

CRCの宇宙ミッション提案

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

平成 27 年 2 月 2 日

目 次

1	目標：CRC における宇宙ミッションとサイエンスについて	3
1.1	CRC のロードマップと宇宙ミッション	4
1.1.1	最高エネルギー宇宙線観測分野	4
1.1.2	ガンマ線天文学分野	5
1.1.3	重力波天文学	5
1.2	今後検討してゆくミッション	5
2	ミッション (プロジェクト候補) 1： K-EUSO	6
2.1	戦略	6
2.2	工程表	7
3	ミッション (プロジェクト候補) 2： Pre-DECIGO	9
3.1	戦略	9
3.1.1	目的と概要	9
3.1.2	背景と将来計画	9
3.1.3	研究領域内での位置づけ	10
3.2	工程表	11
3.2.1	Pre-DECIGO 実現への工程	11
3.2.2	鍵となる技術と準備状況、体制	11
4	ミッション (プロジェクト候補) 3： 気球による広視野高感度 MeV ガンマ線天体広域探査観測 (SMILE 実験)	12
4.1	戦略	12
4.1.1	学問の背景と計画の概略	12
4.1.2	期待される成果	13
4.2	工程表	13
5	ミッション (プロジェクト候補) 4： HiZ-GUNDAM	15
5.1	学術的背景と戦略	15
5.1.1	多波長・他分野連携の考え方	16
5.2	工程表と体制	17

6	ミッション (プロジェクト候補) 5：宇宙線反粒子探索計画 GAPS	18
6.1	戦略	18
6.1.1	学術的背景	18
6.1.2	GAPS の概要，意義，特色	18
6.2	工程表	20
6.2.1	GAPS の実験手法，他実験との相補性	20
6.2.2	準備状況，工程	20

1 目標：CRC における宇宙ミッションとサイエンスについて

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 384 名 (2014 年 6 月 27 日) の研究者が所属し、主に日本物理学会の宇宙線・宇宙物理領域として活動し、大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の交流と推進をはかり、将来計画についても議論している。

宇宙線は地球外から到来する素粒子、放射線であり、本分野の研究はこれらに関する観測、実験、理論である。宇宙線の観測は、20 世紀中葉においては人類初めての反物質の発見 (陽電子) や、ストレンジクォークの発見など、素粒子物理学の黎明期に重要な役割を果たした。その後、宇宙線の起源や伝搬メカニズムの解明を目標とした研究、非常に広い帯域にわたる宇宙線のエネルギースペクトルの観測の蓄積、地下実験とニュートリノの検出など、実験手法も対象となるサイエンスも範囲を広げつつ発展してきた。今日では、宇宙線分野の研究は多岐にわたり、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、宇宙を解明する学問分野の一つとして成り立っている。その魅力は、宇宙から到来する粒子や放射を実際に捉えるということにあり、観測実験は言うまでもなく、理論においても観測と密接に関わる研究が数多くなされている。また、人工的には作り得ない高いエネルギーや大質量の星などから到来するもの、あるいは極限的な感度の装置などによって、基礎科学の知見がもたらされるということも、知的な関心と驚きに満ちている。これらの研究が重なって、広範な「宇宙線物理学」を形成している (図 1)。

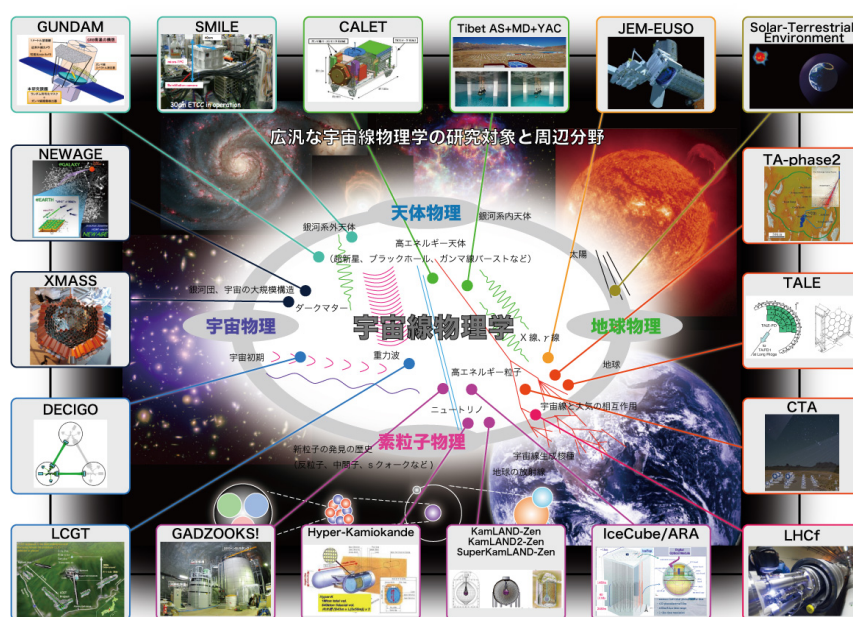


図 1: 「CRC シンポジウム総括：宇宙線分野の現状と将来計画 (2011 年 6 月 30 日)」より引用¹
計画名称などは当時のものであり、現在 (2015 年) までの間に更新されたものも含まれている。図中の点と線は、各計画が主に対応するサイエンスを示している。ただし、多くの計画は複数の単一の目的に限らず、それぞれの研究が重なって、広範な「宇宙線物理学」を形成している。

¹<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/CRC/Symposium/2010-09/future20110630.pdf>

1.1 CRC のロードマップと宇宙ミッション

CRC では内部に将来計画検討小委員会を常設している。この委員会は CRC 会員と会員外の有識者から成り、中・長期的な視点で CRC の将来計画を検討するものである。図 2 は、2013-2014 年期の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。このロードマップと関わる「CRC 将来計画検討小委員会 2011-2012 年度期最終報告²」では、現状の CRC における研究として、1) 最高エネルギー宇宙線観測分野、2) ガンマ線天文学分野、3) 地下非加速器実験分野、4) 重力波天文学、5) 他分野との境界領域、にわけて現状と展望を記述している。ここでは、1)2)4) の分野において宇宙ミッションに関わるものについて述べる。³

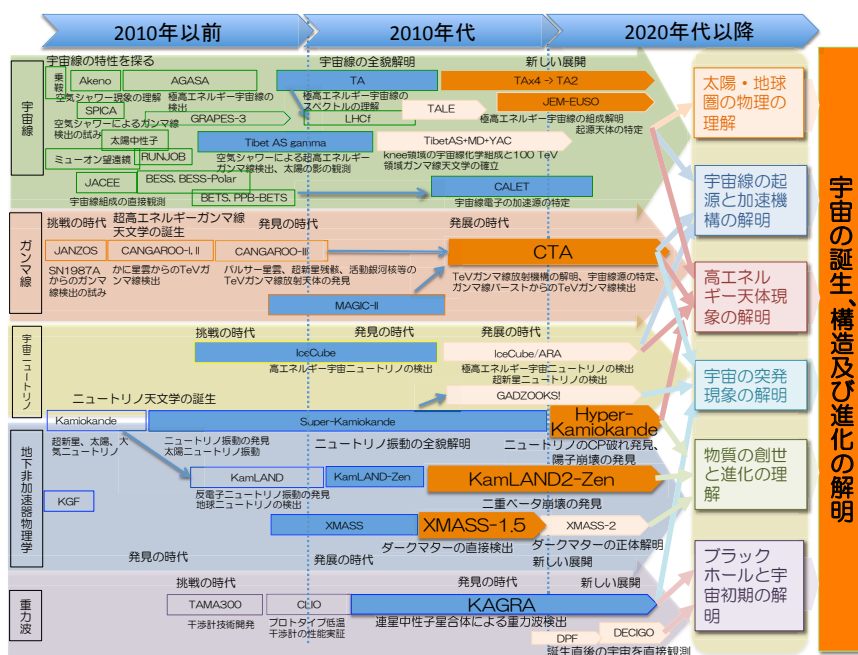


図 2: CRC 将来計画検討小委員会 (2013-2014 年期) による「ロードマップ」

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。

1.1.1 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宇宙線が主な対象である。これらの粒子が天体起源なのか非天体起源を持つのか、天体であればその加速機構と伝搬過程の物理を解明することが研究の目的である。観測的には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 計画がある。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、宇宙ステーションの高高度から広視野で観測し、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、宇宙線源の特定を目指すものである。

