チェレンコフ望遠鏡カメラでみる
空気シャワー像のシミュレーション

甲南大学理学部物理学科
宇宙粒子研究室 4 回生

10021104
山崎明子

平成 16 年 2 月 17 日

目 次

第 1 章　超高エネルギーγ 線天文学　5
- 1.1　宇宙線天文学　5
  - 1.1.1　はじめに　5
- 1.2　宇宙線のγ 線源　5
  - 1.2.1　銀河系内の高エネルギーγ 線天体　5
  - 1.2.2　銀河系外の高エネルギーγ 線天体　6
- 1.3　高エネルギーγ 線の観測理論　6
  - 1.3.1　空気シャワー　6
  - 1.3.2　電子対生成　8
  - 1.3.3　制動放射　8
  - 1.3.4　チェレンコフ光　9

第 2 章　チェレンコフ望遠鏡　10
- 2.1　γ 線観測　10
- 2.2　世界のチェレンコフ望遠鏡　10

第 3 章　シミュレーションの概要　14
- 3.1　シミュレーション　14
- 3.2　実験の条件　14

第 4 章　シミュレーションの結果　16
- 4.1　チェレンコフ像　16
  - 4.1.1　口径 3m のγ 線のチェレンコフ像　16
  - 4.1.2　口径 10m γ 線のチェレンコフ像　20
  - 4.1.3　口径 30m γ 線のチェレンコフ像　24

第 5 章　チェレンコフイメージの違い　28
- 5.1　口径での違い　28
- 5.2　同光量での違い　29
  - 5.2.1　口径 3m1TeV, 口径 10m100GeV, 口径 30m10GeV　29
  - 5.2.2　口径 3m10TeV, 口径 10m1TeV, 口径 30m100GeV　30
  - 5.2.3　口径 3m100TeV, 口径 10m10TeV, 口径 30m1TeV　31
- 5.3　pixel 数での違い　31
  - 5.3.1　口径 3m　31
  - 5.3.2　口径 10m　32
  - 5.3.3　口径 30m　32

第 6 章　結論 **33**

図 目 次

1.1 1TeVγ線(左)と3TeV陽子(右)による空気シャワーの発達。空気シャワー中の荷電粒子の軌跡を描いたもの。縦軸は高度1600mをゼロにしている。 7
1.2 電磁カスケードシャワー 7
1.3 核カスケードシャワー 8

2.1 甲南望遠鏡 11
2.2 CANGAROO-III（10m）望遠鏡 11
2.3 Whipple 12
2.4 VERITAS 12
2.5 HEGRA 12
2.6 MAGIC 12
2.7 H.E.S.S. 13
2.8 CAT 13

4.1 1TeV (口径3m,20×20pixel) 16
4.2 10TeV (口径3m,20×20pixel) 16
4.3 100TeV (口径3m,20×20pixel) 16
4.4 1TeV (口径10m,80×80pixel) 17
4.5 10TeV (口径10m,80×80pixel) 17
4.6 100TeV (口径10m,80×80pixel) 17
4.7 1TeV (口径30m,240×240pixel) 18
4.8 10TeV (口径30m,240×240pixel) 18
4.9 100TeV (口径30m,240×240pixel) 18
4.10 1TeV (口径3m,480×480pixel) 19
4.11 10TeV (口径3m,480×480pixel) 19
4.12 100TeV (口径3m,480×480pixel) 19
4.13 100GeV (口径10m,20×20pixel) 20
4.14 1TeV (口径10m,20×20pixel) 20
4.15 10TeV (口径10m,20×20pixel) 20
4.16 100GeV (口径10m,80×80pixel) 21
4.17 1TeV (口径10m,80×80pixel) 21
4.18 10TeV (口径10m,80×80pixel) 21
4.19 100GeV (口径10m,240×240pixel) 22
4.20 1TeV (口径10m,240×240pixel) 22
4.21 10TeV (口径10m,240×240pixel) 22
4.22 100GeV (口径10m,480×480pixel) 23
4.23 1TeV (口径10m,480×480pixel) 23

4.24 10TeV (口径 10m,480×480pixel) 23
4.25 10GeV (口径 30m,20×20pixel) 24
4.26 100GeV (口径 30m,20×20pixel) 24
4.27 1TeV (口径 30m,20×20pixel) 24
4.28 10GeV (口径 30m,80×80pixel) 25
4.29 100GeV (口径 30m,80×80pixel) 25
4.30 1TeV (口径 30m,80×80pixel) 25
4.31 10GeV (口径 30m,240×240pixel) 26
4.32 100GeV (口径 30m,240×240pixel) 26
4.33 1TeV (口径 30m,240×240pixel) 26
4.34 10GeV (口径 30m,480×480pixel) 27
4.35 1TeV (口径 30m,480×480pixel) 27
4.36 10GeV (口径 30m,480×480pixel) 27

5.1 左から口径 3,10,30m 28
5.2 左から口径 3,10,30m、エネルギー 1TeV,100GeV,10GeV 29
5.3 左から口径 3,10,30m、エネルギー 10TeV,1TeV,100GeV 30
5.4 左から口径 3,10,30m、エネルギー 100TeV,10TeV,1TeV 31
5.5 口径 3m:左から 20,80,240,480pixel 31
5.6 口径 10m:左から 20,80,240,480pixel 32
5.7 口径 30m:左から 20,80,240,480pixel 32

第1章　超高エネルギーγ 線天文学

1.1　宇宙線天文学

1.1.1　はじめに

1910年にV.Hessが気球観測により宇宙線を発見して以来、宇宙線天文学は大きく発展してきた。それぞれのエネルギー領域によって観測の方法は異なる。低エネルギー側は人工衛星や気球による直接観測、高エネルギー側は空気シャワーを利用した地上観測が主となる。これは宇宙線のfluxがエネルギーの巾乗に比例して落ちることにより高エネルギー側ほど大きな検出面積が必要になるので、より高エネルギーの宇宙線を観測するにはより大きな観測器が必要になるためである。

超高エネルギー宇宙線を観測している研究者たちはより低いエネルギーの宇宙線を、また人工衛星で宇宙線を直接観測する研究者たちはより高いエネルギーの宇宙線を観測しようとしている。衛星による観測と地上からの観測の双方から同じエネルギー領域の宇宙線を観ることも今後可能であろう。

1.2　宇宙線のγ 線源

現在までにTeVγ 線源と考えられている天体がいくつか発見されている。その起源は我々の銀河系内から銀河系外など様々である。次にそれらの天体を示す。

1.2.1　銀河系内の高エネルギーγ 線天体

超新星残骸 (SNR)

超新星残骸 (SNR) は長い間高エネルギー宇宙線源と考えられてきた。超新星爆発による爆発風が周囲の物質を圧縮して衝撃波を作り、この衝撃波による加速で宇宙線が加速される。この宇宙線が周囲の物質と衝突してπ^0を生成してその崩壊からγ 線が放出されると考えられる。X線衛星の「あすか」による超新星残骸SN1006からの非熱的X線放射を発見は、シンクロトロン放射を行う数百GeVの電子の存在を示唆した。SNRが実際にこのエネルギーまでの宇宙線の加速器として働いてることを示した。このような超高エネルギー電子は、逆Compton散乱を起こし、光子を超高エネルギーに叩きあげるはずである 。

パルサー

強い磁場をもち、光速に近い速さで回転している中性子星と考えられているパルサーは天体における加速器のような存在である。パルサーの極からビーム状にパルスが放射されている。強い磁場で荷電粒子が加速され、それにともない電磁波の放射が外部加速層と極域加速層の二つの領

域でおこる。高エネルギーのγ 線は、パルサーから放出される粒子流が周囲の物質と衝突してつくる衝撃波で電子が加速され、逆 Compton 効果によって放射される。

銀河円盤から広がったγ 線、分子雲

銀河円盤内の宇宙線が星間物質に衝突してγ 線を生成をする。オリオン座の分子雲 Ophiuchus などからは周囲より強いγ 線が検出されている。また、宇宙線中の電子の制動輻射が核子成分の作る $\pi^0 \to 2\gamma$ と同程度の寄与をすることもわかっている。

1.2.2 銀河系外の高エネルギーγ 線天体

活動銀河核 (**AGN**)

一般に活動銀河核は強力な電波源で、その正体としては銀河中心に巨大な ブラックホールが存在し、そのまわりの降着円盤との相互作用によってできた相対論的ジェットであると考えられている。このジェットによって加速された粒子が光子、物質と相互作用しγ 線が生成される。大別すると、クェーサー、セイファート銀河、電波銀河、BL Lac object などがある。

大マゼラン雲

銀河円盤からのγ 線と同様、この銀河内での宇宙線と星間物質の衝突を主な機構とする。

γ 線バースト

数 10KeV 以上のγ 線 (10GeV を越える観測例もある) が、10 秒程度の間に一時的に放射される現象。

1.3 高エネルギーγ 線の観測理論

1.3.1 空気シャワー

高エネルギーの宇宙線粒子が地球の大気に入射すると、大気中の原子核と次々に衝突して核相互作用を起こし、この結果多数の粒子を発生する。最初 1 個の粒子が大気中を降下するとともに電子、π、μ などの粒子の大群 (2 次粒子) となって地表に到達する。この現象を空気シャワーと呼ぶ。

空気シャワーを引き起こす一次宇宙線がγ 線 (光子) の場合、電磁カスケードシャワーという。ハドロン (陽子・原子核) の場合、核カスケードシャワーという。これらは空気シャワーの発達過程が異なり、γ 線のシャワーではシャワー軸の周りに粒子が集中するのに対し、ハドロンによるシャワーではシャワー軸に対して横方向に広がる。

電磁カスケードシャワー

1 次宇宙線がγ 線 (光子) の場合、大気中に入射すると電子対生成によって電子と陽電子にわかれる。この電子と陽電子がまた大気分子の近傍を通過するとき、制動放射によってγ 線の放出を

