2015-03-19 空気シャワーMC研究会@柏

CTA実験とMCシミュレーション

東大宇宙線研 大石 理子

- Imaging Atmospheric Cherenkov Technique
- 現行のIACT実験 +次期計画CTA
- ・ CTAの感度曲線の定義について
- 上記実験群の中でのMonte Carlo Simulationの扱われ方
- ガンマ線の観測結果にMC simulationの精度が与える影響
- ・ IACT分野でのシミュレーションと実データの整合性に対する 認識(電磁シャワー・ハドロンシャワー)

Imaging Atmospheric Cherenkov Technique による超高エネルギーガンマ線観測



電磁シャワーと核カスケードシャワー



Imaging法:主焦点面に投影された チェレンコフ光パターンの特徴

Run 12, event 1, array 0, telescope 2

Number of triggered pixels: 95 of 1855 Number of pixels after cleaning: 84 Number of significant pixels: 1855 Sum of signals in 84 selected pixels: 4506.7 p.e.



Primary: gamma of 0.500 TeV energy at 70 m distance

Run 14, event 1, array 0, telescope 2

Number of triggered pixels: 195 of 1855 Number of pixels after cleaning: 177 Number of significant pixels: 1855 Sum of signals in 177 selected pixels: 7265.1 p.e.



Primary: proton of 1.500 TeV energy at 71 m distance

Stereo 観測による到来方向再構成

- ▶ 複数の望遠鏡により同一のシャワーを観測することで到来方向・コア位置の再構築が可能になる
- ▶ 望遠鏡の台数が増えることによりエネルギー分解能・角度分解能・ガンマ /hadron弁別能力も向上する



現行のIACT実験群+CTA

現在運用中の実験群



のアレイを採用

CTAサイト候補地

北サイト(調査中)

- Canaries (スペイン)
- San Pedro Martir (メキシコ)
- Arizona (米国)

南サイト(交渉中) ● Aar (ナミビア) ● Armazones (チリ)

CTAのarray configuration(案)



SST 4.3m 日本物理学会2013年秋季大会 20pSR-3

CTAの予想ガンマ線感度曲線

50時間観測に対するガンマ線検出感度



CTAでの感度曲線の定義



予想感度とハードウェア設計

- ◆最終的なガンマ線の観測感度はアレイ中の望遠鏡の空間配置・ 検出器各部の性能値・解析手法に依存して変化する。
- ◆開発段階にある実験では、シミュレーションの中でこれらの装置の設計値を変化させ、最終的な性能に与える影響の大きさを定量的に評価しハードウェアの開発にフィードバックをかける
 ▶ 株定のアレイ配置(Array I)に対する





◆ 空気シャワー発展+チェレンコフ光生成部分

→ CORSIKAを利用(H.E.S.S., MAGIC, VERITAS,+CTA)

(**CO**smic **R**ay **S**imulations for **KA**scade http://www-ik.fzk.de/corsika/)

◆ CORSIKA内部での物理の反応モデル(CTAの場合)

•

EGS4

Electromagnetic Hadronic

: QGSJET-II (高エネルギー側) UrQMD (低エネルギー側) 80 GeV/ nucleonで切り替え

電磁シャワー:CORSIKA EGS4 と他 ツール(KASCADE-C++)の比較

◆ チェレンコフ光の地表分布について二つのツール(CORSIKA EGS4, KASCADE-C++)の結果を比較



hadron interaction modelの比較

◆同様にチェレンコフ光の地表分布について複数のツールの結果を比較 (CORSIKAの中でのモデル選択)

◆低エネルギー側:UrQMD, FLUKA

◆高エネルギー側: QGSJET01,SIBYLL 2.1, QGSJET-II



◆低エネルギー側:UrQMDとFLUKAで有意な結果の違いは見られない ◆高エネルギー側:@1 TeVでモデル間の結果の差異は~5%

IACTアレイでの空気シャワー計算時間短縮の エ夫(主にCTAの場合)

