第4章 スペースプロジェクト

4.1 スペース計画検討班の活動経緯

4.1.1 概要

光赤外線スペース天文学の次期観測衛星計画を我が国が発案していく際、その観測衛星がどの様な科学的主要 課題を明らかにする事が可能であるのか、そして、どれだけ多くのサイエンスコミュニティと成果を共有する 事が出来るのかを、コミュニティで深く精査し、議論する事は非常に重要である。光赤外線天文学コミュニティ へ最大の利益を還元すべく、打上げ機会の限られた日本光赤外スペース天文衛星望遠鏡の将来計画に関して、 現在まで検討が幾度となくされてきた。

編集委員会のスペース検討班は、下記の8人から構成された。班長 松原英雄 (宇宙研)、副班長 山田 亨 (東 北大学、2016年1月より宇宙研)、芝井 広 (大阪大学)、中川 貴雄 (宇宙研)、郷田 直輝 (国立天文台)、住 貴 宏 (大阪大学)、松浦 周二 (関西学院大学)、和田 武彦 (宇宙研)。

本構成員を中心に、光赤天連シンポジウム、スペース将来計画シンポジウムを通じ、2020年代、そしてそれ 以降の時代を含めた日本の光赤外スペース天文の将来計画の議論を現在まで行ってきた。議論の詳細は、各シ ンポジウムで数多くの天文学研究者達と共有されてきている。

本節では、現在までに我が国で提案、もしくは国際共同提案されている、各衛星プロジェクトに関して詳細 をまとめた。

4.1.2 活動経緯の要旨

- 2014/01/21 第一回編集者会議
- 2014/03/04 スペース計画班 班員決定
- 2014/03/07 地上・スペース班 合同打合せ
- 2014/03/21 光赤天連総会。スペース検討班の構成を承認
- 2014/07/23 第二回編集者会議
- 2014/09/08-10 光赤天連シンポジウム
- 2014/11/26 スペース将来計画シンポジウム
- 2015/02/02 スペース計画工程表を宇宙研に提出
- 2015/02/17 第三回編集全体会議
- 2015/04/25 スペース班用 Latex テンプレート配布
- 2015/05/01 分野型横断プロジェクト委員会 (高宇連・光赤天連) の設立

- 2015/06/18 第四回編集全体会議
- 2015/07/08 スペース将来計画シンポジウム
- 2015/09/14-16 光赤天連シンポジウム
- 2015/10/19 第五回編集全体会議
- 2015/11/06 JASMINE HiZ-GUNDAM 打合せ
- 2015/12/15 スペース班打合せ
- 2015/12/31 スペース検討班最終原稿締切
- 2016/01/18 第六回編集全体会議
- 2016/02/09-10 光赤天文シンポジウム。検討書の最終確認

252

4.2 世界の光赤外天文学の来し方:スペース編

天文学研究の多くの分野において、赤外線全波長域における天体観測はいまや欠かすことのできない重要な 研究手段である。しかしながら、技術的には地上からの観測が困難(波長によっては不可能)であるという大き な問題をもっている。地上からの赤外線観測には制約が多く、赤外線全域にわたる高感度の観測のためには地 球大気の影響のない宇宙からの観測が必須となる。

1983年に世界で初めての赤外線天文衛星 IRAS が打ち上げられ、赤外線天体観測はスペースからの観測と いう新しい時代を迎えた。それまでにも飛翔体(気球、飛行機、観測ロケット)を用いて赤外線天体観測が精 力的になされてきたが、やはり人工衛星の実現はおおきな天文学の進展もたらした。本節ではこれまでの赤外 線天文衛星と、近未来に実現する JWST について紹介する。

4.2.1 なぜ衛星で赤外線観測をするのか?

赤外線天文学の初期には観測は大気の透過する近 赤外・中間赤外線波長の一部で、地上から行うしか なかった。この大気吸収は高度が高くなるほど減少 し、飛行機高度・気球高度から観測すれば、ほぼ赤 外線波長全域にわたり大気は透明である(図 4.1 の) 上段に色々な高度での大気の透過率を示した)。この ことだけからすれば何も衛星軌道まで行かなくとも 飛行機や気球によって充分な赤外線観測が可能であ るように思われるが、実はそうではない。衛星で赤 外線観測を行うことの極めて重要な長所は、赤外波 長域に最大強度を持つ大気放射の影響が全くなくな ることである。図 4.1 の下段は、地球大気の放射スペ クトルをいろいろな高度から天空を見た場合に示し たもので、高度 250 km 以上、いわゆる衛星軌道に到 達して初めて、大気放射は惑星間塵の熱放射等、宇 宙起源の拡散放射以下に減少することが分かる。こ れにより、衛星からは大気放射揺らぎに起因する雑 音のない、極めて高感度の観測を行うことができる。 地上や気球高度からの観測では、膨大な大気放射の 影響の中で天体観測を行わざるを得ず、いわば可視 光域で昼間に天体観測を行うようなものであり、当 然微弱な天体の観測は不可能である。衛星軌道に達



図 4.1: 赤外~サブミリ波波長帯における地球大気の 透過スペクトル(上段)と、放射スペクトル(下段)。 いろいろな高度(高山、飛行機、気球)から天空を観 測した場合を比較している。

して初めて、我々は「赤外線で暗い夜空」を得ることができる。

4.2.2 これまでの赤外線天文衛星(1)2000 年以前

図 4.2 に、これまでの赤外線天文衛星と現在計画中の衛星の概要をまとめている。このセクションでは、まず 2000 年以前の赤外線天文衛星について概要を述べる。

衛星による赤外線観測は、1983年に米・蘭・英の三国共同で打ち上げられた IRAS により始まった IRAS は 中間~遠赤外波長で全天をサーベイ観測し、20万個を超える赤外線天体(星・銀河)の検出と、全天の赤外線 強度分布図を提供した。この波長での初めてのサーベイ観測の意義は極めて大きく、エネルギーの大部分を赤 外線波長で放出している銀河や、惑星系形成の名残りであるデブリ円盤を持つ星の発見など、その時点での天 文学者が全く予想しなかった成果を数多くもたらした。ただ全天の拡散放射の絶対的な強度についてはそれほ



図 4.2: これまでの赤外線天文衛星と現在計画中の衛星の概要。

ど信頼できるものではなかったし、波長も 100 μ m 以下に限られていた。続く COBE、IRTS によるサーベイ 観測は、拡散放射の絶対強度の測定を精密に行った。そして、1996 年に史上初の宇宙赤外線天文台 ISO が誕 生した。これら 20 世紀の赤外線天文衛星の概要を表 4.1 にまとめた。

4.2.3 これまでの赤外線天文衛星(2)2000年以降

2000年代に入り、米国・日本・欧州がそれぞれリードする赤外線天文衛星が3年おきに打ち上げられた。また 米国は中間赤外線全天サーベイに特化した WISE を 2009年に打ち上げた。表 4.2 にこれらの仕様をまとめた。

Spitzer は口径 85 cm の冷却望遠鏡を「人工惑星軌道」とも呼べる Earth trailing orbit (地球の軌道上にあっ て徐々に地球から離れて追随する軌道) に投入され、地球のような熱源から離れるので望遠鏡の指向方向に対 する制限が比較的楽である。従って Spitzer は特定の天体にできるだけ長く指向するのに適しており、ISO に 続く天文台型の衛星である。

一方我国が主導して実現した「あかり」は、波長域・空間分解能・感度といった点で IRAS よりも格段に性能 を向上した、全天サーベイを主目的とした衛星である。ミッション部は 170 リットルの液体ヘリウムと 2 台の 機械式冷凍機により望遠鏡(口径 70 cm)と観測装置を冷却するシステムである。なお「あかり」は全天サー ベイのみならず、約 10 分間程度までの指向観測モードも持っており、深い撮像や分光観測も可能である。また 「あかり」は JAXA 宇宙科学研究所をはじめとする我国の研究機関の共同開発であるが、運用・データ解析・ カタログ化について、ヨーロッパ宇宙機関 ESA や韓国のソウル国立大学・英国ロンドン帝国大学等との国際 協力で行った。なお「あかり」の中間赤外線全天サーベイよりも検出限界の深い全天サーベイが 2009 年に打

| 衛星名 | IRAS | COBE | IRTS | ISO |
|--------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 望遠鏡口径 | 60 cm | 20 cm (2 K) | 15 cm | 60 cm |
| (望遠鏡温度) | (2 K) | 30 cm (ホーン) (2 K) | (2 K) | (3 K) |
| 観測波長 | $8120~\mu\mathrm{m}$ | $1.3~\mu\mathrm{m}{-1}~\mathrm{cm}$ | 1.4–800 $\mu \mathrm{m}$ | 3–200 μm |
| 角分解能 | 0'.3–6' | $0^{\circ}.7$ (DIRBE) | $0^{\circ}.1-0^{\circ}.2$ | 3''-1'.5 |
| | | 7° (FIRAS) | | |
| 撮像・測光性能 | スキャン型撮像 4 広域バンド: 12,25,60,100 µm | スキャン型撮像 10 広域バンド @1.3-240 μm (DIRBE) | スキャン型撮像 4 広域バンド @150-800 μm 2 狭域バンド @155, 160 μm 分光撮像 @ 1.4-12 μm | 3' 視野の撮像 (32×32 画素) @3-17 µm 3' 視野の撮像 (3×3, 2×2 画素) @50-200 µm |
| 分光性能 $(\lambda/\Delta\lambda)$ | 20–60 @8–23 $\mu{\rm m}$ | 100-1000 @100 µm-1 cm フーリエ分光 (FIRAS) | $\begin{array}{c} 1030@1.412\ \mu\text{m}\\ 400\ @\ 58\ \mu\text{m} \end{array}$ | 50-30000 |
| 観測タイプ | サーベイ型 | サーベイ型 | サーベイ型 | 天文台型 |
| 軌道 | 900 km 太陽同期軌道 | 900 km 太陽同期軌道 | 500 km 軌道傾斜角 28°.5 | 1000-7万 km 長円軌道 軌道傾斜角 5° |
| 打ち上げ年 | 1983 | 1989 | 1995 | 1995 |
| 観測期間 | 10 ヶ月 | 10 ヶ月 | 3週間 | 2.5 年 |
| 重量 | 1 t | 2.5 t | 0.2 t | 2.5 t |

表 4.1: IRAS から ISO まで。

ち上げられた WISE によってもたらされた。

| 衛星名 | Spitzer | AKARI | WISE | Herschel |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 望遠鏡口径 | 85 cm | 69 cm | 40 cm | 3.5 m |
| (望遠鏡温度) | (<5.5 K) | (<6 K) | (12 K) | (80 K) |
| 観測波長 | 3–180 µm | $2~\mu\mathrm{m}{-}180~\mu\mathrm{m}$ | $3.422~\mu\text{m}$ | $60672~\mu\mathrm{m}$ |
| 角分解能 | 回折限界 (>6.5 µm) | 回折限界 (実績 >7µm) | | 回折限界 |
| | $3''@10 \ \mu m$ | $5''@10 \ \mu m$ | $6^{\prime\prime}@3.4~\mu\mathrm{m}$ | $7''@100 \ \mu { m m}$ |
| | $30''@100 \ \mu m$ | $50''@100 \ \mu \mathrm{m}$ | $12''@22 \ \mu \mathrm{m}$ | |
| 撮像・測光性能 | 5′角撮像 @3.6-8 μm (256×256) 5′角撮像 @24 μm (128×128) 5′角撮像 @70 μm (32×32) 0.5′×5′撮像 @160 μm (2×20) | 10′角撮像 @2-5 μm (412×412) 10′角撮像 @5-26 μm (256×256) スキャン型撮像 @9,18 μm (2×64) @50-100 μm (5×20) @100-180 μm (5×15) | 47'×47' 角撮像 @3.4, 4.6, 12, 22 μm (1016×1016) | $1.75' \times 3'.5$ 撮像 $@60-210 \ \mu m$ (32×64) $4' \times 8'$ 撮像 $@250, 350, 500 \ \mu m$ $(149, 88, 43)$ |
| 分光性能 (λ / Δλ) | 60–600 @5–40 μm 20 @53–100 μm | $\begin{array}{c} 20{-}40 @2{-}26 \ \mu\mathrm{m} \\ 160 @2.5{-}5 \ \mu\mathrm{m} \\ 200 @50{-}200 \ \mu\mathrm{m} \end{array}$ | (機能なし) | 1000-5000 @60-210 μm 40-1000 @ 250 μm 10 ⁷ (ヘテロダイン) |
| 観測タイプ | 天文台型 | サーベイ型 (一部天文台型) | サーベイ型 | 天文台型 |
| 軌道 | 人工惑星軌道 (1500–9000 万 km) | 高度 700 km 太陽同期極軌道 | 高度 540 km 太陽同期極軌道 | 太陽-地球 L2 点 リサージュ軌道 |
| 打ち上げ年 | 2003年8月23日 | 2006年2月22日 | 2009年12月14日 | 2009年5月14日 |
| 観測期間 | 6年 | 1.5 年 | 2010 年 9 月まで | 2013年5月まで |
| | (近赤外は除く) | (近赤外は除く) | | |
| 重量 | 0.95 t | 0.96 t | 0.66 t | 3.3 t |

表 4.2: Spitzer、「あかり」、WISE、そして Herschel の概要。撮像性能の括弧内の数字は画素数を表す。

4.2.4 これからの赤外線天文衛星 / JWST

我国で計画中の赤外線天文衛星計画については、続く節に譲るとして、ここでは NASA が中心となって開発を行っている JWST について述べる。JWST は近未来に実現が期待され、初代天体・初代銀河等、光赤天連の将来計画に大変深い関わりを持つ計画である。

JWST (James Webb Space Telescope)¹は、ハッブル宇宙望遠鏡の後継機として、2018年の打ち上げを目指 して開発が進められている、口径 6.5 m クラスのセグメント鏡 (50 K 以下)を主鏡とするスペース望遠鏡で、 Herschel 同様太陽-地球ラグランジュ点 (L2 点)において観測を行う。JWST は 4 つの主要な科学目的を掲げ ている: (1)宇宙の暗黒時代の終焉:初代天体と再電離, (2)銀河集積, (3)星の誕生と原始惑星系, そして (4) 惑星系と生命の起原。

¹JWST の名称は、NASA の二代目長官ジェイムズ・E・ウェッブにちなんで命名された。

4.2. 世界の光赤外天文学の来し方:スペース編

これらを実現するために、以下の4つの観測機器が搭載される:

- NIRCam (Near-Infrared and visible camera): 観測波長が 0.6-5 µm、視野が 2'.2×2'.2 の近赤外 線撮像装置。広帯域と中帯域の二つの撮像モジュールをもち、それぞれが波長 2.35 µm で二分した光を 受けるための 2 チャンネルとコロナグラフ機能を備えている。
- NIRSpec (Near-Infrared Spectrograph): 視野 3'.4×3'.4、ピクセルスケール ~0".1、100 天体以 上を同時に観測することが可能な近赤外線多天体分光器。3つの観測モードを備える: (1) R=1000 の多 天体分光モード、3グレーティング、波長範囲 1.0-5.0 µm。(2) R=2700 の面分光モードとロングスリッ トモード。(3) R=100、波長範囲 0.6-5.0 µm のプリズム分光。
- MIRI (Mid-Infrared Instrument): 観測波長 5-28 μm の中間赤外線撮像分光器。1つの撮像装置と2つの分光装置を備える: (1) 4つのコロナグラフを持つ、視野 1'.88×1'.27、フィルター 12 枚の撮像装置。(2) 5-10 と 10-27 μm の2チャンネルを持つ、R=3000、視野 3"×3" の面分光装置。(3) R=100、観測波長 5-10 μm の低分散ロングスリット分光装置。
- NIRSS (Near-InfraRed Imager and Slitless Spectrograph): 近赤外線グリズム撮像分光器。2 つの分光装置と2つの撮像装置を備える: (1) R~150、観測波長 1.0-2.5 μm の低分散広視野分光装置、 (2) R~700、観測波長 0.6-3.0 μm の中分散単天体分光装置、(3) 観測波長 3.8-4.8 μm の NRM (nonredundant aperture mask) をもつ干渉計撮像装置、(4) 観測波長 1.0-5.0 μm、視野 2'.2×2'.2 の広帯域 撮像装置。

JWST の最初の観測公募は打ち上げの一年前に、二回目の観測公募は打上げの一年後に行われるとされているので、今後の動きを注視する必要がある。

4.3 SPICA

SPICA は宇宙が重元素と星間塵により多様で豊かな世界になり、生命居住な惑星世界をもたらした過程を 解明することを目的をする赤外線天文衛星である。これまでない大口径の望遠鏡を宇宙空間に設置し、日本が リードしてきた冷却技術を活用し、望遠鏡と観測センサー全体を極低温(8K以下)に冷却する。このことに より、中間・遠赤外線領域において、従来実現されてきた観測と比較して大幅に高感度、高解像度の観測を目 指す。



図 4.3: 2020 年代後半の実現を目指す次世代赤外線天文衛星 SPICA の目指す科学目標の概念図。

4.3.1 概要

ビッグバンで誕生した宇宙は水素とヘリウムのみの単純かつ一様なものであったが、星や銀河の誕生と共に、 多様で豊かな現象に満ち、生命までを育む現在の宇宙に変貌を遂げた。いつどのようにして宇宙に様々な元素 ができ最終的に生命居住可能になったのか?この根源的な問に答えることが SPICA の最終目標である。図 4.3 に SPICA の目指す科学目標の概念図を示す。138 億年の宇宙の歴史の中で、50–100 億年前に、銀河における 星形成や巨大ブラックホールの成長が盛んにおこなわれ、様々な元素が生産・共有されてきた。宇宙最初の鉱 物・有機物は、120 億年前に出現したと考えられる。46 億年前に生まれた地球では、オゾンや有機物等生命を 育む環境が整っていたのだが、果たして 100 億年前の宇宙ではどうだったのだろうか? SPICA はこのような 宇宙の謎を解明する宇宙赤外線天文台である。

研究領域内での位置づけ:

光赤外分野の三つの主要課題の以下二つをカバーする。1)「物質宇宙の多様性とその進化の解明」:特に銀河と巨大ブラックホールの形成・進化とそれに伴う物質進化の解明、および2)「惑星系形成および進化の解

4.3. SPICA

明と宇宙における生命の探査」:特に惑星系形成過程の解明が期待される。また太陽系外惑星の性質解明についても期待されている。

サイエンス成果が与えるインパクト:

宇宙初期における重元素と固体物質の重要性、また宇宙の「激動期」(*z*=1-3)のダストに隠された銀河形成 活動が現在の数10倍も高かった理由はなにか、その物理と銀河進化における重元素と固体物質の生成と役割 が解明される。惑星系形成過程においては、ガスの散逸のタイムスケールや生命の存在環境の証拠となる水・ 二酸化炭素を含む鉱物学によって、惑星が生まれる環境・太陽系の進化の道筋が明らかになる。

以下、SPICAの二大科学目的とそれらを達成するために設定したより具体的な科学目標について説明する。 科学目的と科学目標の関係を図 4.4 に示す。



図 4.4: SPICA の二大科学目的と、それぞれの科学目標の関係。

4.3.2 銀河進化を通しての重元素と星間塵による宇宙の豊穣化

SPICA の二大科学目的の一つである、"銀河進化を通しての重元素と星間塵による宇宙の豊穣化"は、宇宙 史において、どのように星々が銀河内で形成し、その結果、どのようにして重元素と星間塵(ダスト)に満ちた 現在の宇宙に至ったのかを明らかにすることを目的とする。この目的を達成するため、以下の三つの目標(SO) を掲げている。

SO1: 遠方銀河における星形成活動度

星々の誕生と終焉のサイクルを経ることで、重元素や、それを元にした多様な物質(ダストなど)が生成される。つまり、宇宙の星形成史を明らかにすることが、物質の豊穣化(物質進化)を理解するのに欠かせない。 宇宙における星形成活動は、赤方偏移 z = 1 から 3 の時代において最も活発になっていることが知られている。AKARI、Spitzer、Herschel といった近年の赤外線観測により、特にこの最盛期において、ダストに隠された領域で大規模に星形成活動を行っている銀河(超高光度赤外線銀河 ULIRG: 赤外線光度 $L_{\rm IR}$ が $10^{12}L_{\odot}$ 以上の種族)が主役として、宇宙の星形成活動に極めて大きく寄与していることが明らかになった(図 4.5)。このことは、星形成の最盛期において急速な物質進化が起きた可能性を示唆する。しかし、最盛期における物質進化過程の知見は、可視領域に対してのみであり、最も肝心な不可視領域に対しては皆無である。あるいは、ULIRG における星形成の初期質量関数(IMF)が、現在の宇宙における銀河の IMF とは異なっている可能性を示唆する。つまり、ULIRG の星形成は、重い星の割合が大きい top-heavy型 IMF になっているかもしれな



図 4.5: 赤外線および紫外線の観測から求めた、 宇宙における星生成率密度 の変遷 [1](EDP Sciences; 掲載許可取得済み)。赤方偏移 1~3の時代 にかけて、宇宙の星生成率密度が最盛期を迎えた こと、またその時代から現在に至るまでの宇宙の 星生成活動の殆んどがダストにより再放射された 赤外線として観測されている(紫外線では宇宙の 星生成活動の一部しかトレースできていない)こ とが明らかになった。その一方で、スペクトル 分 布(SED)モデルを介して取り除かれている AGN からの寄与には大きな不定性が残されている。



図 4.6: 異なる活動性を持った銀河の中間赤外域 SED[18](IOP;掲載許可取得済み)。赤い線は AGN が卓越した銀河での SED、黒い線や緑の線 は、爆発的な星生成が卓越した銀河の SED であ る。爆発的星生成銀河では、[Ne II] や [S III]、ま た PAH バンド放射などが特徴的に見られる。一 方 AGN では、短波長側の連続光成分が相対的に 強く、[O IV] や [Ne V] など高階電離の微細構造 線が強く検出される。

い。しかし、最盛期の ULIRG の IMF の形は明らかになっていない。SPICA はダストに隠された領域を見通 すことができるため、星形成の最盛期における物質進化および、物質進化と銀河進化との相互作用の謎に初め て迫る。具体的には、赤方偏移 *z* =0.5-3.0 の主系列光度クラスまでの星形成銀河について、スペクトル診断に より平均金属度とダスト / 金属量比を測定することで、物質進化をトレースする。また、物質進化に伴うガス 冷却効率の向上により、銀河進化をトレースする IMF の形が変化することが期待される。同銀河サンプルに 対し、複数のガス輝線を用いて放射場硬さを測定することで、IMF の形に制限をつける。

最初の鉱物や有機物が初期宇宙のいつ・どのように形成したのかで、その後の銀河進化に大きく影響を及ぼ す。例えば、初代大質量星形成(Pop III 星)から、今日の宇宙で見られるような星形成モードへの遷移は、主 に初期宇宙で形成したダストによって起きたと考えられている。そのため、物質進化過程の理解のみならず、 その初期状態を把握することが物質進化史の総合的理解に必要不可欠である。さらに、そもそも、Pop III 星の 質量がどれくらい大きいのかが良く分かっていない。初期宇宙のダストの組成が明らかになれば、Pop III 星 の質量に初めて制限をつけることができるかもしれない。SPICA は、宇宙で最初に生成したダストの検出とそ の特徴付けに挑む。具体的には、赤方偏移 z = 3-7 の星形成銀河に対し、PAH(多環芳香族炭化水素)平均強 度を測定し、赤方偏移 z = 3-10 のクウェーサーについてシリケイトバンド平均強度を測定する。

SO2: 塵に覆われた活動銀河核と物質放出過程

AGN は、質量降着による巨大ブラックホール成長の現場である。それゆえ、巨大ブラックホールへの質量 降着による重力エネルギーの開放が AGN のエネルギー源である。AGN の活動度は、母銀河の星形成活動に大 きな影響を与えていると考えられており(AGN 質量降着と星形成の共進化)、この共進化史を定量化するため には、赤方偏移毎に AGN の無バイアス抽出が必要である。しかし、今日までの AGN サンプルは、主に可視 光による AGN の抽出がベースとなっており、降着物質に富んだダストに埋もれた AGN の抽出がなされてい ない。また、ULIRG と呼ばれる現在の宇宙では極めて稀な銀河が、銀河成長最盛期(*z* = 1-3)の星生成活動

4.3. SPICA

の多くを担っているという重要な特徴がある。しかし、こうした時代の主役である ULIRG に関して、その超 高赤外線光度の起源は、なお謎のままである。ダストに覆われた AGN が、銀河の赤外線光度に大きく寄与で きると期待され、超高赤外線光度の起源の候補として注目されている。SPICA による遠中間赤外線の分光診断 は、ダストに覆われた AGN を抽出する最も強力な方法であり(図4.6)、AGN の初めての無バイアス抽出を 赤方偏移 *z*=0.5-3 において行うことを可能にする。その結果、AGN 質量降着と星形成の共進化史の定量化お よび、個々の ULIRG について赤外線光度における AGN 放射成分の寄与が初めて明らかになる。

さて、ブラックホールへの質量降着の結果、AGN から物質放出(アウトフロー)が生じる。この AGN ア ウトフローによる環境へのフィードバック(AGN フィードバック)は、母銀河での星生成活動を抑制させる、 もしくは、それを止めるなどの影響をもたらす。それゆえ、AGN フィードバックは、大質量銀河への形成に 大きな影響を及ぼすと考えられている。また、AGN フィードバックは、星形成の最盛期から衰退期にわたり、 宇宙の星形成活動を決めているであろうと期待されている一方、その時代における AGN のアウトフローに対 する知見は皆無である。SPICA は、高波長分解能(R >3000)分光観測により、z=2.5 までの AGN の速度構 造を調べ、アウトフローの平均運動量フラックスを測定し、アウトフローによる星形成活動へのインパクトを 明らかにする。

SO3: 近傍の銀河の星形成活動

銀河内の星形成活動によって、ガス中の金属量が増加しダストが形成される。ダストの存在によってガスの 冷却効率が大幅に向上し、さらなる星生成が進む。そして銀河成長とともに加速的に星形成が進行し、物質に 富む現在の宇宙に至ったと考えられる。すなわち、ガス・ダスト進化(物質進化)と星形成は密接な関係があ る(図 4.7)。多様で豊かな宇宙をもたらした銀河成長プロセスにおいて、星形成と物質進化は 最も本質的な物 理素過程と言える。星形成率は銀河毎に 7-8 桁もの違いがあり、銀河内の局所毎でも大きく変化する。星形成 率とガス面密度の間にはおよそ冪乗則の正相関が存在する一方、ダストとガスの質量比は同じ星形成率でも 2 桁近くも違いがある。また近年の Herschel による結果では、金属量から予測されるダストの量が 200 分の 1 し かない銀河や逆に 4 倍もある銀河が見つかってきた。このように、星形成率とダスト/ガス質量比、また金属 量との関係を決める本質の物理条件は全く分かっていない。銀河内の星生成に伴い、ダストがどこで生成・変 性したのか、また逆に物質進化が星形成にどのような影響を与えたかを総合理解することは、銀河進化の理解 に欠かせない。

SPICA によって、近傍銀河に対して、 詳細な局所的物理状態と環境を明らか にする。そして、「星形成が物質の存在 形態を進化させた過程」と「物質の進 化が星形成に与えた影響」の両方向の 相互作用を解明する。中間・遠赤外線 スペクトルは、ガス・ダスト情報の宝庫 である。ダスト温度(輻射場強度)、ダ スト質量、サイズ分布はダストによる 連続波スペクトルから、またガス温度、 輻射場温度、ガス密度、金属量、衝撃 波強度、AGN の影響度はガス輝線より 求めることができる。さらに連続波ス ペクトルにダストバンドが検出されれ ば、ダストの化学組成、結晶度の情報 も得ることができる。近傍銀河を空間 分解することで、これら物理量を銀河





内の局所領域(中心核、腕状構 造、腕間領域、バルジ、ハロー、銀河間空間など)毎に調べることが出来る。 また近傍でも暗い形態の異なる銀河(矮小銀河、楕円銀河)を捉えることで、進化初期(ダスト生成)から終焉 (ガス・ダスト消滅)までの物理状態の違いを調べる事が出来る。これらの物理量を比較することで、現在の 星形成率、将来の星形成のためのガス貯蔵量、そしてこれまでの星形成によって形成された現在のダストの性 質の、銀河形態および銀河内の局所条件に対する依存性を明らかにする。

4.3.3 生命居住可能な世界に至る惑星系形成

現代の天文学・宇宙科学、そして SPICA のもう一つの大目標が、"惑星系形成過程の解明"である。1995 年 に初観測された太陽系外惑星は衝撃的な新発見であった。それまでは太陽系のような惑星系の存在さえ疑われ ていた。発見以後、多くの観測研究と理論研究が行われ、太陽系の特殊性、一般性についての議論が積み上げ られてきた。現在では恒星の平均惑星保有個数は1あるいはそれ以上であることがわかっており、その中でも サイズと表面温度が地球に近く生命が生息できる環境を持つもの(Habitable Planets)まで発見されている。 このように太陽系外惑星の観測例は多く積みあがってきたが、一方で、これらの惑星系がどのような条件で、 どのようなメカニズムで形成されたかについては、理解にほど遠いと言わざるを得ない。

この理解のため、SPICA は原始惑星系円盤がどの様に太陽系の様な惑星系へと進化し、惑星を形成するに 至ったのかを明らかにする事を二大科学目的の一つとする。この目的を達成するため、以下の二つの科学目標 を掲げている。

SO4: 惑星形成円盤におけるガスの散逸過程

近年、惑星は原始惑星系円盤の進化の中で誕生する事が分かってきた。原始惑星系円盤は、円盤中で成長し たダストが円盤面へと沈殿し、ガスが中心星による光蒸発と円盤風を受け蒸発していく事により、最終的にデ ブリ円盤となる [21] と考えられおり、この中で惑星系が誕生するという考えは現在広く受け入れられている。 このプロセスを総合的に理解するには、原始惑星系円盤中に存在する、(ガスの化学、エネルギー収支に重要な 寄与をしている)ダスト、(ダストの運動や成長に強くかかわっている)ガス、の両方の詳細な情報を知る事が 必要不可欠である。

現在まで、ダストについては赤外線、サブミリ波長で盛んに研究が行われてきた。ダスト上の氷がダスト粒 子の効率的な成長、そして微惑星形成に非常に重要な役割を果たしているであろう事、原始惑星系円盤中のダ ストの消失 [9]、が明らかにされてきた事などは惑星系形成にとって非常に重要な知見である。

しかしながら、惑星系形成メカニズムの総合的な理解には未だ至っていない。この原因の1つは、原始惑星 系円盤中のガスに関する詳細な観測が不足している事による。特に重要な問題として、円盤中のガス質量の不 定性、そしてガスがどの様な時間スケールでどの様に消失していくのかがあげられる。



図 4.8: 原始惑星系円盤の断面想像図。

現在の惑星系形成シミュレーションの結果は、初期値に非常に強く依存しており、原始惑星系円盤中のガス 質量は最重要パラメーターの一つとなっている。それにも関わらず、円盤のガス質量の大部分を占めている水 素分子の質量は、現在まで非常に大きい不定性を有している。これは、低温ガスからの H₂ 輝線が期待できな いため、H₂ の量を直接見積もる事が非常に困難である事、また主にダスト放射や CO 輝線の観測から間接的 に、円盤中の水素分子質量が導出されている事に依存している。CO は低温では固体になること、ダストと分 子ガスが必ずしも一様に混在していない事等が不定性の主要因である。

SPICA では、より正確に水素質量を決定する事ができる Hydrogen Deuteride (重水素化水素)の 56 μ m (J=2-1)、 112 μ m (J=1-0)の輝線観測を用いる事で年齢 1-10 Myr の原始惑星系円盤中のガス質量の進化を 追う。

円盤中ガスの消失プロセス:

原始惑星系円盤が進化するにつれ、どの様に、どの程度の時間で円盤中のガスが消失していくのかは未だ明 らかになっていない。SPICA が打ちあがる時代までには、主に ALMA が中心となり原始惑星系円盤の外側 (Fig. 4.8 を参照) 10 AU 程度の領域は随分と明らかにされる事が予期される。一方で、地球型惑星が形成され 得る、恒星からの距離が 1-2 AU 離れた極めて重要な領域は、SPICA の高波長分散分解・高感度中間赤外線 観測をもって、初めて明らかにする事ができる。

この領域では、水素分子が十分に加熱され、励起されるため、 H_2 の 0–0 S(1) 17 μ m, 0–0 S(2) 12.3 μ m の 輝線の分光観測が SPICA では可能となる。SPICA の高波長分散・高感度中間赤外線分光装置により、内側 1-2 AU の領域か放射される水素分子輝線を分光的に分解し、地球型惑星が生成される領域のガスの消失及び その組成を明らかにする。

SO5: 惑星形成円盤における塵成長・変成及び太陽系誕生との関係

我々の太陽系が形成されてきたプロセスを理解するためには、太陽系黄道帯雲を、原始惑星系円盤進化のストーリーの中で理解する事が有効である。そして、原始惑星系円盤からデブリ円盤に至る間の、異なる進化段 階での惑星形成円盤中のダストの成長や変成を追う事が重要となる。

現在まで Spitzer,「あかり」、そして WISE は数多くのデブリ円盤天体を ~20 μ m 帯観測で発見してきた [4; 15]。これらの研究は、デブリ円盤の内幾つかの天体が結晶化シリケートフィーチャーを中間赤外から遠赤 外で示す [2; 14] 事などの、重要な知見をもたらした。しかしながら、現在までの研究で発見されている天体 は、主星に対するデブリ円盤の ~20 μ m での明るさの比が 10^{-2} 程度のものまでであり、我々の太陽と黄道雲 の比はそれよりも 2 桁以上も低い (4.9 参照)。つまり、現在まで観測が出来ていない暗いデブリ、残骸円盤の 詳細を観測する事が、我々の太陽系の成り立ちを理解する為には本質的に重要である。

惑星形成円盤中における物質輸送と熱史

 H_2O は原始惑星系円盤に大量に存在する事が予想され、生命の誕生に密接に関係する重要な分子種である。 H_2O は、ガス(水蒸気)と固体(氷)の2相で円盤中に存在する。上記の氷の2つのバンドは熱史に敏感である事 が知られており、特に円盤の赤道面近くまで氷を検出するには、氷の43、62 μ m バンドの遠赤外線分光観測が 有効である。しかし現在までの観測(ISO, Herschel)では感度が不十分であり、T Tauri 型星の検出例はない。 また、検出が報告されている Herbig Ae/Be 型星でも、S/N が十分でないため、バンドプロファイルに依存す る議論は難しかった。そして、生成にアニーリングが必要な結晶質シリケートが、なぜ低温環境(100-300 K 相当)の外側軌道に存在するのか現在まで解決されていない大きな謎である。

SPICA では特に、太陽系形成を理解するのに極めて重要な惑星形成円盤の、中心星から 1–50 AU 離れた領 域を対象とする。観測天体は、1–10 Myr の異なる年齢の惑星系形成円盤であり、中心星から 1–10 AU の領域 では結晶化シリケートの 18–100 µm のフィーチャー、その外側 10–50 AU の領域を氷の 44、62 µm バンドプ ロファイルを用いて観測を行い、熱史と物質輸送を明らかにする。これにより、熱い円盤内側から外側に物を



図 4.9: 恒星に対する円盤の 20 μ m での flux 比と恒星年齢の比較図。現在まで 10^{-2} 以下の天体はほとんど検出出来ていない。

運ぶ機構がある、もしくは円盤外側を直接加熱する機構があると、惑星系進化のシナリオへ非常に大きなイン パクトを与える事となる。

デブリ円盤の進化

多くの鉱物フィーチャーは 18–100 μ m に数多く存在しており、それらは生成環境を含め、ダストの多くの重要 な情報を提供する。olivine(かんらん石) や pyroxene(輝石) は高温度下で生成され、calcite(方解石)、dolmite(白 雲石) は低温度下で生成されるため、それらの高温、低温ダストの存在量の比は、生成された時の熱環境を知 る重要な指標である。また、calcite や dolomite の生成には水や CO が必要であり、間接的な biomarker とし ても非常に重要な鉱物である。そして、太陽系の始原天体中のケイ酸塩は Fe/Mg 比がほぼ 0%の Mg-rich で ある事が知られており、Fe/Mg 比は金属量環境を明らかにする重要な値である。

Fe/Mg 比は 23, 33 μ m の olivine バンドのピーク波長 [14] や、 69 μ m のピーク波長と半値幅 [2] を観測す る事で明らかにできると期待される。そして、結晶度 (結晶と非結晶質の比) はダストがどのような放射場環境 にあるのかを明らかにする。これはシリケートのスペクトル形状 (図 4.10 を参照) を観測する事で明らかにで きる。

SPICA では惑星形成円盤 に対して 18-36 µm の無バイアスサーベイ観測を行う。黄道帯光程度の非常に 暗いデブリ円盤の検出は、恒星表面、そしてデブリの SED の差を観測する事で達成する。上記の鉱物フィー チャーに従って、恒星の年齢、金属量、放射場強度という主に 3 つのパラメーターで、円盤・惑星系の分類を 詳細に行い、惑星系の環境 (年齢・金属量・放射場強度) 依存性を探り、惑星系形成・太陽系ができる条件を探 る。このように SPICA は、惑星形成円盤の鉱物学を新しく開拓する事によって、原始惑星系円盤がデブリ円 盤、そして我々の居住可能な環境へとどのように進化してきたという、太陽系形成の謎を明らかにする。

4.3.4 ミッションデザイン

ミッション要求と基本仕様

SPICA は波長 12-210 µm の中間・遠赤外線領域において、高い空間分解能と優れた感度を持った天文観測 機器を搭載し、銀河成長と惑星形成という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。前節 4.3.2 及び 4.3.3 で掲げた科学目標を達成するためには、SPICA は表 4.3 に示すシステムが要求



図 4.10: 非結晶シリケートと結晶シリケートのフィーチャーの違い [11] (Springer; 掲載許可取得済み)。



図 4.11: ミッション再定義の結果得られた SPICA の機器配置の現状案。

される。SPICA の波長域には、星間ダストの放射成分が豊富であり、減光の影響を受けない金属原子輝線や水 素分子輝線が存在する。これらの放射に対する分光観測は、SPICA の掲げる科学課題を解明する上で重要なも のである。また、JWST や ALMA と相補関係的な波長帯である。この波長域では、望遠鏡自身からの熱輻射 が背景放射ノイズとして支配的な寄与となるため、極低温に冷却された望遠鏡システムが要求される。要求さ れる分光感度を達成するために、望遠鏡は8K以下に冷却される必要がある。また分光感度と空間分解能の要 求から、口径 2.5m の望遠鏡が必要である。 望遠鏡の冷却には、冷媒を用いず機械式冷凍機と放射冷却を用いる。これにより衛星の小型化と軽量化が実現でき、口径 2.5 m 望遠鏡の搭載が可能となった。SPICA の構造を図 4.11 に示す。さらに衛星の軌道を太陽と地球系ラグランジュL2 点のハロー軌道とすることでより冷やされる。これらは SPICA の重要な特徴となっている。SPICA は、日本側負担分は JAXA/ISAS の戦略的中型計画の規模とし、ESA Cosmic Vision M class mission を合わせた日欧共同ミッションとして、2027-2028 年の打ち上げを目指す。打ち上げは JAXA 新型基 幹ロケットを想定している。SPICA ミッションの基本仕様は表 4.4 にまとめた。

焦点面装置

SPICA には 2 つの焦点面装置が搭載される。日本担当の中間赤外線領域を対象とする SMI (Spica Midinfrared Instrument) 及び欧州が担当する遠赤外線帯の SAFARI (SpicA FAR-infrared Instrument) である。そ れぞれの機能と仕様は表 4.5 にまとめる。

SMI (Spica Mid-infrared Instrument): 中間赤外線 $12-36 \mu m \epsilon n / - \tau a c d h m \epsilon n / - \tau a c d h m \epsilon n / - \tau a c d h m \epsilon n / - \tau a c d h m \epsilon n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau a c d h m e n / - \tau$

SAFARI (SpicA FAR-infrared Instrument): 遠赤外線のグレーティング分光装置。3 つのバンド (SW, MW, LW) により 34-210 μ m の波長帯をカバー。波長分解能は R = 300 の低分散と R = 3000 の高分散とが ある。

4.3.5 他波長・他計画とのシナジー

SPICA が活躍する 2020 年代の後半およびその前後には、図 4.13 に示すようにあらゆる波長帯域で大型の 天文台が稼働している。これらの天文台と適切な連携を図り、それぞれの特徴を活かした研究を進めることで、

表 4.3: SPICA の科学要求

| 項目 | 要求值 | 科学背景 |
|-------|--------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 波長帯域 | 12µm-210µm (以上) | SO1, SO2, SO3, SO4, SO5 |
| 分光感度 | $2 	imes 10^{-20} \mathrm{W m^{-2}}$ 以下の輝線感度 (5σ) | SO1, SO2, SO4 |
| 空間分解能 | 2 秒角 (10 Mpc で 100 pc 相当) | SO3 |
| 波長分解能 | $R > 50 \ (1736 \mu\text{m})$ | SO1, SO2, SO5 |
| | $R \ge 1000~(26\mu{\rm m})$ | SO3, SO4 |
| 衛星寿命 | 3年 (ノミナル)、5年 (ゴール) | SO1, SO2, SO3, SO4, SO5 |

表 4.4: SPICA ミッション仕様

| | 口径 | 温度 | 波長 | 観測モード | 波長分解能 | 空間分解能 |
|--------------|-----------------|-----------------|--------------------|-------|----------------|-------------------|
| スペース極低温冷却望遠鏡 | $2.5\mathrm{m}$ | $< 8\mathrm{K}$ | $12210\mu\text{m}$ | 分光、撮像 | R = 50 - 28000 | $20 \ \mu m$ 回折限界 |



図 4.12: SMI の点源に対する感度 (1 時間、5 σ):背景光レベルは、25 μ m において 80 MJy sr⁻¹ (High) 及び 15 MJy sr⁻¹ (Low) を仮定。

SPICAの科学的価値が大きく高まることは間違いない。そこで、ここの大型天文台との連携で期待される研究の一例を、以下に示す。

SPICA, TMT, すばる望遠鏡のシナジー:

遠方銀河の研究では、SPICA, TMT およびすばる望遠鏡によって、図 4.14 に示すような連携が期待される。 すばる望遠鏡では、HSC を用いて遠方銀河サーベイをかつてない大きな規模, 広い範囲で実施することを計画 している。一方、すばる HSC による広域サーベイで見つかった天体を詳細観測しその正体をより正確に特徴

| | | \mathbf{SMI} | | | SAFARI | |
|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------|-----------|---------------------|
| | LRS | MRS | HRS | SW | MW | LW |
| 波長 (µm) | 17-36 | 18-36 | 12–18 | 34-60 | 60-110 | 110 - 210 |
| 波長分解能 (R) | 50 - 120 | $1300 - 2300^{a}$ | 28000^{a} | | 300, 3000 | |
| 視野 | $600^{\prime\prime}{\times}3\overset{\prime\prime}{.}7{\times}4$ slits | $60'' \times 3.7''$ (slit) | $4'' \times 1.7$ (slit) | | | |
| ビーム FWHM | | | | 47 | 8.6 | $16^{\prime\prime}$ |
| PSF FWHM | $2''_{\cdot}0~(20\mu{ m m})-3$ | $3^{\prime\prime}_{\cdot}6~(36\mu{\rm m}),~2^{\prime\prime}_{\cdot}0~($ | $(1220\mu\mathrm{m})$ | | | |
| 点源に対する感度 ^{b,c} | | | | | | |
| (mJy) | 0.02 – 0.2 | 0.3 - 3 | 2 - 3 | 0.25 | 0.36 | 0.92 |
| $(\times 10^{-20}{ m Wm^{-2}})$ | 8-20 | 3 - 20 | 1.5 - 2 | 5.3 | 4.5 | 6.5 |
| サーベイ速度 d $(\operatorname{arcmin}^{2} \operatorname{hr}^{-1})$ | ~ 16 | ~ 1.5 | - | | | |
| 広がった光源に対する感度 ^{b,e} | | | | | | |
| | 連続波 (MJy sr ⁻¹) | 輝線 (×10 ⁻¹⁰ | ${ m Wm^{-2}sr^{-2}})$ | | | |
| | 0.02 – 0.1 | 0.7 - 4 | 1.5 - 2 | | | |
| 飽和限界 (Jy) | ~ 20 | ~ 1000 | ~ 20000 | | | |
| 測光感度 (mJy) | | | | 0.15 | 0.12 | 0.16 |

表 4.5: SMI と SAFARI の仕様

a: 点光源に対する空間分解能。b: 5σ 、1 時間の観測。c: SAFARI は R = 300 での値。d: サーベイ速度は、LRS と MRS それぞれに対し $30 \,\mu\text{m}$ において $100 \,\mu\text{Jy}$ の連続波、 $28 \,\mu\text{m}$ において $3 \times 10^{-19} \,\text{Wm}^{-2}$ の輝線を 5σ で検出することを想定。e: LRS と MRS に対して広さ 4″ × 4″、HRS に対して広さ 2″ × 2″ の広がった光源に対する感度。

づけることが、究極の高感度と解像度を誇る TMT の大きな役目となる。これらのデータが、銀河形成・進化 の研究に幅広く利用されることが期待されている。ただし、すばる HSC や TMT による可視光・近赤外線観測 は、遠方銀河の静止系では紫外線に対応するため Extinction の影響が大きい。星形成が活発に起こる成長期の 銀河はダストやガスに深く埋もれていると考えられているため、すばる HSC や TMT はその威力を十分には 発揮できない。このようなダストに深く埋もれた天体を探る最強の武器となるのが、遠・中間赤外線に史上最 高の感度をもつ SPICA である。SPICA では、10 平方度クラスの大規模な赤外線サーベイを行うこと主要なサ イエンスの一つと位置づけており、これによって銀河の形成・進化の研究が大きく進展することは間違いない。