²http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/CRC/townmeeting/doc/CRCsubcom_2011-12summary_report_20130909b.pdf

³なおこれまでの宇宙線分野における将来計画検討においては、地上計画を中心に研究分野及びロードマップについて検討されてきた経緯があり、今後の宇宙ミッションについてはかならずしも十分な議論がなされたとはいえない。そのため、本資料は、CRC で宇宙ミッションを視野にいたる将来計画について今後さらなる検討を行うための資料とする。

1.1.2 ガンマ線天文学分野

ガンマ線天文学は、高エネルギーの電磁波であるガンマ線を用いて、極限的な宇宙の姿を明らかにする学問である。ガンマ線源となる天体は、パルサー、超新星残骸、ガンマ線バースト、ブラックホールといった高いエネルギーの天体現象である。また観測による宇宙論的な知見についてもさまざまな期待がある。

ガンマ線の観測は、エネルギー帯域によって観測手法に違いがある。MeV 以下の領域では、先駆的な衛星実験などによってガンマ線天体が観測され、ガンマ線天文学の基礎となった。また陽子宇宙線加速の直接観測など宇宙線の重要なサイエンスもある。またガンマ線バーストもこのエネルギー帯域である。MeV 領域の観測には、大気の影響を避けて衛星や気球などを必要とする。

SMILE 実験は、気球による広視野高感度 MeV ガンマ線天体広域探査観測である。北半球での装置実証実験を経て極域または地球周回観測による一ヶ月以上の長時間観測を数年実施後、銀河面全域を COMPTEL の数倍の感度で探査することを目的としている。

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。

CALET (高エネルギー電子、ガンマ線観測装置) は、すでに JAXA プロジェクトとして、装置開発、打上げ及び運用について JAXA の承認を受けている。宇宙線の加速・伝播機構の直接的解明に重要な意義のある計画として、CRC コミュニティにおけるロードマップに挙げられている。宇宙線電子の観測が主な目的だが、MeV 領域や 10GeV を超える広いエネルギー範囲のガンマ線にも感度がある。

1.1.3 重力波天文学

重力波は、一般相対性理論の予想する時空の歪みの波動であり、これもまた宇宙からの放射であり、なおかつ基礎物理学、天体物理学、宇宙物理学に関わる広義の宇宙線研究として、CRC において推進されている。

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となる。そのため、衛星による重力波検出実験が提案されており、CRC からは Pre-DECIGO が検討されている。Pre-DECIGO では、ブラックホールや中性子星に関連する天体現象の観測を目指し、将来の初期宇宙からの重力波観測に向けたフォアグラウンド観測を行う。

1.2 今後検討してゆくミッション

上述の CRC ロードマップの議論のあとも、新たにいくつかの宇宙線研究が提案されている。これらは CRC における議論、ピア・レビューはまだであるが、近い将来に検討の俎上に載ると期待される。

2015 年 1 月のタウンミーティングでは、宇宙ミッションのひとつである GAPS が紹介された。GAPS は、宇宙線中の反粒子の測定を行う計画である。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。

続く節では、これらの宇宙ミッションについて仔細を述べる。

2 ミッション(プロジェクト候補) 1: K-EUSO

ミッション代表者：戎崎俊一（理化学研究所）

2.1 戦略

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 3）。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。K-EUSO は国際宇宙ステーション (International Space Station: ISS) のロシア MRM-1 モジュールに搭載される。2019 年に打ち上げられ、最短 3 年、可能であれば 6 年またはそれ以上の期間、観測することを想定する。ISS は高度約 400km の軌道を持ち、90 分で地球を一周する。

K-EUSO は、JEM- EUSO で培われた技術を適用して、ロシアの KLYPVE ミッションの性能を格段に向上させる努力の結果として生まれた。KLYPVE はロシア語で”ultra-high energy cosmic rays”を意味する言葉 (Kosmicheskie Luchi Predel’no Vysokikh Energii) から命名されている。ロシア連邦政府の長期宇宙プログラムとして採択され、打ち上げや ISS への搭載の可能性について検討が行われた。しかしながら、その予想性能は、既存の地上 UHECR 天文台に比べても低く、UHECR に関する理解を進めるには不十分であることが明らかになった。我々は、レンズ、検出器、そしてレーザーに関する日本の技術を適用すれば、既存の地上 UHECR 天文台を上回る性能を実現できることを発見した。K-EUSO の基本目的は、**宇宙からの UHECR 観測の実証**とその

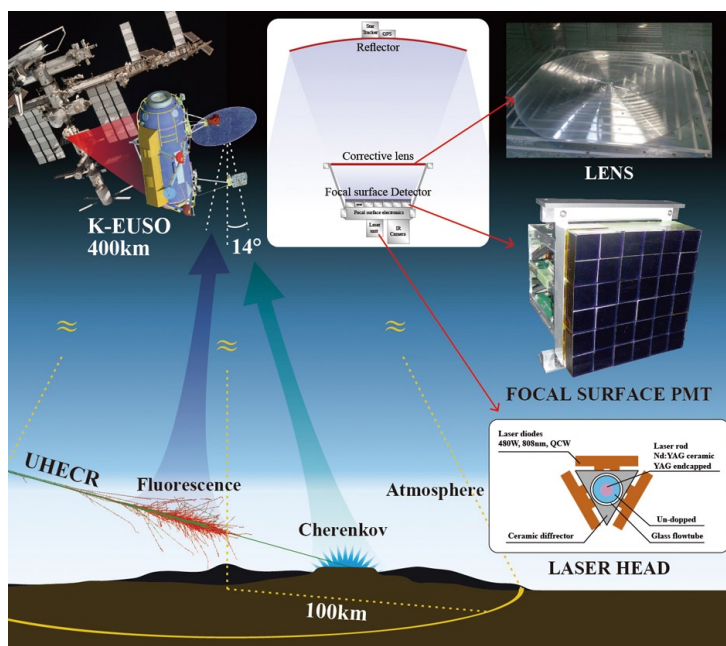


図 3: UHECR を宇宙から観測する K-EUSO 検出器の概念図。ISS のロシア MRM-1 モジュールに設置される。日本の貢献はフレネル補正レンズ (右上)、焦点面の光電子増倍管 (右中)、そして大気モニタ用のレーザー送信装置 (右下) である。

到来方向の全天球にわたる異方性の研究である。さらに、地球大気の発光現象や流星体と宇宙デブリの研究を行う（図 4）。

一方、10 年以上の間に、JEM-EUSO に向けて開発されてきた諸技術（プラスチックレンズ、マルチアノード光電子増倍管など）は、複数の先行ミッションの遂行により成熟し、予備設計を開

