CANGAROO-III望遠鏡の
ミューオンイベントを用いた性能評価

東京大学大学院 理学系研究科
物理学専攻 修士課程2年
足立 裕樹

January 6, 2005

概 要

CANGAROO-III プロジェクトは宇宙から到来する高エネルギー γ 線を大気チェレンコフ望遠鏡を用いて観測するプロジェクトであり、２００４年３月に４台での運用を開始した。この論文では、望遠鏡の性能を観測中に捉えられるミューオンイベントを用い、反射率、スポットサイズを評価することを目的としている。

評価を行うためには、まずミューオンによるイベントのみを多数のイベント中から取り出す必要がある。また、そのS/N比は良いものでなければならない。これは、S/N比が悪いとバックグラウンドの影響を大きく受け、パラメータ分布が歪んでしまい、ミューオンイベントによる評価は行えないからである。そこで、私はミューオンイベントのみを抜き出す方法について研究を行った。私はバックグラウンドの多くを除去できる解析方法を見つけ、これによりミューオンイベントのみを選びだすことに成功した。それは今まで他のグループで行われてきたLength/Size分布による解析よりも良いS/N比でミューオンイベントを選びだせる。

さらに、ミューオンイベントから望遠鏡性能を評価するに当たり、どのパラメータが望遠鏡の効率やスポットサイズに対応しているのか調べた。これらにより決められたパラメータから実際に望遠鏡性能を評価し、CANGAROO-III 望遠鏡２号機、３号機、４号機の観測初期から現在までの性能の変化を導き出した。また、２号機から４号機までの相対的な性能の差についても評価した。

最後に、絶対的な性能評価を行うためにモンテカルロシミュレーションとの比較も行うことにした。しかし、現状は観測とシミュレーションで異なる値が出ており、現状のCANGAROO-III 望遠鏡用に組まれたシミュレーションが観測を反映していないことが分かった。よって、現在シミュレーションの調整中であり、その過程について説明していく。

目 次

第 1 章　Introduction **3**
1.1　宇宙線物理学 3
1.2　TeV 領域の宇宙 γ 線を観測する理由 3
1.3　大気チェレンコフ望遠鏡 4
1.4　CANGAROO-III Project 4
1.5　現在の状況 5
1.6　ミューオンイベントを解析する意義 6

第 2 章　観測機器と観測方法 **8**
2.1　空気シャワー 8
2.2　チェレンコフ光 8
2.3　ハドロンイベントと γ 線イベント 9
2.4　望遠鏡と鏡 10
2.5　カメラシステム 11
2.6　エレクトロニクスとデータ収集システム 14
2.7　キャリブレーション 16
2.8　粒子の再構成 18

第 3 章　ミューオンの発生と Imaging **20**
3.1　ミューオンの発生機構 20
3.2　ミューオンの Imaging 21
3.3　ミューオンイベントと発生高度 21
3.4　チェレンコフ光の光量 21
3.5　ミューオンリングの動径分布 25

第 4 章　カットパラメータの最適化 **27**
4.1　Length/Size 分布 27
4.2　Ring Fitting 29
4.3　カット前の曲率分布と TDC 分布) 30
4.4　Clustering 31
4.5　Arclength による制限 31
4.6　Arclength による制限 32

4.7 動径方向の分布 32
4.8 別の Clustering のテスト 34
4.9 曲率分布 36
4.10 カットのまとめ 36

第 5 章 観測データの解析 **39**
5.1 性能評価パラメータ 39
5.2 観測データ 40
5.3 観測初期 40
5.4 カットパラメータの変化 41
5.5 経年変化 42
5.6 SpotSize Analysis 43

第 6 章 Simulation **46**
6.1 モンテカルロシミュレーション 46
6.2 シミュレーションの構成 46
6.3 シミュレーションパラメータ 48
6.4 ミューオンパラメータの分布 48
6.5 ミューオンの分布 49
6.6 Size/Arclength の修正 52

第 7 章 シミュレーションの改良 **55**
7.1 チェレンコフ光の発生高度 55
7.2 シミュレーションの改良 56
7.3 改良版シミュレーションによるミューオンイベントの分布 57
7.4 観測とシミュレーションの比較 58

第 8 章 Discussion **63**
8.1 結論と今後について 63
8.2 他のグループとの比較 64

第 9 章 Summary **70**

第1章　Introduction

1.1　宇宙線物理学

宇宙線とは広義には宇宙から大気中に入射する放射線と大気との反応で作られる２次的な放射線の総称である。狭義には前者は１次宇宙線、後者は２次宇宙線と呼ばれる。１次宇宙線の正体は主に陽子を主成分としており、鉄以上の重さの原子核まで多種の原子核で構成される。２次宇宙線は様々なものが存在する。

宇宙線研究の歴史は古く、その目的には大きく二つが上げられる。一つは高エネルギー物理学の研究対象として、様々な素粒子や中間子が発生する実験場としての側面である。もう一つは１次宇宙線の発生起源を求めることで天体現象や宇宙構造、宇宙の起源等の解明を行うという宇宙物理学的な側面である。我々の行う sub-TeV 領域から TeV 領域の宇宙 γ 線観測は、後者に当たる。

1.2　TeV 領域の宇宙 γ 線を観測する理由

宇宙 γ 線を観測することには利点がある。陽子等の荷電粒子が１次宇宙線の主成分であり、地球にも大量に降り注いでいる。しかし、これらは銀河磁場や太陽系内の磁場により曲げられ、到来方向に関する情報を失ってしまう。これに対し γ 線は電磁波であり、磁場の影響を受けず地球まで到来方向を維持したまま到達する。

電磁波にも、γ 線以外に昔から観測が行われている可視光、赤外線、電波、X 線等、非常に多くの波長帯が存在する。その中で、TeV 領域の γ 線を観測する意義とは、これらの中でも高エネルギーの天体現象により発生しており、熱的過程で生成することはできず、素過程の物理を研究できることにある。

また、検出することが難しい波長域であることもあり、比較的歴史が浅く、その発生機構についてまだはっきりとした物理的結論が導き出されていない。そこに物理学的に観測を行う意味がある。

1.3 大気チェレンコフ望遠鏡

世界にはいつかの大気チェレンコフ望遠鏡グループがある。その一つが CANGAROO-III プロジェクトであり、他には H.E.S.S グループや MAGIC グループ、VERITAS グループ等がある。どのグループも宇宙空間から到来する高エネルギー γ 線を検出することを目的としている。

大気中に入射した高エネルギー γ 線は大気と反応し、空気シャワー現象起こす。空気シャワー現象により鼠算式に増えた荷電粒子が、大気中で発生するチェレンコフ光を捉えて観測を行う望遠鏡である。

TeV 領域の γ 線になると、反応断面積が非常に小さくなり精度良く検出するためには膨大な大きさの検出機が必要になる。また、その検出機は γ 線が大気と反応してしまい地上まで届かないために、上空もしくは宇宙空間に設置する必要がある。それは予算的にも技術的にも困難である。そこで、空気シャワー現象を利用する方法が考え出された。理由は次の通りである。

空気シャワー中の粒子数が最大になる高度は陽子シャワーで約７ km、γ 線シャワーで約１０ km である。そこから発せられるチェレンコフ光は地上では３００ mϕ の広い範囲に降り注ぎ、その Effective area はおよそ７００００ m^2 になる。つまり、直接検出の場合と比べ遥かに大きな Effective area を持たせることができる。この非常に大きな Effective area を利用し、TeV 領域の γ 線を直接検出するのではなく、空気シャワー現象を捉えることで γ 線を検出するシステムが大気チェレンコフ望遠鏡である。

捉えるべきチェレンコフ光は微弱な光であることから、光学望遠鏡を用いて光を収束させる必要がある。さらにはカメラシステムには高感度、高時間分解能が求められることから、光電子増倍管が使われている。

γ 線観測の分野は他の分野に比べシステムを確立している段階にある。つまり、現在はまだ発展途上にある分野であると位置づけられる。世界の大気チェレンコフ望遠鏡の写真を図 1.1 に載せておく。

1.4 CANGAROO-III Project

CANGAROO-III プロジェクトは、「Collaboration of Australia and Nippon for a GAmma Ray Observatory in the Outback」の略称であり、宇宙線の起源の探索、天体現象の解明を主な目的とした計画である。４台の直径１０ m 大気チェレンコフ望遠鏡を用い空気シャワー現象から発生するチェレンコフ光をステレオで観測することで、天体からの sub-TeVγ 線を間接的に観測している。観測は南オーストラリアの Woomera という図 1.2 に示される 東経 136 度 47 分、南緯 31 度 6 分、海抜 160m の地で行われている。この地に建設された理由は、Woomera の気候が砂漠気候であり、年間を通して晴天率が高くチェレンコフ光を観測するのに適していること、近くに町があり利便性の面でも優れていること等である。主な観測天体としては SN1987A、RX J1713.7-3946、RX J0852.0-4622 等の超新星

図 1.1: 世界の大気チェレンコフ望遠鏡。上から順に、CANGAROO-III グループ、H.E.S.S. グループ、MAGIC グループ、WHIPPLE グループである。

残骸や Crab パルサー等のパルサー、Galactic Center 等であり、これらの領域でどのように宇宙線が発生しているのかを探っている。

1.5 現在の状況

2002 年 12 月から望遠鏡 2 台によるステレオ観測が開始され、2003 年 9 月からは 3 台、2004 年 3 月からは 4 台による運用が開始された。稼働中である 4 台の望遠鏡の写真を図 1.3 に載せる。現在は、これらの望遠鏡を使って観測が行われ、データの解析が行われている。今後、望遠鏡の性能評価を行うことでより精度の高い解析が行われるようになる。ここで言う性能とは、望遠鏡に取り付けられた鏡の反射率やカメラを構成する PMT のゲイン、そしてエレクトロニクスで設定されるスレッショールド等を含む総合的なものであ

図 1.2: CANGAROO-III 望遠鏡の建設場所 (オーストラリア、Woomera)。

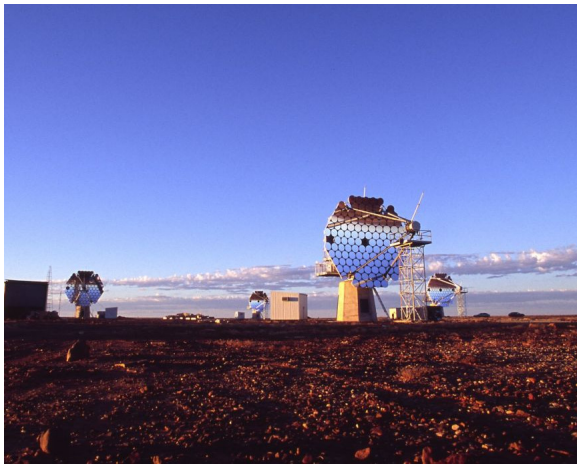

図 1.3: CANGAROO-III 望遠鏡 4 台。

る。これらをパラメータとして現在のシミュレーションプログラムの調整を行っている。

1.6 ミューオンイベントを解析する意義

前節で言及したように、CANGAROO-IIIプロジェクトで使われているシミュレーションは調整中である。これらのパラメータのうち効率、像の広がりというパラメータについては、ミューオンから発生したチェレンコフ光を解析することにより決定できる。また、ミューオンからのチェレンコフ光は観測中にも捉えられる。つまり、観測と平行してパラメータの変化について求めることが可能である。これらのことから、ミューオンイベントの解析を行っていくことは意義がある。

私が担当したのは、ミューオンイベントからどのように望遠鏡パラメータを決定できるのか考察し、観測データからミューオンイベントのみを選びだす方法を探すことである。また、４号機カメラの組み上げやテスト、インストールにも参加した。

第2章　観測機器と観測方法

CANGAROO-III 望遠鏡は、望遠鏡本体、鏡、カメラ、データ収集システムで構成されており、空気シャワーから発生するチェレンコフ光を捉える望遠鏡である。そして、捉えたチェレンコフ光の強度やイメージを解析し、シャワーを作り出した粒子の特定やそのエネルギーを再構成することで、大気中に入射した粒子を特定している。

2.1　空気シャワー

大気中に入射した荷電粒子や γ 線は、大気と反応し２次粒子を放出する。放出された２次粒子がさらに大気と反応することで、粒子数が鼠算式に増える。これが空気シャワーと呼ばれる現象である。空気シャワー現象は入射粒子が陽子の場合、高度２０ km 付近から起こりはじめ7 km 程で粒子数が最大になる。γ 線の場合は、１０ km 程で粒子数が最大になる。その後、制動放射や電子対生成等によりエネルギーを徐々に失い最終的には電離相互作用を起こし終息する。

2.2　チェレンコフ光

空気シャワーにより発生した高速粒子は大気中でチェレンコフ光を出す。このチェレンコフ光はシャワーの発達に対応し、大気中でレイリー散乱や Mie 散乱を起しつつ地上まで到達する。

チェレンコフ光の放射角度は屈折率と粒子速度により決まり、良く知られた次の式で記述できる。

$$cos\theta = \frac{1}{n\beta} \tag{2.1}$$

$$\theta = \text{チェレンコフ光の放射角度} \tag{2.2}$$

$$n = \text{屈折率} \tag{2.3}$$

大気屈折率は地上において１気圧の時、1.00027 以下であることから、放射角度には 1.3 度以下という制限がかかる。また、入射粒子が２次粒子を生成したりエネルギーを失う過程で多重散乱を起こすので、シャワーは横方向にも運動量を持つようになる。１次宇宙線のエネルギーが十分に大きい場合、空気シャワー中の粒子も全体として１次宇宙線

の入射方向に運動量を持つことになる。よって、空気シャワーは１次宇宙線の入射方向に発達することになり、そこから放射されるチェレンコフ光もほぼその進行方向に放射される。

実際に 1TeV の γ 線を大気中に入射させ、シミュレーション行った様子を示す。図 2.1

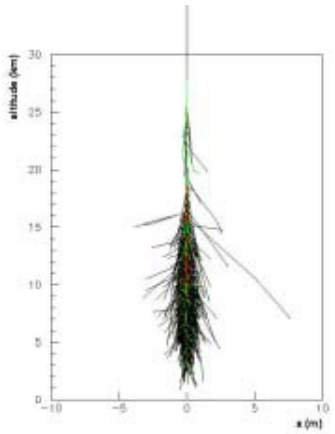

図 2.1: γ 線を大気へ入射したときの空気シャワーの発達。1TeV の γ 線を大気に入射したときの空気シャワーの発達を示している。

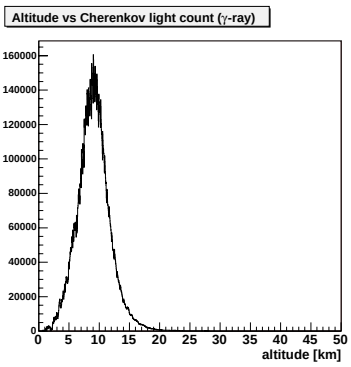

図 2.2: (横軸) 高度に対する (縦軸) チェレンコフ光の発生量。1TeV の γ 線を大気に入射したときの高度によるチェレンコフ光の発生量をしめしている。

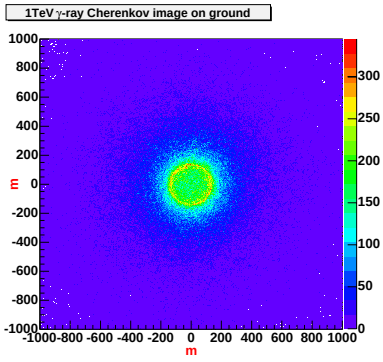

図 2.3: 地上におけるチェレンコフ光の強度分布。1TeV の γ 線を大気に入射したときに発生したチェレンコフ光のうち、地上に到達するチェレンコフ光の強度分布を示している。

は空気シャワーの発達を示しており、その発達方向が宇宙線の入射方向に発達していることが分かる。図 2.2 は発生するチェレンコフ光の高度分布を示しており、発生量が高度１０ km 付近で最大になっていることが分かる。また、図 2.3 は地上に到達したチェレンコフ光の分布を示している。エネルギーにもよるが、γ 線シャワーからのチェレンコフ光はおおむね３００ mϕ の範囲に広く分布する。

2.3 ハドロンイベントと γ 線イベント

CANGAROO-III プロジェクトが観測するのは γ 線イベントである。しかし、宇宙線を構成する主な構成要素は陽子であり、陽子を含むハドロンによるイベントを観測データから排除する必要がある。

γ 線が大気中に入射したときに起す反応は電子対生成等の電磁相互作用である。それに対し、ハドロンが大気中に入射したときに起す反応は核子、反核子、K 粒子、中性パイオン、荷電パイオン等を作り出すハドロン相互作用である。実験事実から電磁相互作用よりもハドロン相互作用の方が２次生成粒子の横軸運動量分布が大きくなることが知られている。このことから、１段目の反応でハドロンシャワーは γ 線シャワーよりも横方

向に広がった分布を持つ。そして、この初段の反応の差がその後のシャワーの横軸方向の発達に違いをもたらすことは直感的に想像できる。実際にこれ以降の反応でハドロンシャワーの方が γ 線シャワーよりも横方向に広がった分布を持つようになる。このことから、地上で観測されるチェレンコフ光もハドロンシャワーを起源とするものは広がった分布を持つ。この特徴を使い我々はシャワーの選別を行っている。図 2.4、図 2.5、図 2.6

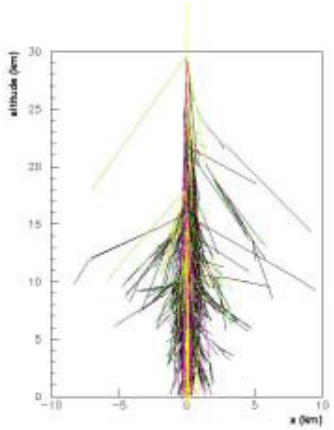

図 2.4: 陽子を大気へ入射したときのシャワーの発達。10TeV の陽子を大気へ入射したときの空気シャワーの発達を示している。

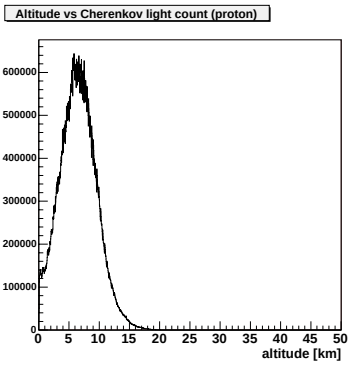

図 2.5: (横軸) 高度に対する (縦軸) チェレンコフ光の発生量。10TeV の陽子を大気へ入射したときの高度によるチェレンコフ光の発生量を示している。

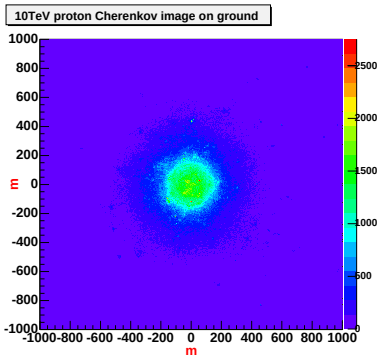

図 2.6: 地上におけるチェレンコフ光の強度分布。10TeV の陽子を大気に入射したときに発生したチェレンコフ光のうち、地上に到達するチェレンコフ光の強度分布を示している。

は 10TeV の陽子を大気中に入射したときのシャワーの発達の様子を表している。前節の γ 線の分布と比べて分かるように、陽子によるシャワーの方が横軸方向に広がっている。地上におけるチェレンコフ光の強度分布にもその違いは現れており、γ 線シャワーによる分布は半径１５０ m 程度の円形部分に強く分布し、シャワーの縦軸方向の発達が良く現れている。陽子シャワーによる分布はその構造が崩れておりシャワー中の粒子が横軸方向に運動量を多く持っていることが分かる。

2.4　望遠鏡と鏡

CANGAROO-III 望遠鏡の基礎となる望遠鏡システムは鏡に関しては１号機から４号機まで同じシステムを用いている。設計は経緯台式の望遠鏡で、雛形として電波望遠鏡の構造を採用している。鏡は１１４枚の小型球面鏡で構成されており、鏡全体で直径１０ m の放物面鏡を構成している。望遠鏡の焦点距離は８ m であり、カメラシステムへの最大入射角は３３度強である。小型鏡は GFRP(ガラス繊維強化プラスチック) 素材を使っており、反射材としてはアルミニウムを用いている。この鏡の特徴としては、ガラス鏡

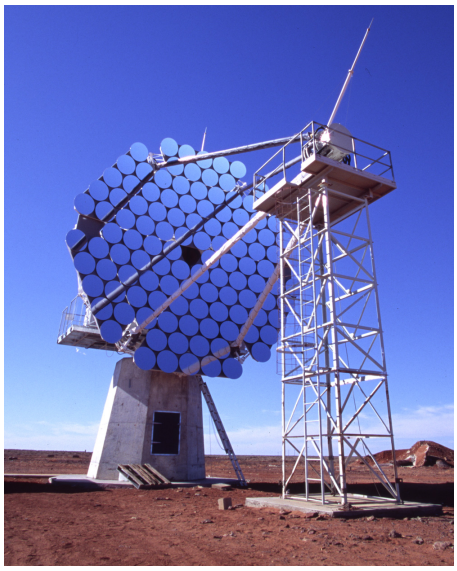

図 2.7: CANGAROO-III 望遠鏡 4 号機。

図 2.8: CANGAROO-III 望遠鏡で使われている小型球面鏡。

を用いるより軽く作ることができ、扱いやすい点である。

各小型鏡の光軸は建設時に調整され、その後も年１回から２回程度測定が行われている。

2.5 カメラシステム

チェレンコフ光を捉え、電気信号へと変換するカメラシステムについて説明する。カメラは４２７本の光電子増倍管で構成され、前面には隙間を埋めるようにライトガイドを取りつけてある。

光電子増倍管モジュールには浜松ホトニクス社製の H8820 を用いている。これは光電面にバイアルカリを用いた R3479 光電子増倍管にプリアンプを取りつけたプリアンプ一体型のモジュールである。R3479 は 3/4 インチ光電子増倍管であり、ＵＶ領域にも感度を持たせるために入射窓にはＵＶガラスを用いている。ダイノードは８段で構成されプリアンプ込で 10^6 のゲインを得られる。また、量子効率は２５％と高い。量子効率も波長依存性を持っており、その値は 図 2.9 である。大気チェレンコフ光の波長のピークが 300nm から 400nm 付近であることを考えると、この光電子増倍管がチェレンコフ光を検出するのに適していることが分かる。

我々はこのモジュールを全てテストし、ゲインが 1.2×10^7 となるように印可電圧の最適値を決めている。同時に時間分解能、ゲインの印可電圧依存性、ゲインの印可電圧に対する線形性を求めた。４号機のものについては私が２００４年の夏にテストを行った。その結果を 図 2.10、図 2.11、図 2.12、図 2.13 に示す。実験セットアップは 図 2.14 を用いており、キャリブレーション用の光源として日亜化学の青色 LED、NSPB510S を用いている。この LED の発光スペクトルは 450nm から 500nm の範囲に強度を持っており、

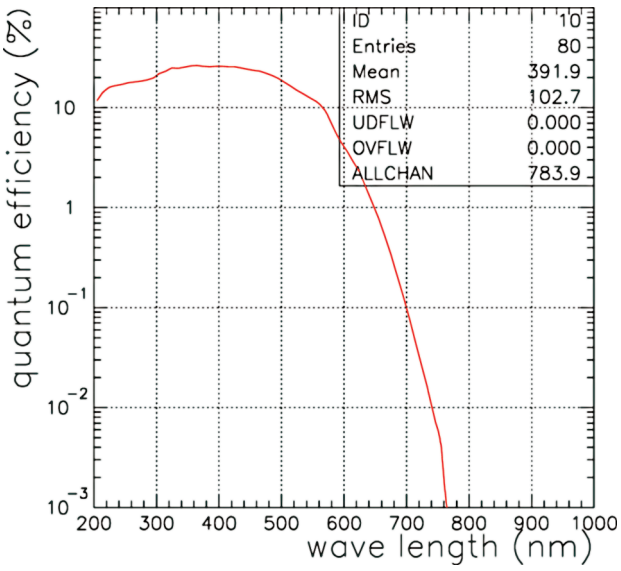

図 2.9: 量子効率の波長依存性。横軸は波長 [nm]、縦軸は量子効率 [%] である。

チェレンコフ光に近い光で光電子増倍管のテストを行えるという利点がある。キャリブレーションはこの LED の光量を一定に保ち、ND フィルターを用いることで必要な光量を作り出している。実際に作り出す光量は、1p.e から 1000p.e. までである。

