

気球を用いた MeV ガンマ線観測実験その 1

京都大学宇宙線研究室 修士 1 年 中村祥吾

概要

京都大学宇宙線研究室 MeV ガンマ線グループでは、宇宙・天体からの MeV 領域のガンマ線のイメージングのために、気球実験 SMILE (Sub-MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment) 計画を行っている。そのための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・改良中であり、2006 年には ETCC で実際に上空でのガンマ線の検出の実証気球実験“SMILE-I”を実行し、成功を収めた。2014 年以降には MeV ガンマ線天体のイメージング能力を実証するために 2 度目の気球実験“SMILE-II”を行う予定である。

現在は SMILE-II に向け ETCC の改良をしており、本稿では ETCC の一部であるシンチレーションカメラの改良について述べる。私達は有効面積拡大のために ETCC を大型化し、使用するシンチレーションカメラを SMILE-I 時の 33 個から 216 個へと大幅に増量した。また、電力消費を抑えるために、信号読み出し回路を改良し、消費電力を 1.71 W/ch から 0.41 W/ch へ削減した。さらにシンチレーションカメラの経年劣化を防ぐために光学セメントを導入し、最後に改良後のシンチレーションカメラの評価を行った。

MeV ガンマ線の観測と問題

MeV ガンマ線にかかわる宇宙物理学の問題として、宇宙での元素合成が挙げられる。超新星爆発によって放射性同位体がつくられると、それらは MeV ガンマ線を放射して崩壊する。したがって、そのガンマ線を観測することで元素合成がどこで、どのような過程で行われているかを知ることができる。

また、その他の重要な問題として、高エネルギーの陽子がどこからやってくるのかという宇宙線起源問題が存在する。高エネルギー陽子は原子核と衝突することによって π 中間子を生成する。そのうち π^0 中間子は静止系で約 70 MeV のガンマ線を 2 本放射するので、高エネルギー陽子由来のガンマ線のスペクトルには特徴的なバンプ構造が現れる。それを観測することで、高エネルギー陽子の生成される場所を調べることができる。

このように MeV 領域には宇宙物理学にとって重要な観測課題が数多く存在するが、その観測は他波長の領域に比べ遅れている。

その原因の 1 つが MeV ガンマ線の検出に関する問題である。MeV 領域では、主な相互作用としてコンプトン散乱が挙げられるが、これは高エネルギー光子と電子の散乱で、到来ガンマ線を再構成するには散乱後の光子、電子の両方を検出する必要がある。CGRO 衛

星（1991～2000）の COMPTEL では電子の飛跡が検出できず、ガンマ線の到来方向が円周でしか制限できなかった。そのため、到来方向の決定には 3 本以上のガンマ線を検出し、その円周の交点を求める必要があった[1]。また、MeV 領域は大気や検出器自体との相互作用によるガンマ線、荷電粒子のバックグラウンドも非常に多く[4]、これらの問題から暗い天体からのガンマ線の検出が困難となり、MeV 領域では検出感度が他の領域より 1 桁以上低いのが現状である（図 2）。

電子飛跡検出型コンプトンカメラ：ETCC

MeV ガンマ線の検出に関する問題を解決し、検出感度を向上させるために私達は電子飛跡検出型コンプトンカメラ、ETCC（Electron Tracking Compton Camera）の開発を行っている。この検出器は中央に μ -TPC というガスを用いた荷電粒子三次元飛跡検出器があり、その周囲に多数のシンチレーションカメラを配置している。

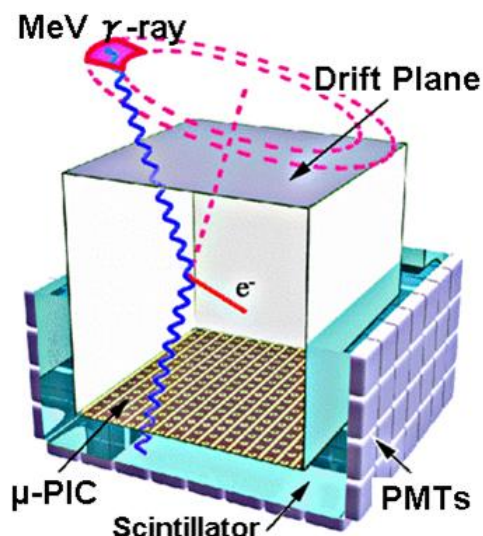


図 1：ETCC の概略図

ETCC では入射ガンマ線にガス検出器の μ -TPC 中でコンプトン散乱を起こさせ、反跳電子のエネルギーと三次元の飛跡を中央の μ -TPC で、散乱ガンマ線は周囲の格子状に配置したシンチレーションカメラで吸収し、エネルギーとその吸収点を検出する。それら 4 つの情報からコンプトン散乱を再構成することができるので、1 イベント毎に入射ガンマ線の到来方向とエネルギーを知ることができる。

