

日本が関与する飛翔体を用いた高エネルギー天体物理学のロードマップ検討まとめ

高エネルギー宇宙物理連絡会将来計画検討委員会 (第四期)

編集：2023年02月28日

公開：2023年05月01日

最終版：2023年05月09日

目次

第1章	はじめに	1
1.1	将来計画検討委員会の役割	1
1.2	第4期の活動の概要	1
第2章	宇宙物理学の目的	4
第3章	高エネルギー宇宙物理学が明らかにすべき課題	6
3.1	X線から GeV ガンマ線による宇宙観測の特徴	6
3.2	取り組むべき課題の大枠	7
3.2.1	宇宙の物質・空間のあり方と起源	7
3.2.2	宇宙における多様性の発現	8
3.2.3	物理学の根本原理の追究	10
第4章	将来計画検討の前提条件	12
4.1	分野の動向	12
4.1.1	日本の大型計画など	12
4.1.2	米国 (NASA) の将来計画	13
4.1.3	ヨーロッパ (ESA) の将来計画	14
4.1.4	その他	15
4.2	宇宙科学研究所の科学ミッションの枠組み	15
4.3	日本における宇宙科学に関連する超小型衛星のプログラム	15
第5章	高宇連が推薦する大型ミッションとその戦略	17
5.1	高宇連が推薦するプロジェクト	17
5.1.1	XRISM(X線分光撮像衛星 X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission)	17
5.1.2	Athena	18
5.1.3	FORCE (Focusing On Relativistic universe and Cosmic Evolution)	20
5.1.4	JEDI (仮称)「広帯域X線撮像分光ミッション」	21
5.2	高宇連が推薦する分野横断プロジェクト	22
5.2.1	HiZ-GUNDAM	22
5.2.2	PhoENiX	22
5.3	高宇連が深く関係する宇宙理学 RG	23

第 6 章	海外ミッションへの積極的な参加	26
6.1	X 線偏光観測衛星 IXPE	26
6.2	硬 X 線偏光観測気球実験 XL-Calibur	26
6.3	COSI MeV 全天観測衛星	27
6.4	FOXSI4 ロケット実験	27
第 7 章	マスタープラン 2023 対応とその時点での高宇連のロードマップ	29
7.1	第 4 期における高宇連のロードマップの更新議論	29
7.2	MP2023 コールへの高宇連の答申	30
7.2.1	序文	30
7.2.2	重点大型研究計画への推薦	31
7.2.3	大型研究計画等への推薦	32
第 8 章	第 4 期将来計画検討委員会若手部会の答申	33
8.1	若手研究者への意識調査	33
8.2	調査結果まとめ	33
8.3	提言	35
第 9 章	今後の将来計画検討委員会への引き継ぎと方向性	36
9.1	順位付けの維持について	36
9.2	高宇連のミッション実現力・サイエンス達成力のための人材育成・人材流動の拡充について	37
9.3	若手部会について	38
9.4	技術開発活動の情報共有（「技術ロードマップ」関連）	39
9.5	その他の項目	39
9.6	まとめにかえて～次なる課題～	39
付 録 A	「2040 年代のスペース天文学」研究会の成果概観	41
付 録 B	高宇連メンバーが主要メンバーとして参加する小型実験	42
B.1	超小型衛星	42
B.1.1	CAMELOT	42
B.1.2	NinjaSat	42
B.1.3	うみつばめ	43
B.1.4	Kanazawa-SAT	43
B.1.5	ARICA-2	43
B.1.6	Geo-X	44
B.1.7	SONGS	44
B.1.8	うみつばめ 2	45
B.1.9	MoMoTarO (Moon Moisture Targeting Observatory) 計画	45
B.2	気球実験	45
B.2.1	GRAINE (Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion)	45

B.2.2	SMILE-3 (Sub-MeV/MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiments 3)	46
B.2.3	GRAMS (Gamma-Ray and AntiMatter Survey)	46
B.2.4	miniSGD	47
B.3	連携ミッション	47
B.3.1	OHMAN	47

第1章 はじめに

本ドキュメントは、第4期将来計画検討委員会によりまとめられたものである。内容は原則として2023年2月28日時点のものとして各方面から取りまとめた情報に基づいている。その後の情勢変化については、第5期以降の将来計画検討委員の下で議論されることに注意されたい。

1.1 将来計画検討委員会の役割

高エネルギー宇宙物理連絡会(以下、高宇連とよぶ)は、宇宙における高エネルギー現象を研究する分野のうち、地上からの観測が困難で飛翔隊を用いる電磁波帯域、特にX線やMeV・GeVガンマ線の観測的研究を行う研究者を中心に、関連する分野の研究者も含めたコミュニティである。高宇連は、今後15~20年にわたるロードマップを作成し将来像を示すために将来計画検討委員会を設置し、「日本が関与する飛翔体を用いた高エネルギー天体物理学のロードマップ案」を答申させることとした。ロードマップ作成においては、以下が求められている。

- (1) 「科学的価値」を第一の指針とする。
- (2) 提案されている計画の優先順位を議論し、今後15~20年程度を見据え、世界の動向を考慮した上で、日本の高エネルギー天体物理学のあるべき将来像をまとめる。
- (3) ロードマップを策定するにあたり、閉鎖的な議論を排し、広くコミュニティ内外から意見を聴取することを理念とする。

高宇連将来計画検討委員会の委員は、高宇連会員推薦により選出された内部委員6名と、内部委員の推薦により選出された外部委員2名から構成される。第4期将来計画検討委員会は2020年10月から活動を開始した。

1.2 第4期の活動の概要

発足

第4期将来計画検討委員会は2020年10月に発足した。委員のメンバーは、中澤知洋(名古屋大学、委員長)、内田裕之(京都大学)、河合誠之(東京工業大学)、野田博文(大阪大学)、山崎典子(ISAS/JAXA)、渡辺伸(ISAS/JAXA)、戸谷友則(東京大学、外部委員)、長尾透(愛媛大学、外部委員)である。第3期のロードマップ検討まとめは、2021

年1月30日に答申された。これは高宇連内部向けページから閲覧可能である。第4期の将来計画検討委員会では、この答申の2年ごとの更新を目的としつつ、新たに若手の高宇連への要望を集める活動（若手部会）、現在検討中のミッションの「さらに次」の議論を進めるための「2040年代研究会」の開催方針を決め、2021年3月の高宇連総会で方針を発表して、活動を開始した。

マスタープラン 2023 対応

活動開始後ほどなくして、学術会議よりマスタープラン 2023 への推薦の依頼があった。これは想定より早く、第4期任期の答申の予定時期(2022年末ごろ)より一年も前に結論を出す必要があった。特に今回は、高宇連の関わる大型の計画について、位置づけでの区別などをせずに、コミュニティとしての「一律の順位づけ」をすることが要求された。これは、第3期の答申では区別していた、国際大型ミッションへの参加、高宇連主導の衛星計画、高宇連が他分野と連携して進める衛星計画という、3種類の異なる性質・規模のミッションを、一律に順位づけをする必要があることを意味する。従来の将来計画検討委員会の陣容では足りないと判断されたため、当時の運営委員長鶴氏とも調整の上、将来計画検討委員8名に加え、運営委員6名も含めたMP2023タスクフォース(MP2023TF)の設置を2021年4月9日に決めた。委員長は玉川氏と決まった。

MP2023TFでは、2021年5月19日の会合で宇宙研の理学委員会でワーキンググループ(WG)活動を実施している4計画のPIも含めて議論すべきと結論し、以後は18名体制(プラス事務局)で活動した。ここでの議論は、第5章にまとめた。結果として、重点大型研究計画(3件まで順位付け)として、AthenaとFORCEを同率1位で、HiZ-GUNDAMを3位で推薦する文書を、学術会議物理学委員会の天文学・宇宙物理学分科会へ、2021年10月18日に提出した。

若手部会

並行して、2021年3月の高宇連総会での報告で、正式に「若手部会」を発足させた。これは、委員長(中澤)の下で、若手の委員である内田氏と野田氏をメンバーとする部会である。内規などに規定のある組織ではなく、第4期個別の活動として始まったものである。若手部会では、高宇連のPDや助教を中心とする若手のメンバーから見て、高宇連がコミュニティとしてなすべきことについて、若手の視点での意見集約を進めた。この活動の成果については、2022年3月9日の高宇連総会において中間報告をし、その後、web formによる意見集約を進め取りまとめをし、本答申の第8章にまとめている。

2040年代のスペースミッション研究会

また、現在検討が進められているミッション案の「次のミッション」をオープンに議論する場として「2040年代のスペース天文学」という研究会を2022年11月14-15日に名古屋大学で開催した。MP2023TF、すなわち2030年代前半のミッションの議論に多くの

時間がかかったため大きく遅れたものの、高宇連将来計画検討委員会単独の研究会ではなく、光赤天連と高宇連の共催として SOC/LOC メンバーを編成し、会場の提供も含めて名古屋大学素粒子宇宙起源研究所 (KMI) も共催とした。大型ミッションであれば 2040 年代、小ぶりのミッションであれば 2030 年代のものを視野に、サイエンスと、考えうるミッションについての大風呂敷的な発表を多数いただき、活発な議論が行われた。ここでの議論は、なるべくそのままの形で運営委員会に提供するものとし、このロードマップ答申の本文には含まない (Appendix-A 参照)。

活動記録

当委員会は発足から 2022 年 12 月の間に、第 4 期将来計画検討委員会単独の会合を 6 回、MP2023TF のメンバーとしての会合を 8 回開催してきた。その他、2021 年 3 月 8-10 日の高宇連研究会での全体方針の説明、2022 年 3 月 9-10 日の高宇連研究会での近況の報告を行い、進め方について高宇連会員のフィードバックを得つつ議論を進め、春秋の学会時期に開かれるインフォーマルミーティングでも現状報告をしてきた。外部委員の長尾氏を通じて、光赤天連の将来計画委員長との会合なども数回開いており、その他、宇宙研の國中所長や研究総主幹の吉田教授ほかとの懇談会も開催している。

本答申は、これらの成果のまとめである。2022 年後半より執筆を始め、冒頭でも述べたように、2023 年 2 月 28 時点までの情勢を取り込んで執筆されている。

第2章 宇宙物理学の目的

宇宙物理学の最大の役割の一つは、人類の宇宙観、世界観を更新し、宇宙の歴史の中で我々人類が存在するその立ち位置を、事実に基づいて理解できる足場をもたらすことである。世界の広がりや宇宙の歴史の短さや天体進化の歴史を知り、我々が今ここにいる経緯を知ること、地上では想像もできないが宇宙には当たり前存在する極限の物理現象を理解することは、人類にとっての知のフロンティアの開拓であり、若者はじめ人類の好奇心を刺激し、人類の知識や活動領域の地平線を広げる、人類にとって欠かせない本質的な活動の一つである。

宇宙物理学はこれまでも、人類の宇宙観を根本から覆す成果を上げてきた。宇宙は定常ではなく、静寂でもない。その開闢から138億年であり、現代宇宙はビッグバンの影響が色濃く残り、ダークエネルギーがダークマターを超えて台頭し始めてきた、まだまだ大きく進化をしている途中の段階にある。量子論的な揺らぎからインフレーションによる急激な膨張をへて時空が平坦となり、ビッグバンによって多様な粒子を生み出し、数十億年にわたって減速膨張を続け、そして今、ダークエネルギーによって再び加速膨張を始めているとされる。我々が今見えている宇宙はそのごく一部で、はるかに広大な宇宙が広がっていると考えられる。宇宙空間の臨界密度のうち3/4がダークエネルギーであり、残る1/4の大半もダークマターが占め、我々の周りに存在するバリオン物質（と付随するレプトン）は1/20にすぎないとされる。そのバリオンの大半は銀河間空間の高温ガスとして存在すると考えられているが、その観測は少なく、どのように宇宙に分布しているかは未だに不明な点が多い。すなわち宇宙物理学の発展により、人類は「自らの宇宙の99%を知らないこと」を知っているのである。宇宙物理学の最重要問題の一つが、この描像そのものの検証及びその起源の理解にあることは論を待たない。特に、インフレーション理論の観測的検証、ダークエネルギー・ダークマターの実体の解明、そしてバリオンの分布を知ることが、宇宙の枠組みを知る上で極めて重要な、喫緊の課題である。

一方で、我々の住む宇宙は、巨視的に平坦な宇宙から始まったにもかかわらず、多様な物質、物質構造、物質状態からなる複雑かつ豊かな世界である。これは重力によって物質がより集まって天体を形成し、大きな重力エネルギーを解放しつつより重力ポテンシャルが深くなって行く不可逆でカオスチックな進化の中で、バリオンなどの物質が様々な密度やエネルギー状態を経験し、多様な相互作用を起こしているためである。天文学・宇宙物理学の究極の目的は、「我々を取り巻く世界」を観測し、その形成過程を理解し、「我々の来し方行く末」を知ることにある。そのためには、複雑な物質世界の現在の様子を詳細に調べ、その時間発展を過去にさかのぼり、または未来へ延長し、今の宇宙のあり様を支配する諸現象を理解することが必要である。希薄な銀河間空間物質から、白色矮星や中性子星などの縮退星、そして極限の天体ブラックホール (BH) で、また、数 K の

冷たい分子雲から PeV を超える相対論的高エネルギー粒子まで、宇宙の現象を隅なく捉えることが必須である。ここには、活動銀河中心核 (AGN) やクェーサーを生み出す巨大 BH の起源や銀河との共進化の理解、超新星やガンマ線バーストなどの爆発現象とその周辺環境の解明、元素の起源と化学進化の解明が含まれ、さらには、系外惑星や地球外生命の探索などとも深く関連している。

また、我々が自然界を理解するために基礎としている物理学は、例えば量子力学と一般相対性理論の統合がまだできておらず、ダークマターやダークエネルギーの正体もわからないなど、いまだ解明できていない根源的な謎を多く抱えている。宇宙でしか実現しない極限の環境を観測しあるいは実験することで、宇宙を支配する根源的な物理法則を検証・解明することも、宇宙物理学に課された大きな課題である。

第3章 高エネルギー宇宙物理学が明らかにすべき課題

3.1 X線からGeVガンマ線による宇宙観測の特徴

高宇連は、X線からガンマ線、光子エネルギーにして keV から GeV までの帯域で宇宙の高エネルギー現象を観測研究するコミュニティである。地球大気の吸収があるため、人工衛星やロケット、大気球といった飛行体を用いた観測を必要とし、フロントエンドの観測方法は多様であるが、光子と検出器の相互作用の基礎物理、信号の読み出しや観測システムの構築などの基礎技術には共通性が高い。対象とする天体からの高エネルギー放射プロセスは、数百万度から数億度の高温ガスからの熱的制動放射、非熱粒子加速と加速粒子からの高エネルギー放射、電離ガスと中性ガスの電荷交換による輝線放射や、原子核反応による核ガンマ線や電子陽電子対消滅、そしてこれらが周辺の物質とコンプトン散乱した成分や光電吸収に伴う蛍光輝線放射などである。電波から赤外線、可視光、紫外線、X線、MeV ガンマ線、GeV ガンマ線、TeV ガンマ線に到る「多波長天文学」、さらに近年では重力波とニュートリノ観測も加わった「マルチメッセンジャー天文学」による統合的な宇宙物理の推進にあたって、X線からGeVガンマ線の帯域はあらゆる高エネルギー現象と深い関わりを持つ。宇宙の動的な場面や突発現象に必ず関わっている高温プラズマや、加速粒子の放射を探る、欠かすことのできない役割を果たしている。