始する準備が整いつつあった。大きな成功を収めた PAMELA ミッションを主導した Piergiorgio Picozza 教授 (理研とローマ大学トルベルガータ校) を PI に迎え、国際コラボレーションが組織された。UHECR 地上実験の豊富な経験をもつグループも参加した。それらは東大宇宙線研究所 TA 実験グループ、米国シカゴ大、ドイツ Karlsruhe Institute of Technology、フランスの APC/CNRS などである。

K-EUSO 観測器は、口径 3.4 m の $\pm 14^\circ$ の視野を持った紫外線望遠鏡である (図 3 参照)。K-EUSO は、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する。その時・空間発達から、UHECR 一次粒子のエネルギーと到来方向を再構築する。EAS の紫外線撮像は、高度に画素化された高速カメラで、 $2.5 \mu\text{s}$ の時間間隔で記録される。そのカメラの焦点面は、約 1.2×10^5 の画素で覆われる。図 5 は年間露出量を表している。50 EeV において、K-EUSO はもともとの KLYPVE に対して 4.5 倍の露出量をもつ。また、Auger の 2 倍、JEM-EUSO の 0.25 倍程度の年間露出量を持つことが分かる。

K-EUSO への日本の貢献は、収差を補正する**フレネルプラスチックレンズ**、焦点面を覆う**マルチアノード光電子増倍管**、そして、大気の状態をモニターするための**レーザー送信機**である。日本は、JEM-EUSO collaboration の一環として K-EUSO に参加することとし、JAXA/ISAS 宇宙理学委員会からの平成 25 年度小規模プロジェクト公募に「K-EUSO」として応募した。K-EUSO は、宇宙理学委員会において、**ミッション定義審査としては合格**との評価を受け (2014 年 8 月)、**引き続きシステム要求審査の準備をする**よう推奨された。システム要求審査に必要な書類は 2014 年 12 月に宇宙理学委員会に提出された。2019 年の打ち上げを想定して、準備を進めている。

本格的な UHECR 天体物理学を実現する JEM-EUSO ミッションは JEM-EUSO Collaboration の最終目標として継続される。

2.2 工程表

表 1 に、現在想定しているマイルストーンをまとめる。

表 1: Major Milestones

Milestone	Date
Mission Definition Review (MDR)	Fri 1/8/14
System Requirement Review (SRR)	Mon 1/6/15
System Definition Review (SDR)	Fri 1/4/16
Critical Design Review (CDR) 1	Thu 1/6/17
Delivery of Mass & Thermal Model	Mon 2/1/17
Preliminary Design Review (PDR)	Mon 2/1/17
Critical Design Review (CDR) 2	Mon 2/4/18
Delivery of Engineering Model	Mon 2/4/18
Delivery of Flight Model	Thu 1/8/19
Launch	Fri 1/11/19

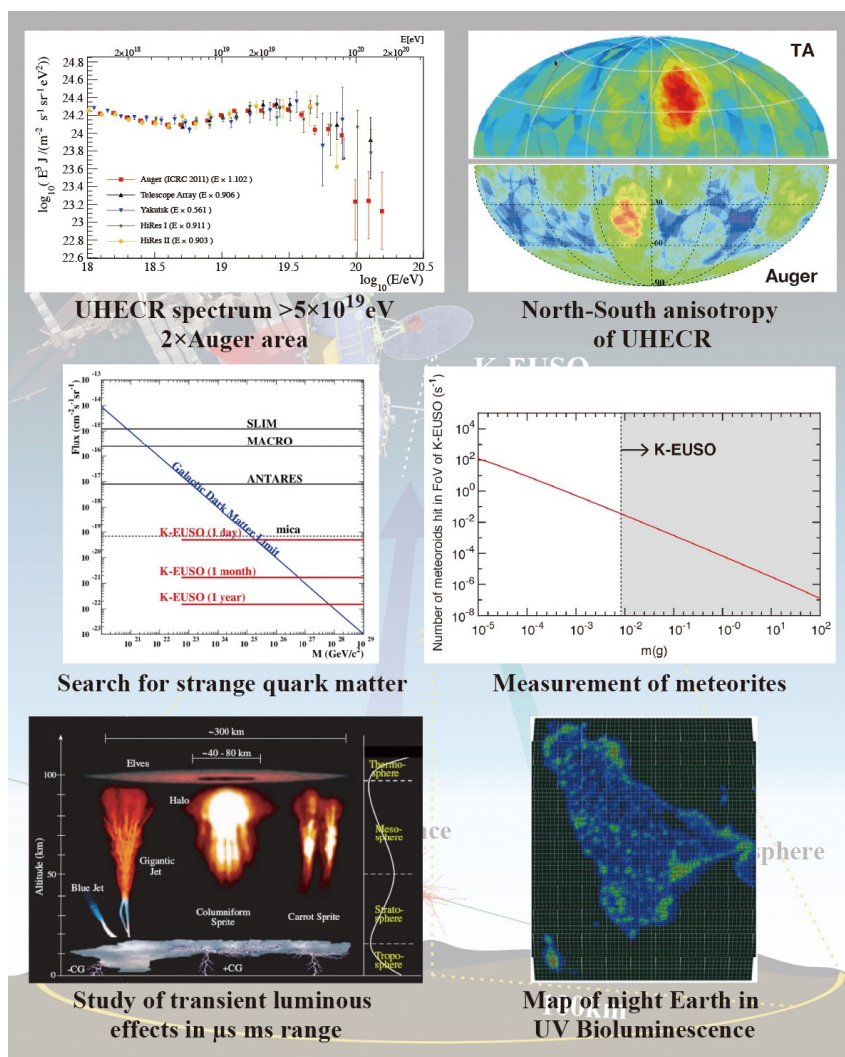


図 4: K-EUSO の科学目的の概要

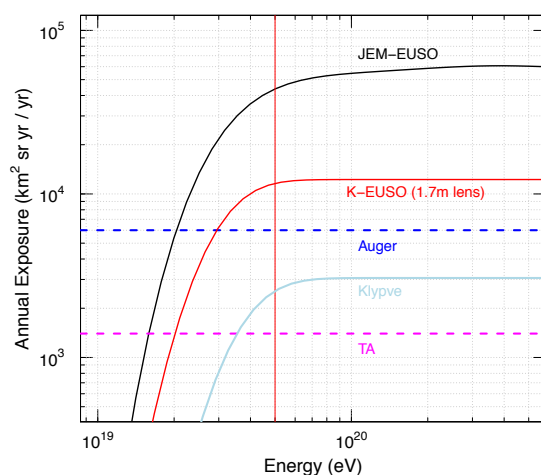


図 5: K-EUSO 望遠鏡の年間露出量をエネルギーの関数としてプロット (赤) し、JEM-EUSO、地上に設置された Pierre Auger Observatory (Auger) 実験、Telescope Array (TA) 実験のそれと比較した。K-EUSO の露出は、 $\simeq 7 \times 10^{19} \text{ eV}$ で水平となる。それより低いエネルギーでは、UHECR シャワーによって生成される紫外線光子の数が減るので、検出効率が下がる

3 ミッション(プロジェクト候補) 2: Pre-DECIGO

ミッション代表者: 安東正樹 (東京大学)

3.1 戦略

3.1.1 目的と概要

Pre-DECIGO は、重力波という新たな手段を用いて宇宙論・強重力場天体現象の観測を行う重力波天文台である。Pre-DECIGO は、その先にある DECIGO による宇宙誕生直後の姿の直接観測という壮大な目標の前段階となるミッションと位置づけられる一方で、それ自体が科学的価値の高いミッションとなっている。特に、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こと、ダークエネルギーやダークマターの情報を得ることといった、電磁波では得ることができない知見を得ること、電磁波観測と相補的な観測をすることを目的とし、0.1 Hz の周波数帯で中間質量ブラックホール連星の合体、中性子星やブラックホールの連星から放射される重力波の観測を行う。一方、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 Pre-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、インフレーション期からの重力波を観測するための基礎情報を得ることも重要な目的となっている。

