

数10Tev以上に感度を持つイメージング チエレンコフ望遠鏡の基礎シミュレーション

山形大学理工学研究科 電磁気学研究室
07521203
大竹 雄樹

February 20, 2009

Abstract

地上に絶えず降り注いでいる宇宙線が、どこでどのように発生しているかは未だはっきりとした結論が出ていない。中でも、 $10^{15} eV$ 付近のエネルギー領域ではスペクトルのべきが変化する knee と呼ばれる部分が存在する。この折れ曲がりについてはまだはっきりとした結論は出ていないが、この領域よりも高いエネルギーの宇宙線は我々の銀河系外に起源があると考えられている。したがってこの領域を調べることは宇宙線の起源を探る上で非常に重要な意味をもつ。宇宙線自体は荷電粒子なので、星間磁場などの影響を受けて地球に来るまでに進行方向の情報を失ってしまう。そこで、星間磁場の影響を受けない電気的に中性なガンマ線を観測するのが有効な方法である。現在、高エネルギーのガンマ線を観測するスタンダードな方法として、地上での解像型大気チレンコフ望遠鏡による観測がある。この大気チレンコフ望遠鏡によって既に数多くの高エネルギーガンマ線天体が発見されている。しかし、現在 knee 領域をカバーするような観測を行っている大気チレンコフ望遠鏡は存在しない。もし、その様な望遠鏡による観測が実現できれば、1 度を切るような角度分解能で、高エネルギーガンマ線の観測が可能になる。そこで、本研究ではシミュレーションを用いて、Knee 領域の手前部分(数 100TeV 程度)に感度を持つ大気チレンコフ望遠鏡の基礎的な設計を行った。高エネルギーのガンマ線を観測する上での大きな問題点は到來頻度が少なく長時間の観測が必要になることである。また、大量に降り注ぐバックグラウンドの除去も非常に困難である。

そこで本研究ではバックグラウンドを大幅に削減できるステレオ観測を想定し、天頂方向からカニ星雲の FLUX をモデルとしたガンマ線を降らせて、複数台の望遠鏡によるシミュレーションを行った。ステレオ観測を行う場合、望遠鏡の間隔、望遠鏡の視野、望遠鏡の大きさ等が観測の性能を大きく左右する。そこで望遠鏡同士の間隔、カメラの視野、鏡の大きさ、カメラのピクセルサイズ等をフリーパラメーターとし、望遠鏡の性能とコストの面から最もよい設計がどの様なものであるかを調べた。結果として、望遠鏡の間隔を 100m から 300m まで広げた場合、ガンマ線の有効イベントが 150% 程度増加する事が分かった。しかし、それに伴い、バックグラウンドも増大し、統計的な優位度の飛躍的な向上は見られなかった。カメラの視野半径を 3 度から 6 度まで変化させた場合には、バックグラウンドの有効イベントの増加を抑えながらガンマ線の有効イベントを最大 222.43% 増加させることができた。その結果視野を大きくすることでバックグラウンドに対する統計的優位度のはっきりした向上が認められた。

Abstract

Since the discovery of cosmic rays in 1920s, the study for the cosmic rays has been much advanced and the energy spectrum up to 10^{20} eV were also measured. However the origin of the cosmic rays is still mystery. To figure out the puzzle, it is very important to identify the location of the acceleration. However, because the cosmic rays are charged particles, the trajectories are easily bent by the magnetic fields in our galaxy and then it is very difficult to identify the location with the direct observation of cosmic rays. In the location of the acceleration, high energy gamma rays should be also generated and they can travel straight. So, the observation of the gamma rays is much useful for the study of the origin of the cosmic rays. At present, four high energy gamma-ray observatories with high sensitivity are built in the world. They are Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope(IACT) and can observe the gamma ray up to the energy of about 10^{13} eV. However, for higher energy region, there are not telescopes with high angular resolution. In the energy spectrum of the cosmic rays, the bend called knee is observed around 10^{15} eV. It can be explained by the theory for the acceleration limit of cosmic rays or also by the effects that high energy cosmic rays cannot be confined by the magnetic fields in our galaxy. However,it is not concluded which theory is right. If the former theory would be right, the indication of the acceleration limitation will be observed in the energy spectrum for gamma rays from the sources outside our Galaxy. So the observation for gamma rays around the knee is very important to study the origin of the cosmic rays. From the above reasons, I carried out the basic design of a IACTs sensitive in the energies more than 50TeV, using computer simulation package called CORSIKA. The most serious problem for high energy gamma-ray observation is that the flux is very low and then the wide effective area is required. Moreover, it is also very difficult to reduce the background due to protons. To figure our the problem, it is much useful to arrange several IACTs and to carry out stereo observation. Varying the telescope parameters such as the space between telescopes, the size of the mirrors, and the opening angle, the performance were investigated in detail. I obtained the following results through the computer simulation.

1 For the spacing of 300 m, the effective event becomes 1.5 times higher than for that of 100.Because effectivearea spread by expanding the space of the telescope.

2 The performance does not much depend on the pixel size of the camera nor the radius of the mirror. Because the angle resolution is good originally, its improvement is the limit.

3 The performance depends on the viewing angle of the telescope. For the viewing angle of 6 deg. the performance becomes 2.2 times higher than for that of 3 deg. Because the event which occurred far could be caught and effectivearea spread.

Contents

1 ガンマ線天文学	6
1.1 ガンマ線観測の意義	6
1.2 高エネルギー粒子の放射機構	8
1.2.1 制動放射	8
1.2.2 逆コンプトン散乱	10
1.2.3 シンクロトロン放射	11
1.2.4 π^0 中間子の崩壊	11
1.2.5 曲率放射	13
1.3 ガンマ線天源	14
1.3.1 パルサー	14
1.3.2 超新星残骸	15
1.3.3 活動銀河核	16
1.3.4 ガンマ線バースト	17
1.4 ガンマ線観測	17
1.4.1 人工衛星による観測	18
1.4.2 地上での観測	21
2 解像型大気チエレンコフ望遠鏡	24
2.1 エアシャワー	24
2.2 チエレンコフ光	25
2.3 イメージング法	27
2.4 ステレオ観測	30
3 シミュレーション	32
3.1 CORSIKA 概要	32
3.2 解像型チエレンコフ望遠鏡のシミュレーター	34
3.2.1 高エネルギーに特化した望遠鏡	34
3.2.2 望遠鏡シミュレーターの基本的なアルゴリズムと設定	36
3.3 イベントセレクション	38
3.3.1 Local Trigger	38
3.3.2 Global Trigger	38
3.4 到来方向の決定	39
4 シミュレーション結果	41
4.1 Crab をモデルにした天源のシミュレーション	41
4.1.1 基本的なパラメータによるシミュレーション	41
4.1.2 望遠鏡間隔とカメラ視野の変化	43

4.1.3	CAMERA pixcel の変化	45
4.1.4	TELESCOPE RADIUS の変化	46
5	まとめ	48
	謝辞	49
A	イメージパラメータ	50
B	θ^2について	52
C	CORSIKA 導入マニュアル	54
C.1	CORSIKA の入手	54
C.2	インストール	56
C.3	簡単な実行例	66
C.4	出力データ	69

List of Figures

1.1	一次宇宙線ブラックス	7
1.2	kifune プロット：横軸 年 縦軸 発見された天体数	7
1.3	制動放射	9
1.4	逆コンプトン散乱	10
1.5	シンクロトロン放射	11
1.6	π^0 中間子の崩壊	12
1.7	曲率放射	13
1.8	かに星雲の中心にあるパルサー	14
1.9	パルサーの模式図	15
1.10	超新星爆発の瞬間	16
1.11	超新星残骸 N63A(大マゼラン星雲)[9]	16
1.12	活動銀河の想像図	17
1.13	活動銀河 NGC253[11]	17
1.14	BASTE によるガンマ線バーストの分布	18
1.15	CGRO 衛星	19
1.16	GLAST 衛星	19
1.17	Gamma-Ray Burst Monitor	19
1.18	Large Area Telescope	19
1.19	fermi 天文衛星 初期観測によるガンマ線全天地図	19
1.20	CANGAROO-III 望遠鏡 カメラ	21
1.21	CANGAROO-III 望遠鏡 反射鏡	21
1.22	世界のチェレンコフ望遠鏡	21
1.23	Milagro 型検出器	22
1.24	Miragro の水チェレンコフ検出器のイメージ	22
1.25	チベット型検出器	23
1.26	チベットに設置された空気シャワー観測装置	23
2.1	エアシャワーの概念図	25
2.2	エアシャワーの発達の様子（シミュレーション） 左：ガンマ 右：プロトン	26
2.3	チェレンコフ光の指向性	26
2.4	分極の様子	26
2.5	1TeV ガンマ線の光子分布	27
2.6	1TeV ガンマ線の光密度	27
2.7	3TeV 陽子線の光子分布	27
2.8	3TeV 陽子線の光密度	27
2.9	シャワーの捕えかたの概念	28
2.10	カメラ面の像 (1TeV ガンマ線)	29
2.11	カメラ面の像 (3TeV 陽子)	29

2.12 イメージパラメータの定義図	29
2.13 ステレオ観測の概念図	30
2.14 カメラ面の像	30
2.15 シャワー軸の決定	30
2.16 IP fit 前後の θ^2 分布	31
3.1 カニ星雲/パルサーの微分 FLUX	34
3.2 ガンマ線の作るチェレンコライトプール	35
3.3 距離と光密度のヒストグラム (縦:p.e./m ² 横:m)	35
3.4 シャワー軸から 100m	35
3.5 シャワー軸から 200m	35
3.6 シャワー軸から 300m	35
3.7 望遠鏡シミュレーターの基本的なアルゴリズム	36
3.8 望遠鏡の設置位置	37
3.9 反射鏡、カメラのピクセルの並べ方	37
3.10 小鏡、光電子増倍管の ID	37
3.11 Local Trigger 条件	38
3.12 Global Trigger 条件	39
3.13 二つの像のなす角度	39
4.1 バックグラウンドイベントによる光量 (縦軸: イベント数 横軸: 光量)	42
4.2 ガンマ線 θ^2	42
4.3 バックグラウンド θ^2	42
4.4 カメラ視野と統計的有意度 (縦軸: 有意度 横軸: カメラ視野)	44
4.5 望遠鏡間隔と統計的有意度 (縦軸: 有意度 横軸: 望遠鏡間隔)	45
4.6 pixcel size と統計的有意度 (縦軸: 有意度 横軸: pixcel size)	45
4.7 望遠鏡の口径と統計的有意度 (縦軸: 有意度 横軸: 口径)	47
B.1 camera 面でのバックグラウンド	52
B.2 バックグラウンドの THETA SQUARE	53

List of Tables

1.1	上空と地上におけるガンマ線観測	18
1.2	CGRO に登載されている検出器	18
1.3	フェルミガンマ線天文衛星に登載されている検出器	20
1.4	現在稼働中のチェレンコフ望遠鏡	21
3.1	CORSIKA のオプション	33
4.1	望遠鏡の基本設定	41
4.2	望遠鏡の基本設定	41
4.3	視野半径 3° (Local Trigger 3 = 1200p.e)	43
4.4	視野半径 4° (Local Trigger 3 = 1200p.e)	43
4.5	視野半径 5° (Local Trigger 3 = 1400p.e)	43
4.6	視野半径 6° (Local Trigger 3 = 1400p.e)	44
4.7	視野半径の変化によるガンマ線イベントの上昇率	44
4.8	PMT 視野半径 0.06° 0.085° 0.17° (Local Trigger 3 = 1200p.e)	45
4.9	10.4m (Local Trigger 3 = 1200p.e)	46
4.10	口径 16.0 (Local Trigger 3 = 2100p.e)	46
4.11	口径 20.0m (Local Trigger 3 = 3000p.e)	46

Chapter 1

ガンマ線天文学

1.1 ガンマ線観測の意義

Victor F. HESS が気球による観測で、宇宙放射線を発見してからおよそ 100 年の間様々な方法で観測が行われてきたが、宇宙線の加速機構や起源については、いまだ謎の部分が多くはっきりした結論が得られていない。

宇宙線とは、宇宙空間を光速に近い速さで飛来している高エネルギー粒子で、たえず地球にも降り注いでいる。宇宙線のそのほとんどは陽子、ヘリウムであるが、炭素から鉄に及ぶいろいろな原子核も含み、他にごくわずかの電子、陽電子、反陽子やガンマ線も含んでいる。

地球に入射してくる一次宇宙線 flux は図 1.1 のように求められており、そのエネルギー領域は、 10^9 から 10^{20} 程度と非常に広い範囲に渡っている。このスペクトルの、 10^{15} eV と 10^{19} eV 付近には折れ曲がりがあり、それぞれ knee と ankle とよばれている。

これらの折れ曲がりは次の二通りの解釈がある。一つ目として、荷電粒子が磁場中で運動するときのラーモア半径はエネルギーが高くなるにつれて大きくなり（古典的には $r = mv/qB$ ）、knee 程度のエネルギーになると宇宙線粒子が銀河円盤の表層から、外に漏れ出す効果が表れると考えられる。そのためにべきが急になるのではないかと考えられている。逆に ankle 領域以上ではラーモア半径は銀河円盤の厚みと同程度になり、ある銀河内で生まれた宇宙線はその銀河内に閉じ込められることはない。したがって ankle の折れ曲がりは我々の銀河の外で生成された粒子が飛び込んできた物と考えられている。もう一つには、knee 付近で、粒子の加速メカニズムが変わるのでないかという説である。しかしどちらの説についても、確かな決着が付いていない。以上の理由から宇宙線のエネルギースペクトルでも、とりわけこの折れ曲がり付近を調べることは宇宙線の起源を調べる上で非常に重要である。

宇宙線そのものは荷電粒子であるため、発生、加速地点（天体）から、宇宙空間を伝播して観測地点（地球、地球近傍）に到達する間に、宇宙空間に存在する銀河磁場などの宇宙磁場によって、進行方向を変えられてしまう。そのため、観測点では、本来の到来方向の情報を失ってしまい、等方的な分布になっている。

しかし、宇宙放射線の発生源で、宇宙放射線が周辺物質と衝突し、高エネルギーのガンマ線を生成することがある。ガンマ線は電気的に中性な粒子なので宇宙磁場の影響を受けずに、発生源からまっすぐに地球に到来する。このガンマ線を観測することによって発生源での宇宙放射線の様子を探ることができると考えられている。

ガンマ線観測の歴史は浅く、1970 年代に打ち上げられた SAS-2、COS-B によって、ようやく観測が始まりった。1991 年にはアメリカによって打ち上げられたコンプトンガンマ線天文衛星 (CGRO) の、およそ 10 年にわたる観測の結果、多くのガンマ線放射天体を発見した。この結果は、ガンマ線で宇宙を見ることは、天文学にとって、新しい価値を見いだす可能性があることを示した。また、1989 年には Whipple グループが、解像型大気チレンコフ望

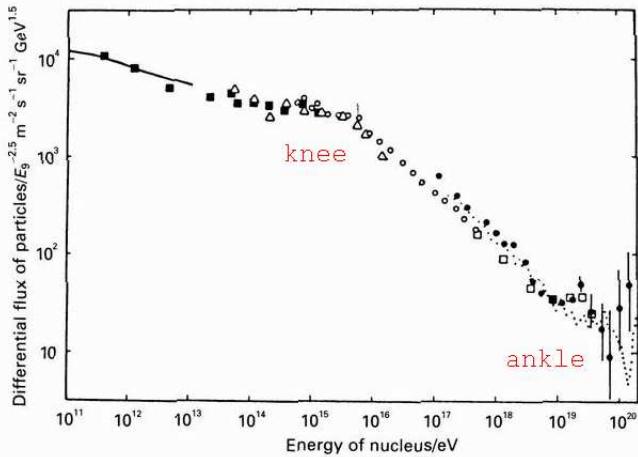


Figure 1.1: 一次宇宙線フラックス

遠鏡を使って、TeV 領域のガンマ線の有意な観測に初めて成功した。解像型大気チレンコフ望遠鏡とは後に詳しく記すが、宇宙線が大気に入射したときに、大気と相互作用を起こして発生するチレンコフ光を観測することによって間接的に宇宙線を観測することができる望遠鏡である。以来解像型チレンコフ望遠鏡は、高エネルギー一ガンマ線を検出するためのスタンダードな検出器となり、世界中で建設された。そして数多くの TeV 領域のガンマ線天体を発見した。(図 1.2 は 2007 年までに発見された高エネルギー天体の数) 熱的に平衡状態にあって、素粒子、原子核反応が盛んに起こっている高エネルギー一ガンマ線放射天体で、高エネルギー宇宙線が作られている可能性は極めてたかい。そのため、今後ますます高性能の観測装置を用いて、高エネルギー一ガンマ線放射天体を観測することが必要である。

しかし、Knee 領域の宇宙線は、現在の解像型チレンコフ望遠鏡では観測が行われていない。そこで、本研究では、既存の解像型チレンコフ望遠鏡よりも高いエネルギーを見るこことできる望遠鏡を作るために、数 10TeV 以上に特化した次世代チレンコフ望遠鏡の設計に関する基礎的なシミュレーションを行う。[1] [2]

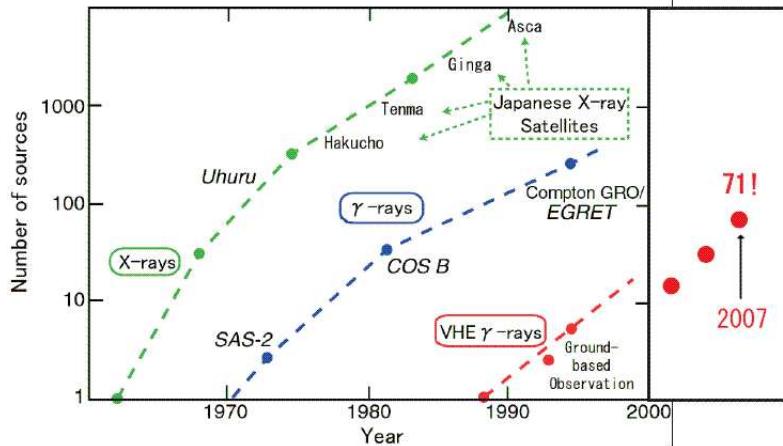


Figure 1.2: kifune プロット：横軸 年 縦軸 発見された天体数

1.2 高エネルギー粒子の放射機構

1.2.1 制動放射

高エネルギー電子が物質中を通過すると、物質中の原子核の電場によって進行方向を曲げられる（図1.3）。この時電子は加速度を受けるので、電磁波を放出する。この現象を制動放射という。高エネルギーの電子がエネルギーを損失する重要な過程であると同時に γ 線やX線発生の重要な過程でもある。制動放射の過程については、BetheとHeitlerによって正確な計算がなされている。電子と原子核との距離の上限をガスモデルの半径 $137(\hbar/mc)(1/Z^{1/3})$ 、下限を原子の半径とし、 $v = h\nu/E_e$ とおくと、反応断面積(σ)は

$$\sigma(E_e, v)dv = 4\frac{Z^2 e^2}{\hbar c} \left(\frac{e^2}{m_e c^2}\right)^2 \frac{dv}{v} [\{1 + (1-v)^2 - \frac{2}{3}(1-v)\} \ln(\frac{184}{Z^{-\frac{1}{3}}}) + \frac{1}{9}(1-v)] \quad (1.1)$$

