

SMILE: 電子飛跡検出型コンプトンカメラによる MeV ガンマ線天体探査実験

高田淳史, 谷森達, 窪秀利, J. D. Parker, 水本哲矢, 水村好貴, 澤野達哉, 中村輝石, 松岡佳大, 古村翔太郎, 中村祥吾, 小田真, 岸本哲郎, 竹村泰斗, 宮本奨平 (以上京大理), 身内賢太郎 (神戸大), 黒澤俊介 (東北大)

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

MeV ガンマ線天文学は、超新星爆発の発生機構や元素合成研究、ブラックホールからの高エネルギー放射、宇宙初期からのガンマ線バースト (GRB)、宇宙線加速起源の同定など興味深い研究対象が多いが、その観測は困難であり 1990 年代になって初めて、COMPTEL によって約 30 個の MeV ガンマ線放射定常天体が発見され天文学として開拓された [1]。しかし COMPTEL をはじめとする従来型のコンプトンカメラ (CC) は、コンプトン散乱の電子反跳方向を測定できないため、入射ガンマ線の到来方向は円環状にしか制限できず、イメージングが不明瞭となる。さらに人工衛星の放射化雑音や大気雑音は MeV ガンマ線が主成分であり、大量の雑音ガンマ線が観測装置に入射するがその除去は困難を極め、COMPTEL は宇宙環境下で予想より 1 桁以上感度が悪化した。しかしながら、COMPTEL は前段・後段検出器間の Time of Flight を用いた雑音除去で上記の成果を得た。2003 年以降はコーデッドマスク法を用いた INTEGRAL 衛星がサブ MeV 領域の探査を行ったが、600 keV 以上で 4 天体の検出に止まっている [2]。これら MeV 領域の観測は、GeV 領域で数千の天体を検出した Fermi 衛星と大きな隔たりがある [3]。

MeV ガンマ線天文学の発展を阻害しているのは上記 2 つの技術的困難 (多量の雑音と不明瞭イメージング) である。COMPTEL の責任者 Schonfelder 氏は、今後の MeV ガンマ線天文学の発展には雑音低減化が最優先課題であり、(1) 高角度分解能および高エネルギー分解能、(2) 雑音除去のための冗長性 (TOF・Kinematics・エネルギー損失率 dE/dx 等)、(3) ガンマ線到来方向決定、(4) 軽量化 (放射化量の低減)、(5) 前方・後方検出器の同時計測等を指摘している [4]。実際、MeV ガンマ線天体はフラックスが高く雑音除去が可能な約 100 cm^2 の有効面積を持つ衛星搭載検出器ならば、Fermi 衛星以上の 1 mCrab の観測感度が原理的に可能となる。京大宇宙線ガンマ線グループは、この未開拓な MeV ガンマ線の全天探査を目指し、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) を 2000 年から開発している [5]。すでにこの ETCC を用いて 2006 年に気球実験を行い、ガン

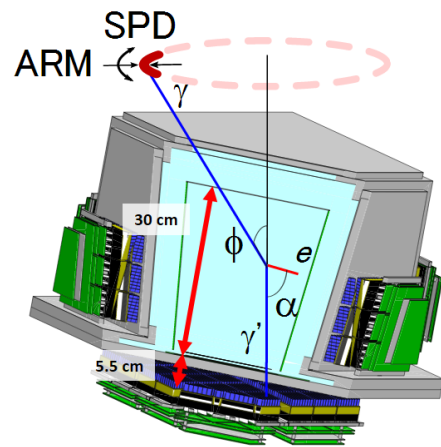


図 1: 電子飛跡検出型コンプトンカメラ

マ線 Veto カウンターを使用せずに大気からの雑音を 2 桁程度除去し、サブ MeV 大気・宇宙拡散ガンマ線フラックスの測定に成功した (SMILE-I 実験)[6]。ETCC は図 1 にあるように、前段部のガス 3 次元粒子検出器 Time Projection Chamber (TPC) でコンプトン反跳電子飛跡の 3 次元測定を行い、その周りの無機結晶シンチレーターアレイで散乱ガンマ線のエネルギーと位置を測定する。このように ETCC はコンプトン散乱の全物理量測定を行うことで、(1) ガンマ線到来方向を円環でなく円弧として制限、(2) 反跳電子と散乱ガンマ線のなす角 α を用いた運動学的チェック、(3) TPC 中での荷電粒子のエネルギー損失率から宇宙線・中性子・TPC を突き抜ける高エネルギー電子等の雑音成分とコンプトン反跳電子の弁別と、従来のコンプトン法に新たに 3 つの冗長性を加えることで高い雑音除去と高品位イメージングを実現、上記の 2 つの問題点を克服することで、COMPTEL より 1 桁以上の感度向上を目指している。