- ◆ 同一のシャワーを複数回使いまわす
 - シャワーの位置に対し、望遠鏡のアレイの位置をランダムに動かす。一つの空気シャワーイベントを、インパクトパラメータの異なる複数のイベントであるかのように扱う。
- ◆ Light pool全体に落ちるphotonを計算せず、望遠鏡の位置に落ちるものだけを計算・データとして残す。
- ◆ アレイの配置が固定化される前は、複数のアレイ配置を重ね合わせた 配置(super configuration)に対して空気シャワーシミュレーションを 行い、後段の解析の部分で特定のアレイ配置の望遠鏡のみ取り出す。
- ◆ 大気透過率・鏡の反射率・光電子増倍管の量子効率を考慮してチェレンコフ光生成段階で光子bunchの生成量を減らすことができる



大気によるチェレンコフ光の散乱・減光の シミュレーション中での記述(CTAの場合) ◆生成したチェレンコフ光子の数を減らす"減光"のみを 考慮

◆ チェレンコフ光の角度が微小に変化する形の"散乱"は考慮 されていない(シャワーの横方向の拡がり WIDTH ~0°.05より 十分に散乱角が大きい場合は減光として取り扱っても問題が ないという認識)

◆CTAのシミュレーションでは、 サイト候補地の大気に合わせて MODTRAN(http://modtran5.com) で計算した減光率テーブルを使用



稼働中IACTでのMC simulation dataの 使われ方

◆ 粒子種の弁別(電磁成分と原子核成分)

・検出するのはチェレンコフ光子のみ,シャワー発展の<u>形状の違い</u>で親粒子の種類を弁別・イベント カットを行う

•MCシミュレーションでガンマ線イベント生成させ、得られたパラメータ分布を"お手本"として、 最適なカット値を決定する(MCの精度がカット 後のガンマ線収率に影響を与える)

・現状電磁成分の中でガンマ線と電子を分離することは困難(試みはなされている)

◆粒子のエネルギー決定・有効面積推定

・放出されるチェレンコフ光の総量 ∝ 親のガンマ線のエネルギー MCガンマ線データを用いて変換係数が求められる

・地表でのLight Poolの光密度分布を考慮し 望遠鏡とシャワーコアの距離を用いて光量(エネルギー)補正を行う

その他解析手法の最適化・効率評価はMCガンマ線データを用いて(お手本として)行われる

あるガンマ・ハドロン弁別 パラメータの分布例



Benbow (2004)

ガンマ線とハドロン分離のアルゴリズム

- Hillas parameter based analysis(H.E.S.S.)
- Random Forest analysis(MAGIC)
- 3D analysis
- ...など....

Hillas parameter (イメージの2次モーメント) いずれの方法も Telescope 1 Image Reconstructed Direction Θ <u>雑音サンプル</u> <u>信号サンプル</u> Major Axis Width 実測シャワーデータ MCガンマ線 True Length Distance Direction (>99%宇宙線) Camera centre をサンプルとして、これらの二つ のデータ群の分離を最良にする解 Telescope 2 Image 析パラメータの探索を行う

Scaled Hillas parameter based analysis



MSRW分布の例(H.E.S.S)

Random Forest analysis(MAGIC style)

- MAGICでのRF解析の詳細は NIM A 588(2008) 424
- 多変量解析:入力パラメータは0-2次モーメント+α
- ・ "Forest" ←決定木(Decision Tree)の集合



- ◆ Pure gamma-ray sampleと Background sampleを準備
- ◆ ノードごとに、あるパラ メータでの場合分け分岐を 行う
- ◆ ノードの終端で、属するイベント数を用いてガンマらしさ(ハドロンらしさ)を計算する
- ◆ もっとも弁別能力の高いパ ラメータとその順序はトラ イアルの末に決定される

MC simulation(ガンマ線)の信頼度の評価 (実データとのパラメータ合致度)

◆非常に明るいガンマ線天体を用いて、MC生成ガンマ線と実 データガンマ線のパラメータ分布を比較・検証



:実測データ(background分布を差し引きした後)

点

PKS2155-304の2006年フレア時のデー タ(超優良S/Nデータ)を用いた検証

実データとMC ganmmaのHillas parameterの比較(H.E.S.S.)