E_e ：入射電子 陽子のエネルギー

v ：放射されるガンマ線のエネルギー E_r と E_e の比 (E_r/E_e)

Z ：媒質の原子番号

m_e ：入射電子 陽子の質量

\hbar ：プランク定数を 2π で割ったもの

c ：光速度

が得られる[3]。

断面積は Z^2 に比例し、 m_e^2 に反比例している。電子のエネルギーが $1/e$ になる距離を

$$X_0 = \frac{\hbar c}{4Z^2 e^2 N} \left(\frac{m_e c^2}{e^2}\right)^2 \frac{1}{\ln(184Z^{-1/3})} \approx \frac{AB}{Z^2 N} \quad (1.2)$$

A ：物質を構成する原子の質量数

B ：定数

N ：原子の数密度

と定義する。エネルギー損失は

$$\frac{N}{A} \int_0^\infty \sigma(E, \nu) h\nu d\nu \approx \frac{E_e}{X_0} \quad (1.3)$$

と近似できる。星間ガス中の電子、陽電子の制動放射によるガンマ線放射率は

$$q_b(E_r) = \frac{4.3 \times 10^{-25} n I_e}{E_\gamma} (cm^{-3} s^{-1} MeV^{-1}) \quad (1.4)$$

E_γ ：放射されるガンマ線のエネルギー

$$n : \text{放射量生きの原子核の数密度}$$

$$I_e(> E_\gamma) : \text{電子、陽電子のエネルギースペクトルの積分値}$$

とかける。

この式から、制動放射のスペクトルのベキは親粒子のベキと同じ値をとることがいえる。また制動放射で発射するガンマ線は親電子のエネルギーを越えることはできないが、ほぼ同じ程度のエネルギーのガンマ線を放射できる。つまり、ガンマ線を観測することによって、その親電子に対する情報を取得でき、どのような加速メカニズムを受けたのかを知ることができると考えられる。

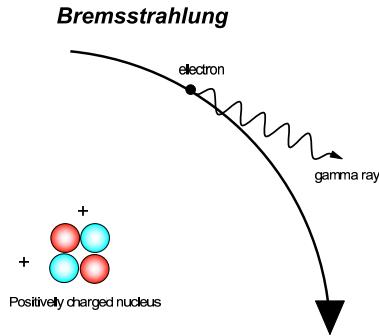


Figure 1.3: 制動放射

1.2.2 逆コンプトン散乱

静止している電子にX線や、ガンマ線が散乱させられる現象をコンプトン散乱という。逆に高エネルギーの電子が光子に衝突して電子がエネルギーを与え、ガンマ線を放射する現象を逆コンプトン散乱という。図のように、光子が電子の進行方向に対して θ の角度から入射したとする。この時の光子のエネルギーを $h\nu$ とすると、電子の系から見た光子のエネルギー $h\nu^*$ は

$$h\nu^* = \gamma h\nu(1 - \beta \cos \theta) \quad (1.5)$$

E ：電子の持つエネルギー

βc ：速度

γ ：ローレンツ因子

となる。

光子のエネルギーが極めて小さい ($\gamma h\nu \ll mc^2$) 場合については、トムソン散乱となり、散乱光子のエネルギーは $h\nu'$ となる。散乱角を ϕ とし、初めの系に戻すと、散乱光子のエネルギー $h\nu'$ は

$$h\nu' = \gamma h\nu'(1 + \cos\phi) \approx \gamma^2 h\nu \quad (1.6)$$

となる。入射光子は約 $(E/mc^2)^2$ 倍だけ高いエネルギーの光子となって散乱される。10GeVの電子は可視光を数 100MeV 以上の γ 線に変換する。このように X 線、 γ 線を放射するので、宇宙空間において逆コンプトン散乱は高エネルギー ガンマ線の重要な放射機構となっている。[3]

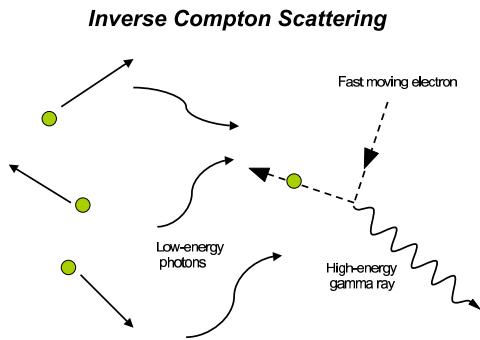


Figure 1.4: 逆コンプトン散乱

1.2.3 シンクロトロン放射

磁場中を電子が通過するとローレンツ力による加速度を受け、電磁波が放出される。運動する電子、陽電子が静止エネルギー (511keV) よりも大きな運動エネルギーを持つときに、この放射をシンクロトロン放射とよび、連続的なスペクトルを放出する(図 1.5)。毎秒放射されるエネルギーは

$$\dot{E}_{Sync} = \frac{4}{3}\sigma_T c \gamma^2 \beta^2 U_B \quad (1.7)$$

$\sigma_T (= 6.65 \times 10^{-25}\text{cm}^2)$: トムソン散乱の断面積

$\gamma (= 1/\sqrt{1 - \beta^2})$: ローレンツ因子

$\beta = v/c$

$U_B (= H^2/8\pi)$: 磁場のエネルギー密度

となる。親電子のエネルギーにもよるが、シンクロトロン放射によって放出される電磁波のエネルギー 100KeV ほどである。しかし、この電磁波が高エネルギーの電子と逆コンプトン散乱を起こすと、高エネルギーのガンマ線を発生する。このような放射を Syncrotron Self Compton モデルという。[6]

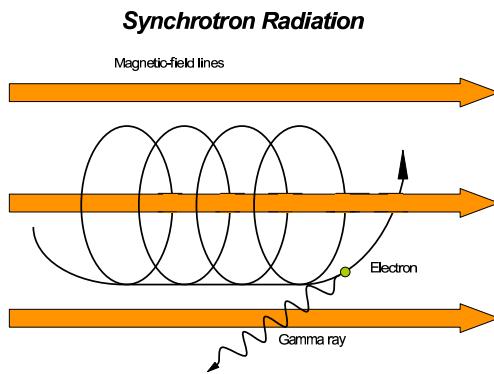


Figure 1.5: シンクロトロン放射

1.2.4 π^0 中間子の崩壊

宇宙線の主成分である宇宙線陽子と星間物質である中性子水素 (HI) 中の核子などが衝突すると π 中間子が生成される。このうち π^0 成分は寿命が非常に短くすぐに崩壊して 2 本のガンマ線を放出する。(式)

$$p + p \rightarrow p + p + \pi^0 \quad (1.8)$$

$$\pi^0 \rightarrow +\gamma + \gamma \quad (1.9)$$

また、 π^+ と π^- も、ミューオンとニュートリノに崩壊する。さらに、ミューオンも電子とニュートリノに崩壊する。発生した電子はシンクロトロン放射などを引き起こすことになる。実際にはどの程度のエネルギーを持った陽子が π^0 中間子を作るかを考察する。ここで、

エネルギー $E = \sqrt{p^2c^2 + m_p^2c^4}$ を持った陽子が静止した陽子に衝突した場合を考える。この時の、重心系のエネルギー W は

$$W = \sqrt{(E + m_p c^2)^2 - p^2 c^2} = \sqrt{2m_p c^2(E + m_p c^2)} \approx \sqrt{2m_p c^2 E} \quad (1.10)$$

となる。この W が二個の陽子と、一個の π^0 の静止質量に等しいと仮定すると、パイオンの生成エネルギーの閾値 E_0 は、

$$E_0 = m_p c^2 + 2m_\pi c^2 + \frac{m_\pi^2 c^2}{2m_p} \quad (1.11)$$

となる。これより、陽子の運動エネルギー $E - m_p c^2$ が $2m_\pi c^2$ ($= 280\text{MeV}$) よりも大きければパイオンが生成され、 π^0 中間子の崩壊からガンマ線が放射される。このとき、重心系でのガンマ線のエネルギーを k_0 とすると、観測系でのガンマ線エネルギー K は、

$$\begin{aligned} K &= \gamma k_0(1 + \cos \theta) \\ \gamma &= (1 - \beta^2)^{-1/2} : \text{ローレンツ因子} \end{aligned} \quad (1.12)$$

重心系のエネルギー W が高いときには、運動エネルギーが陽子とパイオンにほぼ均等に分配されるので、 K_0 は、 W に比例することになる。更に、放出角 θ の平均を取ると $1 - \cos \theta$ は 1 となるので、ガンマ線のエネルギーは、陽子のエネルギーに比例するといえる。[6]

Meson Decay

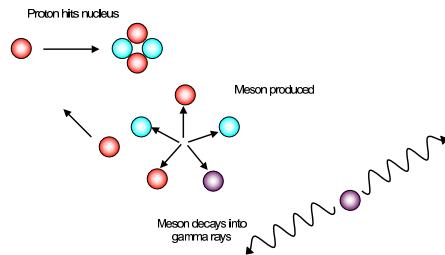


Figure 1.6: π^0 中間子の崩壊

1.2.5 曲率放射

パルサー近傍などの強磁場が存在するところでは荷電粒子は磁力線に沿って運動する現象が起こる。この時磁力線が曲がっていれば荷電粒子に加速度がかかり、電磁波を放射する。この現象を曲率放射という(図1.7)。曲率放射で放出されるガンマ線のエネルギーは

$$E(eV) = \frac{hc}{4\pi\rho} \gamma^3 \approx \frac{3 \times 10^5}{\rho} \gamma^3 \quad (1.13)$$

γ : 磁場に絡み付いている電子のガンマファクター

ρ : 曲率半径

になる。今、中性子星について考えると、半径はおよそ $10\text{km} (= 10^6\text{cm})$ である。パルサー付近の地場の曲率半径は、およそ 10^7cm とする。パルサーへの入射電子のエネルギーは 10^{14}eV 程度と過程する。(通常電子は 10^{14}eV 程度までは容易に加速できるため) この場合に、極率放射によってどの程度のエネルギーのフォトンが放出されるかを計算してみる。電子の静止質量は $0.5 \times 10^6\text{eV}$ であるため、 10^{13}eV の電子のガンマファクターは、 2×10^7 となる。したがって、式1.13から、 $2.4 \times 10^{10}\text{eV}$ 程度のガンマ線が曲率放射でできる可能性がある。これは、 10GeV オーダーの値であるので、曲率放射によって TeV 領域の放射は起こらないと考えられる。また、假りに高いエネルギーの電子によって放射されたとしてもこのような高いガンマ線は磁場によって電子対生成してしまう。[5][7]

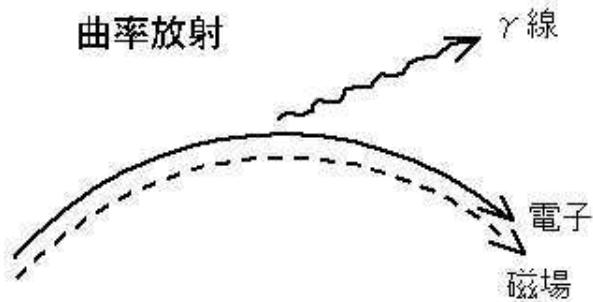


Figure 1.7: 曲率放射

1.3 ガンマ線天源

現在までに、ガンマ線を発生する非熱的な機構を持ったガンマ線天源として、銀河系内の天体では超新星残骸やパルサー星雲など、銀河系外の天体では活動銀河核などが見つかっている。

1.3.1 パルサー

パルサーとは、パルス状の可視光線、電波、X線を発生する天体であり、超新星爆発後に残った中性子星がパルサーの正体であると考えられている。現在は約1000個ほどの電波パルサーが確認されている。パルサーは磁極から出る相対論的プラズマ流を持ち、磁軸と回転軸がずれているため周期的なパルスが観測される天体である。代表的なパルサーである、かにパルサーは1054年の超新星爆発の後に残され、0.033秒周期で、信号を放射している。これは、かにパルサーが0.033秒周期で、回転しているためと考えられており、その半径はおよそ10kmとなっている。

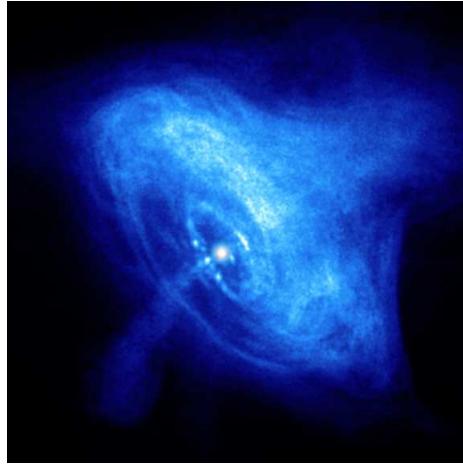


Figure 1.8: かに星雲の中心にあるパルサー

回転駆動型パルサー

大部分の電波パルサーは、中性子星の回転エネルギーによって放射エネルギーを得ているので、回転駆動型パルサーという。回転エネルギーEは、

$$E = \frac{1}{2} I \Omega^2 \quad (1.14)$$

I : 中性子星の慣性能率

Ω : 角速度

となる。回転エネルギーの損失は、時間的变化なので、

$$\frac{dE}{dt} = I \Omega \dot{\Omega} \quad (1.15)$$

回転速度 $r\Omega$ は、図1.9の回転軸からの距離rが大きくなる程速くなる。この速度が光速度に達する距離rを越えてしまうと、中心軸である中性子星と同じ角速度で回ることができ

なくなる。この時の境界の距離 R_L は

$$R_L = \frac{c}{\Omega} \quad (1.16)$$

となり、この時の R_L の面を光円柱という。かに星雲の R_L はおよそ $10^8 cm$ ほどで、中性子星の半径のおよそ 100 倍である。この光円柱の内側のエネルギーは中性子星に留まっている物と考えるので、この光円柱より外に漏れ出したエネルギーは回転エネルギーの損失量に等しいと判断できる。[5]

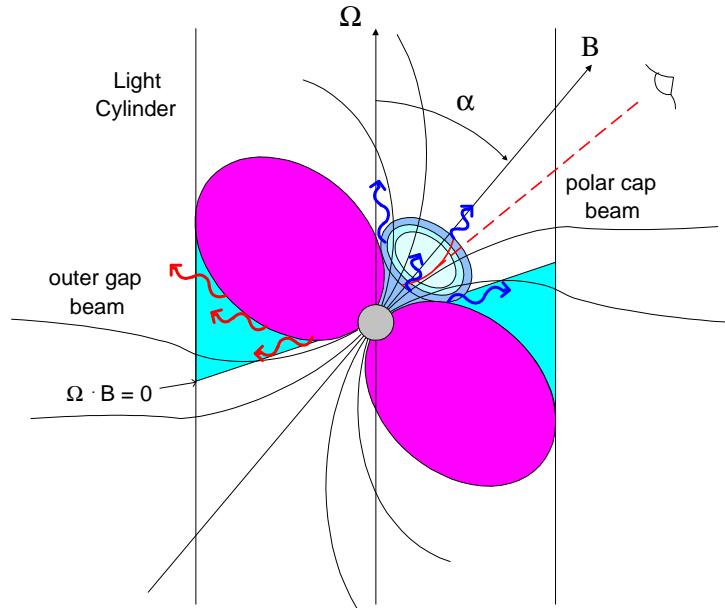


Figure 1.9: パルサーの模式図

1.3.2 超新星残骸

質量がおよそ太陽の 4 倍以上の恒星は、星の進化の最終段階で大きな爆発を起こし、星内部で起こる核融合反応によって作られた重元素（ヘリウムよりも重い元素）を宇宙空間に放射する。これを超新星爆発という。さらに、質量が太陽の 8 倍以上であった場合は、中性子星やブラックホールなどになると考えられている。

超新星爆発によって、周囲に飛び散ったガスによってできる星雲上の天体を超新星残骸（Super Nova Remnant:SNR）という。超新星残骸は、可視光、電波や、X、ガンマ線などを放射しており、宇宙線の加速源の最有力候補として期待されている。すでに、いくつかの超新星残骸から $10^{12} eV$ 程度の超高エネルギーガンマ線が検出されている。

超新星の膨張は次の四段階のフェーズに分かれていることがしらされている。[8]

- フェーズ 1 アウトバーストから、最初の 90 年は $10000 km/s$ 程度に加速された衝撃波が、自由に膨張する。
- フェーズ 2 次の 22000 年は、放出された物質が大量の星間ガスを捕らえる為、残されたガスは膨張する。拡大していくエネルギーは残されたガスと膨張するガスで共有するため、放射線的なエネルギー損失はまだ重要ではない。更に進化が進むと膨張するのに使うエネルギーが超新星残骸全体のエネルギーの中で大きな割合を持つようになってきて、膨張速度が遅くなる。膨張速度はおよそ $200 km/s$ までさがる。

- フェーズ 3 一旦膨張速度が十分に下がると、衝撃波の後ろの領域の膨張部分と星間物質の間の温度は、 $5 \times 10^6 K$ にまで下がる。冷えたガスは局所的に収縮して、なお効率よく放射を出すようになるので、エネルギーを放射の形で吐きだし続け、一気に超新星残骸の温度が下がり始める。このフェーズはおよそ 750000 年ほど続く。
- フェーズ 4 最後のフェーズでは膨張速度は星間物質の平均速度とほぼ等しいおよそ 10km/s まで下がる。その後超新星残骸は周りの星間空間と区別がつかなくなり消えていく。

超新星残骸は、その大部分が電波観測によって発見されてきたが、観測される放射線の強度の分布の形により、球殻状 (shell type)、中心部も明るいもの (plerion 型)、その他の複雑な形状の物などに、分類されており、全体の 85 % を shell type が占めている。また、放射された光のスペクトル、水素の輝線の有無による分類で、I 型 (無) と II 型 (有) にわけられる。さらに I 型は Ia 型 (小質量) と Ib 型 (大質量) に分類され、Ib 型の超新星残骸は爆発前の激しい星風によって飛ばされた物質の中を爆風が進むので、複雑な形状になるが、Ia 型は比較的単純なので、shell 型になりやすい。

超新星残骸のガンマ線放射の加速機構はまだ、不明な点が残されている。星間物質の密度、磁場の強さ、爆発からの時間など、それぞれの超新星残骸にたいして様々な要因があるため、それに異なった特徴をあたえている。このような特徴がどのように、加速機構に影響をあたえているかはまだはっきりしないが、今後の観測による解明が期待されている。[5]



Figure 1.10: 超新星爆発の瞬間



Figure 1.11: 超新星残骸 N63A(大マゼラン星雲)[9]

1.3.3 活動銀河核

1960 年代に遠方の銀河の中には、中心部が銀河全体より桁違いに、しかも広がりを検出できないほど狭い領域に集中して明るく輝いているものが発見された。このような活発な銀河の中心核を活動銀河核という。活動銀河には、中心部のスペクトルの特徴によって、いくつかに分類されている。主な種類としては、セイファート銀河 (I 型、II 型)、クエーサー、ブレーザーがある。これらは主として X 線から硬 X 線領域で、主にエネルギーを放出している。活動銀河核のエネルギー源は、中心にあるブラックホールに降着した物質の開放する重力エネルギーによるものと考えられる。また、ブラックホールの近傍に形成される、降着円盤からはジェットの放出がしばしば観測されるが、宇宙ジェットの形成のメカニズムはあまりよく分かっていない。

