口径30mのチェレンコフ望遠鏡で観る宇宙線のイメージ

甲南大学
理学部
応用物理学科
宇宙粒子研究室 4回生

19921040
坂下 希子

February 2003

目 次

第 1 章　概要 **4**

第 2 章　超高エネルギーγ 線天文学 **5**

2.1　宇宙線天文学 5

2.1.1　はじめに 5

2.2　γ 線発生機構 5

2.2.1　銀河系内の高エネルギーγ 線天体 5

2.2.2　銀河系外の高エネルギーγ 線天体 6

2.3　γ 線測定理論 6

2.3.1　空気シャワー 6

2.3.2　電磁カスケードシャワー 6

2.3.3　電子対生成 6

2.3.4　制動放射 7

2.3.5　ハドロンカスケードシャワー 7

2.3.6　チェレンコフ光 8

第 3 章　チェレンコフ望遠鏡 **9**

3.1　チェレンコフ望遠鏡 9

3.2　チェレンコフ望遠鏡によるγ 線観測 9

第 4 章　シミュレーションの概要 **11**

第 5 章　口径 30m チェレンコフ望遠鏡の有効性 **12**

5.1　口径 30m,10m,3m の望遠鏡の違い 12

5.2　それぞれの宇宙線が作る空気シャワー 15

5.2.1　γ 線 16

5.2.2　電子 17

5.2.3　陽子 18

5.2.4　ミューオン 19

5.3　地磁気による影響 20

5.4　10-100GeV 領域の宇宙線の観測 21

5.4.1　10-100GeV 領域の問題点 21

5.5　ステレオ観測的シミュレーション 25

第 6 章　結論 **33**

6.1 33

第 7 章　謝辞 **34**

図 目 次

2.1 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

3.1 ７素子宇宙線望遠鏡 10
3.2 CANGAROO チェレンコフ望遠鏡の想像図 10

5.1 1TeV のガンマ線 10 イベントを宇宙線の発生地点の真下より 100m 離れた場所で観測。左から口径 3m、口径 10m、口径 30m 望遠鏡 12
5.2 1TeV のガンマ線 10 イベントを宇宙線の発生地点の真下より 100m 離れた場所で観測。左から口径 3m、口径 10m、口径 30m 望遠鏡 ただしスケールを揃えている。 13
5.3 口径 3m 望遠鏡と 30m 望遠鏡の光電子数の差, 光電子数は 10 イベント分の合計 . . 13
5.4 口径の違いによる width と length の変化 14
5.5 宇宙線の作るチェレンコフ光のシャワーを輪切りする 15
5.6 10TeV のγ 線の軌跡 16
5.7 10TeV γ 線の光電子数の動き 16
5.8 10TeV 電子の軌跡 17
5.9 電子拡大図 17
5.10 10TeV 陽子の軌跡 18
5.11 陽子拡大図 18
5.12 10TeV ミューオンの軌跡 19
5.13 ミューオン拡大図 19
5.14 10TeV ミューオンの光電子数の動き 20
5.15 電子 10GeV から 90GeV までのイメージの移り変わり 21
5.16 γ 線 10GeV から 90GeV までのイメージの移り変わり 22
5.17 光電子数の遷移のグラフ 22
5.18 00GeV のγ 線と電子の比較 、3 次元イメージ 23
5.19 視野 16 ° で観た電子 24
5.20 ミューオンの入射方向の延長線から望遠鏡までの距離と光電子数の関係 25
5.21 ミューオンの入射方向の延長線から望遠鏡までの距離の違いによるイメージの遷移 25
5.22 γ 線の入射方向の延長線から望遠鏡までの距離と光電子数の関係 26
5.23 γ 線の入射方向の延長線から望遠鏡までの距離の違いによるイメージの遷移 26
5.24 1TeV γ 線の ステレオ的観測によるイメージ 27
5.25 1TeV 電子の ステレオ的観測によるイメージ 27
5.26 1TeV のγ 線と電子の入射方向の延長線から望遠鏡までの距離と光電子数の関係 . . 27
5.27 100GeV のγ 線と電子の入射方向の延長線から望遠鏡までの距離と光電子数の関係 28
5.28 50GeV のγ 線と電子の入射方向の延長線から望遠鏡までの距離と光電子数の関係 . 28
5.29 10GeV のγ 線と電子の入射方向の延長線から望遠鏡までの距離と光電子数の関係 . 29

5.30 γ 線と電子の入射方向の延長線から望遠鏡までの距離と光電子数の関係 29
5.31 100GeV のγ 線と高度 30000m で発生した電子の入射方向の延長線から望遠鏡までの距離と光電子数の関係 30
5.32 50GeV のγ 線と高度 30000m で発生した電子の入射方向の延長線から望遠鏡までの距離と光電子数の関係 30
5.33 10GeV のγ 線と高度 30000m で発生した電子の入射方向の延長線から望遠鏡までの距離と光電子数の関係 31
5.34 5GeV のγ 線と高度 30000m で発生した電子の入射方向の延長線から望遠鏡までの距離と光電子数の関係 31
5.35 2GeV のγ 線と高度 30000m で発生した電子の入射方向の延長線から望遠鏡までの距離と光電子数の関係 32
5.36 1GeV のγ 線と高度 30000m で発生した電子の入射方向の延長線から望遠鏡までの距離と光電子数の関係 32

第1章　概要

現在、地上で超高エネルギーγ 線を観測するために、世界では 10m から 17m 口径のチェレンコフ望遠鏡で観測するいくつかの計画が進行している。しかし、今後はより遠方の宇宙からやってくるγ 線を捉えるために、更なる大口径のチェレンコフ望遠鏡が必要であろう。

この研究では、30m という大口径のチェレンコフ望遠鏡を用いたときにγ 線、陽子、電子、ミューオンなどがどのように撮像されるかをシミュレーションで調べた。ただし、30m 口径のチェレンコフ望遠鏡の光学系はどのようなものがよいかは未定であるので、ここでは収差のない理想的な光学系を仮定して計算した。この結果、このような大口径望遠鏡を用いると 10-100GeV 領域のγ 線も検出可能であることがわかった。

第2章　超高エネルギーγ 線天文学

2.1　宇宙線天文学

2.1.1　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り、低エネルギーのもの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現象を利用した地上観測が主となる。これは宇宙線のフラックスがエネルギーの巾に従って急激に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観測しようとし、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。

2.2　γ 線発生機構

主なγ 線源として銀河系内の高エネルギーγ 線天体と銀河系外の高エネルギーγ 線天体がある。

2.2.1　銀河系内の高エネルギーγ 線天体

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パイオンを生成してその崩壊からγ 線が放出される。ASCA は超新星残骸からの非熱的放射を発見し、シンクロトロン放射を行う数百 GeV の電子があるであろうと予想した。その電子による逆コンプトン放射で光子を超高エネルギーに叩きあげるはずである。

中性子星で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、それにともなっての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。γ 線は最も外側の閉じた磁力線の近くで電子と陽子の曲率放射、シンクロトロン放射、逆コンプトン放射などによって放射される。

銀河円盤内の宇宙線が星間物質に衝突してγ 線形成をする。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 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ と同程度の寄与をすることもわかっている。

2.2.2　銀河系外の高エネルギーγ 線天体

活動銀河核は我々の銀河外にある中心が非常に活動的な銀河の総称で、電波からγ 線まで幅広く観測されている。

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。

数十 KeV 以上のγ 線 (10GeV を越えることもある) が、10 秒程度の間に一次的に放射される現象。

2.3　γ 線測定理論

2.3.1　空気シャワー

高エネルギーの一次宇宙線が地球の大気に入射すると、大気中の原子核と衝突して核相互作用を起こす。この結果多数の粒子を発生する。これらの二次粒子がさらに大気中の原子核と衝突を繰り返して、莫大な数の粒子が生成される。こうして生成された粒子が、一群となって大気中を光速度に近い速さで地上に降り落ちてくる現象を、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は、荷電粒子である陽子などの原子核と中性粒子である γ 線である。

2.3.2　電磁カスケードシャワー

高エネルギー γ 線は、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、この電子、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 線をつくる。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、陽電子が大気中に入射したときも、制動放射をおこして γ 線を出し、その γ 線が電子対生成をおこす。

このようにして、高エネルギーの γ 線、または、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。

2.3.3　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 (positron) 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。

