参考資料１

第33回宇宙科学・探査小委員会
（10月25日）資料

宇宙科学・探査および国際宇宙探査に関する取り組み状況および今後の進め方について

令和元年（2019年）10月25日

宇宙航空研究開発機構
國中　均

目次

（1） 研究・開発中のプロジェクト

① 小型月着陸実証機（SLIM）

② 火星衛星探査計画 （MMX）のフロントローディングについて

③ 宇宙科学プログラムのその他の進捗状況

④ 月着陸探査活動

（2） 運用中プロジェクト

① 小惑星探査機 はやぶさ2 小惑星近傍運用状況

② 水星磁気圏探査機「みお」（MMO） 運用状況

（１）　研究・開発中のプロジェクト

①小型月着陸実証機（SLIM）（1/2）

【概要】

≪目的A≫小型の探査機にて、月への高精度着陸技術の実証を目指す

ー諸外国で行われてきている月着陸の精度はkmオーダー。これに対して、
SLIMでは将来の科学探査・国際宇宙探査で必要とされる100mオーダーを目指す

≪目的B≫従来と比較して、大幅に軽量な月惑星探査機システムを実現し、
着陸後の月面活動の実証実験を含めて実施することで、月惑星探査の高頻度化に貢献する

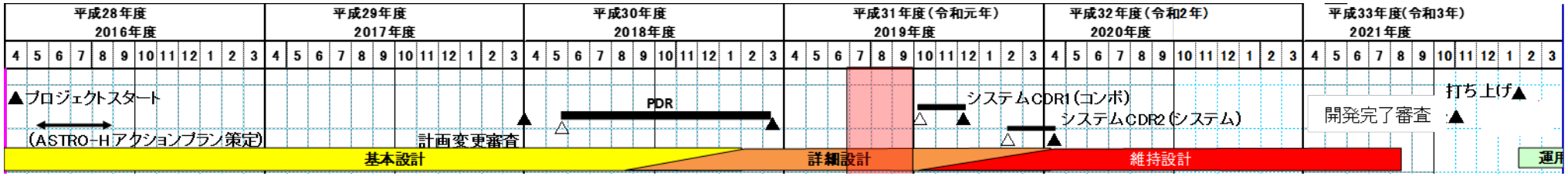
ー軽量化に伴うコスト低減を含めた低リソース化は、我が国における惑星探査の自立性確保の観点からも重要

ー諸外国の月着陸機と比較して大幅な軽量化を目指している

〇総開発費　149億円　2021年度打上げ予定

※PDR：基本設計審査
CDR：詳細設計審査
EM：エンジニアリングモデル
MTM/TTM：構造/熱モデル

【スケジュール】



【進捗状況】

・打上手段変更に伴い、「分光カメラ」による科学的成果が見込まれ、かつ着陸技術実証に適する地点として、「神酒の海」近傍の地点を着陸候補地点として選定した。昨年5月から本年3月まで基本設計審査会を実施し、現在は、詳細設計フェーズへと移行している。今年度後半にシステムEM試験及びMTM/TTMの準備や試験を進める。

・NASA側より、小型レーザリフレクタの搭載を打診されている。21gと非常に軽量であり、質量の観点からは搭載できる可能性があると判断しており、詳細検討を行っている。

①（参考）X線分光撮像衛星（XRISM）（2/2）

【概要】

－ASTRO-H（ひとみ）のミッションを引き継ぎ、「宇宙の構造形成と銀河団の進化」、「宇宙の物質循環の歴史」、「宇宙のエネルギー輸送と循環」を研究するとともに、「超高分解能X 線分光による新しいサイエンス」を開拓する。

