

CRC の宇宙ミッション提案 2019

CRC 実行委員会
CRC 将来計画検討小委員会
CRC 宇宙ミッション計画各代表者

2019 年 11 月 25 日

目次

1	CRC における宇宙ミッション	3
1.1	はじめに	3
1.2	CRC での宇宙ミッションの占める役割	4
1.3	CRC での宇宙ミッションの更新について	4
1.4	今回 CRC が提案する宇宙ミッションの概要	4
2	宇宙線反粒子探索計画 GAPS	7
2.1	学術的背景	7
2.2	GAPS の概要、意義、特色	7
2.3	GAPS の観測手法、工程、他実験との相補性	8
3	宇宙 UHECR 天文台 K-EUSO	10
3.1	戦略	10
3.2	工程表	11
4	POEMMA (Probe Of Extreme Multi-Messenger Astrophysics)	12
4.1	戦略	12
4.2	準備状況と工程表	13
5	B-DECIGO	14
5.1	戦略	14
5.2	工程表	16
6	スペース重力波望遠鏡 LISA への日本の参加	18
6.1	学術的背景	18
6.2	戦略	18
6.3	工程, 開発体制	19
7	MeV ガンマ線掃天探査気球実験 SMILE-3	20

7.1	学術的背景	20
7.2	戦略	21
7.3	工程表	23
8	気球搭載型エマルジョン望遠鏡による宇宙ガンマ線の観測 GRAINE 計画	25
8.1	学術的背景と戦略	25
8.2	工程表	26
9	High-z Gamma-ray bursts Unraveling the Dark Ages and Extreme Space Time Mission - HiZ-GUNDAM	27
9.1	学術的背景と戦略	27
9.2	多波長・他分野との連携	27
9.3	工程表と体制	28

1 CRC における宇宙ミッション

1.1 はじめに

CRC (Cosmic ray Researchers Congress、宇宙線研究者会議) は、広義の宇宙線物理学研究 (宇宙線実験、宇宙物理、宇宙素粒子物理学) に関心のある研究者の自主的な組織である。1953 年に発足し、現在 408 名 (2019 年 3 月現在) の研究者が所属し、会員による選挙で選出された 13 名で構成される CRC 実行委員会が運営を統括している。主に日本物理学会大会・総会時に定期的に総会を持ち、また独自にシンポジウム・タウンミーティングなどを開催して、宇宙線物理学の研究者交流と共同研究の推進をはかるとともに、将来計画を議論している。宇宙線分野のカバーする研究は広く、素粒子物理、宇宙物理、天体物理、地球物理といった性格を併せ持ち、観測手段についても、地上観測、飛行体観測、宇宙機観測、地下観測、放射性同位体分析など、あらゆる手法を駆使している。

CRC では 2011 年以来、将来計画検討小委員会を CRC 実行委員会の元に常設し、これまでに合計 15 回の「CRC 将来計画タウンミーティング」を開催し、会員が持つ将来計画を取り上げ、会員相互の議論により polish up し、宇宙線分野の研究計画としてとりまとめ、発信している。図 1 は、2013-2014 年期的同委員会が取りまとめたロードマップである。宇宙線物理学の大目標が示されている。本年度 (2019 年度) においても、第 1 回 12 月 20-21 日 (大阪) と第 2 回 (3 月予定) の 2 度の将来計画タウンミーティングを予定しており、第 1 回において提案された宇宙ミッションについて議論することになっている。将来計画検討小委員会は、CRC 外部の関連研究コミュニティからも数名の外部委員を招聘し、関連分野との連携の役割も果たしている。

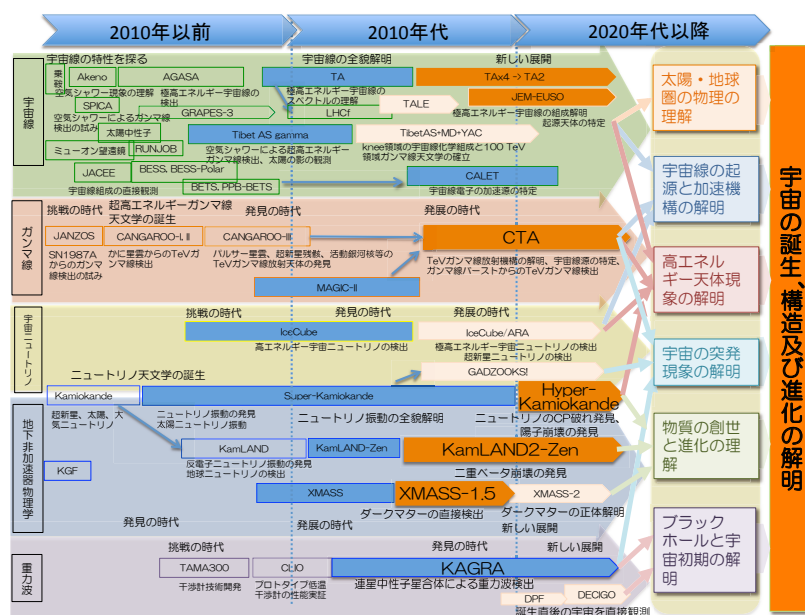


図 1 CRC 将来計画検討小委員会 (2013-2014 年期的) による「ロードマップ」

本ロードマップは、2013 年 8 月 30 日に出された「CRC 将来計画検討小委員会 2011-2012 年度期最終報告」に基づき、その追加資料として 2013 年 3 月に作成したものである。ここでは上述の最終報告で取り上げられた中規模以上のプロジェクトに絞っており、したがって、宇宙線研究の黎明期から現在にいたる様々なプロジェクトとその重要な成果や、これらを含む中小規模の多彩な将来計画を網羅しているわけではないことを注記しておく。

1.2 CRC での宇宙ミッションの占める役割

宇宙からの放射線、素粒子を研究対象とする宇宙線研究において、特に一次宇宙線の観測では、大気の影響の少ない高山、高空での観測、さらに気球・宇宙機による観測が本質的な役割を果たしてきた。これらの中で、CRC 会員が自ら立案して JAXA 計画として実現した宇宙ミッション（CALET など）、CRC 会員が重要な役割を担って実現した大型国際協力実験（Fermi など）や企画中の実験（EUSO など）など、特筆した成果をあげている宇宙ミッションは少なくない。これに加えて、CRC 会員による多くのユニークな気球実験（BESS、BETS など）が成果をあげており、現在も提案され続けている（GRAINE、SMILE、GAPS など）。これらの気球実験は、小規模の予算・人員で新たなアイデアによるタイムリーな成果をあげることが可能であるだけでなく、宇宙ミッションの前哨計画として技術開発に重要である他、宇宙ミッションを志向する若手育成にも大きく貢献している。CRC として日本のペイロードの利用計画のみならず、国際共同実験への参画や、実施頻度の高い気球実験の拡充も検討してゆくべきと考える。

1.3 CRC での宇宙ミッションの更新について

CRC では 4 年前に CRC 会員が構想する 5 つの宇宙ミッション、K-EUSO、Pre-DECIGO、SMILE、HiZ-GUNDAM、GAPS を「CRC の宇宙ミッション提案」（2015 年 2 月 2 日）として取りまとめ、これを「工程表」として ISAS に提出した。今回、宇宙ミッションに関する工程表の更新を ISAS から要請されたことを受けて、2019 年 11 月 15 日締切で CRC 会員に改めて宇宙ミッションを公募し、以下の 8 計画を取りまとめた。これらの全ての計画は、過去の将来計画タウンミーティングで提案され、CRC 会員による議論を経たものである。

1.4 今回 CRC が提案する宇宙ミッションの概要

1.4.1 暗黒物質探索分野

暗黒物質は宇宙における質量の大半を占め、その解明は宇宙物理学・素粒子物理学における最重要課題の 1 つである。GAPSは、宇宙線中の反粒子の測定を行う計画で、とりわけ稀少成分である反陽子や、未発見ながらさらに稀少な量が存在しているかもしれない反重陽子の高感度な測定・探索により、暗黒物質を間接探索するなど宇宙物理学・素粒子物理学的に重要な研究課題を探究する。GAPS 測定器はリチウムドリフト型シリコン検出器アレイとその周囲を二重に囲むプラスチックシンチレーションカウンタ群で構成され、宇宙線反粒子と Si で構成される励起エキゾチック原子の脱励起特性 X 線と、反粒子と Si 原子核の核子対消滅によるハドロン群の測定から入射反粒子種を同定する、というユニークな特徴を持つ。南極周回気球に搭載し、計 3 回のフライトで延べ 100 日の観測から有力な暗黒物質モデルの検証を目指している。

1.4.2 最高エネルギー宇宙線観測分野

およそ 10^{18}eV 以上のエネルギーをもつ超高エネルギー宇宙線・ニュートリノが主な対象である。これらの粒子の加速・生成機構と伝播過程の物理を解明するとともにこれらの粒子をプローブとして最高エネルギー宇宙線源を探索することにより、宇宙における超高エネルギー現象の物理を解明することが研究目的である。観測的には、超高エネルギー宇宙線・ニュートリノのエネルギースペクトル、到来方向分布および粒子種（化学組成）の決定が重要である。

この分野の宇宙ミッションとしては、宇宙ステーションからの空気シャワー観測実験であるK-EUSOが提案されている。地球大気に入射した高エネルギー宇宙線のシャワーによる大気蛍光やチェレンコフ光を、国際宇宙ステーションに搭載された反射式大気蛍光望遠鏡を用いて視野で観測し、宇宙線の到来方向分布を南北半球にわたって詳しく測定し、宇宙線源の直接的に特定することを目指している。2023 年打ち上げを目指す本計画では、 5×10^{19} eV 以上のエネルギーで、現在世界最大の Auger 実験の 4 倍の年間露光量を達成できると期待される。

さらに、K-EUSO によって創始される「荷電粒子天文学」を、本格的に実施する最高エネルギー宇宙粒子の全天観測国際宇宙天文台としてPOEMMAがに提案され、議論されている。口径 3.3m の光学望遠鏡を搭載した観測衛星 2 機によるステレオ観測で、宇宙から地球を見下ろして超高エネルギー宇宙線・ニュートリノを観測し、これらの源を探索することを目的とする米国を主体の計画で、日本 EUSO チームはこれまでの EUSO 計画に関連する準備実験で培った大型レンズの技術で本計画に貢献することを提案している。

1.4.3 重力波天文学分野

重力波は一般相対性理論の予言する時空の歪みの波動であり、これもまた基礎物理学・天体物理学・宇宙物理学に関わる宇宙からの放射であることから、広義の宇宙線研究として CRC はその推進を支援してきた。

宇宙論的な源からの重力波は、地上では観測が困難な低周波の重力波である。そのため、衛星による重力波検出実験が提案されており、日本国内からの提案である B-DECIGO を CRC では議論・検討している。B-DECIGO は地上重力波望遠鏡よりも低い 0.1-10 Hz という周波数帯で非常に良い感度をもつ宇宙重力波望遠鏡である。観測対象は、中性子星やブラックホールからなるコンパクト連星の合体であり、さらにこの観測周波数帯では合体の数か月程度前から観測することが可能で、かつ質量や波源の方向などの連星パラメータを現在の地上重力波望遠鏡よりも圧倒的に良い精度で測定することが期待される。これに加えて、B-DECIGO の先にひかえる「DECIGO 計画」の主研究課題である初期宇宙からの宇宙背景重力波の観測に対して、そのフォアグラウンドとなる多数の中性子星連星からの重力波の大きさと周波数依存性を B-DECIGO で観測的に評価することも重要な目的である。準備実験である Pre-DECIGO、DPF (DECIGO Path Finder)、最終目標である DECIGO などを含めタウンミーティングで計画更新の発表と議論が続けられている。

