

GOPIRA

Optical and Infrared Astronomy Roadmap 2025

光赤外線天文学ロードマップ2025



光赤天連ロードマップ 2025 作成委員会 名簿 (敬称略)

GOPIRA Roadmap 2025 Creation Committee Members

将来計画検討専門委員会

井上 昭雄 (早稲田大学)
金田 英宏 (名古屋大学)
河原 創 (JAXA 宇宙科学研究所)
小山 佑世 (国立天文台)
栗田 光樹夫 (京都大学)
酒向 重行 (東京大学)
高田 昌広 (東京大学)
田中 雅臣 (東北大学)
成田 憲保 (東京大学・委員長)
播金 優一 (東京大学)
松岡 良樹 (愛媛大学)

外部委員

家 正則 (国立天文台)
一本 潔 (立命館大学)
國枝 秀世 (名古屋大学)
小林 千晶 (University of Hertfordshire)
坂井 南美 (理化学研究所)
都丸 隆行 (国立天文台)
中川 貴雄 (JAXA 宇宙科学研究所)
野村 英子 (国立天文台)
藤井 通子 (東京大学)
水谷 忠均 (JAXA 研究開発部門)
吉田 二美 (産業医科大学)

オブザーバー

吉田 道利 (国立天文台)
山崎 典子 (JAXA 宇宙科学研究所)
臼田 知史 (国立天文台)
住 貴宏 (大阪大学)

Future Planning Subcommittee members

Akio Inoue (Waseda University)
Hidehiro Kaneda (Nagoya University)
Hajime Kawahara (ISAS/JAXA)
Yusei Koyama (NAOJ)
Mikio Kurita (Kyoto University)
Shigeyuki Sako (The University of Tokyo)
Masahiro Takada (The University of Tokyo)
Masaomi Tanaka (Tohoku University)
Norio Narita (The University of Tokyo, Chair)
Yuichi Harikane (The University of Tokyo)
Yoshiki Matsuoka (Ehime University)

External members

Masanori Iye (NAOJ)
Kiyoshi Ichimoto (Ritsumeikan University)
Hideyo Kunieda (Nagoya University)
Chiaki Kobayashi (University of Hertfordshire)
Nami Sakai (RIKEN)
Takayuki Tomaru (NAOJ)
Takao Nakagawa (ISAS/JAXA)
Hideko Nomura (NAOJ)
Michiko Fujii (The University of Tokyo)
Tadahito Mizutani (JAXA)
Fumi Yoshida (University of Occupational and Environmental Health)

Observers

Michitoshi Yoshida (NAOJ)
Noriko Yamasaki (ISAS/JAXA)
Tomonori Usuda (NAOJ)
Takahiro Sumi (The University of Osaka)

Acronyms

NAOJ (National Astronomical Observatory of Japan)
JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)
ISAS (Institute of Space and Astronautical Science)

Contents

PART I: Executive Summary

背景	13
ロードマップ策定の趣旨と方針	13
提案募集と評価体制の確立	13
提案内容と評価過程	14
最優先計画の選定とロードマップの方向性	14
結び	15
最優先計画のタイムライン	16
地上計画のタイムライン	17
スペース計画のタイムライン	18
Background	19
Purpose and Policy of the Roadmap	20
Call for Proposals and Establishment of the Evaluation Framework	20
Proposal Contents and Evaluation Process	20
Selection of Highest-Priority Projects and Direction of the Roadmap	21
Conclusion	22
Timeline for Highest-Priority Projects	23
Timeline for Ground-Based Projects	24
Timeline for Space-Based Projects	25

PART II: 大型計画（8 計画）

The Thirty Meter Telescope TMT	
30 m 光学赤外線望遠鏡計画 TMT	27
0. Summary/ 概要	28
1. プロジェクトの意義 / Science goals of the project	31
2. プロジェクトの科学目的 / Scientific objectives of the projec	31
3. プロジェクトの科学的意義と目標の根拠 / Rationale for the scientific goals and objectives	34
4. プロジェクトが実施する研究 / Scientific investigations of the project	37
5. スケジュール / Schedule	37
6. プロジェクトで使用する装置 / Instrumentation of the project	38
7. プロジェクトで獲得するデータ / Data to be obtained	39

8. 主要技術要素 / Key technologies	39
9. 想定されるコスト / Cost estimate	41
10. 技術ヘリテージと技術開発状況と開発計画 / Technical heritages, technology development status and plan	41
11. プロジェクトのリスク管理 / Risk Management Plan of the Project	42
12. 天文学コミュニティの持続可能性に関わる戦略 / Strategy for the Sustainability of Astronomical community	43

GREX-PLUS (Galaxy Reionization EXplorer and PLANetary Universe Spectrometer) 銀河進化・惑星系形成観測ミッション GREX-PLUS

0. Summary/ 概要	45
1. プロジェクトの意義 / Science goals of the project	47
2. プロジェクトの科学目的 / Scientific objectives of the projec	47
3. プロジェクトの科学的意義と目標の根拠 / Rationale for the scientific goals and objectives	48
4. プロジェクトが実施する研究 / Scientific investigations of the project	51
5. スケジュール / Schedule	52
6. プロジェクトで使用する装置 / Instrumentation of the project	53
7. プロジェクトで獲得するデータ / Data to be obtained	54
8. 主要技術要素 / Key technologies	55
9. 想定されるコスト / Cost estimate	57
10. 技術ヘリテージと技術開発状況と開発計画 / Technical heritages, technology development status and plan	57
11. プロジェクトのリスク管理 / Risk Management Plan of the Project	57
12. 天文学コミュニティの持続可能性に関わる戦略 / Strategy for the Sustainability of Astronomical community	57

Participation to NASA 6m Large Infrared/Optical/Ultraviolet Space Telescope: Habitable Worlds Observatory NASA 6m 紫外線可視近赤外線望遠鏡 Habitable Worlds Observatory への参加

0. Summary/ 概要	67
1. プロジェクトの意義 / Science goals of the project	68
2. プロジェクトの科学目的 / Scientific objectives of the projec	69
3. プロジェクトの科学的意義と目標の根拠 / Rationale for the scientific goals and objectives	70
4. プロジェクトが実施する研究 / Scientific investigations of the project	73
5. スケジュール / Schedule	75
6. プロジェクトで使用する装置 / Instrumentation of the project	75
7. プロジェクトで獲得するデータ / Data to be obtained	77
8. 主要技術要素 / Key technologies	78
9. 想定されるコスト / Cost estimate	79
10. 技術ヘリテージと技術開発状況と開発計画 / Technical heritages, technology development status and plan	80
11. プロジェクトのリスク管理 / Risk Management Plan of the Project	81
12. 天文学コミュニティの持続可能性に関わる戦略 / Strategy for the Sustainability of Astronomical community	81

High-z Gamma-Ray Bursts for Unravelling the Dark Ages Mission

ガンマ線バーストを用いた初期宇宙・極限時空探査計画 HiZ-GUNDAM — 85

0. Summary/ 概要	86
1. プロジェクトの意義 / Science goals of the project	88
2. プロジェクトの科学目的 / Scientific objectives of the projec	88
3. プロジェクトの科学的意義と目標の根拠 / Rationale for the scientific goals and objectives	89
4. プロジェクトが実施する研究 / Scientific investigations of the project	91
5. スケジュール / Schedule	92
6. プロジェクトで使用する装置 / Instrumentation of the project	93
7. プロジェクトで獲得するデータ / Data to be obtained	94
8. 主要技術要素 / Key technologies	95
9. 想定されるコスト / Cost estimate	95
10. 技術ヘリテージと技術開発状況と開発計画 / Technical heritages, technology development status and plan	96
11. プロジェクトのリスク管理 / Risk Management Plan of the Project	97
12. 天文学コミュニティの持続可能性に関わる戦略 / Strategy for the Sustainability of Astronomical community	97

“JASMINE”: Japan Astrometry/photometry Satellite Mission for INfrared Exploration

赤外線位置天文観測 / 測光観測衛星 JASMINE — 99

0. Summary/ 概要	100
1. プロジェクトの意義 / Science goals of the project	102
2. プロジェクトの科学目的 / Scientific objectives of the projec	102
3. プロジェクトの科学的意義と目標の根拠 / Rationale for the scientific goals and objectives	103
4. プロジェクトが実施する研究 / Scientific investigations of the project	104
5. スケジュール / Schedule	105
6. プロジェクトで使用する装置 / Instrumentation of the project	106
7. プロジェクトで獲得するデータ / Data to be obtained	107
8. 主要技術要素 / Key technologies	108
9. 想定されるコスト / Cost estimate	110
10. 技術ヘリテージと技術開発状況と開発計画 / Technical heritages, technology development status and plan	110
11. プロジェクトのリスク管理 / Risk Management Plan of the Project	110
12. 天文学コミュニティの持続可能性に関わる戦略 / Strategy for the Sustainability of Astronomical community	110

Life-environmentology, Astronomy, and Planetary Ultraviolet Telescope Assembly(LAPYUTA)

惑星科学、生命圏科学、および天文学に向けた紫外線宇宙望遠鏡計画 — 114

0. Summary/ 概要	115
1. プロジェクトの意義 / Science goals of the project	117

2. プロジェクトの科学目的 / Scientific objectives of the projec	117
3. プロジェクトの科学的意義と目標の根拠 / Rationale for the scientific goals and objectives	118
4. プロジェクトが実施する研究 / Scientific investigations of the project	121
5. スケジュール / Schedule	122
6. プロジェクトで使用する装置 / Instrumentation of the project	123
7. プロジェクトで獲得するデータ / Data to be obtained	125
8. 主要技術要素 / Key technologies	126
9. 想定されるコスト / Cost estimate	127
10. 技術ヘリテージと技術開発状況と開発計画 / Technical heritages, technology development status and plan	128
11. プロジェクトのリスク管理 / Risk Management Plan of the Project	129
12. 天文学コミュニティの持続可能性に関わる戦略 / Strategy for the Sustainability of Astronomical community	130

PRIMA: PRobe far-Infrared Mission for Astrophysics

遠赤外線冷却望遠鏡 PRIMA	132
-----------------	-----

0. Summary/ 概要	133
1. プロジェクトの意義 / Science goals of the project	135
2. プロジェクトの科学目的 / Scientific objectives of the projec	135
3. プロジェクトの科学的意義と目標の根拠 / Rationale for the scientific goals and objectives	137
4. プロジェクトが実施する研究 / Scientific investigations of the project	138
5. スケジュール / Schedule	138
6. プロジェクトで使用する装置 / Instrumentation of the project	139
7. プロジェクトで獲得するデータ / Data to be obtained	141
8. 主要技術要素 / Key technologies	141
9. 想定されるコスト / Cost estimate	144
10. 技術ヘリテージと技術開発状況と開発計画 / Technical heritages, technology development status and plan	144
11. プロジェクトのリスク管理 / Risk Management Plan of the Project	146
12. 天文学コミュニティの持続可能性に関わる戦略 / Strategy for the Sustainability of Astronomical community	147

ULTIMATE-Subaru project

ULTIMATE-Subaru 計画	148
--------------------	-----

0. Summary/ 概要	149
1. プロジェクトの意義 / Science goals of the project	151
2. プロジェクトの科学目的 / Scientific objectives of the projec	151
3. プロジェクトの科学的意義と目標の根拠 / Rationale for the scientific goals and objectives	152
4. プロジェクトが実施する研究 / Scientific investigations of the project	154
5. スケジュール / Schedule	155
6. プロジェクトで使用する装置 / Instrumentation of the project	156
7. プロジェクトで獲得するデータ / Data to be obtained	157
8. 主要技術要素 / Key technologies	158
9. 想定されるコスト / Cost estimate	159

10. 技術ヘリテージと技術開発状況と開発計画 / Technical heritages, technology development status and plan	159
11. プロジェクトのリスク管理 / Risk Management Plan of the Project	161
12. 天文学コミュニティの持続可能性に関わる戦略 / Strategy for the Sustainability of Astronomical community	162

PART III: 大型計画以外の研究施設・研究装置 (5 計画)

Visible Extragalactic background Radiation Exploration by CubeSat (VERTECS)

CubeSat による宇宙可視光背景放射観測プロジェクト VERTECS	166
--------------------------------------	-----

0. Summary/ 概要	167
1. プロジェクトの意義 / Science goals of the project	169
2. プロジェクトの科学目的 / Scientific objectives of the projec	169
3. プロジェクトの科学的意義と目標の根拠 / Rationale for the scientific goals and objectives	170
4. プロジェクトが実施する研究 / Scientific investigations of the project	172
5. スケジュール / Schedule	172
6. プロジェクトで使用する装置 / Instrumentation of the project	173
7. プロジェクトで獲得するデータ / Data to be obtained	174
8. 主要技術要素 / Key technologies	175
9. 想定されるコスト / Cost estimate	176
10. 技術ヘリテージと技術開発状況と開発計画 / Technical heritages, technology development status and plan	176
11. プロジェクトのリスク管理 / Risk Management Plan of the Project	176
12. 天文学コミュニティの持続可能性に関わる戦略 / Strategy for the Sustainability of Astronomical community	177

Astronomy with Super-Precise Spectroscopic Observations

超精密分光観測による天文学	183
---------------	-----

0. Summary/ 概要	184
1. プロジェクトの意義 / Science goals of the project	186
2. プロジェクトの科学目的 / Scientific objectives of the projec	186
3. プロジェクトの科学的意義と目標の根拠 / Rationale for the scientific goals and objectives	186
4. プロジェクトが実施する研究 / Scientific investigations of the project	189
5. スケジュール / Schedule	190
6. プロジェクトで使用する装置 / Instrumentation of the project	191
7. プロジェクトで獲得するデータ / Data to be obtained	191
8. 主要技術要素 / Key technologies	192
9. 想定されるコスト / Cost estimate	192
10. 技術ヘリテージと技術開発状況と開発計画 / Technical heritages, technology development status and plan	194

11. プロジェクトのリスク管理 / Risk Management Plan of the Project	194
12. 天文学コミュニティの持続可能性に関わる戦略 / Strategy for the Sustainability of Astronomical community	195

Observation network for Time-domain astronomy/

Multi-messenger astronomy

時間軸天文学・マルチメッセンジャー天文学観測ネットワーク	198
------------------------------	-----

0. Summary/ 概要	199
1. プロジェクトの意義 / Science goals of the project	201
2. プロジェクトの科学目的 / Scientific objectives of the projec	201
3. プロジェクトの科学的意義と目標の根拠 / Rationale for the scientific goals and objectives	201
4. プロジェクトが実施する研究 / Scientific investigations of the project	204
5. スケジュール / Schedule	204
6. プロジェクトで使用する装置 / Instrumentation of the project	205
7. プロジェクトで獲得するデータ / Data to be obtained	206
8. 主要技術要素 / Key technologies	206
9. 想定されるコスト / Cost estimate	207
10. 技術ヘリテージと技術開発状況と開発計画 / Technical heritages, technology development status and plan	207
11. プロジェクトのリスク管理 / Risk Management Plan of the Project	208
12. 天文学コミュニティの持続可能性に関わる戦略 / Strategy for the Sustainability of Astronomical community	208

Ultra-Doppler

真の第二の地球を探索するウルトラ・ドップラー分光器	210
---------------------------	-----

0. Summary/ 概要	211
1. プロジェクトの意義 / Science goals of the project	213
2. プロジェクトの科学目的 / Scientific objectives of the projec	213
3. プロジェクトの科学的意義と目標の根拠 / Rationale for the scientific goals and objectives	214
4. プロジェクトが実施する研究 / Scientific investigations of the project	216
5. スケジュール / Schedule	217
6. プロジェクトで使用する装置 / Instrumentation of the project	217
7. プロジェクトで獲得するデータ / Data to be obtained	218
8. 主要技術要素 / Key technologies	218
9. 想定されるコスト / Cost estimate	219
10. 技術ヘリテージと技術開発状況と開発計画 / Technical heritages, technology development status and plan	219
11. プロジェクトのリスク管理 / Risk Management Plan of the Project	219
12. 天文学コミュニティの持続可能性に関わる戦略 / Strategy for the Sustainability of Astronomical community	220

The University of Tokyo Atacama Observatory (TAO) Project 東京大学アタカマ天文台 (TAO) 計画	221
---	-----

0. Summary/ 概要	222
1. プロジェクトの意義 / Science goals of the project	224
2. プロジェクトの科学目的 / Scientific objectives of the projec	224
3. プロジェクトの科学的意義と目標の根拠 / Rationale for the scientific goals and objectives	224
4. プロジェクトが実施する研究 / Scientific investigations of the project	225
5. スケジュール / Schedule	225
6. プロジェクトで使用する装置 / Instrumentation of the project	226
7. プロジェクトで獲得するデータ / Data to be obtained	227
8. 主要技術要素 / Key technologies	227
9. 想定されるコスト / Cost estimate	228
10. 技術ヘリテージと技術開発状況と開発計画 / Technical heritages, technology development status and plan	228
11. プロジェクトのリスク管理 / Risk Management Plan of the Project	229
12. 天文学コミュニティの持続可能性に関わる戦略 / Strategy for the Sustainability of Astronomical community	229

PART IV: サイエンス計画 (7 計画)

First Galaxy and Star Formation Investigated through Participation in International Large Projects and Japan's Unique Missions 国際大型計画への参画と日本主導の独自計画で探る初代銀河・初代星形成	233
---	-----

0. Summary/ 概要	234
1. プロジェクトの意義 / Science goals of the project	236
2. プロジェクトの科学目的 / Scientific objectives of the projec	236
3. プロジェクトの科学的意義と目標の根拠 / Rationale for the scientific goals and objectives	236
4. プロジェクトが実施する研究 / Scientific investigations of the project	238
5. スケジュール / Schedule	239

Beyond the optical observations and behind the dust: Probing optically-bright/hidden supermassive black holes in the multi-wavelength Universe 多波長広域観測で明らかにする超巨大ブラックホール進化史	241
---	-----

0. Summary/ 概要	242
1. プロジェクトの意義 / Science goals of the project	244
2. プロジェクトの科学目的 / Scientific objectives of the projec	244
3. プロジェクトの科学的意義と目標の根拠 / Rationale for the scientific goals and objectives	244
4. プロジェクトが実施する研究 / Scientific investigations of the project	246
5. スケジュール / Schedule	248

Unveiling circumgalactic medium with integral field spectrographs on TMT TMT 面分光装置で迫る銀河周辺物質	250
0. Summary/ 概要	251
1. プロジェクトの意義 / Science goals of the project	252
2. プロジェクトの科学目的 / Scientific objectives of the projec	252
3. プロジェクトの科学的意義と目標の根拠 / Rationale for the scientific goals and objectives	253
4. プロジェクトが実施する研究 / Scientific investigations of the project	257
5. スケジュール / Schedule	258
High-redshift cosmology with Subaru HSC, PFS, and CMB experiments すばる望遠鏡 HSC, PFS と CMB 実験による高赤方偏移宇宙論	260
0. Summary/ 概要	261
1. プロジェクトの意義 / Science goals of the project	263
2. プロジェクトの科学目的 / Scientific objectives of the projec	263
3. プロジェクトの科学的意義と目標の根拠 / Rationale for the scientific goals and objectives	263
4. プロジェクトが実施する研究 / Scientific investigations of the project	265
5. スケジュール / Schedule	268
Observational Study of First Cosmic Structures in Early Universe 天体形成史の始まりの観測的研究	269
0. Summary/ 概要	270
1. プロジェクトの意義 / Science goals of the project	271
2. プロジェクトの科学目的 / Scientific objectives of the projec	272
3. プロジェクトの科学的意義と目標の根拠 / Rationale for the scientific goals and objectives	272
4. プロジェクトが実施する研究 / Scientific investigations of the project	273
5. スケジュール / Schedule	276
Formation and evolution of massive galaxies 巨大銀河の形成と進化	277
0. Summary/ 概要	278
1. プロジェクトの意義 / Science goals of the project	279
2. プロジェクトの科学目的 / Scientific objectives of the projec	280
3. プロジェクトの科学的意義と目標の根拠 / Rationale for the scientific goals and objectives	280
4. プロジェクトが実施する研究 / Scientific investigations of the project	283
5. スケジュール / Schedule	283

Visualizing Baryons in Proto-clusters and Exploring Environmental Effects
原始銀河団におけるバリオンの可視化と環境効果の探求 ————— 284

0. Summary/ 概要	285
1. プロジェクトの意義 / Science goals of the project	286
2. プロジェクトの科学目的 / Scientific objectives of the projec	286
3. プロジェクトの科学的意義と目標の根拠 / Rationale for the scientific goals and objectives	287
4. プロジェクトが実施する研究 / Scientific investigations of the project	288
5. スケジュール / Schedule	288

The background of the entire page is a vast field of galaxies, likely from a deep space survey. The galaxies are scattered across the black void, appearing in various colors including white, yellow, orange, and blue. Many of the galaxies are oriented edge-on, showing their characteristic disk-like structure. Some are bright and prominent, while others are faint and distant. The overall effect is a rich, multi-colored stellar population.