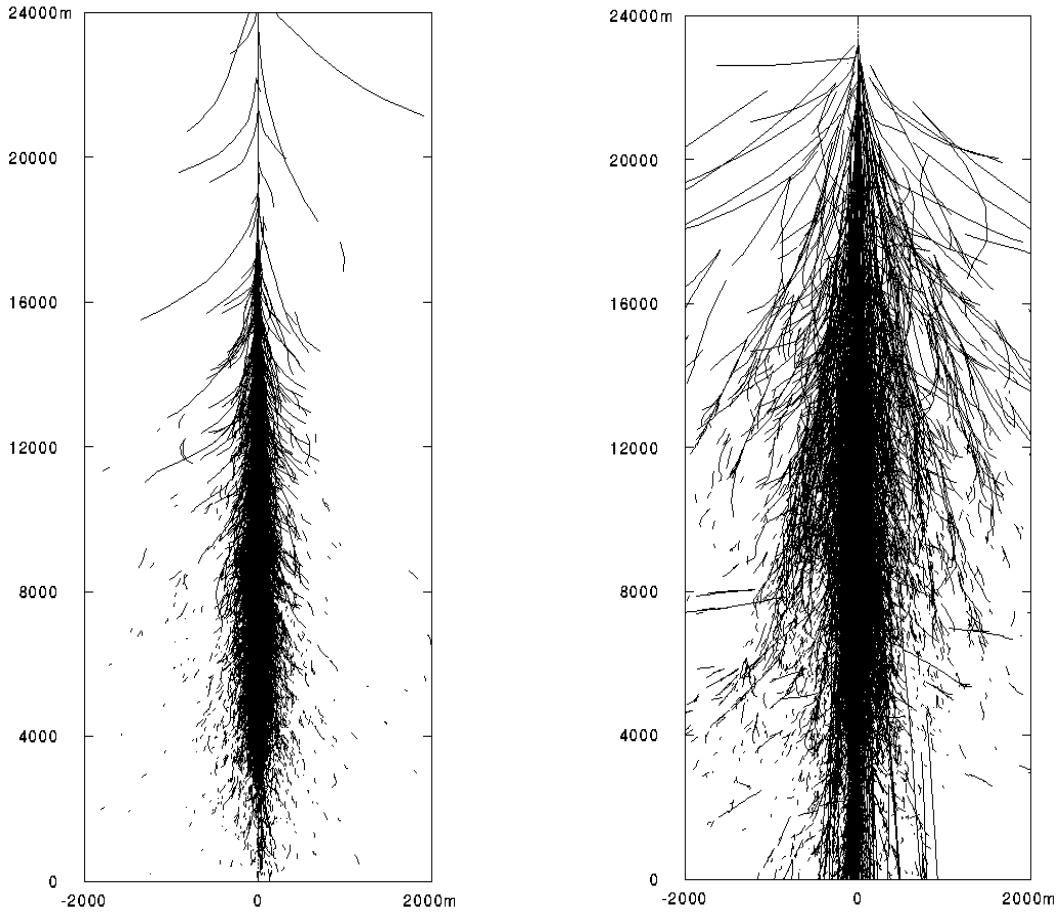


図 2.1: 1TeVγ 線 (左) と 3TeV 陽子 (右) による空気シャワーの発達。空気シャワー中の荷電粒子の軌跡を描いたもの。縦軸は高度 1600m をゼロにしている。

2.3.4 制動放射

高速度で走っている電子が原子核の近傍を通ると、散乱によって急激に進路が曲げられる。そのために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。これを制動放射という。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。

2.3.5 ハドロンカスケードシャワー

高エネルギーの陽子や原子核が大気中に入射すると、大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、ハドロンカスケードシャワーと呼ぶ。

2.3.6 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 / 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び、この現象をチェレンコフ効果と呼ぶ。

チェレンコフ光は粒子の進行方向と角度 θ をなす方向に放出される。ただし θ は

$$\cos\theta = c \ / \ nv$$

で与えられる。すなわち、この光は粒子の運動方向と θ をなす角度をもつ円錐状に放出される。

第3章　チェレンコフ望遠鏡

3.1　チェレンコフ望遠鏡

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。

3.2　チェレンコフ望遠鏡によるγ 線観測

高エネルギーγ 線が地球大気に突入すると大気中の原子核と相互作用し、大量の二次粒子を発生し、空気シャワー現象がおこる。これによって発生するチェレンコフ光を反射鏡で集光し、PMT からなるカメラを使って電気信号に変換し、その信号をデータ収集エレクトロニクスを使って検出する。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。アメリカの Smithonian 天文台の Whipple グループは、アメリカのホプキンス山で 10m 反射望遠鏡を用いて 100GeV ~ 10TeV の領域の観測を行ってきた。彼らはイメージング法を用いてかに星雲からのγ 線を観測することに初めて成功した。宇宙線研や甲南大などが協力して建設したユタ 7 素子宇宙線望遠鏡では、複数のチェレンコフ望遠鏡による観測で活動銀河核 1ES1959+650 からの TeV γ 線フレアーの観測に成功した。ドイツの HEGRA はカナリー諸島で 6 台の望遠鏡による精度のよい観測で成果を上げてきた。フランスのピレネーでは CAT が 200GeV ~ 20TeV の領域のγ 線観測を行った。オーストラリアのウーメラでは日豪の共同実験グループ CANGAROO が当初の 3.8m 口径のチェレンコフ望遠鏡から 7m,10m と拡張し、かに星雲、パルサー 1706-44、帆座パルサー、超新星残骸 1006 などからの TeV γ 線の発見で大きな成果を上げて来た。これらの成果をもとに CANGAROO では 10m 口径の望遠鏡を 4 台建設中である。さらに、HESS はアフリカのナミビアに 4 台の口径 12m 望遠鏡を建設中であり、現在チェレンコフ望遠鏡では世界最大の口径を誇る口径 17m 望遠鏡の MAGIC も建設を急いでいる。その他にも STACEE、CELESTE などがある。また、甲南大学宇宙粒子研究室も口径 3m のチェレンコフ望遠鏡を持っていて、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。

図 3.1: 7 素子宇宙線望遠鏡

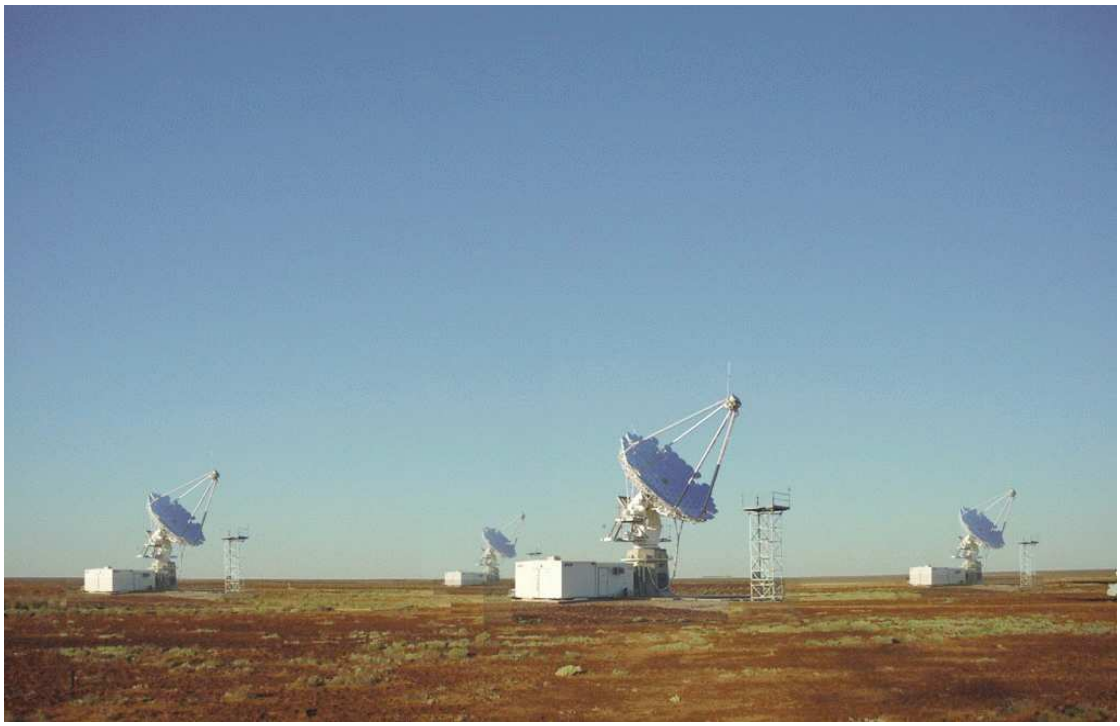


図 3.2: CANGAROO チェレンコフ望遠鏡の想像図

第4章　シミュレーションの概要

この研究で行ったシミュレーションでは、宇宙線が大気に入射し、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てカメラ部に集め、データとして出力するまでの流れをコンピューター上で行った。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や、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。

空気シャワーの生成に関して、第 5 章 5-1 は corsika version4.50、5-2 以降は corsika version5.62 ををを使用した。

チェレンコフ光子は 250 から 500nm の範囲だけを生成した。光子数はさらにこのあとで、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 で光電子にまで変換される確率) にまで落とされる。PMT の感度域は 250 から 500nm であり、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。

望遠鏡の光学系は具体的なものは考えず、理想的な角度分解能を持つものとしたものとした。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 80 個または 160 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 6,400 または 25,600 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。トリガー (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。

観測場所は特に注意書きがなければチベット高度 4300m で行っている。

宇宙線は全て大気の頂上 (高度 103km) 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。

第5章　口径30mチェレンコフ望遠鏡の有効性

口径が 30m のチェレンコフ望遠鏡で覗る宇宙線のイメージとは一体どのようなものか。目標とすることは 10GeV 領域のガンマ線の観測である。その可能性や、口径を大きくすることによって起こるであろう問題点などをさまざまな面から検証した。

5.1　口径 30m,10m,3m の望遠鏡の違い

甲南大学西校舎に設置されている口径 3m 甲南チェレンコフ望遠鏡と、オーストラリアで 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、今回話題にしている口径 30m 望遠鏡で同じ 1TeV のガンマ線を観たときの違いを調べる。宇宙線の位置は (0,0)、望遠鏡の座標は (0,-100)、それぞれ 10 イベント分の合計である。