また、散乱後の電子、光子の方向ベクトルをそれぞれ \vec{e} 、 \vec{g} とすると、 \vec{e} と \vec{g} のなす角 α は幾何学的に

$$\cos \alpha_{geo} = \vec{e} \cdot \vec{g}$$

で求められる。それとは独立に散乱後の光子と電子のエネルギーから運動力学的にも散乱角が

$$\cos \alpha_{kin} = \left(1 - \frac{m_e c^2}{E_\gamma}\right) \sqrt{\frac{K_e}{K_e + 2m_e c^2}}$$

より得られる。ただし、 K_e 、 E_γ は散乱後の電子、光子のエネルギーである。幾何学的に得た α_{geo} と運動力学的に得た α_{kin} を比較することで μ -TPC でコンプトン散乱を起こし、かつシンチレーションカメラで吸収されたガンマ線以外のバックグラウンドを除去することが可能である。

SMILE 計画

SMILE (Sub-MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment) 計画では ETCC の性能を実証し、COMPTEL の 10 倍以上の感度を持たせることを最終目標に気球実験を行っている。2006 年には 1 回目の実験、SMILE-I として実際にバックグラウンドの多い上空でガンマ線が検出できるか実証する気球実験を行った。大気ガンマ線や宇宙拡散ガンマ線の観測を目標として、三陸より放球し、上空 32~35km で 4 時間観測、無事検出に成功している[3]。また、これらのガンマ線は天体のイメージング観測の際には ETCC では排除できないバックグラウンドとなる。

SMILE-I の成功を受け、カニ星雲やはくちょう座 X-1 などの明るい天体のイメージングを目標に SMILE-II を 2014 以降に予定している。SMILE-II ではスウェーデンのキルナで約 2 週間の長時間観測を考えている。

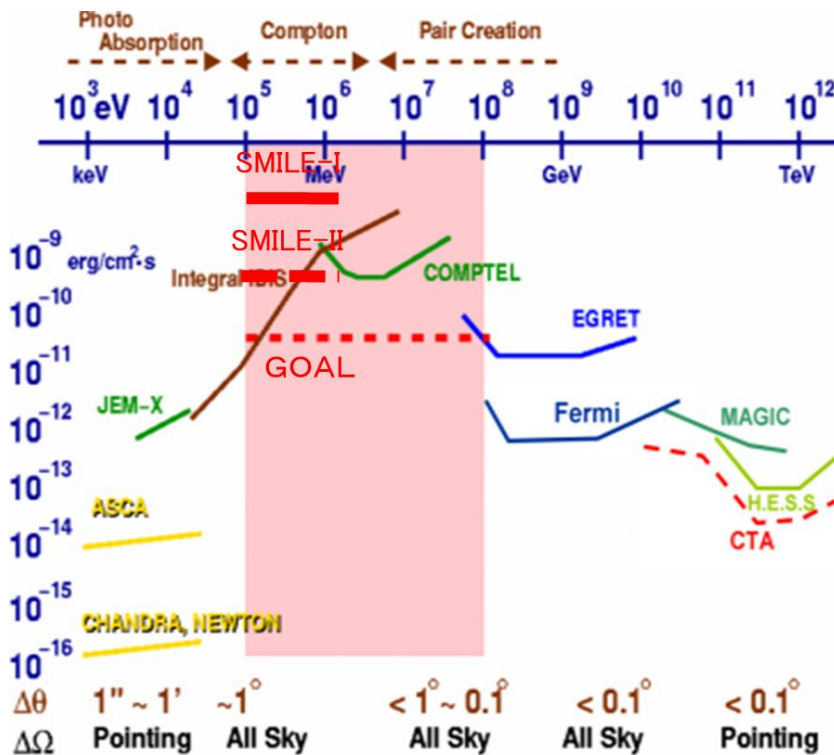


図 2：各波長領域での検出感度および SMILE 計画の目標感度

シンチレーションカメラの改良

現在私達は SMILE-II に向け、ETCC の改良を行っている。本稿では ETCC を構成するシンチレーションカメラの改良について述べる。

最初に、シンチレーションカメラの説明をする。SMILE-II で使用する ETCC ではシンチレータに GSO を用い、それを $6\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 13\text{ mm}$ に加工し、 8×8 の格子状に並べている。それを 8×8 ピクセルのフラットパネルマルチアノード PMT に接着し、信号を読み出している (図 3)。

