◆◇◆◇◆ シリーズ: 2040年代のスペース天文学へ ◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆

MeVガンマ線天文学 ―2040年代への展望―

小 高 裕 和¹•高 田 淳 史²

〈¹大阪大学大学院理学研究科 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-1〉
〈²京都大学大学院理学研究科 〒606-8502 京都府京都市左京区北白川追分町〉
e-mail: ¹odaka@ess.sci.osaka-u.ac.jp, ²takada@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp



小高

高田

MeV ガンマ線は宇宙における原子核反応の唯一の観測プローブを提供し,超新星や中性子星合体における重元素合成過程や,宇宙線加速源やブラックホールの高温降着流における核破砕といった天体における重要な高エネルギー現象を直接捉えることができると期待されている.しかし,MeV ガンマ線帯域の観測は極めて困難であることで知られており,これまでに得られた科学的成果は非常に限られたものとなっている.本稿では,この帯域の観測の現状と課題を整理し,期待されるサイエンスを概観する.さらに,現在進められている宇宙ミッションを紹介し,本格的な「天文学」としての観測結果がもたらされるであろう2040年代への展望を議論する.

1. MeVガンマ線観測の現状と課題

今や観測天文学は電波から超高エネルギーガン マ線(TeVガンマ線)に至る20桁もの電磁波波 長域を対象とするに至り,さらにニュートリノや 重力波による観測までもが可能となった.まさに 「マルチメッセンジャー天文学」の時代が到来し つつある.しかし,そのような状況においても依 然として広大なディスカバリースペースを残して いる電磁波波長域があると聞けば,「えっ,そう なの?」と思う方もおられるかもしれない.その 未開拓の重要な帯域が0.1-100 MeVの中間エネ ルギーガンマ線(MeVガンマ線)である.

このMeV ガンマ線帯域は観測が極めて困難であ ることで知られている.これまでに最高の感度を 達成したのは、1990年代に Compton Gamma-Ray Observatory 衛星に搭載された COMPTEL 検出 器[1] であり、その後、2000年代に INTEGRAL 衛星に搭載された SPI 検出器 [2] がより低エネル ギーの硬X線帯域までエネルギー範囲を広げて, サブMeV帯域の観測を引き継いだ. これらの検 出器は原子核が放出する核ガンマ線を用いたサイ エンスにおいて先駆的成果をあげたものの, COMPTELは全ミッション期間の10年間で約30 天体, SPIは0.6 MeV以上ではわずかに4天体の 検出にとどまっており, COMPTELの観測感度は それ以後四半世紀にわたって更新されていない. こうした状況は, さらに高いエネルギー帯である GeVガンマ線ではFermi衛星のLAT検出器が約 5000個もの天体を見つけていることとはかなり 対照的であると言える(図1,図2を参照).

なぜそれほど感度が悪いのか?その理由は MeV ガンマ線の物理的性質に由来するタチの悪 いものである.まず,光子の検出原理であるが, このエネルギー帯域における主要な相互作用であ るコンプトン散乱を利用する.これは散乱過程で あるため,検出器に入射した光子のエネルギーや 方向を決めるのが難しい.そのためにコンプトン 

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

⁵⁶Ni/⁵⁶Co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

◆◇◆◇◆ シリーズ: 2040年代のスペース天文学へ ◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇

中性子星合体における元素合成の現場が観測でき る.2014年にはINTEGRAL/SPIによって、3.5 Mpc 先で起きた Ia型超新星 SN2014J に伴う 56 Ni/ 56 Co の核ガンマ線が観測されており [4,5],その強度 は $0.6\pm0.1 M_{\odot}$ の 56 Niがその場で生成されたこと を示唆している [5].また、 56 Niや 56 Coの崩壊に 伴う 0.1-4 MeV のガンマ線の約 100 日間にわたる 光度曲線を観測することで、いまだに起源の詳細 がわかっていない Ia型超新星について、親星が 白色矮星と恒星の連星系なのか、白色矮星同士の 連星系なのかを判別できる可能性が理論計算から 示された [6].今回の観測の精度では制限はでき なかったものの SPI による観測も継続的に試みら れている [7].

