

MeV ガンマ線観測に用いる次世代コンプトンカメラの開発

小田 真 (京都大学大学院 宇宙線研究室)

Abstract

現状では MeV ガンマ線の観測は他の領域より進んでいない。これはこの領域特有のバックグラウンドの多さからくる観測の難しさによる。我々のグループはこの状況を改善するため、MeV ガンマ線を高感度で観測可能な新しい検出器である電子飛跡検出型コンプトンカメラ (Electron Tracking Compton Camera, ETCC) を開発している。ETCC を利用した気球実験計画 Sub-MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment (SMILE) の中で 2014 年以降には天体のイメージングを目標とした気球実験 SMILE-II を行う予定である。この実験に向けて ETCC を改良中であり、大型化とそれに伴うシステム周りの整理を進めている。

1 MeV ガンマ線の天文学的意義

高エネルギー天体物理は宇宙現象の理解に大きく貢献している分野であり、その観測の範囲は電波から TeV 領域のガンマ線まであらゆるエネルギーにわたっている。

その中で我々 SMILE グループは MeV の領域に注目している。MeV ガンマ線に関わる天体や現象を挙げていくと、超新星残骸からは放射性同位体の崩壊によるガンマ線の放出がみられる。Fe より重い元素は超新星爆発によってつくられると考えられており、このガンマ線を観測することで元素合成過程の様子が分かる。活動銀河核からはジェットによるガンマ線の放出がみられるが、そのスペクトルを観測することでどのような放射機構（制動放射、シンクロトロン放射、逆コンプトン散乱など）が効いているのかが分かる。ガンマ線バーストによってみられる MeV 領域のスペクトルはシンクロトロン放射でうまく説明することが出来てはいるが、まだ不明な点がほとんどでさらに多くのデータが必要とされている。パルサーは様々な領域の放射線を出すことで知られるが、その内の一つである有名なかにパルサーは MeV 領域だけにある特徴的な光度曲線をもっているが、より正確な観測によってその理由が明らかになるかもしれない。ブラックホールの存在は未だにはっきりと示されていない。ブラックホールほどの強い重力場の下では、重力によって加速された陽子同士の pp 反応によって π 中間子がつくられる。そのうちの π_0

からはおよそ 70MeV のガンマ線が放射され、これを観測できれば天体がブラックホールであることの強い証拠になる。このように MeV ガンマ線を観測することで多くの重要な天体現象の解明につながる事が期待される。しかしながら、従来の検出器ではこの領域で高い感度を達成しておらず新しい検出器の開発が必要とされている。

2 MeV ガンマ線観測の現状とその困難性

MeV ガンマ線は他の領域に比べて観測された天体数が少ない。これまでで最も良い感度で MeV 領域の全天観測を行った CGRO 衛星の COMPTEL 検出器は定常天体を約 30 個発見したのに対して、GeV 領域で全天観測を行っている Fermi 衛星は定常天体を約 2000 個発見している。まず MeV 以下のエネルギーである紫外線や X 線と比べてフォトンのカウントレートが小さい。にもかかわらず透過性の強さから遮蔽によるバックグラウンド除去が難しい。さらに原子核反応では MeV 程度のガンマ線を伴うことが多く、宇宙線と検出器筐体との相互作用で生じるガンマ線などのバックグラウンドは特に MeV 領域での観測を制限してしまっている。

COMPTEL ではこの大きなバックグラウンドが原因で感度が悪くなってしまっていた。そこで SMILE グループはバックグラウンドを積極的に除去するこ

とで、最終的には図 1 の破線で表した COMPTEL の 10 倍ほどの感度を実現し、衛星上での全天観測を目指している。

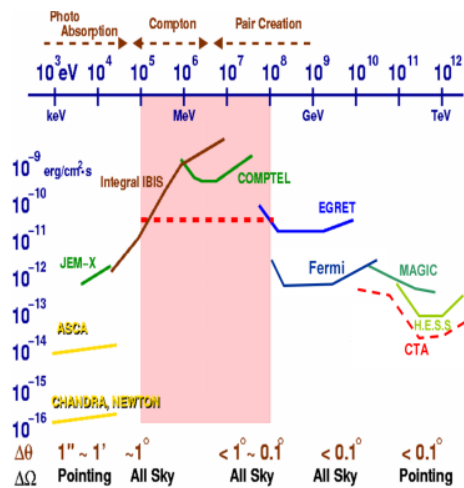


図 1: X 線から Te ガンマ線での観測感度

3 次世代コンプトンカメラ ETCC

我々は次世代の検出器として、効率的にバックグラウンドを除去できる電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) の開発を進めている。図 2 のように、ETCC は μ -TPC という高空間分解能ガス飛跡検出器とその周りの無機シンチレータで構成される。

