

長時間気球による MeV ガンマ線天文学の開拓

高田淳史, 谷森達, 窪秀利, 水本哲矢, 水村好貴, 古村翔太郎, 岸本哲朗,
竹村泰斗, 宮本奨平, 中増勇真, 吉川慶, 黒澤俊介 (東北大), 澤野達哉 (金沢大)

1 MeV ガンマ線天文学と電子飛跡検出型コンプトンカメラ

数百 keV から数十 MeV の MeV ガンマ線領域では、活動銀河核 (AGN) などの粒子加速天体やブラックホールや中性子星など強重力場からの放射、宇宙初期からのガンマ線バースト (GRB)、ガンマ線パルサー、さらには太陽フレアなど様々な天体の観測が期待されている。特に MeV ガンマ線領域でしか観測できない、励起状態にある原子核の脱励起に伴うガンマ線放射からは、元素合成のプロセスや合成された元素の拡散の様子が解明できると期待されている。近年では、Ia 型超新星爆発に伴うガンマ線放射の 100 日程度の時間変化から爆発機構を特定する [1] という観測提案や、系外拡散ガンマ線の非一様性の観測から遠方の AGN のタイプを判別し銀河進化に迫ろう [2] という提案もある。その一方でこのエネルギー領域の観測は遅れており、1990 年代の CGRO に搭載された COMPTEL によりようやく開始され、約 30 個の MeV 天体を発見したが [3]、2003 年以降コーデッドマスクを用いた INTEGRAL による観測でも、600 keV 以上で 4 天体の観測に留まっており [4]、GeV 領域で数千の天体を観測した Fermi 衛星 [5] とは大きな隔たりがある。

この現状を打開し MeV ガンマ線天文学を開拓する為、京大宇宙線ガンマ線グループはコンプトン散乱の電子飛跡が検出可能なガスを用いた電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC, 図 1) を 2000 年から開発してきた [6]。ETCC は、ガンマ線をコンプトン散乱させるガス 3 次元粒子検出器 Time Projection Chamber (TPC) とそれを取り囲む位置検出型シンチレーション検出器から構成される。COMPTEL をはじめとする従来のコンプトンカメラでは取得できなかった反跳電子の方向を取得することで、ガンマ線光子 1 個毎に到来方向とエネルギーを特定する。また、散乱方向と反跳方向の間の角を利用したコンプトン運動学テストやエネルギー損失率を用いた粒子識別によって、ガンマ線以外の雑音粒子やコンプトン散乱事象以外の雑音事象を高効率で除去できる。この高効率雑音除去機能は、2006 年の気球実験により証明されている (SMILE-I 実験) [7]。一方、検出器システムに宇宙線が入射することで生じる雑音ガンマ線は、光子毎の到来方向特定によりガンマ線画像から除去可能となる。これら ETCC の特徴により、これまで実現できなかった高感度 MeV ガンマ線観測が実現できることとなる。

