

Fermi-LAT のイベント再構成とバックグラウンド識別

高橋 光成 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

Fermi ガンマ線宇宙望遠鏡の Large Area Telescope (LAT) は高エネルギーガンマ線観測の決定版的プロジェクトである。ガンマ線観測の最大の障害はガンマ線よりはるかにフラックスの大きい宇宙線バックグラウンドである。LAT では3つの検出器からの情報を元にイベントの特徴を示す多数のパラメータを導出し、モンテカルロシミュレーションに基づく Classification Tree にかけることでバックグラウンドを排除している。本講演ではこの解析がどのように行われているかについてレビューするとともに、今後数十 GeV から数百 GeV でのイベント数を増加させる解析法の研究について述べる。

1 イントロダクション

電磁波の中でも最果てに位置するガンマ線を扱うガンマ線天文学は天文学の他の分野に比べ特異な面を持っている。ガンマ線のエネルギー領域では光は波よりも粒子としての性質が強く表出する。そのためガンマ線の観測装置は望遠鏡よりも高エネルギー粒子の検出器と言うべきものになる。

Fermi-LAT (Large Area Telescope) は Fermi ガンマ線宇宙望遠鏡に搭載された2つの観測装置のうちの1つで、加速器実験で有名なアメリカの SLAC 国立加速器研究所を中心に、日本を含む9カ国共同で開発された。2008年の Fermi 打ち上げ以来観測を続けている。観測帯域は 20 MeV から 300 GeV と実に4桁にわたり視野は 2.4 sr と全天の約4分の1をカバーする。

2 検出装置

光子は電荷を持たないため、物質と何らかの相互作用を起こさせて電気信号としなければ検出することは出来ない。数百 MeV 以上の極めて高いエネルギーにおける光子の反応は電子陽電子対生成が支配的である。物質中に入射した高エネルギーガンマ線は対生成により高エネルギーの電子と陽電子を生む。この電子と陽電子は物質中で制動放射によりガンマ線を放射し、ガンマ線がまた対生成を起こす。このよう

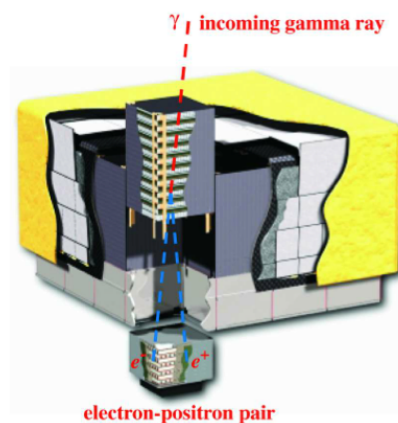


図 1: Fermi-LAT (?)

にして電子・陽電子とガンマ線が増殖する現象を電磁シャワーという。LAT はこの電磁シャワーを捉えるように設計されており、Anti-Coincidence Detector (ACD)、Tracker (TKR)、Calorimeter (CAL) の3種の検出から成っている。ACD については後に回し、TKR と CAL について述べる。LAT は 4x4 個のタワー状のモジュールで構成されているが、各モジュールの上部に位置しているのが TKR、下部が CAL となっている。

Tracker (TKR) TKR は電磁シャワーの飛跡の位置を正確に測定し、ガンマ線の到来方向を精度よく求めることを目的にしている。電荷の大きいタンゲステンのシート 16 層をガンマ線から電磁シャワー

への converter とし、18 層の Silicon Strip Detector (SSD) と交互に重ねることで、高い検出効率と、電子や陽電子の通過位置を数百 μm 以下で記録出来る高い精度を両立している。SLAC を中心に蓄積されてきた加速器実験の技術を活用して開発された。

Calorimeter (CAL) CAL はガンマ線が落としたエネルギー量を測定することと、電磁シャワーの形状をイメージングしてバックグラウンドの識別に用いることが目的である。CAL は角材状の CsI シンチレータを 7 列 10 段にジェンガのように組み合わせることで作られている。角材の両端には PIN フォトダイオードが備わっており、各々で測定された光量を比較することでそのシンチレータで反応が起こったということだけでなく、どの箇所で起こったかまで示すことが出来る。さらにすべてのシンチレータからの情報を合わせれば電磁シャワーの像を正確に再現することが可能である。

3 バックグラウンド識別

ガンマ線観測の最大の敵はシグナルを凌駕するフラックスを持つ宇宙線バックグラウンドである。その大部分を陽子が占め、他の成分としてその他の原子核、電子、陽電子、中性子などが存在する。これらのバックグラウンドを識別して排除しなければ、ガンマ線を解析することができない。