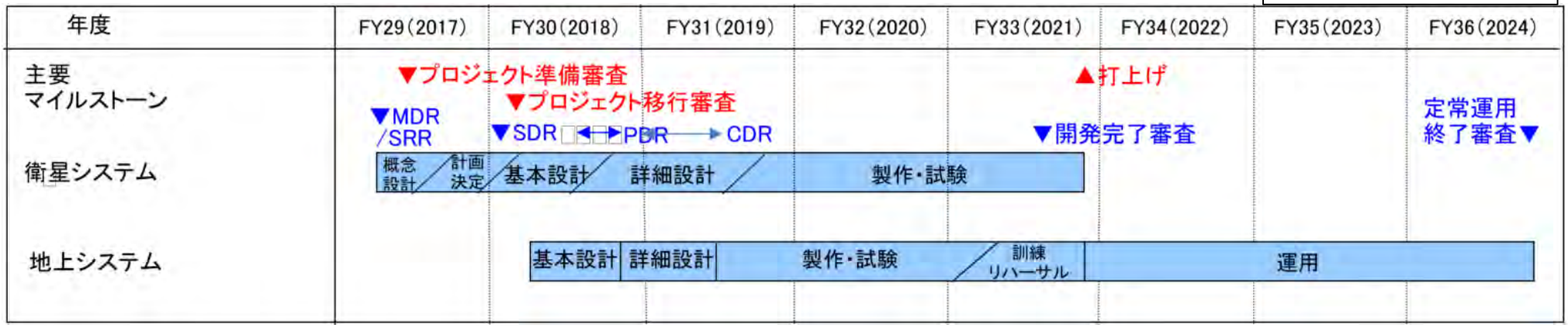
－これらの科学目的を達成するために、これまでにない特長と性能で「宇宙の高温プラズマにおける物質循環・エネルギー輸送過程と天体の進化の解明」を進めることが本ミッションの中心的な意義である。

－さらに、世界に開かれた汎用X 線天文台としてXRISMを実現し、さまざまな分野にわたる宇宙物理をさらに推し進め、2020 年代の物理学の広範な発展の一翼を担う。

※MDR：ミッション定義審査
SRR：システム要求審査
SDRシステム定義審査
PDR：基本設計審査
CDR：詳細設計審査

〇総開発費　269億円　2021年度打上げ予定

【スケジュール】

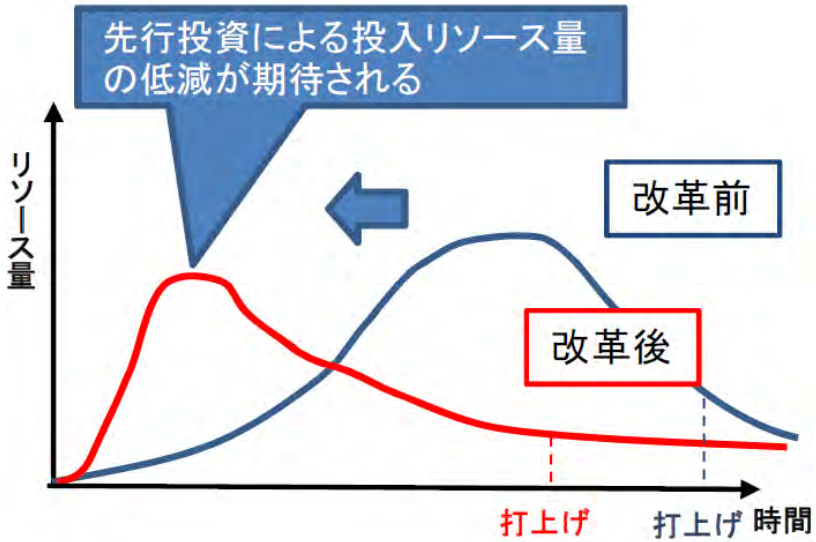


【進捗状況】 本年2月より総括PDRを実施しており、現在は詳細設計を進め、サブシステムCDRを完了、衛星システムCDRを実施している。本年12月には総括CDRを予定している。また、ヘリウムガスが不足しており、年内使用分は他ミッションの余剰ガスを大学の設備で液化することで確保できる見通し。来年以降については入手の目処は立っていない。

② 火星衛星探査計画（MMX）のフロントローディングについて（1/6）

➢ フロントローディング実施計画

新規プロジェクトとして有力な候補である火星衛星探査計画について、初期段階での不確定性を低減し、またその後の開発全体のリスクを低減するため、新規性（リスク）の高いミッション系機器等キーとなる重要技術（クリティカル技術）について、先行的に研究開発および実証を行う。



宇宙科学・探査小委員会（第19回）資料より抜粋・再掲

➢ 技術提案方式（RFP）により、探査機システム開発の請負企業を選定した。この企業とフロントローディングを実施していく。

② 火星衛星探査計画（MMX）のフロントローディングについて（2/6）

➢ フロントローディングの進捗

2019年4月に開始した今回のフロントローディング活動（約半年が経過）における深いレベルでの検討の成果として、１）重力天体着陸・表面探査技術、２）ミッション部成立性、３）探査機システム成立性について技術的成立性の見通しが立った。これにより、現時点で、技術的成立性と資金的成立性及び不具合による延期回避の見込みを立てることに成功した。

