

広帯域X線高感度撮像分光衛星 FORCE

① 計画の概要

FORCE (Focusing On Relativistic universe and Cosmic Evolution) は、宇宙のあらゆる階層において未だ見つかっていない「ミッシングブラックホール」の探査を通じて、現在の宇宙を形作る天体の形成史を紐解くことを科学目的とした小型衛星計画である。ブラックホールの探査はX線観測が最も得意とするものであるが、ブラックホールからの非熱的X線放射をこれまででない高感度で捉えるために、1-80 keV という広帯域のX線を10秒角にせまる角度分解能で撮像分光する。図1に、FORCE衛星の概念図を示す。高角度分解能を有し広帯域のX線を集光するスーパーミラーと軟X線から硬X線を1台でカバーする広帯域X線撮像検出器を搭載し、特に10 keV以上の硬X線においては、既存のX線天文衛星より5-10倍よい角度分解能と1桁よい感度を達成する。天体形成史の解

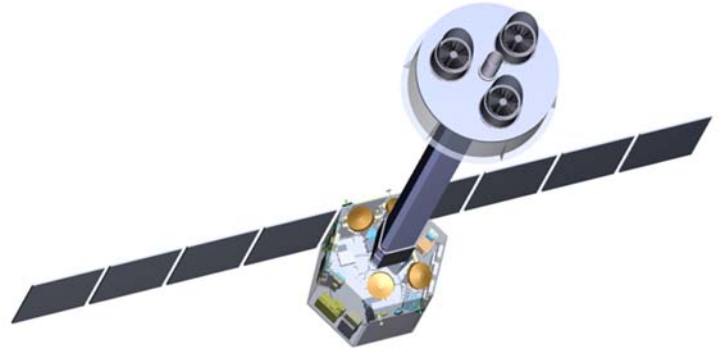


図1 FORCE衛星の概念図

明は他波長での観測計画でも掲げられている天文学の究極の目的の一つであり、ブラックホールをプローブとする本計画は他計画と相補的な関係にある。衛星はイプシロンロケットによる打ち上げを計画しており、2020年代の後半での実現を目指している。FORCEはこの年代における世界唯一の高感度の硬X線プローブとして、世界の公共天文台の役割も果たし、マルチメッセンジャー天文学の一翼を担う。日本のX線天文衛星「ひとみ」の開発に携わった大学・研究機関が開発主体であり、スーパーミラーの開発については米国のNASA/GSFCとの国際協力を進める。飛翔体を用いてX線・ガンマ線の天体観測をおこなう日本の研究者コミュニティである高エネルギー宇宙物理連絡会(高宇連)においては、高宇連が推進する主力ミッションとして位置付けられている。米国・欧州ではむこう10年間で、このような広帯域X線撮像衛星が実現する見込みはたっていない。

② 学術的な意義

FORCEによりミッシングブラックホールの実態が明らかになれば、それを手掛りに現在の宇宙を形作る天体の形成史を紐解くことができる。銀河中心の巨大ブラックホール(SMBH)の質量は、その母銀河の質量と強い比例関係があり、両者は共進化してきたことがわかっている。つまり、SMBHの進化を探ることで銀河の進化も探ることができる。SMBHの進化は観測技術の制約から、軟X線で観測が可能な吸収の少ない種族を中心に議論されてきたが、日本のX線天文衛星「すざく」の観測から吸収の大きい「埋もれた種族」が大量に存在することがわかってきた。最新の硬X線天文衛星であるNuSTARによる探査も続けられているが、観測感度の限界から、まだそのごく一部しか明らかでない。FORCEの高感度広帯域X線探査により、このミッシングであった埋もれた種族を含めてSMBHの進化の全容が初めてわかる。SMBHに関しては、その進化だけでなく起源もよくわかっていない。近年の重力波観測から、従来知られてきた恒星質量BHの上限値(15太陽質量)を超える30太陽質量のBHが確かに宇宙に存在し、それらが合体成長する様子が明らかになった。FORCEでは、これら中質量BHのうち、SMBHへ取込まれず今でも星間空間を漂っているものが濃い分子ガスを降着する際に放つ硬X線を検出することで、その存在を直接的に捉える。天体形成史の解明は他波長での観測計画でも掲げられている天文学の究極の目的の一つであり、ブラックホールをプローブとする本計画は他計画と相補的な関係にある。2020年代後半から2030年代の前半にかけて、世界的に硬X線に高感度を有するX線天文衛星の打ち上げは予定されておらず、FORCEはこの時代の世界唯一の高感度硬X線プローブとして公共天文台の役割も果たし、次世代マルチメッセンジャー天文学の一翼を担う。

③ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

本計画の最大の特徴は1-80 keVの広帯域X線を10秒角にせまる高空間分解能で撮像分光することである。10 keV以上の硬X線の撮像分光は、2012年6月に打ち上げられた米国のNuSTAR衛星が初めて実現し、様々な成果を挙げている。2016年2月打ち上げの日本のX線天文衛星「ひとみ」において、我々も硬X線の撮像分光を実現した。ただし、両衛星とも1分角程度の角度分解能に過ぎず、感度の観点から比較的明るい天体に観測が制限される。軟X線帯域では、計画が承認されているX線天文台として、2030年代初頭での打ち上げが予定されている欧州のAthena衛星がある。しかし、Athena衛星はカロリメーターを用いた超精密X線分光に特徴があり、その望遠鏡は軟X線での広視野・大有効面積に狙いを絞ったので硬X線を含む広帯域の感度は持たず、本計画とは極めて相補的な関係にある。この観点において、FORCEは「ひとみ」で実証した硬X線撮像分光の流れを継承し、発展させる位置付けにある。2020年代後半以降、日本がこの方面で世界をリードすることになる。