MeV ガンマ線天文学のトップサイエンスになると 期待されているのが,速い中性子捕獲「r-process」 による重元素合成過程の解明である.重力波天体 でもある連星中性子星合体はr-processによる重 元素合成サイトの最有力候補であるが,赤外線に よるキロノヴァの観測と異なり,核ガンマ線の計 測を通じて放射モデル依存性のない極めて直接的 な原子核生成の証拠を捉えることが可能であり, 生成量の測定ができると考えられている [8].重 力崩壊型超新星も依然としてr-processサイトの 重要候補であり [9],核ガンマ線の測定によって 超新星を起源とする重元素合成の組成が定量化さ れるであろう.

2.2 銀河スケールの広がった核ガンマ線

COMPTELやSPIで観測された1.8 MeVのガン マ線マップから、²⁶Alが銀河面に沿って大きく広 がって分布していることが判明している [10, 11]. ²⁶Alや⁶⁰Feは、~10⁶年の長い寿命を持ち、これ らの核種の空間分布からは、大質量星や超新星に よる同位体の生成からそれらが銀河系内へと供給 される過程が解明されると期待されている.

宇宙線加速理論の最大の問題である注入問題に 対しても MeV ガンマ線の観測が重要になる.加 速の初期段階や宇宙線エネルギーが散逸する過程 を理解するには、非相対論的なエネルギーを持つ 低エネルギー宇宙線の解明が鍵を握っていると考 えられているが、観測的にはほとんど手がかりが 得られていない、宇宙線と分子雲との相互作用に よって、衝突励起断面積が大きい100 MeV以下 の宇宙線が分子雲中のCやOを励起するため、 ¹²Cや¹⁶Oの脱励起線から低エネルギーの宇宙線 の存在量の測定が期待される [12, 13]. π 中間子 生成には宇宙線が300 MeV程度のエネルギーを 持つ必要があるため、 π^0 崩壊に伴うサブGeVガ ンマ線放射の観測に比べて、¹²Cや¹⁶Oの脱励起 線はより低エネルギーの宇宙線に感度を持つ.

2.3 ブラックホールの高温降着流

MeV ガンマ線帯域の重要テーマとして、宇宙 の高温領域の探索がある.比較的降着率の低いブ ラックホールにおいて形成される放射非効率降着 流 (radiatively inefficient accretion flow, RIAF) は、低密度で放射冷却が効かないため、高速かつ 超高温となる. 電子・イオン散乱のタイムスケー ルが降着のタイムスケールよりも長いため、電子 とイオンの温度が分離すると考えられ、イオンの 温度は1-100 MeV にも達する可能性がある. こ の環境では核反応が重要になり,降着流の落下と ともに核破砕が進み、重元素(CNO)はLi, Be などの軽い元素や中性子・重水素へと変換され る. これはMeV ガンマ線の格好のターゲットで あり,核ガンマ線に加えて,陽子・中性子散乱に よる制動放射,中性子捕捉ガンマ線,πβ崩壊ガ ンマ線などが放射される [14,15].

硬X線のスペクトル観測から,ブラックホール 降着流の電子の熱的分布はサブMeV程度である ことが示唆されている [16]. MeV帯域まで高感 度観測を伸ばすことができれば,恒星質量ブラッ クホールから活動銀河核の超巨大ブラックホール までの降着流の高温電子成分の温度を測ることが できるであろう.電波やX線,GeVガンマ線の 観測が進んだ現在においても,ブラックホールの 高温成分を担うコロナ放射の物理的理解は進んで おらず, 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× 1043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 熊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 源はい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ⁿ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がってい 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, IN-TEGRAL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

◆◇◆◇◆ シリーズ: 2040年代のスペース天文学へ ◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇

出器(Soft Gamma-ray Detector, SGD)が2016 年打ち上げの「ひとみ」衛星に搭載され、COMP-TEL以降で久しぶりに軌道上で運用されるコンプ トンカメラとなった.SGDは「かに星雲」の軟 ガンマ線偏光観測を成功させ、コンプトンカメラ の高い偏光測定能力を示した[28].その後、サ ブMeV帯域の高感度観測で成果をあげることが 期待されたが、衛星全損事故のためにその機会は 失われてしまった.