Pre-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 6)。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。Pre-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。

3.1.2 背景と将来計画

初期宇宙を直接観測し、その誕生と進化の謎を解き明かすことは、人類の科学の大きな目標のひとつである。そのために、マイクロ波から光赤外、 γ 線に至る様々な電磁波波長帯を用いた遠方銀河、ガンマ線バースト、超新星爆発などの観測が行われている。特に、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB, Cosmic Microwave Background) は、宇宙誕生から約 38 万年後の姿を直接我々に届けてくれるものであり、その観測結果は、インフレーション理論を裏付け、宇宙年齢や宇宙のエネルギー組成などの宇宙論パラメータを精度良く与えるものになっている。その一方で、CMB より初期の宇宙では電磁波は散乱されて情報を失うため、我々が直接観測することは困難という限界もある。

そこで、重力波による観測が非常に大きな役割を果たすと考えられる。電磁波や他の粒子と比較して、重力波は物質との相互作用が小さく非常に透過力が強い。そのため、高エネルギー状態であった初期宇宙の情報を失うことなく我々に届けてくれるのである。このような宇宙背景重力波の直接観測は、宇宙が誕生した瞬間 (10^{-35} 秒後)・ビッグバン・相転移といった初期宇宙の歴史を解き明かす強力な手段になり得る。Pre-DECIGO の成功の先にある宇宙重力波望遠鏡 DECIGO (デサイゴ) は、この宇宙背景重力波の直接観測という大きな目的を持った計画である。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



図 6: (左) Pre-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) Pre-DECIGO 実現までのスケジュール.

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.

3.1.3 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, DECIGO 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 aLIGO, ヨーロッパの Advanced VIRGO, 日本の KAGRA といった地上重力波望遠鏡は, 2017 年頃の観測開始を目指して, より高感度の検出器を建設する計画を進めている. これらの地上望遠鏡は, 100 Hz 付近の観測周波数帯を持ち, 主に中性子星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. Pre-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, 大質量・大スケールでの重力波源が観測対象となる. 地上重力波望遠鏡が高エネルギー天体現象を観測対象とし, その初検出を目的としているのに対して, その後に実現される Pre-DECIGO では, 銀河形成や宇宙の誕生と成り立ちに対する知見を得ることを目的としている点が大きく異なる. 一方, 相補的な観測としては, Pre-DECIGO では中性子星連星を観測し, 地上重力波望遠鏡や電磁波望遠鏡に対して方向と合体時刻のアラートを出すことが期待できる.

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 eLISA 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いる. ESA の長期計画である Cosmic Vision においては, 2034 年打ち上げの L3 ミッションとして宇宙重力波望遠鏡ミッションが選定されている. 一方, NASA の長期計画策定の枠組みを示す Decadal Survey (2010) においても, 重力波観測ミッションを推進する

ことが提言されている。その後、ESA での L3 ミッションの決定を受け、GWSIG (Gravitational Wave Special Interest Group) での議論が継続されている。研究者レベルでは、ESA/NASA だけでなく国際協力の枠組みが議論されており、その議論には日本からも参加をしている。宇宙重力波望遠鏡 eLISA は、Pre-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、Pre-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。

3.2 工程表

3.2.1 Pre-DECIGO 実現への工程

Pre-DECIGO は、2024 年頃に実現することを目指す (図 6)。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発展的に解消し、Pre-DECIGO の実現を目指した新ワーキンググループへと再編・再定義する予定である。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、2020 年までに、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と、航空機実験による無重力総合実証試験を完了させることで、ミッション提案までに必要な準備を整える。また、安定化レーザー光源に関しては、フライト品を完成させ、相乗り機会を利用した宇宙実証を行う。プロジェクト移行から約 5 年後の打上げを見込む。

3.2.2 鍵となる技術と準備状況、体制

Pre-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いる。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。

DPF 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、東京大学・地震研究所、電気通信大学、情報通信研究機構、東京大学・新領域創成科学研究科、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、大阪市立大学、大阪大学、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。

4 ミッション(プロジェクト候補) 3: 気球による広視野高感度MeVガンマ線天体広域探査観測 (SMILE 実験)

ミッション代表者: 谷森達 (京都大学)

4.1 戦略

4.1.1 学問的背景と計画の概略

MeV ガンマ線天文学は 90 年代 COMPTEL により開拓された。しかし COMPTEL 等従来型コンプトンカメラ (CC) は、コンプトン散乱電子の方向の欠如からガンマ線の方向が円環となりイメージングが不明瞭、大量の放射雑音等の問題により感度が悪く、COMPTEL で約 30 天体を発見、その後の INTEGRAL も 0.6 MeV 以上で 4 天体の観測のみで、数千天体を観測した Fermi とは隔たりのある。この問題の克服は現在でも難しく、広視野 CC の開発は多数行われたが気球観測で結果が出たのは我々の実験 (SMILE-I) と、UC の NCT のみである。NCT は Ge 製 CC を用い、雑音除去には Veto カウンタを使用。Crab を 4σ で検出したが雑音が多く感度は予想の 6 分の 1 であった。我々は電子飛跡測定により雑音除去と不明瞭イメージングを解決する ETCC を開発、06 年に気球観測 (SMILE-I) を行い宇宙拡散 MeV ガンマ線測定に成功。放射雑音を**飛跡のエネルギー損失率 dE/dx** を用いる手法を開発し Veto カウンタを用いず除去に成功した (図 7: SMILE-I)。現在、天体観測を目指した中型 30 cm 角 ETCC を開発 (SMILE-II)、SMILE-I より 100 倍の感度を実現 (有効面積 1 cm^2 (0.3 MeV)、角度分解能 5 度 (0.6 MeV))、Crab を 4 時間 7σ で観測する能力がある。すでに JAXA 大気球委員会の技術および科学的意義の承認を得、米国気球観測のための JAXA-NASA 包括協定での実施が検討されている。さらに高宇連では衛星以外の有望な観測手段として SMILE-II の Crab 観測実験の支援を得、また宇宙線分野 (CRC) から支援をいただいた。まず今回申請する小型プロジェクトで完成した SMILE-II の有効面積を TPC のガス種と圧力改善およびシンチレーター増強で 4 倍に改善 (図 7 b: SMILE-II+)、この SMILE-II+ を用い米国で短時間観測気球実施、Crab・Cyg X-1 のスペクトル・偏光観測を行う。4 時間で 10σ の感度、30%以上の偏光測定を実現することで ETCC の能力を実証。この結果を基に、ガス種類と 3 気圧加圧、シンチレーター長を増強させた有効面積が $40 \text{ cm}^2 @ 500 \text{ keV}$ を持つ 40 cm 角 ETCC を科研費や米国ゴダード宇宙センター (GFC) との共同で開発。この 40 cm 角 ETCC は極域または地球周回気球観測で一ヶ月以上の長期観測により、COMPTEL の 10 分の 1 に近い感度 7 mCrab で観

