

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3期*）
2021年1月30日

* 深沢泰司（広島大、委員長）、赤松弘規（SRON）、堂谷忠靖（ISAS/JAXA）、中澤知洋（名古屋大）、谷津陽一（東工大）、山口弘悦（ISAS/JAXA）、本間希樹（国立天文台、外部委員）、田中雅臣（東北大、外部委員）

目次

内容

1. はじめに	4
1.1 将来計画検討委員会.....	4
1.2 第3期の活動の概要.....	4
2. 宇宙物理学の目的	5
3. 高エネルギー宇宙物理学が明らかにすべき課題	5
3.1 宇宙の物質・空間のあり方と起源.....	6
3.2 宇宙における多様性の発現.....	7
3.3 物理学の根本原理の追求.....	8
4. 将来計画検討の前提条件	9
4.1 日本の宇宙政策との関連.....	9
4.2 分野の動向.....	10
4.2.1 米国 (NASA)の将来計画.....	12
4.2.2 ヨーロッパ (ESA)の将来計画.....	13
4.3 宇宙科学全体の動向.....	15
5. 高宇連が推薦するミッションとその戦略	15
5.1 高宇連が推薦するプロジェクト.....	17
5.1.1 X線分光撮像衛星 XRISM.....	17
5.1.2 大型国際X線ミッション Athena.....	18
5.1.3 広帯域X線高感度撮像分光衛星：FORCE.....	19
5.2 高宇連が推薦する分野横断プロジェクト.....	21
5.2.1 HiZ-GUNDAM.....	21
4.2.2 PhoENiX.....	21
6. 海外ミッションへの積極的な参加、気球実験や超小型衛星の活用	23
6.1 X線偏光観測衛星 IXPE.....	23
6.2 硬X線偏光観測気球実験 XL-CALIBUR.....	24
7. コミュニティーで進んでいる技術開発	24
7.1 現在進行中の装置開発研究.....	24
7.2 超小型衛星を取り巻く状況.....	27

7.3 大学院生及び若手研究者のサポート.....	28
8. 今後の将来計画検討委員会への引き継ぎと方向性.....	29
A. 高宇連メンバーが関わる外国衛星計画・小型・超小型衛星計画.....	30
ORBIS	30
速報実証衛星 AGU REMOTE INNOVATIVE CUBESAT ALERT SYSTEM(ARICA).....	30
KANAZAWA-SAT ³	30
うみつばめ	30
NINJASAT.....	31
SONGS.....	31
GEO-X.....	31
CIPHER	31
像再合成望遠鏡計画	31
EASTROGAM.....	32
AMEGO.....	32
COSI-SMEX(THE COMPTON SPECTROMETER AND IMAGER).....	32
OHMAN (MAXI-NICER 機上連携).....	32
SPHiNX (SEGMENTED POLARIMETER FOR HIGH ENERGY X-RAYS)	33
SMILE (SUB-MeV/MeV GAMMA-RAY IMAGING LOADED-ON-BALLOON EXPERIMENT)	33
GRAMS (GAMMA-RAY AND ANTIMATTER SURVEY).....	33
GRAINE (GAMMA-RAY ASTRO-IMAGER WITH NUCLEAR EMULSION).....	34
ハンガリー-GRB CAMELOT.....	34

1. はじめに

1.1 将来計画検討委員会

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、「地上からの直接観測が困難であり宇宙科学として行うべき電磁波帯域」（特に極端紫外線から GeV ガンマ線に至る波長帯域）による観測的研究を行う研究者の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、いつでも我々の将来像を示すことができるように準備しておきたいと考えており、その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」を策定し、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) 既に提案されている計画の順序づけをするだけでなく、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) 将来計画検討委員会の内部議論だけでロードマップが決まるわけではなく、適宜タウンミーティング等を開催することにより、高宇連会員や周辺領域からの意見を聞き、それらを考慮した上でロードマップが策定される。

高宇連将来計画検討委員会委員は、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 3 期将来計画検討委員会は 2018 年 10 月から活動を開始した。

1.2 第 3 期の活動の概要

2018 年 6 月 22 日に第二期のロードマップ（案）が答申された（最終版は 2018 年 9 月に公開）。最終答申は高宇連ホームページから閲覧可能である。これを受けて、第 3 期将来検討委員会が 2018 年 10 月に発足した。委員のメンバーは、深沢泰司（広島大、委員長）、赤松弘規（SRON）、堂谷忠靖（ISAS/JAXA）、中澤知洋（名古屋大）、谷津陽一（東工大）、山口弘悦（ISAS/JAXA）、本間希樹（国立天文台、外部委員）、田中雅臣（東北大、外部委員）である。

第 3 期の活動開始直後に、学術会議よりマスタープラン 2020 への推薦の依頼があった。そこで、高宇連タウンミーティング（2018 年 11 月 12 日開催、オンライン zoom）開催やメールで会員に意見聴取を行いながら議論を進めて推薦の文章を作成し、2018 年 11 月 30 日に提出した（高宇連内部向け HP ページ掲載、学術会議 HP 掲載）。詳しくは後述するが、この時点で高宇連のロードマップに載っていた 5 計画（区分 II：XRISM、区分 I：Athena、FORCE、HiZ-GUNDAM、PhoENiX）について、明示的に優先度をつけることなく、高宇連が主体となる 3 計画（XRISM, Athena, FORCE）および分野横断型の 2 計画（HiZ-GUNDAM, PhoENiX）を推薦した。なお、第 3 期任期中は、この 5 計画の位置づけはキープされ、他計画の増減は無かった。また、2019 年 11 月に宇宙科学研究所より分野のロードマップの提出依頼があり、特に深い議論を要する状況ではなかったため、第 2 期将来検討委答申をもとに作成したドラフトをメールで会員に回覧して承認をとり、提出した。

また、高宇連研究会（2019 年 3 月 18-20 日、東京大本郷）の 3 日目に将来検討の議論の時間帯を

取り、第3期の活動内容について意見聴収や議論を行った。その場で特に2030年代を見据えた将来計画構想の検討をそろそろ始めなければならないという意見があったため、2019年12月26日（東工大田町ビル）で2030年代を見据えた将来計画に関するタウンミーティングを開催し、自由なテーマで発表をしてもらった。さらに、高宇連研究会（2020年3月2-3日、オンライン zoom）の2日目に将来検討に関する議論を行い、技術ロードマップの策定を行うとの方針が認められ、2020年6-7月に最初の技術ロードマップへのインプットを募集した。その後も随時受け付けている。第3期中には後述するように18件のインプットがあった。これをどう取り扱うかは次期将来計画検討委員会の課題とした。最後に、2020年7月27日（オンライン zoom）で将来検討タウンミーティングを開催し、本答申のとりまとめに関する議論を行った。この他、昨今急速に進展が見られる超小型衛星の日本における状況の改善に向けて問題意識を共有し、また中国インドとの連携に向けた意見交換も行った。

2. 宇宙物理学の目的

人類がいま手にしている標準的な宇宙モデルでは、宇宙は未知のダークエネルギーおよびダークマターにより占められたほぼ平坦な空間をもち、現在は加速膨張をしている。その時空の中で、宇宙初期のインフレーション期に生成された密度揺らぎが成長し、様々な階層の構造形成がなされ、今日我々のいる宇宙に至ったと考えられる。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は、宇宙の枠組みを知る上で極めて重要な、喫緊の課題となっている。また、我々に身近であるはずのバリオンでさえ、その大半の所在は依然として不明である。

一方、我々の住む宇宙は、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。天文学・宇宙物理学の究極の目的は、「我々を取り巻く世界」を理解し、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、この複雑な物質世界の様相を明らかにし、その時間発展を過去にさかのぼるとともに、現在の様子を詳細に調べ、未来へたどることが必要である。そのために、希薄な銀河間空間物質から濃い物質で隠された天体まで、また、冷たい分子雲から相対論的高エネルギー粒子までの宇宙の現象を隅なく捉えることが必須である。昨今発展しているタイムドメイン、マルチメッセンジャー天文学は、その流れに沿ったものである。

さらに、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。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、いまだ解明しきれていない課題が存在する。そして、それらを理解していくアプローチのいくつかは、宇宙でのみ実現するような極限状況を必要とする。

3. 高エネルギー宇宙物理学が明らかにすべき課題

高エネルギー宇宙物理学のうち、特にX線から GeV ガンマ線の領域では、様々な飛翔体による

観測が行われてきた。これまでの研究により、星から銀河団に至るほぼすべての天体階層からX線あるいはガンマ線の放射が見られ、その源である高エネルギー現象は現在の宇宙で普遍的に存在することが明らかとなっている。10 keV 以下のX線観測は 10^6 K 以上の熱的プラズマ観測に最も適しており、撮像の空間分解能は比較的高い。また、ガンマ線観測は相対論的エネルギーまで加速された粒子からの放射や不安定原子核からのガンマ線、電子陽電子対消滅線の観測を可能とする。

高エネルギー現象の観測は、星や銀河という「天体」として観測される物質やエネルギー状態だけでなく、磁場や加速粒子のように、束縛状態にないエネルギー場の研究にも及ぶ。このようなエネルギー場からの放射では、広帯域エネルギースペクトルによって放射の素過程、それに関与する物理状態が解明されることも多く、X線やガンマ線と共に、電波から TeV ガンマ線にいたる多波長観測という手法も重視される。さらには現在では可能となった重力波、ニュートリノ観測も電磁波観測で得られない情報を与える。白色矮星、中性子星、ブラックホールなどのいわゆる高密度天体と降着円盤からの放射も、この波長に特徴的である。こうした星の終焉期における高密度天体の生成過程には未だ解明できていない部分も多い。一方、10 keV 以上の波長域では、軟X線に比肩するような、十分高い空間分解能の観測例がなく、未だ点源に分解されない「バックグラウンド」放射が存在する。この正体を解明する過程で、今後も新たな高エネルギー放射をする天体が発見されることであろう。