さらに、ESA の掲げる cosmic vision program 大型計画シリーズの 3 番目、L3 ミッションとして 2017 年に採用されたスペース重力波望遠鏡LISA (Laser Interferometer Space Antenna) への参加も提案されている。LISA は 0.1-100 mHz 帯の低周波数の重力波に対して高感度を持つ重力波天文学ミッションで、その主な目的は、超大質量ブラックホールの形成過程とその時期の解明、ブラックホールの事象の地平面付近および宇宙論的スケールでの重力の性質の研究にある。LISA と B-DECIGO は観測周波数帯および科学目的が異なるため、科学成果が相補的である。

1.4.4 ガンマ線天文学分野

宇宙におけるガンマ線放射は様々な高エネルギー現象における電子・陽子・2次粒子・物質・磁場と結びついており、ガンマ線観測の対象と解明を狙う現象も、銀河面拡散ガンマ線、宇宙背景ガンマ線、粒子加速のメカニズムと energetics、SNR での粒子加速と分子雲との相互作用、AGN ジェットの解明、ガンマ線バースト、核ガンマ線、既知／未知の素粒子の対消滅ガンマ線、 $\gamma\gamma$ 吸収による宇宙初期光子密度の推定、量子重力理論の検証など、宇宙物理から素粒子物理・宇宙論まで多岐にわたる。同時に観測手法もエネルギー帯域によって、1MeV 以下の光電吸収、0.1-100MeV のコンプトン散乱、0.1-100GeV の電子対生成などを利用した直接測定、さらに高エネルギーでは、0.1-100TeV の空気シャワーチェレンコフ光・地表粒子観測といった間接測定と多岐にわたる。

SMILE-3は、ガス飛跡検出器をコンプトン散乱標的として用いる電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡 (electron-tracking Compton camera: ETCC) を気球に搭載して、MeV ガンマ線天体、銀河系内拡散 MeV ガンマ線、宇宙背景 MeV ガンマ線などをターゲットとした広域探査観測である。SMILE の ETCC はガス飛跡検出器とそれを取り囲む位置感度型シンチレーション検出器で構成されており、検出事象毎にガンマ線到来方向を一意に決定することができる。これによって 観測対象領域外から混入する雑音ガンマ線事象を大きく削減することができ、さらに中性子などのガンマ線以外の粒子や多重コンプトン散乱の様な不完全なエネルギー損失を排除することも可能となっている。この方式の ETCC の天体観測能力は、2006 年 (SMILE-I) 及び 2018 年 (SMILE-2+) で実証されており、本計画 SMILE-3 では短期間気球観測による試験観測と大型化・高空間分解能化を進め、それに続く一ヶ月以上の長時間観測を複数回の長期気球実験を実施することで、COMPTEL の数倍の検出感度という史上最高感度での全天観測を目指している。

GRAINEは、空間分解能に優れた原子核乾板 (エマルジョンフィルム) を用いた GeV ガンマ線望遠鏡で、科学観測用大気球に搭載して高解像度かつ偏光に感度を有する観測の実現を目指している。本計画によるフルスケール観測が確立すれば、銀河中心方向の GeV ガンマ線超過の実態に迫るガンマ線発生源密集域の高解像度分析、宇宙線陽子加速が示唆される超新星残骸のイメージングとスペクトル分析、未検出であるパルサーからの GeV ガンマ線偏光の観測、大有効面積を活かした極低輝度のトランジエント現象の探査などユニークな科学成果が期待される。

HiZ-GUNDAMは、X線・ガンマ線イメージング検出器と、可視光・近赤外線望遠鏡を同時に搭載した衛星を提案している。高赤方偏移 GRB をいち早く特定することを目標とし、突発天体観測を中心としたマルチメッセンジャー天文学を推進することが期待される。

続く節では、これらの宇宙ミッションについて、その詳細を述べる。

2 宇宙線反粒子探索計画 GAPS

ミッション代表者：福家英之（JAXA）

2.1 学術的背景

暗黒物質は宇宙における質量の大半を占め、その解明は宇宙物理学・素粒子物理学における喫緊の重要課題であることから、「宇宙科学・探査ロードマップ」でも「物理学の根幹にかかわる課題」として挙げられている。暗黒物質として有力なのは通常の物質とほとんど相互作用をせず質量を持つ粒子 WIMP であり、超対称性や余次元など標準理論を超えた新しい物理に伴う様々な理論モデルが提唱されている。世界中でなされているどの実験手法も単独で暗黒物質を 1 つに特定できるわけではなく、暗黒物質の解明には多角的な研究が不可欠である。この多角的アプローチにおいて他実験と相補的かつユニークな位置を占めるのが宇宙線反粒子（とりわけ宇宙線反重陽子）を介した暗黒物質探索である。

宇宙線反重陽子は未発見・未開拓ながら様々な理論モデルにて暗黒物質の対消滅や崩壊から生成される可能性があり、極微ながらも検出可能な量が存在し得るという予測論文が数多く発表されている^{*1}。図 2 に、暗黒物質モデルから期待される宇宙線反重陽子のエネルギースペクトルの例として、超対称性粒子ニュートラリーノ、余次元（5 次元 warped GUT）Dirac ニュートリノ（LZP）、および、LSP gravitino の場合を示す^{*2}。これら暗黒物質起源の反重陽子のエネルギースペクトルは 0.1 GeV/nucleon オーダーの低エネルギー領域に極大を持つと予想される。一方、宇宙線物理学的なバックグラウンドとしての二次起源成分は生成の運動学により低エネルギー域で抑制される。そのため、0.1 GeV/n 付近ではバックグラウンドフリーで暗黒物質起源を直接検出できる可能性がある。

これが宇宙線反重陽子の大きな利点であり、他の宇宙線種を用いた間接探索実験がバックグラウンドからの僅かな過剰信号を見出そうとしているのとは質的に異なる。従来は不定性が大きかった反重陽子の生成確率の理論計算も近年の加速器実験での人工生成例の急増によって精度が高まっている。従って、0.1 GeV/n 領域に 1 イベントでも反重陽子が観測されれば暗黒物質など未知の起源の存在を強く示唆する証拠となる。理論パラメータ空間にて反重陽子で探査できる領域は直接探索実験やニュートリノ等による間接探索実験と相補的である^{*3}。

2.2 GAPS の概要、意義、特色

General Anti-Particle Spectrometer（GAPS）計画は世界で唯一の反重陽子探索実験であり、既存の探索上限値を約 2 桁上回る高感度探索によって幾多の暗黒物質研究の中でもユニークかつ他実験と相補的な知見を提供できる。また、GAPS は 0.1 GeV 域の低エネルギー反陽子をかつてない高統計で観測することでも暗黒物質モデルの検証に貢献する^{*4}。

稀少な反粒子を高い感度で探索するため、GAPS 測定器には大きな面積立体角が求められる。そこで GAPS では、従来のマグネット型スペクトロメータよりも低エネルギー宇宙線に対する透過性や面積立体角の大型化

^{*1} 最初の契機となったのは F. Donato et al., Phys. Rev. D 62（2000）043003.

^{*2} K. Perez et al., Astro2020 Science White Paper（2019）.

^{*3} H. Baer et al., JCAP 0512（2005）008.

^{*4} T. Aramaki et al., Astropart. Phys. 59（2014）12.

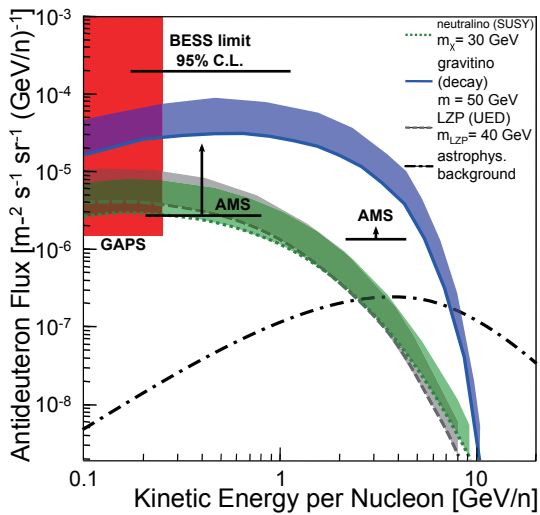


図2 3種類の暗黒物質モデル起源と二次起源の反重陽子予想エネルギースペクトル、および、BESSによる流束上限値、GAPS（100日間）とAMS-02（5年間）で期待される反重陽子感度。

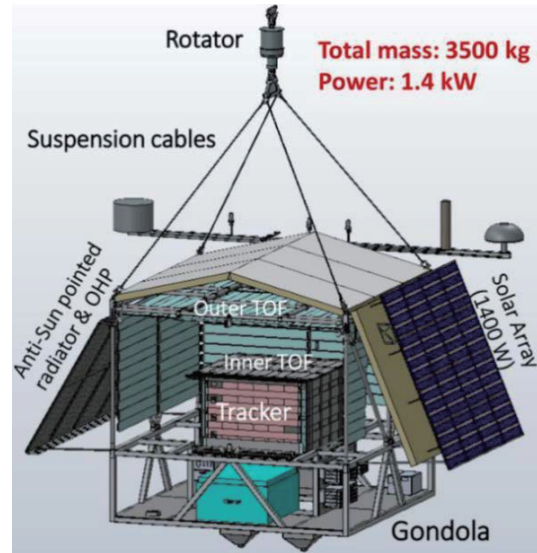


図3 GAPS 測定器の構成概念図。主に Si(Li) 検出器アレイ (Tracker) と内外 TOF シンチレーションカウンタ群で構成される。

を比較的容易に実現できる手法として、エキゾチック原子を用いた新しいオリジナルな手法を導入する^{*5}。

GAPS 測定器はリチウムドリフト型シリコン検出器 (Si(Li)) アレイとその周囲を二重に囲むプラスチックシンチレーションカウンタ群 (TOF) で構成される (図 3)。到来する低エネルギー宇宙線反粒子は TOF カウンタを通過したのち、積層された Si(Li) 検出器を通過中にエネルギー損失により減速・捕獲され、Si と励起エキゾチック原子を構成する。励起エキゾチック原子はすぐに脱励起して特性 X 線が放出され、反粒子と Si 原子核との核対消滅により π や p のハドロン群が放出される。励起エキゾチック原子の脱励起過程や π/p 生成数は捕獲された反粒子の種に固有のため、特性 X 線のエネルギーや π/p 生成数を測定することで入射反粒子種を同定できる。

2.3 GAPS の観測手法、工程、他実験との相補性

低エネルギーの荷電宇宙線に対する地磁気や大気の影響を抑制するため、GAPS は南極周回気球を当面の観測手段とする。NASA は南極マクマード基地を拠点に毎年数機の南極周回気球を運用しており、1 ヶ月規模の長期間観測を期待できる点でも GAPS に最適である。太陽活動に伴う流束変動の影響も抑制するため、太陽活動静穏期の 2021 年に第 1 回観測を計画している。計 3 回のフライトでのべ 100 日間を飛翔できれば $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ GeV/n}^{-1}$ レベルの高流束感度に到達でき、有力な暗黒物質モデルの検証が可能となる (図 2)。

GAPS は日米伊の国際共同計画である。日本では 2010 年に JAXA/ISAS 宇宙理学委員会にて小規模プロジェクトワーキンググループが設立され、2017 年からは JAXA/ISAS 小規模計画として推進されている。米国でも 2017 年から NASA/APRA を獲得しているほか、伊 ASI 等からの支援も得ている。2019 年には GAPS 測定器の基本設計が完了し、実機製作フェーズに移行した。2021 年末の第 1 回南極気球実験実施に向けて、実機の構築が進められている。

のべ 100 日間の南極気球実験の結果として更なる高感度高精度な観測への科学的機運が高まれば、衛星に

^{*5} T. Aramaki et al., Astropart. Phys. 74 (2016) 6.