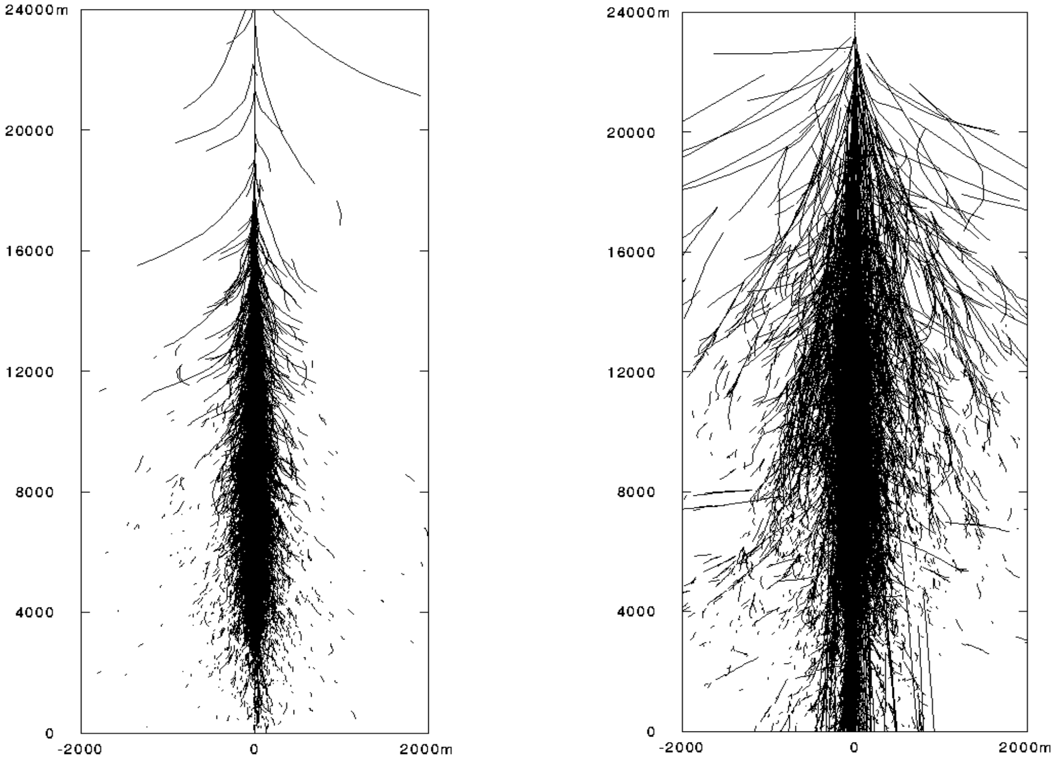


図 1.1: 1TeVγ 線 (左) と 3TeV 陽子 (右) による空気シャワーの発達。空気シャワー中の荷電粒子の軌跡を描いたもの。縦軸は高度 1600m をゼロにしている。

起こす。そのγ 線がまた電子対を生成する。同様に、高エネルギーの電子と陽電子が大気中に入射したときも、電子対生成と電子の制動放射によりγ 線の放出を起こす。電子と光子は交互にこの 2 つの現象を繰り返して電子 (陽電子) 及び光子を増殖させる。

このようにして、高エネルギーのγ 線、電子、陽電子が大気に入射して電磁相互作用をおこすことでつくられる大量の光子と電子のシャワーを電磁カスケードシャワーと呼ぶ。

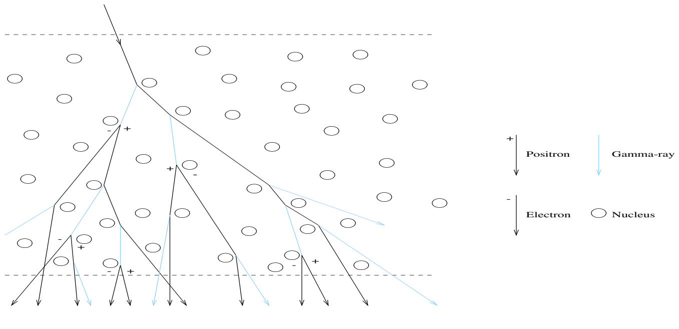

Positron
Gamma-ray
Electron
Nucleus

図 1.2: 電磁カスケードシャワー

核カスケードシャワー

１次宇宙線がハドロン (陽子・原子核) の場合は核カスケードを生成する。１次粒子 (ハドロン) 大は気中の原子核に次々と衝突して相互作用をする。この結果、多数のハドロンが生成される。生成されたハドロンの大部分はπ 中間子で、このほか若干の K 中間子および他の中間子も生成される。π 中間子のうち、π^0 中間子は１０ $^{-16}$ 秒で 2 個のγ 線に崩壊する。このγ 線は大気中で電磁カスケードシャワーをおこし多数の電子を増殖する。また荷電 $\pi^{\pm}$ 中間子は１０ $^{-8}$ 秒程度で μ 粒子に崩壊するか、または大気の原子核と衝突して、さらに多くの中間子を生成する。

このように、衝突を繰り返しながらハドロンが多重発生する様子を、核カスケードシャワーと呼ぶ。

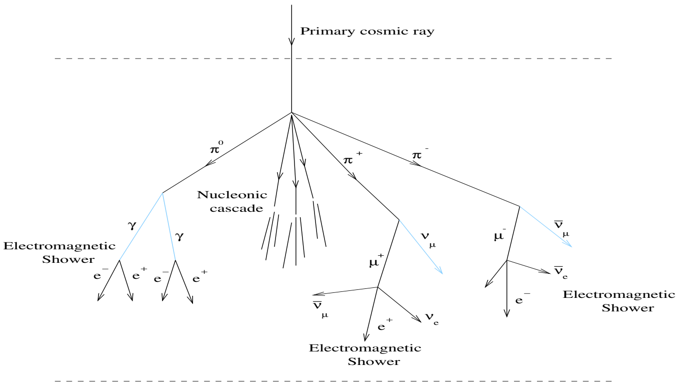

Primary cosmic ray
π0
π+
π-
Nucleonic cascade
γ
γ
Electromagnetic Shower
e-
e+
e-
e+
μ+
ν μ
μ-
ν̄ μ
ν̄ e
ν̄ μ
e+
ν e
e−
Electromagnetic Shower
Electromagnetic Shower

図 1.3: 核カスケードシャワー

1.3.2　電子対生成

光子のエネルギーが電子の質量エネルギー mc^2 の 2 倍をこえると、電子対が発生することがある。エネルギーの高い光子、すなわちガンマ線を Wilson 霧箱や原子核乾板に当てると、Compton 散乱によってはねとばされる電子の飛跡のほかに、１つの点から 2 個の電子が互いに狭い角度で発生するのを観察することができる。霧箱に磁場をかけると相反する向きに曲げられることから、これが正と負の電荷をもっていることが知られる。この正の電荷をもつ電子を陽電子と呼ぶ。2 つの電子の運動エネルギーの和は光子のエネルギー $h\nu$ から 2 個の電子の質量エネルギー $2mc^2$ を引いたものに等しい。

光子は全く何もないところではそのエネルギーが mc^2 を越えても電子対をつくることはできない。何もないところで光子だけではエネルギー保存則、運動量保存則を同時に満足させることができないからである。しかし、原子核近傍では、電子または陽電子は原子核による散乱を受け運動量を授受することにより、２つの保存則を同時に満たすことが可能になってくる。よって光子は原子核にいくばくかの運動量を与えながら電子対をつくる。

1.3.3　制動放射

高速の電子が物質中を通過すると、物質中の原子核のクーロン場で力をうけて急激に進路が曲げられる。電子は加速度を受けるので、電子のまわりの電磁場が電磁波としてふり落とされ放射される。この現象を制動放射という。電子が原子半径程度のところを通ったとすると、原子核の

電荷は大体その外周りの電子で打ち消されているから、制動放射はおこらない。しかし、電子の進路と原子核との距離が原子半径よりはかなり小さいが、原子核半径よりはかなり大きいならば、外周りの電子の影響はないものと考えられ、原子核は点電荷であると考えられる。このような場合には制動放射がおこるのである。高エネルギー電子が、物質中でエネルギーを失う最も重要な過程であるのと同時に、X 線やγ 線発生の重要な過程である。

1.3.4　チェレンコフ光

物質中を通過する荷電粒子の速度 v が、その物質中での光速度 $c' = c/n$ （ c は真空中の光速度、n は物質の屈折率 ）より大きいとき、粒子の飛跡に沿って物質が発する弱い光のことをチェレンコフ光と呼ぶ。チェレンコフ光は粒子の進行方向と角度 θ_c をなす方向に放射される。ただし θ_c はチェレンコフ角と呼ばれ

$$\cos\theta_c = \frac{c'}{v}$$

で与えられる。

すなわち、この光は粒子の運動方向と θ_c をなす角度をもつ円錐状に放射される。

第2章　チェレンコフ望遠鏡

2.1　γ 線観測

宇宙線の起源や加速についての情報を宇宙線観測から得ることは決して容易なことではない。そこで、宇宙線が加速されている現場から磁場による影響を受けない電磁波が放射されているならば、それは有効な研究手段になる。γ 線のエネルギー領域は非常に広いのでひとつのタイプの検出器で全ての領域に対応することは不可能である。検出器のタイプは大まかに3つに分けられる。MeV ~ GeV 領域では人工衛星等の飛翔体にトラッキング検出器、GeV ~ TeV 領域では大気チェレンコフ望遠鏡、TeV 以上で地上エアシャワーアレイである。これらの検出器のうち、我々は大気チェレンコフ望遠鏡を用いて観測を行う。

2.2　世界のチェレンコフ望遠鏡

初期におけるチェレンコフ光を用いた観測は、およそ10°程度の角度分解能しかもたず観測対象である天体の視野通過に伴う検出器トリガーの変化を観測することによってγ 線の観測を行っていたが宇宙線のバックグラウンドにより、十分な集計精度を出すことは困難であった。