総じて高エネルギー宇宙物理学分野の観測は、現在の宇宙を構成する物質やエネルギーの「天体」にとどまらない様々な様相を知り、また物理法則の極限を探る、ということに長けている。したがって、宇宙物理学の両輪である「宇宙の今を知ること」、そして「今の宇宙の姿をもたらした理由を探ること」のために欠かすことはできないものである。

3.1 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。それは標準的宇宙論の検証を行い、宇宙の物質や空間がどのように構成されているか、あるいは構成されてきたかを探る上で欠かすことができない実体だからである。

- (1) ダークマター：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。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となっており、これらが、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。そのためX線による銀河間物質分布の観測は銀河団におけるダークマター分布の推定に不可欠であり、重力レンズ効果や Sunyaev-Zeldovich 効果による観測と相補的である。また、ダークマター粒子の反応に伴って予言される信号をX線やガンマ線で観測することによって検出することも期待される。
- (2) ミッシングバリオン：宇宙観測のほとんどはバリオン、すなわち通常の核子からなる物質を直接の対象としているが、近傍宇宙において実際に観測されているバリオンの総量は、宇宙マイクロ波背景放射(CMB) 非等方性データや軽元素合成理論から予測される値の約半分以下であり、大量のミッシングバリオンが存在することが示唆されている。ミッシングバリオンの最有

力候補は大規模構造形成に伴う重力エネルギーの開放によって 10^5 K 以上に加熱された WHIM (Warm-Hot Intergalactic Medium) と呼ばれる銀河間物質であり、これを直接検出できるのは極端紫外線から X 線にかけての観測しか無い。

3.2 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んでいる。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 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する。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も重要な課題である。

- (1) 銀河と巨大質量ブラックホールの形成・宇宙再電離：宇宙に存在する銀河の中心にある巨大ブラックホールの大多数は、塵やガスに隠されていることが知られている。特に、ブラックホールの質量が増加する初期段階では、周囲からの物質流入量が多く、放射が強く吸収されている可能性が高い。そのため、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 10 keV 以上の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という原理的な優位性を持つ。ガンマ線バースト (GRB) は、遠方の銀河の中で発生し、爆発時には大量のエネルギーを X 線やガンマ線の領域で放射することが知られている。そして、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であるとする説あり、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。
- (2) 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。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、バリオンのおよそ大半を占める高温プラズマの観測は現在の重元素組成に関する情報を与える。高エネルギー宇宙観測は、超新星爆発、超新星残骸、銀河、銀河団など様々な環境における重元素量の測定に大きな役割を果たしてきたが、r-process に代表される元素合成反応、爆発現象を通じて中性子星・ブラックホールが生成する過程、GRB との関係など、未解明の課題が多く残されている。2017 年 8 月 17 日には重力波観測により、史上初の中性子星合体事象が観測された。今後は電磁波対応天体の観測などを通して、元素合成のミッシングリンクを埋める事象になりうるかの研究が進むであろう。
- (3) 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」が存在している。その最大エネルギーは 10^{20} eV に及ぶ。そして、エネルギー密度は宇宙マイクロ波背景放射に匹敵し、宇宙の構成要素として無視はできない。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、PeV粒子まで加速している超新星残骸が少ない、あるいは、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、など不明な点も多い。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や銀河団でのプラズマの衝突などの可能性が議論されている。最近の高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のフレアとの同期現象は、この議論に大きなインパクトを与えた。相対論的ジェットの発生機構、構成粒子、加速機構はいまだに不明な部分が多く、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線ガンマ線観測が望まれる。

3.3 物理学の根本原理の追求

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下記のような重力波とは相補的な観測が期待できる。

- (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。これらは、重力波観測や可視光サーベイ観測と相補的にX線ガンマ線観測でもなされることが独立検証として重要である。
- (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。その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。最近の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法則の理解のために重要である。

- (4) 無衝突衝撃波：超強重力場・超高密度とは対照の極限として、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る。無衝突衝撃波は、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。
- (5) ダークマター：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。ダークマターの探査は、加速器実験、直接検出などの地上実験が行われているが、宇宙観測によるダークマター信号の間接探査も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、X線ガンマ線観測でも進みつつある。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。

4. 将来計画検討の前提条件

4.1 日本の宇宙政策との関連

日本が提供する打ち上げ手段を用いて飛翔体ミッションを実現する上で、2013年1月に制定された「宇宙基本計画」の枠組み (<https://www8.cao.go.jp/space/plan/keikaku.html>; 最新版は2020年6月30日閣議決定、工程表は2020年12月15日宇宙開発戦略本部決定) を無視することはできない。宇宙物理学、太陽系科学、宇宙工学を含む宇宙科学分野には、一定の打ち上げ頻度は確保されるが、そのための予算規模は限られたものである。高宇連の関係する分野では、X線撮像分光観測衛星(XRISM)の打ち上げが、2022年度に位置付けられている。

JAXAの宇宙科学・探査プロジェクトは、表1に示すように、いくつかの資金規模でカテゴライズされた上で、ボトムアップを基本として選定される。この枠組みの中で、高エネルギー宇宙物理学分野(あるいは広く天文学分野)のミッションが、例えば、同じカテゴリーで連続することや、同時期に複数のカテゴリーを独占することが認められるとは考えにくい。他の分野への広がり、あるいは他分野とのシナジーを持つなどが好まれることもあるだろう。

打ち上げ能力の拡大につれ、世界的趨勢として、飛翔体ミッションは大きな目標を掲げ、大規模化の一途をたどっている。その中で、ある目的を達成する際に、国際協力が可能であるか、また必要であるかを見極め、最適化することも求められている。すなわち、科学の中での重要度としての

優先順位、実現時期の必要性のみならず、ある一定枠があるとしたときの国際協力も含めた最適化を考慮したロードマップが求められている。一方で、大型計画ばかりではなく、ロケット、長時間飛行気球、あるいは超小型衛星などの飛翔体を用いた実験についての戦略も検討が必要である。

なお、2020年度にミッションカテゴリーの変更の検討が進められており、それぞれの位置づけや予算規模、打ち上げ頻度などに関して変更がなされるだろう。

表1：JAXA 宇宙科学・探査プロジェクトの規模。

	キャリア等	定義と予算規模
戦略的に実施する中型計画	H-IIA、H-III を想定	世界第一級の成果創出を目指す、各分野のフラッグシップ的なミッション。多様な形態の国際協力を前提とするが、日本が major partner として全体をリードする。プロジェクトライフの総経費の中で JAXA からの総支出が 300 億円以下であること。
公募型小型計画	イプシロンロケットを想定	高頻度な成果創出を目指し、機動的かつ挑戦的に実施する小型ミッション。地球周回軌道からのサイエンスを適正規模のミッションでタイムリーに実施する一方で、衛星探査機の小型化・高度化技術などの工学課題の突破から惑星探査への展開も図り、高頻度な成果創出を目指す。プロジェクトライフの総経費の中で、JAXA からの総支出が 150 億円以下であること。
戦略的海外協同計画	ESA L/M クラス、NASA 旗艦計画、大型公募計画	海外ミッションの minor partner としての参加や国際宇宙探査の観測機器の搭載機会等を活用するなど、多様な機会を最大に活用し、成果創出の最大化を図る。計画全体で、10 億円/年の経費制約がある。
小規模計画	海外サブペイロード、海外の観測ロケット・大気球、国際宇宙ステーション（ISS）	様々な飛翔機会を利用した提案等。プロジェクトあたり、最大で 2 億円程度以下。マッチングファンド方式を基本とする。

4.2 分野の動向

X線天体物理学分野では、XRISM 計画がこの先 10 年の分野を代表するミッションとして進められている。また Athena 衛星計画は、XRISM を除くと今後 10 年間で日米欧の中で唯一認められた大型 X 線天文台ミッションであり、XRISM 以降の時代では、最も確実かつ大型の計画である。日本はこれまで日米欧の 3 極の一つとなってこの国際大型計画を推進してきており、初期の大型計画 XEUS の頃から、多くの高宇連メンバーが参加してきた。この XRISM-Athena の流れを中心に据え

て、高宇連の将来計画を立案することは自然であろう。

ASTRO-H/ひとみの喪失により得られなかった科学成果の一部（「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」）は、XRISM 計画の「超高分解能 X 線分光」により実現される。高宇連は XRISM 衛星の開発・打ち上げを成功させ、多くの科学的成果を創出することが求められている。このため、高宇連主導の衛星計画を新規に着手するのではなく、XRISM 衛星の成功に注力し、その科学的な結果を踏まえた上で、新規に衛星計画を立ち上げた方が良いという考え方も強い。一方で、表2の第2列以下に示すような、XRISM 計画や Athena 計画により実現することができない重要な科学テーマが存在しており、世界的に見ると、そのような科学テーマを追求する衛星ミッションが積極的に立案されつつある。また、インドならびに中国が、X線天体物理学分野に急速な勢いで参入してきており、多くの将来計画が検討・立案され始めた。日本でも、予算やマンパワーを考慮した上で、XRISM や Athena でできない科学テーマを追求するミッションを将来計画の中に組み込む戦略性を持つことが、この先10~20年を考えると必須であろう。これら分野の動向を念頭に置いた上で、将来計画を検討すべきである。

