

図1 MeV/GeVガンマ線の全天画像の比較. MeVはCGRO/COMPTEL, GeVはFermi/LATによって得られた画像である. GeVガンマ線の画像はMeV帯域よりも高精細で多くの天体が検出されている. Credit: NASA/CGRO, NASA/DOE/Fermi-LAT.

カメラという撮像技法を用いるのだが、X線ミラーのような光学系に比べて集光力、撮像能力ともに、大幅に劣る。さらなる問題が人工衛星軌道上における高いバックグラウンドレベルである。軌道上には宇宙線や地球磁場に束縛された荷電粒子が多量に存在し、これらが検出器そのものや人工衛星構体、ひいては地球大気に衝突し、原子核相互作用を起こす [3]。その結果、MeVのエネルギーを持つガンマ線やベータ線を大量に生み出してしまい、これが観測の妨げとなるのである。MeVガンマ線帯域で「天文学」を実践するには、これらの問題を克服し、高いシグナル・ノイズ比の観測を実現する必要がある。

2. MeVガンマ線のサイエンス

ここでは、MeVガンマ線の高感度観測によって実現すると期待される新しいサイエンスを概観する。MeVガンマ線帯域、特に0.1–10 MeVのエ

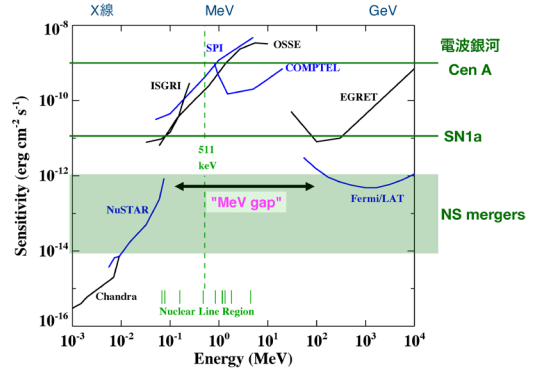


図2 X線からGeVガンマ線に至るエネルギー域の感度（検出可能なフラックス）。MeVガンマ線は隣接する硬X線やGeVガンマ線よりも感度が大きく劣っているのが現状であり、これは“MeV gap”と呼ばれている。MeVガンマ線の主なサイエンスターゲットである電波銀河Cen A, Ia型超新星, 連星中性子星合体について、目標となるフラックスレベルも表示している。

ネルギーは、原子核の準位間エネルギーに相当するため、放射性同位体の崩壊や原子核の脱励起に伴う放射を直接観測できる唯一の帯域となる。そのため、宇宙線加速源の探査や、超新星爆発や連星中性子星合体などの元素合成の現場を探るためのプローブとして、古くから期待されてきた。

MeVガンマ線観測において特筆すべきこととして、天文学の新潮流であるマルチメッセンジャー天文学との相性の良さがある。重力波やニュートリノ、宇宙線は中性子星合体や超新星などの高エネルギー天体現象から放出され、そのような高エネルギー現象は同時に核ガンマ線観測の重要ターゲットとなる。特にライン核ガンマ線はドップラー効果を通して高温・高エネルギー環境のダイナミクスの情報を伝えるため、MeVガンマ線観測がマルチメッセンジャー天文学において果たす役割は非常に重要になると期待されている。

2.1 元素合成—超新星・中性子星合体

$^{56}\text{Ni}/^{56}\text{Co}$ のような半減期が1–100日の短寿命の同位体からの核ガンマ線によって、超新星爆発や

ならず、MeVガンマ線帯域の高精度スペクトルや偏光観測によって、その本質に迫ることができる。

2.4 電子陽電子対消滅線

1970年代の気球実験で銀河中心領域から初検出された0.511 MeVの電子陽電子対消滅線は、以降、多数の気球・衛星でも観測されている [17]。観測からは、銀河中心領域において 2×10^{43} 個/sで陽電子が消滅しており、一つの点源ではなく直径数十度の広がりを持つことが示唆されている [18]。対消滅には、電子-陽電子の束縛状態であるポジトロニウムを生成しての消滅と、正面衝突するin-flight消滅が存在し、0.511 MeVのライン強度とオルソポジトロニウムの連続スペクトルの強度比から、銀河中心領域の電子陽電子対消滅線のほとんどが、ポジトロニウム起因であることが示されている [18]。これは、ポジトロニウム生成断面積の大きい10-100 eVの陽電子が銀河中心領域に広がって存在することを示唆するが [17]、このような低エネルギーの陽電子供給源はまだまだ不明なままとなっている。