知りたいのは次の事柄である。

口径が大きくすることで光電子数の増加はどれくらい期待できるか。30m 望遠鏡は口径大ゆえの誤差によりイメージが広がってしまわないか。

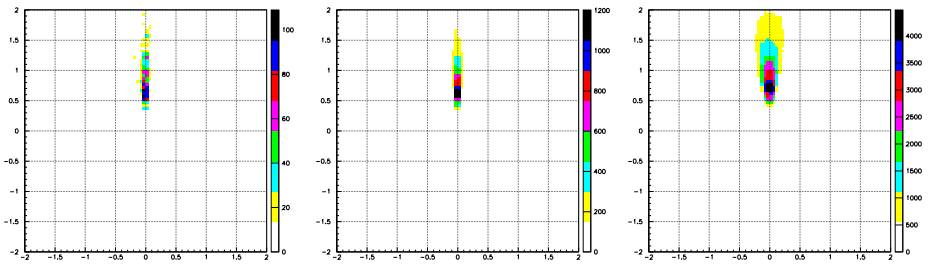


図 5.1: 1TeV のガンマ線 10 イベントを宇宙線の発生地点の真下より 100m 離れた場所で観測。左から口径 3m、口径 10m、口径 30m 望遠鏡

このイメージではあまり変わりがないように思えるが、このイメージのスケールを合わせると、下の図のようになる。

3m 望遠鏡でも光を捕らえ形を確認することができるが、かなりの光量の差があることがわかる。

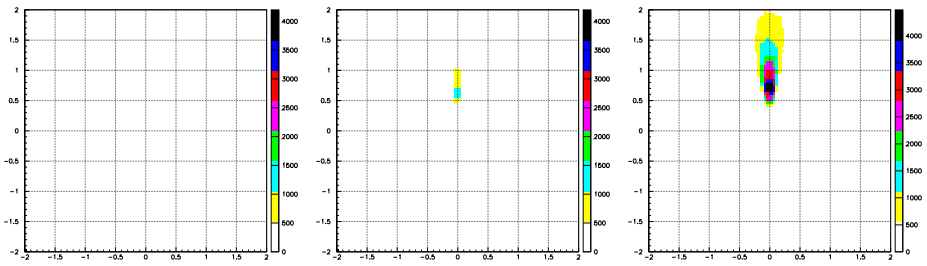


図 5.2: 1TeV のガンマ線 10 イベントを宇宙線の発生地点の真下より 100m 離れた場所で観測。左から口径 3m、口径 10m、口径 30m 望遠鏡 ただしスケールを揃えている。

3m 望遠鏡および 30m 望遠鏡の各エネルギー領域で捕らえた光電子数を下のグラフに示す。(光電子数は 10 イベント分の合計)

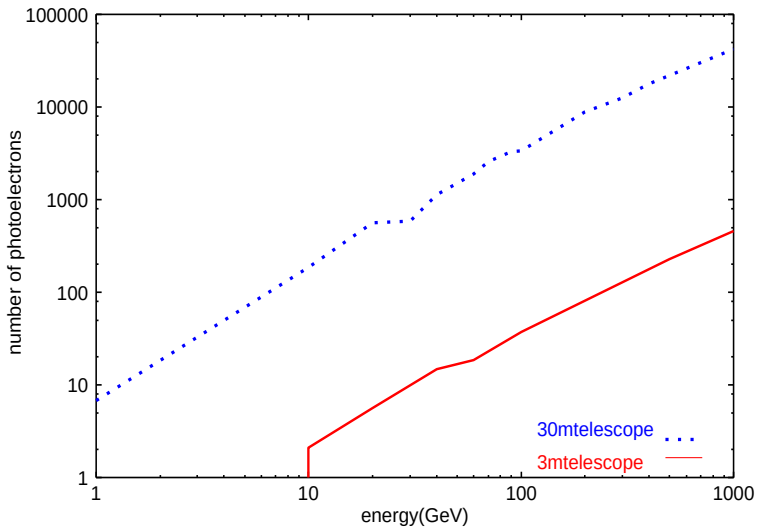


図 5.3: 口径 3m 望遠鏡と 30m 望遠鏡の光電子数の差, 光電子数は 10 イベント分の合計

30m 望遠鏡は 3m 望遠鏡の約 100 倍の光を集めることができそうである。では、口径が大きいゆえの誤差はどうか。口径が大きいと、角度を持って鏡に入射した光は本来入るべきカメラの場所から大きくずれてしまい、形が崩れてしまう可能性がある。そこで、各口径の width,length の平均をとり、その遷移を観た。ピクセル数はそれぞれ 6400 チャンネルである。

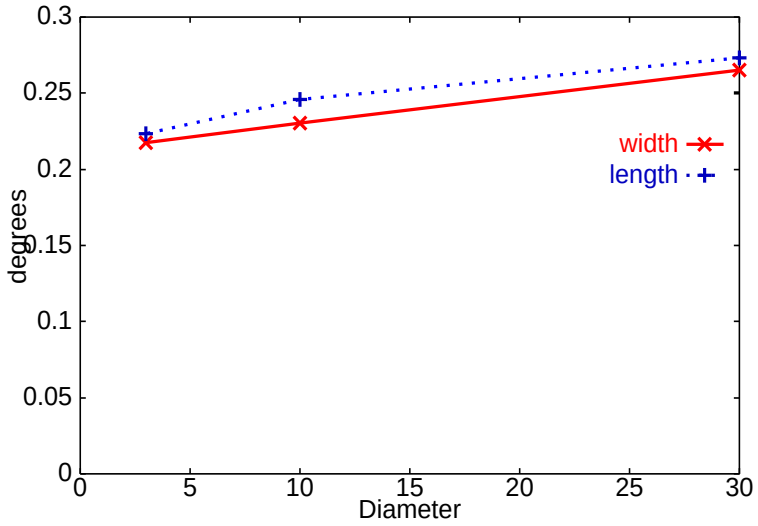


図 5.4: 口径の違いによる width と length の変化

これによって口径を 30m にすることによる像のずれはちいさいと言えるであろう。ただし、理想的に近い光学系を作るための努力が必要である。

5.2　それぞれの宇宙線が作る空気シャワー

粒子の違いによって作るシャワーの形はどのように変わるのか。10TeV の粒子 (γ 線、電子、陽子、ミューオン)1 イベントを大気の頂上 (1.1×10^8cm) から垂直に落とし、高度 40km、30km、20km、10km、0m でのシャワーの断面を観測しシャワーの発達のようすの違いをみた。

それぞれの空気の密度が違うのでシャワーの成長は大きくかわってくるはずである。

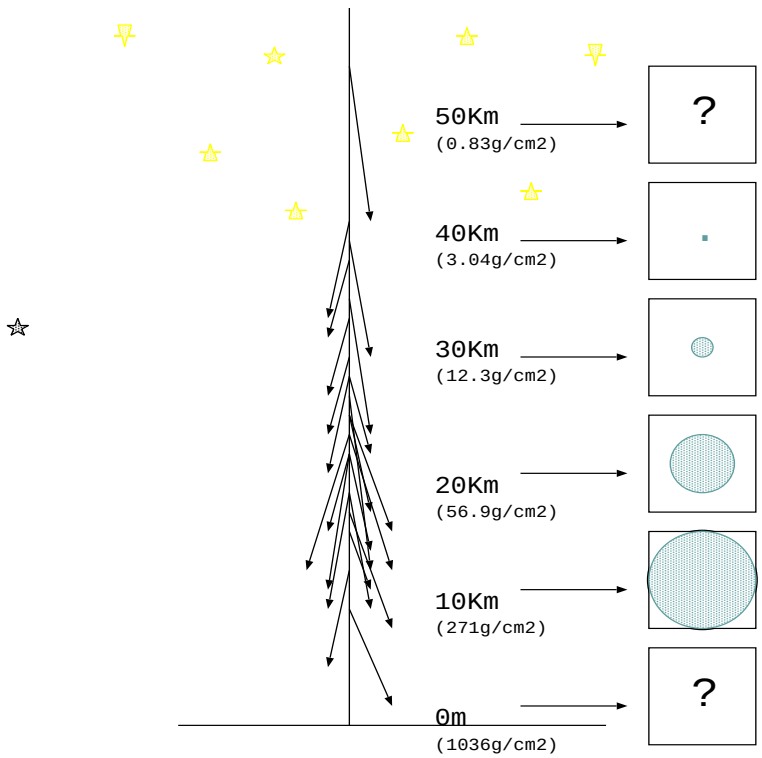


図 5.5: 宇宙線の作るチェレンコフ光のシャワーを輪切りする

5.2.1 γ 線

γ 線は最初の相互作用で電子対を創生し、その電子と陽電子が次々と次々と相互作用し、電磁シャワーを生成する。従って発生するチェレンコフ光はすべて電子由来のものである。

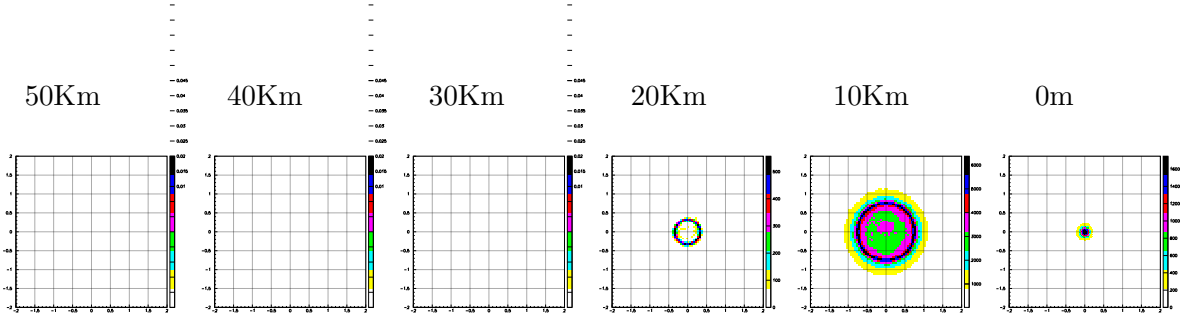


図 5.6: 10TeV のγ 線の軌跡

first interaction を起こすまでの間、チェレンコフ光は発生しない。次の電子と比べてわかるのだが、これが電子とγ 線のつくる空気シャワーの大きな違いのひとつである。また、γ 線は電荷を持たないので電子対創生で電子を作るまではまっすぐ落ちてくる。光電子数の変化は下図のようになる。