よる数年規模の観測をラグランジュ点 L2 にて実施することも検討したい。なお、宇宙線反粒子を観測する他実験との比較としては、過去の BESS 気球実験や PAMELA 衛星、国際宇宙ステーション（ISS）上で実施中の AMS-02 実験よりも低いエネルギーをより高い感度で観測できる利点がある。最近、ポスト GAPS として GRAMS や AMS100/NGS が新たに提案されたことから、GAPS の高い意義と先進性が認められる。

3 宇宙 UHECR 天文台 K-EUSO

ミッション代表者：戎崎俊一（理化学研究所）

3.1 戦略

3.1.1 概要

K (KLYPVE)-EUSO は、宇宙から地球を見下ろして、地球大気を巨大な検出器として使う、はじめての宇宙 UHECR 天文台である (図 4)。UHECR (Ultra-High Energy Cosmic Ray) は、宇宙で最も高いエネルギー ($> 5 \times 10^{19}$ eV) をもつ粒子である。南北両半球を同じ検出器で観測し、宇宙線起源の同定を宇宙線の到来方向分布から直接明らかにする計画である。K-EUSO は、国際宇宙ステーションのロシア MRM-1 モジュールに設置される。2023 年の打ち上げ予定で、最短 3 年、可能であれば 6 年かそれ以上の期間観測する計画である。K-EUSO は、空気シャワーによって励起された窒素の紫外線蛍光とチェレンコフ光を撮像し、その時間的・空間的発達から、UHECR の 1 次粒子のエネルギーと到来方向を再構築する (図 4 中の図)。日本は補正レンズとマルチアノード光電子増倍管の一部を供給を行う。

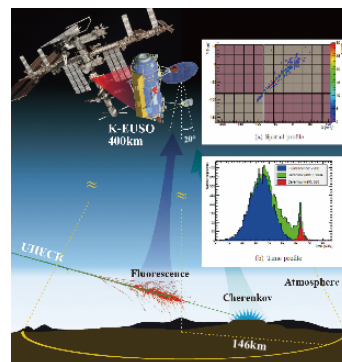


図 4 UHECR を宇宙から観測する K-EUSO 検出器の概念図。

3.1.2 学術的背景と意義

K-EUSO は未だ謎となっている超高エネルギー宇宙線 ($> 5 \times 10^{19}$ eV) の起源と加速機構の解明を目的とし、宇宙から南北両半球を史上初めて同じ検出器で観測し、既存の地上観測装置（北半球の Telescope Array (TA)、南半球の Auger）で得られている北天スポットや到来方向分布、非球対称性の存否、宇宙線起源の同定を、宇宙線の到来方向分布から直接明らかにする。この実現のため、日本はロシアの宇宙線観測ミッション (KLYPVE、直焦点反射望遠鏡) に補正レンズの導入を提案した。Schmidt 光学系により性能が向上し、年間露出量は Auger の約 4 倍となる。この世界最大の露出量は次の二つの重要な科学目的を達成する。

1. 北天と南天の宇宙線超過事象（ホットスポット）の存在の独立検証（もしくは否定）、およびそのスペクトル指数の比較。地上検出器の感度が低い天の赤道領域における新規ホットスポットの探索。特に、北天のホットスポットに関して、その存否確認と起源天体の同定を行える。
2. さまざまな角度スケールにおける超高エネルギー宇宙線の到来方向異方性の研究。それは、近傍銀河系外大規模構造（ ~ 40 度）、天の川銀河に関係した構造、そして双極的な異方性との相関研究を含む。

これらの科学目的は、打ち上げ後 1 年で達成の見通しが明らかになり、6 年間の運用でその確度が向上する。北天観測の TA は、 5.7×10^{19} eV 以上で半径 20 度の範囲からのホットスポットを報告し、以後もその存在が確認されている。He et al. (2016) は、このホットスポットを構成する観測データをエネルギーで二つに分け、両者にズレがあることを発見した。それが磁場による偏向と仮定して起源天体を推定すると、UHECR が伝播できる 100 Mpc 以内のある天体は、M82 しかないことが分かった。M82 は爆発的な星形成が進行しているスターバースト銀河である。また、Auger チームは、観測データとスターバースト銀河モデルとの相関を調べ、39 EeV 以上のエネルギーのイベントについて 2 つのスターバースト銀河 NGC253 と NGC4945 の方向にも 4σ 程度の到来方向の増加が見られると報告している (Aab, A et al., 2018 Astrophys. J. letters, 853, L29) (図 5 (B))。これらのスターバースト銀河の中のブラックホールの質量は $10^4 - 10^6$ 太陽質量程度で、従来

の Fermi 加速機構では超高エネルギー宇宙線まで荷電粒子を加速できない (Anchordoqui, L.A. and Soriano, J.F., 2019, arXiv:1905.13243v1)。もし、M82 が北天ホットスポットの線源ならば、より効率的な新規の加速機構が必要である。「プラズマ航跡場加速」(Tajima and Dawson 1979) は、従来の加速器の限界を超える加速器原理として注目を集めている。Ebisuzaki and Tajima (2014, Astroparticle Physics) は、ガス降着しているブラックホールで「プラズマ航跡場加速」が起こり超高エネルギー宇宙線 (ZeV 領域) にまで加速ができることを示している。これまでで最大の露出を、南北両半球にわたってほぼ一様を実現する K-EUSO は、TA ホットスポットの存否確認と M82 への同定を行う能力を持っており、宇宙におけるプラズマ航跡場加速の証拠を与える可能性がある。また、複数の起源天体の同定が期待でき、史上初めての「荷電粒子天文学」を創始することができる。

3.2 工程表

JEM-EUSO に向けて開発されてきた諸技術は、複数の先行ミッション (EUSO-TA、EUSO-BALLOON、EUSO-SPB1、Mini-EUSO) により成熟し準備が整っている。Mini-EUSO は、2019 年 8 月に Soyuz MS-14 に搭載され、Baikonur Cosmodrom より打上げられ、ISS に設置された。10 月より運用を開始している (図 6)。Mini-EUSO の焦点面検出器のデザインは、K-EUSO にも用いられる。日本は、平成 25 年度小規模プロジェクト公募 (ISAS 宇宙理学委員会) に応募し、ミッション定義審査として合格の評価を受け (2014 年 8 月)、引き続きシステム要求審査の準備をするよう推奨され、必要な書類は 2014 年 12 月に提出を行なった。戦略的開発経費を用いてレンズ製作における課題の解決を行なった。2019 年度、科研費基盤 (B) を獲得し、補正レンズ製作を開始している。ロシアでは、Phase-A 研究を行い 2019 年 5 月に完了した。表 1 に、想定するマイルストーンを示す。実施体制は、理化学研究所、甲南大学、埼玉大学、大阪市立大学、宇宙線研究所等で構成する。

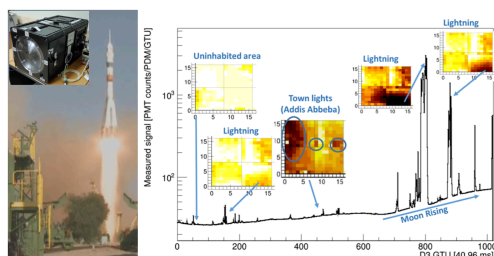


図 6 2019 年 8 月に ISS に向けて打ち上げられた Mini-EUSO 望遠鏡 (左) と 10 月の観測 (右)。

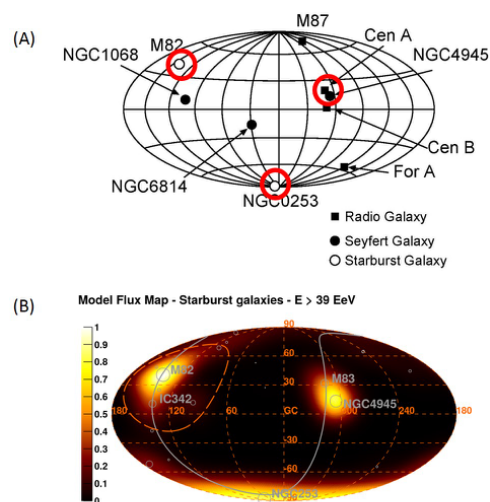


図 5 (A) 線源候補の分布 (Ebisuzaki and Tajima 2014)。4 つの銀河 (M82, NGC253, Cen A, and NGC4945) が 3 つの赤い円に含まれる。それらは、「プラズマ航跡場加速」理論で、線源と示唆される。(B) 39EeV 以上の Auger 観測データと有意な相関を持つスターバースト銀河のフィット分布モデル (Aab, A et al., 2018)。

表 1 主な Milestones

Date	Milestones
2020	Engineering model の製造・テスト
2022	Flight model の製造・テスト
2023	打ち上げ
2026(2029)	運用終了

4 POEMMA (Probe Of Extreme Multi-Messenger Astrophysics)

ミッション代表者：滝澤慶之（理化学研究所）

4.1 戦略

4.1.1 概要

POEMMA (Probe Of Extreme Multi-Messenger Astrophysics) ミッションは、Schmidt 望遠鏡をベースにした口径 3.3m の観測衛星 2 機によるステレオ観測で、宇宙から地球を見下ろして宇宙線およびニュートリノを観測し、超高エネルギーをもった宇宙線粒子 (UHECR) の源を探索する。UHECR (Ultra-High Energy Cosmic Ray) は、宇宙で最も高いエネルギー ($> 5 \times 10^{19} \text{eV}$) をもつ粒子である。UHECR が大気中で作る空気シャワー (EAS) によって励起された窒素の紫外線蛍光とチェレンコフ光を撮像し、その時間的・空間的の発達から、UHECR の 1 次粒子のエネルギーと到来方向を再構築する。POEMMA は、シカゴ大学の Angela V. Olinto 教授により推進され、現在、NASA Decadal survey 2020 の大型計画の候補として選考が行われている (2029 年頃打上の計画)。日本 EUSO チームは、これに参加し、直径 3.3m の補正レンズを供給することを提案している。(図 7)。