空気シャワーからのチェレンコフ光は微弱なため、その観測には大口径の望遠鏡で集光し高感度のカメラで検出する手法がとられている。しかし、この微弱なチェレンコフ光の観測には、太陽・月による光や人工光が邪魔にとなり、観測する時間や場所が大きく制限されてしまう。だが、この方法は衛星に比べて検出面積が非常に広く、粒子検出器では難しいとされる宇宙線陽子や原子核との区別が効率的に行うことができる。

チェレンコフ望遠鏡は、宇宙線によってつくられる空気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装置である。チェレンコフ放射によって発生した光を反射鏡で集光し、焦点面で結像させた像を光電子増倍管 (PMT) を多数並べたカメラやイメージインテンシファイア (I.I.) と CCD カメラを用いたカメラで電気信号に変換し、接続した電子制御回路でデジタル化して、計算機にデータとして保存するようになっている。

甲南望遠鏡

甲南大学宇宙粒子研究室が持っているチェレンコフ望遠鏡で、口径3 m の反射型望遠鏡である。独自の改良を重ねて世界に活躍する望遠鏡作りに日々努力している。現在、猪名川町に場所を移し観測に向けて準備段階である。

CANGAROO-III 望遠鏡

CANGAROO(Collaboration of Australia and Nippon (Japan) for a GAmma Ray Observatory in the Outback) 計画とは天体からの超高エネルギーガンマ線の存在と性質の解明を目指し

た日本・オーストラリアの共同研究で、南オーストラリア州ウーメラ (東経 136 度、南緯 31 度) に設置したチェレンコフ望遠鏡を用い、ガンマ線がもとになり形成される 空気シャワーが大気中で放出するチェレンコフ光を通して、ガンマ線天体の観測を行っている。

ウーメラの晴天率は約 80 %と高く、周囲に明るい都市がないことからチェレンコフ光を用いたガンマ線観測には適した場所である。また南半球の中緯度では銀河中心を天頂近くで観測できるため、北半球よりも銀河系内ガンマ線天体の観測においては有利である。そしてこれまでほとんどが北半球で行われていたガンマ線観測に加え南半球での観測を行うことで、このエネルギー領域で全天をカバーできるようになる。

高エネルギーガンマ線で天体を観測することで、可視光ではわからない激しい高エネルギー天体現象を明らかにすることができる。CANGAROO グループは南天から見えるパルサーやその周りの星雲、超新星、活動銀河核などをターゲットとして観測を続け、天体における高エネルギー現象の解明に向けて世界的にも大きな役割を果たしている。

1992 年から CANGAROO 3.8m 望遠鏡を用いて観測を始め、1999 年 3 月には 7m 口径の CANGAROO-II 望遠鏡が完成、さらに 2000 年 3 月にはこの望遠鏡を 10m 口径に拡張し、観測可能なエネルギー領域は 300GeV 程度まで下がり、高い統計精度での観測が可能となった。

これまでの成果を基にさらに高精度の観測を目指して、チェレンコフ光をステレオ (立体的に) 観測して到来方向やエネルギーの精度を上げるために、10m 望遠鏡を 4 台用いる CANGAROO-III 計画が 1999 年度より文部省科学研究費中核的拠点 (COE) 形成プログラムとして スタートした。そして 2004 年には 4 台の望遠鏡を揃えた高精度の観測が始まる予定である。

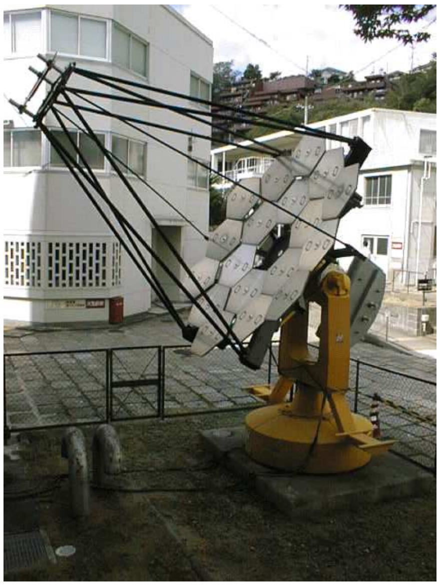


図 2.1: 甲南望遠鏡

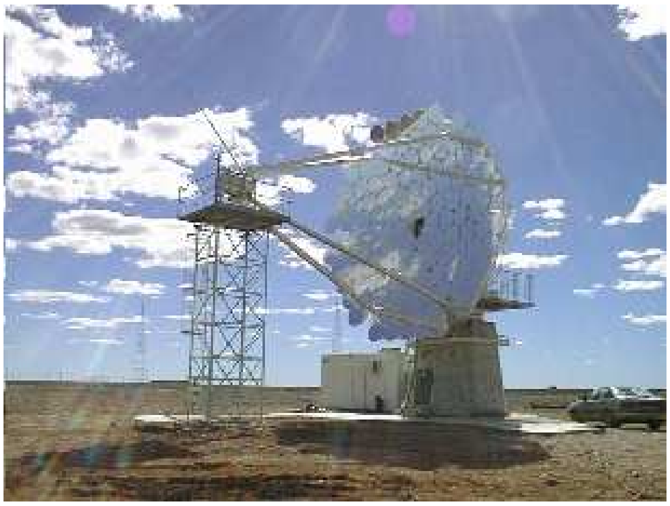


図 2.2: CANGAROO-III (10m) 望遠鏡

Whipple

アメリカの Smithonian 天文台の Whipple グループは、アメリカの南ホプキンス山で 10m 反射望遠鏡を用いて、100GeV ~ 10TeV の領域の観測を行っている。イメージング法を用いてかに星雲 (パルサー星雲) からのγ 線を観測することに成功している。

VERITAS

VERITAS(Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System)は、Whippleの10m望遠鏡の次期計画としてアリゾナのホプキンス山(31.7 ° E, 110.9 ° W, 高度2300m)に口径10m望遠鏡7台の観測を目指している。

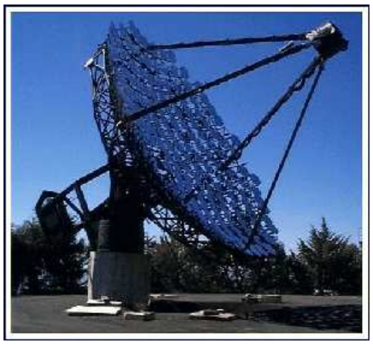


図 2.3: Whipple

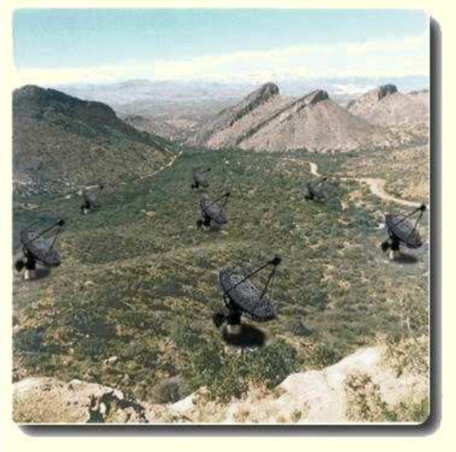


図 2.4: VERITAS

HEGRA

HEGRA(High Energy Gamma Ray Astronomy)は、口径3 mの望遠鏡6台を用いたステレオ観測を行なっている。このサイトで、MAGICが次期計画とされている。

MAGIC

ドイツ・マックスプランク物理研究所(M?nchen)を中心としたグループは、HEGRAのサイト(カナリア諸島La Palma,28.8 ° N, 17.8 ° W, 高度2225m)に口径17mの大望遠鏡を用いた観測を目指している。

図 2.5: HEGRA

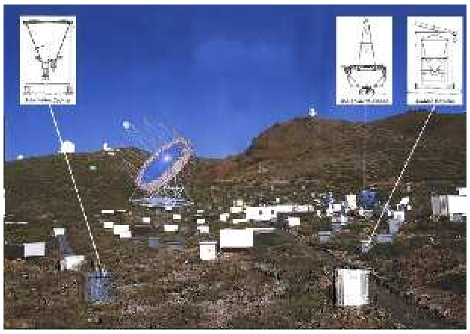


図 2.6: MAGIC

H.E.S.S

ドイツ・マックスプランク天体物理研究所 (Heidelberg) を中心としたグループは、アフリカのナミビアの高地 (2323.3°S,26.5°E の高度 1800m) に口径 12m 望遠鏡 4 台を用いた観測を目指している。これは後に 16 台に拡張されることになっている。

CAT

CAT(Cherenkov Array at THemis) は、フランスのピレネー (20°E,32°N) で観測を行なっているチェレンコフ望遠鏡である。口径 4.5m の分割鏡である反射鏡の形状は、Davis-Cotton として配置させ、200GeV ~ 20TeV の領域でγ 線の観測を行なっている。

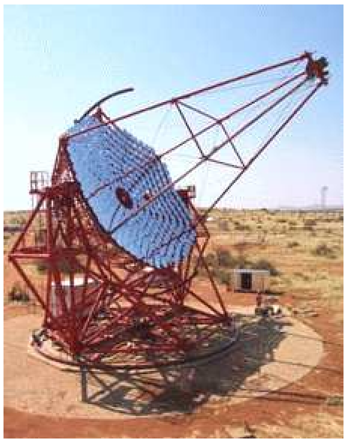


図 2.7: H.E.S.S.

