

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 (第二期\*)  
2018年6月22日  
(2018年9月7日改)

---

\* 玉川徹 (理研・委員長)、秋山正幸 (東北大・外部委員)、井岡邦仁 (京都大・外部委員)、江副祐一郎 (首都大)、高橋忠幸 (東大 IPMU)、田中孝明 (京都大)、深沢泰司 (広島大)、山崎典子 (ISAS/JAXA)

## 目次

1. はじめに .....	3
1.1 将来計画検討委員会 .....	3
1.2 第二期の活動の概要 .....	3
2. 宇宙物理学の目的 .....	6
3. 高エネルギー宇宙物理学が明らかにすべき課題 .....	6
3.1 宇宙の物質・空間のあり方と起源 .....	7
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 .....	9
4. 将来計画検討の前提条件 .....	10
4.1 日本の宇宙政策との関連 .....	10
4.2 分野の動向 .....	11
4.3 宇宙科学全体の動向 .....	12
5. 高宇連が推薦するミッションとその戦略 .....	13
5.1 Advanced DIOS .....	13
5.2 広帯域X線高感度撮像分光衛星：FORCE .....	14
5.3 iWF-MAXI .....	15
6. 高宇連が推薦する分野横断プロジェクト .....	16
6.1 HiZ-GUNDAM .....	16
6.2 PhoENiX .....	17
7. 科研費等で実現する計画と機器開発 .....	18
8. 今後の将来計画検討委員会への引き継ぎと方向性 .....	19
A. 公募型小型衛星のプロジェクト化の考え方 .....	20
B. X線天文衛星代替機（XARM）計画 .....	22
C. 大型国際X線ミッション Athena .....	25
D. X線偏光観測衛星 IXPE .....	29
E. 高宇連メンバーが関わる小型・超小型計画 .....	30

## 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。第二期将来計画検討委員会は 2015 年 10 月から活動を開始した。

### 1.2 第二期の活動の概要

2015 年 12 月 28 日に第一期のロードマップ（案）が答申された。答申案は、高宇連内部向けページ ([http://heapa.astro.isas.jaxa.jp/private/future/Future\\_Report\\_20151228a.pdf](http://heapa.astro.isas.jaxa.jp/private/future/Future_Report_20151228a.pdf)) から閲覧可能である。ただし、これは正式版ではなく、高宇連内部でさらなる議論を経た上で、正式なロードマップとするように第一期委員《栗木久光（愛媛大、委員長）、上田佳宏（京都大）、河合誠之（東工大）、北山哲（東邦大、外部委員）、高橋忠幸（ISAS/JAXA）、鶴剛（京都大）、山崎典子（ISAS/JAXA）、吉田道利（広島大、外部委員）（50 音順・肩書は当時のもの）》から第二期委員に託されたものである。

第二期の活動開始後の 2016 年 2 月 17 日に、高宇連コミュニティの旗艦ミッションである ASTRO-H が打ち上げられ（直後に「ひとみ」と命名）、順調に初期運用を進めていた。そのような中、2016 年 3 月 20 日に将来計画に関連する高宇連集会在開催された。将来計画検討の中で持ち越しとなっていた 2 機の公募型小型衛星（イプシロンクラス）計画、DIOS と FORCE（NGHXT から改名）の、高宇連内部での情報共有を目的とし、海外からも関係する研究者を招待し、会員の間で集中的に討議を行なった。この時点では、プライオリティー付けを行うことはしなかったが、次期公募型小型の募集に間に合うように、どのような方法でプライオリティー付けをすべきか等の意見を聴取した。

その直後の 2016 年 3 月 26 日に、「ひとみ」衛星を喪失するという事故（異常事象）が発生し、コミュニティ内部での議論がストップした。事故に関連する詳細報告と、高宇連におけるタスク

フォース答申、コミュニティとしての総括は以下に詳しい。

<http://heapa.astro.isas.jaxa.jp/private/activity/2016/160704/>

2016年7月9日にタスクフォース答申とコミュニティとしての総括を議論する、高宇連集会を開催した。また、この会議において ASTRO-H のサイエンスを早急に回復するための「後継機」の要望についても議論された。<http://heapa.astro.isas.jaxa.jp/private/activity/2016/160709/>

それを受けて、運営委員会はX線天文学グループに呼びかけ、2016年7月23日にTV会議にて「後継機：のちのX線代替機（X-ray Astronomical Recovery Mission; XARM）」の科学目的と搭載装置構成、および「後継機」でカバーされないサイエンスを目的とする将来計画の議論を行った。

<http://heapa.astro.isas.jaxa.jp/private/activity/2016/160723/> その内容については、宇宙科学研究所宇宙理工学委員会に報告された。

「ひとみ」衛星の喪失と、新たな XARM 提案によって、これまでの前提が大きく変わり、高宇連将来計画は、大きな戦略見直しが迫られることとなった。新しい前提条件をもとに、どのような見直しを行うべきかを議論する一日ワークショップを、2016年12月27日に将来計画検討委員会主催で、首都大学東京において開催した。このワークショップでは、XARM を含む軟X線・硬X線・軟ガンマ線ミッションのロードマップ案が議論され、XARM に引き続く ESA 主導の Athena 衛星を軸として、将来計画を検討することが合理的であるというコンセンサスの元、DIOS WG 内における検討結果より、その実施を Athena 衛星実現後へ、FORCE WG 内での検討結果より、その実施を XARM 実現後まで遅らせることで、XARM に注力することを戦略の第一とした。このワークショップで、各 WG から提案された新戦略をもとに改訂した工程表(案)を表1に示す。

表1：工程表（2016/12/27版）

年度	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	
<b>旗艦ミッション</b>																				
XARM	製作				運用															
Athena (ESA)	準備	開発/製作											運用							
<b>公募型小型ミッション</b>																				
Adv DIOS												Athena 実現後へ		製作		運用				
FORCE	XARM の後へ移動			製作						運用										
HiZ-GUNDAM	製作				運用															
<b>公募型小型以外のミッション</b>																				
PRAXyS等偏光観測計画	製作		運用		IXPEが採択(2017/1)															
iWF-MAXI	→ 超小型、海外の衛星等へ																			
MeV												製作/運用		気球・衛星等						
開発研究・超小型衛星等	本文を参照																			

各ミッションの変更箇所や進捗報告については、次章以降ならびに付録で解説する。iWF-MAXI については、現在の小規模計画の枠組みでは予算的に実現が難しいということで、WG の解散も視野に

## 高宇連将来計画検討（第二期答申；2018年6月）

検討がされている。X線偏光観測については、PRAXyS は採択されなかったが、IXPE が採択されたため、当初の戦略（世界で1機の偏光観測衛星を実現し、それに関与する）通り IXPE へ活動の中心を移した。