ガンマ線を放出する活動銀河をブレーザーという。ブレーザーの条件としては

- 我々の視線方向と中心核から放出するジェットの方向が同じである。

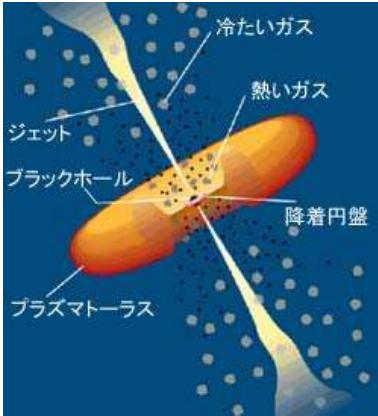


Figure 1.12: 活動銀河の想像図

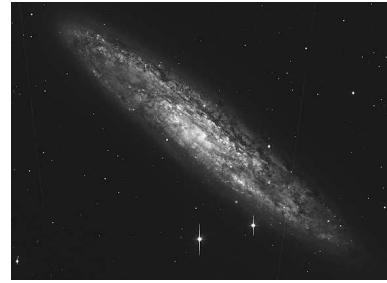


Figure 1.13: 活動銀河 NGC253[11]

である。このようなブレーザーのうち、光子のエネルギースペクトルが、TeV 領域に達している例は数個程度である。これらの TeV ブレーザーは全て、赤方偏移が $z \approx 0.1$ 以下の比較的近傍にある。遠方にある TeV ブレーザーは、高エネルギーのガンマ線を出すものは暗いというブレーザーの傾向に加えて、ガンマ線光子が飛来するときに銀河系外空間に満たされている赤外線背景放射の光子と衝突して電子、陽電子の対生成を起こし吸収されてしまう効果も加わって、非常に見えにくくなっている。[5] [6]

1.3.4 ガンマ線バースト

ガンマ線バーストとは、突然的に起り、極めて短時間の間に大量のガンマ線が降り注ぎ、激しく強度が変動する現象である。ガンマ線バーストのエネルギー強度は、およそ $10^{-8} \sim 10^{-2} \text{ erg/sec/cm}^2$ に分布していて、9割以上がガンマ線領域に分布している。これは、瞬間的ではあるが、平均的な X 線天体に対して桁違いの強度である。ガンマ線バーストの継続時間は、事象ごとに異なり、0.1 秒以下のものもあれば、1000 秒以上継続するものもある。個々のガンマ線の到来時間の分布も事象ごとに異なり、複雑な構造の分布になるのだが、継続時間の短いものほど、エネルギースペクトルが硬い傾向を持つ。

1991 年 4 月に、アメリカによって打ち上げられたコンプトンガンマ線観測衛星の検出器である BATSE(Burst And Transient Source Experiment) によって、ガンマ線バーストを検出し、その天球上の位置を十分な精度で決定することができた。(図 1.14) BATSE によって、硬ガンマ線バーストが存在することが立証された。また、それが、天球状にランダムに分布していることから、ガンマ線バーストという現象は我々の銀河形外で起こっていることを暗示していた。しかし、BATSE の結果からは、どのようにしてこの膨大なエネルギーを生み出しているかを解き明かすことはできなかった。[5]

1.4 ガンマ線観測

ガンマ線の観測には様々な方法があるが、大きくわけると人工衛星や、気球など上空で直接観測する方法と、地上に検出器や望遠鏡を設置して大気と相互作用したものを間接的に見る方法がある。表 1.4 に大まかな特徴を示す。

2704 BATSE Gamma-Ray Bursts

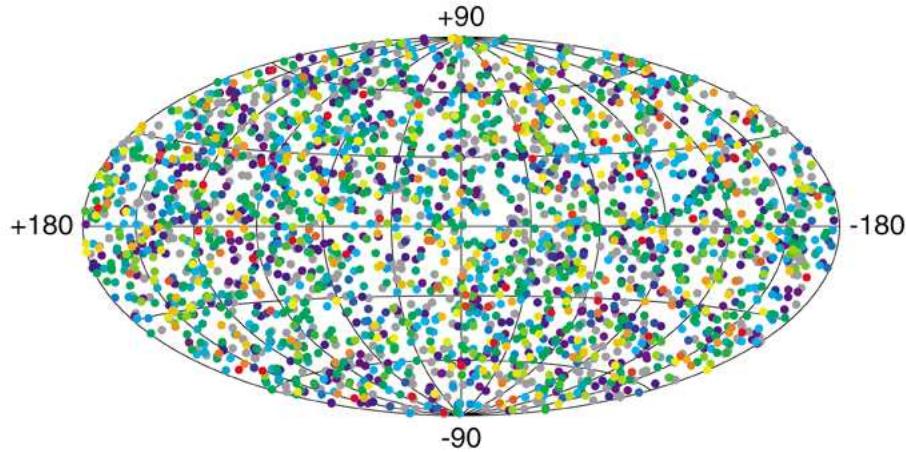


Figure 1.14: BASTEによるガンマ線バーストの分布

ベース	上空観測	地上観測
ガンマ線検出方法	直接観測	間接観測(大気チレンコフ光)
エネルギー 利点	<数 10GeV 高 S/N 比 広視野	>数 100GeV 大面积 高角度分解能
欠点	小面積 高コスト	宇宙線ノイズ大 狭視野

Table 1.1: 上空と地上におけるガンマ線観測

1.4.1 人工衛星による観測

CGRO衛星

CGRO(Compton Gamma-Ray Observatory) とはアメリカ航空宇宙局(NASA)が1991年4月に打ち上げたガンマ線観測衛星で、2001年6月まで、稼働した。CGRO衛星にはBATSE, OSSE, COMPTEL, EGRET の4つの検出器が搭載されており、特に EGRET 検出器では約 300 ものガンマ線天体が発見された。各検出器は表 1.4.1 のようになっている。[12]

検出器名	エネルギー領域	構成	用途
BATSE	30keV~2MeV	NaIシンチレーター 8 個	全天モニタ
OSSE	50keV~10MeV	NaI(Tl)-CaI(Na)シンチレーター 4 個	ラインスペクトルの測定
COMPTEL	0.8MeV~30MeV	NaIシンチレーター 液体シンチレーター	全天探査
EGRET	20MeV~30GeV	スパークチェンバー	全天探査

Table 1.2: CGRO に搭載されている検出器



Figure 1.15: CGRO衛星



Figure 1.16: GLAST衛星

フェルミガンマ線天文衛星

フェルミガンマ線天文衛星(旧GLAST)は、アメリカ、日本、イタリア、フランス、スウェーデン、ドイツの6カ国が参加する国際共同開発プロジェクトとして開発され、2008年6月に打ち上げられた。広視野望遠鏡(LAT)(図1.17)とGLASTバーストモニター(GBM)(図1.18)の2つの検出器を搭載している。フェルミ天文衛星チームは、ファーストライト初期観測成果として、95時間(約4日間)の初期観測によって得られた全天のガンマ線イメージ「ガンマ線全天地図」を公開した(図1.19)。打上げ以来、順調に立ち上げ作業が進み搭載されたガンマ線望遠鏡の革新的な性能が次々と確認されている。また、今後は日本のX線天文衛星「すばる」との共同観測も行われることとなっている。[13]

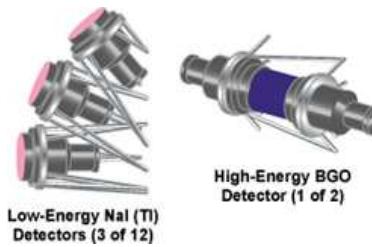


Figure 1.17: Gamma-Ray Burst Monitor

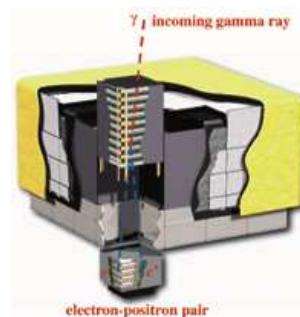


Figure 1.18: Large Area Telescope

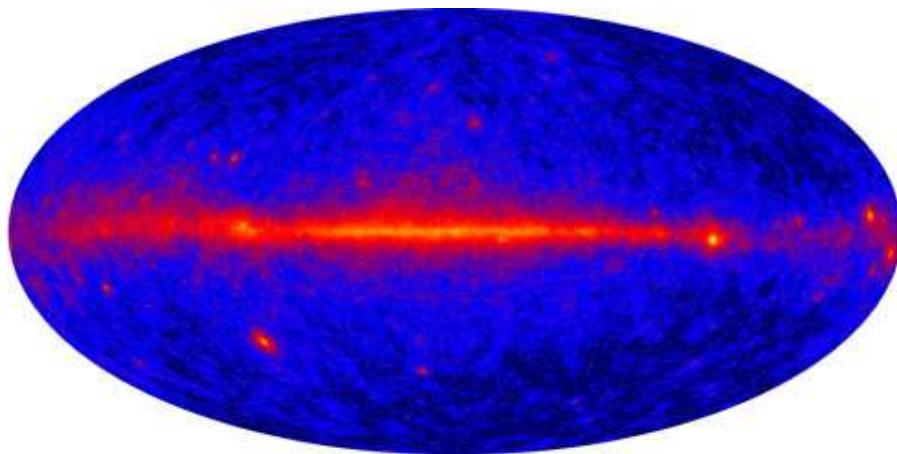


Figure 1.19: fermi 天文衛星 初期観測によるガンマ線全天地図

検出器	エネルギー領域	構成	用途
LAT	$30MeV \sim 300GeV$	シリコンストリップ、鉛シート	全天探査
GBM	$8keV \sim 1MeV$ $150kev \sim 30MeV$	NaI、BGO シンチレーター	バーストモニタ

Table 1.3: フェルミガンマ線天文衛星に登載されている検出器

1.4.2 地上での観測

解像型大気チエレンコフ望遠鏡

ガンマ線が大気と相互作用して発生させるチエレンコフ光を観測することで、間接的にガンマ線を観測するものである。主流なのはシャワーの広がりをイメージでとらえ、宇宙線ノイズを識別する解像型である。大まかには、図 1.20, 1.21 のような光電子増倍管を束ねたカメラ部分と小鏡をあわせた反射鏡からできている。(図 1.20、1.21 は CANGAROO- III 望遠鏡) 現在、世界各地で高エネルギーのガンマ線を観測している。表 1.4.2 は稼働中のおもなチエレンコフ望遠鏡である。

グループ	観測地	望遠鏡
CANGAROO - III	オーストラリア	$10m \times 4$
H.E.S.S	ナミビア	$12m \times 4$
MAGIC	カナリア諸島	$17m \times 2$
VERITAS	アメリカ	$10m \times 7$

Table 1.4: 現在稼働中のチエレンコフ望遠鏡



Figure 1.20: CANGAROO-III 望遠鏡 カメラ

Figure 1.21: CANGAROO-III 望遠鏡 反射鏡



Figure 1.22: 世界のチエレンコフ望遠鏡

水チエレンコフ検出器

大型の水槽を利用して、荷電粒子が媒質（水）を運動するときに発生するチエレンコフ光を観測する。図 1.23 の Milagro 検出器は、アメリカとメキシコによる共同研究で、メキシコ中央部プエブラ近郊のシエラネグラ山に設置してある。高度 4100 m の高高度に設置した 900 台の HAWC(High Altitude Water Cherenkov) で、100GeV～100TeV のガンマ線を捕らえることが可能となっている。図 1.24 は検出器のイメージで、深さ 5 m ほどのプラスチック製のタンクに光電子増倍管を設置している。Milagro はすでに、100TeV のガンマ線天体である MGROJ1908 +06 の観測に成功している。[14]



Figure 1.23: Milagro 型検出器

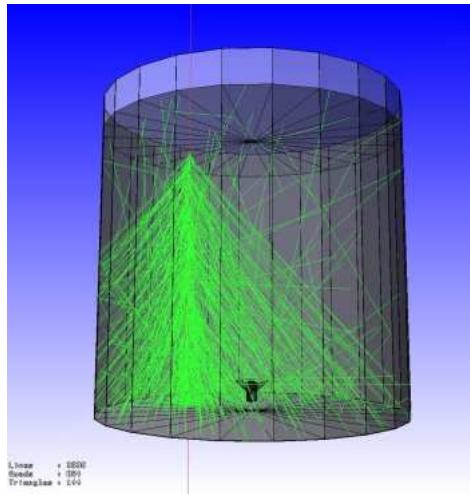


Figure 1.24: Milagro の水チエレンコフ検出器のイメージ

チベット型チエレンコフ検出器

中国のチベット自治区の羊八井高原 (ヤンパーチン、標高 4,300 m) で中国と日本の共同プロジェクトとして、プラスチックシンチレーターを並べた装置を使用してエアシャワーを観測している。(図 : 1.26) 観測装置としては、図 1.25 のような $0.5m^2$ のプラスチックシンチレーターと光電子増倍管を組み合わせた検出器を 7.5m 間隔で、碁盤目状に 697 台並べている。角

度分解能は 1° 以下程度と チェレンコフ望遠鏡に比べて良くないが、 $3\sim100TeV$ のエネルギーのガンマ線天体を広視野で、24時間観測可能となっている。おもな成果として

- カニ星雲からの数 TeV ガンマ線の検出
- Knee 領域の一次宇宙線のエネルギースペクトルの観測
- 太陽活動と銀河宇宙線による「太陽の影」の変動の観測

などがある。[1] [15]

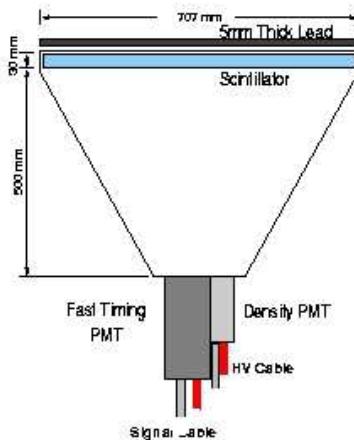


Figure 1.25: チベット型検出器



Figure 1.26: チベットに設置された空気シャワー観測装置

Chapter 2

解像型大気チエレンコフ望遠鏡

ガンマ線を観測する方法は先にもあげたように、様々あるが、 $100GeV$ を越えるような高エネルギーのガンマ線は、非常に入射頻度が少ない。そのため、検出器の有効面積が小さい人工衛星や気球などによる上空の観測ではとらえることは難しい。そこで、有効面積の大きな検出器を地上に設置し、大気チエレンコフ光をとらえる方法をとる。解像型チエレンコフ望遠鏡に限って説明する。

2.1 エアシャワー

高エネルギーの一次宇宙線が大気中に入射すると、大気中の原子核などと相互作用し二次粒子を生成する。この二次粒子もまた、大気と相互作用し三次、四次と次々に増えていく。このように、大気との相互作用によって発生した粒子をエアシャワーという。

入射する一次宇宙線がガンマ線の場合、大気中の原子核などに衝突すると、電子対生成を起こして、 e^+ と e^- ができる。

$$\gamma \longrightarrow e^+ + e^- \quad (2.1)$$

さらに、生成された電子、陽電子が、制動放射によって二次ガンマ線を生成する。

$$e^+ \longrightarrow e^+ + \gamma \quad (2.2)$$

$$e^- \longrightarrow e^- + \gamma \quad (2.3)$$

この反応を電磁カスケードという。この反応を繰り返すことで、エアシャワーができる。この反応を繰り返す過程で、電子のエネルギーはどんどん下がっていき $81MeV$ を下回ると対生成よりもコンプトン散乱が優位になり、シャワーの発達は止まる。平均的には、成層圏付近（上空 $10\sim30km$ 付近）からはじめり、上空 $10km$ 付近で生成される粒子の数はピークを迎える、その後収束していく。

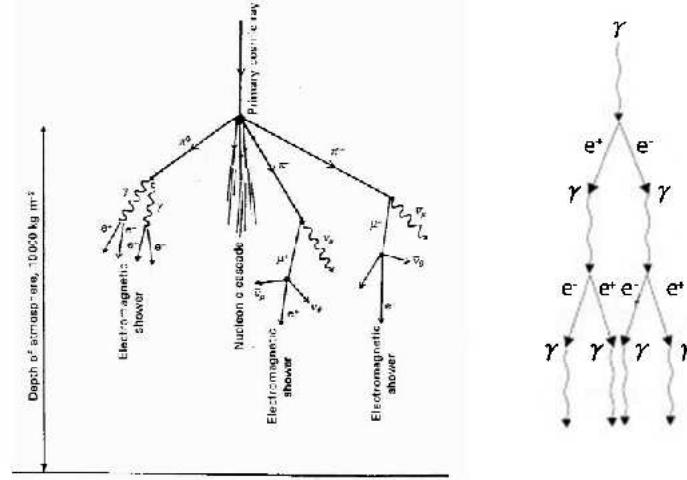
一方、入射粒子が原子核の場合には、核カスケードが起こり、 π^+, π^-, π^0 ができる。さらに π^+ と π^- は μ^+ と μ^- に崩壊し、 π^0 は 2 個のガンマ線に崩壊する。このガンマ線が親粒子となってさらに電持カスケードを起こす

$$\pi^0 \longrightarrow \gamma + \gamma \quad (2.4)$$

$$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (2.5)$$

$$\pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (2.6)$$

Figure 2.1: エアシャワーの概念図



発生したミューオンは通常地上に到達するが、エネルギーが低い場合には以下のように崩壊することもある。

$$\mu^+ \longrightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (2.7)$$

$$\mu^- \longrightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (2.8)$$

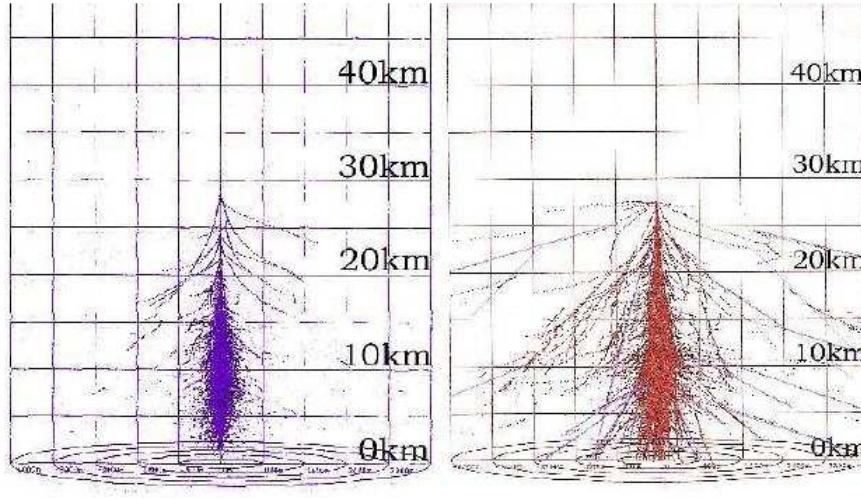
核力スケードによって発生したものよりも、電磁力スケードで発生した二次粒子の方が横方向の運動量が少ない。それによって、ガンマ線起源のエアシャワーはプロトン起源のエアシャワーよりも指向性が強い。また、原子核の二次粒子はほとんどがパイオニであり、それぞれ等確率で発生する。このうち、 p_i^- と p_i^+ はそれぞれ μ^- 、 μ^+ を作る。しかし、 μ^- と μ^+ は電子の 200 倍程度の質量を持つために、チエレンコフ光を出しにくい。そのため、ガムマ線起源のイベントと同じ規模のシャワーが発生していれば、親粒子のエネルギーはガムマ線の 3 倍程度になる。[5]

