

電子飛跡検出型コンプトンカメラを用いた MeV ガンマ線天体探査実験計画

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 (以上京大理), 岸本祐二 (KEK), 身内賢太朗 (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、GeV 領域同様、多数の粒子加速天体の観測のほか、核ガンマ線による元素合成研究、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)、さらには太陽フレアなど様々な天体現象の観測が予想されている。しかし、その観測は困難で 1990 年代 CGRO に搭載された COMPTEL によりようやく開拓されたが、COMPTEL が採用した従来型コンプトン検出器は、コンプトン散乱で生じた反跳電子の方向が得られないため入射ガンマ線の到来方向が円環となる。そのため到来方向は一意に決まらずイメージングが不明瞭となる上、衛星の放射化雑音や大気雑音の除去が難しく、この 2 つの問題により COMPTEL は予想感度より 1 桁以上悪い感度となった。しかしながら、COMPTEL は前段・後段検出器間の Time of Flight (TOF) を用いて雑音除去を行い、約 30 個の MeV 天体を発見し MeV ガンマ線天文学を拓いた [1]。2003 年以降、コードドマスクを用いた INTEGRAL がサブ MeV 領域探査を行っているが、600 keV 以上で 4 天体の観測に止まっており [2]、GeV 領域で数千の天体を観測した Fermi 衛星 [3] とは大きな隔たりがある。

2004 年に COMPTEL の責任者 Schönfelder 氏は、今後の MeV ガンマ線天文学発展には放射線雑音低減化が最優先課題であり、具体的な手法として (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 など)、(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 (時間幅最小へ) などを指摘している [4]。実際、MeV ガンマ線は GeV ガンマ線に比べフラックスが大きく、雑音除去が可能な数十 cm^2 の有効面積を持つ衛星ならば、Fermi 衛星以上の 1 mCrab の感度が可能となる。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

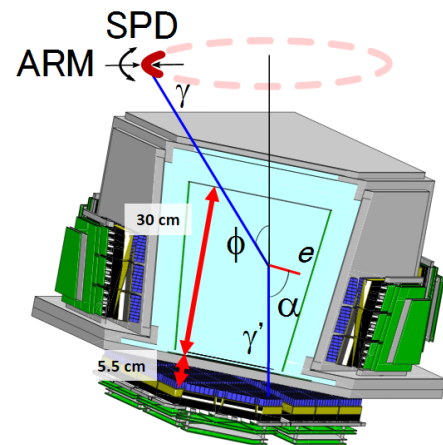


図 1: 電子飛跡検出型コンプトンカメラ

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。

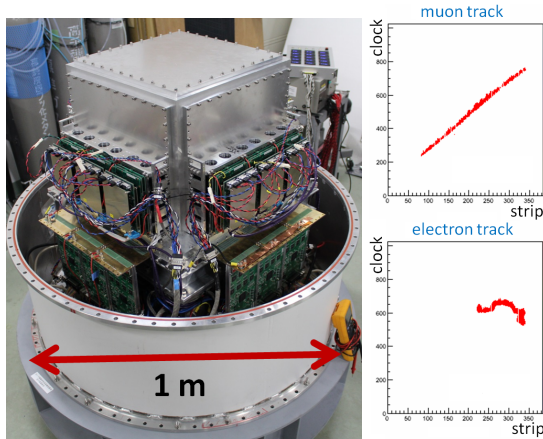


図 2: SMILE-II フライトモデル検出器 (左) と取得された荷電粒子の飛跡 (右)

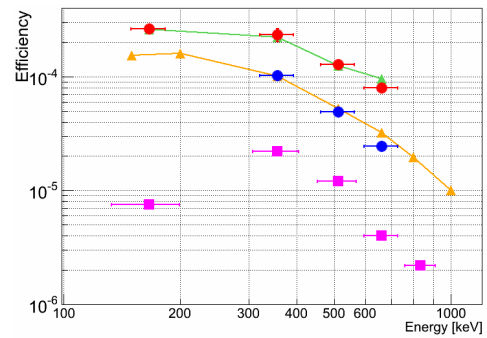


図 3: ETCC の検出効率 (赤●:SMILE-II FM 実験値 [底面のみの]、青●:改良型 10 cm 角 ETCC 実験値、緑▲:SMILE-II FM simulation[底面のみの]、橙▲:改良型 10 cm 角 ETCC simulation、紫■:SMILE-I 実験値)