4.1.2 学術的背景と意義

POEMMA は、未だ謎となっている超高エネルギー宇宙線 ($> 5 \times 10^{19} \text{eV}$) の起源と加速機構の解明を目的としている。北半球の Telescope Array (TA) と南半球の Auger の観測結果から宇宙線起源天体のヒントが見えてきたが、未だ統計不足のため起源天体の特定には至っていない。さらに巨大な観測装置が必要であるが、地上の装置での実現は難しく、またそのような計画も現在のところない。そして、地上装置では、それぞれ北天、南天しか観測できず、到来方向を議論するために必要な全天に対してほぼ一様な露出を得ることは難しい。POEMMA は、これらの課題を克服し、衛星軌道上から UHECR および超高エネルギーニュートリノを高統計で全天観測を行う。POEMMA では、TA および Auger で

得られている宇宙線過剰領域や到来方向分布、非球対称性の存否明かし、宇宙線起源の同定を宇宙線の到来方向分布から直接明らかにする。POEMMA の年間観測露出量は、地上で最大の Auger の 10 倍以上であり、全天で 10 個程度の点源検出が期待されている。POEMMA は、K-EUSO によって創始した「荷電粒子天文学」を、本格的に実施する UHECR の全天観測国際宇宙天文台として期待されている。また、POEMMA は、超高エネルギーニュートリノの検出・測定が期待できる。地球のリム方向を観測し、 τ ニュートリノがつくる上向きに発達する空気シャワーの蛍光やチェレンコフ光の観測により、Cosmogenic なニュートリノの直接検出ができると期待されている。IceCube と比べて、瞬間的な露出量は 10 倍以上あり、突発的に発生する超高エネルギーニュートリノの検出能力が高い (Mary Hall Reno, et al, ICRC2019 (2019),

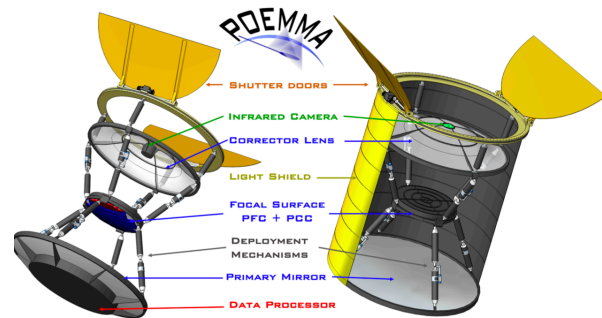


図 7 POEMMA の概念図。望遠鏡 2 台によるステレオ観測を行う。Schmidt タイプの光学系で、補正レンズ 3.3m、主鏡 4.0m である。

989)。Ebisuzaki and Tajima (2014, Astroparticle Physics) は、ガス降着しているブラックホールで「プラズマ航跡場加速 (Tajima and Dawson 1979)」が起こり、超高エネルギー宇宙線 (ZeV 領域) にまで加速ができることを示し、注目を集めている。POEMMA で検出できる高エネルギーニュートリノも生成することを予測している。また、10 太陽質量程度の銀河系内のブラックホール (いわゆるマイクロクェーサーで、Cyg X-1、Cyg X-3、SS433、GX5-1、GX339-4、Sco X-1 など) でも、 10^{19} eV を超える粒子加速が可能となる (Ebisuzaki and Tajima, 2014 a b, Astroparticle Physics)。一方、銀河内マイクロクェーサーの多くが比熱的電波ジェットを持ち、しかも $10^{12} - 10^{15}$ eV の超高エネルギーガンマ線を放出している (I.F. Mirabel, IAU symposium, 214, 2003)。この事実は、プラズマ航跡場加速が実際にマイクロクェーサーで働いていることを示している。これらのブラックホールが濃い分子雲の中にあると、加速された荷電粒子が分子雲内の陽子と衝突して、超高エネルギー ($10^{14} - 10^{19}$ eV) のニュートリノを放射する可能性がある。実際、IceCube によるスカイマップで、銀河中心および銀河円盤への到来方向の弱い集中が指摘されている。マイクロクェーサーをはじめとする銀河系内ブラックホールは、激しい時間変動を示している。また、X 線新星として、MAXI 等で年間数個が観測されている。POEMMA によるニュートリノ観測は、X 線天文学の黎明期に発見されたこれらの天体に再び注目を集めさせるとともに、Multi-Messenger Astrophysics の一翼を担う存在になると考えてる。

4.2 準備状況と工程表

JEM-EUSO に向けて開発されてきた諸技術は、複数の先行ミッション (EUSO-TA、EUSO-BALLOON、EUSO-SPB1、Mini-EUSO) により成熟し準備が整っている (図 9)。Mini-EUSO は、2019 年 8 月に Soyuz MS-14 に搭載され、Baikonur Cosmodrom より打上げ、ISS に設置された。10 月より運用を開始している。Mini-EUSO の焦点面検出器モジュールデザインは、POEMMA で用いられる。現在、NASA Decadal survey 2020 の大型計画の候補として選考が行われている。表 2 に、想定するマイルストーンを示す。日本の体制は、現在の K-EUSO チームを母体とし POEMMA チームを構成する。構成機関は、理化学研究所、甲南大学、埼玉大学、大阪市立大学、宇宙線研究所等である。

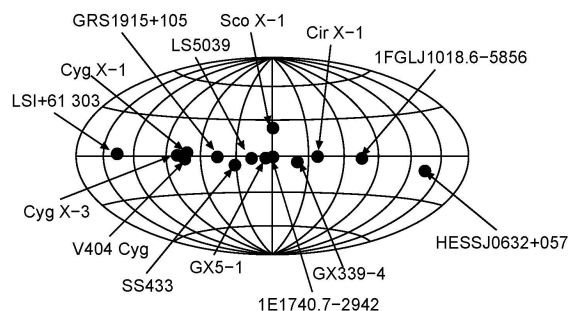


図 8 天の川銀河中のニュートリノ源候補となるマイクロクェーサーの分布。

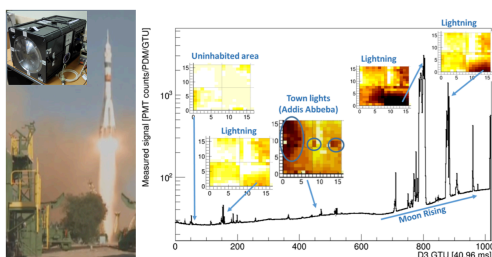


図 9 2019 年 8 月に ISS に向けて打ち上げられた Mini-EUSO 望遠鏡 (左) と 10 月のファーストライト観測 (右)。

表 2 主な Milestones

Date	Milestones
2023	システム要求審査
2024	基本設計審査
2025	詳細設計審査
2026	製造開始
2029	打ち上げ
2034	運用終了

5 B-DECIGO

ミッション代表者：安東正樹（東京大学）

5.1 戦略

5.1.1 目的と概要

B-DECIGO（ビーデサイゴ）は、0.1 Hz-10 Hz の周波数帯に良い感度をもつ宇宙重力波望遠鏡である。B-DECIGO は中性子星やブラックホールからなるコンパクト連星の合体を年間約 10^5 イベント観測することが期待できる。また、B-DECIGO の観測周波数帯では合体の数か月程度から観測することが可能であり、質量や波源の方向などの連星パラメータを現在の地上重力波望遠鏡よりも圧倒的に良い精度で推定することが期待できる。合体時刻も推定できることから、電磁波望遠鏡をによる電磁波対応天体の特定や合体直後からの光度曲線の観測など、従来とは質の異なった科学的成果が期待できる。B-DECIGO では、中間質量ブラックホール連星の合体に関しては宇宙全体をカバーする性能を持っており、銀河中心にある超巨大ブラックホールの形成過程の謎を解き明かすとともにブラックホールの時空構造に迫るという独自の科学的成果も期待できる。より将来の DECIGO による初期宇宙観測時には多数の中性子星連星からの重力波がフォアグラウンドとなる可能性がある。そこで B-DECIGO によってその大きさと周波数依存性を観測的に評価することで、将来的にインフレーション期からの重力波を観測する際の基礎情報を得ることも重要な目的となっている。

B-DECIGO は、0.1 Hz 付近の周波数帯で $10^{-23} \text{ Hz}^{-1/2}$ の歪み感度をもつ宇宙レーザー干渉計である（図 10）。正三角形上に 100 km 離れてフォーメーション・フライトを行う 3 機の宇宙機のそれぞれの内部には試験マスとなる鏡（直径 300 mm 程度、質量 30 kg 程度）とレーザー光源（波長 515 nm, 出力 1 W）が搭載されている。これらを用いて基線長 100 km のレーザー干渉計を構成し、重力波による基線長変動を精密観測を行う。また、太陽輻射圧変動に起因する宇宙機変動が、試験マスへの外乱となることを抑えるために、試験マスの位置を基準に宇宙機の並進変動と姿勢変動を制御するドラッグフリー制御を行う。その実現のために、宇宙機には低推力雑音のスラスタが搭載される。B-DECIGO の軌道は検討中であるが、相対加速度変動の小さい、太陽周回もしくは地球周回のレコード盤軌道が有力である。

5.1.2 背景と将来計画

2015 年に米国の地上重力波望遠鏡 LIGO によって重力波の初観測が実現された。これは連星ブラックホールの合体時の重力波信号を捕らえたものであった。その後、現在までに約 30 個の連星ブラックホール合体イベントが観測されており、連星ブラックホールの存在や相対論の検証といった知見が得られるとともに、重たいブラックホールの起源など新たな謎も生まれており、重力波天文学が本格的に始まったといえる。また、2017 年には LIGO と欧州の重力波望遠鏡 VIRGO によって連星中性子星合体からの重力波も観測されている。このイベント時には、ガンマ線バーストも同時に観測された。さらに、世界の約 70 の電磁波望遠鏡が追観測が行われ、光赤外・紫外・X 線・電波といったあらゆる波長の電磁波で対応天体が発見されている。その結果、この 1 イベントの観測だけから、ガンマ線バーストの起源、宇宙における重元素の起源、中性子星の状態方程式、重力波の伝播速度といった相対論の検証、ハッブル定数の推定といった宇宙論的知見など幅広い科学的知見が得られている。

B-DECIGO は、地上重力波望遠鏡よりも低い 0.1 Hz-10 Hz という周波数帯で非常に良い感度をもつ宇宙重力波望遠鏡である。連星中性子星合体では年間 100 イベント、連星ブラックホール合体では年間 10^5 イベント



図 10 (左) B-DECIGO の概念図。約 100 km 離れた 3 機の宇宙機でフォーメーションフライトを行い、長基線のレーザー干渉計を構成する。(右) B-DECIGO 実現までのスケジュール。

トの観測が期待できる。また、連星合体の数か月程度前から観測を行うことで、事前に連星合体イベントの方向と時刻を推定することが可能になる。このことから、電磁波対応天体の発見が容易になるだけでなく、合体直後からの電磁波観測という質的に異なる観測が可能になる。

B-DECIGO のさらに将来には DECIGO (デサイゴ) ミッションの実現が想定されている。DECIGO では感度をさらに 1 桁向上させることで、初期宇宙からの宇宙背景重力波の観測が期待できる。背景重力波のスペクトルは、インフレーション期の揺らぎの生成や宇宙の熱進化の歴史を反映している。DECIGO が狙う 0.1 Hz の周波数帯はインフレーションが終了し、宇宙の再加熱(ビッグバン)が起こったと考えられる時期を観測することに対応し、インフレーションを起こした粒子やビッグバンが起こった時期といった情報を得ることが期待できる。

