

大気チェレンコフ望遠鏡による高エネルギーガンマ線観測の原理と技術

石尾 一馬 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

1931 年に宇宙からの電波が観測されたのを皮切りに、1950 年代から可視光以外の波長域での宇宙観測が本格的に発達し、多様な宇宙の姿が明らかになってきた。ガンマ線領域は最も短波長または高エネルギーの領域であり、宇宙の高エネルギー現象を最も直接的に調べることができる。高エネルギー宇宙の観測は、現在、銀河系内、銀河系外に、PWN、SNR、AGN など多種多様な 100 を超える最高エネルギーガンマ線源が発見されている。また、その数のみならず、近傍の明るい天体に関しては、観測の高精度化がすすみ、天体での物理現象をより詳細に研究する事が可能になってきた。今後は、超高密度物質、ブラックホールなどの極限時空、超高エネルギー宇宙線や暗黒物質粒子の対消滅ガンマ線の探索など、宇宙論や基礎物理学の発展に重大な貢献をもたらす可能性がある。本発表では、ガンマ線の中でも最も高エネルギーの TeV 領域の観測を可能にした大気チェレンコフ望遠鏡の観測原理とブレイクスルーとなった観測技術についてレビューを行い、今後の発展のために必要な技術について考察を行う。

1 地上からの観測の必要性

ガンマ線は、1 光子あたり概ね 100keV 以上のエネルギーをもつ電磁波全てを指す。宇宙からもガンマ線は降り注いでいるが、地球大気の通過時に吸収されてしまい、可視光線のように地上から直接観測することはできない。そこでガンマ線を直接検出するには人工衛星を打ち上げるなど、高度 40km より上から観測することが必要になる。ガンマ線衛星は 1967 年の OSO III 打ち上げから始まり、その後目覚ましい発展を続け、Compton 衛星に搭載された EGRET 検出器が、全天にわたる観測でガンマ線で輝く宇宙の姿が明らかになった。また現在では、2008 年に打ち上げられた Fermi 衛星が 20MeV~300GeV でガンマ線の観測をおこなっている。この人工衛星による観測は、100keV~100GeV 程度までは衛星が大きな威力を発揮するが、それより高いエネルギーでは観測が難しくなる。天体が放つ光はエネルギーが高いほど検出頻度が急激に減ってしまうが、それを補うために必要な観測装置の大型化に限界がある。一方でガンマ線はエネルギーが高くなるにつれて、大気に入射するときに空気シャワー現象を起こすことで、それに伴ってチェレンコフ光に形を変えて地上に達するようになる。TeV のエネルギーを持つガンマ線では特に顕著になる。このチェレンコフ光を地

上から観測すれば、つまり、地球の大気でチェレンコフ光を発生させるという、とてつもなく大きな検出器を用いれば、人工衛星では難しい超高エネルギーのガンマ線を捉えることが可能になる。

2 空気シャワーとチェレンコフ光

高エネルギーの宇宙線やガンマ線が大気に入射すると、大気の原子核との相互作用で 2 次粒子が生じる。この 2 次粒子が再び相互作用を繰り返して粒子数が増殖していく現象を空気シャワーというが、特にガンマ線由来について電磁シャワー、宇宙線由来についてハドロンシャワーと言う。

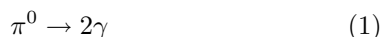
2.1 電磁シャワー

ガンマ線の物質との相互作用は、エネルギーの大きさにより変わってくる。ガンマ線は物質を通過する際に相互作用を起こし、電子を弾き飛ばす。この作用はエネルギーが高くなるにつれて光電吸収、コンプトン散乱、電子-陽電子対生成と過程が変わっていく。入射ガンマ線が $0.511\text{MeV} \times 2 = 1.022\text{MeV}$ を超えると電子-陽電子対生成が起きはじめ、さらに高いエネルギーを持つと、生成した電子、陽電子が

空気中の原子核のクーロン場により加速し制動放射を起こして再びガンマ線を放出する。この過程の連鎖が電磁シャワーという。この時生成された電子、陽電子は多くが真空中の光速となるため、媒質（空気）中の光速を上回っているため、チェレンコフ光が発生する。

2.2 ハドロンシャワー

宇宙線の主成分は陽子などの原子核で、これが大気に突入すると大気中の原子核と相互作用をして多くの二次粒子（多くは π 中間子やK中間子）の生成が繰り返される（核カスケード）。このうち π 中間子は寿命が非常に短く（ 0.83×10^{-16} sec）、ただちに、



と崩壊する。これがそれぞれ上述の電磁シャワーを起こし、チェレンコフ光が発生する。

2.3 チェレンコフ光

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 に依存し、

$$\cos \theta \sim \frac{1}{n} \quad (2)$$

地表付近では $n \sim 1.00028$ で、これに対する $\theta \sim 1.4^\circ$ である。大気上層では n が減少するので θ も小さい。また、速度がほぼ光速のまま電磁シャワーを起こし続けるので、チェレンコフ光が重なりあって発生し、光のフラッシュとなる。地上にはほぼ同時にチェレンコフ光子が到着する。地面に垂直な入射の場合、地上には直径約300m、厚さ1mの「円盤」として降り注ぐ。大気チェレンコフ望遠鏡ではこれを観測する。