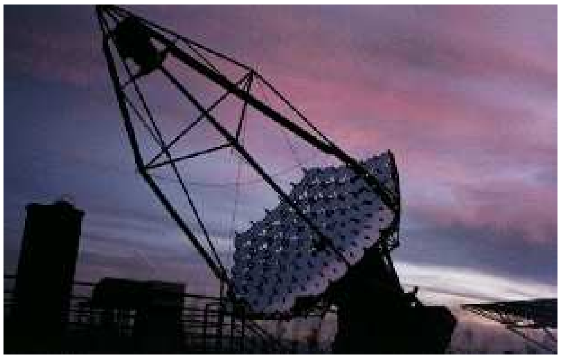


図 2.8: CAT

その他にも STACEE、CELESTE などがある。

第3章　シミュレーションの概要

3.1　シミュレーション

シミュレーション（Simulation）という語はかなり一般化していて、あえて日本語にすると、「模擬実験」になります。シミュレーションとは、現実（実際のところまだ実在しない場合もありますが）の問題を「模擬」（まね）した装置を準備し、その装置を用いた実験を行なって、事の次第を分析・予測する手法のことです。

この実験では、宇宙線を大気に入射させ、チェレンコフ光を発生させその光を望遠鏡の鏡で捕らえ、カメラ部に集め、データとして出力するまでの過程をコンピューター上でシミュレーションを行った。

これは望遠鏡を作る前にどのくらいの効果が期待されるか、どの装置がもっとも正確に効率よく光を集めれるかなどを知るのに有効である。

3.2　実験の条件

空気シャワーの生成には、CORSIKA の version5.62 を用いた。CORSIKA とは空気シャワーを生成せさせるソフトであり、ここで作られた空気シャワーから放射されるチェレンコフ光を鏡で集光しカメラで像をとらえるというのが一連の流れである。

- チェレンコフ光は波長領域 250 ~ 550nm の範囲を生成し、光子数はこのあとで、波長によって PMT（光電子増倍管）で光電子に変換される確率（荷電粒子から放出された光子が鏡で反射してフィルターを通過し、PMT で光電子に変換される確率）にまで落とされる。量子効率は、波長によって最大 25 %の確率で PMT での光電子に変換される。

- 望遠鏡の光学系は、理想光学系 (光学的収差がなく無限遠からの光は 1 点に結像) を用いた。これは、望遠鏡に入射する光子の角度情報のみを利用したということである。

- 一つのカメラには、x 方向、y 方向それぞれに 20,80,240,480 個のピクセルが正方形状に並べられている。 したがって、一つのカメラには、合計 400,6400,57600,230400 チャンネルがある。

- カメラのピクセルを 4 個正方形に並べたものをサブクラスターという。検出条件は、少なくともどれかひとつのサブクラスターの中で、5 ピクセル（チャンネル）以上に 5 個以上の光電子が検出された場合にトリガーがかかり、 データが蓄積されるように設定した。

- 観測場所をチベット (磁場：34μT,35μT) に設定した。

- 宇宙線は全て大気の頂上 (高度 113km) で発生し垂直に落下してくるものとした。宇宙線が発生した場所の真下を原点とし、それに対する望遠鏡の座標をそれぞれの図に示す。

- また、イメージ像の座標系は縦の軸が東西で矢印は上(東)向きに、横の軸が南北で矢印は左(北)向きになっている。
- それぞれ一本一本の宇宙線のエネルギー、また、シャワー（カスケード）の枝分かれの点の位置、そこから出てくる線の数や性質は、適切な分布から無作為（ランダム）に選ぶ必要がある。これは、モンテカルロ法により選ばれる。

以下に主な条件を示す。

	3m 望遠鏡 (γ 線)
口径	３ m
γ 線の入射エネルギー	1TeV,10TeV,100TeV
core location	(0,0)
観測高度	4300m
望遠鏡の座標	(0,100) に１台 (100m 離れた位置で観測)
カメラ視野	４°×４°
pixel size	20×20 80×80 240×240 480×480

表 3.1: シミュレーションの条件 (γ, 口径 3m)

	10m 望遠鏡 (γ 線)
口径	１０ m
γ 線の入射エネルギー	100GeV,1TeV,10TeV
core location	(0,0)
観測高度	4300m
望遠鏡の座標	(0,100) に１台 (100m 離れた位置で観測)
カメラ視野	４°×４°
pixel size	20×20 80×80 240×240 480×480

表 3.2: シミュレーションの条件 (γ, 口径 10m)

	30m 望遠鏡 (γ 線)
口径	３０ m
γ 線の入射エネルギー	10GeV,100GeV,1TeV
core location	(0,0)
観測高度	4300m
望遠鏡の座標	(0,100) に１台 (100m 離れた位置で観測)
カメラ視野	４°×４°
pixel size	20×20 80×80 240×240 480×480

表 3.3: シミュレーションの条件 (γ, 口径 30m)

第4章　シミュレーションの結果

4.1　チェレンコフ像

甲南望遠鏡に用いられている口径3m望遠鏡と、CANGAROO計画に用いられている望遠鏡に代表される口径10m望遠鏡と、口径30m望遠鏡でγ線のチェレンコフ像をみる。

宇宙線の位置は(0,0)、望遠鏡の座標は(0,100)、３章で述べた実験の条件でシュミレーションを行った結果である。それぞれ10event合計をとった。口径30mの1TeV γ線、口径10mの10TeV γ線は1eventの図である。

4.1.1　口径3mのγ線のチェレンコフ像

20×20pixel

表３．１の条件から、口径3m、観測高度4300m、20×20pixelのγ線のチェレンコフ像。左から入射エネルギー1TeV(図4.1)、10TeV(図4.2)、100TeV(図4.3)の時である。

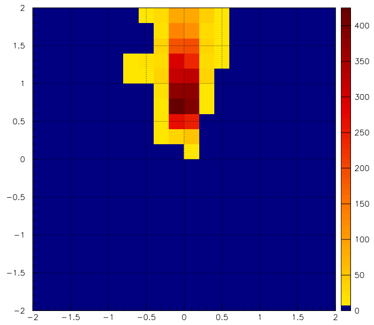


図 4.1: 1TeV (口径3m,20×20pixel)

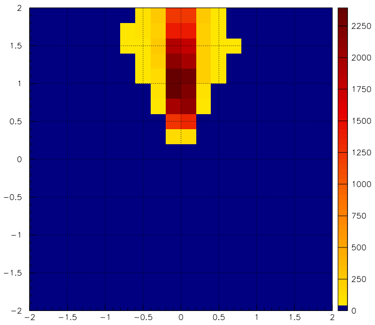


図 4.2: 10TeV (口径3m,20×20pixel)

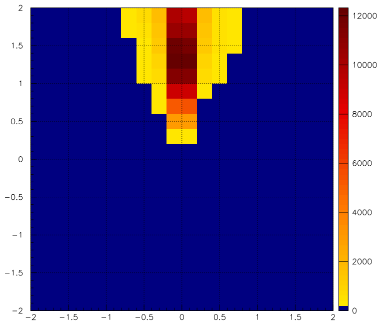


図 4.3: 100TeV (口径3m,20×20pixel)

80×80pixel

表３．１の条件から、口径 3m、観測高度 4300m、80×80pixel のγ 線のチェレンコフ像。左から入射エネルギー 1TeV(図 4.4)、10TeV(図 4.5)、100TeV(図 4.6) の時である。

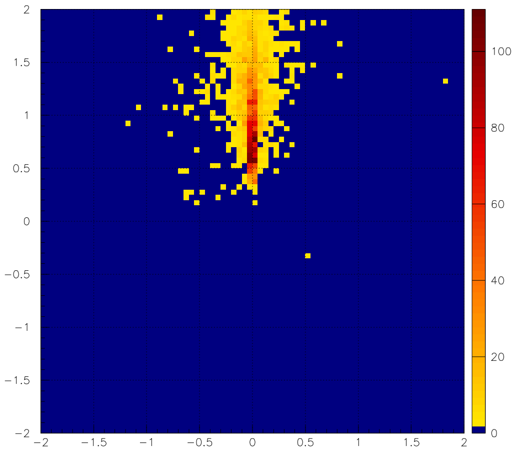


図 4.4: 1TeV (口径 10m,80×80pixel)

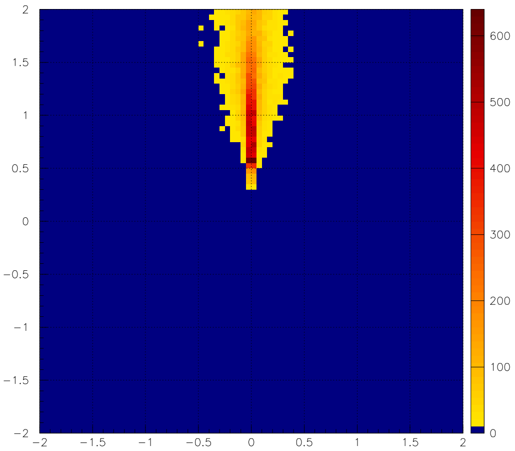


図 4.5: 10TeV (口径 10m,80×80pixel)

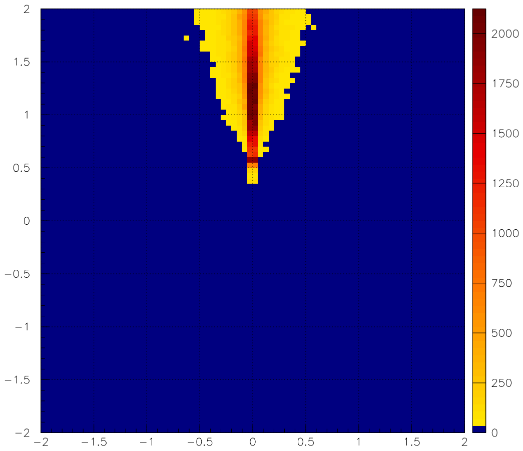


図 4.6: 100TeV (口径 10m,80×80pixel)

240×240pixel

表３．１の条件から、口径 3m、観測高度 4300m、240×240pixel のγ 線のチェレンコフ像。左から入射エネルギー 1TeV(図 4.7)、10TeV(図 4.8)、100TeV(図 4.9) の時である。