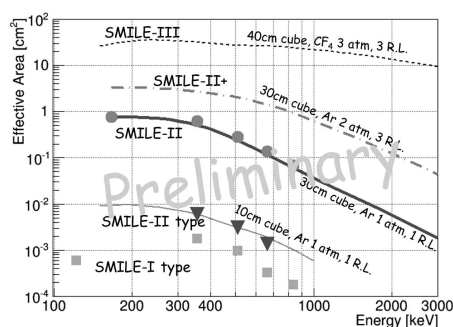


図 2: ETCC の検出効率 (●:SMILE-II FM 実験値、▼:改良型 10 cm 角 ETCC 実験値、■:SMILE-I 型実験値、太実線:SMILE-II FM simulation、細実線:改良型 10 cm 角 ETCC simulation)

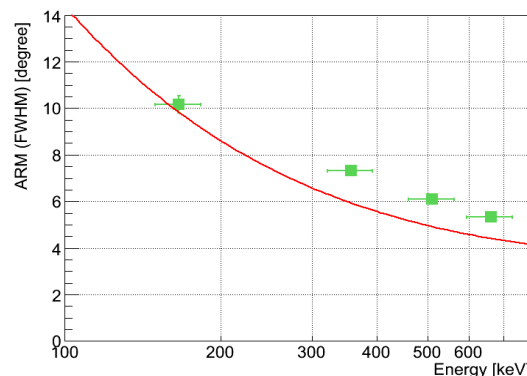


図 3: SMILE-II フライトモデル ETCC の角度分解能 (実線は予想される限界値)

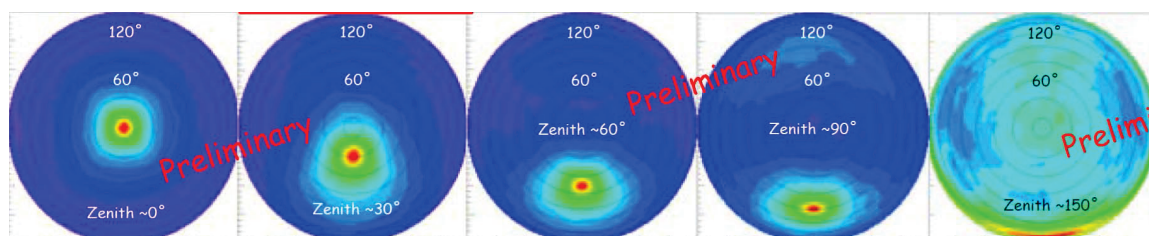


図 4: 線源位置を移動した場合のガンマ線イメージ (^{137}Cs 。左から天頂角 0°、30°、60°、90°、150°。

2 SMILE-II 検出器の性能評価

次期気球実験 SMILE-II 実験では、Crab・Cyg X-1 などの明るいガンマ線放射天体を高度 40 km において数時間の観測で 5σ 以上の有意度で検出し、ETCC の能力実証を目的とする。そのため、Ar 1 気圧の 30 cm 角 TPC とそれを取り囲む 1 放射長の GSO シンチレーターアレイを底面には 36 個、側面 72 個 (18 個×4 面) 使用した 30 cm 角 ETCC を採用し、300 keV で 0.5 cm^2 以上の有効面積と 662 keV で 10° 以下の角度分解能を目指す。実験室の測定から得られた SMILE-II Flight Model (FM) の有効面積を図 2 に、角度分解能を図 3 に示す。SMILE-II では電子飛跡取得方法の大幅な改善に成功し、前回の気球実験 (SMILE-I) で 10% 程度であった電子飛跡検出率を $\sim 100\%$ に改善されたため、コンプトン散乱点の決定精度を向上させることに成功し、有効面積も、装置内のコンプトン散乱の反跳電子が 100% 検出された場合のシミュレーションと精度よく一致している。また、角度分解能も図 3 のようにサブ MeV 領域で GSO シンチレーターと TPC のエネルギー分解能で決まる限界値に近い 662 keV で 6 度程度 (半値全幅) が得られている。これらは要求値を大幅に上回る値であり、かに星雲を有意に観測できると期待される。さらに、SMILE-II のガス TPC の圧力を 2 気圧に、GSO シンチレータの厚みを 3 放射長に拡張することで、有効面積は 4 倍になるとシミュレーションから予想されている。図 4 は線源を移動させて取得したガンマ線イメージである。この図に示されるように SMILE-II ETCC によるイメージングでは、天頂角 90 度のガンマ線源も明確に捉えており、広視野が実現できている。また、裏側からのガンマ線の照射に対しても、ガンマ線の方角を正しく再構成できていることから、宇宙線と筐体との相互作用からくる雑音ガンマ線はイメージから排除可能であることも見て取れる。従って、従来のコンプトン法の同じ有効面積の装置と比べると実質的に数倍以上の高感度が実現可能となる。特に拡散ガンマ線中の天体の探査、つまり銀河面での探査では低雑音化も加わり、大きな感度改善が期待される。