次に、カメラの構成要素のひとつであるライトガイドについて説明する。図 2.15 にライトガイドの設計図を、図 2.16 にライトガイドを載せる。ライトガイドの形状は Winston Cone を採用しており、必要のない入射角３４度以上の光を排除している。 これは、鏡の外から直接カメラへ入射する地上光を排除する意味もある。図 2.17 はライトガイド集光率の角度特性を実測した図である。黒丸がライトガイドを取りつけない場合の角度特性を表しており、０度入射の時を１に規格化してある。水色の四角はライトガイドを取りつけた場合の角度特性を示している。３４度以内に入射する光についてライトガイドが効率的に光を集めていることが分かる。

また、２００３年の１０月から１２月まで３号機のライトガイドが光電面から離れていたという事実があるので、その影響について調べた。図 2.17 の他の色はライトガイドを光電面から離して測定した集光率の変化を示している。測定点は光電面から２ mm、４ mm、６ mm、８ mm の４点である。離れるにつれ大角度で入射する光に対して効率が落ち、小角度で入射する光については効率が上がることが分かる。小角度で入射する光の集光率が上がるのは、ライトガイドの底面のサイズが光電面のサイズよりも小さいからである。ライトガイドを光電面に密着させた場合、光電面の実効サイズはライトガイドの底面のサイズと等しくなる。しかし、ライトガイドが光電面から離れるに従い光電面の実効サイズは実際の光電面のサイズに近くなり、ライトガイドを密着させていたときよりもそのサイズは大きくなる。この効果により小角度入射の集光率が上がる。大角度入

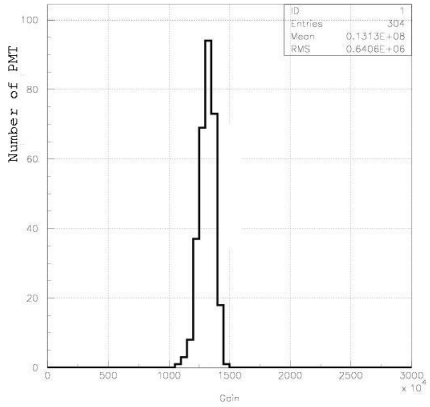

図 2.10: 光電子増倍管のゲインのばらつき (４号機)。横軸はゲイン、縦軸は PMT 本数である。

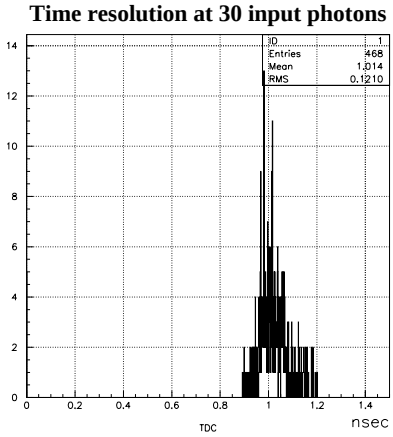

図 2.11: 光電子増倍管の時間分解能 (４号機)。横軸は時間分解能 [ns]、縦軸は PMT 本数である。

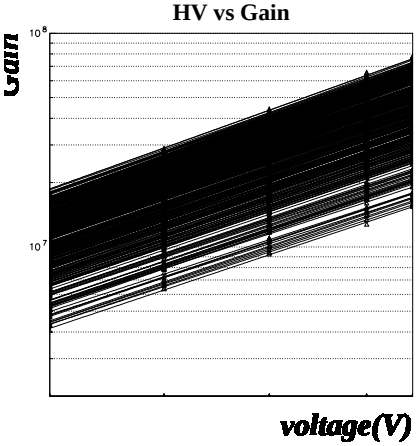

図 2.12: ゲインの印可電圧依存性 (４号機)。横軸は電圧 [V]、縦軸はゲインである。

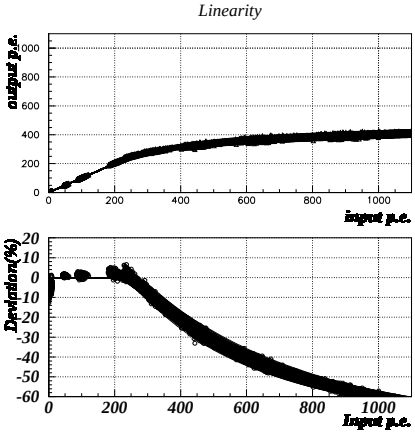

図 2.13: ゲインの線形性 (４号機)。横軸は入力光量 [p.e.]、縦軸は線形性からのずれ [%] である。

射の場合は、ライトガイドが離れるに従い光電面に入らずに逃げ出す光が多くなる。これは角度の大きい入射光はライトガイド底面の縁に集まり、光電面への入射角も大きくなる Winston Cone の特性に因っている。つまり入射角が大きくなるにつれ集光率は落ちていく。図 2.18 にライトガイド効率の変化を示す。また、私がこれから行うミューオンイベントの解析を見ることで、この時に実際に集光率がどのくらいであったかを判断することができる。

これらを装備したカメラの全体像が 図 2.19、図 2.20 であり、重さは１３０ kg 程になる。

光電子増倍管の配置は 図 2.21 のような構造をしており、１６本を単位として菱形に配

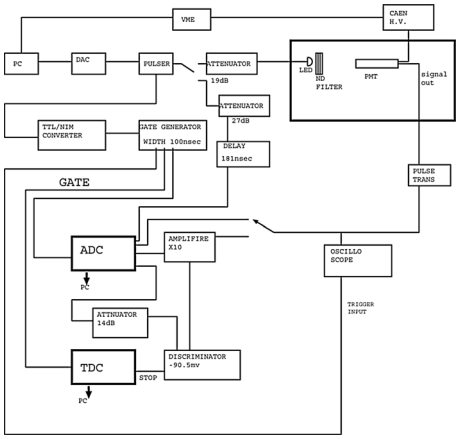

図 2.14: 光電子増倍管を試験するための
セットアップ。

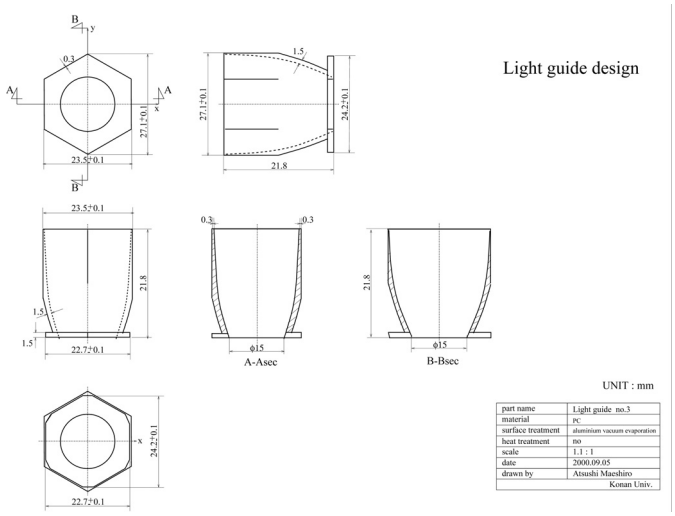

図 2.15: ライトガイド (設計図)[9]。

置されている。カメラの大きさは縦５３ cm、横５０ cmであり、視野角にして４度弱になる。カメラ 1pixel 辺りの視野角は 0.172 度に対応する。また、今後、カメラ面上の距離をそれに対応する視野角で表現する。

2.6 エレクトロニクスとデータ収集システム

エレクトロニクスはフロントエンドモジュール、ＡＤＣモジュール、ＴＤＣモジュールで構成される。フロントエンドモジュールは、カメラからの信号をディスクリミネーターに通しトリガー信号を生成する。ＡＤＣモジュールには１２ bit の Charge sensitive ADC が用いられており、トリガー信号から生成されるゲートに同期してデータ収集が行

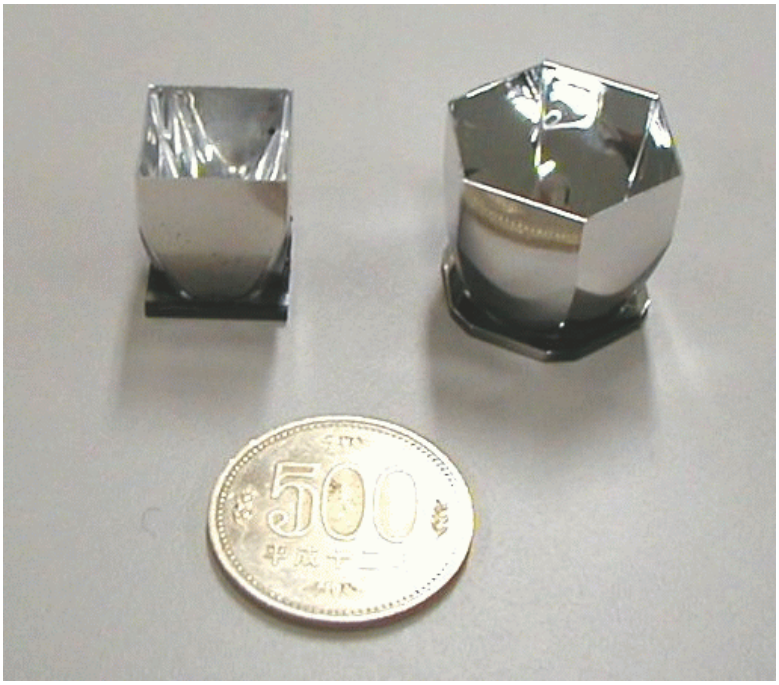

図 2.16: ライトガイド (実物)[9]。右の六角形のライトガイドが、２号機以降で用いられている。

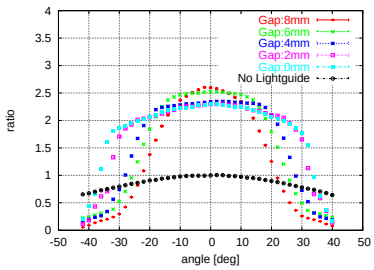

図 2.17: ライトガイド集光率の角度特性 (実測)。横軸は入射角度 [deg]、縦軸は入射角度を０度、ライトガイドを付けずに測定したときの光量を１とした時の比である。

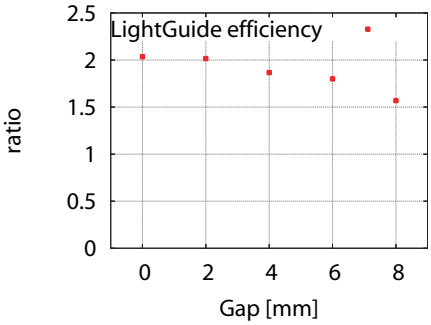

図 2.18: ライトガイドが光電面から離れた場合の集光率 (実測)。横軸はギャップ [mm]、縦軸は入射角度を０度、ライトガイドを付けずに測定したときの光量を１とした時の比である。

われる。

これらのモジュールの制御はＰＣで行われおり、システムには UNIDAQ システムが採用されている。

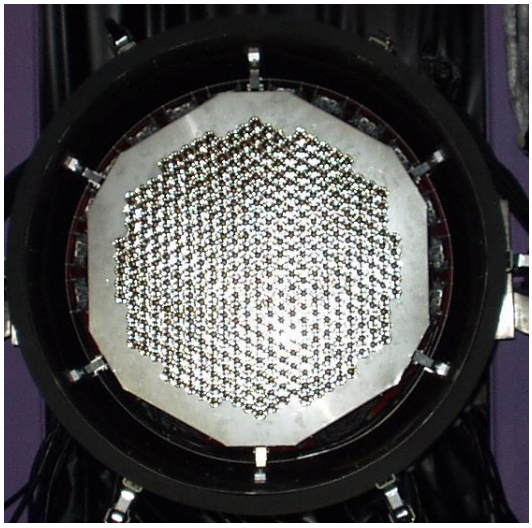

図 2.19: カメラの前面。

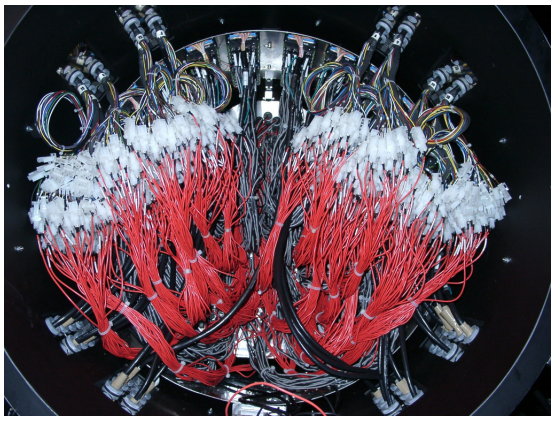

図 2.20: カメラの後面。

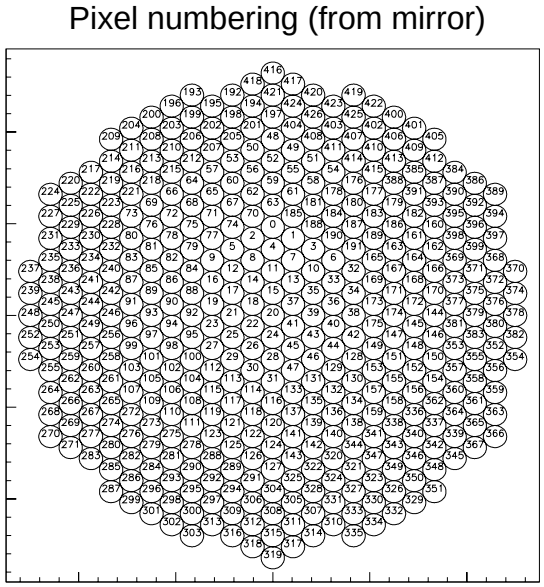

図 2.21: 光電子増倍管の配置。

2.7 キャリブレーション

観測を行うに当たって、その日のカメラの状態を知っておくことは非常に重要である。CANGAROO-III プロジェクトでは、毎夜観測の前に LED Run と呼ばれるキャリブレーションが行われている。このキャリブレーションの目的は、以下のようなものである。

1. 光電子増倍管のゲインの測定
2. 異常な光電子増倍管の特定

1は、光電子増倍管で検出された光が何 p.e. に対応するのかを導き出すのに用いらる。観測開始当初の値ではおよそ 100ADC カウントが 1p.e. に対応するように印可電圧が調整されている。2は、データの解析を行うときに異常を示した光電子増倍管を使わないようにするために用いられる。このデータを用いて明らかにおかしい症状を示す光電子増倍管を排除することにより、データの精度を向上させている。

LED Run の内容は、カメラ本体内部に LED による発光装置を取りつけてある。測定セットアップは図 2.22 に載せておく。その LED を発光させ、カメラ前面蓋の裏に取りつ

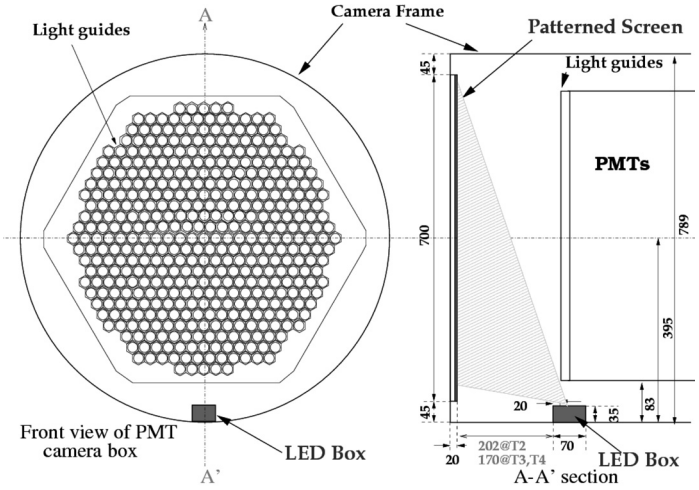

図 2.22: LED Run のセットアップ [9]。カメラ下方に LED Box を配置しキャリブレーション光とする。また、カメラ前面に「Patterned Screen」という明暗模様のスクリーンを配置し、カメラ全面に一様光が当たるように設計されている。

けられたパネルで光を一様になるように反射させる。この光をカメラで捉え、以下のポアソン分布を仮定した式を用いて光電子 [p.e] と ADC カウントとの対応関係を求める。

$$\langle \mu_{p.e.} \rangle = \left(\frac{\langle \mu_{ADC} \rangle}{\sigma_{ADC}} \right)^2 \tag{2.4}$$

$$\text{ADC constant} = \frac{\langle \mu_{ADC} \rangle}{\langle \mu_{p.e.} \rangle} \tag{2.5}$$

$$\mu_{p.e.} = \text{平均光電子 } [p.e.] \quad , \quad \mu_{ADC} = \text{平均 } ADC \text{ カウント} \tag{2.6}$$

$$\sigma_{ADC} = ADC \text{ カウントの } RMS \tag{2.7}$$

また、この対応関係が平均値から大きく外れた光電子増倍管を異常なものとする。

以後、ここで求められた ADC カウントと p.e. との換算値を用い光量を表す値とする。

2.8 粒子の再構成

データの解析は得られたイメージ分布と強度分布をシミュレーションから得られる分布と比較し、1 次宇宙線を再構成することで行われる。

特に、先に述べたように γ 線とハドロンではハドロンシャワーの方が横に広がる傾向にある。よって、γ 線シャワーによるイメージが楕円になるのに対し、ハドロンシャワーは円に近くなる。この違いを利用することで γ 線イベントとハドロンイベントを分けることが可能になる。しかし、厳密に分けることは難しくこの方法により分けられたイベントは、それぞれ γ 線 like なイベント、陽子 like なイベントと呼称される。

実際に CANGAROO-III 望遠鏡で捉えられるイベントは、γ 線イベントは図 2.23、陽子

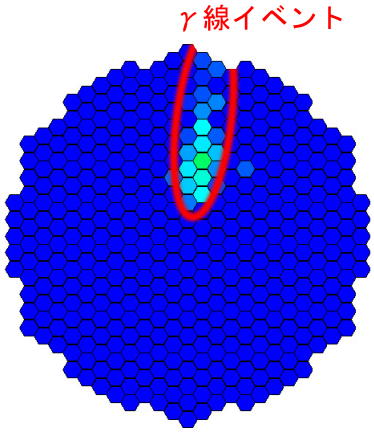

図 2.23: γ 線イベントのカメライメージ。

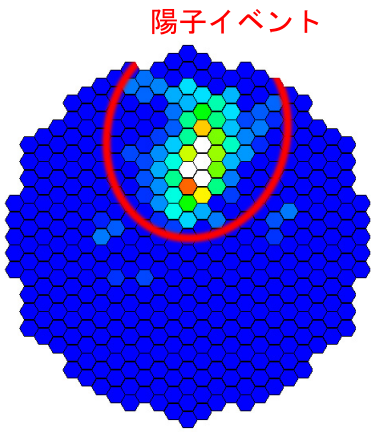

図 2.24: 陽子イベントのカメライメージ。

イベントは図 2.24 の様なカメライメージとして見ることができる。このイメージを次のようにパラメータ化する。楕円の長軸方向の RMS を Length、短軸方向の RMS を Width と定義する。これはそれぞれシャワーの横方向、縦方向の発展を表している。また、楕円の長軸はシャワー軸に対応する。更にシャワーイメージの重心と視野中心を結び、その直線とシャワー軸のなす角を Alpha、直線の距離を Distance と定義する。Alpha はシャワー軸の向いている方向を表し、カメラがシャワーの到来方向を向いている場合は誤差の範囲内で 0 になる。これらのパラメータをまとめた図を図 2.25 に示す。

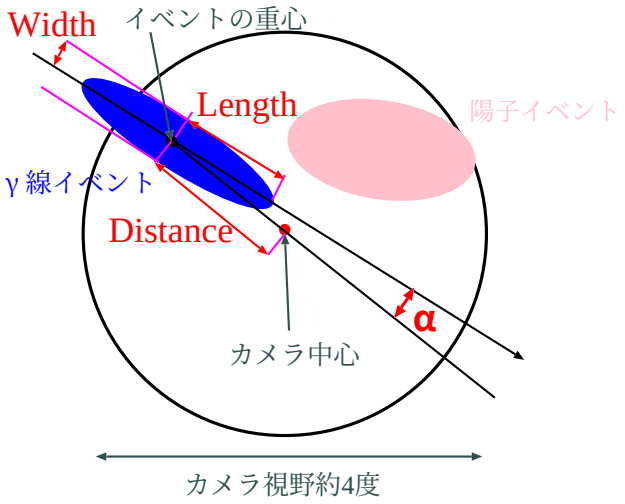

図 2.25: イメージパラメータの定義。

第3章　ミューオンの発生とImaging

前章では大気チェレンコフ望遠鏡の原理についてハドロンによるイベントとγ線によるイベントを例にして説明した。この章ではチェレンコフ光を発生する粒子がミューオンである場合について考察していく。また、ミューオンイベントを解析していくに当って必要となる理論予測についても述べる。

3.1　ミューオンの発生機構

大気中に存在するミューオンは、宇宙線の主成分である陽子から作られる。大気に入射した陽子は空気と反応し、電磁シャワーやハドロンシャワーを引き起こす。ハドロンシャワー中の荷電π中間子は2.603×10^{-8}sで

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \tag{3.1}$$
$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \tag{3.2}$$

のように崩壊しミューオンを作り出す。ミューオンは2.197×10^{-6}sで崩壊を起こし

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \tag{3.3}$$
$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \tag{3.4}$$

のように電子へ変化する。このようにミューオンの寿命は短いので光速に近い速度を持たない場合、地上に到達するまでに崩壊してしまう。光速の９０％の速度を持つミューオンの場合、平均走行距離は約1.51kmである。我々が観測対象とするミューオンは大気中でチェレンコフ光を発するミューオンである。つまり、光速の９９．９７％以上の速度を持つミューオンである必要があり、このエネルギーを持つミューオンの多くは地上に到達するまで崩壊しない。

電子は大気中で制動放射を起こしエネルギーを徐々に失っていく。最終的には電離相互作用でエネルギーを失いイオン等に捕獲される。ミューオンは、電子よりも２００倍程質量が大きく、制動放射は1TeV以上にならないと制動放射は稀にしか起きず、主に電離相互作用を起こしてエネルギーを失う。しかし、電離相互作用によるエネルギー損失は少なく、多くは地上まで到達できる。

3.2 ミューオンの Imaging

CANGAROO-III 望遠鏡で捉えられるミューオンイベントはリング上になる。このことについて今から説明していく。

前章で説明したように CANGAROO-III 望遠鏡の鏡は放物面のフレームに小型球面鏡をのせて作られている。小型鏡が球面鏡であることが無視できる範囲では放物面であると言える。CANGAROO-III 望遠鏡の主鏡構造は、図 3.1 のような放物面である。よって、焦点面では入射角が焦点面上の位置に対応することになる。つまり、星の光などの平行光は焦点面では一点に集まる。ここで、ミューオンから発せられるチェレンコフ光はその速度と大気屈折率をパラメータとして

$$cos\theta = \frac{1}{n\beta} \tag{3.5}$$

のような角度を持って放射される。この光が放物面鏡に入射した場合、一点に集束せず焦点面ではある半径を持つリングを描く。そしてリング半径はチェレンコフ光の放射角となる。また、リング中心はミューオンの進行方向と放物面鏡の光軸がなす角になる。大気の屈折率が 1.000267 であることから、放射角には制限がつけられ 7GeV 以上のミューオンではおよそ 1.3 度以下となる。よって、リング半径の最大値も 1.3 度以下となる。

次に、ミューオンが図 3.1 の 1 のように光軸に沿って鏡の中心に入射した場合、発せられた全てのチェレンコフ光を鏡で捉えることができる。しかし、2 のようにインパクトパラメータ b を持って入射した場合、鏡では一部の光しか捉えることができない。つまり、カメラ面にはリングの一部が欠た形で集束することになる。

3.3 ミューオンイベントと発生高度

ミューオンイベントをカメラで捉える場合、そのイベントが発生した高度はある高さに制限される。これは、チェレンコフ光の放射角が 1.3 度以下であり、高い高度で放射されるチェレンコフ光は鏡に入射しないことから図 3.1 より想像可能である。実際に、鏡の中心へ光軸に沿って入射するミューオンの場合、ミューオンイベントとして捉えらる最大高度はおよそ 200m になる。インパクトパラメータが大きくなるとこの最大高度は高くなるが、高度が高くなるにつれ $1/h$[高度] という関係でカメラで受けるチェレンコフ光も弱くなる。これらのことを考慮にいれ、CANGAROO-III 望遠鏡で捉えるミューオンイベントの最大発生高度を考えると、1km 以下のイベントになる。