分野横断型の公募型小型衛星計画である HiZ-GUNDAM は、高宇連=光赤天連連携の中で最優先課題として位置付けられている。高宇連としてその科学意義の重要性を認識しており、分野横断的なプロジェクトの一翼を担う当事者として最大限の支援を行う。2017年9月に高宇連インフォーマルミーティングで打診のあった太陽観測衛星 PhoENiX については、ASTRO-H/ひとみ喪失で実現できなくなった高感度ガンマ線検出器の実現に向けて重要なミッションであるとの認識である。位置付けについては、この答申で方向性は示すが、最終的な推薦の可否はコミュニティーの総意で決める必要がある。

宇宙科学を取り巻く状況はめまぐるしく変化している。次期の将来計画検討委員会には、内外の状況を見極めつつ、高宇連コミュニティーにとり魅力的な将来計画の策定について、引き続き議論と取りまとめをお願いしたい。

## 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、多様な物質および物質構造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、「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り、そして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。

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。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が必要とする。

## 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に優位性を持つ。

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を可能とする。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。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、ダークマターの崩壊等に伴って予言されるX線やガンマ線放射を宇宙観測によって検出することができれば、ダークマターの直接検出につながることになる。
- (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至る惑星系まで、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) **宇宙再電離・銀河と巨大ブラックホールの形成**：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、紫外線以上のエネルギーをも

つ光子が大量に放射されたと考えられるが、どのようにこの時期の天体形成が進行し、銀河間物質に影響を及ぼしたかについては未解明の課題が多く残されている。銀河の中心に存在する巨大ブラックホールの形成とそれが銀河形成に果たした役割についても、重力エネルギーからそれ以外の形態のエネルギーへの転換過程やその効率の時間発展などの解明が求められている。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。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。ガンマ線バースト（GRB）は、遠方の銀河の中で発生し、爆発の大量のエネルギー放射をX線やガンマ線の領域で行うことが知られており、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。

- (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) 高エネルギー宇宙の誕生：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。また、最近のFermi衛星による陽子加速の観測的証拠は、GeVガンマ線による観測の重要性を印象づけた。しかし、超新星爆発のエネルギーがどのような効率で、PeV領域にまでいたる粒子加速に転換されるのか、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、ブラックホール近傍時空からの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ものの、観測的には全く解明されていない。



### 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であり検証の必要がある。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。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。
- (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。

## 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（<http://www8.cao.go.jp/space/plan/keikaku.html>；最新版は2016年4月1日閣議決定、工程表は2017年に改訂）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、一定の資金は用意されるが、現時点では、その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線天文衛星代替機（XARM）の開発が、2017～2020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2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。公募型小型計画では、2013年度の公募で「小型月着陸実証機 SLIM」が、2015年度の公募で「深宇宙探査技術実証機 DESTINY+」が採択された（SLIMはキャリアをイプシロンからH-IIAへ変更）。

表2：JAXA 宇宙科学・探査プロジェクトの規模。

	キャリア等	位置付けと予算規模
戦略的に実施する中型計画	H-IIA、H-IIIを想定	日本のフラッグシップ的なミッション。300億円程度。
公募型小型計画	イプシロンロケットを想定	世界の宇宙科学をリードする一級の科学的成果が期待できる計画で、各研究分野のコミュニティの中で、最優先のプロジェクトとして戦略的に位置づけられているもの。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	日本が主導することのない1,000億円規模の海外ミッションへ部分的な参加をすることにより、データ取得を可能とし、日本主導ミッションを補完する。
公募型小規模計画	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。

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。

## 4.2 分野の動向

X線天体物理学分野では、XARM 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 衛星計画は付録 C に詳細を述べるように、XARM 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、XARM 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 XARM-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、XARM 計画の「超高分解能 X 線分光」により実現される。高宇連は XARM 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、XARM 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。いっぽうで、表 3 に示すような、XARM 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、積極的にそのような科学テーマを追求する衛星ミッションが立案されつつある。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、XARM 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。

表 3 : XARM や Athena ではできない科学テーマ

次元軸		科学テーマ	手段
波長	分解能	プラズマ診断・運動学	超高精密度分光
	帯域	隠された AGN、非熱的放射	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、CXB	拡散放射、logN-logS
		突発天体・GRB・超新星	広天監視
探査域	全天 X 線源目録	全天監視	
時間	分解能	中性子星表面・内部	超高速計時
	時間尺度	AGN、X 線星の長期変動	長期監視
	運用時期	重力波等の X 線対応天体	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	偏光

小型衛星の世界的な動向としては、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 Explorer; <https://www.nasa.gov/nicer>) が打ち上げられ、宇宙ステーション上に設置、順調に観測を開始した。また、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 Polarimetry Explorer; <https://wwwastro.msfc.nasa.gov/ixpe/index.html>) が採択され、2021年の打ち上げが予定されている。

#### 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。2018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。

2020年代前後には JWST 宇宙望遠鏡、TMT、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 2019年に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

高宇連の旗艦ミッションである XARM と、それに引き続く Athena は、高宇連の最優先課題として開発・検討が進められている。それぞれの詳細については、付録 B、ならびに、付録 C を参照のこと。X線偏光観測については、2017年1月に IXPE 衛星計画が採択され、日本グループの関与が確定したことで、将来計画検討で議論する必要はなくなった。詳細については付録 D を参照のこと。iWF-MAXI については、現時点では予算的にプロジェクト化が難しいということで、それが目指す科学目標を実現する手段については、将来計画検討委員会の中で保留状態にある。

高宇連の中で推薦に関して積極的に議論すべきミッションは、表 4 に示す、DIOS、FORCE、HiZ-GUNDAM、PhoENiX の 4 つである。第 1 期将来計画検討委員会の中で、DIOS、FORCE は最優先課題候補として優劣を争い、HiZ-GUNDAM は分野横断型プロジェクトとして最優先課題として位置付けられている。PhoENiX については、2017年9月に初めて打診があったものであり、高宇連の中での議論が求められている。

表 4：ミッション候補一覧

ミッション名	概要	カテゴリー	高宇連位置付け
(Adv) DIOS	WHIM 探査	公募型小型	最優先課題
FORCE	高角度分解能広帯域観測	公募型小型	最優先課題
HiZ-GUNDAM	GRB を用いた初期宇宙・極限時空探査	公募型小型	最優先課題（分野横断）
PhoENiX	太陽観測衛星	公募型小型	審議中（分野横断）