5.1.3 研究領域内での位置づけ

重力波研究コミュニティ 重力波観測分野においては、地上望遠鏡、宇宙望遠鏡、およびパルサータイミング等の他の手段も含めた国際重力波委員会 (GWIC: Gravitational Wave International Committee) が組織され、情報交換やコミュニティとしての方針の取りまとめが行われている。2010 年には、それらを俯瞰するロードマップがまとめられており、その中で DECIGO の意義も示されている。また、国内では、JGWC (Japan Gravitational Wave Community) において重力波分野の政策や運営が議論されている。その結果、まず、地上重力波望遠鏡 KAGRA による重力波天文学の創生を実現し、その後、宇宙重力波望遠鏡によって重力波天文学の発展を目指す、というコンセンサスが得られている。より広いコミュニティとしては宇宙線研究者コミュニティ (CRC) の一員となっており、将来計画策定のための議論を行っている。

地上重力波望遠鏡との関係 アメリカ合衆国の LIGO, ヨーロッパの VIRGO といった地上重力波望遠鏡はすでに重力波観測を開始しており、重力波信号の検出に成功している。日本の KAGRA は、2019 年末の観測開始を目指して、感度の向上を進めている。これらの地上望遠鏡は、100 Hz 付近の観測周波数帯を持ち、主にコンパクト連星合体といった突発的な高エネルギー天体現象の観測を目的としている。電磁波天文学で対象とする天文現象の温度・エネルギースケールの違いに対応して様々な周波数で観測が行われているのと同様に、重力波天文学においても対象とする重力波源の変動時間スケールに応じて異なった周波数で観測を行うことで、独立・相補的な観測を行うことができる。B-DECIGO は、地上重力波望遠鏡よりも低周波数帯の観測を目指しており、中間質量ブラックホールの観測が可能である。また、地上重力波望遠鏡が連星合体の数分から数秒前程度から合体の瞬間・合体後の信号を観測するのにに対して、低周波数帯に感度をもつ B-DECIGO では、合体の数か月前から信号を観測することで、質量や波源方向といった連星パラメータをより良い精度で推定する

こと、さらに連星合体時刻を予想し、電磁波望遠鏡にアラートを出すことなどが期待できる。

他の宇宙重力波望遠鏡との関係 宇宙重力波望遠鏡としては、1990年代から欧州宇宙機関 ESA とアメリカ航空宇宙局 NASA が共同で、LISA（Laser Interferometer Space Antenna）の検討を進めていた。その後、2011年以降は ESA を中心とした LISA ミッションとして科学的目標とデザインの再検討が進められており、ESA の長期計画である Cosmic Vision においては、2034 年打ち上げの L3 ミッションとして実現されることになっている。宇宙重力波望遠鏡 LISA は、B-DECIGO よりもさらに低周波数帯の 1 mHz 付近の周波数帯に感度を持っており、超巨大ブラックホールの合体やコンパクト連星からの重力波信号を捕えることを目的としている。そのため、B-DECIGO とは異なった、光トランスポンダと呼ばれるレーザー測距方式を用いる構成になっている。国内からは 10 名程度の少人数のグループが LISA に参加し、光検出器などをコンポーネントを担当する見込みである。LISA への参加によって、国際貢献と科学的成果の創出を進めるとともに、宇宙重力波望遠鏡に対する知見を深めることも期待できる。

5.2 工程表

5.2.1 B-DECIGO 実現への工程

B-DECIGO は、2030 年前後に実現することを目指す（図 10）。2015 年度には、これまで進められてきた小型重力波観測ミッション DPF の検討ワーキンググループを解消した。現在、B-DECIGO の実現を目指した新ワーキンググループの立ち上げ準備を進めている。その過程で、サイエンス目標の検討、それに基づくミッション・システム要求の設定と搭載機器の仕様の決定を行う。その後、2023 年頃までに、レーザー光源、干渉計モジュール、ドラッグフリー制御システムといった主要搭載機器の環境試験モデルの開発を進めることで、ミッション提案までに必要な準備を整える。また、宇宙空間におけるレーザー干渉計技術やフォーメーションフライト技術の実証計画の検討も進めている。

5.2.2 鍵となる技術と準備状況、体制

B-DECIGO 実現のための技術的課題については、2005 年に DECIGO Pathfinder（DPF）ミッションとして提案し、その 2 年後にワーキンググループを立ち上げて以来、宇宙科学研究本部・宇宙理学委員会からの搭載機器基礎開発実験経費・戦略的開発研究費等の援助を受け、熱・構造設計や信号処理系などのミッション全体の成立性検討と、根幹となる搭載機器の開発を進めてきた。

主要搭載機器であるレーザー干渉計、試験マス、安定化レーザー光源について、ブレッドボードモデル（BBM）での地上実証試験が行われてきた。また、実験室内での自由落下実験設備の整備も行い、試験マスモジュールの制御試験が行われている。ミッション部搭載スラスタでは、宇宙実績があるものを組み合わせて使用するシステム検討を進め、要求値を満たす構成は実現できる見通しが得られている。また、従来のミッションとは異なった要請である推力雑音の評価試験も進めている。ドラッグフリー制御は、単純モデルでの解析検討から成立性を確認した後、現在では数値シミュレーション評価を実施している状態である。それらに加えて、2009 年に JAXA 小型実証衛星 SDS-1 に搭載されて打ち上げられた小型モジュール SWIM_{μν} では、DPF と同等の構成（SpaceCube2 と SpaceWire 通信規格）での信号処理系の宇宙実証と、無重力下での試験マス非接触制御の実証が行われている。SWIM_{μν} では、地球 2 周回以上の連続観測運用も行われた。そのデータを用いた重力波探査解析も行われており、独自の科学的成果の創出にもつながっている。

B-DECIGO では、ミッション全体の取りまとめは、東京大学・理学系研究科と宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部で行う。搭載機器（レーザー光源、試験マスモジュール、低推力雑音スラスタ、バスシステム）は、国立天文台、法政大学、電気通信大学、東京大学・工学系研究科、宇宙科学研究本部、東京大学・理学系

研究科などの各グループがサブグループを構成し、開発を進める。観測運用の概要検討と、取得された重力波観測データの解析は、京都大学をはじめ、国内外のデータ解析・理論研究グループが協力して進める。

6 スペース重力波望遠鏡 LISA への日本の参加

ミッション代表者：和泉究（JAXA 宇宙科学研究所）

6.1 学術的背景

重力波天文学は、従来の電磁波観測では直接観測が困難な暗く相対論的な天文・宇宙論現象に対して、重力波を観測手段として研究を行う全く新しい天文分野である。米国の地上重力波検出器プロジェクト LIGO が 2015 年に達成した史上初の恒星質量ブラックホール連星合体からの重力波検出を皮切りに、これまでに中性子星連星合体 1 例を含む 40 以上のコンパクト連星合体からの重力波観測例がすでに報告されている。これらの観測により、ブラックホールの質量分布やその質量獲得史、また中性子星連星合体のマルチメッセンジャー観測から重元素合成の過程といった事柄が明らかになりつつある。このように重力波天文学は現在、天文・宇宙物理学において革新的な分野として世界的に展開されつつある。

このような背景の中、スペース重力波望遠鏡 LISA（Laser Interferometer Space Antenna）は、ESA の掲げる cosmic vision program 大型計画シリーズの三番目、L3 ミッションとして 2017 年に採用された。LISA は 0.1-100mHz 帯の低周波数の重力波に対して $10^{-20}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度の高感度を持つ天文学ミッションであり、地上では地面振動由来の雑音に阻まれてしまう周波数領域を探索する。これにより、例えば地上検出器の周波数帯（10Hz-数 kHz）では観測の難しい総質量 $10^6 M_{\odot}$ 程度の超大質量ブラックホール連星合体を、LISA では赤方偏移 $z = 20$ まで SN 比 50 で観測することが可能となる。その科学目的は、次に示す 2 つの天文・宇宙物理学的な問いに答えることである：(1) いつ・どこで・どのようにして超大質量ブラックホールが形成されたのか？(2) ブラックホールの事象の地平面付近および宇宙論スケールで重力はどのような性質を持つのか？これらの問いに対して、LISA は超大質量ブラックホール連星合体のほか、極端質量比連星（EMRI）といったこれまで観測例のない波源からの重力波を直接観測することで、その答えにアプローチする。

LISA は 2034 年に打ち上げが予定されており、3 機の宇宙機をそれぞれ 1 辺が 250 万 km の正三角形の頂点にくるよう軌道配置するミッションである。LISA ミッションでは、宇宙機間でレーザー光を常時交換しながら、到来した重力波によって引き起こされるレーザー光の微小な位相変化を精密計測する。その測定精度は変位換算で $10^{-11} - 10^{-12}$ m レベルが要求される。

6.2 戦略

6.2.1 戦略，国内での立ち位置

現在、国内の研究者グループでは、LISA へ参加するプロジェクトを JAXA の設ける戦略的海外協力ミッションとして、2021 年程度を目処に提案するという戦略シナリオを検討しており、これにより LISA の科学成果の最大化に国際貢献することを目指している。本シナリオの予算規模としては数 10 億円を想定している。このほか、LISA への参加は国内研究者の技術習得・知識獲得を効率的に行う手段としての戦略的な役割も担っており、これにより国内のスペース重力波観測研究の継続的な発展を支えつつ、将来わが国が必要となる国際協調の下地の強化を狙っている。

国内の限られた資源のなかで本戦略を達成するには、我が国主導で検討が進められている宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO と LISA との立ち位置の整理が重要である。B-DECIGO は LISA と観測周波数帯および科学目的が異なるため、科学成果が相補的である。また、LISA への参加と比較して、B-DECIGO は比較的大規模

な JAXA 戦略的中型ミッションとしての自立した遂行が想定される。したがって、両活動は国内での住み分けが可能であると考えられる。一方で、機器開発技術やデータ解析手法といった互いのプロジェクトで共通な研究項目においては相乗効果が期待できる。

6.2.2 LISA 参加へ向けた検討活動の展開

LISA への貢献検討を推進するため、国内では JAXA 宇宙科学研究所の和泉を代表とした機器開発貢献を検討するグループ（11 名）、および九州大学の佐合を代表としたサイエンスの検討をするグループ（8 名）が 2018 年に発足した。両グループとも、開発母体である LISA コンソーシアムのメンバとして貢献活動を行っている。機器開発検討グループでは、LISA のレーザー干渉計動作で重要となる (1)InGaAs 素子を用いた大口径・低雑音・広帯域のフォトレシーバ開発、(2) レーザー光の空間ジッタ雑音を抑圧する精密可動光学アパーチャの開発、および (3) 低振動でかつ柔軟な信号線ハーネスの開発が検討されている。サイエンス検討グループでは、LISA の主要波源の 1 つである EMRI から発生する重力波波形のモデル化に向けた理論研究を主軸に、検討が進められている。これら両グループの活動から得られる知見や成果は、LISA への貢献のみに閉じず、国内でのスペース重力波観測研究という脈絡のもと持続的に発展することが期待されており、国内当該分野の発展に対して重要な意味を持つと考えられる。