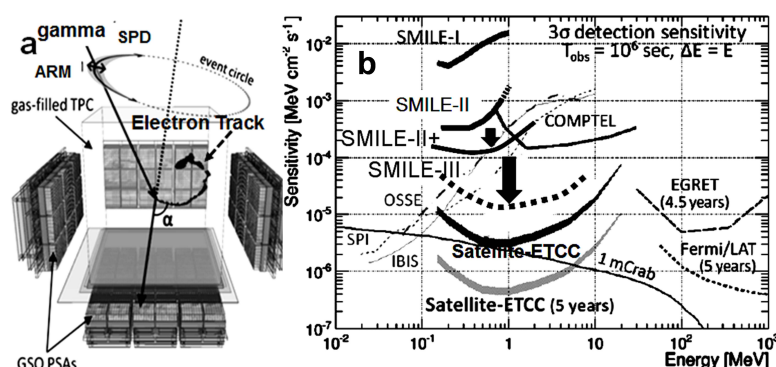


図 7: (a) SMILE-II 30 cm 角 ETCC の概念図。到来方向は幅 ARM 角と弧の長さ SPD 角の領域に限定される。従来の CC は SPD が無く円環となる。(b) 各 SMILE 実験、衛星使用 ETCC と他の観測装置の 10^6 秒観測での感度または予想感度。

測が期待できる (図 7 b: **SMILE-III**)。最終的には中型衛星では 40 cm 角を少し拡大した 50 cm 角 ETCC を 4~6 台程度搭載、有効面積 $300 \text{ cm}^2 @ 1 \text{ MeV}$ を実現、約 1 千天体の観測が期待できる 1 mCrab 以下の達成 (図 7 b: Satellite-ETCC) を目指す。この衛星では数百個の超新星観測による超新星起源、元素合成、銀河進化の解、GRB 探査による宇宙最初の星探査、核励起ガンマ線による宇宙線起源探査など 21 世紀天文学を牽引できる多数の成果が期待される。**しかし、5~8 年で実施を検討している本計画は以下に示すように、気球ながら観測技術実証を越え COMPTEL より 10 倍近い感度の広域観測を行い、停滞している MeV ガンマ線天文学を一気に推進できる科学成果が期待できる。**

4.1.2 期待される成果

SMILE-II+による米国での Crab・Cyg X-1 の 10σ 以上でスペクトル・偏光測定を行う。この 2 天体は近年 100 keV 以上で 40%以上の偏光が報告されたが、衛星での検証は 2016 年以後 ASTRO-H で可能だがそれ以外には無く、さらに天文学的に重要な Cyg X-1 での 400 keV 以上での偏光観測は ASTRO-H の範囲外であり、この申請実験が唯一である。500 keV 以上のガンマ線領域での偏光観測衛星計画は無く、今後 SMILE 実験が唯一定常天体の偏光を測定できる計画である。さらにミリ Crab の感度に迫る 40 cm 角 ETCC を開発、最初の豪州で銀河面ラインガンマ線観測は MeV 天文学で最も重要な多数の核ガンマ線観測の可能性を担保する重要な成果となる。特に核ガンマ線の銀画面の高解像度観測は世界初であり重要な知見が期待できる。また広視野かつ低雑音観測から AGN 進化問題に重要な MeV ガンマ線背景輻射スペクトルの高精度測定が期待出来る。この後予定している最終的な極域または地球周回気球観測により 10 mCrab 以下の広域探査を実施、以下のような多数の成果が期待される。

1. 銀河内宇宙線 (イオン) と分子雲の C や O の反応による 1~6 MeV 間での核ラインガンマ線の観測から宇宙線加速起源直接同定、および宇宙線強度の決定が実現、銀河宇宙線起源問題解明に決定的なデータを出す。
2. 約 15 個程度の GRB を観測し、約 5 個は 10%、残りは 30%という高感度偏光観測が実現できる。特に ETCC 雑音除去の特徴を生かし長時間 GRB に対しても高精度偏光観測を世界で初めて実現できる。GRB 偏光観測は超小型衛星観測が計画されているのみであり、このような高感度かつ高統計な感度の達成は 10 年以内には無理である。数回の気球観測は可能であり、6~7 年後に 50 個程度の GRB の高精度偏光データの取得が実現すれば GRB 発生機構解明に最大の貢献となる。
3. 南天での観測では銀画面内の 10 個以上のパルサー、ブラックホール天体、さらには同程度の AGN に対して MeV ガンマ線精密スペクトルおよび偏光観測を行い MeV 天体カタログを COMPTEL 時代から倍増できる。

このように気球観測ではあるが COMPTEL のデータを大きく改善、新しい MeV ガンマ線天文学を世に示し、1 mCrab 以下の感度のある衛星計画への発展を大きく後押しできる。

4.2 工程表

すでに SMILE-II 実機を用い RI を用いた高イメージング解像度試験、加速器を用い、ガンマ線中性子等宇宙環境に近い強放射線場を生成、その中で宇宙環境以上の強ガンマ線中性子線環境での性能試験、天体と同程度の微弱 RI 画像化試験と従来にない過酷な地上を試験を行い、その性能実証試験を終了、気球実験での実証を残すのみとなり、真空試験も終了している。具体的な今後の気球観測計画は以下のとおりである。

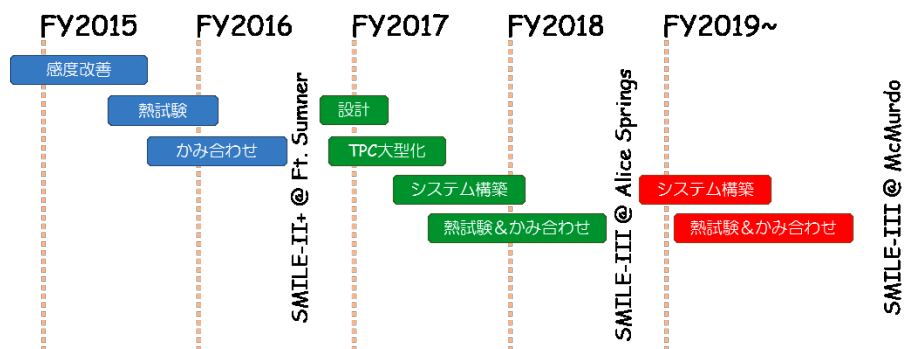


図 8: SMILE 計画の工程表

2015-16 年 上に述べたように SMILE-II の簡単な感度改善 (ガス調整とシンチレーターの増強のみ、SMILE-II+) を行い米国気球による Crab・CygX-1 スペクトル・偏光観測。GFC との共同実験であるがすでに装置開発が日本側で終了しているため日本での大半の気球経費負担が求められる (約 0.8 億円)。本来、日本 JAXA の気球を利用する計画が JAXA 気球が現在北半球での天体観測が困難な状況をふまえ米国での観測を行うものであり、JAXA 小型プロジェクト C へ気球経費の申請を行う。装置改善のために別途大型科研費を申請した。最低限の装置開発費は小型プロジェクト経費に含み科研費が不採択の場合でも実施できるようにする。

2017-19 年 SMILE-II+ の TPC の大型化、シンチレーターの増強により 40 cm 角 ETCC に改善し SMILE-III 装置を制作する (経費 7 千万円程度)。この改良は単なる大型化であり 1 年の短時間で可能である。この改良は GFC との共同で実施する。2018~19 年に JAXA 気球を用いて豪州での 1~2 日間気球観測を実施、銀画面からの 511 keV・ ^{26}Al 核ガンマ線 (1.8 MeV) 検出観測を行い、ラインガンマ線感度実証を行う。装置経費は 2015-16 年の大型科研費、気球経費は JAXA 気球経費で実行できる。

2019 年~ 2017-19 年の成果をふまえ 40 cm 角 ETCC を 1 台増強し、米国 NASA 気球を用いて南極周回観測 (北極も可能) を実施する。GFC との共同実験であり気球経費は米国負担となり、日本側負担は分担する装置負担、旅費等の負担となるため、科研費または小型プロジェクト C の範囲で可能となる。数年後には米国では 1 トン以上の観測装置による地球周回気球飛行観測も実現する予定であり、これの利用も当然考えられる。南極気球では原則装置は回収されるため 2~3 年後の再度の観測が可能となるため再度の観測を行いたい。