X線宇宙観測の特徴として、熱的・非熱的制動放射の連続成分の観測で、電子温度や加速電子のエネルギースペクトルを得られることに加え、炭素から、シリコン、鉄とニッケルなどの重元素までの原子の蛍光輝線が観測でき、重元素分布やその生成の物理、ドップラー効果を用いたプラズマの運動、さらには重元素の電離度やリコンビネーションコンティニウム、コンプトンショルダーと呼ばれる輝線周囲の構造を用いることで、これを放射するガスの密度、イオンの電離温度、電子温度の情報を独立に得ることも可能である。MeV ガンマ線では 511 keV の対消滅線や核ガンマ線輝線があり、陽電子の生成や重元素生成とその速度空間分布、ハドロン粒子加速に伴う原子核反応の情報が得られる。MeV ガンマ線を超えると輝線はなくなるが、パイ中間子などに由来する特徴的なスペクトルの膨らみを持つ。

加速された電子や陽子など、非熱的な高エネルギー粒子の研究では、電波、赤外、可視光から、X線、MeV ガンマ線、GeV、TeV ガンマ線の多波長観測を用いて、非熱的放射を熱的なそれから分離し、非熱的な宇宙を探ることが重要である。中でもX線帯域は超新星残骸 (SNR) 中の PeV 電子がシンクロトロン放射をする最高エネルギーに当たる。また、数 keV の高温プラズマから非熱的な粒子が加速され始める時の MeV 粒子の放射も、硬X線や MeV 帯域に現れる。原子からの輝線を観測し硬X線の連続成分と比較すれば、

光励起か高エネルギー粒子励起かも弁別できる。数十 MeV より上ではパイ中間子の放射も現れる。このように、X線から MeV、GeV に到る帯域は、粒子加速物理を探る重要な窓である。

この帯域ではまた、偏光と短時間変動も重要な情報を持つ。シンクロトロン放射とコンプトン散乱は、最大で数十%もの偏光を生みうる相互作用であり、磁場のオリエンテーションや散乱体と放射源の位置関係など、多くの情報をもたらす。X線ガンマ線を生み出す天体現象は、コンパクト天体や恒星、BHからのジェットが関わるものが多く、マイクロ秒から数日という比較的短い時間での放射の変化を探ることが、物理現象の理解に直結するため、近年注目されているタイムドメイン天文学の分野においても、重要な役割を果たす。

3.2 取り組むべき課題の大枠

観測感度の向上により、恒星から銀河団に至るまで、星間ガスから極限のコンパクト天体である中性子星やブラックホールまで、あるいは惑星も含めて、宇宙の天体のほぼ全てが何らかのX線あるいはガンマ線放射をしていることがわかっており、宇宙の天体のあらゆる階層で高エネルギー現象が起きていることの証拠である。飛翔体を用いた高エネルギー宇宙観測では、以下の3つの大目標の下で、観測および理論研究を進めている。

3.2.1 宇宙の物質・空間のあり方と起源

宇宙の物質の主成分であるダークマターとミッシングバリオンの分布・実体の解明、およびそれらを用いた密度ゆらぎ成長過程の定量的理解は、高エネルギー宇宙物理学における特に重要な課題である。

- (1) ダークマターと宇宙論：ダークマターの大局的空間分布からは宇宙のゆらぎの成長過程を、また局所的な性質からはダークマターの相互作用を制限することができる。ダークマターの間接観測は、宇宙で最も大きな重力的束縛系である銀河団においてよく行われている。可視光観測での背景銀河が手前の銀河団の重力によって歪む「弱い重力レンズ (Weak Lens; WL)」観測の進展は、ダークマターの2次元射影分布を探る主要な手段として近年急速に台頭してきた。銀河団中のバリオンの8割以上は星ではなくX線を発するような高温のプラズマ「銀河団内物質 Intracluster medium (ICM)」であり、ダークマターが作る重力ポテンシャル内を満たしている。このICMをX線観測することで、静水圧平衡などの仮定は必要だが、WLとは相補的に、ダークマター分布を推定できる。ICMはCMB光子と散乱して生じるSunyaev-Zeldovich効果でも観測でき、X線測定による温度情報があれば、その密度分布も得られる。複数の異なる手法で一つの物理量を測定できることは、3次元構造の影響など、測定システムの誤差を知る上で重要である。ICM総量を精度よく測定できれば、宇宙膨張の測定、CMB揺らぎ、大規模構造の空間分布といった手法とは独立な形で、宇宙論パラメータの制約も可能となる。

- (2) バリオンの主成分 WHIM の状態探査：宇宙の時空を支配するのはダークマターやダークエネルギーであるが、天体现象のほとんどはバリオン物質が鍵を握っている。分子雲や銀河、銀河団プラズマなどはその一部に過ぎず、およそ半分が希薄な銀河間ガスとして存在するとされる。近年急速に発展した Fast Radio Bursts での Dispersion Measure の観測によりその兆候が見えつつあるが、その存在形態はわかっていない。銀河間ガスの多くを占める可能性のある温度 10^5 – 10^7 K 程度の warm hot intergalactic medium (WHIM) は軟 X 線放射で観測でき、その温度や重元素量を知ることができる。これは、「宇宙のバリオン」の熱的および重元素汚染の進化の全体像を探る重要なツールとなる。

3.2.2 宇宙における多様性の発現

初期の宇宙は等温のプラズマ状態という実に単純なものであったにもかかわらず、現在の姿は極めて多様性に富む。水素とヘリウムから 100 を超える種類の元素が合成され、それぞれの原子が持つエネルギーも 10 K ($\sim 10^{-3}$ eV) の分子雲から 10^{20} eV の最高エネルギー宇宙線まで実に 23 桁のスケールに達する。また、大規模構造から銀河団、銀河群、銀河や星団、ブラックホール、恒星、ひいては生命の出現に必須な惑星系まで、多様な天体が織りなす階層構造が存在し、その広がりも 20 桁以上のスケールを持ち、いずれもが X 線ガンマ線の放射源である。これらの宇宙の多様性の発現過程の理解と、それを司る物理法則の解明は、宇宙物理学の重要な課題である。代表的なものとして、以下の 4 つがあげられる。

- (1) 銀河と巨大質量ブラックホールの形成：宇宙に存在する銀河とその中心にある巨大ブラックホールの質量は、概ね 1000 : 1 の関係にあり、両者は相互作用しながら共進化してきたことを示す。巨大ブラックホールの多くは、塵やガスに隠されていることが知られている。ブラックホールの成長にはこれらの塵やガスが欠かせないため、強い吸収をもつブラックホールの観測が欠かせない。実際、巨大ブラックホールの質量降着の積分を反映する宇宙背景 X 線放射 (CXB) のスペクトルは 30 keV にピークを持ち、そこには強い吸収を受けた天体の寄与が大きいとされる。これらのことから、銀河と巨大ブラックホールが共に進化する過程をさぐるためには 30 keV をカバーする高エネルギー帯域での観測が必要である。また巨大質量ブラックホールからのジェット放射は、星間ガスを吹き飛ばし星生成を停止させる威力を持つが、これはガンマ線で最も明るく輝くため、ブラックホール進化とジェット形成の関連を探ることも X 線ガンマ線において重要である。現在の X 線やガンマ線による高エネルギー宇宙観測は位置分解能と有効面積において光学・電波域での観測に及ばないが、高エネルギー放射は吸収を受けにくいために遠方まで、そして密度の高い部分まで見通せる優位性を持つ。
- (2) 最初の天体と宇宙再電離：ガンマ線バースト (GRB) のうち継続時間が数秒以上と長いものは、大質量星の重力崩壊型超新星爆発にともなう相対論的なジェットに由来すると考えられる。遠方の銀河の中で発生する割合も高く、現在では $z > 8$ の天

体も発見されている。この現象をプローブとして用いることで最遠方の宇宙を見通すことが可能である。宇宙は $z \sim 1000$ で一度中性化した後、現在に至るまでの間に再電離したことが示唆されているが、その具体的な過程はいまだ明らかにはなっていない。 $z \sim 10$ における最初の銀河形成・星形成に伴い放射された大量の紫外線以上のエネルギーをもつ光子が原因とする説が有力であり、ガンマ線バーストを用いて遠方宇宙の様子を探ることが解明の鍵となる。

(3) 宇宙の化学進化：宇宙初期にはほぼ水素とヘリウムのみであった元素組成は、星形成とそれに伴う超新星爆発等により現在の宇宙組成になったと考えられている。その空間分布および時間発展は、銀河形成、惑星形成などとも深く関連する。超新星爆発とその残骸からの、核ガンマ線 MeV 放射、蛍光輝線 X 線放射の観測は、重元素の合成の情報を直接もたらすものである。熱核暴走型の超新星爆発も、重力崩壊型のそれも、いずれも発生メカニズムと結果としての重元素のイールドの理論的な予測に大きな不定性を抱えている。ニュートリノや乱流も関係する超新星爆発の複雑さから、MeV ガンマ線や X 線観測によるモデルの制限は欠かせない。星の重元素量は太陽に代表されるように数十億年前の重元素量を封じ込めているのに対し、バリオンの大半を占める高温プラズマの重元素量の観測は現在までの重元素組成とその拡散に関する情報を与える。2017年8月17日には重力波観測により史上初の連星中性子星の合体事象が観測され、可視光観測との比較から r-process によってランタノイド系の重元素が作られることが示された。今後は電磁波対応天体の観測などを通して、宇宙の r-process 元素を全て説明できる事象になりうるかの研究が進むであろう。銀河団の ICM に広く広がる重元素も、星の空間分布よりも優意に大きく広がっており、どのようにしてそこまで広く拡散されているのか、決して自明ではない。宇宙の化学進化の理解には X 線、MeV ガンマ線観測が欠かせないのである。

(4) 相対論的高エネルギー宇宙現象：ブラックホールへの質量降着のような極限的な状況下でも、粒子の獲得する運動エネルギーは自らの静止エネルギーを超えないが、実際にはそれ以上の相対論的運動エネルギーをもつ「宇宙線」が存在しており、その最大エネルギーは 10^{20} eV に及ぶ。宇宙線のエネルギー密度は、我々の銀河の星間空間におけるエネルギー密度の最大成分であり、宇宙マイクロ波背景放射に匹敵し、磁場や分子雲のそれを上回る。近年の X 線やガンマ線の観測により、超新星残骸が、宇宙線の Knee 領域までを説明する宇宙の「加速器」であるという証拠を得ている。X 線シンクロトロン放射を用いた観測は統計加速による少数粒子への選択的エネルギー注入による宇宙線加速の現場の解明の鍵である。しかしいくつかの課題も見つかっている。まず、PeV 粒子まで加速している超新星残骸が少ない。次に、宇宙線の分布の主要を占める GeV 領域の粒子加速はどこで実際に起こるのか明確でない。宇宙の高温プラズマの典型的な上限温度である数 10 keV のエネルギーから GeV までを繋ぐ、いわば粒子加速の始まりといえる「MeV エネルギーの粒子」も、どこにどう存在するのかわかっていない。knee エネルギーを大きく超え、銀河を容易に抜け出してしまう 10^{20} eV のような高エネルギー粒子の加速源としては、ガンマ線バーストあるいはブラックホール近傍時空からの相対論的ジェット、銀河団での Mpc スケールでのプラズマの衝撃波などの可能性が議論されている。最近の高エ

エネルギーニュートリノイベントと活動銀河核ジェットフレアの同期現象は、この議論に大きなインパクトを与えた。粒子加速は、地球大気内の雷雲、磁気圏、太陽フレア、超新星残骸、中性子星からのパルサー風、ブラックホールジェットやアウトフロー、銀河団衝突など、宇宙のあらゆる規模で、プラズマの動きのあるところ必ず発生していることが分かっているにもかかわらず、実際の粒子加速の様子はいまだに解明できていない。また、ブラックホールのジェットも相対論的な速度を持つが、その発生機構、構成粒子、加速機構はいまだに不明な部分が多い。高エネルギーニュートリノとともに、新たな情報を付加したX線ガンマ線観測、さらにはその偏光観測が望まれる。

3.2.3 物理学の根本原理の追究

我々が宇宙の起源等を考える時に、基本的な物理法則は時間変化せず、宇宙初期あるいは遠方でも適応可能であることが前提となっている。ただし、ニュートンの重力理論が相対性理論で修正されたように極限状態への外挿は仮定に過ぎない。中性子連星 PSR1913+16 の連星周期変化が重力波放出の証拠として説明されたように、極限状況の天体観測が物理学の根本原理の検証、あるいはその修正へとつながる可能性がある。近年は重力波観測の劇的な進歩により、ブラックホール同士、あるいは中性子星同士の合体事象が観測され始めたが、これらをプローブとして、今後ますます基礎物理学の理解が深まるであろう。高エネルギー宇宙物理学はここでも下記のような欠かせない役割を果たす。

- (1) 極限重力場：ブラックホールのような極端に強い重力場での重力理論の検証、あるいは大規模構造のような超長距離での重力場の検証は天体観測によってもたらされる。ブラックホールや中性子星といった超強重力場、超高密度物質からなる系からは高エネルギー放射が生じており、現在でも降着円盤内縁付近からの放射輝線の赤方偏移プロファイルなどからブラックホールの角運動量を測る試みがなされている。これは電波干渉系による「撮像」の試みとならんで、ブラックホール周辺の時空を測定する有力な手法であり、突発的な事象に限られる重力波の観測と相補的で重要である。また、中性子星合体などの重力波現象の追観測による天体同定および現象の理解にあたっては、電波、赤外・可視とならんで、X線観測も重要である。
- (2) 極限高密度物質：中性子星内部では超高密度状態であり、内部の状態方程式はクォークの多体系が支配するはずである。この状態方程式が中性子星の質量半径関係などを決定するため、中性子星の観測量が量子色力学に強い制限を与える。X線による放射スペクトルや時間変動から中性子星の半径に関する情報を得て、内部の状態方程式に制限を与えることができる。これも、重力波観測とは独立した検証手段として期待される。
- (3) 極限強電磁場：パルサー周辺では地上で実現できない超強力な電場が発生しており、相対論的かつ量子論的な効果が無視できない。フェルミ衛星の観測により、電波で見えていないガンマ線パルサーが半数近くもあることがわかってきた。よって、X線ガンマ線でパルサーをくまなく観測することがパルサー周辺の極限強電場に伴う

現象を理解するために重要である。粒子加速やマグネターに見られる爆発現象、さらには X 線ガンマ線偏光で探査検証される量子電磁気効果なども相対論的量子論的物理学法則の理解のために重要である。X 線偏光観測衛星 IXPE の活躍により、マグネター表面での 10^{15} G に及ぶ極限強電場の証拠も得られ始め、time resolved な広帯域観測や偏光観測によって、極限強電磁場の物理学の理解が進んでゆくと期待される。

