

広帯域 X 線高感度撮像分光衛星 FORCE

① ビジョンの概要

FORCE は、高感度の広帯域 X 線観測によって、宇宙の構造と進化を支配する高エネルギー物理過程の理解を目指す科学衛星計画である。特に、宇宙から到来する全ての信号を用いたマルチメッセンジャー天文学の時代において、2030 年代に 2 桁を超える波長帯域を一手に担う存在である

② ビジョンの内容

高エネルギー現象は、重力的に束縛された最大の構造（銀河団）から個々の星のスケール（恒星の爆発やブラックホールを含む爆発の残骸）に至るまで、宇宙の階層構造のあらゆるレベルで普遍的に見られ、宇宙の構造形成と進化において重要な役割を果たしている。高感度の広帯域 X 線観測は、数百万ケルビンのプラズマからの熱的放射（ブラックホール周辺の降着円盤に存在するような）と非熱的放射（粒子加速によって生じる）の両方に感度があり、これらの高エネルギー現象を研究するのに非常に有利である。特に、10keV 以上の硬 X 線帯域での高感度観測は、その透過力の高さ故に、厚く高密度な周辺物質の下に埋もれた物理現象に直接迫ることができる。また、広帯域 X 線の同時観測により、複数の起源の異なる放射成分を分離でき、圧倒的な熱的放射の存在下にある非熱的放射を捉えることも可能である。2 桁を超える X 線の広帯域を同時観測できる装置を提供するという点で、FORCE はマルチメッセンジャー天文学にも大きく貢献する。世界規模で推進するマルチメッセンジャー天文学という趨勢の中で、日本が大きな役割を果たすことが重要であり、自らの強みを活かす形でそれを主体的に提案・構築していく。

③ 学術研究構想の名称

広帯域 X 線高感度撮像分光衛星 FORCE

④ 学術研究構想の概要

FORCE の概念図を、図 1 に示す。FORCE は、「宇宙における高エネルギー現象にかかわる根源的な物理プロセスを理解し、それが宇宙の進化にどのように影響を与えてきたのかを理解すること」を目的とした科学衛星計画である。そのために、「未知のブラックホール探査を通じた天体形成史の解明」、「宇宙に存在する非熱的エネルギーの起源と総量の解明」、および、「星の終末への進化経路と爆発機構の解明」を目標とする。ブラックホールや超新星残骸からの非熱的 X 線放射を高感度で捉えるために、1-80keV 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。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 10keV 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。「見えているものをよりよく見る」のではなく、「見えていなかったものを見る」ことを志向した計画である。広帯域 X 線天文衛星は世界に確立した次世代計画が存在しない。我々は、世界で唯一の次世代広帯域 X 線天文台としての役割を果たすべく 2030 年代前半に FORCE を実現させ、マルチメッセンジャー天文学の一翼を担う。衛星・検出器開発の主体は X 線天文衛星「ひとみ」の開発に携わった日本の大学・研究機関からなり、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。FORCE は、高エネルギー宇宙物理連絡会(高宇連)において、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。

⑤ 学術的な意義

FORCE による高感度観測で未知のブラックホールの実態を明らかにし、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。銀河の進化を理解するには SMBH の進化を知ることが必須であるが、観測技術の制約から、これまでは軟 X 線で観測が可能な、吸収の少ない SMBH



図 1 FORCE 概念図 (Image courtesy: ESO/M. Kornmesser, NASA, Ute Kraus, CXC/SAO)

を中心に議論されてきた。FORCEはその高感度広帯域X線探査で、未知の埋もれた種族を含めてSMBHの進化の全容を初めて明らかにする。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は、これら中質量BHのうち、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。また、FORCEが明らかにする超新星残骸の爆発・粒子加速機構、銀河団における磁場生成機構については、コミュニティの総力をあげて様々な波長・観測手段でそれらを追い求めているものである。その中で、FORCEが産み出す観測結果は他では得られないものであり、それらの理解にブレイクスルーを与える。2030年代には、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は世界唯一の高感度硬X線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中で2桁を超える波長帯域を一手に担う、重要なピースとなる。

⑥ 国内外の研究動向と当該構想の位置付け

本計画の最大の特徴は1-80keV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。10keV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、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。2030年代前半以降、日本がこの方面で世界をリードすることになる。

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てきた。これ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。こうした先端開発研究は最高の実践的教育の場となっており、X線天文学の枠を超えて日本の宇宙開発の多くの現場に人材も供給している。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、我が国が国際社会全体の科学推進に貢献し、求められている責務を果たすものである。さらに、本計画で開発する観測技術は、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。これらはSDG4、9への貢献となる。

⑧ 実施計画等について

実施計画は、提案段階、開発期間、運用期間(打ち上げ後3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。運用終了後は、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。これらの計画を、宮崎大、京都大、名古屋大、甲南大、大阪大、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。所要経費は現時点で、総額180億円を見込んでいる。

⑨ 連絡先

森 浩二 (宮崎大学)