5 ミッション(プロジェクト候補) 4: HiZ-GUNDAM

ミッション代表者: 米徳大輔 (金沢大学)

5.1 学術的背景と戦略

現代の天文学では、電波から TeV ガンマ線に至る多波長連携により、総合的に天体現象を理解することが重要となってきた。さらに 21 世紀の天文学として、重力波、ニュートリノ、宇宙線のような非光子観測も高エネルギー宇宙物理学を担う重要な要素となっていくだろう。

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。NASA の Decadal Survey 2010 の中で記述されている Science Frontier Discovery には 5 つの項目を重点課題として取り上げているが、ガンマ線バースト (GRB) をはじめとした突発天体の観測により、(1) 重力波天文学の発展、(2) Time Domain Astronomy、(3) 宇宙再電離時期の特定、の 3 項目に貢献できることとなる。

そのような背景の中、**GRB を用いて宇宙暗黒時代の終焉と天体形成の幕開けの観測を目標とした HiZ-GUNDAM プロジェクト**を検討している⁴。近年、GRB 090423($z = 8.26$: 分光観測)や GRB 090429($z = 9.4$: 測光観測)などの高赤方偏移 GRB が検出されたことで、GRB は最遠方天体としての地位を確固たるものにしている。一方、これらの赤方偏移は測定できたものの、銀河間空間の電離度や、重元素組成などの物理的情報は得られていないのが実状である。

HiZ-GUNDAM は、1–10 keV のエネルギー帯域において約 1 ステラジアン視野を監視することで、赤方偏移の効果を強く受けた GRB を検出するための X 線撮像検出器と、赤方偏移 $z > 7$ の GRB 残光でも検出可能な、口径 30 cm の近赤外線望遠鏡を同時に搭載する人工衛星計画である(図 9 参照)。GRB を検出すると自律制御で姿勢を変更し、近赤外線望遠鏡で測光観測を行い、GRB の詳細な発生方向と赤方偏移の大きさ、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示する。高赤方偏移 GRB 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、初期宇宙における星形成、宇宙再電離、重元素合成の歴史的な変遷を観測し、初期宇宙形成史の解明に寄与することを目標としている。

以上のように、HiZ-GUNDAM の最重要課題は GRB を用いた初期宇宙探査であるが、

1. 重力波放出源としての突発天体監視

- ・強い重力場における一般相対性理論の検証と重力波天文学の創成

2. 多波長・マルチメッセンジャー天文学の発展

- ・突発天体を利用した極限宇宙(超高エネルギー宇宙)の理解
- ・全天モニターの軟 X 線領域への拡大
- ・多波長(電波から TeV ガンマ線)および非光子(重力波、ニュートリノ)観測との連携

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)計画などとの関連が強いことから、HiZ-GUNDAM プロジェクトはこれらの計画と連携することで科学成果を最大にするよう努める。

⁴Yonetoku, D., et al., Proceedings of the SPIE, Volume 9144, id. 91442S 12 pp. (2014)

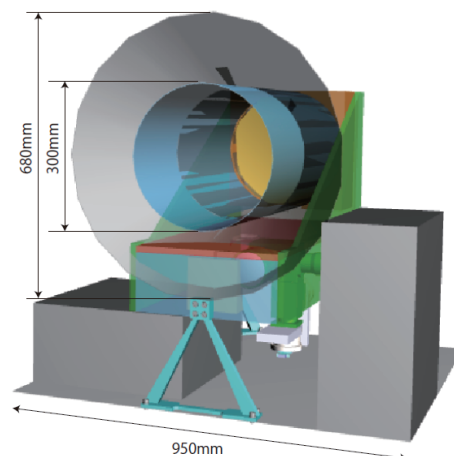
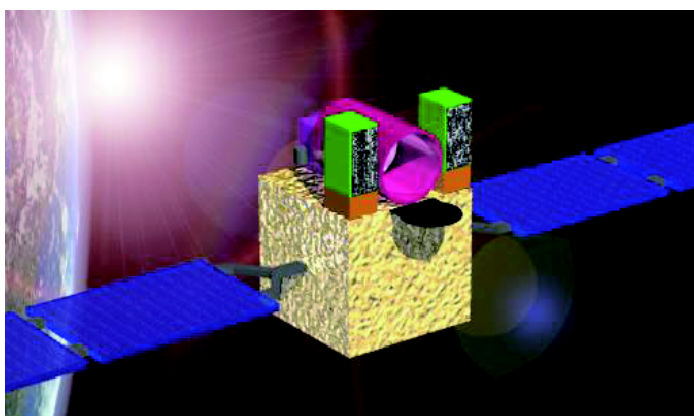


図 9: (左) HiZ-GUNDAM 衛星の想像図。(右) HiZ-GUNDAM 衛星の機器配置例。中央の円筒が可視光・近赤外線望遠鏡で、両脇に配置されている箱が広視野 X 線撮像検出器。

5.1.1 多波長・他分野連携の考え方

今後、大きく進展する重力波やニュートリノ観測においても、突発天体の発生と同期した信号を探索することは S/N の観点で有利であるため、電磁波による広視野モニター観測と連携を強めていくことになるだろう。広視野 X 線観測が多波長に比べて優れている点は、1 ステラジアン以上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、高い精度で物理的な議論を展開できるようになる。以上のように、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、大きく発展させるために極めて重要なサイエンステーマとして位置づけている。

重力波観測との連携

2018 年頃から、我が国の KAGRA、米国の Advanced-LIGO、仏伊の Advanced-VIRGO といった大型重力波天文台が本格的に稼動しはじめる。これまでの重力波観測に比べて飛躍的に感度が高くなるため、史上初の直接的な重力波検出が期待されている。特に、300Mpc 以内で発生する中性子星連星の衝突・合体は最有力の候補天体であり、継続時間の短いショートガンマ線バーストとの関連性が指摘されている。それ以外にも短時間に重力場が変化する突発天体現象からも重力波の検出が期待されている。

しかしながら、重力波のみの観測から制限できる発生方向は、面積で約 10–100 平方度の誤差範囲となるため、発生天体および母銀河を特定することはできない。天体までの距離を測定することもできず、重力波の担う基本的な物理情報を引き出すことさえ不可能である。重力波の観測パラメータが決まれば、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されている。したがって、重力波と同期した突発天体を多波長で監視・観測することが必要とされている。「重力波天文学」という新しい学術分野の創成が期待できる。

ニュートリノ観測との連携

GRB や太陽フレアと同期したニュートリノの探索は、長年にわたって行われている探索方法のひとつである。時間的・空間的（方向的）に同期した電磁波観測の情報を利用することで、検出しきい

値を下げる事が可能となるため、継続して行うべきテーマである。そのために、HiZ-GUNDAM による X 線突発天体の発見を行い、網羅的なデータベースを提供することを目指す。

ニュートリノ観測側からもアラート情報を提供するシステムを構築しているため、本格的に稼働するようになれば、ニュートリノバーストを伴う突発天体の発見を、リアルタイムに全世界へ通報できることになる。この場合は、さまざまな波長帯での追観測を促すことができ、ニュートリノ天文学の発展に大きく貢献できるだろう。