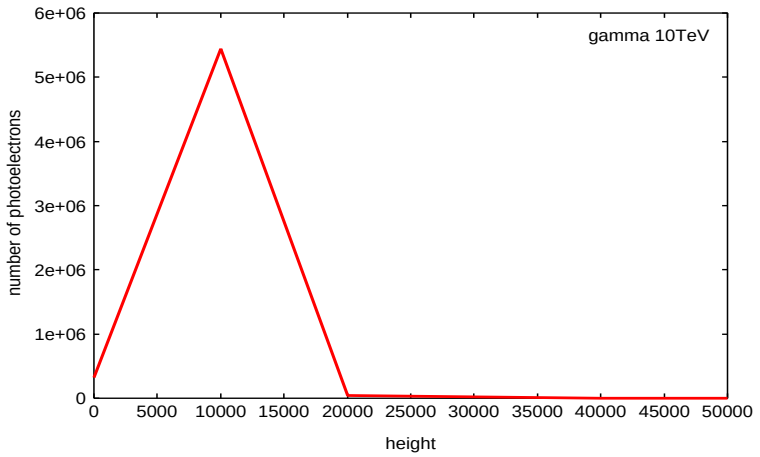


図 5.7: 10TeV γ 線の光電子数の動き

5.2.2　電子

電子はγ 線同様電磁シャワーを生成するが、γ 線と唯一違うのは一次宇宙線が電荷をもち、チェレンコフ光を発生させるということである。また、大気入射から first interaction までの間に地磁気の影響を受けてシャワーの向きが真下ではなくなる。この実験では 10 の粒子でおこなっているのでその影響は少ないが、これが低いエネルギーだったらその影響は無視できないものになるだろう。

50Km　40Km　30Km　20Km　10Km　0m

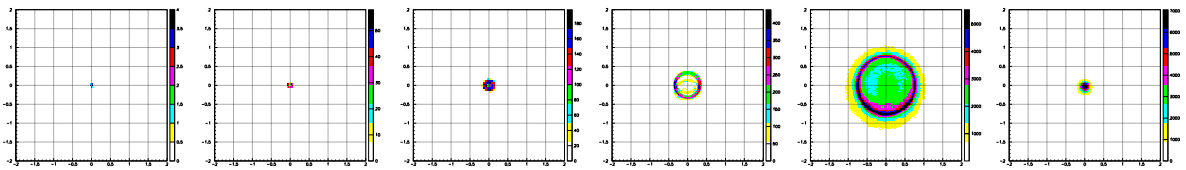


図 5.8: 10TeV 電子の軌跡

この図の視野は 4 度× 4 度であるが、2 度× 2 度の部分だけ拡大したのが下の図である。

50Km　40Km　30Km　20Km　10Km　0m

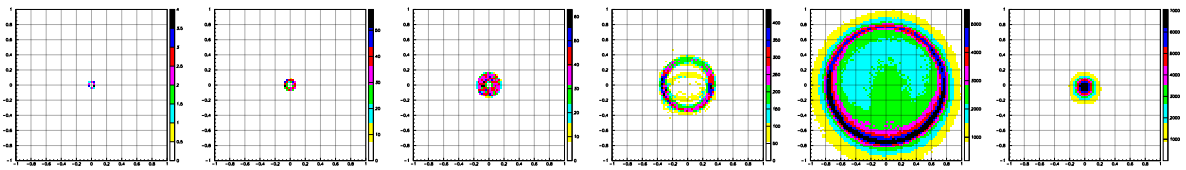


図 5.9: 電子拡大図

5.2.3　陽子

陽子が大気中に入射し、原子核と衝突すると大量の粒子が発生し、それぞれがそれぞれに反応を起こし、大量の粒子を発生させる。陽子が作るようなシャワーをハドロンカスケードシャワーという。first interaction で発生する核子は 10TeV の陽子一個の場合、NUCLEON が 10 個、PION が 26 個、KAON が 6 個、BARYON が 2 個、といった割合である。

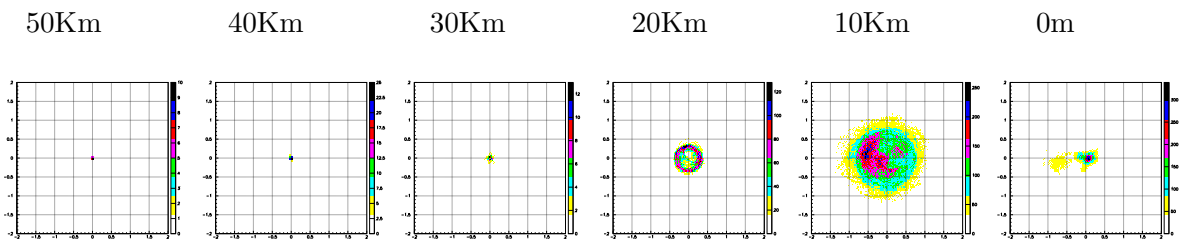


図 5.10: 10TeV 陽子の軌跡

これを拡大したのが次の図。

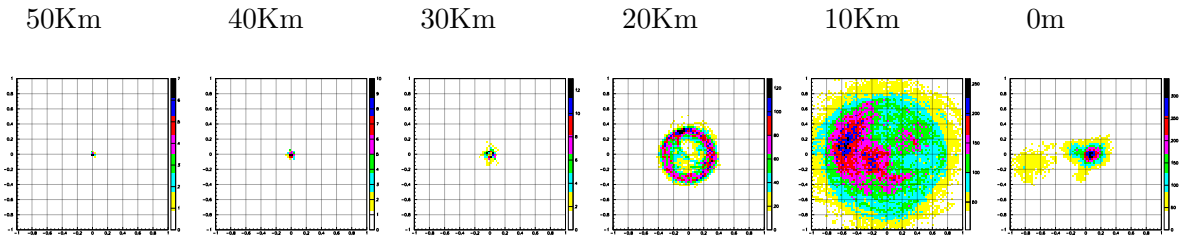


図 5.11: 陽子拡大図

20Km 地点などを見ると円が何重にもなっているのがよくわかる。色んな種類の粒子がそれぞれに崩壊などを繰り返しながらチェレンコフ光を発生させているからである。

5.2.4　ミューオン

最後にミューオンであるが、ミューオンの寿命は比較的長いのでエネルギーの大きいミューオンはほとんどが崩壊することなく地表まで達する。よってミューオンは空気シャワーを作らず、発生するチェレンコフ光はミューオン自身から発生するもののみである。一本のミューオンから発生するチェレンコフ光の角度はほぼ同じで、鏡に同じ角度で入った光は一ヶ所に集光されるので、真下で観測したときその光はリングの様に見える。これはミューオンリングと呼ばれるものである。

50Km　40Km　30Km　20Km　10Km　0m

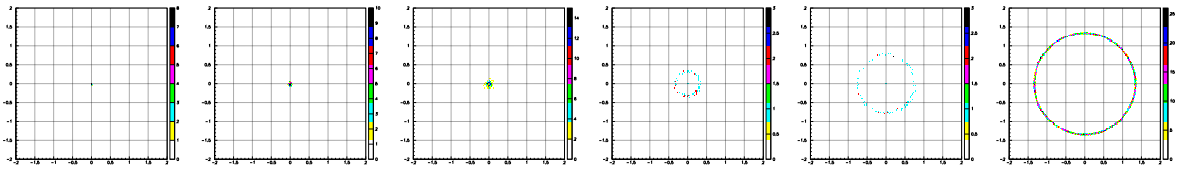


図 5.12: 10TeV ミューオンの軌跡

高度が下がり空気の密度が高くなる程、ミューオンに対してチェレンコフ光の発生する角度がひろがっていく様子がわかる。これを 2 度× 2 度に拡大すると次のようになる。

50Km　40Km　30Km　20Km　10Km　0m

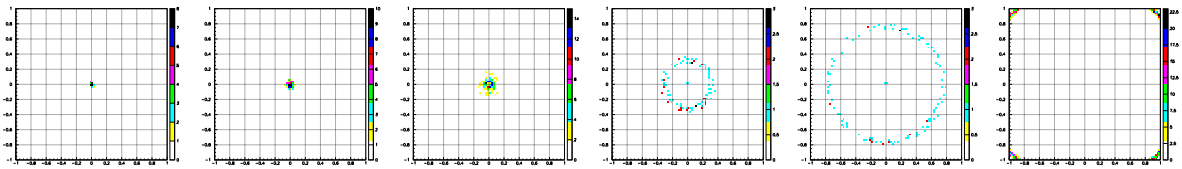


図 5.13: ミューオン拡大図

光電子数の変化は次のようになる。

10km 以下で光電子数が急に増大するのは空気の密度が急激に増加するからで、γ 線や他の粒子のように 0m 付近で光電子数が激減しないのは、崩壊によるエネルギー損失がない分多くのエネルギーを蓄え続けることができる。その代わりほかの宇宙線に比べて発生するチェレンコフ光の数は格段に少ない。

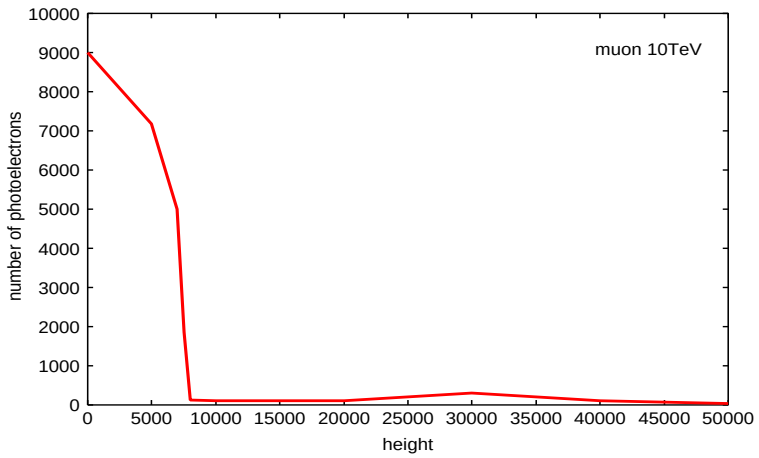


図 5.14: 10TeV ミューオンの光電子数の動き

5.3 地磁気による影響

宇宙からやってきたり大気の上空で発生した電荷をもつ宇宙粒子は、地上に到達するまでの間に地球の地磁気によって曲げられる。電子や陽子などの荷電粒子を観測し、源を調べる際にはこの影響を考慮に入れなければならない。荷電粒子のエネルギーが低くなればなるほど、粒子は地磁気の影響を強く受ける。下図に主なチェレンコフ望遠鏡の設置されている地域の地磁気および標高を示す。