3 イメージング

電磁シャワーがつくるチェレンコフ光は、望遠鏡の焦点面で楕円形の像となって現れる。簡単のために視野の中心方向から入射したガンマ線の電磁シャワーについて説明する（図1の点a、b、c参照）。電磁シャワーの各点を直接見ると、望遠鏡から遠いほ

ど視線中心方向に見えるため、高い位置で発生したチェレンコフ光ほど視線中心に見えることになる。そのため、焦点面では、高い位置で発生したチェレンコフ光ほど焦点面中心に来ることになる。この焦点面に光子が降り注いでできる像の特徴を解析する方法を「イメージング」という。

特徴を像から抽出するために、この像を楕円に見立

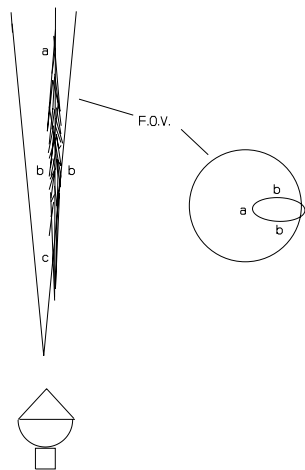


図1: 電磁カスケード（横から）と焦点面にできる像 (Weekes. 2003)

てた上で「イメージパラメータ」を定義する（図2）。降り注ぐ光子によってできる像それぞれについて、このパラメータを計算して蓄積しヒストグラムを作ると、ノイズの除去、到来方向の決定が可能になる。このパラメータの計算には、モンテカルロシミュレーションを利用する。

3.1 宇宙線の除去

先述のように宇宙線もガンマ線と同じように空気シャワーを起こすが、この宇宙線は主に陽子であるため、地球に到達する前に宇宙の磁場によって方向を曲げられてしまい、地球に等方的に降り注ぐほどに発生源の方向の情報を失っている。このため、宇宙線の空気シャワーによるチェレンコフ光は、非常に大きなバックグラウンドノイズとなってしまう。しかし、焦点面に光子が作る像の特徴を判断することで、この事象を取り除くことが可能になる。

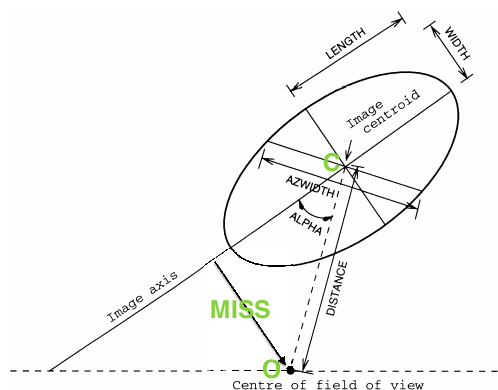


図 2: イメージパラメータ。(Ong, 1998) O (緑字): 焦点中心、C (緑字): 像の重心、MISS: 長軸から焦点までの距離、ALPHA: 像の重心から焦点までの線と長軸がなす角、AZWIDTH: 焦点から見込んだ幅、DISTANCE: 像の重心から焦点までの距離、LENGTH: 像の楕円長軸方向の広がり (標準偏差)、WIDTH: 像の楕円短軸方向の広がり (標準偏差)

宇宙線由来のチェレンコフ光による像は主に以下の様な特徴を持つ (図 3) (図 4)。

1. 宇宙線が発達初期の核カスケードにおいて π 中間子などが獲得する運動量は、ガンマ線由来の電磁カスケードにおいて電子、陽電子が獲得する横向き運動量より大きく、チェレンコフ光の放出される方向の範囲が広がるため、焦点面での像は幅が広がる。
2. 宇宙線は到来方向が等方的なため、像の楕円の向きが一点に集中せず、指向性をもたない。

これらの中でも幅の広い像は宇宙線由来の特徴を一番良く表しており、イメージパラメータにおいて AZWIDTH の高いものを除去することで大半を取り除くことができる。Whipple Telescope で 0.20° 以上のものを取り除くことで、98%以上のハドロンシャワーの除去に成功した。(Hillas, 2013)

3.2 到来方向の決定

宇宙のある方向から到来するガンマ線は電磁シャワーによるチェレンコフ光子は、焦点面の特定の一点を始点として広がるように到着する。電磁シャワー

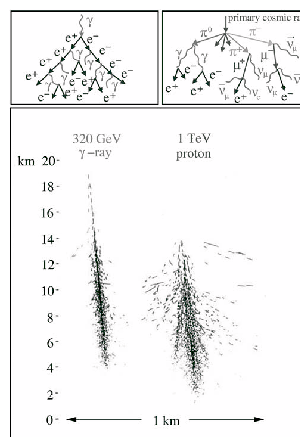


図 3: ガンマ線と宇宙線での空気シャワーの発達の仕事の違い (Weekes, 2003)