PART I: Executive Summary

Executive Summary

背景

21世紀に入り、光赤外線天文学は観測技術と理論の両面で飛躍的な進展を遂げている。地上では、すばる望遠鏡をはじめとする8～10メートル級望遠鏡が宇宙初期の銀河形成過程の解明や太陽系外惑星の直接撮像など多くの画期的成果を挙げ、宇宙空間ではハッブル、スピッツァー、あかり、ハーシェルなどの宇宙望遠鏡、そして2021年に打ち上げられたジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡が超高感度観測を実現し、宇宙黎明期の銀河や惑星形成の詳細を明らかにしてきた。さらに欧米や中国では、次世代の地上超大型望遠鏡や宇宙望遠鏡計画が進行しており、国際的な観測体制の強化が加速している。このような世界的潮流の中で、日本の光赤外線天文学コミュニティである光学赤外線天文連絡会(GOPIRA)は、独自の研究開発と国際共同研究を通じて着実な成果を積み重ねてきた。国立天文台が主導するすばる望遠鏡は、世界有数の光赤外線観測拠点として国際連携の中核を担ってきたが、国際的な大型計画の進展を踏まえ、すばる望遠鏡もこれらの大型計画と連携した新しい戦略が求められる。特に、大型計画を支える資金や人材基盤の強化が課題であり、今後は持続的な科学的貢献と国際的地位の強化に向けた新たな戦略的取り組みが求められている。一方で、地上・宇宙観測を結ぶ多層的な観測計画が形成されつつあり、日本独自の総合的研究体制を構築すべきタイミングを迎えている。

こうした背景のもと、GOPIRAは2021年に将来計画検討専門委員会を設置し、2040年代までの今後の科学的指針と施設・装置開発計画の方向性を明確化することを目的として、「光赤外線天文学ロードマップ2025」を策定するに至った。本ロードマップは、こうした動向を整理し、限られた資源を最大限に活用するための戦略的指針を示すものである。

ロードマップ策定の趣旨と方針

本ロードマップは、公募に対してGOPIRA会員から提案されたすべての研究計画を対象とし、それらを網羅的に整理・掲載したものである。全体として「我々はこのような将来を志向する」という明確な意志を学術界や社会に示すことを目的としている。GOPIRAは、提案された計画群の推進に対して最大限の支援を行い、本ロードマップを現時点での最良の推定に基づく将来ビジョンとして提示するものである。本ロードマップは3年ごとに改訂機会を設け、科学技術や国内外の状況の変化に応じて柔軟に対応していく。

提案募集と評価体制の確立

将来計画検討専門委員会は、2023年度より「光赤外線天文学ロードマップ2025」の策定に向けて本格的に活動を開始した。専門委員会では評価項目として科学的意義、技術

的成熟度、実現可能性、国際的独自性、人的育成効果などが設定された。2023年12月、予算規模が10億円以上の大型計画、10億円以下の中小規模計画、施設・装置開発を伴わないサイエンス提案の3種を対象に提案募集が行われた。評価の公平性を確保するため、将来計画検討専門委員に加えて光赤外線天文学分野およびX線天文学、電波天文学、重力波天文学、理論天文学、惑星科学などの関連分野から招へいた外部委員、国立天文台と宇宙科学研究所のオブザーバー各1名を含む計24名によってロードマップ作成委員会が設置された。

提案内容と評価過程

計20件の提案書が提出された。その内訳は、予算規模が10億円以上の大型計画8件、10億円以下の中小規模計画5件、サイエンス提案7件であった。大型計画は国内の天文学の将来を大きく左右するものであり、詳細な評価およびヒアリングの対象となった。大型8件は以下のとおりである。銀河進化・惑星系形成観測ミッション GREX-PLUS、NASAによる系外惑星の詳細な観測をめざす Habitable Worlds Observatory (HWO)への参加、初期宇宙探査用ガンマ線バースト観測衛星計画 HiZ-GUNDAM、赤外線位置天文・精密測光観測衛星 JASMINE、紫外線宇宙望遠鏡計画 LAPYUTA、NASAによる遠赤外線冷却望遠鏡 PRIMA への参加、30m 光学赤外線地上望遠鏡計画 TMT、すばる望遠鏡の次世代赤外線観測装置 ULTIMATE-Subaru である（以上アルファベット順）。評価は書面審査、ヒアリング審査、総合討議の3段階で実施した。2024年9月に開催されたロードマップ作成委員会において、TMT、GREX-PLUS、HWOをGOPIRAの最優先計画の候補とすることを決定した。同月に開催された光赤天連シンポジウムでは、評価の進捗と初期の評価結果を報告し、広くコミュニティからの意見聴取と合意形成の場を設けた。また、GREX-PLUSの代表者がロードマップ作成委員会のメンバーとなっていることを踏まえ、議論の公平性を期すため、以降のロードマップ作成委員会の議論ではTMTとHWOの代表者をオブザーバーとして追加した。さらに、2024年12月にタウンミーティングを開催し、最優先計画の候補となった3つの大型計画の内容についてGOPIRAコミュニティに広く周知を行った。

最優先計画の選定とロードマップの方向性

2025年のロードマップ作成委員会において国際情勢、リスク、実現可能性などを総合的に議論した結果、現時点および将来の最優先計画として、時系列順にTMT、GREX-PLUS、HWOを位置づけ、実現に向けて最大限の支援を行う方針を決定した。TMTは国際協力により口径30mの光学赤外線望遠鏡を建設する計画であり、赤外線波長で0.01秒角の解像度、約30等級の点源感度という、従来望遠鏡を凌駕する性能を実現する。2030年初頭には欧州のELTの科学運用がチリで本格化するが、TMTは北天からの観測や独自の観測機能で新しい科学を切り開く。GREX-PLUSはJAXA宇宙科学研究所の戦略的中型計画候補であり、2030年代半ばの打上げを目指す。HWOはNASA主導の計画であり、HWOへの参加を長期目標とし、2040年代半ばの実現を見据えてGREX-PLUS後の最優先計画と位置付ける。TMTはすばる望遠鏡とも連携することで、系外惑星や銀河進化、宇宙論などの多様な科学分野や観測装置の技術開発において、

世界をリードする革新的な研究を可能にすると期待される。並行して、現在開発中で、2030年代初頭のすばる3時代に本格運用が期待される ULTIMATE-Subaru を地上の基幹計画として着実に実現する。また、JAXA 宇宙科学研究所の公募型小型計画に選定された JASMINE を 2030 年代前半のスペース計画の基幹計画と位置付け、スペース計画を実現することができる人材の育成および技術基盤形成の中心に据え、着実に実現する。将来のスペース計画は互いに技術と人材の連続性を持ち、順次それらのリソースが次の時代の最優先計画へと引き継がれる。その過程では、NASA 主導で JAXA 宇宙科学研究所の戦略的海外共同計画を目指す PRIMA、JAXA 宇宙科学研究所の公募型小型計画の候補である HiZ-GUNDAM や LOPYUTA といった他分野にもまたがるスペース計画の推進を通じ、電波天文学コミュニティ (PRIMA)・X 線天文学コミュニティ (HiZ-GUNDAM)・太陽系科学コミュニティ (LOPYUTA) などの他分野との連携をより深化させ、そこで培われた技術や人材を GOPIRA の計画へと繋げていくことも重要である。以上の大型計画については、現時点の最良の推定に基づく実現までの時系列および計画間関係を 16-18 ページの年表に示す。一方、中小規模計画とサイエンス提案は将来の GOPIRA の科学基盤を形成する重要な構想として、GOPIRA による全面的な支援の対象と位置付ける。

結び

ロードマップ作成委員会は、光赤外線天文学ロードマップ 2025 の骨子として、本委員会の議論によって得られた以上のロードマップの方向性と年表をコミュニティ内外に提示する。また、各計画の代表者から提出された計 20 件の計画の提案書を以下に掲載する。なお、本ロードマップは現時点での最良の推定に基づく将来のビジョンであり、今後の科学技術や国内外の状況の変化に応じて概ね 3 年ごとに見直しと改訂を行う予定である。

最優先計画のタイムライン

TMT



開発期間

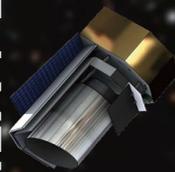
初期科学運用

共同利用

初期科学運用期間まで「最優先」(2036年頃まで)

すばると共に一体運用

GREX-PLUS



ダウンセクション

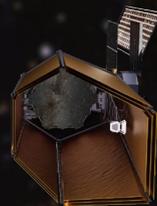
打ち上げ

開発期間 ~10年

運用期間 ~5年

2030年代の早い段階から「最優先」

HWO



2029年国際パートナー決定

打ち上げ 2045頃

技術成熟期間

開発期間

将来の「最優先」であることを明記

GREX-PLUSの後に「最優先」

2025

2028

2031

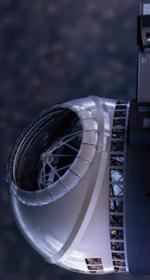
2034

2037

2040

地上計画のタイムライン

TMT



開発期間

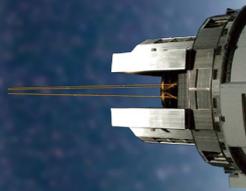
初期科学運用

共同利用

初期科学運用期間まで「最優先」(2036年頃まで)

すばると共に一体運用

ULTIMATE-Subaru



開発期間

すばる 2

すばる 3

すばる 3 時代の主力装置として科学運用

すばる 3 の検討を進め
2028 年のロードマップ改訂時には
すばる 3 を取り入れる

2025

2028

2031

2034

2037

2040

スペース計画のタイムライン

スペース計画を実現することができる人材



Executive Summary

Background

Since the beginning of the 21st century, optical and infrared astronomy has undergone dramatic advances in both observational techniques and theory. On the ground, 8–10 m class telescopes, including the Subaru Telescope, have produced numerous groundbreaking results, such as studies of galaxy formation in the early universe and the direct imaging of exoplanets. In space, space telescopes such as Hubble, Spitzer, AKARI, and Herschel, followed by the James Webb Space Telescope launched in 2021, have enabled ultra-high-sensitivity observations that have revealed detailed processes of early galaxy evolution and planet formation. Furthermore, next-generation extremely large ground-based telescopes and space observatory projects are progressing in Europe, North America, and China, accelerating the strengthening of international observational frameworks. Within this global context, the Japanese optical and infrared astronomy community, organized through the Group of Optical and Infrared Astronomers (GOPIRA), has steadily accumulated achievements through independent research and development as well as international collaborations. The Subaru Telescope, led by the National Astronomical Observatory of Japan, has served as one of the world's premier optical–infrared observing facilities and a core hub of international collaboration. However, in light of the progress of large international projects, Subaru is now required to adopt new strategies in coordination with these initiatives. In particular, strengthening the financial and human-resource bases that support large projects has become a critical issue, and new strategic efforts are required to ensure sustained scientific contributions and to enhance Japan's international standing. At the same time, multi-layered observational programs linking ground-based and space-based observations are being formed, marking a timely opportunity to establish a comprehensive research framework unique to Japan.

Against this background, GOPIRA established a Future Planning Subcommittee in 2021 to clarify scientific priorities and directions for future facility/instrumentation development through the 2040s, with the objective of formulating the “Optical and Infrared Astronomy Roadmap 2025.” This roadmap organizes current trends and provides strategic guidance for maximizing the effective use of limited resources.

Purpose and Policy of the Roadmap

This roadmap encompasses all research plans proposed by GOPIRA members in response to an open call and presents them in a comprehensive and organized manner. Its overarching objective is to clearly articulate to the academic community and to society the future that we collectively aspire to pursue. GOPIRA commits to providing maximum support for the advancement of the proposed plans and presents this roadmap as a future vision based on the best estimates available at present. The roadmap will be revised approximately every three years to allow flexible responses to change in science, technology, and domestic and international circumstances.

Call for Proposals and Establishment of the Evaluation Framework

Beginning in fiscal year 2023, the Future Planning Subcommittee initiated full-scale activities toward the formulation of the Optical and Infrared Astronomy Roadmap 2025. Evaluation criteria were defined to include scientific significance, technical maturity, feasibility, international uniqueness, and human-resource development impact. In December 2023, proposals were solicited in three categories: large-scale projects with budgets exceeding 1 billion yen, small- and medium-scale projects with budgets below 1 billion yen, and science proposals without accompanying facility/instrument development. To ensure fairness in evaluation, the GOPIRA Roadmap 2025 Creation Committee consisting of 24 members was established, including the Future Planning Subcommittee members, external members invited from optical/infrared astronomy and related fields such as X-ray astronomy, radio astronomy, gravitational-wave astronomy, theoretical astronomy, and planetary science, as well as one observer each from the National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ) and the Institute of Space and Astronautical Science (ISAS).

Proposal Contents and Evaluation Process

A total of 20 proposals were submitted: eight large-scale projects exceeding 1 billion yen, five small- and medium-scale projects, and seven science proposals. Given their potential to significantly shape the future of astronomy in Japan, the large-scale projects were subjected to detailed evaluation and hearings. The eight large-scale proposals were as follows (in alphabetical order): the galaxy evolution and planetary system formation mission GREX-PLUS; participation in NASA's Habitable Worlds Observatory (HWO) aimed at detailed characterization of exoplanets; the high-redshift gamma-ray burst observation satellite HiZ-GUNDAM; the infrared astrometry and precision photometry satellite JASMINE; the ultraviolet space telescope LOPYUTA; participation in NASA's cooled far-

infrared telescope PRIMA; the ground-based optical–infrared telescope Thirty Meter Telescope (TMT); and ULTIMATE-Subaru, a next-generation infrared instrument for the Subaru Telescope. Evaluation was conducted in three stages: document review, hearing review, and comprehensive discussion. At the GOPIRA Roadmap 2025 Creation Committee meeting held in September 2024, TMT, GREX-PLUS, and HWO were selected as candidates for GOPIRA’s highest-priority projects. Progress and preliminary evaluation results were reported at the GOPIRA Symposium held in the same month, providing a forum for broad community feedback and consensus building. Given that the representative of GREX-PLUS is a member of the GOPIRA Roadmap 2025 Creation Committee, representatives from TMT and HWO were added as observers to the subsequent committee discussions to ensure the fairness of the deliberation. In December 2024, a town-hall meeting was also held to widely inform the GOPIRA community about details of the three candidate highest-priority large-scale projects.

Selection of Highest-Priority Projects and Direction of the Roadmap

During the 2025 meetings of the GOPIRA Roadmap 2025 Creation Committee, comprehensive discussions were held considering international circumstances, risks, and feasibility. Based on these discussions, TMT, GREX-PLUS, and HWO were positioned chronologically as the highest-priority projects for the present and future, with maximum support provided toward their realization. TMT is an international collaboration to construct a 30-m class optical–infrared telescope, achieving unprecedented performance, including 0.01-arcsecond resolution at infrared wavelengths and point-source sensitivity of approximately 30th magnitude. While Europe’s ELT is expected to enter full scientific operation in the early 2030s in Chile, TMT will open new scientific frontiers through its access to the northern sky and unique observational capabilities. GREX-PLUS is a candidate for a Strategic Large-class mission of ISAS/JAXA, aiming for launch in the mid-2030s. HWO is a NASA-led mission, and participation in HWO is positioned as a long-term goal, to be realized in the mid-2040s as the highest-priority project following GREX-PLUS. By coordinating with the Subaru Telescope, TMT is expected to enable world-leading, innovative research across diverse fields such as exoplanets, galaxy evolution, and cosmology, as well as in the development of advanced observational instrumentation. In parallel, ULTIMATE-Subaru, currently under development and expected to enter full operation in the early 2030s during Subaru Telescope 3.0 era, will be steadily realized as a core ground-based project. In space astronomy, JASMINE—selected as a Competitively-chosen Medium-class mission by ISAS/JAXA—is positioned as a core project for the early 2030s, serving as a central platform for human-resource development and technological foundation

building. Future space projects share continuity in technology and personnel, with resources successively handed over to the next generation of highest-priority projects. In this process, it is also important to deepen collaboration with projects spanning other fields—such as PRIMA (collaboration with radio astronomy community), aimed at strategic international collaboration led by NASA; and HiZ-GUNDAM (collaboration with X-ray astronomy community) and LAPYUTA (collaboration with Solar system science community), candidates for ISAS/JAXA’s Competitively-chosen Medium-class mission program—thereby promoting space missions through interdisciplinary cooperation and channeling the cultivated technologies and human resources into GOPIRA’s programs. For the large-scale projects described above, the timeline toward realization and inter-project relationships based on the best current estimates are summarized in a chronological chart on pages 23-25. Small- and medium-scale projects and science proposals, meanwhile, are positioned as essential concepts that form the future scientific foundation of GOPIRA and will receive comprehensive support.

Conclusion

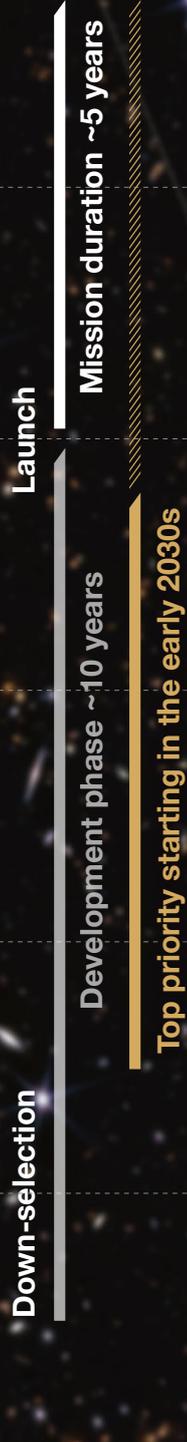
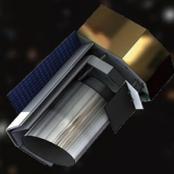
As the core of the Optical and Infrared Astronomy Roadmap 2025, the GOPIRA Roadmap 2025 Creation Committee presents to both the community and the broader public the direction and timeline derived from its discussions. The roadmap also includes all 20 proposal documents submitted by the project representatives. This roadmap represents a future vision based on the best estimates available at present and will be reviewed and revised approximately every three years in response to developments in science and technology and changes in domestic and international conditions.

Timeline for Highest-Priority Projects

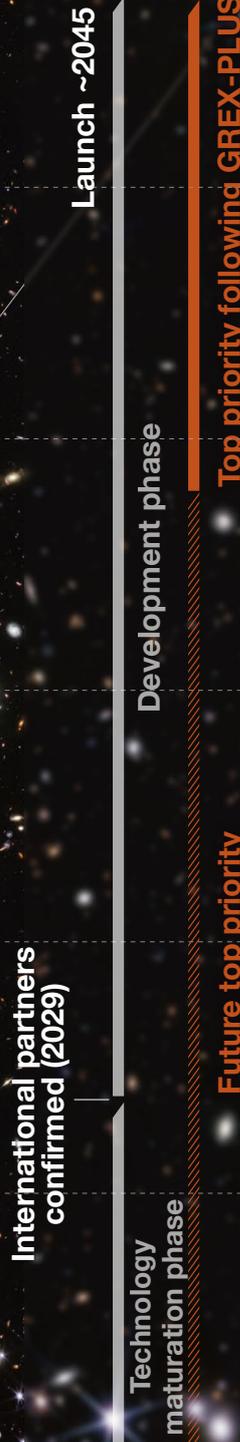
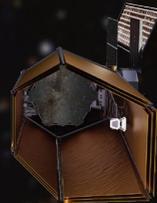
TMT



GREX-PLUS



HWO



2025 2028 2031 2034 2037 2040

Timeline for Ground-Based Projects

TMT



Development phase

Initial science operations

Open use

Top priority until the start of initial science operations (until ~2036)

Operate jointly with the Subaru Telescope

ULTIMATE-Subaru



Development phase

Subaru Telescope 2.0

Subaru Telescope 3.0

Flagship facility instrument during the Subaru 3 era

Advance the review of Subaru 3 and incorporate it into the 2028 Roadmap revision

2025

2028

2031

2034

2037

2040

Timeline for Space-Based Projects

Talent capable of executing space missions



A deep space field of galaxies, featuring a prominent blue starburst at the top center. The field is filled with numerous galaxies of various colors and shapes, including white, yellow, and blue. The background is dark, and the galaxies are scattered across the frame. The blue starburst is the most prominent feature, with several bright blue lines radiating from it. The text "PART II: 大型計画 (8 計画)" is overlaid on the left side of the image.

PART II: 大型計画 (8 計画)

The Thirty Meter Telescope TMT

30 m 光学赤外線望遠鏡計画 TMT

0.

概要

Summary

The Thirty Meter Telescope TMT

30m 光学赤外線望遠鏡計画 TMT

Project Category

1. Big projects having large impacts on GOPIRA, typically cost estimate over ~1 Billion JPY (光赤天連に大きな影響を与える、装置・施設の開発を含む大型計画の提案、目安として 10 億円以上の規模)

Abstract of science goals, objectives, and methods

In the past three decades, astronomy has seen remarkable progress, marked by the discovery of thousands of exoplanets and their diversity, the detection of galaxies in the early universe post-Big Bang, the identification of supermassive black holes, the detection of gravitational waves and the astrophysical phenomena causing them, and the discovery of the universe's accelerated expansion. These achievements have significantly advanced our understanding of the universe, highlighting future research directions and transforming related fields of study. Particularly, the detection and overall understanding of exoplanetary systems are crucial for comprehending the uniqueness or universality of our solar system, understanding conditions for life's emergence, and fostering a new field focused on the formation and evolution of planets and the possibility of life in extraterrestrial environments. To further these studies, the Thirty Meter Telescope (TMT), a 30m optical-infrared telescope, is being constructed through international collaboration. It will surpass existing telescopes with its ability to detect celestial objects as faint as 30th magnitude and resolve them at 0.01 arcsecond resolution in the near-infrared. Japan aims to combine the Subaru Telescope's wide-field surveys with TMT's high sensitivity and resolution to pioneer unique research. Recently, Earth-like planets within habitable zones around stars other than the Sun have been indirectly detected. TMT will attempt to directly image such planets and obtain spectra to analyze starlight passing through their atmospheres, seeking molecules related to life, such as oxygen, ozone, water, and methane.

プロジェクトの意義と科学目的・方法の要旨

ここ 30 年の天文学の発展は目覚ましく、数千もの太陽系外惑星の発見とその多様性の解明、ビッグバン後の初期宇宙における銀河の発見、超巨大ブラックホールの検出、重力波の検出とそれを引き起こす天体現象の同定、宇宙の加速膨張の発見等により、人類の宇宙に対する理解は飛躍的に進んだ。これらの進展は今後数十年の研究の方向性を浮き彫り

にし、天文学を超えて関連学問領域に変革をもたらしている。特に、太陽系外の惑星系の検出とその全体像の把握は、太陽系の特殊性や普遍性を知り生命誕生の条件を理解するには必須であり、惑星の形成・進化および地球以外の環境での生命の発生・活動を探るという新たな学問領域を生み出している。近年、太陽以外の星の周りで生命が誕生しうる温度領域に存在する地球型惑星が間接的な方法で確認されつつある。そのような惑星を直接撮像し、惑星大気を透過する星の光を分光することにより、光合成で作られる酸素分子・オゾンをはじめ、水、メタンなど生命に関連する分子の検出に挑むのが次世代望遠鏡の課題である。これらの研究を推進するために、国際協力で口径 30m の光学赤外線望遠鏡 TMT を建設し、赤外線波長で 0.01 秒角の解像度、約 30 等級の点光源の天体を検出できる感度という、従来の望遠鏡を凌駕する性能を実現する。日本はすばる望遠鏡の超広視野天体探査と TMT の高感度・高解像度観測を組み合わせることで独自性の高い研究を展開する。

Principle Investigator

Name: Tomonori Usuda

Affiliation: National Astronomical Observatory of Japan

E-mail address: tomo.usuda@nao.ac.jp

プロジェクト代表者

氏名: 臼田知史

所属: 自然科学研究機構 国立天文台

E-mail アドレス: tomo.usuda@nao.ac.jp

Co-investigator and his/her role / プロジェクト共同提案者とその役割 (別紙)

Estimate of total cost

42 billion JPY for construction, 3 billion JPY per year for operation (FY2036-)

総コストの見積り

日本負担分

建設期 (2024 年度以降) 420 億円、運用期 (2036 年度以降) 30 億円 / 年

Estimate of total FTE (Full-Time Equivalent) necessary to accomplish the project

NAOJ staff: 340 FTE x year for construction, 67 FTE (each year) for operation

Contributions from community: 90 persons for construction, 120 for operation

プロジェクト実現に必要な総 FTE (人年) の見積り

国立天文台の人員として、建設期の国内製造段階で毎年 34FTE、現地建設段階で 40FTE 以上が必要と見積もっている。また、運用期には毎年 67FTE を要する。た

だし、すばる望遠鏡との一体的な運用を行う計画であり、現在のハワイ観測所の規模を大きく上回ることなくTMTとすばる望遠鏡の共同利用運用を行う。

コミュニティからは、科学検討・運用計画策定への参画 科学諮問委員等の各種委員、観測装置開発での共同研究、および運用期におけるプログラム審査等共同利用への貢献のため、建設期に約90人、運用期に120人の貢献を期待する。平均エフォートを10%とすると、それぞれ9FTE、12FTEに相当する。

Duration of the project

Construction phase: FY2024-2036, Operation phase: FY2036- (50 years)

プロジェクト実施期間

建設期：2024～2036年度、運用期：2036年度～（機能更新、新規観測装置追加等を行いつつ50年の運用を想定）

(別紙)

Co-investigator and his/her role

Aoki Wako: Deputy Project Manager. Oversight of public relations and outreach.