### 5.1 Advanced DIOS

大規模構造は、宇宙全体の進化とともに成長し、現在の宇宙では銀河団を超える超銀河団を含めて、典型的には 10~100 Mpc のフィラメント・ボイド構造を成している。ミッシングバリオンはこの大構造に付随していると考えられており、特に  $z < 1$  の近傍においては  $T > 10^6$  K の中高温ガスがその大半を占め、X線領域においてのみ直接観測が可能である。このことは、今から 15 年以上前に指摘されたにも関わらず、未だにその証拠は断片的あるいは統計的に示唆されるに留まっている。銀河団においても、「すざく」により中心から周辺へと観測可能域が広がってきたように、希薄なプラズマの観測が技術的に難しいという問題がある。しかし、数 eV のエネルギー分解能による精密分光撮像の手法により、酸素輝線を銀河系フォアグラウンドから分離することで、大規模構造に伴う中高温銀河間ガス (WHIM: Warm-Hot Intergalactic Medium) の観測が可能であることが、2000 年代中盤から日本のグループによって指摘、検討されてきた。しかしながら、例えば  $z=0.3$  において 100 Mpc のフィラメントは見かけの大きさで 6 度に相当し、Athena のような汎用天文台で全容をつかむことは難しく、広視野サーベイが必要であると考えられる。これは、どの波長帯、どの時代においても空間分解能をあげた深宇宙探査と大視野サーベイが両輪となってきたことと同様である。「Athena と相補的」なテーマであり、また宇宙の物質の在り方の大部分を隠された（ダークな）領域から観測を可能な物にするという意味で根源的なテーマである。主要な研究テーマを上げる。

- (1) 輝線による WHIM の直接検出
- (2) 吸収線／輝線サーベイによる WHIM の空間分布測定
- (3) 銀河間プラズマの化学組成や物理状態を測定し、銀河間物質の進化を解明

この目的のために、Athena 後となる 2030 年代初頭の実施を念頭に従来の DIOS を強化した Super DIOS を計画し、広視野 X 線望遠鏡と TES 型マイクロカロリメータアレイ (3 万素子程度) を用いて、2 eV のエネルギー分解能と約 30 分角の広視野 (角度分解能約 10 秒角) で WHIM の観測を行う。我が国は「ひとみ」で成果を出し、それに続く XARM の開発を進めつつ新しいカロリメータ技術を強化していく計画であり、Super DIOS を主導する十分な力を持っている。開発は、日米協力を主軸としヨーロッパの参加も得て実施され、日本側は XARM Resolve 開発の主力メンバーと名古屋大学の望遠鏡チームが加わる予定である。XARM (X 線精密分光技術の確立) - Athena (吸収線による WHIM の確認) - Super DIOS (大構造のサーベイ) と段階的に強化される X 線分光観測により、WHIM を中心とするバリオン全体の分布、その物理状態や宇宙論的進化を解明することができる。2018 年にリサーチグループを立ち上げ、DIOS をベースとした衛星検討と国際協力の体制作りを進めていく。

(注記) 2018 年 3 月の高宇連研究会において、Advanced DIOS は公募型小型ではなく、中型衛星プロジェクトを目指すという発表があった。公募型小型に提案することを高宇連からの推薦の前提にしてきたが、中型衛星プロジェクトになると、コミュニティー全体の長期戦略に関わることなので、次期将来計画検討委員会内部で再度検討されるべきである。

## 5.2 広帯域 X 線高感度撮像分光衛星 : FORCE

多くの銀河の中心にある太陽質量の百万～数億倍の質量を持つ巨大なブラックホール (以下 BH) とその母銀河の質量の比例関係や、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。もはや、BH を抜きに宇宙を理解することは不可能であるとも言える。しかしながら、「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。その最大の理由は、「どれだけの質量の BH が何個存在するか」の理解に大きな穴が空いているためである。これら BH の近傍は高温となり、ときに粒子加速も生じるため、BH の研究では X 線観測が本質的な役割を果たしている。これまでに、太陽質量の 10 倍程度の恒星質量 BH と通常の星との連星を観測することでその存在が確立され、併せて BH への質量降着と X 線放射メカニズムの理解が進められてきた。また、巨大 BH の観測でも、最終的に X 線の大光度点源の検出がその存在の根拠となっているうえ、多彩な X 線スペクトルから周辺の降着物質の分布を知る重要な手がかりが得られている。よって、高エネルギー宇宙物理学の急務は、X 線観測上の技術的問題を解決し、天体進化の鍵を握る「宇宙の BH の質量密度関数」を決定することである。

FORCE (Focusing On Relativistic universe and Cosmic Evolution) 計画は、深く埋もれた巨大 BH、中質量 BH、単独の恒星質量 BH など様々な階層でのミッシングブラックホールを検出することで、BH の質量密度関数とその宇宙論的時間軸上の進化を明らかにすることを目的とする。これに

よりBHをプローブとして、現在の宇宙を形作る天体の形成史を紐解く。最近の重力波検出により、これまでの電磁波観測では検出されたことのない太陽質量の数10倍の質量を持つBHの存在が明らかとなった。今後は電磁波に宇宙線・ニュートリノ・重力波も加えたマルチメッセンジャー天文学の時代に入ります。本計画は広帯域X線高感度撮像分光衛星として、このマルチメッセンジャー天文学の一翼を担う。

上記の科学目的を実現するために、FORCEは、15秒角以下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、日米協力を主軸とする。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り、衛星搭載品を製作／開発する際は、米国側でMoOを申請するなどし予算を確保する。衛星システムと焦点面検出器は日本側が担当し、軟X線域検出器と硬X線域検出器を組み合わせたハイブリッド型を開発する。焦点面検出器は「ひとみ」のハイブリッド型焦点面検出器の資産を活用しつつ、軟X線域検出部をシリコン両面ストリップ検出器からシリコンSOI-CMOSピクセル検出器(SOPIX)に変更する。これにより軟X線への感度帯域も拡張し、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。

現在は、2020年度後半での打ち上げを目標に開発を進めている。これまでに初期のシステム検討をおこない、「ひとみ」の実績ベースでサブシステムを検討した結果でも、小型衛星の大枠に収まる目処を得ている。姿勢系やEOBについては、宇宙工学系の先生方と継続した検討をおこなっている。検出器については、SOPIX単体ではイベント駆動の確立、フレーム読み出しでの読み出しノイズの目標値達成など新プロセスの度に進化を遂げている。一方で、イベント駆動読み出しでの分光性能の向上や、カメラとして組込むための回路設計など課題があることも認識しており、別途、解決にむけて取り組んでいる。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。2017年10月時点で、1枚鏡ではあるが、Wolter-I型で4.5 keVのX線に対しHPD 3.4秒角の角度分解能を達成している。日本は「ひとみ」でのスーパーミラー製作の経験を活かし、多層膜形成やSpring-8での硬X線PSF測定実験などを主導している。

### 5.3 iWF-MAXI

Advanced-LIGOやVirgoといった新世代重力波天文台が2015年から本格的に稼働し、ブラックホール合体による重力波が検出され始めた。強い重力場における一般相対性理論を現実の宇宙で検証することは実験物理学に課せられた最重要課題の一つである。2017年8月17日に発生した中性子星合体による重力波検出イベントでは、重力波観測と電磁波観測が直接結びつき、本格的なマルチメッセンジャー天文学が始まった。重力波を検出しても発生源を特定し距離を決めることができなければ、定量的な物理の議論ができないため、広域監視を行い電磁波による対応現象を検出することは必須である。また、広域監視による突発現象の検出は、フレアなどの天体磁気エネルギー現象の解明にもつながる。高宇連はコミュニティとして、他分野よりX線・ガンマ線帯域で重力波対応天体を観測することが期待されており、何からの形で重力波対応天体観測に貢献できるミッションを実現すべきであろう。

iWF-MAXIの科学目的は「高エネルギー宇宙物理学が明らかにする課題」とも合致していることから、「iWF-MAXIが行う科学目的を長期計画の中に適切に位置づけ、iWF-MAXIを重力波源対応天体探査、軟X線突発現象の解明を行うプロジェクトとして記載する」ことが適当であると判断した。次世代重力波望遠鏡の感度が大幅に向上する時期（2019～20年）に合わせて運用することを目指し、2015年2月にISAS小規模プロジェクトに提案し、小規模プロジェクト宇宙理学委員からの推薦を得た。しかし現時点では、縮小された「小規模計画」クラスの予算規模での実現は難しく、プロジェクト実現の見通しは立っていない。

## 6. 高宇連が推薦する分野横断プロジェクト

HiZ-GUNDAMは、高宇連、光赤天連に提案されていた計画であるが、お互いのコミュニティーから大きなサポートがないと成立しないことから、1つのコミュニティー単独で実現することが困難であると判断し、分野横断型プロジェクト合同検討委員会を立ち上げ、その中でHiZ-GUNDAMの科学目的を効果的に実現するための、課題と位置づけ、推進方法を検討してきた。その中で、提案母体と各コミュニティーのサポートに関して次のような答申があった。「HiZ-GUNDAMはガンマ線バーストの観測を主軸として、重力波天文学や赤外線天文学などの分野横断型プロジェクトとして検討が進められており、高宇連もその実現に向け積極的にサポートする。」また、この答申の中では、各コミュニティーに対しての調整・検討課題が付されているので、これに従い検討することが望ましい。

### 6.1 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 $z > 7$ ）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 $10^{-9}$  erg/cm<sup>2</sup>/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。

## 6.2 PhoENiX

PhoENiXは、宇宙プラズマにおいて普遍的に起きている「磁気リコネクションに伴う粒子加速過程の理解」を科学目標とする、公募型小型ミッションである。この科学目標を達成するために、観測対象として太陽フレアを設定し、(1)磁気リコネクション領域中の粒子加速場所の特定、(2)磁気リコネクションの進行に伴う粒子加速の時間発展の調査、(3)磁気リコネクションに伴う加速粒子の性質を特徴づける、という3つの科学目的を設定している。

これらの科学目的を達成するために、加速粒子を捉えることが出来るエネルギー帯に感度を持ち、空間分解能・時間分解能・エネルギー分解能の3つの分解能を持つ装置を用いる。具体的には、軟X線撮像分光装置、硬X線撮像分光装置である。科学目的(3)については、エネルギー帯を高エネルギー側に広げること、時間分解能を高めること、偏光情報を取得することも重要であり、この目的のために、軟ガンマ線偏光分光装置も搭載する。

2018年3月の高宇連研究会において、国立天文台の成影氏(PhoENiX計画PI)からプロジェクトの概要説明があり、分野間連携ミッションとして高宇連からも推薦して欲しいとの要望が出された<sup>1</sup>。搭載装置の一部として、ASTRO-H/ひとみ衛星で開発した軟ガンマ線検出器SGDの技術が利用される。XARMにガンマ線検出器が搭載されないと決定した今では、高感度のガンマ線観測を実現すべきという高宇連の科学目標を担うミッションの一つとして、また、「ひとみ」で失われたサイエンスの1つである粒子加速の解明につながるミッションの推進という意味で、推薦を検討することが望ましい。ただし、高宇連内部での議論が必要であり、その結果をもって最優先課題の判断をするべきである。

---

<sup>1</sup> 2018年9月6日：2018年3月の高宇連研究会での要望があった事実を運営委員会で加筆。

## 7. 科研費等で実現する計画と機器開発

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う予定である。また、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。

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する方法も大いに期待できる。例えば、ガンマ線バースト偏光観測は、1つの研究室単位での参加も可能な小回りの効くミッション設定が可能であり、IKAROS に搭載された GAP では大きな成功を収めた。この戦略のもと、つばめ計画、木星ソーラーセイル計画、スウェーデンの小型衛星 SPHiNX への参加等を検討している。また、長時間飛行気球は将来の衛星計画に発展させるための実証試験の場にもなる。電子追跡型のガス検出器などのガンマ線観測装置の開発が行なわれており、長期気球観測が計画されている。

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づける努力をはかるべきである。参考として [付録 E](#) に、高宇連メンバーが関わる小型・超小型計画の一覧を載せた。

## 8. 今後の将来計画検討委員会への引き継ぎと方向性

第二期将来計画検討委員会は、高宇連が推薦する公募型小型計画である DIOS と FORCE の優先順位づけを目指し、活動を開始した。その後、ASTRO-H/ひとみの喪失、XARM の開発開始等、前提条件が大きく変化した。また、2017年8月には中性子星合体事象からの重力波が観測されるなど、X線天体物理学分野のみならず、広く宇宙物理分野において激動の時代を迎えた。そのような中において、第二期将来計画検討委員会の活動は、十分なものであったとは言い難い。

現時点では、XARM から Athena へつながる流れを主軸として、時期をずらしながら、XARM や Athena では実現することができない科学テーマを扱う FORCE 計画、Advanced DIOS 計画を実施するのが、高宇連の将来計画である。それに加え、分野横断プロジェクトである HiZ-GUNDAM 計画の実現、PhoENiX 計画の位置付けの確定が強く求められている。

以下の点を、次期の将来計画検討委員会に託したい。

- 広く宇宙科学全体を見渡した研究会等を実施し、その中における高エネルギー宇宙物理学の位置付けを再確認し、それを将来計画検討に反映させる。
- 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期間を頻繁に設けると良い。
- Advanced DIOS、FORCE 提案時には、その時点で十分に国際競争力があるミッションであるか、再度高宇連の中で検討し、会員の意見を聴取する機会を設けることが望ましい。
- 新たな発見が相次ぎ、数年単位で各テーマの重要度がめまぐるしく変化していく中で、衛星プロジェクトはどうしても機動力の点で不利である。長期にわたる腰を据えた計画の一方で、7章や付録Eで示すような、小型・超小型の活動を将来計画の中に戦略的に位置付け、新たなテーマの発掘や人材の教育などを強化して欲しい。
- 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。