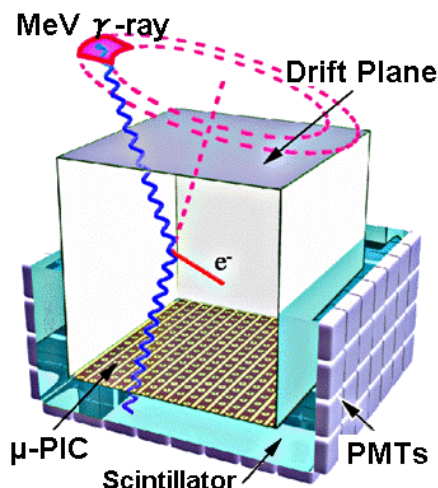


図 2: ETCC の構造と検出の様子

MeV 領域のガンマ線ではコンプトン散乱が最も優位な反応になるが、散乱ガンマ線のエネルギーと散乱方向をシンチレータで、反跳電子のエネルギーと反跳方向を μ -TPC で検出する仕組みになっている。

COMPTEL では反跳電子の反跳方向が測定できなかった。そのためガンマ線の到来方向はリング上までにしか限定できず、少なくとも 3 光子を捕らえて円の重なる点を到来方向としていた。

一方 ETCC では、 μ -TPC 内で起こるコンプトン散乱の反跳電子は飛跡上のガスを電離し、生じた電子を調節した電場によって読み出し用の基盤を設置した底面へドリフトさせる。底面基盤のアノードとカソードのストリップは直交しており、 $\sim 120\mu\text{m}$ もの高い位置分解能で反跳電子の 2 次元の飛跡を捉えることができる。アノード、カソードへの到達時間で高さの情報も加えて飛跡を 3 次元的に描像できる。電子飛跡検出の様子は図 3 に示されている。

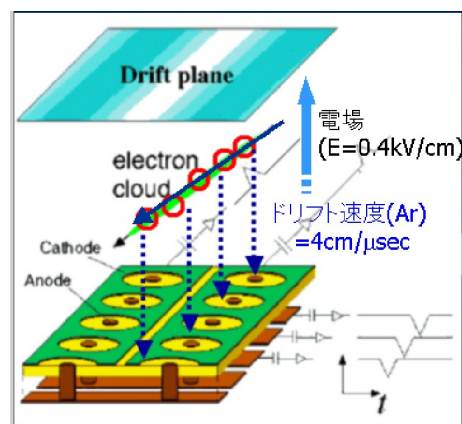


図 3: μ -TPC でのドリフト

よって運動の自由度が全て測定可能なので 1 光子毎にコンプトン散乱を完全に再現することができる。さらにコンプトン散乱の運動学と幾何学的な関係式が一致するイベントだけを選ぶことによってバックグラウンドを除去でき、MeV 領域における高感度な観測を実現している。またガンマ線の入射方向が特定できるので、イメージング能力があること、検出器おおよそ上方からなら飛来するガンマ線を検出できるので視野が広い (~ 3 str) ことも ETCC の強みである。図 4 に COMPTEL と ETCC のコンプトン散乱の再現性の違いを示す。

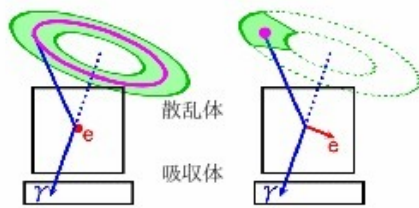


図 4: 検出方法の比較
COMPTTEL (左) と ETCC (右)

4 ETCC を用いた気球実験 SMILE

ETCC を衛星に搭載する前段階として気球実験を行っている。2006 年には ETCC のバックグラウンド除去能力を検証することを目的に気球実験 SMILE-I を行った。この実験では図 5 のように、10cm × 10cm × 14cm の μ -TPC の周りに GSO シンチレータを取り付けた構造でセットアップした。シンチレータは 1 ピクセル $6 \times 6 \times 13 \times \text{mm}^3$ のものを底面と側面に合わせて 2048 ピクセル設置した。岩手県三陸から打ち上げ、高度 35km、約 4 時間の観測を行ったが、荷電粒子など様々な宇宙線が降り注ぐ中でガンマ線のイベントを取り出すことに成功、ETCC バックグラウンド除去能力の高さが示された。

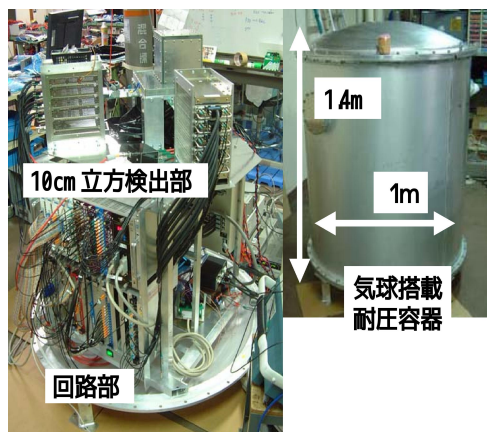


図 5: 10cm 立方の ETCC システム

次の目標は実際の天体のイメージング能力を検証

することである。そこで、かにパルサーや白鳥座 X-1 のような明るい天体のイメージングを行う気球実験 SMILE-II を計画しており、2014 年以降にスウェーデンのキルナで打ち上げ、2 週間ほどの観測を行う予定である。