Terada Hiroshi: Head of Engineering

Iono Daisuke: Assistant to the Project Manager, Project Scientist.

Shindo Miwa: Assistant to the Project Manager(International Relations),

Kurasaki Takaaki: Project Controller, General Affairs.

Yano Tatsuo: Business Manager.

Kakazu Yuko: Public relations and outreach activities in Hawaii.

Noumaru Junichi: Head of Optical Division. Verification of mirror material. Development of segmented mirror polishing and measurement methods.

Oya Shin: Sub Manager of Optical Division

Sugimoto Masahiro: Telescope Division. System Engineer. Oversight of telescope structure development.

Tazawa Seiichi: Telescope Division. System Engineer.

Tada Takeshi: Telescope Division. Mechanical Engineer.

Okamoto Koichi: Telescope Division. Safety Officer.

Suzuki Ryuji: Head of IRIS imaging system, Development of IRIS imaging system.

Hattori Masayuki: Development of IRIS imaging system.

Omata Koji: Development of IRIS imaging system. Development of IRIS.

Ozaki Shinobu: Development of WFOS.

Nishikawa Jun: Development of observation equipment for exoplanets.

Yasui Chikako: Science consideration with TIO, outreach activities.

Kosugi George: Science Operations Division, database and computing.

Ishii Miki: Public relations, website.

プロジェクト共同提案者とその役割

青木 和光 副プロジェクト長。広報・普及活動の統括

寺田 宏 技術開発の統括

伊王野 大介 プロジェクト長補佐、プロジェクトサイエンティスト

進藤 美和 プロジェクト長補佐（国際担当）

倉崎 高明 プロジェクトコントローラー、総務担当

矢野 達男 ビジネスマネージャー

嘉数 悠子 ハワイでの広報・普及活動、TMT 国際天文台広報チームの統括

能丸 淳一 光学部門責任者。主鏡・分割鏡鏡材の性能確認、分割鏡研磨・測定法開発

大屋 真 光学部門サブマネージャー

杉本 正宏 望遠鏡部門 システムエンジニア。望遠鏡構造開発の統括

田澤 誠一 望遠鏡部門 システムエンジニア、

多田 武 望遠鏡部門 メカニカルエンジニア

岡本 公一 望遠鏡部門 安全担当

鈴木 竜二 観測装置部門 IRIS の撮像系開発責任者

服部 雅之 第一期観測装置 IRIS 撮像系の開発

小俣 孝司 観測装置部門 第一期観測装置 IRIS 撮像系の開発

尾崎 忍夫 第一期観測装置 WFOS の開発

西川 淳 太陽系外惑星用の観測装置の開発

安井 千香子 国際協力のなかでの TMT によるサイエンス検討、普及活動

小杉 城治 科学運用部門、データベース・コンピューティング担当

石井 未来 広報普及、ウェブサイト更新

1.

プロジェクトの意義

Science goals of the project

基幹観測装置として口径 30m 光学赤外線望遠鏡 TMT を地上観測の最適地であるハワイ島マウナケアに建設して大学共同利用に供し、すばる望遠鏡の広域探査と連携して地球型系外惑星や宇宙の初代星、宇宙膨張史等の理解を一新する研究を推進する。

2.

プロジェクトの科学目的

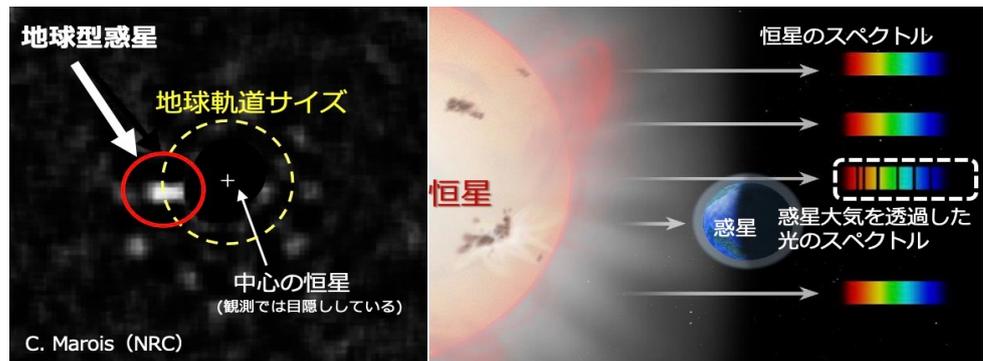
Science goals of the project

科学目標 1. 第二の地球探査と生命の確認

太陽系のような惑星系は宇宙において普遍的なものか、そこに生命は存在するか。これらは、人類にとって根源的な問いであり、今後の天文学・宇宙科学の主要課題である。すばる望遠鏡やジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡（JWST）は、太陽型星を回る木星型惑星の直接撮像に成功する等の成果をあげてきているが、次のブレイクスルーは地球以外に生命が存在する証拠を捉えることでもたらされる。そのためには、生命の存在可能性がある領域（星の周囲で、水が液体として存在できる温度となる領域『ハビタブルゾーン』）に地球型惑星を発見し、詳細に調べる必要がある。ハビタブルゾーンは中心星に近いため、そこに存在する惑星はすばる望遠鏡や JWST の解像度では直接捉えられない。TMT は

その高い解像度を活かし、ハビタブルゾーンにある地球型惑星の直接撮像を確実に実施(図1(左))するのみならず、惑星の反射光の分光観測と、恒星前面を通過する惑星の大気を透過してくる光の分光観測(図1(右))により、生命の存在を示す分子、特に光合成の産物である酸素分子等の存在量を測定する。これまでに木星型の巨大惑星に対して惑星大気の観測例はあるが、生命の存在が期待できる地球型惑星の大気分光観測はTMTで初めて可能になる。日本が強みとする太陽系探査との融合により、宇宙における生命の探査を観測にもとづく研究分野に発展させる。

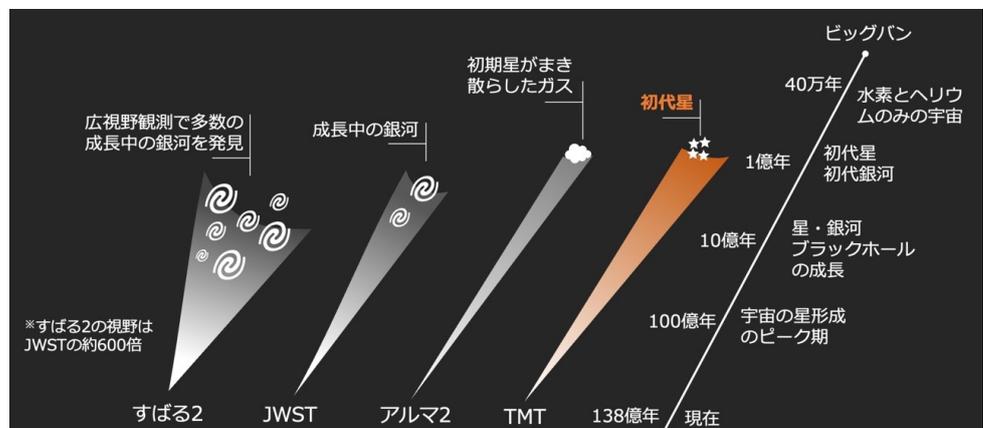
図1: (左) 約12光年の距離にある太陽に似た恒星をTMTで観測した場合のシミュレーション。地球軌道の位置に地球サイズの惑星が存在すれば確実に検出できる。(右) 惑星が恒星の前面通過を起こす惑星系について、惑星大気を透過してくる光の分析により大気組成を調べ、生命存在の兆候を探る。



科学目標 2. 宇宙で最初に誕生した星の検出

宇宙で最初の星はいつごろ生まれ、どんな性質を持ち、周囲にどんな影響を与えたのか。星や銀河に満ちた現在の豊かな宇宙の起源を知るために、すばる望遠鏡やアルマ望遠鏡が切り拓いてきた、宇宙誕生から間もない時期の銀河の観測を進め、宇宙で最初に誕生した星々(初代星)を観測し初期宇宙の天体形成を解明する必要がある。様々な元素から成り、銀河から星間ガス、惑星までが存在する多様性に富んだ現在の宇宙に至る物質進化・構造形成の起点となった初代星は、水素、ヘリウムのみで始原的なガスから形成される。TMTによる高感度分光観測は、特徴的な放射(ヘリウム輝線)を検出して、宇宙最初の星の光を捉えることができる(図2)。これにより、初代星の誕生時期や質量を明らかにし、さらにその紫外線放射や超新星爆発で供給される金属の影響、星間ガスの密度・温度変化を調べて、最初期の天体形成が、以後の銀河形成にどう影響を与えたかや、宇宙最後の大規模な状態遷移である宇宙再電離にどう寄与したのかを解明する。

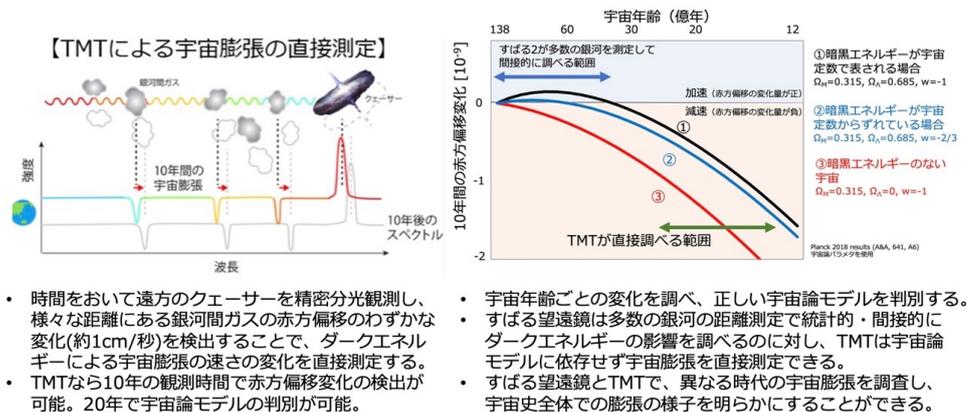
図2: 初代星は、水素とヘリウムのみから成っていた宇宙に初めて重元素をもたらし、紫外線放射や超新星爆発により以後の星・銀河形成、さらには超巨大ブラックホール形成に大きな影響を与えた。初代星の誕生時期や質量、明るさを測定することにより、銀河形成への影響や宇宙最電離への寄与など、宇宙最初期の重要課題を解明する。



科学目標 3. ダークエネルギーの性質の解明

ダークエネルギーは現在の宇宙膨張を支配しており、20世紀末に発見された宇宙の加速膨張を引き起こしていると思われるが、その正体は謎に包まれている。すばる2をはじめ多数のプロジェクトが、その性質を明らかにすべく、多数の銀河の距離を測定する大規模サーベイ観測によって宇宙論モデルに制限を与える取り組みを進めている。TMTは、こうした統計的研究とは一線を画し、宇宙膨張を直接測定することによってダークエネルギーの正体に迫る。宇宙膨張により、遠方の天体が我々から遠ざかる速さは時間変化しているはずだが、従来の望遠鏡では測定精度不足で膨張速度の変化を測定することは不可能であった。TMTで遠方天体の視線速度を10年程度の期間において超精密測定することで、初めて宇宙膨張を直接測定することが可能になる。また、様々な距離の多数の天体（遠いほど昔の情報が届く）の速度を測定し、宇宙膨張の時間変化を調べる（図3）。すばる2が2020年代に展開する多数の銀河の距離測定による統計的なダークエネルギー研究に対し、TMTのこの手法は宇宙論モデルに依存しない完全に独立な方法である。すばる望遠鏡での結果とTMTでの結果を組み合わせることで、宇宙膨張の歴史を明らかにし、宇宙物理学最大の謎であるダークエネルギーの性質に有効な制限を与える。

図3: TMTによる宇宙膨張史の測定とダークエネルギーの性質の解明に向けた研究



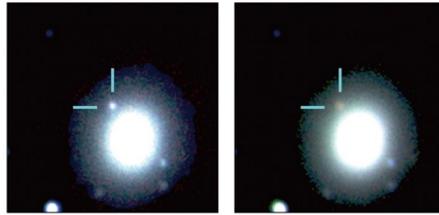
- 時間において遠方のクエーサーを精密分光観測し、様々な距離にある銀河間ガスの赤方偏移のわずかな変化(約1cm/秒)を検出することで、ダークエネルギーによる宇宙膨張の速さの変化を直接測定する。
- TMTなら10年の観測時間で赤方偏移変化の検出が可能。20年で宇宙論モデルの判別が可能。
- 宇宙年齢ごとの変化を調べ、正しい宇宙論モデルを判別する。
- すばる望遠鏡は多数の銀河の距離測定で統計的・間接的にダークエネルギーの影響を調べるのに対し、TMTは宇宙論モデルに依存せず宇宙膨張を直接測定できる。
- すばる望遠鏡とTMTで、異なる時代の宇宙膨張を調査し、宇宙史全体での膨張の様子を明らかにすることができる。

科学目標 4. 重元素の起源の解明

重力波やニュートリノの測定と様々な電磁波の観測を駆使して宇宙の爆発現象に迫る「マルチメッセンジャー天文学」は、重力波やニュートリノを爆発的に放射する極限環境の現象を解き明かすとともに、金やウランなど鉄より重い元素の起源に迫る有力な手段として近年注目されている。重力波やニュートリノの検出装置の位置決定精度は1～10平方度程度しかないため、爆発現象を引き起こしている天体を同定できない。すばる望遠鏡による可視光・赤外線の大視野探査で対応天体候補を絞り、重力波等を伴う爆発現象から放出される可視赤外線をTMTで高感度分光観測し、その爆発メカニズムや生成される元素を明らかにすることにより、未だ解明されていない鉄より重い元素の起源を突き止める（図4）。また、宇宙から飛来する高エネルギーニュートリノの起源天体や生成メカニズムも今後の天文学に課せられた大きな課題である。TMTの高い観測能力は、これらの天体現象の解明、中性子星における高密度物質の状態方程式への制限や、強重力場での重力理論の検証など、極限的な環境下での物理の解明に資するものである。

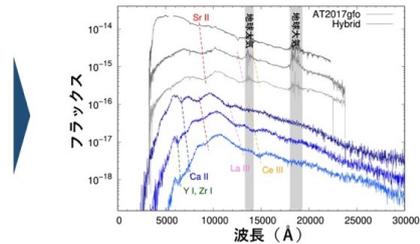
図 4: (左) 連星中性子星合体の観測画像。(右) 対応天体の可視赤外線スペクトル。

2017年の重力波天体の観測例
(比較的近距离で起こった稀な例)
2017.08.18-19 2017.08.24-25



すばる望遠鏡がとらえた、重力波源の明るさの変化。
内海 (Stanford大) 他、2017; 田中 (東北大) 他、2018;
富永 (甲南大) 他、2018

金やウランなどの鉄より重い元素の生成場所は未解明で、連星中性子星合体は候補のひとつ。この例ではSrやCeなどが同定され、鉄より重い元素の生成を示唆



ESO/VLTによる分光観測データの解析:
土本 (東北大学) 他2022

3.

プロジェクトの科学的意義と目標の根拠

Rationale for the scientific goals and objectives

1. 科学的意義の根拠：研究の背景、当該分野の研究状況、等 / Scientific background, status of the relevant scientific area, etc.

ここ 30 年の天文学の発展は目覚ましく、数千もの太陽系外惑星の発見とその多様性の解明、ビッグバン後の初期宇宙における銀河の発見、超巨大ブラックホールの検出、重力波の検出とそれを引き起こす天体現象の解明、宇宙の加速膨張の発見等により、人類の宇宙に対する理解は飛躍的に進んだ。これを牽引してきたのが、新たな技術に基づいた望遠鏡・観測装置である。我が国は、国立天文台がハワイに設置した光学赤外線望遠鏡すばるや国際協力でチリに設置した電波望遠鏡アルマ等を用いた先端的な研究により、人類の宇宙理解の増進に大きく貢献してきた。

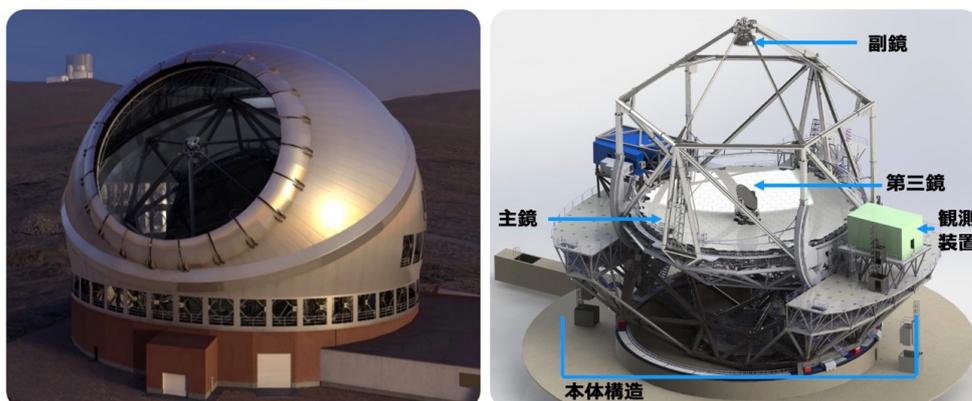
これらの進展は今後数十年の研究の方向性を浮き彫りにし、天文学を超えて関連学問領域に変革をもたらしている。宇宙における惑星系を検出し、その特徴の全体像を掴むことにより、太陽系の特殊性や普遍性に関する知見が得られつつある。これは生命誕生の条件を理解することにつながり、惑星の形成・進化および地球以外の環境での生命の発生・活動を探るといった新たな学問領域を生み出している。また、宇宙のエネルギーの 7 割を占め、加速膨張の要因とされるダークエネルギーを理解する手段としては、遠方の銀河や銀河間物質の観測が唯一可能なアプローチであり、天文観測の推進が物理学の中心的な課題に位置付けられるようになっている。

2. 提案するプロジェクトコンセプトは当該分野になにをもたらそうとするのか / Goals and objectives: new scientific steps the proposed concept aims to achieve in the science area

上記の学術的背景の下、天文学分野の研究を更に推進するため、国際協力でハワイ島マウナケア山頂域に超大型光学赤外線望遠鏡 TMT (Thirty Meter Telescope) を建設する (図 5)。TMT は、紫外線・可視光・赤外線領域において、従来の望遠鏡を凌駕する解像度と感度を実現し、挑戦的な研究課題に取り組むことで人類の宇宙理解に革新をもたらす。TMT には最新技術を採用入れた観測装置を順次搭載し、地上の基幹観測装置として約 50 年に亘って運用し、21 世紀の天文学と関連分野の研究をリードする。日本はすばる望遠鏡の超広視野天体探査と TMT の高感度・高解像度観測を組み合わせるこ

とで独自性の高い研究課題に挑む。

図 5: (左) TMT の完成予想図。(右) 望遠鏡本体構造の CAD モデル。



3. 提案するプロジェクトコンセプトの強みと過去、現在、未来の他のプロジェクト、研究・探査との関係 / The competing power of the proposed project concept and its relationship to past, current, and future other investigations and projects.