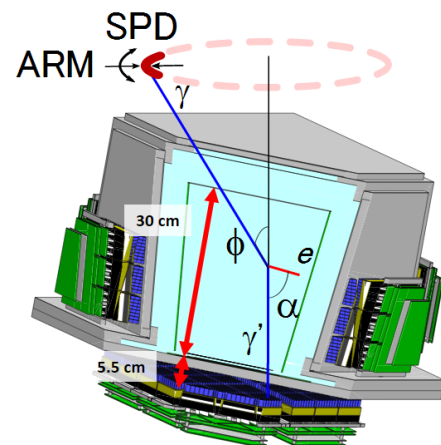


図 1: 電子飛跡検出型コンプトンカメラ

2 コンプトンカメラの角度分解能と ETCC の性能

地上校正試験から到達感度を予測するには、有効面積・角度分解能・雑音量のそれぞれの見積もりが必要となる。これまでの大気球シンポジウムでも述べてきたように、Ar ガス 1 気圧の 30 cm 角 TPC を用いた SMILE-II ETCC では、ガンマ線再構成を行いイベント弁別をかけて残った事象のうちエネルギーが正しく再構成された事象数から有効面積を実測しており、300 keV のガンマ線に対して $\sim 1 \text{ cm}^2$ の有効面積を実証している (図 2)。この値は、Geant4 を用いたシミュレーションから予測される有効面積と良い一致が見られる。また、シミュレーションと良い一致が得られていることから、ガスやシンチレーターの変更に対する有効面積の変化も容易に計算することが出来、30 cm 角 TPC で Ar+CF₄ 1.5 気圧でシンチレーターの厚みを 2.5 放射長に変更することで 5 cm^2 以上 (SMILE-II+)、 $60 \times 60 \times 30 \text{ cm}^3$ の CF₄ 3 気圧の TPC を用いれば 30 cm^2 の有効面積が実現できる (SMILE-III) 見込みである。

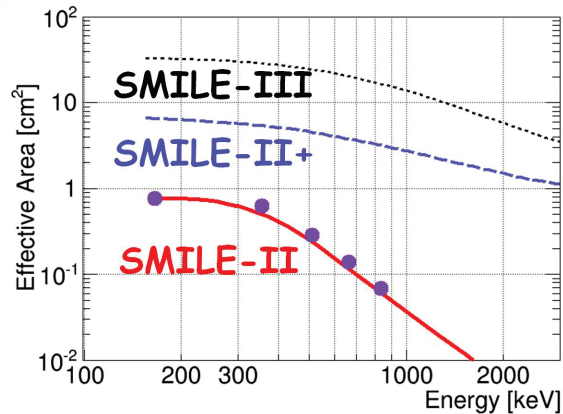


図 2: ETCC の有効面積

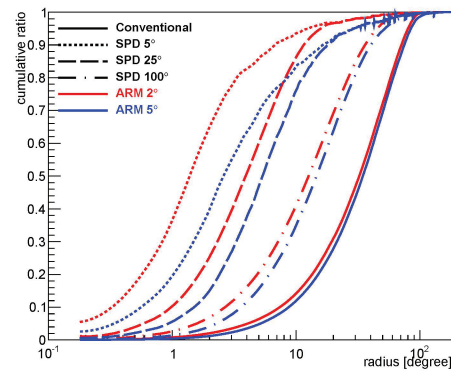


図 3: ARM と SPD による PSF の違い [8]

一方、角度分解能については、これまでコンプトンカメラ独自の指標である、コンプトン散乱角決定精度 angular resolution measure (ARM) と散乱平面決定精度 scatter plane deviation (SPD) で評価してきた。しかしながら、望遠鏡の角度分解能の指標としては一般的では無い上、再構成事象の天空上での角度広がり直接示すパラメータでもないため、今回改めて point spread function (PSF) が ARM/SPD によって、どのように変化するかを計算により検証した (図 3)。多くのコンプトンカメラを用いた実験では、天空上の角度広がりには ARM 程度になるとして到達予想感度を計算しているが、図 3 から ARM のみ向上しても PSF の向上は見込めず、SPD が ARM と同程度にまで改善して初めて PSF が ARM 程度の広がりになることが分かる。従来型のコンプトンカメラで、ARM~PSF と仮定して到達予想感度を計算してしまうと、実際の PSF は平均的なコンプトン散乱角の大きさで決まるため、5~10 倍高い検出感度の見積もりになってしまう。これまで複数の従来型コンプトンカメラが、気球・衛星に搭載されて天体観測しているが、地上校正試験で予想した検出感度に到達している検出器は 1 つもない。これは MeV 領域における雑音量が多いのみならず、PSF の見積もり違いによるターゲット領域以外からのもれこみ量の見積もり違いも大きく関与しているからと考えられる。SMILE-II ETCC では、662 keV における ARM と SPD は、それぞれ半値全幅で 6° と 100° と測定されている。従って、図 3 から 50% の事象数が入る半径を PSF と定義すると、現状の SMILE-II では 15° 程度の PSF となり、実際に得られているガンマ線画像とも一致する。

