

MAGIC 望遠鏡を用いた活動銀河核 PKS1441 の解析

深見 哲志 (東京大学宇宙線研究所)

Abstract

我々は地球に到来する宇宙線を観測することにより、遠方に存在する天体に関する様々な情報を得ることができる。中でもガンマ線を通して見る宇宙は、活動銀河核、超新星爆発、ガンマ線バーストなど非常にエネルギーの高い現象で満ちている。高エネルギーガンマ線天体の例として、活動銀河核 (AGN) が挙げられる。AGN は銀河の大部分のエネルギーが中心付近の非常に小さい領域から放射されている天体である。ジェットにおけるガンマ線放射機構等未解明の部分が多く、高精度、高感度の高エネルギーガンマ線観測によってそれらが解決されると期待されており、次世代のガンマ線観測機器の製作が活発に進められている。2000 年代に入り、地上から間接的に高エネルギーガンマ線を観測する、解像型大気チェレンコフ望遠鏡 (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope, IACT) が次々と建設された。IACT では、ガンマ線入射時大気中で電子陽電子対生成、制動放射を繰り返し発達する電磁シャワーを利用し、シャワー発達の過程で生じたチェレンコフ光を観測することにより、最初に到来したガンマ線のエネルギーと到来方向を決定する。IACT の発展により主に数 10GeV から数 10TeV の超高エネルギーガンマ線を高感度で観測することが可能となった。本講演では、現行の高感度 IACT である MAGIC 望遠鏡を用いて、今年 4 月に初めて 100 GeV 以上の超高エネルギー (Very High Energy, VHE) ガンマ線の放射が観測されたブレイザー PKS1441+25 のデータ解析の結果を報告する。

1 Introduction

活動銀河核 (Active Galactic Nuclei, AGN) とは、銀河中心の非常に小さい領域から銀河全体に匹敵するエネルギーを放出し、放射光度が激しい時間変動を示す、活動的な銀河の核部分である。AGN の多くは相対論的な速度のプラズマからなるジェットを伴う。AGN の中心には太陽の 10^6 から 10^{10} 倍もの質量を持つ巨大なブラックホールが存在しており、ブラックホールに降着する物質が重力エネルギーを解放することによりジェットを駆動すると考えられている。

ジェットを持つ AGN の構造を図 1 に示した。巨大ブラックホールに落ち込む物質が赤道面上に降着円盤を形成し、降着円盤の外側は厚いダストからなるトーラスによって覆われている。降着円盤の周囲には、高速で運動する荷電粒子がドップラー効果により広がった輝線を放つ広輝線領域 (Broad Line Region, BLR)、ブラックホールから離れた領域には、粒子が低速度で運動し幅の狭い輝線や吸収線を示す狭輝線領域 (Narrow Line Region, NLR) が存在する。

AGN は、電波強度の高い radio-loud AGN と電波強度の低い radio-quiet AGN の 2 つのグループに分類される。これらの性質は大きく異なり、radio-loud AGN は常にジェットを伴う。観測者がジェットを見

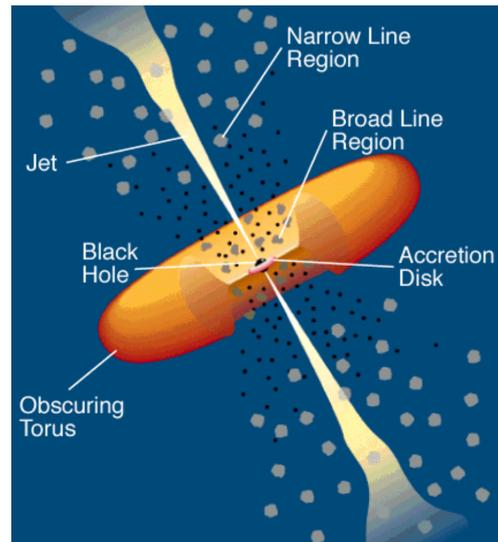


図 1: ジェットをもつ AGN の一般的構造

込む角度によっても分類され、ジェットの方向が観測者の視線方向に近いものはブレイザー、視線方向から外れたものは電波銀河と呼ばれる。

2 About PKS1441+25

ブレイザーは電波強度の違いによりさらに区別され、ある電波波長での輝度が高い場合は Flat Spectrum Radio Quasar (FSRQ)、低い場合は BL Lac 天体と呼ばれる。ブレイザーのエネルギースペクトルには一般的に電波のピーク輝度が高いほどピーク周波数が短いという関係がある(図 2)。この関係を”ブレイザーシーケンス”と呼ぶ。