口径 30 メートル級の超大型地上望遠鏡は、2030 年代の天文学と関連分野の発展に必須との国際的な認識の下、現在、TMT を含む 3 つの計画が進行中である。可視光・赤外線は恒星や惑星からの主たる放射波長帯であるとともに、様々な原子や分子のスペクトル線が集中している。そのため非常に幅広い天体や天体現象を対象とし、撮像・分光・偏光など多彩な観測装置が必要である。大型望遠鏡はそれらを搭載するインフラであり、多様な観測には複数台の超大型望遠鏡の必要性が極めて高い。そのなかにおいて、TMT は、その大口径と補償光学技術、マウナケアという世界最高の立地条件により JWST の約 5 倍の解像度、約 20 倍の集光力、約 1 桁高い波長分解能（分光能力）を持つ。実績のある参加国・機関の貢献により TMT は最も技術的リスクが低く、科学運用早期から高い成果創出が可能である。3 つの超大型望遠鏡のなかで唯一北半球に建設され、北天をカバーする TMT は他の超大型望遠鏡に対し相補的な役割を担う。

他の2つの超大型望遠鏡に対する優位性（表 1、図 6）

従来の望遠鏡群を超える、可視光・赤外線観測の高感度・高解像度化は世界の天文学の喫緊の要請である。これを目標に世界的に計画の具体化が進み、TMT の他に、欧州諸国とブラジルは E-ELT 望遠鏡（口径 39m）、米国の一部大学と豪州・韓国等は GMT 望遠鏡（口径 24.5m 相当）の建設を南半球のチリで進めている。これら二つの望遠鏡はチリに建設されるのに対し、TMT が建設されるハワイ・マウナケアは北半球に位置しており、観測できる天域が異なるため、TMT の重要性は際立っている。TMT と GMT、E-ELT の比較を表 2-1 に示す。E-ELT は、主鏡口径は TMT よりも大きい、TMT が 3 回の鏡による反射で結像するのに対し、E-ELT では 5 回の反射が必要な光学設計となっており、効率は 3 回反射の場合よりも十数%低くなる。また、建設地の標高が TMT よりも約 1000m 低い、赤外線や紫外線の観測では地球大気の影響をより大きく受ける。これらのことから、E-ELT の TMT に対する集光力の差は鏡の面積（口径の

2乗に比例)の差よりも小さい。また、シンプルな光学系と副鏡やスパイダー等の遮光が小さいことによりきれいな像 (PSF : Point Spread Function) が得られること、マウナケアでの補償光学観測の条件がよいこと、冷却した補償光学装置とすることなどにより、TMTは高コントラスト観測に必要な性能が高く、系外惑星の近赤外直接観測 (撮像・分光) において最高の感度が達成できる。さらに、TMTは10分で観測装置の切替えが可能であるため、マルチメッセンジャー天文学等の様々な観測テーマに柔軟に対応することが可能である。加えて、TMTはE-ELTに比べて広い視野を持つため、天体を効率よく探査でき、同時に観測できる天体数が多い。これらのことから、総合的にみてTMTはE-ELTに対し十分に競争力の高い計画であると言える。GMTはTMTやE-ELTよりも口径が小さく、建設地の標高も低い。

図6上：主鏡のサイズと形状、および副鏡・スパイダーによる遮蔽。左から理想的な30m、E-ELT、TMT、GMT。下：得られる点光源の像。TMTは周囲への回折光の影響が小さく、理想的な像に最も近い。

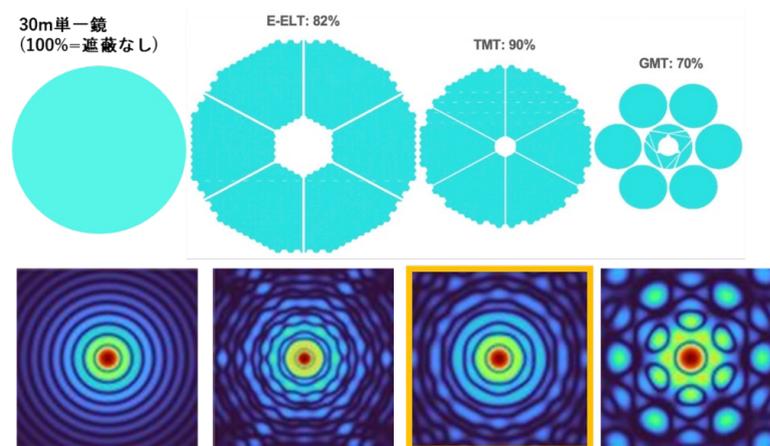


表1:(左)超大型望遠鏡の比較。(右)各望遠鏡の建設地の比較。

	TMT	GMT	E-ELT		ハワイ・マウナケア TMT建設地	チリ・ラスカンパナス GMT建設地	チリ・アルマソネス E-ELT建設地
口径	30m	24.5m (8.4m x 7)	39m	標高 (m)	4012	2514	3064
副鏡サイズ	3.1m	1.1m x 7	4.1m	星像の大きさ (秒角、中央値)	約0.5	約0.6	約0.5
望遠鏡 反射回数	3回	2または3回	5回	地球大気の安定性	非常に安定	安定	安定
望遠鏡 効率	0.92	0.92-0.95 ファイバーを使うと低下	0.79	赤外線観測に 適した時間の割合	約50%	約15%	約20%
視野直径 (クラレ無し)	20分角 (15分角)	20分角	10分角 (5分角)	快晴の夜間時間の 割合	約70%	約65%	約85%

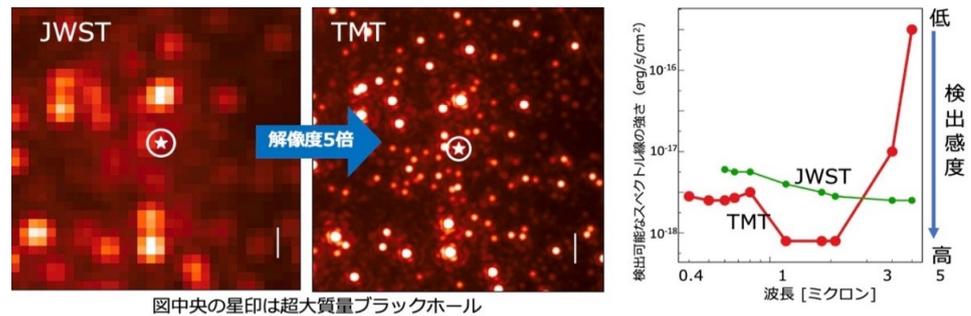
TMTはハワイ・マウナケアにあるすばる望遠鏡との連携で独自の研究を推進できるという強みがある。また、マウナケアは、E-ELT建設地チリ・アルマソネスと比べ、晴天率以外の観測パラメータで優れており、特に補償光学の性能に最も重要な上空大気の安定性が圧倒的に高い。加えて、TMTが目指す主要科学テーマ (地球型系外惑星、宇宙最初の天体等) に必要な赤外線観測でも優位にある。

最新の宇宙望遠鏡と比較しても圧倒的な集光力 (感度) (図7)

2021年末にハッブル宇宙望遠鏡の後継として打ち上がったジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST) には、近赤外・中間赤外線を観測する装置が搭載されており、TMTと一部観測波長範囲が重なる。TMTは、その大口径と補償光学技術によりJWSTの約5倍の解像度、約20倍の集光力を実現する。JWSTではこれまでに冥王星軌道位置にある巨大ガス惑星の検出に成功しているが、TMTが狙う地球軌道位置にある地球型惑星の

検出は、JWST の解像度では検出できない。特に、生命関連分子の検出においては、恒星近くのハビタブルゾーンに存在する地球型惑星の分光観測が不可欠である。TMT は JWST の装置に比べ 1 桁以上高い波長分解能（分光能力）をもつ装置を搭載し、高い精度で地球型惑星の惑星大気分光観測を行い、生命関連分子の存在割合を測定する。これは、JWST では実現不可能な研究である。また近赤外線波長帯（3 ミクロン以下）では、JWST で 10 時間かけて得られるのと同等の分光データが、TMT では 30 分で得られる。TMT はその圧倒的な感度を活かして、JWST では感度が足りない、初代星で構成されるコンパクトな銀河を検出する。また地上望遠鏡の TMT は、宇宙望遠鏡では不可能な装置のメンテナンスや機能更新が可能という利点を活かして長期運用する。

図 7: (左) TMT は JWST の約 5 倍の解像度を実現し、天の川銀河中心付近の星をより多く分離して動きを測定することにより、中心の超大質量ブラックホールの性質を明らかにできる。(右) TMT は、大気の影響を受ける 3 ミクロンより長い波長では、宇宙の JWST より感度が下がるが、それより短い波長では JWST より感度は高い。



図中央の星印は超大質量ブラックホール

4.

プロジェクトが実施する研究

Scientific investigations of the project

上記の科学目的を達成するためには、従来の地上望遠鏡を大きく上回る解像度・感度の観測を可能とする大口径望遠鏡を必要とする。宇宙望遠鏡に対しても、口径で大きく上回る利点を活かし、補償光学による高解像度・高感度と高い波長分解能での観測を実現する。

- 波長帯としては、地上から観測可能な紫外線・可視光・赤外線（波長 0.3 ~ 28 ミクロン）をカバーする。
- 492 枚の分割鏡から成る直径 30m の主鏡を搭載し、すばる望遠鏡をはじめ従来の大型望遠鏡の口径で 3 倍以上、集光力で 10 倍以上となる。
- 地球大気による擾乱の影響を補正する補償光学装置を用いて波長 1 ミクロンで 0.01 秒角の解像度を実現し、星や超遠方銀河などの点光源に対して従来の望遠鏡の 100 倍以上の感度を運用開始当初から達成する。
- 各波長において撮像および低分散から高分散までの分光観測を可能にする装置を順次開発・搭載する。また、太陽系外惑星の直接撮像・分光のための装置により、近赤外線で 20 ミリ秒角において 8 桁（最大 9 桁）のコントラストを達成する。
- 突発天体観測に対応するため、短時間（10 分以下）での観測装置交換を可能にする。

5.

スケジュール Schedule

1. 大まかなスケジュール / Rough schedule

2014 年に望遠鏡建設と運用を担う TMT 国際天文台（TIO）を米国法人として設立し、

合意書（TIO Company Agreement）で各国の役割分担を定めて建設を開始した。現在、TIO および各国機関はハワイ州政府等と協力して、現地工事再開に向けた活動を強化しており、2027 年度現地本格工事再開、2036 年度完成の予定である。重要なマイルストーンは、

- 2027 年度の現地本格工事再開、
- 2031 年の望遠鏡現地据付調整開始、
- 2035 年の約 40 枚の分割鏡により天体の光を入れた総合試験の開始、望遠鏡への主鏡搭載完了。

完成後は日本の観測時間をすばる望遠鏡と一体的な共同利用運用に供し、新しい観測装置により性能向上を図りながら、50 年に亘って運用する。

2. 開発スケジュールの科学成果への影響 / Schedule impact on science

従来の望遠鏡を凌駕する可視・赤外線での超大型望遠鏡は、天文学および関連分野の進展に必須であり、時間をかけても実現する価値がある観測施設である。

その一方、超大型望遠鏡は今後の天文学を牽引するだけでなく、電波をはじめとする他の波長の観測や宇宙からの重力波やニュートリノの検出が進む中で、地球惑星科学、物理学等他分野との融合によって基礎科学全体に大きなインパクトをもたらすものとして、早期の実現が強く要請されている。現在、世界で3つの超大型望遠鏡の計画がある中で、TMT は実績のある参加国・機関の貢献により最も技術的リスクが低く、運用早期から高い性能を発揮することが期待できる。早期の運用開始が、広範な分野の国際競争で日本の研究者が優位に立つために重要である。

6.

プロジェクトで使用する
装置

Instrumentation of
the project

1. 実施する実験・観測・分析などを実現する技術 / Description of the technology to realize the investigations

大口径望遠鏡を実現するために、分割鏡の精密加工・制御技術、軽量かつ高剛性の望遠鏡本体構造の製造とその精密駆動技術、回折限界を達成する補償光学技術、および紫外線・可視から中間赤外線までの高解像度撮像・高分散分光を可能にする観測装置技術を必要とする。

2. 実施する実験・観測・分析などを実現する方法・技術について、他の技術、および類似技術との比較 / Comparisons of the selected technology with other technologies

TMT 実現のための技術は、ケック望遠鏡での分割鏡加工・制御技術やすばる望遠鏡本体の製造・制御技術、地上大型望遠鏡の補償光学技術や各種観測装置の技術をベースにし、これまでにない大型望遠鏡に向けて発展させるものである。特に、分割鏡による大型望遠鏡の技術は、地上・スペースの双方で今後重要性が高まると見込まれる。

日本が担当し、計画の要となる望遠鏡本体構造は基本設計・詳細設計を完了して TIO

によって開催された国際審査にいずれも合格し、主要な機械構造部については製造図面作成を実施して製造前審査にも合格し、材料調達・加工に入ることができる段階にある。主鏡分割鏡は、日本が鏡材を全数（574枚）製造し、球面加工を実施したうえで、175枚は国内で研磨加工を行い、残る399枚は米国（TIO）とインドに送る。各国で研磨加工に続き外形加工と支持機構搭載を実施した後に、米国（TIO）にて仕上げ研磨とコーティングを実施し、望遠鏡に搭載する。多数の鏡の高精度研磨には極めて長期の加工時間を要することから、日本では2013年度に鏡材製造と研磨加工に着手し、2019年度まで量産を実施した。2019年度の現地工事中断後は量産を停止し、外形加工後の量産工程の効率化のための技術開発に絞って実施している。観測装置 IRIS については、日本は撮像部を担当しており、国内で撮像部を製作した後、米国・カナダの担当する分光部・波面センサー部と組み合わせて総合試験を実施し、望遠鏡に搭載する。IRIS は基本設計を完了し、詳細設計も最終段階にある。

3. 提案装置の主要な機能 / Major functions of the proposed instrument

項目4でまとめて記載したため参照されたい。

7.

プロジェクトで獲得するデータ

Data to be obtained

TMT で取得されるデータは、可視および赤外線撮像・分光データである。観測データは共同利用および国際協力で実施される大型観測プログラムにより取得される。TMT は高解像度・高感度観測を実現するが、視野はすばる望遠鏡に比べて狭いため、すばる望遠鏡等での探査で選択された天体を集中的に観測することで科学目的を達成する。取得されたデータは一次処理を行ったうえで観測者に提供されるとともに、占有期間終了後には公開される。

望遠鏡完成後は、TIO が現地観測所運用を主導し、各国の共同利用観測支援は、各参加機関が担う。日本ではすばる望遠鏡と TMT を一体運用するハワイ観測所が共同利用運用を担当する。

日本は建設期及び建設準備期の TIO への貢献割合に応じて観測時間を利用できる。国立天文台は TMT 建設地のハワイですばる望遠鏡を20年以上共同利用運用している仕組みと経験を活かし、観測提案募集からデータ解析支援、アーカイブまで、すばる望遠鏡と TMT を一体的に共同利用して運用の効率化を図りつつ、両望遠鏡の特性を活かした独自性の高い研究を促進する。また、TMT パートナー国で共同実施する戦略的大型観測プログラムの枠組みと科学研究テーマも検討されている。

8.

主要技術要素

Key technologies

1. 主要技術要素と開発が必要な技術要素 / Key technologies and those requiring further investment and development

TMT 実現のための主要技術要素としては以下があげられる。

- 大口径を可能にする分割鏡の精密加工および制御技術。分割鏡はすでに製造段階に入っており、制御技術も確立している。
- 軽量かつ高剛性の望遠鏡本体構造の製造とその精密駆動技術。すでに詳細設計を完了し、製造前審査に合格し、製作に着手できる段階にある。
- 回折限界を達成する補償光学技術。カナダにおいて開発され、すでに詳細設計を完了している。メーカーにて2種類の大型可変形鏡の製造が進んでいる。
- 紫外線・可視光から中間赤外線までの高解像度撮像・高分散分光を可能にする観測装置技術。ファーストライト時には3装置（IRIS、WFOS、MODHIS）を搭載することを決定し、それぞれ詳細設計・基本設計・概念設計が進んでいる。概念設計段階にあるMODHISについても、プロトタイプと位置付けられる高分散分光器がケック望遠鏡において開発されており、主要な技術的課題は解決されている。第二期観測装置については今後の計画具体化にむけ要素技術の開発が日本国内および海外パートナーにより既に開始されている。

2. 技術的不確定性の大きな技術要素 / Assessment of uncertainties in technologies

第二期観測装置としては、より野心的な装置が計画されており、その実現にはさらなる技術開発を要する。例えば以下のような技術があげられる。

- 系外惑星の直接撮像・分光をターゲットにした観測装置 PSI において、高コントラスト観測を可能にするコロナグラフ
- 装置の大型化が避けられない可視高分散分光器 HROS を現実的なサイズで十分な波長分解能を達成するための光学系設計および分散素子の開発
- 中間赤外線観測のための冷却補償光学や高分散分光観測装置の開発

3. 既存技術の活用条件 / Assessment of heritages

- 六角形の分割鏡を用いる方式は口径 10m のケック望遠鏡で採用され、成功をおさめた。TMT はケック望遠鏡で開発された分割鏡の研磨方法や位相合わせを含む制御技術をベースとしている。また、日本における分割鏡非球面研磨加工においては、大型の半導体露光装置等の製造を行っているメーカーの技術および施設が活用されている。分割鏡の枚数がケック望遠鏡（36 枚）に比べ 10 倍以上となるため、鏡の量産や多数の鏡の制御のための技術が新たに必要となった。
- 望遠鏡本体構造の製作・制御には、すばる望遠鏡を実現した国内メーカーの技術が活かされている。すばる望遠鏡に比べ著しく大型となる TMT の実現のためには、本体を軽量かつ高剛性にする設計が必要である。また、軽量化をはかっているとはいえ TMT の本体構造はすばる望遠鏡に比べ約 5 倍の重量となり、一方で回折限界は 4 分の 1 以下となるため、より高精度の追尾性能向上が必要となる。望遠鏡本体構造および制御系については既に詳細設計を完了している。また、ハワイ島では地震のリスクがあるため免震ダンパーとロック機構をもつ免震機構を採用し、プロトタイプを試作し、動作確認試験を実施し、十分に仕様を満たすことも確認済みである。

9.

想定されるコスト Cost estimate

日本担当の望遠鏡本体・主鏡・観測装置の現物貢献と TIO 分担金

TMT の建設は、各国で分担箇所を製作する部分（ドーム、望遠鏡本体、主鏡、観測装置など）と、各国の分担金をもとに TIO が実施する部分（現地工事、主鏡制御、副鏡など）がある。完成までの日本における建設費は約 420 億円であり、内訳は（1）望遠鏡本体の設計・製作・据付調整（約 330 億円）、（2）主鏡分割鏡製作（約 57 億円）、（3）観測装置製作（約 6 億円）、（4）TIO 分担金（約 27 億円）である。望遠鏡本体、主鏡分割鏡の製作経費はメーカー見積をもとに物価上昇等を考慮して算出したものである。輸送・現地据付調整に必要な経費については、米国の物価上昇と為替を変動要因として見込んでいる。観測装置開発は国立天文台先端技術センターでの内製をベースとし、購入が必要な高額な赤外線検出器等の見積を積算している。TIO 分担金は、TIO メンバー会議・評議員会での決議に基づく分担額である。

建設費のほかに、国内で TMT プロジェクトを運営するために必要な人件費・旅費（約 14 億円）と、共同利用体制の準備（観測とデータ解析の支援、広汎な研究者がデータを容易に利用できるようにするためのアーカイブ等）の費用約 12 億円が必要である。

TMT 完成後の観測所運用経費

完成後の観測所運用は TIO が担い、その経費は年約 3 千万ドルであり、これに加えて機能更新や新規観測装置等製作に年約 2 千万ドルを予定している。これらの運用と装置製作の経費は建設への貢献割合に応じて各国が負担する。日本の分担金は約 12 億円であり、TMT を日本の大学共同利用に供するための経費約 18 億円を合わせ年間約 30 億円の運用経費が必要となる。日本の分担金の一部は、国立天文台職員による望遠鏡・観測装置の保守運用および機能更新における TIO への人的貢献によって賄う。

10.

技術ヘリテージと技術 開発状況と開発計画 Technical heritages, technology development status and plan

1. 技術ヘリテージと技術開発状況 / Technology heritage, development history and status

項目 8 でまとめて記載したので参照されたい。

2. 技術開発計画 / Technology development plans

TMT における技術開発では、設計・製造・組立・輸送の各段階において、国際外部機関の専門家をレビュアーとして招いた詳細な審査に合格することで次の段階に進むことができる。こうした系統的な審査を通じて準備状況を検証しながら計画を進めている。日本が担当する部分についてもこのプロセスに則り、全体工程に沿って着実に設計・開発を進めてきた。

- 計画の要となる望遠鏡本体構造および制御系については詳細設計を完了し、主構造については TIO による製造前審査に合格し、材料調達・加工に取り掛かることが

できる段階にある。

- ・かつてない巨大な望遠鏡構造でありながら軽量かつ極めて高い駆動精度を実現するうえでの技術的課題を解決している。
- ・大型望遠鏡として初めて、1000年に一度の規模の地震が発生しても破損しない免震機構の実現の目処をつけるなど、技術的リスクの大幅な低減に成功している。
- 主鏡分割鏡材の製造と非球面加工はすでに量産工程を実施した実績があり、外形加工と支持機構搭載についても主な技術は実証済みで、量産加工のスピードアップに必要な開発も行っている。
- 日本が担当する観測装置 IRIS 撮像系は詳細設計の一部は既に完了するなど最終段階にある。

11.

プロジェクトのリスク管理 Risk Management Plan of the Project

TMT 建設計画において、外的要因によるリスクとしてあげられるのは建設地ハワイでの反対運動である。ハワイでの現地工事に関する法的手続きは 2018 年 10 月までに完了し、2019 年にハワイ州によって着工許可が発出された。しかし現地工事は、計画に批判的な地元住民等による抗議活動があり 2019 年に中断した。事態打開のため TIO 指導部を刷新してハワイへの TIO 本部の段階的移転を決め、まず 2021 年に TIO プロジェクトマネージャや国立天文台 TMT プロジェクト長がハワイに異動して新たな体制をとることで、反対派住民等との直接対話や地元住民からの要望に応える教育支援等が可能となった。また、ハワイ州では、それまで意見が反映されなかった反対派先住民もメンバーとして参加するマウナケア管理の新組織 (MKSOA) が 2022 年に設立された。これらの取り組みにより地元住民等との信頼関係の醸成と計画への理解の増進が大きく進んでいる。2024 年 12 月に就任した Alameda ハワイ郡長は、TMT は 2019 年当時とは違っており、環境配慮や文化への敬意、地元への利益を伴う TMT の建設への道筋をつけたいとの見解を一貫して述べ、MKSOA に自らメンバーとして参加し議論をリードしており、TMT 含むマウナケアの天文学に関する議論が加速している。

また、万一の場合の代替建設地も法的手続きも既に完了している。ハワイでの建設が不可能と判断した場合の代替建設地として、カナリア諸島ラバルマ (スペイン) を 2016 年に選定した。ラバルマでの建設許可は 2019 年に取得され、建設のための法的手続きは整っている。ハワイでの建設を不可能と判断し、かつラバルマ建設の場合に建設予算および運用予算の確実な見通しが立つならば、建設地を変更する。ラバルマに建設する場合でも、これまでに設計開発・製造された構成品はそのまま利用可能であり、またハワイ建設の場合と同程度の期間と予算で完成できる。また、すばる望遠鏡との科学的連携や日本の研究者向け共同利用はハワイに建設する場合と同様に実施可能である。

もう一つのリスク要因は、米国連邦政府予算による国立科学財団 (NSF) の参加の不定性である。米国の Decadal Survey (Astro2020) において、TMT と GMT からなる US-ELT プログラムが地上計画で最優先と評価されたのをうけ、NSF は基本設計審査を実施し、TMT、GMT とともに最終設計段階に進む準備ができているとの評価を得た。一方、2024 年には、NSF により、TMT と GMT を最終設計段階に移行させるかを評

価するための外部審査会が開催され、その報告書では、US-ELT プログラムの米国の科学における重要性が強調されるとともに、TMT と GMT のいずれの計画も最終設計段階に進む準備ができているとあらためて評価された。しかし、2025 年 5 月に NSF が公表した 2026 年度予算要求書においては、GMT を最終設計段階に進める一方で、TMT は同段階に進めず、追加資金提供を約束しないという方針が示された。

これに対し、最終的に米国の予算を決定する米国連邦議会では異なる動きが見られる。2024 年 3 月には、NSB に対し、TMT と GMT の 2 基の望遠鏡を建設するよう強く促す旨の声明が発出された。また、同年 6-7 月に公表された連邦議会上院および下院歳出委員会による米国 2025 年度歳出法案においても、両望遠鏡の建設を強く支持する意向が表明されている。現在（2025 年 12 月）進んでいる米国 2026 年度予算審議においては、上院歳出委員会の歳出法案において「NSF は、両望遠鏡プロジェクトを直ちに最終設計段階へと進めなければならない」という強い文言の入った報告書が出されている。過去には、JWST や Roman 宇宙望遠鏡のように、当初の行政府の予算提案には盛り込まれなかったものの、米国連邦議会での審議を経て大型予算が措置された前例もある。NSF と議会で立場に相違が見られるなか、TMT 計画を NSF の最終設計段階に進め、建設を実現するために米国議会および行政府への働きかけを行っている。

12.

天文学コミュニティの
持続可能性に関わる戦略

**Strategy for the
Sustainability
of Astronomical
community**

2030 年代以降の数十年に亘る天文学の進展には地上の超大型望遠鏡が不可欠であるが、一国では実現できない規模となる。これを国際協力で参加国・機関の技術力・資金を結集して実現し、日本の研究者に最先端の研究機会を提供する。すばる望遠鏡と TMT の連携観測という日本独自の観測戦略を可能にするとともに、順次機能更新、新規観測装置追加等を図ることによって長期の観測を可能にすることで、天文学だけでなく物理学等も含んだ基礎科学全体に画期的な研究成果を長期にわたってもたらし続ける。日本の高い技術力と優れた人材により国際的責務を果たすと共に、先端技術の開発を通じて産業基盤の成長に資する。本計画を通じて国際的人材の育成や国際的頭脳循環を図る。

GREX-PLUS (Galaxy Reionization EXplorer and
PLanetary Universe Spectrometer)

銀河進化・惑星系形成観測ミッション GREX-PLUS

0.