昨今の世界的な X 線ガンマ線観測衛星の動向としては、2017年6月3日に NASA ゴダード宇宙飛行センターが主導する NICER (Neutron star Interior Composition Explore; <https://www.nasa.gov/nicer>) が打ち上げられ、宇宙ステーション上に設置、順調に観測を続けている。また、ドイツとロシアによる Spectrum-Roentgen-Gamma 衛星が打ち上げられ、その観測装置の1つ eROSITA が全天 X 線サーベイを開始した。中国とインドも Insight-HXMT(2017-)と Astrosat(2015-)をそれぞれ打ち上げ、成果を上げている。さらに、世界初の高感度 X 線偏光観測を実現する小型衛星 (SMEX) として、NASA マーシャル宇宙飛行センターが主導する IXPE(Imaging X-ray Polarimeter Explorer)が採択され、2021年の打ち上げが予定されている。

表2：X線ガンマ線観測の科学テーマ

次元軸		科学テーマ	手段
波長	分解能	プラズマ診断・運動学、暗黒物質	超高分散分光
	帯域	AGN、非熱的放射、暗黒物質	硬 X 線・ガンマ線
空間	解像度	宇宙最初の AGN	高解像度撮像
	視野	銀河間ガス、X線ガンマ背景放射、天体探査、天体の宇宙論進化、暗黒物質など	拡散放射、logN-logS
		突発天体	広天監視、多波長、マルチメッセージャー
探査域	全天 X 線ガンマ線源目録	全天監視	
時間	分解能	中性子星、ブラックホール	超高速計時
	時間尺度	突発天体、変動天体	長期監視

	運用時期	突発天体、変動天体	多波長、マルチメッセンジャー
偏光	偏光度・方位角	磁場、幾何構造、極限状態	偏光

4.2.1 米国 (NASA)の将来計画

NASA 主導のスペースミッションは予算規模やミッションの性格に応じて以下のようにクラス分けされる。高コストの大型ミッションを実現させつつ、ある程度のリスクを許容した中小規模ミッションを並列させることで打ち上げ機会を維持する狙いがあり、日本の宇宙科学分野にとっても見習うべき点が多い。なお、コスト上限は毎年変動するため、目安の金額を示す。

Flagship: コスト上限は約 40 億ドル。コミュニティの総意に基づく大きな科学目標を掲げ、パラダイムシフトを確実に実現するための枠。Hubble, Compton, Chandra, Spitzer の 4 台旗艦ミッションの他、JWST, Nancy Grace Roman Space Telescope (旧 WFIRST) などの将来計画がこのクラスに該当する。2030 年代の計画としては、Lynx (X線)、LUVOIR (紫外・可視・赤外)、Origins (中間・遠赤外)、HabEx (系外惑星直接撮像)が候補に挙げられている。

Probe class: コスト上限は約 10 億ドル。Flagship と後述の Explore の中間を埋めるクラスとして定義されつつある。汎用天文台ながら、PI が設定した主要な科学目標にある程度フォーカスしたミッションが想定される。高エネルギーのプロジェクトとしては AXIS、Strobe-X、TAP、AMEGO、XGS-P、HEX-P、XPP がこのクラスの候補に挙げられる。なお、現状日本には以上の 2 クラスに相当するコスト枠は存在しない。

MIDEX (Mid-Explore): コスト上限は約 2 億 5 千万ドル。数年に一度の頻度で公募が行われる。目的特化型のミッションが主。Swift や Arcus がこれに該当する。

SMEX (Small-Explore): コスト上限は約 1 億 5 千万ドル。目的特化型のミッションが主。ある程度のリスクを受け入れ、高頻度の打ち上げ機会を維持することが本枠の狙い。NuSTAR や IXPE がこれに該当する。

上記に加え、NASA 以外の機関(大学等)が主導するミッションのためのハードウェア開発や、Explore(MIDEX, SMEX)よりも小規模のミッションを想定した **Missions of Opportunity (MoO)** が不定期で公募される。コスト上限は 7 千万ドル程度。HETE-II や NICER が本枠を使って開発されたほか、Suzaku/XRS や XRISM/Resolve, ARIEL など、JAXA や ESA が主導する国際協力ミッションへの参画にも本枠が使われることがこれまでは多かった。但し後述するように、今後は本枠を利用した国際協力は困難になると見込まれる。

他に特筆すべき点として、NASA は「宇宙物理学専用の」**CubeSat プログラム**に年間 5 百万ドルを毎年投資しており、主に大学所属の PI がリードする目的特化型の超小型衛星を高頻度で実現させている。また、地上プラズマ実験など、ミッションの科学成果創出を間接的に支えるプロジェクトにも資金的なサポートを行っている。日本では、これらの枠組みが存在しない、あるいは十分に成熟していないため、科研費等の競争的資金に頼らざるを得ない状況が続いている。

以下、個別の将来計画について、規模順に概要を述べる。なお、IXPE (と発展版の XPP)、AMEGO については、それぞれ 6.1 節、付録 A にて詳述するので本節では割愛する。

Lynx: 2030 年代における高エネルギー宇宙物理学唯一の Flagship ミッション候補。Chandra と同程度の角度分解能(0.5" on-axis)と Athena と同程度の有効面積(2m² @1 keV)を持つ望遠鏡、22 分角の広視野撮像検出器、エネルギー分解能 3 eV のカロリメータ、軟 X 線帯域で R > 1000 の回折分光器を全て搭載することが想定される。科学目標は Athena とほぼ共通する。

AXIS: Probe クラスミッションとして 2030 年前後の打ち上げを目指す。検出器のエネルギー分解能は CCD 相当(150 eV @6 keV)ながら、Chandra を上回る角度分解能(0.3")と大有効面積(1500 cm² @6 keV)、低バックグラウンド、高時間分解能(< 50 ms)、即応性など、遠方の銀河・活動銀河核の検出に最適化した性能を有する。望遠鏡は GSFC が開発する Si 結晶薄板鏡を採用。

Strobe-X: 同じく Probe クラスミッションとして 2031 年頃の打ち上げを目指す。端的に言えば RXTE, NICER の強化版(時間分解能 ~100 ns)に広視野モニタを加えたミッションであり、ブラックホールの回転や中性子星の状態方程式の解明を主たる科学目標とする。

TAP: 同じく Probe クラスミッションとして 2030 年頃の打ち上げをを目指す。端的に言えば、Swift の後継機であり、広視野の軟 X 線望遠鏡と多波長検出器により、重力波対応天体などを即時にフォローアップ観測する。

Arcus: 2016 年公募の MIDEX に候補として選出され Phase A まで進んだプロジェクトであり、最終選考で SPHEREx に敗れたものの、次回 MIDEX の最有力候補と言える。Si pore optics に臨界角透過型回折分光器を組み合わせ、12-50 Å で R=3000 を実現する。吸収線を用いた WHIM 探査や、活動銀河核アウトフローの分光等を主たる科学目標に掲げる。

NASA Missions of Opportunity (MoO)の見直しについて

2020 年 6 月にオンラインで行われた第 236 回米国天文学会(AAS)年会におけるタウンミーティングにおいて、NASA 科学局宇宙物理部長の Paul Hertz 氏より以下の報告がなされた。

上述の通り、「すざぐ」への XRS の提供など、「NASA がマイナーパートナーとなる国際協力ミッション」に参加する目的でこれまで MoO 枠が利用されてきたが、リスク評価の難しさ等の観点から、今後は同様の計画段階での提案を MoO で受け付けられないことになった。今後は、機関間で完全に承認済みの計画のみが受け付けられることとなる。日本主導のミッションとしては、高宇連推薦の FORCE の他、JASMINE や LiteBIRD が MoO の利用による NASA の参画を想定していたため、これらのミッションに対する今回の決定のインパクトは大きい。今後の将来計画を検討する上でも、NASA の新指針を十分に考慮する必要があるだろう。具体策としては、国際協力が必須となるミッションについては、コミュニティの総意をまとめ、Agency-directed に推し上げるなどの工夫が必要となる。

4.2.2 ヨーロッパ (ESA)の将来計画

ESA では、Cosmic Vision において、2015-2035 年の計画が公募されて審議が進んできた。Mission category としては、L-class (1B€, flagship)、M-class (500M€)、S-class (50M€)、F-class (fast class, <8 年 <1000kg、M と相乗り)。ただし、検出器予算は上に含まれない。

M-class: ヨーロッパでは、現在、ESA の長期計画の一環である Cosmic Vision Medium class (M5: 2032 年打ち上げ予定) の選考が進んでいる。これまでに、EnVision (金星探査)、THESEUS

(時間領域天文), SPICA (赤外線天文)が候補として選ばれ, 2021年初頭の final selection へ向け, 様々な審査が行われてきた. このような中, 2020年10月15日付で ESA-ISAS/JAXA 共同声明として, コスト超過の面から SPICA を M5 候補から取り下げる, というアナウンス ([ESA](#), [ISAS/JAXA](#))がなされた. SPICA は日本の天文学コミュニティが推進する大型計画として日本学術会議マスタープラン 2020 にも掲載されており, 今後の動向に注意が必要であろう.

Cosmic Vision L-Class : Large class mission として定められている Athena (L2: X線天文), LISA (L3: 重力波天文)は, 各々開発, 審査が進んでいる.

Vision の後継として, Voyage2050 を立ち上げた. これは 2035-2050 年代に”いくつかの M-class mission が好ましいのか”, “L-Class mission に値する科学目標”, “将来必要となる技術要素”を決定する bottom-up process となる. 2019 年に white paper 科学目標+必要な技術的要素に絞った white paper の公募が掛かり, 100 を超える white paper が提出された. 選出された white paper (科学目標+必要な技術的要素に絞った white paper) が workshop での講演を行なっている. 今後, topical panel による review を通じ, 選抜が進んでゆくと予定されている.