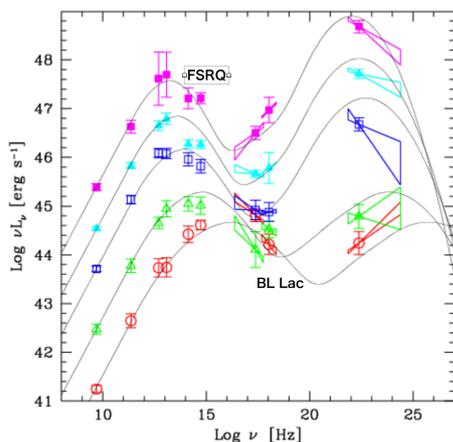


図 2: ブレイザーのエネルギースペクトル

FSRQ は BLLac 天体に比べ数が少なく、VHE ガンマ線を放射する FSRQ は約 5 天体のみが発見されている。FSRQ の高エネルギーガンマ線放射機構の解明など系統的な理解を進めるには、より多くの FSRQ を検出する必要がある。

PKS1441+25 はブレイザーの一種である FSRQ(Flat Spectrum Radio Quasar) に属する。2015 年 1 月以降通常時の何十倍ものフラックスが観測されるフレアと呼ばれる現象が可視、X 線、ガンマ線領域で観測され、今年 4 月に VHE 領域での放射が初めて観測された。PKS1441+25 の驚くべき点は、非常に遠方の天体 ($z = 0.939$) であるにもかかわらず VHE 領域の光子が観測されたことである。高エネルギーの光子ほど低エネルギーの銀河系外背景光

(Extragalactic Background Light, EBL) と電子対生成反応を起こし消滅しやすいため、遠方天体からの VHE 光子は観測されにくい。PKS1441+25 からの VHE 光子の観測によって、ガンマ線生成機構だけでなく、EBL のスペクトルにも制限を与える事が可能である。

今回は 2015/4/18 から 4/27 までの 10 日間、計 26.4 時間の MAGIC 望遠鏡観測データを用いて解析を行った。

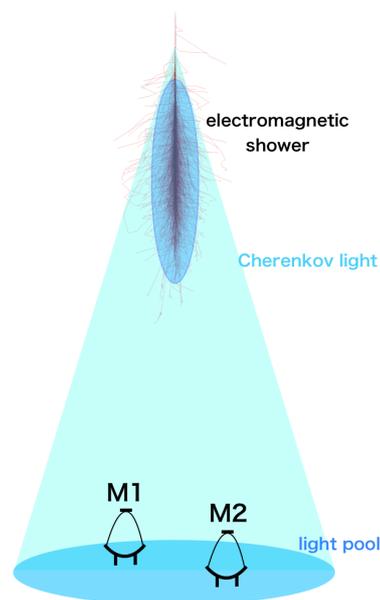


図 3: 入射ガンマ線が作る電磁シャワーとチェレンコフ光による光円錐

3 Observations and Analysis

MAGIC 望遠鏡はカナリア諸島ラパルマ島に建設された、2 台の IACT からなる。観測可能なエネルギーは数十 GeV から数十 TeV であり、衛星望遠鏡では統計数が稼げない VHE 領域をカバーする。各々の望遠鏡は口径 17m、集光面積 $236m^2$ を持ち、焦点面にはイメージング素子である多数の光電子増倍管からなる検出器が搭載されている。

IACT では、地上に到来したガンマ線と大気との相互作用によって生じる電磁シャワーを利用する(図

3)。シャワー中の電子と陽電子が大気中における光速を超えて運動する際に放射するチェレンコフ光を、反射鏡を用いて集光し、焦点面に多数配置した光電子増倍管等の検出器によって検出する。焦点面検出器で得たチェレンコフ光のイメージを元にガンマ線の到来方向とエネルギーを再構成する。

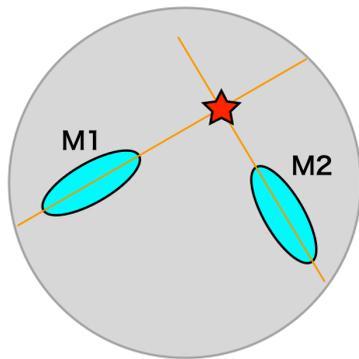


図 4: 焦点面検出器におけるシャワーイメージ

各々の望遠鏡の焦点面検出器におけるチェレンコフ光のイメージを図 4 に示す。M1 と M2 は個々の望遠鏡によるイメージを表し、シャワーの形状を反映した楕円形になる。楕円の長軸の延長線上に最初のガンマ線の到来方向に対応する点が存在し、その点は 2 つの長軸の交点である。このようにシャワーイメージの長軸の交点を求めることにより、到来方向を決定することができる。