## A. 公募型小型衛星のプロジェクト化の考え方

公募型小型衛星のプロジェクト化までの進みを、公募要項からの引用として記載する。本資料の内容に合わせて、一部の文言は変更しているが、基本的に公募要項に準ずる。

公募型小型計画のプリプロジェクト化までのミッション選定は、以下のステップで行われる。

- (1) 宇宙理学委員会・宇宙工学委員会による科学審査（審査第1ステップ）。
- (2) 宇宙科学研究所と提案ワーキンググループが協力して行う「アイデア実現加速プロセス」(Pre-phase A1b) は期間として半年程度を想定。
- (3) Pre-phase A1b を終了し Pre-phase A2 にはいるための宇宙科学研究所による審査。この審査には国際審査を含む（審査第2ステップ）
- (4) 所内プロジェクト準備チームによるミッション定義段階の活動（Pre-phase A2）。期間として1年から2年程度を想定。
- (5) ミッション定義段階（Pre-phase A2）を終了して Phase-A にはいるための宇宙科学研究所によるミッション定義審査（MDR、審査第3ステップ）と、それに続く JAXA によるプロジェクト準備審査。

審査第1ステップでは複数のミッション候補が選ばれる可能性がある。その場合は、MDRの段階で down selection を行い、宇宙基本計画行程表の公募型小型計画の一つの打ち上げ機会をめざして実施するプロジェクトを選定することになる。ミッション定義段階（Pre-phase A2）にはいったミッション候補の所内準備チームは最大二つの打ち上げ機会に対応する down selection まで活動を継続することができますが、それまでに down selection で選定されなかった場合は、チームは解散となる。詳細は図 A1 を参照。上記の宇宙科学研究所による審査（3と5のMDR）には、宇宙理工学委員会が関与します。

プリプロジェクト化後は、以下のステップでプロジェクト化が進められる。

- (1) プリプロジェクトチームによるミッション要求からシステム要求の形成（Phase A1 = 概念設計）。期間としては半年程度を想定。
- (2) 宇宙科学研究所によるシステム要求審査（SRR）
- (3) 担当メーカーの選定
- (4) プリプロジェクトチームと担当メーカーによるシステム要求からシステム定義の形成（Phase A2 = 予備設計・計画検討）。
- (5) 宇宙科学研究所によるシステム定義審査（SDR）
- (6) JAXA によるプロジェクト移行審査

これらの活動と並行して政府への予算申請が行われ、プロジェクト移行審査後は Phase B（基本設計）にはいる。

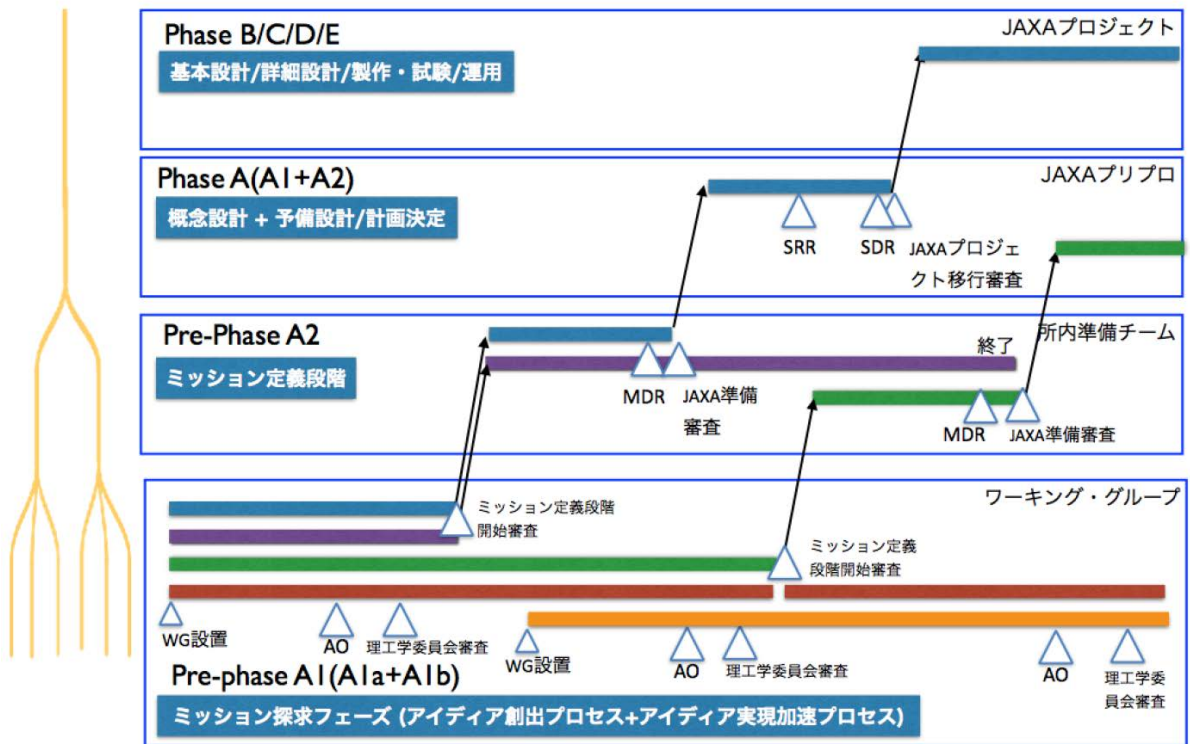


図 A1：プロジェクト化の考え方（公募型小型公募要項から引用）。

## B. X線天文衛星代替機（XARM）計画

### B.1 科学目的

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。ビッグバンによって生まれ膨張しつづけている宇宙の中で、銀河は、銀河群や銀河団のなかを高速で運動し、大規模な構造を形成しながら、銀河間空間に生成した重元素とエネルギーを供給している。宇宙の多様な構造は、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、現在の構造だけでなく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として理解することが重要である。X線スペクトル中の輝線や吸収構造を分光することによって、天体の運動を含めた動的な描像を得ることができる。

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。「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、このX線天文衛星代替機(XARM)計画である。「ひとみ」が拓きXARMが築く新たな超高分解能X線分光の上に、新たなX線天文学の地平が急速に拡大することが期待されるが、それは、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だろう。XARM計画では、4つのテーマをミッションの科学目標(Scientific Objectives)として掲げ、その下に「超高分解能X線分光で拓く宇宙の新たな地平」を展開する。X線天文衛星代替機ミッション要求書(PPR-XA16001)参照。

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、銀河団の成長のようす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。

## B.2 観測性能

XARMは、前述の100 km/s精度でのX線分光を行う *Resolve*（X線マイクロカロリメータ望遠鏡システム）と、より広視野で同帯域を観測する *Xtend*（X線CCD望遠鏡システム）をそれぞれ1台搭載する。それぞれの要求性能を表B1にまとめる。詳細については、X線天文衛星代替機性能ミッション要求フローダウン (PRP-XA16015) を参照のこと。

表 B1： XARM の要求性能一覧

性能要求項目	Resolve	Xtend
空間分解能	HPD < 1.7'	HPD < 1.7'、 pixel size < 100 μm
有効面積 (6 keV)	≥ 210 cm <sup>2</sup>	≥ 300 cm <sup>2</sup>
有効面積 (1 keV)	≥ 160 cm <sup>2</sup>	N/A
視野	≥ 2.9' x 2.9'	≥ 30' x 30'
帯域	0.3–12 keV	0.4–13 keV
エネルギー決定精度	≤ 2 eV	N/A
エネルギー分解能	≤ 7 eV FWHM @ 6 keV	≤ 250 eV FWHM @ 6 keV (EOL)
非X線バックグラウンド	≤ 2x 10 <sup>-3</sup> c/s/keV/array	≤ 1x10 <sup>-6</sup> c/s/keV/arcmin <sup>2</sup> /cm <sup>2</sup>
最大光子処理レート	≥ 150 c/s/array	N/A
絶対時刻精度	≤ 1 ms	N/A

## B.3 これまでの経緯と今後

「ひとみ」の事故（「異常事象」）と運用中止の決定を受け、高宇連は、ASTRO-H計画を推進してきたコミュニティとして総括と今後に向けた科学コミュニティとしての意見表明のための活動を行った。それを踏まえ、高宇連内のX線宇宙物理学グループを中心に、後継計画の提案とミッション定義の提案を進めた。本計画は、2020年度打ち上げとして計画されているが、詳細なスケジュールは、システムメーカー選定後基本設計フェーズを通じて制定される見通しである。これまでの経緯と今後のスケジュールは、以下の通り。

- 「ひとみ」喪失についての総括と後継機計画提案
  - 2016年7月4日 ASTRO-H「ひとみ」の喪失に対するコミュニティとしての総括タスクフォース答申
  - 2016年7月9日 X線天文衛星ASTRO-H「ひとみ」の喪失に対するコミュニティとしての総括に関する7.9高宇連集会
  - 2016年7月11日 宇宙科学研究所宇宙理学工学合同委員会での報告
  - 2016年7月23日 ASTRO-H後継機のコセプトについてX線グループとしての提案を議論するTV会議
  - 2016年8月26日 宇宙科学研究所宇宙理学工学合同委員会の質問への回答と提案
- X線天文衛星代替機ミッション定義
  - 2016年12月17日 第1回XARMミッション定義準備会合

## 高宇連将来計画検討（第二期答申；2018年6月）

- 2017年2月7日 第2回 XARM ミッション定義準備会合
- 2017年3月24日～4月14日 XARM ミッション定義審査・システム要求審査
- X線天文衛星代替機プリプロジェクトからプロジェクト準備
  - 2017年7月～9月 衛星システムメーカー候補（複数）と概念検討
  - 2017年10月3日 JAXA 準備審査（プリプロジェクト化承認）
  - 2017年11月1日 プリプロジェクト発足
- X線天文衛星代替機プロジェクト準備
  - 2017年10月から2018年1月にかけて、衛星システムメーカー候補の2社に対して提案要請。
  - 2017年10月17日 提案要請(RFP)発出
  - 2018年1月31日 衛星システムメーカー候補選定通知
  - 2018年2月～3月 予備設計
  - 2018年4月13日～27日 システム定義審査
  - 2018年6月13日 JAXA プロジェクト移行審査
  - 2018年7月 プロジェクト移行（予定）
- プロジェクト
  - 2018年下半年期衛星システム基本設計審査
  - 2019年衛星システム詳細設計審査



## C. 大型国際X線ミッション Athena

### C.1 ミッション概要

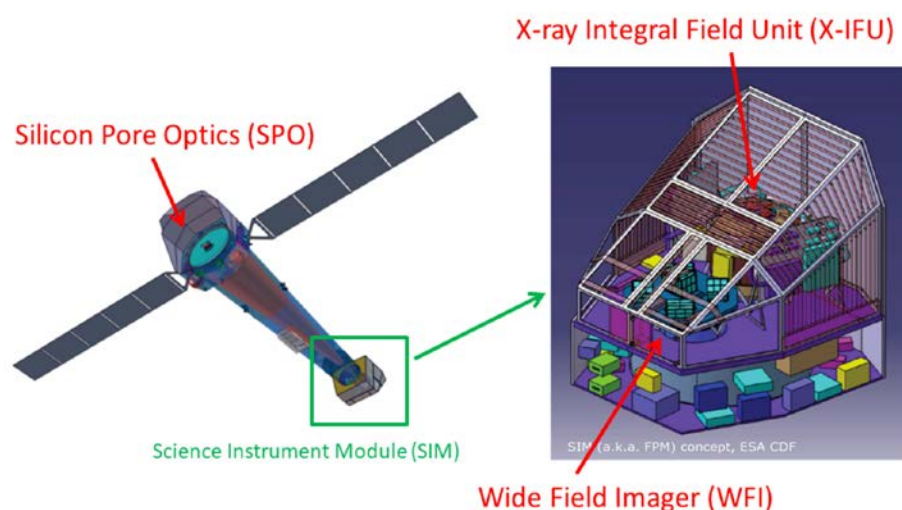
European Space Agency (ESA) は、“Cosmic Vision (2015—2025)”として、今後10~20年程度の宇宙探査機を用いた宇宙科学の戦略を打ち出した。この中で、これから取り組むべき重要課題として「1. 惑星形成と生命の誕生」「2. 太陽系」「3. 宇宙の基礎物理法則」「4. 宇宙の歴史と構造」の四つを掲げている。2013年11月、ESAは二番目に打ち上げる大型ミッションL2の科学目的として、“The Hot and Energetic Universe”を採用した。これは、上記の3. と4. に関連した、

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、図C1に示す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/> を参照のこと。Athena衛星には、大面積X線望遠鏡(Silicon Pore Optics; SPO)、TES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。

我々は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XARMというAthenaの先駆けミッションの開発経験



図C1 : Athena衛星の概要図。

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て、活動を行なっている。宇宙研理学委員会に対してもAthenaWG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。ただし、その後小規模プロジェクトの枠組みが変わったため、AthenaWGは2018年6月1日現在、PhaseA開始前のレビュープロセスの途中に位置したままになっている。

## C.2 2018年6月現在のスケジュール

- ・ Athena は 2016 年 5 月の Mission Consolidation Review (MCR)、2016 年 12 月から 2017 年 3 月にかけて delta MCR を行った。これら MCR の目的はミッションコンセプトのベースラインを確定することであったが、残念ながらコストオーバー、重量オーバーが判明し、また技術的 feasibility の懸念が指摘された。これを受け、Phase A を 2019 年後半まで延長し、より現実的なベースライン案を決めることが予定されている。今後の大雑把なスケジュールは以下の通り。夏ごろに、instrument consortia の設立作業を開始
- ・ 2018 年終盤に、Instrument Preliminary Requirement Review
- ・ 2019 年後半に、Mission Formulation Review
- ・ 2021 年後半に、Mission Adoption Review。ここでミッションの全容が確定。