地名	計画名称	緯度 (°)	経度 (°)	高度 (m)	水平成分 (T)	垂直成分 (T)
Woomera(Australia)	CANGAROO	31.1south	136.8east	1600	+25	-50
羊八井 (China)	TibetAS γ	30.1north	90.5east	4300	+34	35
Gamsberg(Namibia)	H.E.S.S.	23.2north	15.5east	1800		
La Palma(Spain)	MAGIC	28.8north	17.9west	2300	+29.5	+25
Mt.Hopkins(USA)	VERITAS	31.7north	110west	1390	+25	+40
神戸	甲南望遠鏡	34.7north	135.3east	0	+31	+35

5.4　10-100GeV 領域の宇宙線の観測

5.4.1　10-100GeV 領域の問題点

10-100GeV 領域のγ 線を観るにはたくさんの問題がある。まず、宇宙線が発生させるチェレンコフ光の数が少ないので、なかなか集団で捕らえることができない。この問題は口径 30m チェレンコフ望遠鏡で観測することで解決できる。先ほど述べたように同じシャワーを観測したとき、３ m 望遠鏡の 100 倍の光電子を捕らえることができるので、10GeV のγ 線の出すチェレンコフ光は十分領域内である。もうひとつはバックグラウンドの問題である。

この領域の陽子は最初の衝突のときかなりの角度をもってひろがり、ほとんどシャワーの形を作らないことがわかっているので、問題になるのは電子である。しかし、空気シャワーの成長過程が電子とγ 線ではほぼ同じなだけにこれは大きな問題である。では、10GeV 領域のγ 線と電子のイメージを比較してみよう。大気の頂上から地球の中心に向かってまっすぐ落ちてきたそれぞれのエネルギーの宇宙線を、一次宇宙線が落ちる場所から東に 100m 離れた場所に設置した口径 30m チェレンコフ望遠鏡で観測する。観測場所は標高 4300m、北緯 30.1 °、東経 90. 5 ° のチベット、羊八井 (ヤンパーチン) である。

まず、10GeV から 90GeV までの電子のイメージ図を下に示す。100 イベント分を降らせて重ね合わせたものである。

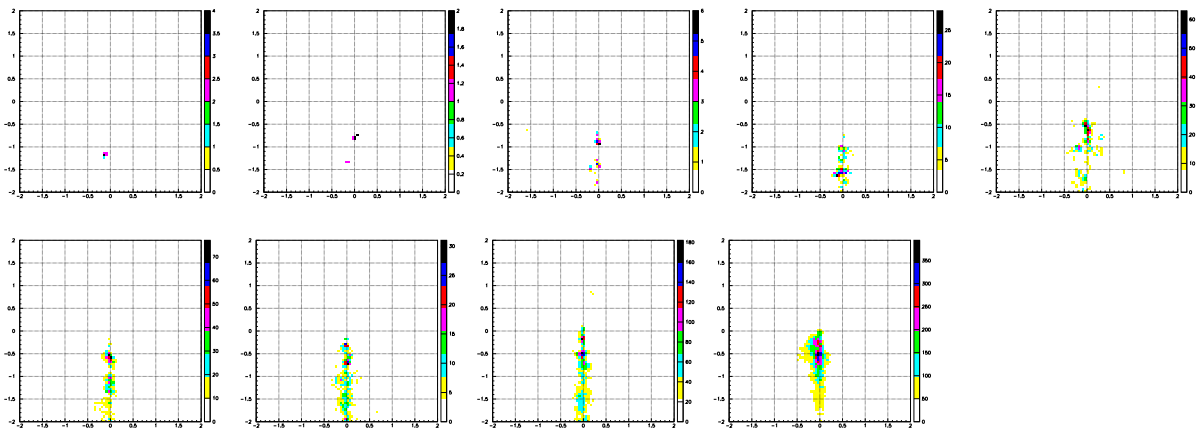


図 5.15: 電子 10GeV から 90GeV までのイメージの移り変わり

続いてγ 線も同じ条件で観測した。これも、100 イベント分の宇宙線を降らせて重ね合わせたものである。

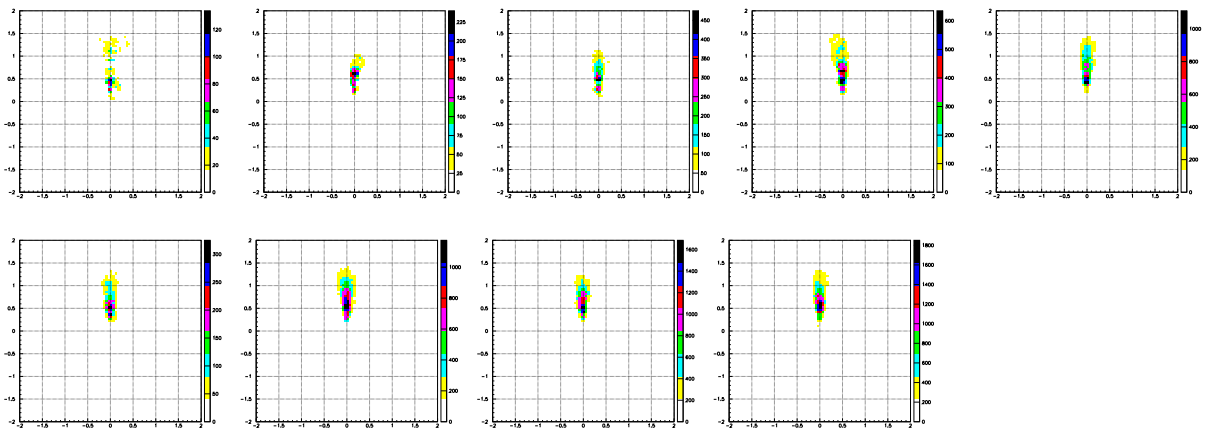


図 5.16: γ 線 10GeV から 90GeV までのイメージの移り変わり

それぞれの光電子数の遷移は下図のようになった。

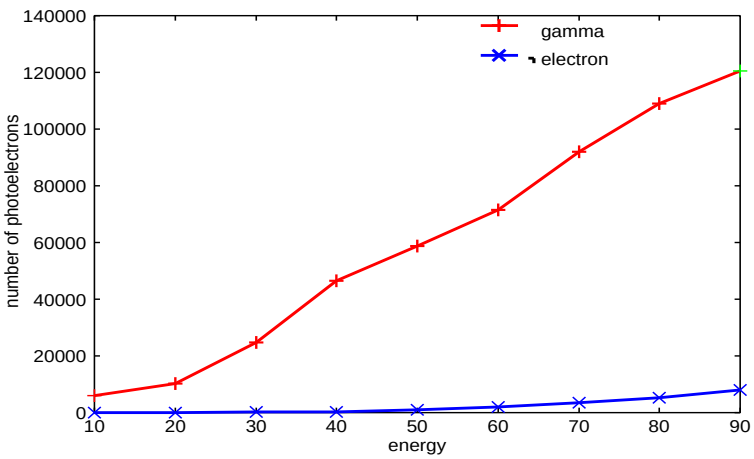


図 5.17: 光電子数の遷移のグラフ

電子はイメージ像でいう上方、つまり西に引っ張られている。それがエネルギーが高くなる程に少しずつ下方向に光がまとまってきているのがわかる。これは、エネルギー低いと地磁気の影響を強く受け、曲がってしまうからである。

この図のひとつを 3 次元で見てみると、下図のようになる。

図 5.18: 00GeV のγ 線と電子の比較 、3 次元イメージ

これは 00GeV での電子及びγ 線の 3 次元イメージであるが、γ 線はまっすぐ落ちるがゆえに中心が高く、電子は地上には斜めに入射するので中心が低く縦に広がっていることをよく理解していただけるだろう。

マイナスの電荷をもって降ってきた電子は西向きに磁場の力が働く。まっすぐ落ちれば望遠鏡より東に 100m の地点に落ちるであろう電子が地磁気によって望遠鏡を通り越してさらに西に曲げられるのである。光電子の遷移については電子はシャワーの全体像は見えてないので、正確とはいえない。なるべく正確に光電子数を見比べるため、シャワーの全体像が見えるよう視野を 4 ° × 4 ° から 16 ° × 16 ° に拡大して同じ電子を観てみた。

