

## 電子飛跡検出型コンプトンカメラにおける飛跡取得の改良

中増 勇真 (京都大学大学院 理学研究科)

### Abstract

MeV ガンマ線での観測は、GRB(Gamma Ray Burst) の発生機構や超新星爆発の機構など、さまざまな天体现象を理解するうえで重要なものである。しかし、MeV 領域での全天観測はこれまで COMPTEL や INTEGRAL 衛星が行ったが、他の波長領域に比べて検出感度もよくない。この原因は、MeV 領域では、物質との相互作用はコンプトン散乱が優位になり、到来ガンマ線のエネルギーを測定するのが難しい上、透過力が高く集光も難しいため、到来方向を求めにくいことにある。また、宇宙線と検出器との相互作用から生じる大量のバックグラウンドが存在することも原因として挙げられる。そこで、我々のグループは優れたイメージング能力を持つ全く新しい検出器として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。COMPTEL では、ガンマ線の到来方向を円環上に制限するのみであったが、ETCC ではコンプトン散乱による散乱ガンマ線のエネルギーや吸収点だけでなく、反跳電子の三次元的な飛跡も測定することでガンマ線の到来方向を円環の一部に絞ることができる。しかし、従来の ETCC では、反跳電子の三次元的な飛跡を得る際に散乱点と反跳方向の決定精度を上げる余地があった。そこで、反跳電子に電離された電子雲の信号の持続時間 (Time Over Threshold, TOT) の値に応じて補正をかけることで、より細かく飛跡の構造を取ることができるようになった。本講演では、ETCC での飛跡解析の改善された点について報告する。

## 1 MeV ガンマ線天文学

MeV ガンマ線での天体観測は、GRB や超新星爆発の機構など、さまざまな高エネルギー天体现象を理解するうえで重要である。超新星爆発の瞬間に激しい核反応が起こり、Fe より重い元素や、特定のエネルギーのガンマ線 (ラインガンマ線) を放出する放射性同位元素がつくられる。放射性同位元素の崩壊にともなうラインガンマ線を測定できれば、その元素の存在比を知ることができる (井上一・ほか編 2008)。これによって、元素生成の過程や生成された元素が宇宙に広がる様子が解明される。

しかし、MeV 領域での観測はあまり進んでいない。1991 年に打ち上げられた CGRO 衛星 (Compton Gamma Ray Observatory) に搭載された検出器 COMPTEL (Compton Telescope)(V. Schönfelder, et al. 1993) によって衛星観測が行われたが、10 年間の観測で発見された天体数は約 30 個と少ない (V. Schönfelder, et al. 2000)。また、MeV 領域での衛星観測は COMPTEL と INTEGRAL 衛星 (C. Winkler, et al. 2003) でしか行われていない。MeV 領域

観測の困難の原因は MeV 領域特有のバックグラウンドである。宇宙線が衛星と相互作用して発生する大量のガンマ線や中性子、検出器外部で他の検出器で散乱されたガンマ線、大気からのガンマ線や中性子といったすべてがバックグラウンドとなってしまう (G. Weidenspointner, et al. 2001)。そのため、MeV ガンマ線検出器では強力なバックグラウンド除去能力が必要とされる。また、イメージングの困難さも原因にある。ガンマ線は透過性が高く、集光することが難しい。さらに MeV 領域のガンマ線と物質との相互作用はコンプトン散乱が優位となる。コンプトン散乱では、散乱ガンマ線と反跳電子が生じ、散乱ガンマ線は到来方向の情報もエネルギーも持たないため、イメージングが非常に困難である。

## 2 電子飛跡検出型コンプトンカメラ

MeV ガンマ線の、物質との相互作用で最も優勢なものはコンプトン散乱である。そのため、MeV ガン

マ線を検出する際はコンプトン散乱を利用し、反跳電子と散乱ガンマ線を測定するために 2 つの検出器を組み合わせて用いる。このような検出器をコンプトンカメラと呼ぶ。

COMPTEL は衛星軌道上で初めて観測を行ったコンプトンカメラであり、MeV 領域での観測を切り拓いた。COMPTEL は上部の液体シンチレータと下部の NaI(Tl) シンチレータで構成されている (図 1)(V. Schönfelder, et al. 1993)。上方向からガンマ線が到来すると液体シンチレータでコンプトン散乱を起こし、そこで反跳電子と散乱ガンマ線が生じる。散乱点と反跳電子のエネルギーを液体シンチレータで測定し、散乱ガンマ線のエネルギーと吸収点を NaI(Tl) シンチレータで測定する。散乱点と吸収点を結ぶことで散乱ガンマ線の方法は決定できる。しかし反跳電子の方向が測定できないため、到来ガンマ線の方法は円環上にしか制限されず (図 2)、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。これに加えて、前述のような大きなバックグラウンドが原因で検出感度が悪くなってしまっていた。