図 4.13: SPICA と同時期に稼働する大型天文台のまとめ。JWST と ATHENA の稼働期間は、ノミナルな稼 働期間と想定される延長可能期間を含めて、10 年としてある。



図 4.14: 遠方銀河研究における SPICA と TMT, すばる望遠鏡のシナジー

SPICA と JWST のシナジー

SPICA では 4.3.2 で述べたとおり、中間赤外線帯域にある PAH のバンド放射 (3.3 μ m, 6.2 μ m, 7.7 μ m,11.3 μ m など) を手掛りに、SMI による星生成銀河のサーベイを行う。この時、SMI の観測帯域 (LRS $\lambda = 17 - 36 \mu$ m; 表 4.5) から、SPICA では赤方偏移 z > 0.5 の PAH 銀河が主要なターゲットとなる。一方、SPICA が不得意とする比較的近傍の銀河 (z < 0.5) からの PAH バンドに対しては、波長帯域 $\lambda \leq 17 \mu$ m に高い感度を持つ JWST が有効となる。したがって、SPICA と JWST を組み合わせれば、幅広い赤方偏移の PAH 銀河をカバーできる。

PAH バンドのスペクトルの詳細な形やバンド間の強度比は、PAH の物理・化学状態を反映していると考えられている。しかし現状では、PAH バンドの形は銀河ごとに変化することが観測的に示唆されているものの、

4.3. SPICA

それをコントロールしている物理・化学状態については良く理解されていない。そこで、JWST による近傍の PAH 銀河の観測によりこれらを明らかにし、PAH バンドを銀河の物理・化学状態を探るためのツールとして 確立する。そして、SPICA による遠方の PAH 銀河の観測へと適用することことで、PAH バンドやそれにと もなって存在する様々なダストの全貌を理解することが可能となる。

SPICA と JWST を組み合わせることにより、惑星系形成領域の全貌をも明らかにすることが期待される。 図 4.8 に示した原始惑星系円盤の中で、JWST による近・中間赤外線観測では内側に存在するホットな領域を 観測することになる。一方、SPICA による中間・円赤外線観測ではより外側のクールな領域を観測する事がで きる。この領域存在する HD, H₂ などのガスは、分子ガスの質量を測定するための非常によい指標となること が知られている。また、中心の恒星から 1 AU 以内の中心領域については、JWST や ALMA で得られる空間 情報と SPICA によるスペクトルで得られる速度場の情報を組み合わせることが、非常に有効である。

さらに、惑星系形成領域の鉱物学でも、SPICA と JWST は相補的な役割を果す。例えば、シリケイトの質量や温度を測定するのに、JWST は波長 9 μ m と 18 μ m のダストバンド観測が有効である。一方、SPICA による波長 18 μ m 以上のシリケイトバンドの観測は、crystalinity, Mg/Fe 比, olivine/proxene 比などの測定には欠かせない。

SPICA と ALMA のシナジー:

銀河の中心領域から噴出する分子ガスアウトフロー研究に、SPICA と ALMA の連携により大きな発展が期 待できる。最近 Herschel などによって、いわゆる P-Cygni プロファイルを示す Blue shift した OH 分子, CO 分子の吸収線が、近傍 ULIRG などから検出されている [3]。これらの吸収線は、分子ガスアウトフローによっ て生成されると理解されている。この分子ガスアウトフローは、AGN や星生成などの活動に伴って駆動され ると考えられており、星生成を抑制するフィードバックの機構としても注目されている。SPICA HRS を用い れば、CO 分子の回転振動遷移 (静止波長 $\lambda_{rest} \sim 4.7 \ \mu m$)を用いて、赤方偏移 1 < z < 3 の銀河の分子アウト フローを探査することが出来る。一方 ALMA では、種々の分子輝線 ([CII] など) を通じて、z > 3 銀河の分子 アウトフローの検出が期待されている。したがって、SPICA と ALMA を組み合わせることで近傍から遠方ま で幅広い赤方偏移で分子アウトフローを探査することができ、AGN フィードバックの全貌を明らかにできる と期待される。

このような分子ガスアウトフローの駆動源の一つとして、AGN の降着円盤から噴出する円盤風が有力と考え られている。一方、円盤風の証拠として、光速の数 10%程度の速度を持つイオン化したガスのアウトフローが 近傍 AGN の X 線観測でしばしば見つかっており、これらは Ultra-Fast Outflow (UFO) と呼ばれている [16]。 さらに、UFO と分子ガスアウトフローの物理的な繋がりを示唆する観測事実も報告され始めている [17]。した がって、分子アウトフローや AGN フィードバックの研究では、ATHENA との連携も大きな役割を担うと考 えられる。

SPICA と ATHENA のシナジー:

AGN の研究において、赤外線観測とX線観測の協力は大変有効である。これまでも、近傍の Seyfert 銀河に おいて、赤外線光度とX線光度が線形相関していることがI型,II型を問わず知られており[5;10]、これらはダ ストトーラスが Clumpy であるという描像を支持する観測事実と考えられている。一方、SPICA と ATHENA の連携によって発展すると思われるのが、ダストに埋もれた AGN や Compton-thick AGN の完全に網羅 するサーベイである。

銀河の合体・成長に関する最近の研究 [6] によると、合体直後の銀河は ULIRG として観測される。ULIRG で は、活発な星生成と共に AGN も非常に活動的であると考えられているが、ダストに深く埋もれているためにそ の全貌はよくわかっていない。次に、AGN フィードバックが有効に機能しダストが晴れ上がった銀河は、QSO として観測される。QSO の中心核周辺の構造は、AGN の統一描像 [20] でよく理解されておいる。ダストトー ラスが我々の視線を横切る II 型 QSO のうち、水素柱密度が $N_{\rm H} \gg 10^{24}$ cm⁻² を満たすような分厚いトーラス を持つようなものが、Compton-thick AGN となる。このように、ダストに埋もれた AGN や Compton-thick AGN は銀河成長・進化と密接に関連しており、SPICA が実施する遠方銀河サーベイでも重要な科学目的と なる。 一方、全天から一様に飛来するX線バックグラウンド (X-Ray Background; XRB)の観測[19]から、Comptonthick AGN の存在量について重要な示唆が得られている。特に、X線フラックスが小さくなる (つまり、遠方 になる)にしたがって Compton-thick AGN の割合は増加し、2 – 10 keV の X線フラックスが 10⁻¹⁶ ergs s⁻¹ cm⁻²の AGN ではその割合は 20–30% に達すると考えられている。しかし、この様な暗い Compton-thick AGN の検出を初めて可能にするのが、ATHENA だと期待されている。

SPICA SMI が遂行する 10 平方度の銀河サーベイでは、ULIRG クラスの赤外線光度 $(L_{\rm IR} \ge 10^{12}L_{\odot})$ を持 つ銀河が 30000 個以上赤方偏移 z = 1 - 4 に検出されると考えられる。この中から、SPICA SMI, SAFARI に よる Spectroscopy によって AGN に特有なガス輝線 ([OIV] など)を探査することで、ダストに埋もれた AGN や Compton-thick AGN を数多く抽出できると期待される。一方 ATHENA では、Wide Field Imager によっ て 5.7 平方度のサーベイを実施することで、1000 個程度の Compton-thick AGN を検出できると推定されてい る [13]。それぞれが抽出した候補天体を互いに追観測することで、ダストに埋もれた AGN や Compton-thick AGN の発見が促進されるはずである。ただし、X 線観測では Compton-thick AGN の兆候として中心核の X 線放射がトーラスなどで反射した成分を探査するが、全方向をダストに囲まれた埋もれた AGN ではこの反射 成分さえ強い吸収を受けるはずである。つまり、埋もれた AGN に対しては X 線観測はあまり威力を発揮せず、 SPICA による赤外線観測の方が有利となる可能性が高い。

SPICA と ATHENA はともに 2020 年代後半の打ち上げを計画しており、稼働時期の重なりが非常に大きい。 したがって、互いの成果に関する情報の共有をタイムリーに進めることが、本研究の推進には重要となるであ ろう。

4.3.6 体制と準備状況

主要キー技術とその位置づけ・開発状況・海外とのベンチマーク:

SPICA は従来の赤外線望遠鏡と異なり冷媒を用いず、機械式冷凍機を用いて望遠鏡・観測装置を8K以下 に冷却する。これはJAXAの戦略的開発要素の一つで、J-T冷凍機は世界最高性能(特に観測装置のための 1K級冷凍機は他に開発例がない)である。また遠赤外線での史上最高感度を実現するためのTESボロメー タアレイ検出器がオランダ SRON を中心に開発されており、雑音等価電力 NEP=2×10⁻¹⁹ W Hz^{-1/2} を既に 達成した(検出器数個レベルの技術実証だが世界一)。

準備・検討体制:

ESA および欧州各国等との国際協力のもとで推進している。米国の参加は議論中である。現在の国際分担の 枠組みでは、国内においては JAXA はミッション部のとりまとめや機械式冷凍機を担当し、大学コンソーシア ム(名大、東大、東北大等)が SMI(中間赤外線観測装置)の 開発を担当する。 準備状況:

SPICA は日本学術会議の大型計画マスタープラン(2014)の重点大型研究計画 27 件の一つとして選定された。また文部科学省科学技術学術審議会のロードマップ 2014 の新たな 10 計画の一つである(aa 評価)。当初、SPICA 計画は、ESA および欧州各国等との国際協力のもと、日本主導で計画を進める案(Plan-A)を検討してきた。しかしながら、Plan-A での日本側の経費負担が大きく、実現が困難であると判断され、平成 25 年 5 月、JAXA および ESA の役割分担を見直した案(Plan-B)に移行する方針が ESA/JAXA 間で合意された。 Plan-B は、ミッション構成は従来から変更せず、ESA 側の負担を増大し (Cosmic Vision M-class)、JAXA 経費を戦略的中型ミッション規模に軽減する案であった。しかしながら Plan-B の準備を ESA-JAXA で進める中で、従来のミッション構成が従来と同じままでは、想定される資金枠では、実行が困難であることが明らかになってきた。そのため、平成 26 年 5 月以降は、想定される日欧の予算枠(前述)で実行可能な案を探る方針(ミッション再定義)を合意し、日欧で計画の再度の見直しを行ってきた。2015 年 3 月の SAFARI コンソーシアム会議にて、望遠鏡は口径 2.5 m、温度 8 K 以下をベースとし、今後の審査に向けて SPICA を推進して 4.3. SPICA

いくことで合意した。ESA の Cosmic Vision M5 に応募し、平成 30 年度に日欧においてプロジェクト化し、 2027-28 年の打上げを目指す。

参考文献

- [1] Burgarella, D., Buat, V., Gruppioni, C., et al. 2013, A&A, 554, A70
- [2] de Vries, B. L., et al. 2012, Nature, 490, 74
- [3] Fischer, J., et al., 2010, A&A, 518, L41
- [4] Fujiwara, H. 2013, A&A, 550A, 45
- $[5]\,$ Gandhi, P., et al., 2009, A&A, 502, 457
- [6] Hopkins, P. F., et al., 2008, ApJS, 175, 356
- [7] Imanishi, M., et al. 2008, PASJ, 60S, 489
- [8] Koike, C., et al. 2003, A&A, 399, 1101
- [9] Mamajek, Eric E., 2009, AIPC, 1158, 3
- [10] Matsuta, K., et al., 2012, ApJ, 753, 104
- [11] Molster, Frank. 2005, SSRV, 119, 3
- [12] Nakamura, T., et al. 2011, Science, 333, 1113
- [13] Nandra, K., et al., 2013, "The Hot and Energetic Universe: A White Paper presenting the science theme motivating the Athena+ mission" (arXive:1306.2307)
- [14] Olofsson, J. 2012, A&A, 542A, 90O
- [15] Su, K. Y. L, et al. 2006, ApJ, 653. 675
- [16] Tombesi, F., et al., 2010, A&A, 521, 57
- [17] Tombesi, F., et al., 2015, Nature, 519, 436
- [18] Tommasin, S., Spinoglio, L., Malkan, M. A., & Fazio, G. 2010, ApJ, 709, 1257
- [19] Ueda, Y., et al., 2014, ApJ, 786, 104
- [20] Urry, C. M., & Padovani, P., 1995, PASP, 107, 803
- [21] Williams, Jonathan P., et al. 2011, A&A, 49, 67
- [22] Zolensky, M. E., et al. 2006, Science, 314, 1735
- [23] Zolensky, M. E., et al. 2008, Meteorit. Planet Sci., 43, 261

4.4 JASMINE

4.4.1 JASMINE 計画の概要

「JASMINE」(Japan Astrometry Satellite Mission for INfrared Exploration)は、赤外線位置天文観測衛星計画シリーズの総称であり、現在、「Nano-JASMINE」計画と「小型 JASMINE」計画を集中的に検討、開発をしている。1989年にヨーロッパ宇宙機関(ESA)によって打ち上げられた世界で初の位置天文観測衛星「ヒッパルコス」による画期的な成果以後、世界のサイエンスコミュニティから次世代の高精度位置天文観測衛星が期待されていたが、2013年12月にはESAにより大型位置天文観測衛星「Gaia」が無事に打ち上げられ定常観測を行っている。2022年頃に最終カタログが公開される予定であるが、それまでに4回の中間リリースも予定されている。今後、質、量ともに画期的な位置天文観測データが手に入ることが可能となり、天の川銀河自体やそこに含まれる多岐にわたる天体や天体現象に関する研究の大進展が期待されている。



図 4.15: 「小型 JASMINE」のイ ラスト図。

そういう状況の中、「Gaia」では達成が困難な研究対象を補完するためにも日本においては「JASMINE」計画が 2000 年頃から検討され、「Gaia」チームや世界の位置天文コミュニティ等からの支援、協力を受け、計画の 実現を目指している。

「Nano-JASMINE」計画は、サイズが 50 cm 立方、重量がわずか 35 kg の超小型衛星を用いた計画であり、 望遠鏡の主鏡口径は 5 cm 級である。小口径ながら zw バンド (0.6 ~ 1.0 μ m) で全天をサーベイし、「ヒッパル コス」と同等の位置精度 (3 ミリ秒角程度) での測定を行う計画である。「ヒッパルコス」による観測から 25 年 以上経過している時間間隔を利用して、「Nano-JASMINE」の観測データとヒッパルコスカタログとを組み合 わせると、ヒッパルコスカタログより固有運動は 1 桁程度、年周視差は 1.3 倍程度の精度向上が期待されてい る。日本での初めてのスペースアストロメトリの実行、今後の JASMINE 計画が行うオンボードでのデータ取 得等の技術的経験の蓄積、大質量星の起源と星形成領域への影響、太陽系近傍での力学構造、多重星・連星の 解析、VERA との協力による天体の運動をもとにした星形成領域研究などの科学的成果を目的としている。衛 星の打ち上げ実機 (FM) は、2010 年 10 月に既に組み立てが完成しており、詳細は、4.4.11 で後述するが、近 い将来の打ち上げを目指して、運用訓練、地上局整備、「Gaia」チームとの連携によるデータ解析準備を進め ている。科学的成果に関してもサイエンス検討ワーキンググループを立ち上げて (代表者:西亮一(新潟大))、 定期的な検討会を開催している。

「小型 JASMINE」は、近赤外線 (Hw バンド: 1.1 ~ 1.7 µm)の波長域における撮像観測を高頻度 (同一天体の観測は約100分に1回)で行い、天球面上での天体の位置の時間変動 (時系列データ)を10 µas クラスの高精度で測定する (位置天文観測)計画である。時系列データやそこから導出される年周視差、固有運動等を世界の研究者コミュニティにカタログとして提供する。「Gaia」のような可視光観測では見通すことが困難な銀河系中心核バルジ方向の数平方度の領域のサーベイ (プロジェクト観測)と、「Gaia」では出来ない高頻度測定を活かせる興味ある特定天体に対する観測 (公募観測)を行う予定である。

以下、詳細は後述するが、「小型 JASMINE」の実現に関しては、JAXA 宇宙科学研究所による公募型小型計 画宇宙科学ミッション(従来の公募型小型科学衛星ミッション)への搭載を目標とし、次期の公募に対してミッ ション提案を目指している。科学目的や目標は具体化され、それに対するミッション要求・システム要求が明確 化されてきたとともに、システム要求を満たす衛星仕様案や観測運用、データ解析の実現可能性は設計上は見 込みをつけてきた。そこで、現在は、より詳細な設計の検討を進めるとともに、実現にとって重要な主要キー 技術の実証実験を進めている。また、研究者有志により組織されているサイエンスワーキンググループ(代表 者;梅村雅之(筑波大))を中心として、「小型 JASMINE」による科学的成果の検討も継続して行われている。 以下では、「小型 JASMINE」計画に関することを中心として詳細を記載する。 4.4. JASMINE

4.4.2 「小型 JASMINE」の科学目的とサイエンス成果が与えるインパクト

○ 科学的大目的

「小型 JASMINE」の科学的目的として、衛星へのミッション要求とシステム要求に直結する大目的は、光 赤天連が 2020 年代に解明すべき 3 つの重要課題の 1 つである「物質宇宙の多様性」(宇宙初期から現在にいた る天体と物質の形成・進化・相互作用)の重要要素の 1 つである、

「宇宙に巨大ブラックホールはなぜ存在するのか?」というテーマである。

そして、それをブレークダウンした中目的は、次の通りである。

「巨大ブラックホールと銀河バルジの共進化の解明を目指して、天の川銀河(銀河系)の中心に潜む巨大ブラックホールの生い立ち(形成)を星の運動(動力学)を用いて知る。」

この中目的をさらにブレイクダウンした、より具体的な主目的は以下の2つとなる。

○ 主な科学目的 (ミッション要求・システム要求に直接つながるもの)

銀河系 (天の川銀河)を対象として、

(i) 銀河形成標準理論の検証につながる巨大ブラックホールの合体形成説の観測的検証。

(ii) 巨大ブラックホールへの物質供給機構を決定づける銀河系中心核バルジの重力場解析。

なお、上記の主目的を達成できるようなミッション要求とシステム要求 (いずれも後述) を「小型 JASMINE」 が満たす場合、それで得られる位置天文観測データは主目的以外にも多岐にわたる科学的目的を達成できる可 能性がある。そのような目的をここでは副次的目的と呼ぶが、具体的には以下のような目的があげられる。 〇 副次的科学目的

銀河系内天体で、短時間変動現象を伴い近赤外線で明るく物理的に興味がある、いくつかの特定天体 (例え ば、高エネルギー天体連星系、恒星が低質量な系外惑星系、星形成領域、活動恒星など) に対象を特化し、こ れらの天体の物理的解明を行う。

○ サイエンス成果が与えるインパクト

以上の科学目的が達成した場合のサイエンス成果が与えるインパクトは次の通りと考える。

「小型 JASMINE」の主な科学目的であり、半世紀にわたり未解決の問題である巨大ブラックホールの形成 は、その研究内容に関しては社会的反響も大きく一般の人の関心も高い。我々が住んでいる天の川銀河の中心 に巨大ブラックホールが存在し、その回りを我々が回転していること自体、一般の人の関心が高いと思われる が、その見えない巨大ブラックホールの生い立ち (ブラックホールの合体による成長があったかどうか)まで が、星の運動によって解き明かされたとしたら大きな反響を呼ぶと考えられる。いわんや、その巨大ブラック ホールへのガスの輸送機構が、中心核バルジの重力ポテンシャルの解析で示唆でき、それによってガス降着に よる巨大ブラックホールの成長に関する知見を得たり、将来、ガスが中心に大量に落ち込み、中心での爆発が 起こると予測できるとすれば、その関心は非常に高くなると期待される。

また、研究者にとっても大きなインパクトが期待できる。つまり、銀河系中心の巨大ブラックホールや銀河 系バルジは他の銀河のそれらと比べると圧倒的に近いという利点があり、近未来に、星の位置や運動の詳細が 精度良く求まると、バルジと巨大ブラックホールの精密探査が可能となり、他の銀河観測だけでは分からない ことが明らかになると期待できる。特に、バルジと巨大ブラックホールとのインターフェース最内縁部である 中心核バルジの精密探査を「小型 JASMINE」が行えるのは、バルジと巨大ブラックホールとの共進化研究の 進展に対して大きな意義があると考える。

以上のような問題に対して、位置天文学的アプローチで行うことは非常にユニークであり、これが可能なのは「小型 JASMINE」しかなく、非常に科学的価値がある。また、位置天文のカタログは、天文学、天体物理 学の幅広い分野での基本情報となるため、高エネルギー天文学(X線連星やガンマ線連星の解析など)など他の 分野への科学的成果にも貢献できる。

4.4.3 「小型 JASMINE」の科学目標・ミッション要求

 ・ 主目的に対する科学目標

前述した主な科学目的のためのミッションの達成目標は以下のとおりである。

(i) 銀河系中心にある巨大ブラ ックホールの形成過程で、中間 質量ブラックホールが合体を起 こしたかどうかの知見を得るた め、中間質量ブラックホールが 中心領域に落ち込み、中心領域 の星へのブラックホールによる 力学的摩擦の効果が効いている か効いていないかを星の位相分 布関数を用いて、統計的に高信 頼度で判断できることを目標と する。以上の目標達成のために、 巨大ブラックホール近傍 (半径 100 pc 程度以内~半径 0.7 度 以内の領域) での星に対して、 年周視差の誤差では、20 µas 程度以下、固有運動の誤差では



図 4.16: 巨大 BH 同士の合体が無かった場合(左図)とあった場合(右図) の銀河系中心付近の恒星の位相分布関数。巨大ブラックホールの成長にあ たり、より小さいブラックホールの合体が起こっていた場合、巨大ブラッ クホールを中心として半径約100 pc 以内の恒星の運動は、ブラックホー ルによる力学的摩擦により影響を受けるため、合体がなかった場合とあっ た場合とで、恒星の位相分布関数に違いがみられる。その違いを活かし て、合体の是非を判断する。

50 µas/yr 程度以下で測定できる (バルジに属すると考えられる) 星を数千個取得する観測ミッションを行う。

(ii) 中心核バルジの一部を含む銀経-2 度 ~0.5 度、銀緯 0.2 度~0.5 度の範囲で の星の位相空間分布の特徴を用いて、巨 大ブラックホールへのガス供給機構の 解明につながる銀河系中心核バルジの 棒状構造モデル(重力場モデル)におけ る棒状パターンの回転角速度といった パラメータへの制限を与える。特に、中 心核バルジに、半径5 kpc 程度の棒状 構造とは異なる、より小さな内部棒状 構造が存在しているかどうかを、運動 学的に、つまり棒状構造のパターンの 回転角速度の違いを用いて統計的に高 信頼度で判断できることを目標とする。 以上の目標達成のために、年周視差の 誤差では、20 µas 程度以下、固有運動 の誤差では 50 μas/yr 程度以下で測定 できる (バルジに属すると考えられる) 星をこの観測領域内で数千個取得する 観測ミッションを行う。

(iii)以上のような巨大ブラックホールの 合体形成の観測的検証や銀河系中心核 バルジの重力場解析に必要な基礎デー タを整備するため、銀河系中心領域に おいて近赤外線帯域で測定できた星の 天球面上での位置変動の時系列データ およびそこから導出される星の年周視



図 4.17: 中心核バルジ付近で期待される恒星軌道 (x1 と x2 軌道)。 内部リンドブラッド共鳴 (棒状構造のパターンの回転角速度が、星 の回転角速度と周転角速度の 1/2 の差に等しい場合)が2点存在す る場合には、その2点間の領域では、このような x1 軌道と x2 軌 道が共存する。さらに、共回転共鳴(棒状構造のパターンの回転角 速度が、星の回転角速度と等しくなる場合)付近では、x1 軌道が 自己交差する。このために、ガスの角運動量やエネルギーが散逸さ れ、ガスが中心に落ち込みやすくなる可能性があり、中心への物質 供給機構と考えられている。内部棒状構造は、このような回転軌道 ではないボックス型軌道が支配的である可能性があるが、いずれに せよ、共鳴が、どこに生じるかがガス供給の効率性の判明につなが ると思われる。そのためには、内部棒状構造のパターンの回転角速 度を知ることが重要であり、恒星の位相分布関数を用いた重力ポテ ンシャルの解析により、それを解明することができる。 4.4. JASMINE

差、固有運動等をカタログとして作成し、世界の研究者へ公開する。

副次目的に対する科学目標

副次目的に対しての達成目標は(これは、あくまでも現在検討中の有力候補天体を観測する場合であるが、 実際には、公募により観測対象を選定する予定である)、例として以下の通りである。

ブラックホール連星 Cyg X-1 に対して 10 % 程度の精度で各軌道要素を決定する。これによりジェットのモデルを制限できることが期待される。また、ガンマ線連星 LS 5039, LS I+61 °303 に対しては、それぞれ 2 太陽質量、0.4 太陽質量の誤差で高密度星の質量を決定し、高密度星がブラックホールか中性子星かの判定を行う。さらに、大質量 X 線連星 Cas、ガンマ線連星 HESS J0632+057 に対してそれぞれ、高信頼度で高密度 星を特定することを目標とする。

また、系外惑星探査に対しても成果を上げることを目標とする。系外惑星探査方法の1つである視線速度法 には「質量の下限値しか得られない」という問題があるが、位置天文観測法では質量そのものを決定すること ができる。したがって、視線速度法によって発見された惑星を「小型 JASMINE」で追観測することにより、 質量を決定することができる。現時点では15 個の惑星系をターゲット天体として挙げている。これらは中心 星の軌道半径の視角が大きく、かつ周期が1年以内であるという条件で選ばれたが、中心星が赤色巨星である 天体、連星を組んでいる天体など興味深い天体を含んでいる。このうち、

(i) 軌道半径の視角が大きい天体に対しては 4-6 % の誤差

(ii) 軌道半径の視角が小さい天体に対しては 16-19 % の誤差

で質量を決定できる。これらの惑星系は太陽系に比較的近い距離に位置するため、中心星半径の視角が10-100 μas に達する。したがって、星表面の10%以上を覆うような黒点がある場合には、「Gaia」の位置決定精度に多大 な影響を及ぼす。一方、「小型 JASMINE」は、高頻度観測の利点を活かして黒点移動による中心位置移動を分 離できるため、「Gaia」と比較して精度の良いデータを取得することができる。さらに、褐色矮星周りの惑星 も探査する (これは「Gaia」ではできないため、「小型 JASMINE」がユニークである)。

前述の主目的に対する科学目標を別途定める成功基準(フルサクセスレベル)で達成するために、「小型 JAS-MINE」のミッションに対して以下のようなミッション要求(案)を行う。この要求を満たすように衛星システ ムへの要求を行うことになる(4.4.6 章)。

○ ミッション要求

銀河系中心核バルジ付近の下記で示す領域方向に 対して、天体の天球面上での位置の時間変動を近赤 外線帯域で、測定する。

(i) 銀河系中心を中心とする半径 0.7 度程度の円の領域(図中の橙色の円内)(以降、領域1とする)を観測する。その際、星の年周視差の誤差が、20 μas 程度以下、固有運動の誤差が、50 μas/yr 程度以下で測定できる、領域1内にある銀河系バルジに属する星の個数が、4000 個程度(tentative)以上。

 (ii) 銀経-2 度~0.5 度、銀緯 0.2 度~0.5 度の範囲の 領域 (図中で青色の長方形内))(以後、領域 2 とする)
 を観測する。その際、星の年周視差の誤差が、20 μas
 程度以下、固有運動の誤差が、50 μas/yr 程度以下で 測定できる、領域 2 内にある銀河系バルジに属する
 星の個数が、5000 個程度 (tentative) 以上。

(iii) 領域1と2において測定された星に対して、星の天球面上での位置変動の時系列データおよびそこから導出された星の年周視差、固有運動等の必要な物理情報をカタログとして作成し、世界の研究者へ



図 4.18: 「小型 JASMINE」の(銀河系中心方向に対 する)観測領域。

公開できること。

4.4.4 「小型 JASMINE」の世界的位置づけ・国際協力

「小型 JASMINE」は、近赤外線帯での観測を行うため、銀河系中心付近に対しては、「Gaia」(可視光観測) に比べては3桁以上多くの個数の星を高精度で測定することが可能である。さらに、「Gaia」には無い高時間 分解能という特徴を活かして短周期変動を伴う天体現象の理解を進展させることができる。「小型 JASMINE」 計画のユニークさ、必要性が世界でも認識されており、国際天文学連合の Commission A1(世界的な位置天文 観測研究者のコミュニティ組織) からは、正式な推薦書を受け取っている。

また、「小型 JASMINE」とは相補的なデータとなる、銀河系バルジの星々の視線速度と元素組成の観測チームからは、「小型 JASMINE」への期待も大きく、連携協力を開始している。例えば、米国における H バンドによる高分散分光サーベイ観測を行う APOGEE 計画チームとの国際的な連携体制もできている。APOGEE 計画の PI である S.Majewski(バージニア大学)より、APOGEE の継続的発展として、バルジ観測に適した南天の望遠鏡に APOGEE と同じ高分散分光器を取り付け、バルジ観測を行う APOGEE-2 計画を共同でプロポーザルを出すことを提案された。その結果、共同プロポーザルの提出を米国で既に行った。順調にいけば、2020 年以前には観測データを得ることが可能となる。「小型 JASMINE」が位置天文観測する中心核バルジの星のすべてが APOGEE-2 で測定できる見込みであり、強力なシナジーとなる。そこで、「小型 JASMINE」と APOGEE-2 で測定できる見込みであり、強力なシナジーとなる。そこで、「小型 JASMINE」と APOGEE-2、およびそれを実行する SDSS-IV collaboration との国際的なサイエンス連携 (お互いの協力が早期に実現できるように、またより良い科学的成果がだせるように、お互いをサポートし、議論を行っていくことにする) に関する MOU を 2013 年 5 月に締結した。さらには、米国 UCLA の M.Rich 氏の BRAVA プロジェクトチームとの国際的な連携、またオーストラリアのチーム (P.I. は K.Freeman 氏) が進めている ARGOS プロジェクトとも国際的な連携を行うこととなっている。

さらに、データ解析に関しては、「Gaia」のデータ解析チーム(特に、ハイデルベルグ大学とドレスデン大学のチーム)が、「Nano-JASMINE」における協力の延長として、「小型 JASMINE」に対しても協力をしてもらえる予定である。

4.4.5 「小型 JASMINE」の研究領域(光赤外天文学分野)内での位置づけ

光赤外分野の中では、位置天文観測という他の国内のスペースミッションにはない切り口で天の川銀河の研 究を行うものである。「小型 JASMINE」の科学的意義そのものは、2012 年~2013 年にかけて行われた光学赤 外線天文連絡会による中規模計画の評価、および学術会議天文学・宇宙物理学分科会による中規模計画への評 価でも、高い評価を得ている。具体的には、光学赤外線天文連絡会からは次のようなコメントを頂いている。 「本観測は、『赤外線観測』による位置天文学であり、銀河系バルジの星の距離を直接に測定できるものであり、 意義は高い。今後、ESA/「Gaia」計画が、全天の位置天文観測を行うが、銀河系バルジは、Extinction(ダス トによる減光)の影響のため、観測することができない。本計画は、世界的に見ても他に例がなくユニークで あると同時に、「Gaia」とも相補的である。さらに「Gaia」の打上 (2013 年) から、あまり遅れることなく、本 ミッションも打ち上げられることが望ましい。JAXA の小型衛星計画として実現するべき計画である。」

4.4.6 「小型 JASMINE」のシステム要求と仕様案

「小型 JASMINE」に対するミッション要求は、4.4.3 章で記述した通りであるが、そのミッション要求を満たすために必要な衛星システムに対する要求 (案) は以下の通りとなる。

(i) 主鏡口径が 30cm 級の光学望遠鏡により近赤外線帯域で撮像を行い、観測データを解析することにより、星の年周視差、固有運動等の必要な物理情報を求める。

(ii) 軌道は太陽同期軌道とし、運用期間は打ち上げ後3年とする。

4.4. JASMINE

| 表 4.6: | 「小型 JASMINE」 | の仕様案 |
|--------|--------------|------|
|--------|--------------|------|

| 項目 | 仕様 |
|------|------------------------------------------------------------|
| 主鏡口径 | 30 cm |
| 光学系 | Korsch 系 |
| 観測領域 | 図 4.18 に示す領域 |
| 観測波長 | 1.1 μ m ~ 1.7 μ m (Hw バンド) |
| 観測等級 | $9 \text{ mag} < \mathrm{H}_{\mathrm{W}} < 13 \text{ mag}$ |
| 軌道 | 高度 550 km、昇交点地方時 6 時の太陽同期軌道、RCS 搭載により軌道を補正する制御を行う。 |
| 運用期間 | 3年程度 |
| 検出器 | HgCdTe 赤外線 2 次元アレイ検出器、1.7 µm カット、10 µm、4 K × 4 K ピクセル |
| 視野 | $0.6^{\circ} \times 0.6^{\circ}$ |

(iii) ミッション要求を実現するために、各サブシステムの仕様が適切に設定され、各サブシステムへの誤差配分が妥当であること。

テ求るMINE」の位度るは、 「小型」AS-MINEはすあ文、的定響要で した。学星な精す因の なました。 のの位度るは、



図 4.19: 「小型 JASMINE」の望遠鏡構造の設計図 (左図) と光学系光路図 (右図)。

影響項目の数は 10 以上になる。その各項目の誤差をすべて考慮したものが、最終的に目標精度に達成するものになっておれば良く、そのため項目毎の誤差配分値はユニークではない。従って、その誤差配分を満たすようなシステムに対する要求を実現する装置の仕様も一意ではないが、表はその実現案の一つである。もし、今後のシステム検討等で、ある項目の誤差配分値を満たせないことになった場合は、他の項目の誤差配分値を見直し、それに対応するサブシステムの仕様案を変更することで対処をしていく。なお、項目とそれに対する誤差配分値案としては次の通りである。光学系の回折 (480 mas)、撮像中の姿勢擾乱 (280 mas)、光学系波面収差 (110 mas)、読み出しノイズ (30 e⁻¹)、暗電流 (57 e⁻) および迷光 (25 e⁻/s) 等を割り当てている。他に、星像中心推定のアルゴリズム、フレーム連結に伴う誤差、座標系固定精度、熱変形による像の変形などの要因とその誤差配分値も検討してある。望遠鏡構造の設計図と光学系光路図は図 4.19 に示す。

4.4.7 「小型 JASMINE」の観測手段

「小型 JASMINE」では、図 4.18 に示す領域を、半視野を重ねながら貼り合わせられるように順次撮像して ゆく、いわゆる step stair 方式で撮像を行なう。視野変更後は姿勢が安定するまで撮像が出来ないので、各視 野を約7秒露出で20回程度撮像し、視野を変更する姿勢運用を行い、次の視野の撮像を行う。これを繰り返 すことで、観測領域全体を地球周回の軌道半周回(約50分間)でカバーする。この運用を、春約90日、秋約 90日、毎周回行う。冬は銀河系中心方向が太陽方向にあって観測できないこと、また夏は規定の軌道では衛星 を銀河系中心方向に対する観測にふさわしい熱環境に保てないことから、夏および冬は銀河系中心方向以外の 興味ある天体の観測に充てる。

4.4.8 「小型 JASMINE」のデータ解析方法

位置天文観測のデータ 解析は、観測データに係 る、考え得るすべての要 素をモデル化し、星の運 動パラメータ以外に、装 置、衛星などの様々なパラ メータを、最小二乗法で解 く。単独星(連星系を構成 していない、惑星や重力 レンズ効果の影響を受け ていない星)の天球上の運 動は、定められた元期の赤



図 4.20: データ解析においてモデル化が必要な事項の全体像。

経・赤緯 α_0, δ_0 、固有運動 $\mu_{\alpha}, \mu_{\delta}$ 、年周視差 π の 5 つのパラメータで書ける。これに、光学系に由来する PSF のモデル、検出器の応答、読み出しエレクトロニクスのノイズ源、迷光、撮像中の衛星姿勢のジッター、衛星 の運動による光行差など様々な要因を全てモデルとして取り入れ、これらのモデルパラメータを最小二乗法で 解くことになる。図 4.20 に示すような、生のデータにノイズや擾乱が加わってゆくプロセスを全てモデル化 し、その逆問題として星の運動パラメータを解くことになる。ノイズに関する、隠されたパラメータの推定や 最適モデルの構築については、統計数理研究所、慶応大学などの専門家の協力を得ながら進めている。また、最適モデルをソフトウエア的に見つけ出してゆくモデル駆動技術の適用に関しては、企業との共同研究で進め ている。

PSF 推定に関しては、同様な Step stair 観測で位置天文を実現している汎用宇宙望遠鏡である HST の実績 がある。pixel 内での感度ムラや、PSF 形状の検出器上での場所依存性、PSF の経時変化などが十分な精度で 推定可能であることを確認している。

撮像により得られた座標系をICRF に貼り付けるためには、位置天文パラメータが既知の星を用いる。「Gaia」 による観測が既に開始されていて、バルジより手前の星は「Gaia」でも高精度で多数観測される見込みである。 最小二乗問題に、これらの星の位置天文パラメータが「Gaia」の観測と一致するという制約条件を入れること で、バルジの星の位置天文パラメータが ICRF に従うものに制約される。

4.4.9 「小型 JASMINE」の主要キー技術とその位置づけ

標準バスの機能要求案は小型科学衛星用に開発された標準バスの仕様を逸脱せず、ミッション機器について もなるべく枯れた技術で構築するように工夫している。しかし、目標の測定精度の実現のためには慎重に開発 を進めないといけない主要なキー技術として、次の5つが挙げられる。



図 4.21: 「小型 JASMINE」の検出器ボックスダミーを用いた断熱試験 configuration(左図) および検出器ボックスダミー (右図)。

(i) 光学系の設計・製作

位置天文観測は、高精度に撮像された星の位置を推定しなければならないことから、光学系は収差が少ない、 かつ広視野のものとして、Korsch 系をベースとした3枚鏡系とする。また設計光学系のメリットを生かすた め、光学系の製作、調整においても高精度なアラインメントを実現するような調整方法を確立する。

(ii) 迷光対策

軌道半周回の観測期間を確保するため、太陽が 45°まで、地球が 23°まで望遠鏡指向方向に近づいても、星像の位置推定に影響がない程度に十分に迷光レベルを下げる必要がある。鏡筒表面を、半球反射率 1% 以下の素材で覆い、バッフルやフード形状も迷光の条件を満たすように設計する。

(iii) 熱制御

ダークノイズレベルの条件から検出器は 180 K 以下 (目標 170 K 以下) に抑えつつ、望遠鏡自身は組み立 て調整を容易にするため 5°C で運用する設計とする。 望遠鏡と検出器の約 100°の温度差を保ちつつ、観測 運用中は望遠鏡を 0.2°、検出器は 0.7°の温度安定を 実現する。

(iv) 構造・熱安定性

上記実現可能な温度安定の範囲で、像面での変形の 時間変動を 10 nm/100 分 以下に抑えるように、望 遠鏡の鏡筒には熱膨張率が低い素材を用い、 かつ鏡 筒の変形が鏡の変形を誘起しないような締結部のス トレスリリーフ構造を採用する。

(v) 構造・振動擾乱

撮像時間以下の短時間の擾乱を抑える設計をすると ともに、振動擾乱の影響を後解析で除去するため、打 ち上げ前に振動伝達パターンを測定する。

以上のキー技術は、他の光赤外スペース計画にとっても共通する技術要素である。「小型 JASMINE」で 培われる上記の技術的ノウハウや経験は、他の光赤



図 4.22: 望遠鏡部の熱安定性を検証するための試験用 望遠鏡ダミー。想定される温度変化、温度非一様性を 望遠鏡ダミーに与えた時に光学系の変形がどの程度で あるかを干渉計を用いて測定する。

外のスペース計画の開発にとっても貢献できると位置づけられる。

4.4.10 「小型 JASMINE」の検討、開発の進捗状況

以上のキー技術は、JAXA 宇宙研の競争的資金である戦略的開発経費を獲得として検討を続けてきている。 例えば、4.4.9 章に記述したキー技術の(iii) 熱制御に関する技術実証の進捗状況は次の通りである。望遠鏡は 常温で、検出器は170 K~180 K の低温で運用するため、検出器周りの冷却方法やそのための熱収支とともに、 検出器ボックスの断熱設計は重要なキー技術である。これを検証するため、ボックスダミーを作成して、対流 による影響を避けるため真空下で試験を行っている。図 4.21 に、断熱試験の configuration と検出器ボックスダ ミーを示す。さらに、次の例として(iv)の構造・熱安定性の実証実験の進捗に関しては次の通りである。望遠鏡 に想定される熱環境の下で、望遠鏡構造の変形が結像性能に影響を与えない程度に収まるような設計を行って いるが、構造物が設計通りの性能を出すことを確認するための試験用の部分モデルを作成した(図 4.22)。この 部分モデルは、特殊鋼メーカ2社に依頼し、極低熱膨張のスーパーインバーの開発を行い(スーパーインバー (Fe-Ni-Co)の組成を含有量を0.1%単位で調整し、熱膨張率が0±5×10⁻⁸/Kといった画期的な特性を得る ことに成功した)、この材料を用いたものである。熱変形の計測に用いる治工具もすべてゼロ膨張スーパーイ ンバーを用いて製作し、計測はJAXA 構造・機構グループ(筑波)の協力を得て、除振機構を設けたゼロ膨張 セラミック製定盤(材質:NEXCERA)を、温度0.1 湿度1%で制御可能な恒温恒湿室内に設置し、その定盤 上に供試体およびレーザ変位計を設置して行っている。

将来、ミッションに選定された場合の開発フェーズに対しても、具体的な開発・検証計画とリスク対策を十 分に検討している。「小型 JASMINE」の多くのコンポーネントは BBM、EM、PFM の順に試作・テストす るが、(i)~(iv)のコンポーネントについては BBM の前に部分試作モデルを作り、問題点の洗い出し、対策を 行う。具体的な複数候補の実現案のトレードオフも検討済みである。特に、最優先すべき (iii) と (iv) について は、すでに BBM レベルの試験を開始しており、2015 年度からは (i)の光学調整の検討も開始した。

4.4.11 「Nano-JASMINE」の進捗状況と国際協力

「Nano-JASMINE」に関する目的、意義、仕様、期待される科学的成果等は4.4.1 章で記述した通りである が、「Nano-JASMINE」の検討・開発は、2003 年から衛星バス部に関しては東京大学工学系研究科・中須賀研 究室が、ミッション部開発やデータ解析、科学的成果などの検討は国立天文台、京都大学等が主に担当し、共 同で進めてきた。2010 年には衛星の打ち上げ実機(フライトモデル)が完成している。現在は、東大工学部のク リーンルーム内で、衛星の機能維持やその確認のための試験を繰り返しながら、打ち上げを待っている。打ち 上げはウクライナのサイクロン4 ロケットを、プラジルのアルカンタラ射場から打ち上げる予定であるが、ウ クライナの政治情勢やプラジルの経済情勢の影響で遅れており、ESA の科学衛星のピギーバックとして 2017 年末頃に ESA が打ち上げる検討が進み出している。

衛星の運用に係るデータの送受信は、東京大学工学部7号館の屋上に設置した3mのパラボラアンテナで行う。 一方、科学データは通信量が多く、3m程度のアンテナでは十分なデータが取得できない。「Nano-JASMINE」 が国立天文台のプロジェクトであることから、国立天文台水沢 VLBI 観測所の10m アンテナで衛星のデータ 受信を行う協力が可能となり、衛星運用に必要な整備を行っている。

データ解析は、「Gaia」のデータ解析チーム (DPAC) と共同で行っている。この国際協力については、2007 年に上海で行われた IAU シンポジウム "A Giant Step: From Milli- to Micro- Arcsecond Astrometry"の席上 で「Gaia」チーム側から提案があり、2008 年には MOU を結び、相互訪問や国際学会の場を利用したミーティ ング等を重ねてきおり、継続中である。星像中心のデータから衛星姿勢と星の運動を同時推定するコア解析部 分は「Gaia」の AGIS(Astrometric Global Iterative Solution) に「Nano-JASMINE」の仕様を入力することで 適用可能であることは既に「Gaia」データ解析チームとの協力のもと確認できている。星像の画像データから 星像中心位置を約 1/200 ピクセルの精度で導出する部分は日本チームの担当で、精度の検証を行ってきている。

データの公開に関しては、「Gaia」のデータ公開及び検証に関する研究課題の予算が採択され (EU-FP7)、 そこに日本 (「Nano-JASMINE」のデータ解析責任者が所属する京都大学) も参画機関の一つとして参加して いる。この研究課題においては、「Nano-JASMINE」と「Gaia」の観測データをマージした合同のアーカイブ を将来作成することを検討しているとともに、データの検証 (validation) に関しての共同研究も行っている。 「Gaia」チームからは「Nano-JASMINE」のデータが「Gaia」データの validation にとっても大変重要である と認識され、「Nano-JASMINE」の実現が期待されているとともに、打ち上げ機会の模索に関しても「Gaia」 チームの全面的サポートを得ている状況である。

4.4.12 「小型 JASMINE」の体制

国立天文台のプロジェクト室である JASMINE 検討室が中心となり検討を 行っている。衛星開発経験者として技術 開発を専門とする支援員も雇用してい る。さらにミッション検討に関しては、 京都大学のメンバーがコアメンバーと なり、また科学的成果に関しては、国内 15 機関の多分野にわたる 25 名程度の 研究者でサイエンスワーキンググルー プを構成して検討を行っている。衛星 システムに関しては、JAXA研究開発 本部、宇宙研の工学の先生の協力を得 て、節目では検討のレビューを頂いて、 改善点などに関してアドバイスを頂い ている。