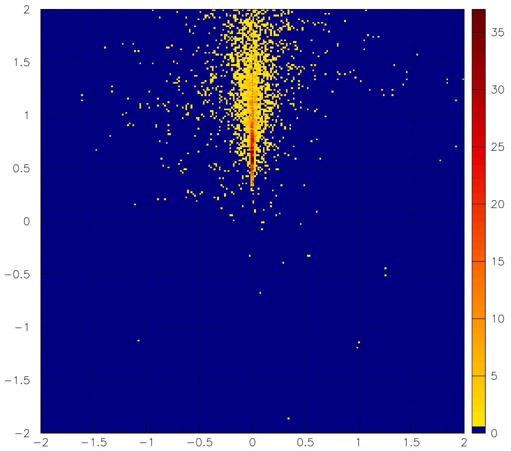


図 4.7: 1TeV (口径 30m,240×240pixel)

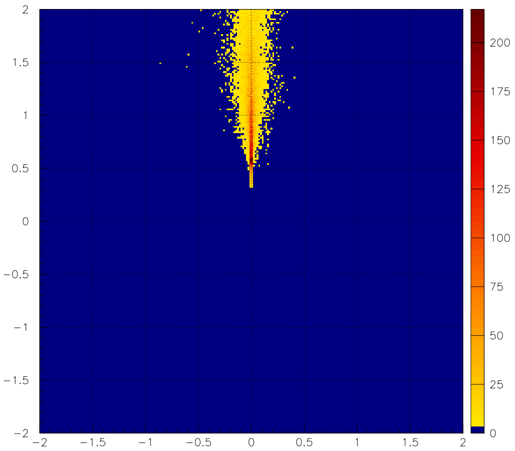


図 4.8: 10TeV (口径 30m,240×240pixel)

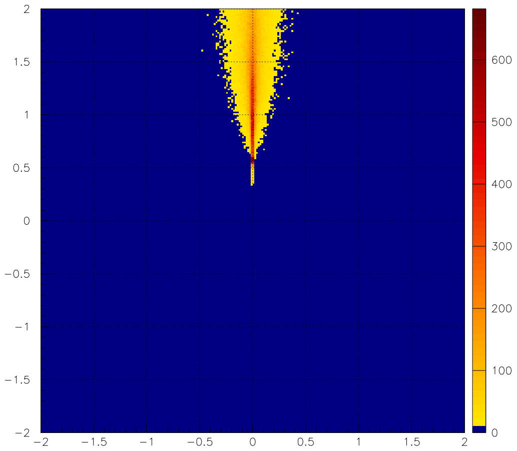


図 4.9: 100TeV (口径 30m,240×240pixel)

480×480pixel

表３．１の条件から、口径 3m、観測高度 4300m、480×480pixel のγ 線のチェレンコフ像。左から入射エネルギー 1TeV(図 4.10)、10TeV(図 4.11)、100TeV(図 4.12) の時である。

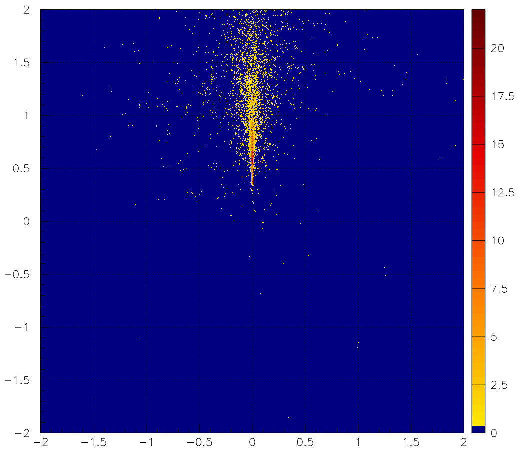


図 4.10: 1TeV (口径 3m,480×480pixel)

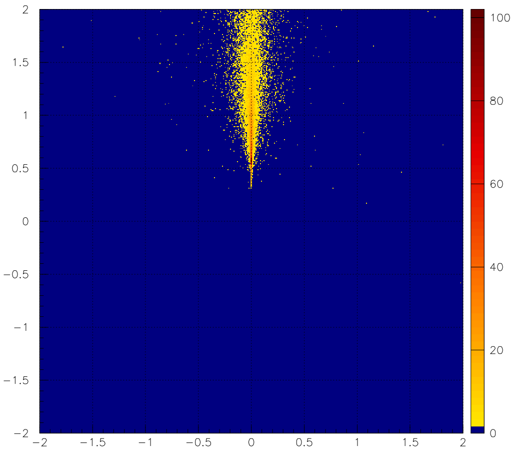


図 4.11: 10TeV (口径 3m,480×480pixel)

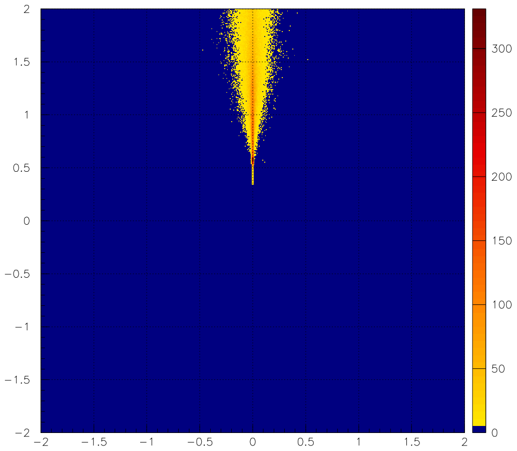


図 4.12: 100TeV (口径 3m,480×480pixel)

4.1.2 口径10mγ線のチェレンコフ像

20×20pixel

表３．２の条件から、口径10m、観測高度4300m、20×20pixelのγ線のチェレンコフ像。左から入射エネルギー100GeV(図4.13)、1TeV(図4.14)、10TeV(図4.15)の時である。

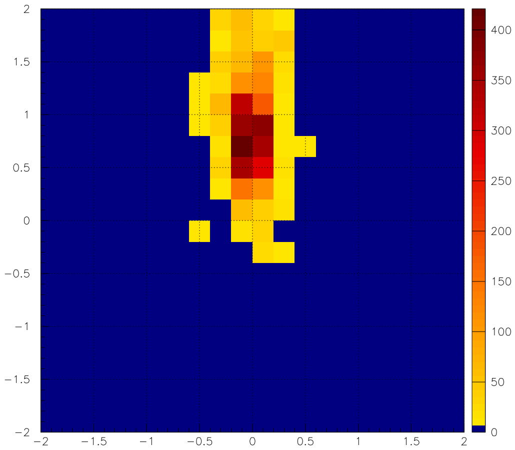


図4.13: 100GeV (口径10m,20×20pixel)

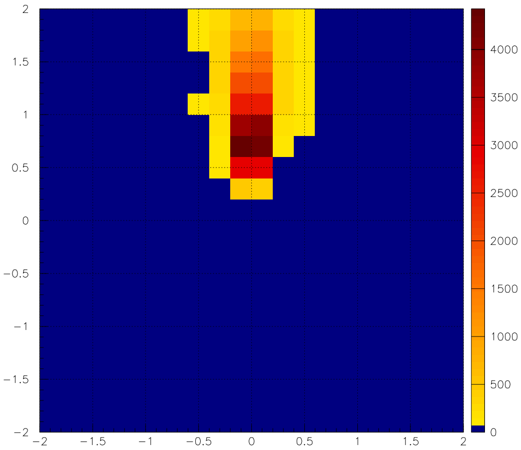


図4.14: 1TeV (口径10m,20×20pixel)

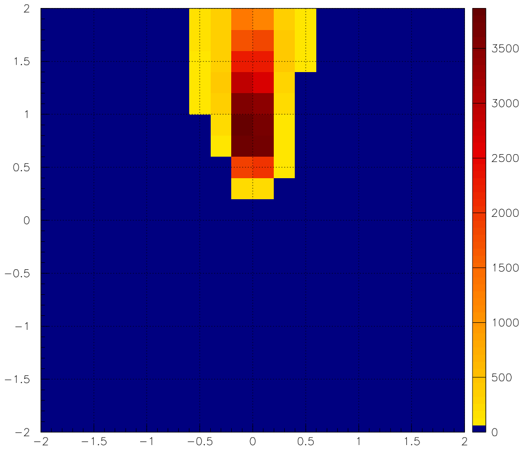


図4.15: 10TeV (口径10m,20×20pixel)

80×80pixel

表３．２の条件から、口径 10m、観測高度 4300m、80×80pixel のγ 線のチェレンコフ像。左から入射エネルギー 100GeV(図 4.16)、1TeV(図 4.17)、10TeV(図 4.18) の時である。

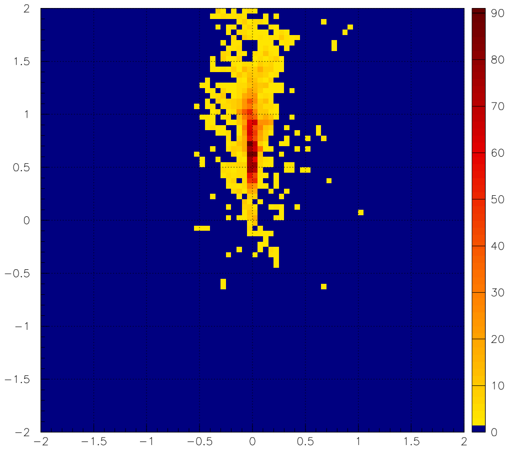


図 4.16: 100GeV (口径 10m,80×80pixel)

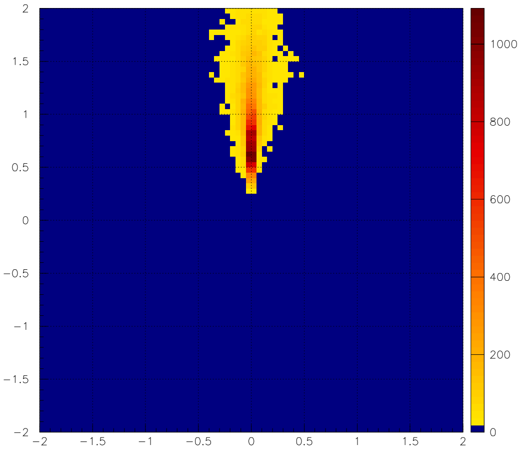


図 4.17: 1TeV (口径 10m,80×80pixel)

