

電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡による MeV ガンマ線天文学の革新

高田淳史^{*1}, 谷森達^{*1, *2}, 窪秀利^{*1}, 水本哲矢^{*1}, 水村好貴^{*2, *1}, 古村翔太郎^{*1}, 岸本哲朗^{*1}, 竹村泰斗^{*1}, 吉川慶^{*1}, 中増勇真^{*1}, 中村優太^{*1}, 谷口幹幸^{*1}, 松岡佳大^{*1}, 小田真^{*1}, 宮本奨平^{*1}, 園田真也^{*1}, 友野大^{*1}, 身内賢太郎^{*3}, 黒澤俊介^{*4}, 澤野達哉^{*5}

Innovation in MeV gamma-ray astronomy based on an electron-tracking Compton telescope

Atsushi TAKADA^{*1}, Toru TANIMORI^{*1, *2}, Hidetoshi KUBO^{*1}, Tetsuya MIZUMOTO^{*1}, Yoshitaka MIZUMURA^{*2, *1}, Shotaro KOMURA^{*1}, Tetsuro KISHIMOTO^{*1}, Taito TAKEMURA^{*1}, Kei YOSHIKAWA^{*1}, Yuma NAKAMASU^{*1}, Yuta NAKAMURA^{*1}, Tomoyuki TANIGUCHI^{*1}, Yoshihiro MATSUOKA^{*1}, Makoto ODA^{*1}, Shohei MIYAMOTO^{*1}, Shinya SONODA^{*1}, Dai TOMONO^{*1}, Kentaro MIUCHI^{*3}, Shunsuke KUROSAWA^{*4}, Tatsuya SAWANO^{*5}

ABSTRACT

In MeV gamma-ray region, there is no advances from COMPTEL observation, whereas it is expected to be a useful probe of nucleosynthesis, particle acceleration, strong gravity, and first stars. For opening a window in MeV gamma-ray astronomy, we are developing an electron-tracking Compton camera (ETCC) having a well-defined point spread function (PSF) and some powerful background rejection tools based on tracking technology of Compton-recoil electron. In 2006, we had the first balloon flight using a small-size ETCC for a demonstration of gamma-ray detection at the balloon altitude (Sub-MeV gamma-ray Imaging loaded on balloon Experiment-I: SMILE-I), and it was successful to observe the intensities of diffuse cosmic and atmospheric gamma rays. As the next step, we are constructing and studying a middle-size ETCC (SMILE-II) using a 30 cm-cubic gaseous electron tracker for the observation of the bright celestial objects. Using SMILE-II ETCC, we validated the effective area, the angular resolution, the background rejection power, and the ability of the polarization measurement by some ground calibrations. In this paper, we summarize the performance and the validation results of SMILE-II ETCC, and present the expectations in the future observations.

Keywords: MeV gamma-ray astronomy, Compton telescope, scientific heavy balloon, instruments

doi: 10.20637/JAXA-RR-16-008/0003

* 平成 28 年 11 月 28 日受付 (Received November 28, 2016)

*¹ 京都大学大学院理学研究科 (Graduate School of Science, Kyoto University)

*² 京都大学宇宙総合学研究所 (Unit of Synergetic Studies for Space, Kyoto University)

*³ 神戸大学大学院理学研究科 (Graduate School of Science, Kobe University)

*⁴ 東北大学未来科学技術共同研究センター (New Industry Creation Hatchery Center, Tohoku University)

*⁵ 金沢大学大学院自然科学研究科 (Graduate School of Natural Science & Technology, Kanazawa University)

概要

天文学における MeV ガンマ線は、元素合成・粒子加速・強い重力場・宇宙最初の星といった様々な現象を解明するのに有力な新しいプローブとして期待されているが、COMPTEL 以降の観測的進展はほとんどない。この状況を打開する為、我々は電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡 (ETCC) の開発を進めてきた。ETCC は、これまでにない鋭い PSF と、粒子識別やコンプトン散乱運動学テストといった雑音除去能力を持つ、新しい世代の MeV ガンマ線望遠鏡である。我々は気球高度におけるガンマ線測定を実証する為、2006 年に小型の ETCC を気球に搭載し、宇宙拡散・大気ガンマ線の観測を行い、その強度を得ることに成功した (SMILE-I)。現在は次のステップとして、明るい天体の観測を目標 (SMILE-II) として 30 cm 立方のガス飛跡検出器を用いた中型 ETCC を開発し、その試験を行っている。これまで、SMILE-II ETCC を用いてその有効面積や角度分解能、雑音除去能力や偏光検出能力について、地上校正実験を行い検証してきた。ここでは、ETCC の性能評価と検証実験の結果を報告し、気球や衛星を用いた将来観測で期待される観測について述べる。

1. はじめに

数百 keV から数十 MeV にかけての MeV ガンマ線領域では、元素合成^{1, 2)} や活動銀河核・ガンマ線バースト (gamma-ray burst: GRB) における粒子加速^{3, 4)}、ブラックホール近傍の強い重力場^{5, 6)}、宇宙線と星間物質との相互作用^{7, 8)} といった様々な現象が観測できると期待されている。特に MeV ガンマ線領域でのみ観測が可能な、放射性同位体や励起原子核から放射される核ガンマ線は特徴的な情報をもたらす。Ia 型超新星爆発の爆発機構は、白色矮星に伴星からの物質が降り積もり圧力を支えきれなくなった時点で火が付く (single degenerate: SD) というモデルだけではなく、2つの白色矮星が衝突して起こる (double degenerate: DD) 可能性も示唆されている。この爆発機構の違いは、⁵⁶Co からの核ガンマ線が直接関与する 0.1-4 MeV での約 100 日間に渡る光度曲線に顕著に現れることが計算されており、MeV ガンマ線による観測で決着がつくと期待されている⁹⁾。半減期が 10^6 年と比較的長い ²⁶Al は、寿命が銀河内の物質拡散のタイムスケール程度であるため、崩壊に伴う 1.8 MeV のガンマ線放射は物質循環のトレーサーとなることが期待されている¹⁰⁾。また、MeV 領域における宇宙の透明度は非常に高い為、遠方まで見通すことが可能である。宇宙初期に生成された恒星 (POP III) には、太陽の 100 倍以上の質量をもつものが数多く存在し、質量放出をほとんどしないまま重力崩壊型超新星爆発を迎えると考えられており、サブ MeV 領域において 10^4 秒以上継続する暗い GRB として観測されると期待されている^{11, 12)}。このような新しい GRB を探査することで宇宙初期の星の進化を直接知ることができる。

このように多種多様な現象に対して新しいプローブとなり得る MeV ガンマ線であるが、その観測は進んでいない。1991-2000 年に全天観測を行った COMPTEL¹³⁾ が発見した定常天体はわずかに 30 天体程であり¹⁴⁾、実現できた時間当たりの検出感度は設計値の 1/3 程度であった¹⁵⁾。2003 年以降は *INTEGRAL* 衛星が観測を続けているが、600 keV 以上での定常天体は 4 天体の検出に留まっている¹⁶⁾。現在も様々な広視野 MeV ガンマ線望遠鏡の開発が進められており、既にいくつかの気球実験が行われているが、地上校正実験から予想される感度に到達した検出器は一つもなく^{17, 18, 19)}、COMPTEL や *INTEGRAL* 以降、宇宙機関に採択された将来計画は一つもない。MeV 領域での観測が進展しないのは、波長が原子核の大きさ程度 (~fm) と集光が困難で、コンプトン散乱優位である為エネルギーや到来方向といった情報を失いがちで検出自体が難しい上、検出器や衛星を構成する物質と宇宙線との相互作用から放射線同位体や励起原子核が生じる為にガンマ線雑音も多く、さらに大気中性子のようなガンマ線ではない雑音も存在する為である。根本的な雑音対策を行わない限り、MeV 領域での高感度観測は望めない。

この状況を打開すべく、我々は電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡 (electron-tracking Compton camera: ETCC) の開発を行っている (図 1)。この ETCC は、高空間分解能な 3 次元ガス飛跡検出器と位置感度型シンチレーション検出器からなり、従来用いられていなかったコンプトン反跳電子の方向情報を取得するこ

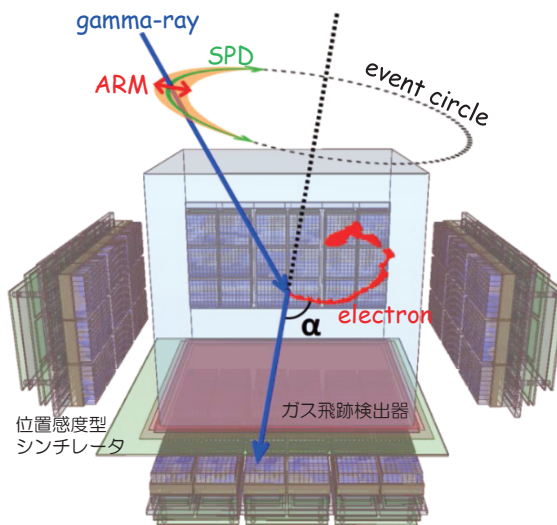


図 1：電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡の概念図²⁰⁾。

とで、事象毎に入射ガンマ線の到来方向とエネルギーを一意に測定可能な望遠鏡である²¹⁾。これにより角度分解能 (point spread function: PSF) が飛躍的に改善され、ガンマ線イメージから視野外からの雑音ガンマ線を除去可能となる²⁰⁾。さらに、飛跡検出器中のエネルギー損失率を用いた粒子識別及びコンプトン散乱運動学テストから、得られた事象がガンマ線であることを強く保証できるため、ガンマ線以外の雑音も排除できる²¹⁾。我々は小さな検出器での原理検証から始め²²⁾、2006年には気球高度でのガンマ線検出実証実験に成功した²³⁾。現在は明るい天体を観測し、実際の天体観測の実現可能性を実証すべく、中型の ETCC を構築し地上での検証を進めている²⁴⁾。

本論文では、ETCC の原理や実証実験結果について紹介する。2 章では ETCC の検出及び雑音除去の原理と性能評価について述べる。3 章では SMILE-II ETCC で得られた地上評価実験について紹介し、4 章では将来期待される観測について議論する。

2. 電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡

2.1. 検出原理と雑音除去

高空間分解能な 3 次元ガス飛跡検出器と位置感度型シンチレーション検出器から構成される ETCC は、ガス飛跡検出器でコンプトン反跳電子のエネルギーと飛跡を、シンチレーション検出器でコンプトン散乱ガンマ線の吸収点とエネルギーを得る。この時、入射ガンマ線のエネルギー E_0 と到来方向 \vec{s} は

$$E_0 = E_g + K_e$$

$$\vec{s} = \left(\cos \varphi - \frac{\sin \varphi}{\tan \alpha} \right) \vec{g} + \frac{\sin \varphi}{\sin \alpha} \vec{e} = \frac{E_g}{E_0} \vec{g} + \frac{\sqrt{K_e(K_e + 2m_e c^2)}}{E_0} \vec{e}$$