5 SMILE-II に向けた ETCC の性能と改善点

SMILE-II の実現に向けて ETCC の性能改善が必要とされている。シミュレーションにより、有用な観測を行うためには SMILE-I のときよりも 50 倍以上の有効面積がなければならないことが分かっている。SMILE-I では入射ガンマ線のエネルギー 662keV において、有効面積は $\sim 1.1 \times 10^{-3} \text{cm}^2$ 、エネルギー分解能は $\sim 12\%$ 、角度分解能は ARM $\sim 12^\circ$ 、SPD $\sim 200^\circ$ を得ていた。

ここで ARM と SPD とは図 6 で定義される角度分解能を評価するパラメータで、それぞれ散乱角の精度 Angular Resolution Measure (ARM) と散乱平面の精度 Scatter Plane Deviation (SPD) を表す。

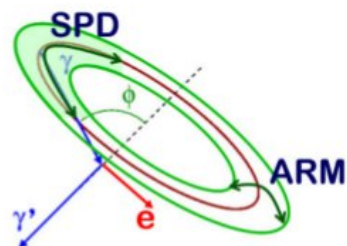


図 6: ARM と SPD の定義

有効面積を稼ぐために図 7 のように、ETCC の大型化を行い 30cm 立方の μ -TPC に変更した。それに伴いいくつかの変更を施した。まず周りのシンチレータは底面と側面に合わせて 6912 ピクセルと大幅に増加させた。また SMILE-I では信号処理に NIM モジュールを利用していたが、増大した消費電力・スペースを抑えるために独自の省電力読出基盤を開発した。

表 1: 目標 (天体イメージング) 達成のための変更点と性能比較

	SMILE-I	SMILE-II	効果
μ-TPC の大きさ 大型化に伴う変更	10 × 10 × 14 × cm ³ 2048 ピクセルのシンチレータ NIM モジュール	30 × 30 × 30 × cm ³ 6912 ピクセルのシンチレータ 独自の読出基盤	有効面積増大 有効面積増大 省電力・小スペース化
飛跡取得アルゴリズム ガス	大強度 X 線用高速処理特化 Xe(,Ar,C ₂ H ₆)	ヒット数と正確な飛跡取得向き Ar(CF ₄ ,i-C ₄ H ₁₀)	有効面積増大 角度分解能向上
性能@ 662keV	有効面積 ~ 1.1 × 10 ⁻³ cm ² エネルギー分解能 ~ 12% ARM ~ 12° SPD ~ 200°	有効面積 ~ 1.1 × 10 ⁻¹ cm ² エネルギー分解能 ~ 9% ARM ~ 10° SPD 未評価	

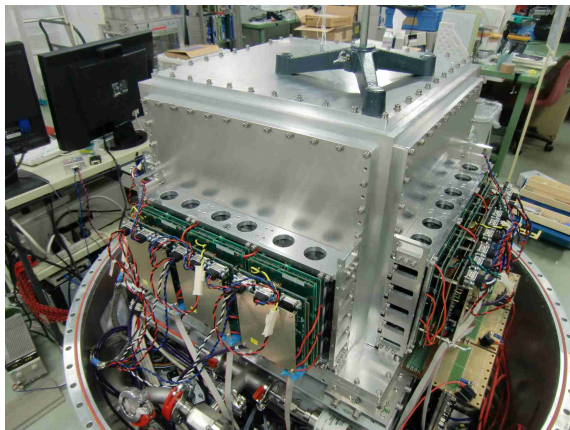


図 7: 30cm 立方の ETCC システム

飛跡取得のアルゴリズムは SMILE-I では X 線イメージング用のもので、扱う情報量を少なくすることで高速処理に特化させていた。検出効率を上げることを考えると問題となる処理はいくつかあり、その中で最も影響の大きいものがアノードとカソードのヒットのコインシデンスを 10ns で取っていたことである。この 10ns では正しいイベントでも処理時間などの遅延で簡単にタイミングがずれる。結果として全体のヒット数の 3 割程度しかコインシデンスを取れていなかった。そこで新たなアルゴリズムとして、コインシデンスを取らずアノードとカソード全てのヒットを記録、コインシデンスはオフラインで最適な幅を設定して行うことにした。

また SMILE-I では検出効率を上げるためチェンバー内のガスは原子番号の大きい Xe ガスを主成分として 1 気圧で封入した。Xe は多重散乱も多く起こっ

てしまうので角度分解能は悪くなっていた。SMILE-II ではチェンバー内のガスは Ar を主として 1 気圧で使用することで SMILE-I よりも高い角度分解能となっている。表 1 に変更点をまとめている。これらの工夫の結果、天体観測のために要求されている数値を満たすことが予測できる。

残された問題点もいくつかある。SMILE-I のときとセットアップが変わったことから、新たに圧力容器系の熱環境試験を行ったが以前よりも冷えすぎることが判明し、ヒーターを取り付けるなどの改善案を考えている。一番大きな問題点として、大型化によってトリガーレートが増加、デッドタイムが急激に増大したことに対応する新しいデータ取得システムを構築する必要がある。また天体を観測するので気球方位角制御システムも必要となる。これらの点を改善することが気球観測実験 SMILE-II に向けた現在の課題である。

Reference

Nolan, P. L., et al., 2012. ApJS,199,31