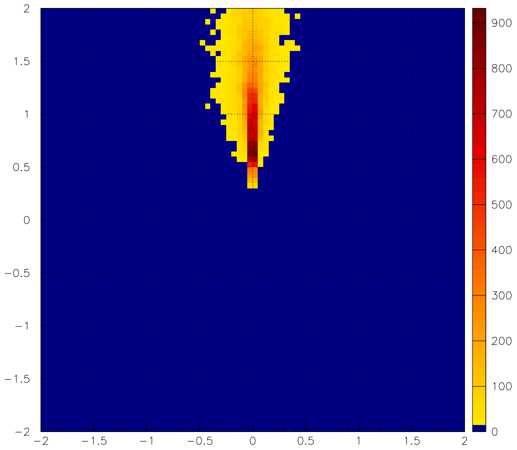


図 4.18: 10TeV (口径 10m,80×80pixel)

240×240pixel

表３．２の条件から、口径 10m、観測高度 4300m、240×240pixel のγ 線のチェレンコフ像。左から入射エネルギー 100GeV(図 4.19)、1TeV(図 4.20)、10TeV(図 4.21) の時である。

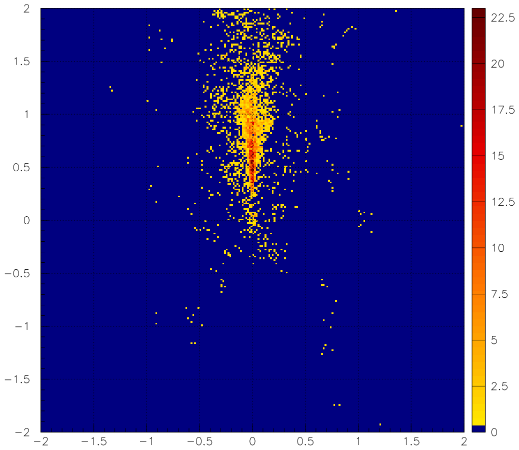


図 4.19: 100GeV (口径 10m,240×240pixel)

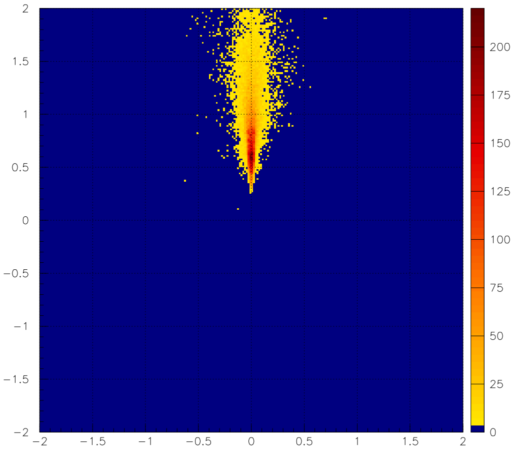


図 4.20: 1TeV (口径 10m,240×240pixel)

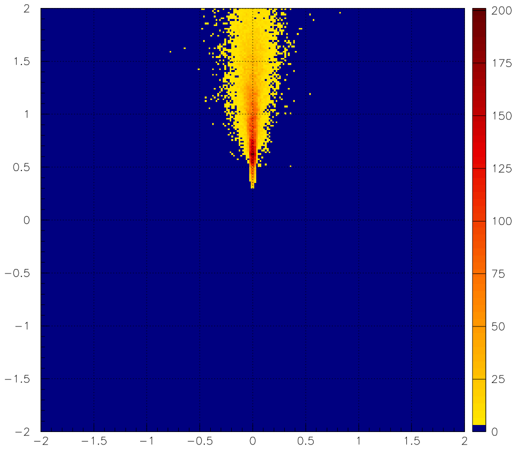


図 4.21: 10TeV (口径 10m,240×240pixel)

480×480pixel

表３．２の条件から、口径10m、観測高度4300m、480×480pixelのγ線のチェレンコフ像。左から入射エネルギー100GeV(図4.22)、1TeV(図4.23)、10TeV(図4.24)の時である。

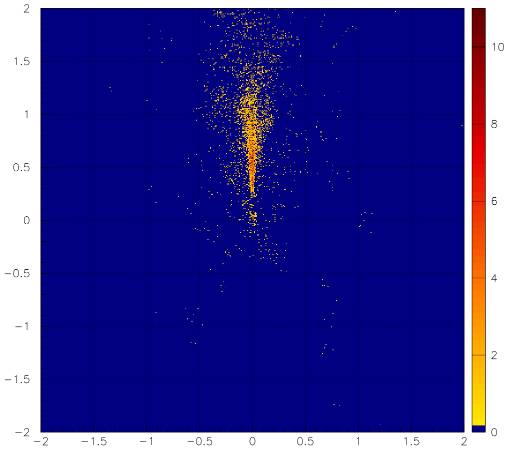


図4.22: 100GeV (口径10m,480×480pixel)

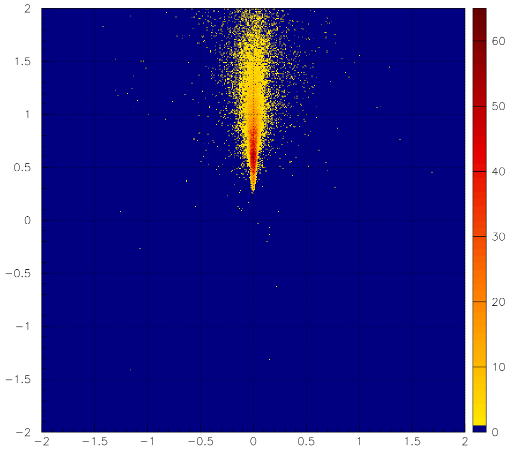


図4.23: 1TeV (口径10m,480×480pixel)

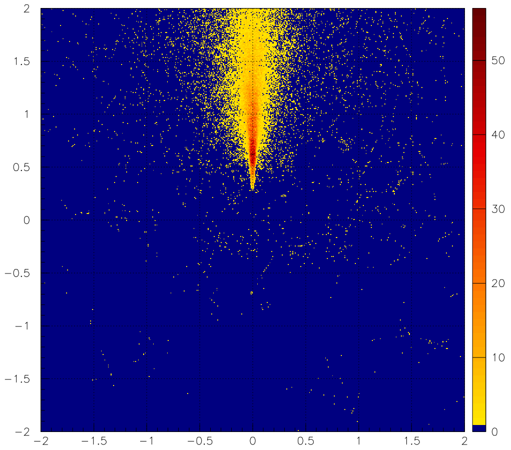


図4.24: 10TeV (口径10m,480×480pixel)

4.1.3 口径 30m γ 線のチェレンコフ像

20×20pixel

表３．３の条件から、口径 30m、観測高度 4300m、20×20pixel のγ 線のチェレンコフ像。左から入射エネルギー 10GeV(図 4.25)、100GeV(図 4.26)、1TeV(図 4.27) の時である。

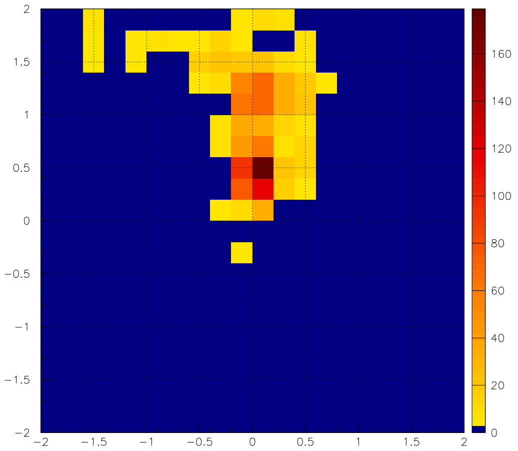


図 4.25: 10GeV (口径 30m,20×20pixel)

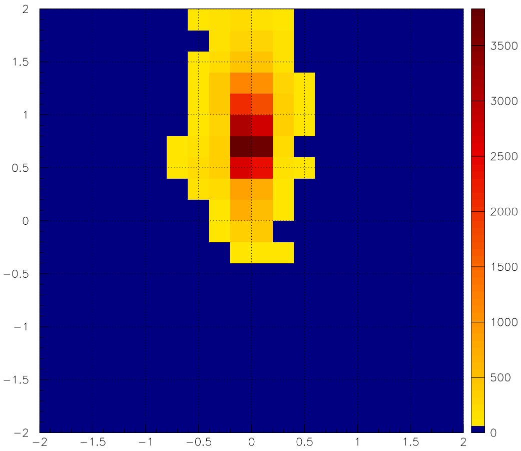


図 4.26: 100GeV (口径 30m,20×20pixel)

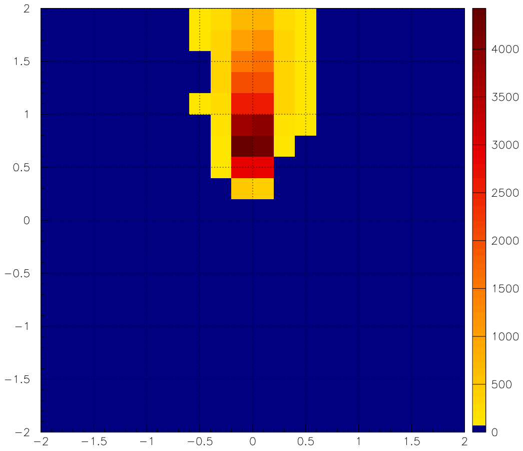


図 4.27: 1TeV (口径 30m,20×20pixel)

80×80pixel

表３．３の条件から、口径 30m、観測高度 4300m、80×80pixel のγ 線のチェレンコフ像。左から入射エネルギー 10GeV(図 4.28)、100GeV(図 4.29)、1TeV(図 4.30) の時である。