- (4) 無衝突衝撃波：超低密度環境における物理プロセスにも未解明の点が多い。例えば、惑星間空間を伝搬する太陽風や、星間空間中を膨張する超新星残骸では衝撃波が形成されるが、遷移層の厚みは粒子のクーロン散乱による平均自由行程と比べて極端に短い。この事実は、流体の加熱・圧縮が、(大気中の衝撃波のような) 粒子衝突ではなく、電磁場を介して行われることを示唆する。これを「無衝突衝撃波」と呼び、同様の現象は衝突銀河団、AGN ジェットやガンマ線バーストなど様々な天体で観測され、宇宙における粒子加速を担う衝撃波の大半を占める。電子とイオンなど、異種粒子間のエネルギー散逸や宇宙線加速の機構を理解する上でも重要である。超精密分光や多波長スペクトル解析を通して衝撃波直後の熱的・非熱的エネルギーの分配を明らかにすることが問題の解明に繋がる。また、近年の電磁流体計算の精度の急速な向上は、磁気リコネクションの詳細の計算、その中での衝撃波の成立まで、整合的に計算できる段階に達しつつある一方で、その基礎物理学の妥当性はやはり観測によって検証することが必要である。X 線観測などと組み合わせることで、電磁流体に支配された無衝突衝撃波の理解が大きく進展すると期待される。
- (5) ダークマターと素粒子論：宇宙の重力を支配するダークマターの解明は宇宙を構成する物質エネルギーを理解する上で重要であるとともに、素粒子標準理論を超える枠組みの構築のためにも理解が必須である。§3.2.1 でも述べた、宇宙の大規模構造を支配する相としてのダークマターに加え、素粒子理論的な立場でのダークマターの探査も重要である。加速器実験、直接検出などの地上実験が行われているが、MeV 帯域や GeV 帯域では、ダークマターの崩壊や対消滅に伴う特徴的な輝線や、2 次生成物としての陽電子が生まれる可能性も指摘されており、その探査も重要である。地上実験では探査できないパラメータ空間を探査できるため、相補的で重要な役割を果たしており、今後も重要な解明すべき宇宙物理学の問題として様々な計画が立案されるだろう。

第4章 将来計画検討の前提条件

4.1 分野の動向

飛翔体を用いる高エネルギー宇宙物理学は、分野の特性上大型計画¹に偏りがちであるが、最近は特色ある超小型衛星計画なども進められるようになってきている。以下簡単に状況をまとめる。なお、科学目的としては天体物理学、素粒子分野と関わるような広い意味での宇宙物理学、太陽系/惑星物理学など様々な分野と（一部）共通であり、多岐にわたる。

4.1.1 日本の大型計画など

現在日本のコミュニティが大きく関与し、進行している衛星を用いた高エネルギー物理学ミッションについて列挙しておく。詳細はそれぞれの web page などを参照されたい。

運用中のもの

- Fermi Gamma-ray Telescope: 2008年に打ちあげられ、現在も運用中の数10 MeVから300 GeV帯域のガンマ線観測衛星。Large Area Telescope(LAT)の開発に広島大等の日本チームが関与した。優れた感度で全天マップを作製したほか、各種点源についてもスペクトルを取得している。サブ検出器のGamma-ray Burst Monitor (GBM)もGRB観測へ主要な貢献をしている。
- MAXI(Monitor of All Sky X-ray Image): ISS「きぼう」搭載の全天X線カメラ(0.5-30 keV)、理研、阪大、JAXAなどが開発に関与し、2009年から観測および変動天体の速報を続けている。
- IXPE(Imaging X-ray Polarimetry Explorer) : 2021年にファルコンによって打ちあげられた2-8 keVでの偏光を測定するNASA SMEX ミッション。日本からは理研、名古屋大が開発に参加している。

製作中のもの

- XRISM: 0.5-12 keVで精密撮像分光を可能とし、2023年に打ちあげ予定のISAS戦略的中型ミッションである。詳細は後述。

計画段階のもの

¹衛星規模による分類は国による違い等もあるので分類を厳密にするのは難しい。ここでは科研費等で実現できないもの、とする

- HiZ-GUNDAM : 30 cm 可視近赤外線望遠鏡と広帯域 X 線モニターを組み合わせ、遠方 GRB の即時観測を目的としたミッションで、2018 年度公募型小型科学衛星候補に選定された。2022 年末現在、プリプロ候補チームとして、ダウンセクションにむけたミッション探求フェーズにある。
- Athena : ESA L2 ミッションとして、2030 年代の大面積 X 線天文台として広視野撮像と精密分光観測を目指す。日本からは分光検出器の冷却系などに関与するものとして、戦略的海外共同計画の 1 つとしてミッション探求フェーズにある。2022 年に ESA で予算超過が課題となり、現在、New Athena として計画の見直しを実行中である。

構想段階のもの

- FORCE : 高い角分解能での硬 X 線撮像を手段とし、CXB の起源でもある埋もれた AGN の探索を主目的として、公募型小型衛星にむけた WG として活動してきた。
- 広帯域 X 線撮像ミッション : 宇宙理学 GDI のイニシアチブで時限 WG として発足した広帯域 X 線撮像分光ミッション。戦略的中型衛星の候補として、サイエンス定義とミッション定義活動を行なっている。

このほかに、制作中の海外の衛星計画への参加として、MeV 全点観測衛星 COSI が挙げられる。またその他の小規模な計画として、小型衛星の Geo-X と“うみつばめ”、気球計画の XL-Calibur、SMILE2、GRAINE、ロケット実験の FOXSI-4 などがフライトにむけた活動中であり、複数の超小型衛星の開発も進んでいる。

4.1.2 米国 (NASA) の将来計画

NASA の astrophysics の長期計画としては、decadal survey の report である Astro2020² による勧告、およびそれに基づくミッション公募に留意すべきである。Astrophysics の主要 3 目的として

- (1) Worlds and Suns in Context
- (2) New Messengers and New Physics
- (3) Cosmic Ecosystem

の 3 つがあげられ、主に高エネルギーが関わるのは (2) の時間変動天体 (ただし photon 以外のマルチメッセンジャーに重点が置かれている)、および (3) の銀河と銀河間空間の相互作用および進化に関することであろう。宇宙機による観測としては、Great observatory としてはまず紫外から近赤外の 6 m 級の宇宙ミッションが第一候補で、そのための技術開発活動が継続される。次に赤外あるいは X 線ミッションを考える (\$ 3-5B) とされている。そのための Probe mission は \$ 1B のコストキャップで、遠赤外線または X 線ミッ

²<https://nap.nationalacademies.org/resource/26141/interactive/>

ションが検討され、最短で 2030 年代初頭の打ち上げを考えている。³ このプローブのスケジュールとしては、2023 年 7 月に正式 AO の発出、それから 3 ヶ月で締め切り、その後 5 ヶ月で selection、2025 年に Down selection の予定で、打ちあげ目標は 2032 年となっている。現在遠赤外線、X 線ともに複数のミッション候補が活動を行なっているが、X 線では HEP-X、AXIS、LEM、Strobe-X など複数存在している。また MIDEX、SMEX などの Expore class ⁴も相変わらず公募は続くものと思われるが、海外協力については同時に複数走らせない、という方針が示されている。現在 2027 年打ち上げ予定で、SMEX ミッションとして MeV 全天観測衛星 COSI の開発が進んでおり、東京大学および名古屋大学が参加している。2021 年度公募 MIDEX では Star-X、UVEX が phase-A study に選出され、down selection にむけた study 中である。

4.1.3 ヨーロッパ (ESA) の将来計画

ESA の科学観測プログラムとしては、Horizon に続き Cosmic Vision 2015-2025 というプログラムとして、S-、M-、L-、fast class ミッションを計画している⁵。S1、M5、L3、F2 までの選定がされているが、高エネルギー宇宙物理学としては、L2 ミッションとして、“Hot and Energetic Universe” の解明を目指す国際大型 X 線宇宙望遠鏡 Athena 計画が進められている⁶。Athena は、Silicon Pore Optics を用いた m^2 級の大型鏡に、TES 型カロリメータアレイを用いた精密分光検出器 X-IFU と、DEPFET による大視野撮像装置 WFI を組み合わせたものである。当初予定では 2023 年に Mission adoption の予定であったが、ESA 負担分（冷却系を含む衛星バス部、X 線ミラー、打ちあげ、運用等）の大幅なコスト超過のために費用削減のための見直しが 2022 年 9 月から始まっている。今後の計画等については 2023 年に ESA 内で議論、スケジュールがされる予定となっている。高宇連は 2022 年の見直し開始の際に、コミュニティの意見をきかずに急激な見直しあるいはミッション終了を行なわないよう ESA SPC メンバーへのレターを発出した。

Cosmic Vision の次の計画をきめるべく、Voyage 2050 ⁷という white paper のコールやシンポジウムが行われた。その結果、

- (1) Moons of the giant Solar System planets
- (2) From temperate exoplanets to the Milky Way
- (3) New physical probes of the early Universe

の 3 大テーマが選出された。詳細レポート中の Potential Scientific Themes for Medium Missions の中には、“Multiphase ISM”、“Accretion by Compact Objects and Astroparticle Physics”、“Mapping the Cosmic Structure”、“Absorption Lines in the UV and X-rays”などが上げられ、また Technology Development Recommendations の中には、“X-rays in High Resolution” や “X-ray Interferometry” が触れられている。

³<https://explorers.larc.nasa.gov/2023APPROBE/>

⁴<https://explorers.gsfc.nasa.gov/index.html>

⁵<https://sci.esa.int/web/cosmic-vision/>

⁶<http://www.the-athena-x-ray-observatory.eu>

⁷<https://www.cosmos.esa.int/web/voyage-2050>

4.1.4 その他

欧米以外にも、中国、インド等でも宇宙科学ミッションの計画は行われ、Astrosat (インド、2015 -)、Einstein Probe (中国、2023 予定?) などの実行が進んでいる。今後も同様な動きは続くと考えられる。これらの国際協力については、一定の地政学的リスクはあるが、安全保障貿易管理のもとでの個々の研究者としての参画は可能であろう。

4.2 宇宙科学研究所の科学ミッションの枠組み

JAXA 宇宙研の科学ミッションの枠組みは、宇宙科学探査ロードマップ (RSQ-2019004C) によりまとめられている⁸。ミッションのカテゴリーとしては、H3 を用いた戦略的中型 (10年で3機程度、最大400億円/機)、イプシロンロケットを用いた公募型小型 (10年で5機程度、最大180億円/機)、戦略的海外共同計画 (10億円程度/年)、小規模計画 (数億円程度/年) の4つが上げられている。戦略的中型に関しては、純粋なボトムアップでのミッション構築が難しいことことから、宇宙科学コミュニティと宇宙研研究系の協力による戦略的中型グループ (GDI) が設置されている。公募型小型に関しては、最大180億円まで拡大されたことに伴う全体のコストバランス (平均～150億円) のため、費用を100億円程度に押さえた ECO 公募の可能性が検討され、スタディモデルケース選出がされた。小規模計画が、大学共同利用機関としての宇宙研がフォローすべきという観点で、ロケット実験等もふくめ幅広い対象に広げているが、費用枠は非常に少ない。別途観測ロケット実験公募、大気球実験公募があるが、対象、費用補助の範囲などについては様々な条件がある⁹。これらのカテゴリーの見直しによる、海外大型計画へのジュニアパートナーとしての参画についても、政府委員会等では議論がされている。

4.3 日本における宇宙科学に関連する超小型衛星のプログラム

上記スキームに載らない、超小型衛星プログラムは、いわゆる相乗り公募として様々な可能性がある。民間以外のいくつかのプログラムについて記す。

- ISS きぼうからの超小型衛星放出¹⁰ : 1U-6U、50kg 級まで、20機以上の実績がある。JAXA 有人宇宙部門が実施。
- HIIA および H3 での相乗り打ちあげ : JAXA は Space BD を相乗り事業者とし、機会提供を行なっている。

⁸毎年改訂がある。理工委員会 [webhttps://www.isas.jaxa.jp/home/rikou/roadmap/roadmap_20220406.pdf](https://www.isas.jaxa.jp/home/rikou/roadmap/roadmap_20220406.pdf)、宇宙科学・探査部会の資料 <https://www8.cao.go.jp/space/> などで見られる。

⁹例えば気球実験では装置、ゴンドラ、旅費も含めて PI 側の費用負担である。

¹⁰<https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/provide/j-ssod/>

- 革新的衛星技術実証プログラム¹¹:このプログラムではJAXA研開部門による実証衛星1機と小型衛星を同時に打ちあげる。小型衛星は50kg級を3機まで、超小型は合計9Uまでとしている。現在4号機までのテーマ選定が終了したところ、ただし3号機（イプシロン6号機）については、打ちあげ失敗があった(2022年10月)。
- 拡充プログラム¹²: 6U、12U（衛星開発フェーズ：5000万～2億円）と、50kg以下衛星（フィージビリティスタディ、500万以下）がある。打ちあげ手段は採択時には決まらないこともある。宇宙科学観測も対象ではあり、#1公募では、九州工大による宇宙可視光背景放射観測衛星(6U)が採択された。JAXA新事業促進部の事業だが、宇宙科学に関するものについては宇宙研（理工委員会）が選考に協力および共同研究として実施する可能性もある。

¹¹<https://www.kenkai.jaxa.jp/kakushin/index.html>

¹²<https://aerospacebiz.jaxa.jp/expansion/call-for-mission1/>

第5章 高宇連が推薦する大型ミッションとその戦略

前章の概要を受けて、本章では、高宇連が関係して推進している宇宙科学ミッションを項目ごとに分けて記述する。高宇連のメンバーが中心となって開発を進めている大型ミッション、高宇連が他分野と連携して分野横断型で進めている大型ミッション、そして将来のこれらのミッションを検討しているリサーチグループ(RG)についてまとめる。次の章では、高宇連のメンバーが海外ミッションへ一定規模で参画している例をまとめる。

5.1 高宇連が推薦するプロジェクト

5.1.1 XRISM(X線分光撮像衛星 X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission)

銀河から宇宙の大規模構造まで、宇宙のさまざまな天体の形成と進化を理解することは、宇宙物理学の大目的の一つである。宇宙のさまざまなスケールの天体は、物質とエネルギーの流れのなかで進化するダイナミックな構造であり、これを理解するためには、物質の運動とエネルギーの流れをとらえ、現在の形にいたる歴史を明らかにする必要がある。天体を構成するバリオンのうち多くは、高温プラズマで占められており、放射されるX線輝度分布は質量分布の指標となる。さらにその特性X線を分光することで、天体の運動を含めた動的な描像を得ることができる。これによって、動的な描像のなかで現在の様子を捉えることができる。これは、宇宙物理学においてX線観測が担うべき重要な役割の一つである。

X線を放射するようなバリオンの運動エネルギーを調べ上げるためには、少なくとも銀河の自転に相当する100 km/s程度の速度を、銀河相当の100 kpc単位で空間分解しながら調べる撮像・分光能力が求められる。この撮像と超高分解能X線分光を世界で初めて実現したのがASTRO-H(ひとみ)に搭載された、軟X線望遠鏡とX線CCDカメラ、そしてX線マイクロカロリメータの組み合わせである。「ひとみ」は、軟X線分光の他に、軟ガンマ線までの広帯域分光による極限宇宙の解明を掲げ、高宇連をはじめ国際的な科学コミュニティの支持をうけ、共同プロジェクトとして推進されたが、2016年3月の事故により、わずか1か月で運用停止となった。この事故を受けて国内外のコミュニティは、「ひとみ」の目的と成果を継承するミッションの早急な構築を求めた。そして、「ひとみ」の科学目的のうち、「物質とエネルギーの流れが作り出す宇宙の構造を高温プラズ

