力信号数は 130 で、CANGAROO-III カメラでの T3a パターントリガー判別回路を書き込み、約 100 通りの入力パターンを試行した。入力波形と出力波形をオシロスコープで観察し、遅延時間がシミュレーション結果 (図 5.6(左)) と矛盾が無いか、書き込んだロジックを正常に動作させているかをチェックした。遅延時間は試行した 100 通りのパターンの内、約 90%が 10 ~ 15ns、約 5%が 15 ~ 20ns となっており、すべての組合せで、シミュレーションより得られた最長遅延時間より 10ns 以上速い結果がでた。また試行した全てのパターンに対して T3a パターン判別回路は正しく動作していることが確かめられた。

EPF10K130EQC240-3(評価ボード概観図 5.7、シミュレーション結果図 5.6(右)) には 180 入力が可能であるが、実験装置の都合上入力信号数は 90 とし、前述の実験と同様に T3a パターン判別回路を書き込み実験を行った。入力パターンは約 20 パターン試行し、いずれも遅延時間は 20ns ~ 30ns の間で、こちらも EPM7256SRC208-10 と同様に、シミュレーションによって得られた最長遅延時間よりも 20ns 近く短い結果が出た。シミュレーションとの矛盾は無く、試行した全てのパターンで T3a パターン判別回路は正しく動作していることが確かめられた。

以上の実験から、MAX+plusII のシミュレーション結果は実際の PLD と実験の範囲内で一致していることが確かめられた。これにより、MAX+plusII のシミュレーション結果が信頼できるものであることが確認され、パターントリガーは少なくても T3a 以下であれば PLD によって実現できるという結論を得た。