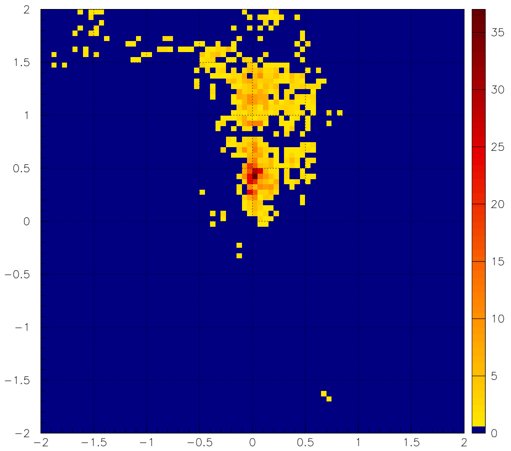


図 4.28: 10GeV (口径 30m,80×80pixel)

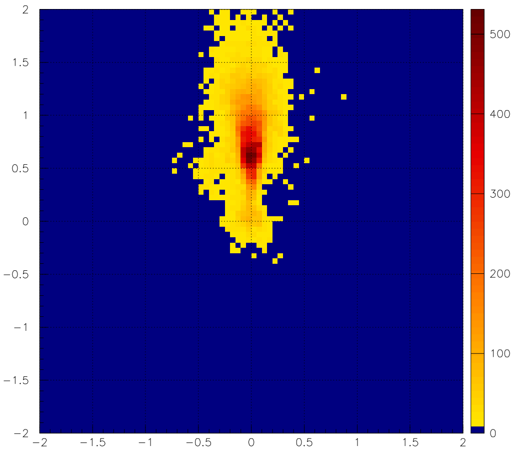


図 4.29: 100GeV (口径 30m,80×80pixel)

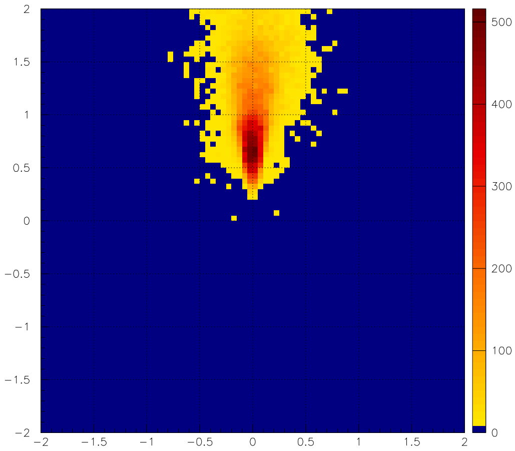


図 4.30: 1TeV (口径 30m,80×80pixel)

240×240pixel

表３．３の条件から、口径 30m、観測高度 4300m、240×240pixel のγ 線のチェレンコフ像。左から入射エネルギー 10GeV(図 4.31)、100GeV(図 4.32)、1TeV(図 4.33) の時である。

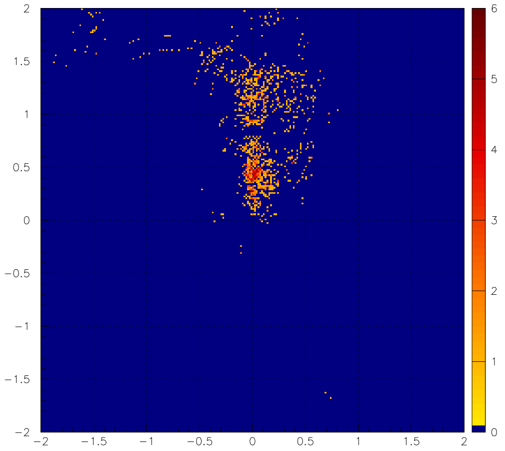


図 4.31: 10GeV (口径 30m,240×240pixel)

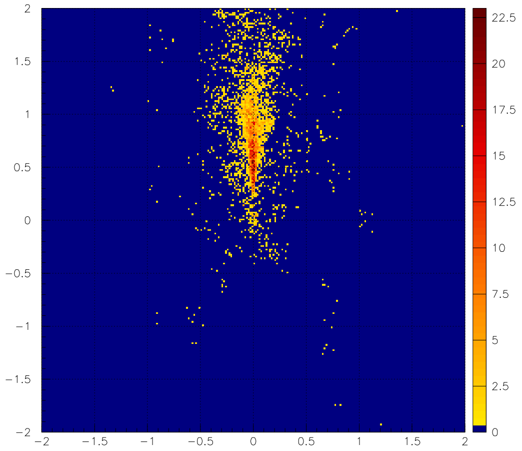


図 4.32: 100GeV (口径 30m,240×240pixel)

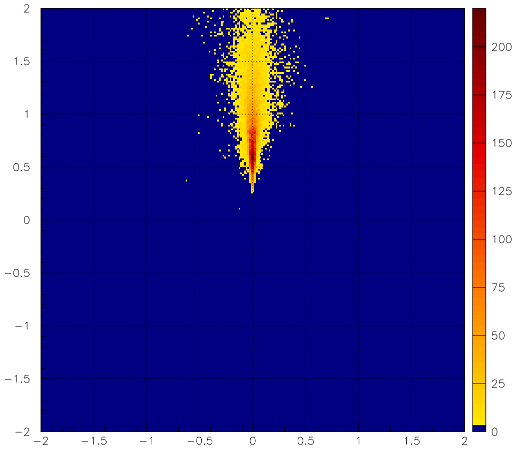


図 4.33: 1TeV (口径 30m,240×240pixel)

480×480pixel

表３．３の条件から、口径 30m、観測高度 4300m、480×480pixel のγ 線のチェレンコフ像。左から入射エネルギー 10GeV(図 4.34)、100GeV(図 4.35)、1TeV(図 4.36) の時である。

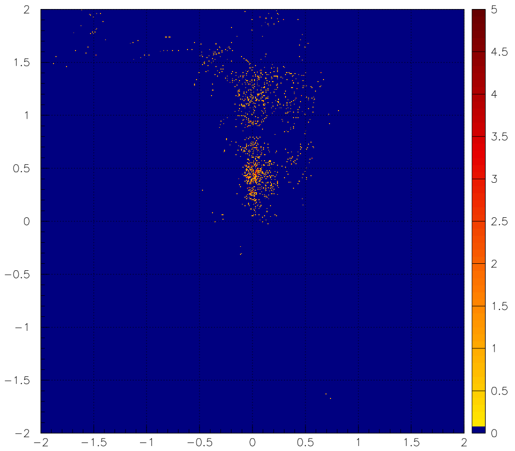


図 4.34: 10GeV (口径 30m,480×480pixel)

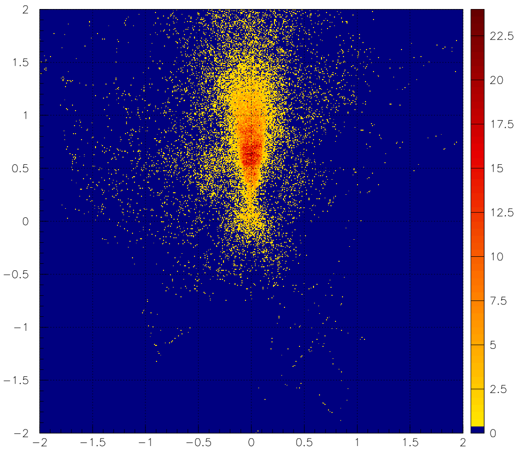


図 4.35: 1TeV (口径 30m,480×480pixel)

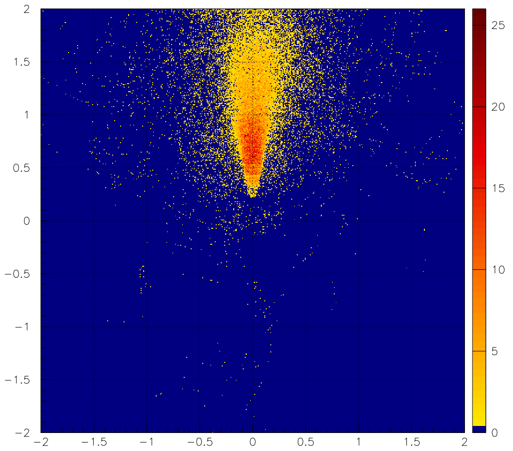


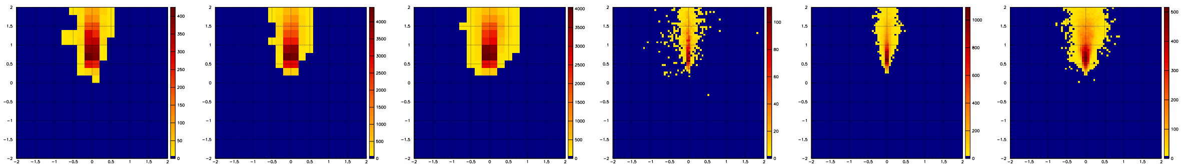
図 4.36: 10GeV (口径 30m,480×480pixel)

第5章　チェレンコフイメージの違い

5.1　口径での違い

観測高度 4300m に口径 3m、10m、30m の望遠鏡を配置した場合の 1TeV γ 線のチェレンコフイメージである。
共通のエネルギー 1TeV を用いた。10event 合計のイメージ。30m は 1event でのイメージ。

20×20pixel　　80×80pixel



240×240pixel　　480×480pixel

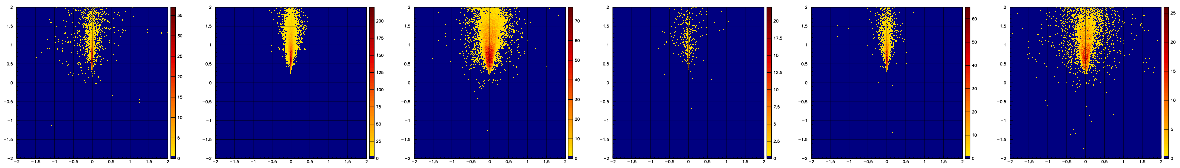


図 5.1: 左から口径 3,10,30m

それぞれの pixel に対して望遠鏡の口径が 3,10,30m の図である。
どの pixel の場合も口径の大きさにより、チェレンコフ像の大きさが違うことが分かる。口径が大きくなるとイメージが大きく見える。
30m のみ 1event の比較であるが 1evant でも十分な光量を捕らえているので 10event 合計を考えるとイメージはもっと大きくなると考えられる。