マの観測によって解明する」という科学目的にフォーカスしたのが、本計画であり、高宇連を母体として 2018 年 初頭にミッション要求された。

2018 年 7 月に JAXA プロジェクト「X 線分光撮像衛星 (X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission: XRISM) 計画」として、正式に発足した。現在、多くの高宇連メンバーの参画はもとより、NASA および ESA の協力も得て、2022 年度の打上を目指して開発が進められている。この計画は、これまでの観測の精密化や検証にとどまらず、質的に異なる天体物理学やプラズマ物理学を作り出すと期待されており、以下の 4 つのテーマをミッションの科学目標 (Scientific Objectives) のもと「超高分解能 X 線分光で拓く宇宙の新たな地平」の展開を企図している。

- 1 「宇宙の構造形成と銀河団の進化」の研究のため、銀河団という宇宙最大の重力的に束縛された天体における熱的エネルギーと非熱的エネルギーの分布と散逸過程を観測し、銀河団の成長の様子を熱力学と動力学的の両面から直接観測する。
- 2 「宇宙の物質循環の歴史」の探究のため、恒星や超新星爆発による元素合成から、星間空間・銀河間空間に至るさまざまな階層の元素循環をトレースし、宇宙の元素組成の進化を直接観測する。
- 3 「宇宙のエネルギー輸送と循環」の解明のため、銀河と活動銀河核による物質とエネルギーフィードバックの機構を観測し、銀河中心巨大ブラックホールと銀河の共進化に対する寄与を明らかにする。
- 4 「超高分解能 X 線分光による新しいサイエンス」の開拓のため、画期的な分光性能による宇宙プラズマ精密観測にかかわる診断方法の開拓、鉄輝線・吸収線の重力赤方偏移の探査など、X 線天文学の新時代にふさわしい観測に取り組む。

現在 XRISM では、打ち上げへ向けた開発完了審査を受ける段階に来ており、2023 年度には、打ち上げ、初期運用、そして定常運用へとすすむ準備をしている。XRISM は、打ち上げ後、初期校正と検証運用を行う。この期間の観測天体は、XRISM 科学チームで検討・決定され、既に公開されている。打ち上げ後、およそ 2 ヶ月をめぐり第一回の観測公募を行う予定であり、JAXA, NASA, ESA それぞれで行う審査によって採択された公募観測を打ち上げ後およそ 10 か月後から行う。定常観測期間は打ち上げ後 3 年間と定義されているが、その時点で、衛星が成果をあげておりまた健全な状態をたもっていれば、延長運用の提案も予定している。

5.1.2 Athena

European Space Agency (ESA) は、「Cosmic Vision (2015-2025)」として、今後 10–20 年程度の宇宙探査機を用いた宇宙科学の戦略を打ち出した。この中で、これから取り組むべき重要課題として「1. 惑星形成と生命の誕生」「2. 太陽系」「3. 宇宙の基礎物理法則」「4. 宇宙の歴史と構造」の 4 つを掲げている。2013 年 11 月、ESA は 2 番目に打ち上げる大型ミッションの科学目的として、「The Hot and Energetic Universe」を採用した。

そして2014年6月、これに対応するミッションとして、Athena衛星計画が採択された。Athena衛星に関する詳しい情報は、<http://www.the-athena-x-ray-observatory.eu/>に記載されている。Athena衛星には、Silicon Pore Optics (SPC) 技術に基づく大面積X線望遠鏡、TES X線マイクロカロリメータ (X-ray Integral Field Unit; X-IFU)、広視野DEPFET検出器 (Wide Field Imager; WFI) が搭載される。撮像分光によって発展してきたX線天文学を、大有効面積・広視野・高エネルギー分解能によってさらに発展させる大型天文台である。

日本がAthenaに参加する目的は、同じX線マイクロカロリメーターミッションであるひとみ衛星、XRISMの経験を元に、実行が確定している世界で唯一の大型X線天文衛星であるAthenaを成功に導き、それにより科学成果を得ることである。X線輝線の放出メカニズムの各々は比較的単純な物理に基づいているとはいえ、精密分光情報から天体の物理を引き出すための総合物理はまだ発展途上である。例えば、「ひとみ」衛星によるわずかな観測からですら、現行のプラズマX線放射コードにはまだまだ改善が必要なことがわかった。XRISM衛星が成功すれば、X線分光の威力を真に発揮するために必要な総合物理を手に入れることが出来るだろう。この知識をもとに、Athenaのサイエンスを成功に導く。日本におけるAthenaの活動は、宇宙科学研究所の戦略的海外共同計画として位置づけられている。

2022年6月以前は、Athenaハードウェアへの貢献として、日本はX-IFUの冷却系である2Kジュールトムソン冷凍機を提供するべく研究開発を行っていた。しかし、2022年6月のESA Science Programme Committee (SPC) Workshopにおいて、AthenaのESA負担額が約19億ユーロであり、もともとのコストキャップの10億ユーロを大きく超過していることが判明した。そこで、ESAは2023年に予定されていたmission adoptionを延期し“NewAthena”を新たに定義することを決定した。このNewAthenaは

- 約13億ユーロのコストキャップに収まること
- フラグシップ的なものであること
- これまでの資産をできるだけ使うこと

の条件を満たさなければならない。NewAthenaの構築のために、ミッションのテクニカルな面の検討をリードするMission Re-Definition Team (MRDT)、サイエンス面の検討をリードするScience Re-Definition Team (SRDT) が結成された。MRDT、SRDT、X-IFU consortium、WFI consortium、NASAとJAXAの国際パートナーらにより、NewAthenaの検討が進められている。日本からは山崎典子(宇宙研)がMRDTに、松本浩典(大阪大)がSRDTに加わっている。

2023年3月現在、ミッション面では、コストダウンのために主にX-IFU冷却系の簡略化が検討されている。これに伴い、日本のハードウェア貢献もジュールトムソン冷凍機から変更になる可能性が高い。一方サイエンス面では、NewAthenaの性能を規定するキーサイエンスの絞り込みが行われている。

NewAthenaのStudy Managerは、2023年6月SPC workshopにおいて、Phase Aに向けたInvitation-to-Tenderを発出するための許可をSPCからもらうこと、そして2023年末までにPhase Aをスタートすることを目標にしている。この場合、おそらくNewAthenaのadoptionは2027年以降になり、打ち上げは2030年代後半以降になると予想される。長きにわたってNewAthenaに関わり続けられる体制の構築が必須である。

5.1.3 FORCE (Focusing On Relativistic universe and Cosmic Evolution)

まず、冒頭に 2023 年 3 月時点での現状をまとめる。2022 年 5 月に発出され、同年 8 月末に締切が設けられた、公募型小型計画のミッションコンセプトの募集に、FORCE WG として提案をおこなった。2023 年 2 月末になり、推薦対象とはならなかった旨を伝える評価概要が送られてきた。最終選考の 2 件のうちの 1 件であり、ASTRO-H/XRISM の開発実績をベースに、それらを更に発展させた、魅力的で学術的価値が高い提案であると評価を受けた。一方で、相当額の海外協力が必須である点が、公募型小型の主旨に照らし合わせて評価を下げた理由ということであった。FORCE が掲げるサイエンスをむこう 10 年のタイムスケールで達成するためには、NASA/GSFC との国際協力が必須である。公募型小型の定義がこのように整理されたことに鑑み、WG 及び高宇連でも議論の上、今後、正式な通知を待って解散の手続をとることとした。一方で FORCE で推進してきたミッション検討は科学的価値が高く、形を変えた次のミッションに引き継がれつつある。

本ドキュメントは 2023 年 2 月時点での情勢をまとめるものであるため、以下、2022 年 8 月の提案時における FORCE の概要をまとめておく。

FORCE (Focusing On Relativistic universe and Cosmic Evolution) の科学目的は「宇宙における高エネルギー現象の根源的な物理プロセスを理解し、それが宇宙の進化にどのように影響を与えてきたのかを理解すること」である。そのために、「未知のブラックホール探査を通じた天体形成史の解明」、「宇宙に存在する非熱的エネルギーの起源と総量の解明」、および、「星の終末への進化経路と爆発機構の解明」を目標として掲げている。

多くの銀河の中心にある太陽質量の十萬 百億倍の質量を持つ巨大なブラックホール (以下 BH) とその母銀河のバルジ成分の質量との比例関係や、宇宙ジェットなどによる BH から周囲の環境へのフィードバックが示す通り、BH は宇宙進化のキープレイヤーの 1 つであり、宇宙の天体進化に決定的な役割を果たしている。しかしながら、その BH がいかにして作られ成長したかという点においては未知な部分が極めて多い。その理由は、吸収体に深く埋もれた銀河中心巨大 BH に代表されるように、これまでの観測では見逃されていた BH が多数存在するためである。本計画は、そのようなミッシングブラックホールを探査し、BH 全体の宇宙論的時間軸上の進化を明らかにする。

これまでの超新星残骸 (SNR) の X 線・ガンマ線観測により、銀河宇宙線の起源は SNR であるという描像が確立しつつある。特に、GeV/TeV ガンマ線観測の進展により、GeV 以上の宇宙線陽子については理解が進んできた。一方で、宇宙線の大部分を担う MeV 陽子については観測的情報が未だに限られている。また、銀河団においても、広い領域で動的な粒子加速が存在すること、様々な非熱的圧力の和が銀河団外縁でガス圧に匹敵することが示唆されているが、非熱的エネルギーの総量はわかっていない。本計画は SNR や銀河団の広帯域 X 線観測を通じて、このような相対論的粒子の起源と総量に関する未解決問題に挑む。

星の最深部から放出されるイジェクタの観測からは、超新星爆発における爆発メカニズムと元素合成に関する重要な知見が得られる。我々は若い超新星残骸の観測を通じて、Ti

や鉄族元素の量と空間分布を測定し、Ia 型超新星の爆発の起源や重力崩壊型超新星爆発の爆発メカニズムの謎に迫る。

上記の科学目的を実現するために、FORCE は ~ 10 秒角の結像性能を持つ高角度分解能スーパーミラーならびに、軟 X 線から硬 X 線までのワイドバンドに感度を持つ焦点面検出器を搭載する。開発体制は、日本が主導し、米国との国際協力を主軸とする。衛星システムと焦点面検出器は日本側が担当し、高角度分解能スーパーミラーは NASA/GSFC で開発している Si ミラーを搭載する予定である。焦点面検出器は軟 X 線と硬 X 線をそれぞれ担当するイメージャを一体化したハイブリッド型であり、「ひとみ」の資産を活用する。具体的には硬 X 線部は CdTe のストリップ検出器の改良型としつつ、軟 X 線部はシリコン両面ストリップ検出器から SOI-CMOS ピクセル検出器 (SOIPIX) に変更する。これによりエネルギー分解能の向上と軟 X 線への感度帯域の拡張をおこない、BH などからの非熱的放射の特徴である“時間変動する広帯域スペクトル”を精度よく捉える。このように FORCE は、「ひとみ」の広帯域 X 線撮像分光という概念を受け継ぎ、それを先鋭化させたミッションである。

5.1.4 JEDI (仮称)「広帯域 X 線撮像分光ミッション」

2022 年度から、戦略的中型ミッション提案の新しい方法として、宇宙理学委員会・宇宙工学委員会の傘下に GDI (Groupe de Discussion Intensive) が発足した。GDI の検討活動は、従来の公募によるミッション選定を改め、コミュニティとの議論を通して科学的価値と成立性のバランスを最適化したミッションを創出することを目的とする。GDI は宇宙物理、太陽系科学、工学の 3 分野に分かれ、各 GDI がおおよそ 3 年ごとの提案機会にそれぞれ 1 件以内のミッションを推薦することを目指す。宇宙物理 GDI は、直近の機会である 2024 年に推薦する中型ミッションの候補として「銀河進化惑星形成観測ミッション (GREX-PLUS)」と「広帯域 X 線撮像分光ミッション (仮称 JEDI)」の 2 つを検討中している。このうち後者が高宇連を支持母体とし、2022 年 12 月に宇宙物理 GDI による推薦の下、本ミッションの検討を推進するための時限 WG が発足した。

JEDI の検討は、過去の X 線ミッションおよび FORCE の検討のヘリテージを最大限活用することを念頭に進められている。具体的には、ASTRO-H の衛星バスをベースに、HXT/HXI の代わりとして FORCE が搭載を目指した硬 X 線望遠鏡および硬 X 線検出器を、SXT/SXI の代わりとして高角度分解能 (HPD < 10") 軟 X 線望遠鏡および広視野半導体検出器を搭載する。さらに、低バックグラウンドが実現する赤道 LEO への投入を検討している。これにより、例えば FORCE の主要科学目的の一つであった「吸収体に埋もれた巨大 BH」のサーベイ観測では、FORCE よりも短い観測時間で (低バックグラウンドのため)、より遠方の天体まで ($z \sim 6$; 軟 X 線に感度を持つため)、多数検出できると期待される。現在、サイエンス検討とシステム検討が並行して進んでおり、2023 年 6 月ごろを目標に、主要科学目的の絞り込みと搭載装置の選定を進める予定である。

5.2 高宇連が推薦する分野横断プロジェクト

5.2.1 HiZ-GUNDAM

HiZ-GUNDAM は、ガンマ線バースト (GRB) に代表される突発天体现象を観測することで、初期宇宙と極限時空の探査を革新的に開拓するミッションである。宇宙で最も明るい光源である長時間 GRB は、初代星を含む大質量星が爆発し、ブラックホールを形成する際に発生する現象と認識されている。その明るい残光現象を利用すれば、宇宙年齢が 7.7 億年よりも若い (赤方偏移が $z > 7$) の初期宇宙における、初代星・初代ブラックホール形成、宇宙再電離、重元素合成の歴史など、初期宇宙観測のフロンティアを開拓することが可能となる。さらに、近年の観測技術の進歩によって重力波や高エネルギーニュートリノが検出できるようになり、マルチメッセンジャー天文学が重要なテーマとなっている。ブラックホールの誕生と成長 (短時間ガンマ線バーストや潮汐破壊現象など)、物質の起源 (近赤外線キロノヴァや宇宙線加速など) が主要なターゲットとなる。ブラックホールが誕生した瞬間や、成長する過程で巻き起こる物理現象を X 線や近赤外線観測することで、極限時空周辺の物理現象を理解する。

以上の観測を実現する方法として、

- (1) X 線突発天体を約 10^{-10} erg/cm²/s の過去最高感度の広視野モニターで発見し、
- (2) 自律制御で衛星姿勢を変更した後、
- (3) 可視光・近赤外線望遠鏡で 20 等級 (AB)/10 分露光の感度で追観測を行う