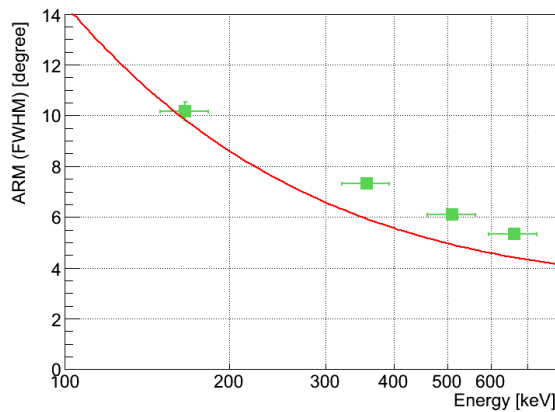


図 4: SMILE-II フライトモデル ETCC の角度分解能 (実線は予想される限界値)

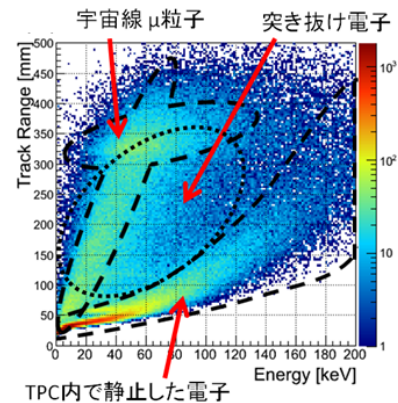


図 5: ガス飛跡検出器でのエネルギー損失率による粒子識別

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、30 cm 角 TPC とそれを取り囲む 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 (図 2 左)、300 keV で SMILE-I の 50 倍の 0.5 cm^2 以上の有効面積を実現する。

SMILE-I ではデータ収集速度および飛跡再構成法に問題があり、約 10% と低い電子飛跡検出率であった。しかし近年、根本的な改善に成功し、さらに各ヒット点でのパルス幅の測定を付加することで、電子飛跡当たりのヒット数は 5 倍以上に増加して図 2 右のような詳細な飛跡検出が可能となり、飛跡検出率を $\sim 100\%$ に改善することで、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た。これにより、SMILE-II 30 cm 角 ETCC の感度が、装置内で起こった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た (図 3)。これはガス中で電子が散乱し且つ TPC 内で静止したコンプトン事象が全て検出されたことを示している。また角度分解能も図 4 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。以上から、SMILE-II 検出器は幾何面積で 10 倍、検出効率で 10 倍、SMILE-I から改善しており、またイメージングを行わず 3 sr の視野内で議論した SMILE-I に対して、SMILE-II ETCC は 10 度以下の角度分解能でのイメージングが可能となるため、検出感度を 100 倍向上できたことになる。

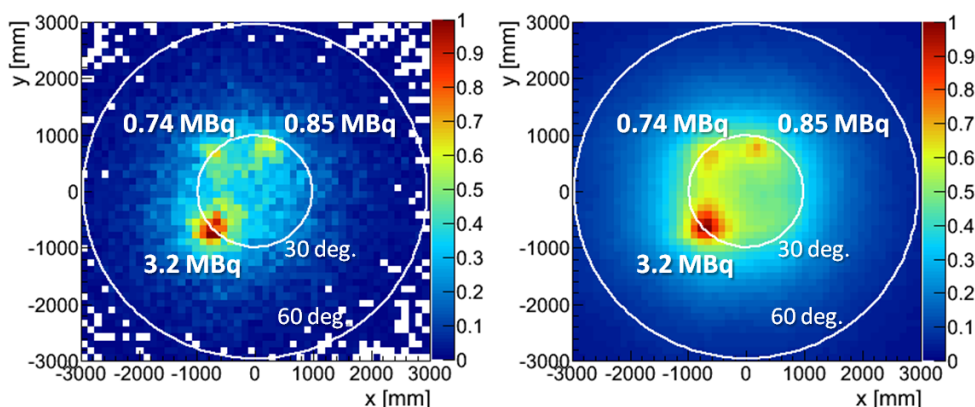


図 6: SMILE-II ETCC で取得された ^{137}Cs のガンマ線イメージ (左: ETCC によるイメージ、右: 従来の電子飛跡を使用しないコンプトン法。各線源は検出器から約 2m の位置に設置)