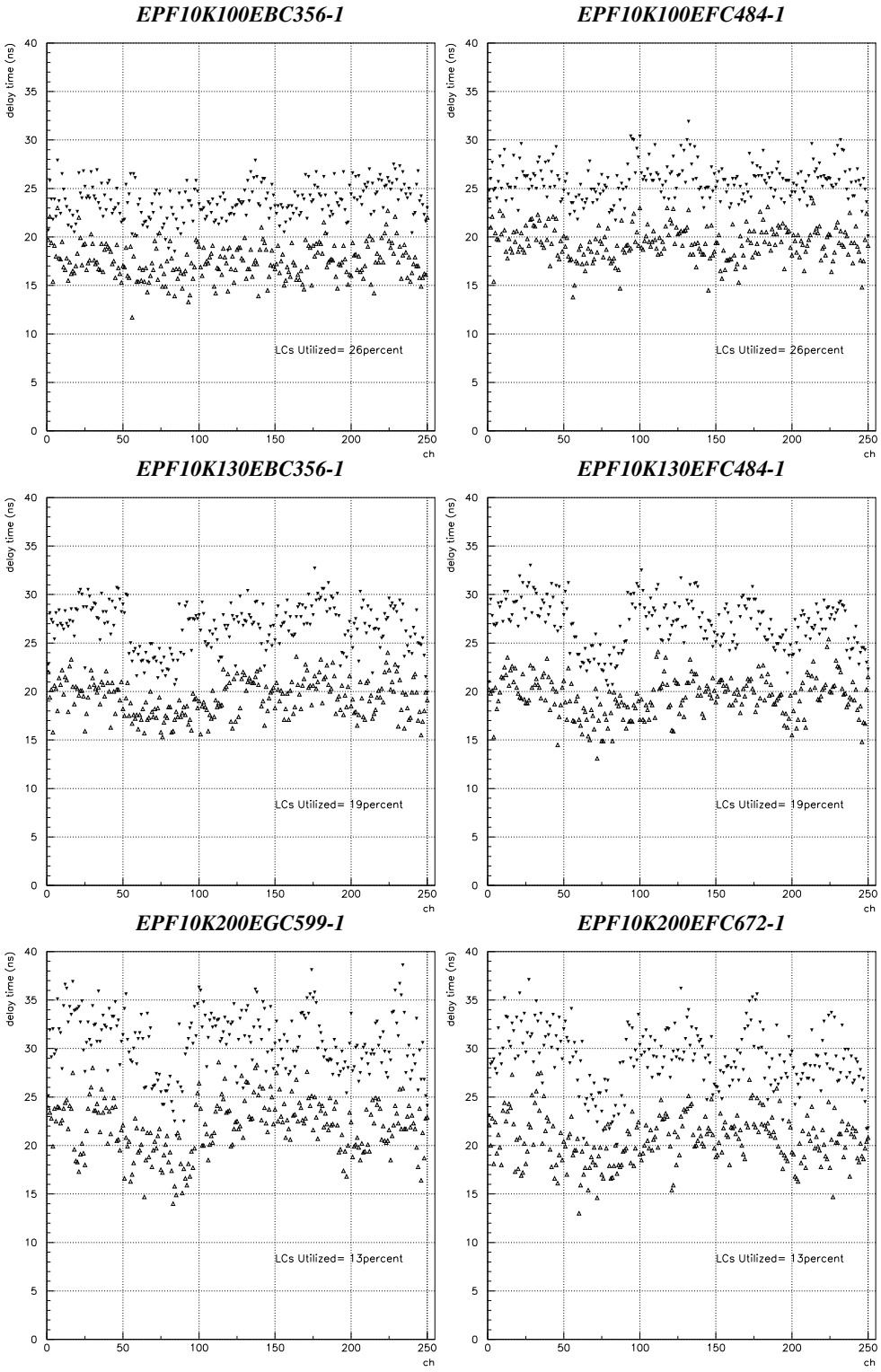


図 5.4: 全信号を 2 台の PLD に分けて処理したケースの遅延時間の分布

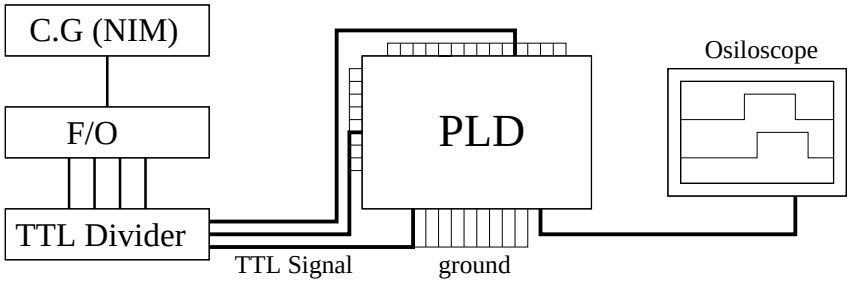


図 5.5: PLD テストの概観

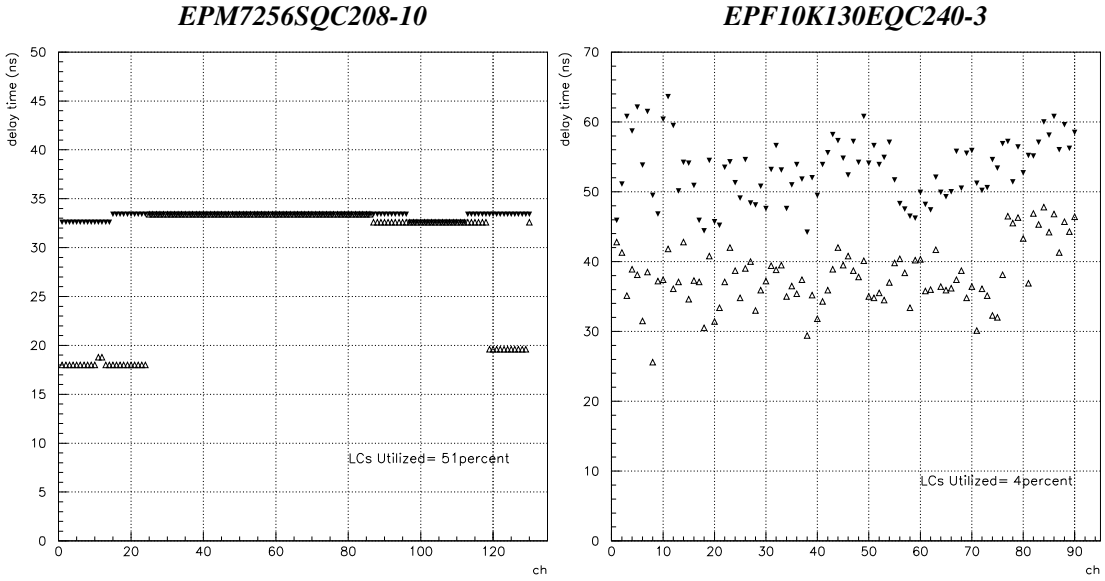


図 5.6: EPM7256SRC208-10(左) と EPF10K130EQC240-3(右) の遅延時間分布

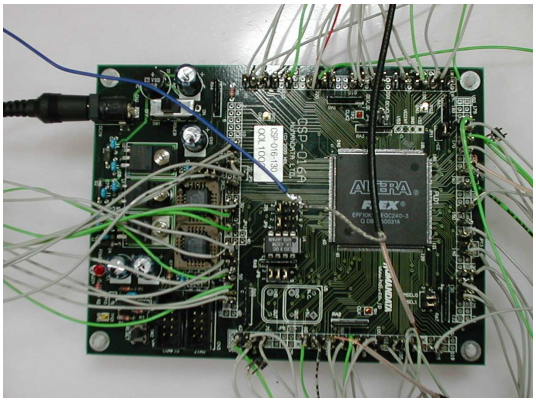


図 5.7: EPF10K130EQC240-3 評価ボードの概観

謝辞

本研究にあたり、学部時代より 3 年間御指導頂きました西嶋恭司先生に心より感謝申し上げます。西嶋先生には、研究内容のみならず、研究に対する姿勢や科学的な思考の方法に至るまでさまざまな面で学ばせて頂き、大変充実した意義深い研究生活を送ることが出来ました。ありがとうございました。