特に、GRB を用いた初期宇宙探査の観点では、従来の地上望遠鏡のみによる追観測は限界にきており、高頻度・高感度なスペース近赤外線望遠鏡による迅速な赤方偏移の同定が望まれている。重力波源からのキロノヴァ現象は r 過程元素による強い吸収のため赤外線放射が卓越し、高エネルギーニュートリノ源はガス密度の濃い環境で生成されると予想されるため、マルチメッセンジャー観測にとっても広視野 X 線モニターと近赤外線望遠鏡は優れた組み合わせである。以上のような初期宇宙と極限時空の探求から、2020 年代の天文学・宇宙物理学全体の最重要テーマである「宇宙の物質と空間の起源」の理解に貢献する。また、近年の天文学で話題となっている、Fast Radio Burst、超高エネルギーニュートリノ源、恒星スーパーフレア、超新星ショックブレイクアウトなどの発見・追観測など、あらゆる時間領域天文学およびマルチメッセンジャー天文学へ貢献できるミッションを提案する。

既出のように、2018 年度公募型小型科学衛星候補に選定された。2022 年末現在、プリプロ候補チームとして、ダウンセクションにむけたミッション探求フェーズにある。

5.2.2 PhoENiX

PhoENiX 計画 (正式名称: Physics of Energetic and Non-thermal plasmas in the X-region) は、太陽フレアを観測・研究対象とし、人工衛星を用いて X 線とガンマ線を観測する計画である。その大目的は、「高いエネルギーにまで達するプラズマ加速現象の普遍

性と、太陽や恒星におけるそのような現象が惑星の環境と居住可能性に与える影響を理解する。」ことである。この大目的の実現に向け、PhoENiX 計画では、

- 太陽フレアにおいて、プラズマはどのようにして超高温にまで加熱されるのか？
- 太陽フレアにおいて、粒子はどのようにして加速・輸送されるのか？
- 太陽フレアにおいて、粒子のエネルギーはどのように熱的・非熱的成分に分配されるのか？

という3つの科学目標を設定した。そのために、高いダイナミックレンジ（明るい場所も暗い場所も同時に観測できる能力）を確保した軟X線～硬X線の2次元集光撮像分光観測（空間、時間、エネルギー分解能を同時に有する観測）と、高精度の硬X線～軟ガンマ線の偏光分光観測（時間、エネルギー分解能と偏光診断能力を同時に有する観測）を行う。これらの観測手法を用いた太陽フレア観測は、世界初の試みであり、高精度ミラーと高速度カメラ・高精度検出器といった日本が持つ最先端国産技術を用いて実現する。衛星の打ち上げは、第26太陽活動周期の前半から極大期付近にかけて（2033年頃以降）を目指している。本計画は、理学分野（太陽物理学、地球惑星磁気圏プラズマ物理学、高エネルギー宇宙物理学、実験室プラズマ物理学）の研究者らに加え、計画推進に必要な技術を持つ工学分野の研究者らも加わり分野間連携の体制で実施する。

5.3 高宇連が深く関係する宇宙理学 RG

宇宙理学 RG は、将来のミッション検討 WG 組織化を目指して活動しているグループであり、以下の3つが高宇連に深く関わっている。

コズミックネットワークを巡るエネルギーと物質の探査 RG

宇宙に存在する通常物質バリオンは、宇宙のエネルギー密度にして5%程度に過ぎないものの、未だにその半分以上がどこにどのように分布しているのかはわかっていない。この「ミッシングバリオン」問題の解決は、宇宙物理学に残された重要な問題のひとつであり、星や銀河、活動銀河中心核など宇宙の動的な進化や元素循環を明らかにするだけでなく、宇宙の構造形成を重力的に支配するダークマターの性質をも制限できる。このミッシングバリオン問題の観測的解決にむけて「コズミックネットワークを巡るエネルギーと物質の探査」リサーチグループを2020年に立ち上げた。これら宇宙のバリオン全体の定量観測には広視野、高空間撮像能力と高いエネルギー分光能力が不可欠であり、その実現方法を探っている。X線天文衛星「XRISM」で開始される精密分光観測は2030年代の欧州の「Athena」衛星でより高い空間撮像能力に遠方の宇宙まで実施されるが、宇宙のバリオンの全体像を見るためには視野が足りない。バリオン探査衛星として、日本で「Super DIOS」計画の提案を目標としつつ、同じコンセプトを持つ米国のLEM計画や中国のHUBS計画との連携など国際協力体制も模索している。

MeV ガンマ線観測検討 RG

グループでは、観測衛星による高感度 MeV ガンマ線観測を実現するため、日本でこれまで MeV ガンマ線観測実現を目指してきた研究者が協力し合い、サイエンスとそれを実現する観測手段、その実現に要するタイムスパン、そして国際的な研究の進展などを取りまとめ、実現可能な目指すべきサイエンスの絞込みを行い、サイエンスを実現する MeV ガンマ線観測衛星や長時間気球ミッションを検討する。

本グループでは、1–500 keV、0.5–10 MeV、10–1000 MeV、100 MeV–100 GeV、0.1–10 TeV での観測を実行してきた研究者で構成され、それぞれの帯域でのサイエンスを進めてきた経験をもつ。そうした経験を統合し、実現が望まれるタイムスパンとともにまとめる。このために、研究会の開催やグループ内での議論を重ねる。

また、本グループは、MeV ガンマ線観測装置あるいは関連技術の基礎開発を進めてきた経験を持つ。具体的には、半導体多層コンプトンカメラ（ひとみ衛星 SGD）、反跳電子飛跡型ガス型コンプトンカメラ SMILE、エマルジョンを用いた高精度電子陽電子追跡型ガンマ線観測気球実験 GRAINE など実際に観測を行っている。また、反跳電子飛跡型半導体コンプトンカメラや反跳電子飛跡型液体型コンプトンカメラ GRAMS 気球実験など、新規技術開発を進めている。イベント再構成（コンプトン再構成、電子陽電子対再構成）の開発経験も持つ。これらは、有効面積や観測時間、角分解能や偏光感度など、それぞれの長所短所がある。

X 線ガンマ線偏光観測 RG

X 線ガンマ線偏光リサーチグループ (偏光 RG) は、X 線からガンマ線の領域で、偏光観測を目指す研究者の集まりである。2021 年に偏光 RG の主査であった大阪大学の林田氏が死去したため、急遽代理で山形大の郡司が主査を務めている。現在偏光 RG のメンバーは、表 5.1 に示すプロジェクトに個別に関わっている。将来的に 1 つの偏光衛星プロジェクトに全体で緩くコミットする事を計画しているが、2023 年 3 月時点では具体的な候補となる衛星計画は存在しない。

表 5.1: 偏光 RG がコミットしている個別のプロジェクト

Project	波長域	platform	状況
IXPE	2~8keV	小型衛星	2021 年 12 月より稼働中
XL-Calibur	15keV~80keV	気球	2022 年夏にテストフライト
GRAMS	数 100keV~数 MeV	気球	2023 年テストフライトの準備中
SMILE-2	数 100keV~数 MeV	気球	次のフライトを目指して準備中
GRAINE	数 10MeV~数 10GeV	気球	2023 年フライトの準備中

現在 IXPE が 2021 年 12 月に打ち上がり、様々なタイプの天体に対して偏光観測を実現しており、偏光 RG のメンバーもその解析に参加しているため、硬 X 線以上のエネルギーバンドで観測すべき天体に関して情報交換を内部で行っている。例えば、以下の表 5.2 は

IXPE で観測されたターゲットであり、すでに論文若しくはプレプリントが出ている天体の一部である。このような天体の中で、各プロジェクトにとって最適な観測天体は何であるか議論を行っている。

表 5.2: IXPE で観測した天体の中で、すでに論文やプレプリントが出ている天体

天体の種類	天体名	備考
マグネター	4U 0142+61、1RXS J1708-40	両者とも偏光検出
ブレーザー	Mrk 501、Mrk 421、BL Lac	前者 2 つからは偏光検出
SNR	Cas A、Tycho	偏光検出
PWN	Crab、Vela	偏光検出
バイナリー (中性子星)	Her X-1、Cen X-3、 Cyg X-2、GRO J1008-57	全て偏光を検出
バイナリー (BH)	Cyg X-1	偏光検出
GRB	GRB 221009A	prompt と afterglow 共に UL

第6章 海外ミッションへの積極的な参加

6.1 X線偏光観測衛星 IXPE

IXPE (Imaging X-ray Polarimeter Explorer) は NASA マーシャル宇宙飛行センターが主導する、世界初の撮像型高感度軟X線偏光観測衛星である。2–8 keV に感度を持ち、擬似偏光度は 0.5% 以下に抑えられている。2021 年 12 月 9 日に打ち上げられ、1 ヶ月間のコミッションングを経て、2022 年 1 月 11 日から科学観測を開始した。IXPE により取得したデータは、観測終了から 1 週間以内に、NASA HEASARC から即時公開されており、誰でも自由にデータ解析を行うことができる。打ち上げ 2 年目までの観測天体は、IXPE SWG により決められているが、3 年目から Guest Observer Program が始まる予定である。

日本グループは JAXA 小規模計画の枠組みと、科学研究費補助金のサポートのもと、「X線偏光天体物理学」分野を開拓し、新しい宇宙の姿をとらえることを目的に、ハードウェア提供から科学成果創出までプロジェクト全体に参加している。日本グループは米伊に次ぐ 3 番目に大きな勢力であり、観測天体選定の議論、観測データへの即時アクセス権、内部ソフトウェアへのアクセス権など、プロジェクトの主要部分への関与が認められている。日本からハードウェア提供した、X 偏光計に用いる電子増幅フォイルと、X 線望遠鏡の熱シールドは、いずれも問題なく動いており、プロジェクトを支え続けている。

X 線偏光はシンクロトロン放射などの X 線発生機構や、散乱などの X 線輸送機構と直接結びついており、高エネルギー天体の磁場や幾何構造を探る優れた手段である。例えば、中性子星の超強磁場中の磁化プラズマや、真空そのものの性質の変化、ブラックホール近傍の時空構造、相対論ジェット、衝撃波面での磁場の乱雑などを観測できる。高感度の X 線偏光観測は新しい観測手段であるため、打ち上げ初年度は、高エネルギー天体現象のカテゴリー毎に、代表的な天体を一つ以上、十分な偏光検出感度で観測するという戦略を取った。活動銀河核、マイクロクェーサー、パルサーとパルサー風星雲、超新星残骸、超強磁場中性子星 (マグネター)、中性子星と恒星の連星 (LMXB, HMXB) といった代表的な X 線天体を、1 年間で約 40 天体観測した。そのうち 20 天体で 99.99% 以上の有意水準で偏光が観測された。これまで IXPE チームにより 17 編の発見論文が出版されており、9 編が出版準備中である。打ち上げ前の理論予想とは異なる結果が得られた天体が多く、今後の追観測や理論研究が期待される。

6.2 硬 X 線偏光観測気球実験 XL-Calibur

XL-Calibur 気球実験は米国ワシントン大学が主導する硬 X 線 (15–80 keV) 偏光観測ミッションであり、米国、日本、スウェーデンにより推進されている。望遠鏡で集光する

ことにより、従来のコリメータ型の偏光計よりも高感度な観測を実現する。これまでに、InFOCuS 望遠鏡を利用した最初の科学観測を、X-Calibur として 2018 年に南極で実施した。その後は、日本の FFAST 衛星用に製作された大型望遠鏡を搭載し、X「L」-Calibur と名前を変えて計画が進行中である。2022 年 7 月には、スウェーデンからカナダまで北極圏を半周回するフライトを実施した段階である。XL-Calibur 気球実験は今後も、2024 年夏に北極圏において、2025 年末-26 年始にかけて南極において天体観測を計画している。

今後の北極圏および南極における複数回の観測により、パルサー星雲 (Crab)、ブラックホール連星系 (Cyg X-1)、質量降着型パルサー (Vela X-1) など、硬 X 線帯域で明るい天体からの偏光を数%オーダーで検出・制限できると考えている。2021 年に打ち上げられた IXPE 衛星は、2-8 keV の低エネルギー側を観測するため、お互いに相補的な関係にあり、偏光のエネルギー依存性が調べられる。また、硬 X 線帯域に特徴的な反射成分の寄与からブラックホール近傍の降着物質のジオメトリを制限したり、サイクロトロン吸収線の帯域の観測から中性子の降着柱の磁場を推定するなど、硬 X 線独自のサイエンス創出も目指している。日本側では 2019 年度から JAXA 小規模計画に採択されている。

6.3 COSI MeV 全天観測衛星

銀河中心やブラックホールなど X 線やガンマ線で明るい天体を全波長でとらえ、その正体を知るために、そして我々の銀河系内での核ガンマ線や 511 keV 輝線の起源を知るため、数 100 keV (sub-MeV) から数 MeV のエネルギー領域のガンマ線観測が必要であるが、2020 年に観測を終了した CGRO/COMPTEL 以降、特に全天観測ミッションは存在しなかった。2027 年に打ち上げ予定の NASA SMEX 衛星 COSI は 3D Ge 半導体イメージャによるコンプトン望遠鏡を搭載し、その優れた性能でこの状況を一変するものと期待されている。

COSI は、511 keV で 3.8 度、1.8 MeV で 1.5 度の角度分解能を、511 keV で 0.4% というエネルギー分解能を併せ持つ、優れた性能を持つ。天の川銀河内のガンマ線輝線を全天撮像分光観測し、星生成と超新星爆発の銀河系内の分布や歴史を探るとともに、系外の明るい MeV 天体や GRB を観測する。

主検出器は、Ge の両面ストリップ検出器 16 セットを用いた半導体コンプトン望遠鏡で、半球側を BGO シールドで囲んでいる。また、Background and Transient Observer (BTO) という簡素なサブ検出器を搭載し、バックグラウンドの推定精度の向上と GRB や TGF などの突発天体への観測性能を補填する。開発の関係機関は、UC Berkeley、NRL、NASA/GSFC、IRAP/France、Clemson U.、LSU、LANL、INAF、NTHU、東京大学 Kavli IPMU、名古屋大学ほかである。日本側は、MeV ダークマターを中心とするサイエンスと、サブ検出器 BTO の技術サポートなどに参加している。

6.4 FOXSI4 ロケット実験

日米共同観測ロケット実験 Focusing Optics X-ray Solar Imager の 4 回目の飛翔計画である FOXSI-4 は、世界初となる太陽フレアに対する X 線集光撮像分光観測 (0.5–30 keV)

を行う。その目的は、磁気再結合が引き起こす磁気エネルギーの解放とそれによって生じるエネルギー変換機構の追究に必要な、観測技術および研究手法の実証と研究基盤の構築である。本計画は、米国 NASA の観測ロケットを用いて 2024 年春に実施予定であり (NASA に最高評価の Excellent で採択済み)、日本では JAXA 宇宙科学研究所の小規模計画 (2020 年度公募に採択) として準備を進めている。本計画は、衛星計画 PhoENiX の科学的・技術的デモンストレーションでもある。観測ロケット実験 FOXSI シリーズ (これまでに 3 度成功裡に実施) は高エネルギー宇宙物理学と太陽物理学の連携で実施してきたが、FOXSI-4 もこの枠組で実施し、日本からは PhoENiX のキー技術でもある高精度ミラー (電気鋳造製) と高速度カメラ (軟 X 線用 CMOS カメラと硬 X 線用 CdTe カメラ) を提供する。