概要

Summary

GREX-PLUS (Galaxy Reionization EXplorer and PLanetary Universe Spectrometer)

銀河進化・惑星系形成観測ミッション GREX-PLUS

Project Category

1. Big projects having large impacts on GOPIRA, typically cost estimate over ~1 Billion JPY (光赤天連に大きな影響を与える、装置・施設の開発を含む大型計画の提案、目安として10億円以上の規模)

Abstract of science goals, objectives, and methods

Understanding the origin of galaxies and planets is the ultimate goal of astronomy, and it is also the subject of great public interest. To verify the standard theory of the structure formation and to elucidate the process of habitable planet formation, we will search for bright “first galaxies” in the Universe less than 300 million years after the Big Bang, and search for the “snowline”, the boundary between water vapor and ice in planetary formation sites. To achieve these goals, we propose the GREX-PLUS space telescope with an aperture of 1.0 m. Compared to the James Webb Space Telescope, it carries an imaging camera for the near- and mid-infrared band (2 to 8 μm) with a field-of-view 200 times wider and an optional high resolution spectrograph in the mid-infrared band (10 to 18 μm) with resolving power 10 times higher. The infrared detectors will be cooled by the world's best mechanical coolers developed in Japan. Launch is targeted for the mid-2030s, and observational operations will last at least five years. With its unique observational capabilities, not available in any existing or future plans in the world, the mission will open a wide variety of researches including to explore galactic building blocks, search for supernovae in the early Universe, search for active galactic nuclei obscured by dust, study the formation process of interstellar organic molecules, search for small icy bodies in the solar system, investigate temperature structure of solar system planetary atmospheres, observe exoplanetary atmosphere, etc. The acquired data will serve as a legacy that will be utilized by a wide range of astronomical communities around the world in the 2030s, 2040s, and beyond. Through space telescope development, data center construction, and scientific research, we will also work to train young researchers and engineers and improve gender balance and diversity.

プロジェクトの意義と科学目的・方法の要旨

銀河と惑星の起源の解明は天文学の究極目標である。その学術的価値に加え、国民の

関心も極めて高い。標準構造形成理論の検証とハビタブル惑星形成過程の解明を目的とし、明るい「初代銀河」をビッグバンから3億年未満の宇宙で探査し、惑星形成現場の水蒸気と氷の境界線「スノーライン」を探査するために、GREX-PLUS (Galaxy Reionization EXplorer and PLanetary Universe Spectrometer) を提案する。GREX-PLUS は、口径 1m 級の冷却宇宙望遠鏡に、ジェームズウェッブ宇宙望遠鏡に比べて 200 倍広視野の近中間赤外線帯 (2 ~ 8 ミクロン) 広視野カメラと、同 10 倍高い波長分解能の中間赤外線帯 (10 ~ 18 ミクロン) の高分散分光器 (オプション) を搭載する。赤外線検出器の冷却には国産の宇宙用機械式冷凍機を活用する。打上げは 2030 年代中盤、観測運用は 5 年以上を目標とする。世界的に他に無いユニークな観測機能により、銀河系ビルディングブロックの探査、初期宇宙の超新星探査、塵に覆われた活動銀河核の探査、星間有機分子生成過程の分光学、太陽系内氷小天体の探査、太陽系惑星大気的气温構造調査、太陽系外惑星大気組成の観測など、多種多様な銀河進化研究と惑星科学研究の扉が開かれる。また、取得したデータは、2030-2040 年代あるいはそれ以上の長きにわたり、世界中の幅広い天文学コミュニティに活用されるレガシーとなる。宇宙望遠鏡開発、データセンター構築、科学研究を通じて、若手研究者・技術者の育成とジェンダーバランスやダイバーシティの改善にも取り組む。

Principle Investigator

Name: Akio K. Inoue

Affiliation: Waseda University

E-mail address: akinoue@aoni.waseda.jp

プロジェクト代表者

氏名: 井上昭雄

所属: 早稲田大学

E-mail アドレス: akinoue@aoni.waseda.jp

Co-investigator and his/her role

See Appendix 1

プロジェクト共同提案者とその役割

Appendix 1 参照

Estimate of total cost

Approximately 50 billion yen (about 40 billion yen from Japan + several tens M\$ from international partners)

総コストの見積り

約 500 億円 (日本負担分 400 億円規模 + 国際協力数 10 M\$)

Estimate of total FTE (Full-Time Equivalent) necessary to accomplish the project

Approximately 600 person-years (concept study, development, and operation, not including production of scientific results)

プロジェクト実現に必要な総 FTE (人年) の見積り

約 600 人年 (検討・開発・運用のみ。科学成果創出に関わる分は別途必要)

Duration of the project

FY2027 to FY2042 (and extended operation)

プロジェクト実施期間

2027 年度～ 2042 年度 (+ 延長運用)

1.

プロジェクトの意義

GREX-PLUS は、近中間赤外線帯を観測する宇宙望遠鏡により、地上からは到達できない高感度を達成し、銀河と惑星の起源を解明し、宇宙の中の生命の起源にも迫る。

Science goals of the project

2.

プロジェクトの科学目的

『宇宙科学・探査ロードマップ』2023 年 8 月 D 改訂には宇宙物理学の大目標が 2 つ掲げられている：

Science goals of the project

宇宙物理学の大目標 1 「宇宙の空間と物質の起源の理解」

宇宙物理学の大目標 2 「宇宙における生命の可能性の探求」

GREX-PLUS は、これらそれぞれに対して以下の科学目標を掲げる：

- 科学目標 1 (銀河科学; GS)

私たちの棲むこの宇宙で、いつ、どのように銀河と巨大ブラックホールが誕生し、現在まで進化してきたのかを理解する。

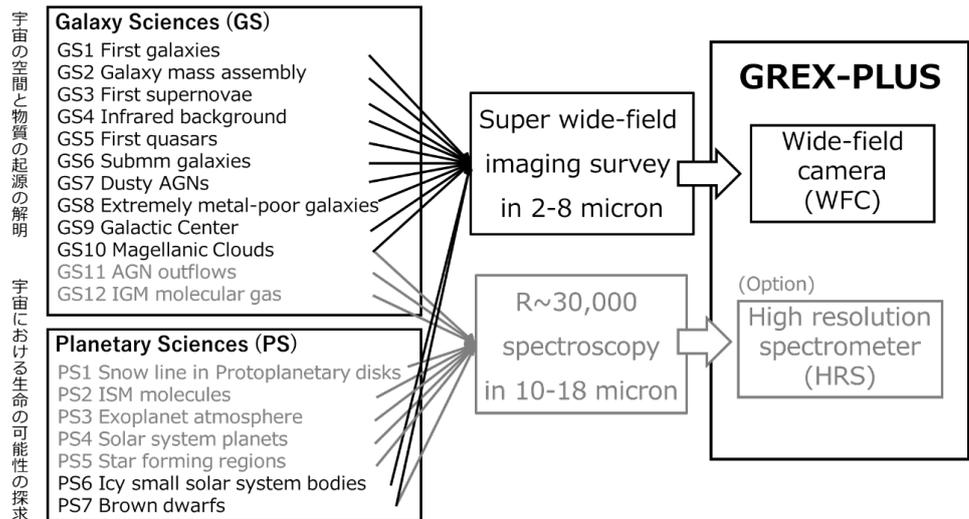
- 科学目標 2 (惑星科学; PS)

私たちの棲む地球と太陽系、さらには、太陽系外惑星系がどのように誕生し、現在まで進化してきたのかを理解する。

上記 2 つの科学目標に対して 12 個あるいは 7 個の科学課題を立てた (図 1)。

高分散分光器は、検出器の入手性等のリスクを鑑み、オプション装置として位置付ける。

図 1: 科学目的, 必要な観測機能, 装置の関係



3.

プロジェクトの科学的意義と目標の根拠

Rationale for the scientific goals and objectives

1. 科学的意義の根拠：研究の背景、当該分野の研究状況、等 / Scientific background, status of the relevant scientific area, etc.

より遠く、すなわち、より初期宇宙の天体を探索することは、天文学の一つの究極目標である。すばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡、そして、ジェームズウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST) もそのために建設されたと言っても過言ではない。赤方偏移 6 を超える遠方宇宙の観測では、銀河間空間の水素原子によるライマン α 吸収のため、天体静止系波長 1216\AA より短波長の光はほぼ完全に失われてしまう (Gunn-Peterson Trough)。逆にこのスペクトルブレイクを目印にすれば、測光観測のみによる遠方銀河選択 (ライマンブレイク法) が非常に良く機能する。すばる望遠鏡 Suprime-Cam による波長 1 ミクロンまでの広視野撮像探査により、2006 年～2012 年の間、赤方偏移 7.2 までの最遠方銀河の記録が打ち立てられた。より高赤方偏移の探査には、より長波長の赤外線観測が必須となる。現在、JWST による分光観測で確認された最高赤方偏移は 14.2 である。一方、明るい、大質量の銀河は個数密度が低いいため、発見するには広視野探査が必要となる。また、大質量の銀河ほど形成するのに長い時間が必要であり、初期宇宙では形成時間が足りず存在できないと考えられる。図 4 の右上の領域は、標準構造形成 (Λ CDM) 理論では銀河の存在が禁止される光度 (質量) 領域を模式的に示している。この「禁止領域」の銀河探査は Λ CDM に対する強力なテストとなる。この探査を、波長 (赤方偏移)、視野 (個数密度)、感度 (限界質量) のすべての面で達成可能な唯一の計画が GREX-PLUS である (図 2, 4)。

地球のような生命にあふれた惑星が普遍的な存在なのかどうかを解明することは、天文学のもう一つの究極目標である。地球型の生命体にとっては水の存在が本質的と考えられ、岩石惑星への水の供給過程の解明が重要となる。また、惑星系全般の形成過程においても水氷の有無により岩石惑星やガス惑星への分岐が起こると予想されている。このような観点から、惑星系形成領域 (原始惑星系円盤) における水の気相・固相境界面「スノーライン」の位置とその時間進化を理解することが本質的に重要である。しかし、水「スノーライン」

の位置は主星からの距離 1 au 程度、すなわち、100 pc の天体に対して 0.01 秒角である。観測波長および必要な感度で水「スノーライン」を撮像することができる装置は計画中のものを含めても存在しない。そこで、水蒸気分子の輝線を速度分解し、そのケプラー運動を捉えることで、「スノーライン」の位置を特定する手法が提案されている (Notsu et al. 2016, 2017, 2018)。中間赤外線帯の複数の水輝線を組み合わせることで、原始惑星系円盤内の「スノーライン」の 2 次元形状まで制限できる可能性がある。太陽質量の場合、主星から距離 1 au でのケプラー運動速度は約 30 km/s であるから、速度分解能 10 km/s 程度が必要となる。これは、同波長帯を観測できる JWST/MIRI の速度分解能に対して 10 倍高い要求となる。これを唯一実現できる計画が GREX-PLUS である (図 3, 5)。

図 2: GREX-PLUS 撮像視野と他の望遠鏡との比較

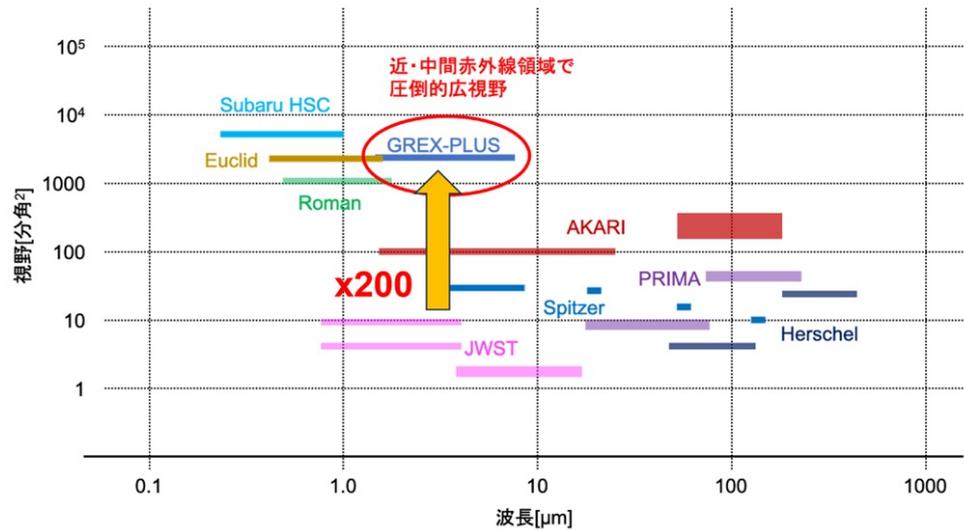


図 3: GREX-PLUS 波長分解能と他の望遠鏡との比較

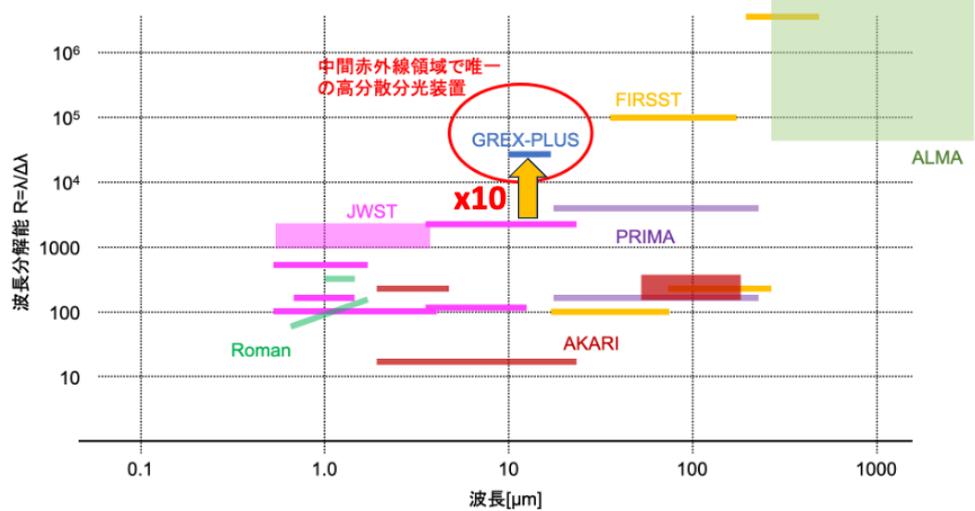


図 4: GREX-PLUS 「初代銀河」 探査による Λ CDM 構造形成シナリオの検証

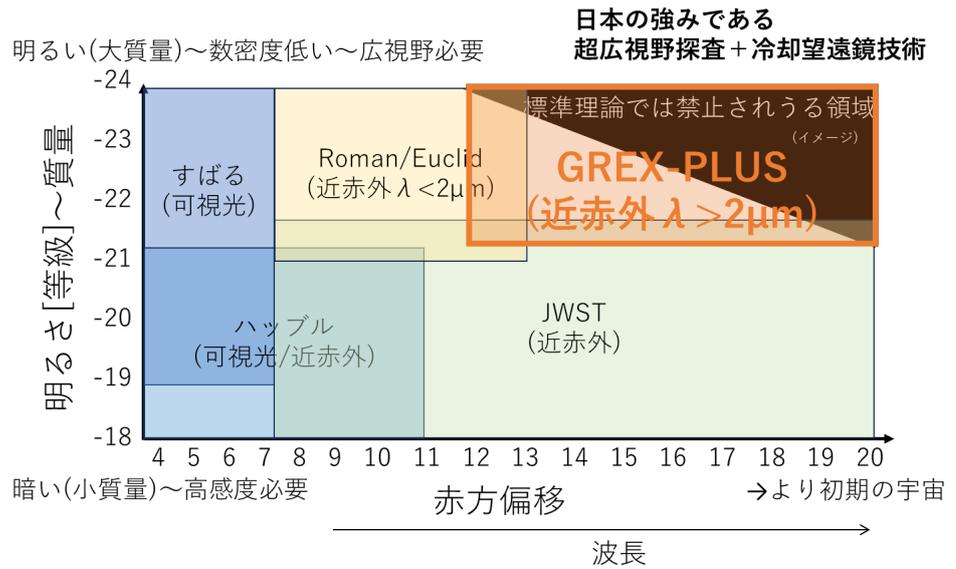
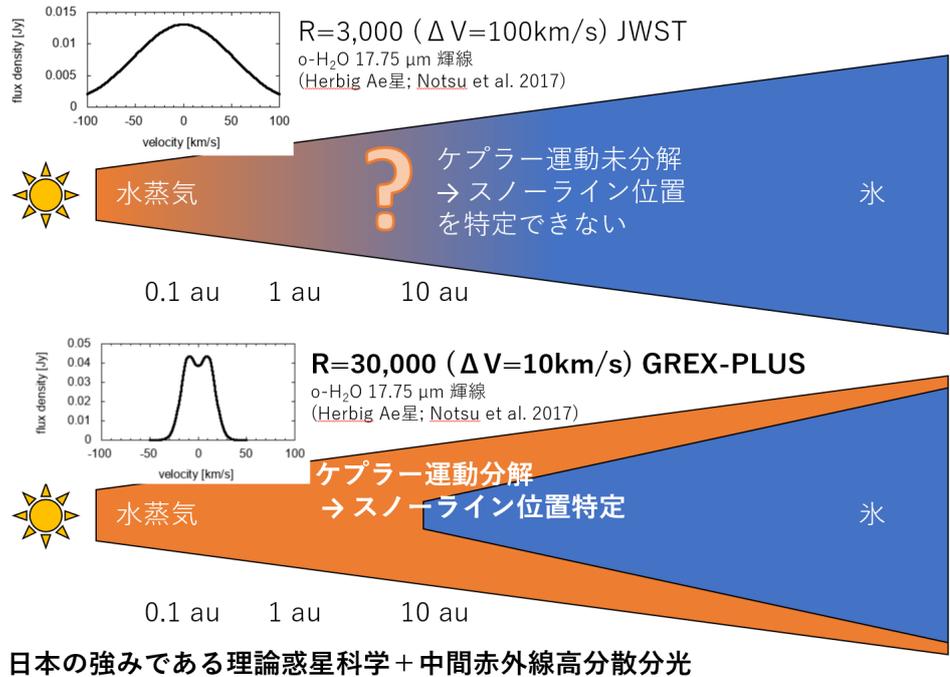


図 5: GREX-PLUS 「スノーライン」 探査による惑星系形成過程の解明



2. 提案するプロジェクトコンセプトは当該分野になにをもたらそうとするのか / Goals and objectives: new scientific steps the proposed concept aims to achieve in the science area

GREX-PLUS がもたらすものは、(1) 「初代銀河」 探査に必要な波長 2 ミクロン以上の超広視野撮像データ、(2) 原始惑星系円盤「スノーライン」探査に必要な中間赤外線帯で $R \sim 30,000$ の高分散分光機能。これら他に類の無いユニークな撮像データおよび分光機能により初めて実現できる、銀河形成進化論および惑星系形成論を始めとした幅広

い天文学・宇宙物理学および地球惑星科学における数々のブレイクスルー。

3. 提案するプロジェクトコンセプトの強みと過去、現在、未来の他のプロジェクト、研究・探査との関係 / The competing power of the proposed project concept and its relationship to past, current, and future other investigations and projects.

GREX-PLUS は、欧米の旗艦宇宙望遠鏡計画には無い独自の機能を追求し、比較的小さい予算規模でもそれらを凌駕する科学成果を創出する。具体的には、JWST より 200 倍広い視野のカメラと 10 倍高い波長分解能を持つ分光器を搭載する。同様の広視野カメラを持つ Euclid や Roman 宇宙望遠鏡とは観測波長帯が異なる (図 2)。また、米国で検討中の PRIMA とも観測波長帯や波長分解能が異なる (図 2, 3)。我が国の他の宇宙望遠鏡計画とも観測波長、機能、科学目的が異なる。これらのスペースミッションとは互いに相補的である。大型地上望遠鏡と比較した場合、観測波長が一部重なるのは 30m 望遠鏡 TMT である。しかし、スペースからの高感度かつ連続的な観測波長が確保できる点、広視野撮像機能の点から、まったく異なる役割を持つ。GREX-PLUS で見つけた天体を TMT の超高空間分解能で詳しく観測するというシナジーがある。特に、スノーライン探査に関しては、地球大気中の水分子のため地上からの探査はほぼ不可能である。また、スノーラインで狙う水分子輝線はアルマ望遠鏡の波長帯にもあるが、1 天体あたり 10 時間以上の観測が必要なため、約 100 天体の統計的サンプル構築は GREX-PLUS で初めて実現できる。

4.

プロジェクトが実施する
研究
Scientific
investigations of the
project

目的 (1) 標準構造形成理論の検証

ビッグバンから 3 億年未満の初期宇宙 (赤方偏移 15 以上) で大質量銀河の光度関数と星形成効率を制限し、宇宙最初の銀河の形成過程解明を目指す。明るい大質量の「初代銀河」の個数密度を、定説である Λ CDM シナリオから予想される個数密度と比較する。個数密度が予想より多い場合、初期宇宙における星形成効率が後の時代に比べて高いことが示唆される。仮に 100% を超える星形成効率が必要になれば、究極的には Λ CDM シナリオの見直しにつながる。これまでの光度関数の測定結果を高赤方偏移へ外挿し、絶対等級 -21 等より明るい側で意味のある制限を得るために必要な感度と探査面積を考え、Deep, Medium, Wide の 3 種類の広視野撮像サーベイを実施する (表 1)。これらのサーベイは NASA Roman 宇宙望遠鏡による波長 2 ミクロン以下の広視野撮像サーベイ領域で実施する。Roman の撮像データと組み合わせ、「初代銀河」のライマンブレイク選択を実施する。具体的には、波長 2 ミクロン以下 (Roman バンド) で未検出、波長 2—5 ミクロン帯 (GREX-PLUS 近赤外線チャンネル) で検出、さらに波長 5—8 ミクロン帯 (GREX-PLUS 中間赤外線チャンネル) で未検出となる天体を「初代銀河」候補として選択する。波長 5—8 ミクロン帯の未検出条件は、低赤方偏移のダストで覆われた銀河や AGN を排除するために必要である (逆にそういった興味深い銀河・AGN の選択にも活用できる)。得られた「初代銀河」の個数密度を Λ CDM による予想と比較し、 Λ CDM を検証する。

表 1: GREX-PLUS 広視野探索の一覧

	Deep	Medium	Wide
面積 [deg ²]	10	100	1,000
F232 [AB 等級]	26.5	25.5	24
F303 [AB 等級]	26.5	25.5	24
F397 [AB 等級]	26.5	25.5	24
F520 [AB 等級]	24.5	23.5	22
F680 [AB 等級]	23.5	22.5	21

目的 (2) 惑星系形成過程の解明

原始惑星系円盤における水「スノーライン」の位置は惑星系形成過程に重大な影響をおよぼすだけでなく、岩石惑星系表面の海の起源にも深く関わっている。若い太陽型星周囲の原始惑星系円盤 (T Tauri 型円盤) で、気相の水分子の波長 10 ~ 18 ミクロン帯の複数の輝線を観測し、輝線プロファイルからケプラー運動を速度分解して、「スノーライン」の位置を特定する。具体的には、自発放射係数 (アインシュタイン A 係数) と励起温度の組み合わせが異なる複数の水分子輝線を検出し、そのケプラー運動を速度分解することで、その輝線の放射領域 (具体的には放射領域の外縁半径) を特定する。これらを総合することで、原始惑星系円盤内の「スノーライン」の 2 次元構造を描き出す。この観測をさまざまな主星パラメータや年齢の原始惑星系円盤、約 100 個に対して実施することで、「スノーライン」の時空間進化を解明する。これに必要な観測性能は、波長分解能約 30,000 に加えて、波長 10 ~ 18 ミクロン帯の連続的な波長カバレッジ、および、1 時間、5 σ 、5 mJy 程度の連続光感度と数 $\times 10^{-20}$ W/m² 程度の輝線感度である。(図 6)

5.