2.2 チエレンコフ光

荷電粒子が屈折率 n の大気に入射するときに、粒子の速度 v が大気中の高速度 (c/n) よりも大きい場合に可視光または紫外線を放射する。これをチエレンコフ放射とよぶ。この現象は荷電粒子自身ではなく、荷電粒子による電場の作用により、分極された大気が電気双極子放射を行うためにおこる。荷電粒子が通った軌跡にそって、物質の誘電分極が起こり、その分極が元に戻るときに図 2.3 の θ 方向にエネルギーが電磁波として放射される。 θ は

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} \qquad \qquad \beta = \frac{v}{c} \quad (2.9)$$

Figure 2.2: エアシャワーの発達の様子（シミュレーション） 左：ガンマ 右：プロトン



となる。 n は波長に弱く依存するが、波長300nmでは、一気圧で約1.00029である。大気中をほぼ光速で走る荷電粒子は進行方向にたいしておよそ $\theta = 1.3^\circ$ の方向にチエレンコフ光を放出する。しかし、実際にはシャワー中の電子は多重クーロン散乱されて多少の広がりがある。海拔0mでの臨界エネルギーは21MeV、ミューオンでは4.4GeV、バイオノンで5.8GeVとなる。チエレンコフ光は発生高度が高くなるほど大気の屈折率が小さくなるため放射角度は小さくなるが、発生してから地上に到達するまでの光路差を考慮すると、高度7kmから20kmで発生したチエレンコフ光はシャワー軸から110m～140m程度までに落ちる。この時にできるリングをチエレンコフリングという。実際に粒子が垂直に入射した場合の地上でのチエレンコフ光密度をシミュレーションにより求めてみた。[5]

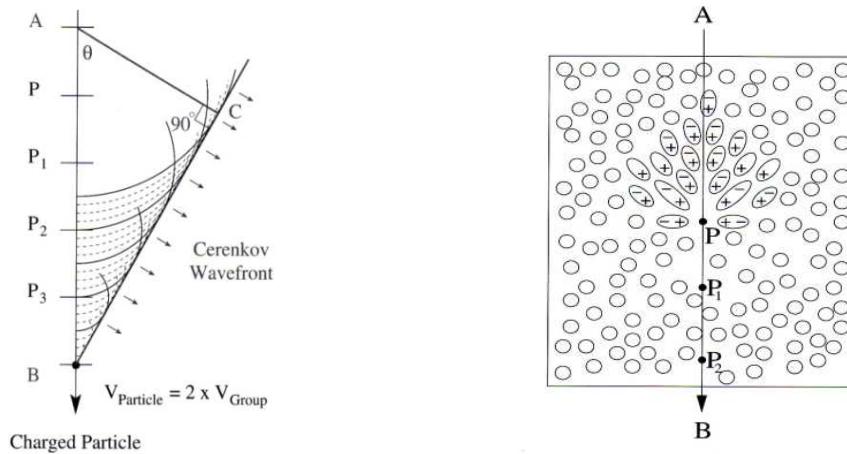


Figure 2.3: チエレンコフ光の指向性

Figure 2.4: 分極の様子

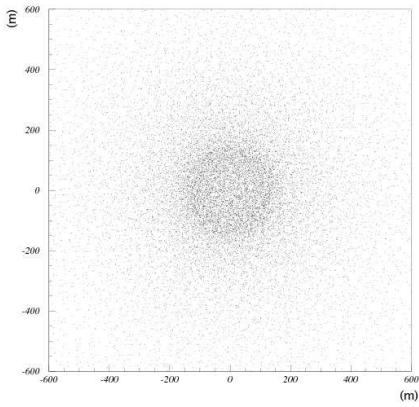


Figure 2.5: 1TeV ガンマ線の光子分布

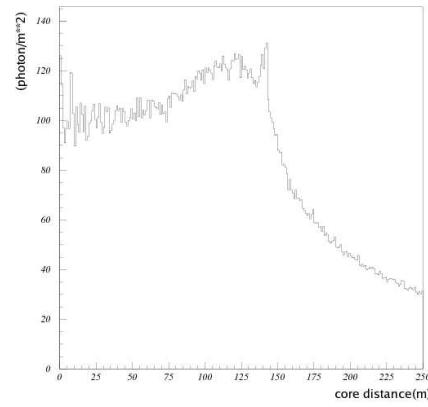


Figure 2.6: 1TeV ガンマ線の光密度

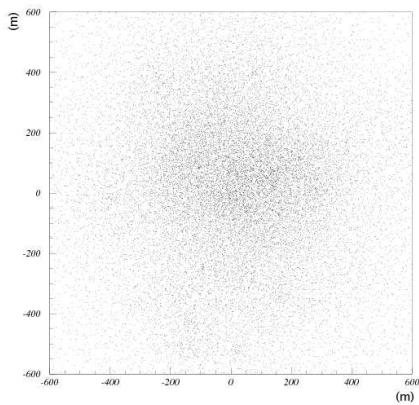


Figure 2.7: 3TeV 陽子線の光子分布

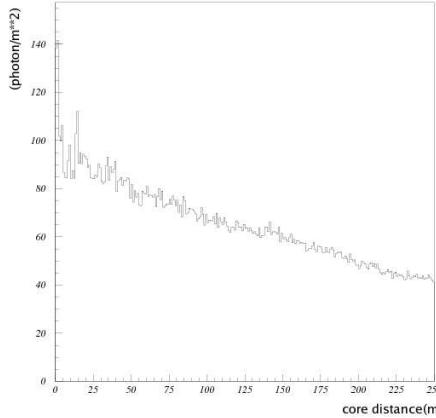


Figure 2.8: 3TeV 陽子線の光密度

ガンマ線の場合にはシャワー軸からの距離 (core distance) が 150m 付近を境界に急激に光量が落ちている。これにたいして、陽子線を入射した場合には、ガンマ線に比べて指向性が弱く、チェレンコフ光発達の様子を反映している。

2.3 イメージング法

地上でのガンマ線観測をする場合、等方的に飛来する宇宙線陽子やその他の原子核がバックグラウンドとなる。バックグラウンドノイズは標準的なガンマ線天体とされるカニバルサー/星雲と比べても 1000:1 オーダーの比率で到来する。そのため地上でガンマ線を観測するためには効果的にバックグラウンドをカットしなければならない。このための手法として、今日標準的に用いられているのが Whipple グループの提唱した、イメージング法である。解像型 チェレンコフ望遠鏡の鏡部分は通常、セグメント化された放物面鏡でできており、この鏡で、チェレンコフ光を反射し、焦点面に設置されている光電子増倍管を束ねた物からなるカメラに集光する。(図 2.14) この鏡は、ある一定方向から入ってきた光をカメラ上の同一点に集光するため、カメラ上でのイメージから、チェレンコフ光がどのような角度で入射したかがわかる。ガンマ線によって生成されたエアシャワーでは、電子と陽電子の運動量分布はガンマ線の当来方向に局在する。そのため、チェレンコフ光もガンマ線の当来方向から 3° 程度の範

囲に集中する。また、先ほども示した様にチエレンコフ光は、数 100m 程度に広がり、望遠鏡の口径は 10m 程度であるため、ほんの一部のチエレンコフ光だけが 1 台のカメラに集められる。この効果も加わって、ガンマ線によって生じるチエレンコフ光のイメージは非常にコンパクトになる。

一方、陽子によるシャワーの場合は、先ほども示したとおり、大気中のプロトン等と衝突して、バリオンが大気中を走ることになる。一番質量の軽いバリオンである陽子でさえも、質量が電子の 2000 倍ほどもある。したがって、このような重い粒子がエアシャワー中にある場合は、横方向の不規則な運動量を持ちやすい。そのため、チエレンコフ光も不規則な発達をする。[20]

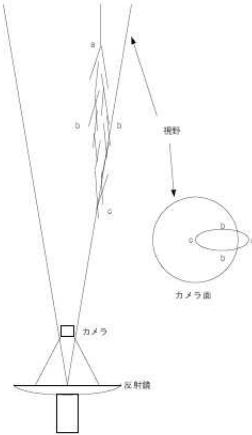


Figure 2.9: シャワーの捕えかたの概念

ガンマ線は指向性が強く、望遠鏡への入射角度が狭い範囲に集中するため、カメラ面のイメージはコンパクトになる。さらに、通常目標天体の方向に望遠鏡を向けているので、カメラ面の中心に向かった楕円になる。一方、陽子などの原子核によるシャワーは、ガンマ線に比べて粒子の運動方向が不規則なため、カメラ面のイメージは大きく広がったものとなる。図 2.10 と図 2.11 はそれぞれ、シミュレーションによる 1TeV のガンマ線と 3TeV の陽子線によるカメラ面のイメージである。

これらの像を楕円で近似してパラメータ化することによって、ガンマ線イベントと宇宙線ノイズを分ける。以下に代表的なイメージパラメータをあげる。[16]

- **Width** 楕円の短軸方向の像の広がり（標準偏差）
- **Length** 楕円の長軸方向の広がり（標準偏差）
- **Distance** 楕円の重心と観測天体の距離
チエレンコフ光が望遠鏡に入射してくる角度に依存するパラメータ
- **alpha** 楕円の重心と観測天体を結んだ直線と楕円の長軸がなす角度

図 2.11 からわかるとおり、陽子起源によるエアシャワーは不規則な形をしているため、無理に楕円で近似すると、Width と Length が同じ程度の円に近い形になる。そのため、この 2 つのパラメータだけでもガンマ線のイベントとある程度識別が可能となる。さらに次の節で述べるステレオ観測を行えば、よりプロトンのバックグラウンドを低減することが可能となる。

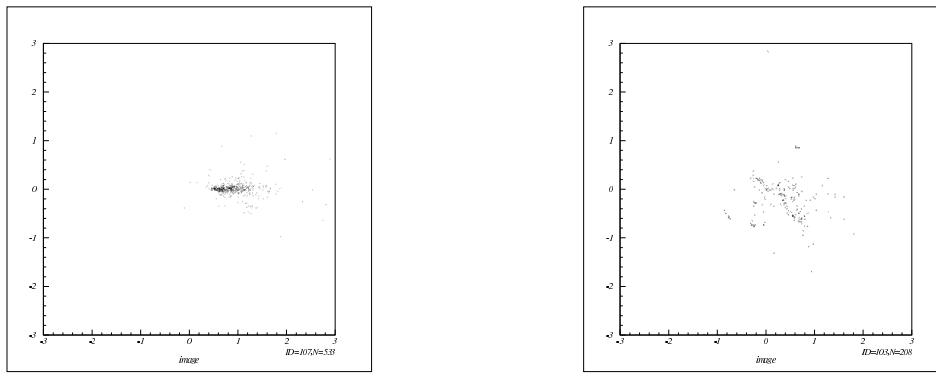


Figure 2.10: カメラ面の像 (1TeV ガンマ線)

Figure 2.11: カメラ面の像 (3TeV 陽子)

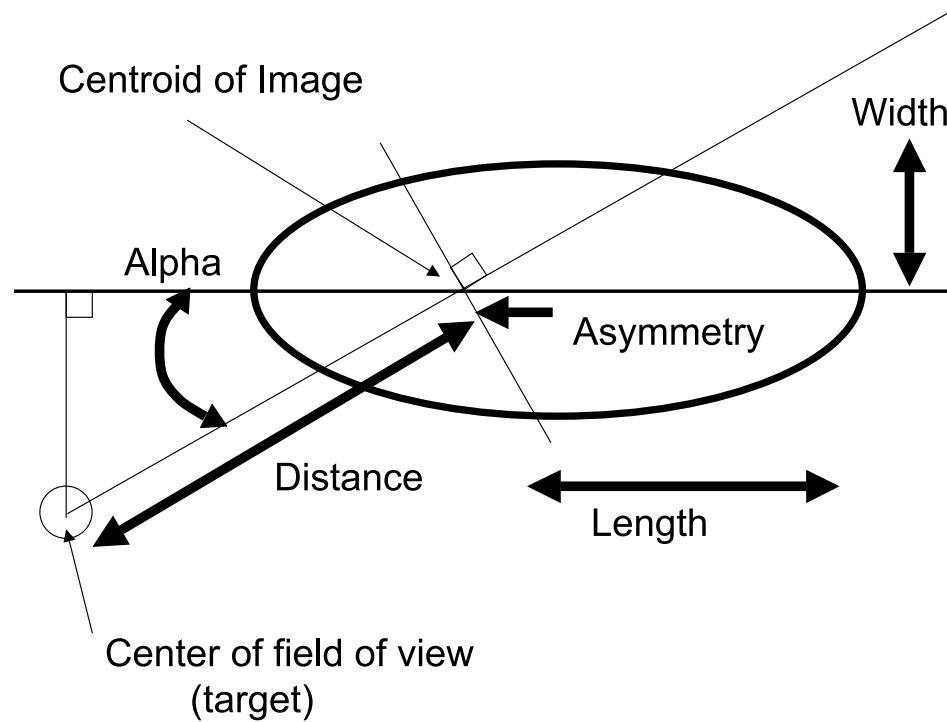


Figure 2.12: イメージパラメータの定義図

2.4 ステレオ観測

一つの天体を、複数台の望遠鏡で観測することをステレオ観測という。(図 2.13) 一台の望遠鏡による像では、方向を完全に特定することは不可能である。また、橢円の長軸を決定するのも誤差が大きく難しいためにどうしても、それが生じてしまう。そこで、複数台の望遠鏡で観測し、像を重ねることによって、図 2.14 のように到來方向を決定することができる。このように求められた長軸の交点を IP(Intersection Point) という。ガンマ線イベントの場合は、IP と目標天体の角距離 θ のヒストグラムをとると、 $\theta^2 = 0$ にピークをもつ。また、望遠鏡の設置されている平面上にカメラ面において考えると、この時の長軸の交点はシャワー軸と地面との交点を表す。(2.15) これによって一台の望遠鏡では得ることのできなかったシャワー軸と望遠鏡の距離を決定することが可能となる。

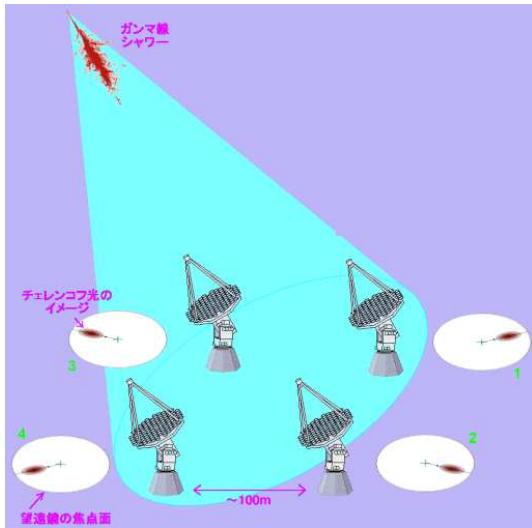


Figure 2.13: ステレオ観測の概念図

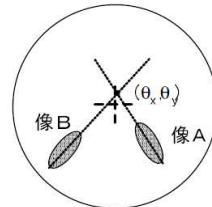


Figure 2.14: カメラ面の像

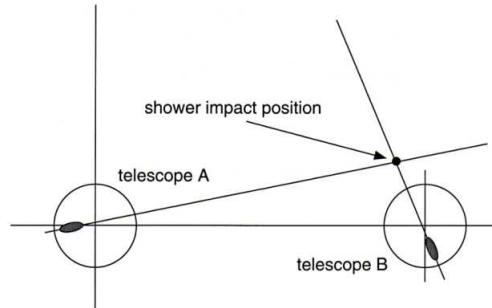


Figure 2.15: シャワー軸の決定

また、シャワーの中心軸と望遠鏡間の距離からシャワーの発生高度を粗く見積もることができる。さらにチエレンコフ光の強度からエネルギーを推定する際に、この距離を考慮することによって、エネルギーの決定精度は1台の場合に比べて40%~15%程度向上する。さらに、宇宙線中のミューオンによるイベントも2台以上の望遠鏡で観測することによってほぼカットすることができる。[20]

IP fit

上記のように求める IP だが、目標とする天体の天頂各が大きい場合はイメージの長軸同士のなす角度が 0° または 180° に近づくため、決定精度が悪くなる。そこで、IP の決定精度を向上させるために IPFIT という手法が考案された。IPfit とは、求められた IP の周りに、最適な IP があると仮定して、 χ^2 検定によって最適な IP を探し出す方法である。 χ^2 は次のように定義する。[10]

$$\chi^2 = \sum_k^{n_{tele}} \left\{ \sum_i^n (WID(i) \times q(i)) + \frac{(DIS_{IP} - \langle DIS \rangle)^2}{\sigma_{DIS}^2} \right\} \quad (2.10)$$

$WID(i)$: イメージ重心と IP を結ぶ直線に対する各 pixel の width 成分

$q(i)$: 各 pixel に入った光量

DIS_{ip} : イメージ重心から IP までの距離

$Distance$: 天体ごとに決まるイメージパラメータ DISTANCE の平均値

σ_{DIS} : DISTANCE の標準偏差

とする。ガンマ線イベントなので、Width は小さく、Distance は天体の平均に近い値を持つように、IP の周りの任意の点にたいして、 χ^2 が最小になるような点を探し、新しい IP とする。

図は天頂角 60° のシミュレーションデータで IPfit を行ったものである。このように IPfit は大天頂各の天体に有効であるが、解析に使用する際にはシミュレーションして、解析する天体にたいして有効であることを確認することが必要である。

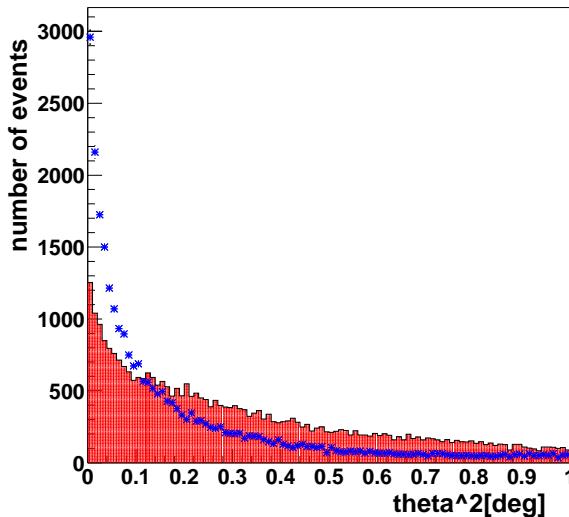


Figure 2.16: IP fit 前後の θ^2 分布

Chapter 3

シミュレーション

本研究では、数 $10TeV$ 以上に特化したチェレンコフ望遠鏡の設計に関する基礎的なシミュレーションを行う。そこで、シミュレーションの基本的な流れを示す。

- CORSIKA というエアシャワーのパッケージソフトを用いる。
- かに星雲の flux をモデルとしたガンマ線のイベントを発生させる。
- 宇宙線バックグラウンドの flux をモデルとしたプロトンのエアシャワーを発生させる。
- 作成した望遠鏡のシミュレーターで、発生させたそれぞれのシャワーのデータを受け取る。
- 望遠鏡で取得したデータから、解析に使えるデータをセレクションし、イメージング法を用いて、シャワーの到来方向を求める。
- バックグラウンドのプロトンに対して、どの程度の有意度で観測できるかを調べる