以下に, 高宇連と関係が深い White paper の概要をまとめる.

表 3 : 高宇連と関係の深い White Paper の概要

White paper	概要	カテゴリー
Voyage through the Hidden Physics of the Cosmic Web	WHIM/CGM 探査/TEScal surveyor	L-Class
The high energy universe at ultra-high resolution: the power and promise of X-ray interferometry	X線干渉計	L-Class
A deep study of the High-Energy Transient Sky	MeV 帯域時空間天文	L-Class
PHEMTO: Polarimetric High Energy Modular Telescope Observatory	Hard X-ray (~600 keV) Polarimetry	M-Class
A Polarized View of the Hot and Violent Universe	0.2-50 keV polarimetry	M-Class
The ASTROGAM Concept and Beyond	MeV domain	M-Class
Understanding the origin of the positron annihilation line and the physics of the supernova explosions	MeV domain	
The Voyage of Metals in the Universe from Cosmological to Planetary Scales	軟X線回折格子	M-class

4.3 宇宙科学全体の動向

世界的にみて、宇宙物理学分野は激動の時代に突入している。2015年9月14日に世界で初めて、LIGO重力波望遠鏡により、ブラックホール合体からの重力波が観測された。その後も、数10太陽質量のブラックホール同士の合体からの重力波が受かり、これらの発見に対して、2017年度のノーベル物理学賞が授与された。2017年8月17日には、中性子星合体からの重力波が観測され、同時に電磁波領域でもガンマ線バーストが検出され、真のマルチメッセンジャー天文学が幕を開けた。さらに、2017年9月22日には、フレア中のブレーザー天体の方向から高エネルギーニュートリノが検出され、重力波とともにマルチメッセンジャー天文学の双壁となるとともに、高エネルギーニュートリノ・最高エネルギー宇宙線の発生源の解明への一歩が始まった。2019年4月には世界中の電波望遠鏡が共同して実現したEvent Horizon Telescopeによるブラックホール近傍の撮影画像が発表された。

2020年代前半にはJWST宇宙望遠鏡、LSSTなどの地上大型望遠鏡、SKA電波望遠鏡、CTAガンマ線望遠鏡等の大型ミッションが本格的に稼働する。LIGO/Virgo等の重力波天文台も感度を上げ、日本の重力波天文台であるKAGRAも間もなく本格稼働する予定である。X線天体物理学もこれらの動向には無縁ではなく、各波長の電磁波観測や、重力波、ニュートリノ、荷電粒子などの異種メッセンジャー観測との連携を模索することが極めて重要な意味を持つ。

5. 高宇連が推薦するミッションとその戦略

高宇連における第3期委員終了時点での工程表（ロードマップ）を図に示す。高宇連が推薦するミッションとしては、第2期から計画の増減はなく、マスタープラン2020に推薦する際に、以下のように考え方が整理された。

高宇連のロードマップにおいて高宇連が中心となって推進すると位置付けられているのが、XRISM衛星、FORCE衛星（公募型小型を想定）、そしてAthena衛星（戦略的海外共同計画）である。X線精密分光の世界的な流れを切り開くべく日本を中心として開発中のXRISM、そしてこれを発展させるESAの大型X線観測衛星Athenaへの日本の参加の流れを機軸とし、この2衛星では実現できない重要課題としての高感度硬X観測を目指すFORCEをXRISM衛星の次に推進する高宇連の主力ミッションとして位置づけている。FORCEは2019年度公募型小型に応募したが採択されず、引き続き活動は続けている。

高宇連の重要サイエンスを分野横断的にカバーするのが、HiZ-GUMDAM衛星（公募型小型）と、PhoENiX衛星（公募型小型を想定）である。HiZ-GUMDAMは、光赤天連と高宇連による分野横断型のガンマ線バーストの観測計画であり、2017年度のJAXA公募型小型科学衛星で2つの候補の一つとして選ばれている。PhoENiXは、太陽研連と高宇連による分野横断型の太陽フレア中の粒子加速を観測する衛星である。PhoENiXは2017、2019年度公募型小型に応募したが採択されず、引き続き活動は続けている。

5計画とも、高宇連の観点からマッチしたサイエンスを掲げ、高宇連の会員が主体的に参加しており、高宇連のロードマップに沿った計画である。また、高宇連会員の人的リソース配分につ

いても各計画の具体化の中で今後適切に調整されると考えている。高宇連が中心となって推進する3計画(XRISM、FORCE、Athena)は、時系列に沿って遂行すべき重要な計画であると位置づけている。また、分野横断型の2計画(HiZ-GUNDAM、PhoENiX)はいずれも高宇連として重要なながら、連携する分野が異なり参加している高宇連会員も異なる。5計画のうち、既に予算化されているものはXRISMのみである。

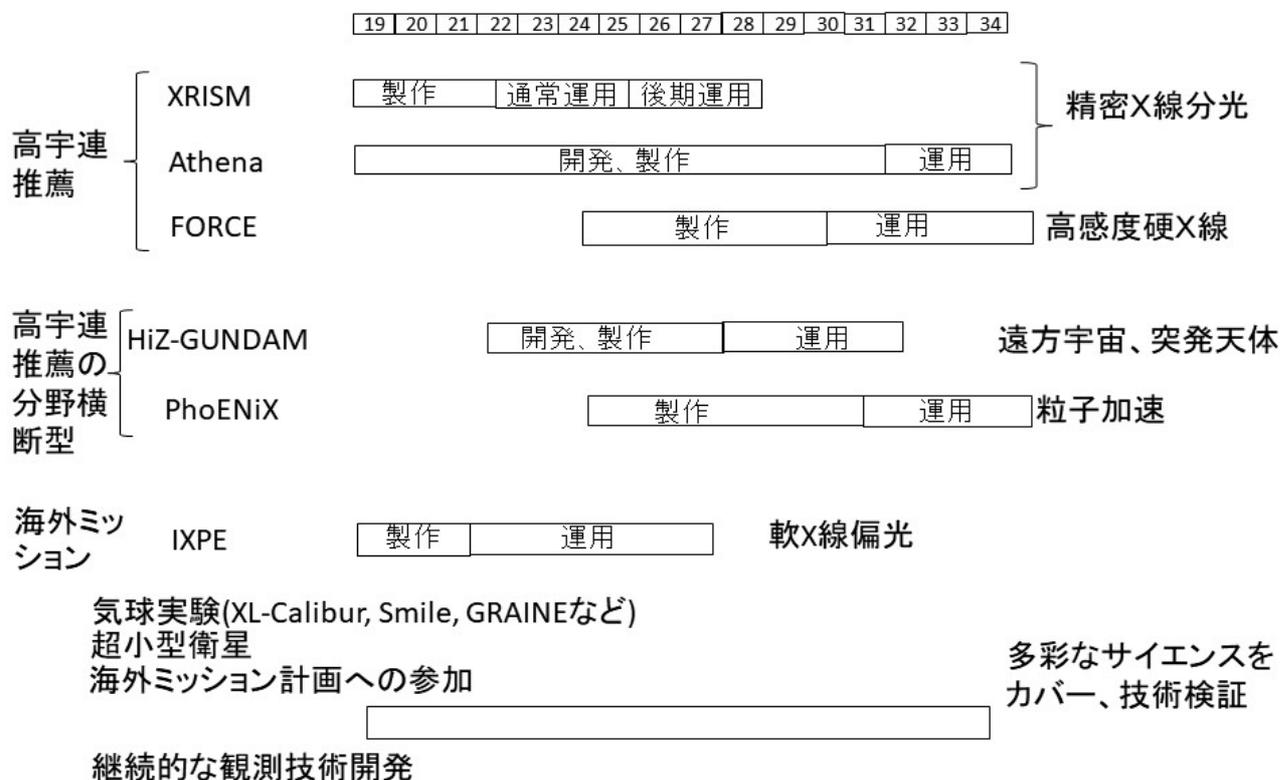
なお、マスタープラン2020に向けてLOIが提出された計画のうち、高宇連では、高宇連が中心となって推進する3計画(XRISM、FORCE、Athena)と、分野横断の枠組みで高宇連会員が参加して推進している2計画(HiZ-GUNDAM、PhoENiX)について推薦を行った。

これらとは別に、高宇連の会員が海外ミッションに大きな貢献をしながら参加しているものとして、X線偏光観測衛星IXPE（アメリカ、2021年度打ち上げ予定）があり、ISAS/JAXAから小規模計画の枠組みで支援されている。また、2つのガンマ線観測気球実験(MeV:Smile, GeV:GRAINE)が国内で進んでいる。一方で外国での打ち上げに高宇連から大きく参加する例として、現状では硬X線偏光観測気球実験XL-Calibur（アメリカ）が進んでおり、ISAS/JAXAから小規模計画の枠組みで支援されている。

この他、将来ミッション検討を進めるため、ISAS/JAXA理学委員会におけるリサーチグループとして、X線ガンマ線偏光観測(2016-)、MeVガンマ線観測(2019-)、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(2019-)が立ち上がっている。

高宇連将来衛星計画ロードマップ

2020年11月版



5.1 高宇連が推薦するプロジェクト

5.1.1 X線分光撮像衛星 XRISM

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受け、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、各コンポーネント・サブシステムの製造・試験を行っており、2020年度末から2021年度にかけて、衛星インテグレーションを開始する。2021年度は、ミッション機器をふくむインターフェース試験、2022年度には、衛星総合試験を経て、打ち上げオペレーションを計画している。