ミッション採択後は、宇宙研のもと に宇宙研の規定にも従って、図 4.23 の ようなチームを編成する。各サプシス テムのチームも編成し、チームリーダ



図 4.23: ミッションが採択された場合、その後の開発フェーズでの 「小型 JASMINE」の組織案。

とメンバを配置する。ミッション部の技術開発として重要な熱・構造系、電気系、光学系は、企業の経験者等 を国立天文台 JASMINE 検討室で特任専門員として雇用する予定である。宇宙研内の体制については、採択時 期と他ミッションとの人員の関係を考慮しながら、適切な方にサポートをお願いする。データ解析に関しては、 先行している「Nano-JASMINE」計画のデータ解析チームが引き続き担当するとともに、諸大学や統計数理 研究所、「Gaia」データ解析チームや USNO の位置天文研究者グループとの連携も行うなどして体制強化を図 る。マネージメント、システム、構造系、光学系、熱制御系、電気系、検出器・フィルタ、姿勢制御系、推進系、 通信系、運用、解析・公開系、サイエンスの 13 の work package に分けて、WBS を作成して進捗を管理する。

4.4.13 準備状況と今後について

イプシロン搭載宇宙科学ミッション(従来の小型科学衛星)の公募(2014年2月締切)に対して既にミッション提案を行うことができた。最終候補には残らなかったが、明確な課題を与えられるとともに、一定の評価を得ている。その課題の解決の見込みもたってきており、次の公募に備えて準備を行ってきている。なお、2009年度から今年度まで、主に宇宙研の競争的資金である戦略的開発経費により小型 JASMINE の技術的検討を行っている。科学的成果の検討は、科研費基盤A(郷田代表)により、2011年度より検討を行ってきた。

4.5 WISH

4.5.1 WISH 計画の目的と意義、位置づけ

WISH 計画は、銀河宇宙史の解明に残された最後のフロンティアである赤方偏移 z = 8 - 15 (宇宙年齢 3-8 億年)、とくに赤方偏移 z = 10 を越える初期宇宙の銀河を多数検出し、「初代銀河」というべき天体の形成過程を解明することを目指す野心的な計画である。2015 年度に行われた戦略的中型ミッション公募では選出されなかったが、今後、WISH 計画で以下に議論する科学目的の達成に向けて引き続き将来のミッション検討を進めることが期待される。

すばる望遠鏡など地上大型望遠鏡そしてハッブル宇宙望遠鏡などの活躍により、人類は「宇宙史の発見」と も称することもできる 130 億年にわたる宇宙における天体形成ならびに構造形成の過程を俯瞰的に観測するこ とに成功してきた。宇宙年齢の実に94%を遡って天体構造の形成過程が解明されつつあることは現代科学の たいへん大きな成果といえる。そして、WISH が挑もうとするフロンティアは、宇宙再電離の完了時期を跨い でさらに初期の宇宙における、初代銀河と言うべき天体の形成と進化の解明である。宇宙再電離現象は、宇宙 の熱史において、z~1000の中性化以降に生じた最大かつユニークな変化であり、宇宙で最初期の天体形成そ のものの過程を反映していると考えられている。宇宙再電離は赤方偏移 z = 6 - 7 付近ではほぼ完了したこと が知られており、また、宇宙背景放射の偏光度から求まる自由電子の柱密度から、この電離の過程はおそらく z = 10 以前に遡って始まっていたものと考えられている。最初期の宇宙で天体形成がどのように進んだのか、 また、その結果、いつ、どのようにして宇宙の再電離が行われたのかを解明するためには、現在のフロンティ アを超えて、少なくとも z = 15 付近まで天体の観測を行うことが必要である。WISH 計画では、まさにこの ような初代銀河の研究をその主たる目的としている。赤方偏移 z = 8 より初期の宇宙の銀河については、水素 ライマン α線 (波長約 0.1216μm) 以下の紫外線放射は銀河間の中性水素ガスによる吸収のため、ほぼすべて吸 収され てしまう。このような初期の宇宙における天体からの赤方偏移した放射をとらえてその性質を解明する ためには、波長1-5µmの近赤外線波長域の観測が必要不可欠である。ところが、この波長帯においては、地 上からの観測は地球大気の夜光および熱雑音によって、著しい感度の低下を被る。また、初代銀河は数密度の 点で非常に希少な天体であり、とくに赤方偏移 z = 10 を越える天体の探査には広視野での観測が必須である。



図 4.24: WISH 計画

282

そこで、適切に冷却した衛星によるスペースからの観測を実現し、地上からでは達成が困難な高感度を得ることによって、ユニークかつ大きな成果を上げることができる。さらに、視野30分角という広視野観測機能により、これまでにないサーベイパワーを達成し、これによって初期宇宙における広範な探査観測を実現できる。

[これまでの日本の天文学の成果との関係]

すばる望遠鏡はその大集光力と他の大型望遠鏡にないユニークな広視野観測能力によって初期宇宙の天体観 測研究において世界をリードする成果をあげてきた。現在でも赤方偏移 *z* ~ 7 の Lyα 輝線銀河をはじめ、赤方 偏移が確認された最も遠方にある銀河の多くは、すばる望遠鏡により検出されたものである。WISH は、冷却 スペース望遠鏡によってはじめて達成される近赤外線での高感度と、すばる同様ユニークな広視野観測能力を 併せ持つことにより、日本の光赤外天文学がすばる望遠鏡で挙げてきた大きな成果をさらに時代を遡り初代銀 河の形成期まで着実に拡大しようとするものである。また、スペース近赤外線観測としては「あかり」による 系統的な観測が行われてきた。WISH 計画は、より大口径の近赤外線広視野に特化した計画として「あかり」 の成果も大きく発展させるものでもある。

[国際的位置付け]

2020年代中盤にかけては、国際的にも、次期の光赤外大型装置が本格稼働する時期に当たる。とくに、ス ペース観測では JWST 望遠鏡が 2018 年打上予定で少なくとも5年の観測期間での運用が見込まれ、これに よって光赤外観測天文学は検出感度、解像度、近・中間赤外線という点で革新的な段階に進むだろう。一方、 地上では、2020年代前半の完成を目標に超大型望遠鏡(ELT)少なくとも3台の建設が始まりつつあり、TMT, GMT, E-ELT が 2020 年代初頭に稼働し、大集光力、大口径、補償光学などを活かした、これも革新的な高 感度観測と詳細観測が実現する。最先端観測装置としての ELT の稼働期間は、少なくとも 2020-2040 年の期 間までは続くだろう。一方、とくに暗黒エネルギーの解明など精密宇宙論の分野を中心に広視野での大規模な サーベイ観測を実現する計画が推進または検討されている。日本では、すばる望遠鏡の可視光超広視野撮像装 置 HSC、2018 年にも稼働が期待される超広視野分光装置 PFS 計画があり、2020 年代初頭までには一定の成 果を挙げることが期待されている。米国では、有効口径 6.5m に相当し非常に広い視野で南半球でのサーベイ 観測を実現する LSST 計画が始まっており 2020 年代前半に本格稼働が見込まれる。また、欧州では、スペース 計画としてとくに弱い重力レンズ効果と銀河クラスタリングを用いて精密宇宙論を行うことに特化し、15000 平方度の撮像・分光観測を行う Euclid 衛星計画が進んでおり、2020-2021 年に打上が予定されている。さらに 米国では、2025 年頃の打上を目指す WFIRST 計画がある。これらの計画は、宇宙論研究を科学目的の柱とし て最適化されたものであるが、一方、広視野深宇宙探査という観点でもこれまでにない巨大なデータを供給す ることになる。

これらの計画の中にあって、WISH 計画は、波長 1-5 μ m、とくに 2 μ m より長い波長で広視野スペース観測を 実現する点でユニークであり、上記の全ての計画と相補的でありかつ親和的な計画を目指すものである。Hubble 宇宙望遠鏡と Spitzer 宇宙望遠鏡はともに数分角の視野を持つが、これらは波長 2 μ m 以下と以上で非常に相乗 的な成果を挙げている。2020 年代には、Euclid/WFIRST/Subaru/LSST と WISH が同様なシナジーを発揮 することを期待している。WISH が主目的とする z = 8 - 15の銀河探査では、まさに WISH こそが最適化さ れた計画ということができ、z = 10を超える天体の探査や天体物理観測に非常にユニークな能力を持つことに なる。また、WISH の特筆すべき能力として、広視野でユニークなターゲットを JWST や ELT の詳細研究に 供することも挙げられる。JWST/ELT の分光感度に匹敵する撮像感度での観測を行うことで大きな相乗効果 が期待できる。

[これまでにない近赤外線広視野深宇宙観測]

強調すべきこととして、WISH はとくに 2µm より長波長でこれまでにない広視野の非常に深いサーベイ観 測を行うことができる。米国 JWST 衛星の近赤外線装置はやはり 5µm までの超高感度観測を実現するが視野 は数分角に限られる。WISH 計画が実現すれば、2µm より長波長帯での広視野のサーベイを行う望遠鏡として 2020 年代の計画の中で唯一無二の存在となる。また、初代銀河の研究のためには多数回露出による深い観測を 実施するため、同時に変光天体の観測も重要な科学目的となる。初代星超新星の検出や高赤方偏移の高光度超 新星などの検出も 2020 年代の重要な課題である。特に、Ia 型超新星を用いた精密宇宙論研究において、WISH はその波長帯域により、これまでにない観測研究を行うことができる。

第4章 スペースプロジェクト

| フィルター | 中心波長 λ_0 | 半値全幅 $\Delta\lambda$ | ピーク比 50% 波長 | $R = \lambda_0 / \Delta \lambda$ | |
|-------|------------------|----------------------|-------------|----------------------------------|-------|
| | $\mu { m m}$ | $\mu{ m m}$ | $\mu{ m m}$ | | |
| F104 | 1.040 | 0.280 | 0.900 | 1.180 | 3.714 |
| F136 | 1.360 | 0.360 | 1.180 | 1.540 | 3.778 |
| F178 | 1.774 | 0.470 | 1.540 | 2.010 | 3.777 |
| F232 | 2.320 | 0.620 | 2.010 | 2.630 | 3.742 |
| F303 | 3.030 | 0.800 | 2.630 | 3.430 | 3.788 |
| F397 | 3.965 | 1.070 | 3.430 | 4.500 | 3.706 |

表 4.7: WISH 広帯域フィルター基本案

| | 探查面積 | 5σ 限界等級 | 使用フィルター |
|-------------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|
| | deg^2 | AB 等級 | |
| UDS (Ultra Deep Survey) | 100 | 28 | F104,F136,F178,F232,F303 |
| | 27 | F397 | |
| UWS (Ultra Wide Survey) | 1000 | 25 | F104,F136,F178 |
| | 24.6 | F232,F303, F397 | |
| ExS (Extreme Survey) | 0.24 | 29.4 | F104,F136,F178,F232,F303,F397 |

表 4.8: WISH サーベイ基本計画

4.5.2 WISH の目指すサイエンス

WISH サーベイデザイン

WISH は広視野新宇宙赤外線撮像サーベイに特化した計画である。ここでは、まず WISH のサーベイデザインについてまとめる。まず、基本フィルタ案を述べ、これを用いて行う Ultra Deep Survey, Utra Wide Survey,



図 4.25: WISH サーベイ案とこれまでの近赤外深宇宙サーベイとの比較

Wxtreme Survey について記述する。WISH 広帯域フィルター基本案は、多波長測光値を用いた遠方銀河の検

出に最適化された 6 枚のフィルターから成る(表 4.7)。ほぼ一定の波長分解能 R で、波長 0.9 4.5µm を隙間なくカバーする。また、従来の地上観測との比較や測光校正の利便性を考慮し、地上観測で用いられてきたフィルターの波長範囲とできるだけ近い構成とする。

WISH サーベイ計画基本案は、WISH UDS (Ultra-Deep Survey)、WISH UWS (Ultra-Wide Survey)、WISH ExS (Extreme Survey) からなる (表 4.8)。 UDS は、波長1 5μ m 帯で 28 等 AB (5σ) 100 平方度の探査を 行なう WISH ミッションの基幹的探査である。z = 8 15の初代銀河を発見しその光度関数を精度良く測定す る他、広い波長帯域で初代銀河の SED を測定し、その物理的諸性質も明らかにする。同一視野を多数回(波 長により異なる)観測して目標の限界等級に到達するが、それを適切な時間間隔で実施することで Ia 型超新星 の検出も行ない、それによる宇宙の膨張則とダークエネルギーの測定も行なう。なお、最長波長の F397 フィ ルターでは比較的大きな自然背景光雑音の影響で感度が悪くなると予想されるが、一方で F397 フィルターは、 短波長のフィルターで検出された天体の同定や SED 測定に主として用いられるため多少浅い検出限界で適応 しうる。そこで、限界等級を 27 等 AB(5σ)と規定している。探査天域は、黄道光による背景雑音が最小とな る黄極付近を中心(80%程度)とし、すばる望遠鏡HSC戦略観測など可視光多波長資産のある天域(天の赤 道付近)を20%とする基本案を検討している。これに対して、UWSは、WISHの広視野を活かし、1000平方 度の超広視野探査を 25 から 24.6 等 AB (5σ)の深さで行なう。これにより、明るいが非常に数密度が低い天体 を発見することができる。主要な科学目的として、z > 8の最遠方クェーサー検出による巨大ブラックホール形 成メカニズムの解明が挙げられる。UDS とともに、深さと広さの観点で、3-4µm 帯で極めてユニークな探査 となり、幅広い天文学に寄与する。最後に、ExS は、1 視野のみを限界まで深く観測する探査である。JWST で可能な広視野探査と同程度の深さ 29.4 等 AB (5σ)で、10 倍程度の広さの探査となる。WISH と JWST で フィルターセットが異なる場合、UDS で測定する初代銀河の光度関数の明るい側と JWST で測定する暗い側 を接続する際のキャリブレーションという目的も重要となる。

初代銀河

深宇宙探査画像から遠方銀河を検出する標準的な手法として、ライマンブレイク法がある。図 4.26 は、z = 9, 12,15の銀河の予想スペクトルと WISH 広帯域フィルターセット案を示している。WISH 広帯域フィルタを組 み合わせることにより、z=7 付近から 18 付近に至る幅広い赤方偏移範囲の銀河をサンプルすることができる。 なお、銀河系内の暗い褐色矮星の混入は最長波長 F397の測光により取り除くことができる。



図 4.26: 赤方偏移 z = 9,12,15 の星形成銀河の予想スペクトル

WISH ミッションの最も重要な目的は、宇宙再電離期をまたぐ z = 8 - 15の銀河の光度関数を測定することである。銀河の光度関数は Schechter 関数の典型的光度 M_* 、数密度規格化定数 Φ_* 、暗い銀河のベキ指数 α という 3 つのパラメータで表されるが、HST を用いた $z \sim 10$ までの深宇宙探査を総合した結果からは、おお

むね高赤方偏移ほど Φ_* は小さく、 M_* はあまり変化しない「 Φ_* 進化」が支持される結果が得られている。ただし不定性も大きく、現時点で「 Φ_* 進化」と「 M_* 進化」のいずれかに結論するのは早計と言え、さらに初期の宇宙までこれを決定するのがまさにWISH ミッションの目的である。図 4.27 に、光度関数進化の2つの予想例と、28 等を検出感度とするWISH UDS および JWST で想定される探査の $z \sim 14$ での探査体積と限界等級を示した。これら逆 L 字型の左上領域が LBG を検出できる目安となる。JWST は非常に深い検出限界まで到達できるため、光度関数の暗い側の LBG を検出できるが、探査面積を稼ぐことができず、数密度の少ない明るい側の LBG を検出することは難しい。一方、WISH は JWST より浅い検出限界ではあるが、圧倒的に広い探査面積を活かし、 $z \sim 14$ の明るい LBG を検出することができる。したがって、JWST と WISH を合わせて初めて初代銀河の光度関数の全貌を明らかにすることができる。



図 4.27: WISH が解明する初代銀河光度関数

表 4.9 は、WISH UDS による LBG の検出期待個数を示す。この評価には、探査の限界等級に応じた統計 誤差のシミュレーションにもとづくライマンプレイク法の選択効率を考慮した。 $z \sim 9$ の銀河は 20-30 万個、 z > 10の銀河は約1万個という圧倒的な数となる。最古・最遠方である z = 15付近の検出期待個数は約 100 個である。上に述べたように、z > 10における光度関数は現時点で未知である。採用する進化モデルにより、 $z \sim 14$ の銀河の期待個数は、1個-1000 個と大きな違いが生じうるが、典型値である期待個数(100 個)を十分 な精度(統計誤差 10%)で見極めるためには、まさに WISH UDS のような 100 平方度の探査が必須であり、28 等の検出限界、高感度を達成しうる黄道光背景雑音が最小となる黄極を中心とする天域の観測が必須である。

WISH ミッションは、z = 8 - 15の銀河を単に発見するだけに止まらず、その物理的諸性質の導出による初 代銀河の天体物理学をも目的とする。たとえば、HST のデータだけでは銀河の総星質量などを決めることが できない。波長 2µm 以上のデータを加えて初めて、紫外線スペクトル勾配 β ($F_{\lambda} \sim \lambda^{\beta}$)と水素バルマーブレ イクを測定することができる。 β は、銀河の星種族、星形成継続時間、星間塵減光等の情報を含んでおり、天 体物理学的重要性がある。この振る舞いを調べることにより、初代銀河の星形成活動や塵粒子生成についての 貴重な情報が得られる。また、重元素量の極端に少ない始原的な星種族の場合、 $\beta < -3$ になると予想されて いる。初代銀河に含まれる重元素は初代星に起源を持つと考えられ、 β の測定により、初代星による重元素汚 染の様子にまで研究を進めることができる。また、水素バルマーブレイクは、年齢1億年以上で総星質量の主
| T.O. NIDII | 4.5. | WISH |
|-------------------|------|------|
|-------------------|------|------|

| モデル | F104 Dropout | F136 Dropout | F178 Dropout | Reference |
|-----------|--------------|---------------|---------------|---------------------|
| | (8 < z < 10) | (10 < z < 14) | (14 < z < 18) | |
| *進化モデル 1 | $246,\!940$ | $30,\!647$ | 1,843 | Bouwens et al. 2015 |
| M*進化モデル 1 | 370,190 | 8,188 | 3.8 | Ishigaki 2015 |
| 流体計算モデル | 142,560 | 3,016 | 2.3 | Shimizu et al. |
| 準解析的モデル | 94,414 | 5,138 | 59 | Kobayashi et al. |
| *進化モデル 2 | $233,\!170$ | 8,561 | 107 | IShigaki 2015 |
| M*進化モデル2 | 304,880 | 16,104 | 69 | Iwata 2015 |

表 4.9: WISHUDS による初期宇宙銀河検出期待数

要な担い手となる小質量星からの寄与の有無で生じ、その測定から星形成継続時間や総星質量への強い制限を 得ることができる。ダークマターハロー中で銀河が形成し進化すると考えると、ダークマター質量当たりの星 形成効率の時間進化の有無は、銀河形成進化論において本質的な重要性を持つ。WISH では、質量集積の進む ダークマターハロー中でバリオンがどのように進化し、どのように星形成が進展してきたかを z ~ 10 まで追 うことができる。

WISH ミッションが UDS で目指す 28 等 AB という検出限界は、TMT 等の地上 30m 級望遠鏡や JWST によるフォローアップ分光の感度限界と非常に良くつり合うことは特筆に値する。例えば、直径 0.2 秒角の開口、波長分解能 R=400、10 時間の積分で到達する TMT の近赤外線分光限界は、28 等 AB (3σ) である。また、WISH で検出できる 28 等 AB より明るい z > 7 の銀河の持つ酸素輝線は、JWST により高い S/N で分光検出することができる。このようなフォローアップ分光により、初代銀河の物理的諸性質をさらに良く理解することができる。一方、JWST がその深宇宙探査で検出する > 30 等 AB の天体は、近い将来の分光装置では感度的に検出不可能である。JWST 運用期間の延長の可能性を考慮し、シナジーを高めるためにも、WISH のできるだけ早期の実現が望ましい。また、WISH で検出できる LBG は、その時代で最も明るい銀河、最もハロー質量の大きな銀河であると考えられ、強くクラスタリングしていることが予想される。再電離期のそのような銀河の密集領域では、銀河からの紫外線により大きな電離バブルが形成される。2020 年代に稼働する電波望遠鏡(LOFAR、SKA)による中性水素 21cm 空間分布と、WISH による LBG 空間分布の相互相関解析を実施することで、実際に LBG が電離光源かどうか検証することができる。

初代星それ自体 (~40 等 AB)を直接観測することは 2020 年代の観測装置でも不可能であるが、そのガン マ線バースト (GRB) や超新星爆発は十分な明るさを持つ可能性がある。例えば、~200 太陽質量の初代星は 対不安定超新星爆発を起こし、それは赤方偏移により波長 1-5 μ m で明るく観測されることが予想されている。 また、GRB が z = 20 で生じた場合、バースト後 15 分で 23 等程度の残光光度が予想される。また、初代星超 新星とは異なるカテゴリに属するが、爆発と星周物質との相互作用などで明るくなると考えられている高光度 超新星爆発も z > 10 でも検出できる。WISH では Euclid と WFIRST での期待個数を大きく超え 10 個程度 検出できると期待される。これら大質量星起源の超新星爆発の発生率を測定することは、初期宇宙の星形成率 の推定とともに、恒星初期質量関数の測定にもつながる。これは初代星形成理論への強い制限となり、非常に 重要である。

Ia 型超新星

遠方 Ia 型超新星による距離の測定は、宇宙が永遠に膨張し続けるという事実だけではなく、宇宙が加速膨脹しているという驚きの発見をもたらした。2020年代以降には地上、スペースの両方からさらに大規模な探査による精密測定が計画されている。WISHによる広視野深宇宙探査により、この宇宙膨張史の精密観測にも挑みたい。

距離測定に Ia 型超新星を使うためには静止系で約 60 日間に渡ってその光度曲線を少なくとも 3 つのフィル ターバンドで観測する必要がある。これは、z = 1 では、観測者系で 120 日、z = 2 で 180 日にあたる。Ia 型 超新星は、爆発から約15日(静止系)かけて最大光度になり、約60日後までに最大光度に比べ約2等級暗くなる。探査の最適化は、この光度曲線を正確に推定できるよう十分な数の観測点のサンプリングと測光精度を保ちつつ、より多くの超新星を発見、追尾できるように、できるだけ広範囲を探査するという要求を同時に満たす必要がある。初代銀河検出を主目的として立案された UDS は、高赤方偏移の Ia 型超新星の探査にも大きな成果を期待できるものである。UDS では目的の検出限界に達するため、同一領域を繰り返し観測する。Ia 型超新星探査について、初代銀河探査を主目的とする UDS の黄極方向の約80平方度を探査領域とし、各視野を7から14日毎に(フィルタ別に最適化する)最長240日/年の期間内に繰り返し観測するというシミュレーションを行った。その結果、これを5年間実行すれば、約7000個のz > 1超新星を検出することができると 試算している。特に、1.7 < z < 2.4 は、他の計画では及ばない赤方偏移であり、WISH ミッションによる Ia 型超新星探査を他の追随を許さないユニークなものにすることが可能である。WISH による Ia 型超新星観測によって距離は、系統誤差、赤方偏移誤差を勘案しても、z = 1.5では 0.8%の精度で求めることができる。これは、WFIRST の超新星観測と比肩するレベルである。さらに、WFIRST では観測できない、1.8 < z < 2.5の範囲では 0.9 - 1.5% の精度で求めることができ、極めて重要な貢献となる。

銀河進化

銀河形成史を解明する上で、銀河系の 100 分の 1 程度(10⁹太陽質量)の星質量を持つ矮小銀河(ビルディング・ブロック)から現在の成熟した銀河まで、いつどのように質量を集積してきたかを知ることは必須である。この目的には、銀河の星質量を比較的忠実に反映している銀河静止系可視光(~0.5 μ m)での測光観測が必要であるが、z > 4 では地上観測では圧倒的に不利な波長 2 μ m 以上での観測が要求される。そこに WISH によるスペースからの波長 5 μ m までの深い撮像観測の価値がある。WISH で検出可能な銀河の星質量を評価すると、z = 8 に至るまでビルディング・プロック規模の銀河を捕えるには、UDS の深さがちょうど適当であることがわかる。UDS の 100 平方度の探査領域は、現在のかみのけ座銀河団のような大質量銀河団の祖先が、各赤方偏移に 100 個程度入る体積に相当しており定量的な解析に十分である。以上により、WISH は星形成と合体という 2 つの過程を切り分け、さらに形態と環境との関係に注目しながら、銀河の星質量成長の全貌を太古の構成単位天体から現在の成熟した銀河まで一貫して明らかにすることができる。

広視野赤外線探査の天文学一般への波及効果

主たる科学目的である初代銀河の研究のために WISH が行なう波長 1-5µm 帯でのこれまでにない超広視野 深宇宙探査データを用いて、他にも多くの研究を行うことが可能である。特に 3-4µm 帯の超広視野深探査は 非常にユニークな探査パラメータとなっている。実際、地上観測や多波長観測と連携することによる相乗効果 は非常に大きいだろう。日本では、2020 年までにすばる望遠鏡 HSC による広域観測が行われるが、とりわけ WISH-UDS と深さとして対応しうる HSC 戦略枠 DEEP 観測領域(COSMOS, SXDS/UDS 領域など天の赤 道で 21 平方度、ELAIS N1 天域7 平方度)を共通の観測領域とする利点は非常に大きい。黄極に比べて背景 光輝度は最悪 3 倍程度高くなり検出限界が最大 0.5 等程度浅くなることが予想されるが、WISH-UDS の一部 の観測時間(20%)を資産が最も大きい多波長深宇宙探査領域にあてることは大きな意義がある。さらに、初 代銀河研究のためのミッション要求で規定される WISH の広視野赤外線観測能力は、潜在的には、多種多様な 課題に応用が可能である。たとえば、JASMINE 計画でも検討されている銀河系バルジの位置天文学や、太陽 系天体の水氷探査なども重要な課題である。地球の海の起源において彗星や小惑星等に含まれる水が重要な役 割を果たしたとする仮説の検証には太陽系小天体の含水率を測定する必要があるが、WISH では、水氷の 3µm 帯の強い吸収を利用した含水率測定が可能であり、直径 300 km 程度の小型天体に対しても数 AU 付近まで観 測できる。このような探査は、対象天体のサイズおよび期待されるサンプル数の観点で、全く前例の無い極め てユニークで大規模なものである。

| 4.5. | WISH |
|--------------|----------|
| 1 .0. | · · ±~±± |

| 主要項目 | 主要諸元 | 備考 |
|--------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| | | |
| 打ち上げ時期 | 2020年代以降 | |
| ミッションライフ | 5年以上 | |
| 打ち上げロケット | H-IIA を想定 | |
| フェアリング | 4/4D-LC 下段対応 | |
| 衛星外形寸法 | $3.3m \ge 5.2m$ | 収納時突起部(恒星センサ)を含む |
| 質量 打上時 (WET) | 1.4t | |
| 軌道 | S-E L2 ハロー軌道 | |
| 消費電力 | 最大 1.2 kW | SAP 発生電力 1.6kW (BOL) 1.4kW (EOL) |
| 冷却 | 受動冷却(機械式冷凍機搭載なし) | |
| ミッション部 | | |
| 主鏡 | 1.5m ellipsoidal | |
| 副鏡 | 0.28m hyperboloid | |
| 第3鏡 | 0.41m ellipsoidal | |
| 斜鏡 | コールドストップ位置を兼用 | |
| 視野 | 0.2-0.7 度角 波長 1-5 µ m で回折限界 | |
| 焦点面スケール | 0.155 秒角 / 18 µ m(pixel) | |
| その他 | 斜鏡直進光を用いたオプション分光器 | |
| | (国際協力) | |
| 焦点面検出器 | HgCdTe 検出器 2048 x 2048 pix | |
| | 32 個 (134Mpix) 波長 0.9-5.3 µ m 対応 | |
| ピクセルサイズ | 1pixel=18 µ m を想定 | |
| フィルタ交換機構 | フリップ式交換機構 | |
| フィルタ数 | 11 filters + Cold Shutter | |
| 検出器駆動温度 | 40K | |
| バス部 | | |
| 太陽電池パドル | 衛星固定 2 翼 | $1.6 \mathrm{kW} (\mathrm{BOL}) \ 1.4 \mathrm{kW} (\mathrm{EOL})$ |
| サンシールド | アルミパネル+ MLI 30/30 層 | SPICA 検討ヘリテージ |
| 姿勢軌道制御系 | STT-IRU ストラップダウン型姿勢決定系 | |
| | RW 高精度姿勢制御系 | |
| | (トルクバランス型) | |
| 推進系 | 一液触媒式ブローダウン方式 | |
| | 推薬量 162kg 以上 | 504mm タンク 4 個 |
| | スラスタ構成 3N8 台 23N4 台 | |
| 通信系 | X-band (データ通信 16Mbps 要請) | |
| | S-band (衛星テレメトリ) | |
| BUS 内データ速度 | 50Mbps 以下 (Space Wire 使用) | |
| データレコーダ | 48GB x 2 Ka-band (32Mbps) も検討 | |

表 4.10: WISH 衛星の基本仕様案

4.5.3 WISH システム概要

WISH 衛星システムは、ミッションペイロード部、サンシールド、そして太陽電池パネルを含む衛星バスシ ステムから構成される。ミッション部は、口径 1.5m の主鏡、および、副鏡、斜鏡、第 3 鏡からなる光学系と焦 点面検出器、フィルタ交換機構、そしてこれらを支える構造体からなるシンプルな構成である。波長 0.9-5µm の近赤外線での高感度観測を実現するため、ミッション部は構造体からの熱放射雑音および検出器雑音が自然 背景光雑音を下回るよう適切に冷却される必要がある。擾乱回避、低寿命回避のため、機械式冷凍機は搭載せ ず、放射冷却による冷却を行う。衛星バス部は電源、姿勢制御、信号処理、通信、 2 次推進のサプシステムか

289

らなり、最大限、すでに確立している既存の技術を用いてこれを実現する。最適な熱環境を得るため、軌道は 太陽 - 地球ラグランジュ2点(SE-L2)ハロー軌道を基本案として採用している。ミッションライフタイムは、 宇宙線による検出器の劣化、バッテリなど機器の寿命から、正味5年の観測時間を基本としている。



図 4.28: WISH 衛星外観図

4.5.4 WISH 広視野撮像システム

図 4.29 に、WISH ミッション部の光学レイアウト基本案 (Yamada et al. 2010) を示した。これは、有効口 径 1.5m 主鏡 (ellipsoidal)、副鏡 (hyperboloid 280mm)、斜鏡、および第 3 鏡 (ellipsoidal 410mm)の 3 枚鏡からなる光学システムである。これにより、1000 平方分角を超える広視野において波長 1-5µm で、ほ ぼ回折限界の星像を達成する。主鏡が瞳となっており、実寸として最小となり製作性を高めている。斜鏡にあ いた穴付近に cold stop を設置することができ、余分な熱放射が焦点面に届くのを防ぐ働きも担う。

望遠鏡システムと組み合わされ、広視野撮像観測を実現するためのコンポネントが、フィルタ交換機構と焦 点面検出器部である。これらを合わせて、WISH 広視野撮像システムと呼ぶ。フィルタ交換機構は、多色での 撮像観測を目的に応じて効率よく行い、また、科学目的に特化したフィルタを切り替えて運用する上で必須の 機構である。WISH 衛星では、検出器ブロックごとのユニットに分かれたフリップ式フィルタ交換機構を採用



図 4.29: WISH 光学レイアウト基本案

4.5. WISH

している。広視野をカバーすると同時に80K低温での安定した耐久性の高い駆動を実現する仕組みであり、また、冗長性の面でも利点がある。

焦点面検出器として、2k x 2k 検出器を 32 個焦点面に配置する。宇宙で使用可能な波長 5µm まで高い感 度を持つ赤外線焦点面アレイには、JWST にも使用予定の Teledyne 社製 HAWAII-2RG 検出器を採用する。 80%以上の量子効率が得られ、読み出し雑音は 15e-以下(CDS の場合) 暗電流中央値 0.05e-以下(60K 以 下) full well 65000e-以上の性能を持つ。検出器に関しては事実上一社供給である。検出器クロック生成、デー タの読み出しおよび A/D 変換を行う非常にコンパクトな SIDECAR ASIC と呼ばれるエレクトロニクス・シ ステムを用いるが、こちらも低温・宇宙用品化が達成されている。SIDECAR ASIC は検出器チップとともに 焦点面近くに配置される。

焦点面検出器配置コンフィギュレーションの検討の前提としてフィルタ機構の概念について、固定式/交換 式の検討、さらには交換式の場合のホイール式、スライド式、フリップ式の概念を検討した。ホイール式は重 量・サイズ的に、スライド式は低温での潤滑の問題があり、成立性の見込めるフリップ式の交換機構を基本案 とした。最終焦点面における検出器の配置は、フィルタ位置におけるフィルタ配置の制約により決定される。 焦点面の構成として、上記 2k x 2k 検出器 8 個からなる一組を1 グループとし、これに対応して、各グループ のフリップ式フィルタ交換機構を配置する。交換機構は、それぞれ4 枚のフィルタを使用することができるユ ニットを3 段に組み合わせ、検出器あたり 12 枚のフィルタを交換して使用することができる。ただし、1 ス ロットはコールドシャッタが配置される。

4.5.5 WISH 望遠鏡システム

WISH 望遠鏡システムは、超低熱膨張ガラス製 1.5m 主鏡とその他光学素子を支える CFRP(炭素繊維強化 プラスチック)を基本部材としたトラス構造である。主鏡は、冷却荷重・打上荷重に適切に対応する主鏡保持 機構により支持される。主鏡を支持するフレームはメイントラスによりバス部上面から支持され、同時に フ レームに配置されるストラットにより光学ベンチ部をつり下げる形で支持する。第3鏡、斜鏡、焦点面パネル (検出器を配置)は光学ベンチ上に配置され、検出器用ラジエータ、ASIC/光学ベンチ用ラジエータは光学ベン チから支持される。光学ベンチ上の光学素子を覆うように副鏡筒が配置され、フィルタ交換機構は副鏡筒上に 配置される。

100K に冷却する 1.5m 主鏡を安定に保持することが WISH 開発の最も重要な課題である。このため、主鏡 の概念設計をすすめると同時に、これを保持する主鏡保持機構の検討を行った。主鏡保持機構の概念検討に当 たっては側面支持、裏面支持、また、接着方式およびクランプ方式など複数の案を検討した。地上での試験の 利便性、過去の衛星 (ISO 衛星) の実績などから、側面支持方式を採用し、また冷却に伴う熱荷重に対する成 立性からクランプ式を採用するに至った。この方式では、主鏡側面には強度保持のため表面を研磨した円柱状 の「テノン」構造を削りだし製作する。保持機構は、これに金のフォイル、鉄製の熱変形補償リングを挟んで、 INVAR 製の外部リングでクランプにより適切な強度で締め付ける構造である。金フォイルは特に主鏡硝子材 の表面の微小な幾何学的不完全性に対して、圧縮ストレスを均一化させる働きを持つ。熱変形補償リングは、 内側および外側から交互に切れ目が入っており冷却時にはこの有効厚みが変化して、外側の外部リングの収縮 を補償し、テノン構造にかかる応力をほぼ一定に保つ働きをする。このような主鏡保持機構について、有限要 素解析を行ってその成立性を確認した上で部分モデルとして保持機構試験モデルを製作し、冷却時の適切な振 る舞いを確認する試験を行っている。

WISH 望遠鏡の構造部材として、軽量かつ強度の高い CFRP を想定している。WISH 衛星では、常温(試験時、待機時、打ち上げ時)から、軌道上で約100K に冷却を行うため、低温での物性、また、常温から100K までの熱変化に対する変形の予測性についての検討を行った。また、試験時には冷却サイクルを経ることも想 定されるため、冷却サイクルに伴う強度、物性の変化も調べた。適切な積層配合の CFPR 部材を作成し試験を 行い、熱膨張係数 0.3ppm/K を実測値として得た。積層を最適化することにより、0.1ppm/K が可能である。 0.1ppm/K が達成できれば 200K の温度変化に対して 20ppm 程度の変化となり、2m の構造でも 40µm 程度 の変形となる。予測変形量に対して最適に設計することにより光学公差 (100-200µm) に対して十分小さい変 形量となる。同じ部材で吸湿変形も測定し、20ppm 以下となることを確認した。

一方、望遠鏡構造は、打ち上げ荷重に対して十分な強度と剛性を持つことが要求される。WISH 衛星の構造 をモデル化し予備的な構造解析を行ってその成立性を確認するとともに剛性を評価した。WISH 望遠鏡構造部 材として考えるゼロ熱膨張 CFRP 板材の引張強度は、冷却サイクル後で、約 450MPa = 45kgf/mm² である (2010 年度 WISH WG 実測値)。これに対して、圧縮強度は、引張強度の約 1/3 程度と推定される。したがっ て、WISH 望遠鏡 CFRP 部材の圧縮強度は、15kgf/mm² であると評価できる。これに対して解析モデルの最 大応力は引張荷重 1.1kgf/mm²、圧縮荷重 0.27kgf/mm² であり、荷重に対して十分な強度を有することが示さ れた。H-IIA-202 ロケットの剛性要求条件と、解析結果から得られた WISH 衛星システムの一次固有振動数 との比較を行ったところ、WISH 望遠鏡構造モデルは剛性条件を十分に満たすことが示されている。さらに振 動解析を行ったところ、正弦波振動条件に対して、0-100 Hz の全振動数の範囲において、過大な応答は見ら れず、衛星の強度に問題が生じないことが確認された。また、主構造に最大の荷重が生じる横方向の主共振点 (ベンディングー次モード)における応答は、ノッチングを行わない場合でも、主鏡部で 12G 以下となった。 主要部材に生じる応力も、引張 / 圧縮応力 4.6kgf/mm² となり、CFRP 構造部材の強度と比較して、構造は十 分な強度を有すると評価される。

4.5.6 WISH 衛星システム

WISH 衛星の構造(バス部)は、これまでの実績に基づく成立性の高い技術により構成される。バス部構造 様式の基本案としては、シンプルな構造で、ミッション系とのクリアなインターフェースを実現し、また台形 シリンダによる剛性確保が可能なシリンダパネル方式を採用している。RCS 燃料タンクは、366mm のもの を4個、シリンダ内に搭載可能である。また、リアクションホイール(RW)は4台を搭載。バス機器は、側 面パネルに配置される。現在の基本案での総質量は、推薬(97.5kg)を含め、約1.3t である。また、約10%の マージンを含め、衛星全体の消費電力は1.2kW となる。これを実現するためには、2m x 1.2m の太陽電池パ ネル4枚が必要である。これによる発生電力は、打ち上げ当初で1.6kW、ミッションライフタイム(5年)終 了時では劣化を考慮して、約1.4kW となり、定常観測時に200-400kWの余剰電力が期待できる。WISH 衛星 の軌道として、基本案は、太陽 - 地球ラグランジュ2点(SE-L2)ハロー軌道とする。この軌道は、太陽、地 球という大きな熱源を、衛星に対し常にほぼ同じ方向に置くことから、衛星の熱設計・熱管理において有用で ある。H-IIA は約3.2 t の衛星を太陽 - 地球ラグランジュ2点(SE-L2)ハロー軌道に投入可能である(Single Launchの場合)。

[電源系サブシステム] WISH 電源系サブシステムは、シャントデシペータ、電力制御器、バッテリ、NEA 制御器 からなる。太陽電池パドルは、2枚2翼、全面積 8.5m2のサイズとなる。発生電力 1.8kW(BOL)1.6kW(EOL) が得られる。 固有振動数は収納時 50Hz 以上、展開時 0.8Hz 以上が見込まれる。

[信号処理系サブシステム] 信号処理系サブシステムの構成は、衛星マネジメントユニット、ミッションデー 夕処理装置、Space Wire ルータ、テレメトリコマンド I/F モジュール、データレコーダからなる。DR は 48GB 容量 2 台を想定している。

[通信系サブシステムの構成案] WISH の通信系基本案としては、(1)ミッションデータ伝送回線:Xバン ド、(2)TT and C 回線:Sバンドとしている。地上局として主として考え得る臼田局は更新が予定されてお り更新計画の確定をもって WISH の通信システム案を確定する必要がある。ミッション提案に当たって基本案 としたのは、少なくとも 16Mbps の送信率が可能な場合の想定である。飽和出力電力が20W クラスのパワー アンプと+32dBi 以上のアンテナゲインを持つアンテナを組み合わせることで、16Mbps のミッションデータ を回線マージン 0dB 以上の状態で、200万 km の SE-L2 Halo 軌道上から、臼田局に伝送できることが見積も られる。比較のため、USC34m および、USC20m の場合も計算したところ、USC34m では、8Mbps の伝送率 とする場合、2.5dB の回線マージンが得られるが、USC20m では、6Mbps でマージン 0 となることがわかっ た。技術成熟度は TRL=8-9 である。WISH のデータ生成率は定常状態で約 3Mbps (50% 圧縮) である。臼田 局のデータ受信レートが 8Mbps を上回らない場合には、海外局などネットワーク受信が不可欠である。基本 4.5. WISH

案の S-X 系に対して、X バンドで 32Mbps のデータ転送を行う場合と S-Ka 系 (S バンドと Ka バンドを用い る場合)の検討も行っている。

[姿勢系サブシステム] 姿勢決定系は、光学センサ(恒星センサおよび焦点面ガイドセンサ)と伝搬用の慣性 センサ、およびこれらのデータを利用する姿勢推定フィルタからなる。慣性センサとして、Tuned Dry Gyro を用いた最も安定度が高いものを用い、光学センサとしては恒星センサに加えて、ガイドセンサとして、焦点 面の検出器の1部を非破壊で読み出し姿勢系にフィードバックする方式を基本案としている。これによって、 精度=0.07 秒角(3*o*)以下/1Hz 出力が達成可能な見込みである。ガイドの精度については、視野端の星像を 用いたシミュレーションを行って、どの波長帯でも十分な精度でガイドを行える恒星が十分な数視野中に期待 できることを確認している。

[二次推進系] 推進系方式としては、これまでにフライト実績の多い、1液推進系ブローダウン方式をベース とする。推薬量としては初期姿勢補足、軌道修正、トランスファ軌道上姿勢制御、SE-L2 軌道投入、L2 ハロー 軌道維持、ホイールアンローディング、故障発生時を合わせ、合計 97.5kg (1液推進系)と評価している。

[バス部構造および熱制御] バス部様式として、台形シリンダ + パネル方式を基本案として採用する。発熱量 評価、熱制御系機器構成、バス上面 I/F 温度要求を達成するための熱設計案も検討している。

4.5.7 WISH 熱解析

WISH の構造基本案をもとに熱解析を行っている。WISH 衛星は波長 1-5µm で、最大効率で高感度の観測 を目指している。また、多数回の露出の重ね合わせによるシグナル / 雑音比 (S/N 比) の十分な向上が達成さ れることも必要である。このため、深宇宙観測における個々の露出での背景雑音が、自然背景光のポアソン的 雑音で支配されている状況が必須である。このためには、検出器固有の雑音としての読み出しノイズと、暗電 流による雑音を十分小さくすることと、自然背景光以外の背景光雑音を極力小さくすることが必要である。検 出器暗電流を低減するためには、検出器を冷却することが必要である。主鏡、副鏡、斜鏡(表面) 第3鏡,メ イントラスは 100K、斜鏡(裏面) 副鏡筒(検出器バッフル) フィルタは 80K、検出器は 40K となる。

これに対して、必要な熱設計方針を策定し、衛星システムおよびミッション部の概念検討に反映させると もに、衛星全体の熱的成立性を確認することを目的として衛星全機の熱数学モデルを作成して、定常解析を行 い、ミッション部各部の温度が要求温度条件を満たすことができるか検討を行った。熱設計方針としては、サ ンシールドの設置およびバス・ミッション間の断熱を徹底し、外部からミッション部への熱入力を極力遮断す ることとし、ミッション部については、多段的な放射冷却方式により熱設計を行った。もっとも低温が要求さ れる検出器の熱制御には専用のラジエータを設け、また、検出器部への熱流入源となる光学ベンチ部および検 出器駆動エレクトロニクス(ASIC部)を熱的な次段として、これらを適切に冷却する ASIC/光学ベンチラジ エータを設けて積極的な放熱をはかる。ASIC 検出機の間のハーネスによる熱接続は可能な限り低減する。こ れらと断熱的に結合されるメイントラス、主鏡支持フレーム、サンシールドなどは、熱的には比較的高い温度 を許容する。このような考え方で、熱フローを制御した構造の概念を確立する。熱解析は WISH 基本案の構造 モデルおよびミッション部発熱条を考慮して、サンシールドに垂直方向のみから太陽光が照射する静的な環境 で行った。衛星バス部上面温度は 300K を仮定している。

これまで得られている解析結果によると、検出器温度が、要求温度 40K に対してマージナル (45.9K) であ り、また、副鏡筒の高温部が同 80K に対してマージナル (58-93.4K) であるが、他の部分は要求を満たしてお り、放射冷却に基づく熱設計の成立性を示している。副鏡筒は、検出器からみて冷却絞り、斜鏡の背後の第 3 鏡付近の温度が高く検出器近くでは要求を満たす温度となっている。検出器温度に関しては、メーカの評価値 に基づくと、 60K で暗電流雑音中央値が 0.05e-/s/pix, 45K では 0.005e-/s/pix となっており、感度要求から の要求値 0.05e-/s/pix、目標値 0.01e-/s/pix に対して、一定のマージンを達成していると評価できる。なお、 40K の場合の暗電流予測値は 0.003e-/s/pix である。