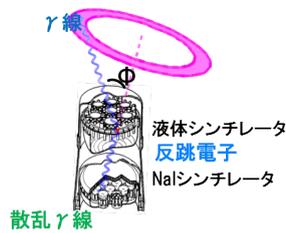


図 1: COMPTEL の構造 (V. Schönfelder, et al. 1993)

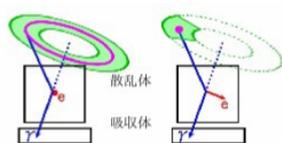


図 2: 検出方法の比較 COMPTEL (左) と ETCC (右)

そこで、我々は次世代の検出器として、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 3)(Tanimori. T, et al. 2015)。図 3 の ARM(Angular Resolution Measure) は入射ガンマ

線の散乱角の角度分解能であり、SPD(Scatter Plane Deviation) は反跳電子の散乱平面の決定精度である。ETCC の底面と側面はシンチレータで囲われており、そこで散乱ガンマ線を吸収し、散乱ガンマ線の吸収点とエネルギーを測定する。ETCC にはガスが封入されており、コンプトン散乱で生じた反跳電子が飛跡上のガスを電離する。底面には電離電子の読み出し基板を設置して、上面から底面に向けて電場をかけておくことで、底面へ電離電子をドリフトさせる。底面基板では、アノードとカソードのストリップが直交しており、電離電子を 2 種類のストリップで  $x$  軸,  $y$  軸として 2 次的に読み出すことができる (図 4)。この際、電子を増幅させて読み出し、微小な信号も電氣的に得られる。また、底面への到達時間より高さの情報 ( $z$  軸) も加えて、電子の飛跡を 3 次的に決定できる。これにより、1 光子ごとにガンマ線の到来方向とエネルギーを決定することができる (図 2)。このように ETCC ではガンマ線の分光イメージングが可能であるので、方向に制限をかけることで大気や衛星からのバックグラウンドを除去することができる。また、電子飛跡とエネルギーから求められるエネルギー損失によって、電子でない中性子などのバックグラウンドを分離できる。さらに、コンプトン散乱の、運動学的に導かれる散乱方向と反跳方向のなす角が一致する成分のみを取り出すことで、偶然同時計数やシンチレータで散乱されたイベントなど、コンプトン散乱以外のイベントを除去することができる。このようにして、MeV 領域における高感度な観測を実現している。

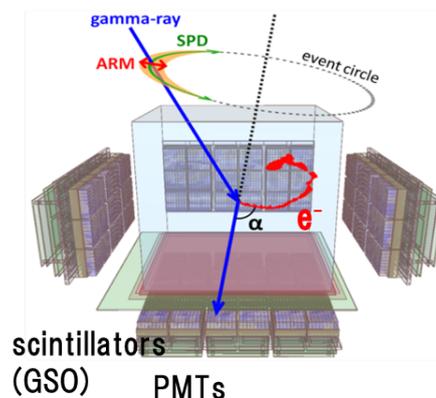


図 3: ETCC の構造

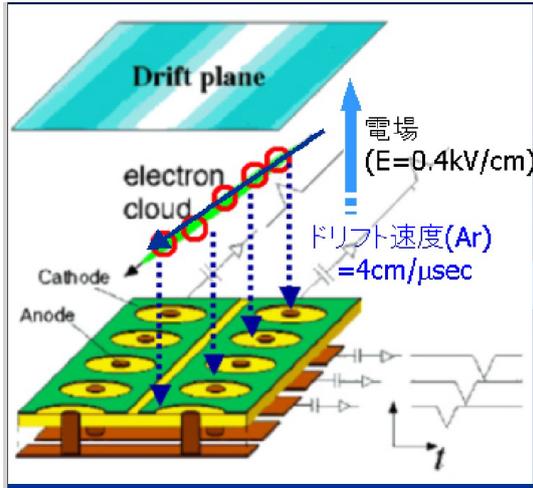


図 4: 電離電子の読み出し

### 3 TOT 補正

30 cm 角のガス飛跡検出器を用いた ETCC を用いることで有効面積が 1 cm<sup>2</sup> 程度、SPD は 200 度、ARM は 5.3 度を達成した (Tanimori, T, et al. 2015)。電子飛跡を用いない従来のコンプトン法に比べ、ETCC の検出有意度は約 3 倍改善した。図 5 は 3 つの <sup>137</sup>Cs 線源を測定し、同じデータに対して、解析に電子飛跡を用いる場合と用いない場合での検出有意度マップである。

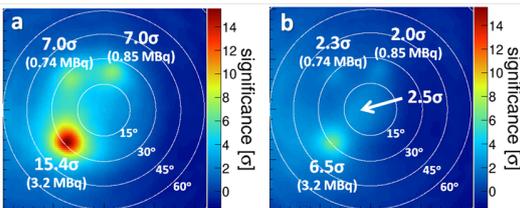


図 5: 検出有意度マップ (データは左右同じ) ETCC 法 (左) と従来のコンプトン法 (右)