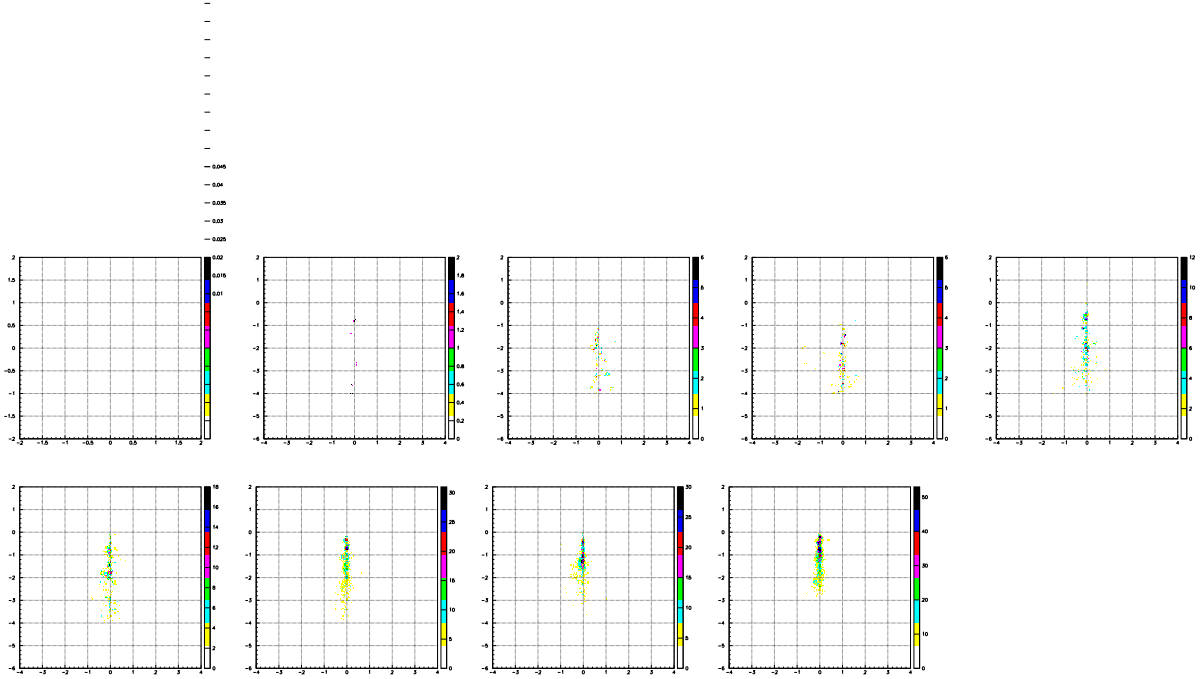
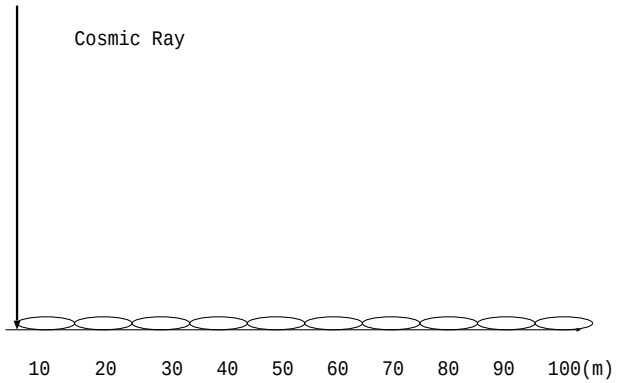


図 5.19: 視野 16 ° で観た電子

電子は低いエネルギーではシャワーの像全体が視野の狭いカメラに収まることは難しく、γ 線に比べて広い範囲に広がってしまう。現在の光学系の技術では視野 16 度の光学系を作るのは困難であるのでこのエネルギー領域の電子の全体像を捉え、排除していくという方法は難しいであろう。

5.5　ステレオ観測的シミュレーション

望遠鏡と宇宙線の距離で光電子数やイメージ像がどう変わっていくかを調べた。まず 10TeV の宇宙線を (0,0) に落とし、座標 (0,10),(0,20),(0,30),(0,40),(0,50),(0,60),(0,70),(0,80),(0,90),(0,100) に口径 30m 望遠鏡を設置し、光電子数とイメージ像の移り変わりを観た。これは 10 イベント降らせた時の 1 イベント分の平均である。



まず、ほとんどが崩壊せず一次宇宙線によるチェレンコフ光のみが観測できるミューオンでこの実験を行った。イメージおよび光電子数の変化は下図のようになった。

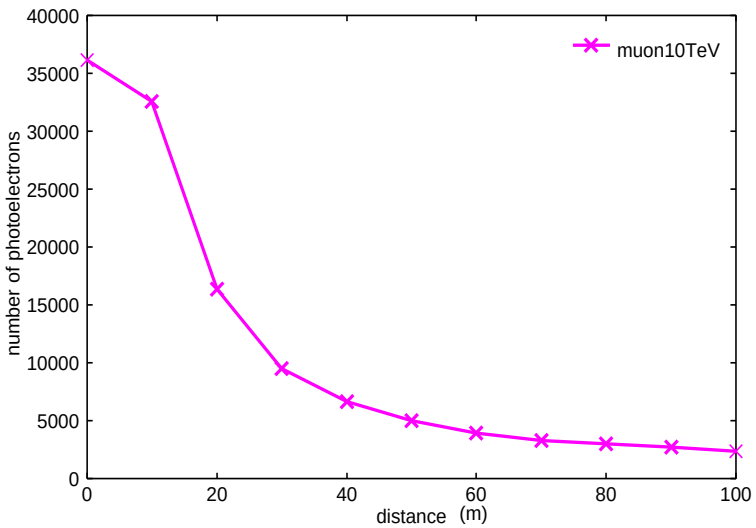


図 5.20: ミューオンの入射方向の延長線から望遠鏡までの距離と光電子数の関係

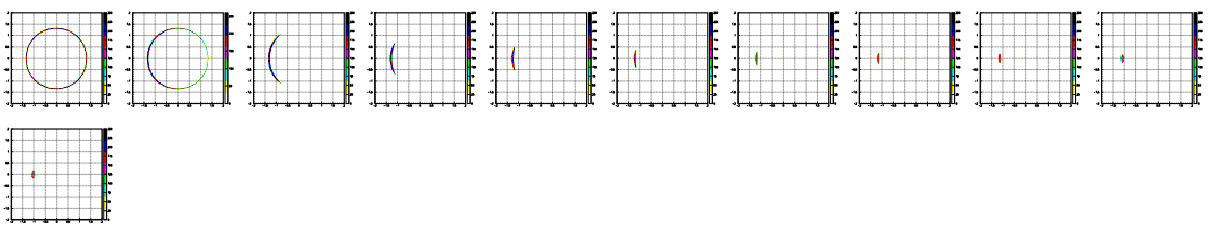


図 5.21: ミューオンの入射方向の延長線から望遠鏡までの距離の違いによるイメージの遷移

同じシミュレーションを 10TeV γ 線で行った。

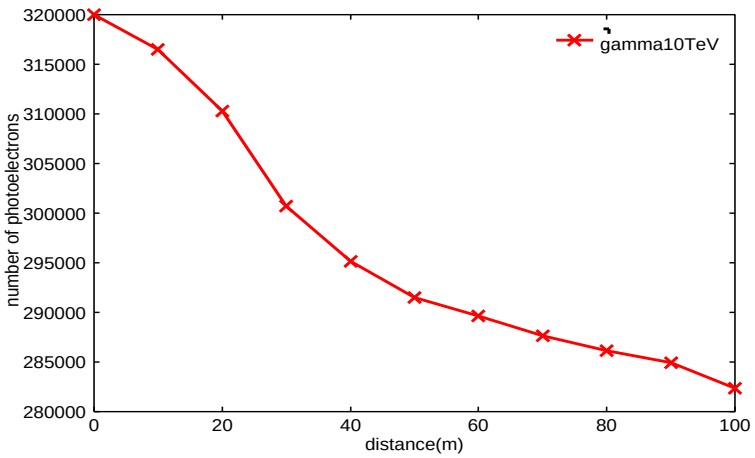


図 5.22: γ 線の入射方向の延長線から望遠鏡までの距離と光電子数の関係

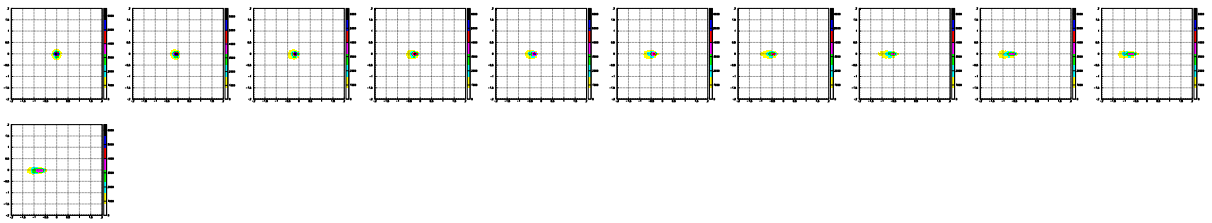
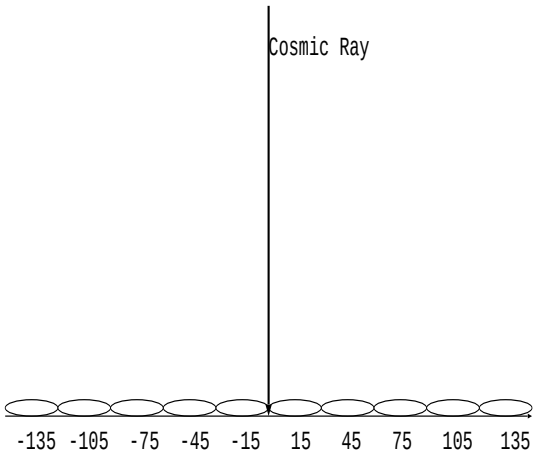


図 5.23: γ 線の入射方向の延長線から望遠鏡までの距離の違いによるイメージの遷移

次に 1 個のγ 線または電子がつくり出すシャワーの全体像を観るため、口径 30m の望遠鏡を横に一列に並べて同じ粒子を観測した。これは低エネルギー宇宙線中のγ 線と電子の識別の糸口を探すためのシミュレーションなので、まず 1TeV で行った。