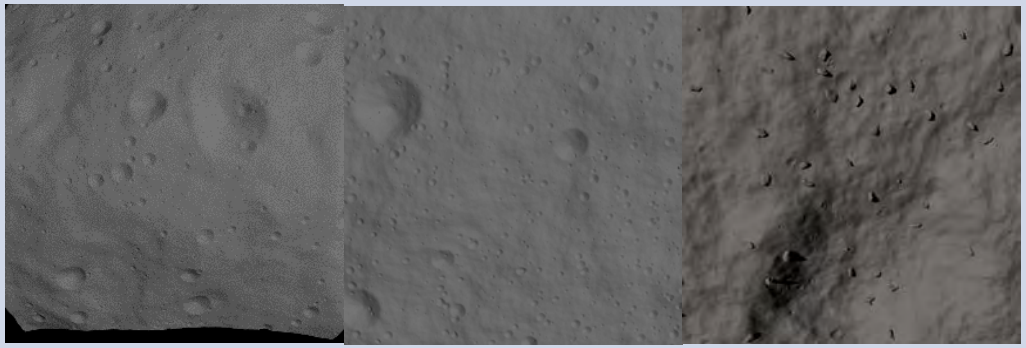
➢ フロントローディングの成果

プロジェクト実行段階において万が一、重要な開発課題について技術課題が顕在化した場合、その技術課題の対策・実証のみにとどまらず、周辺の装置や衛星システム全体にも波及するため設計変更/追加試験等、手戻りの作業コストの発生やスケジュールの大幅遅延等のリスクが想定される。しかし今回のフロントローディングの実施により、プロジェクト実行段階では技術リスクは低減され、手戻り作業等による想定外の追加コストは最小限に抑えることができ、全体として開発コストは十分に削減できると見込んでいる。

これは、 “実現性の高いプロジェクト”を確実に立ち上げることを狙った今回のフロントローディングの取り組みの成果である。

➢ 2019年度後半は、当初計画通り、 上記成立性の成果を開発計画へ反映して確定させ、開発移行に向けた活動を実施する予定。

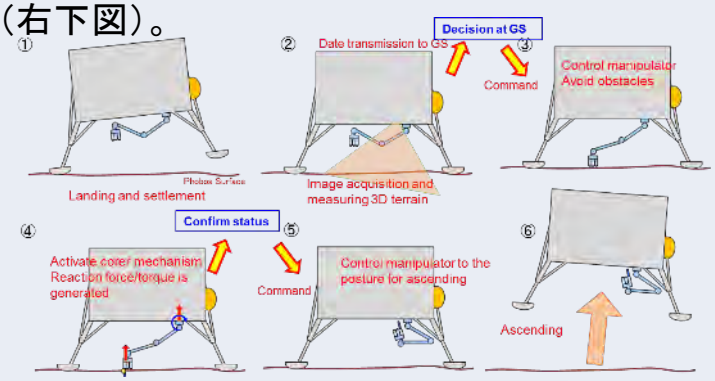
重力天体着陸・表面探査技術として、往路モジュール・着陸誘導機器・サンプリング装置の開発を行い、いずれも成立性の目途を得た。

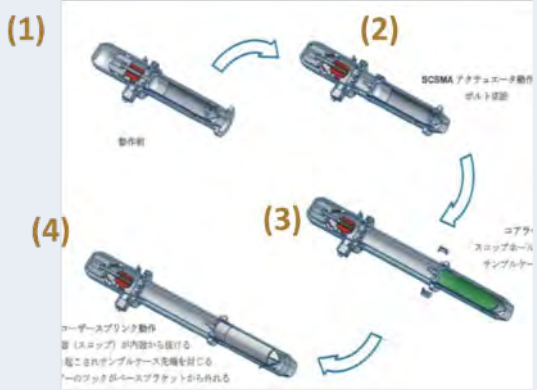
MMXフロントローディング：重力天体着陸・表面探査技術の開発	
実施内容	具体的な実施内容（例）
○往路モジュールの開発 火星衛星周回軌道投入/脱出時の大きな軌道速度を効率よく得るための化学推進系などを検討する	メインエンジンのオフモジュレーション制御による軌道姿勢制御方式の工夫（推力軸の重心オフセットによる外乱トルク発生を防止）により、推薬量が削減できる見込みを得た。質量制約の厳しいMMX探査機にとって、有効な対策となっている。
○着陸誘導機器の開発 火星衛星近傍での安全かつ確実な運用に必要な要素技術開発を行う。（例：表面環境の不確定性が大きな微小重力天体への安全な着陸、平坦な表面を期待できる狭い範囲への誘導、探査機の位置特定のために必要な画像照合航法など）	定量的な精度評価をするために、火星衛星周りのダイナミクスシミュレータを構築した上で、基本設計レベルの航法誘導精度解析を実施している。  (a) 高度 15km　(b) 高度 3.5km　(c) 高度 0.1km 図 4.3.6.2-1　Phobos 表面のシミュレーション画像例 画像照合航法アルゴリズム検証には、フォボス表面の密なクレータ分布を要する。そのため、解析・シミュレーションによって、カメラ画角内に収まるクレータ密度を見積もり、アルゴリズムに支障がないことを確認している。