以上の行程を、望遠鏡の設計を変更して繰り返し行い、最適な設計を探る。

3.1 CORSIKA 概要

CORSIKA (COsmic Ray SImulations fo KAscade) [17] とは、高エネルギー宇宙線が大気と相互作用して生成するエアシャワーの発達と特性の研究のために開発されたモンテカルロシミュレーションパッケージである。様々な研究に応用できるよう、多様なオプションが用意されているが、大まかに次のような特徴がある。

- $10^{20}eV$ 程度までのエネルギーの粒子のシャワーをシミュレートできる
(入射粒子のエネルギースペクトルの幕を設定することもできる)
- 入射粒子の種類として、ガンマ線、電子、陽電子、プロトン、その他様々な粒子がある

- カスケードの相互作用モデルとして、低エネルギーと高エネルギーの2種類のモデルを選択できる
- 地球近傍の磁場を考慮することができる
- 地球上の様々な地点をモデルとした大気を考慮することができる。
(高度による大気圧の変化や、元素素性など)
- いくつかの形状の検出器を空間上の任意の位置に設置できる
- 出力情報としては、シャワーの発達の様子、検出器上に到達したシャワーの情報が得られる。

本研究では、CORSIKAによって、地表でのチエレンコフ光の情報を得ることにした。詳細な情報としては、

- 地表に到達したときのチエレンコフ光の光量
- 地表に到達した時点のチエレンコフ光の位置情報
- 地表に到達した時点でのチエレンコフ光の進行方向
- 最初に相互作用した時からのタイミング情報

である。

バージョン

本研究に用いたバージョンは 6.720 である。

オプション

本研究に用いたオプションは、

オプション名	説明
QGSJET	高エネルギーの相互作用モデル
GHEISHA	低エネルギーの相互作用モデル
cherenkov	チエレンコフ光のデータを出力

Table 3.1: CORSIKA のオプション

である

3.2 解像型チェレンコフ望遠鏡のシミュレーター

3.2.1 高エネルギーに特化した望遠鏡

望遠鏡のシミュレーターを作成する上で、どのような方針で設計のパラメータを決めれば高エネルギーに特化した望遠鏡をシミュレートできるか考察する。高エネルギーのガンマ線を観測する上で、一番の問題点は当来頻度が非常に少ないことがある。そのため、十分な量のデーターを集めることは非常に時間がかかる。さらに、バックグラウンドの除去が難しくなる。図 3.1 に代表的なガンマ線天体である、かに星雲が発生するガンマ線の微分 flux を示す。

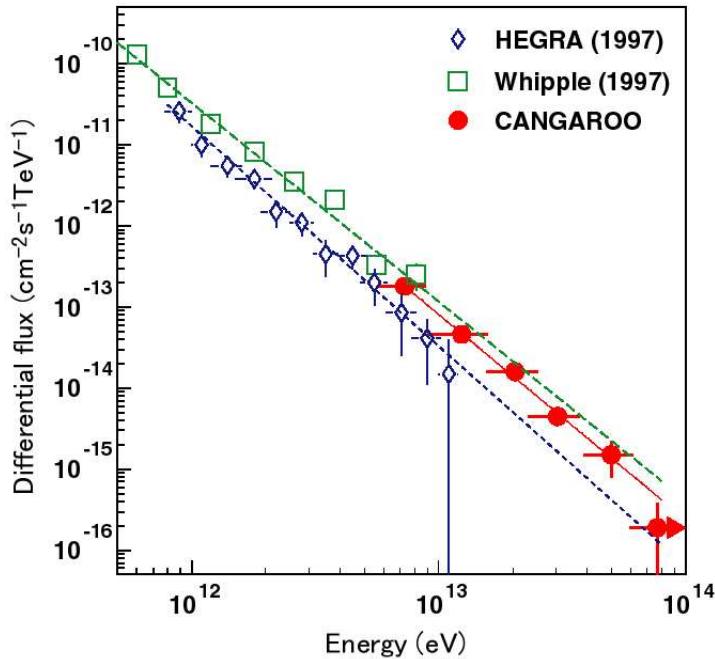


Figure 3.1: カニ星雲/パルサーの微分 FLUX

短時間で当来頻度の少ないガンマ線の十分な量のデーターを得るためにには、観測可能な面積(有効面積)を増やしてやればよい。ガンマ線を検出するためには図 3.2 のようにチェレンコフ光が作るライトプールのなかに望遠鏡がなければいけない。そのため、有効面積を増やすためには、広く望遠鏡を分布させなければならない。この時、なるべく望遠鏡の数を増やしてやるのが良いのだが、チェレンコフ望遠鏡は 1 台建設するのにも数億円規模で建設費がかかるため、できるだけ少ない台数で最大限に有効面積を増やすことを考える。少ない望遠鏡で、最大限に有効面積を広げるためには望遠鏡の間隔を広げることになる。ガンマ線が作るシャワーブールの半径はエネルギーが大きくなればある程度まで広がる(図 3.3 それぞれ、100TeV、50TeV、10TeV、1TeV を鉛直方向から入射)ので、高エネルギーのガンマ線イベントにしぼって観測することにすれば、ある程度望遠鏡の間隔を広げても、解析に十分な光量が得られる。ただし、シャワー軸から離れた地点に到達する光は、シャワー軸方向にたいして傾いてしまうので、この光を観測するためにはより広視野な望遠鏡にする必要がある。(図 3.4、3.5、3.6 はそれぞれ、垂直に入射したガンマ線のシャワー軸から 100m, 200m, 300m の距離に設置した望遠鏡のカメラ面のイメージ)さらに、それぞれの望遠鏡の細かな性能を向上させることによっても検出効率を向上させる。

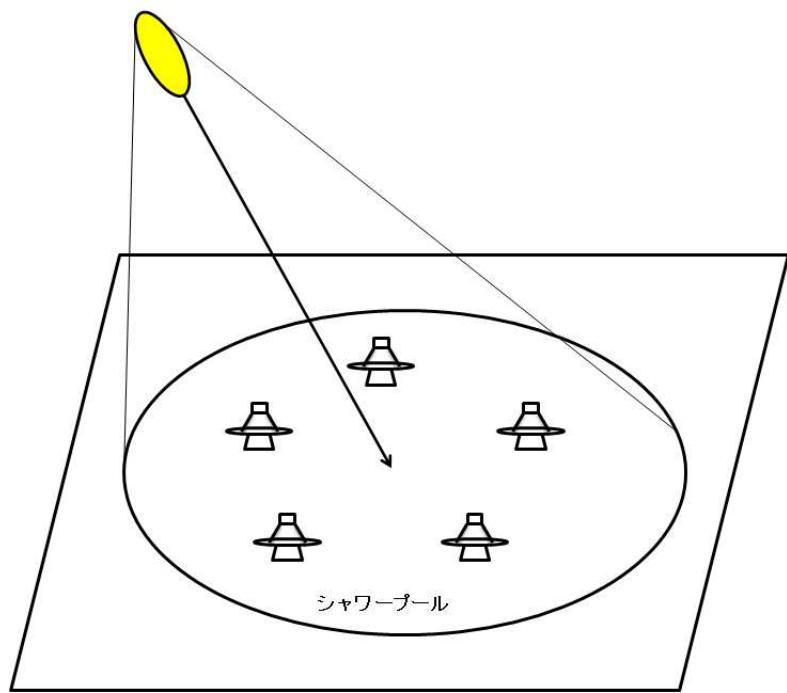


Figure 3.2: ガンマ線の作るチエレンコライトプール

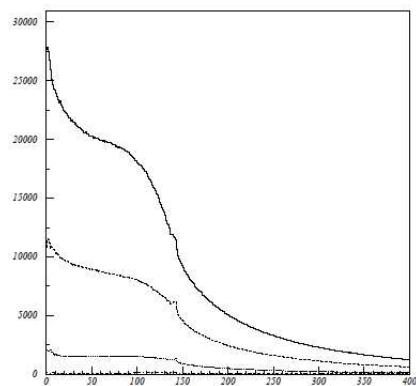


Figure 3.3: 距離と光密度のヒストグラム (縦: $p.e/m^2$ 横:m)

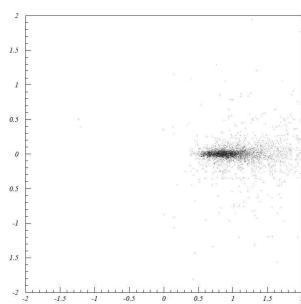


Figure 3.4: シャワー軸から
100m

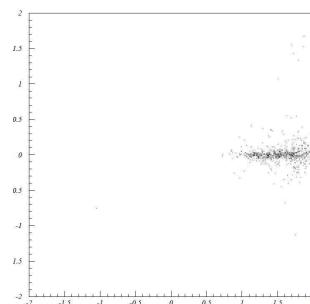


Figure 3.5: シャワー軸から
200m

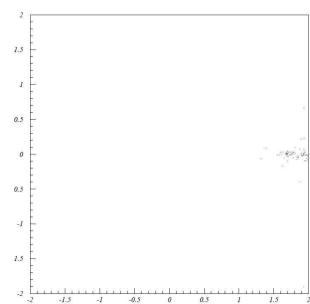


Figure 3.6: シャワー軸から
300m

3.2.2 望遠鏡シミュレーターの基本的なアルゴリズムと設定

望遠鏡のシミュレーターは大まかに次のようなアルゴリズムで動いている

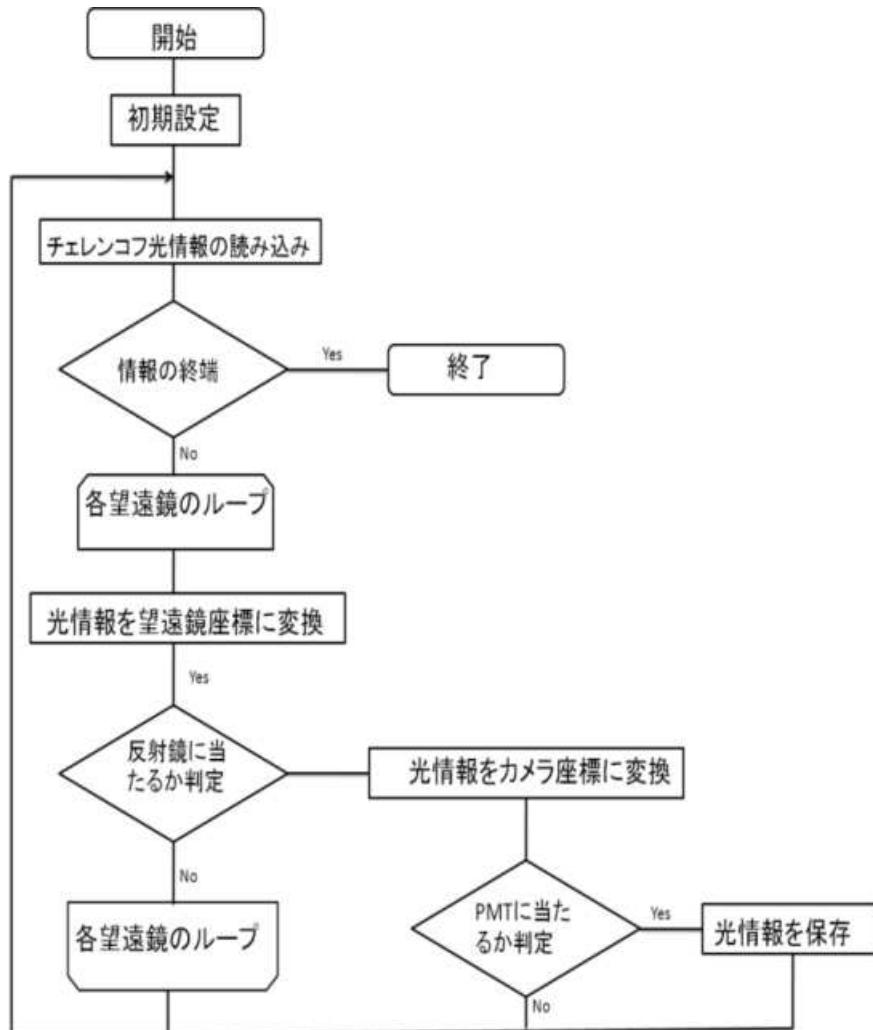


Figure 3.7: 望遠鏡シミュレーターの基本的なアルゴリズム

最終的に出力されるのは、各望遠鏡の各 PMT にはどのくらいの光量がどのタイミングで入ったかという情報である。

初期設定

まず設置する望遠鏡のパラメータを設定する。指定する項目は以下の通りである。

- 望遠鏡の設置台数
- 望遠鏡の設置座標 (CORSIKA 座標上)
- 望遠鏡の口径
- 望遠鏡の焦点距離を指定

- 反射鏡となる小さな鏡の半径
- 反射鏡の反射率
- カメラの視野半径
- 光電子増倍管一本あたりの視野半径
- 光電子増倍管の量子効率
- 望遠鏡の視線方向 (オイラー角で指定)

以上のパラメータは各望遠鏡ごとに設定可能である。

望遠鏡の設置形態は、今回のシミュレーションでは図のように六方細密に設置した 7 台によるステレオ観測に固定する。

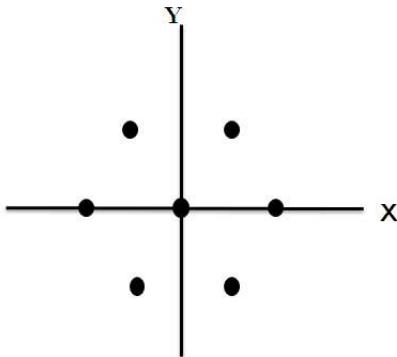


Figure 3.8: 望遠鏡の設置位置

また、望遠鏡の反射鏡とカメラ部分はそれぞれ図 3.9 のような六方細密形にセットされ、小鏡の枚数と、光電子増倍管の本数は R と r によって自動的に決定する。(ただし、 R は望遠鏡の半径もしくはカメラの視野半径、 r は反射鏡の小鏡もしくは光電子増倍管一本の視野半径) さらに、小鏡および光電子増倍管には図 3.10 のように、それぞれに ID を付ける。

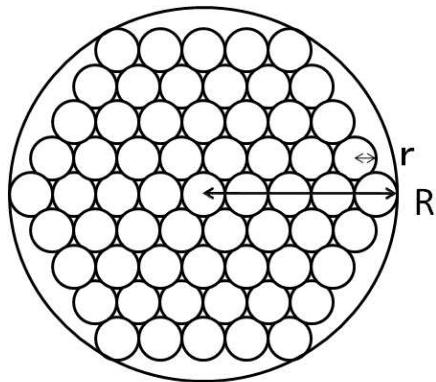


Figure 3.9: 反射鏡、カメラのピクセルの並べ方

0	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
15	16	17	18	19	20	21
24	25	26	27	28	29	30
34	35	36	37	38	39	40
45	46	47	48	49	50	51
57	58	59	60	61	62	63
70	71	72	73	74	75	76
82	83	84	85	86	87	88
93	94	95	96	97	98	99
103	104	105	106	107	108	109
112	113	114	115	116	117	118
120	121	122	123	124	125	126

Figure 3.10: 小鏡、光電子増倍管の ID

3.3 イベントセレクション

今回のシミュレーションでは先にも述べた通り、7台の望遠鏡によるステレオ観測を想定している。そこで、イベントを取得する条件として、以下のような Local Trigger と Global Trigger を定義し、Global Trigger を満たすものをイベントとして識別する。

Local Trigger とは各望遠鏡がそれぞれ満たすべき条件で、Global Trigger とは、複数台の望遠鏡の信号を使った Trigger である。

このような Trigger 条件を設定することによって、実際の観測ではハードウェアの段階である程度のバックグラウンドをカットすることが可能となる。

3.3.1 Local Trigger

各望遠鏡が満たすべき条件として、

- 接する 3 本の PMT が同時にある値以上の光量を感知した場合。
- PMT 全体である値以上の光量を感知した場合。

を定義する。(ただし、それぞれの閾値は、望遠鏡の設定によって異なる)

1番めの条件は、主に夜光を除去するための設定である。夜光は、暗い面では、PMT 1 本(0.17deg の場合)で、およそ 2~3p.e 程度、銀河面のような明るい場所でも 4p.e 程度である。また、夜光イベントの場合では、ガンマ線イベント異なり、まとまってヒットすることはまれである。

2番目の条件は、プロトンによるバックグラウンドを除去するための条件である。ガンマ線のイベントは高エネルギーであれば、比例して光も増える。このことを利用して、ターゲットのエネルギー領域より小さなイベントを捨てることによって、同時に大量のプロトンによるバックグラウンドも除去できる。

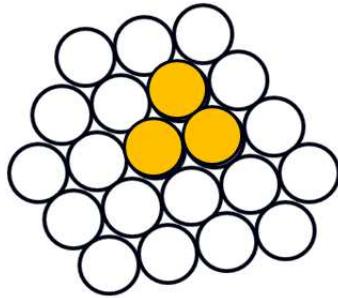


Figure 3.11: Local Trigger 条件

3.3.2 Global Trigger

望遠鏡全体で満たすべき条件として

- 一つのイベントに対して、同時に 2 台以上で Local Trigger 条件を満たす

を定義する。

この条件により、ハードウェア的には、ミューオンのイベントを除去することができる。多くのミューオンは地表面付近で、チエレンコフ光を放射するために、ミューオンによるチエレンコフリングは、ガンマ線によるそれよりも小さくなる。そのため、複数台で同時に観測するという条件を付けるとかなりのミューオンイベントを除去することが可能となる。[21]

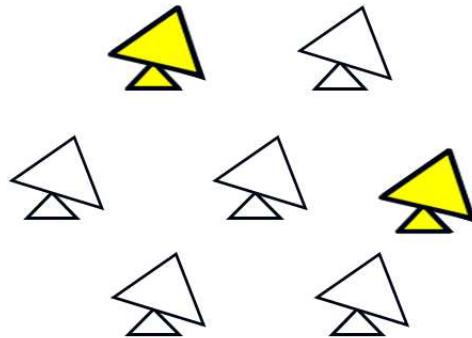


Figure 3.12: Global Trigger 条件

3.4 到来方向の決定

望遠鏡のシミュレータから出力されるガンマ線イベントとバックグラウンドイベントの情報から、それぞれ先ほどの Global Trigger 条件を満たすイベントを選びだし、イメージング法と IP fit を用いて到来方向を決定する。もし、Global Trigger 条件を満たす望遠鏡が三台以上あった場合は、図 3.13 の θ が 90° に一番近くなるような 2 台を選んで到来方向を求める。 θ が 90° から遠くなるほど決定精度は悪くなる。

