

解像型大気チェレンコフ望遠鏡による高エネルギーガンマ線の観測原理

稲田 知大 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

今日宇宙の姿を明らかにするために様々な波長の電磁波を用いての観測が行われている。ガンマ線領域は電磁波の中でも波長が一番短く高エネルギーな領域である。さまざまなガンマ線の観測を行う検出器の中でも最もエネルギーの高い TeV 領域の観測を可能としたのが解像型大気チェレンコフ望遠鏡 (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope, IACT) である。現在は H.E.S.S. や MAGIC、VERITAS といった望遠鏡が稼働しており、次世代計画として Cherenkov Telescope Array (CTA) が現在国際共同プロジェクトとして進められている。これは口径の異なった望遠鏡を合計約 100 台用いることで 20GeV から 100TeV 以上の領域の超高エネルギーガンマ線の観測を目指すものである。現行の望遠鏡と比べると感度 10 倍かつ 4 桁にも渡る広いエネルギー領域という CTA が持つ特徴により新たな物理が発見されることが期待され、いままさに高エネルギーガンマ線天文学は発展の時期を迎えている。本発表では地球大気を利用することで TeV 領域の高エネルギーガンマ線観測を可能にした解像型大気チェレンコフ望遠鏡の観測原理とそれに付随する観測技術についてレビューを行う。

1 解像型大気チェレンコフ望遠鏡 (IACT) の必要性

光子のエネルギーが数 10keV に入るとガンマ線と呼ばれる領域に入る。初めて天体からのガンマ線を検出したのは 1967 年に行われた人工衛星 (OSO-3 衛星) による手法である。近年では Compton 衛星に搭載された EGRET 検出器による 20MeV-10GeV 領域 (D J Thompson (2008)) のガンマ線全天観測や Fermi 衛星に搭載された LAT 検出器による 20MeV-300GeV 領域の観測が行われている。GeV 領域以下のエネルギー帯でのガンマ線観測人工衛星が活躍しているが、GeV 以上の領域、TeV 領域のガンマ線観測は人工衛星には難しい。主な理由は TeV 領域のガンマ線の検出効率を上げるために必要な広い検出面積の実現が検出器の大きさに制限のある人工衛星では難しいからである。大気中に高エネルギーガンマ線が入射した際にはチェレンコフ光を伴う空気シャワーが発生する。TeV 領域ではこの現象が顕著となる。解像型大気チェレンコフ望遠鏡 (IACT) ではこのチェレンコフ光を観測することで従来不可能だった地上でのガンマ線観測が可能となった。また検出器が地上にあるため有効検出面積を大きくすることもできるの

でより高エネルギーガンマ線の統計を稼ぐことができる。

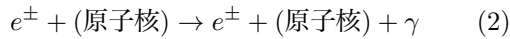
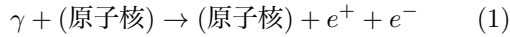
2 空気シャワー

検出するチェレンコフ光はガンマ線と大気との相互作用で生じる空気シャワー由来であり、観測原理を知る上で空気シャワーの物理を知ることは必要不可欠である。空気シャワーは陽子やヘリウムなどの原子核由来のものがハドロンシャワー、ガンマ線由来のものは電磁シャワーと呼ばれる。電磁シャワーとハドロンシャワーにはシャワーの形状にいくつか異なる点があり、それらを利用することでガンマ線イベントとハドロンイベントを分離する。図 1 はそれぞれシミュレーションによる電磁シャワーとハドロンシャワーを示しており上図は縦方向のシャワーの発達分布、下図は焦点面検出器で得られた光子分布を示している。

2.1 電磁シャワー

ガンマ線は大気中の原子核との相互作用により電子-陽電子対生成 (式 (1)) を起こす。入射したガンマ

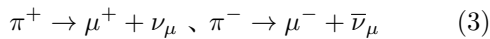
線のエネルギーが十分高いと、生成された電子、陽電子が制動放射 (式 (2)) を起こし、再びガンマ線を放出する。この過程の連鎖を電磁シャワーという。



電磁シャワーの特徴は生成物である光子や電子がシャワー軸に対して対称に分布することである。これはシャワーによって生じた電子が空気中で多重クーロン散乱を受けることが主な原因である。

2.2 ハドロンシャワー

高エネルギー宇宙線の主成分は陽子やヘリウムであり、このような宇宙線が生成する空気シャワーを電磁シャワーと区別してハドロンシャワーと呼ぶ。1次宇宙線は大気中の原子核と相互作用をし、多くの2次粒子を発生させる。2次粒子の大部分は π 中間子である。生成された π 中間子は π^0 、 π^\pm の3種類がありそれぞれほぼ同数生成される。なかでも π^0 は極めて短い寿命で生成後すぐに2つの光子に崩壊し電磁カスケードの起点となる。一方、 π^\pm は一部は式(3)のように崩壊する。