第7章 マスタープラン2023対応とその 時点での高宇連のロードマップ

7.1 第4期における高宇連のロードマップの更新議論

本章でまとめるのは、2022年12月時点のロードマップである。マスタープラン2023対応後、2022年初頭に更新された高宇連の将来計画ロードマップを図7.1に示す。これ以降は2022年12月まで、ロードマップの更新はない。しかしこの後、2023年3月ごろには、2022公募の公募型小型科学衛星の結果が出ることで、2022年末より戦略的中型の理学GDIの時限WGとして「広帯域X線撮像分光ミッションWG」が発足して検討が進み、高宇連でも議論が進んでいることから、今後改定が想定される。

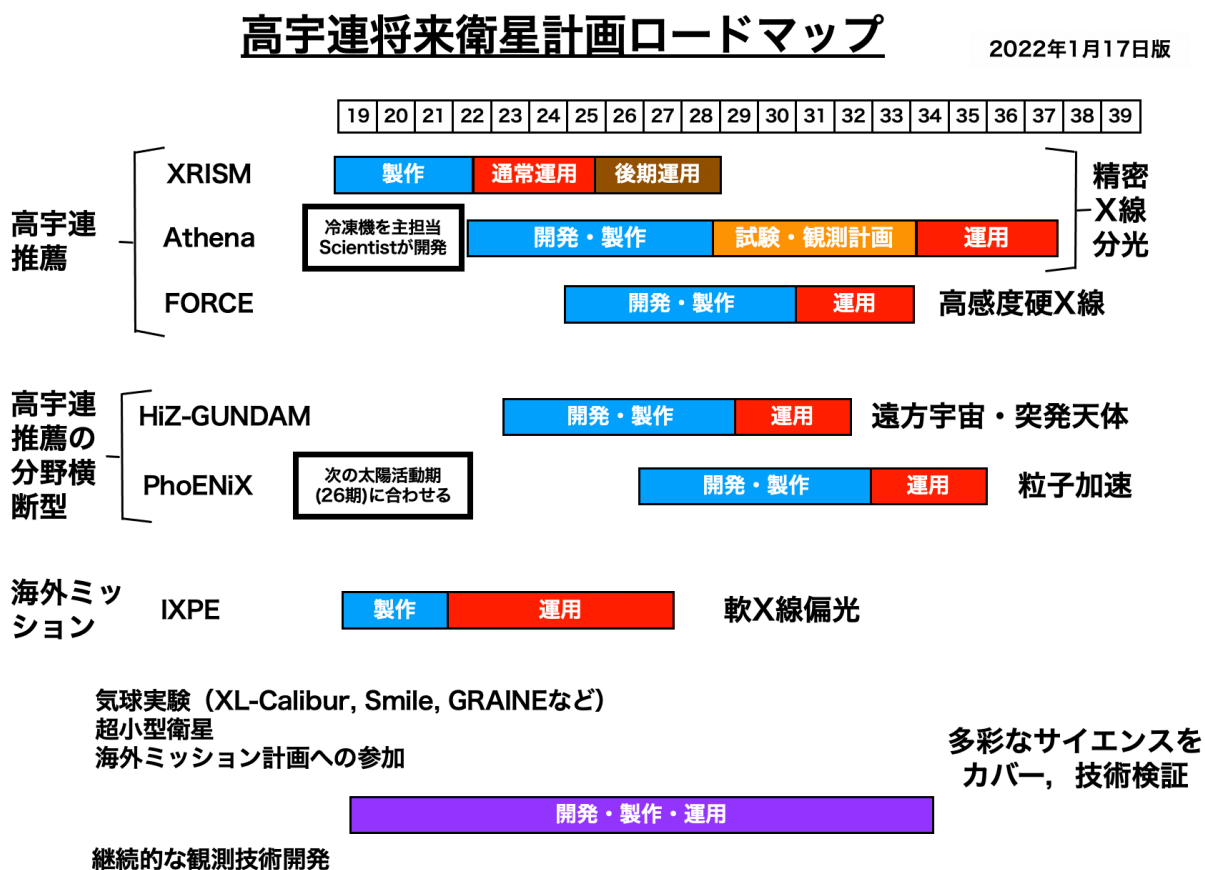


図 7.1: 2022年1月時点での、高宇連における各ミッションのロードマップのまとめ。

7.2 MP2023 コールへの高宇連の答申

冒頭に述べたように、第4期将来計画検討委員会の活動の大部分を占めたのが、マスタープラン2023への対応である。記録のためにその結論を以下にまとめる。具体的に、本章は、2021年10月18日に、当時の高エネルギー宇宙物理連絡会会長（鶴剛）の名前で、当時の日本学術会議、物理学委員会、天文学・宇宙物理学分科会（委員長 林正彦）宛に提出された、「マスタープラン2023 推薦書」からの抜粋である。これが現時点で高宇連として最新のロードマップに対応する。

7.2.1 序文

マスタープラン(以下 MP)2023 への重点大型研究計画推薦をまとめるにあたり、過去の MP での推薦経緯と、高宇連での検討の背景を最初にまとめておく。

MP2020 で高宇連は、XRISM を「区分 II(既に予算化されている計画)」と位置付け、それ以外は、高宇連が中心となって推進する国際協力ミッションとして Athena を、高宇連が中心となって推進する日本主導のミッションとして FORCE を、高宇連と光赤天連の分野間連携ミッションとして HiZ-GUNDAM を、高宇連と太陽研連の分野間連携ミッションとして PhoENiX をそれぞれ 1 位とし、全体としての順位をつけずに提出した。これは各々のミッションが、大きく異なる方向性と位置付けを持つためである。4 つのうち Athena が学術会議ヒアリングに進み、4 ミッション全てが、学術大型研究計画として MP2020 に掲載された。MP2023 にあたり LOI を提出したのは、同じ 4 つの計画(アルファベット順に、Athena、FORCE、HiZ-GUNDAM、PhoENiX)である。いずれもそれぞれのカテゴリーで、一級のサイエンス目標を持ち、高宇連としては 4 ミッションともを、是非とも実現すべきと考えている。しかし今回、必ず順位付けすることが強く要請されたこともあり、このように本質的に異なるミッションをあえて順位付けする試みを、高宇連として初めて実施した。順位付けの基準としては、「(1) 学術的な重要度、(2) タイミング・緊急性、(3) 成熟度・実現可能性、(4) 他分野からの支持、(5) 高宇連コミュニティへの影響」の 5 点を評価項目とした上で、分科会の指針である「コミュニティにとって死活的に重要なミッションを上位にする」を考慮することとした。なお、本推薦書では MP2023 に推薦すべきものとして「2023-2025 年度の予算化を目指すミッション」を意図している。

今回の推薦書を取りまとめる中で、3 つの課題と注意事項を、冒頭に宣言させていただきたい。

まず、Athena は ESA 主導の計画であり、そのスケジュールに従えば 2022 年には日本の分担が決まる。これに日本が責任を持って応えるためにも、2022 年以前に是非とも予算化すべきものである。言い換えると、本来、MP2023 の期間が始まったときにはすでに予算化され、区分 II 相当になっているべきものである。MP2020 で大型研究計画として定義されヒアリングも受けていることから、2022 年度までの予算化が実現することを強く望んでいる。

今回の「コミュニティにとって死活的に重要なミッション」という指針では、分野間連携のミッションが不当に低く評価されるレギュレーションである。この指針を標準化しま

うと、目的特化型の尖鋭的なミッションが永遠にサポートを受けられなくなることを懸念する。

本質的に異なる分類・位置づけのミッションを、一つの枠で順位付けすることにも、大きな困難が伴うことも強調させていただきたい。特に学術会議で重点大型研究計画を選定するときに、どのような視点で分類されるか、その指針が存在しない中での順位決定には、大きな困難がある。こうした貴重な機会を有効に使うためにも、学術会議メンバーの審査をより効率的にするためにも、早めに審査基準等を明確化することが、日本のアカデミーのより良い発展のために重要と考える。これらは、次回の MP2026 へ向けての問題であると提起させていただきたい。

こうした制約の中で、高宇連は 2021 年 4 月末に MP2023 タスクフォース (TF) を発足させ (メンバーリストは付記を参照)、TF 内部、高宇連ワークショップ、高宇連インフォーマルミーティング等を通して議論を進めてきた。その結果を以下にまとめる。

7.2.2 重点大型研究計画への推薦

LOI を提出した 4 ミッション (Athena, FORCE, HiZ-GUNDAM, PhoENiX) に対して、高宇連 MP2023TF を中心として議論した結果、日本学術会議天文学・宇宙物理学分科会 (以下、分科会) への重点大型研究計画の推薦 (3 件まで) は、同率 1 位で Athena と FORCE、3 位で HiZ-GUNDAM とする。PhoENiX は大型研究計画として推薦する。

FORCE と Athena の順位付けについては、TF 内で最後まで大きな議論となった。FORCE は日本主導、Athena は欧州主導なので、日本学術会議の大型研究計画としては、FORCE が重要となる。一方で Athena はヨーロッパ (ESA) 主導の巨大ミッションで、そのデータに一定の権利を持つことは日本にとって高い価値を持つものである。金額ベースでは小さいながら、日本独自の技術に基づく重要装置の提供も期待されている。計画は大きく進んでおり、序文で述べたように、2022 年までに予算化を進めることが重要である。万が一これが遅れたときには、高い緊急度で予算化が必要であり、MP2023 の重点大型研究計画にふさわしいミッションとなる。以上のように、2 つ計画の重要性と緊急性の基準は大きく異なることから、高宇連からは同率 1 位で推すこととした。

この 2 つの計画は、いずれもコミュニティの総力をあげて、参加・実現すべき重要なものであり、どちらか一方が欠けても高宇連コミュニティが目指すサイエンスが成り立たないというのが、TF における結論である。このため、少なくとも FORCE と Athena は、学術会議 MP2023 のヒアリングに進めていただくことを、極めて強く希望する。

HiZ-GUNDAM と PhoENiX は、それぞれ 2 つの分野が連携し、サイエンスを絞り込んで目的を特化した計画であり、ISAS/JAXA 公募型小型衛星の理念にうまく適合した、優れたミッションである。これらは高宇連内部での位置づけにおいて、FORCE や Athena とはカテゴリが違い、同じ土俵で比較することは不可能であった。今回 TF では、分科会の「コミュニティにとって死活的に重要なもの」を重点大型研究計画として推して欲しいという指針に則り議論を進めたが、この観点からは FORCE や Athena のような observatory 型のミッションが必然的に上位となり、コミュニティの一部参加の形となる HiZ-GUNDAM や PhoENiX ミッションは、どうしても次点とならざるをえなかった。そのような特殊な条件下における順位付けであったことに留意されたい。

HiZ-GUNDAM と PhoENiX の順位については、HiZ-GUNDAM の方が公募型小型衛星の選定段階として先行していること、高宇連の関与がより大きいことから、上位で推すこととした。

なお、TF での議論の中には、HiZ-GUNDAM は本来、さらに上位で推されるべきであるという意見も強かった。今回の順位は、あくまで、分野間連携のミッションを高宇連単体で推薦するというレギュレーションが、分野間連携ミッションに非常に不利に働くためであることを、繰り返し強調させていただく。

7.2.3 大型研究計画等への推薦

今回の MP2023 では、重点大型研究計画への推薦順位を決めることは独立して、分科会の「将来計画が一覧できる冊子」に向けた推薦も求められている。上記4つの計画はいずれも大型ミッションとして高い価値を持つものであり、これら全てを推薦する。また、今回 LOI が出された中型ミッション GRAMS と SMILE-3 についても、高宇連でのワークショップ発表などを通じ、重要かつ魅力的であることが示されたので、同じく分科会に推薦するものとする。

第8章 第4期将来計画検討委員会若手部 会の答申

8.1 若手研究者への意識調査

背景 第三期将来計画検討委員会『ロードマップ検討まとめ』において、若手の研究者が減っていることへの対策が必要との提言がなされた(7.3項)。さらに、「若手がより活発に観測研究や装置開発を推進できるよう、高宇連として環境づくりをすることが重要」という指摘があり、しかし若手からの意見が出にくかったことから、「若い世代からの意見を積極的に聴く機会を設けるなど検討」することが、申し送り事項として残っていた。そこで第四期では、若手研究者の意識調査を踏まえた上で、高宇連として今後行うべき対策を、提言という形でまとめることにした。

若手研究者への意識調査 第四期では、まず若手研究者へ「高宇連、X線天文グループについて」「行いたい勉強会・研究会」「若手への顕彰制度」「研究職に対する考え方」など複数の項目についてインタビューを行い意見分布を調査した。なお、なるべく本音を語ってもらうために、回答は生のままでは会員に公開しないことが若手との約束なので、将来計画検討委員責で内容を壊さない程度に適宜まとめてある。この調査における若手の定義は、「高宇連会員で学位取得後10年以内」とし、性別や職位が偏らないように配慮しつつランダムに選んだ。学位取得前の学生の意見聴取はできていないため、今後はこうしたより若い世代への意見聴取も必要である。ただし、今回のインタビューは、学生時代を含む彼らのこれまでの経験から思うところを述べてもらったので、以下の調査結果や提言は、若い世代全般にかなりの程度適用可能であると考えられる。

8.2 調査結果まとめ

調査結果1 インタビューにおける一貫した傾向として、コミュニティ内の繋がり希薄さを指摘する声が多く挙った。ここで言う「繋がり」とは、(1)研究室(研究者)間、(2)世代間、(3)サイエンス中心の研究者と装置・衛星開発メインの研究者間、の3点に集約される。これは「ひとみ」事故やCOVID-19などの複合要因により、コミュニティが一丸となって行うイベントや研究会が減少したことが背景にあると考えられる。特に(2)は将来計画を考える上で重要で、彼ら自身シニアに比べてプロジェクトへの知識が不足しているという自覚があり、それを吸収したいと思っているが、コミュニティに聞きづらい雰囲気がある、ということも多く若手が指摘している。また、シニア主導でコ

コミュニティの方針が決まっている雰囲気があり、若手からアイデアを言いづらい/シニアから耳を傾けてほしい、といった、ベクトルが逆だがやはりコミュニケーションの不足を示唆する意見もあった。第三期で提起された「若手がより活発に観測研究や装置開発を推進」できる環境づくりとしては、まずはコミュニティ内の情報共有・相互扶助の機会の乏しさを改善していく必要がある。

調査結果2 インタビューで明らかになったもう一つの顕著な傾向として、若手が描くキャリアパスにおける「業績を上げやすいサイエンス・装置開発」と「業績になりにくい衛星開発運用」の間のジレンマを指摘する声が多数あった。サイエンスだけをやってきた若手は装置・衛星開発に着手しないとアカデミアに残れないと考えており、衛星開発をしている若手（運用など論文になりにくい貢献をしている人）は、サイエンス・検出器基礎開発の方が業績を作りやすく有利と考えている。全体として、そもそもポストが少ない上に、長期化するプロジェクトの開発・運用に関わったところで、業績として評価されにくい（ポストも保証されない）ため、開発に関わるのは損、という認識がある。

現実には研究機関や個々の人事案件によって様々な評価軸があり、プロジェクトの開発・運用経験を重視するものや、ほぼ論文数だけで論じられる人事など多様で、キャリアにおいて何が得で何が損かを一般論で片付けることは不可能である。ただ、若手の中で特に「観測機器を衛星に搭載するための開発作業」が、論文になりにくい上にコミュニティからの認知・顕彰が不足しているという認識が形成されつつあり、これが将来計画への参加を尻込みさせる一因になっていると考えられる。高宇連のコミュニティーの底力を高める視点から、改善が必要である。