と与えられる。ここで、 E_g と \vec{g} は散乱ガンマ線のエネルギーと方向、 K_e と \vec{e} は反跳電子のエネルギーと方向、 α は \vec{g} と \vec{e} のなす角 (図 1 中の α)、 m_e と c は電子質量と光速である。また、 φ はガンマ線の散乱角で

$$\cos \varphi = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E_g} - \frac{1}{E_0} \right)$$

である。可視光や X 線の望遠鏡で用いられる集光による検出方法では、到来方向の 2 つの角度情報を 2 次元の位置情報に写像することで事象毎に到来方向を得ているが、ETCC では測定情報を基に計算から到来方向の 2 つの角度情報を得る。COMPTEL に代表される従来のコンプトンカメラは、コンプトン反跳電子

の方向を測定できないため、ガンマ線到来方向について1角度しか特定できない。さらに *INTEGRAL* のような符号化マスク法では、事象毎の到来方向情報は取得しない。この意味で、ETCCはMeV領域において初めて一般的な望遠鏡と同様の画像取得方法とすることができる。

図2は、SMILE-II ETCCのガス飛跡検出器中での荷電粒子のエネルギー損失と飛程の相関を取ったものであるが、3つの成分があることが見て取れる。一つはArガス中の電子の飛程²⁵⁾に沿った成分であり、ガス飛跡検出器中で止まった電子である。二つ目は、飛跡の長さが検出器の大きさ(30 cm)程度で、最小電離粒子のエネルギー損失率⁴¹⁾付近に緩やかなピークを持つ成分であり、宇宙線 μ 粒子などの高エネルギー荷電粒子が外から到来していることを示す。三つ目の成分は、最小電離粒子のエネルギー損失率に沿った飛程が比較的短い成分であり、高エネルギー荷電粒子が飛跡検出器をかすめる、または飛跡検出器内部で生成された電子が飛跡検出器外部へ出て行く成分である。数MeVのエネルギーの電子は最小電離粒子となるため、最小電離粒子のエネルギー損失率と同程度のエネルギー損失をしている。従って、この図からガス飛跡検出器内で止まった電子のみを選び出す一方、飛跡の位置情報から飛跡検出器内で閉じた飛跡かを判定すれば、「飛跡検出器内で発生し内部で止まった電子」の事象を取り出せる。ガンマ線と物質との相互作用では電子(または陽電子)が生成されるが、例えば中性子が相互作用して生じる荷電粒子は主に陽子や原子核であり、これらのエネルギー損失率や飛程は電子とは桁で大きく異なる。この為、エネルギー損失率による粒子識別から反跳電子のエネルギーの完全性だけでなく、ガンマ線以外の雑音粒子を大きく除去できる。さらに、 α 角はその定義から

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

と幾何学的に得られる一方、コンプトン散乱であればエネルギー情報のみを使用して

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

とも表すことができる。この独立な2つの値を比較するコンプトン散乱運動学テストで、偶然同時計数事象や不完全なエネルギー損失の事象を制限することが出来、エネルギー損失率による粒子識別と合わせて、「コンプトン散乱を起こしたガンマ線事象」であることを強く要求できる。これは電子飛跡を取得するETCCの大きな特徴である。

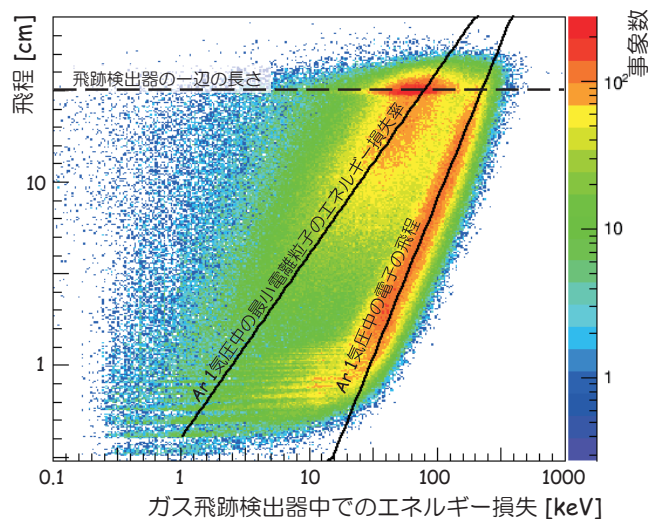


図2: Arガス1気圧の飛跡検出器で取得された荷電粒子のエネルギー損失と飛程の相関。地上において飛跡検出器から2 m離れた位置に¹³⁷Csを設置。

2.2. コンプトンカメラの角度分解能についての再考

従来、コンプトンカメラの角度分解能は、散乱角の決定精度である Angular Resolution Measure (ARM) というパラメータで評価を行ってきた。ETCC の場合は ARM に加えて、散乱平面の決定精度 Scatter Plane Deviation (SPD) を用いた評価をしている。しかし ARM 分解能や SPD 分解能は天空上での事象の広がり (PSF) を表すパラメータではない。実際、ETCC で得られたガンマ線事象を用いて ARM と SPD を軸とする画像 (図 3 左) と天空への投影画像 (図 3 中) を得て比較してみると、ARM 分解能も SPD 分解能も天空上での事象広がりとは一致しない。この為、ARM 分解能と SPD 分解能から PSF がどのように変化するかシミュレーションを行い、図 3 右を得た²⁰⁾。事象の 50% が含まれる半径 (half power radius: HPR) を角度分解能の指標として用いると、ARM 分解能が半値全幅で 5 度かつ SPD 分解能が半値全幅 100 度の時の HPR は 15 度程度と実験と矛盾していない²⁰⁾。この図から、同じ ARM 分解能であっても SPD 分解能が大きく異なると HPR も大きく変化することが分かる。1 度程度の角度分解能を得るには、ARM 分解能を 2 度程度にするだけでなく、SPD 分解能も 5 度程度にする必要がある²⁰⁾。SPD 分解能は電子が受ける多重散乱で制限されるため、高 SPD 分解能を実現するには反跳方向をコンプトン散乱直後から可能な限り短い距離で決定する必要がある。5 度を達成する為には検出器の材質によらず反跳方向を 10^{-5} 放射長程度の距離で決定しなければならない。

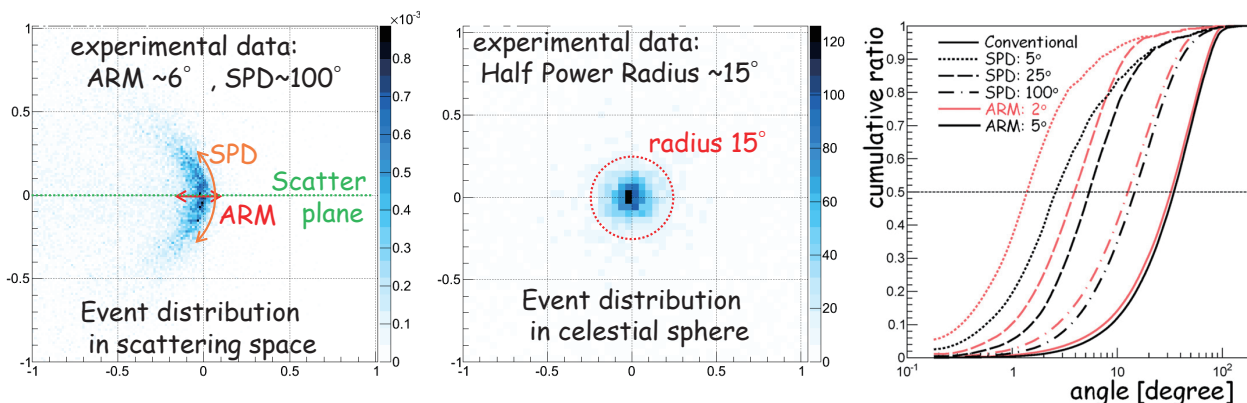


図 3 : SMILE-II ETCC で得られた散乱空間 (左図) と天空上 (中図) でのガンマ線再構成画像 (^{137}Cs : 662 keV) とシミュレーションから得た 662 keV ガンマ線に対する PSF の ARM/SPD 依存性^{20), 26)}。

一方で、従来型コンプトンカメラの事象広がり、ARM 分解能の変化に対してあまり変化しない²⁰⁾。これは従来コンプトンカメラの画像が、コンプトン散乱角を半径とする円を天空上に重ねていく手法であるため、ARM 分解能がコンプトン散乱角の取り得る範囲よりも十分小さければ、PSF は平均的な散乱角で制限されてしまうことが原因である。図 4 から、662 keV のガンマ線の画像を 10 度以下の HPR の PSF で取得するには、ガンマ線の散乱角を 5 度以下に制限する必要があるが、散乱角が 5 度以下になる確率はコンプトン散乱事象の内の 0.6% しかない。このように、従来型コンプトンカメラで数度の分解能を達成するには、数度程度の方散乱事象のみを使用するしかないが、検出効率を大幅に失い検出感度の改善にはつながらない。また、現在の従来型コンプトンカメラでは Maximum Likelihood-Expectation Maximization (ML-EM) 法などの逐次近似法による解析が良く用いられているが、逐次近似法は PSF を改善するものではない。仮に PSF が改善しているならば、信号優位か雑音優位かに依存しないはずであるが、実際には逐次計算を重ねる度に背景の揺らぎが強調されてしまい、暗いガンマ線源の検出有意度は改善しない。逐次近似法による解析法は、信号優位な状況でのみ画像を改善する統計的推定法であり、本質的な改善ではない。

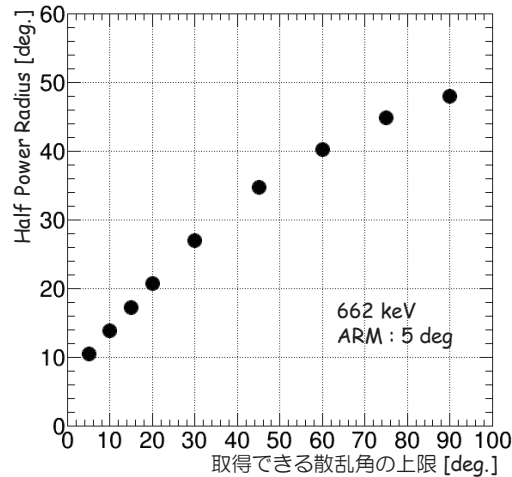


図4：従来コンプトン法の event circle を重ね描きする手法において、散乱角に制限を与えた場合の Half Power Radius の変化。入射ガンマ線のエネルギーは 662 keV、ARM 分解能は 5° とし、散乱角分布は Klein- 仁科の式で与えた計算。