また卒業された神保純一郎氏には Event Monitor のメンテナンスや解析方法など、多くの場面で丁寧な助言を頂きました。同様に西嶋研究室の中瀬友和君にも折りにふれて有用なアドバイスを頂いたことを深く感謝致します。他にも研究生活に於いては西嶋研究室 M1 の橋本孝明君、4 年生の服部敬裕君、浜田美佳さん、茂呂寿子さん、M2 の市川喜徳さんにお世話になりました。

東京大学宇宙線研究所の奥村公宏氏には、woomera での観測の際に、また解析の際に大変お世話になりました。PLD のシミュレーションやテストに当たって常に端的なアドバイスを頂いた東京工業大学の窪秀利氏、多くの時間を割いて下さったヒューマンデータの宇城氏にも深く感謝致します。

その他にも CANGAROO グループでは大阪市立大学の吉越貴紀氏、東京大学宇宙線研究所の森正樹先生、榎本良治先生、河内明子さん、東京工業大学の原敏氏をはじめ多くの皆様にお世話になりました。本研究ならびに研究生活でお世話になった皆様に心より感謝致します。ありがとうございました。

関連図書

[1] Weekes et al ,Physics Reports 160(1989)1

[2] J.V.Jelly. Cherenkov Radiation and its Applications , 219,Pergamon Press , 1958

[3] Rene.A.Ong , Physics Reports , 305(1998)93

[4] ALTERA Device Data Book 1999

[5] http://www.altera.com/

[6] ALTERA MAX+plusII Getting Started

[7] ALTERA MAX+plusII AHDL

[8] トランジスタ技術編集部編.「パソコンによるプログラマブル・ロジックの設計」CQ 出版社、1995

[9] D.J.Macomb et al , Astrophysical Journal Supplement Series,120(1999)335

[10] C.M.Hoffman et al , Astropatticle Physics , 6 (1999)423

[11] C.Kohler et al , Astroparticle Physics , 6 (1996) 77

[12] F.Krennrich et al , Astroparticle Physics , 11(1999) 235

[13] HEGRA collaboration , Astroparticle Physics , 10 (1999) 275

[14] CANGAROO collaboration , CANGAROO-IIIproject パンフレット ,1999

[15] T.Tanimori et al , ICRR-Report-409-98-5

[16] G.P.Rowell et at , Astronomy and Astrophysics , 359 , 337(2000)

[17] Konrad Bernlohr , Astroparticle Physics , 12(2000) , 255

[18] T.Sodo&K.Nishijima , Proceedings of the School of Science , Vol.XXXIII(1998)

[19] T.Yoshikoshi et al , Astrparticle Physics , 11(1999) , 267

[20] P.T.Reynords et al , The Astrophysical Journal , 404 , 206(1993)

[21] T.Murakami et al , NAture 368(1974) , 127

[22] GLAST ; http://glast.riken.go.jp/

[23] HEGRA ; http://www-hfm.mpi-hd.mpg.de/CT/CT.html

[24] Whipple ; http://egret.sao.arizona.edu/index.html

[25] VERITAS ; http://www-veritas.physics.purdue.edu/veritas/index.html

[26] HESS ; http://www-hfm.mpi-hd.mpg.de/HESS/HESS.html

[27] 吉越貴紀、東京工業大学修士論文、1993

[28] 吉越貴紀、東京大学博士論文、1996

[29] 守谷 昌代、東京工業大学博士論文、2000

[30] 神保純一郎、東海大学修士論文、2000

[31] 原敏、東京工業大学修士論文、1999

[32] 櫛田淳子、東京工業大学修士論文、2000

[33] 小田 稔 他 「宇宙線物理学」朝倉書店、1983

[34] 須藤猛 、東海大学修士論文、1997

[35] 亀井新、東京工業大学修士論文、1998

[36] 吉越貴紀、東京工業大学修士論文、1993

[37] 吉越貴紀、東京大学博士論文、1996

[38] 守谷 昌代、東京工業大学博士論文、2000

[39] 神保純一郎、東海大学修士論文、2000

[40] 原敏、東京工業大学修士論文、1999

[41] 櫛田淳子、東京工業大学修士論文、2000

[42] 日本物理学会 「現代の宇宙像」培風館、1991

[43] 須藤猛 、東海大学修士論文、1997

[44] 亀井新、東京工業大学修士論文、1998

[45] 石田義久、鎌田弘「DSP 活用のポイント」産業図書、1990

[46] 吉沢 康和 「新しい誤差論」共立出版 、1998

[47] 桜井 邦朋 「高エネルギー宇宙物理学」朝倉書店、1990

[48] 日本物理学会編 「宇宙の物理」丸善 、1975

[49] 永田 靖 「入門 統計解析法」日科技連出版社、1992