3.4 チェレンコフ光の光量

問題を簡単にするために、ミューオンが光軸に平行に対し鏡の中心へ飛んでいる状況を考える。

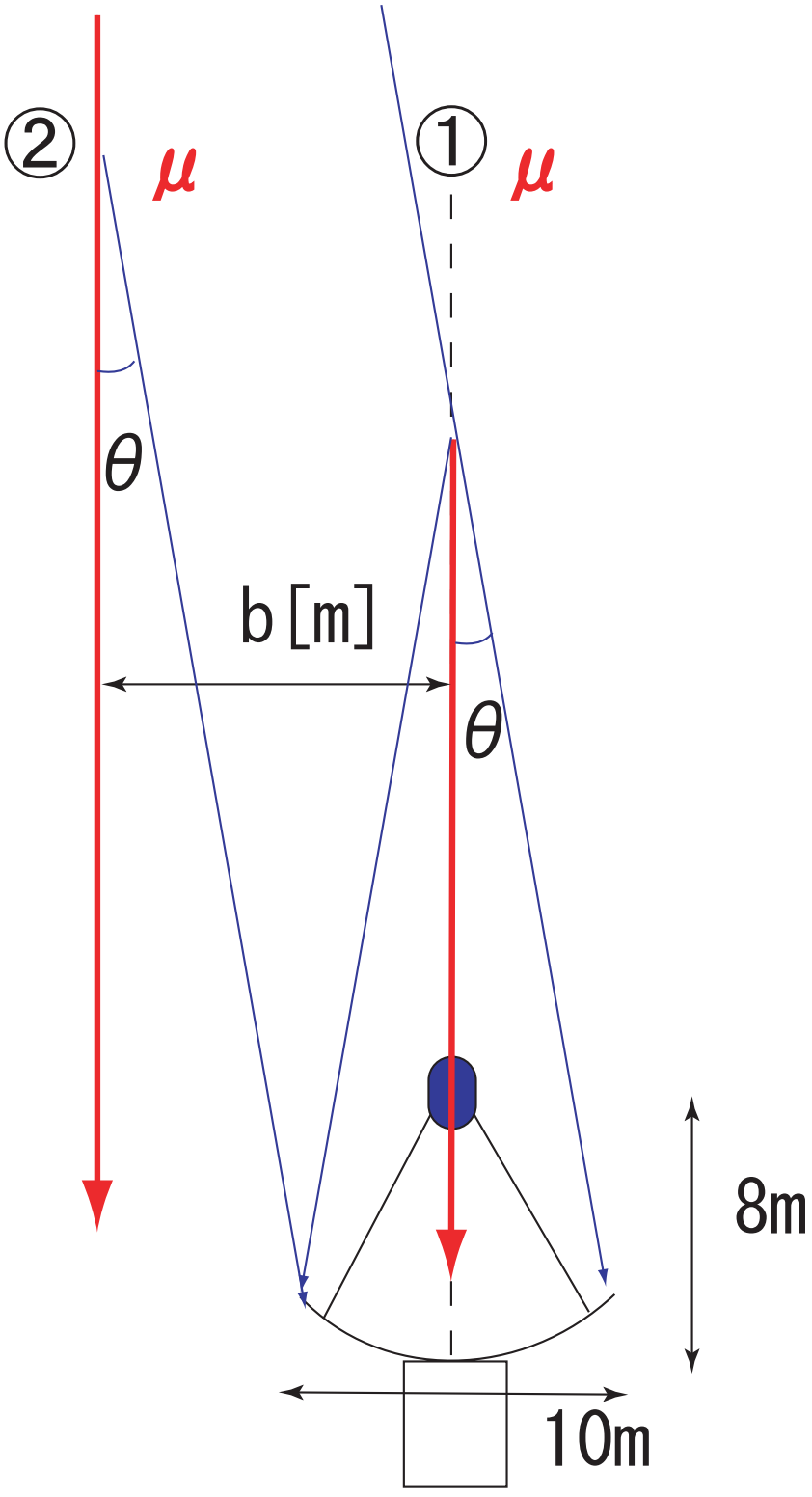

図 3.1: 放物面鏡のパラメータ定義。

チェレンコフ光は荷電粒子が媒質中を媒質中の光速を越えて走行するときに発せられる光のことである。その発生量は

$$dN = \frac{\alpha z^2}{\hbar c}\left(1-\frac{1}{n^2\beta^2}\right)\left(\frac{dE}{J}\right)\left(\frac{dx}{m}\right) \tag{3.6}$$

$$\simeq 370z^2\left(1-\frac{1}{n^2\beta^2}\right)\left(\frac{dE}{eV}\right)\left(\frac{dx}{cm}\right) \tag{3.7}$$

$$\alpha = \text{微細構造定数} \qquad z = \text{入射粒子の電荷} \tag{3.8}$$

(3.7) のように Flank-Tamm の式から求められる。ミューオンの場合、電荷 z=1 である。

速度はほぼ光速であり、$\beta = 1$ と近似してしまって良いので、この式から発光量を求めるには屈折率とエネルギー範囲、走行距離が必要になる。

まず、屈折率は Hillas の論文 [1] より

$$n = 1.0 + 0.000296\left(\frac{x}{1030\mathrm{g}\cdot\mathrm{m}^{-2}}\right)\left(\frac{T}{273.2\mathrm{K}}\right)^{-1} \tag{3.9}$$

$$x = \text{Atmospheric depth} \tag{3.10}$$

$$T = \text{温度} \tag{3.11}$$

式 (3.9) となる。x は大気密度に依存し、静水圧平衡を仮定すると温度と次の関係式で結び付く。[1]

$$T = 204 + 0.091x \tag{3.12}$$

また、気温は高度１１ km までは $-6.5C^\circ/km$ で変化する。よって、地上の気温を $20C^\circ$ とし、高度 0m から 200m の屈折率の変化を考えると、1.000262 から 1.000260 へ変化する温度は観測中も変化しており必ずしも屈折率は一定ではない。また、季節によっても気温の変化はありこの点についても考慮する必要がある。気温の変動を考慮すると、一年を通すと Woomera の気温は $10C^\circ$ から $40C^\circ$ まで変化する。よって、温度による屈折率の不定性は

$$10C^\circ \leq T \leq 40C^\circ \tag{3.13}$$

$$870.3g\times m^{-2} \leq x \leq 1200g\times m^{-2} \tag{3.14}$$

$$1.000241 \leq n \leq 1.000301 \tag{3.15}$$

のように、0.00006 ほど存在する。

次に、エネルギー範囲であるが、鏡の反射率や光電子増倍管の感度を考慮すると、300nm から 500nm の波長の光を検出可能である。これに対応するエネルギーは 2.48eV から 4.13eV になる。

最後に走行距離について考える。望遠鏡が捉えるミューオンからのチェレンコフ光は、正確に計算すると２１９ m 以下で発生した光である。よって、走行距離は鏡に到達するまでのおよそ２１０ m となる。

これらの結果から、チェレンコフ光の発光量を (3.7) の式を用いて求めると、

$$6700photons \leq N_{total} \leq 7500photons \tag{3.16}$$

となる。これがミューオンが視野中心へ垂直に入射したときに CANGAROO-III 望遠鏡が捉える全チェレンコフ光になる。

さて、鏡の中心に垂直にミューオンが入射していると考た場合、走行中に放射されたチェレンコフ光は全てカメラ面上にリング状に集束する。このことから、実際に検出される信号はこの N_{total} に鏡の反射率と量子効率、ライトガイド効率を掛けたものになる。鏡の反射率８５％と前章で載せた量子効率、ライトガイド効率を用いることで、この値は

$$720photons \leq N_{camera} \leq 800photons \tag{3.17}$$

と見積もることができる。また、それはリング状に分布しているので、円弧の長さ当りで一定になる。つまり、

$$\frac{Size[p.e.]}{Arclength[deg]} = \text{Constant} \tag{3.18}$$

という式が成り立ち、その値は先程求めた N_{camera} を用いて、

$$\frac{Size[p.e.]}{Arclength[deg]} = \frac{N_{camera}}{2\pi \times 1.3} \tag{3.19}$$

となる。この式は 図 3.2 のように、望遠鏡が見込むミューオンの走行距離にのみ依存する。そこで、インパクトパラメータが b[m] であるときの走行距離について考える。走行距離 l[m] は、幾何学的に考え

$$l[m] = \frac{b+10}{tan\theta_c} - \frac{b}{tan\theta_c} \tag{3.20}$$

$$= \frac{10}{tan\theta_c} \tag{3.21}$$

となり、インパクトパラメータによらず望遠鏡の直径１０ m とチェレンコフ光の放射角のみに依存する。また、式 (3.18) はスポットサイズのような動径方向の広がりにも依存しない。つまり、式 (3.18) は光学系の反射率やカメラの効率のみに依存するパラメータになる。よって、この Size/Arclength を用いて、カメラの性能評価を行っていくことが可能である。

大気の不定性を考慮に入れ、望遠鏡の初期状態における反射率等を考慮した場合に Size/Arclength を求めると、

$$80 \leq \frac{Size[p.e.]}{Arclength[deg]} \leq 88 \tag{3.22}$$

となる。

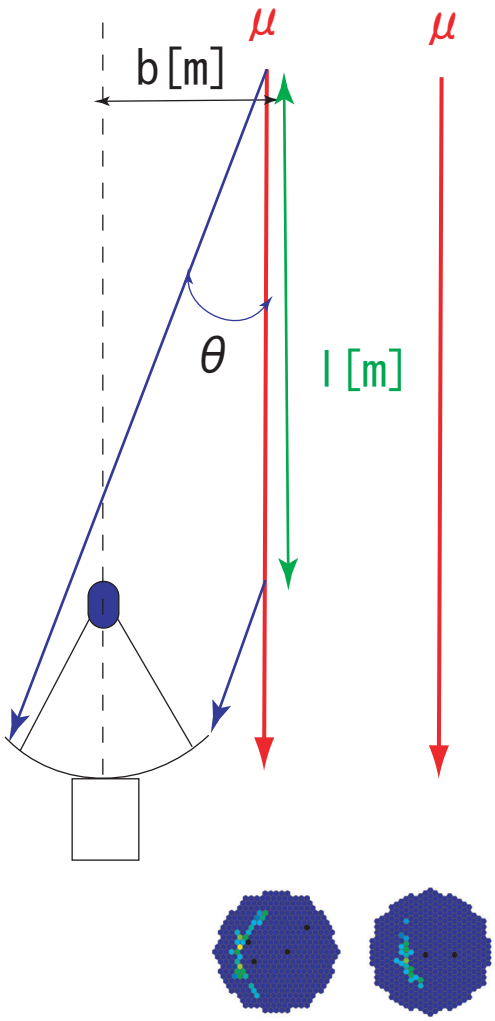

図 3.2: インパクトパラメータと走行距離、
それぞれの場合におけるカメライメージ。

3.5 ミューオンリングの動径分布

リングの動径方向の分布を解析的に求めるのは難しい。しかし、どのような理由から動径方向に分布を持つのか考えておくことは重要である。そこで、ここではその理由について考える。理由としては次のことが考えられる。

1. 放物面鏡の幾何学的性質 (望遠鏡の収差)
2. ミューオンの多重散乱
3. 小型鏡の光軸のずれ
4. 小型鏡の曲率のばらつき

１、２についてはシミュレーションを行うことで推定することができる。しかし、３、４については実際に計測してみないことには分からないパラメータである。２については建設時期に測定が行われているが、４については鏡の取りつけ後に計測することは困難である。そこで、ミューオンリングは動径方向の分布を用いて、この測定が出来きるのではないかと考えた。現状の解析では傾向が見える程度であり、今後解析手法の改良を進めて行く必要がある。

第4章　カットパラメータの最適化

大気チェレンコフ望遠鏡で観測されるミューオンリングの特徴は前章で説明した通りである。これらの特徴からカットの妥当性を判断するパラメータとして曲率半径と TDC 分布が使える。実際には、曲率半径の逆数である曲率分布を用いる。まず、曲率分布であるが、曲率は大気屈折率とミューオンのエネルギーで主に決まり、およそ $0.7[\mathrm{deg}^{-1}]$ にピークを持つ構造になる。単体のミューオンから発生する光子はカメラでほぼ同時に観測されるので、TDC 分布にピーク構造を持つ。よって、この２つのパラメータは正しい解析を行うことにより、ある値へと収束するはずである。以後、これらのパラメータをモニターパラメータとし、カットパラメータの最適化を行う。具体的にはこの２つのパラメータが綺麗になるように他のカットパラメータを選んでいく。

4.1　Length/Size 分布

私が初めに注目したパラメータは Length/Size[deg/p.e.] という分布である。このパラメータは、H.E.S.S 等、CANGAROO-III 望遠鏡と同じ大気チェレンコフ望遠鏡グループが以前から行っている解析に使われている。まず、他のグループで行われている解析が CANGAROO-III 望遠鏡でどのように有用であるかを確かめることを目的として解析を行った。

Length/Size というパラメータは、望遠鏡で得られたイメージを楕円でフィッティングし、その長軸の長さをイベントの全光量で割ったパラメータである。つまり、通常のシャワーの解析で行われる方法を用いて導き出せるパラメータである。このことから、このパラメータはミューオンイベントがシャワーパラメータ中のどこに分布するのかを見るのに役に立つ。

実際に、CANGAROO-III 望遠鏡と H.E.S.S 望遠鏡で Length/Size 分布を比較すると、図 4.1、図 4.2 のようになる。[3]H.E.S.S グループはステレオ観測を行うことでミューオンイベントを落としており、シングルイベントとステレオイベントを比べた時に形の違いがはっきり見えている。この違いは主にミューオンイベントから来ており、ステレオイベントで落ちた部分にミューオンイベントが存在している。落ちずに残った部分は、主に陽子によるイベントである。CANGAROO-III 望遠鏡においても同様のことが言える。

２章、３章で説明したように、ハドロンシャワーや γ 線シャワーは数 km から 20km までの比較的高度の高い領域で起きる。これに対しミューオンからのイベントは 1km 以下、

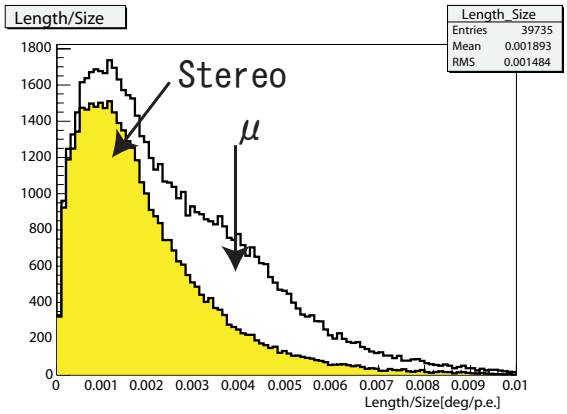

図 4.1: CANGAROO 望遠鏡における Length/Size 分布。横軸は Length/Size[deg/p.e.]、縦軸は count である。黄色はステレオイベントとして選ばれたものを、白色は全イベントのヒストグラムである。0.004 付近に μ 粒子によるイベントがあるとわかる。

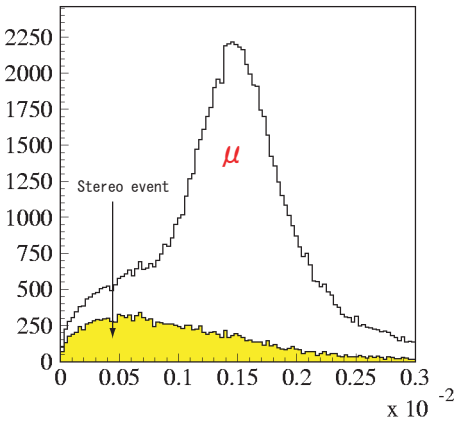

図 4.2: HESS 望遠鏡における Length/Size 分布 [3]。横軸は Length/Size、縦軸は count である。黄色はステレオイベントとして選ばれたものを、白色は全イベントのヒストグラムである。

特に数百 m の領域で発生したものがほとんどである。曇天の日に現れる雲は主に数百 m から数 km の範囲に分布し、シャワーからのチェレンコフ光を遮る効果を持つ。よって、地上で観測を行っている大気チェレンコフ望遠鏡に届くチェレンコフ光は主にミューオンからのものとなり、曇天の日のイベントはミューオンイベントがほとんどであると考えられる。そこで、曇天の日のデータ解析した。すると Length/Size 分布は図 4.3 のようになる。このグラフから CANGAROO-III 望遠鏡におけるミューオンイベントの Length/Size 分布は 0.003[deg/p.e.] にピークを持つことが分かった。H.E.S.S 望遠鏡とは望遠鏡パラメータが違うことからそのまま比較することはできないが、ピーク構造は同じ形をしていることが分かる。このことから、CANGAROO-III 望遠鏡においても、ステレオ観測を行うことで、ミューオンイベントを落し、シャワーのみのデータを取り出せるはずである。

また、曇天のデータの場合、Length/Size 分布はミューオンイベントを判定する良いパラメータとなり得ることも分かる。しかし、通常の観測データでは、ミューオンイベントとシャワーイベントは似通ったパラメータ分布を持ちはっきりと区別することができない。そこで、ミューオンイベントが持つイメージの特徴を利用し、ミューオンイベントのみを選びだす必要がある。

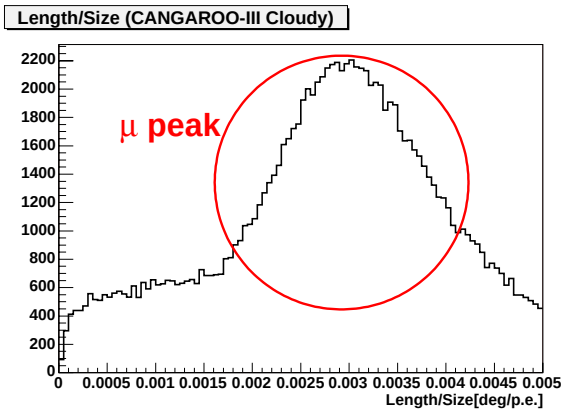

図 4.3: CANGAROO 望遠鏡における Length/Size 分布。横軸は Length/Size[deg/p.e.]、縦軸は count である。曇天の Length/Size 分布であり、晴天の時のデータに比べ S/N 比が向上している。

4.2 Ring Fitting

ミューオンイベントの特徴を用いることで、イベントの中からミューオンのみを選び出す必要があることが前節で分かった。この特徴とはミューオンイベントのイメージがリング上に分布するということである。そこで、全イベントにリングイメージによるフィッティングを行い、中心と半径を求めることにする。実際にはこの 2 つをスキャンパラメータとし、イベント毎に χ^2 を求める。そして χ^2 が最小となるパラメータをミューオンリングの中心と半径としている。

アルゴリズムを以下に示す。

1. カメラ面を 5x5 のメッシュに分割する
2. メッシュの中心を円の中心とする
3. チェレンコフ光を検出した光電子増倍管に対し、次の式で平均半径と χ^2 を求める。

$$< r_j > = \sum_i \frac{ADC_i[p.e.] * ((x_i - x_{center})^2 + (y_i - y_{center})^2)}{ADC_i[p.e.]}$$

$$\chi_j^2 = \sum_i 4 \times \frac{ADC_i[p.e.] * ((x_i - x_{center})^2 + (y_i - y_{center})^2)}{Size[p.e.] \times PIXELSIZE^2}$$

4. χ^2 が最小となる j という区画をさらに 5x5 のメッシュに分割し、1 から繰り返す。そして、χ^2 がもっとも小さくなる半径と中心を求めていく。

この方法でミューオンリングをうまくフィッティングすることができる。

前章で説明したが、ミューオンリングの半径はその逆数を取り曲率分布とすることでおよそ 0.7[deg^{-1}] にピークを持つ構造になる。このことから、以後フィッティングパラメータとして求められた半径は、正規分布に従う曲率として用いることにする。

4.3 カット前の曲率分布と TDC 分布)

解析の説明を始める前に、解析をしていない時の曲率分布と TDC 分布を示しておく。解析を行う前の曲率分布は図 4.4、TDC 分布は図 4.5 の形をしている。赤丸で囲った部分

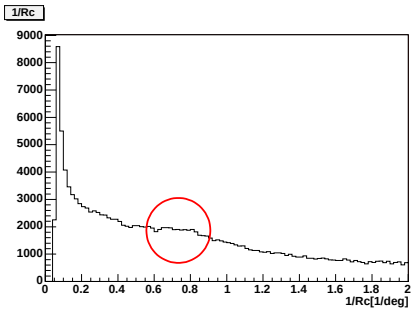

図 4.4: 曲率分布 (カット前)。横軸は曲率 [deg^{-1}]、縦軸は count である。μ イベントによる寄与は 0.7[deg^{-1}] に現れ、赤丸の部分のピークが μ イベントによる寄与である。

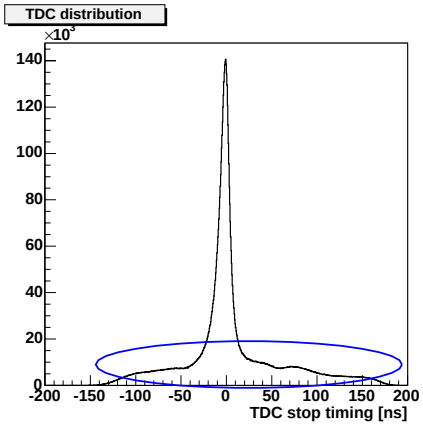

図 4.5: TDC 分布 (カット前)。横軸は TDC タイミング [ns]、縦軸は count である。青まるで囲まれた部分にランダムノイズが存在し、これは夜光による影響である。

にミューオンからの寄与が存在するはずである。実際に少しではあるが盛り上がっておりミューオンイベントが存在することが分かる。TDC 分布では青丸で囲った部分にベースノイズが存在している。これは視野の明るい天体を観測した場合に増加する傾向があり、広義の夜光による影響である。ただし、ハードウェアスレッショールドと密接に絡んでいるおり、夜光量との関係が一意ではない点に注意が必要である。

これから解析を行っていくが、指標としてはこの曲率分布と TDC 分布を用いる。この２つの分布はミューオンイベントの特徴を良く表すパラメータである。今後、各種パラメータに制限を設けることで解析を行っていくが、正しい解析を行っていればこれらのパラメータは収束していくであろう。この事実を用いて解析の妥当性を評価していく。

つまり、曲率分布はミューオンイベントがリング状になることから 0.7[deg^{-1}] にピークを持つ構造になる。TDC 分布は広がって分布しているものがなくなり、ある点を中心とした細い分布を持つようになるはずである。

4.4 Clustering

まず行うべき事として、まとまって鳴るイベントを選び出すことである。これはシャワーイベントを解析するときにも行われる。夜光やエレクトロニクス、カメラからのノイズはホワイトノイズであり、カメラ面全体でランダムに検出されるはずである。つまり、まとまって鳴るイベントを選びだすことで、これらのホワイトノイズの多くを落とすことが可能になる。

そこで、シャワーの解析で行われるように T10a と言われる互いに隣り合う光電子増倍管が１０本以上まとまって鳴るような Cluster 構造が存在する時にイベントを選び出すように Clustering を行った。しかし、ミューオンによるチェレンコフ光は弱く、また視野上で広く分布する。つまり、光電子増倍管１本当りに入射する光量は低くなり、連続して鳴らないものも多い。そこで、１本間をおいて鳴る光電子増倍管も Cluster を構成するとして解析を行った。この Clustering を以後 T10a2 と呼ぶことにする。図解すると図 4.6 のようになる。

この条件における曲率分布の比較を図 4.7 に、TDC 分布を図 4.8 に載せる。曲率分布においては明らかに T10a2 により S/N 比が向上している。また、0.7[deg^{-1}] 付近にピークが立ってきており、イベントの選別が正しく行われていることが分かる。一方、TDC 分布上の夜行の除去は不十分である。

4.5 Arclengthによる制限

さて、次にミューオンイベントの特徴であるリング状の形に注目する。何度も述べているように、リングの半径はミューオンのエネルギーと大気屈折率で決まり、7GeV 以上のミューオンについてはその半径は約 1.3 度の視野角に対応する。円弧の長さが短いイベントはハドロンシャワーと分離しにくいので、円弧の長いものを選び出すことにより、バックグラウンドを排除することが可能である。また、このカットはイメージサイズの大きいものを選び出すことから、夜光のカットにも有効である。