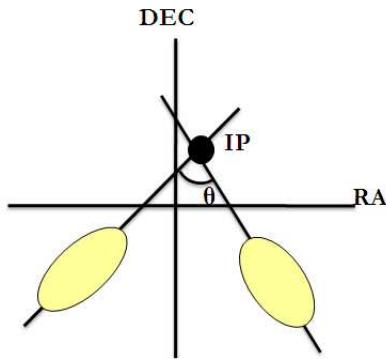


Figure 3.13: 二つの像のなす角度

また、観測時間については、CORSIKA には時間の概念がない（相互作用してからのタイミング情報はある）ので、ガンマ線イベントとバックグラウンドイベントのそれぞれの実際の FLUX から、観測時間、面積、立体角あたりのイベント数を計算し、重みを付ける。ガンマ線イベントとバックグラウンドイベントの微分フラックスの式はそれぞれ 3.1、3.2 とする。本研究では観測時間を 50 時間に固定する。

$$\text{diff flux} = AE^{-2.5} \quad [\text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}] \quad (3.1)$$

$$\text{diff flux} = BE^{-2.7} \quad [\text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}] \quad (3.2)$$

E:入射エネルギー

A,B:定数

Chapter 4

シミュレーション結果

4.1 Crab をモデルにした天源のシミュレーション

4.1.1 基本的なパラメータによるシミュレーション

まず、基準となる設定の望遠鏡での結果を示す。基準となるパラメータは表 4.1.1 に示す。ただし、入射するガンマ線は全てのシミュレーションで、天頂方向から、50TeV 600TeV の範囲のかに星雲をモデルとした FLUX とし、観測時間は 50 時間とする。

望遠鏡パラメータ	値
望遠鏡同士の間隔	100 m
望遠鏡の口径	10.4 m
小鏡の半径	40 cm (127 枚)
小鏡の反射率	0.7
カメラ視野半径	3.0 degree
PMT 一本の視野半径	0.17 degree (217 pixcel)
PMT の量子効率	0.25

Table 4.1: 望遠鏡の基本設定

とする。また、3-3 で定めた Local Trigger 条件の値を決めるために、光電子増倍管に入る光量の分布を調べた。Local Trigger 条件の 1 番と 2 番を充たすものの光量は図 4.1 のようになっている。この図より Local Trigger 条件の 3 番目を 1200p.e とする。ただし、この条件によって 3 割程度のガンマ線イベントもカットしてしまう。これ以降の設定についても、同様にカット条件をきめることとする。

さらに、ガンマ線イベントとバックグラウンドイベントの IP-fit 後の θ^2 分布はそれぞれ図 4.2、4.3 のようになっている。

0.01° 以下をガンマ線イベントと識別するとガンマ線イベントのバックグラウンドイベントに対する統計的有意度は以下の表の様になる。

ガンマ線のイベント数	64.34 event
バックグラウンドのイベント数	122.09 event
統計的有意度	5.82 σ

Table 4.2: 望遠鏡の基本設定

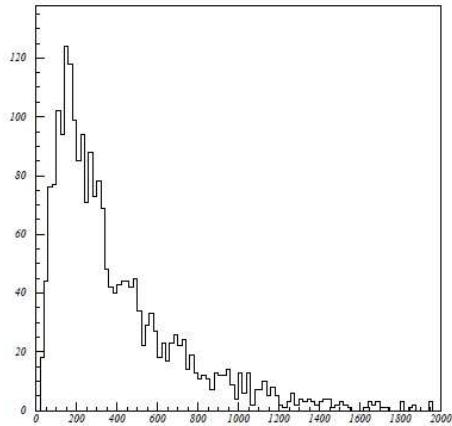


Figure 4.1: バックグラウンドイベントによる光量 (縦軸: イベント数 横軸: 光量)

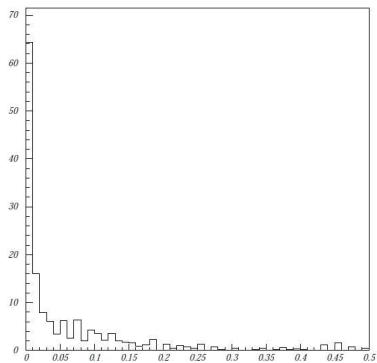


Figure 4.2: ガンマ線 θ^2

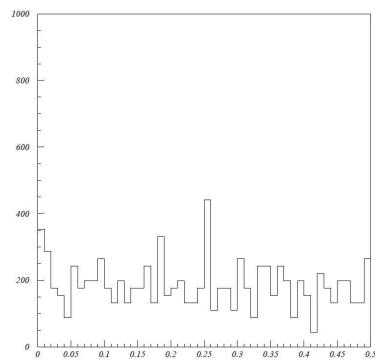


Figure 4.3: バックグラウンド θ^2

ただしバックグラウンドに対する統計的有意度 S の計算は以下のようにおこなうものとする。

$$S = \frac{N_{on}}{\sqrt{N_{off}}} \quad (4.1)$$

N_{on} :ガンマ線のイベント数
 N_{off} :バックグラウンドのイベント数

以下のセクションではカメラのピクセル密度、カメラ視野、望遠鏡の口径を変化させた場合の結果を示す。

4.1.2 望遠鏡間隔とカメラ視野の変化

望遠鏡の間隔を 100m、200m、300m の 3通りについて、シミュレーションした。望遠鏡の間隔を広げることによって、有効面積が増加し有効イベント数が増加すると考えられる。そのさいに、各間隔で、カメラの視野半径を 3° 、 4° 、 5° 、 6° の場合についてもシミュレーションする。そのほかの設定については、基本の設定でシミュレーションをおこなう。結果を以下の表に示す。ただし、イベント増加率は、100m の場合に対するガンマ線イベントの増加率である。

視野半径 3°

望遠鏡の間隔	100m	200m	300m
ガンマ線イベント数	64.34	78.73	96.15
バックグラウンドイベント数	122.09	343.95	218.27
統計的有意度	5.82σ	4.24σ	6.51σ
イベントの増加率	100%	122.36%	149.44%

Table 4.3: 視野半径 3° (Local Trigger 3 = 1200p.e)

視野半径 4°

望遠鏡の間隔	100m	200m	300m
ガンマ線イベント数	89.06	106.19	130.30
バックグラウンドイベント数	103.09	218.27	165.38
統計的有意度	8.77σ	7.18σ	7.47σ
イベントの増加率	100%	119.23%	146.30%

Table 4.4: 視野半径 4° (Local Trigger 3 = 1200p.e)

視野半径 5°

望遠鏡の間隔	100m	200m	300m
ガンマ線イベント数	111.31	143.41	172.99
バックグラウンドイベント数	104.94	384.95	275.60
統計的有意度	10.87σ	7.31σ	10.42σ
イベントの増加率	100%	128.88%	155.38%

Table 4.5: 視野半径 5° (Local Trigger 3 = 1400p.e)

望遠鏡の間隔	100m	200m	300m
ガンマ線イベント数	142.41	173.80	213.87
バックグラウンドイベント数	104.51	373.51	132.29
統計的有意度	13.93σ	9.00σ	12.67σ
イベントの増加率	100%	122.04%	150.17 %

Table 4.6: 視野半径 6° (Local Trigger 3 = 1400p.e)

視野半径の変化によるガンマ線イベントの増加割合 (視野半径 3deg の場合を 100% とする)

視野半径	望遠鏡の間隔		
	100m	200m	300m
3deg	100 %	100%	100%
4deg	140.61 %	134.88 %	135.52 %
5deg	173.0 %	182.15%	179.92 %
6deg	221.34%	220.61%	222.43 %

Table 4.7: 視野半径の変化によるガンマ線イベントの上昇率

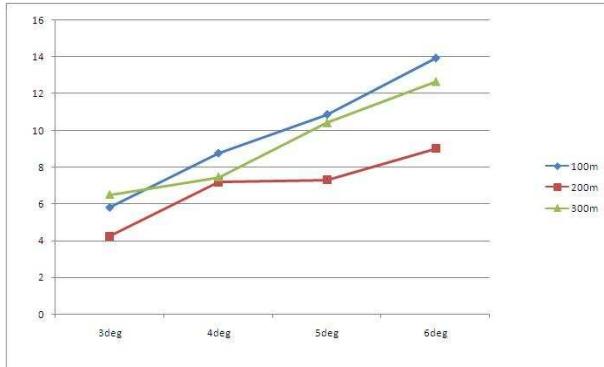


Figure 4.4: カメラ視野と統計的有意度 (縦軸: 有意度 横軸: カメラ視野)

望遠鏡の距離を 100m～300m まで、広げることによっておよそ 150% ほどガンマ線の有効イベントを増加させることができた。しかし、それ以上に同時にバックグラウンドが増加し、統計的優位度の向上は認められなかった。その理由としては、望遠鏡を離すことによって、一定の方向からのバックグラウンドイベントが増えたために、バックグラウンド有効イベントが増えたのではないかと考えられる。

カメラ視野を広げた場合について見る図 4.4 からもわかるように、カメラの視野半径を広げるとそれにともなって、統計的優位度も向上している。この結果が次のような理由が考えられる。一つには視野を広げることによって遠くで発生した（視野方向から傾いて入射してくれる）イベントを拾うことができるようになるため、ガンマ線の有効イベントは増えるためである。(図) それと同時に、集められる光の量は変化しないため、バックグラウンドの有効イベントはそれほど増加しないと考えられる。

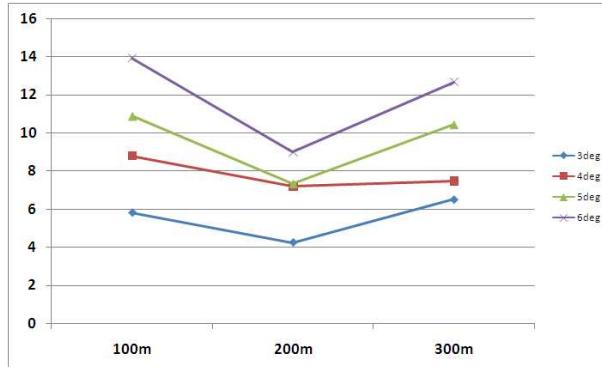


Figure 4.5: 望遠鏡間隔と統計的有意度 (縦軸: 有意度 横軸: 望遠鏡間隔)

4.1.3 CAMERA pixcel の変化

カメラの視野半径を 3° に固定し、各光電子増倍管の視野半径を 0.06° 、 0.085° 、 0.17° と変化させシミュレーションした。そのほかの設定に関しては、基本設定と同様である。ピクセルを増やすことによって、カメラ面での像が鮮明になり、決定精度が増と考えられる。結果を以下の表にしめす。

PMT 視野 (pixcel 数)	0.06° (1801 本)	0.085° (919 本)	0.17° (212 本)
ガンマ線イベント数	53.36	53.31	64.34
バックグラウンドイベント数	75.35	87.66	122.09
統計的有意度	6.15σ	5.69σ	5.82σ

Table 4.8: PMT 視野半径 0.06° 0.085° 0.17° (Local Trigger 3 = 1200p.e)

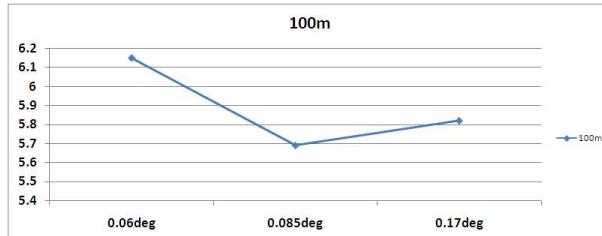


Figure 4.6: pixcel size と統計的有意度 (縦軸: 有意度 横軸: pixcel size)

カメラ視野を変えずにカメラピクセルを増やして角度分解能の向上を試みたが、今回のシミュレーションではもともと角度分解能の良い天頂方向の天源の場合についてシミュレーションしたためか、統計的優位度の向上は認められなかった。天頂方向以外の天源にたいしては、どの程度有効性があるか今後調べる必要がある。

4.1.4 TELESCOPE RADIUS の変化

望遠鏡の口径を、10.4m、16.0m、20.0m の場合について、シミュレーションした。さらに各場合について、望遠鏡の間隔も 100m、200m、300m の場合をシミュレーションした。望遠鏡の口径を大きくすることによって、取得する光量が増加するため、イメージパラメータの精度が向上し、決定精度が良くなると考えられる。また、低エネルギーのイベントも取得できるようになるため、エネルギー閾値を下げるには有効であるが、本研究では低エネルギーのイベントはカットしてしまうため、エネルギーースレッシュホールドを下げても意味はない。そのほかの設定に関しては基本設定と同様である。

□径 10.4m

望遠鏡の間隔	100m	200m	300m
ガンマ線イベント数	64.34	78.73	96.15
バックグラウンドイベント数	122.09	343.95	218.27
統計的有意度	5.82σ	4.42σ	6.51σ
イベントの増加率	100%	122.36%	149.44%

Table 4.9: 10.4m (Local Trigger 3 = 1200p.e)

□径 16.0m

望遠鏡の間隔	100m	200m	300m
ガンマ線イベント数	65.41	83.61	101.17
バックグラウンドイベント数	132.29	220.92	189.40
統計的有意度	5.69σ	5.63σ	7.39σ
イベントの増加率	100%	127.82%	154.67%

Table 4.10: □径 16.0 (Local Trigger 3 = 2100p.e)

□径 20.0m

望遠鏡の間隔	100m	200m	300m
ガンマ線イベント数	60.81	84.61	108.58
バックグラウンドイベント数	156.10	262.37	167.56
統計的有意度	4.86σ	5.44σ	8.39σ
イベントの増加率	100%	139.14%	178.56%

Table 4.11: □径 20.0m (Local Trigger 3 = 3000p.e)

望遠鏡の口径を広げるとそれにともなって、バックグラウンドも大量に増えてしまい結局増加したイベントの大部分をバックグラウンドとともにカットすることになってしまった。そのため、高エネルギーにしぼった場合には大口径化による統計的優位度の向上は難しいことがわかった。

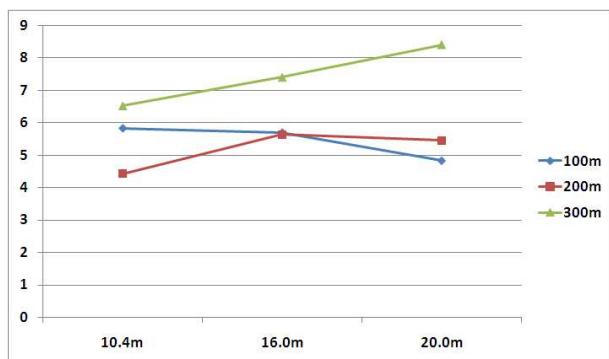


Figure 4.7: 望遠鏡の口径と統計的有意度 (縦軸: 有意度 横軸: 口径)

Chapter 5

まとめ

本論文では、シミュレーションによって数 10TeV 以上のガンマ線に感度を持った解像型チエレンコフ望遠鏡の基礎的な設計について探った。その結果についてまとめる

- 望遠鏡の間隔を 100m~300m まで、変化させることによってステレオ観測による有効検出面積を広げることを試みた。その結果ガンマ線の有効イベントは、150% ほど向上したが、それにともない、バックグラウンドも大幅に増えたため、統計的な優位度の向上は認められなかった。
- 望遠鏡のカメラ視野を広げることによって一台一台の検出有効面積を広げることを試みた。その結果視野半径を 3° ~ 6° まで、変化させることで、バックグラウンドイベントの増加を抑えながらガンマ線イベントを 220% ほど増大させることに成功し、飛躍的にガンマ線イベントの優度を向上させることができた。
- カメラピクセルを増やすことによって角度分解能を向上させることを試みたが、はっきりとした性能の向上は認められなかった。今回は天頂方向からの天源によるシミュレーションを行ったため、角度分解能が非常に良く、これ以上の向上は望めないと思われる。
- 望遠鏡の口径を大きくすることによって取得する光量を増やすことを試みたが、同時にバックグラウンドも大量に増加してしまい、ほとんどカットしなければならない。そのため、今回の目的のように高エネルギーにしぼった観測を行う場合には有効とはいえない。

以上のことから、高エネルギーのガンマ線に感度を持った望遠鏡を建設するには、カメラ視野を広げることが非常に有効であることがわかった。しかし、最適な設計を決定するためには、望遠鏡の間隔を 300m 以上広げた場合のバックグラウンドの有効イベントの変化についてもう少し探る必要がある。また、望遠鏡の設置台数を増やした場合に、どの程度性能の向上が望めるのかを調べる必要がある。

謝辞

まず、本研究にあたりご多岐にわたりご指導して頂きました郡司修一先生に深く感謝いたします。学部時代から3年もの間、この電磁気学研究室の恵まれた環境で研究活動をさせていただいたことに大変感謝いたします。

また大学生活を通じて大変お世話になった櫻井敬先生、門叶冬樹先生に心より感謝いたします。

CANGAROO グループの皆様に深く感謝いたします。特に森正樹先生、吉越貴紀先生、湯川洋平さん、水上拓さんにはウーメラでの生活、観測中に大変お世話になり勉強させていただきました。

菊地聰さん、岸元祐二さん、鈴木佳代さん、高橋唯さんに心より感謝いたします。特に菊地聰さん、岸元祐司さんにおかれましては、お忙し中アドバイスをいただき、何度もピンチを助けて頂きました。同期の石川優詩さん、佐藤太一さん、高田真さんには、学部時代から様々な面で助けていただき大変感謝しています。東海林礼之さん、田中祐磨さん、渡部一真さん、4年生のみなさんに深く感謝します。みなさんのおかげで楽しい研究生活を送ることができました。

最後に常に研究生活を支えてくれた両親に深く感謝いたします。

Appendix A

イメージパラメータ

イメージパラメータは Hillas ら Whipple グループによって提唱されて、イメージング解析に広く用いられるようになった。本論文で用いた定義は以下の通りである。 i 番目の PMT のカメラ面での座標を (x_i, y_i) としたとき (単位は度)、 i 番目の PMT が捉えた光量を s_i とすると、

$$\langle x \rangle = \frac{\sum_i s_i x_i}{\sum_i s_i}, \quad \langle y \rangle = \frac{\sum_i s_i y_i}{\sum_i s_i} \quad (\text{A.1})$$

$$\langle xy \rangle = \frac{\sum_i s_i x_i y_i}{\sum_i s_i}, \quad \langle x^2 y \rangle = \frac{\sum_i s_i x_i^2 y_i}{\sum_i s_i}, \quad \langle xy^2 \rangle = \frac{\sum_i s_i x_i y_i^2}{\sum_i s_i} \quad (\text{A.2})$$

$$\langle x^2 \rangle = \frac{\sum_i s_i x_i^2}{\sum_i s_i}, \quad \langle y^2 \rangle = \frac{\sum_i s_i y_i^2}{\sum_i s_i}, \quad \langle x^3 \rangle = \frac{\sum_i s_i x_i^3}{\sum_i s_i}, \quad \langle y^3 \rangle = \frac{\sum_i s_i y_i^3}{\sum_i s_i} \quad (\text{A.3})$$