コンプトン散乱の散乱ガンマ線・反跳電子は、入射ガンマ線の偏光方向に対して垂直な方向に飛びやすい。ETCC はコンプトン散乱に基づいた検出器であるため、直線偏光に対して感度を持つ。SMILE-II の偏光検出能力検証をシミュレーションで検証した理想的な場合の結果を図 5 に示す。ETCC はコンプトン散乱体 (ガス TPC) の周囲に散乱ガンマ線吸収体 (GSO シンチレータ) が配置される、単純な構造な上、ガス

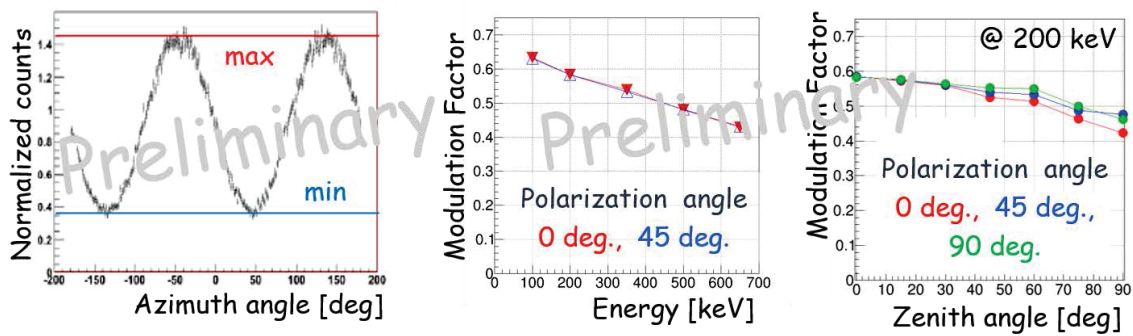


図 5: SMILE-II の偏光検出シミュレーション (左:100%直線偏光の 200 keV に対するモジュレーション。中:モジュレーションファクターのエネルギー依存性。右:モジュレーションファクターの入射角依存性。)

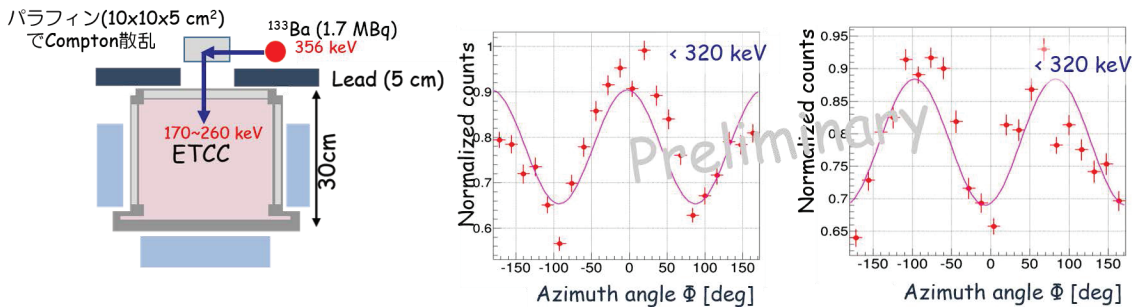


図 6: 放射線源を用いた偏光測定。(左:偏光測定セットアップ。散乱角は 30~150° 程度であり全体の偏光度は 40%程になる。中:得られた偏光モジュレーション。右:偏光方向を 90° 回して得られた偏光モジュレーション)