雑音は、大きく雑音ガンマ線とガンマ線以外の雑音粒子とに分けられる。これまでの大気球シンポジウムでも報告してきたが、ETCC の TPC は内部を走る荷電粒子のエネルギー損失率から粒子識別が可能であり、TPC 内部でエネルギーを落としきった電子と、最小電離粒子、陽子などそれ以外の粒子を弁別できる。例えば中性子が TPC 内で相互作用を起こすと、反跳する粒子は陽子や原子核であるのに対して、ガンマ線がコンプトン散乱で反跳する粒子は電子のみである。従って、ガンマ線以外の粒子の入射に対しては、粒子識別により容易に除去できる。実際、2006 年の SMILE-I 気球実験でも、3 sr の視野全体でガンマ線以外の粒子による事象は 2% 以下という結果を得ている。また、ガンマ線が入射したが検出器内部でエネルギーを落としきれなかった事象についても、TPC 内部の反跳電子については、粒子識別からエネルギーを落としきっているかが判断でき、コンプトン散乱運動学テストからは、散乱ガンマ線と反跳電子のそれぞれのエネルギーに矛盾がないかを確認できるため、大部分の雑音事象を除去可能である。一方、宇宙線により励起した原子核などからの雑音ガンマ線については、ガンマ線の再構成画像を得て、到来方向に制限を与えることで視野外からの雑音ガンマ線を大きく制限でき、もれこみ量は PSF から厳密に評価できる。

以上を考慮し、計算した到達予想感度を図 4 に示す。これより、SMILE-II+ では数時間で 1 Crab、SMILE-III では 2 週間で 5% Crab の flux を有意に観測可能であることが示される。

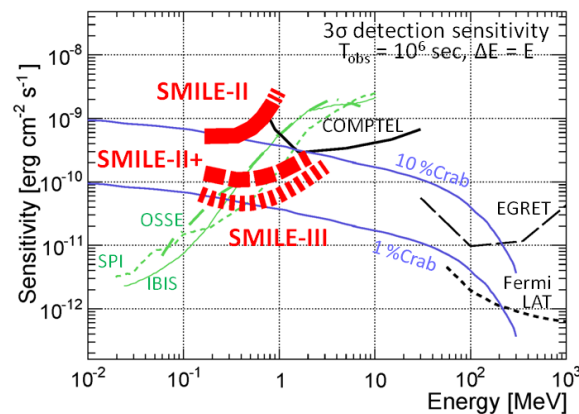


図 4: 現状で予想される SMILE-II/II+/III の検出感度

3 長時間気球実験で迫る MeV ガンマ線天文学

海外機関の気球実験も含めると、1 日以上 of 長時間気球実験が可能となっているのは、ISAS/JAXA のオーストラリア実験・NASA/CSBF の南極周回実験・SSC の北極周回実験などが挙げられる。これらを用いて以下に挙げるような観測を行い、MeV ガンマ線天文学を拓いていく。

- 銀河中心・銀河面からの電子陽電子対消滅線：これまでの OSSE/CGRO や SPI/INTEGRAL の観測から、銀河バルジや銀河面から電子陽電子の対消滅に伴う 511 keV のガンマ線放射が存在することは良く知られている。しかし、その分布画像が不鮮明な為、その陽電子の起源は未だ特定されていない。SMILE-II の検出感度であれば、オーストラリアにおいて高度 40 km の 1 日フライトが実現できれば、銀河バルジからの 511 keV を 5σ 程度の有意度で観測可能である。また SMILE-II+以降では、銀河面の 511 keV ラインガンマ線の詳細な分布画像の取得も可能となり、既知の天体分布との相関から、その起源特定に迫れる。
- ^{26}Al からの 1.8 MeV 核ガンマ線：半減期が $\sim 10^6$ 年と非常に長寿命な ^{26}Al は、 β^+ 崩壊する際 1.8 MeV の核ガンマ線を放射する。この放射は COMPTEL により銀河面に広く分布していることが観測され、SPI/INTEGRAL でも銀河面から 1.8 MeV のガンマ線が検出されている。この 1.8 MeV ガンマ線の詳細な分布画像が得られると、元素合成の現場からどのように銀河内に元素が拡散していくかを直接見ることができると期待されている。しかし、COMPTEL の画像は解像度が悪く、また SPI/INTEGRAL は銀河面分布は今のところ発表していない。SMILE-II+により、銀河面を探索することで 1.8 MeV の詳細な分布画像を得て、元素拡散に迫る。
- 系外拡散ガンマ線の起源特定：現在の処、300 keV 以上における系外拡散ガンマ線の起源は、遠方の Ia 型超新星爆発や活動銀河核の重ね合わせであるとされている。また、MeV ガンマ線領域を挟む X 線領域と GeV ガンマ線領域の系外拡散ガンマ線のスペクトルの傾きの間には大きな折れ曲がりが存在しているが、MeV 領域における詳細なスペクトルは得られていないため、起源が特定できていないのが現状である。系外拡散ガンマ線は、SMILE-I で既に有意な観測が出来ているため、SMILE-II の感度であれば詳細な系外拡散ガンマ線のスペクトルが得られ、スペクトルから起源の特定が可能となる。さらに ETCC は非常に大きな視野を持つため、SMILE-III では系外拡散ガンマ線の角度分布を測定し、銀河分布との相関や非一様性から、Flat Spectrum Radio Quasar (FSRQ) のような明るい AGN が少量存在するのか、Seyfert 型の暗い AGN が大量に存在するのか、ということも議論することが出来、銀河進化に対して新しい制限をつける。
- ガンマ線バーストの偏光測定：ETCC は、偏光方向に対して異方性を持つコンプトン散乱を使用した検出器であるため、偏光に対して高い感度を持つ。実際、2015 年 1 月末に SPring-8 で行った偏光測定実験では、130 keV でのモジュレーションファクターが ~ 0.6 という、非常に大きな値を実証した。