Anti-Coincidence Detector (ACD) そのためにまず用いられているのが Anti-Coincidence Detector (ACD) である。ACD はタイル状またはリボン状の薄いプラスチックシンチレータであり、TKR と CAL の前後左右と上方を取り囲むように配置されている。薄いためにガンマ線であれば反応すること無く通過し、荷電粒子であればシンチレーションを起こす。ACD がトリガーされたイベントを排除することにより、バックグラウンドのかなりの部分を落とすことが出来る。

イメージング しかし、ACD には隙間も存在するなど完全ではないため、さらなるバックグラウンド識別の仕組みが必要である。LAT では TKR と CAL

におけるシャワーのイメージングによりこれを実現している。先述のようにガンマ線が物質中に入射した時には電磁相互作用により電磁シャワーが起こるが、陽子や原子核などが入射した場合は核相互作用によるハドロンシャワーが起こる。これらはそのトポロジーに異なった特徴を示す。たとえば、ハドロンシャワーは電磁シャワーに比べ横に広がった分布を示す傾向がある。これらの特徴を用いてガンマ線とバックグラウンドを識別する。

多変量解析 実際には 3 種の検出器のデータを元にイベントの特徴を示す多数のパラメータを導き、これらをモンテカルロデータを用いた多変量解析にかけることによってそのイベントがどれだけガンマ線らしいかを評価している。高水準解析で使われるデータは残存バックグラウンドのレベルによってクラス分けされており、例えば突発天体の解析に使われるデータクラスでは統計数を増やす代償にバックグラウンドレベルが比較的高くなっている。多変量解析の手法としては Boosted Decision Tree (BDT) 法が用いられている。

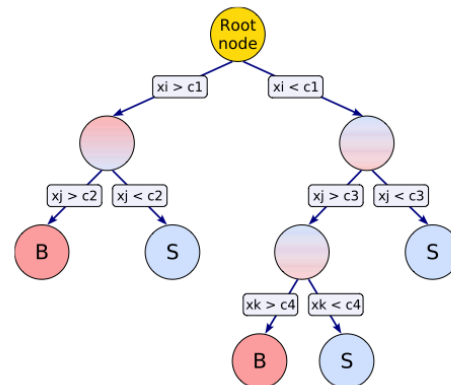


図 2: BDT 法の模式図 (?)

BDT 法では複数のパラメータを用意し、各パラメータの値によって木が分岐するようにイベントが分けられていき、分けられた先がほとんどガンマ線、あるいはほとんどバックグラウンドとなった時点でストップする。パラメータがどの値のところイベントを分岐させるかというのが問題になるが、これはモンテカルロシミュレーションによって生成され

たガンマ線、バックグラウンドのデータによって教育される。そしてその後、実際のガンマ線かバックグラウンドか分からないデータを tree にかけて判定を行う。

4 Pass8 での改善

LAT のデータ解析は定期的にアップデートされている。打ち上げ時の Pass6 から、2011 年の Pass7、現在リリースの準備が行われている Pass8 と、運用の過程で得られた知見、イベント再構成、モンテカルロシミュレーションの進歩などによりパフォーマンスを向上させている。Pass8 では特に 100MeV 以下や 100GeV 以上という観測帯域の限界両側において統計数やバックグラウンドレベルに大きな改善がなされている。

5 CalOnly analysis の開発

特に数十 GeV 以上の帯域では観測の限界はイベントの統計に依存している。またこの領域の観測は次世代望遠鏡アレイ CTA 計画が進行している超高エネルギー領域との連携においても極めて重要である。これを改善するため、発表者は CalOnly analysis と呼ばれる解析の開発を進めている。現在の解析では、TKR と CAL 両方をトリガーしたイベントだけを解析しているが、CAL だけをトリガーしたイベントも活用することによって統計数を増やそうというアイデアである。使える情報が減るためバックグラウンド識別が難しくなるが、多変量解析を最適化することによって 30% - 50%ほど統計数を増やせると見込んでいる。

6 まとめ

Fermi-LAT はその規模、高度な技術から高エネルギーガンマ線観測の決定版的プロジェクトと言われているが、打ち上げ後も解析を洗練させることによってパフォーマンスを向上させている。

Reference

- W. B. Atwood et al. 2009. APJ. 697 1071
L. Rochester et al. 2010. ArXiv 1001.5005.
M. Ackermann et al. 2012. APJ. 203 4
A. Hoecker et al. 2013. ArXiv:physics/0703039