TeV ガンマ線観測との連携

宇宙における極限状態を理解するためには、定常天体のみならず突発天体を理解することも必要不可欠である。得に GRB や超新星爆発はブラックホールや中性子星の形成を伴う最高のターゲットである。近年、フェルミ衛星によって発見された GRB 130427A と呼ばれるイベントは、赤方偏移 $z = 0.34$ と近傍で発生し、かつ解放エネルギーが 10^{54} erg を越える、極めて大規模な爆発現象であった。残光中に 100 GeV に達するガンマ線光子が観測されたことから、標準的なシンクロトロン放射モデルに疑問を呈している。衝撃波によって加速された粒子からの放射か、ハドロンや暗黒物質の崩壊を起源とする放射かは、長年にわたって議論されている大問題であり、HiZ-GUNDAM のリアルタイムアラート機能により、様々な突発天体に対して観測機会を提供できる。

5.2 工程表と体制

図 10 に想定するスケジュールと様々な分野の主なプロジェクトについてまとめた。HiZ-GUNDAM の最重要課題である初期宇宙探査を行うためには、TMT 望遠鏡と同時期に実現することが重要と考えている。これは、2018 年頃からの重力波観測や、2020 年からの CTA とも整合していることから、HiZ-GUNDAM を 2020 年代前半の実現を目指したロードマップとして位置づける。

HiZ-GUNDAM では、コーデッドマスクを用いた広視野撮像検出器を検討している。既に X 線撮像を実証できているが、より大面積な検出器を駆動できる回路系を構成する必要がある。また、近赤外線望遠鏡については、CIBER-2 ロケット実験搭載の近赤外線望遠鏡などの技術を取り入れた検討を行っており、実現性の見通しが高い。

HiZ-GUNDAM は 2009 年の GRB 研究会で最初の構想を提示し、2012 年に宇宙科学研究所に小型科学衛星ワーキンググループ (旧称) として認定されている。現在は、国内の GRB 研究者の大多数が参加しており、一部、国外の研究者とも議論している。X 線・ガンマ線検出器グループとして 19 名、近赤外線望遠鏡グループとして 10 名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。また、22 名の理論研究者も参加しており、主にサイエンス面を主導する体制となっている。

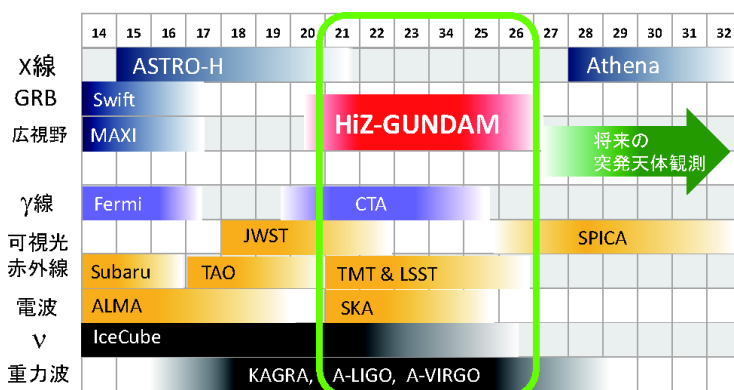


図 10: HiZ-GUNDAM の想定するスケジュールと異分野連携の戦略

6 ミッション(プロジェクト候補) 5: 宇宙線反粒子探索計画 GAPS

ミッション代表者: 福家英之 (JAXA)

6.1 戦略

6.1.1 学術的背景

宇宙誕生時に物質と反物質が同数だけ生み出されたと考えられるにもかかわらず、現在の我々の周りの宇宙は物質で構成されており、物質・反物質の対称性が大きく破れている。物質優勢宇宙の最も直接的な証拠として我々の周りを飛び交う宇宙粒子線もまた物質優勢であるが、僅かながら反物質（以下では宇宙線反粒子と表記）が含まれていることが知られている。この宇宙線反粒子を観測・探索することで、宇宙線反粒子の起源に迫り、ひいては、その背後にある学術的に重要な種々の研究課題に迫ることができる。

代表的課題として暗黒物質の解明がある。暗黒物質は宇宙の約 1/4 を占める未知の物質であり、素粒子物理学的・宇宙物理学的に非常に重要な喫緊の研究テーマである。宇宙線反粒子は暗黒物質を起源とする可能性があることから、宇宙線反粒子の観測・探索によって暗黒物質を間接的に探査することができ、暗黒物質の正体に迫ったり理論モデルに制約を付したりすることができる。暗黒物質の理論モデルは数多く提唱されており、それらの正誤の検証には多角的な実験が欠かせないが、後述のように、宇宙線反粒子は他種の実験アプローチと相補的かつユニークな暗黒物質探査プローブである。

そのほか、宇宙線反粒子は、原始ブラックホールなどの素粒子物理学で予言された未知の現象について知見を得る手がかりともなる。宇宙線反粒子は、物質優勢と見られる宇宙のどこかに未知の反物質領域が存在するのか兆候を探る手段としても知られている。宇宙線反粒子のエネルギースペクトルやその時間変動を詳細に観測したり、粒子と反粒子のスペクトルを比較したりすることで、宇宙空間での宇宙線の伝播や太陽による変調などについての情報を得ることもできる。

このように宇宙線反粒子は、「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」として列記されている「暗黒物質」「反物質」をはじめとする宇宙物理学的に重要な課題に直接的な貢献ができる。ここでは、宇宙線反粒子に特化して探査を推し進める実験計画として、GAPS を挙げる。

6.1.2 GAPS の概要、意義、特色

General Anti-Particle Spectrometer (GAPS) 計画は、宇宙線反粒子の高感度探索・高精度観測を通じて前節で述べた素粒子物理学的・宇宙物理学的な初期宇宙の謎に迫ることを目的とする。GAPS は特に、運動エネルギー 100MeV 付近という未踏の低エネルギー領域にて宇宙線反陽子がかつてない高統計精度で観測し、なおかつ、未発見・未開拓ながら多くの魅力を秘める宇宙線反重陽子を高感度で探索することを主目的とする。

これにより期待される学術的な意義の代表として、ここでは暗黒物質に関して述べる。一般的に暗黒物質に対する実験的アプローチとしては、加速器による暗黒物質の生成実験、暗黒物質とターゲット物質との反跳を手がかりとする直接探索実験、暗黒物質の対消滅や崩壊の産物を宇宙線中に探る間接探索実験の 3 つがある。この 3 つのアプローチはいずれも世界中で数多くの実験が実施または計画されているが、その中でも GAPS はユニークかつ他実験と相補的な位置を占めている。

GAPS の最大の特色は宇宙線反重陽子の高感度探索を flagship とする点である。暗黒物質 (CDM = cold dark matter) の有力候補として多くの WIMP (weakly interacting massive particle) モデ

ルがあるが、それらの対消滅や崩壊によって宇宙線反重陽子が生成され、しかも GAPS で検出可能な量が存在しているという予測論文が数多く発表されている⁵。図 11 に、その代表例として、MSSM (minimal 超対称性モデル) の LSP (Lightest Supersymmetric Particle) としてのニュートラリーノ⁶、余次元 (5 次元 warped GUT) の Dirac ニュートリノ (LZP)⁷、および、LSP gravitino⁸ 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を示す。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 100 MeV/n 領域にピークを持つと予想される。一方、他の宇宙線種と同様に、反重陽子も宇宙線的なバックグラウンドとして二次起源 (宇宙線と星間物質との衝突起源) が存在しうが、衝突による反重陽子生成の運動学の故に二次起源の反重陽子の流束は低エネルギー領域で抑制される⁹。そのため、100 MeV/n 付近の低エネルギー領域では、二次起源流束の影響を殆ど受けずに暗黒物質起源を直接検出できる可能性がある。この言わばバックグラウンドフリーである点が、既存の間接探索実験のプロープとして使われている他の宇宙線種とは異なる宇宙線反重陽子の大きな利点である。従来は不定性が大きかった反重陽子の生成確率計算も、近年の加速器実験などの寄与で精度が向上している。従って、100 MeV/n 領域に 1 イベントでも宇宙線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ものとなり、逆に観測されずとも暗黒物質モデルに大きな制約を課することができる。しかも、反重陽子によって様々な暗黒物質モデルの広範囲なパラメータ空間を他の実験と相補的にサーベイできることが指摘されている³。近年複数の直接探索実験が矛盾する結果を出して注目を集めている 10~30 GeV 付近の軽い暗黒物質モデルもカバーしており²、一方で、TeV スケールをカバーできる暗黒物質モデルや¹⁰、他の実験ではカバーできず宇宙線反重陽子のみで検出可能なモデルもある⁴。