SMILE-I から SMILE-II へ、有効検出面積拡大のために検出器を大型化する。中央のガス検出器を一辺 10 cm から 30 cm に大型化し、それに伴いシンチレーションカメラも底面 9 個、側面 24 個から底面 72 個、側面 144 個へと大幅に増量する。

また、SMILE-I では信号の処理に市販の NIM モジュールを使用していたが、気球に乗せて実験するためには省電力、省スペース化が重要な問題であるので、新たに信号整形および読み出し、PMT への高電圧供給などの機能を持つ PMT アンプユニット (HA) の開発、改良も行った。この HA では 1PMT、64 ピクセル毎の情報を 4 端読み出しで取得し、重心演算でその位置とエネルギーを再構成する。この HA の改良によって消費電力を 1.71 W/ch から 0.41 W/ch へと抑えることに成功している。

さらに、今回私は PMT からの光量の経年での減少を防ぐためシンチレータと PMT の接着剤を光学ガラスから光学セメントへと変更した。これについて、次に詳しく説明する。

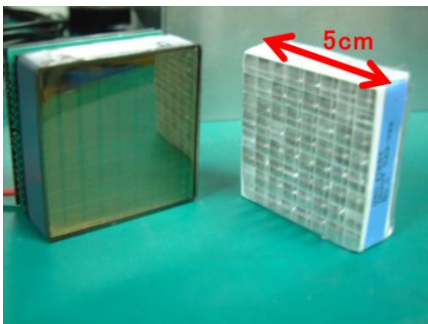


図 3：シンチレーションカメラ

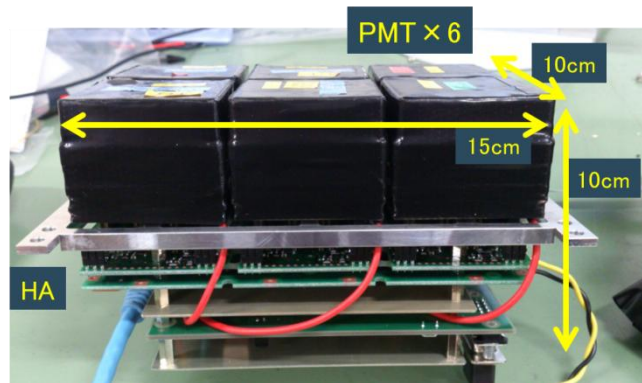


図 4：シンチレーションカメラと HA

光学セメント

SMILE-I ではシンチレータと PMT の接着に光学ガラスを使用していたが、光学ガラスは時間の経過で乾燥し、光の透過率が低下、得られる光量が減少してしまう問題があった。そのため、今回光学セメントの導入を検討した。

今まで使用していた光学ガラス (oken 6262A) と新たに導入する光学セメント (BC-600) の屈折率と透過率を表 1 に示す。

表 1 : 光学グリスと光学セメント

	屈折率	透過率(≥ 400 nm、厚さ 125 μ m)
光学グリス (oken 6262A)	1.45	> 99 %
光学セメント (BC-600)	1.56	> 98 %

シンチレータ (GSO) のピーク波長 430 nm での屈折率は 1.85、PMT の入射窓の屈折率は 1.48 (at 436 nm) であるから、屈折率では光学セメントの方が適しているといえる。ただし、透過率は光学グリスのほうが高いので、実際にガンマ線源を用いて性能を評価した。

線源は ^{57}Co (122 keV)、 ^{133}Ba (496 keV)、 ^{22}Na (511 keV)、 ^{137}Cs (662 keV)、 ^{54}Mn (835 keV) を使用し、シンチレーションカメラ 1 個 (64 ピクセル) で測定した。例として光学グリス、光学セメント時の ^{137}Cs のスペクトルを図 5、図 6 に示す。