XRISM は、打ち上げ後、初期校正と検証運用を行う。この期間の観測は、XRISM の科学的課題に取り組むための性能を実証する目的で計画される。そのための観測天体は、XRISM 科学チームで検討中である。打ち上げ後、およそ9か月までに予定されているこれらの運用の後、広く公募観測による通常観測運用を行う。初期の通常観測期間は打ち上げ後3年間と定義されており、その間に本計画で目指す科学成果の詳細については、Tashiro et al. (Proc. SPIE 10699, Space Telescopes and Instrumentation 2018: Ultraviolet to Gamma Ray, 1069922 (6 July 2018); doi: [10.1117/12.2309455](https://doi.org/10.1117/12.2309455)) に記載されている。

5.1.2 大型国際X線ミッション 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」の四つを掲げている。2013年11月、ESAは二番目に打ち上げる大型ミッションL2の科学目的として、"The Hot and Energetic Universe" を採用した。これは、上記の3. と4. に関連した、

A) 普通の物質(バリオン)がどのように集まって今日のような大規模構造になったのか

B) どのようにしてブラックホールは成長し、そして宇宙の構造に影響を与えるのか

という謎に挑戦するものである。そして2014年6月、"The Hot and Energetic Universe" のためのミッションとして、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、大面積X線望遠鏡 (Silicon Pore Optics; SPO)、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、2030年代の大型天文台である。

日本は1990年代後半の XEUS 計画、2010年代の IXO 計画や前 Athena 計画を通して、長い間国際協力を続けてきた。現在の Athena 計画に日本の参加が期待されている理由は、これまでの国際協力関係に加えて、日本には「ひとみ」衛星や XRISM という Athena の先駆けミッションの開発経験があることが大きい。我々は現在、Athena ミッションの正式な製作スタート時に国際パートナーとして参加し、データを共有するという目標をたて、活動を行なっている。宇宙研理学委員会に対しても Athena WG として2015年2月に小規模プロジェクトとしての申請を行い、宇宙理学委員会よりプロジェクトへの推薦を得た。その後小規模プロジェクトの枠組みが変わり、2019年10月1日に戦略的海外共同計画の候補としてミッション探求フェーズ活動 (Pre PhaseA1b)を行うこととなった。そのため、日本の Athena グループは WG を終了し、宇宙科学

研究所所内計画チームへと移行し、現在プリプロジェクト化を目指している。Athena 自体は、2019年11月に Phase-A を終了し、Phase-B に入った。次の重要なマイルストーンは、2022年中ごろに予定されている Mission Adoption Review (MAR) である。本格的建設は MAR 以降に始まるので、これと歩調を合わせたい。

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、2030 年代世界で唯一の大型 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。そのために、現在 ASST (Athena Study Science Team) や SWG に日本人研究者が入り込み、Mock Observation Plan の立案などに関わっている。

Athena ハードウェアへの貢献としては、X-IFU の冷却系をメインとしている。X-IFU のための冷凍機開発技術は、「ひとみ」や XRISM のみならず、LiteBIRD や SPICA などの他プロジェクトにも応用可能な重要な冷凍機技術である。そのため宇宙科学研究所は、CNES（フランス国立宇宙研究センター）および CEA（フランス原子力・代替エネルギー庁民生科学センター）と協力し、ESA の公募型研究開発プログラム Cooling Chain Core Technology Program (CC-CTP) に参加し、そのもとで基礎技術開発に取り組んできた。特に、絶対温度 4K/2K を実現するジュールトムソン冷凍機は、日本の開発品が要求を満たし、最も開発が進んだ段階にある。なお、X-IFU consortium には日本人研究者 4 名が Co-I として参加しており、さらに日本人研究者 1 名が X-IFU scientist として参加している。

サイエンス、X-IFU 冷凍機への貢献が日本の貢献のベースラインである。その他の寄与として、X-IFU の多数ピクセル読み出しに必要な SQUID の提供の可能性を検討している。また、SPO の迷光を削減するためのプリコリメーター、X 線反射膜である Ir の光電吸収端に起因する有効面積の減少をリカバーするための軽元素オーバーコートの開発での寄与を検討している。2019年11月には、WFI の PI である Kirpal Nandra (MPE) より、日本で WFI の Detector Electronics の一部を担当出来る可能性はないか、との依頼があり、feasibility study を始めた。現在、ブレッドボードモデルの開発に取り組んでいる。「ひとみ」や XRISM の経験をもとに、Athena の運用やキャリブレーションに貢献する可能性も議論している。

5.1.3 広帯域 X 線高感度撮像分光衛星 : FORCE

FORCE (Focusing On Relativistic universe and Cosmic Evolution) の科学目的は「ミッシングブラックホールの探査を通じて、現在の宇宙を構成する天体の形成史を紐解くこと」、「超新星残骸や銀河団の観測を通じて、相対論的粒子の起源と総量を測定すること」、および「若い超新星残骸の観測を通じて、超新星爆発における爆発メカニズムと元素合成を理解すること」である。

多くの銀河の中心にある太陽質量の十万～百億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がいかん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索し、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(SOPIX)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ひ、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。

2019年度に発出された公募型小型計画には提案したものの、採択には至らなかった。審査報告書には、審査期間中にNASAにおける海外協力の体制が大きく変更され、今後のマネジメントリスクが増大したことが、その要因の一つに挙げられている。この点については、NASAとJAXAの今後の協議の行方を注視するとともに、容易に海外協力の道が閉ざされることのないよう我々としても積極的に関与していく。米国側でも、NASA/GSFCを中心にUS-FORCEチームを立ち上げており、今後はより広範な視点でサイエンス検討も進めていく。また、現在は次回の提案にむけて、観測性能の向上と衛星のさらなる最適化を目指し、新たにシステム・サブシステム検討の見直しをおこなっている。SOPIX単体では裏面照射素子のイベント駆動読み出しでのエネルギー分解能の目標値達成など新プロセスの度に進化を遂げており、要素技術の多くは要求性能を満たしたと考えている。そこで、軸足を直接の搭載品開発へ移し、大型サイズの素子開発や、読み出しシステムの開

発に取り組んでいる。CdTe についても、着実に性能向上が進んでいる。多層膜化した Si ミラーの開発については、NASA/GSFC のグループと緊密に連携しつつ進めている。日本は「ひとみ」でのスーパーミラー製作の経験を活かし、多層膜モデルや SPring-8 での硬 X 線測定実験などを主導している。現時点で、2 回反射 1 ペア要素モデルで 30keV の X 線に対し HPD 15 秒角以下の集光像を達成している。

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現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、2017 年のノーベル物理学賞となった重力波の直接検出を、真の「重力波天文学」へと発展させるためには、重力波と同期した突発天体現象の電磁波での観測が必須である。特に、中性子星連星の衝突・合体などに伴う電磁波放射を観測することが重要課題であり、短時間ガンマ線バーストや軟 X 線超過現象、近赤外線で輝くキロノヴァ現象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の極限時空を X 線で観測することで、重力波との検出時間差などから相対論的ジェットの生成メカニズムを探求し、その周辺の物理現象を探査する。これまでのブラックホールに対する理解を、その誕生メカニズムから包括的に理解することを目指す。

以上の観測を実現する方法として、

- (1) X 線突発天体を 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。さらに、これまでの観測から、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することが知られていることから、重力波源の電磁波対応天体の探査にとっても広視野 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。

4.2.2 PhoENiX

PhoENiX 計画は、磁気リコネクションに伴う粒子加速の理解を科学目的とした衛星計画で、磁気リコネクションが引き起こす太陽フレアを主たる観測対象とし、粒子加速場所の特定、加速の時間

発展の調査、加速の特徴の把握を目指す。そのための観測手法として、高いダイナミックレンジと空間・時間・エネルギー分解能を同時に有する「軟X線～硬X線の2次元集光撮像分光観測」と、時間・エネルギー分解能と偏光測定能力を有する「硬X線～軟ガンマ線の偏光分光観測」を用いる。これらは、高精度ミラーと高速度カメラ・高精度検出器を用いて実現する。なお、これまでの太陽フレア観測は、ダイナミックレンジ不足により、有力な加速場所の候補領域（エネルギー解放領域など）が十分に見えていない上、3つの分解能の同時達成が不十分で、高エネルギー帯域の偏光測定も未実施であった。このことを考えると、PhoENiXこそが初めて真に太陽フレアにおける粒子加速の理解に迫る計画であると言える。

本計画では、硬X線の2次元集光撮像分光観測により、加速電子が存在する場所、時間を同定する。そして、軟X線の2次元集光撮像分光観測から、加速中の電子や加速の原因となっている物理過程の把握を行う。加速原因の候補としては、磁気リコネクションが生み出す衝撃波、プラズマの塊（プラズモイド）、フロー、電流シートなどが想定される。これらはスペクトルから得られる物理情報を用いて同定する。また、硬X線～軟ガンマ線の偏光分光観測により、加速方向の非一様性、加速電子の最高到達エネルギー、加速電子が太陽表面に到達するまでの時間などを測定することで、加速電子の特徴を調査する。

X線～ガンマ線帯域で太陽フレアを観測する本計画は、宇宙空間からの定常的な観測が必須であり、衛星を用いて太陽活動周期第26期（2030年代前半～）の極大期前後での観測実現を目指す。

本計画は、粒子加速の理解を目指す研究者が、既存分野（高エネルギー宇宙物理学、太陽物理学、地球惑星磁気圏プラズマ物理学、実験室プラズマ物理学（エネルギーの高い順））の枠組みを超えて参加・推進する分野間連携計画である。

なお、PhoENiXの科学的・技術的デモンストレーションとして、太陽フレアに対するX線2次元集光撮像分光観測（世界初）を目指した日米共同観測ロケット実験FOXSI-4を実施する。FOXSIロケット実験は、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。この計画は、NASAにExcellent（9段階評価のうちの最高評価）の評価で採択されており、2024年の打ち上げを予定している。