ハドロンシャワーは電磁シャワーと異なる特徴をいくつか持っている。

- 一次宇宙線がガンマ線の場合全エネルギーを電磁シャワーに転換するのにに対し、ハドロンの場合エネルギーの2/3をミューオンなどの電磁シャワーに寄与しない粒子が持ち去ってしまう。
- 個々の π 中間子は生成時に横方向の運動量を持つため、ハドロンシャワーはガンマ線シャワーに比べ横方向に広がったシャワーを形成する。またハドロンシャワーに含まれる電磁シャワーは別々の π^0 から作られるのでガンマ線による電磁シャワーと異なり、シャワー軸に対して不規則となる。

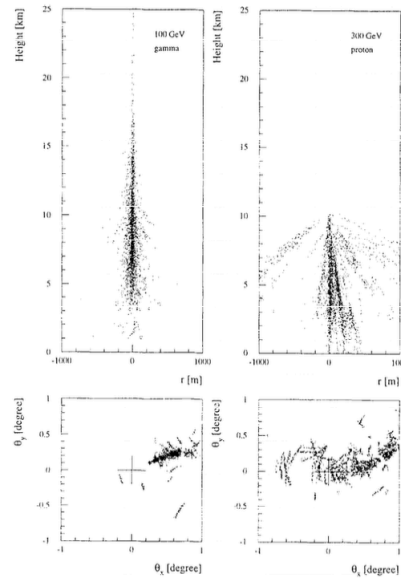


図 1: 左図は 100GeV のガンマ線、右図は 300GeV の陽子のそれぞれが大気中でシャワーを作る様子をシミュレーションしたもの (F.Aharonian et al 2008)。

3 チェレンコフ光

シャワー中の電子陽電子のような荷電粒子が十分なエネルギーを有する時、大気中の光速は大気の屈折率 n を用いて c/n で表される。粒子の速度 β が c/n より大きい時は粒子の運動に追いつかない光子が衝撃波となる。この衝撃波をチェレンコフ光と呼ぶ。この関係は (4) 式で表される。

$$\beta = \frac{v}{c} \geq \frac{c}{n} \quad (4)$$

チェレンコフ光の放出される方向 (粒子の進行方向とのなす角 θ) は屈折率 n と粒子の速度 β で決まる。

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} \quad (5)$$

地表付近では $n \sim 1.00028$ なので $\theta = 1.4^\circ$ という値をとる。またチェレンコフ光を起こすエネルギー閾値は電子の場合だと 21MeV に相当する。

4 IACT によるガンマ線観測および解析手法

IACT は光を反射する鏡面と、その焦点に設置されたカメラで構成される。鏡面の形状は複合放物面状のものもあるが、多くの望遠鏡では Davies-Cotton design が採用されている。Davice-Cotton design とは曲率半径 f の球面に焦点距離 f の球面鏡を、光軸が望遠鏡中心から光軸にそって $2f$ の所で交わるように配置し、全ての小型球面鏡の曲率半径は $2f$ で一律であるという特徴を持つ主鏡形状である。放物面鏡と比べ、時間的同時性は劣るが off-axis (望遠鏡光軸に平行な入射光を on-axis、光軸に対して角度を持つものを off-axis と定義する) の入射に対する結像が優れていることにより広い視野で一様なイメージを得られるという特徴を持っている。チェレンコフ光は望遠鏡の鏡面で反射し、焦点面の検出器でその光量とシャワーのイメージが電気信号として記録される。シャワーによるチェレンコフ光はライトプールと呼ばれる円盤を形成する。ライトプールの半径は検出高度 H_1 とチェレンコフ光発生高度 H_2 、チェレンコフ光放出角度 θ_c による $r = (H_2 - H_1)\theta_c$ の関係式で決まる。光子が発生した高度に対して望遠鏡で捉える角度が異なるので焦点面のカメラで記録されたイメージはある軸上に伸びるように分布する。(大石理子 2002) 記録された光量とイメージの形状から、チェレンコフ光の発生源である粒子のエネルギーとその到来方向を決定することが可能となる。

4.1 イメージング法

ガンマ線とハドロンイベント比は宇宙線を捉える視野やガンマ線の Flux にもよるが代表的なガンマ線源であるかに星雲の場合はおおよそ $1:10^4$ である。相対的に少ないイベントを抽出するために厳しいイベントセレクションが必要となる。その手法の一つがイメージング法である。焦点カメラでとらえたシャワーイメージ (図 1) を楕円に近似しパラメータを設定する。図 2 は主なパラメータを表している。図 3 はガンマ線由来のイベントとハドロン由来のイベントでのイメージパラメータの分布の違いをシミュレーションから求めた図である。図 3 からシグナルとな