このカットの最適値を選ぶために次の段階のカット条件である χ^2 による制限を掛けたときの曲率と Arclength の２次元分布を取ると、図 4.9 のようになる。この２次元分布から分かるように、Arclength が 2 度以上でカットをかけた場合、多くのバックグラウンドを取り除くことができ、ミューオンイベントを探すのに有効である。２度以下にもミューオンイベントは多数含まれるであろうが、シャワーイベントやノイズとの判別が難しく、現在の解析では利用しないことにする。このことから、Arclength に 2 度以上という制限を掛けると、曲率半径は図 4.10、TDC 分布は図 4.11 のようになり、この分布においてもノイズ部分が落ちていることが分かる。

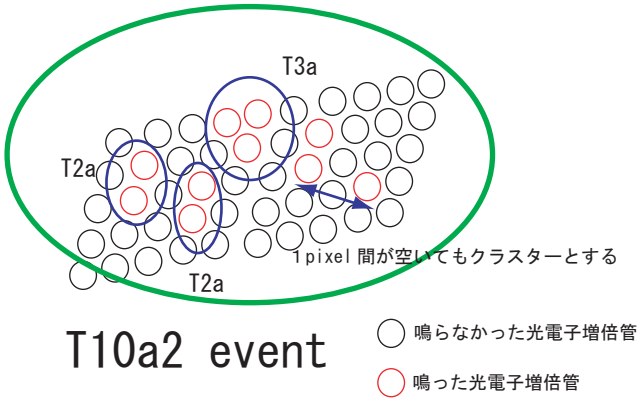

図 4.6: T10a2 Clustering の模式図。

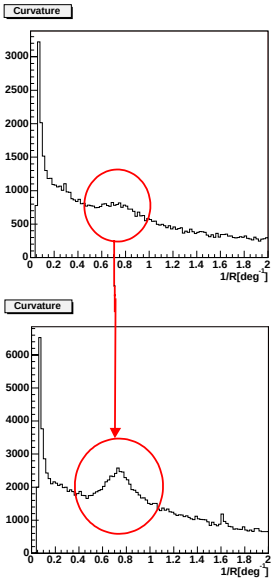

図 4.7: Clustering カットを行った曲率分布 上段:T10a 下段:T10a2。横軸は曲率 [deg^{-1}]、縦軸は count である。Clustering カットにより S/N 比が向上していることが分かる。

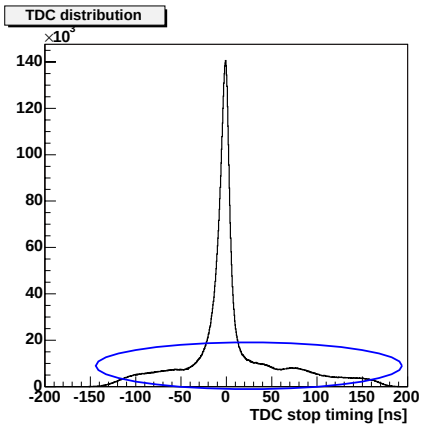

図 4.8: Clustering カットを行った TDC 分布。横軸は TDC タイミング [ns]、縦軸は count である。

4.6 Arclength による制限

4.7 動径方向の分布

更に、リングの特徴としてはリング中心が埋まっていないという条件が考えられる。つまり、中心が埋まるようなイベントはミューオンによるイベントなのか明確に判断出来ず、今要求されている解析には不適切である。このことから、動径方向の分布に対応す

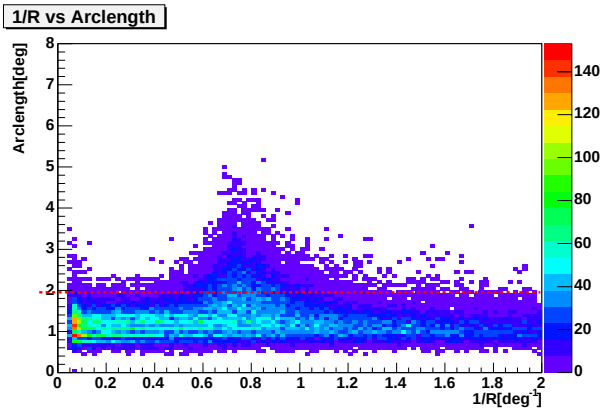

図 4.9: 曲率 vs Arclength。横軸は曲率 [deg^{-1}]、縦軸は Arclength[deg] である。T2a2 Clustering を行い χ^2 に制限を設けた図である。この図から分かることは、Arclength¡2 にシャワーイベントが多く含まれ、Arclength≥2 とすることで μ イベントを選びだせるということである。

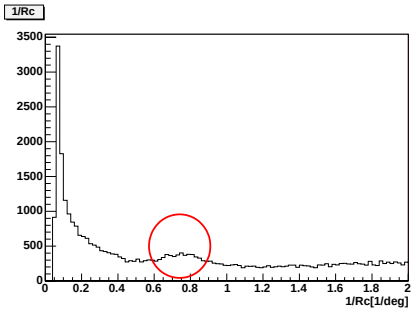

図 4.10: 曲率分布。横軸は曲率 [deg^{-1}]、縦軸は count である。T2a2 Clustering、Arclength≥2 のカットを行ったところ、0.7[deg^{-1}] 付近のピークが残り、ノイズが落ちた。

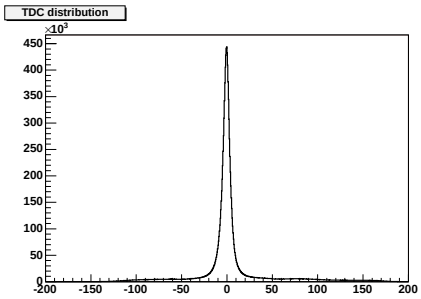

図 4.11: TDC 分布。横軸は TDC タイミング [ns]、縦軸は count である。T2a2 Clustering、Arclength≥2 のカットを行ったところ、夜光を落せた。

るパラメータとして χ^2 を定義することにより、リングの広がりに対して制限を付ける。χ^2 の定義は次式である。

$$\chi^2 = \sum_{pixel} 4 \times \frac{ADC[\text{p.e.}]\left\{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2\right\}}{Size[\text{p.e.}] \times PIXELSIZE^2}$$

$Arclength \leq 2.0$[p.e.] の制限を付けた時の χ^2 分布は 図 4.12 のようになり、2 山の構造を持つ、このうち、χ^2 の小さい方の山が良いミューオンイベントであると類推される。そこで、$\chi^2 \leq 2.0$ で制限を付けることで、更にミューオンイベントの S/N 比を向上させることが可能である。χ^2 の制限を掛けた時の曲率分布は図 4.13 、TDC 分布は図 4.14 になる。TDC 分布においてベースノイズがかなり落ち、0[ns] 付近にピークを持つ構造がはっきり現れている。このように、S/N 比が十分に落ちており、このカットもミューオンイ

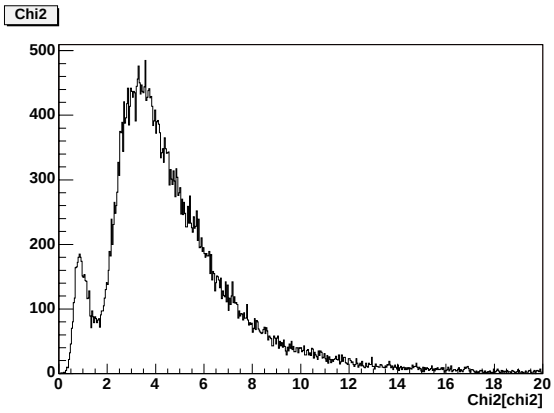

図 4.12: χ^2 分布。横軸は χ^2[pixel^2]、縦軸は count である。T2a2 Clustering、Arclength≥2 のカットを適用したところ、μ イベントは 1 付近にピークを持つことが分かった。χ^2 の大きいピークはシャワーイベントである。

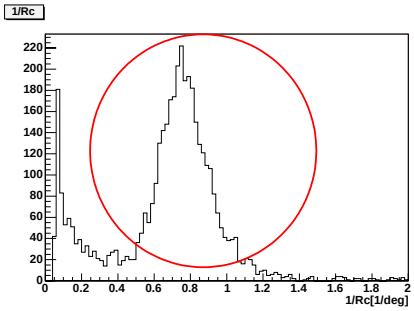

図 4.13: χ^2 カットを行った曲率分布。横軸は曲率 [deg^{-1}]、縦軸は count である。T2a2 Clustering、Arclength≥2、χ^2 ≤2 のカットを適用した。

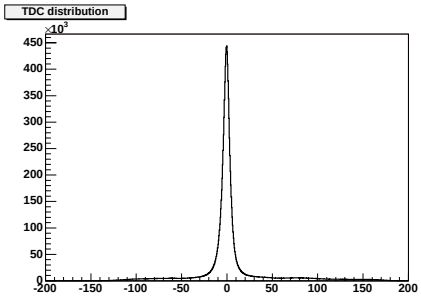

図 4.14: χ^2 カットを行った TDC 分布。横軸は TDC タイミング [ns]、縦軸は count である。T2a2 Clustering、Arclength≥2、χ^2 ≤2 のカットを適用した。

ベントを選びだすのに妥当であるといえる。

さて、ここで排除した χ^2 の大きいイベントにはどのようなイベントが含まれるかというと、図 4.15 に載せたようなイベントである。これは、直線的ではなく円形に広がるハドロンシャワーによるイベントであると解釈できる。このことから、χ^2 はハドロンシャワーによるイベントとミューオンイベントを分けるのに有用であることが分かる。

4.8 別の Clustering のテスト

ここまでに行われたカットにより、ミューオンイベントについてある程度 S/N が得られるようになった。よりこの S/N 比を向上させるために Clustering プロセスをよりミュー

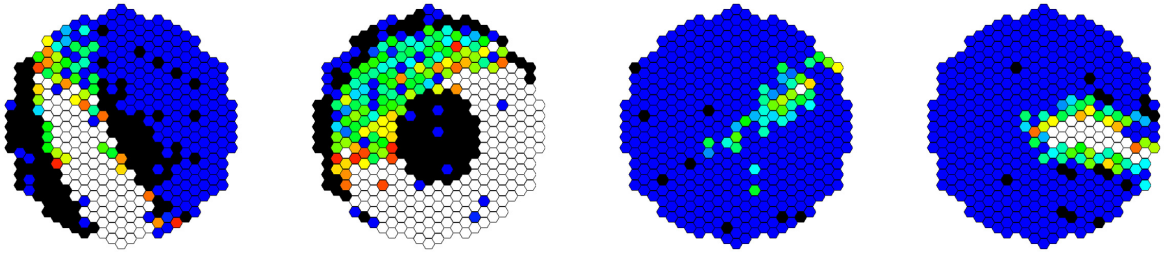

図 4.15: χ^2 の大きなイベントイメージ。T2a2 Clustering、Arclength≥2、χ^2 >2 のカットを用い、χ^2 の大きいイベントを選びだした。

オンイベントを選び出すのに適したものへ替える。

今までは、ミューオンからのチェレンコフ光がカメライメージで必ずしも連続したリングにならないことを考慮に入れた Clustering を行ってきた。しかし、これでは不十分であると思われる。そこで、更に Cluster を全て足し合わせることで、弱いチェレンコフ光まで拾うことができるようにした Clustering を行っていく。それは、T2a2 と呼称する２本の光電子増倍管がまとまってなる Clustering を行い、その Cluster を足し合わせて新たな Cluster を作るというものである。これにより、今まで捨てられていたミューオンイベントも選びだすことができるようになった。

次に、Arclength のカットと χ^2 の制限を固定し、クラスタリングのサイズを替えて曲率分布の比較を行い、最適なクラスタ数を探した。T2a2 を適用した時の曲率分布が図 4.16 であり、T3a2 を適用した時の曲率分布が図 4.17 になる。これらから判断すると T2a2 の

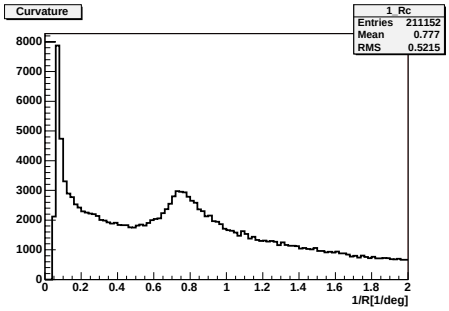

図 4.16: T2a2 Clustering を行ったときの曲率分布。横軸は曲率 [ns]、縦軸は count である。

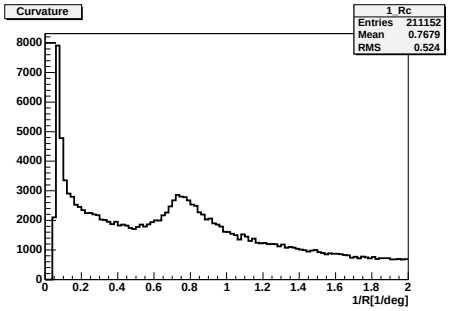

図 4.17: T3a2 Clustering を行ったときの曲率分布。横軸は曲率 [ns]、縦軸は count

Clustering を行ったものがもっとも S/N 比が良くなり、また acceptance も高くなることから、ミューオンリングの選択方法として優れていることが分かる。よって、以後このクラスタリングを用いて解析を行うことにする。

4.9 曲率分布

ミューオンリングの曲率分布は $0.7[\mathrm{deg}^{-1}]$ にピークを持つ。そして、7GeV 以上のエネルギーを持つミューオンからのチェレンコフ光は $0.55[\mathrm{deg}^{-1}]$ から $1[\mathrm{deg}^{-1}]$ の範囲に分布を持つことが分かっているので、最終的にこの値を用いて曲率分布に制限を掛ける。これにより良いミューオンイベントのみが選び出されたことになる。

4.10 カットのまとめ

まず行っているのは T2a2 と呼ぶ Clustering である。これによりシャワーイベントを含めたミューオンイベントを選び出す。次にミューオンイベントの特徴であるリング構造をフィッティングし、曲率とリング中心を求めている。これらを基礎としてカットを行っている。

カットとして用いるパラメータは Arclength、χ^2、曲率である。それぞれのカット値としては各望遠鏡で次の表の値が最適値となる。

望遠鏡	Arclength[deg]	χ^2	Curvature[deg^{-1}]
2 号機	≥ 2.0	≤ 2.0	$0.55 \leq \frac{1}{r} \leq 0.9$
3 号機	≥ 2.0	≤ 2.0	$0.55 \leq \frac{1}{r} \leq 0.9$
4 号機	≥ 2.0	≤ 2.0	$0.55 \leq \frac{1}{r} \leq 0.9$

表 4.1: 各望遠鏡に適したカットパラメータ。

どの望遠鏡も同じカットパラメータで最適化出来ており、これらのカットにより選び出されたミューオンイベントは次の図に示すようなイベントである。リング状のイベントが選ばれていることが分かる。以上により明確にミューオンからのイベントであるもののみ選び出されたことになる。また、実際にミューオンイベントのみが選びだされていることを示すために、カットをかける前のイベントモニターも載せておく。

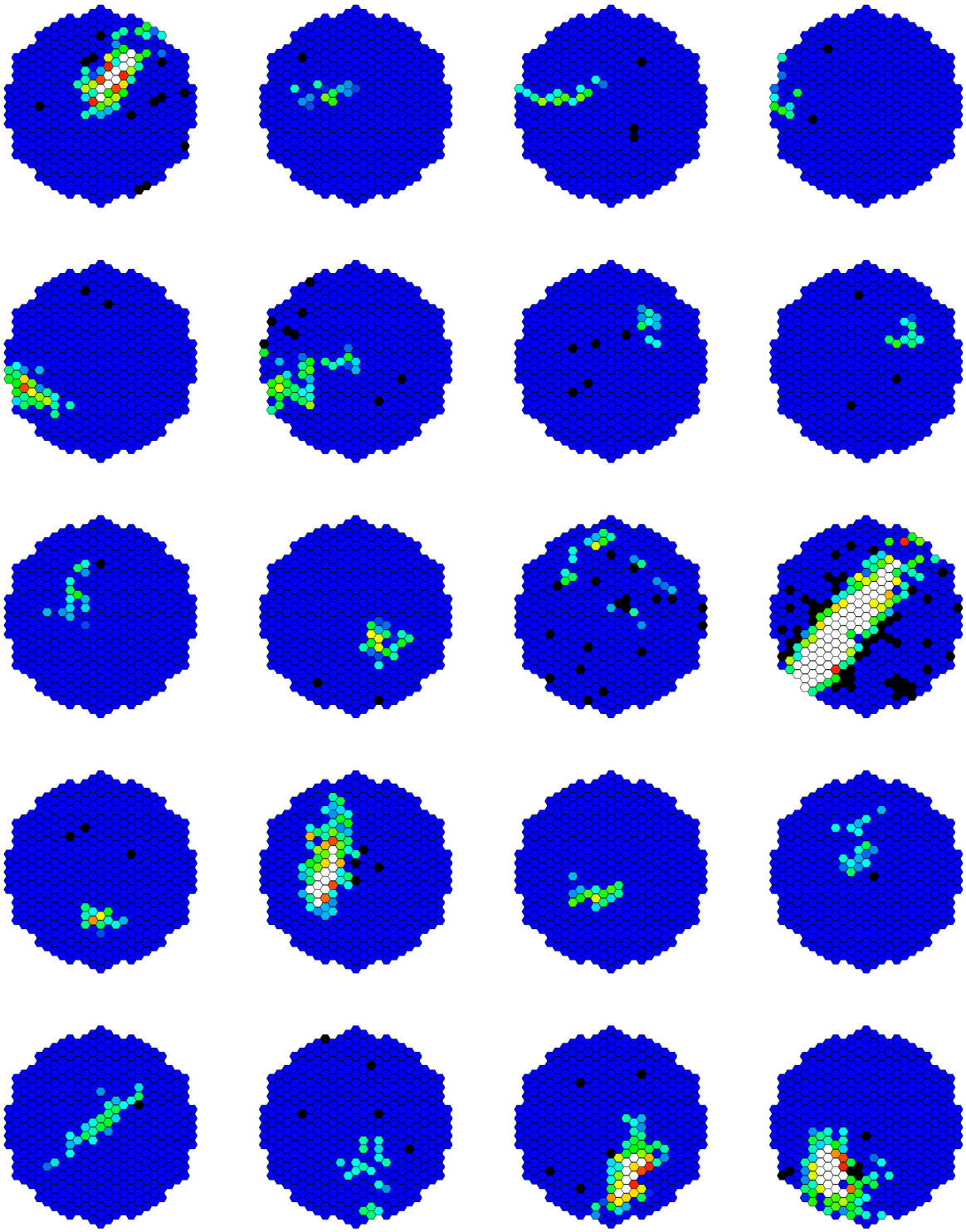

図 4.18: カットを行わないときのイベントモニター。夜光イベントを排除するために、T2a2 Clustering カットのみを行った。

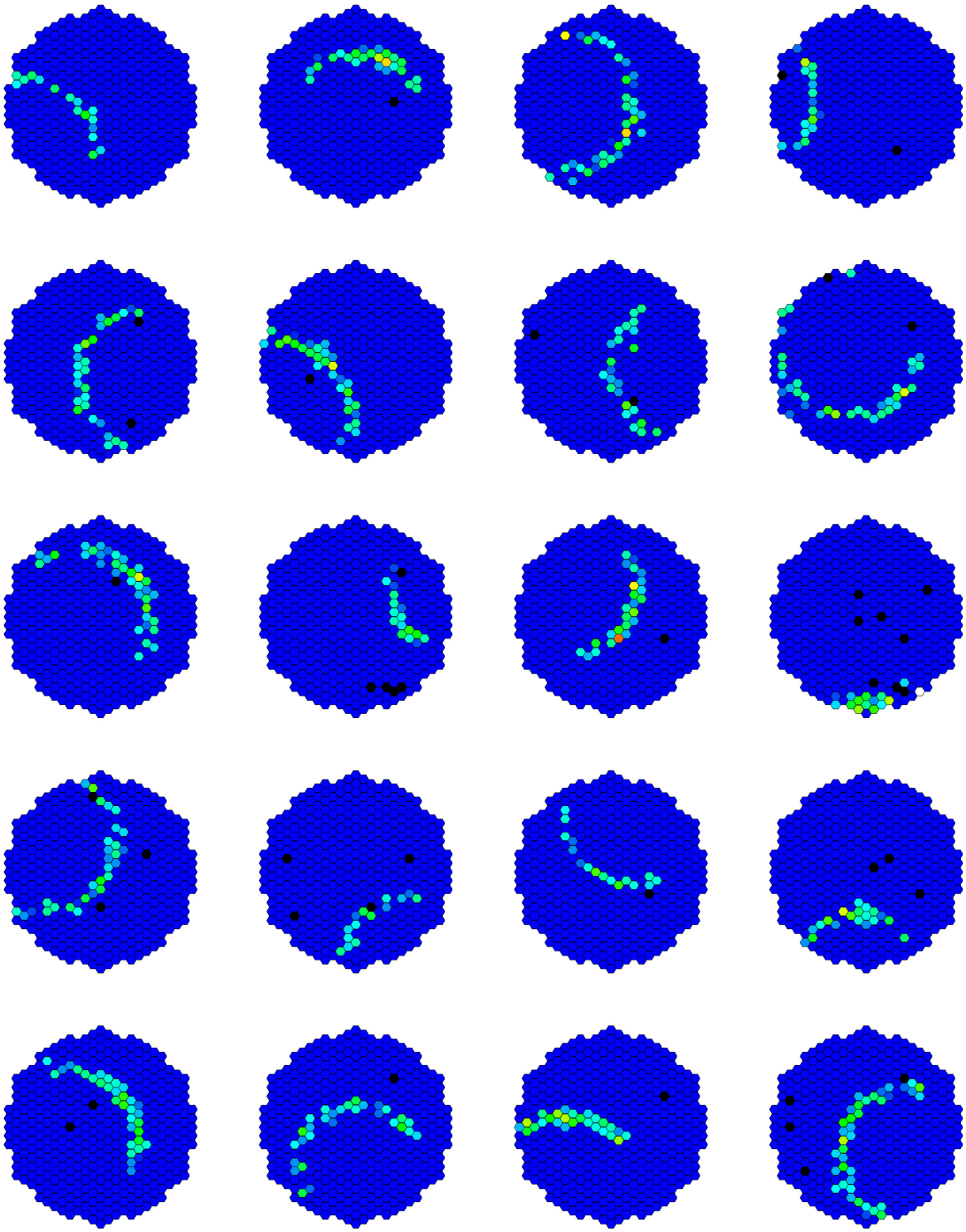

図 4.19: 全てのカットを適用したときのイベントモニター。μ イベントを選びだすために、T2a2 Clustering、Arclength≥2、χ^2 ≤2 カットを行った。

第5章　観測データの解析

CANGAROO-IIIプロジェクトが保有する望遠鏡は４台ある。１号機は他３台とは違うシステムを用いているので、今回の論文からは除外する。他３台の望遠鏡は性能向上やメンテナンス性を考え改良が加えられているが、その点を除けばほぼ同じシステムで構成されている。建設時期は２号機が２００２年１２月、３号機は２００３年６月、４号機は２００４年３月となっている。４号機の建設から半年、２号機からは２年が経つがその間に望遠鏡の持つ性能の変化については今まで考えられて来なかった。この章ではこれらの性能の変化について、そして次の章のシミュレーション結果と合わせ絶対的な性能評価を行うことを目的とし、それに必要なパラメータを導き出していく。

5.1　性能評価パラメータ

望遠鏡の性能を評価するパラメータとして考えられるものは大きく分けて２つある。１つはチェレンコフ光に対する集光効率である。ここで言う効率とは、以下の式で決まる。

$$\text{集光効率} = \text{鏡の初期反射率} \times \text{ライトガイドの初期反射率} \times \text{光電面の初期透過率} \tag{5.1}$$

$$\times \frac{\text{鏡の現在の反射率}}{\text{鏡の初期反射率}} \times \frac{\text{ライトガイドの現在の反射率}}{\text{ライトガイドの初期反射率}} \times \frac{\text{光電面の現在の透過率}}{\text{光電面の初期透過率}} \tag{5.2}$$