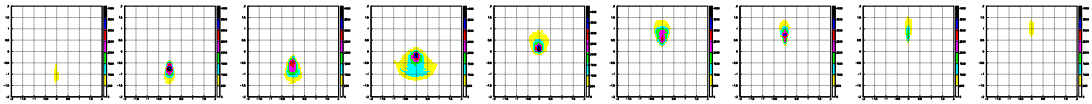


図 5.24: 1TeV γ 線の ステレオ的観測によるイメージ

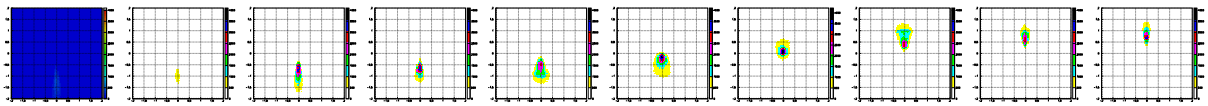


図 5.25: 1TeV 電子の ステレオ的観測によるイメージ

光電子の関係は下図のようになる。

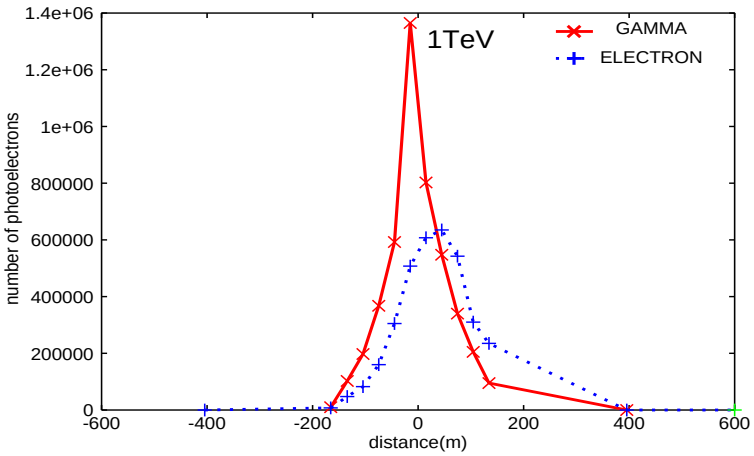


図 5.26: 1TeV のγ 線と電子の入射方向の延長線から望遠鏡までの距離と光電子数の関係

同様のシミュレーションを 100GeV,50GeV,10GeV で行い、光電子数の変化の様子をみた。

このグラフでわかるように、γ 線はほぼ中心の少ない面積中に集中して落ちて、電子はγ 線よりすこし広い範囲に分布し、エネルギーが低いほど地磁気の影響を受け曲がっていく。

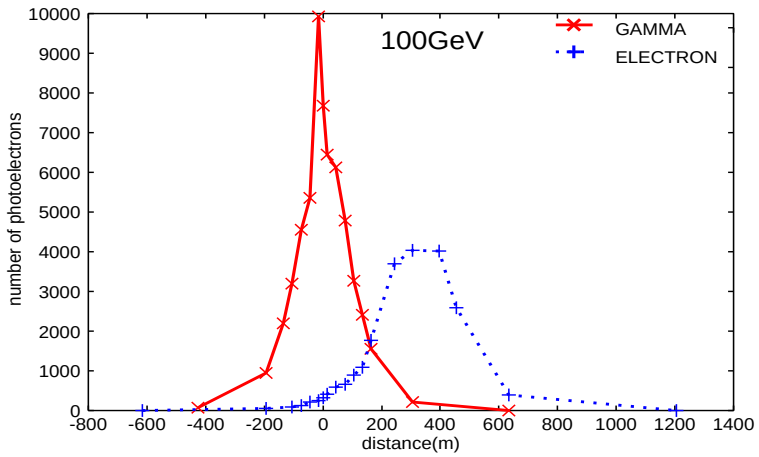


図 5.27: 100GeV のγ 線と電子の入射方向の延長線から望遠鏡までの距離と光電子数の関係

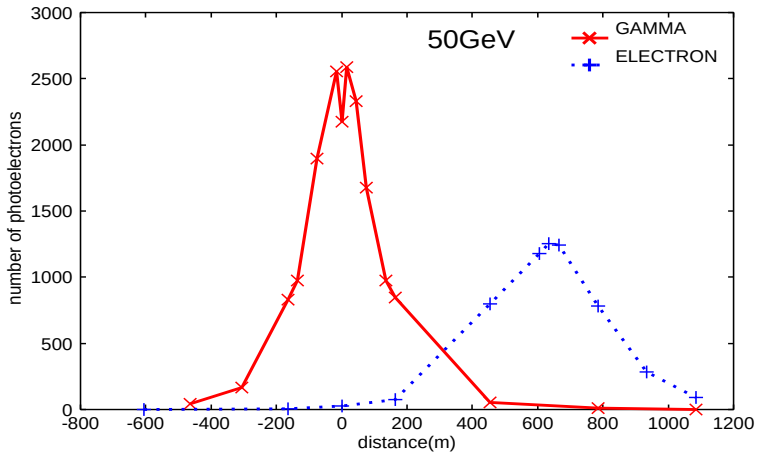


図 5.28: 50GeV のγ 線と電子の入射方向の延長線から望遠鏡までの距離と光電子数の関係

下図はすべてのデータをひとつのグラフに表現した図である。

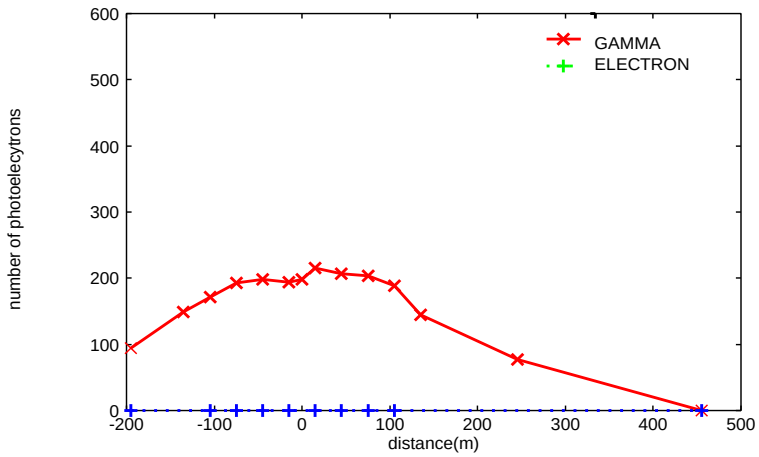


図 5.29: 10GeV のγ 線と電子の入射方向の延長線から望遠鏡までの距離と光電子数の関係

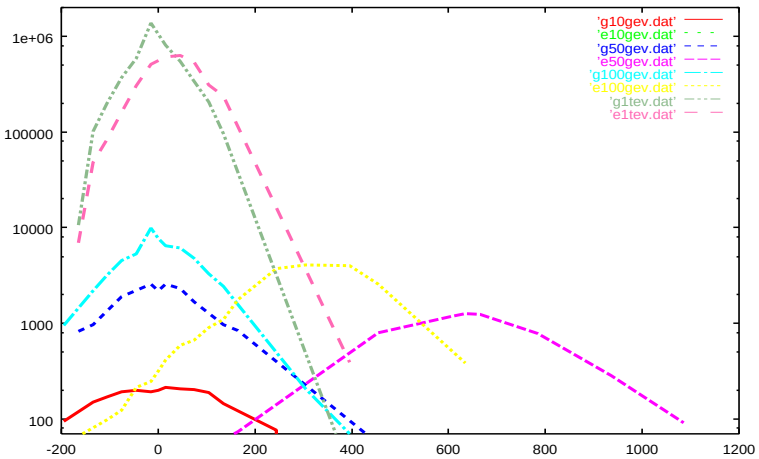


図 5.30: γ 線と電子の入射方向の延長線から望遠鏡までの距離と光電子数の関係

さて、先程までの結果はγ 線および電子が大気の頂上から垂直に入射した場合のものである。そのような電子が地上に到達する頃にはすっかり曲げられてバックグラウンドにはならないと言えるだろう。ところで電子というのは宇宙空間から等方的に地球にやってくる。ということは垂直にやってくるものと同じ数だけ角度をもって地球にやってくる電子もあるということだ。角度を持って地球に入射する電子の中には、地表に到達することに垂直になるものも存在する。そのような電子こそ、バックグラウンドになるのではないか。角度をもち、地表に到達する頃に垂直になる電子を検証するため、高度 30000m で発生した電子と先ほどのデータのγ 線を検証する。高度 30000m ではγ 線も電子も相互作用をし始めているので角度をもち、結果として地表で垂直になった電子とほぼ同じ振舞いをする。また、γ 線は前章で述べたとおり遠い宇宙の向こうで発生した時から曲がることなく地表に達するのでそのほとんどが垂直に入射する。