スケジュール

2021年後半（前回からの2年後を想定）：ミッション提案

2022年～2023年：プロジェクト化に向けたレビュー（Pre-Phase）

（2024年 観測ロケット実験FOXSI-4 打ち上げ）

2024年～2031年：開発・製作（Phase A-D）

2032年以降（太陽活動極小期以降）：打ち上げ、運用（ミッション期間は2年間、その後の延長運用も考えている）

6. 海外ミッションへの積極的な参加、気球実験や超小型衛星の活用

上で述べた5計画だけでは達成できないサイエンス（偏光、ガンマ線、サーベイなど）を狙うためには、積極的に海外ミッションへ小中規模に参加することが必要である。そのためには次節で述べる日本独自の観測技術開発を並行して進めることが望まれる。日本のコミュニティーは最先端で独自の観測装置や技術を開発してきており、世界的にも評価が高い。これを武器に国際プロジェクトに参加し、限られたリソースを有効活用し、科学目標を実現することも重要である。例えば、偏光観測のIXPEでは、JAXA小規模計画の枠内で国際協力を実施し、フライトハードウェアの提供を行っている。また、アメリカが主導していた硬X線偏光衛星気球実験XL-Caliburにも、2018年度より本格的に日本から多くの人々が参加し、ハードウェアの提供および技術協力などを行っている。ガンマ線観測の分野では、ASTRO-H/HXIとSGDで培ってきた半導体検出器の技術を元に、コンプトンカメラの開発が継続されており、太陽観測衛星PhoENiX計画への貢献が期待される。また、国際協同計画や国内計画でキューブサット計画も、少しずつであるが進んでいる。他にもプロジェクト化されていない海外ミッション計画に高宇連メンバーが参加しており、その一部は将来的に正式にプロジェクト化されると期待される。

観測ロケット、長時間飛行気球、超小型衛星など多くの打ち上げ機会を積極的に利用して、そうしたものでも実現できるサイエンス、および、それらを用いた技術検証も不可欠であり、高宇連メンバーから実際に様々な気球実験（SMILE実験、GRAINE実験など）や超小型衛星計画が立案あるいは実際に進められている。これらについても日本国内でのリソースやノウハウの共有とともに、海外との連携あるいは海外の打ち上げ機会を探ることが必要であろう。また、超小型衛星についても、高宇連メンバーがいくつかの計画を提案あるいは実行しており、技術検証だけでなく若手の技術訓練のためにも、今後積極的に検討していくことが期待される。

参考として付録Aに、高宇連メンバーが関わる海外計画・小型・超小型計画の一覧を載せた。以下には、実際に打ち上げが確定しており、ISAS/JAXAからの小規模計画で予算サポートをされている2つの計画について記述しておく。

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、2021年後半の打ち上げを予定している。日本グループはJAXA小規模計画の枠組みのもと、X線偏光天体物理学という新分野を開拓し、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含めて参加している。日本グループには、観測天体選定の議論、全ての観測データへのアクセス権、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。日本から提供する、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、いずれもフライト品を納品済みであり、米国において衛星への組み込みと試験が行われている。

X線偏光はシンクロトロン放射などのX線発生機構、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でのプラズマや、真空そのものの振る舞い、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さなどを観測できる。新しい観測手法であるため、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とる。活動銀河核、マイクロクェーサー、パルサー星雲/パルサー、超新星残骸、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線天体が一通り観測対象になっており、幅広いカテゴリーのX線天体に対して、網羅的に偏光観測のアウトプットが期待できる。IXPEにより取得したデータは、原則、即時公開の予定である。

IXPE や次に述べる XL-Calibur に続く発展計画として、紫外線、軟X線、硬X線の多波長を同時に偏光観測する X-ray Polarization Probe (XPP) が Probe クラスミッションとして提案されている。

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。2018年に南極において最初の科学観測を X-Calibur として実施した。次回フライトは XL-Calibur と名前を変え 2022年の放球を計画している。日本からは FFAST 衛星用に製作された大型望遠鏡の提供を通じて、科学成果創出まで含めて参加する。

FFAST 望遠鏡はすでに全ての反射鏡を製作済みである。現在は一部の支持構造をフライト仕様に置き換え、2021年度末までに SPring-8 などの放射光施設で較正実験を行うことでフライト準備が整う。これらの対応のため、日本側では 2019年度から JAXA 小規模計画に採択されている。

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。同時期に観測を行う 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。

7. コミュニティーで進んでいる技術開発

将来のミッションを構築、あるいは世界のミッションにその高い技術力を乞われて参加することができるように、世界最先端で独自の装置開発は必要である。サイエンスと同時に装置開発を行うことが日本の特徴であり、先端技術の開発に基づいた人材育成のためにも重要である。個々の計画とは別に、ユニークでレベルの高い装置開発を引き続き進めるべきであり、一定の予算を確保しつつづける努力をはかるべきである。

7.1 現在進行中の装置開発研究

第3期の将来計画委員会では、こうした技術開発の動向を把握すべく、コミュニティで現在進行中の技術開発プロジェクトを集め、「高宇連技術ロードマップ補足資料（コミュニティメンバ

一より提出された技術開発項目のリスト)」として取りまとめた。軟X線、硬X線、MeVガンマ線の検出器や、超軽量X線集光鏡や大型高角分解能X線集光鏡、その熱制御素子に加えて、地上でのX線スペクトル測定実験による放射モデル較正や、より柔軟な科学観測を実現するための衛星バス技術やインフラの整備まで、幅広くコミュニティーメンバーが技術開発に取り込んでいることが確認できた。一方で、すでに具体的な検討が進んでいるミッションのための技術は見られるものの、サイエンスを引き出すための独自のソフトウェア開発や、2040年代を見据えた宇宙観測のための要素技術開発など、「今はだれもやっていないが、日本としてアクセスを確保すべき技術」が存在するはずであり、今後は、これを取りまとめることが重要とであると認識を得た。それは国産技術であっても良いし、市販されているものであればこれを市場で入手すれば良いものである。また、外国の技術にしっかりと食い込んでアクセスを確保するものでも良い。手段を問わず、自らがやりたいと考える未来のサイエンス観測を実現するための技術開発が求められる。

技術ロードマップの議論は、第3期の将来計画委員会の後半に立ち上げられたため、とりいそぎ既存の技術開発を取りまとめ、課題を整理する段階まで進めたところで止まることとなる。第4期では、2040年を見据えた「ニーズに基づいた新技術の議論」や、技術開発を促進する体制づくりを議論できるとよいと考える。

観測機器技術：検出器 順不同

タイトル	グループ	備考	項目	Status(仮)	10年	30年
可視光多画素CMOSイメージセンサー技術のX線観測への展開	玉川 徹(理研)/林田 清(大阪大学)、中嶋 大(関西学院大学)、米徳 大輔(金沢大学)、幸村孝由(東京理科大学)、平野 純子(関西学院大学)、津野 達哉(金沢大学)、三原達弘(理化学研究所)、小高裕和(東京大学)、有元 誠(金沢大学)、馬場 彩(東京大学)	軟X線汎用撮像分光+高速	ア	working	GEO-X, MIXIMほか小規模	適宜応用
多画素 TES マイクロカロリメータ読み出しのためのマイクロ波超伝導量子干渉計多重化技術 (Microwave SQUID Multiplexer technique)	佐藤浩介(埼玉大学)/Super DIOS	精密分光技術	ア	start working, SuperDIOS etc	256 ch 衛星へ SuperDIOS etc	適宜応用
SOI-CMOS イメージセンサー(SOIPIX)技術と、それを用いるX線・ガンマ線検出器システムの開発	鶴 剛(京都大学)/鶴剛、田中孝明、内田裕之(京都大学)、森清二、武田彩希、西岡祐介(宮崎大学)、幸村孝由、萩野浩一(東京理科大)、成影典之(国立天文台)、片桐秀明(茨城大学)、加賀谷美佳(仙台育英)	軟X線汎用撮像分光+高速	ア	start working FORCE/PhoENIX etc	FORCE/P hoENIX etc	MeV 広帯域 CdTe-SOIPIXなど
液体アルゴン Time Projection Chamberを用いた宇宙ガンマ線検出器の開発	小高裕和(東京大学)/小高裕和(東京大学)、一戸悠人(立教大学)、米田清基、辻直美(理化学研究所)、田島宏康(名古屋大学)	MeVガンマ線	ア、イ、エ	start working, GRAMS etc	GRAMS 気球、改良	GRAMS/L ArGo衛星
硬X線軟ガンマ線半導体イメージャー技術の開発	深沢泰司(広島大学)/田島宏康、中澤知洋、渡辺伸	硬X線+軟ガンマ線の撮像分光偏光	ア、ウ	working, FORCE etc	FORCE/P hoENIX MeV気球	電子トラック化
ガス飛跡検出型コンプトンカメラ	高田淳史(京都大学)/SMILE 谷森 達(京都大学)、中森 健之(山形大学)、黒澤 俊介(東北大学)、濱口 健二(GSFC/NASA)、水村 好貴(ISAS/JAXA)、津野 達哉(金沢大学)	MeVガンマ線観測	ア、オ	working, SMILE	大型化, NASA気球	大型化衛星 for mCrab
光検出器 Si-PM (MPPC) によるシンチレータ読み出し	高橋弘充(広島大学)/深沢泰司、水野田史、大野雅功(広島大学)、山岡和貴、中澤知洋(名古屋大学)	ガンマ線、中性子、粒子	ア	working,	FORCE, PhoENIX, 気球	発展