参考文献

- [WISH1] WISH Web Page http://http://wishmission.org/jp/index.html
- [WISH2] WISH ミッション提案書 第1版, 2012, WISH Working Group
- [WISH3] JAXA/ISAS 戦略的中型スペースミッション WISH 提案書, 2015 年 2 月, WISH Working Group
- [1] Yamada, T., Iwata, I., Ando, M., et al. 2012, SPIE, 8442, 84421A
- [2]Yamada, T., Doi, M., Goto, T., et al. 2010, SPIE, 7731, 77311Q

4.6 WFIRST

4.6.1 概要

20世紀後半の宇宙物理学での最大の発見は、宇宙 の加速膨張と系外惑星の発見と言われる。宇宙の加 速膨張の発見は、全く新しい物理を示唆しており、暗 黒エネルギーの存在や、重力理論の修正が提案され ている。系外惑星の発見は、これまで太陽系を唯一 の手本として発展してきた惑星科学に無限の研究対 象を開き、近い将来、宇宙に生命を天文学的手法で 探査するという全く新しい領域も開拓してゆく可能 性を秘めている。わずか20年足らずで、私たちの太 陽系とは大きく異なる多様な惑星系の存在が明らか になり、人類の世界観に大きな変革を迫っている。

そして現在、これらの分野は、宇宙物理の最重要 分野の一つに位置付けられており、多くの精密宇宙 論、系外惑星の大規模探査とキャラクタライゼーショ ンの観測計画が進められている。この分野における 日本の貢献は当初限定的であったが、最近は、すば る望遠鏡による大規模銀河サーベイの開始や、第二 の木星の直接撮像の成功や逆行惑星の発見、重力マ イクロレンズによる惑星発見など世界をリードする 分野も展開しつつある。

そんな中、NASA の Wide Field Infra Red Survey Telescope (WFIRST) は、2010 年発表の米国天 文宇宙物理の次期 10 年の計画を推薦する「Astro2010 Decadal Survey」²で、大型衛星計画の 1 位に選ばれ



図 4.30: WFIRST-AFTA 2.4m 宇宙望遠鏡の予想図。



図 4.31: WFIRST-AFTA 広視野カメラの視野。HST-ACS の 90 倍。WFC3 の近赤外チャンネルの 200 倍。 4k×4k pixels H4RG-10 近赤外検出器 (四角) を 18 個使 用。ピクセルスケール 0.11 arcsec/pixel、視野 0.28 平 方度。

た NASA の近赤外広視野サーベイ望遠鏡である。 主目的は、これら宇宙の加速膨張、系外惑星の精密観測及び 公募観測で、2024 年頃の打ち上げを予定している。2013 年からは米国国家偵察局 (NRO) より譲り受けた 口 径 2.4m 望遠鏡を利用する、WFIRST-Astrophysics Focused Telescope Assets (AFTA) コンセプト³(図 4.30) が再定義され、系外惑星の直接撮像を目的としたコロナグラフ装置の搭載が新たに検討されている。

ハッブル望遠鏡 (HST) と同じ 2.4 m という大口径に、近赤外で HST の 200 倍 (可視光カメラの 90 倍) の 0.28 平方度という圧倒的な広視野を持ち、これまでにない深さと広さの大規模サーベイ観測を可能にする (図 4.31)。この様な広視野とスペースでの安定した観測により、高銀緯方向の 2000 平方度を観測する事などで、バ リオン音響振動実験、弱重力レンズ実験、Ia 型超新星の観測により暗黒エネルギーと重力理論の検証をし、ま た、銀河系バルジ方向の高頻度観測により、重力マイクロレンズによる系外惑星探査を行う事で、系外惑星の 分布図を完成させる。コロナグラフ装置の搭載は、これまでにない精度での系外惑星の直接撮像を実現するだ けでなく、さらに将来における地球型系外惑星観測ミッションを実現するための重要な科学的および技術的ス テップとして位置づけられている。

この様に、WFIRST-AFTAは、上述の宇宙の加速膨張と系外惑星の精密観測の決定版とも言えるスペース ミッションで、この歴史的な計画に日本が参加する事は、非常に重要である。

²http://sites.nationalacademies.org/bpa/BPA_049810

³http://wfirst.gsfc.nasa.gov

4.6.2 WFIRST 仕様、科学目的、研究手段

WFIRST-AFTA は、口径 2.4 m の広視野可視光・近赤外線宇宙望遠鏡に広視野観測装置、面分光装置、そしてコロナグラフ観測装置を搭載し、宇宙論および系外惑星観測、近赤外サーベイを行う計画である。これら 装置の衛星上での位置、NRO より譲り受けた現存する望遠鏡、瞳の形状を図 4.32 に示す。現在の仕様をそれ ぞれ表 4.11, 4.12 に示す。



図 4.32: WFIRST-AFTA 望遠鏡と広視野装置・コロナグラフ装置の位置 (左)。外部バッフルを取り除いた望 遠鏡構造 (中)。複雑な瞳の形状 (右)。文献 [4] より。

| 観測モード | 波長範囲 | 波長分解能 | 感度 * | 視野 | 空間分解能 |
|------------|---------------------------------|----------------|---------------------------------|---------------------|------------|
| 撮像 | $0.76\text{-}2.0\mu\mathrm{m}$ | ZYJH+F184,W149 | $H_{AB} \sim 27.1 \mathrm{mag}$ | $0.281 \rm deg^{2}$ | 0.11"/pix |
| 分光 (grism) | $1.35\text{-}1.95\mu\mathrm{m}$ | $R \sim 600$ | $AB\sim 20.4{\rm mag}$ | $0.281 \rm deg^{2}$ | 0.11"/pix |
| 分光 (IFU) | $0.6\text{-}2.0\mu\mathrm{m}$ | $R \sim 100$ | $AB\sim 24.2{\rm mag}$ | $9as^2$ | 0.075"/pix |

表 4.11: WFIRST 広視野カメラの主な仕様。T~120 K。 *1000sec. S/N~10.

| 観測モード | 波長範囲 | 波長分解能 | コントラスト | IWA | OWA | 空間分解能 |
|-------|-------------------------------|-----------|-----------|------------------------------------|-------------|------------------|
| 撮像・分光 | $0.4\text{-}1.0\mu\mathrm{m}$ | $R\sim70$ | 10^{-9} | $0.10\text{-}0.25"@400\mathrm{nm}$ | 0.75 - 1.8" | $17\mathrm{mas}$ |

表 4.12: WFIRST コロナグラフの主な仕様。T~150K。

総観測時間 6年のうち、(1)2.4年は宇宙論、(2)1.2年は重力マイクロレンズ系外惑星探査、(3)1年は コロナグラフによる系外惑星の直接撮像、(4)1.4年は共同利用 (公募)として運用される予定である。

(1)宇宙論観測は、高銀緯2000平方度の銀河赤方偏移探査(high-latitude survey:HLS、図4.33)等により、弱重カレンズ実験、赤方偏移空間分布実験、バリオン音響振動実験を行い、さらに5-9平方度の連続測光により2000個以上のIa型超新星を発見しIFUによる分光観測をする。これらの手法で、暗黒物質の構造進化と宇宙の加速膨張を同時に見積り(図4.34)、暗黒エネルギーと修正重力理論を区別する。スペースでの非常に安定した高分解能、高感度により地上観測を凌駕する。

296





図 4.33: 高銀緯領域サーベイ (HLS) での高赤方偏移銀河数の 累積分布。高赤方偏移銀河は、JWST や TMT で詳細な追観 測が可能。初期銀河の理解には、広視野の WFIRST-AFTA と大口径の JWST や TMT とのシナジーが非常に強力であ る。文献 [4] より。

図 4.34: WFIRST で期待される、暗黒エネル ギーの状態方程式パラメータ (w, dw/da) の制 限の予想。(w = -1, dw/da = 0の場合が宇宙 定数に対応) 文献 [4] より。

(2)マイクロレンズ系外惑星探査は、銀河系バルジ方向の 2.8 平方度を 15 分おきに 72 日間連続観測し、 これを 6 回合計 432 日間行う。高い測光精度と 24 時間連続高頻度観測のおかげで、比較的長軌道長半径 (0.2-数 10 AU)の数倍月質量の惑星まで感度があり、太陽系で例えると水星以外全ての惑星が検出できる (図 4.35)。 約 3000 個の惑星を検出し、うち約 200 個は地球質量以下と期待される。また、主星を持たない浮遊惑星も火 星質量まで検出可能である。Kepler が地球軌道より内側のハビタブルゾーン (HZ)内縁部に感度が有ったのに 対し、WFIRST は HZ 外縁部をカバーし互いに相補的である。これらを合わせる事で、HZ の地球型惑星を含 むほぼ全ての種類の惑星頻度が求まり、惑星形成研究に非常に重要な情報を与える。



図 4.35: WFIRST-AFTA によるマイクロレンズ系外惑星探査の光度曲線のシミュレーション。左図:0.36太 陽質量の星の周り 2.2 AU をまわる水星質量の惑星。右図:0.1 地球質量の浮遊惑星。文献 [2] より。

(3)現在、オカルティングマスクコロナグラフ (OMC) 方式が最優先として選ばれて開発が進んでいる。 仕様を表 4.12 に示す。これにより、30 pc 以内の明るい星約 200 個の周り 3-10 AU で、巨大ガス惑星はもとよ り、初めて巨大氷惑星や超地球を直接撮像により 10 数個発見する (図 4.36 左)。さらに既知の惑星 10 数個を直 接分光により大気などの詳細観測をする (図 4.36 右)。またデプリ円盤の直接撮像も計画されている。現在の系 外惑星研究に大きな成果を上げるだけでなく、将来八ビタブルな地球型惑星を直接観測するスペースミッショ ンへの技術実証の役割も果たし、非常に重要である。



図 4.36: WFIRST-AFTA コロナグラフでの惑星直接検出(左図)とスペクトル観測(右図)の例。質量の違い(木星と海王星)と金属量の違い(太陽金属量 10倍)による惑星スペクトルの変化。黒線は木星質量で太陽金属量、緑線は木星質量で3倍の太陽金属量、青線は海王星質量で10倍の太陽金属量。文献[3]より。

(4) 近赤外線でのこれまでにない大口径、広視野、高分解能望遠鏡なため、様々なプロジェクトが公募研 究として提案されるだろう。ダストの影響が強い銀河系中心や銀河面のサーベイ、星形成領域の星の質量関数、 固有運動、近傍銀河、高赤方偏移 QSO/銀河、重力レンズ、宇宙再電離の研究などが考えられており、日本の 研究者の応募も期待されている。

4.6.3 国内外のステータスと相手先との合意の現状

もともと WFIRST 計画は米国 NRC による「Astro2010 Decadal Survey」で、大型衛星計画の最優先課題 として位置づけられた口径 1.5m の暗黒エネルギー、系外惑星観測計画で、2010 年 12 月に設置された初期 WFIRST Science Definition Team (SDT) に住 (大阪大) が参加し、2012 年 8 月の最終レポート作成に貢献し た [1]。

2012 年、NASA が NRO より広視野 2.4 m 宇宙望遠鏡を譲渡されたことから、これを WFIRST に使用して、 さらにコロナグラフ装置を搭載するなど広範なサイエンスの達成を目指す WFIRST-AFTA 計画として再定義 され、SDT が結成された。2013 年 4 月までの検討に基づき、NASA は同年 5 月、WFIRST-AFTA SDT の活 動の継続を決定。これに際し、JAXA-NASA の協議において WFIRST-AFTA SDT に JAXA からの代表 1 名 が参加することが提案され、同年 7 月より、山田亨 (東北大学) がこれに参加することとなった。

国内においては、宇宙論から系外惑星に至る幅広い分野で WFIRST への参画に強い意欲を示す研究者がお り、同年8月より国内の研究者約20名(現在約40名)から成る「WFIRST連絡会」を組織し、各分野におけ る日本の貢献についての活発な議論と具体的検討が行われている。この検討結果は、2015年3月に発表された WFIRST-AFTA SDTの最終報告書の Appendix に、日本の潜在的な国際協力として加えられた[4]。

この最終報告書を受け、NASAは2016年度以降には広範なレビューおよび計画実現に向けた pre-formulation を行うことを目指している。これまでのところ、NASA Astronomy Division においては、WFIRST-AFTAを JWSTに続く旗艦ミッションとして実現することを念頭に検討が進められており、既に100MUSD 規模の予算 が配分されている。

特にコロナグラフ装置の搭載は、将来における地球型系外惑星観測ミッションを実現するための重要な科学的および技術実証のステップとして位置づけられている。このような WFIRST-AFTA 計画に、当初から日本の研究者、JAXA/ISAS が 参加しプレゼンスを示すことは非常に重要である。

4.6. WFIRST

WFIRST へのコロナグラフ搭載の可能性は 2013 年 1 月に決まり、その検討は急ピッチで進んできた。同年 末には、5 つのコロナグラフ案のうち 2 つに絞られた。その時期から日本との協力について議論が開始された が、背景としてはこれまでの地上コロナグラフ観測装置における共同開発、および、JTPF におけるスペース コロナグラフでの基礎開発の協力関係が背景となっている。

このような状況に於いて、日本による貢献のうち、とくに技術開発の緊急性と予算措置の必要性が高いコロ ナグラフ装置への貢献に特化して技術的検討をすすめるために、2014年2月、コロナグラフ開発 WACO WG (主査:田村元秀、東京大学)を設立した。これは元々、全体の進捗に基づいて、全般的な WFIRST WG の 設立を視野にいれていたが、現在、米国側の順調な進捗を鑑み、より全般的な WFIRST WG(主査:住 貴宏、 大阪大学)として発展的に改組した。NASA からは日本が参加するかどうかの意思表明が求められており、本 WG はその検討及び交渉を行う母体となる。

4.6.4 日本の貢献と技術的な準備状況及び開発のシナリオ

ハードウェアの貢献の柱は、前述のコロナグラフ装置の共同開発である。他分野の貢献はすばる望遠鏡によ る予備観測・共同観測、地上受信基地局、データアーカイブ、解析などを軸として検討が進められている。

日本は現在、宇宙論観測では、世界最高のサーベイ能力を持つすばる望遠鏡広視野カメラ HSC を用いた Subaru Strategic Program 観測で世界をリードしている。このデータ解析の経験は、WFIRST データの解析 に大きく貢献できるはずである。また、この HSC や現在開発中の広視野多天体分光器 PFS で WFIRST 観測 領域を観測する事で WFIRST の測光赤方偏移の校正と言う WFIRST 宇宙論の結果の是非に関わる非常に重 要な役割を果たす事が期待されている。

マイクロレンズに関しては、地上観測では日本はこれまで世界をリードしてきた事から、その経験を活かし てのデータ解析が期待されている。また、すばる望遠鏡による予備観測により、WFIRSTの観測領域を最適化 する事が期待されている。さらに、地上の専用近赤外広視野望遠鏡による同時観測でスペースパララックスの 観測も期待されている。このために、口径 1.8m 望遠鏡を南アフリカに建設し、WFIRST プロジェクトチーム が所有する 4 枚の H4RG-10 近赤外検出器を使用したカメラを製作して、地上で近赤外マイクロレンズ予備観 測をして WFIRST の観測領域のより精密な選定と、スペースパララックス観測を行う計画をたてている。

WFIRST の軌道は、傾斜対地同期軌道とL2 が候補になっている。傾斜対地同期軌道は、データレイトや将 来のロボティックサービスミッションの可能性などの利点があるが、L2 の安定性や将来のオカルター衛星との 同期による次世代系外惑星観測の可能性などの利点が議論されている。L2 となった場合、米国の深宇宙ネット ワーク (DSN)を使った Ka バンド帯 (26GHz 帯)での受信が必要で、日本のタイムゾーンでの基地局運用が期 待されている。現在、臼田基地局などで進んでいる受信基地の Ka バンド帯 (32GHz 帯)を含めたアップグレー ドはこの目的に最適で、これに新たに 26GHz 帯受信機を追加する事で対応する。

コロナグラフ装置の開発は、技術的には、これまでの地上コロナグラフ開発、SPICAのSCIでのスペース コロナグラフの開発、WACOWGによる開発着手により、共同開発研究をすぐに開始できる状況にある。具 体的な開発項目・目標は以下の通り: (A) 偏光撮像ユニットの提供。検出器前に導入できる物を検討。(B) 偏光 補償機能の開発と提供。望遠鏡、装置偏光による偏光差分波面収差(PDWA)が発生するが、現在のベースラ イン案では、直線偏光の1成分のみをとりだしDMで波面補償を行う。偏光補償装置では、複屈折デバイスに より波面整形、色消しを行い、光子を無駄にすることなく、コントラスト低下を防ぐ。その他、発展的な可能 性として(C)他マスクの開発を推進する(全くの新規コロナグラフ開発検討ではなく、米国主導で開発された マスクとの比較検討が中心となる)。(D) 独自の PIAA 装置の開発。おおよそのスケジュールは以下の通り、

概略スケジュール

2016 年度 偏光撮像ユニット、偏光補償機能の基礎開発

2017年度 同・開発継続 (性能評価)

2018 年度 同・開発継続(性能向上)

2019 年度 偏光撮像ユニット・偏光補償ユニットの実機製作開始

2022 年度 ミッション側ハンドオーバー

2024 年度 打ち上げ

参考文献

- [1] Green, J., et al. arXiv:1208.4012 (2012).
- [2] Spergel, D., et al. arXiv:1305.5425 (2013).
- [3] Spergel, D., et al., "WFIRST-AFTA Science Definition Team Interim Report" (2014).
- [4] Spergel, D., et al. arXiv:1503.03757 (2015).

300

4.7. Euclid

4.7 Euclid

目的: Euclid は、2020年頃打ち上げ予定の ESA の口径 1.2m の可視光近赤外広視野サーベイ望遠鏡 [1]。可 視光で 0.54 平方度と言う圧倒的な広視野を利用して、ほぼ全天 (15k 平方度) にわたる銀河サーベイを行い、弱 重力レンズ、バリオン音響振動により宇宙の加速膨張の起源を探る。メインの可視光チャンネルは、WFIRST と同程度の高空間分解能で銀河の形を決定する。近赤外チャンネルは、比較的低い空間分解能で、主に photo-z を求めるために使われる。メインの宇宙論観測以外に、観測期間を延長して、マイクロレンズ系外惑星探査な どその他のサイエンスが検討されている。主な仕様を表 4.13 に示す。

| 観測モード | 波長範囲 | 波長分解能 | 視野 | 空間分解能 |
|----------|---------------------------------|--------------------------------------------|---------------------|----------|
| 可視光撮像 | $0.55\text{-}0.90\mu\mathrm{m}$ | single wide band | $0.541\deg{^2}$ | 0.1"/pix |
| IR 撮像・分光 | $0.92\text{-}2.0\mu\mathrm{m}$ | $R \sim 300(1.1-2\mu\mathrm{m~slitless}),$ | $0.541 \rm deg^{2}$ | 0.3"/pix |

表 4.13: Euclid の主な仕様

研究領域内での位置づけ:宇宙物理学上の最重要課題の一つ、宇宙の加速膨張(暗黒エネルギー、修正重力) は、すばる/HSC など活発な地上観測が行われている。Euclid は、これをスペースから圧倒的精度と統計量で 観測する決定版である。主に近赤外で狭く深くサーベイを行う WFIRST とは相補的である。

サイエンス成果が与えるインパクト:宇宙の加速膨張の起源は何なのか?暗黒エネルギーか、アインシュタ インの重力理論に修正が必要なのか?と言う宇宙の起源を検証する。

主要キー技術とその位置づけ・開発状況・海外とのベンチマーク Euclid の可視光観測は、ワイドバンドー 色のみで、photo-zを見積もるには可視光多波長撮像が不可欠である。南天では、Dark Energy Survey (米国、 5000 平方度) がパートナーに決まっているが、北天は、すばる/HSC が最有力装置で参加が期待されている。

準備・検討体制: ESA 主導で、米国が部分参加する形で国際協力のもと推進している。国内においては高田 氏(IPMU)ら HSC 関係者、すばるコミュニティーで検討。HSC サーベイの見返りに日本人 40 人が Euclid に参加する様に提案されている。

準備状況: 2012 年 6 月に Euclid Consortium Leader の Yannick Mellier 氏が来日し、日本に HSC で 6000 平方度 (i~25, 200 晩相当) をサーベイして欲しいと依頼があった。このサーベイの見返りとして、日本人 40 人 の Euclid 参加を提案されている。これまで数度の研究会を行い、SAC 主導ですばる Users Meeting などで継 続議論中。

参考文献

[1] ESA/SRE(2011)12, EUCLID DEFINITION STUDY REPORT (RED BOOK)

4.8 EXZIT

4.8.1 概要

宇宙創成以来の天体形成過程の解明を目指し、*z*>10の宇宙再電離期やその原因となった宇宙で最初の星や ブラックホールが発した電離紫外線を、近赤外線の「宇宙背景放射」として捉える。具体的には、高温の宇宙初 期天体に特有な水素の再結合線や吸収端構造(ライマン・ブレーク)をスペクトル検出する。これにより、宇宙 最初の天体形成を物理的に解明するとともに、宇宙初期におけるダークマター構造形成論を検証する。赤外線 波長では前景放射である黄道光(惑星間ダストによる太陽光散乱や熱放射)が極めて明るく、その差引きの系統 誤差が宇宙赤外線背景放射の測定精度を制限している。この状況を打破すべく提案した EXZIT (EXo-Zodiacal Infrared Telescope)は、惑星間ダストが希薄な深宇宙へ投入するソーラー電力セイル探査機に赤外線望遠鏡を 搭載し、黄道光の影響のない究極の精度の宇宙背景放射観測を実現する。さらに、太陽からの距離に対する黄 道光の輝度やスペクトルの変化を調べることにより惑星間ダストの密度や組成の3次元分布を明らかにするこ とや、あらゆる階層にある未知の天体や粒子の探索も重要な科学目的である。

4.8.2 背景

初代天体と宇宙再電離

近年、遠方クエーサー光の銀河間中性水素吸収量や宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の偏光観測による銀河 間電子散乱の光学的深さから、宇宙年齢 38 万年にいったん中性化した宇宙は、約5億年後(赤方偏移 $z \sim 10$) に再び電離される「宇宙再電離期(Epoch of Reionization)」を経たことが明らかになった[1]。HST や Spitzer を用いて $z \sim 10$ 銀河の近赤外線探査が進められたが、宇宙初期の銀河による紫外線量は宇宙再電離を起こす のに充分ではないことがわかった[2]。つまり、宇宙再電離は探査にかからなかった多数の小質量($10^9 M_{\odot}$ 以 下)の銀河や星々の紫外線により起こされた可能性が示唆される。それらは、宇宙初期の重元素がない環境で 生まれた初代星や超新星爆発の残骸ブラックホールかもしれない[3]。銀河は初期宇宙の密度ゆらぎを種とする ダークマターの集積と原始水素ガスの重力崩壊により形成したと考えられるが、その実証には銀河形成以前の 初期宇宙を観測する必要がある。ダークマター宇宙の構造形成モデルでは、ビッグバン後の数億年(赤方偏移 z > 10)にて星やブラックホールなどの初代天体が生まれ、それらが集積して原初銀河が形成される。宇宙再 電離は、冷たい中性水素ガスの宇宙が、初代天体の紫外線放射により電離状態へ相変化した宇宙事象であり、 その後の銀河や巨大ブラックホールの形成に関わる重要なエポックとして宇宙創成や晴上がり期と並ぶ現代宇 宙論の重要研究課題である。

これまで、HST や最大級の地上望遠鏡を稼働し、初代天体や宇宙再電離期の紫外線を近赤外線(波長1-5 μ m)として検出する観測が精力的に進められただけでなく、今後10-20年におけるJWST、Euclid、WFIRST および WISH といった宇宙望遠鏡計画や地上30m望遠鏡計画 TMT の主目的のひとつは初代天体の検出である。しかし、これらの大望遠鏡をもってしても初代天体の低光度(小質量)種族を個別の点光源として捉えることは難しい。

宇宙赤外線背景放射の謎

小質量までの初代天体を余すことなく捉えるには、広視野で天体群をまとめて「宇宙背景放射」として観測 する手法がブレークスルーとなる。このような観測は日本や米国のグループが中心となり、COBE、IRTS、「あ かり」およびロケット実験 CIBER といった飛翔体を用いて行なわれてきた。その結果(図 4.37)が示すのは、 可視光の宇宙背景放射観測の多くは既知の系外銀河光の総計(Integrated Galaxy Light; IGL)と矛盾がない が、近赤外での観測値はいずれも IGL よりも数倍明るいことである(宇宙背景放射の赤外線超過)。驚くべき 4.8. EXZIT



図 4.37: 可視・近赤外線波長域における宇宙背景放射の過去の観測結果。測定された背景放射の明るさ(デー タ点、および陰影で示す領域)は、既知の系外銀河光の総計(破線)よりもはるかに明るい。1 µm 周辺の輝 度超過は初代星のライマン・ブレークによる可能性が議論されてきたが、前景の黄道光(点線)の差引き残し による可能性は否定できない。



図 4.38: ロケット実験 CIBER により検出された宇宙赤外線背景放射の非等方性(空間的ゆらぎ)[10]。左: 波長1.6 µm での宇宙背景放射の非等方性。約10分角スケールを強調する画像処理をしたもの。右: 「あか り」[7] や Spitzer[5; 8] のデータも含んで得られた非等方性の SED は、非等方性の大部分が系外銀河のハロー 星の寄与により説明できることを示す。初代天体の寄与を検出するには、さらに高い精度の測定が必要である ことがわかった。

ことに、我々は宇宙赤外線背景放射の大部分の発生源を理解していない。

宇宙背景放射の「赤外線超過」の原因は未解決の問題であるが、ひとつの解釈として初代の星々によるとい

う仮説がある [4]。可視光と近赤外線の背景放射観測値には波長 1 µm 付近にスペクトルの輝度超過が見られ (図 4.37)、それは冒頭で述べた初代星のライマン・ブレークではないかというものである。しかし、この解 釈にしたがう宇宙初期の星生成率は極めて大きく、近傍宇宙で現在見られる重元素量との矛盾や、宇宙マイク 口波背景放射(CMB)観測から得られる宇宙初期の電子密度との矛盾などの課題がある。一方、日米韓が共 同で実施したロケット実験 CIBER(Cosmic Infrared Background ExpeRiment)[6]による宇宙赤外線背景放 射の非等方性(ゆらぎ)観測の結果によれば、非等方性の SED は初代星からの予想と大きく違っており、宇 宙赤外線背景放射のかなりの部分は、むしろ系外銀河のダークマター・ハロー内に浮遊する古い星々による放 射(Intra Halo Light; IHL)として説明されうることがわかった[9;10](図 4.38)。この解釈が正しければ、 ダークマター・シミュレーションの予想よりも一桁ほど矮小銀河スケールの IHL が明るいことになる。これは、 構造形成論における「失われた伴銀河」や「見えないバリオン」の問題にも関わる重要な結論である。IHL の 解明は宇宙背景放射の研究において考慮すべき新たな「前景放射」となった。IHL 説には、弱い重力レンズか ら得たダークマター分布との空間相関をはじめとする様々な検証が待っている。CIBERに続くロケット実験 CIBER-2 計画においても、可視・近赤外域における宇宙背景放射の非等方性の多波長観測により IHL 成分を 分離し、初代天体成分の検出を目指す[11]。

近地球ミッションの限界

宇宙背景放射の赤外線異常についての解釈は未解決課題であるが、その解決には、最も大きな系統誤差要因 である黄道光(惑星間ダストの太陽光散乱)の扱いがカギとなる。これまでの地球軌道上からの観測では前景 成分である黄道光が宇宙背景放射より1桁ほど明るく、それの全観測値からの差引き系統誤差が宇宙背景放射 の測定精度を支配する。この状況は、地球軌道上にとどまる限り、将来も格段には改善しない。これを一気に打 破できるのは、小惑星帯以遠や黄道面外のようなダスト密度が低い惑星間空間からの観測にほかならない[14]。 図 4.39 では、COBE データにもとづく惑星間ダストの分布モデルによる、日心距離が4 AUの黄道面内軌道で の黄道光の明るさを1 AU の場合と比較している。深宇宙における黄道光は地球軌道の20 分の1程度まで低 減することがわかる。このような環境では、黄道光の差引き系統誤差によらない高精度の観測が可能になる。

4.8.3 科学目的

宇宙背景放射観測による初代天体と未知物質の探索

EXZIT は黄道光の影響を受けることなく宇宙背景放射を測定する。これにより、初代天体に起源をもつ放 射だけでなく、宇宙の様々な時代や空間スケールの天体からの拡散放射を、かつてない高い精度で探索する。 例えば、銀河系ハローに存在する褐色矮星や MACHOs などの低光度天体や IHL の検出が期待される。放射源 である星の質量や種族同定に可視・近赤外域のスペクトル測定が本質的な役割をはたす。また、宇宙初期から の残存素粒子やダークマター粒子の崩壊光子探索などの貢献も期待できる。活動的銀河 Blazar からの TeV ガ ンマ線は赤外線の宇宙背景放射との衝突対生成による銀河間吸収を受けるため、TeV ガンマ線の観測から背景 放射光子密度に制限を与えることができる。これまでの TeV ガンマ線観測から得られた光子密度は、宇宙背景 放射の直接観測値よりも低い(宇宙はガンマ線で透明である)とされている[15]。この不一致を解決すべく新 たな放射過程やアクシオン等の新粒子導入などが研究されており、精密な宇宙背景放射の観測値は宇宙線・素 粒子分野にも広く影響を与える。



図 4.39: 地球軌道上(1 AU)と小惑星帯以遠(4 AU)での黄道光の明るさ比較。深宇宙では黄道光の明るさ が全銀河光の総計(IGL,黒三角のデータ点)や銀河系ダストと暗い星の総計(点線と一点鎖線)の明るさと 同等になりうる。EXZIT は宇宙背景放射の下限である IGL を充分に高い精度で検出できる(太破線が EXZIT の検出限界)。



図 4.40: 惑星間ダスト。左上: 上層大気中で採取された惑星間ダスト(約10 µm サイズ)の電子顕微鏡画像。 右上: ダスト分布をその主要な起源である小惑星や彗星とともに描いた概念図。左下: COBE の黄道光 観測データをもとに作られた惑星間ダスト分布のモデル(ダスト数密度をコントアで表示)。日心距離や黄道 面外距離が大きくなると急激にダスト密度が低減する。右下: 黄道光の明るさの日心距離依存性のモデル計 算(太陽離角 90°と 180°の場合)。

黄道光の立体計測

惑星間ダストは、惑星間空間に広く分布する大きさ 10 μ m 程度の固体微粒子である。惑星間ダストによる 太陽光の散乱光である黄道光は、可視波長で比較的明るく、古くから観測が行なわれてきた [12]。その結果、 惑星間ダストは黄道面に集中し、日心距離に反比例する密度分布を持つことがわかった。IRAS や COBE によ リ光散乱特性の影響がない熱放射の観測が行なわれ、ダストの 3 次元分布モデルが構築されたが [13]、視線方 向のダストを積分として見る黄道光観測の原理的な不定性により、黄道面外や外惑星領域(>3 AU)のよう な密度が低い場所でのダスト分布は未だに明らかになっていない。通常は地球軌道上から観測される黄道光で あるが、これを惑星間空間の様々な場所から観測すれば、黄道光の微分値として惑星間ダストの 3 次元分布を 測定できる。これまでに、Pioneer10/11 により黄道面内のダスト分布が日心距離変化として可視光で測定され た例がある。本計画では、黄道面内のみならず黄道面外や外惑星域も含む極めて広い領域の立体計測を初めて 赤外スペクトル観測として行なう。シリケイトや含水鉱物に特有の波長 1 μ m や 3 μ m 付近の赤外吸収を、日 心距離や黄道面外距離ごとに測定できれば、太陽系形成の解明に不可欠なダストの組成と起源に関する重要な 情報となる。外惑星領域では、残留黄道光として星間ダストの検出の可能性がある。

4.8.4 研究領域内での位置づけ

EXZIT では、宇宙初期の天体形成過程の解明を目指すことでは WISH や HiZ-GUNDAM と共通の課題に 取組むが、これらでは個別に分解しきれない低光度天体群が発する光をもれなく捉えうる宇宙背景放射を観測



図 4.41: ソーラー電力セイルの概略。左: ソーラー電力セイルによる小惑星探査の想像図。差渡し約 50 m のサイズのセイル膜の中心に探査機本体がある。右: 探査機本体の拡大図。EXZIT は低温環境が実現可能 な反太陽面パネルに搭載される。

する。将来のスペース望遠鏡の方向性の観点では、これまでは地球大気の影響がない測定環境を求めて地上か らスペースへと向かったように、新たに「深宇宙・惑星間空間からの天文学」を開拓する重要な役割を担う。 さらに特筆すべきこととして、本計画は「ソーラー電力セイルによる木星トロヤ群小惑星の探査」という宇宙 工学ミッションを主体とした、探査工学、惑星科学、天文学の異分野が連携する世界にも例をみない極めてユ ニークなミッションである。天文学としては「小規模ミッション」に該当する計画であるが、将来の科学ミッ ションの試金石となるであろう。

4.8.5 観測装置の概要

ソーラー電力セイル

原子力電池をもたない我が国が外惑星領域の探査を進めるには、他国に先行して IKAROS により実証した ソーラーセイル技術が必須である。その本格的な応用としての工学ミッションであるソーラー電力セイルの開 発が JAXA を中心に進められている(図 4.41)。打上げは 2020 年代を目標としている。ソーラー電力セイル の主な科学目的は、太陽系始原天体である D 型小惑星が密集する木星トロヤ群の探査であるが、約5 AU の木 星圏に到達するまでは惑星間空間を航行(クルージング)するため、この期間は惑星間空間科学にとって極め て有用である [14]。現在の EXZIT は、このような貴重な機会を天文観測に活かそうとするものである。

EXZIT の主な仕様

| | | EXZIT 仕様 | ŧ | | |
|-------------------|-----------------------------|------------|----------------------------|----------|--------------------|
| 望遠鏡 | 波長範囲 | 波長分解能 | 視野 | 空間分解能 | 質量 |
| 口径 10 cm | 0.6–2 $\mu {\rm m}$ | $R\sim 20$ | $4{\times}0.2~{\rm deg}^2$ | 1 arcmin | $\sim 10~{\rm kg}$ |
| 温度 < 140 K | (option 2–10 $\mu {\rm m})$ | | | | |

入射光の位置に対して透過波長が線形に変化する Linear Variable Filter (LVF)を焦点面に設置し、その分 光像を焦点面 2 次元アレイを用いて撮像するという、グレーティングやプリズム等の分散素子を用いないシン



図 4.42: EXZIT の概念設計例。オフセット・グレゴリアン式反射望遠鏡にレンズ結像系を組み合せた光学系 設計を示す。光線群は 4°の視野角に対応している。焦点面アレイは描いていない。



図 4.43: 過去の赤外線観測装置における放射冷却と断熱構造(MLIと断熱脚)の例。左上: 「はやぶさ2」 NIRS3(全系 170 K)。左下: 韓国 STSAT-3/MIRIS(光学系 200 K、検出器 90 K)。望遠鏡開口と同じ方 向に開いた宇宙空間へ放射により排熱する。右: EXZITの探査機への配置案。探査機の反太陽面パネルに 断熱脚により接続し、深宇宙への放射により全光学系を 140 K 以下に冷却する。

プルで広視野の分光光学系を構成する。望遠鏡は迷光が小さいオフセット・グレゴリアン系とし、レンズ光学 系で収差補正する(図4.42)。打上げ前の常温から上空での極低温までの温度変化により性能が大きく変化し ないように、レンズ以外の部品はすべてアルミニウム合金で製作する。検出器には CIBER/CIBER-2 で実績 のある HgCdTe2 次元アレイを用いる。



図 4.44: 探査機スピンによるスキャン観測。左: スピン軸と望遠鏡視線方向(LOS)とのオフセット角 θ を 半頂角とし、視野角(ここでは 4°)を幅とする円環領域をスキャンしながら分光観測する。右: 探査機軌道 (例)と観測天域(探査機スピン軸)の時間変化。

望遠鏡を含む全光学系を熱放射の寄与が無視できる温度(140 K 以下)まで冷却する。検出器は暗電流が無 視できる100 K 以下に冷却する。冷却は深宇宙で特に有効となる放射冷却のみにより行なう。装置を太陽光照 射がない位置に取付ける場合、探査機構体からの熱放射と支持構造およびハーネスからの熱伝導に対して適切 に断熱すれば、単段の放射シールドと検出器に直結したラジエータを宇宙空間へ露出させるだけで要求される 温度まで到達可能である(図 4.43)。

観測モード

観測装置は探査機に固定取付けとする。探査機の自転により LVF の波長変化方向に空間スキャンするとと もに、波長変化に垂直な方向には広い視野をとり分光撮像を行なう。木星に向かう探査機軌道においては、時 間経過とともにスキャン観測する円環領域が黄経に沿って徐々にシフトし、広域観測が可能となる。(図 4.44)。

4.8.6 主要キー技術の開発状況

小型の近赤外線装置は、IRTS、「あかり」、CIBER/CIBER-2 等の開発実績により技術的成熟度が高く、今 後の技術課題は搭載環境が主である。高感度赤外観測のため放射冷却により 80-100 K まで冷却するが、その 技術要素は SPICA での開発や「はやぶさ2」NIRS3 の実績が参照できる。探査機の姿勢安定度や深宇宙での 通信量制限は主要な課題であり、今後も重点的にシステム検討を行なう。なお、外惑星探査機だけでなく惑星 間ダストが希薄な黄道面外軌道に EXZIT を投入する代替案も検討の価値がある。

4.8.7 開発体制

ソーラーセイルWGによる開発体制のもと工学ミッションとして準備をすすめ、惑星間ダストの計数やトロヤ群小惑星探査に関わる惑星科学コミュニティのメンバーと協同で搭載機器を検討している。EXZITの搭載検討は、CIBER/CIBER-2の開発メンバーを中心とする、関西学院大、東北大、国立天文台、宇宙研の研究者で行なっている。今後の計画進行に伴い、開発体制のさらなる強化が必要である。

4.8.8 準備状況

ソーラーセイル WG 発足当初より、外惑星間空間への機器投入の貴重な機会を利用した科学観測として EXZIT の搭載提案を行ない、探査機システムとともに仕様や要素技術の検討を行なっている。これまでに科研 費や ISAS 搭載機器基礎開発経費などにより、光学系や熱構造検討および要素技術実証を実施してきた。ソー ラー電力セイルを含む探査技術実証の計画は、日本学術会議大型計画マスタープラン 2014 において総合工学 分野の重点大型研究計画として選定された。ソーラー電力セイルは、JAXA 宇宙科学研究所の戦略的中型ミッ ション(工学)として提案され、最終選考されるミッション候補としてに残っている(2016 年1月時点)。

4.8.9 国際情勢

惑星探査の機会が多い米国では、EXZITより後発で同様の検討がなされた例があるが実現の見通しは立っていない。その他の国では、EXZITと同様の提案は存在しない。このような国際情勢のもと、世界初の惑星間天文学を日本主導で実現することが強く望まれる。

4.8.10 関連するミッション

EXZIT と相補的であるが深く関連する将来の赤外線ミッションとしては、CIBER-2、NISS、SPEREx が挙 げられる。CIBER-2 は、すでに述べたように、CIBER の後継となるロケット実験であり、2018 年ごろの打上 げを目指し観測装置を日米韓台で国際共同開発しているところである。CIBER-2 は宇宙赤外線背景放射の非等 方性測定を可視~近赤外の多波長バンドで行い IHL 成分と初代天体成分とを分離する。これは EXZIT の主目 的である絶対輝度測定と相補的である。NISS は、宇宙赤外線背景放射や銀河系拡散放射を分光観測する KASI (韓国)の衛星ミッションである。2018 年の打上げが計画されており、CIBER-2 よりも詳しい非等方性の放射 スペクトルが観測できる。すでに研究者レベルでは技術的な共同研究が行なわれ、今後さらに進んだ国際協力 の可能性を探る。SPHEREx は、Caltech と JPL の研究者らが NASA/SMEX として提案した全天分光サーベ イ衛星である(2020 年打上げ予定)。全天の銀河を近赤外で分光観測し、low-z での大規模構造の 3 次元分布を EUCLID や WFIRST よりも高い精度で決定する。これにより宇宙初期の密度ゆらぎの非ガウス性の有無を検 証するとともに、宇宙赤外線背景放射の非等方性スペクトルを高精度で測定する。SPHEREx を主導している CIBER チームの米国メンバーと研究者レベルでの協力について協議を行なっている。

参考文献

- [1] Kogut, A., et al. 2003, ApJS 148, 161
- [2] Bouwens, R. J., et al. 2008, ApJ 686, 230

- [3] Loeb, A. & Barkana, R., 2001, ARA&A 39, 19
- [4] Matsumoto, T., et al., 2005, ApJ 626, 31
- $[5]\,$ Kashilinsky, A., et al., 2005, Natre 438, 45
- [6] Zemcov, M., et al., 2013, ApJS 207, 31
- [7] Matsumoto, T., et al., 2011, ApJ 742, 124
- $[8]\,$ Cooray, A., et al., 2012, ApJ 756, 92
- [9] Cooray, A., et al., 2012, Nature 494, 514
- [10] Zemcov, M., et al., 2014, Science 346, 732
- $[11]\,$ Lanz, et al., 2014, SPIE 9143, 91433N
- $\left[12\right]$ Leinert et al., 1998, A&A Suppl. Ser. 127, 1
- $[13]\,$ Kelsall, T., et al., 1998, ApJ 508, 44
- [14] Matsuura, S., et al., 2014, Trans. JSASS, Aerosp. Tech. Japan 12, ists29, Tr1
- [15] H.E.S.S. Collaboration, 2013, A&A 550, A4

4.9 HiZ-GUNDAM (High-z Gamma-ray bursts for Unraveling the Dark Ages Mission)

4.9.1 ミッションの目的

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Bursts: GRBs) は 10^{52} erg ものエネルギーをガンマ線放射として解放す る、宇宙最大の爆発現象である。図 4.45(左) に示すように数秒から数十秒の短時間だけガンマ線で輝き、その 後、時間とともに暗くなる残光を伴う現象である (図 4.45 右)。短時間ではあるが極めて明るく輝くことと、そ の多くが赤方偏移 z > 2 で発生していることから、初期宇宙を探るプローブとして利用されてきている。

そこで、GRB を用いてz > 7の高赤方偏移観測のフロンティアを開拓するために小型科学衛星 HiZ-GUNDAM (High-z Gamma-ray bursts for Unraveling the Dark Ages Mission)を計画している [1]。本ミッションの目的 は、GRB を用いて宇宙暗黒時代の終焉と天体形成の幕開けを観測することで、初期宇宙における星・ブラッ クホールの形成、宇宙再電離、重元素合成の歴史的な変遷を捉え、初期宇宙形成史の解明に寄与することであ る。初期宇宙において最も明るい光源である GRB を観測し、GRB の発生頻度から星形成率を測定する。特 にこれまでに十分な観測が行われていない z > 7 における GRB を発見し、発生時刻や発生方向などの情報を 通報するまでを本プロジェクトの目的とする。それにより、地上や宇宙の大型望遠鏡の観測を促し、宇宙再電 離の時期の測定や宇宙最初の重元素の精密観測の実現が期待される。そのため、TMT が掲げている「GRB を 用いた初期宇宙探査」という大きな目標を強力に推進できることになる。

「宇宙で最初の星はいつ誕生したのか?」や「この宇宙はどのように進化してきたのか?」という根本的な 疑問に対して、明るい GRB を光源として観測的にアプローチできるようになる。また、2020 年代の観測でも 初代星からの直接的な放射を観測することは難しいが、初代星が爆発した際に発する GRB 現象を利用すれば、 初代星が形成される環境さえも探査できると期待される。



図 4.45: (左図) GRB の光度曲線の例。数 100keV 程度の大量のガンマ線が、激しい時間変動を伴いながら飛 来する。(右図) 可視光残光の光度曲線の例。平均的には t⁻¹ に比例して減光する。

4.9.2 科学的背景とミッションの概要

昨今の宇宙論は目覚ましい発展を遂げ、精密科学と呼べる域に達してきた。代表的な例として、宇宙マイク 口波背景放射による宇宙論パラメータや宇宙年齢の測定(137.98 ± 0.37 億年)、Ia 型超新星爆発を標準光源と した暗黒エネルギーの存在証明が挙げられる。大型計算機による第一原理シミュレーションでは、宇宙の晴れ 上がり(中性化)から約2億年後(z~20)には、宇宙で最初の星(初代星・Pop-III 星)が誕生していたと考え られている(図 4.46 左)。第一世代星からの強烈な紫外線放射は中性化した宇宙を再電離し、*z* = 7 の頃には、 現在のようにほぼ完全電離した宇宙が形成したと考えられている。星の核融合で生成された重元素は、超新星 爆発や GRB などで宇宙空間にばら撒かれ、水素とヘリウムばかりだった宇宙に新たな要素を付け加えた。こ のように、赤方偏移が 7 < z < 20 の 6 億年という僅かな時間で宇宙は劇的に変化し、宇宙の運命を決定づけ たといっても過言ではない。その頃の物理状態を探査することは、現代宇宙論にとって最も重要な研究対象で あり、電磁波で天体を観測できる最後の砦とも言える。