式 (5.1) は建設前に取られたデータから求められる。ミューオンイベントを解析することで求められるのは式 (5.2) である。集光効率はカメラで捉えるチェレンコフ光の強さに対応することから、ミューオンリングにおいては単位 Arclength 辺りの光量がそれに対応する。カメラを構成する光電子増倍管が検出した光は、解析を行う前に p.e. へ変換される。これは、光電子増倍管個々においてゲインの違いを吸収するために行われている。また、この値が光電子増倍管一本当りが受け取った光量を表している。この値をイベントを構成する光電子増倍管について足し合わせたものを Size と定義し、イベントの全光量とする。以降は、以下の式で集光効率を評価するパラメータを定義する。

$$Size[\text{p.e.}] = \{\ \text{ミューオンイベントを構成する全光量}\ \} \tag{5.3}$$

$$\{\ \text{集光効率を表すパラメータ}\ \} = \frac{Size[\text{p.e.}]}{Arclength[\text{deg}]} \tag{5.4}$$

このパラメータを求めることで望遠鏡性能の一つを評価していく。

もう１つのパラメータは像の広がりである。このパラメータは望遠鏡の解像度に関わる重要なパラメータであり、ミューオンイベントの動径方向の広がりに現れる。よって、χ^2 分布が像の広がりを表すパラメータになる。

5.2 観測データ

時期	２号機	３号機	４号機
２００２年3月	カメラ取付	—-	—-
２００２年１１月	鏡取付	—-	—-
２００３年1月	観測開始	—-	—-
２００３年6月	↓	鏡	—-
２００３年7月	↓	カメラ取付	—-
２００３年9月	↓	観測開始	—-
２００４年1月	↓	ライトガイドの再接着	—-
２００４年3月	↓	鏡の調整、交換	鏡、カメラ取付、観測開始
２００４年１０月	↓	↓	望遠鏡の再調整
２００４年１１月	↓	↓	↓

表 5.1: 建設時期。

表 5.1 は２号機から４号機の建設時期と観測時期を時系列に並べた表である。

２号機は２００２年３月に建設が行われ、その後調整を行いつつ、２００２年１２月から観測を開始している。２号機は CANGAROO-III プロジェクトが始まって最初に作られた望遠鏡であり、準備期間も長くなっている。３号機、４号機はシステムは２号機のコピーであるので、建設期間も短く済んでいるが、３号機は建設から観測までに時間が空いている。また鏡の再調整やライトガイドの再接着などを行っており、これらをふまえた上で解析を行っていく必要がある。まずは各望遠鏡で観測開始時期の集光効率を比較し、次に、時間が経過した後にどのようにこのパラメータが変化していくのかを見ていく。

5.3 観測初期

この節では観測開始時の各望遠鏡の集光効率について解析していく。２号機については２００３年１月のデータを用いて、３号機は２００３年９月のデータ、４号機は２００４年３月のデータを用いて解析を行った。前章で最適化したカットパラメータを各望遠

カットパラメータ	2号機	3号機	4号機
クラスタリング	T2a2	T2a2	T2a2
Arclength[deg]	2	2	2
χ^2[本^2]	$\leq$2	$\leq$2	$\leq$2
曲率 [deg^{-1}]	$0.55 \leq \frac{1}{R} \leq 0.9$	$0.55 \leq \frac{1}{R} \leq 0.9$	$0.55 \leq \frac{1}{R} \leq 0.9$

表 5.2: 各望遠鏡へ適用したカットパラメータ。

鏡に適用し、更に望遠鏡ごとの最適化を行ったパラメータが表 5.2 になる。このカットを掛けたときにチェレンコフリングの曲率は図 5.1 のように変化する。解析によりどの望遠鏡においてもノイズが落ち、S/N がかなり良くなることが分かる。次に、このカットを行ったときの Size/Arclength の値は、図 5.2 のようにバックグラウンドがほとんどない状態になる。また、観測開始後の一ヶ月間の平均値は表 5.3 となる。この値は前に理論的概算から推測できると示した (3.22) と非常に良い一致を示す。

2号機	3号機	4号機
$71.2[\frac{p.e.}{deg}]$	$69.8[\frac{p.e.}{deg}]$	$78.1[\frac{p.e.}{deg}]$

表 5.3: 表 5.2 を適用した時の各望遠鏡における Size/Arclength の平均値。

2号機と3号機についてはほぼ同じ値が得られていると言える。4号機については他の2台に比べ明らかに高い値を示している。これは4号機が建設直後に観測を開始しているのに対して2号機、3号機が建設後しばらくの期間をおいて観測を開始していることを考慮に入れると妥当であると推測できる。これらのことより、望遠鏡の初期状態は3台とも同じであったと考えられる。

5.4 カットパラメータの変化

さて、観測初期における最適なカットパラメータは求められた。このミューオンイベントの解析が何を目的としていたかというと、望遠鏡のパフォーマンスの経年変化を求めることである。それを考えると、これらの観測初期に定めたカットパラメータが果たして現在の観測データにも使えるのかどうかが問題になる。結論はカットパラメータの値を変える必要はないというものである。それについて説明していく。

まず、クラスタリングであるが、これは連続したイベントを得るための最低限のカットであり、変える必要はない。

Arclength は、カメラの構造に依存しており、2 [deg] 付近にピークを持つことから 2 [deg] に値を決めている。つまり、カメラの構造は時間の経過で変わらないので、このカットを変える必要はない。

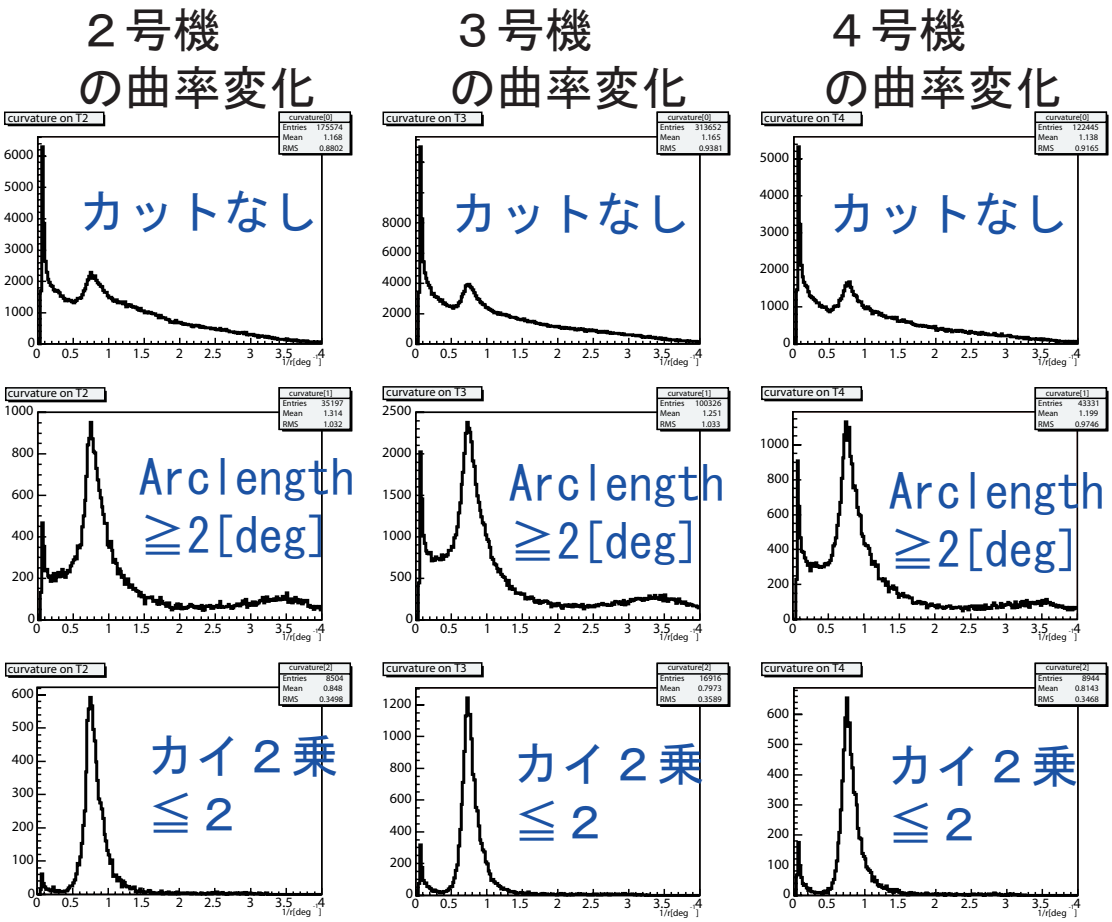

図 5.1: 表 5.2 を適用した各望遠鏡における曲率分布の変化。横軸は曲率 [deg^{-1}]、縦軸は count である。左列から 2 号機、3 号機、4 号機である。上段から T2a Clustering、Arclength≥2、χ^2 ≤2 のカットを掛けた。

χ^2 はチェレンコフ光の強さやスポットサイズの変化、スレッショールドに依存する。しかし、この値がピクセルにして 2 本以下であるというカットは十分に小さいカットである。このことから、年月が経つにつれ像に広がりがでた場合、ミューオンイベントとして判定されないイベントが増えると推測される。しかし、選ばれたイベントについての Size/Arclength は変わらないので、このカットを変える必要はない。

5.5 経年変化

次に、Size/Arclength の経年変化について見ていく。カット条件として観測初期の値を用い、全 Run の Size/Arclength を見た図が図 5.3 である。この図は横軸に２００２年からの年月を取り、縦軸に Size/Arclength を取っている。Size/Arclength は観測期間ごとに

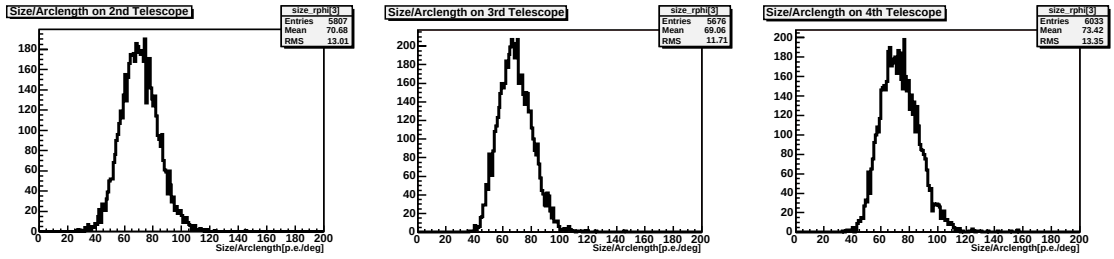

図 5.2: 各望遠鏡の Size/Arclength 分布。横軸は Size/Arclength[p.e./deg]、縦軸は count である。左から、２号機、３号機、４号機の Size/Arclength 分布である。

平均を取ったものをプロットしてある。観測期間とは、新月を挟んで半月から半月までの約１４日間であり、CANGAROO-III 望遠鏡において観測が行われる期間のことである。

図を見てわかるように、観測開始直後の Size/Arclength は高く望遠鏡の効率が高いことがわかる。特に、観測の始まった月についてはどの望遠鏡でも次の月と比べかなり効率が高いと言える。また、どの望遠鏡も月日が経つにつれ次第に効率が落ちていることが見て取れる。

このように CANGAROO-III 望遠鏡には経年変化があり、今後はこのことを考慮に入れた解析を行う必要がある。

5.6 SpotSize Analysis

次に、望遠鏡の像のサイズに関係するスポットサイズについて議論する。スポットサイズとは、望遠鏡で光を集光したときの像の広がりである。ミューオンリングにおいては、この効果は動径方向の広がりに現れる。また、像の広がりは２章で箇条書きにしたように、望遠鏡の収差、粒子の散乱、大気屈折率の高度による違い、鏡の曲率のずれ等によっている。ミューオンリングの場合、そのチェレンコフ光の発生高度が数百 m と低いことから、大気屈折率の高度差による放射角の違いは１分以下になり、無視できる範囲である。ミューオン粒子が大気により散乱され、進行方向を曲げられることによる広がりは、Moliere 散乱でありシミュレーションにより物理的に考えることが可能である。そして、その分布はガウス分布で近似できる。

今までに行ってきた解析の中で、ミューオンリングの広がりを表すパラメータは χ^2 である。しかし、このパラメータはカットに使われており、そのまま使うわけにはいかない。そこで、各望遠鏡についてミューオンイベントに関する Size/Arclength パラメータの分布が分かっているので、この値をカットパラメータとし χ^2 を見ることにした。ミューオンリングの動径方向の広がりはバックグラウンドの影響を受けやすいので、この解析で用いるデータは２００４年５月に取られた曇天のデータである。

各望遠鏡について Size/Arclength カットの値は、図 5.4 の図から判断して、表 5.4 を用いた。

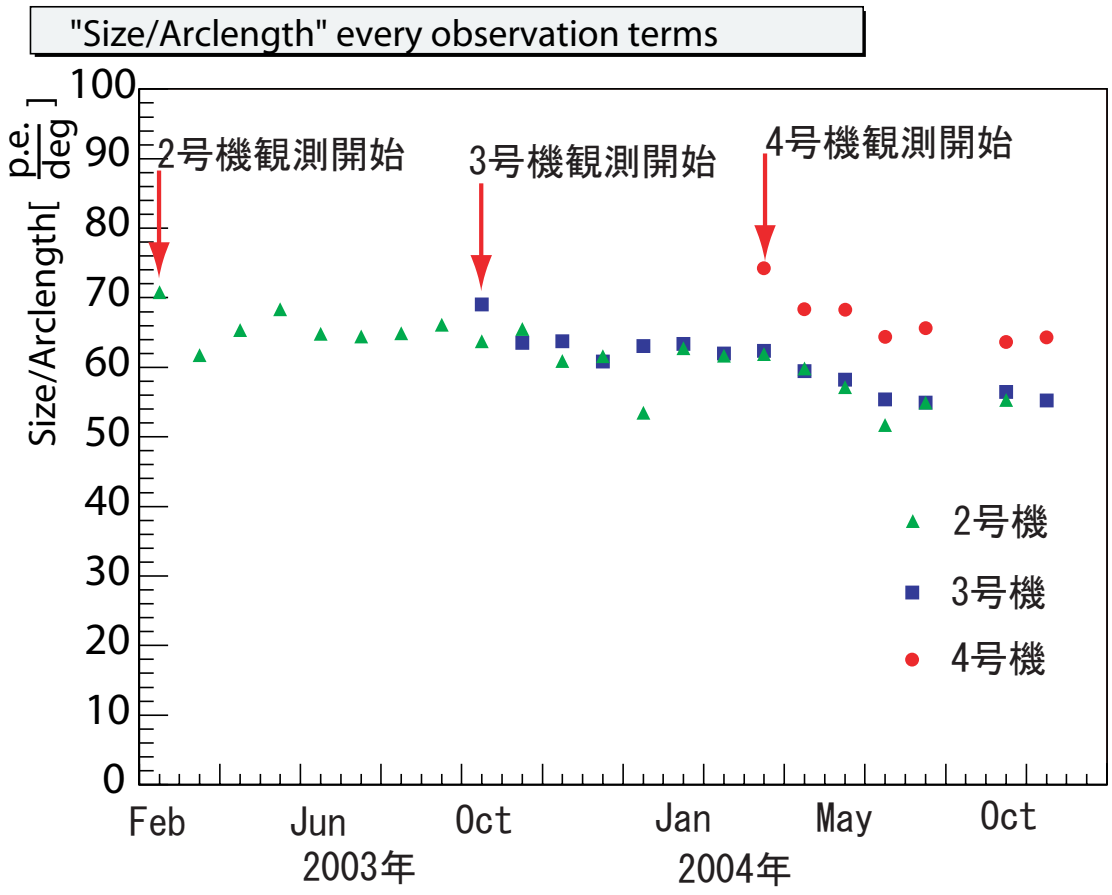

図 5.3: Size/Arclength の経年変化。横軸は年月、縦軸は Size/Arclength[p.e./deg] である。

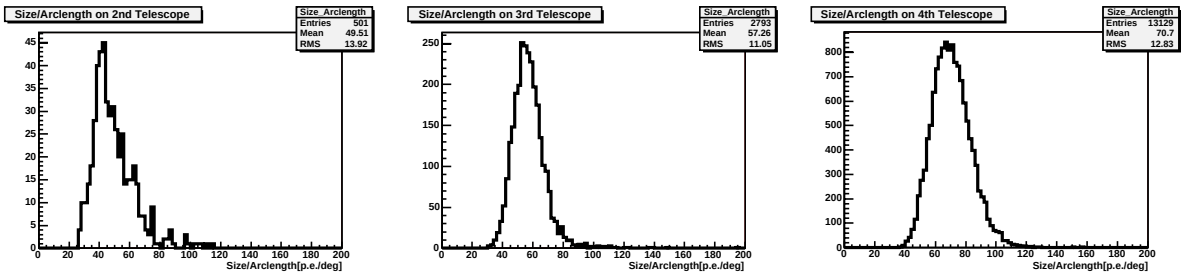

図 5.4: 各望遠鏡の Size/Arclength 分布。横軸は Size/Arclength[p.e./deg]、縦軸は count である。曇天の日のデータを解析したもので、T2a2 Clustering、Arclength≥2、χ^2 ≤2 カットを適用してある。左から 2 号機、3 号機、4 号機の図である。

2号機	3号機	4号機
$30 \leq \frac{Size}{Arclength}[\frac{p.e.}{deg}] \leq 70$	$40 \leq \frac{Size}{Arclength}[\frac{p.e.}{deg}] \leq 70$	$50 \leq \frac{Size}{Arclength}[\frac{p.e.}{deg}] \leq 90$

表 5.4: 各望遠鏡における Size/Arclength カットの値。

これに基づいて Arclength、Size/Arclength、曲率にカットをかけた時の χ^2 分布は図 5.5 になる。この図から、望遠鏡間の像の広がりが推定でき、２００４年５月時点ではその

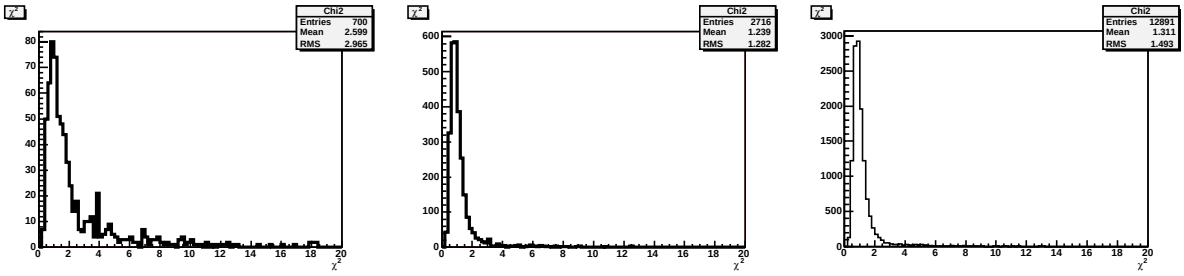

図 5.5: 各望遠鏡の χ^2 分布。横軸は χ^2[pixel^2]、縦軸は count である。T2a2 Clustering、Arclength≥2、表 5.4 による Size/Arclength カットを適用した。左から２号機、３号機、４号機の図である。

関係は『３号機 $\leq$ ４号機 $\leq$ ２号機』になる。

像の広がりを表すスポットサイズを実際に解析データから求めるのは難しいことである。そこで、この値はシミュレーションパラメータを調整することに今後使っていくことになるだろう。

第6章　Simulation

大気チェレンコフ望遠鏡の性質上、データの解析にはモンテカルロシミュレーションが使われる。現在使われているモンテカルロシミュレーションは各パラメータが実験開始時の値に設定されている。これは経年変化などを再現していない。そこで、ミューオンイベントを再現するように各種パラメータの調整を行った。この章ではCANGAROO-IIIで使われているモンテカルロシミュレーションについて、またパラメータの調整について説明する。

6.1　モンテカルロシミュレーション

大気チェレンコフ望遠鏡の解析では、捉えたチェレンコフ光から空気シャワーを起こした粒子を再構成するために、モンテカルロシミュレーションを使うのが一般的である。CANGAROO-IIIプロジェクトにおいても再構成にはモンテカルロシミュレーションが用いられている。その流れは、入射粒子のエネルギーを仮定して粒子を降せる。次に、望遠鏡で捉えたチェレンコフ光のパラメータを観測値と比較し、一致するエネルギーを探すというものである。このことから、大気チェレンコフ望遠鏡ではモンテカルロシミュレーションが正しいことが非常に重要である。モンテカルロシミュレーションの較正には、今までは Crab Pulsar の γ 線 Flux や宇宙線の Flux が用いられてきた。これはシミュレーション結果と Crab Pulsar の観測結果を比較し、シミュレーションが観測を再現するように調整されていた。この論文では、この較正に加えミューオンイベントを用いた解析をする。そして、正しくミューオンイベントを再現するようにシミュレーションを調整することで、より正しいシミュレーションにすることを目的としている。実際には入射粒子として陽子を用い、シミュレーションと観測でミューオンイベントのパラメータが一致するように調整を行った。

6.2　シミュレーションの構成

現在、CANGAROO-IIIプロジェクトで用いられているシミュレーションプロセスは、入射粒子の生成を行う部分、空気シャワーを構成する部分、チェレンコフ光を発生し望遠鏡を構成する部分、カメラ、エレクトロニクスを構成する部分の４部に別れている。そ

の流れは図 6.1 の通りである。それぞれのプロセスで行われることは次のようになる。

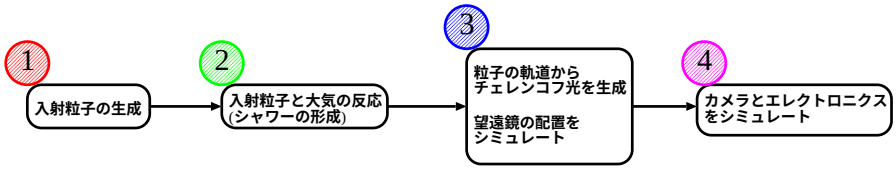

図 6.1: シミュレーションプロセス。

1. 入射粒子を生成するプロセスである。

   このプロセスは、５０ km 上空から粒子を地上に向けて打ち込む部分である。粒子としては geant3 で定義されている粒子を用いることが可能で、現在使われているのは γ 線と陽子である。また、粒子のエネルギーについても計算を行い、巾の曲線に沿ったエネルギー分布を持つ粒子を生成することが可能である。
   私はこの部分の改良を行い、数 km 上空からミューオン粒子を入射させることを可能にしている。エネルギーフラックスは BESS 実験により測定されたデータを用いている。実際には、BESS 実験で求められたミューオンフラックスのデータ点から PDF 分布を作り、そのデータを再現するように計算を行っている。

2. 1で生成された粒子が大気と反応し、空気シャワーを起こす過程をシミュレートする部分

   geant3 を用い、電磁相互作用やハドロン相互作用等のシミュレーションを行い、空気シャワーを作り出す。大気は高度により８０の層に別れており、区切り方は Atmospheric depth が均等になるように分けられている。

3. 2で生成された空気シャワーを構成する粒子の軌跡をもとに、チェレンコフ光を発生させ、望遠鏡の幾何学構造に関するシミュレートを行う

   2で作られた粒子が描く軌跡の終端において、その高度から屈折率を計算する。その屈折率と軌跡の長さからチェレンコフ光の発生量と放射角度を計算し、軌跡の終点からチェレンコフ光を放射する。そして、シミュレーション中に配置された望遠鏡でこの光を捉え、焦点面へ収束させている。
   チェレンコフ光の伝搬過程で考慮に入れられている効果は、Rayleigh 散乱のみであり、Mie 散乱については効果は微少であるとして考慮されていない。

4. 3で発生し、焦点面に収束されたチェレンコフ光をもとに、カメラとエレクトロニクスのシミュレーションを行い、観測データへ変換する

> カメラの幾何学的構造とライトガイドの構造をシミュレーションに入れることで、カメラの視野をシミュレートしている。また、望遠鏡全体の効率やスポットサイズ等のパラメータを含めるように改良することでシミュレーションの微調整を行う部分でもある。エレクトロニクスノイズや夜光の生成もこの部分で行われている。