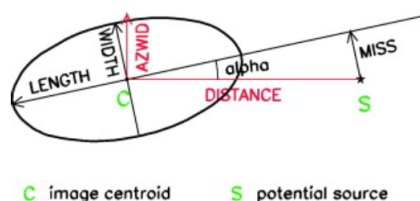


図 2: イメージング法に用いるイメージパラメータの定義 (A.M.Hillas 2013)。

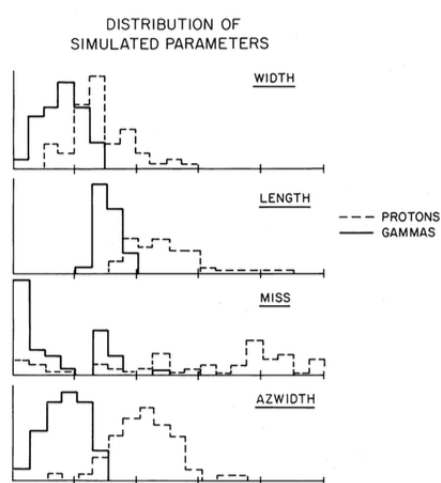


図 3: シミュレーションによって求められたガンマ線イベントとハドロンイベントそれぞれのイメージパラメータの分布 (T.C.Weekes et al 1989)。

るガンマ線イベントとバックグラウンドとなるハドロンイベントでは分布が異なることがわかる。この分布の差異は電磁シャワーシャワー軸に対して対称なのに対しハドロンシャワーは不規則になることが原因である。

4.2 ステレオ観測

ガンマ線の到来方向を精度よく決定する方法として望遠鏡二台以上を用いて行うステレオ観測がある。図 4 のように、シャワーを離れた複数箇所で同時に検出して天体の方向を求め、到来方向をより正確に求めようというのがステレオ観測法である。天体からのガンマ線であれば二つのシャワーイメージの長軸

の交点は天体方向を中心に分布することになる。天体方向とチェレンコフ光のイメージ軸の交点との角距離 θ のヒストグラムを取るとガンマ線のシグナルは $\theta^2 = 0$ 付近のピークとして現れることになる。またバックグラウンドは角距離のピークを持たないのでステレオ観測はバックグラウンドとシグナルの識別にも役立っている。このようなメリットにより現在稼働している IACT にはステレオ観測手法が採用されている。

ステレオ観測によって得られた複数の望遠鏡由来のイメージパラメータを解析しガンマ線イベントを取り出す手法を紹介する。

- Mean Reduced Scaled Parameters 法 (K.Tsurusaki 2012)

観測データのイメージパラメータを MC シミュレーションを元に作成したガンマ線イベントのパラメータにより規格化することで期待されるガンマ線シグナルからのずれを定義している。この過程を複数のイメージパラメータで行い、平均化することで SN 比を改善する手法である。

- Random Forest 法 (J.Albert et al 2008)

機械学習アルゴリズムの一種であり、Decision Tree と呼ばれるデータの性質を特徴づける複数のパラメータからランダムに選び出された組み合わせを用いてイベントの分類を行う多変量解析手法である。Decision Tree に観測データを通す際にはガンマ線によるイベントを MC シミュレーションにより作成し、ここから得られたイメージパラメータと比較することで観測データの Hadroness(ハドロンらしさ) という値を定義し、その値によって主なバックグラウンドであるハドロン由来のイベントの除去を行う手法である。

5 まとめ

1989 年に Whipple 望遠鏡により初めて TeV 領域のガンマ線が検出されてから現在に至るまで IACT による高エネルギーガンマ線天文学はバックグラウンドであるハドロンシャワーをいかに取り除くかと

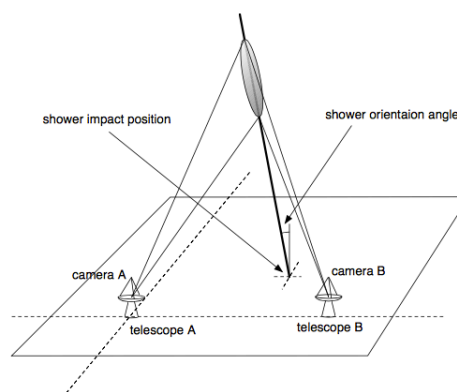


図 4: ステレオ観測の概念図 (原敏 1999)

いうことと角分解能の上昇させるという点において改善され進歩してきた。解析手法の改良や望遠鏡の台数の増加などの趣向を凝らすことによりガンマ線由来の大气チェレンコフ光をとらえる精度を向上させることが可能となった。現在、CTA と呼ばれる次世代計画が進行中であり TeV 領域の高エネルギーガンマ線天文学の更なる飛躍が期待される。

Reference

D.J.Thompson Rep. Prog. Phys. 71 (2008) 116901
 F.Aharonian et al Astropart. Phys. 6 (1997) 344
 A.M.Hillas Astropart. Phys. 43 (2013) 19
 W.Hofmann et al Astropart. Phys. 12 (1999) 135
 T.C.Weekes et al Astrophys. J. 342 (1989) 379
 J.Albert et al Nucl.Inst.Meth. A588 (2008) 424
 K.Tsurusaki Ph.D thesis University of Iowa VERITAS observations of galactic gamma-ray sources (2012)
 原敏 東京工業大学修士論文 複数の大型チェレンコフ望遠鏡によるガンマ線ステレオ観測 (1999)
 大石理子 東京大学修士論文 解像型チェレンコフ望遠鏡光学系の性能評価 (2002)