このように、それぞれの平均値が計算できる。 $(\langle x \rangle, \langle y \rangle)$ はイメージの重心座標である。これらの値を用いてそれぞれの分散を求める。

$$\sigma_{x^2} = \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2, \quad \sigma_{xy} = \langle xy \rangle - \langle x \rangle \langle y \rangle, \quad \sigma_{y^2} = \langle y^2 \rangle - \langle y \rangle^2 \quad (\text{A.4})$$

$$\sigma_{x^3} = \langle x^3 \rangle - 3\langle x^2 \rangle \langle x \rangle + 2\langle x \rangle^3 \quad \sigma_{y^3} = \langle y^3 \rangle - 3\langle y^2 \rangle \langle y \rangle + 2\langle y \rangle^3 \quad (\text{A.5})$$

$$\begin{aligned} \sigma_{x^2 y} &= \langle x^2 y \rangle - 2\langle xy \rangle \langle x \rangle - \langle x^2 \rangle \langle y \rangle + 2\langle x \rangle^2 \langle y \rangle \\ \sigma_{xy^2} &= \langle xy^2 \rangle - 2\langle xy \rangle \langle y \rangle - \langle x \rangle \langle y^2 \rangle + 2\langle x \rangle \langle y \rangle^2 \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

そしてこれを用いて

$$d = \sigma_{y^2} - \sigma_{x^2}, \quad z = \sqrt{d^2 + 4\sigma_{xy}^2} \quad (\text{A.7})$$

を定義すると、WIDTH と LENGTH は

$$WIDTH = \sqrt{\frac{\sigma_{x^2} + \sigma_{y^2} - z}{2}} \quad (\text{A.8})$$

$$LENGTH = \sqrt{\frac{\sigma_{x^2} + \sigma_{y^2} + z}{2}} \quad (\text{A.9})$$

のように書ける。

また DISTANCE は (x_s, y_s) にあるソースからの距離を表すので、DISTANCE ベクトル $\vec{D} = (D_x, D_y)$ は

$$\vec{D} = (x_s - \langle x \rangle, y_s - \langle y \rangle) \quad (\text{A.10})$$

であるから、

$$DISTANCE = \sqrt{(x_s - \langle x \rangle)^2 + (y_s - \langle y \rangle)^2} \quad (\text{A.11})$$

となる。

橢円近似した際の長軸方向の単位ベクトル $\vec{u} = (u_x, u_y)$ は以下のように書ける。

$$\vec{u} = \left(\sqrt{\frac{z-d}{2z}}, \operatorname{sign}(\sigma_{xy}) \sqrt{\frac{z+d}{2z}} \right) \quad (\text{A.12})$$

したがって ALPHA は以下のように求められる。

$$ALPHA = \cos^{-1} \left(\frac{u_x D_x + u_y D_y}{DISTANCE} \right) \quad (\text{A.13})$$

また、ASYMMETRY は

$$ASYMMETRY = \operatorname{sign}(\vec{A} \cdot \vec{D}) \frac{|\sigma_A|}{LENGTH} \quad (\text{A.14})$$

$$= \frac{\vec{A} \cdot \vec{D}}{DISTANCE \cdot LENGTH \cdot \cos(ALPHA)} \quad (\text{A.15})$$

と定義される。ここで

$$\vec{A} = (x_a, y_a) = -\sigma_A \vec{u} \quad (\text{A.16})$$

$$\sigma_A = (\sigma_x^3 \cos^3 \phi + 3\sigma_{x^2 y} \cos^2 \phi \sin \phi + 3\sigma_{xy^2} \cos \phi \sin^2 \phi + \sigma_y^3 \sin^3 \phi)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{A.17})$$

であり、 ϕ はベクトル \vec{u} の x 軸に対する角度である。最後に、CONCENTRATION は最も大きな二つの PMT 信号を S_1, S_2 としたとき

$$CONCENTRATION = \frac{S_1 + S_2}{\sum_i s_i} \quad (\text{A.18})$$

と定義される。

Appendix B

θ^2 について

もしバックグラウンドの宇宙線が望遠鏡の視線方向の 3° 以内の方向からランダムにふってきたとする。そのときの IP をプロットすると図 B.1 のようになる。

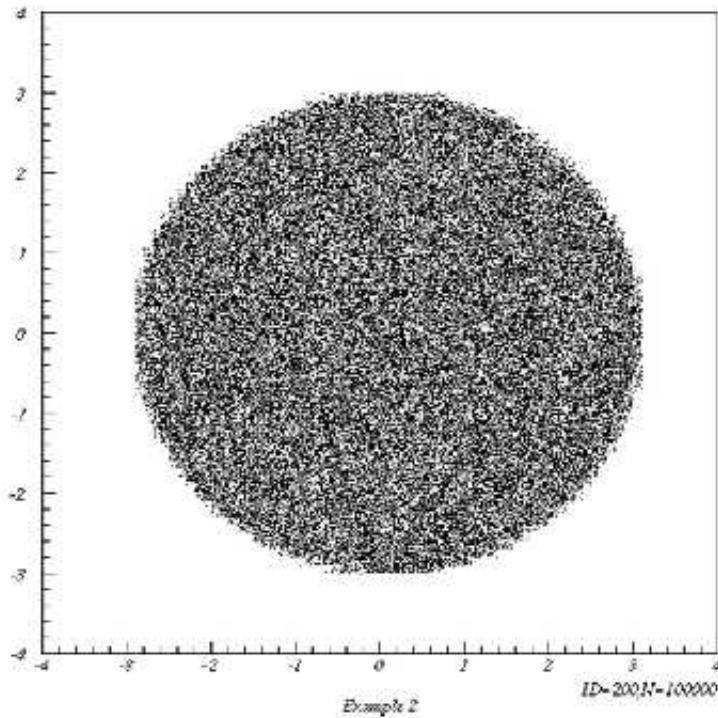


Figure B.1: camera 面でのバックグラウンド

そのときの θ^2 分布は図 B.2 のようになる。

θ^2 分布の θ^2 は

$$\theta^2 = \theta_x^2 + \theta_y^2 \quad (\text{B.1})$$

で定義されている。この θ^2 は、半径 $\sqrt{\theta_x^2 + \theta_y^2}$ の円の面積を π で割ったものに等しい。つまり、 θ^2 分布は面積の密度分布に比例した分布と言うことになる。そのため図 B.1 のように、一様な面積密度で分布している物の θ^2 分布は一定の分布となる。

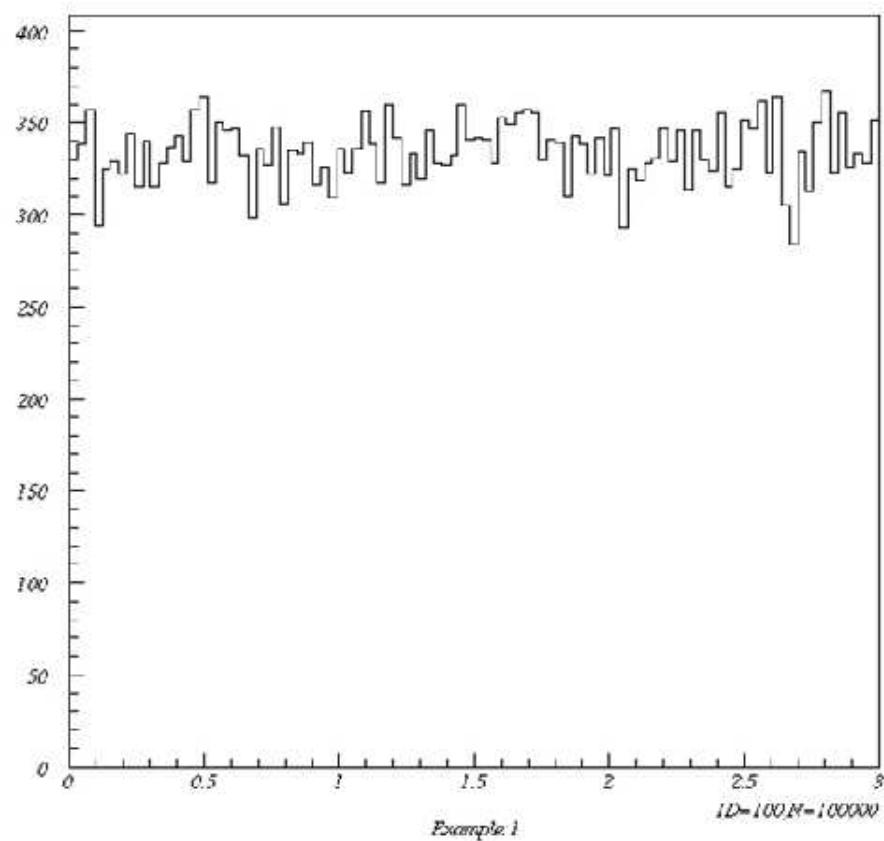


Figure B.2: バックグラウンドの THETA SQUARE

Appendix C

CORSIKA 導入マニュアル

エアシャワーシミュレーター CORSIKA の導入から簡単な使用方法をまとめた。なお本まとめは ver6.720 を対象としており、32bit 版 LINUX 環境への導入を想定している

C.1 CORSIKA の入手

CORSIKA は無償で手に入れられるが、許可された IP アドレスからでなければダウンロードすることはできない。そこで、まず登録された計算機を用意しなければならない。電磁気学研究室にある以下の 2 台に割り当てられた IP アドレスは既に登録してあるので、すぐに使うことができる。

- olympus
- kseyfert

新たに許可を得るには以下のどちらかメールアドレスに使用したい計算機のホスト名を送って許可してもらう。

- tanguy.pierog@ik.fzk.de
- dieter.heck@ik.fzk.de

なおメールを送った場合には数日中に登録完了の返信がくる。計算機が用意できたら、以下の流れでダウンロードする。実際にユーザーが入力するのは下線のついた部分である。

```
$ ftp ftp-ik.fzk.de
~~~~~
Trying 141.52.67.78
Connected to ftp-ik.fzk.de.
220 ftp-ik FTP server (Version [number & date]) ready.
Name (ftp-ik.fzk.de:username): anonymous [or ftp]
~~~~~
```

331 Guest login ok, send your complete e-mail address as password.

Password: your_mail_address < 実際の自分のメールアドレスを入力
~~~~~

230- Welcome to ftp-ik.fzk.de, the

230- \*\*\*\*\* I N F O and S O F T Server \*\*\*\*\*

230- Forschungszentrum Karlsruhe, Institut fuer Kernphysik

230- KASCADE Collaboration Karlsruhe

230-

230- current directory: / local time: [date & time]

230- You are user number # out of a possible total of 10 in our domain class

230- All transfers to and from ftp-ik.fzk.de are logged. If you don't like this

230- then disconnect now!

230-

230 Guest login ok, access restrictions apply.

Remote system type is UNIX.

Using binary mode to transfer files.

ftp > cd /pub/corsika/v670  
~~~~~

250 CWD command successful.

ftp > mget *
~~~~~

mget corsika-6735.tar.gz? y  
~

.

.

.

ftp > quit  
~~~~~

221-You have transferred # bytes in # files.

```
221-Total traffic for this session was # bytes in # transfers.
```

```
221-Thank you for using the FTP service on ftp-ik.
```

```
221 Goodbye.
```

C.2 インストール

CORSIKA 本体 (corsika-6720.tar.gz) をダウンロードできたらインストールしたいディレクトリに先ほどダウンロードしたファイルを移動し、

```
$ tar zxvf corsika-6720.tar.gz
```

とタイプして、ファイルを展開する。展開すると corsika-6720 というディレクトリができ、その中にある corsika-install というシェルを実行するとインストールが始まる。インストールする際に、目的に応じていくつかのオプションを選ぶことになるのであらかじめ doc ディレクトリ内のマニュアルを読み選択するオプションを決めておく。以下のインストールログでは以下のオプションを選んでいる。

- QGSJET 01C (高エネルギー側のハドロン相互作用モデル)
- GHEISHA 2002d (低エネルギー側のハドロン相互作用モデル)
- Cherenkov version for rectangular detector grid (平面の検出器によって検出したチエレンコフ光情報を出力)
- apply atm. absorption, mirror reflectivity & quantum eff ()

インストールログ

```
$ ./corsika-install
```

```
Compile CORSIKA in lib/Linux/ and copy executable in run/
```

```
checking whether to enable maintainer-specific portions of Makefiles... no
checking build system type... i686-pc-linux
checking host system type... i686-pc-linux
checking for a BSD-compatible install... /usr/bin/install -c
checking whether build environment is sane... yes
checking for gawk... gawk
checking whether make sets $(MAKE)... yes
checking for pgf77... no
checking for g77... g77
Following environment variables will be used ...
LIBS      = -L/home/otake/corsika/inst_test/corsika-6720/lib/Linux/lib
```

```
LDFLAGS =
CC =
CFLAGS = -g
CXX =
CXXFLAGS = -g
CPP =
CPPFLAGS =
F77 = g77
FFLAGS = -fbounds-check -g
Fortran optimization : -O0
checking for cc... cc
checking for C compiler default output... a.out
checking whether the C compiler works... yes
checking whether we are cross compiling... no
checking for suffix of executables...
checking for suffix of object files... o
checking whether we are using the GNU C compiler... yes
checking whether cc accepts -g... yes
checking for cc option to accept ANSI C... none needed
checking for style of include used by make... GNU
checking dependency style of cc... gcc3
checking for g++... g++
checking whether we are using the GNU C++ compiler... yes
checking whether g++ accepts -g... yes
checking dependency style of g++... gcc3
checking for ld used by GCC... /usr/bin/ld
checking if the linker (/usr/bin/ld) is GNU ld... yes
checking for /usr/bin/ld option to reload object files... -r
checking for BSD-compatible nm... /usr/bin/nm -B
checking for a sed that does not truncate output... /bin/sed
checking whether ln -s works... yes
checking how to recognise dependent libraries... pass_all
checking command to parse /usr/bin/nm -B output... ok
checking how to run the C preprocessor... cc -E
checking for egrep... grep -E
checking for ANSI C header files... yes
checking for sys/types.h... yes
checking for sys/stat.h... yes
checking for stdlib.h... yes
checking for string.h... yes
checking for memory.h... yes
checking for strings.h... yes
checking for inttypes.h... yes
checking for stdint.h... yes
checking for unistd.h... yes
checking dlfcn.h usability... yes
checking dlfcn.h presence... yes
checking for dlfcn.h... yes
```

```
checking for ranlib... ranlib
checking for strip... strip
checking for objdir... .libs
checking for cc option to produce PIC... -fPIC
checking if cc PIC flag -fPIC works... yes
checking if cc static flag -static works... yes
checking if cc supports -c -o file.o... yes
checking if cc supports -c -o file.lo... yes
checking if cc supports -fno-rtti -fno-exceptions... yes
checking whether the linker (/usr/bin/ld) supports shared libraries... yes
checking how to hardcode library paths into programs... immediate
checking whether stripping libraries is possible... yes
checking dynamic linker characteristics... GNU/Linux ld.so
checking if libtool supports shared libraries... yes
checking whether to build shared libraries... yes
checking whether to build static libraries... yes
checking whether -lc should be explicitly linked in... no
creating libtool
```

Welcome to the CORSIKA extraction macro

create an executable of a specific CORSIKA version

Please read the documentation for a detailed description of the options and how to use it.

Note : press Enter (blank line) to select an option followed by "(default)"

abschätzung für die einzelnen Konfigurationen

Which high energy hadronic interaction model do you want to use ?

- 1 - DPMJET 2.55
 - 2 - NEXUS 3
 - 3 - QGSJET 01C (default)
 - 4 - QGSJET II
 - 5 - SIBYLL 2.1
 - 6 - VENUS 4.12
 - 7 - EPOS

```
r - restart make  
x - exit make  
(only one choice possible)
```

3

```
select QGSJET QGSJETOLD
```

```
It will use program qgsjet01c.f (with enlarged commons) for linking  
checking for /home/otake/corsika/inst_test/corsika-6720/src/qgsjet01c.f... yes
```

```
-----
```

```
presently selected options are
```

```
UNIX BYTERECL QGSJET QGSJETOLD
```

```
-----  
Which low energy hadronic interaction model do you want to use ?
```

- 1 - FLUKA 2005/2006
- 2 - GHEISHA 2002d (default)
- 3 - UrQMD 1.3cr

```
r - restart make  
x - exit make  
(only one choice possible)
```

2

```
select GHEISHA
```

```
It will use program gheisha_2002d.f (double precision) for linking  
checking for /home/otake/corsika/inst_test/corsika-6720/src/gheisha_2002d.f... yes
```

```
-----
```

```
presently selected options are
```

```
UNIX BYTERECL QGSJET QGSJETOLD GHEISHA
```

```
-----  
which routine for date and time ?
```

- 1 - new date_and_time routine (default)
- 2 - old date routine
- 3 - timerc routine
- 4 - date and time for IBM risc
- 5 - old date routine for pgf77 or HP-UX

```
r - restart make  
x - exit make
```

(only one choice possible)

1

select new date_and_time routine

presently selected options are

UNIX BYTERECL QGSJET QGSJETOLD GHEISHA

which detector geometry do you have ?

- 1 - horizontal flat detector array (default)
- 2 - non-flat (volume) detector geometry
- 3 - vertical string detector geometry

r - restart make

x - exit make

(only one choice possible)

1

select flat detector (default)

presently selected options are

UNIX BYTERECL QGSJET QGSJETOLD GHEISHA

Which program version do you like ?

- 0 - standard version (flat detector) : reset options
- 1 - Cherenkov version for rectangular detector grid
- 2 - Cherenkov version for telescope system (using bernlohr C-routines)
- 3 - apply atm. absorption, mirror reflectivity & quantum eff.
- 4 - external atmosphere functions (table interpolation)
(using bernlohr C-routines)
- 5 - THINning version
- 6 - NEUTRINO version
- 7 - shower PLOT version (PLOTH) (only for single events)
- 72 - shower PLOT version 2 (PLOTH2) (only for single events)
- 8 - interaction test version (only for 1st interaction)
- 9 - SLANT depth instead of vertical depth for longi-distribution
- a - CURVED atmosphere version

b - UPWARD particles version

c - view-cone version

d - ANALysis HISTos & THIN (instead of particle file)

e - Auger-info file instead of dbase file

f - Auger-histo file & THIN

g - Auger Cherenkov longitudinal distribution

h - PRESHOWER version for EeV gammas

i - STACEE experiment output Cherenkov photons
(includes: CERENKOV CEFFIC THIN)

j - COMPACT particle output file

k - annitest cross-section version (obsolete)

l - LPM-effect without thinning

m - STACK INput of secondaries, no primary particle

n - primary neutrino version with HERWIG

p - ROOT particle OUTput file

o - FINISH SELECTION (default)

r - restart make

t - test version

x - exit make

(combinations of options are possible)

1

select CERENKOV

not compatible with: INTTEST ANAHIST AUGERHIST AUGCERLONG

not compatible with: COMPACT VOLUMECORR

- - - - -

presently selected options are

UNIX BYTERECL QGSJET QGSJETOLD GHEISHA CERENKOV

- - - - -

Which program version do you like ?

0 - standard version (flat detector) : reset options

1 - Cherenkov version for rectangular detector grid

2 - Cherenkov version for telescope system (using bernlohr C-routines)

3 - apply atm. absorption, mirror reflectivity & quantum eff.