重力天体着陸・表面探査技術として、往路モジュール・着陸誘導機器・サンプリング装置の開発を行い、いずれも成立性の目途を得た。

MMXフロントローディング：重力天体着陸・表面探査技術の開発（続）

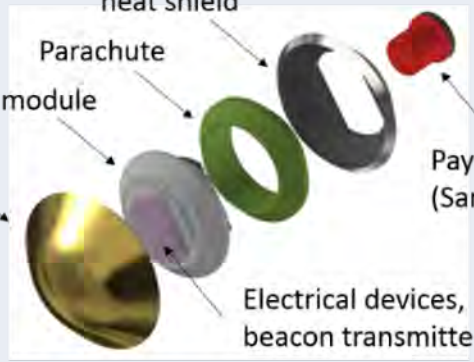
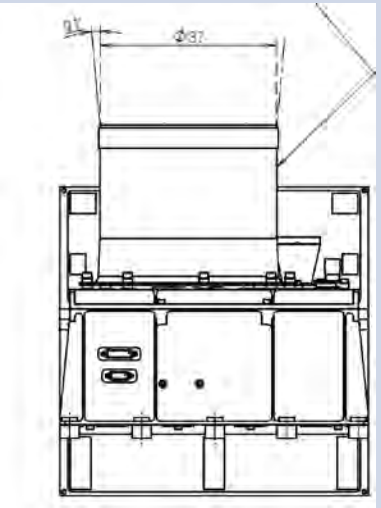
実施内容	具体的な実施内容（例）
○サンプリング装置の開発 砂貫入機構、ロボットアーム、試料搬送機構について設計・試作を行うとともに、試験評価を継続して実施する。	火星衛星表面での運用シナリオを検討し（左上図）、「火星衛星表面から地下2cm以上の深さのサンプルを採取すること。」のミッション要求を満たせるロボットアーム（右上図）及びコアラー機構（砂貫入機構；左下図）について、「コアラーを射出する」、「コアラーの先端にフタをする」、「コアラーを収納するために切り離す」という機能を試験した（右下図）。





ミッション部成立性確認を行い、結果を探査機システム構成に反映した。

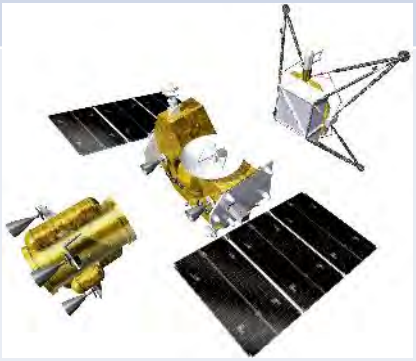
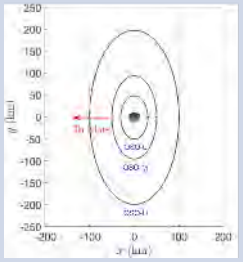
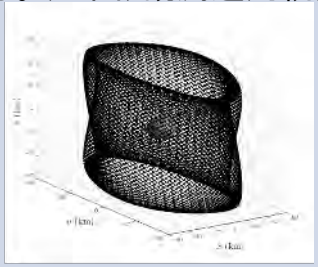
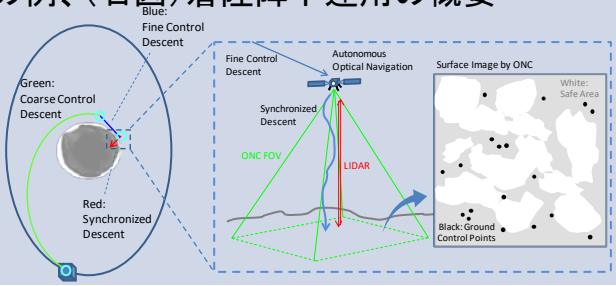
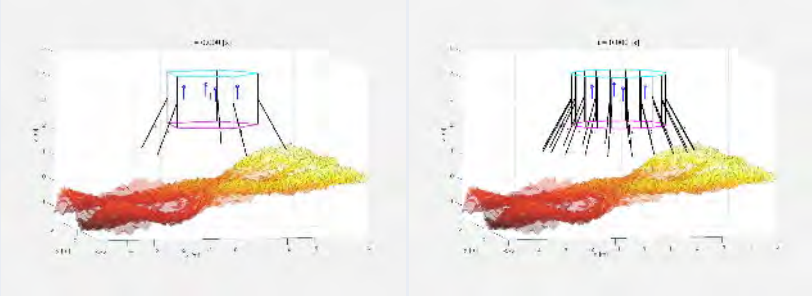
MMXフロントローディング：ミッション部成立性確認