「ひとみ」代替機であるXRISMは軟X線観測に 特化してミッション最適化を行ったため,SGD は搭載されていない.2024年末現在で,COMP-TELやINTEGRALに匹敵する大型のMeVガン マ線衛星計画は採択されていないが,マルチメッ センジャー天文学と非常に相性の良いMeVガン マ線観測は国内外でその重要性があらためて注目 されてきている.ここでは,採択・進行中の小型 衛星や気球を用いたMeVガンマ線の観測計画に ついていくつか紹介する.

3.1 COSI

COSI (Compton Spectrometer and Imager) はエネルギー分解能が優れたゲルマニウム半導体 検出器を用いたコンプトンカメラを採用してい る [29]. NASA の SMEX (Small Explorer program)として採択され、カリフォルニア大学バー クレー校の研究チームを中心に計画が進められて おり、2027年に打ち上げられる予定である.研 究チームはこれまでに、2005年、2009年、2016 年の3度の気球実験に成功しており、かに星雲や Cygnux X-1, Centaurus Aの検出や雑音事象の理 解を進めてきた. COSI衛星は, COMPTEL以来 となる本格的な広視野コンプトンカメラミッショ ンであり, 0.2-5 MeV という広いエネルギーバン ドで、全天サーベイ観測を行う. ゲルマニウム半 導体検出器の高エネルギー分解能を最大に活かせ る²⁶Al, ⁶⁰Fe, ⁴⁴Tiなどの核ガンマ線のマッピング 観測や銀河中心領域の0.511 MeV電子陽電子対 消滅線の観測に加えて、ガンマ線バーストの観測

やガンマ線偏光測定も大きなサイエンスターゲッ トとして掲げている.

3.2 SMILE

SMILE (Sub-MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment) は荷電粒子の飛跡観 測が得意なガス飛跡検出器をコンプトン散乱の標 的とし,散乱後の運動情報を全て取得する事で, 光子ごとの運動量を測定する電子飛跡検出型コン プトン望遠鏡(図3)を用いた,京都大学を中心 とした研究チームによる観測計画である.電子の 飛跡がもたらす強力な雑音除去能力により,ガン マ線の入射方向を制限するためのコリメータや重 い反同時係数検出器を必要としないため,高いシ グナル・ノイズ比の観測と3 srもの大きな視野を



図3 電子飛跡追跡型コンプトンカメラの概念 図 [30].通常のコンプトンカメラはコンプトン散乱の反跳電子のエネルギーを測ることで、 円環 (event circle)の範囲に光子到来方向を限 定し、複数イベントの統計的解析により撮像 を行う.電子飛跡追跡型は反跳電子の運動量 も測ることで、1つの光子イベントで光子到来 方向を円弧上に限定でき、背景事象の混入を 抑制できる.

同時に実現している.2006年,2018年の2度の 気球実験を成功させており,0.15-2.1 MeVの帯域 で背景放射・大気ガンマ線・かに星雲・銀河中心 領域の電子陽電子対消滅線を検出した[30].現 在は2027年に気球実験を計画しており,銀河中 心領域の拡散ガンマ線や電子陽電子対消滅線の観 測を行うべく,準備を進めている.