2.3. ガス飛跡検出器を用いた ETCC の有効面積

一般にガスの密度は液体や固体に比べて 1000 倍小さい。この為、ガスをコンプトン散乱の標的として用いる ETCC は有効面積が小さいと思われがちであるが、大きな間違いである。表 1 は現実的なガス検出器と半導体検出器のコンプトン散乱断面積の比較である。散乱断面積は検出器の不透明度 (opacity) に依存するものであり、密度のみに依存するわけではない。半導体検出器は密度が高い一方、大きな面積で厚みのあるものは作りにくい。ガス検出器の場合は、密度は低いが大きな体積は容易に作る事が出来る。半導体検出器を用いたコンプトン散乱標的は、検出器をスタックすることで散乱断面積を確保するが、コンプトン散乱確率は電子の数に比例する為、ガスの圧力や種類を変更することでガス標的も散乱断面積を確保することが出来る。このため、表 1 の様にコンプトン散乱体となる検出器が固体かガスかでは、有効面積の大小は決まらない。さらに、コンプトンカメラの検出効率は、入射ガンマ線のコンプトン散乱確率だけでなく、散乱ガンマ線の吸収断面積も大きく関わるため、検出器の相ではなく構造がその有効面積を決定する。一方で、コンプトン散乱標的となる検出器は SPD 分解能に大きく関わる。前節で述べたように、SPD 分解能を 5 度程にするのであれば、 10^5 放射長の距離での反跳方向決定が必要であるが、ガスではおおよそ 0.1 mm、固体では 0.1 μm となる。表 1 の大きさの検出器で、この空間分解能を実現させるには、ガス検出器では深さ方向を時間情報とし

表 1：ガス飛跡検出器と半導体散乱ターゲットの例

	ガス飛跡検出器		半導体
	Ar 1 atm	CF ₄ 3 atm	Si
	SMILE-II	SMILE-III	SGD (1 C.C.) ⁴¹⁾
電子数 / 分子	18	42	14
密度	1.78 mg/cm ³	10.9 mg/cm ³	2.33 g/cm ³
厚み	300 mm		0.6 mm×32 層
散乱確率 (300 keV)	0.507 %	3.26 %	37.6 % (1 層 : 1.46 %)
散乱確率 (600 keV)	0.386 %	2.48 %	32.0 % (1 層 : 1.20 %)
幾何面積	30×30 cm ²		5.12×5.12 cm ²
散乱断面積 (300 keV)	4.56 cm ²	29.3 cm ²	9.86 cm ²
散乱断面積 (600 keV)	3.47 cm ²	22.3 cm ²	8.39 cm ²

て取得できるため (30 cm/0.1 mm) × 2 軸 ~10⁴ ch、半導体スタック型検出器では (10 cm/0.1 μm) × 2 軸 × 32 層 ~10⁷ ch の読み出しが必要になる。従って消費電力の観点からはガス検出器が有利である。

図 5 に、ガス飛跡検出器を用いた ETCC の有効面積を示す。現在、試験中の ETCC は Ar 95% + CF₄ 3% + i-C₄H₁₀ 2% の混合ガス 1 気圧で一辺 30 cm の立方体のガス飛跡検出器の周囲に、6×6×13 mm の GSO ピクセルシンチレータを底面に 2304 ピクセル、各側面に 1152 ピクセルずつ図 1 のように配置しており、雑音除去後のガンマ線事象として得られ、エネルギーも正しく再構成された検出効率から得た有効面積を点で示している (SMILE-II)²⁰。実線は検出器のジオメトリを Geant4 シミュレーションに取り入れて計算したもので、ガス中でコンプトン散乱を起こし、反跳電子がガス飛跡検出器内のみで全エネルギーを損失し、かつシンチレータで吸収された散乱ガンマ線のエネルギーと合計して入射エネルギーとエネルギー分解能の範囲で一致する事象の検出効率から得た有効面積である²⁰。これより、現在の SMILE-II ETCC の有効面積が Geant4 シミュレーションで良く再現されていることが分かる。一方で、SMILE-II ETCC のシンチレータはガス飛跡検出器の容器外に配置しているため、各面のシンチレータ同士の間には大きな隙間が生じ、散乱ガンマ線の吸収効率が悪い。また、ガス飛跡検出器の阻止能の不足から、200 keV 以上の反跳電子は有感領域外へと逸脱してしまい、ガンマ線再構成に使えない。さらに、シンチレータの厚みも 1 放射長と薄いため、高エネルギーガンマ線の検出効率を大きく損なっている。これを改善する為、シンチレータの厚みを 3 放射長へと増し、飛跡検出器容器内部に設置する改良を計画中である (SMILE-II+ : 図 5 中一点破線)。この改良により、より高いエネルギーの散乱ガンマ線を吸収できるようになる上、これまで飛跡検出器有感領域内で止めきれずガス容器で止まっていた 200 keV 以上の反跳電子を周囲のシンチレータでエネルギー測定ができるため、1 MeV 以上の高エネルギーガンマ線に対する検出効率が 1 桁以上も大きく改善する。さらに、シンチレータ同士の距離を狭めて隙間を無くす構造が取れるために、低エネルギー側でも有効面積を 2 倍に広げることが出来る。さらに、検出器の構造はそのまま、ガスを CF₄ 3 気圧へ変更するとコンプトン散乱断面積が Ar 1 気圧の場合の 6.5 倍になるため、10 cm² の有効面積が実現可能である (SMILE-III : 図 5 中破線)。将来、50 cm 立方のガス飛跡検出器と十分な厚みのシンチレータを用いた ETCC を 4 台用意できれば、図 4 の点線に示されるように数百 cm² の有効面積も可能となる²⁰。

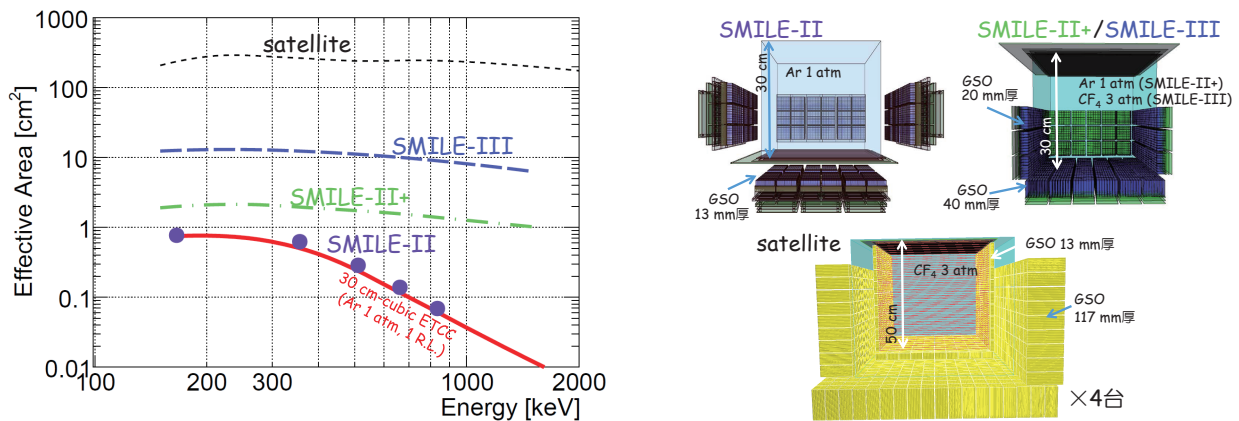


図 5: SMILE ETCC の有効面積 (左) と各 ETCC の模式図 (右)。各線は Geant4 によるシミュレーション、点は実験値 (可視化の為、ガス容器の表示は省いている)。

2.4. 予想検出感度

MeV 領域において、検出感度は 3σ の有意度で観測可能な最小の明るさで表すことが一般的である。この計算には雑音量の見積もりが不可欠である。MeV ガンマ線観測に対する雑音は、宇宙線および宇宙線と大気や筐体との相互作用から生じる二次粒子によって構成される為、雑音量は太陽活動や地球磁気緯度・地磁気の擾乱によって変化する。従って正確な見積もりは難しい。ここでは SMILE-I の実験結果²³⁾とその Geant4 シミュレーション²³⁾ について述べる。

図 6 左は、QinetiQ Atmospheric Radiation Model²⁷⁾ を用いて計算された SMILE-I 水平浮遊時の残留大気圧 7.0 g/cm^2 における陽子・電子・中性子のフラックスである。これらが SMILE-I ゴンゴラに入射した時、SMILE-I ETCC に入射する粒子のスペクトルを Geant4 によりシミュレーションしたものが図 6 中である²³⁾。これより、ガンマ線以外の粒子がゴンドラの筐体と相互作用して生じるガンマ線や中性子が多く入射し、荷電粒子も入射していることが分かる。SMILE-I の回路応答も含めたシミュレーションから、中性子及び荷電粒子をガンマ線として誤認識してしまう確率は、それぞれ 2×10^{-5} と 3×10^{-4} であるため、ガンマ線以外の粒子の合計誤検出レートは、SMILE-I の視野全体での再構成事象レートの 1.5% に過ぎない²³⁾。さらに SMILE-II ETCC では、ガス飛跡検出器の粒子識別能力が改善しており²⁰⁾、より抑えられると期待できる。一方で、雑音ガンマ線は天体由来のガンマ線と同様に検出される。図 6 右は、この装置由来のガンマ線の内訳である。SMILE で主に測定する 0.1~数 MeV においては高エネルギー電子が作るガンマ線が主であるが、1 MeV 以上においては陽子や中性子を起因とするガンマ線も無視はできない。SMILE-I では、この検出器由来のガンマ線は再構成事象レートの 19% 存在した²³⁾。残りの再構成事象は、大気ガンマ線と宇宙拡散ガンマ線であり、これから得た大気ガンマ線と宇宙拡散ガンマ線のフラックスは他の観測機器による観測結果と矛盾しない²³⁾。SMILE-I ETCC は角度分解能が悪くイメージングを行っていないが、SMILE-II ETCC は図 7 のように広い視野にわたってガンマ線の到来方向が特定できる²⁸⁾。検出器由来のガンマ線は、物質量が検出器より下方に多い為、下側から天空に向かって ETCC に入射するものが多い。この為、SMILE-II での観測においては、イメージングによって検出器由来の雑音ガンマ線をさらに制限できると期待できる。