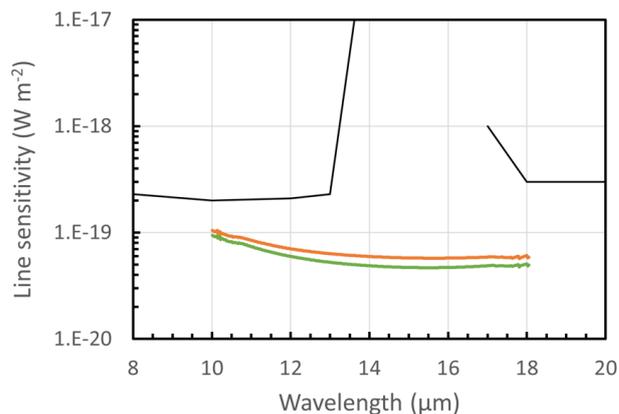
スケジュール

Schedule

1. 大まかなスケジュール / Rough schedule

- 2022 年 12 月 銀河進化・惑星系形成観測ミッション 時限 WG 設置
- 2024 年 7 月 戦略的中型計画ミッションコンセプト提案
- 2024 年 10 月 銀河進化・惑星系形成観測ミッション WG
- 2027 年度 宇宙科学研究所として戦略的中型ミッション候補絞り込み (予定)
- 2028 年度 ミッション定義審査 (MDR)
- 2037 年度 打上げ (目標)
- 運用期間 5 年 (可能ならば延長運用)

図 6: GREX-PLUS 高分散分光器と TMT の検討中装置 MICHl (Mid-Infrared Camera, High-disperser, and IFU) の輝線感度の比較 (1 時間積分, 5 σ 検出限界)。GREX-PLUS (緑線: 低背景放射の場合, 橙線: 高背景放射の場合) は波長分解能 30,000, TMT/MICHl (黒線) の波長分解能は波長 13 μ m までは 120,000, 波長 17 μ m からは 60,000。いずれも輝線が分解できない場合。波長 13.5 μ m から 17 μ m の間は地球大気の透過率が低く、TMT/MICHl では観測できない波長帯。



2. 開発スケジュールの科学成果への影響 / Schedule impact on science

GREX-PLUS が提供する 2 つの観測機能（波長 2 ミクロン以上での広視野撮像と波長 10～18 ミクロン帯での高分散分光）は、いずれも、世界的に他の代替え計画は存在しないため、仮に多少計画が遅れても科学成果創出に影響は無い。ただし、例えば「初代銀河」の赤方偏移の確認は、ALMA や TMT による分光観測でも可能であるが、JWST による分光観測が極めて有効であり、その観測機能が維持されていることが望ましい。したがって、2030 年代中盤までの打ち上げが強く望まれる。

6.

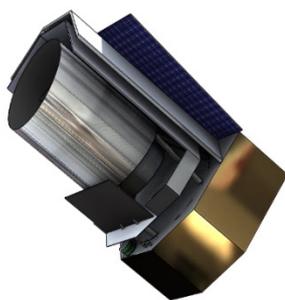
プロジェクトで使用する装置

Instrumentation of the project

図 7: GREX-PLUS 完成イメージ

1. 実施する実験・観測・分析などを実現する技術 / Description of the technology to realize the investigations

広視野カメラ(波長 2～8 ミクロン帯, 5 バンド)と高分散分光器(波長 10～18 ミクロン帯, R～30,000)を搭載した主鏡口径 1.0m, 温度 50K の赤外線宇宙望遠鏡 (図 7)。



2. 実施する実験・観測・分析などを実現する方法・技術について、他の技術、および類似技術との比較 / Comparisons of the selected technology with other technologies

広視野探査：波長 2 ミクロン以上で地上からは到達不可能な感度で超広視野探査を実現する計画は他に存在しない (図 2)。

高分散分光：地上からアクセス不可能な波長帯を中心とした中間赤外線 10～18 ミクロン帯において、スペースから波長分解能 30,000 を実現するのは実用的に初めて。また、他には存在しない (図 3)。

3. 提案装置の主要な機能 / Major functions of the proposed instrument

表 2～4 に、GREX-PLUS の基本仕様、広視野カメラの仕様、高分散分光器の仕様をそれぞれ示す。

表 2: GREX-PLUS の基本仕様

望遠鏡口径	1.0 m
望遠鏡温度	50 K 未満
焦点面視野	1,792 平方分角(これを 5 バンドに分割)
絶対指向精度	1 秒角(3 σ)
指向安定性	0.6 秒角(3 σ , 300 秒間)
断熱放射冷却	望遠鏡, カメラ検出器(F232, F303, F397)
機械式冷凍機	カメラ検出器(F520, F680), 分光器検出器
データダウンリンク通信量	20 GBytes/day

表 3: GREX-PLUS 広視野カメラの仕様

	近赤外線チャンネル			中間赤外線チャンネル	
	F232	F303	F397	F520	F680
中心波長 [μm]	2.3	3.0	4.0	5.2	6.8
波長帯 [μm]	2.0–2.6	2.6–3.4	3.4–4.5	4.5–5.9	5.9–7.7
波長分解能 [$\lambda/\Delta\lambda$]	3.7				
ピクセルスケール [arcsec pix ⁻¹]	0.48				
視野 [arcmin ²]	256	256	768	256	256
検出器	HgCdTe				
感度 [AB 等級] (*)	23.35	23.42	23.04	21.78	20.73

(*) 300 秒, 5 σ , 点源。背景光は波長 3 μm , 0.11 MJy/str を仮定(北黄極の 3 倍の強度)

表 4: GREX-PLUS 高分散分光器の仕様

波長帯 [μm]	10–18
波長分解能 [$\lambda/\Delta\lambda$]	~25,000
スリットサイズ [arcsec ²]	9.8 \times 4.2
ピクセルスケール [arcsec pix ⁻¹]	1.8
検出器	Si:As
連続光感度 [mJy; 5 σ , 1hr]	6.0 / 7.2 (*)
輝線感度 [$10^{-20} \text{ W m}^{-2}$; 5 σ , 1hr]	4.9 / 5.9 (*)

(*) 波長 14 μm , 黄道光放射強度: 16 MJy/str (低い場合) / 50 MJy/str (高い場合)

7.

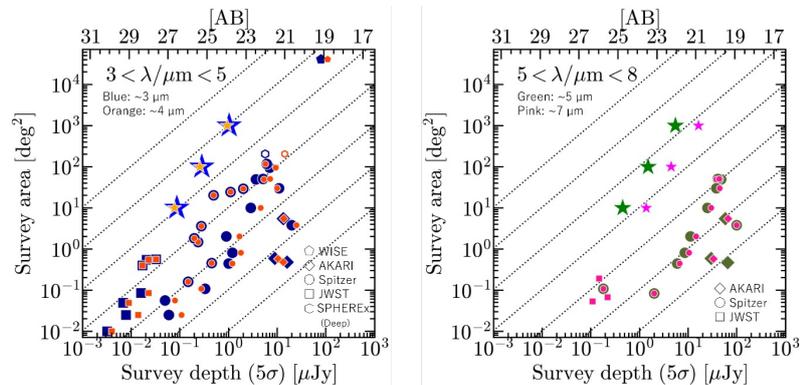
プロジェクトで獲得するデータ

Data to be obtained

図 8: 撮像探査パラメータの比較。横軸は探査の深さ(点源検出限界, 5 σ), 縦軸は探査の面積。(左) 波長 3–5 μm 帯の比較。青系統は 3 μm バンド, 橙系統は 4 μm バンド。丸形は Spitzer 宇宙望遠鏡, ひし形は「あかり」, 五角形は WISE (全天) の探査である。四角形は JWST で計画されている探査。星型が GREX-PLUS で計画している Deep, Medium, Wide 探査である(表 1 を参照。F303 と F397 の 2 バンド分)。(右) 波長 5–8 μm 帯の比較。緑系統は 5–6 μm バンド, 桃系統は 7–8 μm バンド。丸形は Spitzer 宇宙望遠鏡, ひし形は「あかり」, 星型が GREX-PLUS の 3 つの探査 (F520 と F680 の 2 バンド分)。

広視野撮像探査

GREX-PLUS は Deep, Medium, Wide の 3 つの撮像探査を波長 2–8 ミクロン帯で実施する(表 1)。図 8 に示すように, 従来の同波長帯の撮像探査に比べて, GREX-PLUS の撮像探査は, より広視野, より高感度のパラメータとなっている。得られた撮像探査データは「初代銀河」の探査に加えて, 多種多様な銀河および AGN の研究, 遠方超新星探査, 銀河系の褐色矮星探査, 太陽系の氷小天体探査などに活用される(図 1)。



高分散分光観測

GREX-PLUS は地上からアクセスできない波長帯を中心に、中間赤外線 10～18 ミクロン帯で波長分解能約 30,000 の高分散分光機能を提供する(図 6)。他に類の無いユニークな高分散分光機能を活用し、「スノーライン」の観測に加えて、太陽系内外の惑星大気、星間有機分子の形成過程、星形成領域の分子生成過程、AGN 分子ガストラス、銀河間分子ガスなど、多種多様な科学研究を実現する(図 1)。

8.

主要技術要素

Key technologies

1. 主要技術要素と開発が必要な技術要素 / Key technologies and those requiring further investment and development

放射冷却系の試験検証技術

GREX-PLUS 望遠鏡は温度 50K 未満を要求としており、これを断熱放射冷却により実現する。SPICA の検討資産をベースとした概念検討でその成立性は示されている。一方、放射冷却性能の試験検証は現時点では一つの技術的課題である。SPICA の概念検討で試験方法自体は検討されており、また、LiteBIRD の概念検討でも継続的に検討されている。LiteBIRD は温度 5K の要求であり、その試験検証に比べて、温度 50K の GREX-PLUS の試験検証の難易度は相応に下がると考えられる。

高精度指向制御技術

スペース天文ミッションでは一般的に高い指向制御技術が必要である。GREX-PLUS では、分光器スリットへの天体導入のために絶対指向精度 1 秒角、星像ゆらぎを抑制し撮像感度を確保するために指向安定性 0.6 秒角(300 秒間)を要求する。絶対指向精度は標準的な衛星姿勢系のみで達成することはできず、焦点面観測装置から衛星姿勢系に情報提供する指向精度向上が必要となる。また、指向安定性も冷凍機や衛星リアクションホイールなど擾乱源のもとで達成することは一つのチャレンジと言える。これらの技術は汎用性が高く、その獲得は将来的なスペース天文ミッションを支える基盤となる。

低温下での光学性能検証技術

GREX-PLUS 望遠鏡光学系を 50K 未満に冷却した環境で所望の光学性能が得られるか試験検証する技術が必要となる。「あかり」での実績や、SPICA 概念検討をベースに 1.0m 鏡に対応した試験検証方法を検討する。また、高分散分光器光学系は多数の自由曲面鏡を利用する。分光器光学系エンクロージャの温度 20K の環境下での鏡面形状測定技術、アライメント精度測定技術の開発が必要である。

イメージンググレーティングの開発

グレーティング部を高屈折率・高透過率の物質で満たし、実距離より長い光路差を作ること、小さな光学素子で高い波長分解能を実現する「イメージンググレーティング」は、宇宙望遠鏡に適したコンパクトで軽量の高分散分光器を実現するために必須の技術であ

る。開発に成功すれば、GREX-PLUS だけでなく、将来的にスペースでの高分散分光器を開発するための基幹技術となる。

2. 技術的不確定性の大きな技術要素 / Assessment of uncertainties in technologies

擾乱伝達抑制

GREX-PLUS の指向安定性要求を満たすには、バス部に搭載される冷凍機およびリアクションホイールからミッション部への擾乱伝達を抑制する必要がある。まずは擾乱発生源に振動アイソレータを設置し、振幅を 100 分の 1 に落とす必要がある。これを実現する振動アイソレータは実際に開発されているが、GREX-PLUS の条件に合うか検証が必要である。また、ミッション部内での擾乱伝達抑制も課題である。「ひので」で実施された大掛かりな擾乱伝達試験結果を活用しながら、解析で十分に追い込むことができるかが課題となる。

イメージンググレーティングの開発

GREX-PLUS 高分散分光器の波長帯 10 ~ 18 ミクロンで高い透過率を持つ素材として CdZnTe を検討している。想定する性能のグレーティングを製造するには、CdZnTe に対し①高精度な溝加工、中間赤外線波長・極低温での②高い透過率、③屈折率の把握、④高効率の反射防止膜、を実現する必要がある。これまでに、①溝加工の実現性は実証できている。今後、②高い透過率 (吸収係数 $\alpha < 0.01 \text{cm}^{-1}$)、③屈折率測定 (屈折率精度 $\Delta n < 10^{-4}$)、④反射防止コートを実証する必要がある。これらは科研費基盤 S により進捗中である。仮に低温下での吸収係数が要求を満たさない場合、通常のグレーティングを利用することになるが、サイズが約 8 倍となってしまう。また、反射防止コーティングの高効率化ができない可能性も考える必要がある。

3. 既存技術の活用条件 / Assessment of heritages

冷却系に関しては、まず「あかり」による冷凍機と低温光学系のフライト実績がある。また、SPICA 概念検討のヘリテージを活用して GREX-PLUS 熱モデルを構築した。今後、LiteBIRD による冷却系試験技術の活用もある。なお、LiteBIRD の温度 5K に対して GREX-PLUS は温度 50K であり、放射冷却効率は 4 桁高いため、試験検証の難易度は相応に低くなると考えられる。広視野望遠鏡光学系は、WISH 広視野望遠鏡光学系として検討された Korsch タイプ 3 枚鏡光学系をベースにして構築した。広視野カメラは、JWST/NIRCam のヘリテージである HgCdTe 検出器を活用する。高分散分光器光学系は、SPICA/SMI 高分散チャンネル光学系案を直接利用している。高精度指向制御技術に関しては、「ひさき」による観測系からの衛星姿勢系への情報フィードによる指向精度向上アルゴリズムを参考にする。擾乱伝達抑制に関しては、「ひので」による実績があり、その成果を活用する。

9.

想定されるコスト Cost estimate

JAXA 負担分は、打ち上げ費用、衛星システム・望遠鏡・冷却系メーカー概算見積、SPICA 検討時の装置開発費用見積、JAXA 地上局費用、データセンター人件費等を積算し、2020 年度末換算で 400 億円規模（マージン込み）。近年のインフレ、円安による増加分は別途 JAXA 対応の想定。また、宇宙戦略基金（JAXA）の獲得も目指す。他に国内からは、国立天文台から年間 1 億円規模の協力、大型科研費などによる資金獲得（数億円規模）も目指す。国際協力として、数 10 M\$ 規模の NASA 予算を米国 GREX-PLUS チームにより獲得し、広視野カメラ開発提供および分光器検出器提供を受ける。NASA 予算獲得失敗の場合は広視野カメラのみ搭載としたデスコープ案を日本単独で実施する。

10.

技術ヘリテージと技術 開発状況と開発計画 Technical heritages, technology development status and plan

1. 技術ヘリテージと技術開発状況 / Technology heritage, development history and status

項目が多く紙面に収まらないため Appendix 2 にて GREX-PLUS TRL 管理表を示す。現時点ですべての項目で TRL ≥ 3 である。

2. 技術開発計画 / Technology development plans

Appendix 2 GREX-PLUS TRL 管理表にて MDR までの TRL 向上プランを示す。

11.

プロジェクトのリスク管理 Risk Management Plan of the Project

GREX-PLUS ベースライン案は米国 NASA の協力を前提としているため、NASA 予算の獲得に失敗するリスクの管理が必要である。上記 9 で述べたように、NASA 予算が無い場合、広視野カメラのみを搭載するデスコープ案に移行し、国内予算のみで実施する。

12.

天文学コミュニティの 持続可能性に関わる戦略 Strategy for the Sustainability of Astronomical community

現在さまざまな要因によりスペースミッションの長期化、頻度低下が問題となっている。光赤天連では 2006 年の「あかり」以来、スペースミッションの実現が途絶えている。一方、光赤天連に関わる将来のスペースミッションとして、公募型小型計画の JASMINE があり、その後は HiZ-GUNDAM や LOPYUTA が控えている。また、2040 年代には大型国際計画である Habitable World Observatory (HWO) への参加が検討されている。このような中、GREX-PLUS を推進するには地上装置開発グループも含めた光赤天連を挙げた強力な体制が必須。今後、ISAS 宇宙物理学 GDI の推薦を受け、高宇連などと連携してスペース宇宙物理学コミュニティを創設し、それが一体となってこれを推進する体制を構築する。コミュニティとして、JAXA 中型計画規模の宇宙望遠鏡実現の経験値を獲得し、HWO を念頭に 2040 年代以降への技術と経験を継承する。開発を通じた若手天文学者・技術者の人材育成、さまざまなキャリアパスの提示を行なう。ジェンダーバランス・ダイバーシティ改善に向けた具体的方策として、必要とあれば女性限定公募を実施す

る。貴重な取得データを利用したアウトリーチ活動と学部学生教育とすそ野の拡大にも力を注ぐ。

Appendix 1

GREX-PLUS 参加メンバー（2025年12月25日現在） 136名

中核メンバー（17名）

井上昭雄（早稲田大学） 代表、科学検討、望遠鏡、広視野カメラ
山村一誠（宇宙科学研究所） プロジェクト統括、衛星システム、運用計画
鈴木仁研（宇宙科学研究所） 冷却系
金田英宏（名古屋大学） 技術検討全般（望遠鏡、高分散分光器）
本原顕太郎（国立天文台） 望遠鏡、広視野カメラ
和田武彦（国立天文台） 検出器、電気系、高分散分光器
平原靖大（名古屋大学） 高分散分光器、イメージンググレーティング開発
菅原悠馬（早稲田大学） 地上系（観測計画）
江上英一（アリゾナ大学） US チーム代表
播金優一（東京大学） 科学検討（銀河グループ長）
野村英子（国立天文台） 科学検討（星惑星グループ長）
守屋亮（国立天文台） 科学検討（時間軸グループ長）
大内正己（国立天文台 / 東京大学） 科学検討（低金属量銀河、宇宙再電離）
児玉忠恭（東北大学） 科学検討（特に宇宙大規模構造と銀河質量集積史）
山田亨（宇宙科学研究所） 衛星システム（姿勢系）
中川貴雄（宇宙科学研究所 / 東京都市大学） アドバイザー
渡辺伸（宇宙科学研究所） 宇宙物理学 GDI

科学検討メンバー（23名）

大坪貴文（産業医科大学） 太陽系小天体
川島由衣（京都大学） 系外惑星大気
黒川宏之（東京大学） 惑星科学
郷田直輝（国立天文台） 銀河面、銀河中心、位置天文
佐川英夫（京都産業大学） 太陽系惑星大気
下西隆（新潟大学） マゼラン雲
鈴木尚孝（フロリダ州立大学） 超新星
高田昌広（東京大学） 銀河面、時間軸天文学、マイクロレンズ
高見道弘（ASIAA） 星形成領域
但木謙一（北海学園大学） サブミリ波銀河
寺居剛（国立天文台） 太陽系小天体
鳥羽儀樹（立命館大学） 活動銀河核
中島王彦（国立天文台） 極低金属量銀河
長峯健太郎（大阪大学） 銀河形成

野津翔太（東京大学） 原始惑星系円盤
馬場俊介（宇宙科学研究所） 活動銀河核
長谷川靖紘（JPL） 原始惑星系円盤
藤井友香（国立天文台） 系外惑星大気
松浦周二（関西学院大学） 宇宙赤外線背景放射
松尾太郎（大阪大学） 系外惑星大気
松岡良樹（愛媛大学） 高赤方偏移クエーサー
三澤透（信州大学） クエーサー吸収線系
安井千香子（国立天文台） 星形成領域
矢野太平（国立天文台） 銀河面、銀河中心、位置天文

技術検討メンバー（34名）

植田聡史（JAXA） バス部（軌道計画・姿勢制御）
坂井真一郎（宇宙科学研究所） バス部（姿勢制御）
竹内伸介（宇宙科学研究所） バス部・望遠鏡（構造）
橋本樹明（宇宙科学研究所） バス部（姿勢制御）
安田博実（宇宙科学研究所） バス部・望遠鏡（構造）
坂東信尚（宇宙科学研究所） バス部（姿勢制御）
富木淳史（宇宙科学研究所） バス部（通信系）
豊田裕之（宇宙科学研究所） バス部（電源系）
小川博之（宇宙科学研究所） バス部（熱制御）
岩室史英（京都大学） 望遠鏡（光学）
橋ヶ谷武志（京都大学） 望遠鏡（光学）
櫛引洸佑（国立天文台） 望遠鏡、広視野カメラ
木野勝（京都大学） 望遠鏡（光学、試験）
石村康生（早稲田大学） 望遠鏡（構造）
水谷忠均（JAXA） 望遠鏡（構造）
北本和也（JAXA） 望遠鏡（構造）
内田英樹（JAXA） 望遠鏡（構造）
杉田寛之（JAXA） 冷却系
篠崎慶亮（JAXA） 冷却系（冷凍機）
小田切公秀（宇宙科学研究所） 冷却系
小宮山裕（法政大学） 広視野カメラ
大藪進喜（徳島大学） 高分散分光器
松原英雄（宇宙科学研究所） 高分散分光器
國生拓摩（名古屋大学） 高分散分光器
近藤翼（名古屋大学） 高分散分光器
上塚貴文（東京大学） 高分散分光器
小野宜昭（東京大学） 地上系（観測計画）
馬渡健（早稲田大学） 地上系（データ処理）