図 4.46: (左図) 宇宙の歴史的変遷を模式的に示した図。HiZ-GUNDAM は 7 < z < 20 の宇宙における星・ブ ラックホール形成史、宇宙再電離や重元素合成の解明に寄与する計画である。(右図) これまでの最高赤方偏移 の年代推移。GRB は銀河と並んで最遠方天体と言える。

これまでの GRB 観測の歴史を、高赤方偏移観測の視点で俯瞰してみる。図 4.46(右)は、天体ごとの最高 赤方偏移(分光観測)の年代推移を示している。GRB は 1997 年に初めて赤方偏移が測定されて以来、急速に 記録を伸ばしてきた。現在は *z* = 8.2 の GRB が分光観測されており [2] [3] 測光観測では *z* = 9.4 が確認され ている [4]。今後もこの記録は伸びると期待されている。しかしながら、このイベントについては光学分光によ る赤方偏移の同定はできたものの、宇宙の物理状態については何一つ情報を得られていない。

一方で、すばる望遠鏡で観測した GRB 050904 (z = 6.3)の可視残光スペクトルからは、大きく赤方偏移を受けたライマン α 吸収の Dumping Wing 形状を測定し、宇宙がほぼ電離していたことを明らかにした。また、スペクトル中の吸収線から炭素や酸素などの重元素組成を測定することができている [5] [6]。さらに GRB 130606Aでは、初めて銀河間空間に中性水素が存在する兆候を 3 σ の有意性で検出している [7]。したがって、赤方偏移z > 7の GRB を用いて、このような良質のデータを取得することが次の課題と言えよう。赤方偏移z > 7を探求するには、最も重要なライマン系列端 (912 Å) やライマン α 線 (1216 Å) を近赤外線で観測する必要がある。

そこで我々は、赤方偏移の効果を強く受けた GRB を検出するために 10 keV 以下に感度を有する広視野 X 線撮像検出器と、可視光・近赤外線望遠鏡を同時に搭載した衛星 HiZ-GUNDAM (High-z Gamma-ray bursts for Unraveling the Dark Ages Mission) を計画している。

- 1. 広視野 X 線撮像検出器で GRB を発見し、発生時刻と大まかな発生方向を第一報のアラート情報として 地上観測者へ通報する。
- 2. X線の情報を元に自律的に衛星姿勢を変更し、近赤外線望遠鏡で追観測を実施する。
- 近赤外線で詳細な発生方向を同定し、測光観測によって赤方偏移と明るさを測定した上で、第二報のア ラート情報を通報する。

続けて、残光が明るいうちに大型望遠鏡を用いて詳細な分光観測を実施し、 *z* > 7 の GRB に対する高分散可 視光・近赤外線スペクトルを取得する。これにより、宇宙再電離や重元素合成の歴史といった、現在の宇宙論 における最重要トピックの解明を目指す。GRB は大質量星の終焉(重力崩壊型超新星爆発)で発生し、恒星



図 4.47: HiZ-GUNDAM の構想図。広視野 X 線撮像検出器と口径 30 cm の近赤外線望遠鏡を同時に搭載する。 X 線で発見した GRB に対して迅速に近赤外線で追観測を行い、測光赤方偏移を同定する。高赤方偏移 GRB の候補天体を発見した場合は、地上の大型望遠鏡で分光観測を行う。

質量ブラックホールを形成するため、星形成歴やブラックホールの誕生・進化、超新星爆発のメカニズム、活 動銀河核のブラックホール進化などの天文学的課題も探求できると期待している。

HiZ-GUNDAM で掲げるサイエンス目標は、高エネルギー天文学と可視光・近赤外線天文学の融合と、衛星 観測と地上観測との密接な連携を通じて初めて実現できるものである。さらに、X 線や近赤外線で変動天体を モニターし,様々な波長帯および非光子での観測を主導・補助することは,Time Domain Astronomyの発展 に寄与し、新たな天文学分野を開拓できる discovery space の一つと言えるだろう。NASA の Decadal Survey 2010 の中で記述されている Science Frontier Discovery には 5 つの項目を重点課題として取り上げているが, HiZ-GUNDAM を主軸とした突発天体の観測により,(1) 重力波天文学の発展,(2) Time Domain Astronomy, (3) 宇宙再電離時期の特定,の3項目に貢献できることとなる。

4.9.3 ミッション機器

科学目的を達成するために、赤方偏移の効果を強く受けた GRB を検出し、自律制御で衛星の姿勢を変更した上で、近赤外線望遠鏡で追観測を実施する。以下の2種類のミッション機器の搭載を検討している。

1. コーデッドマスクを用いた広視野 X 線撮像検出器

高赤方偏移 GRB は、これまでに観測されてきたガンマ線帯よりも X 線帯での検出が有効である。1 ~ 20 keV 帯域で視野 1 ステラジアンを監視する X 線撮像検出器により、軟 X 線帯域で Swift 衛星の約 10 倍の感度で高赤方偏移 GRB を監視する

2. 口径 30 cm 可視光 · 近赤外線望遠鏡

赤方偏移 z > 7の GRB が作り出す水素のライマン α 吸収端は $\lambda > 970 \mu$ m の近赤外線となるため、 可視光だけでなく近赤外線での観測が重要となる。GRB 発生の約 1 分後からの追観測を実施し、波長 $1 \sim 2.5 \mu$ m の近赤外線バンドで限界等級が 20.7 等級 (AB)の測光観測を実現する

通常の GRB や X-ray flash (XRF) を年間 100 イベントの頻度で検出する中から、その 1 割程度の高赤方偏移 GRB の候補を選出し、効果的に大型望遠鏡での観測を促したいと考えている。以下、各検出器に関する情報をまとめる。

広視野 X 線撮像検出器

現在、1次元シリコンストリップ検出器 (SSD) とコーデッドマスクを組み合わせた広視野 X 線撮像検出器を 開発している。赤方偏移の効果を強く受けた GRB を検出するために、1~20 keV 帯域で有効面積 500 cm²(検 出器面積 1000 cm²)、1 ステラジアンの視野を有する検出器を採用する。図 4.48 (左)に、検出器の感度曲線を 示す。GRB の典型的なエネルギー (E_{peak}) が約 1 keV となるような高赤方偏移 GRB に対しては、Swift/BAT および SVOM/ECLAIR と比較して 1 桁程度も良い感度を達成することができる。また、さらなる高感度を実 現するためにイメージングトリガー機能を充実させることを検討している。図 4.48 (右)には、近年の GRB 検出器の有効面積を示す。HiZ-GUNDAM の広視野 X 線撮像検出器は、これまでに実現したことのないディス カバリースペースを開拓することになる。検出器の諸元を表 4.14 に示す。



図 4.48: (左)広視野 X 線撮像検出器の感度曲線(黒:Swift/BAT,青:SVOM/ECLAIR,赤:HiZ-GUNDAM, すべて S/N=8 を想定)。赤方偏移の効果を強く受け、*E_{peak}* が数 keV となるような GRB に対しては、1 桁程 度高い感度で検出できる。(右)近年の GRB 検出器の有効面積。10 keV 以下の帯域で有効面積が 100 cm² を 上回る検出器は存在しなかったため、広視野観測におけるディスカバリースペースと言える。

図 4.49 (左)に開発中の検出器を示す。写真上部の SSD と読み出し専用の集積回路 (ASIC)を独自に開発 し、エネルギー閾値としてすでに 2 keV 以下を達成している。図 4.49 (右)には、実際にコーデッドマスク を用いた撮像システムを構築し、撮像機能を実証している。

| 項目 | 諸元 | コメント |
|----------|-------------------------|-----------------------------|
| | シリコンストリップ | X 軸/Y 軸の2台 |
| ストリップ幅 | $300 \ \mu m$ | |
| シリコン厚 | $500 \ \mu m$ | |
| コーデッドマスク | タングステン | 500 µm 程度 |
| エネルギー帯域 | $1 \sim 20 \text{ keV}$ | |
| 視野 | 1 ステラジアン以上 | |
| 有効面積 | 500 cm^2 | 幾何学面積は 1000 cm ² |
| 角度分解能 | 約 10 分角 | 光子統計の重み付けで 5 分角 |

表 4.14: 広視野 X 線検出器の諸元表



図 4.49: (左図) シリコンストリップ検出器に読み出し集積回路を実装したもの。(右図) タングステン製のコー デッドマスクを利用して放射線源を撮影したもの。X 軸・Y 軸それぞれの1次元撮像を組み合わせることで、 その交点として GRB の方向を特定することができる。

近赤外線望遠鏡

高赤方偏移 GRB の残光に対して良質な分光データを取得するためには、残光が明るいうちにできるだけ早 く大型望遠鏡で観測を開始する必要がある。すべての GRB に対応できない以上、GRB 発生直後に系統的か つ網羅的に残光を観測し、高赤方偏移の候補を選出することと、分光可能な明るさであるかの情報を提供する ことで、大型望遠鏡による効果的な追観測に結びつくだろう。

図 4.50 に赤方偏移 z = 7 で発生した GRB の近赤外線残光の予想等級を示す。また同時に、大型望遠鏡の代表としてすばる、TAO、JWST、TMT の分光感度を示している。例えば GRB 発生から 30 分以内に 20.7 等級 (AB) 以上の明るさであることを提示できれば、すばる望遠鏡や TAO で分光可能なターゲットを提示できる。また、TMT や JWST の感度は十分であるため、1 日後であっても分光可能であると判断できるが、この場合も GRB 発生から 30 分後に明るさを押さえておけば、1 日後の等級が予想できる。したがって、HiZ-GUNDAM によるミッション要求として、30 分後に 20.7 等級 (AB) の限界等級で測光観測を行い、photometric redshiftを提示することと位置付けている。

HiZ-GUNDAM に搭載予定の近赤外線望遠鏡は口径 30 cm を想定しており、赤外線背景放射観測プロジェ クト CIBER-2 と同等のスペックとなっている。これまでにジェネシア社と検討を行い、図 4.51(左) に示すよ うに、望遠鏡前面に反射型バッフルを設けることで太陽光および地球光の侵入を防ぎ、かつ斜入射光学系(オ フセット・グレゴリアン)を用いることで迷光を避ける構造となっている。バッフルはラジエータとして機能 し、望遠鏡を冷却することができる。望遠鏡の側面・底面・背面は MLI を用いたサンシールドで保護し、上 面はラジエータとして機能させる。衛星を極軌道に投入し、太陽光や地球光を避ける姿勢で運用すれば、常時 200 K 以下を維持できると想定している。

撮像検出器は可視光 1 バンド (HyViSi 0.5 ~ 0.9 μ m)、近赤外線 3 バンド (HgCdTe: 0.9 ~ 1.5 μ m, 1.5 ~ 2.0 μ m, 2.0 ~ 2.5 μ m) の合計 4 バンドで構成する。これは高赤方偏移の Lya 端とダストによる吸収とを区別 するために最低限必要な構成である。図 4.51(右) にレイトレースの結果を示す。3 分露光で 20 等級 (AB) の検 出限界 (S/N=10) を達成し、先に示したミッション要求を満足する設計となっている。主鏡・副鏡およびレン ズ系は放射冷却で 200 K 以下を保ち、検出器部のみ冷凍機によって 80 K 程度まで冷却する予定である。より 確度を高く高赤方偏移 GRB を選定するためには、K バンドまで拡張することが有効であると考えている。望 遠鏡のシステム設計において温度条件が満足できるようならば、拡張を検討することにしている。

近赤外線検出器における主な雑音源は、読み出し雑音である。従って、焦点面において2秒角/ピクセル程



図 4.50: これまでに観測された GRB 残光が、赤方偏移 z = 7 で発生した場合に予想される光度曲線。Kann et al. (2011)[10] を参考に、K-correction および Time Dilation の効果を考慮して変換した [1]。GRB 発生後 30 分以内に photometric redshift と明るさを通報することで、すばる望遠鏡、TAO, JWST, TMT などによる分 光追観測を促す。

| 項目 | 諸元 | コメント |
|----------|--------------------------|----------------------------------|
| | 直径 30 cm ² | |
| 光学系 | オフセットグレゴリアン | |
| 反射バッフル | 直径 68 cm, 長さ 30 cm | |
| 焦点距離 | 183.5 cm (F6.1) | |
| 視野 | 34 分角 × 34 分角 | |
| プレートスケール | 2 秒角/ピクセル | 1 ピクセル = 18 μm |
| 鏡筒温度 | $T < 200 {\rm ~K}$ | |
| バンド1 | $0.50.9~\mu\mathrm{m}$ | HiViSI, 限界等級 21.4 mag(AB) |
| バンド 2 | $0.91.5~\mu\mathrm{m}$ | HgCdTe, 限界等級 21.3 mag(AB) |
| バンド 3 | 1.5–2.0 $\mu \mathrm{m}$ | HgCdTe, 限界等級 20.9 mag(AB) |
| バンド4 | $2.02.5~\mu\text{m}$ | HgCdTe, 限界等級 20.7 mag(AB) |
| | | (限界等級は全て 10 分露光, $S/N = 10$) |

表 4.15: 可視光・近赤外線望遠鏡の諸元表

度と設定しても検出感度に影響は無い。1回の露光時間内での衛星擾乱が2秒角程度に抑えられれば良く、これは小型衛星規模でも実現可能なレベルである。また、GRB検出後の姿勢変更についても、60度/60秒の機能を有しているため、約1分後からの追観測を実施する姿勢変更についても標準バスで実現できると考えられる。ただし、姿勢擾乱を十分に抑え込めるよう、システム設計を進める必要がある。



図 4.51: (左図)機器レイアウト図。直径 30 cm の望遠鏡に反射型バッフルを取り付け、カメラユニットは望遠 鏡の直下に配置する。両脇の黒い箱は X 線検出器を表している。(右図)望遠鏡の光学系に対するレイトレー ス。3 枚のダイクロイックミラーにより 4 バンドに分割している。

4.9.4 様々な突発天体の追観測

HiZ-GUNDAM の掲げる主なサイエンス目標は、GRB を用いた初期宇宙探査であるが、搭載検出器の性能 を考えると突発天体・変動天体に関する様々なサイエンスが行える。

2010年代後半から、KAGRA や Advanced-LIGO, Advanced-VIRGO のような世界の重力波観測施設が本 格的に稼働しはじめる。重力波源としての最有力候補は「コンパクト星同士の合体(中性子星連星など)」であ るが、同時に short GRB を発生すると予想されている。さらに中性子過剰核の原子核崩壊に伴う macronova (kilonova)が伴うことが発見された。重力波観測だけで決まる方向は 10 度以上と粗いため、発生源の特定が困 難である。HiZ-GUNDAM による広視野 X 線モニターおよび近赤外線望遠鏡での追観測により、重力波と同 期した short GRB (特に extended emission) やその他の X 線突発天体の方向を精度良く特定できるため、重 力波天文学という新たな学術領域の創成に貢献できるだろう。

さらに GRB 固有の研究として、赤方偏移 z < 1の X 線フラッシュ(X-Ray Flash : XRF) や、optically dark GRB と呼ばれる明るい残光を伴わない種の GRB について研究を発展させられるだろう。XRF は GRB と類 似した振る舞いを示すが、10 keV 以下の X 線領域で主に輝き、通常の GRB のような 100 keV 帯域の放射は ほとんど見られない天体現象である。GRB と同様に大質量星の崩壊に伴って発生すると考えられており、関 連性が極めて深い現象である。Swift 衛星は 15 keV 以下に感度が無かったため全くと言って良いほど研究が進 まなかった。XRF のローカルな発生率は、GRB よりも 10 倍程度多いと見積もられているため、XRF・GRB の包括的な研究は星の最期を理解する上で極めて重要な位置づけとなっている。また、optically dark GRB を 早期に近赤外線で追観測することで、大質量星の形成環境(ダスト吸収など)の調査や、そもそも暗い放射メ カニズムなのかの特定をすることができるだろう。

GRB の発生を待ち受けている間は、近赤外線望遠鏡によるサーベイ・モニター観測を実施できる。図 4.52 に、1年間(運用効率 1/2 を仮定)で実現できるサーベイ領域と限界等級を示す。天体が 3×3 ピクセルに広 がると仮定し、1 % の偶然確率の混入限界を見積もると、 $1-1.5 \mu m$ 帯で 24 mag(AB)程度となることから、 図 4.52 の赤い実線が実効的な感度となる。2 MASS カタログを越える広域カタログの生成や、超新星爆発や 変動天体のモニター観測、高赤方偏移クェーサーの photometric 探査などに活用できる。



図 4.52: 近赤外線望遠鏡による予想感度とサーベイ可能領域

高密度天体(ブラックホール、中性子星、白色矮星)において「時間変動」は基本的な性質の1つであり、 他にも多種多様な天体について突発天体の監視は重要である。星からの巨大フレア現象は太陽などの主系列星 の性質を理解するとともに、宇宙天気にも関連する重要なテーマである。超強磁場の中性子星(マグネター天 体)はバースト活動や定常X線の突発現象など変動性の高い天体として知られ、極限的な磁場における物理や 高密度な内部への新しい観測の窓になりつつある。また、X線バーストを生じる中性子星の質量や半径の精密 測定から、高密度物質への状態方程式の観測的研究も再び活発になってきている。激しく変動するブレーザー 天体は、相対論的な速度を持った宇宙ジェットの形成メカニズムを探求する場であり、これは高エネルギー天 文学最大の謎の1つと言える。これらの天体の活動性をX線でモニターし、迅速に近赤外線望遠鏡で追観測す ることで、Time Domain Astronomy の発展に大きく寄与できるほか、地上の TeV ガンマ線観測計画 (CTA) やニュートリノ観測 (IceCube) などとも連携できることから、突発天体を主軸としたマルチメッセンジャー天 文学へも貢献できることになる。

4.9.5 他の天体を用いた初期宇宙観測との相補性

初代天体と再電離 (3.4 節) でも説明されているように、クェーサーによる Gunn-Peterson テストなどでも 宇宙再電離の測定が行われているが、中性水素の割合が 10⁻³ よりも高くなると吸収線構造が飽和して測定が 不可能となってしまう。また、宇宙マイクロ波背景放射は視線方向に積分された情報であるため、明確な時期 の特定は難しいと考えられるし、複数回の電離を受けたような状況は判別できなくなってしまう。

GRB は突発天体であるために周辺環境への影響が少なく、さらに、その母銀河は進化の進んでいない矮小 銀河であることが多いため、より一般的な無バイアス性の高い観測が可能となる。しかも、GRB 残光のスペ クトルは単純なベキ型であることから、Lyα端の減衰翼の構造を捉えやすい点でも不定性の少ない観測が行え る。銀河進化やクェーサーの観測と相補的な利点が多く、共同で推進すべき課題である。

4.9.6 国内外の関連研究動向と今後の戦略

2020年代前半のGRB 衛星として、中国・フランスが SVOM 衛星を計画している。このミッションの位置 付けとしては Swift 衛星の後継機で、GRB の観測を継続するという意味合いが強い。GRB 検出器の感度は 10 keV 以下においても Swift 衛星と同等の感度しか達成できない。HiZ-GUNDAM の方が 1 桁程度も高感度 で、高赤方偏移 GRB や軟 X 線突発天体に対しては圧倒的に有利である。さらに、SVOM の可視光望遠鏡は 400-950 nm を観測波長帯としているため、赤方偏移 z > 7 の GRB には原理的に対応できない。地上に 1.2 m の近赤外線望遠鏡を建設する可能性もあるが、感度は不十分と言える。GRB を用いた初期宇宙観測のフロン ティアを開拓するためには、HiZ-GUNDAM のように高赤方偏移観測に特化したプロジェクトが必要である。 2011年に NASA の Explorer Mission Program に対して、JANUS (ペンシルバニア州立大学)[8] と Lobster (NASA/GSFC)[9] という 2 つのミッションが提案された。いずれも GRB を用いた初期宇宙観測を主題とし ていたが、科学的意義は高評価だったものの技術的課題が指摘され、採択には至らなかった。我々は Lobster 計画を率いている Neil Gehrels 氏 (現 Swift 衛星のリーダー) との国際協力関係として、運用面と X 線検出器の 技術共有の面で協力していただくこととなっている。具体的には、Swift 衛星がリアルタイムアラートを提供 する際に利用している TDRS 中継衛星についての技術やノウハウを共有させていただき、HiZ-GUNDAM で も利用できるかを共同で検討する。また、X 線撮像検出器の技術は、Swift-BAT 検出器と共有できる点が多い ため、技術面でもサポートしていただく。

4.9.7 ワーキンググループメンバー

HiZ-GUNDAM 計画は、国内の GRB 研究者のほぼ全員が参画しているプロジェクトであり、GRB コミュ ニティの総意として推進しているものである。地上大型望遠鏡による追観測体制について TAO 計画との共同 観測を行えるよう調整している。

1. X線・ガンマ線検出

米徳大輔(金沢大)、三原建弘(理研)、澤野達哉(金沢大)、河合誠之(東工大)、有元誠(東工大)、 池田博一(ISAS/JAXA)、榎戸輝揚(理研)、大野雅功(広島大)、黒澤俊介(東北大)、郡司修一(山 形大)、坂本貴紀(青山学院大)、芹野素子(理研)、田代信(埼玉大)、谷森達(京都大)、中川友進 (ISAS/JAXA)、村上敏夫(金沢大)、谷津陽一(東工大)、山内誠(宮崎大)、山岡和貴(青山学院大)、 吉田篤正(青山学院大)、Lorenzo Amati (INAF)

2. 赤外線望遠鏡

川端弘治、 吉田道利 (広島大)、松浦周二(ISAS/JAXA)、津村耕司(東北大)、松本敏雄(台湾中央研究院)、白籏麻衣、柳澤顕史、沖田博文、田中雅臣、成田憲保、福井暁彦(天文台)、浦田裕次(台湾国立中央大学)、本原顕太郎(東京大)、Jochen Greiner (MPE)

3. 理論検討

浅野勝晃(宇宙線研) 井岡邦仁(高エネ研) 泉浦秀行(国立天文台)板由房(東北大) 伊藤裕貴(理 研)、稲吉恒平(コロンビア大)、井上進(宇宙線研)、川中宣太(東京大)、諏訪雄大(京都大)、高橋 慶太郎(熊本大)、寺木悠人(理研)、當真賢二(東北大)、戸谷友則(東京大)、長倉洋樹(京都大)、 長滝重博(理研)、中田好一(東京大)、中村卓史(京都大)、新納悠(国立天文台)、松本仁(理研)、 水田晃(理研)、村瀬孔大(ペンシルバニア州立大)、山崎了(青山学院大)、横山順一(東京大) Maria Giovanna Dainotti (RIKEN) Maxim Barkov (RIKEN) Jirong Mao (Kyushu Univ.) Alexey Tolstov (Kavli IPMU)

4. 衛星システム検討 山田和彦(ISAS/JAXA)

参考文献

- [1] Yonetoku, D., et al., SPIE, 9144, 91442S, 12 (2014)
- [2] Tanvir, N. R., et al., 2009, Nature, 461, 1254
- [3] Salvaterra, R., et al., 2009, Nature, 461, 1258,
- [4] Cucchiara, A., et al., 2011, ApJ, 736, 7
- $[5]\,$ Kawai, N., et al., 2006, Nature, 440, 184
- [6] Totani, T., et al., 2006, PASJ, 58, 485
- $[7]\,$ Totani, T., et al., 2014, PASJ, 66, 63
- $[8]\,$ Roming, P., et al., 2008, HEAD meeting, 10, 28, 22 $\,$
- [9] Gehrels, N., et al., 2012, Proceedings of IAU Symp., 285, 41
- [10] Kann, D. A., et al., 2011, ApJ, 734, 96
第5章 地上プロジェクト

5.1 地上計画検討班の活動経緯

5.1.1 班員

地上計画班は、当初、中規模以上のプロジェクトに焦点をあて、各プロジェクト1人ずつからなる以下の班員で 出発した。地上計画班長 土居 守(東京大学)、TMT: 柏川伸成(国立天文台)、すばる望遠鏡 ULTIMATE SUBARU: 児玉忠恭(国立天文台)、すばる望遠鏡 PFS: 菅井 肇(東京大学)、TAO: 土居 守(東京大 学)、京大 3.8 m: 岩室史英(京都大学)、南極中口径望遠鏡 AIRT: 市川 隆(東北大学)、SGMAP: 吉田道利 (広島大学)。

5.1.2 活動経緯の要旨

2014年3月14日に一回目の会合を開いた。班長は土居が、副班長は柏川が務めることとなった。班員について、すばる望遠鏡全体の将来計画に詳しい人も必要ということで、国立天文台ハワイ観測所副所長の岩田 生氏に参加していただいた。また、2015年2月には PFS の組織の改編に伴い、PFS の担当は菅井氏から東京大学の田村直之氏に交代した。

検討するプロジェクトの選択は、現在の地上大型望遠鏡の柱であるすばる望遠鏡に関係した将来装置計画と、 2020年代の日本の地上光赤外線望遠鏡の柱となるTMTを大型計画として選択した。また中型計画としては、 日本学術会議物理学委員会・天文学・宇宙物理学分科会光赤外線天文連絡会の依頼をうけ、光赤外線天文連絡 会によって、検討された計画のうち、望遠鏡計画のみを選択した。系外惑星の計画はサイエンスの検討に分類 するのが今回の検討書の形ではより適切だと判断をしたためである。

班員による検討会は以下のスケジュールで TV 会議によって行われた。

- 2014 年 3 月 14 日 第一回班員会議: 前述の班員の議論を行った後、当面の目標設定を議論した。とくにサイ エンス班の検討にむけ、大至急、各プロジェクトのサマリースライドを作成することとした。
- 2014年4月3日各プロジェクトのサマリースライドを松原委員長に提出。
- 2014 年 4 月 10 日 松原委員長よりサイエンス班へサマリースライド公開。
- 2014 年 8 月 19 日 第二回班員会議: 各計画の進捗状況について報告しあった他に、地上計画班の活動全体に ついて以下のような議論を行った。柱となる地上大規模計画は、TMT 中心ということで予算が認められ 進み始めた。中規模計画については、2012 年に学術会議の長期計画の議論の一環として光赤天連で一度 議論をした。それぞれが努力をして予算が大半あるいは部分的についたところもあり、再度大きく検討 をしなおすタイミングではないと思われる。しかしながら、計画の数は多く、2020 年代の光赤外線天文 学の健全な発展のため、また他分野に光赤外線分野のビジョンを示すために、サイエンス班と連携をと りながら、目的、大規模計画との関係やシナジーなどを整理して示したい。そのためには、すばる望遠 鏡などの共同利用を中心とした観測装置の整備などと、目的を絞った大学の計画は区別が必要であろう。 ただし、TAO や京大 3.8m は、中間の位置づけを持つ部分がある。共同利用に関係した観測装置の将来

計画については、光赤外専門委員会でも検討をされているので、班の一部の人でワーキンググループを 作ってたたき台を作ると良いだろう。

2014 年 9 月 8 日 2014 年度光学赤外線天文連絡会シンポジウム「光赤外分野の展望~将来計画検討書中間 報告会」にて、全体の議論および各計画の進捗状況を紹介した。

2015年2月18日 各計画の執筆を開始した。

- 2015 年 3 月 6 日 第三回班員会議:執筆及び調整のスケジュールのうちあわせを行った。TMT との関係と スペースあるいは他のプロジェクトとの関係を計画書に含めることとした。地上望遠鏡は長期間にわた り使うことも考慮し、全体のまとめのところでは
 - ピラミッド的に望遠鏡のサイズ分布を描き、相補性をアピールする図をつくる、
 - 年表もシンプルなものを作る、

そして

班長・副班長でたたき台を作る

こととした。TMT をさらにどのくらい応援すべきかは、TMT 推進室と密に連絡して調べる。

2015 年 6 月 10 日 各地上計画の原稿を、松原編集委員長・事務局へ提出した。

- 2015 年 6 月 15 日・24 日 第四回班員会議(全員の予定があわなかったため、二回に分けて開催): スペース計画の検討を中心に、今後のスケジュールなど全体状況の情報を共有した。
- 2015 年7月8日 スペース将来計画シンポジウムにて、児玉氏が地上計画班の報告を行った。また他班原稿に も目を通し、7/24 までにコメントがあれば編集事務局へ連絡をすることとする。また各プロジェクト、 TMT、SPICA を中心に、連携、相補性についての節を必ず作ることとする。
- 2015年9月11日 班長による検討要旨原案を、班員へ送付した。
- 2015年9月14-16日 2015年度光学赤外線天文連絡会シンポジウム「光赤外将来計画:報告書の最終取りまとめと長期戦略への布石」にて、議論を行った。地上班検討書原案の紹介が、土居班長からあった。その場で出た意見としては、スペースとのシナジーの議論をとりいれるべきこと、大学間連携の重要性を強調すること、などである。またシンポジウムの後、地上計画のとりまとめの図について、望遠鏡の口径と数をまとめているようなピラミッド的な観点のみに見えるので、大型・超大型望遠鏡はインパクトのある科学的成果を多数出していく能力を有するという逆ピラミッド的な観点も取り入れるべき、との意見がでた。これを反映させた図を班長・副班長で作成し、地上計画班で持ち回りで議論を行い、とりまとめた。

5.2 世界の光赤外天文学の来し方:地上編

5.2.1 我が国におけるこれまでの主な望遠鏡プロジェクト

はじめに

地上の光赤外望遠鏡の日本における歴史は、2008年に日本天文学会百年史編集委員会により編集され恒星 社厚生閣より発行された「日本の天文学の百年」に黎明時期から詳しく記されている。また光赤外将来計画検 討委員会によって2005年に編集された「2010年代の光赤外線天文学将来計画検討報告書」にも、岡山天体物 理観測所・木曽観測所・上松天体赤外線観測室・ハワイ観測所を中心に記されている。ここでは、2005年以降 の進展を中心に主な観測所を簡潔に紹介する。

324

岡山天体物理観測所

東京大学東京天文台では、乗鞍コロナ観測所が1949年に設置されたのに続き、天体物理学の観測研究を推進しようと、大反射望遠鏡を国内に設置する計画を当時の台長萩原雄祐を中心に推進した。1953年5月、日本 学術会議から総理大臣宛てに政府への要望が提出され、翌1954年6月に、英国から188センチメートル(74 インチ)反射望遠鏡を購入するための予算措置が国会で承認された。東京天文台では台内に藤田良雄氏を委員 長として74吋建設委員会を設置し、計画の立案推進をおこなった。望遠鏡の設置場所は、気象庁の協力で岡 山県・静岡県・長野県内の三候補地が選定され、小型望遠鏡による星像(シーイング)の測定などが行われ、 その結果、1956年6月に建設地は岡山県の現敷地と決定された。188センチメートル望遠鏡は、カセグレン分 光器2台、クーデ分光器1台とともに、英国グラブ・パーソンズ社より購入することとなり、また91センチ メートル反射望遠鏡(36吋光電反射赤道儀)が、日本光学工業株式会社で製作されることとなった。1958年12 月、現地でドームの起工式が行われ、1960年10月に、観測所開所式が188センチメートル望遠鏡ドームの傍 で挙行された。

観測プログラムは、全国の研究者からの提案を調整して観測計画案を作成し、東京天文台長が教授会にかけ る形で決定された。188 センチメートル望遠鏡は、建設当時には世界第7位の口径を誇り、初期の研究成果に は X 線天体 Sco X1の光学同定、A 型特異星 (CP 星) や低温度星、B 型輝線星、食連星の分光学的研究、銀河 の形態研究などがあげられる。

1988年に東京大学東京天文台が国立天文台と東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センターに 改組された際には岡山天体物理観測所は国立天文台の観測所となった。それを契機に本格的共同利用が順次始 まり、スクリーニング制が1989年後期より実施され、現在に至っている。また、すばる望遠鏡の稼働にほぼあ わせて、長期の観測時間を使って特色ある成果を出す「プロジェクト制」も2000年前期から導入されている。

共同利用観測装置は、188 センチメートル望遠鏡、91 センチメートル望遠鏡あわせて約 20 種類が開発・運 用されてきた。188 センチメートル望遠鏡では、1970 年代半ばまでクーデ分光器による観測が主流であった が、1969 年に開発されたカセグレン映像増幅管 (II) 分光器によって、銀河などの分光観測が活発に行われる ようになった。1980 年代後半には CCD カメラが導入され、写真乾板は使われなくなっていった。1994 年に は、日本で初めて本格的な 2 次元赤外線検出器を搭載した近赤外線共同利用装置 OASIS が稼働し、また 2000 年には高分散エシェル分光器 HIDES の運用が始まった。2006 年からは新しい近赤外線観測装置 ISLE が稼働 を始め、共同利用へ供された。大学等からの持ち込み装置も数多く受け入れており、京都大学 3 次元分光器、 低分散・偏光分光測光装置 HBS、名古屋大学 TRISPEC などが持ち込み装置として活躍した。現在は HIDES を用いた太陽系外惑星探査計画が活発に行われている他、京都大学 3 次元分光器をもとにした可視分光撮像装 置 KOOLS や ISLE などを用いた様々な種類の観測が実施されている。また太陽系外惑星のトランジット観測 のための MuSCAT も稼働を開始している。

木曽観測所

木曽観測所は、1974年10月に当時東京大学東京天文台の観測所として開設された。1960年に東京天文台岡 山天体物理学観測所に74インチ望遠鏡と36インチ望遠鏡、また1962年に東京天文台堂平観測所の36インチ 望遠鏡が稼働を始めると、広視野観測を可能とするシュミット望遠鏡を実現をめざす動きが活発となり、日本 学術会議天文学研究連絡会の下の将来計画小委員会によって1965年に報告書がまとめられた。呼応して、恒 星天文学の研究を進めたい新進天文学者が集まったSAM(Stellar Astronomy Meeting)によっても検討が進 められた。特に微光天体の観測を行える夜空の暗い場所ということで、調査の結果、長野県の三岳村(現木曽 町)・大滝村・上松町の境界の1120mの地点に、口径105 cmのシュミット望遠鏡を建設することとなった。 木曽シュミット望遠鏡は、開所当初は 35.6 cm 角の写真乾板に約6度角の視野の撮像が可能であり、発足当 初から共同利用施設として全国の研究者に開放され、太陽系から系外銀河に至る様々な天体の撮像観測を行っ てきた。

写真乾板を用いた代表的な観測研究としては、紫外超過銀河 (KUG) サーベイ、近傍銀河の表面測光、輝線天体探査、銀河系恒星分布、炭素星探査などがある。1987 年からは CCD カメラが搭載されはじめ、共同利用観測には、主に 1K CCD カメラ、2K CCD カメラが供されてきた。現在では 8、個の 4096 × 2048 画素の CCD を搭載した 4 平方度の視野を有する KWFC (Kiso Wide Field Camera) が、活発に使われている。CCD カメラの時代にも太陽系天体から銀河まで様々な天体観測が行われてきており、比較的長期にわたる観測としては、近傍の超新星サーベイ KISS (Kiso Supernova Survey)、銀河系の変光星探査 KISOGP (Kiso Intensive Survey of the Galactic Plane) などが行われ、多くの超新星や変光星を発見している。

また 100 万画素の CCD を 16 個動かすモザイク CCD カメラ1号機や近赤外線カメラ KONIC などもシュ ミット望遠鏡に搭載され、半導体検出器による観測天文学の開発現場ともなってきている。広視野の短時間変 動観測にむけて、CMOS センサーを多数搭載したカメラの開発も始まっている。

木曽観測所では教育活動も大変盛んに行われてきており、全国から高校生が春休みに合宿形式で集まる「銀 河学校」、近隣の高校向けの「星の教室」をはじめとするさまざまな教育・普及活動が行われてきている。

1988年に東京大学東京天文台が国立天文台と東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センターに 改組された際には、天文学教育研究センターの観測所となり、引き続き全国共同利用を継続している。

上松天体赤外線観測室

わが国の赤外線観測は、1965年頃、名古屋大学の早川幸男教授を中心に、杉本大一郎、松本敏雄、奥田治 之の各氏らが研究体制の立ち上げを行った。当初は浜松テレビ(現浜松ホトニクス)のガラス管封入の硫化鉛 (PbS)検出器を岡山天体物理観測所の91センチメートル望遠鏡に持ち込み、月の表面の観測を行った。1967 年には奥田治之氏を中心に京都大学物理学第2教室の宇宙線研究室に赤外線天文学のサブグループが作られ、 名古屋大学と共同で岡山天体物理観測所の望遠鏡を用いて、銀河中心や晩期星の偏光観測実験などを行った。

1973年には京都大学理学部物理第2教室・宇宙線研究室の佐藤修二、舞原俊憲の両氏を中心に、名古屋大 学理学部(U研)の協力を得て、口径1mの赤外線専用の望遠鏡を持つ上松天体赤外線観測室が、科研費を中 心財源として長野県木曽郡上松町の才児牧場に建設された。1973年7月に開室し、彗星、新星におけるダス トの研究や、銀河中心部の磁場構造、暗黒星雲の内部磁場、炭素性の3ミクロン帯バンドなど、様々な観測が 活発に行われた。

上松赤外線望遠鏡の主鏡は口径 1.0 m で、当初はジュラルミン塊を曲率半径と同じ長さの鉄の角棒の先にバ イトの刃を取り付けて切削した、"球面鏡"であった。1978 年から 79 年にかけて科研費を新たに獲得して、鏡 面の更新を行った。また半波長板を回す方法を採用した偏光計を製作して、偏光の精度 0.05 %の観測を可能と し、星形成領域の散乱偏光や暗黒星雲の磁場偏光など、世界に注目を浴びる偏光観測の成果をあげた。検出器 は当初は、硫化鉛 (PbS) と Ge:Ga ボロメーターであったが、1970 年代後半から主流になったインジウム・ア ンチモナイド (InSb) 単素子検出器を 1980 年に導入、CVF 狭帯域測光、偏光器、ファブリペロー分光器を製 作して組み合わせて観測が行われた。

初めの15年間には、34編の査読論文を出版し、11名の博士を生んだ。少ない予算の中で、関係者の努力で 上松観測室を軸に地上赤外線観測天文学が立ち上がったということは、特筆に値する。1980年代後半以降は、 上松観測室で育った赤外線研究者がマウナケア(UH88、UKIRT日英協力)やワイオミングへの海外へ進出し た。一方、上松観測室の望遠鏡は1980年代後半からは次第に使われなくなり、2003年11月にドームや望遠 鏡が撤去され、閉室となった。

国立天文台ハワイ観測所

岡山天体物理観測所の 188 センチメートル望遠鏡は、建設当初は世界で 10 位以内に入る大口径を誇ってい たが、1980 年代になると 30 位近くまで下がってきたため、次期大型光学赤外線望遠鏡を望む声があがってい た。1980 年に野辺山宇宙電波観測所が発足すると、東京天文台将来計画委員会や 1980 年に結成された光学天 文連絡会を中心に、本格的な検討が開始された。1984 年には日本学術会議の天文学研究連絡委員会において、 大型光学赤外線望遠鏡計画 (Japan National Large Telescope = JNLT)の推進決議が採択され、1985 年から は、様々な建設地の調査や基礎技術開発等が行なわれはじめた。1988 年の東京天文台の改組後は、大学共同利 用機関として設置された国立天文台が、計画を担うこととなった。1990 年度には、いわゆる調査費が政府に よって認められ、1991 年度から製作・建設が開始された。望遠鏡の口径は最初は「口径5 m 以上」という下限 目標だったが、設計段階では 7.5 m に、さらに概算要求最終段階では 8 m 級となった。建設予算の執行段階で 一般公募を行ない、愛称「すばる」を冠した望遠鏡名となり、最終的な有効口径は 8.2 m (主鏡直径は 8.3 m) となった。

すばる望遠鏡は、直径 8.3 m、厚さ 20 cm、重さ 23 トンのメニスカス主鏡を 261 本のアクチュエータで 0.1 秒ごとに制御する、という能動光学方式を採用した。焦点は、カセグレン焦点と 2 つのナスミス焦点に加え、 8 m 級望遠鏡としては当時唯一の主焦点も作られた。

建設地については、観測条件のみならず、交通の便、社会環境、受け入れ体制など様々な要素を検討したう えで、米国ハワイ州ハワイ島のマウナケア山頂と決定され、1992年7月に山頂で起工式が催された。1987年 にはハワイ州ハワイ郡ヒロ市にハワイ観測所が開設され、また三鷹の国立天文台本部には開発実験棟、解析研 究棟、情報図書館棟などが整備された。

すばる望遠鏡の建設の総合契約者は三菱電機で、その下で主鏡材鋳造は米コーニング社、研磨はスイス系の コントラヴェス社が請け負った。計算機・制御系は富士通、山頂の建屋設計はイギリスのエーサー・フリーマ ンフォックス社、施工はカナダのコースト・スチール社が担当した。大型部品等の運搬は日本通運アメリカな ど各社の努力により、可動部重量 550 トンという当時世界最重量の光赤外線望遠鏡が建設された。

すばる望遠鏡は、1998 年末にファーストライトを迎え、完成式典は 1999 年 9 月に催され、2000 年から本格 的な試験観測が開始された。第一期観測装置は、CIAO, COMICS, FOCAS, HDS, OHS, IRCS、Suprime-Cam の7種類が日本の研究者の様々な需要にこたえる形で、幅広く用意された。観測装置の立ち上げに当たっては、 大学関係者、とくに大学院生も多く参加し、日本の光赤外線天文学のそれまでの装置開発の力を結集し、さら に発展を続けるための次世代育成の大切な現場となった。その後も、AO36, AO188, MOIRCS, FMOS, Hyper Suprime Cam と、第二期以降の装置も製作、可動を開始している。これらを用いた研究は大変盛んに行われ ており、観測成果は国際的にも高く評価されている。

広島大学・東広島天文台

広島大学・東広島天文台は、国立天文台に設置されていた「赤外シミュレーター」の改造・移設により、2006 年5月に完成した。赤外シミュレーターは、すばる望遠鏡の装置開発のテストベンチとして1996年に製作さ れた口径1.5mの光赤外線望遠鏡である。東広島天文台に移設後は「かなた望遠鏡」と命名され、主として高 エネルギー突発天体観測の専用望遠鏡として、広島大学によって運用されることとなった。

この計画の始まりは 1995 年頃に遡る。当時、国立天文台では岡山天体物理観測所の活性化の一つの方策と して大学への移管が議論されていた。岡山観測所は、この検討の中で広島大学との関係強化を模索していた。 広島大学では NASA が主導する次期ガンマ線観測衛星(後のフェルミ衛星)開発への参加を検討しており、衛 星と連携した地上望遠鏡の設置が議論されていた。1998 年に、広島大学は正式にガンマ線衛星計画に参加し、 地上望遠鏡計画の具体化を検討しはじめた。そして、赤外シミュレーターの岡山観測所への移設・活用を主眼 とした計画をまとめた。1999年から2000年にかけて、関西・中四国の大学と協力して岡山観測所活性化案の 検討を進めた。それは、京都大学の3m望遠鏡計画を中心として、国内活動拠点となる新たな観測所を目指 すというものであり、広島大学は赤外シミュレーターを移設してガンマ線衛星との連携研究を推進することと なっていた。

その後、京都大学の計画の早期の推進が困難となり、広島大学は独自に計画を進めることを余儀なくされ、 単独で赤外シミュレーターを移設することとなった。2002年には国立天文台と広島大学の間で望遠鏡移設のタ スクフォース、さらには光赤外専門委員会の下に移設小委員会が作られ、移設に関する具体的な検討が行われ た。2003年に、国立天文台から広島大学に赤外シミュレーターを移管することが、正式に決定された。

当時は、移設先として岡山観測所が想定されていたが、広島大学によるシーイング調査の結果、東広島市西 条盆地南東の福成寺近辺に、良好なサイトが特定された。地元からの支援もあり、広島大学は、2004年に望遠 鏡移設先として東広島とすることを決定し、国立天文台および光赤外天文コミュニティとの議論を開始した。 2004年3月に赤外シミュレーターは国立天文台から広島大学に移管された。

2004年4月に広島大学・宇宙科学センターが設立され、以後の移設計画推進母体となった。2004年8月に 国立天文台から移設先についての正式な了承を得、その後コミュニティの理解も得た。さらに新天文台建設の ための概算要求が承認され、2005年から移設・天文台建築が行われた。望遠鏡の移設と天文台建設は2006年 5月に完了し、前述の通り、東広島天文台が発足したのである。

東広島天文台は、その当初目的通り、ガンマ線天文衛星「フェルミ」やX線天文衛星「すざく」などの高エネルギー天文衛星との多波長連携観測によって、高エネルギー突発天体を主たるターゲットとして観測研究を 進めている。装置開発のテストベンチとしての機能も残し、東京大学、東北大学、名古屋大学などの観測装置 の試験観測にも活用されている。

東京大学アタカマ観測所

すばる望遠鏡のファーストライトが 1998 年末に行われると、南半球での日本の光赤外線観測天文学のさらな る推進と、次世代育成に資する大学望遠鏡の必要性などの観点から、東京大学大学院理学系研究科附属天文学 教育研究センターを中心に、中口径の望遠鏡を建設する計画の検討が開始された。1999 年には、チリ共和国北 部のアタカマ地方で、最初の現地調査が行われた。その後、米国の気象衛星データを解析して、チャナントー ル山(標高 5640 m)の地域が、高山かつ乾燥した気候のため、赤外線を吸収する水蒸気が大変少なく、様々な 様相を検討すると世界で最も赤外線観測に適した場所であると判断された。2001 年からはチャナントール山麓 で気象モニターを開始、またシーイングや赤外線雲モニターの測定が行われた。