ETCC では、検出した信号の立ち上がりから立ち下りまでの持続時間 (TOT, 図 6) を記録している。電離電子の信号は増幅器などの時定数分だけ時間方向に広がっているため、その TOT も広がり、時間方向 (z 軸方向) に広がって構成されていた。したがって、従来の ETCC では、散乱点や散乱方向の決定精度が

悪くなってしまい、改善の余地が残されていた。そこで、TOT の値に応じて補正をかけることで反跳電子の真の飛跡を推定する (図 7)。方法としては、ミュオンの飛跡を直線でフィッティングすることにより、信号の立ち上がりと真の飛跡との時間差 (z 軸の値の差) を補正值として求め、補正をかける (図 8)。これにより、従来の ETCC 法の約 1.6 倍、電子飛跡を用いないコンプトン法の 4 倍近く検出有意度を改善した (図 9)。

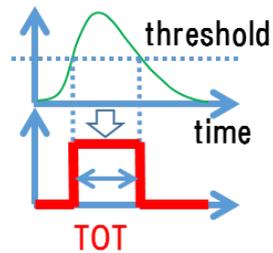


図 6: 信号の持続時間 TOT

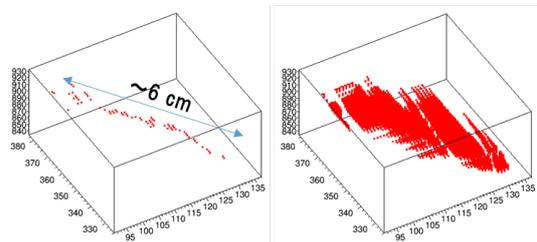


図 7: 電子の飛跡 TOT 補正有り (左) と TOT 補正無し (右)

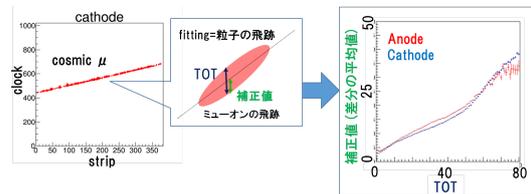


図 8: TOT の補正值を求める方法

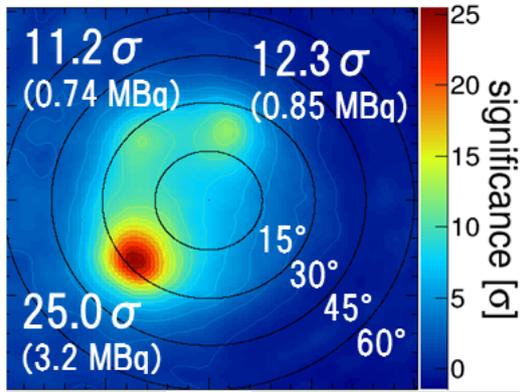


図 9: TOT 補正後の検出有意度マップ (図 5 とデータは同じ)

#### 4 まとめ

従来の ETCC では有効面積が  $1 \text{ cm}^2$  程度 (@  $300 \text{ keV}$ ) で角度分解能は  $5.3$  度 (@  $662 \text{ keV}$ ) であった。これは高度  $40 \text{ km}$  で  $4$  時間観測したとき、かに星雲を  $3\sigma$  で測定することができる。さらに、TOT 補正を行うことで、検出有意度が約  $1.6$  倍改善され、同じ条件でかに星雲を  $5\sigma$  で測定することができる。この電子飛跡解析方法の改良に加え、今後はコンプトン散乱点の決定方法の改良をすることで、より感度の高いコンプトンカメラとすることを目指す。MeV 領域での感度が改善すると予測され (図 10) (Tanimori, T, et al. 2015)、計画としては、アメリカのフォートサムナーでかに星雲や Cyg X-1、極域で銀河面や GRB などを観測する気球実験 (SMILE-II) があり、MeV 天文学での大きな革新は可能となっている。

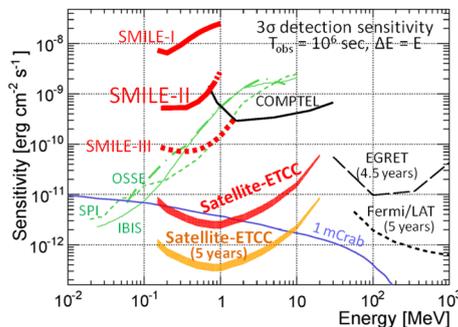


図 10: 今後の計画 (SMILE-II, III, Satellite-ETCC) での予測感度

#### Reference

- 井上一・ほか編 2008 『宇宙の観測 III-高エネルギー天文学』 (シリーズ現代の天文学 17) 日本評論社
- V. Schönfelder, et al. 1993, ApJS vol86, 657-659
- V. Schönfelder, et al. 2000, Astron. Astrophys. Suppl. Ser. vol143, 145
- C. Winkler, et al. 2003, A&A 411, L1
- G. Weidenspointner, et al. 2001, A&A 368, 347-368
- Tanimori, T, et al. 2015, ApJ