嶋川里澄（早稲田大学） 地上系（データ処理）
 市川幸平（東北大学） 地上系（データ処理）
 大井渚（北海道情報大学） 地上系（データ処理）
 日下部晴香（東京大学） 地上系（データ処理）
 柏野大地（国立天文台） 地上系（データ処理）
 諸隈佳菜（東京大学） 地上系（データ処理）

US チーム（11 名）

Andre Wong（アリゾナ大学） 広視野カメラ、検出器
 Jarron Leisenring（アリゾナ大学） 広視野カメラ
 Buell Jannuzi（アリゾナ大学） スチュワード天文台長
 Matthew Ashby（スミソニアン天文台） 広視野カメラ
 Giovanni Fazio（スミソニアン天文台） 広視野カメラ
 Gary Melnick（スミソニアン天文台） 広視野カメラ
 Howard Smith（スミソニアン天文台） 広視野カメラ
 Steven Willner（スミソニアン天文台） 広視野カメラ
 Joseph Hora（スミソニアン天文台） 広視野カメラ
 Volker Tolls（スミソニアン天文台） 広視野カメラ
 Randall Smith（スミソニアン天文台） NASA 対応

他一般メンバー 51 名

Appendix 2

GREX-PLUS TRL 管理表 ver.20250325

バス部

サブシステム	技術成熟度(TRL)		TRL の根拠	TRL 向上プラン	技術破綻防止策・バックアッププラン
	現時点	MDR 時点			
構造系	4	4	2023 年度検討において、バス部機器配置案、構造概念設計、熱・構造解析までを行った。製作のための技術的にクリティカルな項目はない。	ベイロード部の構造設計が確定したところで、衛星システムとして構造解析を行い、要すればバス部の構造設計に反映させ、成立性を向上させる。	クリティカルな技術課題はないため、技術破綻のリスクは回避できる。
熱制御系	4	4	過去の衛星でフライト実績のある機器を採用予定。2023 年度検討において、バス部機器配置案、構造概念設計を基に熱解析をおこない、熱計装の概要案を定めた。	ベイロード部の設計が確定したところで、衛星システムとして熱解析を行い、要すればバス部の熱設計に反映させ、成立性を向上させる。	クリティカルな技術課題はないため、技術破綻のリスクは回避できる。
信号処理系	3	4	SOLAR-C で開発を進めている統合 SMU および過去の衛星でフライト実績のある機器を採用予定。技術的にクリティカルな要素はない。	SOLAR-C の開発に従って TRL は向上することを期待する。	クリティカルな技術課題はないため、技術破綻のリスクは回避できる。

電源系	4	4	過去の衛星でフライト実績のある機器を採用予定。技術的にクリティカルな要素はない。	—	クリティカルな技術課題はないため、技術破綻のリスクは回避できる。
姿勢制御系	3	3	過去の衛星でフライト実績のある機器を採用予定。本衛星の要求である、 ・焦点面機器を用いた絶対指向精度向上 ・姿勢安定性要求の達成に対する実現性検討が未了。 「ひさき」で観測系からの姿勢情報入力の実績あり。	2024年度にバス部熱歪による望遠鏡指向変動への影響を評価し、典型的な観測時間300秒間では要求値0.2秒角を満たすことを確認した。今後、衛星システムの結合構造モデルによる振動擾乱解析、搭載予定の姿勢系センサの詳細スペックに基づく姿勢システムとしての最適化と性能評価、運用シナリオへの反映を2026年度にかけて行う予定である。	姿勢制度要求に対する定量的な検討を行い、その結果を運用シナリオに反映することで、リスクを回避する。
通信系	4	4	過去の衛星でフライト実績のある機器を採用予定。技術的にクリティカルな要素はない。	Ka帯の採用を検討することで、地上系も含めた運用成立性の確認を行う。	クリティカルな技術課題はないため、技術破綻のリスクは回避できる。
二次推進系	4	4	過去の衛星でフライト実績のある機器を採用予定。技術的にクリティカルな要素はない。	スラスト配置の検討から運用シナリオの作成を行うことで、衛星システムとしての成立性を高める検討を行う。	クリティカルな技術課題はないため、技術破綻のリスクは回避できる。

ペイロード部 望遠鏡サブシステム

コンポーネント	技術成熟度 (TRL)		TRLの根拠	TRL向上プラン	技術破綻防止策・バックアッププラン
	現時点	MDR時点			
反射鏡(主鏡、副鏡、等)	3	4	鏡材は光学素材として実績のある超熱低膨張ガラスを中心に選定する。常温での光学性能は実証例が多数あるが、冷却状態での性能確認が未了。 ESA/ARIEL用に製作されるΦ1mクラスのアルミ鏡の可能性も並行して検討している。 ARIEL望遠鏡は現在EMまで進んでおり、TRLは4以上。	ガラス鏡の場合は、BBMにより、運用温度での熱ひずみなど光学性能への影響を検証する。 アルミ鏡の場合は、低温下でのアラインメント精度についてスケールモデルによるBBM試験を検討。	鏡材としてガラスとアルミを並行検討している。
支持構造	3	4	打上時の機械環境条件への適応性については、多くの実績があるが、低温冷却時の要求性能達成、軌道上での振動擾乱に対応する剛性要求、総質量が課題である。 主要な材料はアルミ材とCFRPの可能性を検討。異種材料の接合方法に課題がある。	使用する素材の低温測定が不明の場合には、BBMにて測定し、適切に設計に反映させる。	剛性要求緩和に伴う性能劣化に対応した観測プランの検討を行う。
バッフル	4	4	機械環境特性については支持構造に準じる。光学性能(迷光除去性能)については、今後検証。 熱的観点から材料はアルミ材1.5mm厚以上を採用。	望遠鏡システム概念設計で光学設計が固まったら、迷光解析を行い適切なバッフルの設計、配置をおこなう。	光学シミュレーションにより可能性のある光学パスを拾い上げる。

主鏡保持機構	4	4	極低温環境下では「あかり」で実証・評価済み。 常温環境下では、「ひので」等の望遠鏡で実証済み。 ただし、今回の条件（1.0m 鏡、50K 冷却環境下で要求性能達成）については未検証。	過去の実績がある保持方法の場合は、EMにて検証。新規方式の場合、BBM 検証を行い TRL=4 とする。	ガラス鏡の場合は実績のある「あかり」方式をベースとする。 アルミ鏡の場合は ESA/ARIEL の方式を参考にする。
焦点調節機構	3	4	「あかり」で基本的な動作原理は宇宙実証済みであり、同様（焦点距離方向 1 軸）の仕様であれば TRL=6 である。今回、調整する軸数が検討中のため、3 を設定した。	光学系設計案が定まったのち、公差解析を行い、組立誤差、冷却時熱変形を考慮して必要な調整軸数と可動距離を決定する。その後、対応する調整機構の概念設計を進め、要すれば BBM により動作原理実証をおこなう。	・ 調整軸数を最小とする光学設計解の追求。 ・ 1 軸調整のみでの結像性能評価と、それを基にした観測プランの検討。

広視野カメラサブシステム

コンポーネント	技術成熟度 (TRL)		TRL の根拠	TRL 向上プラン	技術破綻防止策・バックアッププラン
	現時点	MDR 時点			
近赤外線検出器	7	7	JWST で実績のある Teledyne 社製 HgCdTe アレイ検出器 HAWAII-2RG (波長 5.3μm カットオフ) を使用する。	—	Teledyne 社からの購入調達のため、技術破綻のリスクはなし。
近赤外線検出器読み出し回路	7	7	JWST で実績のある Teledyne 社製 SIDE CAR/ASIC を使用する。	—	Teledyne 社からの購入調達のため、技術破綻のリスクはなし。
中間赤外線検出器	5	5	NEO Surveyor 用に開発された Teledyne 社製 HgCdTe アレイ検出器 HAWAII-2RG (波長 8μm カットオフ) を使用する。	—	Teledyne 社からの購入調達のため、技術破綻のリスクはなし。
中間赤外線検出器読み出し回路	7	7	JWST で実績のある Teledyne 社製 SIDE CAR/ASIC を使用する。	—	Teledyne 社からの購入調達のため、技術破綻のリスクはなし。
常温電気回路	3	3	WFC の米国貢献により、JWST で実績のある常温電気回路をベースとする。	—	クリティカルな技術課題はないため、技術破綻のリスクは回避できる。
検出器モジュール	3	3	検出器モジュールは、検出器マウントとフィルターマウントから構成される。HgCdTe アレイ検出器 HAWAII-2RG は、焦点面上にタイル状に並べてマウントされる。JWST、Roman Space Telescope も同様の検出器マウントを採用しており、これらの構造を GREX-PLUS の検出器マウントの設計に活用する。	—	クリティカルな技術課題はないため、技術破綻のリスクは回避できる。

フィルター	3	4	「あかり」などで実績のある誘電体多層膜干渉フィルターの適用を想定。	GREX-PLUS で要求されるフィルターの透過率、帯域幅、ブロッキング性能等を満足するようなフィルター設計を行い、その BBM 試作を行う。光学性能に加え、冷却サイクル耐性、減圧耐性、および振動耐性を実証する。	宇宙応用実績のある Si 基材の上に誘電体多層膜を形成すると温度 150 K 以下で Si と多層膜の熱膨張係数の違いによって剥がれが生じ得る。これを回避するため、多層膜との熱膨張係数が近く、かつ波長 2-8 ミクロン帯に透明な基材を選定する必要がある(例: Ge)。早期に試作して評価することが必要。
クライオハーネス	3	4	WISH 計画、EChO 計画および、TAO/SWIMS における HgCdTe アレイ検出器等の信号を伝送するクライオハーネス情報に基づき、概念検討を実施した。冷却係熱数学モデルに組み込み、熱的に問題ないことを確認。	ハーネスに用いる線材のうち、SPICA で測定していない線材 (Brass) の低温温度帯の熱伝導率と比抵抗を実測する。検出器の信号伝送において、ハーネスの最大物理長さを実証する。	クライオハーネスのうち、検出器と SIDECAR/ASIC の間のハーネスは最大物理長さの制約が最も厳しい。信号伝送の観点ではハーネス長が短い程良いが、熱的観点では厳しくなる。Teledyne 社と NDA を締結し該当情報を早急に得る必要がある。

高分散分光器サブシステム

コンポーネント	技術成熟度 (TRL)		TRL の根拠	TRL 向上プラン	技術破綻防止策・バックアッププラン
	現時点	MDR 時点			
イメージングレーティング	3	4	CdZnTe 材への回折格子面を形成する溝加工を実施し、要求を満たすピッチ精度と表面粗さをもつ溝形状を実現した。また、CdZnTe 材の低温光学物性を評価し、イメージングレーティングに要求される低吸収係数を達成できる見通しを得た。	イメージングレーティングに実際適用する CdZnTe 材の吸収係数の高精度な評価を実施し、低吸収係数要求が満たしていることを確認する。平行して、高効率反射防止コーティングの開発を行う。そして、フルサイズの CdZnTe イメージングレーティングを試作し、実際の使用温度での分光性能評価により波長分解能 ~30,000 を実証する。これらの開発を科研費基盤研究 S「中間赤外線高分散分光システムによるスノーライン探査」(PI: 中川) などにより進め、MDR までに TRL=4 (TBC) を達成する。	CdZnTe の低温吸収係数が要求を満たさない場合、通常イメージングを適用する。また、高効率反射防止コーティングが実現できない場合、従来の誘電体多層膜コーティングに切り替える。ただし、前者の場合は分光器のサイズが約 8 倍にも大きくなる、後者の場合は効率低下や極低温冷却によるコーティング剥がれの可能性などのデメリットが生じる。
自由曲面金属鏡	3	4	自由曲面製造用プロセスで球面鏡を試作し、目標の鏡面精度が得られることを実証済。	CGH (Computer Generated Hologram) 干渉計を用いて、極低温における自由曲面鏡の形状測定および、複数の自由曲面鏡の光学アラインメントを確立する。これらの開発を自然科学機構 OPEN MIX LAB 公募研究プログラム「自由曲面鏡を用いた冷却光学系を基盤とした赤外線天文学プラットフォームの構築」(PI: 稲見) などの外部資金を活用して進めていく。MDR までに実施して TRL=4 (TBC) を達成する。	極低温における自由曲面鏡単体もしくは、複数の自由曲面鏡を組み合わせた系における光学性能が要求を満たさない場合、従来の回転対称な光学面鏡を用いることを検討する。ただし、この場合は分光器のサイズが大きくなる。

中間赤外線検出器	4	4	Spitzer, WISE, および JWST に搭載実績のある DRS 社の Si:As (BIB) 検出器を使用する。	—	Si:As (BIB)検出器は赤外線天文衛星の搭載実績を多く有しており、それ自身の技術課題はない。しかし、現時点で天文観測用 Si:As (BIB) 検出器を製造できる企業が米国の DRS 社のみとなっている。2022年時点で同検出器の DRS 社による調達が可能であることを確認したが、今後の調達可能性について DRS 社と密にコンタクトを図る必要がある。平行して、Si:As (BIB) を調達できなくなる場合を想定し、NASA/JPL が所有する JWST/MIRI のスペア
					である Si:As 検出器を入手する可能性および、Teledyne 社 HgCdTe アレイ検出器(波長 18μm カットオフ)の調達可能性を検討していく。
極低温読み出し集積回路	3	4	SPICA/SMI 用に極低温集積回路の低雑音化・低発熱化を目指し、回路を試作して動作温度での性能評価を実施(コンセプト証明)。また、読み出し回路システムの実証試験まで可能な常温電気回路(BBM)や低温バッファアンプも製作済。	読み出し回路システムとして実証するために、試作した極低温集積回路、低温バッファアンプおよび、常温電気回路を接続して性能評価する。さらに極低温集積回路から常温電気回路までの配線長を GREX-PLUS で必要な配線長(〜7m TBD)にしたコンフィギュレーションで性能評価する。これらを MDR までに実施して TRL=4 (TBC) を達成。	GREX-PLUS では SPICA と比較して熱バジェットに余裕があるために、極低温集積回路の発熱要求を緩和できる。極低温集積回路の発熱と雑音は相反する関係にあるため、雑音性能が要求を満たさない場合は発熱増加を許容した回路設計に変更する。
常温電気回路(Data Control Unit)	4	4	SPICA/SMI で常温電気回路(BBM)を製作し、これを極低温読み出し集積回路と組み合わせた動作実証を行った。	—	クリティカルな技術課題はないため、技術破綻のリスクは回避できる。
検出器モジュール	3	4	SPICA/SMI 検出器の熱アニーリング運用でも冷凍機の熱負荷要求を満たす検出器モジュールの熱構造設計を実施した。また、熱アニーリング運用時の熱負荷ピークを緩和する鍵となる熱バッファ材(約 20 K で高い比熱を有する磁性蓄冷材)の構造材としての加工性を実証した。	熱バッファ材の極低温における熱物性(比熱、熱伝導率)を評価する。この結果を用いて、検出器モジュールの熱解析を実施して熱要求に対する成立性を確認する。さらに、検出器モジュールを試作し、その観測運用と熱アニーリング運用を模擬した性能実証を行う。MDR までに TRL=4 (TBC) を達成する。	GREX-PLUS では SPICA と比較して熱バジェットに余裕があるために、熱負荷ピークの上限要求を緩和できる。磁性蓄冷材の極低温における熱物性が設計値よりも悪い場合、一般的な金属から選定する。極低温で高い比熱を得るためにデバイ温度の低い部類の材質を候補とするが、熱容量を確保するために熱バッファ部が大きくなる可能性がある。
クライオハーネス	3	4	SPICA/SMI-HR のクライオハーネス概念検討成果をそのまま GREX-PLUS/HR に活用。	GREX-PLUS 用のクライオハーネスを試作する。このクライオハーネスを極低温集積回路、低温バッファアンプおよび、常温電気回路に接続して信号伝送を実証する。	クリティカルな技術課題はないため、技術破綻のリスクは回避できる。

冷却系サブシステム

コンポーネント	技術成熟度 (TRL)		TRL の根拠	TRL 向上プラン	技術破綻防止策・バックアッププラン
	現時点	MDR 時点			
20K 級 2 段スターリング(ST)冷凍機	4	5	コンプレッサのピストン支持に板バネを導入し、コンプレッサの低擾乱化、高信頼化を図った改良型 2ST 冷凍機を適用する。BBM における冷却性能を実証済。	技術 FL「2K-JT 冷凍機システム総合実証」プログラムにて、改良型 2ST 冷凍機 (EM) の試験を FY2025 に実施する計画であり、TRL=5 を達成する。	板バネ化は BBM にて技術実証済。それ故、この技術破綻のリスクは回避できる。
4K 級 ジュールトムソン(JT)冷凍機	5	5	ASTRO-H/XRISM で実績のある冷凍機をベースラインとする。冷凍機コンプレッサはバス部に設置することをベースラインとしているため、JT 第三熱交換器は直線型を適用。	—	直線型交換器の適用可能性の有無を予め検討しておく。つまり、JT 冷却端温位置、第三熱交換パイプのルーティングおよび、JT パイプの支持や熱シールドに関して具体化する。これをもとに JT 冷凍機系における熱的成立性を確認しておく。
振動 Isolator	3	4	冷凍機振動を受動的に抑制することをベースラインとする。メタルタイプ(形状記憶合金)の振動アイソレータ (Uchida et al. 2022) と VEM (epoxy base Visco Elastic Material) の組み合わせを適用する。	アイソレーションシステムを部分試作し、動作温度帯における伝達特性を評価する。これを MDR までに実施し、アイソレーションシステムとして TRL=4 を達成する。	メタルタイプの振動アイソレータの開発や製造性に困難が生じた場合、技術的に確立しており、かつ多くのフライト実績を有するオイルタイプの振動アイソレータの導入を検討する。ただし、オイルタイプの振動アイソレータはオイル漏れの懸念や伝達特性の温度依存補償のためにメタルタイプに比べて複雑な機構を有している。
冷凍機台座+ラジエター	3	4	GREX-PLUS は、SPICA と同様に、冷凍機台座をバス部側面に設置することをベースラインとする。SPICA では、冷凍機台座と排熱構造の概念検討を実施した。	GREX-PLUS の冷凍機台座における熱構造設計を実施する。設計に基づき冷凍機台座の BBM を試作し、その熱特性等を評価して MDR までに TRL=4 を達成する。	冷凍機台座をバス部側面への設置可能性を早期に見極めておくことが必要不可欠。冷凍機台座自身にクリティカルな技術課題はないが、冷却系全体への影響が生じる。つまり、バス部側面に設置できない場合、設置場所の選定と冷凍機台座の概念検討が必要になる。また、場所によっては断熱放射冷却系の設計変更が必要になる。
断熱放射冷却構造	3	4	概念検討は完了。ただし、軽量 Sunshield の構造および、メインラスと熱シールドとの接合構造の部分試作とその熱的性能評価が必要。	構造の具体化と部分試作による熱性能の実証により、MDR までに TRL=4 を達成する。	メインラスと熱シールドの間を、CTE の違いを吸収しながら機械的に支える構造方式を具体化・確定し、熱構造設計に反映する。

Participation to NASA 6m Large Infrared/
Optical/Ultraviolet Space Telescope:
Habitable Worlds Observatory
NASA 6m 紫外線可視近赤外線望遠鏡 Habitable Worlds
Observatory への参加

0.

概要

Summary

Participation to NASA 6m Large Infrared/ Optical/Ultraviolet Space Telescope: Habitable Worlds Observatory NASA 6m 紫外線可視近赤外線望遠鏡 Habitable Worlds Observatory への参加

Project Category

1. Big projects having large impacts on GOPIRA, typically cost estimate over ~1 Billion JPY (光赤天連に大きな影響を与える、装置・施設の開発を含む大型計画の提案、目安として10億円以上の規模)

Abstract of science goals, objectives, and methods

We propose Japan's participation in the Habitable Worlds Observatory (HWO), NASA's future flagship project, with contributions in instrument development and science review, and will carry out its main scientific goals: 1) search for habitable environments and traces of life in the atmosphere of exoplanets around solar-type stars, and 2) extensive general astrophysics research. This project is an ultra-large space telescope with an aperture of 6 meters in the ultraviolet-visible-near-infrared. It will take advantage of its unprecedented high spatial resolution and sensitivity to directly spectroscopy the atmospheres of about 25 terrestrial planets to determine their composition. This will enable the first detection of life habitats and traces of life on exoplanets and estimate their frequency. It will also be able to detect small, dark structures in the early universe, and its ultraviolet spectroscopic capabilities will enable it to probe the material cycle in galaxies, revealing the history of the formation of galactic structure since the creation of the universe. The high spatial resolution of the instrument will also provide images of solar-system objects as if they were observed by a spacecraft, and will deepen our understanding of the possibility of life on icy satellites. This project will participate in the ultimate mega-mission HWO by contributing Japan's own instruments and scientific investigations to maximize its science, and to develop human resources for world-class research and technological development.

プロジェクトの意義と科学目的・方法の要旨

本計画は、NASAの将来の旗艦計画である超大型宇宙望遠鏡 Habitable Worlds

Observatory (HWO) に、日本が装置開発、科学検討の貢献を持って参加し、その主要科学目標、1) 太陽型星周りの系外惑星の大気において、生命居住環境及び生命の痕跡の探査、2) 広範囲な一般宇宙物理学研究、を遂行する。本計画は、口径 6m の紫外線可視光近赤外線における超大型宇宙望遠鏡である。これまででない高空間分解能・高感度を生かして約 25 個の地球型惑星の大気を直接分光し成分を調べる。これにより、系外惑星で、初めて生命居住環境及び生命の痕跡を発見し、その頻度を見積もる。また、宇宙最初期の暗く小さな構造体まで検出可能で、さらに、紫外線分光能力により銀河内の物質循環を探査可能であり、宇宙創生以来の銀河の構造形成史を解き明かす。また、高空間分解能により太陽系天体を探査機で観測した様な画像が得られ、氷衛星での生命居住可能性の理解を深められる。本計画は、この究極のメガミッション HWO に日本独自の装置及び科学検討で貢献することで参加し、そのサイエンスの最大化を図るとともに、世界レベルの研究、技術開発を担う人材育成を行う。

Principle Investigator

Name: Takahiro Sumi

Affiliation: Osaka University

E-mail address: sumi@ess.sci.osaka-u.ac.jp

プロジェクト代表者

氏名: 住 貴宏

所属: 大阪大学

E-mail アドレス: sumi@ess.sci.osaka-u.ac.jp

Co-investigator and his/her role / プロジェクト共同提案者とその役割

末尾に別紙として添付

Estimate of total cost / 総コストの見積り

20 ~ 40BJPY/200 ~ 400 億円

Estimate of total FTE (Full-Time Equivalent) necessary to accomplish the project / プロジェクト実現に必要な総 FTE (人年) の見積り

TBD

Duration of the project / プロジェクト実施期間

約 30 年

1.

プロジェクトの意義

Science goals of the project

HWO の主要な科学目標は：1) 太陽型星周りの系外惑星の大気において、生命居住環境及び生命の痕跡の探査、2) 広範囲な一般宇宙物理学研究である。

2.