観測機器技術：光学系 順不同

タイトル	グループ	備考	項目	Status (仮)	10年	30年
マイクロマシン技術を用いた超軽量 X線望遠鏡	江副 祐一郎(都立大)/地球磁気圏 X線可視化 WG、MEMS X線光学系コラボレーション、Lobster eye 光学系コラボレーションほか	超軽量X線集光結像鏡	ア	working, PhoENiX etc	GEO-X超小型衛星	大型化
Si高温塑性変形技術を用いた X線光学系	石川久美(JAXA/ISAS)/Si foil 光学系コラボレーション、ブロッグ偏光計コラボレーション	軽量高精度X線集光結像鏡	ア	seed	実証、角分解能強化	<10秒、大型衛星へ
広視野高感度な X線集光系の開発	坂本 貴紀(青山学院)/HiZ-GUNDAM ワーキンググループ	LobsterEye集光結像鏡	ア	seed (with HiZ-G)	start, cubesat	cubesat fleet、大型衛星
CFRP (炭素繊維強化プラスチック)を用いた高精度光学素子の開発	栗木久光(愛媛大)/松本清典(大阪大学)、石田孝 (JAXA)	軽量X線集光結像鏡	ア、ウ	working	30秒大気球	10-20秒衛星など
超小型衛星から中・大型飛翔体ミッションへの搭載を目指した次世代高性能多重薄板型電鍍 X線望遠鏡の開発	三石郁之(名古屋大学)/三石郁之(名古屋大学)、三村秀和(東京大学)、植爪 寛和、平栗 健太郎、松澤 雄介、久米 健大(夏目光学株式会社)	高精度X線集光結像鏡	ア、エ	seed	superDIOS, PhoENiX, FOXSI4/5, 超小型衛星	大型衛星 超小型衛星
多重像X線干渉計等の超高空間分解能X線撮像技術と関連衛星技術の開発	林田清(大阪大学)/林田清、野田博文、松本清典(大阪大学)、栗木久光(愛媛大学)、中嶋大(関東学院大)、川村静児、松尾太郎(名古屋大)、安東正樹、五十里哲(東京大学)、伊藤球博、河野功(JAXA)	超高精度角分解能	ア、エ	start working, MIXIM etc	超小型衛星 + 編隊飛行	大型ミッション
グラフェン超薄膜を用いた高機能汎用型光学素子の開発	三石郁之(名古屋大学)/三石郁之、田原謙(名古屋大学)	高機能、温度制御、超薄膜	エ、ア、オ	seed	superDIOS, PhoENiX, FOXSI4/5	大型衛星 超小型衛星

サイエンスエンハンスメント

タイトル	グループ	備考	項目	status (仮)	10年	30年
精密 X線分光観測の成果最大化を目的とした地上プラズマ計測実験	山口 弘悦 (JAXA/ISAS)/辻本 匡弘(宇宙研)、澤田 真理、玉川 徹(理研)、田中 孝明、内田 裕之(京大)、赤松 弘規 (SRON)、ほか高宇連外メンバー数名	プラズマコード	ウ、イ	started	EBIT動作, Fe 中心	将来精密分光の全て

宇宙インフラ・バス技術 順不同

タイトル	グループ	備考	項目	status (仮)	10年	30年
将来天文衛星で取得した大容量データダウンリンクのための高速かつ大容量ダウンリンク技術	佐藤浩介(埼玉大学)/Super DIOS	通信	エ	needs		available
突発天体観測のための機上情報処理、および地上での情報統合システムの構築	佐藤浩介(埼玉大学)/Super DIOS	fast repointing	エ	needs	HiZ-GUNDAM, superDIOS	available
挑戦的科学ミッションを実現する汎用超小型衛星バスの開発	谷津 陽一(東京工業大学)/超小型科学衛星リサーチグループ(現時点では非公式コラボレーション) 田分 紀秀(ISAS)、上野 宗孝(JAXA)、河合 誠之(東工大)、江副 祐一郎(都立大)、山岡 和貴、中澤 知洋(名古屋大)、坂戸 輝雄、玉川 徹(理研)、船瀬 龍(ISAS/東大)、五十里 哲(東大)、坂本 祐二(東北大)、松永 三郎(東工大)、後藤 雅亨(JAXA有人)	超小型衛星バス	エ	seeds and needs	3年で基盤整備 5年で国産バスセットカタログ	10年以内が勝負

- 注意；項目 [ア] 検出器技術、機上ソフトウェア、望遠鏡など、熱・構造技術など
 [イ] 地上解析ソフトウェア技術
 [ウ] 地上解析での実験技術
 [エ] 宇宙科学に関わる汎用技術
 [オ] その他（より広範な技術）

7.2 超小型衛星を取り巻く状況

科学衛星がより大型に、そして信頼性重視に進んで価格も高騰する中、予算は増えないために衛星打ち上げの頻度が低下し、かつ実際の現場で装置開発に携わる機会が減っている。SPICAのような国際協力の大型計画が突然キャンセルされる時代であり、現在計画されている公募型小型衛星だけではなく、今できる一番新しいサイエンスを着実に積み上げていくという研究戦略が本コミュニティの維持・発展には必要である。また、人材育成・技術力の維持という観点では、地上実験とは全く異なる宇宙機開発の技術力は、地道な軌道上実証実験の積み重ねでのみ醸成される。したがって、フライトチャンスの獲得はコミュニティにとって、そして宇宙科学にとっての死活問題である。

この課題を解決する一つの可能性として研究開発が進められてきたのが超小型衛星であり、日本でも科学観測を目指していくつかの超小型衛星が計画されてきた。そして、2018年以降これら超小型衛星の科学利用は全世界で極めて活発に推進される様になっている。例えばNASAは年間5億円のキューブサット利用科学ミッションを予算化し、1プロジェクトあたり3~5億円のキューブサット開発を組織的に推進している。この様な動きはESA、CNSA(China National Space Agency)等でも同様であり、開発サイクルの長い大型科学ミッションと超小型衛星を相補的に組み合わせる利用するのが世界の潮流となりつつある。しかしながら、現在の日本にはこの様な予算枠・開発支援体制が存在せず、科研費単独で辛うじて開発が出来るのはセンサシステムのみが限界である。衛星バスの開発費・打ち上げ費・運用費は「研究費」として獲得することが性質的にも困難であり、結

果として開発から打ち上げまでに5年以上も掛かってしまい、科学的価値の上でも、センサ技術の上でも、システム設計の上でもでもミッションが陳腐化し国際競争力を喪失しつつある。超小型衛星のバスや地上システムを安価に迅速に提供でき、かつ日本の科学者からアクセス性の良い仕組みが求められる。この問題を解決し、日本の宇宙科学コミュニティが、技術の軌道上実証や、超小型衛星プロジェクトに容易に取り組める道筋を立てることが重要である。

【ゲートウェイ計画】

月軌道プラットフォーム・ゲートウェイ計画は NASA が主導するプロジェクトであり、日本も JAXA が正式に参加を表明している。一方で、日本は具体的に何に対して貢献するのか全く決まっていない状態での参画決定であり、文科省が航空宇宙系の研究者に対してヒアリングを行っている状況である。（文科省は、超小型衛星等による地球・月間もしくは、月軌道上での通信支援等を想定していると思われ、科学利用はヒアリングの対象外である）。

月軌道へアクセスする機会が得られることから、ISAS では深宇宙探査技術のための軌道制御実験やそれを利用した編隊飛行ミッションなどの可能性が検討されている。輸送コストの面から、これらの計画は基本的に超小型衛星で行われることになる。高エネルギー天文学分野においては、地球から離れているという特徴を活かし、温度的に安定した環境下で、地球大気からのコロナ輝線や散乱ガンマ線、さらに地球磁気圏の放射線に影響されない（代わりに太陽起源の放射線に対応が必要）観測が可能になるだろう。この様な観点から、宇宙工学分野では今後この様な超小型衛星が提案されるはずであり、その相乗りミッションとして、上記条件でしかできないユニークな科学観測ミッションを提案し、理・工学連携で提案することが望まれる。

7.3 大学院生及び若手研究者のサポート

これらとは別の論点として、必ずしも技術ロードマップに限らないものの、大学院生をはじめ、若手の研究者が減っていることへの対策は必要との提言がなされた。実態の調査が必要であるものの、全体的に博士を取得しアカデミック業界に残る若者の数は減少している。これは高宇連のみの課題ではなく、だからこそ企業への就職との比較、他分野との比較の双方で、より魅力や活力の向上がますます重要となっている。若者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であるとの認識を得た。

8. 今後の将来計画検討委員会への引き継ぎと方向性

第3期将来計画検討委員会の任期中には、ロードマップが変わるような計画提案あるいは境界条件の変更はなかったので、現5計画に対しては会員との情報共有を中心に行った。一方で、他波長や諸外国の動向をみると2030年代のミッション計画が進み始めているのに対し、高宇連ではなかなか計画立案などが進んでいないことを認識した。そのため、タウンミーティングなどを開催して議論を進めるとともに、技術ロードマップを立ち上げるべく、会員からインプットを集めたところで、任期終了となった。しかし、次の第4期になってすぐに、SPICAのキャンセルという大きなニュースが飛び込んできた。また、宇宙研のミッションカテゴリーの変更もまもなく行われるようである。このため、第4期はロードマップの大きな変更が起きる可能性がある。

以上をふまえて、以下の点を、次期の将来計画検討委員会に託したい。

- 会員からインプットされた技術ロードマップの項目を整理し、どのように位置づけるのかを議論を重ねて決定し、最終的に技術ロードマップを立ち上げてほしい。
- 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。
- 2030年代の計画提案のためには、サイエンス検討が重要である。そのため、サイエンス検討を議論するタウンミーティングなどを開催し、議論を進めてほしい。
- ISAS/JAXA 関連の境界条件が大きく変わると思われるため、それらを会員に知らしめて情報共有するとともに、計画立案に対する影響の議論を進めてほしい。
- 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、どのような対応が可能なのか、JAXAを始めとする関係各機関と情報交換すること。また、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。
- 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。
- 若手からの意見が出にくいということが第3期中にも認識されたので、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してほしい。