3.3 GRAMS

GRAMS (Gamma-Ray and AntiMatter Survey)はコンプトン散乱標的に大容量の液体アル ゴンを採用し、かつてない大有効面積をねらうコ ンプトンカメラの計画であり [31], 大阪大学, 早稲田大学、ノースイースタン大学、コロンビア 大学,NASA/GSFCなどの日米の共同研究グルー プにより進められている. 2023年にJAXA国内 気球実験として,液体アルゴン放射線検出器を気 球に搭載するエンジニアリング実験に成功してお り、現在はガンマ線測定用の測定器開発が進めら れている. 2026年には米国にてプロトタイプ検 出器を搭載した気球実験を実施する予定であり, 2030年代には大型の液体アルゴン放射線検出器 を南極大陸周回気球に搭載し、MeV ガンマ線観 測と反粒子を介した暗黒物質探索実験を実現する ことを目指している.

4. 2040年代への展望

核反応の直接的プローブという唯一無二性とマ ルチメッセンジャー天文学への影響力を考えれ ば,2040年代にMeVガンマ線観測の大型衛星計 画を実現することが強く望まれる.1 MeVのガ ンマ線の検出効率は物質の種類にあまり依存しな いので,コンプトンカメラの有効面積は検出器媒 体の質量で決まると考えて良い.したがって,本 格的な全天高感度サーベイ観測を可能とする衛星 は必然的に大型衛星になる.実際に,COMPTEL もSPIも質量1トンを超える検出器であり,それ らを搭載したCGRO衛星とINTEGRAL衛星の打 ち上げ時質量はそれぞれ17トン,4トンにもなっ た. このことからも,国際的かつ分野横断的な協力の下,MeVガンマ線観測衛星計画を立案・遂行することが求められる.

MeV ガンマ線は厚い地球大気で散乱・吸収を 受けて通り抜けられず、地上から観測することは できないのだが,幸いなことに高度35 kmを超え るような高高度の科学観測気球であれば観測可能 である.気球は人工衛星に比べて安価な一方,飛 翔時間には限界があることから. 将来計画に向け た技術実証や天体観測実証,観測対象を絞った目 的特化型実験で古くから使用されてきた、中緯度 帯での半日~1日飛翔(米国・フォートサムナー やオーストラリア・アリススプリングス),昼夜 のない高緯度帯での1週間~1ヵ月の飛翔(ス ウェーデン・キルナからの大西洋横断や南極大陸 周回)での実験が行われている.加えて、近年 NASAが開発したスーパープレッシャー気球によ り、南半球中緯度帯での1ヵ月を超える飛翔時間 の気球も可能となってきており、気球による MeV ガンマ線の観測機会は増加傾向にある.

2040年代の大型計画に向けて、どのような設 計の検出器を採用して,衛星ミッションを組み立 てるべきなのかは国際的にもまだ十分に議論が深 まっているとは言えない状況である、ベストなコ ンプトンカメラの構成というのは研究者間でもま だコンセンサスが得られておらず、それは当然科 学目標にも依存する.将来的には,GRAMSのよ うな大型高密度の検出器で SMILE のように電子 飛跡を取得し、大有効面積かつ低バックグラウン ドの観測装置を目指す必要がある。さらにコンプ トンカメラの角度分解能を超えた撮像能力を得る ために、コンプトンカメラを焦点面検出器とし、 ガンマ線レンズや狭視野符号化開口マスクのよう な光学系を用いることも考えられる [32] (図4). そうした基盤技術を確立するために、2020年代 には基礎開発や気球による実証実験,2030年代 に長時間気球や超小型衛星・小型衛星による技術 実証や科学観測実証を進めていかなければならな

◆◇◆◇◆ シリーズ: 2040年代のスペース天文学へ ◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇◆◇



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 である.

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, Nucle. Inst. 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] Knödlseder, 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] Benhabiles-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] Siegert, T., et al., 2016, A&A, 586, A84
- [19] Strong, A. W., et al., 1999, Astrophys. Lett. Commun., 39, 209
- [20] Siegert, 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 fullfledged field of astronomy.