5.2 同光量での違い

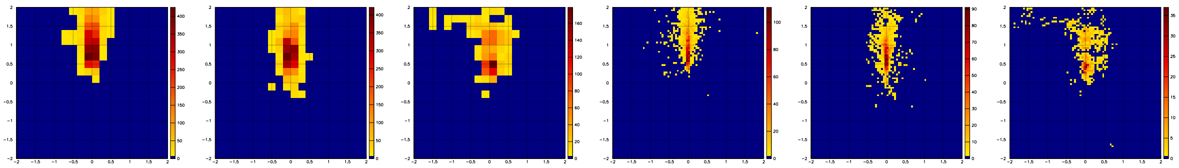
口径 3m → 10m は 10 倍の面積が、口径 3m → 30m は 100 倍の面積の違いから口径の大きさによってエネルギーを変え同光量となると思われる以下の 3 つの違いをみた。
観測高度 4300m で

1. 口径 3m1TeV, 口径 10m100GeV, 口径 30m10GeV
2. 口径 3m10TeV, 口径 10m1TeV, 口径 30m100GeV
3. 口径 3m100TeV, 口径 10m10TeV, 口径 30m1TeV

1、2 は 10event 合計のイメージ、3 は 1event イメージ

5.2.1 口径 3m1TeV, 口径 10m100GeV, 口径 30m10GeV

20×20pixel　　80×80pixel



240×240pixel　　480×480pixel

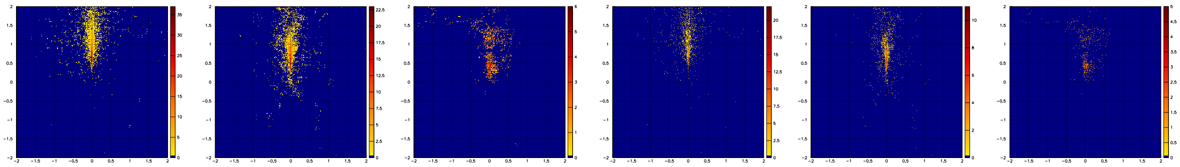
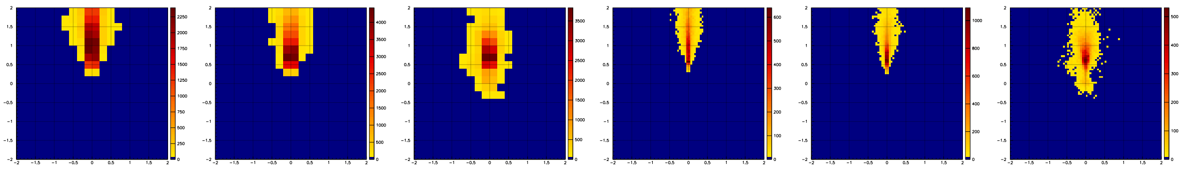


図 5.2: 左から口径 3,10,30m、エネルギー 1TeV,100GeV,10GeV

イメージから同じような形をしている。

5.2.2 口径 3m10TeV, 口径 10m1TeV, 口径 30m100GeV

20×20pixel 80×80pixel



240×240pixel 480×480pixel

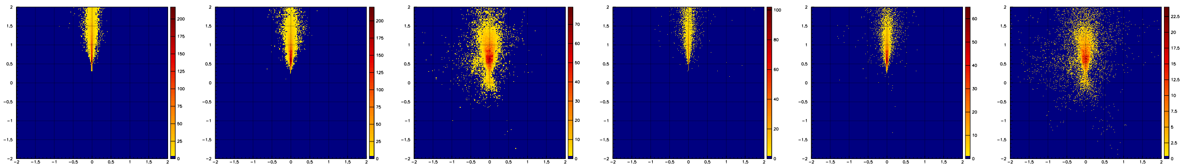
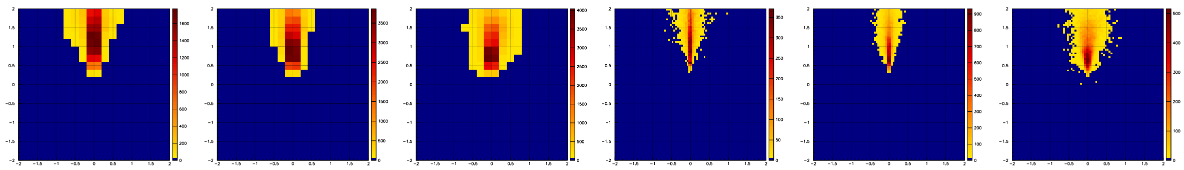


図 5.3: 左から口径 3,10,30m、エネルギー 10TeV,1TeV,100GeV

イメージから口径が大きくなるにつれて像が大きく (広がって) 見える。

5.2.3 口径 3m100TeV, 口径 10m10TeV, 口径 30m1TeV

20×20pixel　　80×80pixel



240×240pixel　　480×480pixel

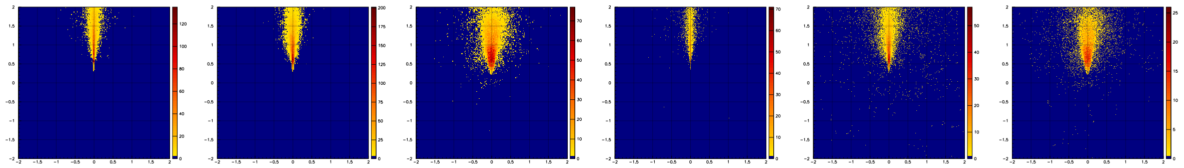


図 5.4: 左から口径 3,10,30m、エネルギー 100TeV,10TeV,1TeV

2 と同様に口径が大きくなるにつれイメージが広がって見える。

5.3 pixel 数での違い

観測高度 4300m で望遠鏡の口径 3,10,30m に対して pixel 数が変わることによってイメージがどう違うのかをみた。1TeV γ 線 10event 合計のイメージ。30m は 1event でのイメージ。

5.3.1 口径 3m

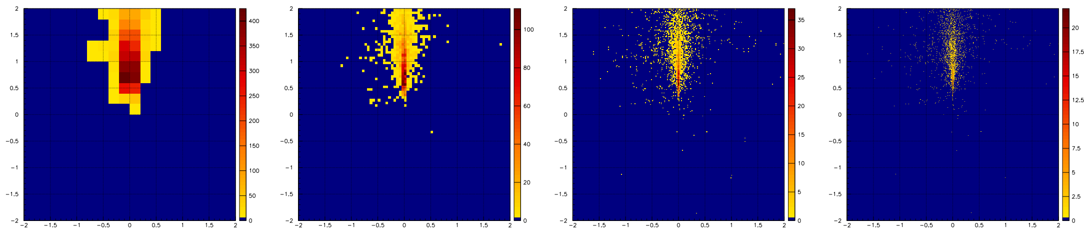


図 5.5: 口径 3m:左から 20,80,240,480pixel

pixel 数が大きくなることによりイメージが鮮明に捕らえれる。

5.3.2 口径 10m

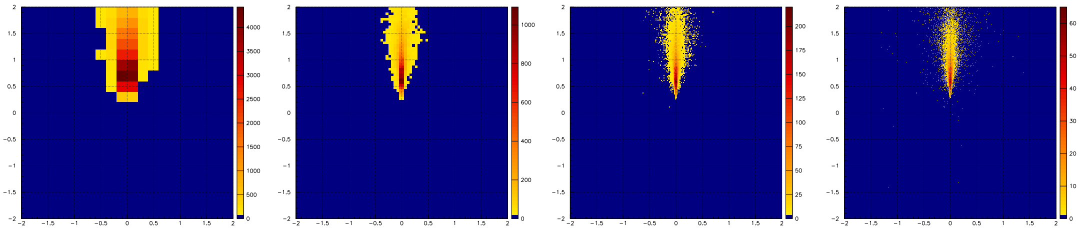


図 5.6: 口径 10m:左から 20,80,240,480pixel

pixel 数が大きくなることによりイメージが鮮明に捕らえれる。

5.3.3 口径 30m

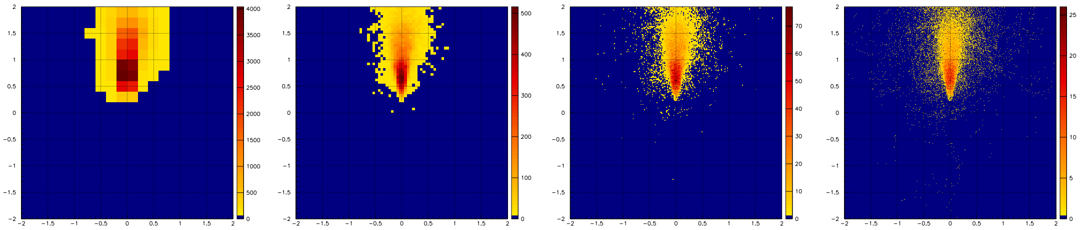


図 5.7: 口径 30m:左から 20,80,240,480pixel

pixel 数が大きくなることによりイメージが鮮明に捕らえれる。

第6章　結論

シミュレーションの結果から、口径が大きくなると

　カメラで捕らえたイメージは大きくみえることから口径が大きいものを用いる方がチェレンコフ光をよく集光させることができることが分かった。(光量の増加)

　光量が増加するのでエネルギーの閾値を下げることが可能。

よって低エネルギーのγ 線を捕らえれる可能性がある

　像が広がってしまい角度分解能が悪くなる傾向がある。これはチェレンコフ光は無限遠からの光ではないので1点では結像せず像に広がりをもたせてしまう。口径が大きければ大きい程ずれがおおきくなる。

pixel数を大きくすると

　光解像度カメラを用いていることになるのでよりイメージの鮮明な像を捕らえれる。