6.3 シミュレーションパラメータ

ミューオンイベントについて考察する場合、入射粒子としては陽子を用いる。これは大気中のミューオンが主に陽子のハドロン相互作用で作られたパイオンの崩壊により発生したものだからである。陽子のエネルギーは 400GeV から 20TeV の範囲で降せており、エネルギースペクトラムの巾は-2.7 乗を用いている。各高度における屈折率は Hillas の論文 [1] より

$$n = 1.0 + 0.000296 \left(\frac{x}{1030\mathrm{g} \cdot \mathrm{m}^{-2}} \right) \left(\frac{T}{273.2\mathrm{K}} \right)^{-1} \tag{6.1}$$

$$x = \text{Atmospheric depth} \tag{6.2}$$

$$T = \text{温度} \tag{6.3}$$

式 (6.1) を採用し、大気モデルは US Standard Atmosphere 1976 を用いている。鏡の反射率は建設前に納入業者により計られた値が使われており、およそ８５%である。また、鏡の収束度を表すスポットサイズは建設時や調整時に計られた値を用いており、２号機で 0.10[deg]、３号機で 0.076[deg]、４号機で 0.081[deg] となっている。光電子増倍管の量子効率も製造者により測定されたものを使い、ピーク値で２５%である。現在、これらのパラメータを初期値とし、全体的な効率は１００%であるとしてシミュレーションを行っている。しかし、先の解析で示したように経年変化を考えるとこの効率は修正されるべきである。

6.4 ミューオンパラメータの分布

この節では現在のシミュレーションを用いたときのミューオンパラメータの分布を見ていく。陽子を 10000000 個降せたときの曲率分布は図 6.2 のようになる。観測データと同様に 0.7[deg^{-1}] 付近にピークを持つことが分かる。更に、曲率 vs Arclength 分布、曲率 vs χ^2 分布、曲率 vs Size/Arclength 分布は図 6.3 となっている。それぞれ観測データの

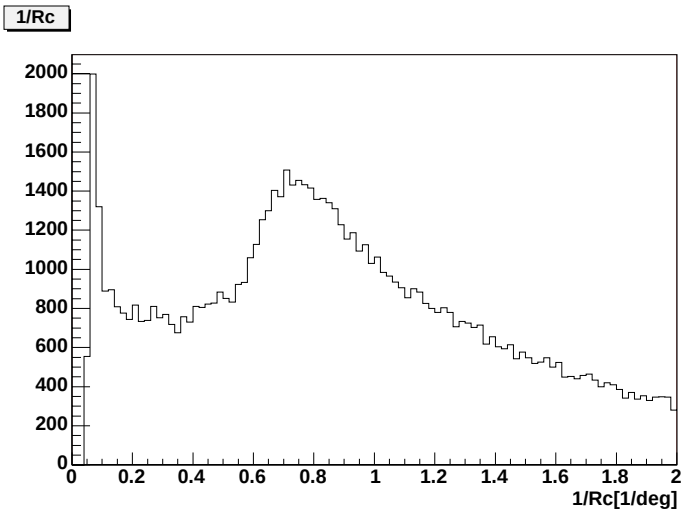

図 6.2: シミュレーションにおける曲率分布。横軸は曲率 [deg^{-1}]、縦軸は count である。T2a2 Clustering カットのみ適用した。

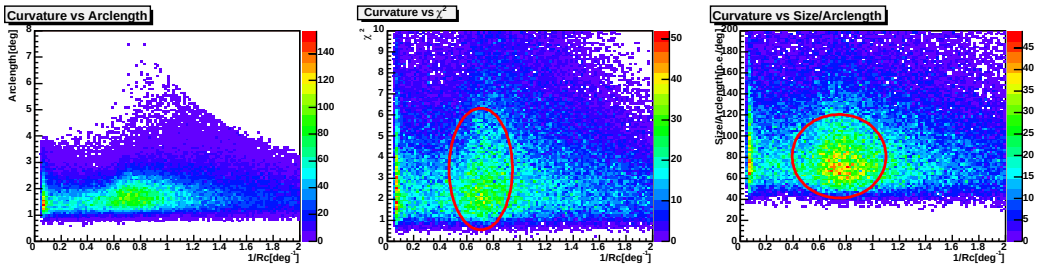

図 6.3: シミュレーションにおける 2 次元分布。左から「曲率 vs Arclength 分布」「曲率 vs χ^2 分布」「曲率 vs Size/Arclength 分布」を表しており、T2a2 Clustering カットのみ適用した。

場合と比較すると、曲率 vs Size/Arclength 分布が大きく異っている。実際に、これらのデータを元に表 6.1 のようにカットパラメータを決め、観測データ同様に解析を行った。その結果、Size/Arclength は図 6.4 のようになり、2 つのピークを持つことが分かる。これは明らかに観測と異っている。そこで、まずはこのパラメータを観測と合わせるようにシミュレーションを修正することにした。

6.5 ミューオンの分布

Size/Arclength の修正を行う前に、シミュレーションの利点を生かしてミューオン起源のイベントのみを選び出す。そして、ミューオンイベントが Size/Arclength や他のパラ

クラスタリング	Arclength[deg]	χ^2[pixel]	曲率 [deg^{-1}]
T2a2	$\geq$2	$\leq$2	$0.55 \leq \frac{1}{R} \leq 1.0$

表 6.1: シミュレーションデータへ適用するカットパラメータ。

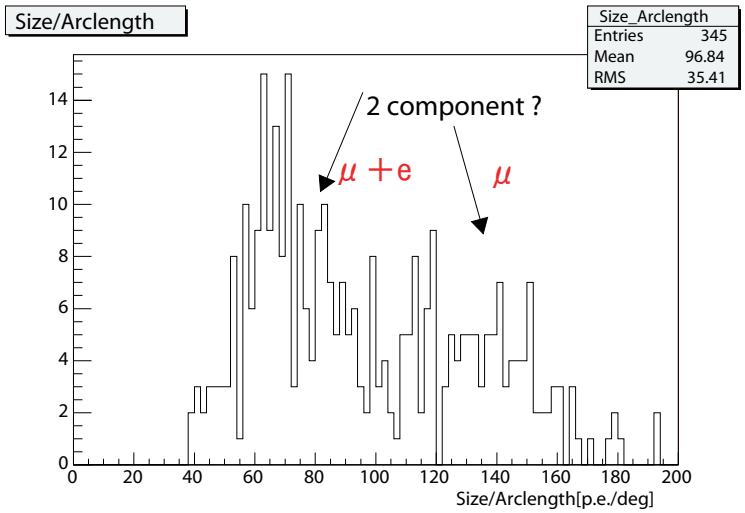

図 6.4: シミュレーションにおける Size/Arclength 分布。横軸は Size/Arclength[p.e./deg]、縦軸は count である。表 6.1 のカットを適用した。

メータのどこにピークを持つのか探すことにする。

クラスタリング	鳴った PMT 本数	TDC 分布 [ns]
T2a2	$\geq$10	-20$\leq$TDC$\leq$20

表 6.2: チェレンコフ光を発生した粒子を特定するために適用される最低限のカット。

まず、表 6.2 のようにイベントを選び出す最低限のカットをシミュレーション結果に適用する。その時、チェレンコフ光を発生した粒子分布は図 6.5 のようになる。これを見るとほとんどが電子によるチェレンコフ光であることが分かる。

今度はイベントを構成する粒子の比率を見る。イベントに占める電子 (陽電子) の割合を表す図は図 6.6 に、ミューオンの比率は図 6.7 に、それ以外の粒子による割合は図 6.8 のようになる。この結果から、ミューオンの割合が 8 割以上のイベントを選び出し、その時、各パラメータがどこにピークを持つのか調べることにする。

ミューオンの割合が 8 割以上となるイベントのみを選び出した時、その曲率分布と 2 次元分布は、図 6.9、図 6.10、図 6.11、図 6.12 のようになる。それぞれの分布からミューオンイベントは広く散らばっていることが分かる。しかし、$\chi^2 \leq 2$、$0.55 \geq \frac{1}{R}[\mathrm{deg}] \leq 1.0$ の部分にミューオンイベントが集中していることも分かる。よって、これらのカットは

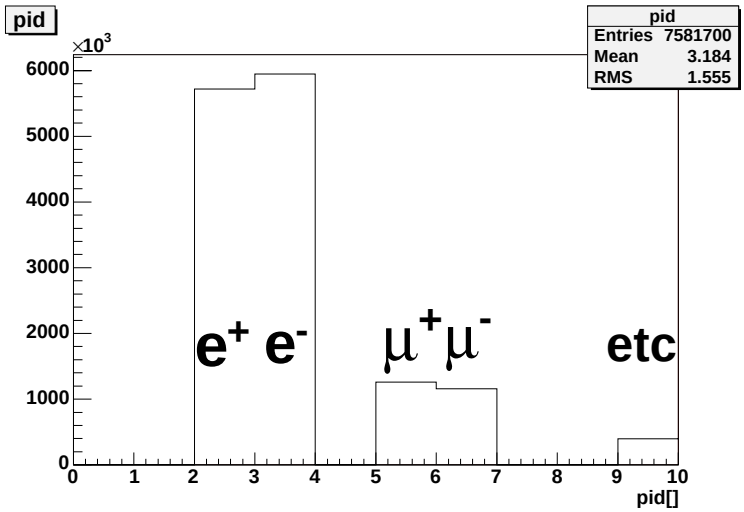

図 6.5: チェレンコフ光を作り出した粒子分布。横軸は geant3.21 の particle id、縦軸は発生チェレンコフ光子数である。表 6.2 のカットを適用した。

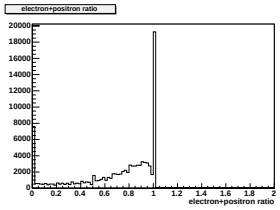

図 6.6: 電子 (陽電子) の割合。表 6.2 のカットを適用した。

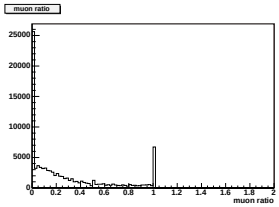

図 6.7: ミューオンの割合。表 6.2 のカットを適用した。

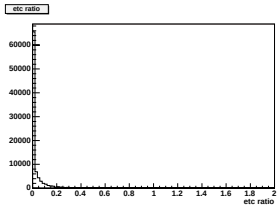

図 6.8: その他の粒子の割合。表 6.2 のカットを適用した。

ミューオンイベントを選びだすのに適切である。

実際に Arclength のカット、χ^2 のカット、曲率のカットを掛けたときの粒子分布を見ると、図 6.13、図 6.14、図 6.15 のようになる。これらの図より、ミューオンの比率が高くなり、S/N が良くなっていることが分かる。しかし、まだ多くの電子 (陽電子) も含まれている。この時の Size/Arclength 分布は、図 6.4 のように 2 山の構造をしている。ここで電子 (陽電子) の方がミューオンよりも質量が軽く多重散乱の効果が大きいことを考えると、Size/Arclength の小さい方が電子 (陽電子) イベントではないかと推測できる。この仮定に基づき Size/Arclength[p.e./deg]$=100$ でカットを入れて粒子の比率を見る。すると図 6.16、図 6.17 のようになり、推測通り Size/Arclength が大きい方がミューオンイベントであることが分かる。

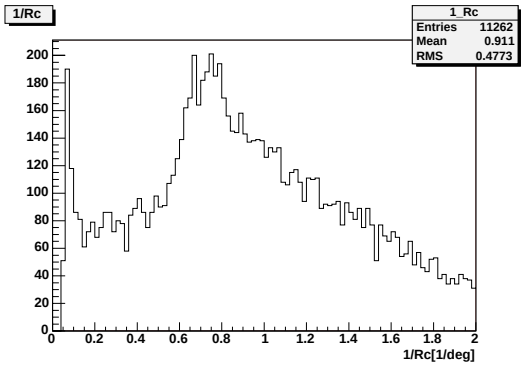

図 6.9: 曲率分布 (集光率 70%)。T2a2 Clustering かつミューオンから生成されたチェレンコフ光が 80%以上を占める場合を選びだした。

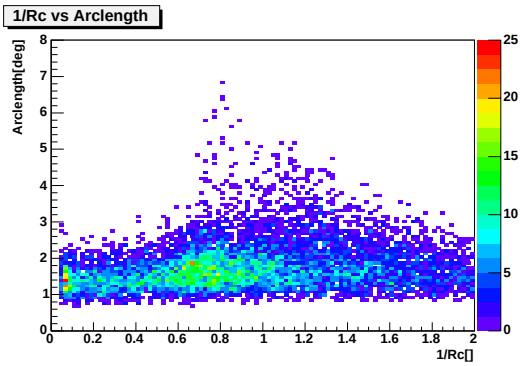

図 6.10: 曲率 vs Arclength(集光率 70%)。T2a2 Clustering かつミューオンから生成されたチェレンコフ光が 80%以上を占める場合を選びだした。

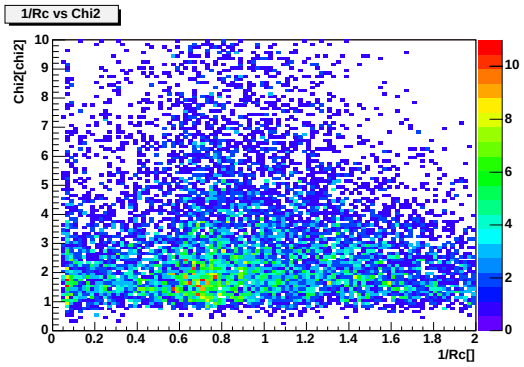

図 6.11: 曲率 vs χ^2(集光率 70%)。T2a2 Clustering かつミューオンから生成されたチェレンコフ光が 80%以上を占める場合を選びだした。

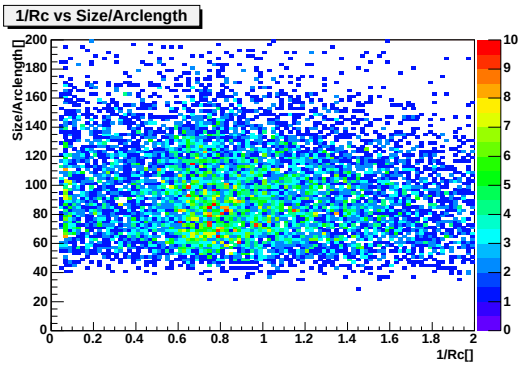

図 6.12: 曲率 vs Size/Arclength。T2a2 Clustering かつミューオンから生成されたチェレンコフ光が 80%以上を占める場合を選びだした。

6.6 Size/Arclength の修正

前節より Size/Arclength の値が観測データと比べてシミュレーションデータでは高いことが分かる。Size/Arclength の値は望遠鏡の集光効率を表しているので、シミュレーションは観測よりも効率を高めに見積もっている。このことから、集光効率を下げてシミュレーションを観測と合わせる必要がある。まずは、建設開始直後から観測を開始した４号機にシミュレーションを合わせるために、効率を７０％まで下げた。すると、図 6.18 のようになり、Size/Arclength が観測値に近づくことがわかる。しかし、まだ観測値よりも高く合っていない。そこでどこまで効率を下げれば観測値と等しくなるか確かめたところ、その値はおよそ５０％であった。

しかし、シミュレーションの効率が観測にくらべ５０％も高くなっているとはにわか

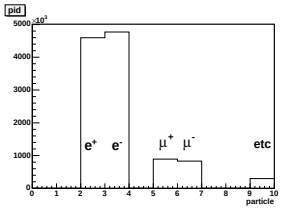

図 6.13: Arclength カットを掛けた時の粒子分布 。T2a2 Clustering、Arclength≥2 のカットを適用した。

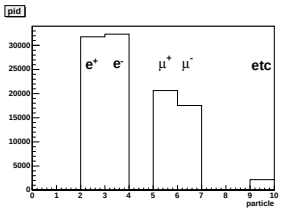

図 6.14: χ^2 カットを掛けた時の粒子分布。T2a2 Clustering、Arclength≥2、χ^2 ≤2 のカットを適用した。

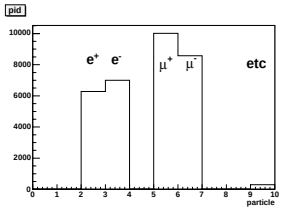

図 6.15: 曲率カットを掛けた時の粒子分布。T2a2 Clustering、Arclength≥2、χ^2 ≤2、0.55≤ $\frac{1}{r}$ ≤0.9 のカットを適用した。

には信じ難い。そこで、シミュレーションに不確定な要素が潜んでいることが考えられるので、シミュレーションコードの見直しを行うことにした。

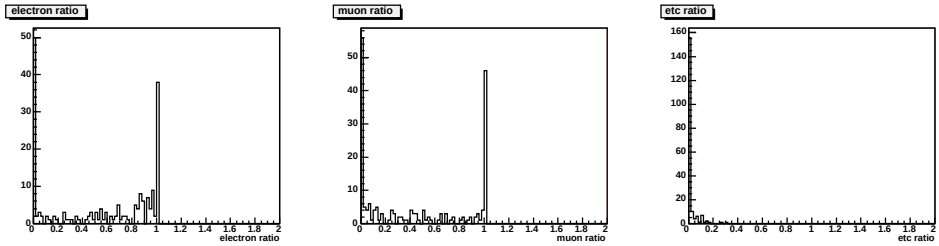

図 6.16: 電子の割合、ミューオンの割合、他の粒子の割合 (Size/Arclength $\leq$ 100)。表 6.2 のカットを適用した。

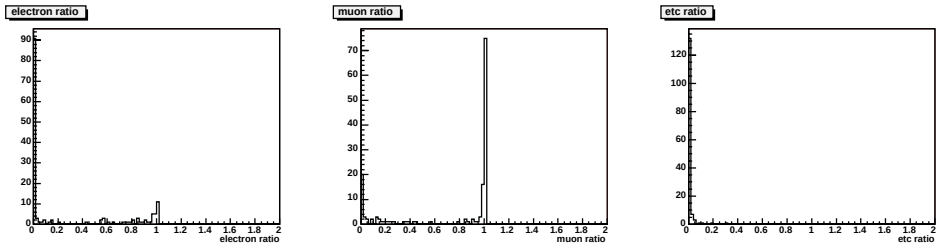

図 6.17: 電子の割合、ミューオンの割合、他の粒子の割合 (Size/Arclength $\geq$ 100)。表 6.2 のカットを適用した。

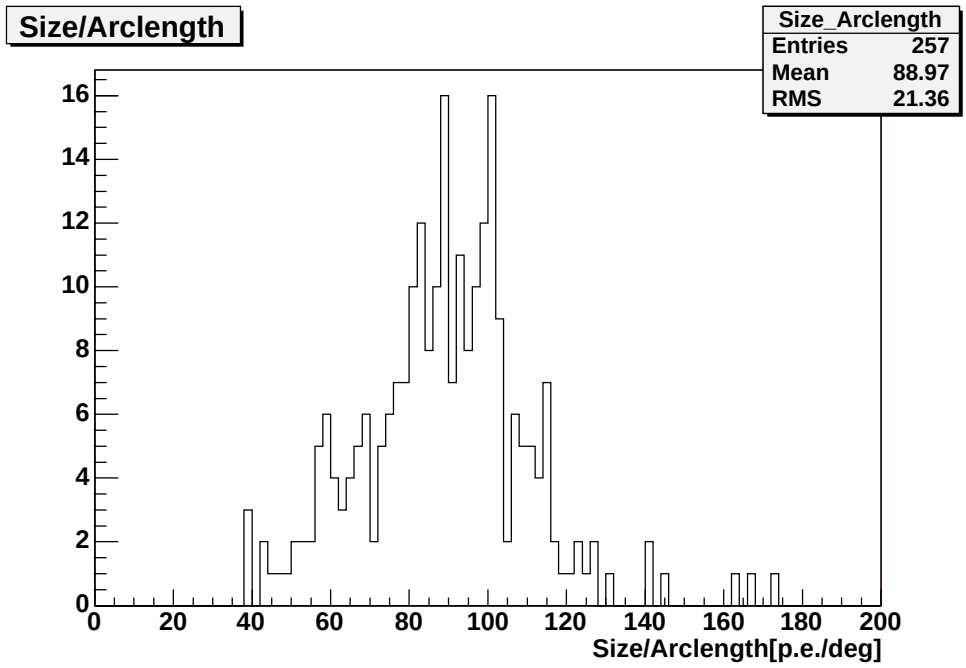

図 6.18: 反射率 70 % の時の Size/Arclength 分布。横軸は Size/Arclength[p.e./deg]、縦軸は count である。表 6.2 のカットを適用した。

第7章　シミュレーションの改良

前章でシミュレーションと観測結果に違いがあることが分かった。この違いは大きく、効率の変化のみで説明することは不可能である。そこで、シミュレーションコードを見直すことにした。前章までに分かった観測結果とシミュレーションとの違いについて次にまとめておく。

1. Size/Arclengthが異なる。特に、シミュレーション結果は２成分あるように見える。シミュレーション結果と観測値を合わせるには望遠鏡全体の効率を５０％まで下げなければならず、信じがたい。

2. シミュレーションにおいて各パラメータの二次元分布 (図 6.18) を見ると、Arclength vs Size 分布において分布が複数成分に別れている。これは、３章で導出した Arclength vs Size は直線状になるという推測と異なる。

7.1　チェレンコフ光の発生高度

シミュレーションである利点を生かし、チェレンコフ光の発生高度の分布を取ることにした。この時、状況を分かりやすくするために入射粒子としては 10GeV のミューオンを用いている。横軸に発生高度を縦軸に発生量を取った図が図 7.1 になる。これを見て分かるように連続分布をしていない。これは、シミュレーションで大気層を Atmospheric depth が均等になるように８０層に分けて計算を行い、粒子の軌跡の終点からまとめてチェレンコフ光を生成しているからである。空気シャワー等、多粒子から生成されるチェレンコフ光から作られるイメージの場合、この方法を用いてもチェレンコフ光を連続的に生成した場合と違いはない。しかし、ミューオンイベントのように単一の粒子から生成されるようなイベントの場合、この離散的な分布は問題となってしまう。

前章で示した Arclength vs Size 分布を再度示すが、ここには３つの構造が見て取れる。これはちょうど発生高度に対応していると思われる。図 7.1 からチェレンコフ光の発生高度は３個所存在していることが分かる。これがそのまま Arclength vs Size 分布の成分に対応している。

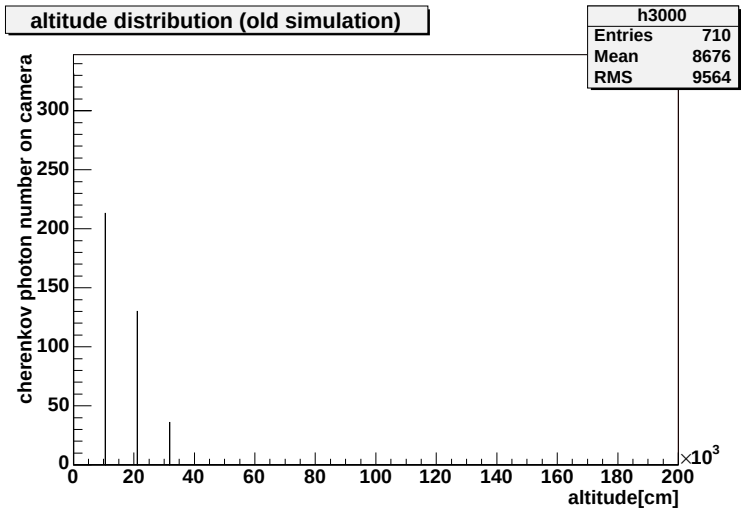

図 7.1: 入射粒子に μ 粒子を用い、現在のモンテカルロシミュレーションにおける、高度に対するチェレンコフ光の発生量。横軸は高度 [cm]、縦軸はカメラ面に集光された発生チェレンコフ光子数である。

7.2 シミュレーションの改良

前節のように、現在の CANGAROO-III プロジェクトが用いているシミュレーションは、チェレンコフ光の発生高度が離散的になっており、ミューオンイベントを再現することができない。そこで、チェレンコフ光を粒子の軌跡に沿って連続的に発生させ、Arclength vs Size 分布が連続的に変化するようにプログラムの改良を行った。その時の、高度とチェレンコフ光の発生量との関係は、図 7.2 になる。このようにチェレンコフ光を粒子の軌跡に沿って連続分布させることで、Arclength vs Size 分布は、図 7.3 になる。カットは Arclength 以外は前章までに説明のあった標準のカットを掛けている。この図は、3 章で説明した Arclength vs Size 分布が直線状になるという事実に合っている。また、観測の傾向とも合っている。このことから、シミュレーションと観測で傾向が合わなかった理由は、シミュレーションにおいてチェレンコフ光の発生が離散的に行われていたことにある。以後、この新しいシミュレーションを用いることで、観測との比較を行っていくことにする。