TPC による散乱点の空間分解能が高い為、400 keV 以下で 0.5 もの非常に大きなモジュレーションファクターが得られる。さらに、偏光感度に対する視野も大きく、天頂角 60° まで偏光測定が可能と予想される。従って、ETCC のイメージング能力と雑音除去能力により、sub-MeV/MeV ガンマ線の偏光天体全天探査に可能性が出てきた。図 6 に実際に実験室で行った偏光測定の結果を示す。ETCC 前にパラフィン (10×10×5 cm³) を設置し、パラフィン横に設置した ¹³³Ba からガンマ線をコンプトン散乱させたガンマ線を ETCC に照射した。¹³³Ba から直接 ETCC に入射するガンマ線を減らすように放射線源と ETCC の間には 5 cm 厚の鉛を設置し、パラフィンの 10 cm 角部分のみ開けてある。この時、パラフィンでのガンマ線散乱角は 30~150° (170~260 keV) 程度になり、シミュレーションから予想される平均的な偏光度は 40%となっている。このセットアップで得られた偏光モジュレーション (図 6 中及び右) から、SMILE-II ETCC によりガンマ線偏光が検出できていることがわかる。2015 年 1 月には SPring-8 でビーム試験を行い、更なる検証を行う予定である。

SMILE-II ETCC の性能評価により、観測時間を 10⁶ 秒 (約 2 週間) としたときに期待される検出感度を図 7 に示す。現状の性能で、高度 40 km において約 3 時間以内に星雲を 5σ で検出可能な感度まで到達している。さらに、Ar 2 気圧・3 放射長の GSO シンチレータの ETCC (SMILE-II+) であれば、半日の観測時間で星雲の偏光測定も期待できる。来年以降、米国ゴダード宇宙センターとの共同実験で Ft. Sumner における、かに星雲観測気球実験を計画している。

3 今後の展望

かに星雲観測後を見据え、今後以下に挙げるような開発・改良をさらに行っていく。

- TPC 内のガス種と圧力の選択: CF₄ ガス 3 気圧で有効面積が 10 cm² へ増加

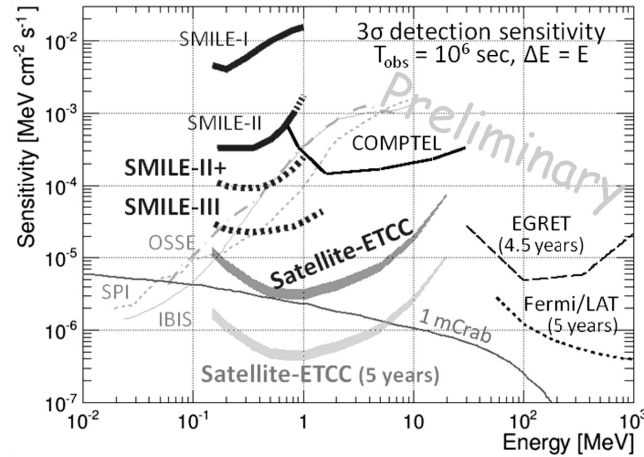


図 7: 現状で予想される SMILE-II の検出感度とこれまでの衛星観測の 3σ 検出感度

- シンチレーターの増強：3 放射長のシンチレーター長を使用し、底面シンチレーターの被覆率を 2 倍に増強すれば、有効面積 $\sim 20 \text{ cm}^2$ が実現可
- 広帯域化：シンチレータをガス容器内に配置し、TPC ガス層を突き抜ける散乱電子を捕らえ、5 MeV までのガンマ線検出を可能に
- 角度分解能の向上：エネルギー分解能のよい LaBr_3 (半値 5 % 以下 @ 662 keV) を用いれば、ARM 角度分解能は 2 度 @ 662 keV を実現

これら改良を加えた検出器を用いて、極域周回長時間観測 SMILE-III 計画を同じくゴダード宇宙センターと共同で行う。この観測では、COMPTEL と同等の有効面積・3 倍の視野・低雑音・高品位イメージングを生かし、 10^6 秒の観測で COMPTEL 以上の感度で広域探索を行い、宇宙物理観測を行う。SMILE-III は気球実験においても、系外拡散ガンマ線の非一様性観測からの放射起源特定や銀河面における新天体探索など、COMPTEL を上回る高エネルギー宇宙物理を牽引出来る成果が期待でき、 $10^{-7} \text{ erg/sec/cm}^2$ 程度の GRB の偏光観測も可能となる。これにより、未開拓な MeV ガンマ線天文学から新しい結果が出れば、高エネルギー宇宙物理に希望を与える。

参考文献

- [1] V. Schönfelder+, A&ASS Vol. 143 (2000), 145-179.
- [2] L. Bouchet+, ApJ, 679 (2008), 1315.
- [3] A. Abdo+, ApJS, 183 (2009), 46.
- [4] V. Schönfelder+, New Astron. Rev., 48 (2004), 193-198.
- [5] T. Tanimori+, New Astron. Rev., 48 (2004), 263.
- [6] A. Takada+, ApJ. 733 (2011), 13.