100GeV,50GeV,10GeV のγ 線および電子を比べた。

それより低いエネルギー (1GeV,2GeV,5GeV) では、つぎのようになる。

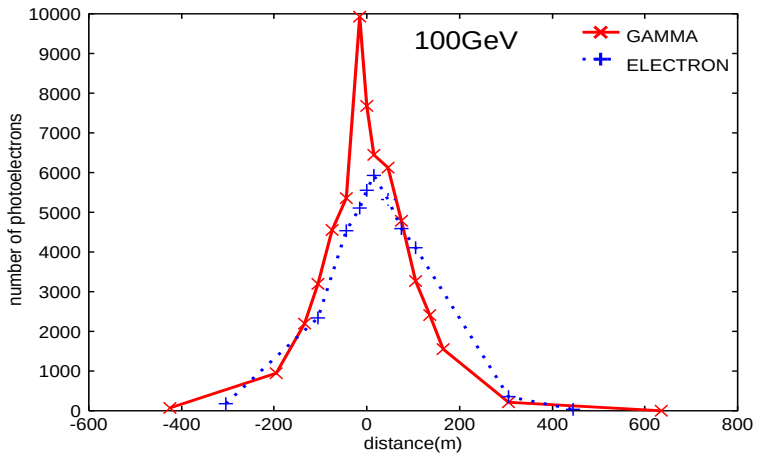


図 5.31: 100GeV のγ 線と高度 30000m で発生した電子の入射方向の延長線から望遠鏡までの距離と光電子数の関係

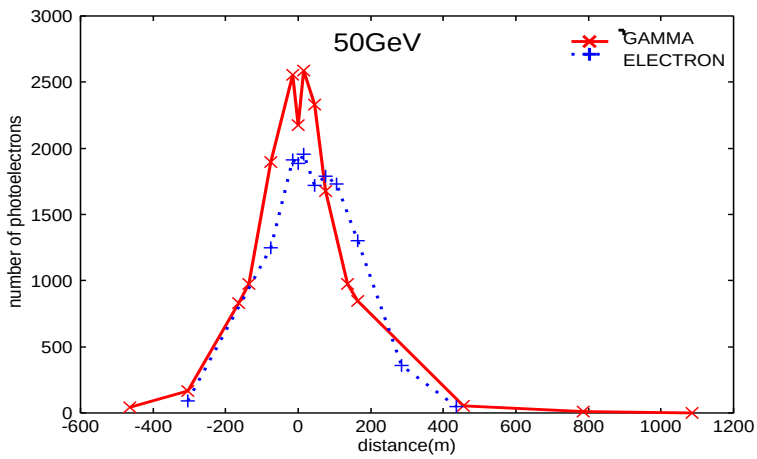


図 5.32: 50GeV のγ 線と高度 30000m で発生した電子の入射方向の延長線から望遠鏡までの距離と光電子数の関係

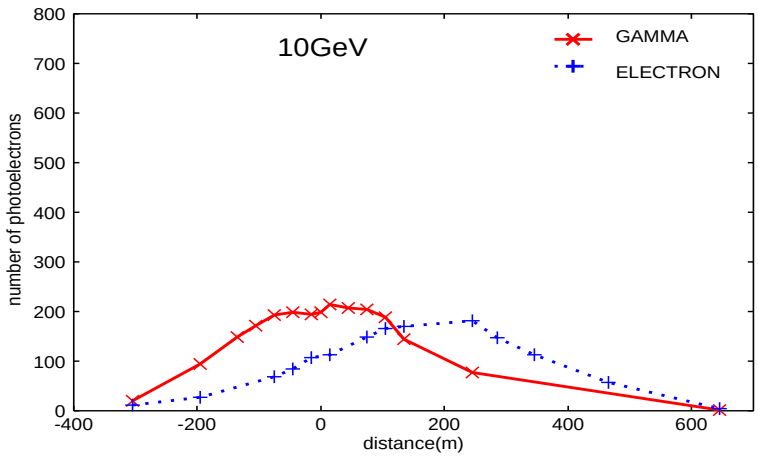


図 5.33: 10GeV のγ 線と高度 30000m で発生した電子の入射方向の延長線から望遠鏡までの距離と光電子数の関係

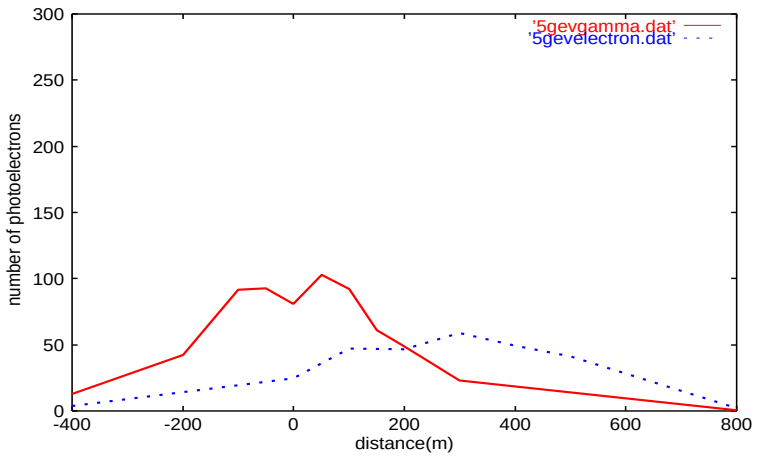


図 5.34: 5GeV のγ 線と高度 30000m で発生した電子の入射方向の延長線から望遠鏡までの距離と光電子数の関係

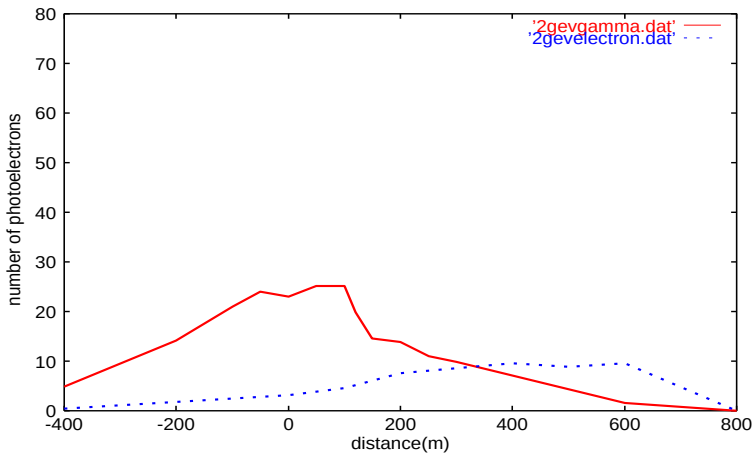


図 5.35: 2GeV のγ 線と高度 30000m で発生した電子の入射方向の延長線から望遠鏡までの距離と光電子数の関係

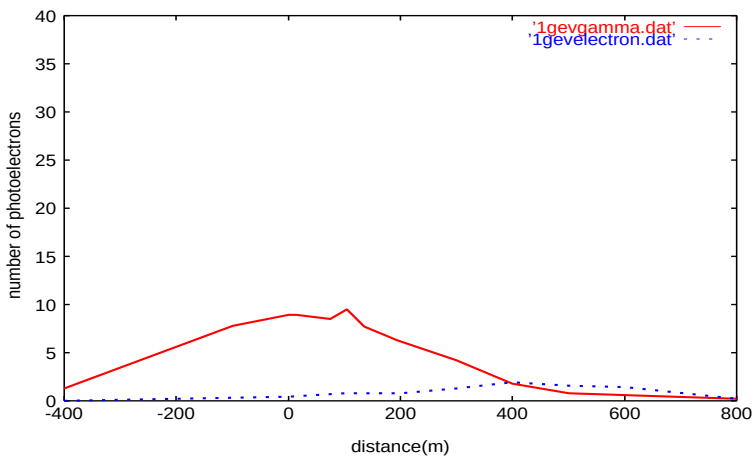


図 5.36: 1GeV のγ 線と高度 30000m で発生した電子の入射方向の延長線から望遠鏡までの距離と光電子数の関係

第6章　結論

6.1

今回の研究の結論として、口径 30m チェレンコフ望遠鏡でのγ 線観測でわかったことは、以下のようなことです。

3m チェレンコフ望遠鏡の 100 倍の光電子数をエネルギーに関わらず観測できる。口径が大きくなることが原因のイメージ像のぼやけは多少はあるがそれほど大きくない。夜光やミューオン、電子等のバックグラウンドの影響を考えないならば、γ 線は 10-100GeV の領域で観測可能である。また、バックグラウンド電子の数が増える 10GeV 領域での電子の影響は地磁気の影響で少くなってくる。

しかし、今回の実験は垂直入射電子のみを検証したので、角度を持って入射する電子の影響を調べる必要がある。また、口径が大きくなることによって深刻になる夜光の影響や宇宙線ミューオンの影響、そして、その実現に当たっては光学系の開発など今後のさらなる研究が必要です。

口径 30m チェレンコフ望遠鏡の開発は今後の超高エネルギーγ 線天文学において、革命的な事件になるでしょう。今後の甲南大学の研究による実現を心から期待します。

第7章　謝辞

本研究にあたり、優しくも厳しくご指導してくださった梶野文義教授、坂田通徳教授、山本嘉昭教授に深く感謝を申し上げます。素晴しい先生達に出会えたことを幸せに思っております。

宇宙粒子研究室で、コンピューターをろくに使えない 3 回生の私にシミュレーション実験の基礎から丁寧に教えてくださり卒業後も多岐にわたりご指導していただいた小田淳史さん、M2 の鷲尾智子さんには大変お世話になりました。ありがとうございました。

同研究室の M2 多田逸洋さん、M1 山岡知隆さんは甲南大学のチェレンコフ望遠鏡についての質問に答えてくださったりアドバイスをしていただいて実験のヒントとなる多くのことを教えていただき、大変感謝しております。

共に大学院受験に挑んだ同学年の土取哲くん、山田洋介さん、そしてその他の 4 回生のみなさんと、研究のみならず友人としてたくさんの楽しみや苦しみを分ちあい互いに向上できたことを誇りに思います。

また、故郷を離れ大学進学および大学院進学することをを快く承諾してくれ、あたたかく見守り支えてくれた両親に心から感謝致します。

宇宙粒子研究室という素晴しい環境で研究者としてのスタートを踏み出せたことを大変幸せに思っております。甲南大学の卒業生という名に恥じぬようここで学んだ多くのことを財産にして、研究者として今後一層の努力をいたします。

最後に、本論文を製作するにあたり、ご協力いただいたすべての方に深く御礼を申し上げます。ありがとうございました。

2003 年 2 月 19 日 坂下 希子