また ETCC は広い視野での画像取得能力があるため、全天探査型イメージング偏光測定という、これまでには存在しない新しい手法でガンマ線偏光測定が行える。極周回の気球実験では、2 週間程度の観測が可能となる一方、ETCC は 5~6 sr の広い視野を持つため、偏光度 30% 以上のガンマ線バーストを 5 個程度観測可能となる。特に、1 ヶ月間飛翔が実現すれば比較的明るいガンマ線バーストが 1~2 個視野に入ることが期待され、偏光度 10% までの観測が可能となる。GRB 偏光データはその爆発および加速機構解明の最有力な手段であり、精度の高いデータが待ち望まれている。

- 高エネルギー電子降下現象に伴うガンマ線放射の観測：放射線帯の MeV 程度のエネルギーを持つ高エネルギー電子は、ある確率で極域の地球大気に降りこんでくることが知られており、高エネルギー電子降下現象 (Relativistic Electron Precipitation: REP) と呼ばれている。この REP 現象は、高層大気における化学反応に大きな寄与をする他、地球磁気圏観測衛星 (ERG) が観測する赤道面でのプラズマおよび高エネルギー粒子観測と合わせることで、磁力線に沿った高エネルギー電子加速の全容解明が可能になると期待されている。極域では REP 現象に伴うガンマ線放射を観測する気球実験として、MAXIS 実験や BARREL 実験が行われ、比較的局所的な変動が報告されているが、ガンマ線画像取得能力に乏しく大気ガンマ線に埋もれて詳細な観測には至っていない。ETCC はガンマ線の到来方向が光子毎に検出できるため、到来方向を絞ることで大気ガンマ線の影響を立体角の分大きく減らすことが出来るため、高い感度の観測が可能と期待される。

ここに挙げた以外にも、低エネルギー宇宙陽子線と銀河間物質との衝突により発生する ^{12}C や ^{16}O の励起状態からの 4 MeV や 6 MeV などのラインガンマ線の測定からの宇宙線の加速起源の特定や、銀河面の深い観測からの新しい MeV ガンマ線天体の探索など、気球実験でも様々な科学観測が期待でき、MeV ガンマ線天文学を開拓していくことが可能となる。

参考文献

- [1] A. Summa+, A&A 554 (2013), A67.
- [2] Y. Inoue+, ApJ 776 (2013), 33.
- [3] V. Schönfelder+, A&ASS Vol. 143 (2000), 145-179.
- [4] L. Bouchet+, ApJ, 679 (2008), 1315.
- [5] A. Abdo+, ApJS, 183 (2009), 46.
- [6] T. Tanimori+, New Astron. Rev., 48 (2004), 263.
- [7] A. Takada+, ApJ. 733 (2011), 13.
- [8] T. Tanimori+, ApJ 810 (2015), 28.