まず一般論として、研究者がどの開発研究に携わるかは自己判断であるが、判断に必要な情報（例えば多様な人事案件のそれぞれの評価軸）を知っていることが重要である。また、こうした開発作業の負荷が、キャリアの見通しなしに、学生や任期付きの若手にかかっている場合が多く、受け入れスタッフや研究者の意識改革、そして若手とのキャリアのビジョンの共有が必要である。具体的なアクションの一つとして、このような貢献に対しても、コミュニティ内でその貢献の情報を広く共有し、外部に対しても提示できるよう、顕彰する場を設けるなどの対応が必要である。また、アカデミアに残る/残らないという観点からは、プロジェクトの実施力を重視する人事が近年増えており、応募する側もこれらを意識してどこで経験を得るかという視点でキャリアパスを考えることが大切である。受け入れる機関やスタッフ、コミュニティや大学側でもこうしたことを考慮すべきである。

調査結果3 若手研究者の自己像・将来像については肯定的な回答が多く、自身の研究がコミュニティから不当に低く評価されているといった不満は聞かれなかった。コミュニティの現状に対するシビアな意見とは相反する印象で、多くの若手がこの業界に残りたいと考えていることも明らかになった。ただし当然ながら将来への不安を表明する回答もあり、「調査結果2」で述べた問題を背景として、観測研究と装置開発のどちらに重点を置くかについて迷うコメントがしばしば見られた。

8.3 提言

以上の結果より、多くの若手研究者はこの業界でできる限り研究を続けていきたい、プロジェクトに積極的に参画していきたい、という希望を持っている一方、現状のコミュニティについては情報共有・相互扶助、および特定の仕事に対する顕彰の不足を感じていることが明らかになった。第三期で認識された課題「若手がより活発に観測研究や装置開発を推進できる」環境づくりを行うにあたっては、以上の調査結果を踏まえて具体的な対策を講じる必要がある。

本活動に先行する形で、XRISM に対しては第四期将来計画検討委員からインプットを行い、結果として Incentive structure の導入や、若手を対象とした XRISM Workshop の開催の契機となった。今後は、特定のミッションに限らずコミュニティ全体で行える対策を考える必要がある。そこで、高宇連運営委員会に対して、以下のような提言を行う。

- A 高宇連主催の(希望者による)修論発表会を行い、その中で発表賞や衛星プロジェクトへの寄与に対しての高宇連からの顕彰を行う。
- B 若手の衛星プロジェクトへの貢献に対しての高宇連(宇宙研 or プロジェクト)からの顕彰を行う。
- C 隔年で、サイエンス、ミッションをテーマとした研究会を、シニア-若手、若手-若手で集まって行う。若手インタビューや第四期の議論では、以下のような内容が提案された。
 - 世代間で知識伝導の会
 - サイエンス-開発間でマッチング放談会
 - 宇宙研の仕組み、プロジェクトの立ち上げ方、CML や SE についてのセミナー
 - 情報共有と相互扶助の促進
- D 修士学生が会員に入りやすいように入会条件を見直す。例えば、「論文1報」という条件をなくすなど。

なお、第四期では調査対象の若手を「博士号取得後10年以内」の会員に絞ったため、博士号取得前の博士課程・修士課程の学生への意識調査は未完了である。当の目的に立ち返って「若手がより活発に観測研究や装置開発を推進できるよう、高宇連として環境づくりを進めていくためには、上記を推進しつつ、今後はこうしたより若い世代についても調査を行い、彼らの意見を取り込んだ上で対策を考えることを提言したい。

第9章 今後の将来計画検討委員会への引き継ぎと方向性

以下は第4期の将来計画委員から、特に個別の特出し案件についての、今後の将来計画委員への引き継ぎとしての提言である。

9.1 順位付けの維持について

今後も2年（公募型衛星の公募発出1年前）や3年に一回（マスタープランに代わるもの）への対応を意図して、今回のMP2023TFで実施した、全体を通した順位付けは、定期的実施すべきである。今回のMP2023TFの進め方が必ずしも最適であったとは限らないが、概ねその原則は以下となるであろう。

- マルチメッセンジャー天文学や地球惑星科学まで含めた理学全体という大きな文脈において、科学成果の意義づけを行うこと。特に、世界の中で日本として何をするのか、どのように独自性を出しつつ、かつ、サイエンスの本流にコミットしてゆくのか、あるいは挑戦的な課題に取り組むのかを、よく考えること。
- 衛星計画の経験が比較的豊かなコミュニティとして、計画の技術的課題（TRLなど）、マンパワー規模、予算規模からして、実施の実現性がある程度は評価し、「採択されたがコミュニティとしてこれを必要なレベルでサポートできる」か、しっかり判断すること。ここには、宇宙研ができることできないことも含み、必ずしも理想的に（あるいは理念通りに）進むわけではない。しかしミッションの大きな遅延やコスト超過はコミュニティに大きなダメージをもたらすため、責任を持ってミッションを実施できる見通しをどのように得るかが重要である。
- 最終的な順位付けは、それぞれの公募の中で（例えば宇宙研によって）実施されるものであるが、高宇連としてのサポートの順位は、状況を判断して適切に実施すること。
- このために、コミュニティ全体に情報をしっかりシェアし、方針と判断の考え方、それをジャッジする代表の選定方法、最終的なコミュニティとしてのアプルーブ手続きをしっかりとシェアすること。予算やマンパワーの見通し、宇宙研での議論の進み方、国際協力体制の変化など、必ずしも全て公開で議論できないことから、全体での投票と、代表による投票とのバランスを考えつつ、この方針を立てること。

9.2 高宇連のミッション実現力・サイエンス達成力のための人材育成・人材流動の拡充について

ミッション実現力は高宇連の強みの一つであり、日本の宇宙科学を支える力人もなってきた。これを維持・強化することが重要ではないか？例えば、同じ時期に複数の提案が重複することは構わないが、マンパワーの融通をミッション間で検討する場を用意する、など。

ミッションに必要なマンパワーは、ミッションとして考えるのは当然として、高宇連としてきちんとアセスメントすべきである。必要な理念は、2つ。

- きちんとミッションを遂行できること
- 高宇連のメンバーがミッション遂行を経験できること

例えば、プロジェクトのメンバーに重複が多くて良く、当初から「どちらかが選ばれたら、もう一つは遅れ・進化・撤回するけれども、そのメンバーの多くが選ばれたプロジェクトに合流できるような仕組みが望ましい」とする。重複が少ないならなぜ少ないのかを明快にする。これはISASが高宇連などのコミュニティーに期待している、継続性の維持の方策の返事ともなる。

これが成り立つ前提として、各ミッションのリーダー層が、そのミッションのコアサイエンスに直接関わっていないコミュニティーメンバーでも、そのミッションに合流することで、技術を学び、一定レベルでサイエンスもできるように配慮することが望ましい。目的が非常に特化しているミッションで、他のミッションからのメンバーの合流が難しい場合には、足りないマンパワーを例えば別コミュニティーから確保することを宣言する必要があるのではないか。さらに踏み込んで行くと、これらの人材確保・人材流動の議論は、個々人の残る任期やステータスなど、取り扱いに注意すべき情報も含むため、まずは高宇連の運営＋各ミッションPIレベル（＋必要なら将来計画検討委員）で議論することとすればよいのではないか。

若手のみなさんが、「1つのミッションに所属したら、もう一つは敵だから、もう参加できない」と思うことは、あってはならない。「どちらのミッションが通っても、自分にできることはある。もちろんAミッションが自分のサイエンスに近いけど、Bミッションでも**はできる」と思える、そう思えることが重要で、これを情報共有できる場が重要ではないか？

経験を積むと言う意味では、気球、超小型衛星、外国ミッションの参加などを、促進すべきであろう。その必要性・有効性は昔から言われていることだが、打ち上げ・飛揚機会の少なさや様々なインフラの制約もあり、多くの研究者にとって使いやすく身近な実験手段となるころまでは普及はしていない。これを克服する方策の検討を続ける必要がある。例えば超小型衛星で言えば、革新プログラムもサイエンステーマで出せるようになり、拡充プログラムもサイエンスが目的の一つとして含まれている。食い込めるかもしれない。気球や超小型のミッションは根本的にボトムアップで進むべきで、あくまで各PIが自分の判断で進めるべきものである。高宇連として大事なことは、「広げてゆくマインドを高宇連全体として共有すること」であろう。各PIがそれを高宇連に所属する強みと

して感じられれば良い。具体的には横の情報の風通しをよくして、超小型ミッションに必要な考え方を学びやすい環境にすること、さらに、メンバーがミッションからミッションへ、異動してゆくプロセスを促進する、そんな「情報流通を広げる場を用意する」役割は、高宇連にあるのではないか？また、ミッションの時間が長くなっているので、「小さいものから大きいもの」という発想に捉われず、進行中の多様なミッションにある程度貢献しつつ、スキルを獲得してゆく視点も重要である、という提言もあった。

メンバー個人の側でぜひ考えて欲しいことは、専門性とそれを実現するためのミッション実現技術の両立をするメンバーが増えてほしいということである。研究者として専門性は重要である。だけどそこから外れたことを全くやらないのでは、世界が狭くなる。自分の現時点の専門と近くないものは関係ない、という発想だと、日本でのミッションができなくなる。そこにあるミッションを使って、できることを考えてほしい。これまでの専門から外れても、その延長で貢献できることをどんどんやり、スキルを獲得し、人脈（縦横の繋がり）を拡大してほしいと考える。全員がそうである必要はない。しかし、そういうメンバーが多いほど、やりたいことができるコミュニティになるのではないだろうか。

9.3 若手部会について

第4期で若手部会を設置した。詳細は当該の章に譲るとして、明らかになったことは、シニア層としては若手のことを重く配慮しているつもりであるが、その配慮の前提となる「若手が何を気にしているか」の理解は、半分はあっており、半分は間違っていたことである。一方で若手層としてはシニア層のそうした動きを当然ながら全貌は把握できていない一方で、若手自身の意識は高いことが確認できた。結果として、最大の課題はシニア-若手間、さらには若手-若手間の情報の共有不足であることが認識された。

日々のサイエンス成果の創出と、ミッション実現の努力について、成果となる研究を若手になるべくやってもらいたいという思いは共通性が高かった。一方で、ミッション実現という必ずしも直接論文成果につながらない部分については「レベルをさらに上げて」論文文化できるようにすることの大切さを、一層共有すべきである。並行して、顕彰など、論文以外での形でもその成果を見える化することが大切であり、その仕組みが高宇連において他分野と比べてまだ改善の余地があることも認識された。また、若手の多くが、「衛星ミッションを必要とし、自ら実現できるコミュニティとして高宇連が存在し続けること」という目的意識を共有し、ミッションを実現できる力を得ることに並々ならぬ意義を感じていることが分かったのは大きな収穫であった。人事公募での評価については、その評価軸に多様性があることへの情報共有が必要である。学振などのPD評価においては論文成果がどうしても重視される一方で、(特任を含む)助教や准教授では、論文成果だけでなく、プロジェクトへの貢献度や教育経験なども重たく評価される人事も一定数存在することは、もう少し共有されて良いであろう。これはまた、ミッション貢献の見える化としての顕彰の必要性なども密接に関わる議論でもある。

これらのことから、シニア層と若手層の「対話」、そしてもう一つ「若手間の対話」の不足がクローズアップされた。今後の高宇連活動では是非この辺の改善を意識していただきたい。その上で、若手部会のような活動は、今後も一定期間は重要ではないかと提言す

るものである。

9.4 技術開発活動の情報共有（「技術ロードマップ」関連）

第3期将来計画検討委員会の答申では「技術ロードマップ」として情報を収集した。これは高宇連メンバーの間で進む技術開発項目を共有し、連携を深めたり、将来計画の検討をする一助とすることを目的としている。一方で、その後の議論により「ロードマップ」という言葉には選択と集中のニュアンスが強く、「メンバーの自由な発想に基づく研究開発活動を推奨・強化する」との当初の理念と、相反するという指摘を受け、第4期の中ではこの活動は一旦停止している（半分はMP2023TFにエフォートを取られたためでもある）。若手部会の答申にあるように、技術開発の情報共有と人材流動は重要な課題と認識されており、形を変えて、「メンバーの自由な発想に基づく研究開発活動を推奨・強化する」活動を継続できると良い。

9.5 その他の項目

この他に、以下の項目を託したい。

- 宇宙研の首脳部と積極的に関わり、執行部の考える方向性を知ることと、我々コミュニティの希望する方向性をインプットする活動を強化すべきである。
- 光赤天連、宇電懇、CRC、理論懇などの近隣各コミュニティと、意図的に交流する機会を設け、高宇連の立場を再確認する機会を頻繁に設けると良い。
- 欧米はもちろんのこと、新興国(中国、インド)のミッション動向を十分に注視し、高宇連の世界戦略の中にどのように位置付けることができるか、議論の機会を設けることが望ましい。
- コミュニティー全体として（若手も含んで）、宇宙科学ミッションを実現できる実力を維持・発展させることへの意志を持っている。この観点から、気球実験や海外ミッションへの参加、超小型衛星の推進に対する戦略検討、問題の洗い出しなどを引き続き進めてほしい。
- 2030-40年代の計画提案のためには、サイエンス検討が重要であり、サイエンス検討を議論するタウンミーティングやワークショップを定期的で開催し、議論を進めてほしい。関連して「2040年代研究会」のような、少し遠くを見た情報共有会を数年に一回で良いので開催すべきである。

9.6 まとめにかえて～次なる課題～

近年、宇宙研との対話の中で、コミュニティが何をしたいのか、そのためにどのような体制を取り、どのようにミッションを選んで行くのか、現実的にそして主体的に検討し

て欲しい旨のサジェッションを受けつつある(2022/3 高宇連研究会タウンミーティング、および2023/3 高宇連研究会でのタウンミーティング参照)。少なくとも中型ミッションについては、「波長別」ではなく最低限「天文」、できれば「宇宙物理」としてのミッションを検討すること、選ばれなかった波長コミュニティーが次のミッションを実現する能力をどうやって維持するかが課題とされた。関連して、公募型小型の開発のタイムリー性を担保するための欠かせない開発能力をどうやって獲得するか、海外巨大計画への主要パートナーとしての参画を検討するなら金額的にもその経費は日本国内での研究開発(装置提供など)となるため、その開発体制をどう獲得するかが課題であると認識されている。

大まかには、「提案母体としての高宇連とそれを選定する宇宙研」という旧来の体制ではなく、(高宇連を含む)宇宙理学のメンバーが宇宙研も含めて一体となって良いミッションと能力の維持獲得を考えてゆこうという方向性が必要とされている。その一歩目がGDI活動であるとされる。一方で公募型小型科学衛星などでは競争的なアプローチが残っており、宇宙研にも高宇連にもまだ最適解は見つかっていない。

将来計画検討委員会としては、これらの課題解決の方法の検討などが求められる。GDI活動とのオーバーラップもあるため、これを有効に生かす方法を考えることも必要である。アウトプットとしての「高宇連のロードマップ」のあり方も、上記の議論に関連して変わる可能性が高い。これらは高宇連全体としての主体的な対応が必要で、今後も議論されてゆくと理解している。第5期の委員会でもその議論を進めていただきたい。