山頂の調査は、2002 年 11 月に、徒歩による山頂調査から始まった。2006 年 4 月には、パンパラボラ平原か ら山頂への全長 5.7 km の調査用道路を開通させ、気象モニターと雲モニターを山頂へ移設し、自動計測を開 始した。2006 年 11 月には山頂における最初のシーイング測定も行われ、山頂でのサイト調査はいずれも期待 通りの良い結果をえた。2009 年 3 月には、実際の天体観測によってサイトの良好さを示す目的で口径 1 m の mini-TAO 望遠鏡が建設され、5 月より本格的な観測が行われた。mini-TAO 望遠鏡には中間赤外線観測装置 MAX38 と近赤外線可視撮像装置 ANIR の 2 台の観測装置が搭載された。MAX38 は、地上からはほぼ初めて 30 µm 帯の天体観測に成功し、また ANIR も大気の窓の端にあって地上からの観測がほとんど行われていない Pa 線 (1.875 µm)の観測に成功した。

mini-TAO 望遠鏡は共同研究ベースで TAO プロジェクト以外の研究者にも活用され、日本の研究者を中心に、木星の衛星イオの噴火活動の中間赤外線モニター、星周円盤の中間赤外線観測、Be 型星の Pa 線観測、

AGN やパルサーなどの近赤外線・可視モニター、Pa 線を中心にした近傍の赤外線高輝度銀河の観測などで 成果をあげており、2014 年度末までに 7 本の査読論文、4 本の博士論文が出版されている。

なお、主力望遠鏡である口径 6.5 mTAO 望遠鏡については、後ろで詳しく記されるように、2018 年のファー ストライトを目指して建設が進んでいる。

光赤外大学間連携

2011 年度から、北海道大学、東京大学、東京工業大学、名古屋大学、京都大学、広島大学、鹿児島大学の7 大学と大学共同利用機関である自然科学研究機構・国立天文台が連携し、日本の大学が国内外に持つ中小口径 の望遠鏡を有機的に結びつけて、突発天体等の即時および連続観測により、その物理現象の解明をメインテー マとした最先端共同研究の推進と大学における天文学教育を促進するための事業(大学間連携による光赤外線 天文学教育研究のネットワーク構築)が始まった。2012 年度には埼玉大学、兵庫県立大学も加わっている。

この連携事業では、突発天体のフォローアップ観測および変光天体の連続モニター観測等、天文学の比較的未 開拓な次元である「時間軸」に焦点を当てた斬新な研究を行うことを目的としている。すばる望遠鏡や ALMA など大型望遠鏡では観測時間を得にくい種類の観測モードにおいて、小型望遠鏡を連携させて最先端研究を行 うことにより大学での教育と研究を促進し、研究者間の交流を促進しながら、広い視野と知識を備えた研究者 を育成することを目指している。

連携に参加している望遠鏡は、北海道大学のピリカ望遠鏡(口径 1.6 m)、埼玉大学の 0.55 m 望遠鏡、東京 大学の木曽観測所シュミット望遠鏡(口径 1.05 m)およびアタカマ観測所 miniTAO 望遠鏡(口径 1.0 m)、東 京工業大学の明野 MITSuMe 望遠鏡(口径 0.5 m)、名古屋大学の南アフリカ天文台 IRSF(口径 1.4 m)、京 都大学の京大屋上観測所の望遠鏡(口径 0.4 m)、兵庫県立大学の西はりま天文台なゆた望遠鏡(口径 2.0 m) 国立天文台岡山天体物理観測所の 188 センチメートル望遠鏡と MITSuMe0.5 m 望遠鏡、広島大学の東広島天 文台かなた望遠鏡(口径 1.5 m)、鹿児島大学の入来観測所 1.0 m 望遠鏡、国立天文台の石垣島天文台むりか ぶし望遠鏡(口径 1.0 m)である。(この他に京都大学が岡山に建設中の 3.8 m 望遠鏡や東京大学の 6.5 mTAO 望遠鏡の建設にむけての協力も、活動の一環として行われている。)

目玉となるのは、これらの望遠鏡群を連携させ、様々な場所から様々な観測装置を用いてほぼ同時に観測を 実施することである。突発天体の観測や、モニター観測においては、ある時間帯に確実に観測を実施すること が重要となる場合が多いが、地上観測の場合、天候の不定性が常に伴う。しかしながら、この連携では国内に おいても北海道から石垣島まで広く分布した望遠鏡群を使うことにより、悪天候を回避した観測が行える確率 が、通常の1台の望遠鏡による観測に比べ格段に向上している。

また、連携に参加している多くの大学・機関の若手を中心とする研究者による運用を行うことにより、若手 研究者の交流も促進されている。

現在までに、特異な型のクエーサー、セイファート銀河、超新星、パルサー、彗星の観測で査読論文5編を 出版、さらに多くの論文報告が予定されている。また、ガンマ線バーストの追加観測報告は随時行っているほ か、連携によって確保された研究者によって、100編以上の査読論文が出版されている。

5.2.2 地上の大型望遠鏡の動向

Extremely Large Telescopes

10m クラスを超える超大型望遠鏡 (Extremely Large Telescope; ELT) については、TMT, GMT, E-ELT の 3 つの計画が進んでおり、それぞれ 2020 年代に運用を開始することを目指している。TMT については別途詳 細に記述されるので、ここではGMTとE-ELTについて簡単に説明する。

GMT: Giant Magellan Telescope (GMT) は 8.4 m の鏡 7 枚を同架する形の ELT で、チリ ラス・カンパナ スに建設される予定で、web page¹ によると 2021 年にコミッショニング開始を目指すとされている。米国の 複数の機関・大学のほか、オーストラリア、韓国、プラジルが参加している。観測装置としては、

- G-CLEF: 可視高分散エシェル分光装置
- GMACS: 可視撮像・多天体分光 (中分散) 装置
- GMTIFS: 近赤外線 (0.9 2.5 μm) 面分光・撮像装置
- GMTNIRS: 近赤外線 (1-5 μm) 高分散エシェル分光装置

の4つが挙げられている。近赤外線の装置は共に補償光学を利用する。GMTの特徴としては、20分角程度と いうELTとしては広い視野をもち、補償光学もGround Layer AO (GLAO)に対応する点が挙げられる。上 記の装置に加えて、ファイバーポジショナーシステムMANIFESTが提案されており、20分角の視野にファイ バーを配置して、複数の観測装置で同時に観測できるようなシステムを構築しようとしている。

E-ELT: European Extremely Large Telescope (E-ELT)² は、ESO が推進する ELT 計画で、VLT が設置さ れている Cerro Paranal から近い Cerro Amazones に口径 39 m の望遠鏡を建設するものである。2014 年末に、 一部を Phase 2 として先送りするものの建設開始の決定がなされ、2024 年のファーストライトを目指すとされ ている。

主鏡セグメント鏡の枚数は、798枚となっている。望遠鏡光学系の特徴としては、M4として2.4mの平面 鏡(6枚のセグメント鏡)が入っており、これを約8000本のアクチュエータで駆動して補償光学を行う、すな わち補償光学が望遠鏡光学系に組込まれていることが挙げられる。これにより、ナスミス焦点に視野10分角 にわたって補正された光が届けられるようにする、とされている。

観測装置としては、ファーストライト装置として近赤外線撮像装置 (ELT-CAM/MICADO)、面分光装置 (ELT-IFU/HARMONI) が選定されているほか、中間赤外線装置、多天体分光装置、高分散分光装置も開発を 進めることとなっている。MICADO は 3×3 の $4k\times4k$ 検出器により 4 mas で約 1 分角の視野または 1.5 mas で 20 秒角の視野をカバーする。レーザーガイド星つき Multi-Conjugate AO (MCAO) システムである MAORY と組み合わせる。スリット分光モードやコロナグラフモードも備えるようである。HARMONI は $6'' \times 9''$ から $1.5'' \times 2''$ の視野の面分光装置で波長分解能 $R \sim 3500$ 、近赤外線 ($0.8 - 2.4 \mu$ m) の波長カバレッジをベースラ インとしつつ、可視光や高分散への拡張を検討しているようである。

ELT の科学目標: ELT は、その巨大な鏡による集光力と8-10m級望遠鏡を凌ぐ角分解能が鍵であり、これらによって、JWSTを凌駕する空間分解能力と感度を達成することを目指している。これらのプロジェクトが主たる科学目標として掲げているものは、

- より遠方の銀河まで星種族を分解し、銀河の形成史を明らかにする
- 宇宙初期の銀河の形態や力学的構造
- 系外惑星の観測 ハビタブルゾーンの地球型惑星の characterization
- 高精度のアストロメトリによる銀河系中心や銀河系の力学的進化の理解

330

¹http://www.gmto.org

²http://www.eso.org/sci/facilities/eelt/

などであり、比較的似通っている。また、地上の 8 – 10 m 級望遠鏡や宇宙望遠鏡、多波長の望遠鏡とのシ ナジーがいずれのプロジェクトでも強調されている。今後は、それぞれの望遠鏡と装置の特徴をよく見極め、 どのようなサイエンスがユニークなものか、また ELT 同士がいかに連携していくかを考えていくことが、必 要になるであろう。

\mathbf{LSST}

LSST (Large Synoptic Survey Telescope)³は、米国 NSF, DoE と大学、研究機関等のコンソーシアムに よって推進されている、口径 8.4 m (実質口径 6.7 m)の広視野望遠鏡を使った撮像サーベイ観測を実施するプ ロジェクトである。望遠鏡は 3.5 度の視野をもち、カメラは 4k × 4k (0.2" サンプリング)の CCD 189 個を焦 点面に配置し、U-band から Y-band までの 6 色の広帯域フィルターをもつ。15 秒の積分を繰り返し南天の全 域を 10 年間にわたり繰り返し観測することで、変動天体の発見から宇宙論、暗い天体の観測までを含む多様な サイエンスを展開する計画である。1 晩あたり 30 TB という膨大なデータを処理し公開する計画で、これまで の天文学プロジェクトをはるかにしのぐ大量のデータを生み出す。LSST は、2010 年の米国の Decadal survey で地上望遠鏡計画として最優先項目に挙げられ、2020 年代初頭の観測開始を目指している。

参考のため、可視/近赤外線の広視野撮像望遠鏡+装置の口径と視野直径の比較を行った図を示す(図 5.1)。



図 5.1: 広視野撮像装置の望遠鏡口径と視野の比較。視野直径の左側は丸は月の直径を、右側の三つの丸はオ リオン座の三つ星の距離を表している。WFCam、VIRCam は近赤外線撮像装置、それ以外は可視光の撮像装 置。京都大学 岩室史英氏による。

8-10 m 級望遠鏡の将来計画

8-10m級望遠鏡のうちいくつかについて装置開発の動向を以下にまとめる。

Keck :

³http://lsst.org

マウナケアの2台の10m 望遠鏡からなる Keck observatory では、2010年代後半に以下の二つの新しい観測装 置を立ち上げつつある。

NIRES (Near-Infrared Echelette Spectrometer) ⁴ は近赤外線のエシェル分光器で、波長分解能 $R \sim 2700$ で 0.94 μ m から 2.45 μ m までを同時にカバーする。2015 年にコミッショニングが開始される予定である。

KCWI (Keck Cosmic Web Imager)⁵ は 20"×8.3 – 33" の視野を持つイメージスライサー方式の可視面分 光装置で、波長分解能 1,000 から 20,000、当初は青側チャンネルのみで、将来赤側チャンネルを追加する計画 である。

これらの装置は Keck II に間もなく搭載される予定である。

また、補償光学システムとしては、Next Generation Adaptive Optics (NGAO) を推進している。Keck NGAO は、複数レーザーガイド星によるトモグラフィーで回折限界に近い補償性能を達成すること、可視光 (0.65 µm より長波長) での AO、より広い Sky Coverage を主な目標としている。

Gemini:

Extreme AO 装置 GPI (Gemini Planet Imager) が、Gemini-S で稼働を開始している。新装置として、可視ファイバー高分散分光器 GHOST の開発が始まっている。マイクロレンズを使ったイメージスライサーをもち、1または2天体を同時に観測でき、波長分解能 R = 50,000 - 75,000 で波長帯域 363 - 1,000 nm を一度にカバーする。

さらに、次の新たな観測装置の開発を計画しており、2014 年に feasibility study の提案を公募した。2020 年 代初頭のコミッショニングを目指して、開発が進められる計画である。

VLT:

VLT では、近赤外線多天体面分光システムの KMOS、Extreme AO/コロナグラフの SPHERE、可視面分光の MUSE と、新しい観測装置が次々と立ち上がっているが、この後も新たな装置が加わる予定である。

補償光学システムとして、UT4 に AOF (Adaptive Optics Facility)の搭載が進んでいる。これは可変副鏡 と 4 本のレーザーガイド星を含むシステムであり、HAWK-I の地表層補償光学 (GLAO) モード (7.5'×7.5') と MUSE の補償光学 (広視野モードは 1'×1' の GLAO、狭視野モードは 7.5"×7.5" の Laser Tomographic AO) を実現する予定である。また、1 – 5 μ m の撮像と 2.5 μ m より短波長での面分光 (SINFONI の SPIFFI の改良 版)を可能にする新装置 ERIS が AOF と組み合わせる装置として開発されている。

惑星探査用の可視高精度高分散分光装置 ESPRESSO⁶は、2016年のファーストライトを目指して開発が進められている。

4 台の望遠鏡を使う VLTI も、VLT の強力な特徴である。K バンドでの高精度アストロメトリを目指す GRAVITY、および中間赤外線装置 MATISSE が、2016 年にファーストライトを迎える予定となっている。

さらに検討中の段階の装置として、MOONS ⁷ がある。これは、ファイバーを使った近赤外線多天体分光装置 で、500 平方分の視野内に 1,000 本のファイバーを配置し、640 nm – 1,800 nm の波長範囲で中分散 ($R \sim 4,000 - 6,000$) から高分散 ($R \sim 20,000$) の分光観測を実現するものとなっている。

MSE :

まだ計画段階ではあるが、すばると同じマウナケアにある CFHT を新たな 10m 級望遠鏡に更新するプロジェ クトが MSE (Maunakea Spectroscopic Explorer)⁸である。既存のドーム建物とピアーを利用しつつ、10 m 級 のセグメント望遠鏡を設置し、すばる PFS に似たファイバー多天体分光器を用いたサーベイ観測を展開する計 画である。現在検討されている装置仕様は、波長分解能 2,000 から 20,000、3200 本のファイバー、370 – 1300

⁴http://www2.keck.hawaii.edu/inst/nires/

 $^{{}^{5}} http://www.srl.caltech.edu/sal/keck-cosmic-web-imager.html$

 $^{{}^{6}} http://www.eso.org/sci/facilities/develop/instruments/espresso.html ~~$

⁷http://www.roe.ac.uk/ ciras/MOONS/VLT-MOONS.html

 $^{^{8}}$ http://mse.cfht.hawaii.edu

nm(または 1800 nm) の波長カバレッジとなっている。CFHT のもとに MSE プロジェクトオフィスが設置され、科学的、技術的な検討を進めている。

参考文献

[1] 日本の天文学の百年 日本天文学会百年史編集委員会編 恒星社厚生閣 2008 年

- [2] 東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター木曽観測所40周年記念誌 2014年
- [3] TAO Project The 2nd edition 東京大学大学院理学系研究科 TAO 計画推進グループ 2012 年

5.3 TMT

5.3.1 概要と科学目的

TMT (Thirty Meter Telescope) は 492 枚の分割鏡からなる口径 30 m の汎 用光学赤外線望遠鏡で、マウナケア山 頂に国際協力科学事業として建設する。 日本は設計製作実績のある望遠鏡本体 構造の製作、ゼロ膨張主鏡材の製作と 非球面研磨の一部、第一期観測装置の 製作により、建設経費全体の約 25%に 相当する分担を行う。 補償光学機能を 用いることにより、すばる望遠鏡の4倍 の解像力、13 倍の集光力、200 倍の効 率を達成する。すばる望遠鏡で日本の 研究者の実績のある初期宇宙の銀河形 成史の研究、急速な拡がりを見せてい



図 5.2: TMT の完成予想図

る太陽系外惑星探査と惑星形成過程の研究、ダークマター/ダークエネルギーの解明につながる研究などを目 的の柱とする、次世代の基幹望遠鏡となる。2012 年度から準備検討費、2013 年度から継続的に建設費が予算 措置されている。完成予想図を図 5.2 に示す。

5.3.2 TMT の主な仕様

光学系

TMT の特徴は、492 枚の六角形分割鏡を敷き詰めて作る f/1 の直径 30 m の主鏡である。光学設計は無収差 カセグレン (リッチークレチアン式) であり、球面収差とコマ収差は補正されている。開口絞りは主鏡部分に設 置され、後側焦点距離は 16.5 m である。凸型副鏡 (直径 3.1 m 双曲面) を用いることによって、可能な限り鏡 筒を短くし、望遠鏡構造とドームのサイズ並びに費用を最小限に抑えることができる。主鏡前面に位置する可 動式第三鏡 (2.5 m×3.5 m 平面鏡) によって、f/15 の望遠鏡ビームはナスミス台に設置する観測装置へと向け られる。大気分散補正、視野回転補正並びに迷光遮断機能は観測装置と補償光学に組み込まれる。有効観測波 長は 0.31 – 28μm である。

望遠鏡本体構造

望遠鏡構造は、単一の方位角ベアリング と2つの大型高度角ベアリングを持った高 度方位角設計になっている(図 5.3 参照)。 望遠鏡の指向精度は1秒角、オフセット精 度は1分角オフセットに対して50ミリ秒 角である。望遠鏡構造は、(1)ピアと観測 所フロアに接続されている固定構造、(2) 観測装置を支える2つの大型ナスミス台を 含む方位角構造、(3)すべての望遠鏡光学 系を動作させる高度角構造、の3つの部位 から構成されている。副鏡とレーザーガイ



ド星発射装置はトップリングから伸びる6本スパイダー交点に設置されることで安定性を向上させる。このような設計によって、ドーム開口部付近の強風にさらされる面積を最小限に抑え、風による振動を軽減することができる。望遠鏡にはミラーカバーが無いため、塵の付着を最小限に抑えるために望遠鏡を水平方向に向けて 待機させると共に、すばる望遠鏡と同様にドライアイスを用いた主鏡クリーニング装置が設置される。主鏡再 蒸着の際の分割鏡の交換は、望遠鏡を天頂に向けたうえで高度角構造の中に設置される移動可能なセグメント 鏡交換システム(SHS)を使って行われる予定である。望遠鏡構造は、望遠鏡サブシステムの荷重を効果的に 支えるために有限要素解析を行い最適化されており、必要とされる架台制御ならびに主鏡制御帯域幅(ともに ~1 Hz)での動作を可能にしている。望遠鏡可動部の総重量は関連装置すべてを含めると、2527 トン(2015 年9月時点)であり、そのうち1942 トンは望遠鏡構造と機械系サブシステムである。地震に関しては、マウ ナケアにおける大規模地震モデルデータに基づいて、望遠鏡構造がこれに耐えるよう設計され、免震装置は中 心のピントルベアリングに組み込まれる。架台制御システムには、天体導入のための回転やオフセット、観測 中の天体追尾、信号ノイズ比を高めるためのノッディングとディザリングなどの望遠鏡動作要件を満たすため に必要な装置が含まれる。

主鏡

TMT の主鏡である分割鏡配置図を、図 5.4 に示す。主鏡は、492枚の六角形分割鏡(角か ら角まで 1.44 m、厚さ 45 mm) を 2.5 mm の 間隔で敷き詰めたものである。分割鏡の全体 配置は、これらがあたかも一枚の鏡として機 能するように、主鏡制御システムによって能 動的に制御される。主鏡配置は、82種類の分 割鏡が一つのセットとなり、これが光軸の周 りに 60 度ごとに 6 回繰り返される配置になっ ている。各分割鏡は、裏面を球面メニスカス 加工された低膨張ガラスを素材とする軸外し 非球面鏡である。個々の分割鏡の非球面量は、 6 μm(内側の分割鏡) から 226μm(外側の分割 鏡)の範囲になっている。蒸着のために分割鏡 を取り外した後、すぐに同じ種類の蒸着済み の鏡を設置できるよう、各種類ごとに7つの





分割鏡(蒸着交換用を含む)が製作される予定である。要求される鏡の表面精度と安定性を得るために、各分割 鏡支持機構には27点の軸方向支持と横方向支持機構が組み込まれている。分割鏡の形状は、さらに21個のア クチュエータをもつ歪補正装置を使って準静的に制御される。鏡面と垂直方向の3つの動き(鏡面の上下運動、 傾き)は、各分割鏡ごとにある3つのアクチュエータと分割鏡間ごとにある2つのセンサーを用いて、主鏡制 御システムによって能動的に制御される。

ドーム

望遠鏡ドームは、帽子型の斬新な設計(図 5.2 参照)になっており、これによって風による望遠鏡の揺れを最小限に抑え、データの画質を向上させることができる。またこの設計はドームサイズの縮小とコスト削減にも貢献している。ドームは半径 33 m、高さ 56 m であり、固定台と 3 つの回転機構(台座、帽子型構造、シャッター)で構成されている。

観測装置

TMT 観測装置群は、3 つの"ファーストライト装置"と6 つの"将来装置"に分類されている。この選択にあ たっては、科学的重要性、JWST や ALMA とのシナジー、また予算、立ち上げの実現性、技術的先進性など 現実的な側面も考慮された。選択された観測装置群の計画は、紫外 - 可視 - 近赤外、広視野から高空間分解能、 撮像から分光まで、TMTの機能を幅広く網羅している。表 5.1 に、ファーストライト装置と将来装置をまとめ た、TMT の観測装置計画を示す。ファーストライト装置3台は TMT 建設費の一部で開発され、他の装置は運 営費で開発・製作・立ち上げが行われる。すべての装置について、データ解析モジュールが開発され、クイッ クルック機能や観測者それぞれの目的に従って最適化できるデータ解析機能が提供される。3 つのファースト ライト装置は IRIS、IRMS、WFOS と呼ばれる装置である。IRIS は回折限界分解能を持つ撮像および面分光 装置で、34 秒角 imes 34 秒角 (撮像)、4 秒角 (面分光) の視野、 $0.8-2.4~\mu{
m m}$ の波長域、波長分解能 R=4000、な どが装置仕様である。IRMS は Keck 望遠鏡の MOSFIRE のコピーで、再配置可能なスリットを持つ近赤外多 天体分光装置である。波長分解能 R = 3200 と、直径 2 分角の視野にわたって 46 個の多天体スリットを持つ。 IRIS も IRMS も、NFIRAOS という AO 装置に取り付けられる。WFOS は、可視波長域 (0.31 – 1.0 μm) に おいて、シーイング限界での多天体分光、ロングスリット分光、撮像を行うことができる装置である。この波 長域全域にわたる高透過率、視野 8.3 分角 ×3 分角、波長分解能 R = 1000 - 8000 を持つよう設計されている。 サイエンス面からの要請と回折限界解像力を達成するために、ファーストライト時の補償光学系 (AO) はレー ザーガイド星 (Laser Gude Star; LGS) を用いた多共役 AO(MCAO) 方式を採用する NFIRAOS という装置で ある。NFIRAOS は、TMT のナスミス架台に設置され、望遠鏡からの光の波面補正を行った後で観測装置に 出力する3つのポートを備えている。レーザーガイド星システム(LGSF)は地球大気中間圏にあるナトリウム 層に、NFIRAOS に必要な明るさとビーム性能と投影パターンを持った複数のLGS を作り出す。

| 観測装置 | 視野/スリット長さ | 波長分解能 | 観測波長 (µm) | 備考 |
|---------------------|-------------------------------|------------|------------------|---------|
| 近赤外撮像分光装置 $(IRIS)$ | 34″(撮像), < 2″(IFU) | 4k - 10k | 0.83 - 2.4 | NFIRAOS |
| 広視野可視分光器 $(WFOS)$ | 100MOS in $8.'3 \times 3'$ | 1k-8k | 0.31 - 1.0 | |
| 近赤外多天体分光器 $(IRMS)$ | 46MOS in 2.'3 | 4.6k | 0.8-2.5 | NFIRAOS |
| 可視高分散分光器 (HROS) | スリット長 5″ | 50k | 0.31 - 1.0 | |
| 近赤外高分散分光器 $(NIRES)$ | スリット長 2″ | 20k - 100k | 1 - 5 | NFIRAOS |
| 近赤外多天体分光器 (TMT-AGE) | ~ 20 3″IFU in 5′ | 3k | 0.8 - 2.4 | MOAO |
| 中間赤外撮像分光器 (MICHI) | 27.''5 FOV/IFU | 250-100K | 3.0 - 25 | MIRAO |
| 系外惑星直接撮像装置 (SEIT) | 0."3, コントラスト 10 ⁻⁹ | 5 - 100 | 0.95 - 2.4 | |

表 5.1: TMT の観測装置群の主な仕様。最初の3台がファーストライト観測装置である。下欄の将来装置につ いてはまだ決定されていない。

より詳細な TMT の観測装置ラインアップと仕様、観測モードについては http://tmt.mtk.nao.ac.jp/info/files/tmt_inst_table_2014.pdf また、TMT の各機能ごとの観測時間評価については以下の ETC を利用されたい。 http://tmt.mtk.nao.ac.jp/ETC-e.html

科学運用

TMTの科学運用は、毎晩TMTの性能を最大限に引き出し、パートナーの研究者による観測が効率的になるようサポートすることを目指している。観測時間は、あらかじめ各パートナーに配分された夜数に従って、

各パートナーが責任を持って割り当てを行う。各パートナーは、独自に観測プロポーザルの募集・評価・採択を 行う。各パートナーは、採択された観測提案とそれが観測可能な日程を、観測所に連絡する。ユーザーサポー トとして、観測所はプロポーザルの準備、観測準備、観測後のデータ解析のそれぞれに必要なツールを提供す る。観測所のサポートサイエンティストによるユーザーへの直接的なサポートには、オンラインのドキュメン ト、観測シミュレータ、積分・観測時間の見積ツール、一般的なヘルプデスクや FAQ が含まれる。さらに、観 測所はパートナーと協力して、ユーザズミーティングや講習会を開催する。TMT は、基本的にヒロもしくは パートナーの基幹機関からのリモート観測を想定している。ファーストライト時には2種類の観測モードが予 定されている。これは、1) PI が観測の遂行を自らおこなう方法 (PI-直接観測モード) と、2) 観測所のサポー トサイエンティストが PI に代わって観測を遂行する方法 (キューサービス観測モード) である。完全キュー観 測を可能にする機能は将来設ける予定であるが、運用開始時には実装しない。2種類の観測モード共に、突発 天体を観測する ToO プログラムに対応し、後日観測時間を補填する。定期的なモニター観測が必要な提案も、 予めスケジュールすることで対応する。観測データは、18 か月ほどの PI 所有期間を経て公開される。観測所 の運用組織は、執行部の下に、事務部、科学運用、観測装置開発室、ソフトウェア・情報技術グループ、技術 運用グループ、エンジニアリング支援グループの6つの部門で構成され、120 名ほどの常勤職員を抱える予定 である。

5.3.3 TMT の性能と観測プログラム

TMT で実現可能な天文学は多岐に及び、ほぼすべての分野において現在のフロンティアを著しく進歩させ ることが期待されている。その詳細については、この冊子のサイエンスパートの随所に記述されている。従来 の8m級望遠鏡に比べると一桁高い集光力が期待でき、高波長分解能観測が実現できる。また、補償光学の活 用により、スペース望遠鏡を大きく凌ぐ高空間分解能が実現されるとともに、点光源の観測では背景光の影響 が抑えられることも含めて、8m級望遠鏡の約200倍の感度となる。TMT は、汎用望遠鏡として建設され、 最新の観測装置を搭載することにより、さまざまな研究課題に柔軟に対応することが可能となる。補償光学に より、回折限界に近い像を達成した場合には、同じコストの宇宙望遠鏡より口径が大きい分だけ、高い空間分 解能を得ることができる。TMT の持つ高空間分解能 (AO 使用時近赤外線波長において 0.015 秒角) は、さま ざまな分野でメリットをもたらす。また集光力が大きいため、高 SN で高分散分光を行う場合などにも大きな 利点がある。また、中間赤外線波長帯では、3m級の宇宙望遠鏡では回折限界による制限が大きいが、TMT の場合について、すばる望遠鏡、30m級地上大型望遠鏡 TMT、6m級赤外線宇宙望遠鏡 JWST の感度を比 較した。

これまでに検討されてきた観測プログラムについては以下の3つの報告書にまとめられている。

• TMT Detailed Science Case (2015)

http://ec2-52-8-144-112.us-west-1.compute.amazonaws.com/documents/

tmt-dsc-2015-release-2015apr29-s2.pdf

• TMT Detailed Science Case (2007)

http://www.tmt.org/sites/default/files/TMT-DSC-2007-R1.pdf

TMT サイエンス検討会報告書 (2011 年)

http://tmt.mtk.nao.ac.jp/science/download/download.cgi?name=tmt_science.pdf

5.3.4 実行グループ、今後のスケジュールと日本の役割

国立天文台、カリフォルニア工科大学、カリフォルニア大学、カナダ天文学大学連合、中国国家天文台、インド TMT 連携機構の6者からなる TMT 国際天文台 (TIO)が、TMT の建設、運用にあたる。NSF は、TMT



図 5.5: TMT+AO、TMT AO なし、すばる望遠鏡並びに JWST との感度比較図 (TMT 計画説明書より抜粋)。それぞれ (a) 点源に対する撮像、(b) 点源に対する分光、(c) 広がった天体に対する撮像、(d) 広がった天体に対する分光、(e) 点源に対する輝線撮像、(f) 広がった天体に対する輝線分光の場合の観測感度を表している。1 時間の観測で S/N=10 となる場合の天体の明るさを示している。観測装置を含めた効率はすべて等しく 20%、読み出しノイズもすべて等しく $10e^-$ としている。1 時間の積分で S/N=10 となる場合を考えているが、積分は full well を考慮して複数回の読み出しを考えている。点源に対する感度は、それぞれの望遠鏡・波長帯 での回折限界を考慮し、その 2 倍の直径を持つアパーチャを使用した。ただし、すばるおよび補償光学なしの TMT の場合は、大気の影響を受け、FWHM=0.8 秒角 (可視) および 0.6 秒角 (近赤外) とし、 $2\times$ FWHM を直 径としている。ピクセルスケールは、可視、近赤外でそれぞれ現実的なものに近い値を用いている。背景光ノ イズは、地上はマウナケアの場合、宇宙は HST の観測で求められている黄道光 (散乱光) の値を用いている。

5.3. TMT

計画への連携計画資金の助成を決定している。今後のニューパートナーの参入も期待している。国内では国立 天文台を中心に、数多くの大学における天文学研究者も計画に参画しており、物理学/生物学研究者への関心 の広がりも見せている。TMT 計画は、すでに望遠鏡本体、ドーム、初期観測装置の概念設計、基本設計が進 んでいる。TMT の実現に向け、参加国・機関との技術検討と役割分担等の協議をふまえて 2014 年 4 月に合意 書を締結し、5 月に米国において TMT 国際天文台を法人登録/設立し、7 月に建設開始を宣言した。2027 年に ファーストライトを迎え、2028 年から共同利用観測を開始できると見込んでいる。

日本は、国立天文台を軸に、国内の実績のある企業の参加を得て、(1)望遠鏡本体構造の設計・製作・据 付、(2)ゼロ膨張主鏡セグメントガラス材の提供、(3)非球面主鏡セグメント研磨の一部分担、(4)観測 装置の一部の製作、(5)共同利用施設の整備を行うことを想定している。計画の要となる望遠鏡本体構造に ついては、基本検討を行い、平成25年度にレビューに合格し、平成26年度には詳細設計を進めた。主鏡分割 鏡材の開発を進め、鏡材については平成25年度に量産を開始し、研削加工も平成25年度より行っている。観 測装置の製作の国際分担も協議が進み、日本の分担については開発・検討が進められている。大学等の研究者 約100人の協力を得て、TMTによる観測研究提案の検討が行われ、国際的な科学協議においても議論をリー ドしている。

5.3.5 国内の他の計画との関連

すばる望遠鏡はその特色である主焦点機能等を活かした運用とし、ハワイ観測所の拡張という位置づけで、 人的/施設的資源の有効利用を諮り、TMT の運用と連携/一体化を計る。8 – 10 m 級望遠鏡で唯一広視野探査 機能を実現できる主焦点を持つすばる望遠鏡は、次世代に向けて主焦点機能を強化するプランを持っている。 これとタイアップすることで、すばる望遠鏡で絞り込んだ観測天体を TMT で日本人研究者がリーダーシップ を取って観測する流れをつくることができる。すばるの持つ可視広視野撮像機能と TMT との強い連携が期待 されるように、TMT が最も性能を発揮する近赤外線域での広視野探査を目指す WISH との親和性は強い。東 大 TAO、京大望遠鏡、など国内中小規模望遠鏡計画とは技術的接点が多く、新技術による共同装置開発といっ た技術的連携の他に、人材育成・交流の面でも連携が期待される。

世界最高レベルの性能を持つ TMT の観測時間は、高い競争率の審査により配分されるため、厳しい競争に 勝ち残る研究者を養成する。すばる望遠鏡から既に育っている世界的なレベルの観測的研究者が、TMT 時代 に次世代の若手を育てながら日本の研究成果を挙げていく。TMT を用いた研究には、国内の大学の大学院生 が多く関わることが見込まれ、最先端の研究により高度な知識・経験を持つ人材の育成に貢献できる。また、 国際共同プロジェクトである TMT は、海外の研究者との共同研究・交流を通じて国際的に活躍できる人材を 育成する。

5.3.6 海外の類似計画との区別化

南米チリに欧州南天天文台が口径 39 mの E-ELT を計画し、また米豪韓の国際協力事業として口径 24 mの GMT 計画があり、TMT は北天唯一の超大型望遠鏡 (ELT) となる (図 5.6⁹)。技術実証と計画検討の進展で 3 つの計画の中では TMT が実績がある。南天については、協定等で交流促進することで将来的にアクセスを確保することもできる。JWST 宇宙望遠鏡は、大気下では観測できない中間赤外・遠赤外線の観測、そして波長 2.5 µm 帯での撮像・低分散 (R< 1000) 分光観測で活躍し、TMT との親和性が強い。

5.3.7 関連ホームページ

• TMT

http://www.tmt.org/

⁹http://www.eso.org/public/teles-instr/e-elt/および http://www.gmto.org/

第5章 地上プロジェクト



図 5.6: TMT、GMT、E-ELT の比較。

• 国立天文台 TMT 推進室

http://tmt.nao.ac.jp

• TMT 計画説明書 (2012 年版)

http://tmt.mtk.nao.ac.jp/info/files/tmtbb-ols.pdf

• TMT Instrumentation & Performance Handbook (2010 年版)

http://www.tmt.org/sites/default/files/TMT-Instrumentation-and-Performance-Handbook.pdf

5.4 すばる望遠鏡の将来計画

すばる望遠鏡は、ハワイ島マウナケアに設置された口径 8.2 mの光学赤外線望遠鏡であり、2000年に共同 利用観測を開始した。半年ごとの観測公募を行い、年間約 240 夜を共同利用に供している。4 つの焦点を持ち、 現在 9 つの共同利用観測装置を運用している。日本における光赤外天文学の主要望遠鏡として、観測的宇宙論、 遠方・近傍銀河、恒星、星形成領域、系外惑星、太陽系天体などあらゆる観測的天文学研究に利用されている。

5.4.1 現行観測装置

図 5.7 に、2015年現在の共同利用観測装置の基本的な観測パラメータを示す。可視光から中間赤外線までの 波長域、補償光学系による高空間分解能の観測から HSC による超広視野までの空間サンプリング、撮像から高 分散分光までの波長分解能と、地上からの光赤外観測におけるほぼ全てのパラメータを9つの共同利用装置に よってカバーしている。各装置の仕様についてはすばる望遠鏡の web ページ¹⁰ を参照して頂きたい。



図 5.7: すばる望遠鏡の共同利用装置。(左) 波長カバレッジおよび波長分解能で観測装置を示した図。(右) 波 長カバレッジと空間分解能および視野で観測装置を示した図。

5.4.2 将来装置計画

TMT 等の ELT の運用開始を踏まえて、2020 年代には 8 – 10 m 級望遠鏡は ELT と相補的な機能に重点を 置くべきと考えられる。すばる望遠鏡では、特に主焦点による広視野観測と優れた像質を活かした観測装置に 力点を置く。具体的には、

- Hyper Suprime-Cam (HSC): 視野 1.5 度角の可視光撮像装置
- Prime Focus Spectrograph (PFS): 2400 本のファイバーによる広視野多天体分光装置
- ULTIMATE-SUBARU: 可変副鏡による地表層補償光学系と広視野近赤外線装置

の3つを主力観測装置とすることを、コミュニティと議論してきた。

Hyper Suprime-Cam (HSC) は、視野 1.5 度角を 104 枚の 2K×4K CCD でカバーする広視野可視撮像装置 で、すばる望遠鏡のユニークな観測装置として多くの科学的成果を挙げてきた Suprime-Cam の後継機として、 国立天文台、東京大学、プリンストン大学、台湾の国際協力で開発されてきた。2012 年にエンジニアリング

 $^{^{10} \}rm http://www.subarutelescope.org/Observing/Instruments/index.html$

ファーストライトを迎え、2014年3月から共同利用を開始した。一般共同利用のほか、300夜を投入して宇宙 論、銀河進化などを展開する大規模サーベイを戦略枠プログラムとして実施している。

Prime Focus Spectrograph (PFS) は、HSC と同じ主焦点ユニットを利用したファイバー多天体分光器で、約 2,400 本のファイバーで 1.3 度角の視野内の多数の天体を同時に観測することを可能にする。可視光から近 赤外線の一部の波長域を、波長分解能 R = 2,000 - 4,000 で 一度の観測でカバーする。東京大学 Kavli IPMU を中心とした国際協力で開発が進められており、2019 年の科学観測開始を目指している。

ULTIMATE-SUBARUは、広視野のシーイング改善を可能にする地表層補償光学システムをすばる望遠鏡 に搭載するとともに、その能力を活かした広視野近赤外線観測装置を開発する計画である。2010年から概念検 討を開始しており、2020年代初頭に科学観測を開始することを目指している。HSC、PFSが主に可視光の波長 域でほかの 8 – 10 m級望遠鏡やTMTなどの超大型望遠鏡ができない超広視野の観測を可能にするのに対し、 ULTIMATE-SUBARUは、主に近赤外線の波長域で高い像質と広い視野での観測を可能にする計画である。

HSC に続き、PFS と ULTIMATE-SUBARU を立ち上げていくことは、すばる望遠鏡が 2020 年代において 高い競争力を維持するために不可欠であると考えている。

5.4.3 Prime Focus Spectrograph (PFS)

概要



図 5.8: PFS サブシステムのうち、主焦点部 (Prime Focus Instrument – "PFI") の CAD モデル (左上、運用 時はこの部分が HSC の代わりに主焦点ユニット POpt2 に)、ファイバーポジショナーシステムのプロトタイ プ、分光器の光学デザインと CAD モデルを示す。

PFS (Prime Focus Spectrograph) はすばる望遠鏡次期観測装置の一つとして開発が進められている超広視 野多天体分光器である [5]。すでに稼働中の超広視野撮像装置 Hyper Suprime-Cam (HSC) とともに SuMIRe

342

5.4. すばる望遠鏡の将来計画

("すみれ") 計画 (Subaru Measurement of Images and Redshifts) の両輪をなし、ダークマター、ダークエネ ルギーの起源や多種多様な銀河形成・進化の歴史を紐解くのが目的である。

PFS の開発は、東京大学 Kavli IPMU を中心した 6 か国 11 研究機関による国際チームにより、2018 年初 頭のファーストライト、2019 年半ばの科学運用、サーベイ観測開始を目指し進められている。2012 年 3 月の 概念設計レビュー、2013 年 2 月の基本設計レビューを経て、現在は詳細設計段階に入っている。さらに分光器 システムは 2014 年 3 月、主焦点装置部分は 2015 年 3 月に、それぞれ詳細設計レビューを終え、残存する課 題に取り組みつつ最終設計がかたまった部分から順次製作に入っている。Metrology camera system (MCS)、 ケーブルシステム望遠鏡部分についても、2015 年中に詳細設計レビューを行い製作に入る予定である。

仕様

PFS のサブシステムの概要を図 5.8 に、主な仕様を表 5.2 に示す。PFS では、すばる主焦点の直径 1.3 度角 に及ぶ視野内に約 2400 本の光ファイバーを配置し、それぞれに天体や空からの光を導入して分光器へ導く。 ファイバー配置は、ファイバーに分光器側から光を入れて主焦点面側の端面を光らせ (back illumination)、そ れをカセグレン焦点に取り付けられた MCS で見ながら行う。MCS は主焦点面全体の画像を一度の露出で取 得できるため、2400 本のファイバーの現在位置と、目的位置からのずれを瞬時に測定し、ファイバーポジショ ナーシステムにフィードバックすることが可能である。現在までのスタディから、1 回の測定からファイバー の移動に 4 秒程度かかり、これを 6 – 7 回繰り返すことにより配置を終了できる予定である。

2400 本のファイバーは、約 65 m のファイバーケーブルを伝い主焦点から望遠鏡ドームの赤外側 4 階に設置される予定の 4 台の分光器に分配される。それぞれの分光器では、ファイバーから射出されコリメートされたビームが 2 枚のダイクロイックミラーにより「青」「赤」「赤外」3 つに分けられたのち、Volume Phase Holographic (VPH) グレーティングで分散がかけられ、カメラにより検出器上にスペクトルとして結像する。こうして、380 nm から 1260 nm までの広い波長範囲にわたるスペクトルを 2400 本分、一回の露出で一度に得られる仕組みになっている。

主焦点ユニット (POpt2), 主焦点補正光学系 (WFC) は HSC がすでに使用しているものを共用し、PFS 主 焦点装置部分 "PFI" が HSC の代わりに POpt2 内に装備され PFS の観測運用が行われる。主鏡アクチュエー タによる主鏡の能動制御とともに、POpt2 に備えられたヘキサポッドで WFC の相対位置を微調整し (PFI は POpt2 内部で WFC に対して固定されている)、焦点面での像質を確保する。望遠鏡をターゲットフィールド に向けたあとの field acquisition と auto guding は、2400 本のファイバーが敷き詰められた領域の外側に配置 された 6 個の CCD カメラ (Acquistion & Guide Camera "AGC") で行う。

主な研究課題

PFS チームがすばる戦略枠への提案を目標に検討を進めている長期サーベイプログラムの内容については、 高田らの PASJ 論文 [6] に詳しく述べられているので、ここでは概略を述べる。大きく分けて、3 つのプログ ラムを柱として検討が進められている。

宇宙論

ダークエネルギーの性質に強い観測的制限を与えることが、大きな目的である。PFS では、HSC の画像 データから 0.8 < z < 2.4 の範囲にある輝線銀河候補を選び出して、comoving volume で $\sim 10 h^{-3}$ Gpc³ に及ぶ大規模な分光サーベイを行い、 ~ 400 万個の銀河について赤方偏移を正確に求め、BAO スケール の精密測定を目指す。HSC による撮像サーベイを用い同じ天域について PFS で分光サーベイを行うこ とで、様々なシステマティックを良く理解した上で宇宙論パラメータを観測データから導出できること、

¹³Wide Field Corrector (補正光学系)。HSC のものを共用する。

^{1354mm} 厚のシリカガラス平行平板。光学的に HSC のフィルター、デュワー窓の代わりとなる。

¹³各ファイバーの先端に接着される。

| | | | | コメント | |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| 主法点面 | | | | | |
| 光学配置 | WFC ¹¹ + Field Element ¹² + マイクロレンズ ¹³ | | | | |
| 視野 | | 直径約 1.3 度 | | | 六角形。頂点間 1.4 度。 |
| 入射口径比 | | 2.8 | | | |
| ファイバー本数 | | 2394 | | | 天体及びスカイ観測用。 |
| 各ファイバーの視野 | 1."1 | | | ファイバーコア径 128µm | |
| 各ファイバーが動ける範囲 | | 直径 9.5mm の円内 | | | |
| ポジショナー間隔 | 8mm | | | | |
| 隣接ファイバーの最小距離 | 約 3mm | | | | |
| ファイバー (再) 配置時間 | 約 60 秒 | | | カセグレン焦点に取り付ける メトロロジカメラで主焦点面全 体を一回の露出で撮像し、ファ イバーの現在地を測定、目標位 置との差異を計算し、イテレー ションをかける。 | |
| | | | | | |
| | Blue | R | ed | NIR | |
| | | Low Res. | Med Res. | | |
| 波長域 | $380-650 \mathrm{nm}$ | 630-970nm | $710\text{-}885 \mathrm{nm}$ | 940-1260nm | |
| 分解能 | 2300 | 3000 | 5000 | 4300 | |
| 運用開始 | | 2019 | 年半ば | | 2018 年初旬コミッショニング 開始 |

表 5.2: PFS の主な仕様

重力レンズによるスタディとの相関をとることで、宇宙論パラメータにより強い制限をつけることがで きること、などが HSC+PFS による大きな強みである。

● 銀河考古学

PFS で広い波長域にわたるスペクトルを取得し様々な元素の吸収線を測定することにより、銀河系、M31、 これらの周囲に分布する衛星銀河、tidal stream に属する星の視線速度、金属量を正確に測定する。ま た、中分散モードによるデータを追加することで、金属量だけでなくさらに主要元素量も求めることが できる。すばる PFS の広い視野を生かし、ディスクからハローに至るまで様々な領域にある 100 万個 程度の星を観測してこうした情報をそろえることで、各銀河の星形成と質量集積、合体の歴史を明らか にするとともに、星の運動を理論モデルとつぶさに比較して、各銀河の力学構造、特にダークマターの 分布を正確に予測することができる。すばる PFS の強み、他のプロジェクトとの相補性は、その集光 力により V = 20 - 22 等級の星について十分に質の高いデータが得られることである。これにより、銀 河中心から 10 kpc 以上離れた星についても十分なサンプルを集めて解析が可能である。さらに HSC の 撮像データを使えば、よりサクセスレートの高いユニークな分光候補天体リストを用意することができ、 PFS による分光サーベイの効率を飛躍的にあげることができる。