実施内容	具体的な実施内容（例）
○再突入カプセル及び搭載観測機器（各種カメラ・分光計他）について、設計・試作・試験及び成立性確認を行う。FY2018までの検討で抽出された課題を解決するともに、検討結果を探査機システム構成に反映する。	「はやぶさ」カプセルの実績をもとに概念検討を実施。その結果、搭載ペイロードの体積・重量の増加に伴い、「はやぶさ」カプセルよりサイズアップ（直径60cm）を設計ベースラインとした。 
	火星衛星の表面形状・密度分布を把握するためにレーザー高度計（LIDAR）を搭載する。これについて、反射光の受信エネルギーをもとに、回線計算を実施し、要求性能を設定・配分した。この要求性能が満たされれば、距離100km以下での測距が成立することを確認しているが、このためレーザ出力向上の必要があり、この設計・試験・試験を行っている。（右図はLIDAR構造図面） 

② 火星衛星探査計画（MMX）のフロントローディングについて（6/6）

探査機システム全体の成立性検討を行い、モジュール構成を始めとする探査機設計ベースラインを確定した。

MMXフロントローディング：探査機システム成立性確認

実施内容	具体的な実施内容（例）
○FY2018までの検討で抽出された課題の解決と、ミッション部成立性検討の結果をシステム構成に反映した成立性確認を行い、システム・ベースラインに反映する。	システム成立性の確認 MMXでははやぶさ2の約2.5km/s、SLIMの約3km/sと比べて、格段に大きな約5km/sの総ΔVが要求されている。また、小重力の天体への着陸に伴い、着陸脚や太陽電池パドルの構成などにMMX特有な設計が求められる。そのため、アンテナや観測機器の配置、ステージング、推進系構成等を幅広く検討し、効率の良いシステムとして、3モジュール構成を採用した。 （図：探査機モジュール構成） 
	フォボス近傍での観測運用、表面への着陸運用、サンプリング運用等の検討を進め探査機システムへの要求を整理した。地球から遠方で、短時間の内に必要な運用を安全に完了するため、自律化が重要である。（左図）観測運用軌道（QSO）の例、（右図）着陸降下運用の概要   
	実際の運用を想定した着陸時の運動（剛体・弾性体）の動的な解析を実施した。（左図）低重力環境および複雑地形での簡易スロッシングモデルを含んだ多脚探査機の着陸ダイナミクスシミュレーション （中央大学 前田助教による結果） 

③宇宙科学プログラムのその他の進捗状況（1/2）

カテゴリー	進捗状況
戦略的中型計画	➢ 次期戦略的中型計画2の候補として、宇宙マイクロ波背景放射偏光観測衛星（LiteBIRD）を選定した。フロントローディングに向けて、対象技術の具体的な検討を進めている。
公募型小型計画	➢ 深宇宙探査技術実証機（DESTINY^{+}）の開発を進める。 ➢ 公募型小型計画3として赤外線位置天文観測衛星（小型JASMINE）を選定した。フロントローディングに向けて、対象技術の具体的な検討を進めている。 ➢ 年度内に公募型小型計画4の選定を行う。また、公募型小型計画5、6の公募を開始した。
戦略的海外共同計画	➢ ESAの木星氷衛星探査計画（JUICE）への参画等、小型衛星・探査機やミッション機器の開発機会を活用した特任助教（テニュアトラック型）の制度を引き続き進める。 ➢ NASAのNew Frontiers-4計画にて、彗星サンプルリターン探査機（CAESAR）は落選した（土星衛星タイタンの探査（Dragonfly）が採択）。サンプルリターンカプセル技術についてはMMXにて引き続き実施することとした。 ➢ NASAの広視野赤外線サーベイ望遠鏡（WFIRST）、ESAの大型国際X線天文衛星（Athena）などの新たな計画への参画について、実現に向け相手方との調整及び具体的な検討を開始した。