A. 高宇連メンバーが関わる外国衛星計画・小型・超小型衛星計画

ORBIS

- 目的：バイナリブラックホール探査
- 乗り物：超小型衛星(50 kg 級)
- 搭載装置：MEMS X線望遠鏡 + X線 CCD
- 打ち上げ見通し：現状 2025年
- 関係機関：首都大、JAXA 宇宙研、関東学院大、関西学院大、名古屋大、明星大ほか
- 売り込みポイント：AGN の長期モニタリング観測を行う特定天体専用衛星

速報実証衛星 AGU Remote Innovative CubeSat Alert System (ARICA)

- 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：1U キューブサット
- 搭載装置：GAGG シンチレータ + MPPC
- 打ち上げ見通し：2021年革新的衛星技術実証2号機にて打ち上げ
- 関係機関：青山学院大学、理化学研究所、東工大
- 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。

Kanazawa-SAT³

- 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 (50cm・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：2022年5月ごろ、革新的衛星技術実証3号機にて打ち上げ
- 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

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 (50cm・50 kg 級)
- 搭載装置：250~300nm 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：2022年革新的衛星技術実証3号機にて打ち上げ
- 関係機関：東京工業大学 (理・工)、JPL/Caltech、甲南大、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。

【開発中 飛びそうな順で】

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・教育等
- 乗り物：6U キューブサット
- 搭載装置：Xe/CO₂ + GEM ガス検出器 (2 系統)。2-50 keV, 有効面積 38cm²@6.4 keV (2 台)、FoV 2.1° 放射線帯モニター (2 系統)。
- 打ち上げ見通し：2021 年内にペイロード完成予定、2022 年前半に ISS から放出予定
- 関係機関：理化学研究所、中央大、静岡大、東大、広島大、国立彰化師範大
- 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。

SONGS

- 目的：太陽中性子・ガンマ線分光ミッション
- 乗り物：3U キューブサット
- 搭載装置：GAGG+MPPC によるコンプトンカメラ
- 打ち上げ見通し：2023 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：工学実証ミッション MAGNARO が 2022 年打ち上げ予定であり ASIC 等の基幹部品も実証予定。本ミッションは 2 号機のペイロードであり、太陽からの中性子・ガンマ線、GRB などの突発天体の観測を狙う。3 号機以降では編隊飛行観測などのシリーズ化を目指す (NuCube)。

GEO-X

- 目的：地球磁気圏 X 線撮像
- 乗り物：超小型衛星+月付近への投入のための推進系
- 搭載装置：MEMS X 線望遠鏡 + X 線 CMOS 検出器
- 打ち上げ見通し：2022 年頃目標、衛星概念検討、宇宙研リサーチグループで活動
- 関係機関：首都大学東京、名古屋大学、東京大学、ISAS/JAXA、理化学研究所ほか
- 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

cipher

- 目的：硬 X 線 (10-25 keV) 偏光撮像ミッション
- 乗り物：3~6U キューブサット
- 搭載装置：符号化マスク+CMOS イメージセンサ
- 打ち上げ見通し：202?
- 関係機関：東大・理、理研、国立天文台、IPMU、大阪大学

売り込みポイント：世界初の硬 X 線偏光のマッピング観測であり、かに星雲の磁気乱流、Cyg X-1 の降着流ジオメトリ、太陽フレアの粒子加速等の解明を目指す。

像再合成望遠鏡計画

- 目的：符号化マスクと X 線望遠鏡を組み合わせた超高解像度 X 線観測
- 乗り物：キューブサットの編隊飛行

高宇連将来計画検討（第3期答申; 2020年12月）

- 搭載装置：第一衛星：符号化マスク、第二衛星：X線望遠鏡+X線エリアセンサ
- 打ち上げ見通し：技術開発中
- 関係機関：宇宙研ほか
- 込みポイント：符号化マスクのパターンをX線望遠鏡で結像することにより、秒角以下の空間分解能を実現する。マスクと望遠鏡の間隔を広げるため、進展機構や編隊飛行等の技術を利用する極めて挑戦的な計画。

eASTROGAM

- 目的：MeV-GeVガンマ線の全天観測
- 乗り物：ESA/M5 ミッションへのサイエンス参加。HPK とのやりとりもサポート。
- 搭載装置 Electron-Tracking Compton and Pair Telescope
- 打ち上げ見通し：2029 打ち上げ予定の ESA/M5 に提案中
- 関係機関：INSF、CEA/Sackley など。日本では、東大や広大などの研究者。
- 売り込みポイント：COMPTEL と Fermi の後継となる MeV-GeV ガンマ線全天観測ミッションとして、未開の帯域を切り開く。

AMEGO

- 目的：MeV-GeVガンマ線の全天観測
- 乗物：NASA Probe mission or MIDEX class, 2020 NASA Decadal Review に申請、2021 MIDEX に申請予定。
- 観測装置: Electron-Tracking Compton and Pair Telescope
- 打ち上げ見通し: 2030 年前後
- 関係機関: NASA などアメリカ多数, 広大、名大、京大など、ヨーロッパ
- 売り込みポイント：COMPTEL と Fermi の後継となる MeV-GeV ガンマ線全天観測ミッション。マルチメッセンジャー・タイムドメイン天文学を推進する全天モニター観測。

COSI-SMEX(The Compton Spectrometer and Imager)

- 目的: Ge 半導体を用いたコンプトン望遠鏡で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。
- 乗り物: NASA SMEX 衛星
- 搭載装置: Ge を用いた半導体コンプトン望遠鏡
- 打ち上げ見通し: Phase-A 検討中で、セレクションを通過すれば、2025 年に打ち上げ。
- 関係機関: UC Berkeley、NRL、GSFC、IRAP/France、Clemson U.、LSU、LANL、INAF、NTHU、Kavli IPMU/東大、名古屋大学ほか
- 売り込みポイント：核ガンマ線や電子陽電子対消滅線を中心に、MeV の全天探査をする CGRO/CMOPEL 以来の専用衛星。比較的小型であることから、系外天体よりも天の川天体の探査に重点を置いている。Ge 検出機のエネルギー分解能は高く、輝線の分離・検出に大きな威力を発揮する。日本側は、サイエンスとサブ検出器の技術サポートで参加している。

OHMAN (MAXI-NICER 機上連携)

- 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。ソフトを upload する予定。
- 打ち上げ見通し：日本側開通 (2017 年度)、アメリカ側開通 (未定)
- 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。

SPHiNX (Segmented Polarimeter for High Energy X-rays)

- 目的：ガンマ線バーストの偏光観測によるジェットの放射メカニズム解明
- 乗り物：50kg 級の超小型衛星
- 搭載装置：コンプトン散乱型偏光計
- 打ち上げ予定年、打ち上げ見通し等：2021 年 (現在 Phase-A/B1 後の審査中)
- 関係機関：広島大、名古屋大、偏光観測 RG
- 売り込みポイント：自身で突発天体の位置決め (数度) ができるため、重力波天体の対応天体を探査などにも貢献する。

SMILE (Sub-MeV/MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment)

- 目的：数百 keV から数 MeV の帯域において真のイメージング分光を実現し、元素合成の現場や Ia 型超新星爆発の期限解明などを通して、核ガンマ線を用いた MeV ガンマ線天文学を切り拓く
- 乗り物：しばらくは長時間気球、手法が確立次第、衛星 (小型 or 中型) へ展開する。
- 搭載装置：ガス飛跡検出器と位置感度型シンチレータの組み合わせ SMILE-II+ では、30cm 立方 Ar 2 気圧の飛跡検出器と 6mm 角 GSO ピクセルシンチレータアレイを使用
- 打ち上げ見通し：2023 年以降長期気球による科学観測 SMILE-3 開始
- 関係機関：京都大学、山形大学、メリーランド大
- 売り込みポイント：「寿命」を持つ放射性同位体の直接観測により、「在る」だけでなく「いつ頃生成された」・「その場で作られた」など時間的な情報も得られるのが核ガンマ線天文学の大きな特徴。高い透明性により遠くまで観測でき、太陽や惑星から活動銀河核まで様々な天体から放射が期待できるため、マルチメッセンジャー天文学にも大きな寄与が期待できる。

GRAMS (Gamma-Ray and AntiMatter Survey)

- 目的：大面積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索
- 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 time projection chamber
- 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, 東大, Northeastern University, 阪大, MIT, 理研, 立教大、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 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。

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 (10MeV-100GeV)
- 乗り物：長時間気球を繰り返す
- 搭載装置：エマルジョンガンマ線望遠鏡
- 打ち上げ見通し：2021 年、科学観測開始のための豪州気球実験 (JAXA 申請中)
- 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 (~10m²) (2018 年の JAXA 豪州気球実験で Vela のイメージングにより ~1 度@100MeV の角度分解能を確認中)

ハンガリー-GRB Camelot

- 目的：シンチレータを載せた超小型衛星を複数、それぞれ異なる軌道に入れて、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
- 搭載装置：CsI シンチレータ + MPPC
- 打ち上げ見通し：早くて 2020-2022 年に複数。
- 関係機関：MTA-Eotvos U.、Masaryk U.、広大、Kobkoly Observatory、Eotvos U.、C3S、東大、京大、理研、立教大他
- 売り込みポイント：TGF の観測も視野に入れている。