もちろん、反重陽子のみならず反陽子の精密測定も暗黒物質モデルの制約に対して重要な役割を果たす¹¹。以上のように、GAPS による暗黒物質探索はユニークな特徴と多くの可能性を有している。

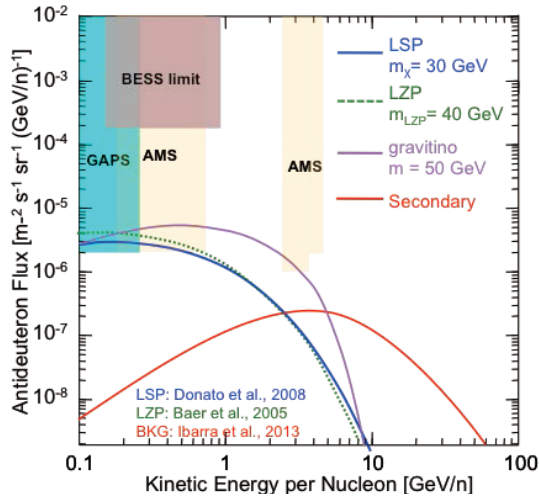


図 11: 3 種類の暗黒物質モデル起源と二次起源の反重陽子予想エネルギースペクトル、および、BESS による流束上限値、GAPS (100 日間) と AMS-02 (5 年間) で期待される反重陽子感度。

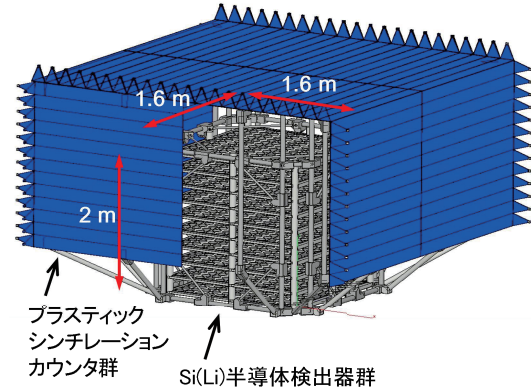


図 12: GAPS 測定器の構成概念図。Si(Li) 半導体検出器群が degrader, depth sensing, target, X 線測定, π/p tracker を兼ね、その周囲のプラスチックシンチレーションカウンタ群が Time of Flight 測定, trigger, dE/dx 測定, 到来方向測定, π/p 検知, veto を担う。

⁵最初の契機となったのは F. Donato et al., Phys. Rev. D 62, 043003 (2000).

⁶F. Donato et al., Phys. Rev. D 78, 043506 (2008).

⁷H. Baer et al., JCAP 0512:008 (2005).

⁸L. Dal et al., Phys. Rev. D 89, 103504 (2014).

⁹A. Ibarra et al., Phys. Rev. D 88, 023014 (2013).

¹⁰C. Brauner et al., Phys. Lett. B 678, 20 (2009).

¹¹T. Aramaki et al., Astropart. Phys. 59, 12 (2014).

6.2 工程表

6.2.1 GAPS の実験手法、他実験との相補性

低エネルギーの荷電宇宙線を地磁気や大気の影響を受けずに直接観測するには、極域（北極や南極）の高空または地磁気圏外に行く必要がある。また、反重陽子の予想存在量が極微なため、かつてない高感度（大面積立体角 × 長い観測時間）を確保する必要がある。GAPS は先ず NASA の南極周回気球による長時間飛翔観測（約 1ヶ月間）を目指す。高感度を得るために、従来のマグネット型スペクトロメータよりも大型化が比較的容易な、エキゾチック原子物理を応用した独自の検出方法¹²を採用しており、その検出原理は反陽子ビームテストで実証済みである¹³。太陽風による流束抑制を最小限にとどめ反重陽子の観測数を最大化するため、次期太陽活動極小期（2020年頃）の実施を目指している。

GAPS は世界に類を見ない唯一の反重陽子探索計画であり、日米共同で推進している。宇宙線反粒子を観測する他の実験としては BESS（～2008 年）があったが、GAPS は BESS よりも低いエネルギーをより高い感度で観測できる。PAMELA 衛星（2006 年～）は、極軌道を飛んでおり極域の飛翔機会が限られることや観測器の面積立体角の小ささのため、極低エネルギーの感度には限界がある。国際宇宙ステーション（ISS）上の AMS-02 実験（2011 年～）は、ISS の軌道が極域を通らないため、地磁気の影響を大きく受ける。AMS-02 の非公式な試算と比較すると、GAPS は AMS-02 に匹敵する高い感度に、しかも AMS-02 よりも暗黒物質探査に適した低エネルギー側の隣接エネルギー領域にて、到達可能である（図 11）。また、これら 3 実験はマグネット型スペクトロメータであり、全く異なる検出方法を用いる点でも GAPS は相補的な位置を占める。

前述の通り GAPS は最近話題の候補種を含む広範囲な暗黒物質候補を他の実験アプローチと相補的に探索でき、LHC を含む他実験の進展との関連から見ても時宜的である。

6.2.2 準備状況、工程

GAPS は 2010 年に小規模プロジェクトワーキンググループとなり、計画検討を重ねてきた。2012 年には GAPS 測定器のブレッドボードモデル（BBM）を JAXA 大気球により飛翔させる技術実証試験を大樹町にて実施した。この BBM 気球実験はフルサクセスを達成し、GAPS の基本構成要素の動作を実際の飛翔環境下で実証することに成功した¹⁴。BBM の性能を維持・向上させつつ南極フライト用の実機へとスケールアップするために鍵となる技術にはいずれもバックアップ代替手段を用意していて致命的な問題は無く、実機開発に向けた機は熟した。資金としては国内ではこれまで科研費や宇宙理学委員会搭載機器経費などを獲得してきた。国際パートナーである米国側は NASA/APRA (ROSES) を受給してきており、今後も日本側と同期しての予算申請を予定している。

GAPS の第 1 期は 5 年計画であり、南極用の実機の詳細設計（1.5 年）、開発製造（1.5 年）、および第 1 回目の南極気球実験の実施（4 年目）とデータ解析（5 年目）までをカバーする。南極での第 1 回目のフライトにて反重陽子の存在の兆候を得るなどの成果があり、さらなる高感度探索への科学的機運が高まれば、第 2 期 5 年計画として、南極周回気球による 1ヶ月以上の規模の観測を 2 回程度追加で実施する。そして、計 3 回 100 日間のフライトの結果として、反重陽子の存在の確たる証拠を得たりエネルギースペクトルを得たりするなどの成果があり、さらなる高感度高精度な観測への科学的機運が高まれば、第 3 期 10 年計画として、中型衛星による数年規模の観測をラグランジュ L2 点にて実施する。

¹²K. Mori et al., ApJ 566, 604 (2002)

¹³T. Aramaki et al, Astropart. Phys. 49, 52-62 (2013).

¹⁴P. von Doetinchem et al., Astropart Phys 54, 93 (2014).