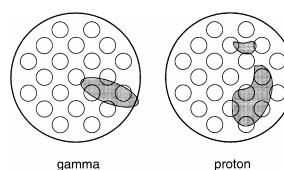


図 4: チェレンコフ光の由来による像の違い (Ong, 1998)

の始点は十分上空にあり、そこから出たチェレンコフ光子はほぼ同じ方向から到達するが、電磁シャワー終点に近づくにつれて入射する光子の方向が着地点の方角にゆがんでしまうからである。よって、図 2 の楕円の長軸の交点を結べば、到来方向を推定できることになる。

さらに望遠鏡を目的の線源方向に焦点を合わせた時、ALPHA=0 にイベントは集中することになる (図 5)。このようにして到来方向を決定できる。

4 ステレオ観測法・変位法

チェレンコフ光は、直径 300m、厚さ 1m の「円盤」として地上に到達する。この円盤を 100m 程度離れた 2ヶ所で同時に検出してイメージングによって天体の方向を求めると、微小な角度差ができる (実際はシャワー始点の方向を見ているため)。これを利用して、シャワーの「三角測量」としてシャワーまでの距離の情報を得て、シャワーの到来方向をより

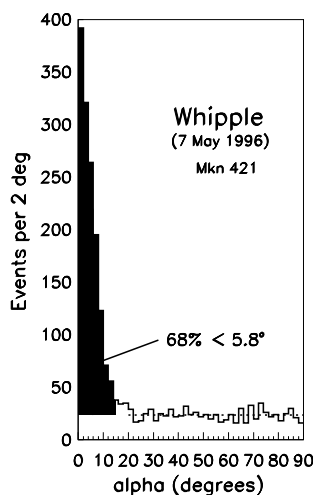


図 5: Whipple 望遠鏡で Mrk 421 の観測結果 (Hillas. 2013)

正確に求めようというのがステレオ観測法である。角度分解能の向上のみならず、シャワーから検出器までの距離がわかることにより、シャワーの発達高度のばらつきが補正されて、エネルギー分解能も向上する。

また、変位法は MAGIC 望遠鏡に用いられている方法で、天頂角が大きい方向のガンマ線源のステレオ観測をする際の方向修正に特に有効である (図 6)。図 6 は、2つの望遠鏡によるそれぞれのイメージを望遠鏡の視野を重ねることで重ね合わせたものである。そのため楕円長軸交点 (赤印) は本来の方向から大きくずれる。ここで、それぞれの望遠鏡視野で統計により得られた到来方向 (緑印) の平均を取ること、本来のガンマ線源方向に近づけられるという方法である。台数を増やすとこれが有効になる。

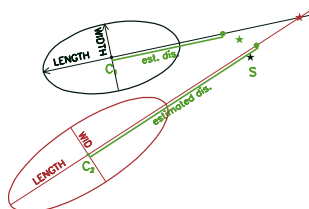


図 6: 変位法 (Hillas. 2013)

5 今後の発展の方向性

今後の大気チェレンコフ望遠鏡の発展の方向性として、以下の 2 つが挙げられる。

5.1 到来方向の精度向上 (特に低エネルギーにおいて)

地上で観測するガンマ線のスペクトル領域を、人工衛星によって得られる低エネルギーガンマ線のスペクトルとオーバーラップすることで、シームレスに 6 桁に渡る波長域でのスペクトルを得ることができる。低エネルギーのガンマ線は、高エネルギーのガンマ線に比べて多く降り注ぐ一方で、電磁シャワーの発達が弱くチェレンコフ光をの放射が高高度で尽きてしまう。そのため地上からは非常に弱い光を捉えることになる。望遠鏡の台数は少なくても良いが、感度を向上させるため、望遠鏡の口径を大型化することが重要である。

5.2 感度向上 (特に高エネルギーにおいて)

さらなる高エネルギー領域の観測が宇宙の高エネルギー現象の理解のために重要だが、人工衛星の観測で一番の不利な点は、検出器を大型化出来ないため、光子フラックスの非常に少ない高エネルギーガンマ線の統計を取れないことであった。地上では望遠鏡を多数設置することで、統計を向上させることができる。高エネルギーガンマ線は電磁シャワーの発達が大きいので望遠鏡は小型で良く、台数を多くすることが重要である。

Reference

井上一、小山勝二、高橋忠幸、水本好彦、「シリーズ現代の天文学 17 宇宙の観測 III」(2008)、日本評論社

A.M.Hillas, Astroparticle Physics 43(2013)19-43.

R.A.Ong, Physics Reports 305(1998)93-202.

T.C.Weekes, "Very high energy gamma-ray astronomy" (2003), Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia.