

次世代赤外線天文衛星 SPICA

Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics

ミッション提案

次期赤外線天文衛星 Working Group

2005年3月14日

概要

銀河の誕生と進化、星・惑星系の誕生と進化、物質の進化の研究を通して、宇宙史を解明することを旨として、次世代赤外線天文衛星 SPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics) を提案する。SPICA は、ASTRO-F によるサーベイ観測の成果を基礎に、天文学における重要課題の解明を目指すミッションである。

SPICA には、口径 3.5m 大型望遠鏡を、絶対温度 4.5K に冷却して搭載する。これにより、今までにない高感度でかつ高空間分解能の観測を可能にしようとしている。このような大型冷却望遠鏡の搭載を可能にするために、望遠鏡を常温で打ち上げ、軌道上で冷却する Warm Launch 方式を SPICA では採用する。

SPICA を実現するための基礎技術 (冷凍機、大型軽量望遠鏡など) の開発にワーキンググループとして精力的にとり組み、ミッションが技術的に十分に実現可能であることを示してきた。

SPICA は、従来の科学衛星よりも大きな規模のミッションである。このような規模のミッションを確実に実現していくためには、プロジェクト開始前に、系統的な技術検討と、高い技術成熟度が要求される。そこで、SPICA では、従来の科学衛星の提案書のように、いきなり PM フェーズの開始を提案するものではなく、まず

フェーズ A を開始し、その中で系統的な技術検討と、技術成熟度の向上を目指す

ことを提案する。そのために、最重要技術項目の洗い出しと、フェーズ A で行なうべき開発内容の明確化を行なっている。

フェーズ A 終了時に、獲得目標の達成度を確認し、その上でシステム設計・開発方針ならびにそのプロセスの妥当性について検証を行ない、次のステップにプロジェクトを進めるかどうかを判断する。

1 宇宙の進化: ビッグバンから生命まで

我々の宇宙は約 137 億年前にビッグバンで生まれた。その後の宇宙の進化の歴史の中で、現在の我々の世界を構成している各種の天体が誕生、進化してきたと考えられている。

しかし、それらの天体が「いつ」「どのように」誕生、進化してきたのかは、未だによくわかっていない。SPICA は、宇宙の歴史における「様々な天体の誕生と進化」という大きな謎に挑む。具体的には、以下の 3 つを最重要テーマとしてあげている。

1. 銀河の誕生と進化

宇宙は、誕生してからしばらく後まで、極めて「一様」であった。しかしながら、現在の宇宙は、銀河をはじめとする様々な天体で構成された、極めて「非一様」な様相を示している。

SPICA は、高感度の赤外線観測により、最も初期の銀河の誕生をとらえ、現在の宇宙の「複雑さ」の起源と進化に迫る。

2. 星と惑星系の誕生と進化

宇宙の中で最大のエネルギー発生源は「星」である。SPICA は高い空間分解能を活かして、星の誕生の場を、銀河系の中のみならず、系外の銀河でも明らかにすることを期待されている。さらに、SPICA は、太陽系外の惑星を直接に撮像、分光できる能力をもっている。太陽系外の惑星の直接検出は、我々の太陽系そのものを見直す大きな機会となるであろう。

3. 物質の進化

宇宙の多様性は、重元素によるところが多い。しかし、その重元素の多くは、固体に取り込まれ、一般には観測が困難である。SPICA はその豊富な分光能力を活かし、ガス相のみならず、固体相の観測も行ない、宇宙における物質の進化を明らかにする。

2 ASTRO-F への期待とその発展

2.1 ASTRO-F への期待

上記の3つのテーマに迫るには、スペースからの赤外線高感度観測が必要不可欠である。

スペースからの赤外線観測を進めるべく、我々は2005年度打ち上げを目指して、ASTRO-F 衛星計画を進めている。これは全天を観測することを主目的の一つとしたサーベイ観測衛星であり数百万個以上の赤外線天体の発見が期待されている。ASTRO-F は、いわば究極の赤外線サーベイ衛星である。

2.2 ASTRO-F の成果

ASTRO-F は、上記のように極めて強力な赤外線天文衛星であるが、限界もある。その最大のものは、空間分解能が不足していることである。例えば、ASTRO-F の最も長波長での空間分解能は50"と人間の視力程度である。

空間分解能の向上のためには、大口径の望遠鏡が必要である。しかし、その実現は従来は困難であった。赤外線観測では、観測機の冷却が必要であるが、従来の赤外線衛星ではそのために用いる冷媒を用いていた。するとその冷媒の保持のために、大きなタンクと重い真空容器が必要となる。そのため、衛星が大きくなり、限られた重量のもとでは、比較的小口径の望遠鏡しか搭載できなかったのである。

2.3 ASTRO-F からの発展: Warm Launch 型の赤外線衛星

従来の赤外線衛星の「大きい、重い」という最大の欠点を克服するために、SPICA では、冷媒を搭載せず、打ち上げ時に観測器を冷却しない“Warm Launch”型の衛星を提案する。冷媒がなければタンクは不要になり、望遠鏡の口径を一定とすれば、衛星は小型化される。さらに、打ち上げ時に観測器が冷却されていなければ無駄な真空容器外壁は不要になり、衛星は画期的に軽量化される。これらの効果により、逆に、衛星全体の重量を同じとすれば、従来よりもはるかに大口径の望遠鏡の搭載が可能になる。

3 SPICA ミッション

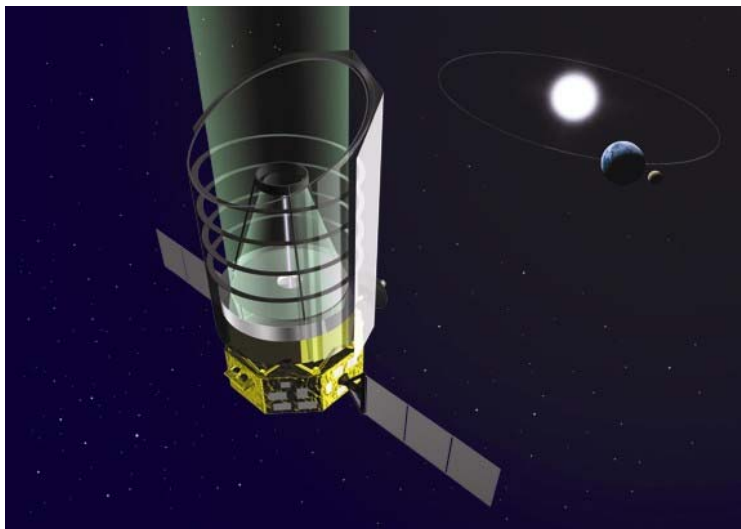


図 1: SPICA の概念図

3.1 ミッション概要

SPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics) は、主に波長 $5\text{-}200\mu\text{m}$ の中間-遠赤外線領域において、今までにない高い空間分解能と、優れた感度をもった天文観測機器を搭載し、宇宙の進化、銀河の誕生と進化、星惑星系の誕生と進化などの重要な課題を解明しようとする、次世代の赤外線天文衛星ミッションである。

SPICA の観測機器の特徴は、口径 3.5m という大望遠鏡を、冷却した状態で観測に用いる点である。これを技術的に可能にするために、SPICA 観測系冷却システムでは前述のように全く新しい設計思想をとる。すなわち、従来の衛星で用いてきた冷媒による冷却にかわって、観測機器の冷却に放射冷却と機械式冷凍機を全面的に用いる。これにより、限られた打ち上げ能力のもとで、画期的な大口径望遠鏡の搭載が可能になる。

この設計思想に基づく衛星の概念図を図 1 に、ミッションの仕様の概要を表 1 示す。

3.2 軌道: S-E L2 ハロー

このミッションの軌道として、「太陽 - 地球」系のラグランジュ点のうち L2 (以下 S-E L2) (図 2) のまわりのハロー軌道を有力候補として検討している。S-E L2 ハロー軌道は、天体観測、特に赤外線天体観測にとっては、以下の理由から、大変に有利な軌道である。

1. 赤外線衛星の大敵であった地球の見かけの大きさが、非常に小さくなり、かつ太陽とほぼ同じ方向になるため、衛星への熱入力が大幅に減少し、放射冷却が有効に働く。
2. ある時点における観測不能天域が「太陽 - 地球」方向を中心とする特定の方向のみに限られるため、観測可能な天空の領域が広く、かつ長時間の積分が可能である。

特に SPICA にとって、上記 (1) の特徴は、冷却の観点から大変に重要である。

S-E L2 ハロー軌道に、SPICA を投入することは H-IIA ロケットで十分に可能である。

2010 年代初頭の打ち上げを目指している。

表 1: SPICA Mission 仕様 (案)

項目	値
特徴	中間-遠赤外線領域の高感度、高空間分解能観測 多目的観測用の天文台型衛星
望遠鏡	口径 3.5 m 温度 4.5 K 精度 波長 $5\mu\text{m}$ 以上で回折限界
観測波長域	コア波長域 5-200 μm オプション 近赤外線、サブミリ波
観測機冷却	打ち上げ時 常温 軌道上 放射冷却と機械式冷凍機で冷却
冷凍機	望遠鏡用 ^4He JT 冷凍機 (4.5 K) 遠赤外線観測器用 ^3He JT 冷凍機 (2.5 K, 1.7 K)
総重量	2.6 t
軌道	太陽-地球系のラグランジュ点 L2 周りのハロー軌道
打ち上げ	ロケット H-IIA-202 時期 2010 年台初頭

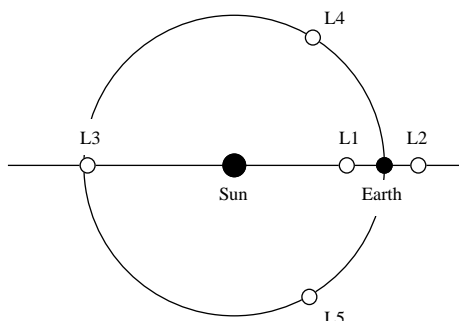


図 2: 太陽-地球系のラグランジュ点

3.3 SPICA の能力と国際的位置づけ

口径 3.5m の冷却望遠鏡は、赤外線観測のあらゆる分野で画期的な観測を可能にする。今までの冷却望遠鏡 (ASTRO-F を含む) が口径 1m 以下の望遠鏡しか搭載していなかったことを考えると、3.5 m という口径は画期的なジャンプである。口径の増大および積分時間の増大により、SPICA は非常に優れた感度を達成することができる (図 3, 4)。

特に、SPICA は、中間-遠赤外線領域での感度が高い。21 世紀初頭には、JWST (NASA), Herschel (ESA) といった大型の赤外線-サブミリ波ミッションが予定されている。しかし、これらの望遠鏡は SPICA の望遠鏡ほどには冷却されていない。したがって、中間-遠赤外線領域では、図 3 に示すように、これらの望遠鏡では、望遠鏡からの熱放射のゆらぎのために、感度が著しく劣化する。一方、SPICA では、冷却望遠鏡を搭載しているために、中間-遠赤外線領域でも感度の劣化はなく、他のミッションに比べて圧倒的に優れた感度を持つことができるのである。

このミッションが実現すれば、撮像を行うにしても、分光を行うにしても、従来とは全く質の異なるすばらしいデータが取得できる。これにより、冒頭に述べた大きな謎の解明に大きな前進をすることができるであろう。

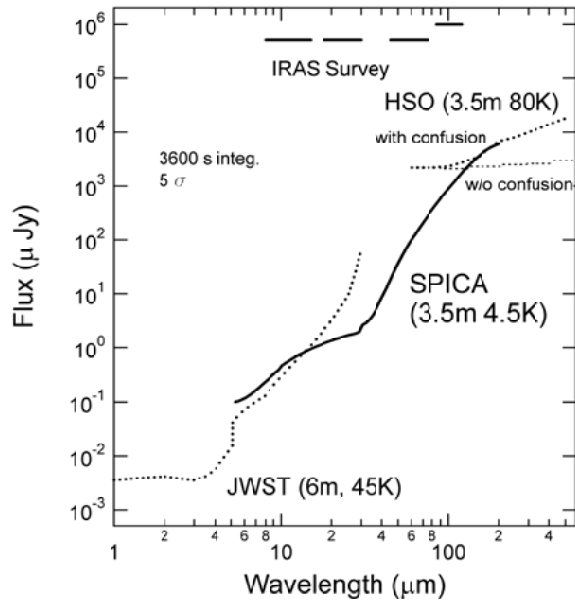


図 3: 21 世紀初頭に計画されている赤外線天文衛星ミッションの測光感度の比較。SPICA は、中間・遠赤外線領域において、他のミッションよりも 2 桁以上優れた感度を有する。

4 SPICA 推進体制

従来の科学衛星の枠組を超える SPICA 計画では、その推進体制も重要な検討課題となる。

これまでに、ASTRO-F にとりくんできたグループのみならず、天文学研究コミュニティにおいて、SPICA に関して広く議論してきた。その結果、SPICA については、単なる一つの衛星計画としてではなく、地上望遠鏡もふくめた「光赤外線天文学将来計画」の中で議論されている。

SPICA の観測装置の開発に関しては、国際協力がスタートしている (米国、ヨーロッパ、韓国)。

開発の体制は、ISAS 理学グループ、ISAS 工学グループ、JAXA 他本部、国立天文台、大学、その他国内外の研究機関による従来の枠を超えたものになる。これらの共同開発の多くは、すでにスタートしている。

5 技術開発

SPICA の技術開発は、戦略的開発経費等の補助を受け、(1) 冷凍機、(2) 軽量大型望遠鏡の 2 点に重点的にとりくんできた。あわせて、ミッション全体の検討もおこなってきた。その結果、ミッションが技術的に充分に実現可能であることを示すことができた。

上記の重点的技術開発の成果は、SPICA に留まらず、他の衛星にも使われており、日本の大きな「武器」となりつつある。

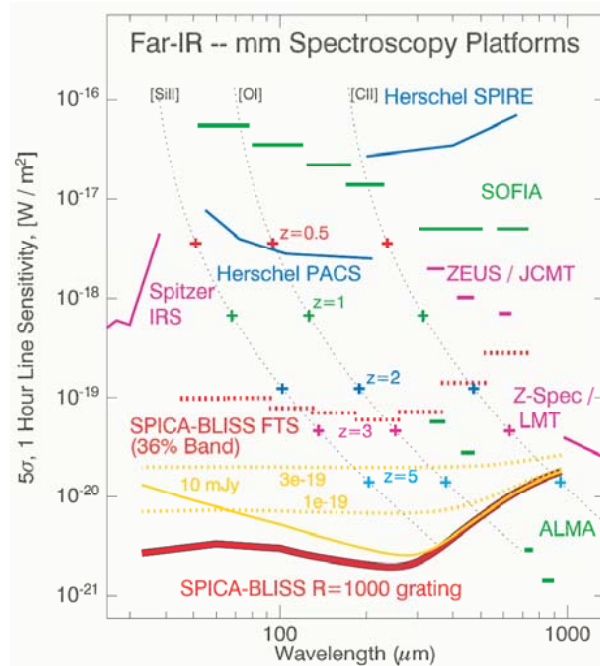


図 4: SPICA の分光感度 (長波長部分のみ)。同口径の Herschel と比べても 2 桁以上の感度向上が期待される。一部の波長では ALMA の感度すら上回る。

6 日本の宇宙科学、宇宙開発における位置づけ

6.1 新しいカテゴリーの提案

SPICA は科学衛星として今までにない大きな規模のものである。これは科学衛星として新しいカテゴリーを提案するものである。

科学衛星の規模と言うものは、その目指すところにより決められるべきものである。その意味においては、目的に応じて、従来よりも大きな衛星も、小さな衛星も、どちらの方向にも多様性をもった規模の衛星が打ち上げられることが、健全な科学研究という観点からは望ましい。

2003 年の宇宙 3 機関の統合、および JAXA の誕生は、科学衛星の多様化へ可能性を拓きつつあるものであるといえる。SPICA は、このような流れの中で、従来の科学衛星よりも「大きな」規模の衛星を提案するものである。打ち上げロケットとしても、M-V ではなく、H-IIA ロケットを用いることを提案している。

日本の科学衛星が、さまざまな規模の多様性を持ち、健全な発展をとげていけるよう、SPICA が一助となれば幸いである。

6.2 宇宙開発の将来を拓く SPICA

従来の科学衛星の規模を超えるミッションを実現しようとするれば、宇宙科学で第一級の成果を挙げられるのは当然として、それにくわえて、日本の宇宙開発をも牽引していくことが求められることになる。

SPICA は、以下の 2 つの側面から、日本の宇宙開発の未来を拓くことに貢献したいと考えている。

1. 新生 JAXA の新しい可能性を示す

2003 年 10 月に、新しい宇宙機関 JAXA は誕生した。統合後 1 年以上経過したが、統合ならでの新しい可能性を提示するには、未だいたっていない。

SPICA という従来は困難であったタイプのミッションの実現は、新しい宇宙機関ならでの可能性を明確に示すことになる。

2. 宇宙科学と宇宙開発の発展

SPICA は大型の望遠鏡を搭載するミッションである。そのために、軽量鏡や高精度姿勢制御技術など「鍵」となる重要技術を開発する。これにより、SPICA の実現は、将来の天文ミッションはもちろんのこと、新しい地球観測衛星など、今までにはない新しいミッションへの道を拓くことにもなる。

このように、SPICA の実現は SPICA 単体に終わらず、日本の宇宙科学、宇宙開発の未来への重要な第一歩となるものである。

6.3 新しい開発体制の提案

SPICA のような大きなミッションになると、その実行体制についても新しい仕組みが必要となる。SPICA は、従来の科学衛星の規模を、超えるものである。したがって、従来の「家内制手工業」的な開発方法では、対応できないことは明らかである。

そこで、SPICA を JAXA としてとりくむ最初の科学衛星と位置づけ、(旧)宇宙開発事業団のシステム・エンジニアリング的な手法をとりいれつつ、(旧)宇宙研方式の機動性の良さを併せ持った開発方式を、SPICA では模索して行きたい。この成果は、今後の科学衛星の開発に生かされるのはもちろんのこと、JAXA 全体の衛星開発の仕方も、改善する力としていきたい。

7 プロポーザルの概要

7.1 プロポーザルの目的

今回のプロポーザルは、SPICA プロジェクトの実現を目指して、「フェーズ A を開始する」ことを提案するものである。詳細は、別冊のミッション提案書を参照されたい。

SPICA は、従来の科学衛星よりも大きな規模のミッションである。このような規模のミッションを確実に実現していくためには、プロジェクト開始前に、他の科学衛星の場合よりも、より系統的な技術検討と、高い技術成熟度が要求される。したがって、SPICA では、従来の科学衛星の提案書のように、いきなり PM フェーズの開始を提案するのではなく、まずフェーズ A を行ない、その中で系統的な技術検討と、技術成熟度を高めることを提案するものである。

このために、今回のプロポーザルでは、以下を記述している。

1. ミッションの科学的意義
2. ミッションの内容
3. 現時点での技術レベル
4. 最重要技術項目の洗い出しと、フェーズ A で行なうべき開発内容の明確化
5. フェーズ A 終了後のロードマップ

上記の議論より、上記4の「最重要技術項目の洗い出しと、フェーズAで行なうべき開発内容の明確化」は、極めて重要である。

そのために、今回のプロポーザルでは、各技術要素について、技術成熟度(TRL)を用いて、技術レベルを記述している。従来の方法のように、技術要素を「できる」「できない」の単に二値化するだけでなく、

- 各要素における現在の技術レベルを定量的に示す
- 今後の技術開発項目を明確にする

ことを行なう。これにより、フェーズAでの獲得目標を明確にし、フェーズAの終了後に、確実にプロジェクトを進めていく道を確認しようとするものである。

SPICAは、宇宙科学にとって、全く新しい規模の試みとなる。SPICAの実現を通して、宇宙科学衛星プロジェクトの新しいモデルを模索、提案していきたい。