今回の解析では MAGIC 望遠鏡の解析ツール (MARS) を用いた。主なバックグラウンドであるハドロンとガンマ線との判別には、入射粒子がガンマ線とハドロンの場合でシャワーの形状が異なることを利用した、機械学習アルゴリズムである random forest 法を採用している。ガンマ線のエネルギー推定は、モンテカルロシミュレーションによって入射ガンマ線の作る電磁シャワーを擬似的に作り、シャワーに関する種々のパラメータとガンマ線のエネルギーの対応表を予め作成し、実際のパラメータ値を対応表にあてはめる、という過程で行われる。

4 Results

検出されたガンマ線の統計数を元にスカイマップと θ^2 プロットを作成した (図 5、図 6)。スカイマップの広がり大きさが、点源を観測した時の広がりとはほぼ一致するので、点源であることが容易に確認できる。

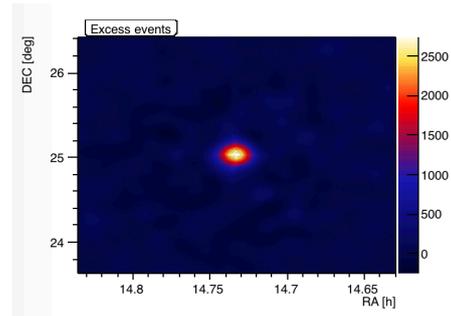


図 5: スカイマップ

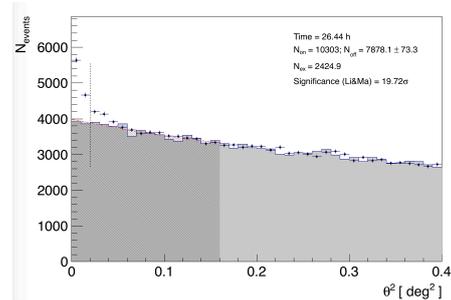


図 6: θ^2 プロット

図 7 は 2015/4/18 2015/4/22 と 4/23 4/27 それぞれの期間での多波長でのエネルギースペクトルである。MAGIC 望遠鏡のデータは最も高エネルギー側のプロットである。実線は適当な磁場強度 B とローレンツファクター γ を仮定して、電波側を相対論的ジェットのスィンクロトロン放射、電子による逆コンプトン散乱とした時のフィットである。PKS1441+25 のスペクトルはこのモデルでよく説明できる。

5 Discussion & Conclusion

計 10 日間のスペクトルを算出した結果、高エネルギー側のスペクトルが電子による逆コンプトン散乱

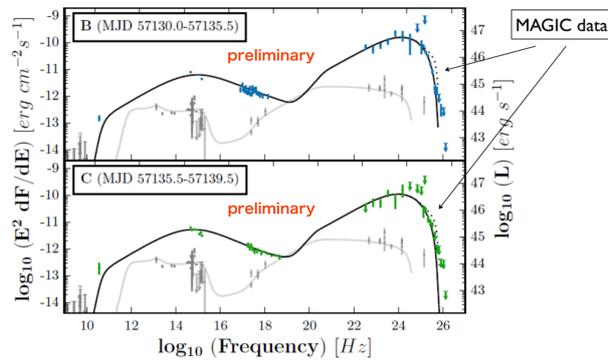


図 7: 多波長のエネルギースペクトル, plot from MAGIC members

でよくフィットすることができた。しかし AGN に特徴的な激しい変動を詳細に理解するためには長時間かつ高時間分解能のライトカーブを得ることが不可欠であり、今後 PKS1441+25 のさらなる観測が求められる。

VHE エネルギー領域での放射が検出された FSRQ は現在までに約 5 個程度と非常に少ない。その中で最も遠方に位置する PKS1441+25 は、これから EBL の量に強い制限を加えることができるだけでなく、FSRQ の系統的な理解を推し進めるのに重要な役割を果たすと考えられている。

Reference

Achterberg et al., *Astrop. Phys.*, 26:282-300, 2006

Igor Oya, PhD Thesis, 2010

Donato et al., 2002

slide from Razmik Mirzoyan, 2015

slides from MAGIC Software School, 2015