2030 年代前半に打ち上げ

元々の提案された Athena のオリジナルな諸性能と、MCR の結果を受けて ESA より提案された案 (Phase A 案) の諸性能を表 C1 に示す。オリジナル案を目指しつつ、サイエンスへのインパクト、コストや実現性を考慮しながら、Phase A 案との間で「妥協点」を探す作業が行われている。

表 C1 : Athena オリジナル案と Phase A 案の比較

	オリジナル案	Phase A
SPO	焦点距離 12 m、 有効面積 2 m <sup>2</sup> @1 keV、 0.25 m <sup>2</sup> @6 keV	焦点距離 12 m、 有効面積 1.4 m <sup>2</sup> @1 keV、 0.25 m <sup>2</sup> @6 keV
WFI	視野 40' x 40'、 エネルギー分解能 120~150 eV	同左
X-IFU	エネルギー分解能 2.5 eV、 視野 5' x 5'、 ピクセルサイズ ~5"	同左
T00 機能	50%に対し、4 時間以内の観測開始	50%以下に対し、4 時間程度で観測開始
Astrometry	1'' 以内 (3σ)	同左
打ち上げ	Ariane 6、L2 ハロー軌道	Ariane 6, L2 or L1 (TBD)
運用	5 年+延長	4 年+延長
その他		カウントレートのダイナミックレンジを増やすために、defocusing capability

Phase A の間に、日本の Athena に対する貢献のベースライン案も決めなければならない。日本の貢献が確定するのは、2021 年後半に予定されている Mission Adoption である。従って Mission adoption までは、望遠鏡や検出器の構成、あるいは各国の役割分担は変わり得る。サイエンス目標がどこまで実際に達成されるのかは、今後も慎重に見極めるべきであろう。

Phase A が 2 年程度伸びる予定であるが、Phase A の間にしっかり検討を進めることで Phase B を出来るだけ短縮する。これにより、もともと 2028 年を目指していた打ち上げへのインパクトをなるべく小さくし、現在は 2030 年代前半の打ち上げを目指している。

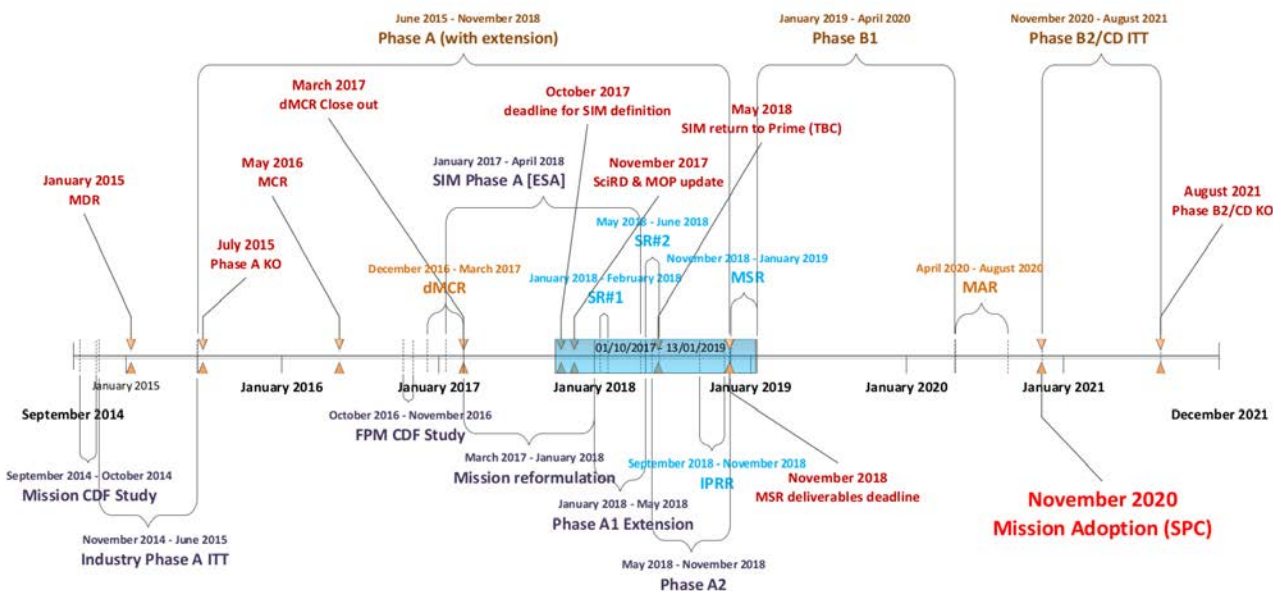


図 C2：予想される Athena のスケジュール (2017 年 10 月現在)

### C.3 Athena Science Study Team (ASST) と Science Working Group

Phase A での各種調査をリードするために、ESAによって Athena Science Study Team が設置されている。メンバーは、M. Guainazzi (ESA; Chair)、Kirpal Nandra (MPE、Lead Scientist、WFI PI)、Didier Barret (IRAP、X-IFU PI)、Luigi Piro (INAF)、Jan-Willem den Herder (SRON)、Andy Fabian (IoA)、Anne Decourchelle (CEA Saclay)、Richard Willingale (Univ. Leicester)、Randall Smith (SAO、Harvard、USA、NASA scientist) と、日本から参加の松本（阪大、JAXA scientist) の 10 人である。

ASST の活動は多岐にわたり、その活動をサポートするために、ASST の下に Sub-Working Group (SWG) が設定されている。SWG についての詳細は、

<http://www.cosmos.esa.int/web/athena/community-wg> を参照のこと。SWG メンバーは ESA の公募により決定された。日本からは高宇連の会員 26 名が Athena SWG に選ばれている。さらに、6 名は SWG のチェアとして、サイエンス面での議論に深く関わっている。

### C.4 日本の貢献案

日本が Athena に参加する目的は、同じカロリメーターミッションであるひとみ衛星、XARM 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 を成功に導くことである。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。XARM 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 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。

日本は、ハードウェアとしては、X-IFU の冷凍機、特にシールドクーラーへの貢献を期待されている。X-IFU のための冷凍機開発技術は、ひとみや XARM 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冷凍機技術である。そのため、この技術開発は宇宙科学研究所により Cooling Chain Core Technology Program (CC-CTP) として定められ、技術開発に取り組んでいる。ただし、MCR で懸念されている技術的 feasibility の1つが X-IFU の cooling chain であり、Phase A の間にその設計を徹底的に見直すことが予定されている。日本はこの設計見直しの議論にも深く関わっている。設計見直しの結果、日本の担当範囲が変わることは有り得るが、日本の貢献が X-IFU の成功にとって必須であることには変わりはない。なお、X-IFU proto-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、SP0 は X 線反射膜として Ir を使用する。カロリメータの精度で SP0 のレスポンスを正確に把握するための、Ir 光学定数の詳細測定を日本の SPring-8 で行う可能性の議論を開始し始めている。ひとみ、XARM を通して得るカロリメータキャリブレーションの経験をもとに、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。もしチャンスがあれば、WFI も含めて他にも寄与を行いたい。