• 銀河/AGN 進化

PFS の広い波長域は、すなわち広い赤方偏移範囲にわたって銀河をくまなく探査できることを意味する。 特に z = 1 - 2 では、宇宙の星形成活動やブラックホールの成長、銀河の形態進化などが活発な時期だっ たことが示唆されており、重要である一方、分光観測の難しさから redshift desert と呼ばれるなど、銀 河の統計的研究は発展途上である。PFS では、HSC deep survey で 20 平方度の天域にわたり取得され る多色撮像データに近赤外のデータを組み合わせて、z = 1 - 2 の候補銀河を選び出し、追分光観測を行 う。輝線銀河のみならず、吸収線銀河もターゲットとし、 $10^{10}M_{\odot}$ までの stellar mass limited なサンプ ルについて撮像、分光データのアーカイブをそろえることで、SDSS の高赤方偏移版を目指す。すばる PFS の視野の広さにより、銀河の大規模構造 "cosmic web"に沿ってその統計的性質を明らかできる一 方、その高いファイバー面密度により銀河群スケールまで十分な研究が可能であり、赤方偏移の範囲と ともに密度スケールにおけるダイナミックレンジの広さは PFS のユニークな点である。

TMT などの大型計画との関係

Euclid, TMT, WFIRST, LSST などが台頭する時期でも、PFS はユニークな威力を発揮すると期待される。 他の計画に比較して、8.2m の口径、広視野、2400 という多天体分光性能を有するのは PFS だけある。Euclid, WFIRST, LSST が目指す主要なサイエンステーマの一つは、広天域の領域の銀河イメージングデータの高精 度重力レンズ解析から、ダークエネルギー、ダークマターの性質を究明するというものである。しかし、重要 な系統誤差の一つが測光的赤方偏移の不定性であり、無バイアスな分光銀河サンプルによる補正が必要不可欠 である。Euclid、WFIRST、LSST が目指す統計精度、暗いイメージング銀河に必要な大量の分光サンプルを、 現実的な望遠鏡夜数で供給できるのは、PFS のみであろう [4]。この意味で、PFS が計画している、HSC-Deep 領域の星質量で選択されたターゲット銀河の分光データは、これら 2020 年代の LSST などの大型計画に対し てレガシー的役割を果たすと期待され、将来計画は PFS サーベイ領域を含む可能性が非常に高い。TMT につ いても、望遠鏡時間の獲得は熾烈な国際競争にあると考えられ、より確実な稀少天体の洗い出しが重要であり、 すばる HSC と PFS を用いた事前サーベイによる周到な準備研究が望まれる。このときにも、HSC と PFS の 広天域の宇宙論サーベイでは重力レンズ天体などの明るい稀少天体の選定、狭帯域フィルターのイメージング も含む HSC と PFS の Deep サーベイ領域では $z \sim 7$ の高赤方偏移の有力候補の選定が可能になると考えられ る。以上述べたように、PFS の多天体分光能力は、2020 年代の大型計画と極めて相補的であり、様々なシナ ジー的サイエンスの発展が期待される。

5.4.4 広視野補償光学システム / ULTIMATE-SUBARU 計画

計画の概要

地表層補償光学系 (Ground-Layer Adaptive Optics; GLAO) は、複数のガイド星により地球大気のゆらぎを トモグラフィー再構成し、その中の地表に近い成分を補正することで、広い視野にわたって補償光学系による 星像の改善をもたらす補償光学システムである (図 5.9)。



図 5.9: Ground-layer AO の概念図。右側に描かれた点源像はシミュレーションに基づくもので、GLAO では、 回折限界像にはならないが、ナチュラルシーイングに対して約半分の FWHM まで星像が改善される。 すばる望遠鏡 広視野補償光学システム計画 (ULTIMATE-SUBARU: <u>Ultra-wide Laser Tomographic Imager</u> and <u>MOS with AO for Transcendent Exploration</u>) は、地表層補償光学系と、その性能を最大限に活かす近赤 外線広視野観測装置をすばる望遠鏡に導入することにより、ハッブル宇宙望遠鏡に匹敵する高い解像度と望遠 鏡口径2倍に相当する高感度化、そして従来の6倍の広視野化を実現し、これらのシステムによってしかでき ないユニークなサイエンスを展開する計画である。2011年からワーキンググループによる検討を開始し、2012 年には報告書第一版をまとめた¹⁴。現在は引き続き概念検討を行っている段階である。

地表層補償光学系

表 5.3 には、GLAO システムの基本的な仕様をまとめた。可変副鏡は、MMT (Multiple Mirror Telescope) や LBT (Large Binocular Telescope) などで実装され、VLT への実装が進行している。すばる GLAO 用の可 変副鏡は、これらの開発の成果を最大限に活用しつつ すばる望遠鏡のシステムへの組み込みを行い、コストを 低減させる考えである。

| 仕様項目 | 内容 |
|------------|-------------------------------|
| 可变形鏡 | 副鏡 |
| 素子数 | 約 1,000 |
| 波面センサー | シャックハルトマン式 (100 – 1,000 分割程度) |
| ガイド星 | レーザーガイド星 (4 個)、自然星 (3 個) |
| レーザータイプ | ファイバーレーザー |
| レーザー出力 | 20 W |
| レーザー射出ビーム系 | 約 25 cm |

表 5.3: 地表層補償光学系 (GLAO) の仕様案

図 5.10(左) は、4 つのレーザーガイド星を 15 分角の直径に配置した場合に、点源の FWHM がどれくらい改善するかを推定したシミュレーションの結果である。近赤外線ではおおむね FWHM がナチュラルシーイング に対して約半分になる。K-band では、天頂付近で典型的なシーイングの場合、GLAO では 0.2" が達成できる と期待される。また、可視光の波長域でも一定のシーイング改善効果が期待できることが分かる。図 5.10(右) は、ensquared energy についてのシミュレーションで、GLAO を用いることで、ナチュラルシーイングに対し て 1.5 – 2 倍程度の光量改善が期待できることが示されている。なお、これらのシーイング改善は 15 分角の視 野全面でほぼ一様に達成される。

装置計画

GLAO によって可能になる広視野にわたる像質改善を活かした観測装置として、ワーキンググループでは複数の可能性を検討してきた。

(1) 広視野近赤外線撮像·多天体分光観測装置

現行の MOIRCS のような近赤外線撮像・多天体分光装置を 15 分角程度の視野に拡張する案で、幅広いサイ エンスに活用できることが期待できる。カセグレン焦点に装着されることを想定して、4k×4k の近赤外線検出 器を4 枚用いた直径 13 分角の光学系の基本的な設計を行い、一定の成立解を得ている。一方、デュワーが巨 大になること、多天体分光用のマスク交換機構をどう実装するかなど、機械系については技術的な障壁が大き いと考えており、成立性の検証ができていない状態である。

¹⁴http://www.naoj.org/Projects/newdev/ngao/

5.4. すばる望遠鏡の将来計画



図 5.10: (左) 天頂での GLAO によるシーイング改善のシミュレーション結果。黒点線:ナチュラルシーイング、 赤線: GLAO。発生頻度 25%, 50%, 75%の3つの場合について計算している。4 つのパネルはそれぞれ異なる波 長での結果。(右) Ensquared energy のシミュレーション結果。点線はナチュラルシーイング、実線は GLAO。 青線は 0.24″ 幅、緑線は 0.36″ 幅、赤線は 0.48″ の場合

(2) 広視野近赤外線撮像装置

視野を4つに分割しそれぞれにデュワーを用意する光学系も考えられる。分光機能を考えず撮像機能に特化した場合光学系は比較的シンプルになり、実現性はより高くなると考えられる。この場合の基礎的な光学設計 も得られているが、科学目的として撮像機能だけに絞って十分な成果が期待できるかを検討した上で、技術的 にさらに検討を進めることが求められると考えられる。

(3) ファイバー多天体分光装置

カセグレン焦点に分光器や検出器を含めた装置全体を取り付けるのではなく、ファイバーポジショナーを配 置して、観測床など別の場所にある分光器に導くことで、広視野を活かした観測装置を実現できる可能性があ る。Australian Astronomical Observatory (AAO)が開発している焦点面上をピエゾを使って移動するファイ バーポジショナー Starbug を使う案が検討されている。0.2^{''}の直径のファイバーを 37 個まとめたバンドルを 26 個焦点面上に配置し、既存の近赤外線装置である MOIRCS に導く案が考えられている。これにより、初期 の装置開発コストを低減して広視野のメリットを活かすことができる。その次のステップとして、ファイバー ポジショナーの数を増やした上で、専用の光学系をもった分光器を製作することも考えられる。撮像機能が失 われること、熱的雑音により、2 µm よりも長い波長をカバーすることが難しいことが欠点として挙げられる。

GLAO がすばる望遠鏡において実現されれば、これまでの8m級望遠鏡よりも結像性能が高く、広視野・高 感度の観測が実現できると期待される。以上に挙げたような装置だけでなく、可視光波長域も含めてあらゆる 観測装置にメリットがあると言える。また、可変副鏡は1000素子の可変鏡として、GLAO だけでなく、single conjugate の AO に対しても高い補正性能が達成できる。これを用いた観測装置も将来には考えられるであろ う。このように、可変副鏡を備えることは、望遠鏡の基本性能を大幅に強化することを意味するので、2020年 代において すばる望遠鏡が競争力を維持するために重要な戦略であるといえる。

ULTIMATE-SUBARU で展開されるサイエンス

銀河形成・進化研究:近赤外線大規模サーベイで明らかにする銀河史の全貌 すばる望遠鏡をはじめとする 8 - 10 m 級望遠鏡や 4 m 級サーベイ望遠鏡、HST を始めとする宇宙望遠鏡などの活躍によって、宇宙が現在の 1/10の年齢にも満たない時代から現在に至るまでの銀河の観測が進められ、宇宙における大局的な銀河形成の 歴史が明らかになってきた。宇宙年齢約 20 – 50 億年 ($z \sim 1 - 3$)の時代に宇宙全体としての、あるいは個々の 銀河の平均的な星形成量はピークに達し(銀河形成最盛期)、その後ゆるやかに星形成活動は減退してきた。こ の間に個々の銀河の恒星質量は増え続け、同時に楕円銀河、渦巻き銀河といった現在の宇宙にみられる銀河の 形態が発現してきた。また、同時に銀河中心部の超巨大ブラックホールも、より大きいスケールでの星形成活 動と密接にリンクした進化を経てきたことが、明らかになりつつある。しかし、このような大局的な銀河形成 の歴史の背後で何が星形成活動を支配し、銀河の形態を決定していくのか、その物理過程については未解明の 部分が極めて多い。これは、技術的な制約としては、遠方銀河は「点」として観測できるにとどまり、その内 部でどのような物理が働いているかを直接観測することができなかったことに大きな問題があった。近年の補 償光学と面分光装置技術の発達によって、遠方銀河における内部構造を分解した観測が可能になりつつある。

撮像観測では、銀河の形態の情報 (サイズ、輝度プロファイルのパラメータ、非対称性、色分布など) を知 ることができる。特に銀河の有効半径の測定について、従来の観測よりも暗い中小質量の銀河まで測定が可能 になるであろう。質量の異なる多数の銀河について、様々な時代の銀河を調べることで、星質量の蓄積と銀河 サイズ、形態の進化のパスを描き出すことが期待できる。また、宇宙望遠鏡とは異なり、必要に応じた狭帯域 フィルタを追加して観測できることも大きな強みである。対象の赤方偏移した輝線にあわせた狭帯域フィルタ での撮像観測によって、特定の赤方偏移範囲にある多数の星形成銀河 (輝線銀河)を探査することができる。地 球大気の OH 夜光との重なりが少ない波長域を狙えば、宇宙望遠鏡に匹敵するような特に深い観測が可能に なる。今後最前線の遠方銀河を見つけ、宇宙再電離過程の探究を進めるためには、広視野近赤外線カメラでの *z* > 7 の Lyman α 輝線銀河探査が必要である。また、形成最盛期 (1 < *z* < 3.7) における Hα 輝線銀河や [OIII] 輝線銀河の系統的探査も、この時代の星形成や AGN の活動を統計的に明らかにするために極めて重要である。 対象の赤方偏移に応じて新たなフィルタを製作、装着できるのも地上望遠鏡ならではの利点であると言える。

分光観測では、星形成量、ダスト量、金属量、ガスの運動状態、銀河間空間へのアウトフローの様子など、極め て豊富な情報を得ることができる。これらの情報は銀河形成のもっとも大きな謎である、ガスの feeding/feedback とよばれる銀河形成を支配するガスプロセスの解明と密接に関係しており、今後の遠方銀河研究においてもっ とも注目される分野の一つである。面分光観測を行うと、空間 2 次元+波長方向の 3 次元データを効率良く 取得できる。既に $8-10~{
m m}$ 級望遠鏡で $z\gtrsim3$ の銀河の面分光による観測が進められているが、これまでの観 測は活発な星形成を行っている明るい銀河に集中してきた。また従来の装置では、面分光観測は一度に1つの 天体に対してしか行うことができなかったため、サンプル数は限定されており、統計的な議論を行うに至って いない。大幅にサンプル数を増やすことは、望遠鏡時間のコストからみて今後も容易ではないと考えられる。 そこで、上述したような GLAO と組み合わせた超広視野近赤外線装置で、多数の天体に対して一度に面分光 観測を行うことが可能になれば、世界に類を見ない強力な観測機能を持つことになる。新装置の視野あたりに は数十から百個程度の対象銀河が存在するので、multiplicity を上げればあげるほど効率的な観測が可能であ る。また、銀河の進化はその存在する環境に大きく依存することが知られているが、銀河団/原始銀河団をその 周縁部まで含めて観測することで、環境効果が個々の銀河の進化にどのように影響を与えるかを系統的に調査 することが可能になる。これは広い視野をもつ GLAO+新装置の強みを非常によく活かす観測となるだろう。 $z\sim 1-3$ の銀河の大規模な(面)分光サーベイプログラムを実施することで、はじめて形成最盛期にある銀河 の解剖学は、統計的な議論が可能なレベルにまで到達できると期待される。2020年代初頭にこれを実現すれ ば、すばる望遠鏡が達成するレガシーサイエンスとして、世界に唯一の非常に強力な成果となりうるであろう。

銀河系中心方向の観測 広視野近赤外線装置+GLAO で格段の進展が期待されるサイエンスケースの一つとし て、もう一つ例を挙げるなら、銀河系中心方向の研究が挙げられる。銀河系中心方向の球状星団は、ハローの それとは異なる性質をもつ可能性があり、かつ矮小銀河の合体を経たバルジ形成に関する情報を得られる貴重 なプローブである。銀河系中心方向は星間吸収が大きく近赤外線観測が必須で、近年探査が進みつつあるもの の、金属量、年齢、内部構造など、銀河系中心方向の球状星団の性質の包括的な探究には至っていない。GLAO でアシストされた広視野・好条件の撮像観測によって個々の球状星団の金属量、年齢等を明らかにし、かつ分 光観測によってその空間分布を明らかにすることで、バルジの動力学、ひいては暗黒物質分布にも強力な知見 をもたらすことが期待できる。Nuclear Star Cluster は、銀河系中心の超巨大ブラックホールと銀河系バルジ との共進化を探る上での鍵となりうる天体である。また、銀河系中心近傍に存在する若い星の起源の候補であ

5.4. すばる望遠鏡の将来計画

る星団の残骸の探査や、Hyper-velocity stars と呼ばれる 1,000 km/s に近い速度で飛び回る星の起源を明らか にすることで、超巨大ブラックホールの存在を明らかにする研究などには、広視野 AO でのアストロメトリが 適している。従来 VLT や Keck で 銀河系中心のアストロメトリの精力的な研究が行われてきたが、超巨大ブ ラックホール近傍の非常に狭い領域に限られている。上記の研究は、すばる望遠鏡での独自の展開を可能にす るものである。このように、広視野近赤外線装置(撮像、多天体分光、多天体面分光)と広視野 AO による観 測は、様々な天体現象の研究に新たな扉を開くと期待できる。

多岐に渡るサイエンスの新展開 上記以外の分野でも、銀河系内の若い星団や星形成領域の広視野近赤外撮像 観測を系統的に行うことによって、星の初期質量関数を求めたり、暗い惑星質量天体の性質(親星の有無や軌 道要素、密度など)およびその起源を解明することが期待される。このように高い空間分解能と広い視野の両 立、および高い感度を生かして拓かれるサイエンスは多岐に渡っている。

コミュニティでの議論と今後の展開

ハワイ観測所では、2011年から継続的に次世代補償光学系およびそれで展開されるサイエンスについて、 ワークショップを開催してきた。GLAOシステムおよび新観測装置両方を整備するとなると予算が大きいこと、 観測装置プランが明確になっていないことが問題であるが、2016年1月にはこれまでの検討をまとめた報告書 を作成し、コミュニティに公開するとともに、2016年2月にはこの報告書に基づく外部レビューを実施した。 このレビューの結果を踏まえつつ、コミュニティ全体を巻き込んだ議論を行いながらすばる望遠鏡の将来装置 計画を具体化していくことが必要になるであろう。

5.4.5 2020年代にむけた装置プラン

TMT 等の超大型望遠鏡計画やスペースの将来計画を踏まえて、既存の 8 – 10 m 級望遠鏡はいずれも、2020 年代にどのような役割を果たすべきかを課題としている。その中にあって、すばる望遠鏡は、特徴的な主焦点 による広視野観測や優れた像質を活かした装置を整備し、従来よりも大型サーベイに重点を置いた観測プログ ラムを推進して、TMT などと相補的な役割を果たすという戦略を提示しており、基本的な方針は明確である と考えている。

一方、限られた観測時間、予算、人的資源、山頂インフラの中で、最大限に優れた科学的成果を挙げてい くためには、従来のすばる望遠鏡がそうであったような、可視赤外線における観測パラメータのほぼすべてを 網羅する戦略から、すばる望遠鏡が特に強みを発揮する領域に絞り込んで運用していく戦略への転換が必要で ある。このために、国立天文台ハワイ観測所では、すばるユーザーズミーティングやすばる小委員会(Subaru Advisory Committee; SAC)で、既存の装置のデコミッションを含む観測装置計画の策定の必要性を説明し、 議論を行ってきた。2014 年度には、観測所員および SAC メンバーの一部によるタスクフォースを組織し、す ばる望遠鏡の観測装置それぞれの科学的成果創出のパフォーマンス、コミュニティからのデマンド、装置トラ ブルの頻度や運用維持のための負荷、時間交換を実施している Keck, Gemini 望遠鏡の観測装置による代替の 有無などの項目を具体的に検討した。その上で観測所内や SAC での議論を経て、装置プランの観測所案を作 成した。

図 5.11 は観測所の装置プラン案を模式的に表したものである。現在の共同利用装置のうち FMOS および Suprime-Cam は 2016 年頃の運用終了を計画している。HDS については、2010 年代にはできるだけ運用を維 持する。AO188+IRCS は、次世代の補償光学システムが立ち上がるまではできるだけ運用を維持すべきであ る。一方、PI タイプのカセグレン装置を受入れる場合、MOIRCS, COMICS, FOCAS といったカセグレン装 置は、一部を休止状態にするなどの対応が必要となる。また、2010 年代後半には、観測所の運用上やむを得な い場合には運用を停止する。今後具体的な日程を含めたプランを策定する予定である。



図 5.11: すばる望遠鏡の 2020 年代初頭までの装置計画案。PF は主焦点、Cs はカセグレン焦点、Ns はナスミス焦点 (可視、赤外線の二つの焦点がある)を指す。

PI タイプ装置

観測所が維持する Facility instruments は数を絞り込んでいく方針であるが、一方で PI タイプ装置の受入れ は可能な限り推進すべきと考えている。すばる望遠鏡に向けた PI タイプ装置には大別して二つの意義がある と捉えている。

- 比較的短い時間スケールで開発・試験、コミッショニング、サイエンス観測のサイクルを回して、先端的な技術を用いた、科学目的を特化した装置を開発することで、変化の速い研究分野において世界最先端の成果を創出する。
- 将来につながる先端的・挑戦的な技術を用いた観測装置開発を促進するため、すばる望遠鏡を開発プラットフォームとして利用する。

前者は、系外惑星探査に関する観測装置が例として挙げられる。すばる望遠鏡ではハイコントラスト観測に よる系外惑星の直接検出やキャラクタリゼーションのための装置として、SCExAO¹⁵ [2] や CHARIS [1] を受 け入れている。後者は、すばる望遠鏡だけでなく、TMT なども含めた将来の観測装置開発に、すばる望遠鏡 が一層貢献することを目指すものである。例えば、2014 年には、8 – 10 m 級望遠鏡向けの初めての多天体補 償光学システムとして RAVEN [3] の試験観測を実現した。これは、TMT の将来の多天体補償光学装置につな がっていくものと考えている。限られた資源の中で、科学的成果と両立させながら装置開発を促進していくこ とは簡単ではないが、日本の光赤外線天文学コミュニティが持続的な発展を果たしていくためには是非必要な ことであると考えている。

参考文献

- [1] Groff, T. D., et al. 2014, proc. SPIE, 9147, 91471W
- [2] Jovanovic, N., et al. 2014, proc. SPIE, 9147, 91471Q
- [3] Lardiére, O., et al. 2014, proc. SPIE, 9148, 91481G
- [4] Newman, J., et al., 2013, arXiv:1309.5384
- [5] Sugai, H., et al., 2014, SPIE, 9147, id. 91470T 14 pp.
- [6] Takada, M., et al., 2014, PASJ, 66, Issue 1, id.R1

¹⁵http://www.naoj.org/Projects/SCEXAO/index.html

5.5. TAO

5.5 TAO

5.5.1 計画概要

東京大学アタカマ天文台(The University of Tokyo Atacama Observatory: TAO) 計画は、チリ共和国・ アタカマ地方にある標高 5640 m のチャナントール 山山頂に口径 6.5 m の大型赤外線望遠鏡を建設する 計画である [1]。このサイトは、極めて小さい水蒸気 量、優れたシーイング、良い晴天率など、世界トップ クラスの観測環境を誇る。ここに赤外線観測に最適 化した大口径望遠鏡を設置することにより、銀河形 成や惑星形成などの天文学の重要課題に赤外線観測 で迫る。またこの計画は、大学による次世代研究者 育成もその大きな目標としており、開発・観測研究の 両面で若手の育成に力を入れている。これは他の大 規模国際計画での日本の競争力・発信力を高め、リー ダーシップを発揮するのに重要である。



図 5.12: TAO 望遠鏡のサイト。右側に見える山がチャ ナントール山。麓は ALMA が展開するパンパラボラ 平原。

5.5.2 サイト

TAO 望遠鏡の建設サイトは、アタカマ砂漠にあるチャナントール山山頂である (図 5.12)。このサイトは ALMA が展開しているパンパラボラ平原に隣接しており、ちょうど ALMA 全体を見渡せる位置にある。標高 は 5,640 m である。これは、天文観測施設としては世界最高標高のものとなる。高い標高のお蔭で水蒸気が非 常に少なく、可降水量はメディアン値で 0.85 mm、上位 25 % で 0.5 mm 以下である [2][3]。

このサイトの赤外線透過率を、図 5.13 に示す。近赤外線波長では 0.9 – 2.5 µm の大気の窓が連続し、すべ ての波長が観測可能となる。また中間赤外線波長では、20 µm のいわゆる Q-band の大気透過率が格段に向上 するのみならず、30 – 40 µm にも新しい大気の窓が開くことが分かる。これらの新しい波長を開拓し、質的に 新しい観測を実現することも TAO 計画の大きな目標の 1 つとなる。

TAO 計画では、サイト調査を 2000 年頃から継続的に行ってきた。2003 年には徒歩で山頂に登頂を行い、サ イトの様子の実地調査を開始した。2006 年には、パンパラボラ平原からのアクセス道路(全長 5.7km)を開通 させ、車での往来を可能とした。2009 年には、口径 1 mの miniTAO 望遠鏡を設置し、これまで地上からは観 測できないとされていた $Pa\alpha$ 線や波長 30 μ m 帯中間赤外線などでの天体観測に成功している [4] [5]。これら の成果は、2014 年度末までで 7 本の査読論文、4 本の博士論文などにまとめられている。



図 5.13: (左) TAO サイトでの大気透過率(右) 2009 年に山頂に設置した口径 1 mの miniTAO 望遠鏡。望 遠鏡は右奥のドームに入っている。手前のコンテナは観測室、発電機室、倉庫に用いられている。

光学系

TAO 望遠鏡の光学系としては、通常のリッチークレチアン光学系を採用している。赤外線性能を向上する ため、瞳を副鏡位置に置くいわゆる赤外線望遠鏡光学系を採用している。最終 F 値は 12.2 とすばる望遠鏡と同 じ値となっており、装置を相互利用することが比較的容易になっている。望遠鏡の遮蔽なし視野は 25 分角 であり、同口径の望遠鏡の中では比較的広い値を持つ。最終的な像性能としては、 $\theta_{80}(80\%$ encircled energy) で 0.32 秒角を目指しており、それに基づいて各光学部品、機械系の許容誤差を割り振っている [6]。 望遠鏡の主たるパラメータを表 5.4 に示す。

| 主鏡口径 | 6461.0 mm | clear aperture |
|----------|-----------------------------------|----------------|
| 主鏡有効径 | $6153.8 \mathrm{~mm}$ | |
| 主鏡副鏡間距離 | 6943.2 mm | |
| バックフォーカス | 4000.0 mm | |
| 副鏡口径 | 896.0 mm | clear aperture |
| 最終 F 値 | 12.2 | |
| 焦点 | Nasmyth x2 + folded-Cassegrain x2 | |
| 望遠鏡視野 | 25 arcmin | |

表 5.4: TAO6.5m 望遠鏡光学仕様

口径 6.5 m の主鏡は、Ohara E6 ガラスを用いた light-weighted borosilicate を採用している。これは、鏡の中を蜂の巣状にくりぬ いた形状を持っており、大口径の鏡を軽量かつ比較的剛性高く実 現できるのが特徴である。また、中空部分に温調された空気を流 せるため、鏡の温度制御が比較的容易にできるのも利点となる。 この仕組みにより、完全ゼロ膨張ガラスではない E6 ガラスで熱 ひずみが起きないよう工夫されている。主鏡の製造は、アリゾナ 大学スチュワート天文台のミラーラボが担当する。ミラーラボは このような鏡の製作実績を多数有しており、その性能は MMT・ Magellan (2枚)・LBT(2枚) などで実証されている。図 5.14 は 製作中の鏡写真である。





図 5.14: 製作中の TAO6.5m 主鏡と関係 者の集合写真

タとしては、空力アクチュエータを用いており、焦点面に搭載されたシャックハルトマンセンサーからの情報 をもとに、形状を補正する役割を担う。

副鏡・第三鏡

副鏡は、有効径 896 mm の凸面鏡で、主鏡同様 borosilicate ハニカム鏡を採用している。赤外線性能を重視 し、鏡としては有効径外の縁が極力小さい構造とし、機械系は鏡の裏側に完全に隠れるような構造を持つ。鏡 位置は、ヘキサポッド型のポジショナーで制御する。一方で、チョッピングなどの高速ビームスイッチ機構は、 副鏡には持たせない。中間赤外線などチョッピングが必要な観測については、装置内にビームスイッチ機構(冷 却チョッパーなど)を搭載し利用することになる。

第三鏡も、borosilicate ハニカム鏡である。鏡は主鏡から突き出た保持構造にマウントされ、回転によって使用する焦点を選べるようになっている。これによって、観測に用いる装置の機動的な切り替えを実現している。

5.5. TAO

望遠鏡架台

望遠鏡架台としては、トライポッドディスク型の Alt-Az マウントを採用 している。駆動部は静水圧ベアリングで支えられており、これをフリクショ ンドライブで駆動する。また構造体は中空になっており、各部に空気を循 環させることで温度制御が可能な設計となっている。焦点としては、ナス ミス焦点が各々のエレベーションディスクの中央に設置されており、加えて folded カセグレン焦点がセンターセクションに設置される。各々の焦点は ガイダーと波面補正用のシャックハルトマンセンサーを有しており、高いト ラッキング性能とリアルタイムでの鏡面制御を実現する。

仮組段階での TAO 望遠鏡の架台写真を、図 5.15 に示す。

エンクロージャー・観測運用棟

TAO 望遠鏡のエンクロージャ形状としては、カルーセルタイプを採用する。TAO 望遠鏡では、電力インフラの問題からエンクロージャー内を常時

図 5.15: 製作中の TAO 望遠鏡 架台

温調することは非常に難しく、エンクロージャーには高い換気性能が求められる。その点、カルーセルタイプ のエンクロージャは、壁面に多数のベンチレーションウインドウを設置できるため換気効率が高く、観測開始 時の時間ロスを最小にできるというメリットがある。またオーバーヘッドクレーンを設置することで、望遠鏡 メンテナンスや装置交換の作業性・安全性を向上できるというメリットもある。エンクロージャーの回転部直 径は 20 m、高さは 18 m であり、総重量はおおよそ 250 t である。すばる望遠鏡などとは異なり、回転は望遠 鏡と独立して行える [7]。

観測運用棟は、エンクロージャーに隣接して設置される建物である。全体は3階建ての構造をしており、1 階は電源施設や機械室およびガレージが、2階は大型の蒸着室が、3階は観測室やラウンジが配置されている。 望遠鏡エンクロージャーとは、ブリッジを介して2階でつながっている[7]。完成予想図および山頂でのレイア ウトを、図 5.16 に示す。



図 5.16: (左) TAO 望遠鏡エンクロージャと観測運用棟の完成予想図(右)山頂レイアウト。6.5 m 望遠鏡は 山頂エリア北西側に設置する。





第5章 地上プロジェクト

山麓研究棟

望遠鏡整備運用および観測のベースキャンプとし て、サイトに近接する San Pedro de Atacama 市中 心部に山麓研究棟を運用する。この施設は床面積 554 平米の平屋建ての建物であり、実験室やリモート観 測室、会議室などを備えている。またリビングやキッ チン、ベッドルーム5部屋もあり、観測者やデイク ルーなどが長期滞在することも可能である。この施 設は 2014 年中に完成し、すでに運用を開始している (図 5.17)。



蒸着装置

図 5.17: TAO 山麓研究棟正面写真

TAO 望遠鏡では、鏡の輸送リスクを軽減するた

め、蒸着設備を山頂に設置する計画である。この装置は、上釜と下釜の2つのパーツからなっており、蒸着用 のフィラメントを上釜内側部分にぶら下げる構造となっている(図 5.18)。主鏡蒸着の際には、主鏡をセルか ら取り外すことなくセルごと上釜と下釜の間に挟み込み、全体を真空引きして蒸着を行う。また、副鏡・第三 鏡の蒸着の際には、鏡を下釜に固定し、上釜と下釜だけを使って蒸着する。同様の方式は Magellan 望遠鏡で 採用されており、安定的な方策である。

金属膜にはアルミニウムを用いる。これは、実績・経験が多いという事に加え、観測波長帯を可視光から中間赤外線までカバーするという特徴を活かす上で重要な点である。膜厚、面精度はアルミニウムを含浸させたフィラメントを用い、その配置を最適化することで必要スペックを実現する。また、蒸着作業として、新しい金属膜を生成する前に古い膜を剥離・洗浄するという工程が必要である。これには、安全性や実績を考慮し、水酸化ナトリウムを用いる。このための装置およびスペースも、観測運用棟内に用意されている[8]。



図 5.18: 蒸着設備の概念図。

5.5. TAO

5.5.3 観測装置

TAO の第一期観測装置としては、2つの装置が開発される。一つは近赤外線装置 SWIMS であり、もう一つ は中間赤外線をカバーする MIMIZUKU である。両装置とも、ナスミス焦点に設置される予定である。

SWIMS

SWIMS は、近赤外線広視野撮像カメラ/多天体分光器である。その最大の特徴は、コリメート光にダイクロ イックミラーを挿入することにより、0.9 – 1.45 µm 帯 (青アーム)と1.45 – 2.5 µm 帯 (赤アーム)の同時撮像・ 分光ができることにある。これにより、通常の2倍の効率で多波長撮像サーベイが可能となるだけでなく、近 赤外線全域のスペクトルを一度に取得することができる。

撮像時の視野は ϕ 9.6 で、これを赤、青アームそれぞれ 4 台の H2RG 検出器でカバーする。アームごとに 3 枚のフィルターホイールを持ち、通常の *zJHK* フィルターおよび、8 枚の中間帯域フィルタ及び 10 枚の狭帯 域フィルタ (Pa α , β など)、さらに分光用のグリズム 2 個を搭載する。これらにより、遠方銀河の SED を高い 精度で決めつつ、チャナントールの良好なシーイングを活かした高い空間分解能のサーベイ観測を効率よく実 行できる (図 5.19 中)。

多天体分光時の視野は 9.6×3.1 であり、スリット長にもよるが、最大で 40 天体程度の同時分光が可能であ る。波長分解能 R = 1600 - 3000 (0.25 幅スリット時) で 0.9 - 2.5 μm のスペクトルが一度に取得でき、TAO サイトでの高い大気透過率と合わせて、遠方銀河の撮像・分光サーベイに威力を発揮すると期待されている (図 5.19 右)。



図 5.19: (左)開発中の近赤外線装置 SWIMS の写真。(中) SWIMS による近赤外線撮像サーベイ。口径を活かし、UKIDSS, VISTA に比べてもより深く、高空間分解能の観測を目指す。(右)NGC1510 を z = 1.88 に置いた時のスペクトルの例。青ハッチ、赤ハッチはそれぞれ TAO サイト、VLT サイトで大気透過率が 50%以下になる波長域。TAO サイト+ SWIMS では大気の透過率が高く、広い赤方偏移レンジで複数輝線の同時観測が可能となることがわかる。

MIMIZUKU

MIMIZUKU は、TAO 望遠鏡用中間赤外線観測装置である [9]。撮像と低分散分光観測が可能で、波長カバ レッジは 2 – 38 μm という広い範囲にわたっている。これを実現するために MIMIZUKU では H1RG-5 μm cutoff、Si:As 1k array、Si:Sb MF-128 という 3 つの検出器を利用している。空間解像度は 8 μm より長波長側 で回折限界を達成でき、10, 20, 30 μm での空間分解能は各々0.4, 0.8, 1.2 秒角である。25 – 38 μm をカバー する地上観測装置は TAO/MIMIZUKU が世界で唯一であり、空間解像度の点では現在あるいは近未来の天文 プロジェクトの中で最も高解像度の装置である(図 5.20)。

MIMIZUKUのもう一つの重要な機能は、二視野同時観測が可能なことである。中間赤外線では通常の星が 暗く、ターゲット星の周りに前景・背景星がうつりこむことは極めてまれである。そのため可視近赤外線での 観測で用いられる視野内相対測光ができず、これが変光天体などの同定や測光精度を損なう原因となってきた。 MIMIZUKUでは望遠鏡視野内の2つの領域をピックアップして同時観測が可能であり、これまでにない高い 測光精度を達成できる見込みである。





図 5.20: (左)開発中の中間赤外線装置 MIMIZUKU の写真(右)現在および近未来の中間赤外線計画の空間 分解能比較。TAO/MIMIZUKU は 25 - 38 µm の領域で最高の空間分解能を有する。

第二期装置

SWIMS/MIMIZUKU に続く第二期観測装置の検討も、すでに開始している。候補の一つは、U-band の高 い大気透過率を活かした分光器である。また可変副鏡を用いた補償光学システムについても、検討がなされて いる。

5.5.4 他計画との関係

TAO 望遠鏡は南半球に建設されるため、北半球にあるすばる望遠鏡や国内望遠鏡とは観測天体の点で相補 的である。また ALMA サイトに隣接して建設されるため、観測天域は ALMA のそれと完全に共通している。 これは、ALMA の観測天体の捜査やフォローアップ観測などで、非常に有利である。また、TAO 望遠鏡は比 較的フレキシブルな運用が可能であり、近年重要性が増している長期間のモニタ観測や突発天体観測などでも 大きな役割を果たしうる。

さらに大学望遠鏡である TAO は、大学院生や若手の育成でも大きな役割を果たす。望遠鏡時間を大学院生 や若手の研究に厚く配分するほか、装置等の開発の面でも実地経験を通じた教育を進める。これらにより、次 世代の大型計画で活躍する人材を輩出し、日本の天文学全体に大きく貢献する。

5.5.5 望遠鏡時間

TAO 望遠鏡の望遠鏡時間のうち 50% は、TAO プロジェクト枠として利用する。また、10% は、チリ時間 としてチリコミュニティで利用される。残る 40% は公募枠とし、全国の研究者に開放される。また大学望遠鏡 であることから、東京大学のみならず全国の大学院生の学位のための観測を重視する。TAO プロジェクト枠を 含めた共同研究・共同観測は、常に歓迎する。

356

5.5. TAO

5.5.6 スケジュール

TAO 計画は、2013 年度の補正予算措置を受け、製造建設フェーズに入っている。2015 年には、鏡・架台を 含めた主要部品の製造が完了する。製造完了後国内工場で実験調整を行い、チリに輸送、山頂での建設組立を 進める。ファーストライトは、2017 年度内を目標としている。

参考文献

- [1] Yoshii, Y., et al., 2014, SPIE, 9145, 914507
- [2] Miyata, T., et al., 2008, SPIE, 7012, 701244
- $[3]\,$ Konishi, M., et al., 2015, PASJ, 67, 4
- [4] Motohara, K., et al., 2010, SPIE, 7735, 77353
- [5]Nakamura, T., et al., 2010, SPIE, 7735, 773561
- [6] Morokuma, T., et al., 2014, SPIE, 9145, 914553
- [7] Sako, S., et al., 2014, SPIE, 9145, 91454P
- [8] Takahashi, N., et al., 2014, SPIE, 9145, 91454N
- [9] Kamizuka, T., et al., 2014, SPIE, 9147, 91473C

5.6 京大3.8 メートル望遠鏡

5.6.1 京大 3.8 メートル望遠鏡仕様

国立天文台岡山天体物理観測所構内に、口径 3.8 m の新 技術光学赤外線望遠鏡を建設する。主鏡は国内初の分割鏡 で、可視近赤外望遠鏡では世界初となる花びら形である。そ の分割主鏡を、超精密研削技術と独自開発の CGH 干渉計 を駆使して製作する。加えて、遺伝的アルゴリズムにより 最適化された軽量コンパクトな架台を用い、次世代の超大 型望遠鏡や量産型中口径望遠鏡のために必要な基礎技術を 実験開発する。分割鏡の制御に必須となる非接触の位置セ ンサーをはじめ、その大部分に国産の技術が用いられてい る分割鏡望遠鏡である。

望遠鏡の光学系はリッチークレチアン式で、焦点は2つ のナスミス焦点のみだが、合成F比はF/6と明るく、2枚 の補正レンズを用いた際の視野は直径1°(なしの場合は12') となる。F/6の焦点比では、F変換レンズやマイクロレン ズなどを用いないで直接光ファイバーを配置して天体の光 を拾い上げることが可能となるため、ファイバー分光器の 設置がより容易となる利点を持つ。また、焦点スケールが 110 µm/1″となり、画素サイズ24 µm の CCD であれば



図 5.21: 京大 3.8 m 望遠鏡の完成予想図。ナス ミス台と方位ベースの色は地元浅口市の小学生 の投票により決定された。

0²²/pixel と直接焦点面に配置して観測に使用できるものとなっている。望遠鏡の本体重量は 20 t で、この 規模の望遠鏡としては非常に軽いため、望遠鏡を早く動かす事が可能である。突発天体出現の際には、どの方 向に出現しても1分以内に観測が始められる事を目指して、望遠鏡と観測装置を合わせた観測システムの統合 制御を行う。

項目 京大 3.8 m 望遠鏡 主鏡口径 3.78 m 最大幅 1.2 m の扇型 主鏡セグメントサイズ 主鏡セグメント数 18 主鏡F比 1.3副鏡口径 1.1 m 副鏡形状 非球面 リッチークレチアン 光学系 合成 F 比 6.0 主鏡-副鏡間距離 3.7m波長 $0.4 - 2.4 \ \mu m$ 望遠鏡重量 20 t 最低固有振動数 10 Hz (鏡筒のみ) 2018年 運用開始

完成予想図を図 5.21 に示す。また、仕様を表 5.5,表 5.6 に示す。

| 項目 | 京大 3.8 m 望遠鏡 |
|--------------|---------------------------|
| 焦点スケール | 9."09/mm |
| 焦点サイズ | $12'\phi$ (補正レンズなし) |
| | $1^{\circ}\phi$ (補正レンズあり) |
| 焦点面曲率半径 | 1425 mm (補正レンズなし) |
| | 3175 mm (補正レンズあり) |
| 結像性能 | 0!'28 (光学系のみ) |
| 方位軸最高駆動速度 | 4°/秒 以上 |
| 高度軸最高駆動速度 | 3°/秒 以上 |
| ロテータ最高駆動速度 | 3°/秒 以上 |
| 指向精度 | 3"(rms) 以下 |
| クローズドループ追尾精度 | 0.25/時 以下 |
| オープンループ追尾精度 | 0."5/10 分 以下 |
| 加速度 | 1°/秒 ² 以上 |

表 5.5: 京大 3.8 m 望遠鏡の仕様

表 5.6: 京大 3.8 m 望遠鏡の仕様 2
5.6.2 主な研究課題と観測装置

中口径の機動性と占有性を活かし、ガンマ線バースト等の突発天体・新技術補償光学を用いた系外惑星の直 接撮像・スーパーフレア等の特色ある研究を推進する。さらに、国内の大学による利用にも供し、これらを通 じて日本の大学での研究・教育・人材育成の基盤的拠点とする。

観測研究課題として京大グループで重点を置いているものは、主としてこの望遠鏡の機動性、占有性、経度 を活かしたものである。

- ガンマ線バースト、超新星、激変星、X 線新星等の突発天体現象
 - これらの代表的な突発天体現象 (激変天体現象) の多くは、高密度天体 (白色矮星、中性子星、ブラック ホール) に落ち込むガスが明るく光り、観測されるものである。このような突発天体現象の研究は、相対 論的天体の物理的理解において大きな意義がある。これは、現在進行中の大学間連携での観測の中核と もなる。また、これらの中にはガンマ線バーストや超新星のように重力波源の候補もあり、その可視光 対応天体の観測に貢献できる。さらに、時間軸にも重点を置いた撮像サーベイが世界的に行われるため、 東アジアにおいてそのフォローアップを行うことは、新たなパラメータ空間での天文学を拓く可能性が ある。
- 系外惑星の直接撮像観測

太陽系外惑星の研究では、すでに存在が明らかになった惑星を分光観測しその性質を明らかにすることや、さらに主星に近い領域で新たな惑星を直接撮像していくことが次なる目標であり、そのためにはすぐれた Inner Working Angle (IWA; 主星のどれだけ近傍まで高いコントラストで観測できるか)を備えた観測装置を、豊富な観測時間が得られる望遠鏡に搭載することが重要である。ここでは、新技術の Adaptive Optics (ExAO)を開発して上記の目標を達するとともに、TMT 等のセグメント望遠鏡に対する観測機器の基礎開発とする。

• 太陽型恒星のスーパーフレア現象の解明

太陽に似た星の活動性を調べるため、ケプラー衛星のデータを精査したところ、約300個の星でスーパー フレア(太陽で観測された史上最大のフレアの10倍以上のエネルギー規模のフレア)が発見された。さら に、べき乗則から、最大級の太陽フレアの100倍のエネルギーのフレアが800年に1度の頻度で起こる ことが示唆された。スーパーフレア星の性質と活動性の変化を明らかにするために、長期的な占有時間 で、可視光高分散分光観測によって系統的な探査と継続的なモニター観測を行うことが重要である。ま た、こういった分光観測装置によって、現在岡山188 cm望遠鏡で行われているドップラー方式での系外 惑星探査を継続しさらに発展させることができる。

その他の観測対象と併せてまとめたものを表 5.7 に、それらの観測を行うための開発中/計画中の観測装置 を表 5.8 に示す。

| 観測対象 | 観測タイプ | 観測モード |
|-------------------------------|----------|-----------------|
| γ 線バースト、超新星、激変星、X 線新星等 | 突発天体 | 面分光/高速分光 |
| 系外惑星/円盤の直接撮像 | サーベイ | 極限 AO +コロナグラフ |
| 太陽型恒星のスーパーフレア現象 | モニタ | 高分散分光 |
| ドップラー法による惑星探査 | サーベイ/モニタ | 高分散分光 (高精度・高安定) |
| 超新星分光 | モニタ | 測光分光 |
| AGN 分光 | モニタ | 測光分光 |
| 星周磁場やジェットの偏光 | モニタ | 偏光ユニット追加 |

表 5.7: 主な観測対象と観測モード

| 装置名称 | 概要 |
|-----------|-----------------------------------------|
| 高速撮像分光器 | 512×512 EM-CCD 搭載、最速で 36 frame/sec |
| 可視面分光装置 | $15''\phi$ を 127 本のファイバーでカバーし KOOLS へ |
| SEICA | 極限補償光学+コロナグラフで主星の 0.11 周辺まで観測 |
| 可視高分散分光器 | $R=50,000\;U\sim z$ バンドを 2 天体同時測光分光 |
| 近赤外相対分光器 | $R\sim5,000\;z\sim K$ バンドを 2 天体同時測光分光 |
| 近赤外高分散分光器 | 極限補償光学 + シングルモードファイバで $R>100,000$ |
| 偏光ユニットの追加 | |

表 5.8: 開発中/計画中の観測装置 (PI 装置を含む)