6.3 工程、開発体制

機器開発の貢献を検討するグループは 2019 年に、宇宙理学委員会 Working Group「LISA」を発足した。本 WG 活動の目的は、日本が提案する貢献項目が技術・コストなどいった面から実際に遂行可能であるかを検討することにある。本検討活動で得られた知見を集約した上で、我々は 2021 年程度に JAXA 戦略的海外協力ミッションに LISA への参加を提案する予定である。JAXA プロジェクトとしての活動が承認された場合、2034 年の打ち上げに向けた当該フライト・コンポーネントの設計・制作・統合試験を 10 年程度のタイムスケールで遂行していく見通しである。

現在、国内の研究開発体制の拡大と整備が積極的に進められている。機器開発グループでは、メンバの所属機関のほか、国立天文台先端技術センター、国内半導体メーカーといった新たなプレイヤーの参入が検討されている。同様に、サイエンス検討グループでは、UC ダブリン、マックス・プランク研究所、サウサンプトン大学との国際協力のもと、EMRI 波形のモデリングに向けた理論研究を加速させる構想が提案されている。

7 MeV ガンマ線掃天探査気球実験 SMILE-3

ミッション代表者：高田淳史 (京都大学)

7.1 学術的背景

数百 keV から百 MeV にかけての MeV ガンマ線帯域は、放射性同位体や励起原子核からの核ガンマ線を観測できる唯一の帯域であり、宇宙線加速源の探査や、超新星爆発や中性子合体などの元素合成の現場を直接的に探るためのプローブとして、以前から期待されてきた。低エネルギーの宇宙線と分子雲との相互作用から励起された C や O の原子核からは、脱励起線が観測されると期待され、軽い暗黒物質の対消滅や原始ブラックホールの蒸発に伴うガンマ線放射も、この帯域で観測されとの予測がある。また、Ia 型超新星爆発では、生成される 0.6 太陽質量もの ^{56}Ni から放射される核ガンマ線の増光の様子から爆発機構が解明できるという予測や、 $\sim 10^6$ 年という比較的長い寿命をもつ ^{26}Al は、銀河系内の物質拡散のプローブになるという期待がある。1990 年代の COMPTEL 及び 2000 年代から観測を続ける INTEGRAL によって行われてきた観測では、SN1987A や SN2014J からの $^{56}\text{Ni}/^{56}\text{Co}$ 、Cas A の ^{44}Ti 、銀河面に広がった ^{26}Al や ^{60}Fe 、銀河中心領域付近で大きな空間的広がりを持つ電子・陽電子対消滅線が検出されている一方、COMPTEL は 10 年間で約 30 天体、INTEGRAL は 0.6 MeV 以上ではわずかに 4 天体の検出のみ、C や O の脱励起線も銀河面やオリオン領域で観測されず、と MeV ガンマ線帯域の観測は他波長に比べて大きく遅れている状況が長く続いており、Ia 型超新星の爆発機構の特定や ^{26}Al ・陽電子の起源・拡散を系統的に議論できるデータは無く、高 SN 比で定量性のある観測が強く求められている状況にある。

MeV ガンマ線の観測が進んでいない状況は、その観測の困難さに理由がある。この帯域での主な物質との相互作用はコンプトン散乱であるため、天体からのガンマ線は検出器周りの不感物質中でエネルギーや到来方向の情報を失いやすく、かつ検出器中で捕らえることも難しい。また、宇宙線と観測器筐体との相互作用では、励起原子核や放射性同位体が生成されるため、多量の雑音ガンマ線が観測器自身や地球大気から放射され、SN 比を悪化させる。さらに、MeV ガンマ線は波長が原子核の大きさ程度と非常に短く、透過力も高いため、可視光や X 線のようなレンズや鏡を用いた集光系は使用できない上、従来の天体観測で用いられてきた符号化マスク法 (INTEGRAL) や従来型コンプトン法 (COMPTEL) は、測定パラメータ数の不足から事象毎の到来方向測定は不可能であるため、雑音ガンマ線と天体由来のガンマ線を切り分けられず、SN 比が悪いまま、検出器応答を用いた統計的推論法によりガンマ線到来方向を求めており、結果、悪い空間分解能で低い SN 比の観測しか実施できていない。

MeV ガンマ線天文学を大きく前進させるには、検出事象毎にガンマ線到来方向を一意に決定することで、観測対象領域外から混入する雑音ガンマ線事象を大きく削減することが不可欠である。このためには、観測の困難さから従来型コンプトン法では取得していないコンプトン反跳電子の運動方向を正確に測定する必要がある。MeV 帯域のガンマ線によるコンプトン反跳電子のエネルギーは、数 keV から数 MeV と比較的低エネルギーの電子であり、飛程は短く、クーロン多重散乱の影響も大きい。従って我々はガス飛跡検出器をコンプトン散乱標的として用いる、電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡 (electron-tracking Compton camera: ETCC) を開発してきた。ETCC は図 11 左に示す様に、ガス飛跡検出器とそれを取り囲む位置感度型シンチレーション検出器から構成され、コンプトン散乱されたガンマ線のエネルギーと吸収点の位置をシンチレーション検出器で、反跳電子の飛跡とエネルギーをガス飛跡検出器で測定し、散乱後のガンマ線と電子の運動量の両方を得る事で、その和から入射ガンマ線の運動量が導出され、光子毎に到来方向を一意に決定できる検出器となって

いる。また、飛跡検出器中の荷電粒子のエネルギー損失率による粒子識別、及び散乱方向と反跳方向のなす角を用いたコンプトン散乱運動学テストにより、強くコンプトン散乱事象であることを要求できるため、中性子などのガンマ線以外の粒子や多重コンプトン散乱の様な不完全なエネルギー損失を排除することが可能となる。

この ETCC の天体観測能力を実証するため、2006 年 (SMILE-I) 及び 2018 年 (SMILE-2+) に気球実験を実施し、SMILE-I では雑音除去能力の検証を、SMILE-2+ では天体観測の検証を行った。SMILE-I の ETCC は有効面積 1 mm^2 という小さな検出器であったが、ETCC 特有の強力な雑音除去能力により、宇宙拡散・大気ガンマ線の観測から各々の強度を得る事に成功した。SMILE-2+ では数 cm^2 の有効面積により、COMPTEL は不可能であった設計感度での天体観測を目標に、明るい銀河中心領域とかに星雲の観測を行った。図 12 左の SMILE-2+ で取得されたガンマ線事象率の時間変化からは、銀河中心の仰角時間変化に対応してガンマ線事象率が変化する様子が見て取れ、ETCC が実現する極低雑音観測により、銀河中心領域からの放射を有意に検出できている事がわかる。図 12 右の有意度マップでは、銀河中心領域だけでなく、かに星雲に対応する位置に高い有意度が確認でき、コンプトン散乱を利用した望遠鏡としては世界で初めて設計感度を宇宙環境下で実現した事を示している。これら SMILE-I 及び SMILE-2+ の結果から、MeV ガンマ線帯域において最も高感度な観測を実現する検出器が ETCC であることが実証された。

7.2 戦略

SMILE-3 では、有効面積 10 cm^2 ・空間分解能 5° の ETCC を長時間気球に搭載しての掃天観測から始め、大型化・高空間分解能化を都度進めつつ、複数回の長期気球実験を実施することで、COMPTEL の数倍の検出感度という史上最高感度で全天観測を行い、以下に挙げる新しい宇宙物理を推進する。

元素合成の謎・銀河面に広がるラインガンマ線 銀河面に広がる ^{26}Al 、銀河中心・銀河面からの電子・陽電子対消滅線や、 ^{60}Fe は COMPTEL や INTEGRAL でも報告されているが、画像が不鮮明なためガンマ線の生成天体は未解明である。銀河中心領域からの電子・陽電子対消滅線は SMILE-2+ でも既に検出されており、 ^{26}Al ・ ^{60}Fe 、C や O の脱励起線が存在する $4\sim 6 \text{ MeV}$ においても兆候が見られる。SMILE-3 の南天観測では、10 日間程度の観測で INTEGRAL を上回る精密さで電子陽電子対消滅線・

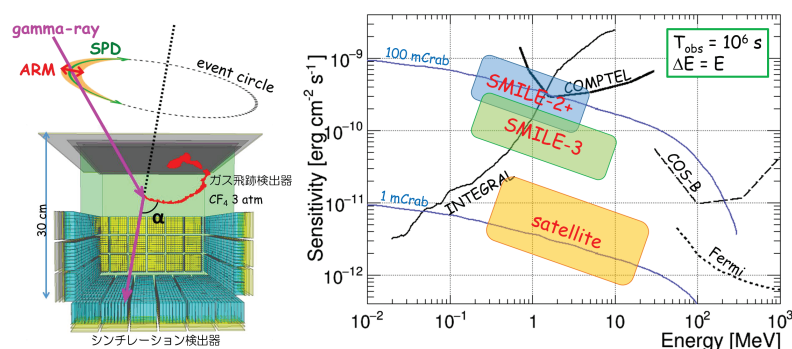


図 11 電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡の概念図 (左) と予想検出感度 (右)

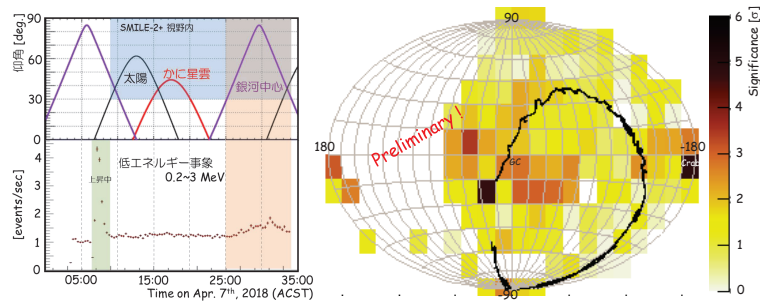


図 12 (左)SMILE-2+ で観測されたガンマ線事象率と主な天体の仰角時間変化。(右)SMILE-2+ の観測による有意度マップ。

^{26}Al の銀河面分布が得られると期待でき、超新星残骸やブラックホールなどと分子雲との空間相関から、その起源や銀河内の元素循環を解明する。また、銀河面における C や O の脱励起線の存在を明らかにし、その強度と分子雲マップから sub-GeV の低エネルギー宇宙線量を見積もり、宇宙線加速天体を特定する。

銀河系内拡散 MeV ガンマ線の空間分布・軽い暗黒物質への制限 SMILE-2+ で最も有意に検出した銀河系内拡散ガンマ線は、現在の理論予測では、高エネルギー電子の制動放射が卓越すると考えられ、10 MeV 以下ではそのフラックスは減少すると考えられている。しかし SMILE-2+ の観測結果は、この理論予測を大きく上回る強度を示唆しており、軽い MeV 暗黒物質対消滅や原始ブラックホール蒸発の寄与の可能性もある。SMILE-3 の観測により、銀河内空間分布と場所毎の詳細なスペクトルを測定することで、銀河系内拡散ガンマ線の起源を特定し、軽い MeV 暗黒物質や原始ブラックホールの存在に制限を与える。