特定のガンマ線天体の観測においては、SMILE-I で測定した事象は全て雑音事象となる。しかし、その内訳は宇宙拡散ガンマ線・大気ガンマ線・宇宙線と筐体との相互作用から生じる検出器由来のガンマ線が 98% 以上を占めていた²³⁾。このため、検出感度の見積もりには、視線方向の宇宙拡散ガンマ線・大気ガンマ線及び、検出器由来のガンマ線を考えればよい。ガンマ線天体は、2.2 節で述べた PSF を持つため HPR で切り出すことを想定し、有効面積は 2.3 節のシミュレーションで得た値の 0.5 倍とし、雑音量は残留大気圧 3.5 g/cm^2 における宇宙拡散・大気ガンマ線の強度の 2 倍として SMILE-II+ 及び SMILE-III の検出感度を計算した。SMILE-II+ 以降の PSF は、ARM 分解能はエネルギー分解能で、SPD 分解能は電子の多重散乱で制限さ

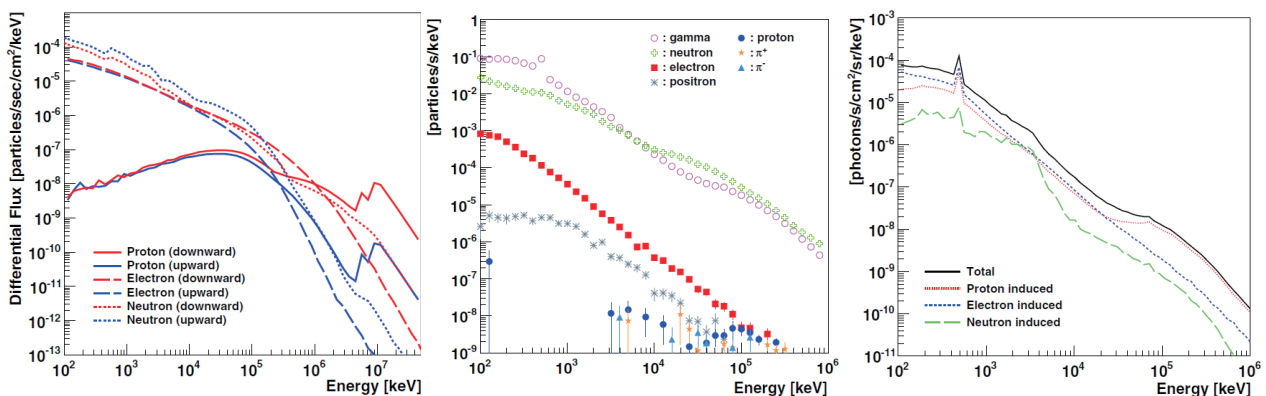


図 6: SMILE-I 放球時に想定された陽子・電子・中性子のフラックス(左)及び SMILE-I ETCC に入射する様々な粒子及び装置由来のガンマ線のスペクトル (中)。右図は装置由来のガンマ線の内訳²³⁾。

れると仮定している。この結果を図 8 に示す。これより、SMILE-II+ では数時間の観測時間により、かに星雲を 5σ の有意度で観測可能であると示される。また、SMILE-III では COMPTEL より 10 倍良い検出感度、衛星実験では 1 mCrab の検出感度が達成できる見込みである³⁹⁾。

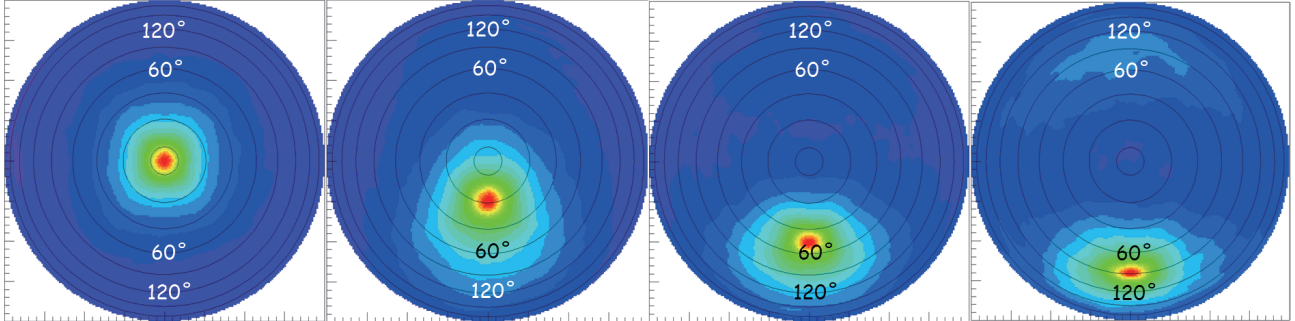


図 7：SMILE-II ETCC で実際に得た ^{137}Cs (662 keV) の再構成ガンマ線画像。ガンマ線源と検出器の光軸のなすおおよその角は左から 0 度・30 度・60 度・90 度²⁸⁾。

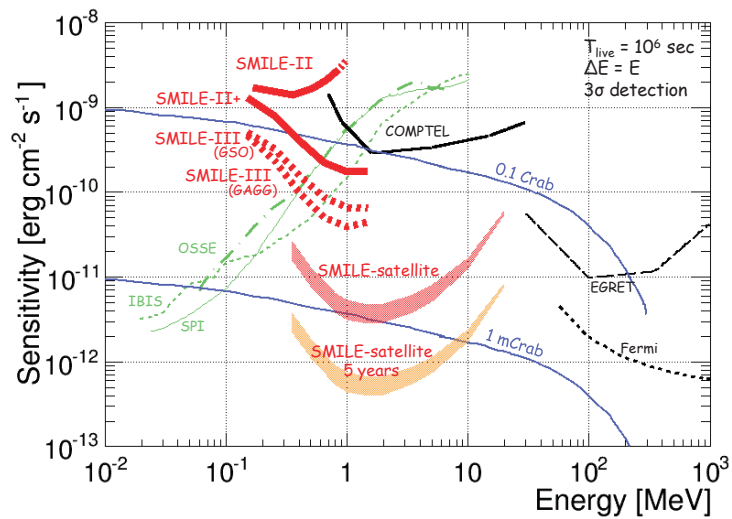


図 8：PSF に基づいた計算による SMILE ETCC の予想検出感度。

3. SMILE-II ETCC による実証実験

3.1. ETCC のエネルギースペクトル構造

図 9 左は、SMILE-II ETCC によるガンマ線再構成画像から、ガンマ線源設置位置を中心とする領域で事象を取り出して得たエネルギースペクトルである。画像の切り出しを行わないと、ガンマ線源から直接観測された成分 (図中 662 keV 付近のピーク) と、検出器周囲の空気等で散乱された低エネルギーの連続的成分が見られる。しかし、画像からガンマ線源付近の事象だけ取り出すと、散乱成分である連続成分が大きく排除され、検出器に入射するガンマ線のエネルギースペクトルが観測できている。図 9 右は、単純な GSO シンチレータで取得した ^{137}Cs のスペクトルとの比較である。SMILE-II ETCC は、散乱ガンマ線の吸収体として GSO シンチレータを使用しているため、そのエネルギー分解能はほぼ同じ (662 keV に対して ETCC は半値全幅で 11%、GSO シンチレータのみは半値全幅で 11%²⁹⁾) である。このため、図 9 右においても、ガンマ

線のエネルギーが全吸収されたピークの幅はほぼ同じになっている。一方、GSO シンチレータのスペクトルには、低エネルギーから 480 keV 付近まで続く連続的な成分があり、ピークとの間に明瞭な落ち込みがあるが、SMILE-II ETCCC のスペクトルでは、明瞭な落ち込みはない。両者のスペクトル構造についての模式的な説明を図 10 に示す。GSO シンチレータのような一般のガンマ線検出器では、1) ガンマ線が全吸収されるとエネルギースペクトルにピークを作る。しかし、MeV ガンマ線領域ではコンプトン散乱が有意であるため、2) 検出器中で散乱を起こし、散乱ガンマ線は検出されない事象も多い。コンプトン反跳電子のエネルギーは散乱角に依存し、180 度散乱で最大値を取る。このため、2) の成分によるスペクトルには高エネルギー側にコンプトンエッジと呼ばれる肩構造を作る。662 keV のガンマ線に対する反跳電子の最大エネルギーは 478 keV であり、図 9 右赤のスペクトルの構造と一致する。ところが、ETCC は散乱検出器と吸収検出器の同時を取るため、反跳電子のみが測定されることは原理的になく、図 10 の 2) に相当する事象はスペクトルには表れない。一方、3) 検出器外部でコンプトン散乱を起こした事象は、ガンマ線が検出器に入射するため、一般の検出器でも ETCC でも検出され、連続成分として観測される。この成分は、全吸収のピークと連続的につながり、180 度散乱で最小値をとる。このため、ETCC のエネルギースペクトルにはコンプトンエッジが無く、全吸収ピークと連続的につながる散乱成分のみが観測されることになり、図 9 右黒のようなスペクトルが得られる。

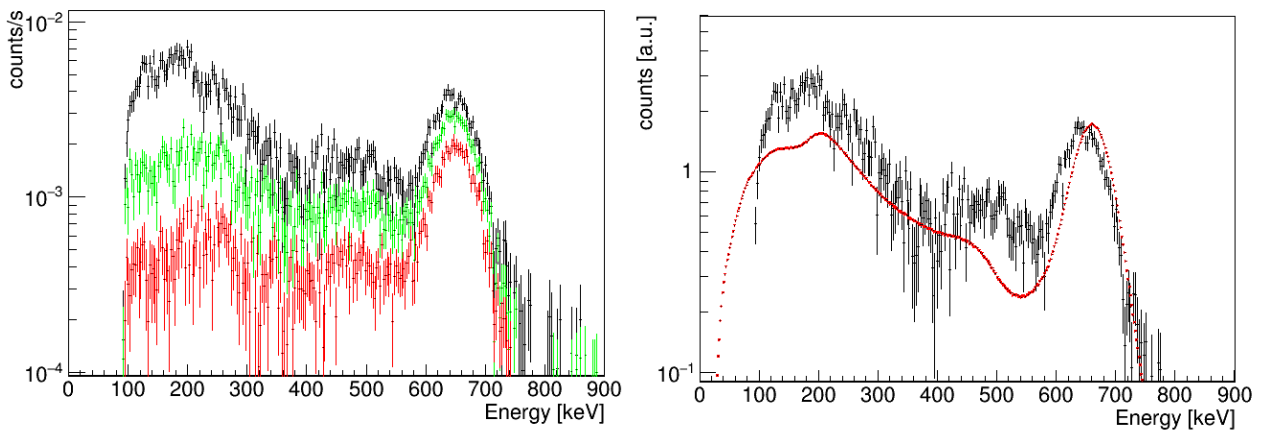


図 9：左図は SMILE-II ETCC で得たイメージでガンマ線源設置位置を中心とする円の領域の事象を選び出した時の ^{137}Cs (662 keV) のスペクトルの変化 (黒：カット無し、緑：半径 30 度、赤：半径 15 度)。線源は ETCC の中心軸上、検出器から 2 m 離れた位置に設置。右図は SMILE-II ETCC (黒：左図の黒と同じ) と GSO シンチレータ (赤) で得た ^{137}Cs のスペクトルの比較 (ガンマ線源と GSO シンチレータの距離は 50 cm)。両者のエネルギー分解能はほぼ同じだが、シンチレータ単独のスペクトルでは明確なコンプトンエッジが見られ、ETCC のスペクトルでは見られない (ピーク位置のずれは PMT のゲイン揺らぎによるもの)。