比較を行う前に、入射粒子を陽子とした場合のチェレンコフ発生量と高度との関係も見ておくことにする。それは、図 7.4 のような分布をしている。このように、高度 10km 辺りから数百 m でまで広い範囲で発生したチェレンコフ光を CANGAROO-III 望遠鏡では捉えていることが分かる。

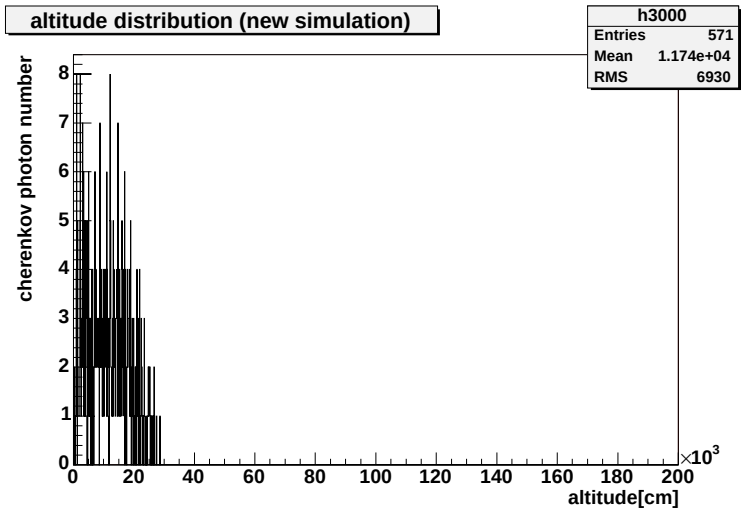

図 7.2: 入射粒子に μ 粒子を用い、改良したモンテカルロシミュレーションを用いた時の、高度に対するチェレンコフ光の発生量。横軸は高度 [cm]、縦軸はカメラ面に集光された発生チェレンコフ光子数である。

7.3 改良版シミュレーションによるミューオンイベントの分布

改良されたプログラムを用いて生成したシミュレーションデータの解析を行っていく。入射粒子としては陽子を用い、高度５０ km から角度分布が一様になるように降らせた。最低限のカットを掛けたときの曲率分布が図 7.5 である。２次元分布は、図 7.6 となっている。これらの図から分かるように、ほぼ推測される位置にミューオンイベントが集中するようになった。図においては赤丸で囲った部分がミューオンイベントが存在すると推測する部分である。

次に、表 7.1 のカットパラメータを用いてカットを行ったときの Size/Arclength は、図

クラスタリング	Arclength[deg]	χ^2[本 ^{2}]	曲率 [deg^{-1}]
T2a2	$\geq$2	$\leq$2	$0.55 \leq \frac{1}{R} \leq 1.0$

表 7.1: 改良したシミュレーションへ適用したカットパラメータ。

7.7 となっている。

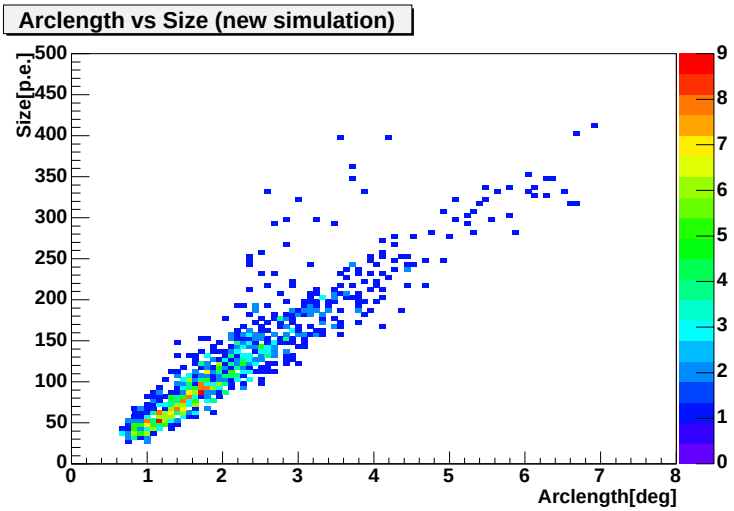

図 7.3: 改良したモンテカルロシミュレーションによる「Arclength vs Size 分布」。横軸は Arclength[deg]、縦軸は Size[p.e.] である。T2a2 Clustering、χ^2 ≤2 のカットを適用した。

7.4 観測とシミュレーションの比較

改良を行ったシミュレーションを用いた結果と、6 章までに行った観測データの解析結果との比較をここで行う。まず、シミュレーション結果であるが図 7.7 より、Size/Arclength の値は 58.7 である。この値を 2 号機、3 号機、4 号機の観測開始時期の Size/Arclength と比較すると明らかに低くなっていることが分かる。表 7.2 にこの値を列挙しておく。

シミュレーション	2 号機	3 号機	4 号機
$58.7[\frac{p.e.}{deg}]$	$71.2[\frac{p.e.}{deg}]$	$69.8[\frac{p.e.}{deg}]$	$78.1[\frac{p.e.}{deg}]$

表 7.2: シミュレーションと各望遠鏡の観測開始時期における Size/Arclength 値。表 5.2 と表 7.1 のカットを適用した。

Size/Arclength はそのまま望遠鏡の効率を表すパラメータであるので、このままでは、シミュレーションは観測開始時期においても 4 号機に対して７５%の性能しか出ていないことになってしまい、シミュレーションが間違っているであろうと推測される。

このことから、解析の現状としては絶対値の推測をすることはできなかった。しかし、4 号機の２００４年３月データを基準として月ごと、望遠鏡ごとの相対的な値については信じることができる。この効果は反射率などチェレンコフ光の検出効率を調整することでシミュレーションに導入することができ、この効率を７０%にすることで Size/Arclength も７０%にすることができる。

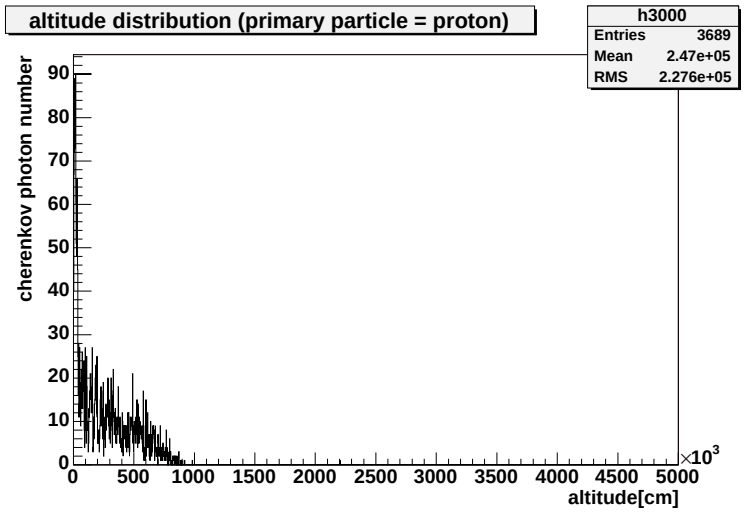

図 7.4: 入射粒子として陽子を用い、改良したモンテカルロシミュレーションを用いた時の、高度に対するチェレンコフ光の発生量。横軸は高度 [cm]、縦軸はチェレンコフ光の発生光量である。

そこで今後シミュレーションへ効率の変化として入力可能なように４号機の２００４年３月データを１００％とした時の値を表 7.3 へまとめておく。

ただし、この章で議論されている発生高度の問題は、対象粒子がミューオンであり低い高度で放射されるチェレンコフ光を問題にしているから問題になることである。γ 線イベントは約１０ km 上空の粒子数が最大になるので、チェレンコフ光の発生高度に関する影響はないであろう。

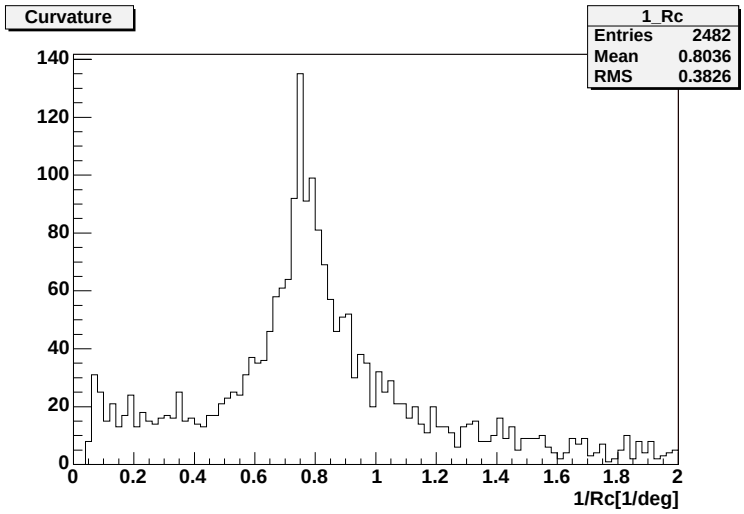

図 7.5: 改良したシミュレーションの曲率分布。横軸は曲率 [deg^{-1}]、縦軸は count である。T2a2 Clustering、Arclength≥2、χ^2 ≤2 のカットを適用した。

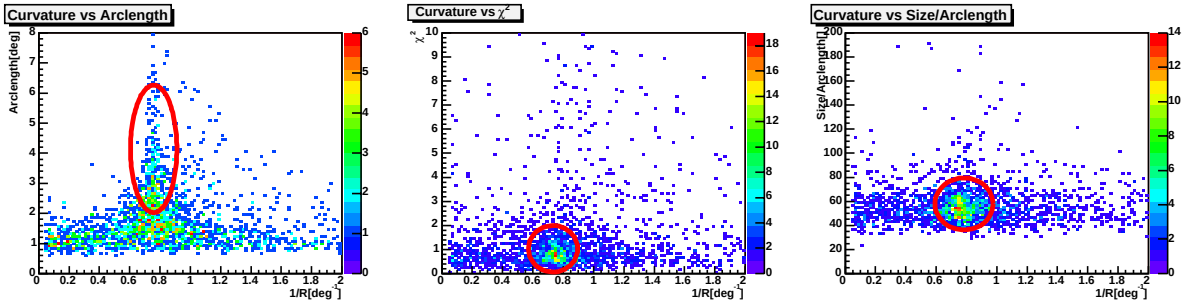

図 7.6: シミュレーションにおける 2 次元分布。左図から「曲率 vs Arclength」「曲率 vs χ^2」「曲率 vs Size/Arclength」を表している。T2a2 Clustering カットを適用した。

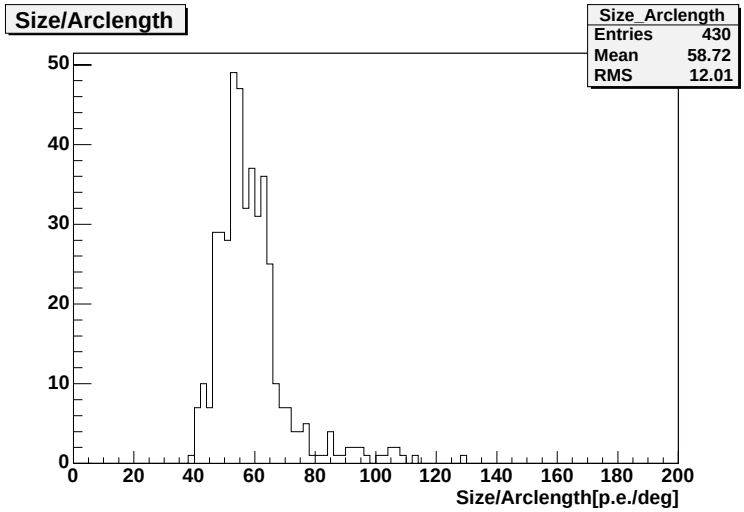

図 7.7: 改良したシミュレーションの Size/Arclength。横軸は Size/Arclength[p.e./deg]、縦軸は count である。表 7.1 のカットを適用した。

年月	２号機	３号機	４号機
２００３年２月	95.3%	—-	—-
２００３年３月	83.2%	—-	—-
２００３年４月	88.0%	—-	—-
２００３年５月	92.0%	—-	—-
２００３年６月	87.3%	—-	—-
２００３年７月	86.7%	—-	—-
２００３年８月	87.3%	—-	—-
２００３年９月	89.0%	—-	—-
２００３年１０月	85.9%	92.9%	—-
２００３年１１月	88.2%	85.5%	—-
２００３年１２月	82.0%	85.8%	—-
２００３年１２月	82.9%	81.9%	—-
２００４年１月	71.9%	84.9%	—-
２００４年２月	84.5%	85.3%	—-
２００４年３月	83.0%	83.4%	100%
２００４年４月	83.2%	83.9%	98.2%
２００４年５月	80.5%	80.1%	90.4%
２００４年６月	76.9%	78.4%	90.3%
２００４年７月	69.6%	74.5%	85.1%
２００４年８月	73.9%	73.9%	86.9%
２００４年９月	—-	—-	—-
２００４年１０月	74.4%	76.0%	84.2%
２００４年１１月	—-	74.4%	85.0%

表 7.3: 望遠鏡の効率の経年変化。４号機の２００４年３月における Size/Arclength 値を 100%とし各月の相対値を示してある。カットは、表 5.2 のカットを適用した。

第8章　Discussion

8.1　結論と今後について

これまでに説明してきたように、私はCANGAROO-III望遠鏡により観測されたデータの中から、クリーンなミューオンイベントのみを選び出す解析方法を開発した。曲率分布から分かるようにそのS/N比において私の解析はノイズがほとんど残らない。これにより、ミューオンイベントのパラメータを解析することで望遠鏡の相対的な性能評価が行えるようになった。この方法の特筆すべき点は、通常の観測データであっても評価が行えるところにある。なぜなら、シャワーイベントとミューオンイベントをT2a2 Clustering、Arclength、χ^2、曲率というパラメータに制限を設けることのみで分離できるからである。つまり、観測時間を削ることなく望遠鏡性能の評価も行える以前に比べ優れた方法であると言える。

しかし、４章のカットパラメータを決定する部分で示したように、曇りの日のデータを使うことで、より良いミューオンイベントを選びだすことが可能になる。曇りの日の観測からは、シャワーイベントを含まないデータを得ることができ、ミューオンイベントを高S/N比で取り出すことが可能である。このことから、観測期間の間に曇りの日の観測を一度行うことで観測期間中の性能評価を行うことが可能になる。

曇りの日の観測については、観測時間を削って行う必要はない。Woomeraの晴天率は高いが、常に晴れるわけではなく、観測期間中には曇りの日も存在する。大気チェレンコフ望遠鏡はシャワーからのチェレンコフ光を捉える望遠鏡であり、このような日はチェレンコフ光が雲に遮られ地上まで届かず目的を果たせない。そこで、本来なら観測を行わないこのような日に観測を行うことで性能評価を行うことができる。この観測は、γ線観測を妨げることなく行うことができる。

シミュレーションとの比較では、観測データとシミュレーション結果でSize/Arclengthの値が異なっている。しかし、その他の２次元分布は合わせることが可能である。このことから、観測データの解析手法に問題があるのではなく、現在のCANGAROO-III望遠鏡用のシミュレーションコードに問題があると思っている。この部分については、より一層の改良が必要であり、今後の大きな課題である。

8.2 他のグループとの比較

初めの紹介で述べたように大気チェレンコフ望遠鏡グループは世界にいくつか存在している。また、過去にも HEGRA、Whipple というグループが存在した。どのグループも使っている機材は光学望遠鏡と光電子増倍管で構成されたカメラ、データ収集システムであり、観測手法は同じである。よって、他のグループにおいてもミューオンの解析は行われている。公開されているものとしては、HEGRA グループと Whipple グループの論文がある。HEGRA グループの論文 [6] では図 8.1、図 8.2 のように記述されている。このように HEGRA グループにおいても望遠鏡の効率は年単位で変化しており、その変

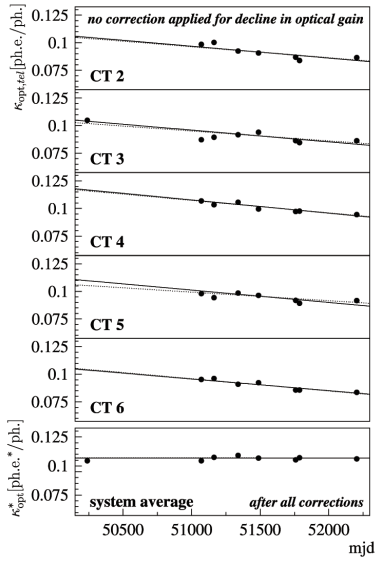

Fig. 15. Measurements of the absolute optical telescope efficiencies. The data points are results from *muon runs*. In the upper panels, the development of the efficiency vs. time is shown for all telescopes individually. Here, the signal amplitudes were corrected for the electronic conversion factor $\kappa_{el,tel}$. The fits (solid and dotted lines) describe the data very well; details are explained in the text. In the lower panel, the system average of all telescope efficiencies is plotted, where the relative gain drop of the optical efficiency (κ'_{opt}) was also corrected. As expected, this corrected system average is constant in time.

図 8.1: HEGRA グループにおけるミューオンイベント解析結果から推測される望遠鏡効率の経年変化 [6]。横軸は mjd、縦軸は集光効率である。

A common decline of the optical efficiency is observed for all telescopes. The solid lines have a fixed slope of −3.7% per year, and were only normalized to the muon results. This value for $d\kappa_{opt}/dt$ was derived on average for the system from the trigger rate analysis (see Fig. 10 and Eq. (21)), and describes the results for the individual telescopes very well. The difference to fits where the slope was allowed to vary freely (dotted lines) is small, showing that the results of the rate development and of the muon ring analysis are well consistent.

図 8.2: 図 8.1 に対する本文内容 [6]。

化は年―３．７％である。CANGAROO-III 望遠鏡においても、観測初期の効率が激減する部分を除けば、年―５％～―１０％の割合で低下している。しかし、CANGAROO-III 望遠鏡の場合、図 5.3 のように１２月の観測期間の終りに効率が激変しており、傾向としては HEGRA グループの結果と違わないと言えるだけである。この効率が激変する理由としては、視野内に明るい天体が入ったあとで、カメラを構成する光電子増倍管のゲインが一時的に落ちてしまうからと思われる。この時期の観測は主にカニ星雲の観測を行っており、視野内に３等星が入ることから、この理由が推測された。これを裏付ける証

拠として、５月から６月の観測にかけても効率に変化が見られることが上げられる。この観測期間では、CANGAROO-III グループは SN1006 の観測を行っており、この天体の観測中にも視野内に 2.8 等星と 3.4 等星が入っており、光電子増倍管のゲインが落ちてしまうと考えられる。また、２００４年５月の観測後では２号機のみではなく３号機、４号機でも同様の現象が起きており、これも観測天体が原因であることを裏付ける一つの証拠である。

図 8.3は、Whippleグループが考察したミューオンイベントと γ 線イベントの Length/Size 分布である。[5] 横軸は望遠鏡の幾何学構造に依存するので、CANGAROO-III 望遠鏡と

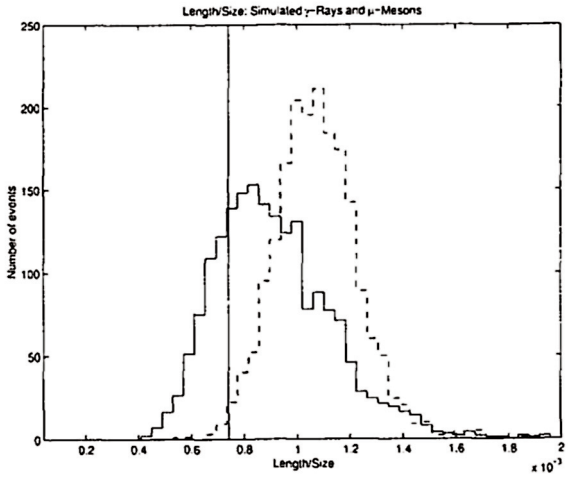

Fig. 3. Distribution of Length/Size for simulated γ-ray events (solid line) and muon events (dashed line). 98.6% of muon events lie above the line representing Length/Size = 0.00075°/dc, while 26% of γ-ray events lie below it.

図 8.3: Whipple グループによる Length/Size 分布の考察 [5]。横軸は Length/Size[deg/digital count]、縦軸は count である。モンテカルロシミュレーションによる予測値を示しており、点線がミューオンによるイベントで、実線が γ 線によるイベントである。このように Length/Size 分布から分離することは難しい。

値は違うが形は似た構造をしている。次に、H.E.S.S. グループにおける Length/Size 分布は４章でも示したように、図 8.4 のような分布をしている。この図はステレオイベントとそれ以外のイベントを表している。ステレオイベントとは主にシャワーイベントである。よって、ステレオイベントを除いたイベントに多くミューオンイベントが含まれると言える。この図からも分かるように Length/Size 分布によりミューオンイベントを分けたとしても、シャワーイベントが残ってしまう。これは CANGAROO-III 望遠鏡においても同様のことが言え、Length/Size 分布ではシャワーイベントとミューオンイベントを分離することは難しい。

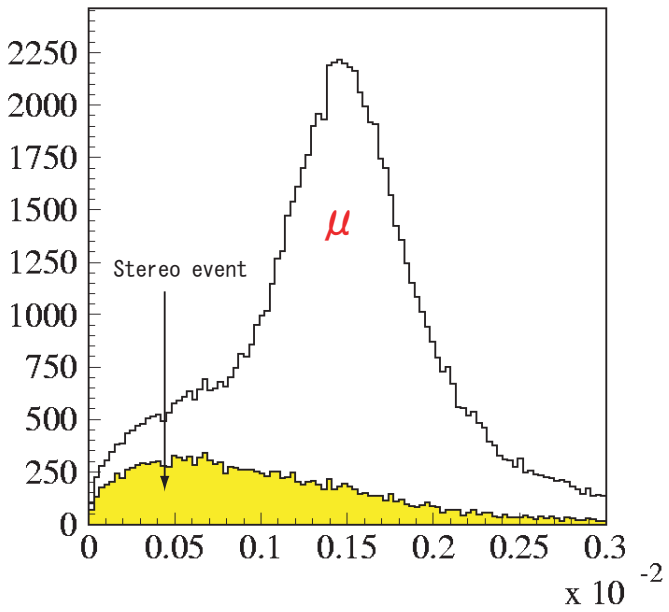

図 8.4: HESS 望遠鏡における Length/Size 分布 [3]。横軸は Length/Size、縦軸は count である。黄色はステレオイベントとして選ばれたものを、白色は全イベントのヒストグラムである。

ここで、CANGAROO-III 望遠鏡において、Length/Size 分布にカットを入れることにより、ミューオンイベントの解析を行った場合について考える。実際には T2a2 Clustering を行ったあと、Length/Size≥0.0018[deg/p.e.] でカットをかけミューオンイベントを選びだしている。その時の曲率分布の変化を示しているのが図 8.5 である。この図の曲率分布から分かるように、このカットによりミューオンイベントがある程度選びだされていることが分かる。しかし、Whipple の考察にあるように多くのシャワーイベントが残っているのもたしかである。このことから、CANGAROO-III 望遠鏡では Length/Size 分布でカットを行うのはミューオンイベントを選別するのに適当でないと言える。

これに対し、私の行ったカットでは図 8.6 分布で示されるように、ミューオンイベントのみを選びだすことができる。Length/Size 分布についてもミューオンイベントらしい部分にピークを持つ。曲率にもカットを掛けた、最終的な Length/Size 分布は、図 8.7 になる。このように、ノイズはほとんど残らない。

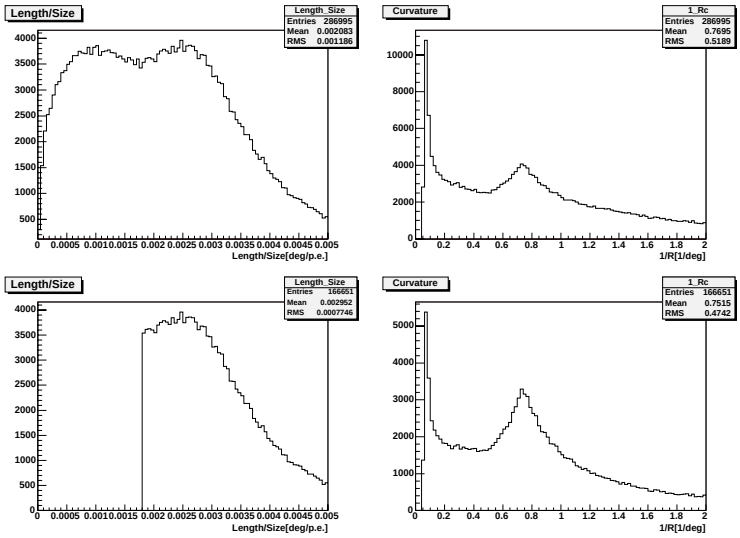

図 8.5: CANGAROO-III 望遠鏡において、Length/Size 分布にカットを行った場合の曲率分布の変化。横軸は Length/Size[deg/p.e.]、縦軸は count である。左図がカットを行う前後の Length/Size 分布を示しており、上段がカットを行う前、下段がカット後である。右図はそれぞれ左図に対応する曲率分布である。