宇宙背景 MeV ガンマ線輻射観測による遠方銀河の進化の検証 MeV ガンマ線背景輻射の起源は、長らく遠方の Ia 型超新星だと考えられてきたが、その強度を説明するには 1 桁も発生頻度が不足することが近年の観測から示唆されており、現在の有力候補は活動銀河核である。この活動銀河核の種族や年代が MeV ガンマ線背景輻射の非一様性から特定できると予想され、その高精度観測から遠方の活動銀河核の進化について検証が期待される。SMILE-3 の観測が実現する極低雑音観測により雑音を宇宙背景輻射以下に抑制できるため、広域での背景放射の揺らぎの波数分布計測を可能にし、活動銀河核の進化モデルに決定的なデータを供給する。また、遠方銀河での軽い MeV 暗黒物質対消滅や原始ブラックホール蒸発が存在すれば、宇宙背景 MeV ガンマ線にもその寄与が現れるはずであり、銀河系内拡散ガンマ線と併せて議論することで、軽い MeV 暗黒物質や原始ブラックホールの存在に強い制限を与える事ができる。

Ia 型超新星爆発の爆発機構 Ia 型超新星爆発は、その爆発機構が熱核爆発によっており宇宙における標準光源となってきた。しかしその爆発に至る過程は、白色矮星に伴星からの物質が降着し核爆発に至る過程だけではなく、2 つの白色矮星が衝突して生ずる過程である可能性も示唆されている。この爆発機構の違いは、0.1-4.0 MeV での光度曲線に顕著に現れることが予想され、MeV ガンマ線観測で決着がつくと期待されている。SMILE-3 の飛翔が超新星爆発の発生と時期が合えば、15 Mpc 以内の Ia 型超新星

爆発を 5 日間で 3σ 以上の精度で検出でき、50 日程度の長時間観測では高精度の光度曲線が得られる。15 Mpc 以内の Ia 型超新星爆発の頻度は毎年 1 個程度あり、事前に準備しておけば衛星の実現を待たずにこの問題に対して大きな寄与が期待できる。

ガンマ線バーストの観測・宇宙最初の星の探索 ガンマ線バーストの MeV 帯域における放射はシンクロトン放射と考えられているが、その放射領域の詳細な検証には偏光観測からの磁場情報抽出が重要とされている。実際、GAP 検出器の観測でバースト中の偏光角変化が報告されており、追観測が待たれている。一方、宇宙最初の星 (POP-III) は太陽の数十倍以上の超巨星と考えられ、重力崩壊型超新星爆発を迎えると考えられている。この初代星の超新星爆発は、その大きさ・距離から 10^4 秒以上の長時間、弱いフラックスで連続して輝く GRB になることが予想されている。このような新しいタイプの 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。SMILE-3 で 6 日間以上の飛行が実現されれば、5~10 個程度のガンマ線バーストの検出が期待できる。また、 10^{-5} erg/cm² の明るいガンマ線バーストが発生すれば (期待値 1 個程度)、詳細なガンマ線スペクトル観測と偏光の検出が可能となる。加えて、符号化マスク法では難しい 10^4 秒を超える長時間ガンマ線バーストの観測から、その発生頻度の上限值が得られる。

高エネルギー放射天体スペクトル観測・新天体探査 現在、超新星残骸・パルサー風星雲・X 線連星・活動銀河核などの高エネルギー粒子加速天体は、X 線から TeV 領域の多波長放射スペクトル解析により、粒子加速や放射過程が議論されているが、MeV ガンマ線帯域のデータは欠落または品質が十分でない。SMILE-3 が実現する高感度観測は、COMPTEL より数倍良い観測感度が期待され、COMPTEL や INTEGRAL で観測されたガンマ線天体について、より高精度なスペクトル観測ができる。また、COMPTEL の未同定天体の確認も挑戦可能であり、史上最高感度により新天体探査も期待できる。

ここに挙げた以外にも、中性子星合体に伴うショートガンマ線バースト・超新星爆発・太陽フレアなども SMILE-3 の観測対象であり、重力波やニュートリノ・中性子観測器との連携によるマルチメッセンジャー観測や多波長観測も実現する。

現在、気球実験は ISAS/JAXA の提供する豪州 1 日気球の他、南半球では NASA の提供する圧力気球による中緯度 1 ヶ月飛翔及び南極周回 1 ヶ月飛翔、北半球では NASA による米国内半日気球、スウェーデン宇宙公社による北極圏 1 週間飛翔など、多数の長時間気球が存在しているため、単発の気球実験でも大きな科学成果が期待できる上、各地の気球実験を合わせれば ETCC の大きな視野による全天観測も可能となる。このような観測からは、百個を超える天体の検出が期待できるため、各国の研究者と気球実験の実施やデータ解析において協力していき、現在は世界的に観測の進展が無いことから縮小している MeV ガンマ線天文学を日本が中心となって大きく拓く。SMILE-3 計画の進行は、ISAS の MeV ガンマ線観測検討リサーチグループにも含まれており、将来の MeV ガンマ線観測衛星プロジェクトに向けた大きな柱になっている。また、NASA の decadal survey のミッション選定に向けた Astro2020 white paper も提出しており (arXiv:1907.06658)、海外の研究者との連携も始めている。

7.3 工程表

2020-2022 年度

気球搭載型有効面積 10 cm²・空間分解能 5° の ETCC を開発する。ガス飛跡検出器には、30×30×30 cm³ の CF₄ 3 気圧を使用、シンチレータは GSO シンチレータを MPPC 光読み出しで ETCC を構成する。不感時間削減のため、データ収集システムはコモンストップモードで構築し、観測中の不感時間を数 % に抑える。

SMILE-I 及び SMILE-2+ では、ETCC 全体を与圧容器内に封入してきたが、不感物質削減のため、ETCC そのものを大気に曝露する設計を進める。また、並行して米国との協力体制の構築を進め、NASA の提供する気球実験へ向けた準備を開始する。

2023-2025 年

改良された ETCC を ISAS/JAXA の提供する豪州 1 日気球に搭載し、SMILE-2+ の数倍の感度で南半球の掃天観測を実施、電子・陽電子対消滅線の広がりや ^{26}Al の検出、電波銀河 Cen A、マイクロウェーサー GRS1915+105、銀河系内拡散ガンマ線の詳細スペクトルの取得を行う。また、豪州気球用とは別途に ETCC を構築し、NASA の提供する米国半日気球を用いて Cyg X-1 偏光観測を行う。米国気球実験は圧力气球による長期飛翔に向けた試験を兼ねる。

2025-2029 年

豪州・米国で飛翔した 2 台の ETCC を NASA の圧力气球に搭載し、ニュージーランドからの 1 ヶ月超の長期気球実験を行う。1 ヶ月超の飛翔時間が確保できれば、観測時間を $O(10^6)$ 秒確保できるため、到達感度で COMPTEL を超える、MeV ガンマ線帯域では史上最高感度の観測となる。この長期気球実験では、銀河系内の核ガンマ線分布やガンマ線バーストの偏光観測、新天体探査を行う。他方で、3 台目の ETCC の開発を進め、北半球天体の長期観測や相対論的電子降下現象の観測を目標に、スウェーデンからの 1 週間気球の実施を目指す。また、気球実験で用いてきた ETCC をベースに $50 \times 50 \times 50 \text{ cm}^3$ の ETCC を衛星搭載用に開発を開始し、衛星化に向けた体制作りを行い、1 mCrab の検出感度で MeV ガンマ線帯域の全天探査観測を行う衛星を 2030 年代の打上げを目指しミッション化する。

8 気球搭載型エマルジョン望遠鏡による宇宙ガンマ線の観測 GRAINE 計画

ミッション代表者：青木茂樹 (神戸大学)

8.1 学術的背景と戦略

GeV/sub-GeV 帯域の宇宙ガンマ線観測は、2008 年に打ち上げられた Fermi 衛星 LAT 検出器の観測によって 5000 個以上のガンマ線天体を検出するなどの成果が得られている。その一方で、角度分解能が必ずしも十分ではないことや背景の拡散ガンマ線の影響から、観測量が年々増加して天体の数が増えても、それらが密集する銀河面近傍を中心に全体の約 3 割が他波長で確認されている天体と対応づけられないという状況が続いている。また、銀河中心方向の GeV 帯域のガンマ線観測に関して、既知の天体の寄与および銀河面放射モデルに基づく成分を差し引いた結果、理解の及ばない広がったガンマ線の超過が確認された。それを機に、ダークマターをはじめとした様々なモデルが提唱され、銀河中心からのガンマ線放射の理解は混沌とした状況になっている。広がり的大小と同程度の角度分解能の Fermi-LAT で統計を蓄積しても状況の改善は見込めず、決め手となり得ない。加えて、ガンマ線の発生メカニズムについて多大な情報をもたらす偏光に関しては、この帯域で有意な観測の報告はなされていない。

このような状況を打開するため、空間分解能に優れた原子核乾板 (エマルジョンフィルム) を用いたガンマ線望遠鏡を開発し、科学観測用大気球に搭載して高解像度かつ偏光に感度を有する観測の実現を目指す。本計画によるフルスケール観測が確立すれば、銀河中心方向の GeV ガンマ線超過の実態に迫るガンマ線発生源密集域の高解像度分析、宇宙線陽子加速が示唆される超新星残骸のイメージングとスペクトル分析、未検出であるパルサーからの GeV ガンマ線偏光の観測、大有効面積を活かした極低輝度のトランジエント現象の探索などユニークな科学成果が期待出来る。

図 13 にエマルジョン望遠鏡本体の概念図を示す。低物質量のエマルジョンフィルム (1 枚あたり約 $0.005X_0$) を 100 枚程度積層し、ガンマ線のコンバーター部とする。対生成直後の電子・陽電子の角度および運動量を多重電磁散乱により測定し、親ガンマ線の到来方向とエネルギーを再構成する。エマルジョンフィルムは製造してから現像までの期間に通過するすべての荷電粒子の飛跡を捉えるため、本来的には時間情報を持たないが、コンバーターの下流に複数のフィルムをアナログ時計の針のようにそれぞれ独立な周期で動かす多段シフターによるタイムスタンプを配置する。解析の際のフィルムのアライメント情報から通過時の位置関係を再現することで、すべての通過飛跡に対してサブ秒の時刻情報を付与する。

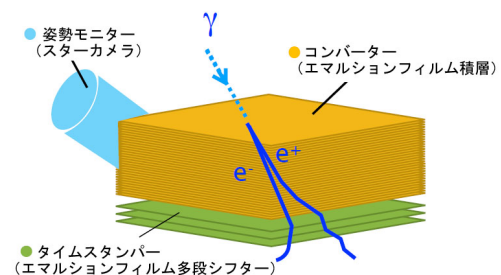


図 13 エマルジョン望遠鏡の概念図

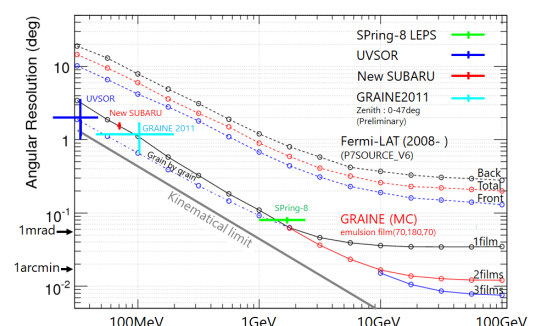


図 14 ガンマ線に対する角度分解能シミュレーション (実線) と実験データ (十字)

観測器の天球に対する姿勢は、気球高度で昼間でも星を捉えられるスターカメラでモニターする。これら各コンポーネントの情報を組み合わせることで、個々のガンマ線について天球上の到来方向を再構成する。