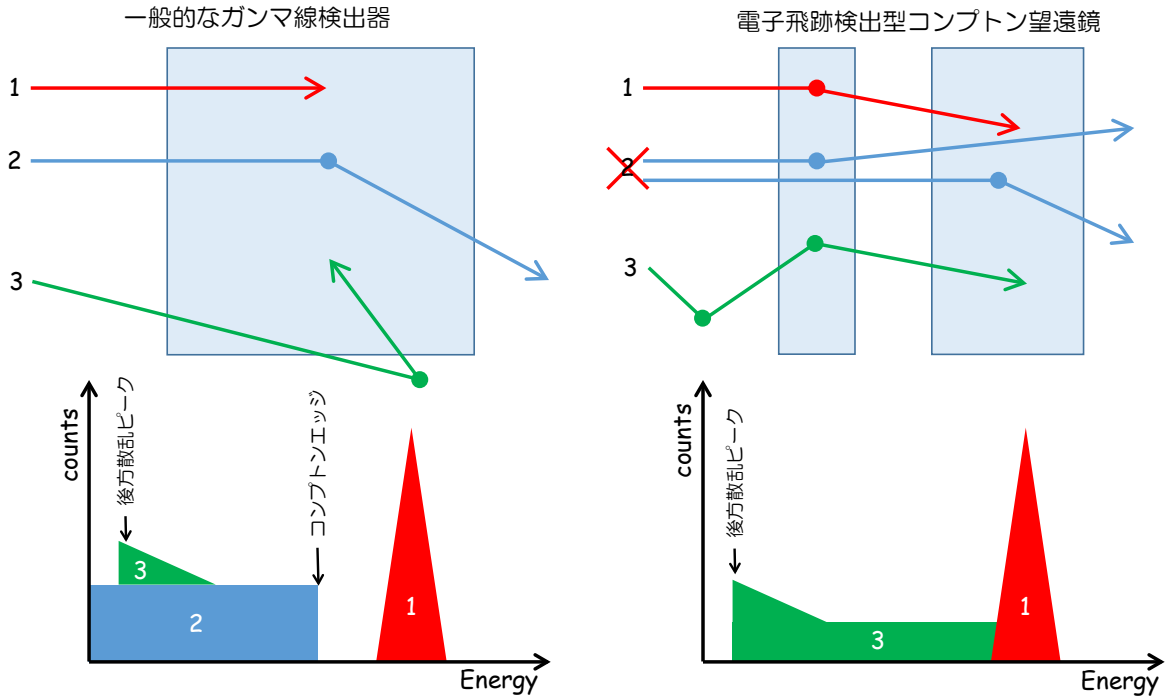


図 10：一般的なガンマ線検出器とコンプトン望遠鏡のエネルギースペクトルの違い。MeV ガンマ線は散乱優位であるため、1) 検出器で吸収される事象だけではなく、2) 検出器内部や 3) 外部で散乱され部分的なエネルギーのみ検出器で測定される事象も観測され、一般の検出器ではコンプトンエッジと呼ばれる構造がみられる。一方、ETCC ではコンプトンエッジを構成する事象はトリガーされないため、エッジ構造は見られない。

3.2. 雑音優位な環境でのガンマ線の検出

MeV 領域における天体観測を困難にしている理由の一つは、雑音の多さにあるが、ETCC は単体で雑音を除去する手法を複数持つという特徴を持つ。これを実証するため、図 11 左に示す配置で水ターゲットに 140 MeV の陽子を照射し、中性子やガンマ線が多量に発生している中で、既知の強度のガンマ線源を観測する実験を行った。中性子とガンマ線の強度比は、液体シンチレータを用いてモニタリングし、Geant4 によるシミュレーションの結果と合わせて、SMILE-II ETCC の位置における中性子：ガンマ線が 1：3 と見積もられた²⁹⁾。また、ビームシャッター付近で跳ね返った陽子が一部、SMILE-II ETCC に直接入射している成分も同時に観測されている²⁹⁾。このときの SMILE-II ETCC のデータ取得レートはガンマ線源ありで 400 Hz (dead time ~60%)、線源なしで 350 Hz (dead time ~60%)、線源なしかつビーム無しで ~30 Hz (dead time ~10%) となっており、ガンマ線源よりもビームで生成された雑音量の方が 5 倍以上強い環境になっていた。この雑音優位な環境の中で、SMILE-II ETCC で取得されたガンマ線再構成画像が図 11 中である²⁹⁾。この画像から、設置した既知のガンマ線源の位置が正しく再構成されていることが分かる。また、図 11 右はガンマ線再構成画像から、ガンマ線源付近の領域と線源のない領域をそれぞれ切り出して得たエネルギースペクトルである²⁹⁾。2つの領域のスペクトルを比較すると、ビームによって生成された連続的な成分は双方の領域で見えているが、ガンマ線源からの信号は線源領域にのみ確認できる。これらから、上記のような種々の粒子が飛び交う中で、入射ガンマ線のエネルギーと到来方向を正しく捉えることが出来ていることが分かる²⁹⁾。また、この実験結果から計算された SMILE-II ETCC の有効面積は、誤差の範囲で図 5 のデータに一致する²⁰⁾。即ちガンマ線以外の雑音量によらずに精度よくガンマ線観測ができるということであり、ETCC の雑音除去能力の高さを示している。種々の粒子が飛び交う中で、線源領域以外を背景放射として線源領域のエネルギースペクトルから差し引くという解析は、動かすことのできない定常天体の観測で常識的に用いられている方法であり、図 11 の結果は ETCC が天体からのスペクトルを従来と同じ方法で取得できる事の証明にもなっている。

図 12 は、27 kBq 相当の ^{22}Na を検出器から 5.5 m 離し、環境放射線と比較して十分弱いガンマ線源を SMILE-II ETCC で測定した結果である²⁰⁾。この時のデータ取得レートはガンマ線源の有無にかかわらず ~40 Hz であり、環境放射線が十分優位である。おおよその見積もりでは、 ^{22}Na からのガンマ線は、毎秒 15 光子程 SMILE-II ETCC に入射し、環境放射線に対して 1-2% 程度の寄与となっている。実際 SMILE-II ETCC で取得できたスペクトルにおいても、画像情報を用いないと図 12 左の橙線のように ^{22}Na からの電子陽電子対消滅線の超過は全く確認できない。しかし、511 keV 周りのガンマ線再構成画像では、線源位置に明らかな超過が確認できる²⁰⁾。この観測では 3.5×10^5 秒の観測で 511 keV 付近におおよそ 10^3 事象の超過を観測しており、これから計算される有効面積は図 5 の有効面積に等しい²⁰⁾。図 11・図 12 の結果から雑音環境によらず、測定された検出器の基本パラメータから想定される観測結果が得られていることが分かる。

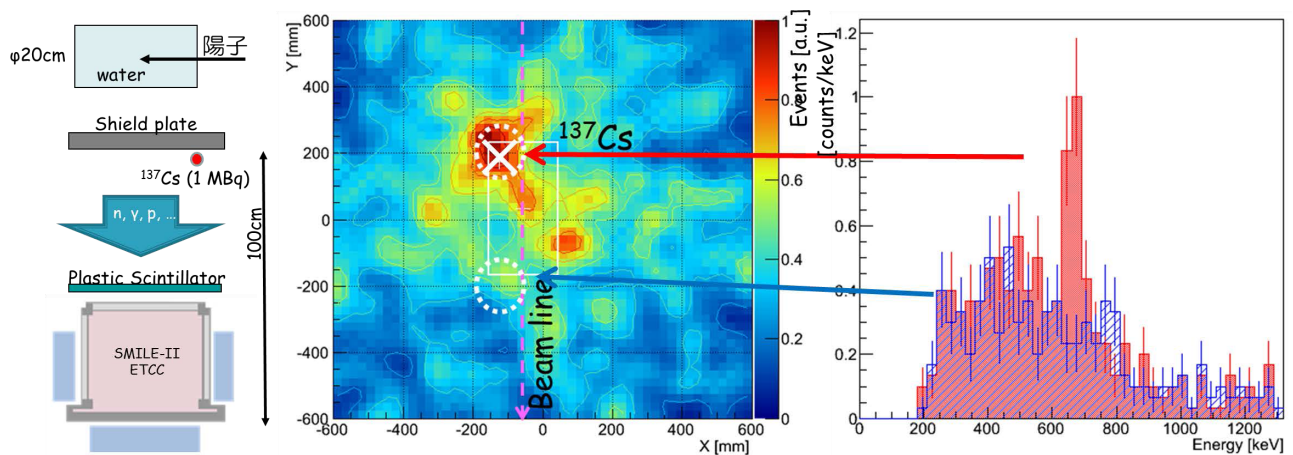


図 11：雑音が多い中でのガンマ線観測実験。左図のようなセットアップで中性子・陽子・ガンマ線が飛び交う中で取得した 662 keV でのガンマ線再構成画像（中）と領域ごとのエネルギースペクトル（右）。ガンマ線源は ^{137}Cs (662 keV, 0.85 MBq) を使用し、設置位置は × 印の位置²⁹⁾。