電子陽電子対消滅線はブラックホールや中性子星の降着流、白色矮星で起きる新星爆発などさまざまな高エネルギー現象から発生することが期待されている。しかし、これまでの観測で個別の天体から0.511 MeVの輝線放射が検出された例はなく、将来の高感度観測での発見が待たれている状況である。高エネルギー天体におけるサブMeV帯域での輝線は貴重であり、降着流や爆発のアウトフローのダイナミクスの測定に利用することができる。

2.5 未知のトピック—暗黒物質など

銀河中心領域におけるMeVガンマ線帯域の観測は数多く実施されており、連続的なエネルギースペクトルが1 MeV以上にも伸びることが報告されている [19, 20]。MeVガンマ線帯域では、電子宇宙線の逆コンプトン散乱による放射が予想されているが、観測されている強度は予想の数倍強

い強度となっている。この拡散ガンマ線を宇宙線で説明する試みは行われているが、Fermi衛星で観測されている π^0 放射強度や一般的に知られる光子密度・宇宙線拡散係数・宇宙線スペクトルとは合わない結果となっている [20, 21]。空間分解されていない天体からの放射の重ね合わせである可能性もあるが、MeVガンマ線帯域に特徴的な放射を持つ天体種族はいまだ発見されていない。

MeVガンマ線帯域においても全天に広がる背景放射が存在する。これは、系外拡散ガンマ線と呼ばれ、空間分解できない遠方の天体からの放射が重ね合わさったものだと考えられている。これまでApolloやCOMPTEL、及び多数の気球実験によって観測され、その起源としてセイファート銀河やflat spectrum radio quasar (FSRQ) といった種族の活動銀河核が候補に挙げられている [22, 23]。

一方で、系外拡散ガンマ線や銀河中心領域のMeVガンマ線放射について、宇宙初期の密度揺らぎで生じた 10^{16} - 10^{17} g程度の質量を持つ原始ブラックホールのホーキング放射 [24] や数十MeVの質量を持つ素粒子的な粒子WIMP (weakly interactive massive particle) の対消滅に伴うガンマ線放射 [25] も提案されており、暗黒物質の間接探索の可能性も出てきた。さらに、MeVガンマ線帯域における宇宙の透明度は非常に高く遠方まで見通すことが可能であるため、宇宙初期の星によるガンマ線バースト [26, 27] の観測も可能と期待されている。

3. これからのミッション

人工衛星ベースの宇宙MeVガンマ線の観測は、COMPTELによる核ガンマ線の全天観測、INTEGRALによる超新星起源の核ガンマ線の検出や銀河中心からの電子陽電子対消滅線のマッピングなどの先駆的成果が創出されてきた。日本でも高いエネルギー分解能を持つ半導体積層コンプトンカメラという新しいコンセプトの軟ガンマ線検

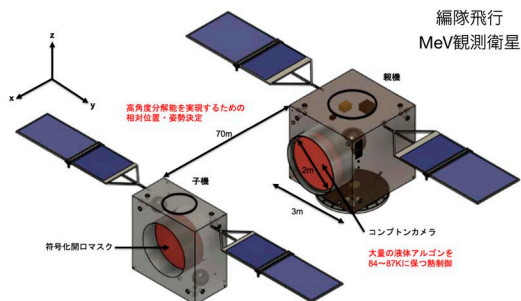


図4 コンプトンカメラと符号化開口マスク光学系を組み合わせた編隊飛行MeVガンマ線観測ミッションの概念図 [32]。コンプトンカメラ衛星(親機)単体で広視野全天サーベイ観測を常時実施する。超新星や中性子星合体などの突発天体やMeVガンマ線定常放射が期待できる銀河中心領域、系内ブラックホール天体などを対象として、光学系衛星(子機)が目標に指向し、高感度・高空間分解能の観測を行う。

い。2027年にCOSIが軌道投入されればMeVガンマ線サイエンスには多くの発見が期待されており、2040年代に向けて重要なパスファインダーの役割を果たすことになる。

5. 日本のコミュニティの活動

日本では、先に挙げたような将来計画に向けた観測機器開発に並行して、MeVガンマ線天文学の推進・観測対象となるサイエンスの洗練を目的とし、宇宙科学研究所・宇宙理学委員会の下にMeVガンマ線観測検討リサーチグループを設立し、これまでに3回のMeVガンマ線天文学研究会(2017, 2019, 2024)及び天文学会2024春季年会での企画セッションを実施してきた。これらの研究会・企画セッションでは、日本におけるガンマ線観測計画だけでなく、観測が期待される天体についての議論やMeVガンマ線の宇宙観測がもたらす素粒子理論・宇宙論への新しい知見への期待など、多種多様な講演・議論が活発に行われた(図5)。また機器開発を進める学生・若手研究者にとっても、係わるミッションに関係なく広く交流を深める機会となっている。本稿を読んで頂い