付録A 「2040年代のスペース天文学」 研究会の成果概観

2022年11月14-15日に、今から考えるスペース天文ミッションやそのサイエンスを議論する研究会「2040年代のスペース天文学研究会」を名古屋大学で開催しました。大型宇宙ミッションなら2040年代、小規模なミッションなら2030年頃を目指すものを対象に36講演を集め、2日間、朝から夕方まで、色々なアイデアを議論しました。大学の授業期間中にもかかわらず、会場には40名、オンラインに100-150人が参加し、議論も盛り上がり大変盛況な会となりました。本研究会は、名大KMI、光赤天連、高宇連の共催で行われました。

今この時も多くの研究者やエンジニアが科学衛星プロジェクトを推進しています。プロジェクトを実現し、新しいサイエンスを得ることは多大な労力を要しますが、大変やりがいもあり面白いタスクでもあります。一方で「次の次」のミッションを考えることも欠かせません。こちらにも創意工夫と努力が必要ですが、最も大事なものは「面白いサイエンス」であり「人を惹きつけるミッション」である事です。

本研究会では、面白い話をする、大風呂敷を広げて良い、というくくりで多くの講演をいただきました。アストロバイオロジー、星・惑星形成、重力波、天体進化史、ブラックホール成長、ガンマ線バーストや中性子星合体、銀河団の非熱的な性質、宇宙線探査など、多くのサイエンスが議論されました。可視光のコロナグラフや分光、赤外・可視・X線の干渉計、宇宙重力波望遠鏡、MeV天文台やX線偏光に加え、量子と重力の精密物理実験、地球・惑星大気の観測や月面探査とのシナジーなど、多様なミッションの提案がありました。個人的には、アイデアの光る提案ばかりで、大きな夢だけど頑張れば日本リードで実現できるのではないかと思わされるものも多く、大変ワクワクする内容にコミュニティの底力を感じました。科学ミッションの枠組みは将来どうあるべきか、人材・技術育成はどうすべきかという課題を、多くのメンバーが共有していることも明確となりました。コミュニティとして今後、これらの課題の解決が重要であること、高宇連とか光赤外天連を超えた宇宙科学の宇宙物理としての横の繋がりがより重要となることが議論され、こうした未来志向の研究会を数年に一度は定期的で開催すべきというコンセンサスも得られました。¹

注記：本節は、ISAS ニュース 2023 年 1 月号に書かれた記事に若干の加筆をしたものであるが、高宇連側の記録としてここにも追記しておく。

¹web 情報： <http://exoplanets.astron.s.u-tokyo.ac.jp/2040WS/index.html>

付録B 高宇連メンバーが主要メンバーとして参加する小型実験

B.1 超小型衛星

打ち上げ予定の早い順にまとめている。不確定要素が高いため、必ずしも実際の打ち上げ順とは前後すると想定される。

B.1.1 CAMELOT

- 目的：シンチレータを載せた超小型衛星を複数、それぞれ事なる軌道に入れて、GRBの検出時刻差から方向を分角スケールで特定し、重力波源の対応天体探査情報を与える。
- 乗り物：ESA 超小型衛星 (1U, 3U) を中心に他の機会も狙う。
- 搭載装置：CsI シンチレータ + MPPC
- 打ち上げ見通し：2021/3, 2022/1 に合計 2 台打ち上げた。2024 に次の打ち上げ計画。係機関：MTA-Eotvos U.、Masaryk U.、広大、Konkoly Observatory、Eotvos U.、C3S、名大、阪大、京大、立教大他
- 売り込みポイント：既にガンマ線バースト多数検出。

B.1.2 NinjaSat

- 目的：明るいX線源の多波長モニタリング観測・MAXI 発見天体の追観測・科学教育等
- 乗り物：6 U キューブサット (NanoAvionics 社)
- 搭載装置：Xe/Ar/DME+GEM ガス検出器 (2 系統)。2-50 keV, 有効面積 32cm²@6.4 keV (2 台)、FoV 2.3°。放射線帯モニター (2 系統)。
- 打ち上げ見通し：2023 年度秋に太陽同期軌道に投入、観測開始
- 関係機関：理化学研究所、京都大学、千葉大学、広島大、国立彰化師範大、東大

- 売り込みポイント：商用衛星バスを利用した短期開発・観測実現、キューブサットによるポインティング観測。

B.1.3 うみつばめ

- 目的：広視野紫外線サーベイによる時間領域マルチメッセンジャー天文学
- 乗り物：超小型衛星 (50 cm・65 kg)
- 搭載装置：250–300 nm の紫外線望遠鏡。視野 50 平方度。検出限界 20 等級 (AB)1800s exposure 4 点タイリングで 200 平方度を 1.5/hr ケイデンスでカバー。
- 打ち上げ見通し：2023 年海外ロケットでのフライト予定
- 関係機関：東京工業大学 (理・工)、JPL/Caltech、国立天文台、東北大学、東京大学
- 売り込みポイント：Caltech/JPL の紫外線観測衛星計画 ULTRASAT の Pathfinder として共同開発を行う。紫外線変動天体を起点として、木曾 Tomo-e-gozen、京都 3.8m 望遠鏡など、重力波追観測網をフル活用したマルチメッセンジャー天文学を実現する。およそ 1 ヶ月に一発以上の頻度で新天体を発見できる。2020 年度より JAXA 小規模計画。産学連携プロジェクト。2023 年打ち上げ予定。

B.1.4 Kanazawa-SAT

- 目的：重力波の発生と同期した X 線・ガンマ線突発天体の発見と通報
- 乗り物：超小型衛星 (50 cm・50 kg 級)
- 搭載装置：広視野 X 線撮像検出器、小型ガンマ線トリガー検出器
- 打ち上げ見通し：革新的衛星技術実証 3 号機の枠組みで 2023 年度中の打ち上げを目指し輸送機を調整中
- 関係機関：金沢大学、理化学研究所
- 売り込みポイント：高エネルギー突発天体現象を伴う時間領域天文学やマルチメッセンジャー天文学に貢献する

B.1.5 ARICA-2

- 目的：民間衛星通信を利用した突発天体速報システムの実証、軌道上ガンマ線観測実験
- 乗り物：2U キューブサット

- 搭載装置：CsI/EJ-270 + MPPC
- 打ち上げ見通し：2024年度革新的衛星技術実証4号機にて打ち上げ
- 関係機関：青山学院大学、理化学研究所
- 売り込みポイント：HiZ-GUNDAMで使用するGRB速報システムのパスファインダー。

B.1.6 Geo-X

- 目的：地球磁気圏X線撮像
- 乗り物：超小型衛星 (50 cm・50 kg 級)
- 搭載装置：MEMS X線望遠鏡 + X線CMOS検出器 + 可視光遮光フィルタ
- 打ち上げ見通し：2024-25年頃打ち上げ目標、衛星開発中
- 関係機関：東京都立大、関東学院大、名古屋大学、東京大学、ISAS/JAXA、北海道大ほか
- 売り込みポイント：月付近からの「世界初」の地球磁気圏X線撮像、X線天文、惑星科学、太陽科学、宇宙工学の分野横断ミッション

B.1.7 SONGS

- 目的：太陽フレアに伴う高速中性子・軟ガンマ線の分光と宇宙天気への貢献
- 乗り物：JAXA革新的技術実証衛星やISSでの実験もしくは3Uキューブサット
- 搭載装置：積層プラスチックシンチレータとGAGGシンチレータアレイのMPPC読み出しによる中性子分光・コンプトンカメラ
- 打ち上げ見通し：2025年頃目標（太陽極大期）
- 関係機関：名古屋大学・名城大学の理工学連携
- 売り込みポイント：超小型衛星の低バックグラウンド環境化における太陽中性子観測を行うとともに軟ガンマ線による太陽フレアやGRBなどの突発天体の観測を狙う。

B.1.8 うみつばめ2

- 目的：MeV ガンマ線コンプトンカメラ衛星
- 乗り物：超小型衛星（50 cm・65 kg）
- 搭載装置：GAGG+MPPC コンプトンカメラと紫外線望遠鏡を搭載した観測衛星計画。200~2400 keV 二感度を持つ開口面積 10 cm×10 cm、瞬間視野 1 str のコンプトンカメラにより銀画面サーベイを実施。
- 打ち上げ見通し：2026 年目標
- 関係機関：早稲田大学、東京工業大学（理・工）
- 医療用に開発したガンマ線コンプトンカメラを衛星に搭載し、早期の観測を実現する。衛星バスはほぼ量産体制の整った、うみつばめ衛星のシステムを流用する。JST・ERATO ラインガンマ線プロジェクトにより開発進行中。

B.1.9 MoMoTarO (Moon Moisture Targeting Observatory) 計画

- 目的：月周辺での放射線測定により水資源探査・中性子寿命の測定・ガンマ線バーストの観測を行う
- 乗り物：国際宇宙探査での月周辺に投入される超小型衛星・キューブサット・月面ローバー
- 搭載装置：中性子とガンマ線に感度のあるシンチレータ系検出器
- 打ち上げ見通し：2028 年度頃
- 関係機関：京都大学、理化学研究所、立命館大学、聖マリアンナ医科大学、量研、JAXA、広島大学、国立天文台、近畿大学、名古屋大学、東京大学
- 売り込みポイント：月面に絶えず降り注ぐ銀河宇宙線で生じる熱・熱外中性子を測定することで、非接触で水資源探査を行える中性子水モニタの開発を行っている。これを月面ローバーに搭載するだけでなく、月周回機にも搭載して熱中性子の高度プロファイルの測定をすることで、中性子の寿命測定という素粒子物理学の研究をも狙う。さらに、月周辺でのガンマ線バーストの測定を行い、その到来方向の測定を行うなど、月面天文台として運用する。

B.2 気球実験

B.2.1 GRAINE (Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion)

- 目的：宇宙高エネルギーガンマ線精密観測実験 (10 MeV–100 GeV)

- 乗り物：長時間気球を繰り返す
- 搭載装置：エマルションガンマ線望遠鏡
- 打ち上げ見通し：2023年、科学観測開始のための豪州気球実験 (JAXA と実施)
- 関係機関：神戸大学、名古屋大学、岡山理科大学、岐阜大学、愛知教育大学、ISAS/JAXA
- 売り込みポイント：高角度分解能 (0.1 度@1GeV)、偏光有感、大口径面積 (~ 10 m²) (2018年のJAXA 豪州気球実験で Vela のイメージングにより 0.51 度@ (E_i80MeV) の角度分解能を検証)

B.2.2 SMILE-3 (Sub-MeV/MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiments 3)

- 目的：0.1 100 MeV にかけての MeV ガンマ線領域は、超新星爆発や中性子星合体に伴う元素合成・ガンマ線バーストや活動銀河核における粒子加速・宇宙線加速現場の探索・暗黒物質の間接探査等、多様な宇宙物理現象の解明へのプローブとして期待されている。この MeV ガンマ線帯域において真のイメージング分光を実現し、銀河系内拡散ガンマ線や MeV ガンマ線背景放射の起源解明、元素合成の現場観測や拡散の様子などを通して、20 年以上停滞している MeV ガンマ線天文学を切り拓く。
- 乗り物：複数回の長時間気球の実施後、衛星化を目指す。
- 搭載装置：CF₄ を用いたガス飛跡検出器と位置感度型シンチレータを組み合わせた電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡
- 打ち上げ見通し：2026 年 4 月ごろを想定、以降数年に一度の頻度を目指す。
- 関係機関：京都大学、山形大学、金沢大学、立命館大学、東北大学、東海大学、メリーランド大学、宇宙科学研究所
- 売り込みポイント：電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡は、コンプトン散乱を完全に再構成することで、MeV ガンマ線放射源の検出感度を根本的に向上する。気球を用いた天体観測実証実験により、宇宙環境下で雑音放射線事象を背景ガンマ線強度以下に低減し、信号雑音比を従来に比べて 10 倍以上改善したことを実証した。この結果、銀河中心領域の拡散ガンマ線放射を、その仰角の変化に伴うカウントレート増大として、フライト中のリアルタイムで観測できたほどで、これは広視野 MeV 観測として画期的な結果である。

B.2.3 GRAMS (Gamma-Ray and AntiMatter Survey)

- 目的：大有効面積の液体アルゴン検出器による MeV ガンマ線天文学の開拓と反粒子検出によるダークマター間接探査

- 乗り物：超長時間気球実験と将来的な衛星への展開
- 搭載装置：液体アルゴンタイムプロジェクトチェンバー
- 打ち上げ見通し：概念実証段階。NASAの超長時間気球フライトへの搭載を目指す。
- 関係機関：Columbia University、阪大、Northeastern University、早稲田大、東大、神奈川大、広島大、他
- 売り込みポイント：日米の若手宇宙物理・素粒子物理研究者による大面積 MeV ガンマ線望遠鏡とダークマター探索の新しいコンセプト。大面積を活かした大統計データの取得による MeV ガンマ線天文学の開拓を目指す。将来的には微弱信号の検出による超新星・中性子星合体の観測を目標とし、マルチメッセンジャー天文学の一翼を担う。

B.2.4 miniSGD

- 目的：ASTRO-H/SGD 検出器の概念を引きつぐ狭視野 Si/CdTe 半導体コンプトン望遠鏡により、大気ガンマ線をシールドで有効に遮蔽しつつ、sub-MeV 帯域で宇宙を変更分光観測をする狙いの「気球 SGD」計画を検討しており、その概念実証機が miniSGD である。
- 乗り物：長時間気球をベースとする
- 搭載装置：BGO アクティブシールドで深く覆った中に、DSSD と CdTe-DSD で構成されるコンプトンカメラを設置している。直径 32 cm、高さ 40 cm 程度、重量 65 kg (電池込み) の小型のシステム。
- 打ち上げ見通し：2023 年 4 月の豪州気球で miniSGD が搭載されるフライトがキャンセルされたため、将来のフライトを模索中
- 関係機関：名古屋大学、東京大学 Kavli IPMU
- 売り込みポイント：5 ks と短時間でカニ星雲の 100 keV 帯域の偏光分光観測を実現した SGD の技術を継承し、新型の両面ストリップ検出器で角分解能の格段の向上を目指した実証ミッション。システム構成は FORCE の WHXI のそれも意識しており、実際に今後、硬 X 線帯域で動作試験をして性能検証をする予定。

B.3 連携ミッション

B.3.1 OHMAN

- 目的：ISS に搭載された日本の MAXI と米国の NICER を ISS 上で結ぶことで Time-domain 天文学を推進する。軌道上で MAXI のデータを解析し、X 線の増光を検出

すると即時に NICER に伝え、NICER がその方向の詳細観測を 2 分後（目標）から実施できるようになる。

- 乗り物：ISS
- 搭載装置：MAXI-NICER 接続用の laptop は ISS 内に既にあり。OHMAN ソフトを upload して専用にする。データは JEM ハブでイーサネットパケットを複製して OHMAN laptop に流す。
- 打ち上げ見通し：運用開始（2022 年 8 月 10 日）
- 関係機関：MAXI (理研)、NICER (NASA/GSFC)
- 売り込みポイント：突発天体が X 線で明るいうちに X 線で見よう。