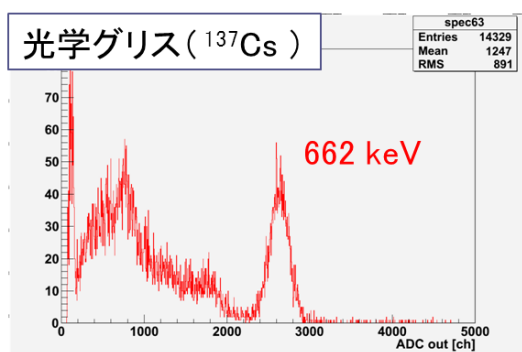


図 5 : 光学グリス時の ^{137}Cs のスペクトル

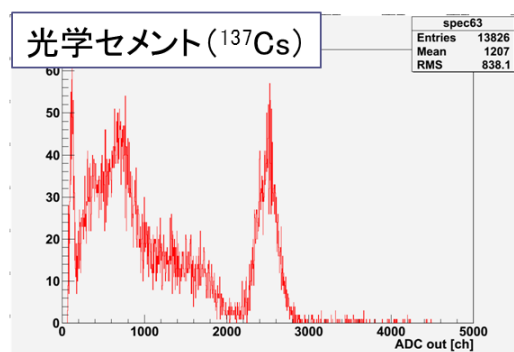


図 6 : 光学セメント時の ^{137}Cs のスペクトル

光学グリスと光学セメントについてこれらの線源のスペクトルからガンマ線のエネルギーとスペクトルのピークでの ADC 値の比を求めると、表 2 のようになった。

表 2 : 光学グリスと光学セメントの 1ch あたりのエネルギーの比較

	ガンマ線のエネルギー/ADC 値の平均 [keV/ch]	標準偏差
光学グリス	0.21	0.023
光学セメント	0.20	0.019

ここで、keV/ch は PMT へ入る光量の逆数を表し、その標準偏差は PMT の各ピクセルの Gain のばらつきを表していると考えられる。

この表 2 から、光学セメントを使用した場合にも光学グリスを使用した場合と同程度の結果が得られたので、今後光学セメントを使用しても問題ないことが分かった。

また、先行研究より光学グリスの場合には PMT の光量が 2 年で 80% に低下していたこ

とが分かっているので、光学セメントでも同程度の期間を置いて経年劣化の評価をする予定である。

シンチレーションカメラのエネルギー校正

SMILE-II へ向けて、各シンチレーションカメラの性能を把握するため、シンチレーションカメラのエネルギーのキャリブレーションを現在行っている。

線源として ^{57}Co (122 keV)、 ^{22}Na (511 keV)、 ^{137}Cs (662 keV)、 ^{54}Mn (835 keV) を用い、全シンチレーションカメラ 216 個のうち、6 個が完了している。その結果は、6 個のカメラのガンマ線のエネルギーと ADC 値の比の平均が 0.27 ± 0.01 keV/ch となった (図 7)。またカメラのエネルギー分解能は ^{137}Cs (662 keV) で $10.6 \pm 0.6\%$ であった (図 8。ただし、数値は 6 個のカメラの値の平均)。

また、得られたスペクトルからガンマ線によるピークが確認できる範囲をダイナミックレンジとすると、シンチレーションカメラのダイナミックレンジは 60~900 keV であった。これは SMILE-I 時の 80~800 keV と同程度であり、SMILE-II で要求される性能を満たす結果であった。

まとめ

京都大学宇宙線研究室 MeV ガンマ線グループでは革新的な MeV ガンマ線検出器 ETCC を用いた SMILE 計画を行っている。

2014 年以降の SMILE-II 打ち上げに向け、ETCC の改良中であり、シンチレーションカメラでは回路改良によって消費電力が 1.71 W/ch から 0.41W/ch へと削減に成功した。また、今回シンチレーションカメラの光量の経年劣化防止のために光学セメントを導入した。接着直後は以前の光学グリッドと変わらない光量を得られることを確認した。今後期間を置いて再測定し経年性能を評価する必要があるが、光学グリッドの場合よりも長期間シンチレーションカメラの性能が維持されることが期待される。これらの改良後のエネルギー分解能 (FWHM) は 662 keV で $10.6 \pm 0.6\%$ 、ダイナミックレンジは 60~900 keV となった。これは SMILE-I とほぼ同程度の性能であり、SMILE-II で要求される性能を満たしている。