これらの装置を利用して到達できる限界等級の目安は、露出時間1時間、S/N=10、Sky 差し引きを行うという条件で AB 等級で可視光撮像では 24 等、近赤外撮像では 22 等であり、低分散分光の場合は3 等、高分散分光の場合は6 等程度これよりも明るい天体が観測対象となる。

上記観測研究以外の開発研究課題として、

- 世界最高精度の研削加工/計測技術による自由曲面の加工 (次世代装置の製作に極めて有用)
- 世界初となる花びら型分割鏡のリアルタイム制御
- 機動性の高い軽量架台の高速制御 (衛星やデブリなどの高速移動対象の追尾技術)
- 望遠鏡の低コスト技術

が挙げられる。これら以外にも、定期的なワークショップや運用開始後には共同利用を行う大学等の研究者 とともに学外メンバーを含めて組織される共同利用協議会(仮称)などで、コミュニティとして整合性のある研 究計画を作り上げていく。

5.6.3 TMT などの大型計画との関係

2000年以降、現在までの日本の観測天文学は、すばる望 遠鏡を中心に多くの観測提案を行うことで研究が進められ てきたが、2020 年代には TMT、すばる、TAO、京大 3.8 m と多様な口径の望遠鏡での役割分担が可能となる。これ までにも行われてきたサーベイ的な観測は、すばる望遠鏡 の広視野装置を用いてより広く深く進められ、TMT では より詳細な観測が行われる。近年の観測天文学でもう1つ 重要となってきた要素として、時間変化を追うモニター的 な観測がある。モニター観測を行うには、占有時間の高い 望遠鏡が必要であり、TAO や京大 3.8 m などの望遠鏡が TMT やすばるでは行うことのできないモニター的な観測 を行うことで、相補的な役割を持つ。京大 3.8 mは、北米や ハワイで発見された突発増光天体をいち早く追観測するに は経度的に有利な立地条件にあり、望遠鏡の即応性の高さ から、東アジア地域での突発天体観測の中核施設となる。ま た、系外惑星探査では、中間赤外線・遠赤外線での SPICA、 サブミリ波での ALMA による惑星系や原始惑星系円盤の 研究と相補的な成果を得られ、重力波望遠鏡(KAGRA)と



図 5.22: 将来的な日本の地上望遠鏡の役割分 担。丸の大きさは主鏡口径を表しており、望遠 鏡や装置の性能に占有時間も考慮した「能力」 を定性的に表したもの。 の共同研究課題として、可視光で対応する突発天体の発見と重力波源の理解への寄与がある。

間接的な寄与としては、人材の供給がある。本計画では、望遠鏡、分割鏡制御、光学素子製作の技術を備え た人材を育成する。さらに、TMT の観測装置など、メートルサイズの多様な光学装置の開発技術を獲得する という面でも、重要な寄与ができる。また、セグメント鏡での Adaptive Optics を確立し、TMT の観測装置 への橋渡しをするとともに、3.8 m 望遠鏡での系外惑星探査の成果を TMT でのサイエンスにつなげる。

5.7 南極中口径望遠鏡 (AIRT)

5.7.1 概要

極寒の乾燥した南極内陸の標高4000mの 氷床地帯は、水蒸気が少なく大気の透明度が 高い。また極低温のため、大気からの赤外線放 射の影響が極めて少ない。南極中口径望遠鏡 (AIRT)は、東北大学が国立極地研究所、筑波 大学、京都大学等と協力して、地球上最も優れ たサイトと期待される南極内陸に中口径赤外 線望遠鏡を設置し、high-z での銀河進化の解 明や、極夜を利用した長期間連続観測による 太陽系惑星の大気構造の研究、生命存在の可 能性のある系外惑星発見のための観測的研究 を行う。AIRTは、現在のドームふじ基地から 南に60kmの距離に計画されている新ドーム ふじ基地に建設を計画している(図 5.23, [1])。

5.7.2 科学的目的

南極内陸、特に新ドームふじ基地の冬期に おける観測環境の特徴は、高い晴天率(晴天 85%、快晴70%)、低い接地境界層(約15 m高) 上の良好なシーイング(可視光で0.23 秒,[2])、 水蒸気量0.12 mmPWV、低温(平均マイナス 70)大気による低バックグランド(マウナケ アの1/50~1/100 熱放射)である。南極内陸に 口径2.5 m級の望遠鏡を設置した場合、撮像 性能ですばる望遠鏡より優れた性能を発揮す る。近赤外線では、Jバンド(1.2 μm)より長 波長では回折限界の観測となる。水蒸気量が
 F-4545

 (3810m)

 MF-4540

 (3800m)

 F-454

 (390m)

 MF-4540

 (235m)

 F-454

 (235m)

図 5.23: 南極の天文基地とドームふじ基地

極端に少ないので、現在の天文台では観測困難な大気の窓での赤外線観測が可能である。安定した大気、高い 快晴率、極夜における5ヶ月間の連続観測などで、独創的な研究が可能となる。このような好条件を生かして、 下記のような研究を計画している。

系外惑星大気の水蒸気の検出

近年、Kepler などのトランジット観測により、多数の系外惑星探査、特に地球型のように質量が小さく、長 周期の惑星が発見されている。このような系外惑星の科学は、大気の性質を調べる段階に入った。惑星大気は 赤外線波長に CO₂、CH₄、H₂O などの分子の強い吸収帯を持つ。この波長に合わせて低分散での分光トラン ジット法を応用することで、惑星大気の分子の存在や大気の厚みに関する情報も直接得ることができる。大気 が薄く非常に安定している南極では高い測光精度が得られるため、分子によるトランジット法を応用するサイ トとして地球上で最も優れた場所と言える。赤外線でのトランジット分光観測は、一部 HST や Spitzer などの 宇宙望遠鏡でも行われているが、宇宙望遠鏡は高価・短命であることや装置交換ができないことを考えると、 南極は定常的な観測が可能な地球上で最も適した場所である。さらに南極での極夜は連続して 5ヶ月以上の観 測が可能であり、長周期惑星の観測を効果的に行うことができる。恒星を回る惑星は、複数存在するはずであ る。小型の広視野望遠鏡とCCDカメラによる連続観測によって複数の惑星を持つ星を発見し、惑星の周期に 合わせて、赤外線観測でその大気の成分を明らかにする。可視光からは大気の散乱、赤外線からは大気の成分 と温度、大気の厚みなどが測定される。特に、M型星などの低温星においては、惑星と主星の光度比が小さく、 高い精度で惑星大気の観測が可能である。水成分は生命が存在する可能性を知る最も良い分子であるが、惑星 大気を透過する主星の吸収線から大気水蒸気量、厚みを知ることができる。これまでの天文台では地球大気の 水蒸気によって高い精度での観測が困難であり、宇宙望遠鏡などが必要とされていた。南極では地球大気の水 蒸気量が極端に少ないので、観測が可能となる。特に南極は大気が安定していることも高い精度での観測を可 能にする。

10 µm レーザーヘテロダイン分光器による太陽系惑星の大気構造の研究

東北大学では 7 – 13 μ m で波長分解能 $R = 10^7 – 10^8$ のヘテロダイン分光器を開発した。バンド幅は 1 GHz、 量子限界の 1/2 程度の感度を達成した。赤外線でのヘテロダイン分光器は、世界にはまだ 2 ~ 3 台しかない。 ドームふじ基地から見る惑星は高度が低いものの、水蒸気量が少なく、連続して観測できる利点があり、惑星 大気中の様々な分子による大気組成と循環、温度分布、それらの鉛直分布などの研究が可能である。地球型系 外惑星への観測の応用には望遠鏡の口径は十分ではないが、ホットジュピーターの大気成分や構造の研究には 有効であり、将来の大型望遠鏡によるハビタブルゾーンにある系外惑星観測の基礎的な研究になることが期待 される。

遠方宇宙での広域銀河探査

 $10^9 M_{\odot}$ 程度の銀河は、ビルディングブロックとして大質量銀河の進化に大きな影響を与えている。銀河生成 が盛んで合体が頻繁に起きていると言われている $z = 2 \sim 3$ の時代での低質量銀河の広域探査を行う。近赤外線 で最も空の暗い波長 2.4 μ m で、限界等級 26.5 mag (AB)の観測を行う。他に J バンド、 3.5 μ m で同時観測を 行い、銀河のクラスタリング進化、大規模構造内部での合体の頻度などを解明する。すばる望遠鏡+MOIRCS 以上の性能が得られるので、1 年程度でプロジェクトが完成する。近赤外線での銀河の広域探査は宇宙望遠鏡 が最も有効であるが、本研究では角度分解能が高く (回折限界 0.25 秒@2.5 μ m)、極めて安価に、また早く研 究を進めることができる。

その他、極夜を利用した長周期変光星の観測、超高光度赤外線銀河 (LIRG) における II 型超新星探査、GRB や重力マイクロレンズのモニターキャンペーンへの参加、200 µm 帯での赤外線検出器の実証試験などの装置 開発にも応用される。5 µm より長波長では、昼間でも明るい星などの観測も可能である。同時期に建設され るテラヘルツ望遠鏡とのシナジーによる high-z 銀河の進化、銀河系内での星生成領域での研究も重要なテーマ である。シーイングが良いので、夏期の太陽の高空間分解能の連続観測も期待されている。さらに将来の赤外 線観測技術と干渉計技術開発にも資する。

5.7.3 望遠鏡と観測装置仕様

望遠鏡(図 5.24)と第一期観測装置の仕様を、表 5.9 に示す。2 つのナスミス台において、光路を切り替えな がら使用する。保守・維持が困難な場所なので、装置交換は数シーズン毎に越冬交代の夏期に行う。日本から のリモート観測で、観測装置の保守は越冬隊員が行う。通信回線が細いので、画像データの解析は現地又は交 代期にデータを日本に持ち帰って行う。本設備は、極地研と国立天文台の協力の下、筑波大などとの大学間連 携によって開発、建設、維持する。

| 望遠鏡 | AIRT(Antarctic Infrared Telescope) | | |
|----------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| | 口径 | 2.5 m | |
| | ナスミス合成焦点距離 | 30 m (F/12) | |
| | ナスミス台 | 2ヶ所切り替え | 大きさ 1 m×1 m、耐加重 1 トン |
| 第1期観測装置 | 三色同時撮像分光装置 (AIR-C) | | |
| | 観測波長 | 赤外線3チャンネル | $0.8-5~\mu{ m m}$ |
| | 検出器 | $2~{\rm K}{\times}2~{\rm K}$ InSb | 3個 |
| | 画素の大きさ | $25 \ \mu m \times 25 \ \mu m$ | |
| | ピクセルスケール | 0.25 秒 | <i>K</i> バンドでの回折限界 |
| | 低分散グリズム | $R\sim 50-100$ | 約10天体の多天体分光機能付き |
| | 視野 | 9 分角 ×9 分角 | |
| | 検出限界 | 24.5 mag (AB) K_{dark} | 点源 1 時間露出 S/N=5 |
| 第1期観測装置 | ヘテロダイン分光器 (MILAHI) | | |
| | 検出器 | HgCdTe フォトダイオード | |
| | バックエンド帯域 | 1 GHz | |
| | 波長域 | 7 –13 $\mu{ m m}$ | |
| | 波長分解能 | $R \sim 10^{7} - 10^{8}$ | |
| | 視野 | 0.85 秒 | 10.3 µm での回折限界 |
| | 検出限界 | 20 mK (14 Jy) | 点源 1 時間積分 S/N=1 |

表 5.9: AIRT および観測装置の仕様

5.7.4 大型計画との関連

大学においては、萌芽的、独創的な 研究の創成と優秀な人材の育成が期待 されている。また巨大プロジェクトは、 大学が主体になるのは困難である。以 上のような観点から、本設備は大学の 基盤装置として、南極での利点を生か した独創的なサイエンスの開拓、教育・ 研究を通じての人材の育成、装置開発、 国内外の研究者との共同研究、極地科 学・工学とのシナジーなどを推進する。 南極は、小型の装置であっても新しい 大気の窓での研究、低背景放射での高 い効率などの利点を生かすことで、新



図 5.24: AIRT と地上 15 m 高に設置するドーム

しいサイエンスが期待できる。その結果、大型計画に携わることのできる人材の輩出、大型観測装置によるサ イエンスの提案にも貢献する。

5.7.5 外国の状況と国際協力

南極点の米国基地には 10 m サブミリ電波望遠鏡が設置され、宇宙背景放射の研究で目覚ましい成果を上げ ている。より観測条件の良い氷床ドームでは、フランスとイタリアがドームC基地を建設し、2005 年より可 視光での越冬観測を続けている。ドームAには中国が小型望遠鏡を設置し、2012 年から 50 cm シュッミット 望遠鏡による無人観測を開始した。米国は、2012 年にドームAの近く、リッジAに小型のテラヘルツ観測装 置を設置して、大気透過率の調査を開始するとともに、銀河面サーベイを続けている。このように世界各国が

5.7. 南極中口径望遠鏡 (AIRT)

注目する南極内陸において、世界で初めて赤外線やテラヘルツ分野で日本がイニシアティブを取る意義は大きい。将来、世界各国が共同で南極内陸に天文基地を建設することも期待される。現在、極地科学の国際組織 SCAR(Scientific Committee on Antarctic Research)の下、2010年から南極天文学の国際委員会 (Astronomy and Astrophysics in Antarctica, AAA) が活動している。

5.7.6 スケジュール

当初の予定では、極地研の第9期南極地域観測計画 (2016 度から6年間) にて新ドームふじ基地に越冬基地 を建設し、それと同時に、10mテラヘルツ望遠鏡と2.5m赤外線望遠鏡の建設を始める計画であった。しか し、2年間「しらせ」が接岸ができなかったことなど、南極事業の遅れと、基地建設のための予算的な問題で、 第9期の越冬基地の建設は先送りとなった。従って、第9期ではこれまでと同様に小型望遠鏡での調査や研究 を続け、2020年代中期での望遠鏡建設を目標とする。

参考文献

- [1] http://www.astr.tohoku.ac.jp/ ichikawa/antarctic/report/AIRT.pdf
- [2] Okita, H., et al., 2013, A&A. 554, L5-8

5.8 広島大 SGMAP 計画

5.8.1 概要と科学的目的

広島大学 SGMAP (Search for the Galactic Magnetic-field by All-sky Polarimetric survey) 計画は、これまでほ とんど開拓の進んでいない「可視偏光」 による天体観測を追求し、全天の3分 の2に及ぶ天域を多色偏光撮像サーベ イして、この分野で世界のトップに立 つとともに、歴史的な全天偏光データ ベースを構築して天文学の広い分野に 貢献しようとする計画である[1]。この ため、口径2mの可視赤外線望遠鏡を 広島大学宇宙科学センター附属東広島 天文台に設置する(図 5.25)。

天体の可視偏光観測は、未開拓の領 域が大きく広がるフロンティアである。 宇宙における磁場構造とその起源、星 間ダストの性質、宇宙ジェットの構造と 放射機構、宇宙マイクロ背景放射の精 密測定による宇宙論の検証など、大規 模かつ精密な可視偏光観測がもたらす サイエンスは、測光や分光などの観測



図 5.25: SGMAP 望遠鏡と東広島天文台。現行のかなた望遠鏡の隣 に MAGNUM 2 m 望遠鏡を移設して SGMAP 計画専用に用いて、 全天の偏光撮像サーベイを行う。

では成し得ない大きな広がりを持っている。これまでになされてきた偏光観測は、データの量と質の両方にお いてきわめて貧弱と言わざるを得ず、そのために上記の研究分野は停滞を余儀なくされている。

SGMAP計画は、未だ研究の手が十分に届いていない天文学の領域に踏み込み、新たな知見を得るために、 これまでにない大規模な可視偏光観測を行う計画である。現在、SGMAP計画に匹敵する大規模な天体偏光 サーベイの計画はなく、機を逸せずにこれを敢行すれば、当該分野において我が国が世界をリードできるだけ でなく、世界の天文学に歴史的基礎データを提供できるであろう。

5.8.2 計画内容と装置仕様

口径2mの光赤外望遠鏡を東広島天文台に設置し、多色同時偏光観測装置を開発・装着して観測可能な全天 域の偏光サーベイを行い、世界初の系統的な大規模偏光天体データベースを構築する。これを元に、銀河系磁 場構造の解明を行う。大規模偏光データベースおよび得られた銀河系磁場構造の情報は、銀河系の構造形成史 の研究のみならず、星間塵から遠方の銀河研究にまで使用される汎用性の高いものであり、歴史的なデータと して世界の天文学研究に大きな貢献をする。並行して、他大学等と連携して近赤外高分散分光器を開発し、偏 光天体の追跡観測を行う。かなた望遠鏡や高エネルギー天文衛星とも連携し、2m望遠鏡とかなた望遠鏡の豊 富な観測時間を利用して、学内外の大学生の観測実習を行う。2m望遠鏡観測装置開発、観測システム開発、 さらには上記の研究プロジェクト推進を通じて、広島大学の大学院教育を行う。2台の望遠鏡を持つ大学天文 台として、広く一般社会にアピールし、社会連携活動(施設公開、観望会、講演会等)を推進する。望遠鏡は、 東京大学の所有する MAGNUM 望遠鏡を移設する。望遠鏡および観測装置の仕様は表 5.10 に、観測装置のレ イアウト案を図 5.26 に示す。

| 望遠鏡 | MAGNUM 望遠鏡 | |
|------|-------------------|-------------------------------------------------------|
| | 口径 | 2021 mm |
| | カセグレン合成焦点距離 | 14003 mm (F/6.9) |
| 観測装置 | 三色同時偏光撮像装置 | |
| | チャンネル数 | 可視域 3 チャンネル $(\mathrm{g}',\mathrm{r}',\mathrm{i}')$ |
| | 偏光ビームスプリッター (PBS) | 2 直交偏光成分とも透過ないし反射するもの |
| | 視野 | 遮蔽のない直径 50 分角の円(3 チャンネルとも) |
| | 偏光測定精度 | $\sigma_{ m p}\sim 0.09\%$ (3 チャンネルとも) |
| | 検出器 | 4k×4k CCD 6 個 (3 チャンネル ×2 偏光成分) |
| | 主鏡面から検出器面までの距離 | 1900 mm 以内 |
| | 装置総重量 | 500 kg 以内 |

表 5.10: SGMAP 望遠鏡および観測装置の仕様

5.8.3 SGMAP サーベイ計画の概要

SGMAP は、世界初の北天域(赤緯 $\delta > -30^{\circ}$;全天の3分の2の天域)に おける偏光サーベイ計画であり、4.5年 の観測期間で数百万個の恒星に対し可 視3バンドで均質・高精度の偏光測定 を遂行するプロジェクトである。サー ベイ領域を図 5.27に示す。

SGMAPでは、視野直径 50 分角に亘 る可視3バンドの偏光撮像観測が可能で ある。望遠鏡指向や検出器読み出しに掛 かるオーバーヘッド込みで、1領域(直径 50分角) に対し、40秒×4フレームを1 セットとするデータの取得が、280秒間 で完了する。この1セット計160秒露出 で、V=13等の恒星に対し $\Delta p = 0.10\%$ 、 V=14 等の恒星に対し △p =0.20%の偏 光測定精度が達成可能である。晴天率 33%を仮定すると、銀河面サーベイ (Region 1; 12000 平方度) に 2.1 年、中高銀 緯サーベイ (Region 2; 13200 平方度) に 2.4 年掛かる (図 5.27)。すなわち、4.5 年で V=14 等よりも明るい北天の星を、 $\Delta p = 0.20\%$ の深さでサーベイし尽すこ とが可能である (図 5.28)。また、これ 以外に少数の領域を繰り返して観測す る時間変動天体サーベイも予定している。



図 5.26: SGMAP 多色同時偏光撮像装置のレイアウト。左から望遠 鏡の直径 50 分角視野の光束が入射する。カセグレン部のフランジ の前に 2 枚玉のレデューサーを入れて F/6 の収束光にしたあと、半 波長板を通って焦点 (1 次像)を結ぶ。その後、コリメータおよびカ メラからなる再結像光学系と 2 つのダイクロイックプリズム、およ び 3 つの偏光ビームスプリッター (PBS)を介して、3 チャンネル合 計 6 つの偏光像を 4k×4k ピクセルの CCD に結ぶ。



図 5.27: SGMAP でサーベイする領域を銀河座標の全天図で表したもの。銀河面サーベイ領域 (Region 1) が青 線で囲まれた領域、中高銀緯サーベイ領域 (Region 2) が黄線で囲まれた領域である。

5.8.4 SGMAPによるサイエンス

遠い彼方にある天体の情報は、宇宙線や重力波といったごく一部を除き、そのほとんどすべてが電磁波に よって得られている。観測的な研究は、主として電磁波が持つ2つの側面、「進行方向(=天球上の位置)」と 「強度」を、波長と時間の関数として把握することによって為されている。加えて、電磁波には「偏光」という 第3の側面がある。偏光には直線偏光と円偏光とがあるが、以下では可視域で特に重要となる直線偏光につい て、単に偏光と表記することにする。偏光は通常、電磁波全体のうちわずかな割合しか占めないが、偏光が持 つベクトル的性質はユニークなもので、進行方向と強度の観測だけでは決して得られない情報をはるばる我々 まで運んでくれる、貴重な側面である。偏光は放射源の情報だけでなく、電磁波が進む媒質のベクトル的な情 報も付加して運んでくれる。

このような偏光特有な性質は、天文学のさまざまな分野の進展に大きく貢献してきている。偏光を生じる メカニズムで観測天文学上重要なものには、大きく分けて、ダスト(固体微粒子)による散乱(ミー散乱、レイ リー散乱)、自由電子による散乱(トムソン散乱)、シンクロトロン放射、サイクロトロン放射、ゼーマン効果・ ハンレ効果があり、それぞれ以下のような天文分野に深くかかわっている。

- ダストによる散乱(分子による散乱を含む場合あり):星間ダスト・星間磁場、星周物質、太陽系天体、原始星、漸近巨星分枝星、古典新星、スターバースト銀河など
- 自由電子による散乱:太陽コロナ、高温度星(古典新星、超新星等を含む)の光球、星周物質(特に高温度 星周辺のプラズマ)、活動銀河核周辺のプラズマ、宇宙背景放射(CMB)など
- シンクロトロン放射(逆コンプトン散乱や電気制動放射を伴う場合あり):木星デカメートル波、天の川 銀河の背景電波放射、電波銀河、超新星残骸、活動銀河核のジェット・ホットスポット、X線連星(中性 子星、ブラックホール)、パルサー、ガンマ線バースト(GRB)など
- サイクロトロン放射:強磁場激変星など
- ゼーマン効果・ハンレ効果:太陽磁場(黒点、彩層、コロナ)、強磁場星、分子や中性水素の電波輝線など

偏光は、電磁波としての性質上、周辺磁場と強く結びついており、シンクロトロン放射、サイクロトロン放 射、ゼーマン・ハンレ効果のように磁場を起源の一つとするメカニズムで生じているものがある。一方、星間



図 5.28: 高銀緯領域と銀河面領域からそれぞれ 4°×4°の領域をピックアップして拡大して表示したもの。既 存のカタログ [2] に比べ、SGMAP でいかに観測密度が向上するかが判る。

ダストによる偏光では、磁場によって統計的に整列したサブミクロンサイズの非球状ダストが選択吸収(ないし放射)を生じることによって、結果的に星間磁場と揃った(ないし垂直の)偏光を生じるものもある。

天の川銀河のように渦状腕を持つ渦巻き銀河においては、バルジよりも外側において、磁場のエネルギー ($B^2/8\pi$)は、星間乱流による運動エネルギー ($1/2\rho v^2$; $v \sim 7 \text{ km/s}$)に匹敵するかそれ以上であり、電離ガス の内部エネルギー ($3/2n_e kT$; $T \sim 10^4 \text{ K}$)、中性/分子ガスの内部エネルギー ($3/2n_H kT$; $T \sim 50 \text{ K}$)を遥かに 凌駕することが判っており [3; 4]、磁場の影響を無視しては銀河進化を知りえないといえよう。しかしながら、銀河磁場を直接的に測ることは不可能であり、偏光観測などを用いてようやく知り得ることが可能となる。

ただし、偏光のベクトル的性質特有の情報の縮退によって、偏光測定だけでは情報の抽出が難しい場合があ る。天体がある固有の偏光を持つ場合でも、途中の星間媒質でそれと垂直な偏光が付加された場合には、ベク トル的に打ち消し合い、偏光がゼロになってしまう。このとき、偏光の情報だけでは、天体固有の偏光と星間 偏光とを分離することは困難になるのである。

しかし、次世代のアストロメトリ衛星による大規模な恒星距離データベースが、この困難を解決する糸口を 与えてくれる。Gaia が観測を開始し、続く Nano-JASMINE、小型 JASMINE などにより 2020 年代には全天 10 億個もの恒星に対する距離データベースが公開される見込みである。SGMAP 計画では、Gaia が高精度に 距離測定できる 14 等級 (Vバンド)までのすべての恒星について、偏光測定を実施する。Gaia による距離デー タと SGMAP による偏光データを組み合わせれば、偏光データの縮退を解き、銀河磁場の高精度三次元マップ を構築することが可能となる。

参考文献

- [1] 吉田道利, 他, 2014, "広島大学 SGMAP 計画書"
- [2] Heiles, C., 2000, AJ, 119, 923-927
- [3] Boulares, A. & Cox, D. P., 1990, ApJ, 365, 544-558
- [4] Beck, R., 2004, Ap&SS, 289, 293-302

補足:図表の掲載許可取得について

本検討書で使用した以下の図表については、編集事務局よりジャーナル等に問合せを行い、その掲載許可を 取得している。

- 図 3.2(左) Anderson, L. et al., "The Clustering of Galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Baryon Acoustic Oscillations in the Data Releases 10 and 11 Galaxy Samples" MNRAS, 441, 24, Fig.16 (2014)
- 図 3.2(右) Samushia, L. et al., "The Clustering of Galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Measuring Growth Rate and Geometry with Anisotropic Clustering" MNRAS, 439, 3504, Fig.2 (2014)
- 図 3.3(左) Aubourg, E. et al., "Cosmological Implications of Baryon Acoustic Oscillation (BAO) Measurements" Physical Review D, 92, 12, id.123516, Fig.1 (2015) Reprinted with permission. Copyright (2015) by the American Physical Society.

- 🖾 3.7 Saito, S. et al., "Nonlinear Power Spectrum in the Presence of Massive Neutrinos: Perturbation Theory Approach, Galaxy Bias, and Parameter Forecasts" Phys. Rev. D, 80, 083528, Fig.8 (2009) Reprinted with permission. Copyright (2009) by the American Physical Society.
- 🗷 3.9 Lee, K.-G. et al., "Lyalpha Forest Tomography from Background Galaxies: The First Megaparsecresolution Large-scale Structure Map at z > 2" ApJ, 795, 1, L12, Fig.3 (2014)
- 3.12 Matsuoka, K. & Woo, J., "Far-Infrared and Accretion Luminosities of the Present-day Active Galactic Nuclei" ApJ, 807, 1, 28M, Fig.9 (2015)
- 🛛 3.13 Schramm, M. & Silverman, D., "The Black Hole-Bulge Mass Relation of Active Galactic Nuclei in the Extended Chandra Deep Field-South Survey" ApJ, 767, 1, 13S, Fig.8 (2013)
- 🛛 3.14 Alexander, D. M. et al., "What Drives the Growth of Black Holes?" New Astronomy Reviews, 56, 4, 93, Fig.6 (2012) Copyright (2012), with permission from Elsevier.
- 🖾 3.15 Harrison, C, M. et al., "Kiloparsec-scale Outflows Are Prevalent among Luminous AGN: Outflows and Feedback in the Context of the Overall AGN Population" MNRAS, 441, 3306, Fig.6 (2014)
- 3.22 Zackrisson, E. et al., "Primordial Star Clusters at Extreme Magnification" MNRAS, 449, 3057, Fig.2
 (2015)
- 🖾 3.23 Heger, A. et al., "How Massive Single Stars End Their Life" ApJ, 591, 1, 288, Fig.1 (2003)
- ⊠ 3.24 Yonetoku, D. et al., "High-z Gamma-ray Bursts for Unraveling the Dark Ages Mission HiZ-GUNDAM" SPIE, 9144, 12, Fig.3 (2014)
- 3.25 Bouwens, R. et al., "UV Luminosity Functions at Redshifts z ~ 4 to z ~ 10: 10,000 Galaxies from HST Legacy Fields" ApJ, 803, 1, 34, Fig.19 (2015)
- ⊠ 3.27 Shibuya, T. et al., "What is the Physical Origin of Strong Lyalpha Emission? II. Gas Kinematics and Distribution of Lyalpha Emitters" ApJ, 788, 1, 74, Fig.10 (2014)
- 🖾 3.29 Konno, A. et al., "Accelerated Evolution of the Lyalpha Luminosity Function at $z > \sim 7$ Revealed by the Subaru Ultra-deep Survey for Lyalpha Emitters at z = 7.3" ApJ, 797, 1, 16, Fig.13, Fig.14 (2014)
- 3.30 Madau, P. & Dickinson, M., "Cosmic Star-Formation History" ARA&A, 52, 415, Fig.8 (2014) Reproduced with permission. Copyright by Annual Reviews http://www.annualreviews.org.
- 3.31 Rodighiero, G. et al., "The Lesser Role of Starbursts in Star Formation at z = 2" ApJ, 739, 2, 40, Fig.1 (2011)

- 🛛 3.32 Daddi, E. et al., "Different Star Formation Laws for Disks Versus Starbursts at Low and High Redshifts" ApJ, 714, 1, 118, Fig.2 (2010)
- 🛛 3.33 Mannucci, F. et al., "A Fundamental Relation between Mass, Star Formation Rate and Metallicity in Local and High-redshift Galaxies" MNRAS, 408, 2115, Top panel of Fig.2 (2010)
- 🛛 3.34 Behroozi, F. et al., "The Average Star Formation Histories of Galaxies in Dark Matter Halos from z = 0.8" ApJ, 770, 1, 57, Fig.14 (2013)
- ⊠ 3.37 Guo, Y. et al., "Clumpy Galaxies in CANDELS. I. The Definition of UV Clumps and the Fraction of Clumpy Galaxies at 0.5 < z < 3" ApJ, 800, 1, 39, Fig.4 (2015)
- 3.38 Schreiber, F. N. M. et al., "The SINS Survey: SINFONI Integral Field Spectroscopy of z ~ 2 Starforming Galaxies" ApJ, 706, 2, 1364, Fig.17 (2009)
- ⊠ 3.39 Peng, Y. et al., "Mass and Environment as Drivers of Galaxy Evolution in SDSS and zCOSMOS and the Origin of the Schechter Function" ApJ, 721, 1, 193, Fig.1 (2010)
- 🖾 3.40 Leauthaud, A. et al., "New Constraints on the Evolution of the Stellar-to-dark Matter Connection: A Combined Analysis of Galaxy-Galaxy Lensing, Clustering, and Stellar Mass Functions from z = 0.2 to z = 1" ApJ, 744, 2, 159, Fig.11 (2012)
- 🛛 3.44 Cooper, A. et al., "Galactic Stellar Haloes in the CDM Model" MNRAS, 406, 744, Fig.6 (2010)
- 🛛 3.45 Richardson, J. C. et al., "PAndAS' Progeny: Extending the M31 Dwarf Galaxy Cabal " ApJ, 732, 2, 76, Fig.1 (2011)
- 🛛 3.46 Mart'nez-Delgado, D. et al., "Stellar Tidal Streams in Spiral Galaxies of the Local Volume: A Pilot Survey with Modest Aperture Telescopes" AJ, 140, 4, 962, Fig.2 (2010)
- 🛛 3.47 Walker, M. G. et al., "A Universal Mass Profile for Dwarf Spheroidal Galaxies?" ApJ, 704, 2, 1274, Fig.1 (2009)
- ⊠ 3.48 Kirby, E. et al., "Multi-element Abundance Measurements from Medium-resolution Spectra. IV. Alpha Element Distributions in Milky Way Satellite Galaxies" ApJ, 727, 2, 79, Fig.4 (2011)
- 図 3.49(左) Frebel, A. et al., "High-Resolution Spectroscopy of Extremely Metal-Poor Stars in the Least Evolved Galaxies: Ursa Major II and Coma Berenices" ApJ, 708, 1, 560, Fig.16 (2010)
- 図 3.49 (右) Kirby, E. N. et al., "The Universal Stellar Mass-Stellar Metallicity Relation for Dwarf Galaxies" ApJ, 779, 2, 102, Fig.1 (2013)
- X 3.50 Frebel, A. et al., "Segue 1: An Unevolved Fossil Galaxy from the Early Universe" ApJ, 786, 1, 74, Fig.3 (2014)
- 図 3.51 (右) van der Marel, R. P. et al., "The M31 Velocity Vector. III. Future Milky Way M31-M34 Orbital Evolution, Merging, and Fate of the Sun" ApJ, 753, 1, 9, Fig.3 (2012)
- 図 3.51 (左) Shaya, E. J. & Tully, R. B., "The formation of Local Group planes of galaxies" MNRAS, 436, 2096, Fig.3, (2013)
- X 3.53 Colbert, J. W. et al., "SO LWS Spectroscopy of M82: A Unified Evolutionary Model" ApJ, 511, 2, 721, Fig. 2 (1999)
- 図 3.53 Sloan, G. C. et al., "A Uniform Database of 2.4-45.4 Micron Spectra from the Infrared Space Observatory Short Wavelength Spectrometer" ApJS, 147, 379 (データアーカイブの中から M82 のデータを使用) (2003)
- ⊠ 3.54 De Looze, I. et al., "The Applicability of Far-infrared Fine-structure Lines as Star Formation Rate Tracers over Wide Ranges of Metallicities and Galaxy Types" A&A, 568, 62, Fig.10 (2014), reproduced with permission ©ESO
- ⊠ 3.55 Deharveng, L. et al., "A Gallery of Bubbles. The Nature of the Bubbles Observed by Spitzer and What ATLASGAL Tells Us about the Surrounding Neutral Material" A&A, 523, A6, 35, Fig.1 (2010), reproduced with permission ©ESO
- 図 3.55(右下) Habe, A. & Ohta, K., "Gravitational Instability Induced by a Cloud-cloud Collision the Case of Head-on Collisions between Clouds with Different Sizes and Densities" PASJ, 44, 203, Fig.5 (1992) with permission of Oxford University Press
- 3.56 Kennicutt, R. C. & Evans, N. J., "Star Formation in the Milky Way and Nearby Galaxies" ARA&A, 50, 531, Fig.9, Fig.11 (2012) Reproduced with permission. Copyright by Annual Reviews http://www.annualreviews.org.
- 図 3.57(左) Sano, H. et al., "A Quality Check of the AKARI Mid-infrared All-sky Diffuse Map toward the Massive Star-Forming Regions NGC 6334 and NGC 6357" PKAS in pres., Fig.1 (2015)
- 図 3.57(右) Amatsutsu, T. et al., "The Current Status of the AKARI Mid-Infrared All-Sky Diffuse Maps" PKAS, in pres., Fig.1 (2015)

- ⊠ 3.58 Langer, W. D. et al., "A Herschel [C II] Galactic plane survey. II. CO-dark H₂ in clouds" A&A, 561, A122, 20, Fig.1, Fig.6, Fig.17 (2014), reproduced with permission ©ESO
- ⊠ 3.59 Langer, W. D. et al., "A Herschel [C II] Galactic Plane Survey. II. CO-dark H₂ in Clouds" A&A, 561, A122, 20, Fig.7 (2014), reproduced with permission ©ESO
- X 3.61 Aniano, G. et al., "Modeling Dust and Starlight in Galaxies Observed by Spitzer and Herschel: NGC 628 and NGC 6946" ApJ, 756, 1, 138, Fig.2, Fig.3 (2012)
- 図 3.62(上) Ishihara, D. et al., "The AKARI/IRC Mid-infrared All-sky Survey" A&A, 514, A1, 14, Fig.2 (2010), reproduced with permission ⓒESO
- 図 3.62(下) Ishihara, D. et al., "Galactic distributions of carbon- and oxygen-rich AGB stars revealed by the AKARI mid-infrared all-sky survey" A&A, 534, A79, 10, Fig.6 (2011), reproduced with permission ©ESO
- 図 3.63(左上)&図 3.63(下) Fisher, D. B. et al., "The Rarity of Dust in Metal-poor Galaxies" Nature 505, 186, Fig.1, Fig.3 (2014)
- ⊠ 3.63 Hunt, L. K. et al., "ALMA Observations of Cool Dust in a Low-metallicity Starburst, SBS 0335-052" A&A, 561, A49, 15, Fig.1 (2014), reproduced with permission ©ESO
- X 3.64 Yamagishi, M. et al., "Difference in the Spatial Distribution between H2O and CO2 Ices in M 82 Found with AKARI" ApJ, 773, 2, L37, Fig.1, Fig.2 (2013)
- 3.65 Dudley, C. C. et al., "Ice Emission and the Redshifts of Submillimeter Sources" ApJ, 686, 1, 251, Fig.2 (2008)
- 図 3.66(左) Fendt, C. et al., "Spiral Pattern in the Optical Polarization of NGC 6946" A&A, 335, 123, Fig.2 (1998), reproduced with permission ©ESO
- 図 3.66(右) Fendt, C. et al., "Large-field Optical Polarimetry of NGC 891, 5907 and 7331. Selecting the Intrinsic Polarising Mechanism" A&A, 308, 713, Fig.1 (1996), reproduced with permission ©ESO
- X 3.67 Chyzy, K. T. & Beck, R., "Magnetic Fields in Merging Spirals the Antennae" A&A, 417, 541, Fig.12 (2004), reproduced with permission ©ESO
- 図 3.67(右) Nikiel-Wroczyski, B. et al., "Intergalactic Magnetic Fields in Stephan's Quintet" MNRAS, 435, 149, Fig.2 (2013)
- 図 3.68(左) Greaves, J. S. et al., "Magnetic Field Surrounding the Starburst Nucleus of the Galaxy M82 from Polarized Dust Emission" Nature, 404, 732, Fig.1 (2000)
- 図 3.68 (右) Jones, T., "The Magnetic Field Geometry in M82 and Centaurus" AJ, 120, 6, 2920, Fig.2 (2000)
- 🖾 3.73 Rho, J. et al., "Freshly Formed Dust in the Cassiopeia A Supernova Remnant as Revealed by the Spitzer Space Telescope" ApJ, 673, 1, 271, Fig.3 (2008)
- 図 3.74 Honda, M. et al., "Detection of Crystalline Silicates around the T Tauri Star Hen 3-600A" ApJ, 585, 1, L59, Fig.1(一部改変) (2003)
- X 3.75(A) Zolensky, M. E. et al., "Mineralogy and Petrology of Comet 81P/Wild 2 Nucleus Samples" Science, 314 (5806),1735-1739, Fig.4a (2006) Reprinted with permission from AAAS.
- X 3.76 Nozawa, T. & Kozasa, T., "Formulation of Non-steady-state Dust Formation Process in Astrophysical Environments" ApJ, 776, 1, 24, Fig.8 (2013)
- 図 3.77(右) Ishizuka, S. et al., "In-situ Infrared Measurements of Free-flying Silicate during Condensation in the Laboratory" ApJ, 803, 2, 88, Fig.6 (2015)
- 図 3.77(中央) Kimura, Y. et al., "Direct Observation of the Homogeneous Nucleation of Manganese in the Vapor Phase and Determination of Surface Free Energy and Sticking Coefficient" Crystal Growth & Design, 12 (6), 3278, Fig.4 (2012) Reprinted with permisson. Copyright (2012) American Chemical Society.
- 🖾 3.78(a) Takigawa, A. et al., "Morphology and Crystal Structures of Solar and Presolar Al2O3 in Unequilibrated Ordinary Chondrites" Geochimica et Cosmochimica Acta, 124, 309-327, Fig.15 (2014) Copyright (2014), with permission from Elsevier.
- ⊠ 3.78(b) Fabian, D. et al., "Infrared Optical Properties of Spinels A Study of the Carrier of the 13, 17 and 32m Emission Features Observed in ISO-SWS Spectra of Oxygen-rich AGB Stars" A&A, 373, 1125, Fig.7 (2001), reproduced with permission ©ESO
- X 3.80 Moore M. H. & Hudson R. L., "Far-infrared Spectral Studies of Phase Changes in Water Ice Induced by Proton Irradiation", ApJ, 401, 1, 353, Fig.2 (1992)
- ⊠ 3.81 Shimonishi, T. et al., "Spectroscopic Observations of Ices around Embedded Young Stellar Objects in the Large Magellanic Cloud with AKARI" A&A, 514, A12, 12, Fig.1 (2010), reproduced with permission ©ESO

- X 3.87 Coleiro, A. & Chaty, S., "Distribution of High-mass X-Ray Binaries in the Milky Way" ApJ, 764, 2, 185, Fig.4 (2013)
- X 3.89 Kobayashi, C. & Nomoto, K., "The Role of Type Ia Supernovae in Chemical Evolution. I. Lifetime of Type Ia Supernovae and Metallicity Effect" ApJ, 707, 2, 1466, Fig.15 (2009)
- X 3.90 Takiwaki, T. et al., "A Comparison of Two- and Three-dimensional Neutrino-hydrodynamics Simulations of Core-collapse Supernovae" ApJ, 786, 2, 83, Fig.1 (2014)
- 🖾 3.93 Green, T., "Protostars" American Scientist, 89, 4, 6, Fig.2 (2001)
- ⊠ 3.96 Battersby, C. et al., "An Infrared through Radio Study of the Properties and Evolution of IRDC Clumps" ApJ, 721, 1, 222, Fig.12 (2010)
- 図 3.98 「ダストの内部密度進化を考慮した微惑星形成」片岡章雅、天文月報 2014 年 5 月号、図 1
- ⊠ 3.99 Honnda, M. et al., "Detection of Water ICE Grains on the Surface of the Circumstellar Disk Around HD 142527" ApJ, 690, L110, Fig.1, Fig.3 (2009)
- ⊠ 3.101 Ida, S. et al., "Toward a Deterministic Model of Planetary Formation. VII. Eccentricity Distribution of Gas Giants" ApJ, 775, 1, 42, Fig. 8 (2013)
- ⊠ 3.106 Swain, M. R. et al., "The Presence of Methane in the Atmosphere of an Extrasolar Planet" Nature, 452, Issue 7185, 329-331, Fig.2 (2008)
- 🖾 3.114 Hiroi, T. et al., "Thermal Metamorphism of the C, G, B, and F Asteroids Seen from the 0.7 micron, 3 micron and UV Absorption Strengths in Comparison with Carbonaceous Chondrites" Meteoritics and Planetary Science, 31, 321, Fig.3 (1996)
- X 3.115 Hiroi, T. et al., "Thermal metamorphism of the C, G, B, and F Asteroids seen from the 0.7 micron, 3 micron and UV Absorption Strengths in Comparison with Carbonaceous Chondrites" Meteoritics and Planetary Science, 31, 321, Fig.4 (1996)
- X 3.116 Rivkin, A. S. & Emery, J. P., "Detection of ice and Organics on an Asteroidal Surface" Nature, 464, 1322, Fig.1 (2010)
- Image: Strong Release of Methane on Mars in Northern Summer 2003" Science, 323, 1041 (2009) Reprinted with permission from AAAS.
- ⊠ 3.118 Krasnopolsky, V. A. et al., "Detection of Methane in the Martian Atmosphere: Evidence for Life?" Icarus, 172, 537-547, Fig.3 (2004) Copyright (2004), with permission from Elsevier.
- 🖾 3.119 Witze, A., "Icy Enceladus Hides a Watery Ocean" Nature, doi:10.1038/14985 (2014)
- ⊠ 3.120 Kodama, K. et al., "First Detection of [OI] 630nm Emission in the Enceladus Torus" Geophys. Res. Lett., 40, 16, 4177-418, Fig.1 (2013)
- 4.5 Burgarella, D. et al., "Herschel PEP/HerMES: the Redshift Evolution (0 ≤ z ≤ 4) of Dust Attenuation and of the Total (UV+IR) Star Formation Rate Density" A&A, 554, A70, Fig.4 (2013)
- 🖾 4.6 Tommasin, S. et al., "Spitzer-IRS High-Resolution Spectroscopy of the 12 μ m Seyfert Galaxies. II. Results for the Complete Data Set" ApJ, 709, 1257, Fig.14 (2010)
- 🖾 4.10 Molster, F. & Kemper, C., "Crystalline Silicates" Space Science Reviews, 119, 1-4, 3 (2005)

| 2020年代の光赤外天文学 _{将来計画検討報告書} | | |
|---------------------------------------|---------------------------------|--|
| | 2016年8月1日印刷 | |
| | 2016 年 8 月 20 日 発行 | |
| 発行者 | 光赤外天文学将来計画検討会検討報告書編集委員会 | |
| 編集委員長 | 松原 英雄 (JAXA) | |
| 編集委員 | 吉田 道利 (広島大学) | |
| | 土居 守 (東京大学) | |
| | 戸谷 友則 (東京大学) | |
| | 長尾 透 (愛媛大学) | |
| | 柏川 伸成 (国立天文台) | |
| | 金田 英宏 (名古屋大学) | |
| | 橋本 修 (ぐんま天文台) | |
| | 深川 美里 (国立天文台) | |
| 編集事務局 | 和田 武彦 (JAXA) | |
| | 小山 佑世 (国立天文台) | |
| | 浅野 健太朗 (JAXA) | |
| 印刷所 | タイヨー印刷株式会社 | |
| | 〒 252-0243 神奈川県相模原市中央区上溝 4-9-10 | |
| | Tel. 042-762-2157 | |
| 表紙デザイン | 權 靜美 (KWON Jungmi) (JAXA) | |