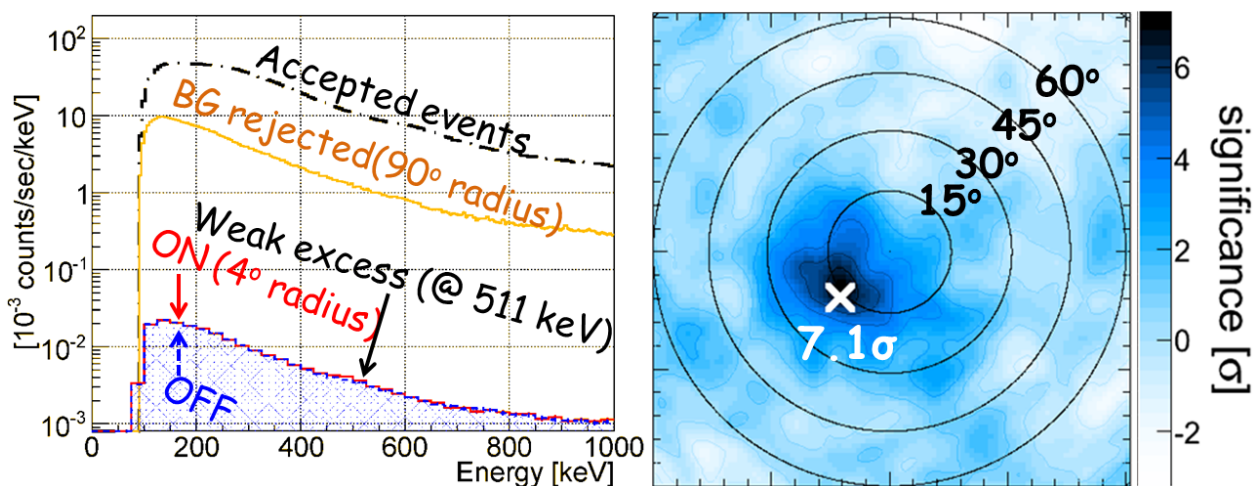


図 12：27 kBq 相当の ^{22}Na を SMILE-II ETCC から 5.5 m 離れた位置に設置した際のスペクトル（左）と 511 keV \pm 10% でのガンマ線再構成画像（右）²⁰⁾。左図の線は、上から取得された全てのデータ、再構成できた事象の内検出器より前方から到来した事象、線源設置位置を中心とする半径 4 度の事象 (ON は線源あり、OFF は線源なし)。右図の × が線源の設置位置。有意度の最も高いところとのずれは 2 度。

3.3. イメージングスペクトロスコピー

天体现象を理解するには、それぞれの天体から放射されているエネルギースペクトルを正確に測定する必要がある。このため、MeV 天文学の開拓にはイメージングスペクトロスコピーが欠かせない。図 13 は異なる種類のガンマ線源を同時に設置して行った、SMILE-II ETCC の測定結果である。特にエネルギーに制限を加えないと 3 種類のガンマ線源が全て再構成画像内に確認できるが、それぞれのエネルギー帯域で制限を加えると、特定のガンマ線源のみが画像で確認できる。これは、視野内に複数天体が同時に存在しても、個々のエネルギースペクトルを取得できることを意味している。一方で、視野内に複数のガンマ線源が存在する場合、とある線源周囲の事象からエネルギースペクトルを得ると、近くのガンマ線源からの事象が観測対象の領域に漏れ込んでしまう事になる。ETCC では、図 3 で示されるように PSF を明確に定義できるため、観測対象周囲の画像から漏れ込み量を正確に見積もり差し引くことができる。しかし、統計的画像処理を施した画像では PSF の定義が難しいため、漏れ込み量の見積もりが出来ず、天体本来のスペクトルを見誤ることになる。特に、銀河面に広がる電子陽電子対消滅線や ^{26}Al からのガンマ線など、大きな広がりを持つ放射や多数の天体からの放射が期待されるようなガンマ線の観測においては、正確な PSF が定義できなければ議論を困難にする。これまで、全てのコンプトン法を用いたガンマ線検出器では明確な PSF の定義をおろそかにしてきたが、MeV ガンマ線天文学を拓くのに必要なイメージングスペクトロスコピーを行う為に、それぞれの PSF について深く議論する必要がある。

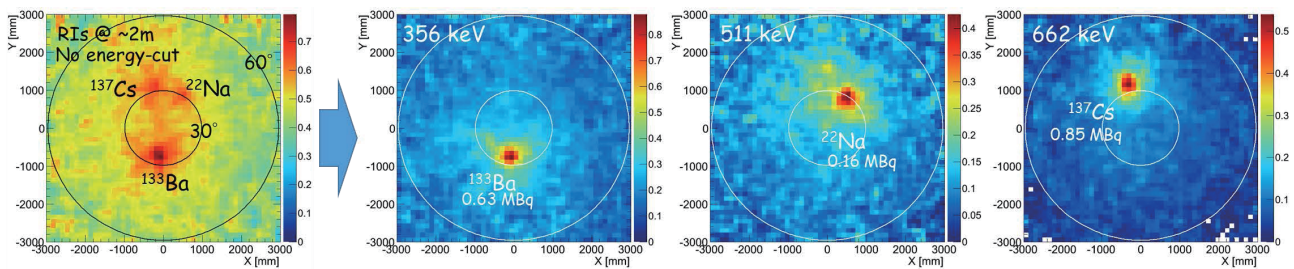


図 13：複数種類のガンマ線源を同時に設置して測定したガンマ線再構成画像。

3.4. 偏光検出

偏光したガンマ線がコンプトン散乱を起こすと、散乱ガンマ線及び反跳電子は入射ガンマ線の電場方向に飛びやすい、という性質を持つ。この為、コンプトン散乱を用いたガンマ線検出器は、一般に偏光検出能力を持つ。我々の開発する ETCC も、コンプトン散乱を利用したガンマ線望遠鏡であり、偏光検出が期待できる。この偏光検出能力を実証する為、SPRING-8 のビームライン BL08W を用いて実験を行った (図 14)³⁰⁾。ビームラインからの 182 keV のガンマ線を Al 板で散乱させ、偏光度およそ 96% で 135 keV 程度にして SMILE-II ETCC に入射させた。ビーム出口から Al 板までの約 2 m は、特に真空に引いたりせずに空気中を通して行っている。また、SMILE-II ETCC の入射窓には 10 cm 角の開口部を持たせた鉛シールドを置き、ゆるく入射角の制限を行った。この時得られたエネルギースペクトルが図 14 右である³⁰⁾。ガンマ線はおおよそ 90 度の散乱を受けるため 134 keV になると計算されるが、図でも Al 板による成分が 135 keV 付近にピークを持っていることが分かる³⁰⁾。この状態で SMILE-II ETCC を回転させて方位角を変更し、散乱ガンマ線の散乱方向分布の測定を行った。SMILE-II ETCC のシンチレータの配置は方形であるため、取得した生の散乱方向分布には幾何効果によるモジュレーションが含まれる。この為、0 度と 90 度の結果を足し合わせて無偏光入射を模擬した計算から幾何効果を得て、真の散乱方向分布を取ったものが図 15 である³⁰⁾。それぞれの角度における測定点を正弦曲線でフィットすることで得られた偏光角は、設定した角度と誤差の範囲で一致する。また、振幅から偏光検出能力を示すモジュレーションファクターは 0.58 ± 0.02 と大きな値が得られた³⁰⁾。これは、Geant4 シミュレーションから予想される SMILE-II ETCC のモジュレーションファクター (0.62 ± 0.02) と一致し、期待通り高い偏光検出能力を持っていることが確認された³⁰⁾。

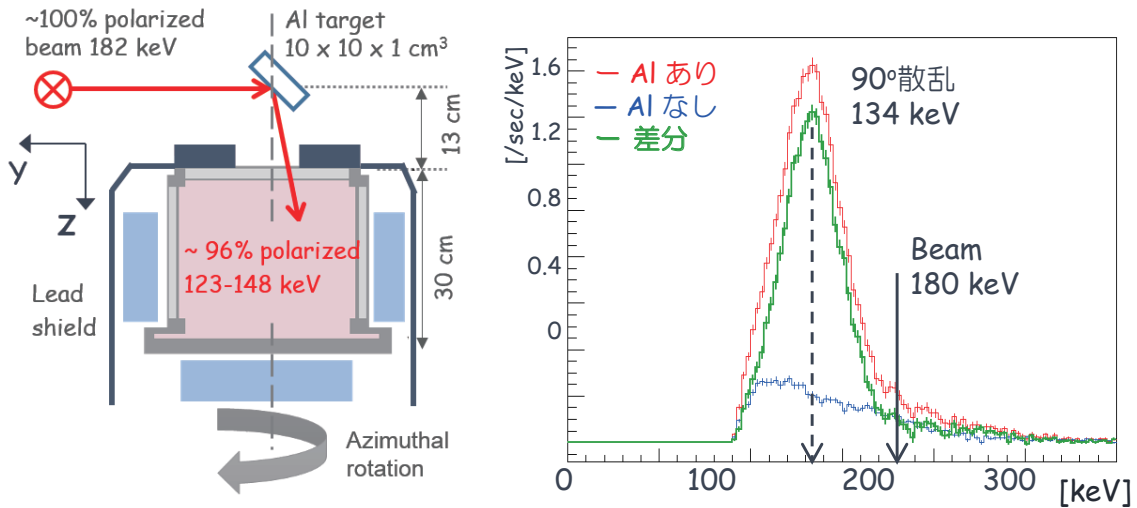


図 14：偏光検出実証実験のセットアップと SMILE-II ETCC で得られたスペクトル³⁰⁾。

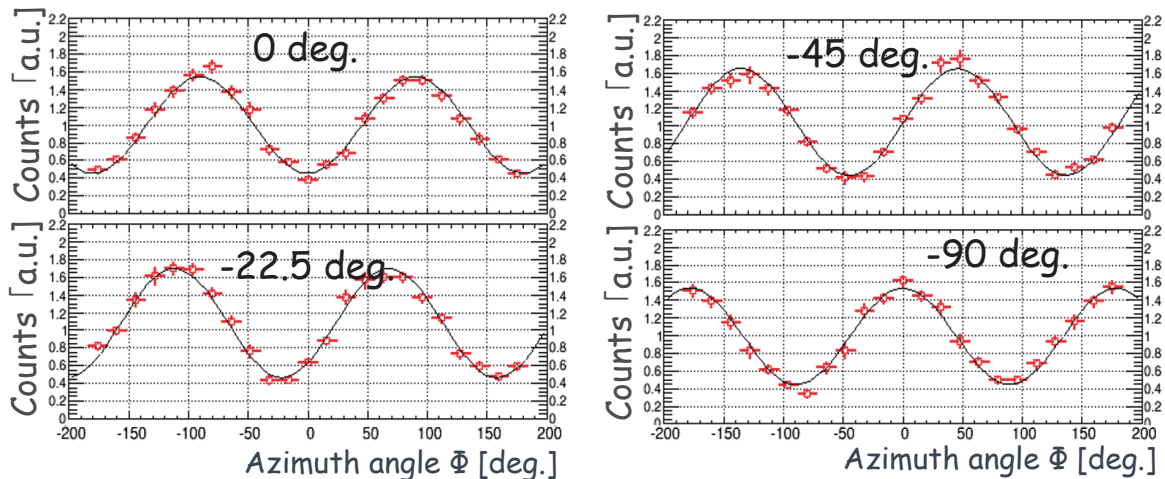


図 15：測定されたモジュレーションカーブ³⁰⁾。正弦曲線によりフィットされた線（実線）から得られた偏光面の角度は、それぞれ 0.3 ± 1.3 度・ -21.8 ± 1.0 度・ -44.0 ± 0.7 度・ -89.7 ± 1.1 度。