今後はシンチレーションカメラのエネルギー較正を進め、その後 ETCC に組み込み、ETCC としての性能評価を行う予定である。

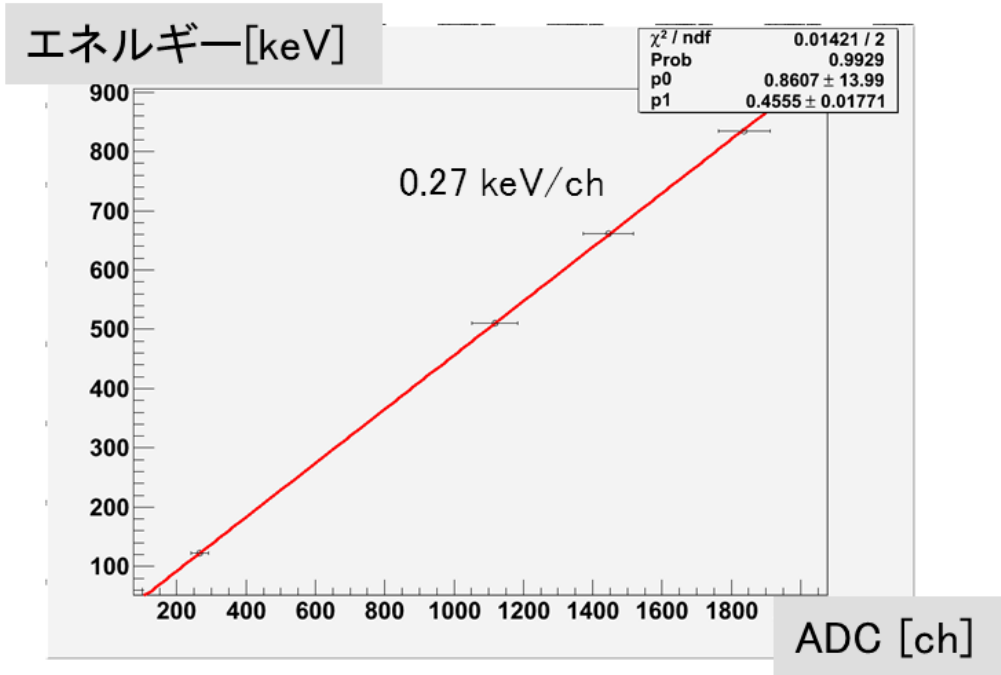


図 7: シンチレーションカメラのエネルギーキャリブレーション (数値は 6 カメラの平均)

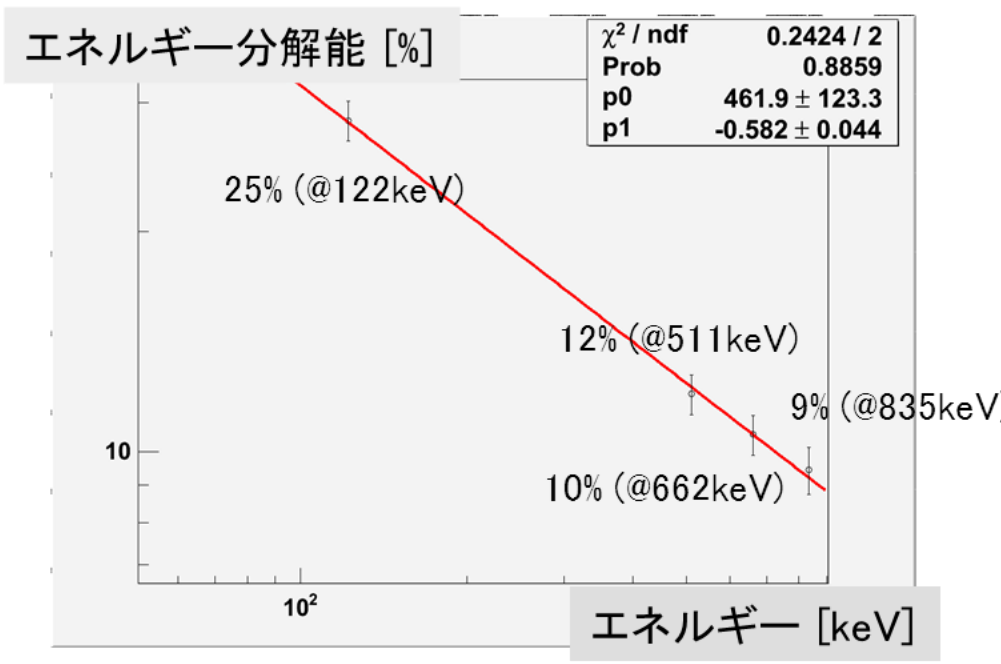


図 8: シンチレーションカメラのエネルギー分解能 (FWHM) (数値は 6 カメラの平均)

参考文献

- [1] J.M.Ryan, *NewAR* **48** (2004) 199.
- [2] V.Schönfelder et al., *A&A* **143** (2001) 145.
- [3] A.Takada, *Ph.D.Thesis*, Kyoto Univ. (2007).
- [4] G.Weidenspointner et al., *A&A* **368** (2001) 347.