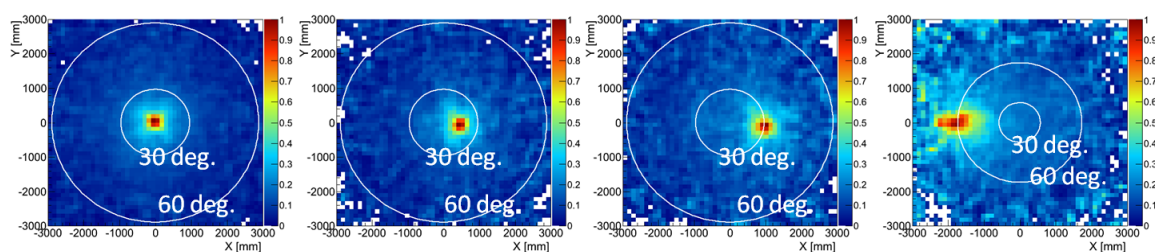


図 7: 線源位置を移動した場合のガンマ線イメージ (^{137}Cs 。左から天頂角 0° 、 15° 、 30° 、 60° 。線源と検出器の間隔は約 2 m)

SMILE-II ETCC では、ガス飛跡検出器をコンプトン散乱体として用いている。この為、単位体積当たりのコンプトン散乱確率は固体の検出器に比べて小さくなる一方、エネルギー損失率を利用した粒子識別やコンプトン散乱の運動学との一致確認が可能となり、非常に強力な雑音除去能力を持つ。図 5 に SMILE-II

ETCC で実際に測定されたエネルギー損失率を示す。これより、TPC 内で静止した電子成分、TPC 外部へ抜け出した電子の成分、宇宙線ミュー粒子成分がはっきりと区別できている。また宇宙環境下では、宇宙線が大気や筐体と相互作用することで生じる中性子も検出器に入ってくるが、中性子反跳の原子核によるエネルギー損失率は電子のものと比較して非常に大きいため、図で示す範囲よりも右側に分布し、容易に排除可能である。SMILE-I では電子飛跡検出率が低いにも関わらずエネルギー損失率の測定から、大気雑音の主成分である速中性子と宇宙線がほぼ 100%除去でき、ガンマ線のみを取り出すことに成功している。SMILE-II では、ガス TPC の改良により電子飛跡がより詳細となったため、さらに分離が良くなっている。

図 6 に SMILE-II ETCC で実際に測定した 3 つの同じエネルギーの点源の画像について、電子飛跡を使用した場合と使用しない従来のコンプトン法の場合の 2 通りで示す。従来のコンプトン法ではガンマ線の到来方向円環を天球上に積み上げてガンマ線画像を求めるが、ガンマ線信号の円環は天球に大きく広がるため、広い視野外領域からの雑音の一部が信号領域に重なる。この視野外からの雑音ガンマ線の浸み込みにより、視野境界領域の雑音が上がって多数の偽信号が現れ、実質的な視野を狭くしている。このように円環コンプトン法は、GeV ガンマ線のように装置の有効面積で決まる感度を得ることが困難となる。一方、電子飛跡を用いた ETCC では、雑音領域と最も強い点源の比は 4 倍程度改善し、各点源の分離が大変明瞭になる。SMILE-II は円周方向の分解能 SPD が 100 度程度で得られ、この問題を大きく低減できる。図 7 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 60 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。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。

これらの SMILE-II ETCC の性能評価により、観測時間を 10^6 秒 (約 2 週間) としたときに期待される検

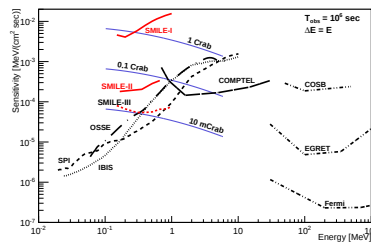


図 8: 現状で予想される SMILE-II の検出感度とこれまでの衛星観測の 3σ 検出感度

出感度を図 8 に示す。現状の性能で、高度 40 km において約 3 時間でかに星雲を 3σ で検出可能な感度まで到達している。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： CF_4 ガス 3 気圧で有効面積が 10 cm^2 へ増加
- シンチレーターの増強：シンチレーター長を 2 倍に、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：500 keV 以上の TPC ガス層を突き抜ける散乱電子を捕らえるため、TPC 内壁に Si パッド検出器を置き、7 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。従来、気球実験は装置の実証が主目的であった。しかし MeV ガンマ線領域では発見天体数が 30 と少なく、不明瞭なイメージング法による観測のみであり、低雑音で高品位イメージング観測が実現出来れば、気球といえども新しい天体発見が充分期待できる。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る。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。極域周回気球実験において、人工衛星に匹敵する成果ができれば、MeV ガンマ線観測衛星の早期実現にも繋がっていく。

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.