④ 実施機関と実施体制

FORCEチームは現在、JAXA/ISASの宇宙理学委員会下のワーキンググループとして、公募型小型科学衛星への応募を目指して

活動している。現在のチーム構成を補足説明資料の表1に示す。宮崎大、京都大、名古屋大、大阪大、愛媛大、ISASを中心に、各大学で分担しつつ、科学目的の検討、観測機器の概念設計やキー技術開発を推進し、同時に衛星システムの検討を進めている。今後、コミュニティのサポートを得つつ、JAXA/ISASに応募する。2段階の審査を経て計画が採択されれば、JAXA/ISASを中心としてプロジェクトチームが設立され、人員と予算措置がなされる。衛星システムを担当する企業、観測機器全体を担当する企業を選定し、同時に設立されるNASA側のプロジェクトチームと連携して衛星開発を推進する。大学研究機関のメンバーは、サイエンス活動をリードするとともに、特に観測機器の基盤技術を有する大学は、担当企業及びJAXAに協力して、観測機器の基礎設計や評価にも参画する。なお、機関を通じて、チャレンジングな技術には、ISASおよび大学で理工一体の体制をとって開発を進める。

⑤ 所要経費

現時点で、マージンを含めて総額150億円を見込んでいる。そのうち打ち上げ費用が50億である。まず、開発は、衛星全体のシステム設計およびバス系を担当するメーカーと、ミッション系を担当するメーカーに集約する。高感度な広帯域X線観測の実現には、10 mに達する長い焦点距離が必要である。これを小型の衛星で実現するために、進展式光学ベンチ(EOB)を含む先進的な宇宙機構造が欠かせない。EOBは鍵を握る技術の一つであり、「ひとみ」衛星にも搭載されていた。また、長大な衛星で一つの望遠鏡を構成し、10秒角を上回る高精度な姿勢決定を実現するには、EOBも取り込んだ、非常に注意深い衛星バス設計が必要である。このためEOBを含む衛星バスの開発・試験に55億円を見積もる。観測機器についてはスーパーミラーはNASA/GSFCが開発経費を負担する。広帯域X線検出器は日本側で開発し、ここには15億円を見込んでいる。その他の運用などの諸々の経費は、これまでの実績ベースで15億円とした。解析ソフトウェアの整備・データ配布などをおこなうデータセンターについては、海外協力を想定している。

⑥ 年次計画

年次計画は、提案段階、開発期間、運用期間(打ち上げ後に予定のサイエンスを目指した三年間の観測)、さらに成果が期待されると認められた場合の後期運用期間、そして運用終了後の5つのフェーズに分けられる。(1)提案段階においては、科研費等を用いて観測装置やサイエンス検討を推進し、並行して人材を育成する。ISAS予算などで、衛星のシステム検討やキー技術開発、国際協力を推進する。FY2019年度後半に想定される公募型小型科学衛星に応募する。(2)開発期間においては、JAXAプロジェクトとして、段階を経て開発を進める。契約企業とともに、衛星および運用システムの開発を進める。NASA側も担当部の開発を進める。日米の研究者を中心にサイエンスチームを編成し、観測計画を進める。若手研究者が装置開発およびサイエンス検討の実働を担い、プロジェクト推進の経験を積み、先端サイエンスを推進する。(3)運用期間においては、JAXAおよび企業と連携して衛星の運用を行う。ミッシングブラックホールなど、硬X線や広帯域を特徴とするサイエンスを推し進める。国際協力やマルチメッセンジャー天文学への参加を通じ、人材の育成を強力に推進する。得られた成果を元に、将来のより強力な広帯域X線、ガンマ線観測の方向性を議論し、将来計画の検討を進める。(2)、(3)の期間に150億円の日本側負担が必要となる。(4)後期運用期間においては、予定された3年の運用で得られた結果を元に、さらに優れたサイエンスを得るため、観測を進める。(5)運用終了後においては、耐用年数を超えての故障などに応じた、予算停止により観測を終了する。その後も得られたデータのアーカイブ化を推進し、目標天体以外の新発見など、継続的なサイエンス推進を実施する。さらに、将来計画の実現へ向けて研究開発を進める。

⑦ 社会的価値

X線天文学は日本の御家芸として新聞紙上で紹介されるほど、その立ち上げの時代から日本が発展に寄与し、成果をあげてきた。基礎科学において世界最先端の成果を出し続けることは、多くの国民に夢や希望を与え、我が国が先進国として人類の知的共有財産の創出に貢献しているという自信をもたらす。特に宇宙開発・宇宙物理学は、若者たちに大いに刺激を与え、彼らを育み、勇気付ける上で、重要な役割を果たしている。本計画は我が国のX線天文学の系譜の先にあるものであり、このような価値観を継続して提供する。また、FORCEは我が国が主導する国際共同プロジェクトとして推進し、国際宇宙天文台として運用する。観測データも最終的に全世界に公開されるため、国際社会に貢献し、求められている責務を果たすものである。さらに、本計画で開発する広帯域X線カメラに使用する技術は、医療や工業への応用も進んでおり、今後の両者の発展において相乗効果も期待できる。教育的観点からみれば、大学院生や若手研究者には、衛星開発に携わり最先端技術に触れる実践的教育の機会を供給する場となっている。これらはSDGs 4、9への貢献となる。

⑧ 本計画に関する連絡先

森 浩二 (宮崎大学工学部)