4. 将来計画で期待される観測

これまで述べてきたように、電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡 ETCC は、MeV ガンマ線天文学を拓くのに必要とされる、高い角度分解能・広い視野・大きな有効面積・強力な雑音除去能力を併せ持った検出器であるが、最初の気球実験 SMILE-I (2006 年) 以降、気球実験を実施できていない。ここでは、SMILE-III 以降の検出器を用いた将来観測でどのような結果が期待されるか、核ガンマ線の観測を例に紹介する。

²⁶Al が放射する 1.8 MeV のガンマ線は、HEAO-3 によって発見された後³¹⁾、COMPTEL³²⁾ や SPI/INTEGRAL³³⁾ によってその銀河面分布が粗く測定されており、銀河面に広く分布していることが知られている。

²⁶Al は asymptotic giant branch (AGB) 星と呼ばれる赤色巨星・Wolf-Rayet 星・重力崩壊型超新星爆発・新星のアウトフロー内などで生成されると考えられている¹⁰⁾。これら元素合成の現場で生成された ²⁶Al は、銀河内の物質拡散のタイムスケール程度の寿命を持っているため、物質の広がりに対するプローブとして銀河の化学進化の理解に大きく貢献することが期待される。しかし、現状の観測から得られている COMPTEL や SPI の銀河面分布は ²⁶Al の生成源やそこからの広がり具合を議論するにはあまりに粗く、詳細な議論はでき

ていない。そこで我々の ETCC で観測を行った場合、どのような観測結果が得られるかを簡単に見積もった。背景ガンマ線として、系外拡散ガンマ線と系内拡散ガンマ線を仮定し、系外ガンマ線は一様・等方として、強度は SMM の観測結果³⁴⁾を用いた (図 16 上段左)。系内拡散ガンマ線の分布は、EGRET の系内拡散ガンマ線モデル³⁵⁾を用いて、強度は COMPTEL の 1-3 MeV での観測結果⁸⁾に合うようスケールした (図 16 上段中)。²⁶Al の銀河面分布は、COMPTEL や SPI による観測でその類似性が報告されている^{32, 33)} DIRBE/COBE の 240 μm (12 K のダストのトレーサー) での全天観測結果³⁶⁾をテンプレートとして、1.8 MeV ガンマ線の強度は SPI の銀河中心付近の観測結果³³⁾でスケールしたもので仮定した (図 16 上段右)。これらを合計したものを 1.8 MeV において期待される強度分布として用いる (図 16 下)。SMILE-III の有効面積は図 5 の Geant4 シミュレーションの結果を用いる。SMILE-III ETCC の視野は非常に広いが、天頂角 60 度以上では大気ガンマ線が卓越する上、大気減衰も大きくなるため天頂角 60 度以下を測定範囲とすると、1 日当たり観測できる範囲は図 17 左のようになる。1.8 MeV における SMILE-III のエネルギー分解能を半値全幅 6%、ARM 分解能を 5 度、SPD 分解能を 25 度と仮定し、高度 40 km で観測を 10 日間行うとし大気減衰が 15% とすると、期待される検出事象数マップは図 17 右のようになり、銀河面および銀河中心付近に卓越する部分が見えることが期待できる。また、銀河面に広がる分布として、電子陽電子対消滅面の 511 keV も観測されている。OSSE や SPI でその分布が観測され^{37, 38)}、²⁶Al はおよそ 80% が β^+ 崩壊をすることからこれらの相関が議論されているが、放射源の特定には至っていない。²⁶Al の見積もりと同様に、系外拡散ガンマ線として SMM の 511 keV 付近の観測強度³⁴⁾で一様等方な分布を仮定した。系内拡散ガンマ線として EGRET の系内拡散ガンマ線モデルの分布を OSSE の観測から推定されている宇宙線電子の制動放射の強度⁸⁾でスケールした。511 keV の空間分布は SPI の観測で類似性が認められている³⁸⁾ DIRBE/COBE の 240 μm の全天マップで仮定し、511 keV の強度は SPI/INTEGRAL の観測値³⁸⁾を用いた。これらの仮定の下、SMILE-III の観測で期待される検出事象数マップは図 18 の様になる。さらに衛星観測においては、超新星爆発に伴う核ガンマ線も観測が期待される。図 19 は 5 Mpc の距離で Ia 型超新星爆発が起きた場合、爆発後 50 日から 100 日を積分して得られるスペクトルである³⁹⁾。Ia 型超新星爆発では 0.6 太陽質量もの ⁵⁶Ni が生成されると考えられているが、図 19 ではその娘核の ⁵⁶Co からの核ガンマ線が多数確認できる³⁹⁾。3.5 Mpc の距離で爆発した SN2014J の SPI による観測では、847 keV と 1238 keV の核ガンマ線がそれぞれ 3.9σ と 4.3σ の有意度の検出であった⁴⁰⁾ 事を思えば、MeV ガンマ線天文学における大きな進展が期待できる。

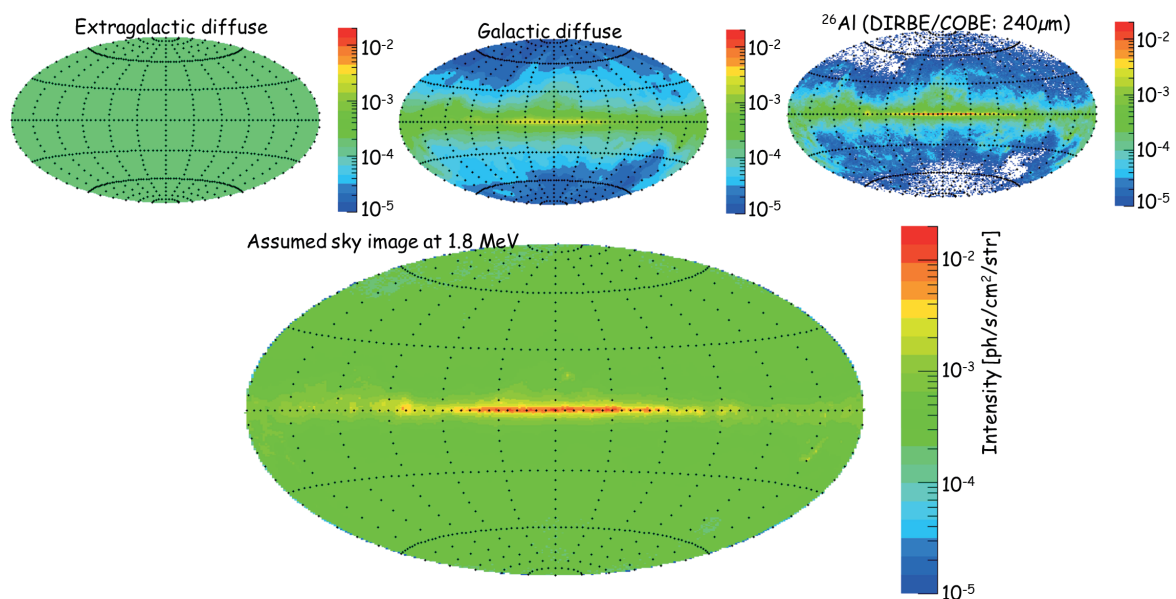


図 16：仮定した系外拡散ガンマ線・系内拡散ガンマ線・²⁶Al のそれぞれの全天ガンマ線強度分布 (上段) とそれらを合計して得た 1.8 MeV での予想強度分布 (下)。

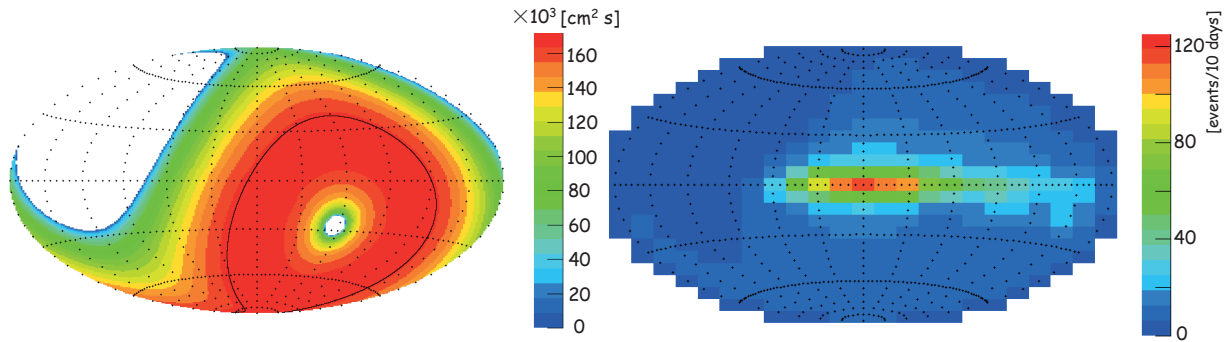


図 17：SMILE-III で期待される 1 日あたりの 1.8 MeV に対する有効観測時間（左）と高度 40 km における 10 日間の観測で期待される事象数マップ。左図の 1 マスはおおよそ $\delta l = 10$ 度 $\times \delta b = 7.5$ 度

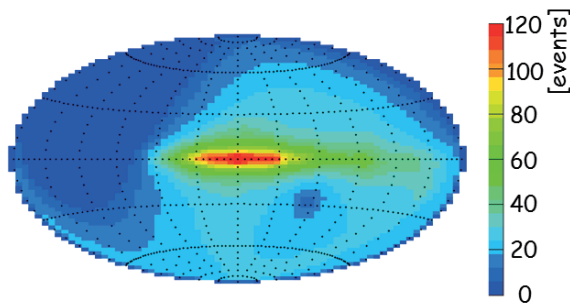


図 18：高度 40 km で 10 日間、SMILE-III で観測を行った際に期待される 511 keV の検出事象数マップ。エネルギー分解能を 11.4%、ARM 分解能を 5 度、SPD 分解能を 30 度、大気減衰が 25% とした。有効面積は図 5 のシミュレーションを用いている。1 マスは $\delta l = 4.8$ 度 $\times \delta b = 2.4$ 度程度。