4 - external atmosphere functions (table interpolation)
(using bernlohr C-routines)

5 - THINning version

6 - NEUTRINO version

7 - shower PLOT version (PLOTH) (only for single events)

72 - shower PLOT version 2 (PLOTH2) (only for single events)

8 - interaction test version (only for 1st interaction)
9 - SLANT depth instead of vertical depth for longi-distribution
a - CURVED atmosphere version
b - UPWARD particles version
c - view-cone version
d - ANALysis HISTos & THIN (instead of particle file)
e - Auger-info file instead of dbase file
f - Auger-histo file & THIN
g - Auger Cherenkov longitudinal distribution
h - PRESHOWER version for EeV gammas
i - STACEE experiment output Cherenkov photons
(includes: CERENKOV CEFFIC THIN)
j - COMPACT particle output file
k - annitest cross-section version (obsolete)
l - LPM-effect without thinning
m - STACK INput of secondaries, no primary particle
n - primary neutrino version with HERWIG
p - ROOT particle OUTput file

o - FINISH SELECTION (default)

r - restart make
t - test version
x - exit make
(combinations of options are possible)

3

select atmos. absorption, mirror reflectivity & quantum eff.
not compatible with: INTTEST CURVED AUGCERLONG

presently selected options are

UNIX BYTERECL QGSJET QGSJETOLD GHEISHA CERENKOV CEFFIC

Which program version do you like ?

- 0 - standard version (flat detector) : reset options

1 - Cherenkov version for rectangular detector grid
2 - Cherenkov version for telescope system (using bernlohr C-routines)
3 - apply atm. absorption, mirror reflectivity & quantum eff.
4 - external atmosphere functions (table interpolation)
(using bernlohr C-routines)
5 - THINning version
6 - NEUTRINO version

7 - shower PLOT version (PLOTSH) (only for single events)
72 - shower PLOT version 2 (PLOTSH2) (only for single events)
8 - interaction test version (only for 1st interaction)
9 - SLANT depth instead of vertical depth for longi-distribution
a - CURVED atmosphere version
b - UPWARD particles version
c - view-cone version
d - ANALysis HISTos & THIN (instead of particle file)
e - Auger-info file instead of dbase file
f - Auger-histo file & THIN
g - Auger Cherenkov longitudinal distribution
h - PRESHOWER version for EeV gammas
i - STACEE experiment output Cherenkov photons
(includes: CERENKOV CEFFIC THIN)
j - COMPACT particle output file
k - annitest cross-section version (obsolete)
l - LPM-effect without thinning
m - STACK INput of secondaries, no primary particle
n - primary neutrino version with HERWIG
p - ROOT particle OUTput file

o - FINISH SELECTION (default)

r - restart make

t - test version

x - exit make

(combinations of options are possible)

o

selection finished

Cherenkov light vertical (longitudinal) distribution option:

1 - photons counted only in the step where emitted (default)

2 - photons counted in every step down to the observation
level (compatible with old versions but inefficient)

3 - no Cherenkov light distribution at all

r - restart make

x - exit make

(only one choice possible)

1

Cherenkov light emission angle wavelength dependence

1 - emission angle is wavelength independent (default)

2 - emission angle depending on wavelength

```
r - restart make  
x - exit make  
(only one choice possible)
```

1

```
=====  
finally selected options are
```

```
UNIX BYTERECL QGSJET QGSJETOLD GHEISHA CERENKOV CEFFIC
```

```
=====  
Make corsika6720 executable file ?
```

```
yes - make source and compile (default)  
no - do not compile now but make source to compile later ...
```

```
r - restart make  
x - exit make
```

y

```
- - - - -  
checking for cpp... cpp -traditional-cpp  
checking for /etc/issue... yes  
- - - - -
```

```
=====  
Do you want to save the "src/corsika6720_QGSJET_gheisha_compilefile.f" ?
```

```
y - yes, save it for special uses  
n - no, I don't need it (default)  
y
```

```
- - - - -  
configure: creating ./config.status  
config.status: creating Makefile  
config.status: creating bernlohr/Makefile  
config.status: creating coast/Makefile  
config.status: creating coast/CorsikaIntern/Makefile  
config.status: creating coast/CorsikaFileIO/Makefile  
config.status: creating coast/CorsikaROOT/Makefile
```

```

config.status: creating coast/CorsikaToROOT/Makefile
config.status: creating coast/rootout/Makefile
config.status: creating dpmjet/Makefile
config.status: creating epos/Makefile
config.status: creating herwig/Makefile
config.status: creating nexus/Makefile
config.status: creating urqmd/Makefile
config.status: creating src/Makefile
config.status: creating run/Makefile
config.status: creating doc/Makefile
config.status: creating lib/Makefile
config.status: creating include/config.h
config.status: executing depfiles commands

```

```
corsika6720_QGSJET_gheisha_compilefile.f saved in src/
```

```
run "make install" in lib/Linux/
```

```
Making install in src
```

```

make[1]: Entering directory '/home/otake/corsika/inst_test/corsika-6720/lib/Linux/src'
cpp -traditional-cpp -DHAVE_CONFIG_H -I. -I../../src -I./include ../../. ./src/corsika
g77 -O0 -fbounds-check -g -c -o corsika-compilefile.o `test -f 'compilefile.f' || echo '...
if cc -DHAVE_CONFIG_H -I. -I../../src -I./include -g -MT trapfpe.o -MD -MP -MF ".deps/
-c -o trapfpe.o `test -f '../../src/trapfpe.c' || echo '../../src/'`'../../src/trapfpe...
then mv ".deps/trapfpe.Tpo" ".deps/trapfpe.Po"; \
else rm -f ".deps/trapfpe.Tpo"; exit 1; \
fi
g77 -O0 -fbounds-check -g -c -o corsika-qgsjet01c.o `test -f 'qgsjet01c.f' || echo '...
g77 -O0 -fbounds-check -g -c -o corsika-gheisha_2002d.o `test -f 'gheisha_20 02d.f' || echo '...
/bin/sh ./libtool --mode=link g77 -fbounds-check -g -o corsika corsika-com pilefile.o cor...
mkdir .libs
g77 -fbounds-check -g -o corsika corsika-compilefile.o corsika-qgsjet01c.o corsika-gheisha_20...
g77 -fbounds-check -g -c -o corsikaread.o `test -f '../../src/corsikaread.f' || echo '...
/bin/sh ./libtool --mode=link g77 -fbounds-check -g -o corsikaread corsika read.o -L/home/o...
g77 -fbounds-check -g -o corsikaread corsikaread.o -L/home/otake/corsika/inst_test/corsika-6...
g77 -fbounds-check -g -c -o corsikaread_thin.o `test -f '../../src/corsikaread_thin.f' || echo...
/bin/sh ./libtool --mode=link g77 -fbounds-check -g -o corsikaread_thin corsika read_thin.o -L...
g77 -fbounds-check -g -o corsikaread_thin corsikaread_thin.o -L/home/otake/corsika/inst_test...
make[2]: Entering directory '/home/otake/corsika/inst_test/corsika-6720/lib/Linux/src'
/bin/sh ../../config/mkinstalldirs /home/otake/corsika/inst_test/corsika-6720 /run
/bin/sh ./libtool --mode=install /usr/bin/install -c corsika /home/otake/corsika/inst_test/corsi...
/usr/bin/install -c corsika /home/otake/corsika/inst_test/corsika-6720/run/corsi ka
/bin/sh ./libtool --mode=install /usr/bin/install -c corsikaread /home/otake/corsika/inst...
/usr/bin/install -c corsikaread /home/otake/corsika/inst_test/corsika-6720/run/corsi ka
/bin/sh ./libtool --mode=install /usr/bin/install -c corsikaread_thin /home/o take/corsika/...
/usr/bin/install -c corsikaread_thin /home/otake/corsika/inst_test/corsika-6720 /run/corsi ka

```

```

make[2]: 'install-data-am' に対して行うべき事はありません。
make[2]: Leaving directory '/home/otake/corsika/inst_test/corsika-6720/lib/Linux /src'
make[1]: Leaving directory '/home/otake/corsika/inst_test/corsika-6720/lib/Linux /src'
Making install in .
make[1]: Entering directory '/home/otake/corsika/inst_test/corsika-6720/lib/Linux '
make[2]: Entering directory '/home/otake/corsika/inst_test/corsika-6720/lib/Linux '
make  install-exec-hook
make[3]: Entering directory '/home/otake/corsika/inst_test/corsika-6720/lib/Linux '

--> "corsika6720Linux_QGSJET_gheisha" successfully installed in :
/home/otake/corsika/inst_test/corsika-6720/run/

--> You can run CORSIKA in /home/otake/corsika/inst_test/corsika-6720/run/ using  for instance
./corsika6720Linux_QGSJET_gheisha < all-inputs > output.txt

```

```

make[3]: Leaving directory '/home/otake/corsika/inst_test/corsika-6720/lib/Linux '
make[2]: 'install-data-am' に対して行うべき事はありません。
make[2]: Leaving directory '/home/otake/corsika/inst_test/corsika-6720/lib/Linux '
make[1]: Leaving directory '/home/otake/corsika/inst_test/corsika-6720/lib/Linux '

```

C.3 簡単な実行例

インストールが完了したら、runディレクトリ内に実行ファイルが作られる。実行ファイル名は選んだオプションによって変化する。ファイルを実行するには TXT 形式の設定ファイルを読み込ませる必要がある。設定ファイルの名前を仮りに input.com とすると、以下のように実行ファイルを読ませればシミュレーションが始まる。また設定ファイルの例を以下に示す。

```
$ ./corsika6720Linux_QGSJET_gheisha < input.com
```

```

RUNNR    1
EVTNR    1
NSHOW    1
SEED     1   0   0
SEED     2   0   0
SEED     3   0   0
PRMPAR   1
ERANGE   1000.0 1000.0
ESLOPE   0
THETAP   0.0 0.0
PHIP     0.0 0.0
ATMOD    1

```

```
MAGNET 20.40 43.23
LONGI   F 20.0 F F
MAXPRT  1
DIRECT   .
PAROUT  T T
CERARY  1 1 500.0 500.0 100000.0 100000.0
DATBAS   T
CWAVLG  300.0 450.0
CERFIL   T
CERSIZ  10
CERQEF  F T F
OBSLEV  11000.0
exit
```

指定したパラメータのおおよその意味は以下のとおりである。他にも様々なパラメータがあり、選択したオプションによって制限があるものも多いので英語のマニュアルを読む必要がある。また、指定しなかったパラメータはディフォルト値が適用される。また、注意点として CORSIKA は、出力ファイルの上書きをしないので、同ディレクトリに同一の名前のファイルがあるとシミュレーションすることはできない。

RUNNR

出力ファイルに書き込まれるランナンバー。0～999999まで指定できる。

EVTNR

最初のイベントのナンバー。0～999999まで指定できる。

NSHOW

シミュレートするシャワーイベント数。何発ものシャワーを降らせたいときはこの数字を大きくする。

SEED

それぞれハドロン部分、EGS4、チェレンコフ部分の乱数の種。

PRMPAR

新粒子の種類。上の表ではガンマ線(1番)である。数多くの粒子が用意されている。詳しくはマニュアルの82、83ページを参照すること。

ERANGE

シミュレーションする親粒子のエネルギー(GeV)の幅。上の例では1発しか打たないので、1TeVに固定している。

ESLOPE

シャワーを複数降らせ、親粒子のエネルギーに幅を持たせた場合に、エネルギースペクトルを考慮した際のべきを指定できる。例えばこの値を-2.7にして、エネルギーの幅を 1TeV～100TeV にすると、 $E^{-2.7}$ にの重みを付けながら、乱数を降ってエネルギーを決定することになる。ただし、このべきの値に見合った量の粒子数を降らせなければならぬことに注意する。粒子が不足すれば想定しているべき関数からかなりはなれたエネルギースペクトルになってしまう。

THETAP, PHIP

親粒子の打ち込む θ 方向と、 ϕ 方向を指定できる。それぞれ、範囲を指定でき、その間でランダムにふらせられる。上の例では垂直入射している。値の制限は、 $0 \leq \text{THETAP} \leq 70$ 、 $-360 \leq \text{PHIP} \leq 360$ となっている。

ATMOD

大気の高度による気圧の変化などを指定できる。CORSIKAには、世界各地のいくつかの大気モデルが用意されており、上の例では US STANDARD の大気モデルを使用している。また、自分で大気モデルを設定することも可能で、その場合はいくつか追加のパラメータ指定が必要である。詳しくはマニュアルの 55 ページを見ること。また、大気モデルの詳しい説明は、マニュアルの 112 ページ以降に書かれている。

MAGNET

地球に働いている磁場を指定できる。最初の引数は、南北方向の強さで、2番目の引数は垂直方向の磁場の強さになっている。単位は μT

LONGI

シャワーの縦方向の発達に関するファイルを出力させる。上の例では出力させていない。

MAXPRT

画面に何イベントまで出力するかを指定。

DIRECT

ファイルの出力先のディレクトリを指定できる。上の例では実行ファイルと同じ場所に出力される。

PAROUT

粒子情報のファイルを出力するか指定できる。指定すると DAT000* と DAT000*.tab というファイルが出力される。

CERARY

設置する検出器の数と大きさを指定できる。1、2番目の引数は、X 方向、Y 方向に並べる検出器の数(碁盤の目上に、 $X \times Y$ 個の検出器を設置することになる)。3、4番目の引数は検出器の X、Y 方向の間隔である。上の例では一つしか設置していないので、無視される。5、6番

目の引数は、検出器一つの X、Y 方向の大きさ (cm) である。上の例では 1 km 四方の検出器を設置している。また、CORSIKA では入射粒子は座標の原点に向かって入射してくる。チエレンコフオプションを指定していないと使用できない。

DATBAS

シミュレーションを行ったパラメータが書かれたデータベースファイルを出力できる。

CWAVLG

発生するチエレンコフ光の波長を制限できる。上の例ではディフォルト値になっている。 $100\text{nm} \leq \text{CWAVLG} \geq 900\text{nm}$ 範囲で、指定できる。チエレンコフオプションを指定していないと使用できない。

CERFIL

チエレンコフファイルを出力するかを指定する。チエレンコフオプションを指定していないと使用できない。

CERSIZ

この値は、チエレンコフバンチの大きさを指定している。大まかな意味としてはどの程度頻繁に相互作用を起こすかを指定できる。小さければ小さい程正確なシミュレーションになるが、計算速度、ファイル容量との兼ね合いが必要である。

CERQEF

最初の引数は、光電子増倍管の量子効率を考慮するかを指定している。2番目は大気による減衰を考慮するかを指定している。3番目は鏡にの反射効率を指定している。

OBSLEV

検出器を設置する高度を指定できる。 (g/cm^2)

C.4 出力データ

シミュレーションが終わるといくつかのファイルができるが、チエレンコフデータを含んでいるファイルは CER000*というファイルである。このファイルはバイナリーファイルなので、直接見ることはできない。そこで、run ディレクトリ内にある corsikaread というソフトを使って CER000*のデータを txt 形式にして、出力する。corsikaread を使うためには CER000*ファイル名をパス付きで書いたインプットファイルが必要である。インプットファイルの名前を input-read とすると、以下のように実行すれば良い（同時に画面出力を read-log と言うファイルに出力している）なお、corsikaread は FORTRAN 書かれており、*corsika - 6720/src/* 内にソースがあるので、使い易く改変すると良い。

```
$ ./corsikaread < input-read > read-log
```

input-read の中身

```
/home/otake/corsika/inst_test/corsika-6720/run/CER000001 #自分の環境にあわせて書くこと
```

corsikaread の実行が終わると fort.8 という txt ファイルができあがる。このファイルの中身は 7 列の実数がつまっている。数字の意味は以下の通りである。ただし、corsikaread は、複数発のイベントデーターを読み取っても一つのファイルに情報をまとめて出力してしまう。イベントごとにデーターを識別したい場合にはソースファイルを書き換える必要がある。

- 1 word : 光量 (p.e)
- 2 word : 観測平面での X 座標 (cm)
- 3 word : 観測平面での Y 座標 (cm)
- 4 word : X 軸方向の方向余弦
- 5 word : Y 軸方向の方向余弦
- 6 word : 最初に相互作用してからのタイミング (nsec)
- 7 word : 発生した高度 (cm)

この出力情報を読み取って解析するソフトは各自で用意するものとする。参考までに、本研究で使用した望遠鏡のシミュレーターを olympus の

```
/artemis/otake/CORSIKA_ANA_SRC/iact_sim.c
```

に置いておく。このプログラムは望遠鏡のパラメータを設定して、corsikaread から出力される txt ファイルを読み込ませると、望遠鏡の ID、PMT の ID、光量、最初に相互作用してからのタイミングを出力する。設定できる項目は以下の通りである。ただし、CORSIKA 本体で地表に一つの巨大な検出器をおいた場合のデータを読み込むことを想定している。

- 設置する望遠鏡の台数
- CORSIKA 座標上での望遠鏡の設置する (x,y,z) 座標 (cm)
- 望遠鏡の鏡全体の半径 (cm)
- 望遠鏡の小鏡の半径 (cm)
- 焦点距離 (cm)
- 鏡の反射率
- カメラの視野半径 (degree)
- 光電子増倍管一本の視野半径 (degree)
- 光電子増倍管の量子効率
- 望遠鏡の視線方向のオイラー角 (α, β, γ)

Bibliography

- [1] 「チベットにおける高エネルギー宇宙線の研究」 湯田利典 日本物理学会誌 2002 Vol57 no7
- [2] <http://icrh9.icrr.u-tokyo.ac.jp/>
- [3] 「宇宙線物理学」 小田 稔、西村 純、桜井 邦朋 編, 朝倉書店 (1983)
- [4] 「天文学への招待」 岡村定矩 (2001)
- [5] 「宇宙線エネルギー粒子の物理学」 木舟正 (2004)
- [6] 「宇宙物理学」 監修 湯川秀樹 岩波書店 (1978)
- [7] 「Gamma-ray Astronomy」 V.POLLA
- [8] 「Cosmic X-ray Astronomy」 ADAMS
- [9] 「見えてきた宇宙の神秘」 野本陽代 (2004)
- [10] 今野加奈子 山形大学修士論文
- [11] <http://apod.gsfc.nasa.gov/apod/ap990121.html>
- [12] <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/index.html>
- [13] <http://fermi.gsfc.nasa.gov/>
- [14] <http://hawc.umd.edu/index.php>
- [15] <http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/em/index-j.html>
- [16] 「image parameter を作る」 坂本直樹
- [17] CORSIKA <http://www-ik.fzk.de/corsika>
- [18] Extensive Air Shower Simulation with CORSIKA:A User's Guide (Version 6.7) D.Heck T.pierog (2007)
- [19] <http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/morim/index-j.html>
- [20] 「シリーズ 現代の天文学 17 高エネルギー天文学」 井上 一 小山 勝二 高橋 忠幸 水本 好彦 (2008)
- [21] 中森 健之 京都大学修士論文

- [22] 宇宙線はどこで生まれたか 桜井邦朋 (1985)
- [23] 高エネルギー宇宙物理入門 桜井邦朋 (2007)
- [24] 放射線物理学 飯田博美 (2002)
- [25] 宇宙電波天文学 赤羽賢司 海部宣男 田原博人 (1988)
- [26] ガンマ線で見る宇宙 吉森正人 (1988)