## D. X線偏光観測衛星 IXPE

X線偏光観測は分光、撮像、計時観測とは独立した情報をもたらす重要な手段であるが、現在まで高感度のX線偏光観測は実現したことはなく、ごく少数の明るいX線源（かに星雲、Cyg X-1）とガンマ線バーストに対する結果が報告されているに過ぎない。X線偏光は、降着円盤表面や強磁場中など電子散乱が異方性をもつ状況で、放射領域の幾何学的配置や構造を反映し、シンクロトロン放射では磁場の向きを反映する。さらに、ブラックホール近傍の強重力場中のゆがんだ時空や、強磁場による真空偏極によっても、偏光方向が変化する。本計画は、偏光計測をブラックホール天体などの極限状況の天体観測に適用することで、物理学の根本原理の検証を目的とする。

IXPE (Imaging X-ray Polarimeter Explorer) 衛星は NASA マーシャル宇宙飛行センター (MSFC) が主導する高感度軟X線偏光観測衛星で、2021年4月の打ち上げが予定されている。日本グループは PRAXyS (Polarimeter for Relativistic Astrophysical X-ray Sources) 衛星計画に関わっていたが、採択されなかった。「偏光観測を実現するのは世界で一機であり、打ち上げが決まった衛星に注力する」という偏光観測グループの戦略通り、IXPE 衛星でも日本からハードウェアを提供する機会を得て、参加が決まった。日本グループは偏光計の電子増幅フォイルとX線望遠鏡の熱シールドの提供を通して、科学成果創出まで含めて参加する。現時点で、観測天体の選定、全ての観測データアクセス権、内部ソフトウェアのアクセス権など、プロジェクトの主要部分への関与が認められている。日本側では2018年2月に JAXA 小規模計画に再提案した。

IXPE 計画は、GEMS/PolariS 衛星の流れを汲むもので、高宇連で優先的に実施すべきミッションとして位置付けられたものである。その判断理由を記録として残しておく。

- (1) GEMS/PolariS 計画は2012年11月に高宇連から学術会議への推薦として「PolariS チームと GEMS チームのアクティビティを統合して、GEMS に参加することをサポートする」に合致している。
- (2) これまでの将来計画の討論会でも、偏光観測は Athena では実現できない重要な観測手法として認識されており、偏光観測の重要性は変わっていない。
- (3) 海外の計画に参加することは、日本がさけるリソース面でも有利であり、国際的にも日本の立場を高めるもので推奨できる

## E. 高宇連メンバーが関わる小型・超小型計画

小型で機動力の高いミッションを実現することが現実的になってきた中で、そのようなミッションを将来計画の中でどのように位置づけるかは、今後の議論の重要な課題である。ここでは将来計画検討の参考として、高宇連会員が何らかの形で関わる、小型・超小型衛星、ならびに、気球計画等について、情報が寄せられたものを、順不同で掲載する。実現度が高く、具体的な打ち上げ時期が決まっているものを優先した。今後、周辺環境が変わるに従い、新たなプロジェクトが加わったり、中止になったりすることが想定される。その場合は、なるべく以下のリストを最新のものにアップデートし、高宇連会員への情報提供に資するものとする。

### ORBIS

- 目的：バイナリブラックホール探査
- 乗り物：超小型衛星
- 搭載装置：MEMS X線望遠鏡 + X線 CCD
- 打ち上げ見通し：2020年頃目標、衛星バス・搭載機器を開発中
- 関係機関：首都大学東京、大阪大学、JAXA、宇宙科学研究所、名古屋大学、明星大学
- 売り込みポイント：X線望遠鏡を用いた「世界初」の超小型X線天文衛星、特定天体の長期間モニタリング。

### 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 + DepFET 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

### 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 MIDEX class, 2020 NASA Decadal Review に申請予定
- 観測装置：Electron-Tracking Compton and Pair Telescope

- 打ち上げ見通し：2030年前後か
- 関係機関：NASAなどアメリカ多数，広島大学など。
- 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

### Kanazawa-SAT<sup>3</sup>

- 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・50kg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：H30年度末以降打ち上げ目標
- 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

### ひばり

- 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：超小型衛星で、現時点では6Uキューブサットに縮小予定。以降の情報は、6Uキューブの場合の期待性能。
- 搭載装置：200~300nmの紫外線望遠鏡。視野30平方度。検出限界20等級(AB)@600s exposure 3点タイリングで100平方度を2/hrケイデンスでカバー。
- 打ち上げ見通し：2020~2022年あたりを目標にフライト予定。(6Uは定期的な商用フライトチャンスがあり完成さえすれば、1年でフライトを確定できる)開発経費については現時点でフライトも含めた総額の約30%を確保。
- 関係機関：東京工業大学(理・工)、JPL/Caltech、甲南大、国立天文台、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。

### 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°）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：2018年4月に豪州気球実験 (SMILE-II+)
- 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。

#### 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：2018年、総合性能実証のための豪州気球実験 (JAXA 採択済み)、2021年科学観測開始を目指す
- 関係機関：神戸大、愛知教育大学、ISAS/JAXA、岡山理科大学、神戸大学、名古屋大学
- 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 (~10m<sup>2</sup>)

#### HaloSat

- 目的：軟 X 線全天サーベイ
- 乗り物：6U (100x200x300 mm) 超小型衛星
- 搭載装置：シリコンドリフト検出器
- 打ち上げ見通し：2018年4月打ち上げ予定
- 関係機関：アイオワ大学・NASA・名古屋大学
- 売り込みポイント：<1 keV 帯域にてエネルギー分解能 <100 eV の感度で全天サーベイを行うことで、太陽風電荷交換反応、ローカルホットバブル、銀河系 X 線ハロー等の分光特性を調べる。

#### X-Calibur

- 目的：硬 X 線偏光観測
- 乗り物：極域（南極）周回長時間気球
- 搭載装置：現状は InFocus Mirror と散乱型（プラシント CdTe）偏光計、Mirror として FFAST



Mirrorに置き換え可能か検討開始した状況

- 打ち上げ見通し：2018年に南極で気球実験、2021年に二度目のフライトを予定
- 関係機関名：ワシントン大学他。今後、日本でどのように参加するか相談中。
- 売り込みポイント：IXPEと相補的な硬X線偏光観測を実現。Polarisの目的の一部を実現。将来的にはIXPEの次の偏光衛星につながる可能性がある。

#### ハンガリーGRB CubeSAT

- 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
- 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、首都大他
- 売り込みポイント：TGFの観測も視野に入れている。