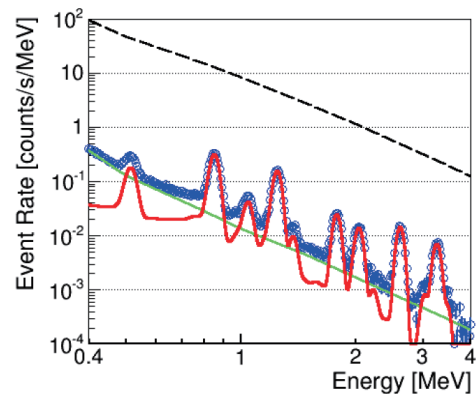


図 19：5 Mpc の距離で Ia 型超新星爆発が起きたとき、爆発後 50-100 日の積分観測で期待されるスペクトル。緑線は SMILE 衛星で想定される背景ガンマ線³⁹⁾。

5. さいごに

様々な天体现象を探るプローブとして期待されながら、2000 年で観測を終えた COMPTEL 以降、MeV ガンマ線天文学はほとんど進展していない。これは、MeV ガンマ線の透過力が高かつ散乱優位であるために検出自体が難しい上、様々な雑音が存在しているにもかかわらず、雑音除去の手法や PSF の理解が進まなかった為である。我々は、コンプトン望遠鏡の角度分解能を改めて PSF で評価し、将来の MeV ガンマ線観測には正確なコンプトン反跳方向の測定が必須であることを確認した。また、現実的な検出器で構成するコンプトン望遠鏡の有効面積は、散乱体となる検出器がガスと半導体で大きな差が生まれることは無い。我々の開発するガス飛跡検出器を用いた ETCC について、SMILE-I 気球実験の観測結果と Geant4 を用いたシミュレーションから将来観測における検出感度を求めたところ、SMILE-III で COMPTEL のおよそ 10 倍、衛星計画では 1 mCrab の感度に到達できることが示された。一方、現在試験中の SMILE-II ETCC を用いた地上校正試験からは、多量の雑音の中でのガンマ線観測、イメージングスペクトロスコーピー、偏光検出が Geant4 シミュレーションで期待される通り実施できることも確認されている。現在、この ETCC を用いた気球実験を計画しており、明るい天体の観測（SMILE-II+）、長時間気球による科学観測（SMILE-III）、と段階的に進め、最終的に衛星搭載を目指している。この SMILE-III や衛星観測による核ガンマ線の観測からは、これまでになく高感度かつ詳細な画像を得ることが期待され、MeV ガンマ線天文学が大きく進歩すると思われる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費基盤研究 (S) JP21224005, 挑戦的萌芽研究 JP23654067, JP25610042, JP16K13785, 基盤研究 (A) JP16H02185, 若手研究 (B) JP15K17608, 特別研究員奨励費 JP11J00606, JP13J01213, JP16J08498 の助成を受けたものである。また、グローバル COE プログラム「普遍性と創発性から紡ぐ次世代物理学」、JAXA 搭載機器基礎開発実験費から援助を受けている。偏光測定実験は、SPrin-8 の BL08W ビームラインを使用して行った (課題番号 2014B1088)。

参考文献

- [1] Matz, S. M. et al., 1988. Gamma-ray line emission from SN1987A. *Nature*, 331, pp. 416-418.
- [2] von Ballmoos, P., 1995. Future goals for γ -ray spectroscopy. *Experimental Astronomy*, 6(4), pp. 85-96.
- [3] Urry, C. M. & Padovani, P., 1995. Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Volume 107, p. 803.
- [4] Briggs, M. S. et al., 1999. Observations of GRB 990123 by the Compton Gamma Ray Observatory. *The Astrophysical Journal*, 524(1), pp. 82-91.
- [5] McConnell, M. et al., 1996. A search for galactic black hole candidates at MeV energies - preliminary results. *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 120, pp. 149-152.
- [6] Mahadevan, R., Narayan, R. & Krolik, J., 1997. Gamma-Ray Emission from Advection-dominated Accretion Flows around Black Holes: Application to the Galactic Center. *The Astrophysical Journal*, 486(1), pp. 268-275.
- [7] Boggs, S. E. et al., 2000. Diffuse Galactic Soft Gamma-Ray Emission. *The Astrophysical Journal*, 544(1), pp. 320-329.
- [8] Strong, A. W., Moskalenko, I. V. & Reimer, O., 2000. Diffuse Continuum Gamma Rays from the Galaxy. *The Astrophysical Journal*, 537(2), pp. 763-784.
- [9] Summa, A. et al., 2013. Gamma-ray diagnostics of Type Ia supernovae. Predictions of observables from three-dimensional modeling. *Astronomy & Astrophysics*, 554, p. A67.
- [10] Prantzos, N. & Diehl, R., 1996. Radioactive ^{26}Al in the galaxy: observations versus theory. *Physics Reports*, 267, pp. 1-69.
- [11] Mészáros, P. & Rees, M. J., 2010. Population III Gamma-ray Bursts. *The Astrophysical Journal*, 715(2), pp. 967-971.
- [12] Toma, K., Sakamoto, T. & Mészáros, P., 2011. Population III Gamma-ray Burst Afterglows: Constraints on Stellar Masses and External Medium Densities. *The Astrophysical Journal*, 731(2), p. 1227.
- [13] Schönfelder, V. et al., 1993. Instrument description and performance of the Imaging Gamma-Ray Telescope COMPTEL aboard the Compton Gamma-Ray Observatory. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 86(2), pp. 657-692.
- [14] Schönfelder, V. et al., 2000. The first COMPTEL source catalogue. *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 143, pp. 145-179.
- [15] Schönfelder, V., 2004. Lessons learnt from COMPTEL for future telescopes. *New Astronomy Reviews*, 48(1-4), pp. 193-198.
- [16] Bouchet, L. et al., 2008. INTEGRAL SPI All-Sky View in Soft Gamma Rays: A Study of Point-Source and Galactic Diffuse Emission. *The Astrophysical Journal*, 679(2), pp. 1315-1326.

- [17] Aprile, E. et al., 2004. Calibration and in-flight performance of the Compton telescope prototype LXeGRIT. *New Astronomy Reviews*, 48(1-4), pp. 257-262.
- [18] Bandstra, M. S. et al., 2011. Detection and Imaging of the Crab Nebula with the Nuclear Compton Telescope. *The Astrophysical Journal*, 738(1), p. 8.
- [19] Kamiya, K., 2011. *Compton Recoil Electron Tracking With the TIGRE Gamma-Ray Balloon Experiment*, s.l.: University of California.
- [20] Tanimori, T. et al., 2015. An Electron-Tracking Compton Telescope for a Survey of the Deep Universe by MeV Gamma-Rays. *The Astrophysical Journal*, 810(1), p. 28.
- [21] Tanimori, T. et al., 2004. MeV γ -ray imaging detector with micro-TPC. *New Astronomy Reviews*, 48(1-4), pp. 263-268.
- [22] Takada, A. et al., 2005. Development of an advanced Compton camera with gaseous TPC and scintillator. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 546(1-2), pp. 258-262.
- [23] Takada, A. et al., 2011. Observation of Diffuse Cosmic and Atmospheric Gamma Rays at Balloon Altitudes with an Electron-tracking Compton Camera. *The Astrophysical Journal*, 733(1), p. 13.
- [24] Mizumoto, T. et al., 2015. New readout and data-acquisition system in an electron-tracking Compton camera for MeV gamma-ray astronomy (SMILE-II). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 800, pp. 40-50.
- [25] Sauli, F., 2014. *Gaseous Radiation Detectors*. s.l.:Cambridge University Press.
- [26] Takada, A. et al., 2016. MeV gamma-ray observation with a well-defined point spread function based on electron tracking. *Proceedings of SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation*.
- [27] Lei, F. et al., 2006. Improvement to and Validations of the QinetiQ Atmospheric Radiation Model (QARM). *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 53(4), pp. 1851-1858.
- [28] Mizumura, Y. et al., 2014. Effectiveness and Performance of a Full Ray-Tracing Sub-MeV Compton Imager. *Conference Record of 2014 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference*.
- [29] Matsuoka, Y. et al., 2015. Performance of a new Electron-Tracking Compton Camera under intense radiations from a water target irradiated with a proton beam. *Journal of Instrumentation*, 10, C01053.
- [30] Komura, S. et al., 2015. Balloon-Borne Experiment for Deep Sky Survey of MeV Gamma Rays using an Electron-Tracking Compton Camera. *Proceedings of 34th International Cosmic Ray Conference*.
- [31] Mahoney, W. A. et al., 1982. Diffuse Galactic Gamma-ray Line Emission from Nucleosynthetic ^{60}Fe , ^{26}Al , and ^{22}Na : Preliminary Limits from HEAO 3. *The Astrophysical Journal*, 262, pp. 742-748.
- [32] Plüscke, S. et al., 2001. The COMPTEL 1.809 MeV survey. *Proceedings of the Fourth INTEGRAL Workshop*, pp. 55-58.
- [33] Bouchet, L. et al., 2015. The Galactic ^{26}Al Emission Map as Revealed by *INTEGRAL* SPI. *The Astrophysical Journal*, 801, pp.142.
- [34] Watanabe, K. et al., 1999. The Diffuse Gamma-Ray Background from Supernovae. *The Astrophysical Journal*, 516, pp. 285-296.
- [35] <ftp://legacy.gsfc.nasa.gov>

- [36] <http://lambda.gsfc.nasa.gov>
- [37] Purcell, W. R. et al., 1997. OSSE Mapping of Galactic 511 keV Positron Annihilation Line Emission. *The Astrophysical Journal*, 491(2), pp. 725-748.
- [38] Bouchet, L. et al., 2010. On the Morphology of the Electron-Positron Annihilation Emission as Seen by SPI/*INTEGRAL*. *The Astrophysical Journal*, 720(2), pp.1772-1780.
- [39] Mizumura, Y. et al., 2016. Possibility of Systematic Study of Supernova Explosions by Nuclear Imaging Spectroscopy. Accepted to *JPS conference proceedings*.
- [40] Churazov, E. et al., 2015. Cobalt-56 γ -ray emission lines from the type Ia supernova SN2014J. *Nature*, 512(7515), pp.406-408.
- [41] Particle Data Booklet, <http://www-pdg.lbl.gov>
- [42] Ichinohe, Y. et al., 2016. The first demonstration of the concept of “narrow-FOV Si/CdTe semiconductor Compton camera”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 806, 5-13.