K. Bernlöhr(2013) 装置記述部分はsim_telarrayではなく SMASH

- ◆ 南天で観測条件の良好な 活動銀河核(=点源)
- ◆ 2006年 7月のgiant flareを H.E.S.S.で観測
- ◆ 1.5時間観測で168σ=超高 S/N (ガンマ線ビームテ ストの代替)
- ◆ Hillas parameter(Width, Lengt)を実データとシ ミュレーションデータで 比較すると5%レベルで一 致
- ガンマ線のシミュレー
 ションについては実デー
 タを十分な精度で再現していると理解

実測とsimulationの間でガンマ線Image parameterの分布がずれていると何が起きるか



- ◆パラメータカットを行った後、観測天体の方向から有意な数のexcess eventが残ったケースを想定
- ◆イベント数からガンマ線フラックスに換算する際のacceptanceが誤認される
- ◆ 結果的にfluxの値が真の値からずれる
- ◆ 集光効率の値が実測とMC simulationの 間でずれている場合→再構築エネルギー のずれにつながる
- ◆実データ解析で有意なexcess countが出た場合も、best significanceを与えるカット位置がsimlationと同一か、カット値(解析法)を変化させてもフラックスの値は一定であるか等、signalの分布がMC simulationと同一で真にガンマ線信号であるかの検証を行うことは重要



IACT分野での観測結果によるシミュ レーションの検証

◆ <u>電磁シャワーについて</u>

- ガンマ線天体からの信号を使用した検証では少なくとも100 GeV 10 TeV の領域についてはCORSIKA+EGS4は十分な精度で実データを再現できてい ると認識されている
- 宇宙線電子とガンマ線の(僅かな)Xmaxの違いを用いて電子スペクトルも計 測されており、E>1 TeV領域で他の飛翔体の結果と矛盾がない
- 検証OK、改善の必要性は高くないという認識

◆ ハドロンシャワーについて

- 実データとシミュレーションの一致度評価のスタディ例は多くはない
- シンプルに実データのHillas parameterの分布を使って各モデルとの合致 度の評価は可能。CTAではアレイが広範(~3km四方)になり、同一シャ ワーを多数の(>10台)望遠鏡で観測できるようになり、シャワーの3次元 的な再構成の精度が向上してより詳細なシミュレーションとの比較ができ るようになる。
- ・ Hillas parameterの他にもリングイメージを使って実データからミューオンを同定・計数してシミュレーションでの生成数との比較が可能か。
- Direct Cherenkov光を用いた電荷同定を用い、重元素と軽元素でのシャ
- **ワー形状の差異をシミュレーションと比較可能か。**

IACTでのMCシミュレーションの使われ方について:簡単な振り返り

- ・ 空気シャワー記述部はCORSIKAが主流。装置応答の記述部分は各研究グループで異なる。
- MC simulationで生成されたガンマ線のパラメータ分布をもとに解析条件 (背景雑音除去法)の最適化・ガンマ線エネルギーの再構築・有効面積の 推定を行う。従ってMC中の電磁シャワーの記述の精度は最終的に得られる ガンマ線フラックスに影響を与える。
- ガンマ線に関しては、強いガンマ線天体を用いて、実測シャワーデータと シミュレーションデータとの合致度の検証が行われている(現状のEGS4の 記述で十分な精度で合致していると考えられている)。
- ガンマ線検出器としては OFF-source dataを取得しそれに対する超過事 象数を評価する上では、background 宇宙線シャワーについてはMCシミュ レーションとの合致度は(γ線ほどは)重要視されない。ただし同時に現状 ではoff-sourceの定義が難しい非常に広がった天体の観測(extragalactic diffuse componentなど)は困難になっている。

CORSIKA PHYSICS :

Electromagnetic(EGS4)

- EGS4 (Nelson et al., 1985) full simulation considering
 - o e-e+ annihilation
 - Bhabha scattering
 - o Bremsstrahlung
 - Moller scattering
 - Multiple scattering (Moliere's theory)
 - Compton scattering
 - o e+e- pair production
 - Photoelecrtric reaction

標準的なEGS4コードにいくつか修正が加えられている (詳しくは→CORSIKA physics guide)

MC-WPの位置付けとCTA-Japan MC WPの活動内容



 空気シャワー発達・検出器応答の記述を 含むシミュレーションを用い、望遠鏡配 置の最適化・ハードウェアパラメータの 最適化・各種天体に対する観測モードと 解析手法の有効性評価などを行う
 他のWPとの連携・情報交換が重要

CTA-Japan MC WPの活動

- LST4台によるGRB観測用広視野観測モード (Divergent pointing mode)の有効性評価
- ハードウェアの実測性能値を取り入れたシ ミュレーション(トリガーレートに与える 影響の検証など)