フィルムに対して垂直に入射したガンマ線について、対生成点すぐ下流側のフィルムで角度測定を行うというシミュレーションを行い、角度分解能のエネルギー依存性を調べた結果を図 14 に Fermi-LAT 検出器のグラフに重ねて示す。フィルム 1 枚の極めて薄い物質で電子陽電子の角度が測定できるという特徴から、すべてのエネルギー領域にわたって、Fermi-LAT 検出器に較べて投影角で約 1 桁（立体角で約 2 桁）の改善が望める事がわかる。

さらに、親ガンマ線の入射軸に対して対生成した電子陽電子が作る方位角のモジュレーションを測ることで、偏光に関する情報が得られる。図 15 は、直線偏光している SPring-8 の逆コンプトンビームで方位角分布を測定した結果であるが、ビームの偏光から期待される値とコンシステントな結果が得られている。

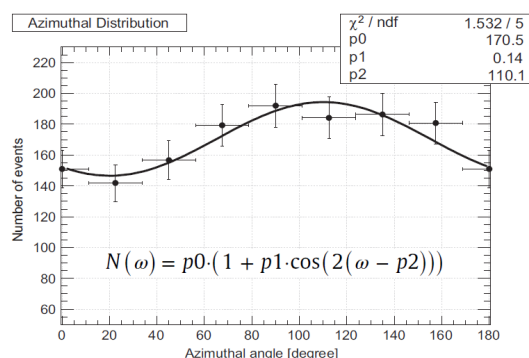


図 15 直線偏光ガンマ線により生成した電子対の方位角分布

8.2 工程表

GRAINE 計画のロードマップを以下に示す。

- ・ 2004 年～2012 年：原理実証フェーズ

地上の加速器ビームなどにより角度分解能やエネルギー分解能を検証し、小面積（約 0.01m²）望遠鏡による気球実験を国内（北海道大樹町）にて行い、エマルション望遠鏡の各要素が気球高度環境で機能し、それぞれが初期の性能を発揮することを確認した。

- ・ 2013 年～2019 年：性能実証フェーズ

中面積（約 0.4m²）望遠鏡による豪州での気球実験により、GeV/sub-GeV 帯域において全天で最も明るい Vela パルサーからのガンマ線のイメージングを行い、海外での気球観測・回収・現像の流れを確立するとともにガンマ線望遠鏡としての総合性能実証を行った。（図 16）

- ・ 2021 年～：科学観測フェーズ

大面積（2.5～10m²）望遠鏡による気球実験により科学観測を実施する。観測機会をより確実に得るため、2.5～5m² の開口面積によるコミッショニング段階から開始し実績を積んだ上で、データの蓄積速度を高めるためのフルスケール（5～10m²）望遠鏡による観測実現のためさらに大型の気球による観測機会の獲得を目指す。望遠鏡の開口面積やフライト時間の拡大をはかりつつ観測を繰り返すことによりデータを蓄積し、積分観測量の増大とともに銀河中心方向の GeV ガンマ線超過、Vela パルサーの偏光観測、超新星残骸 W44 のガンマ線発生域の形状、ガンマ線バーストなどの突発現象などの観測が期待される。

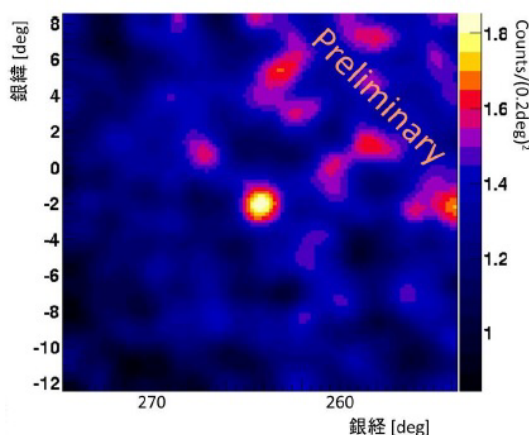


図 16 Vela パルサー周辺でのガンマ線到来方向分布（ $E_\gamma > 80\text{MeV}$ 、スムージングあり、露出補正やバックグラウンドの差し引きなし）

9 High-z Gamma-ray bursts Unraveling the Dark Ages and Extreme Space Time Mission - HiZ-GUNDAM

ミッション代表者：米徳大輔（金沢大学）

9.1 学術的背景と戦略

21 世紀になり、電波から TeV ガンマ線に至る電磁波の多波長連携観測に加えて、重力波、ニュートリノ、宇宙線のような非光子観測が宇宙物理学を担う重要な要素と認識され、総合的に天体現象を理解することが必須の課題となっている。高密度天体において「時間変動」は基本的な性質の 1 つであることから、その活動性を X 線でモニターし、様々な波長帯および非光子での観測を主導・補助することは、Time Domain Astronomy の発展に大きな貢献をもたらす。突発天体の発見を主軸として、あらゆる波長や手法が有機的に結びつくことは、これまでの天文学を大きく発展させ、さらには新たな天文学分野を開拓できる discovery space の一つと言えるだろう。

とりわけガンマ線バースト (GRB) は、近傍から初期宇宙にわたる宇宙の全域において重要な役割を担う天体現象である。継続時間の長い GRB を明るい光源として利用することで、初期宇宙の星形成歴や宇宙再電離、宇宙で最初の重元素合成の現場を探索することが可能となる。また、継続時間の短い GRB は、連星中性子星の衝突・合体現象と関連しており、重力波天文学と密接に関連している。そのような背景の中、[1] GRB を用いた初期宇宙探索と [2] 重力波天文学の推進を主要課題として掲げる人工衛星計画 HiZ-GUNDAM を提案し、そのミッションコンセプト案が公募型小型衛星の候補の 1 つとして選定されている。

上記の 2 つの主要テーマを実現するためには、広視野の X 線モニターと近赤外線帯での追観測が必須となる。HiZ-GUNDAM は、ロブスターアイ光学系と撮像検出器を組み合わせることで、数 keV のエネルギー帯域において従来の 1 桁～2 桁も高い感度で突発天体を監視する（100 秒の時間積分で $\sim 10^{-10}$ erg cm $^{-2}$ s $^{-1}$ の検出感度）。GRB を検出すると自律制御で姿勢を変更し、同時に搭載する口径 30 cm の近赤外線望遠鏡で 0.5～2.5 μ m の波長帯で測光追観測を実施する。発見した GRB に対して網羅的に追観測を実施することで、赤方偏移の効果を強く受けた GRB を効率良く選定したり、重力波源と同期した突発天体をその発生直後から観測できるようになる。X 線での突発天体を発見した時刻や発生方向、そして近赤外線望遠鏡で測光観測を行った際の詳細な方向、赤方偏移の大きさ、および明るさ（等級）をリアルタイム・アラート情報として地上観測者に提供する。高赤方偏移 GRB や重力波源の電磁波対応天体の候補を発見した場合は、地上・スペースの大型望遠鏡と協力して精密な分光観測を行うことで、物理情報を獲得することが観測戦略である。本計画は、CRC コミュニティで推進している大型低温重力波望遠鏡 KAGRA、ニュートリノ観測実験、チェレンコフ望遠鏡アレイ (CTA) 計画などと連携し、多波長・マルチメッセンジャー天文学の発展に大きく貢献できる計画である。これらの計画と連携することで科学成果を最大化するよう努める。

9.2 多波長・他分野との連携

広視野 X 線観測が他波長に比べて優れている点は、1 ステラジアン以上もの広視野を一度にモニターして突発天体を発見できることである。GRB などの突発天体が発生した、まさにその瞬間を捉えることが可能で、重力波やニュートリノ観測との時刻同期が取りやすく、詳細な発生方向を迅速に通報できるようになる。HiZ-GUNDAM による突発天体の監視・探索は、多波長・マルチメッセンジャー天文学を支える拠点となり、

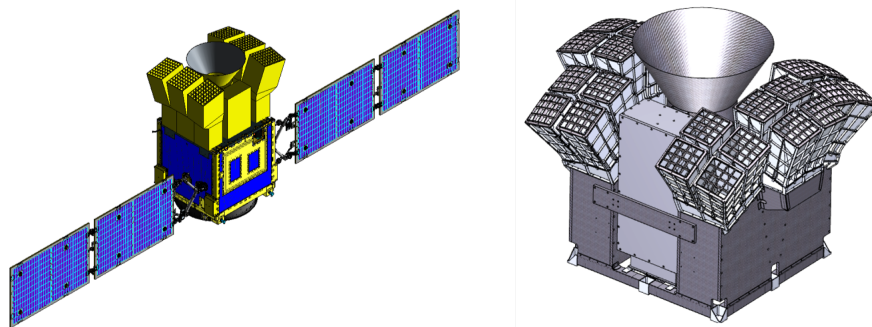


図 17 (左)HiZ-GUNDAM 衛星の外観図、(右) ミッション機器部の詳細図

先述の主要課題のほかにも、様々な突発天体現象を観測できる計画である。

■重力波観測との連携

これまでの GW 170817/GRB 170817A では、短時間 GRB に類似した突発現象が検出され、その後、数日にわたって輝くキロノヴァ現象が観測された。2020 年代の中頃には、主要な重力波天文台である我が国の KAGRA, 米国の LIGO, 欧州の VIRGO がデザイン感度に達し、本格的な重力波観測が行われるようになる。連星中性子星の衝突・合体からの重力波の観測範囲が 200Mpc に達することから、より高感度の広視野 X 線モニターが必要となる。重力波源からの X 線突発天体を検出することで発生方向を高い精度で同定し、多波長での追観測を主導することが可能となる。重力波の観測パラメータと合わせて、一般相対論の検証や中性子星内部の高密度物質の状態方程式（ハドロン物理）を制限することができ、重力波観測の本来の目的を超えた成果も期待できる。

■ニュートリノ観測との連携

IceCube 170922A と同期したブレーザ天体 TXS 0506+056 からのフレア現象が観測され、ニュートリノ天文学が新たな局面を迎えている。HiZ-GUNDAM は GRB のほかにも様々な突発天体現象に対して、従来よりも 1～2 桁程度も高感度なモニター観測を実施できるため、ニュートリノ天文学へも大きく貢献できる計画である。

■TeV ガンマ線観測との連携

MAGIC 望遠鏡により、GRB 190114C から放射された多量の TeV ガンマ線が検出され、超高エネルギーガンマ線天文学も突発天体観測に大きく寄与する時代となってきた。HiZ-GUNDAM のリアルタイムアラート機能により、GRB をはじめとした様々な高エネルギー突発天体の発生情報を提供し、CTA をはじめとする超高エネルギーガンマ線観測施設に観測機会を提供できる。

9.3 工程表と体制

2017 年度に HiZ-GUNDAM のミッションコンセプト案を宇宙科学研究所に提案し、公募型小型計画の候補の 1 つとして選定されている。2021 年度からエンジニアリングモデルの開発および検証、2023 年度からフライトモデルの製造を行い、2020 年代半ばから後半にかけての打ち上げを目指している。

HiZ-GUNDAM は国内外から 80 名以上のスタッフレベルの研究者が参加しており、各教員の指導する大学院生・学部生と共同でプロジェクトを遂行する。衛星開発は、高エネルギー宇宙物理連絡会および光赤外線天文連絡会が主体となって実施する計画と位置づけている。計画の遂行において CRC コミュニティへ人員を要請するものではないが、科学面での連携が重要であることから工程表に記載している。