③宇宙科学プログラムのその他の進捗状況（2/2）
ー(参考)　広視野赤外線サーベイ望遠鏡(WFIRST)/大型国際X線天文衛星(Athena)概要ー

広視野赤外線サーベイ望遠鏡(WFIRST)（検討中） Wide Field Infrared Survey Telescope

イメージ図

目的

WFIRSTは、米国Decadal Survey2010でスペースの最優先計画として推薦され、JWSTにつづくNASAの次期旗艦大型衛星計画となり、予算は$3.2Bである。
宇宙の根本的な謎に挑み、同時に幅広い宇宙物理学研究を行う、近赤外線宇宙望遠鏡である。系統的な広視野撮像・分光観測により宇宙の膨張史と構造形成過程を精密に測定してダーク・エネルギーや修正重力理論など宇宙の加速膨張をもたらした要因について検証し、マイクロレンズ観測によりこれまで見えていなかった太陽系外惑星のより全体的な描像を得るとともに、さらに様々な広視野近赤外線観測を行うことを目指している。技術実証装置として初めての本格的なコロナグラフ装置を搭載してスペース・高コントラスト観測を実現し、系外惑星の直接観測を行う予定であり、将来の地球型系外惑星観測へと繋がる技術および科学的成果を得る。

期待される成果と効果

- 宇宙論広視野観測では数億個の銀河の分布や 1500個以上の遠方Ia型超新星の測定から100億年以上の期間にわたる宇宙の膨張率の変化を1%以下の精度で測定し、ダークエネルギー理論などを検証する。
- 系外惑星マイクロレンズ観測では、地球質量以下数百個を含む 3000個以上の大軌道半径惑星を検出しその質量および軌道分布を求める。
- コロナグラフ装置では主星から0,2秒角で10億分の１のコントラストの系外惑星直接観測を実証する。十数光年内の巨大惑星・氷惑星を観測。
- Guest Observer 観測（25%）で様々な公募観測研究を実施。

日本は、将来のスペースコロナグラフに必須である偏光機能の提供、L2軌道からの膨大なデータのためのKa26.5GHz帯受信協力、そして、地上望遠鏡による協調観測などを通じて、WFIRSTの成果の最大化への寄与を目指す

大型国際X線天文衛星(Athena)（検討中） Advanced Telescope for High-Energy Astrophysics

イメージ図

目的

欧州宇宙機関(ESA)がCosmic Vision 大型計画2号機として2030年代前半の打ち上げを目指すX線天文衛星で、予算は€1.6Bである。ESAおよび欧州諸国が開発中心だが、日本(ISAS/JAXA)とアメリカ(NASA)の国際協力を加えて実現を目指す。直径3mにも及ぶ大口径で高角度分解能のX線望遠鏡(Silicon Pore Optics;SPO)でX線を集光し、ASTRO-HのX線カロリメーターの発展版である超伝導遷移端(TES)型カロリメーター(X-ray Integral Field Unit;X-IFU)で、高解像度・高精度のX線分光を実現する。また、広視野半導体検出器(Wide Field Imager;WFI)も搭載し、遠方のX線天体を検出する。

期待される成果と効果

宇宙の物質は重力により集積することで，星，銀河，銀河団，ブラックホール等の構造を形成し，開放されたポテンシャルエネルギーが天体の温度や物質のエネルギーへと変換されてきた。宇宙最大の構造である銀河団の温度は数1000万度に達し，主にX線で輝き，観測することができる。Athenaは
(1)宇宙の物質は、どのように大規模構造に集積したのか、
形成初期から現在までの銀河団の系統的なX線観測を行い、温度や密度など、物理状態の進化を直接的に観測する。
(2)どのようにして銀河中心の巨大ブラックホールは成長し、その際に放出するジェット，放射などの高エネルギー現象は銀河や宇宙にいかに影響を与えたのか。
という宇宙物理学の大きな2つの課題の解明を目指す。2030年代の多波長天文学を担う世界で唯一の大型X線天文台である。
日本はXRISM等の経験をいかしてAthena/X-IFUの冷却システム開発等に参画し，科学成果の最大化に貢献する。