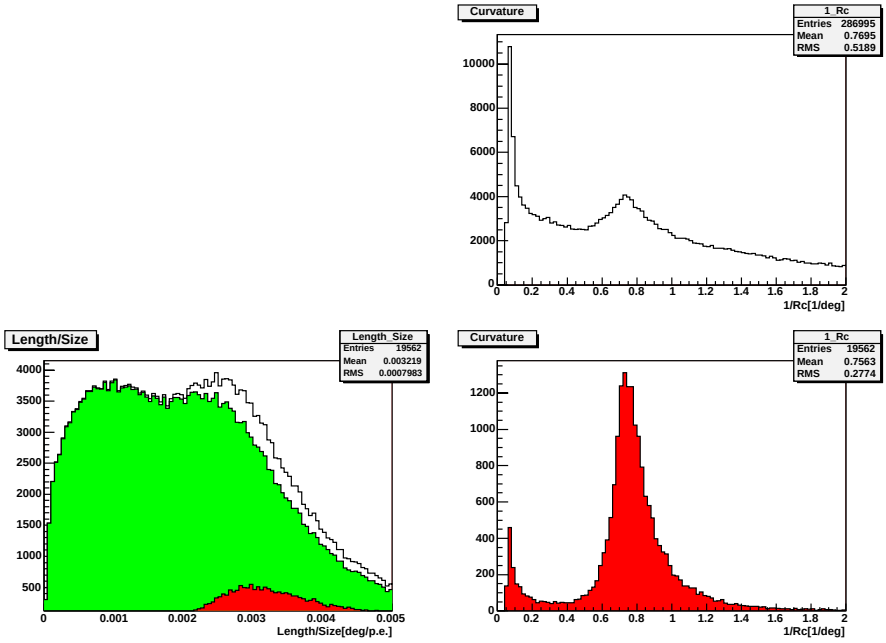

図 8.6: CANGAROO-III 望遠鏡において、私のカットを用いたときの Length/Size 分布と、曲率分布の変化。カットは T2a2 Clustering、Arclength≥2、χ^2 ≤2を適用した。左図がカットを行う前後の Length/Size 分布を示しており、白がカットを掛けないときの分布、赤がカットを掛け残った分布、緑はカットを掛け排除された分布である。右図はそれぞれ左図に対応する曲率分布で、上段がカット前、下段がカット後であり、ノイズが落ちていることを示している。

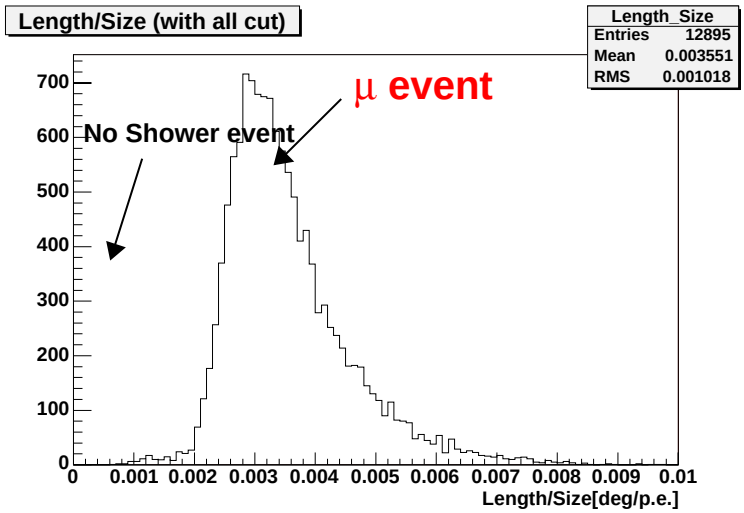

図 8.7: CANGAROO-III 望遠鏡において、今回用いた解析手法を適用したときの Length/Size 分布。横軸は Length/Size[deg/p.e.]、縦軸は count である。

第9章　Summary

私が行ってきたことはCANGAROO-III望遠鏡におけるミューオンイベント解析である。この解析の目的はCANGAROO-III望遠鏡の性能評価をすることにある。

解析を行ったところ、ミューオンイベントにより検出される光量は弱く、光電子増倍管１本に入射する光もハードウェアスレッショールド付近であることが分かった。そして、一般的にシャワーを解析するときに使われるClusteringでは、ミューオンイベントを構成するピクセルの一部を取りこぼす可能性があり、新たにClusteringを考える必要があった。T2a2と呼んでいる新たなClusteringを行うことで、この問題が解消され、取りこぼしも少なくなった。さらに、シャワーイベントから分離する良いパラメータとして、Arclength、χ^2、Curvatureという分布がミューオンイメージを表す良いパラメータであり、カット条件として優れていることを見つけ出した。

そして、これらのカットパラメータを用いることで、CANGAROO-III望遠鏡の２号機、３号機、４号機について性能評価を行えるようになった。実際に性能評価を行うと次のことが分かった。

- 観測開始直後の観測ではどの望遠鏡も性能が他の月に比べ高く、次の月の観測期間から性能が安定している。
- どの望遠鏡も全体として性能は下降傾向にあるが、その変化はさほど大きくない。
- 視野内に明るい星が入った次の月の観測では、性能が落ちており、その星の明かりの影響で、光電子増倍管のゲインが一時的に落ちていると推測される。この現象はさらにその次の月では元に戻っているが、若干戻りきらない成分もある。天体としては、カニ星雲、SN1006等が上げられる。
- それぞれの望遠鏡の現時点での性能の差は、「２号機＝３号機＜４号機」という図式が成り立っている。しかし、時期により異なっており、２００４年初めでは「２号機＜３号機」であった。
- 年間を通して、ミューオンイベントによる解析は季節変動しておらず、その点を考慮に入れなくても性能評価が可能である
- シミュレーションとの比較では、観測値と値が異なっており、現在のシミュレーションコードが現実に合っていないことを示している。

このように、今回の解析では相対評価は行うことができたが、絶対評価を行うにはシミュレーションコードの改良が必要である。その点については今後行っていくべき課題である。

また、私が行ってきたことは、

- シャワーイベントからミューオンイベントのみを分離するパラメータを決めたこと
- ２号機から４号機までの解析を行い望遠鏡性能の経年変化を求めたこと
- シミュレーションコードの改良を行ったこと
- ３号機のライトガイドに関するトラブルの影響を調べたこと
- ４号機の建設作業と、カメラシステム全般のキャリブレーションを行ったこと

が上げられる。

まだ課題はいくつか残っているが、ミューオンイベントを用いて CANGAROO-III 望遠鏡の相対的性能評価に関する手段を作り上げたことで一区切りとしたいと思う。

図 目 次

1.1 世界の大気チェレンコフ望遠鏡。上から順に、CANGAROO-III グループ、H.E.S.S. グループ、MAGIC グループ、WHIPPLE グループである。 . . . 5
1.2 CANGAROO-III 望遠鏡の建設場所 (オーストラリア、Woomera)。 . . . 6
1.3 CANGAROO-III 望遠鏡４台。 6

2.1 γ 線を大気へ入射したときの空気シャワーの発達。1TeV の γ 線を大気に入射したときの空気シャワーの発達を示している。 9
2.2 (横軸) 高度に対する (縦軸) チェレンコフ光の発生量。1TeV の γ 線を大気に入射したときの高度によるチェレンコフ光の発生量をしめしている。 . 9
2.3 地上におけるチェレンコフ光の強度分布。1TeV の γ 線を大気に入射したときに発生したチェレンコフ光のうち、地上に到達するチェレンコフ光の強度分布を示している。 9
2.4 陽子を大気へ入射したときのシャワーの発達。10TeV の陽子を大気へ入射したときの空気シャワーの発達を示している。 10
2.5 (横軸) 高度に対する (縦軸) チェレンコフ光の発生量。10TeV の陽子を大気へ入射したときの高度によるチェレンコフ光の発生量を示している。 . . 10
2.6 地上におけるチェレンコフ光の強度分布。10TeV の陽子を大気に入射したときに発生したチェレンコフ光のうち、地上に到達するチェレンコフ光の強度分布を示している。 10
2.7 CANGAROO-III 望遠鏡４号機。 11
2.8 CANGAROO-III 望遠鏡で使われている小型球面鏡。 11
2.9 量子効率の波長依存性。横軸は波長 [nm]、縦軸は量子効率 [%] である。 . 12
2.10 光電子増倍管のゲインのばらつき (４号機)。横軸はゲイン、縦軸は PMT 本数である。 13
2.11 光電子増倍管の時間分解能 (４号機)。横軸は時間分解能 [ns]、縦軸は PMT 本数である。 13
2.12 ゲインの印可電圧依存性 (４号機)。横軸は電圧 [V]、縦軸はゲインである。 13
2.13 ゲインの線形性 (４号機)。横軸は入力光量 [p.e.]、縦軸は線形性からのずれ [%] である。 13
2.14 光電子増倍管を試験するためのセットアップ。 14
2.15 ライトガイド (設計図)[9]。 14

2.16 ライトガイド (実物)[9]。右の六角形のライトガイドが、２号機以降で用いられている。 15
2.17 ライトガイド集光率の角度特性 (実測)。横軸は入射角度 [deg]、縦軸は入射角度を０度、ライトガイドを付けずに測定したときの光量を１とした時の比である。 15
2.18 ライトガイドが光電面から離れた場合の集光率 (実測)。横軸はギャップ [mm]、縦軸は入射角度を０度、ライトガイドを付けずに測定したときの光量を１とした時の比である。 15
2.19 カメラの前面。 16
2.20 カメラの後面。 16
2.21 光電子増倍管の配置。 16
2.22 LED Run のセットアップ [9]。カメラ下方に LED Box を配置しキャリブレーション光とする。また、カメラ前面に「Patterned Screen」という明暗模様のスクリーンを配置し、カメラ全面に一様光が当たるように設計されている。 17
2.23 γ 線イベントのカメライメージ。 18
2.24 陽子イベントのカメライメージ。 18
2.25 イメージパラメータの定義。 19

3.1 放物面鏡のパラメータ定義。 22
3.2 インパクトパラメータと走行距離、それぞれの場合におけるカメライメージ。 25

4.1 CANGAROO 望遠鏡における Length/Size 分布。横軸は Length/Size[deg/p.e.]、縦軸は count である。黄色はステレオイベントとして選ばれたものを、白色は全イベントのヒストグラムである。0.004 付近に μ 粒子によるイベントがあるとわかる。 28
4.2 HESS 望遠鏡における Length/Size 分布 [3]。横軸は Length/Size、縦軸は count である。黄色はステレオイベントとして選ばれたものを、白色は全イベントのヒストグラムである。 28
4.3 CANGAROO 望遠鏡における Length/Size 分布。横軸は Length/Size[deg/p.e.]、縦軸は count である。曇天の Length/Size 分布であり、晴天の時のデータに比べ S/N 比が向上している。 29
4.4 曲率分布 (カット前)。横軸は曲率 [deg^{-1}]、縦軸は count である。μ イベントによる寄与は 0.7[deg^{-1}] に現れ、赤丸の部分のピークが μ イベントによる寄与である。 30
4.5 TDC 分布 (カット前)。横軸は TDC タイミング [ns]、縦軸は count である。青まるで囲まれた部分にランダムノイズが存在し、これは夜光による影響である。 30

4.6 T10a2 Clustering の模式図。 32
4.7 Clustering カットを行った曲率分布 上段:T10a 下段:T10a2。横軸は曲率 [deg^{-1}]、縦軸は count である。Clustering カットにより S/N 比が向上していることが分かる。 32
4.8 Clustering カットを行った TDC 分布。横軸は TDC タイミング [ns]、縦軸は count である。 32
4.9 曲率 vs Arclength。横軸は曲率 [deg^{-1}]、縦軸は Arclength[deg] である。T2a2 Clustering を行い χ^2 に制限を設けた図である。この図から分かることは、Arclength¡2 にシャワーイベントが多く含まれ、Arclength≥2 とすることで μ イベントを選びだせるということである。 33
4.10 曲率分布。横軸は曲率 [deg^{-1}]、縦軸は count である。T2a2 Clustering、Arclength≥2 のカットを行ったところ、0.7[deg^{-1}] 付近のピークが残り、ノイズが落ちた。 33
4.11 TDC 分布。横軸は TDC タイミング [ns]、縦軸は count である。T2a2 Clustering、Arclength≥2 のカットを行ったところ、夜光を落せた。 33
4.12 χ^2 分布。横軸は χ^2[pixel^2]、縦軸は count である。T2a2 Clustering、Arclength≥2 のカットを適用したところ、μ イベントは 1 付近にピークを持つことが分かった。χ^2 の大きいピークはシャワーイベントである。 34
4.13 χ^2 カットを行った曲率分布。横軸は曲率 [deg^{-1}]、縦軸は count である。T2a2 Clustering、Arclength≥2、χ^2 ≤2 のカットを適用した。 34
4.14 χ^2 カットを行った TDC 分布。横軸は TDC タイミング [ns]、縦軸は count である。T2a2 Clustering、Arclength≥2、χ^2 ≤2 のカットを適用した。 . 34
4.15 χ^2 の大きなイベントイメージ。T2a2 Clustering、Arclength≥2、χ^2 >2 のカットを用い、χ^2 の大きいイベントを選びだした。 35
4.16 T2a2 Clustering を行ったときの曲率分布。横軸は曲率 [ns]、縦軸は count である。 35
4.17 T3a2 Clustering を行ったときの曲率分布。横軸は曲率 [ns]、縦軸は count 35
4.18 カットを行わないときのイベントモニター。夜光イベントを排除するために、T2a2 Clustering カットのみを行った。 37
4.19 全てのカットを適用したときのイベントモニター。μ イベントを選びだすために、T2a2 Clustering、Arclength≥2、χ^2 ≤2 カットを行った。 38

5.1 表 5.2 を適用した各望遠鏡における曲率分布の変化。横軸は曲率 [deg^{-1}]、縦軸は count である。左列から 2 号機、3 号機、4 号機である。上段から T2a Clustering、Arclength≥2、χ^2 ≤2 のカットを掛けた。 42
5.2 各望遠鏡の Size/Arclength 分布。横軸は Size/Arclength[p.e./deg]、縦軸は count である。左から、2 号機、3 号機、4 号機の Size/Arclength 分布である。 43

5.3 Size/Arclength の経年変化。横軸は年月、縦軸は Size/Arclength[p.e./deg] である。 44
5.4 各望遠鏡の Size/Arclength 分布。横軸は Size/Arclength[p.e./deg]、縦軸は count である。曇天の日のデータを解析したもので、T2a2 Clustering、Arclength≥2、χ^2 ≤2 カットを適用してある。左から 2 号機、3 号機、4 号機の図である。 44
5.5 各望遠鏡の χ^2 分布。横軸は χ^2[pixel^2]、縦軸は count である。T2a2 Clustering、Arclength≥2、表 5.4 による Size/Arclength カットを適用した。左から 2 号機、3 号機、4 号機の図である。 45

6.1 シミュレーションプロセス。 47
6.2 シミュレーションにおける曲率分布。横軸は曲率 [deg^{-1}]、縦軸は count である。T2a2 Clustering カットのみ適用した。 49
6.3 シミュレーションにおける 2 次元分布。左から「曲率 vs Arclength 分布」「曲率 vs χ^2 分布」「曲率 vs Size/Arclength 分布」を表しており、T2a2 Clustering カットのみ適用した。 49
6.4 シミュレーションにおける Size/Arclength 分布。横軸は Size/Arclength[p.e./deg]、縦軸は count である。表 6.1 のカットを適用した。 50
6.5 チェレンコフ光を作り出した粒子分布。横軸は geant3.21 の particle id、縦軸は発生チェレンコフ光子数である。表 6.2 のカットを適用した。 . . . 51
6.6 電子 (陽電子) の割合。表 6.2 のカットを適用した。 51
6.7 ミューオンの割合。表 6.2 のカットを適用した。 51
6.8 その他の粒子の割合。表 6.2 のカットを適用した。 51
6.9 曲率分布 (集光率 70%)。T2a2 Clustering かつミューオンから生成されたチェレンコフ光が 80%以上を占める場合を選びだした。 52
6.10 曲率 vs Arclength(集光率 70%)。T2a2 Clustering かつミューオンから生成されたチェレンコフ光が 80%以上を占める場合を選びだした。 52
6.11 曲率 vs χ^2(集光率 70%)。T2a2 Clustering かつミューオンから生成されたチェレンコフ光が 80%以上を占める場合を選びだした。 52
6.12 曲率 vs Size/Arclength。T2a2 Clustering かつミューオンから生成されたチェレンコフ光が 80%以上を占める場合を選びだした。 52
6.13 Arclength カットを掛けた時の粒子分布。T2a2 Clustering、Arclength≥2 のカットを適用した。 53
6.14 χ^2 カットを掛けた時の粒子分布。T2a2 Clustering、Arclength≥2、χ^2 ≤2 のカットを適用した。 53
6.15 曲率カットを掛けた時の粒子分布。T2a2 Clustering、Arclength≥2、χ^2 ≤2、$0.55 \leq \frac{1}{r} \leq 0.9$ のカットを適用した。 53
6.16 電子の割合、ミューオンの割合、他の粒子の割合 (Size/Arclength ≤ 100)。表 6.2 のカットを適用した。 54

6.17 電子の割合、ミューオンの割合、他の粒子の割合 (Size/Arclength $\geq$ 100)。表 6.2 のカットを適用した。 54
6.18 反射率７０%の時の Size/Arclength 分布。横軸は Size/Arclength[p.e./deg]、縦軸は count である。表 6.2 のカットを適用した。 54

7.1 入射粒子に μ 粒子を用い、現在のモンテカルロシミュレーションにおける、高度に対するチェレンコフ光の発生量。横軸は高度 [cm]、縦軸はカメラ面に集光された発生チェレンコフ光子数である。 56
7.2 入射粒子に μ 粒子を用い、改良したモンテカルロシミュレーションを用いた時の、高度に対するチェレンコフ光の発生量。横軸は高度 [cm]、縦軸はカメラ面に集光された発生チェレンコフ光子数である。 57
7.3 改良したモンテカルロシミュレーションによる「Arclength vs Size 分布」。横軸は Arclength[deg]、縦軸は Size[p.e.] である。T2a2 Clustering、$\chi^2 \leq$2 のカットを適用した。 58
7.4 入射粒子として陽子を用い、改良したモンテカルロシミュレーションを用いた時の、高度に対するチェレンコフ光の発生量。横軸は高度 [cm]、縦軸はチェレンコフ光の発生光量である。 59
7.5 改良したシミュレーションの曲率分布。横軸は曲率 [deg^{-1}]、縦軸は count である。T2a2 Clustering、Arclength$\geq$2、$\chi^2 \leq$2 のカットを適用した。 . 60
7.6 シミュレーションにおける２次元分布。左図から「曲率 vs Arclength」「曲率 vs χ^2」「曲率 vs Size/Arclength」を表している。T2a2 Clustering カットを適用した。 60
7.7 改良したシミュレーションの Size/Arclength。横軸は Size/Arclength[p.e./deg]、縦軸は count である。表 7.1 のカットを適用した。 61

8.1 HEGRA グループにおけるミューオンイベント解析結果から推測される望遠鏡効率の経年変化 [6]。横軸は mjd、縦軸は集光効率である。 64
8.2 図 8.1 に対する本文内容 [6]。 64
8.3 Whipple グループによる Length/Size 分布の考察 [5]。横軸は Length/Size[deg/digital count]、縦軸は count である。モンテカルロシミュレーションによる予測値を示しており、点線がミューオンによるイベントで、実線が γ 線によるイベントである。このように Length/Size 分布から分離することは難しい。 65
8.4 HESS 望遠鏡における Length/Size 分布 [3]。横軸は Length/Size、縦軸は count である。黄色はステレオイベントとして選ばれたものを、白色は全イベントのヒストグラムである。 66

8.5 CANGAROO-III 望遠鏡において、Length/Size 分布にカットを行った場合の曲率分布の変化。横軸は Length/Size[deg/p.e.]、縦軸は count である。左図がカットを行う前後の Length/Size 分布を示しており、上段がカットを行う前、下段がカット後である。右図はそれぞれ左図に対応する曲率分布である。 67
8.6 CANGAROO-III 望遠鏡において、私のカットを用いたときの Length/Size 分布と、曲率分布の変化。カットは T2a2 Clustering、Arclength≥2、χ^2 ≤2 を適用した。左図がカットを行う前後の Length/Size 分布を示しており、白がカットを掛けないときの分布、赤がカットを掛け残った分布、緑はカットを掛け排除された分布である。右図はそれぞれ左図に対応する曲率分布で、上段がカット前、下段がカット後であり、ノイズが落ちていることを示している。 68
8.7 CANGAROO-III 望遠鏡において、今回用いた解析手法を適用したときの Length/Size 分布。横軸は Length/Size[deg/p.e.]、縦軸は count である。 69

表 目 次

4.1 各望遠鏡に適したカットパラメータ。 36

5.1 建設時期。 40
5.2 各望遠鏡へ適用したカットパラメータ。 41
5.3 表 5.2 を適用した時の各望遠鏡における Size/Arclength の平均値。 . . . 41
5.4 各望遠鏡における Size/Arclength カットの値。 45

6.1 シミュレーションデータへ適用するカットパラメータ。 50
6.2 チェレンコフ光を発生した粒子を特定するために適用される最低限のカット。 50

7.1 改良したシミュレーションへ適用したカットパラメータ。 57
7.2 シミュレーションと各望遠鏡の観測開始時期における Size/Arclength 値。表 5.2 と表 7.1 のカットを適用した。 58
7.3 望遠鏡の効率の経年変化。４号機の２００４年３月における Size/Arclength 値を 100%とし各月の相対値を示してある。カットは、表 5.2 のカットを適用した。 62

関連図書

[1] Hillas, A.M., J.Phys. G, 8 (1982) 1475

[2] D.A.Lewis, Experimental Astronomy 1 (1990) 213

[3] W. Hofmann, Presentation at Workshop on the occasion of the inauguration of the MAGIC telescope, La Palma, Oct. 2003

[4] A.C.Rovero et al, Astroparticle Physics 5 (1996) 27

[5] P.Moriarty et al, Astroparticle Physics 7 (1997) 315

[6] G.Puhlhofer et al, Astroparticle Physics 20 (2003) 267

[7] 小田 稔 『宇宙線 [改訂版]』

[8] 吉越貴紀 博士論文 (東京工業大学 1996)

[9] 真栄城敦 修士論文 (甲南大学 2001)

[10] 大石理子 修士論文 (東京大学 2002)

[11] 株木重人 修士論文 (東京大学 2002)

[12] 内田直志 修士論文 (東京大学 2003)

[13] 黒坂亮治 修士論文 (東京大学 2004)

謝辞

修士課程の２年間を過ごすにあたり、指導教官として直接のご指導をしてくださった榎本良治助教授に深く感謝します。また、実験や物理について様々なアドバイスをしてくださった森正樹教授にも感謝いたします。シミュレーションや物理の解釈について様々な御助言を下さった吉越貴紀助教授、有難うございました。河内明子助手にはいろいろな文献を紹介して頂きました、有難うございました。原敏博士にはコンピュータの扱いについて様々なことを教えて頂きました。お礼申し上げます。

そして、研究室に配属されたばかりの私に CANGAROO-III 望遠鏡のカメラ製作を丁寧に教えてくださった、株木重人様、黒坂亮治様、ありがとうございました。また、土屋兼一博士、片桐秀明博士、大石理子様には研究との向きあい方を教えていただきました。感謝いたします。

同僚の木内隆太君、２年間、この研究室で楽しく過ごすことができました、有難うございました。京都大学の中森健之君には CANGAROO-III 望遠鏡で使われている DAQ システムについていろいろ教えていただきました、有難うございます。M １の川崎祥君には、様々な手伝いをして頂きました、有難うございます。

他にもたくさんの方に支えられ、２年間の修士課程を過ごしてまいりました。私にかかわったすべての方々に感謝いたします。