図5 第3回MeVガンマ線天文学研究会(2024年9月9-10日, 石川県文教会館)。

た皆様にも、MeVガンマ線天文学研究会や将来計画の議論へ、ご参画・ご支援いただければ幸いです。

謝辞

編集委員の志達めぐみ氏には原稿の完成を辛抱強く待ってくださったうえに、有益な助言をいただき厚く御礼申し上げます。本稿を執筆する貴重な機会を作ってくくださった榎戸輝揚氏、原稿の内容に有益な助言をいただいた井上芳幸氏にも深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Schoenfelder, V., et al., 1993, ApJS, 86, 657
- [2] Vedrenne, G., et al., 2003, A&A, 411, L63
- [3] Odaka, H., et al., 2018, Nucl. Instr. Method. Phys. Res. A, 891, 92
- [4] Diehl, R., et al., 2014, Science, 345, 1162
- [5] Churazov, E., et al., 2014, Nature, 512, 406
- [6] Summa, A., et al., 2013, A&A, 554, A67
- [7] Diehl, R., et al., 2015, A&A, 574, A72
- [8] Hotokezaka, K., et al., 2016, MNRAS, 459, 35
- [9] van de Voort, F., et al., 2020, MNRAS, 494, 4867
- [10] Knödseder, J., et al., 1999, A&A, 345, 813
- [11] Bouchet, L., et al., 2015, ApJ, 801, 142
- [12] Orlando, E., et al., 2019, BAAS, 51, 151
- [13] Benhables-Mezhoud, H., et al., 2013, ApJ, 763, 98
- [14] Aharonian, F. A., & Sunyaev, R. A., 1984, MNRAS, 210, 257
- [15] Kafexhiu, E., et al., 2019, A&A, 623, A174
- [16] García, J. A., et al., 2015, ApJ, 808, L37
- [17] Prantzos, N., et al., 2011, Rev. Modern Phys., 83, 1001
- [18] Siebert, T., et al., 2016, A&A, 586, A84
- [19] Strong, A. W., et al., 1999, Astrophys. Lett. Commun., 39, 209
- [20] Siebert, T., et al., 2022, A&A, 660, A130
- [21] Orlando, E., 2018, MNRAS, 475, 2724
- [22] Inoue, Y., et al., 2019, ApJ, 880, 40

- [23] Ajello, M., et al., 2009, ApJ, 699, 603
- [24] Carr, B. J., et al., 2010, Phys. Rev. D, 81, 104019
- [25] Ahn, K., & Komatsu, E., 2005, Phys. Rev. D, 72, 061301
- [26] Mészáros, P., & Rees, M. J., 2010, ApJ, 715, 967
- [27] Toma, K., et al., 2011, ApJ, 731, 127
- [28] Hitomi Collaboration, et al., 2018, PASJ, 70, 113
- [29] Tomsick, J., et al., 2024, 745
- [30] Takada, A., et al., 2022, ApJ, 930, 6
- [31] Aramaki, T., et al., 2020, Astroparticle Phys., 114, 107
- [32] Mochizuki, T., et al., 2023, The 74th IAC, A7,3,5, x76297

MeV Gamma-Ray Astronomy: Prospects for the 2040s

Hirokazu ODAKA¹ and Atsushi TAKADA²

¹Osaka University, Graduate School of Science, 1-1 Machikaneyama-cho, Toyonaka-shi, Osaka 560-0043, Japan, ²Kyoto University, Graduate School of Science, Kitashirakawa Oiwakecho, Sakyo, Kyoto, Kyoto 606-8502, Japan

Abstract: MeV gamma rays provide the only observational probe of nuclear reactions in the universe, enabling direct detection of key high-energy astrophysical phenomena. These include heavy element nucleosynthesis in supernovae and neutron star mergers, as well as nuclear spallation in cosmic-ray acceleration sources and the hot accretion flows of black holes. However, observations in the MeV gamma-ray band are known to be extremely challenging, and the scientific results obtained so far have been very limited. In this paper, we review the current status and challenges of observations in this energy range and provide an overview of the expected science. We then introduce ongoing space missions and discuss prospects for the 2040s, when MeV gamma-ray observations are expected to establish themselves as a full-fledged field of astronomy.