プロジェクトの科学目的 Science goals of the project

本計画のスコープは、日本の参加によって HWO を成功させることである。つまり、本計画の科学的目的は、NASA の HWO 構想のそれと本質的に同じである。他の恒星の周囲に 6,000 個以上の外惑星が見つかるが、系外惑星の性質に関する我々の知識は、軌道、質量、大きさなどに限られている。我々は、ようやく巨大ガス惑星の大気成分を測定できるようになったばかりである。このミッションの目的は、これらの大気測定能力を岩石惑星にまで拡張し、太陽近傍の「pale blue dots」を見つけることである。十分なサンプル・サイズがあれば、居住可能（ハビタブル）な地球のような条件が近傍の惑星で稀なのか一般的なのかを判断し、生命の兆候（バイオシグネチャー：例えば大気中の酸素など）を探索することができる（図 1）。太陽系に最もよく似た惑星系、つまり 太陽型星のハビタブルゾーンを周回する地球サイズの系外惑星の大気中でバイオシグネチャーを発見する。さらに、膨大な種類の系外惑星を観測することで、我々の太陽系を惑星系という広い文脈の中に位置づける比較系外惑星学が可能になる。また、太陽系内の氷衛星などでの生命居住環境を調査する。

他の科学目的は、生命を育む宇宙を生み出した環境とプロセスを理解することである。最も初期の構造の形成から、銀河の合体と進化、星と惑星の詳細な形成メカニズムまでを解明することである。宇宙の誕生と進化を探求することで、物理学のフロンティアを開拓する。HWO が可能にする科学の範囲は広大で、ハッブル望遠鏡で扱われた全てのトピックとそれ以上のトピックを包含している。表 1 は、HWO の科学的可能性の全てを網羅するものではないが、代表的なサイエンスケースの例を示す。

図 1: HWO で観測されると期待される 10 pc、~30 等星の地球型系外惑星のスペクトル (SNR = 8.5)

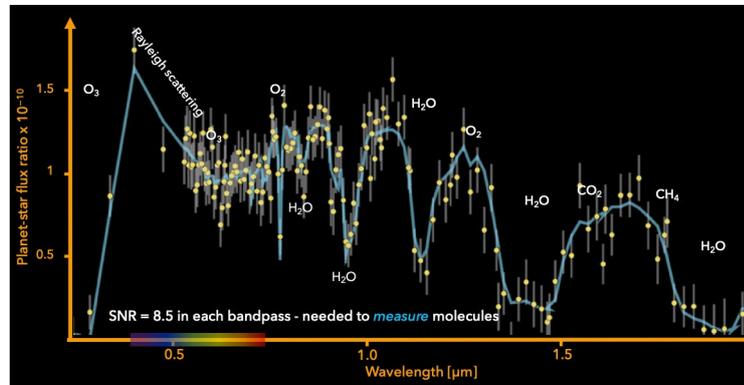


表 1: HWO's Signature Science Cases

- 1- Finding habitable planet candidates
- 2- Searching for biosignatures and confirming habitability
- 3- The search for life in the solar system
- 4- Comparative atmospheres
- 5- The formation of planetary systems
- 6- Small bodies in the solar system
- 7- Connecting the smallest scales across cosmic time
- 8- Constraining dark matter using high precision
- 9- Tracing ionizing light over cosmic time
- 10- The cycles of galactic matter
- 11- The multiscale assembly of galaxies
- 12- Stars as the engines of galactic feedback

3.

プロジェクトの科学的
意義と目標の根拠

Rationale for the
scientific goals and
objectives

1. 科学的意義の根拠：研究の背景、当該分野の研究状況、等 / Scientific background, status of the relevant scientific area, etc.

米国の宇宙物理学の今後 10 年の計画を検討する Decadal Survey Astro2020 の大型衛星計画に提案された 4 計画の内 3 つ (LUVOIR、HabEx、Origins) は、系外生命探査を主目的の一つにしていた。日本からもそれぞれ代表者が検討に参加していた。2021 年 11 月の Astro2020 の結果、旗艦ミッションに関しては、Great Observatories Mission and Technology Maturation Program (GOMTMP) を設置し、そこで「6m 紫外線可視近赤外線望遠鏡」を検討することが推薦された。これは、LUVOIR、HabEx とサイエンスゴールは同じで、中間の規模をもつ計画である。その後、NASA で Habitable Worlds Observatory (HWO) として概念検討が始まり、JAXA 代表者として、住(阪大)、宮崎(NAOJ)が参加した。2025 年 1 月に ISAS/JAXA に HWO study task force(代表: 塩谷) が設置され、日本の貢献案を一元化して、NASA との窓口となり共同開発体制を整えた。

系外惑星の観測的探査は、天文学と惑星科学における最もホットな話題のひとつである。過去 20 年間で、何千もの系外惑星が発見されてきた。太陽のような恒星だけでなく、低質量の赤色矮星にも惑星が存在することも分かってきた。現在の系外惑星観測は、発見だけでなく、その大気を含む様々な特徴を明らかにする「特徴付」も行われるようになってきた。生命を宿す系外惑星の発見とその特徴付は、ますます関心が高まっているが、ハビタブル惑星や温帯惑星の観測はまだ限られている。これは、惑星が小さく、恒星に近いためであり、現在の取り組みは、Trappist-1 系のような間接的な方法で検出しやすい赤色矮星の周りの惑星が中心となっている。赤色矮星の周りにおける小さな惑星は JWST の良いターゲットになるだろうが、太陽のような恒星の周りにおける小さな惑星は近い将来でも難しい。次世代の 30m クラスの望遠鏡は、赤色矮星周りのハビタブル地球を直接観測するが、太陽型星では難しい。しかし、ようやく人類の歴史上初めて、明るい太陽のような恒星の周りを回る、地球のような居住可能な惑星を発見し、その特徴を明らかにすることができる宇宙望遠鏡ミッションを可能にするほど、技術が成熟してきた。

宇宙に関する我々の理解は、洗練されてはいるが不完全である。宇宙膨張の歴史、暗黒物質、放射線、バリオンの間には複雑な相互作用がある。JWST、Euclid、LSST、Roman、そして 2030 年代までに計画されている 20m から 40m の地上望遠鏡は、初期宇宙における宇宙構造の構成要素に関する我々の理解を大幅に向上させる。しかし、これらの望遠鏡ですら、**宇宙の構造形成の理解に最も重要な、 $z > 10$ の最初の銀河形成から現在の最も暗い矮小銀河まで、数 kpc に相当する最も質量の小さい銀河 (恒星質量 $\leq 10^6 M_{\odot}$) には到達しない。**これらのサイズと質量のスケールでは、暗黒物質の密度場とそれに関連するバリオン構造の進化に関する競合するシナリオは、 $AB = 33$ 等級より暗い観測で検証可能であると予測されている。

数十年にわたる多波長観測により、我々は、**銀河がどのようにして大規模構造における小さな揺らぎから始まり、それが自己収縮した暗黒物質ハローへと集合し、そこでガスが積み重なり、星が形成されるのか**についてのシナリオを描いてきた。これらの小さな種

は、時間とともに合体し、より大きな銀河へと階層的に成長する。しかし、このようなシナリオの背後にある物理学的な理解は、まだ遅れている。紫外線領域の撮像と分光能力は重要な役割を果たすが、**HST が退役した後、紫外領域の宇宙望遠鏡はない**。これらこそが、今後 20 年間に HWO が必要な理由である。

日本はこれまで系外惑星の観測に大きく貢献してきた。すばる望遠鏡は、太陽のような恒星の周りを回る巨大ガス惑星の直接撮像を可能にし、若い恒星の周りに惑星が形成される兆候となる原始惑星系円盤のギャップや渦巻き構造を明らかにした。ALMA は現在、数 au の岩石惑星形成領域まで円盤研究を拡張している。MOA や PRIME 望遠鏡を含む世界規模のマイクロレンズネットワークは、銀河系内の、大軌道長半径にある低質量惑星の検出数を増加させている。

すばる望遠鏡はまた、銀河の大規模撮像や現在進行中の銀河の分光サーベイによって、宇宙の理解に貢献している。

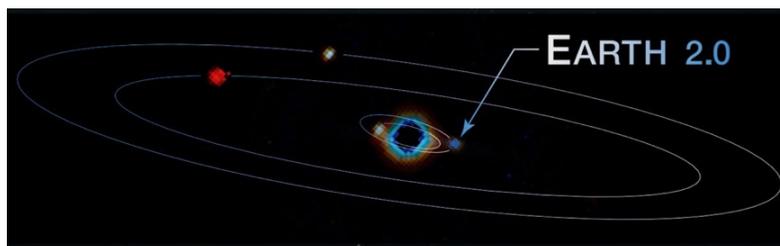
2026 年、NASA の Roman ミッションが打ち上げられる。Roman は Kepler ミッションを補完し、地球質量以下の太陽系外惑星のセンサスを完成させる。**Roman には、HWO に不可欠な高コントラスト撮像の技術実証機としてコロナグラフも搭載される。日本もマイクロレンズ、コロナグラフ、宇宙論で Roman に貢献している。**

日本はまた、ロシアの WSO-UV ミッションに UVSPEX（太陽系外惑星用紫外分光器）で貢献する予定で開発を進めてきた。UVSPEX は、M 型矮星の周囲にある地球に似たハビタブルな系外惑星をターゲットとする。WSO-UV/UVSPEX は地球に似たハビタブル系外惑星周辺の広がった原子状酸素大気を～ 16 pc の距離まで検出することができる。このような広がった原子状酸素大気は、そのような惑星に地球と同様の大気や海洋が存在することを示唆する。国際情勢により WSO-UV/UVSPEX の開発は中断しているが、UVSPEX の開発経験は活かす事ができる。国内では紫外線宇宙望遠鏡計画（LAPYUTA）が公募型小型に提案されている。LAPYUTA は、紫外線観測により、氷衛星の水噴出、系外惑星の大気広がり、銀河の構造形成、重元素合成を解明する。**UVSPEX、LAPYUTA の開発は、HWO に搭載される紫外線分光器／検出器の技術実証となる。**

2. 提案するプロジェクトコンセプトは当該分野になにをもたらそうとするのか / **Goals and objectives: new scientific steps the proposed concept aims to achieve in the science area**

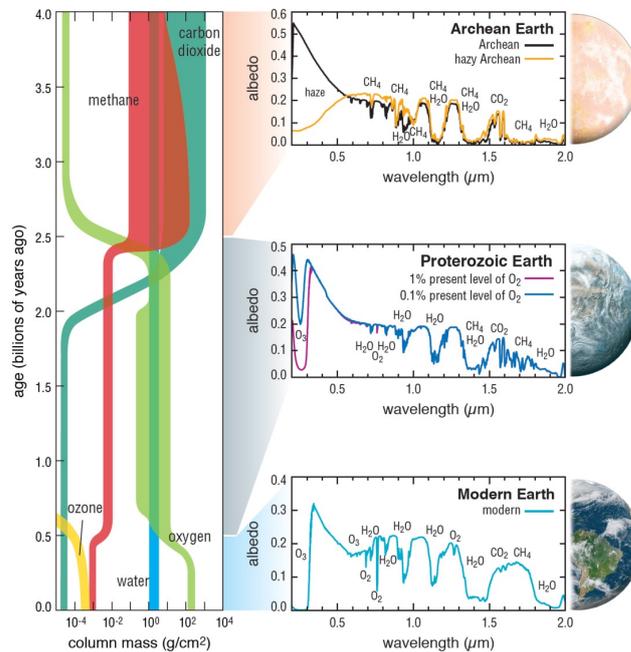
- **HWO は、近傍の太陽のような恒星のハビタブルゾーンにある地球型惑星を発見し、生命の痕跡を初めて探索する。**この目的は、他のプロジェクトでは達成できない(図 1、2、3)

図 2: HWO で 10 パーセクの距離から見た可視光による太陽系のシミュレーション。(NASA/GSFC)



- HWO は近傍の惑星系をマッピングし、それらの多様性を解明する。
- HWO は、紫外から近赤外までの観測範囲を拡大することで、太陽系から銀河、宇宙に至る天体物理系の新たな探査を可能にする。

図 3: HWO は、地球型惑星のセンサスを達成するだけでなく、それらの惑星の大気で生物起源ガスを探査し、居住歴に伴う大気組成の変化によっては、地球以外で生命が存在する最初の兆候を明らかにできる。



3. 提案するプロジェクトコンセプトの強みと過去、現在、未来の他のプロジェクト、研究・探査との関係 / The competing power of the proposed project concept and its relationship to past, current, and future other investigations and projects.

前述したように、HWO は太陽のような恒星のハビタブルゾーンにある地球型惑星を探し出し、生命の痕跡を探ることができる最初のミッションである。この目的は他のプロジェクトでは達成できない。

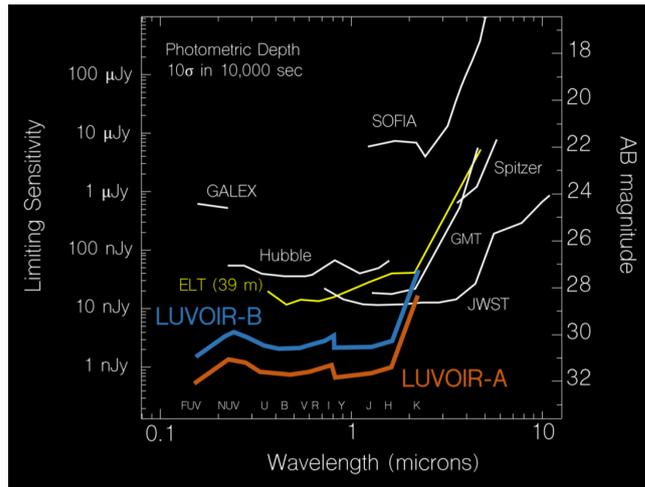
最も成功した系外惑星探査ミッションである Kepler は、何千もの系外惑星候補を検出し、特に太陽のような恒星の周りに系外惑星が普遍的に存在していることを明らかにした。ハビタブルゾーンに岩石惑星が存在する確率は、太陽のような恒星の周りで 10% 程度と推定されている。しかし、それらはすべて地球から遠すぎる (100 pc 以上) ため、その特徴を明らかにすることは不可能である。

現在進行中の TESS ミッションは、Kepler ミッションの問題を補完することができ、ハビタブルゾーンにある小さな惑星を含む系外惑星候補をすでに 1000 個以上検出している。しかし、それらは太陽のような星ではなく、赤色矮星の周りを回っている。これらの惑星のいくつかは、JWST による観測で、水の痕跡を検出することができる。これらは、最終的には地上 30m クラスの望遠鏡で直接撮像できる。しかし、地上から観測可能なコントラストは 10^8 に制限されているため、太陽のような恒星の周りにある惑星は、最も近くにあるケンタウルス座アルファ星を除いて観測できない。ESA のアリエル (ARIEL) のような将来の小型宇宙ミッションには、小さな惑星に対する感度はない。したがって、HWO は上記のミッションとは一線を画す。

一方、WSO-UV は、M 型矮星の周囲にある既知の、あるいは TESS によって発見された地球型ハビタブル惑星を、 $\sim 16\text{pc}$ の距離まで観測できる想定である。しかし、そのような近傍のターゲットの数は ~ 10 個に制限される。HWO は望遠鏡の口径が大きく、短波長 (100nm-) に感度を持つことから大気や海洋の有無に関する手がかりとなる原子状酸素、炭素、窒素の検出能力がさらに拡張される。

HST の退役後は、スペースでの紫外線可視光での高感度観測が途絶えることになるが HWO は、HST 以降の紫外観測の不足を数桁良い感度で補うことで、一般的な天体物理学の研究も幅広く実施する (図 4)。

図 4: 様々な望遠鏡の感度曲線。HWO は LUVOIR-B に相当する。

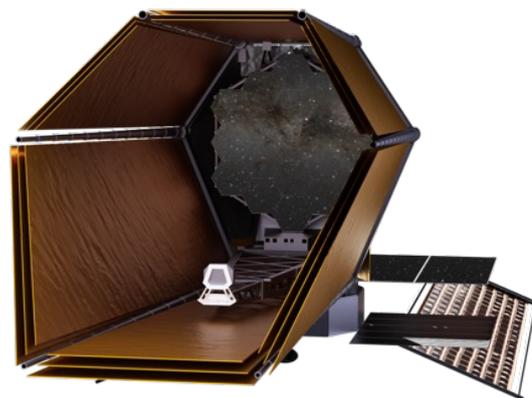


4.

プロジェクトが実施する
研究

Scientific
investigations of the
project

図 5: 検討中の HWO アーキテクチャ案の一つ。六角形 off-axis 分割鏡、内径 6m。



HWO は口径 (内径) 6-8m (LUVOIR-B 口径: 8m/ 内径 6.7m, HabEx 口径 4m) の紫外線可視光近赤外線における軸外し分割望遠鏡で、LUVOIR-B コンセプトに近い。観測装置の仕様はセクション 6 に示す。検討中のデザイン案の一つを図 5 に示す。

HWO は、研究可能な系外惑星のサンプル数と多様性を劇的に増加させる。5 年間のプライムミッションで、近傍 25pc 以内の数百個の太陽型星で生命の兆候を探ることができる約 30 個の地球型系外惑星候補と約 600 個の非居住系系外惑星を発見する。そして 約 25 個のハビタブルな地球型惑星の大気を直接分光し成分を調べ生命の痕跡を探る。

れにより、系外惑星で、初めて生命居住環境及び生命の痕跡を発見し、その頻度を見積もる。 HWO はまた、太陽系天体を探査機なみの解像度で観測する (図 6)。

図 6 : HWO による木星の衛星エウロパの表面とブルームの画像。



その感度と空間分解能は、超暗天体と超遠方天体への扉を開き、あらゆる種類の銀河の詳細な観測を可能にし、銀河がどのように進化するかを理解する。高い角度分解能 (500nm で <16mas) で 33 等までの天体を検出する能力を持つ HWO は、 $z \sim 2$ において $10^{-3} M_{\text{sun}}$ の矮小銀河 (139 時間の観測で S/N=5 を想定) のような最も小さく質量の軽い銀河を数えることによって、銀河と暗黒物質を関連づけることができる。

高空間分解能撮像装置 High Resolution Imager (HRI) は、その広い視野により、銀河の最も小さな構成要素を観測できる。UV Multi-Object Spectrograph (UVMOS) のユニークで強力な紫外線多天体観測は、銀河進化を考える上で重要な、円盤と Circumgalactic medium (CGM) 間のガスの流れをマッピングする能力を一変させる。日本のコミュニティからの貢献として、装置の一つ、もしくは2つの開発を視野に検討しており、現在は、以下の様なキー技術の要素開発を行っている段階である。

- 近赤外線コロナグラフ装置：コロナグラフのマスク、偏光素子は、すばる / HiCIAO、Roman CGI のヘリテージを活用できる。スペースコロナグラフ技術開発のため、いくつかの実験室テストベッドが国内に建設済み / 建設中である。近赤外では可視光より小さな Inner working Angle (IWA) が必要である。これらのテストベッドでは、フォトリック結晶 6 次位相マスク (IWA $\sim 2-3 \lambda / D$) や瞳面アボダイザ、独自の波面センシング / ダークホール制御法などを開発している。さらに、一次元回折限界コロナグラフは、4 次のヌルを非常に小さな IWA ($\sim 1 \lambda / D$) で実現でき、連星周りの惑星も観測できる。また、すばる / SCEXAO を on-sky、室内テストベッドとし、その波面補償技術を用いて、上記マスク、光集積回路 photonic nulling chip (IWA $\sim 0.5 \lambda / D$) の実証を行う。
- UV Integral Field Spectrograph (IFS) with High Resolution Spectrograph (HRS) mode : JAXA の HISAKI 衛星やロシア WSO-UV 紫外線宇宙望遠鏡搭載機器、さらに現在提案中の紫外線衛星 LOPYUTA の開発メンバーが、その経験を活かし HWO 用の紫外線検出器 (Tapered MCP)、回折格子 (ブレード型トロイダル回折格子)、イメージライザー、および鏡面コーティングを開発しており、紫外線面分光器 (UV-IFS) の装置設計を進めている。また、この IFS を波長分解能 10 万程度の高分散分光器 (HRS) と組み合わせた装置パッケージを検討して

いる。

- 地上局での Ka バンドでダウンリンク：Roman 用に美笹局（54m）に開発した Ka-band（26.5GHz）受信機を活用する。
- データ処理パイプラインとサイエンスの開発

5.

スケジュール Schedule

1. 大まかなスケジュール / Rough schedule

2023-2029 GOMTMP (概念検討、技術実証フェーズ, pre-Phase A)
2029.6 Independent Technical Review
2029.10 Mission Concept Review (MCR)
2030- Phase A Concept & Technology Development
Phase B Preliminary Design and Technology Completion
Phase C Final Design and Fabrication
2040 Phase D System Assembly, Integration and Test, Launch
Mission duration: 5 years (prime) , 10 years (extension) , 25 years (with service mission)

2. 開発スケジュールの科学成果への影響 / Schedule impact on science

- 提案された観測を達成できる他のプロジェクトはないため、開発の遅延は、本計画の系外惑星科学の目標には影響しない。
- HWO は 2029 年に pre-phase A を終え MCR を行う。主要技術が MCR までに準備できなければ、スケジュールとコストの両方に大きな影響が出る。

6.

プロジェクトで使用する 装置

Instrumentation of the project

1. 実施する実験・観測・分析などを実現する技術 / Description of the technology to realize the investigations

HWO の革命的な科学目標は、技術的に挑戦的な感度と空間分解能を必要とし、大口径、分割鏡、展開式、超高安定、500nm での回折限界、遠紫外から近赤外までの宇宙のあらゆる温度と密度の物質の情報を読み取るのに十分な広帯域の波長（100-2500nm）に感度を持つ望遠鏡と観測（分光・撮像）装置が要求される。地球型系外惑星を高コントラストで観測するために波面補償を行う可変形鏡を組み込んだ波面補償を行う高性能コロナグラフも必要である。

2. 実施する実験・観測・分析などを実現する方法・技術について、他の技術、および類似技術との比較 / Comparisons of the selected technology with other technologies

- なぜ直接観測なのか？居住可能な惑星の表面と表面付近の環境を理解することは、

その惑星が液体の水を維持できるかどうかを判別する鍵である。惑星表面の反射光の直接観測は、惑星の大気から地表までの短い視線を提供する。このため、地表付近の物理的条件、水蒸気量、生物起源ガス（高高度では豊富に存在しないガスも含む）の重要な測定が可能になる。透過分光法（別名トランジット分光法）では、太陽のような恒星の周りにある地球のような惑星の表面付近の大気による減光量が少ないため、検出は困難である。

●**なぜ宇宙？なぜ NUV-Optical-NIR 波長なのか？** HWO は、太陽のような恒星の周りにある地球のような系外惑星を直接観測するために必要な高いコントラストを達成するだけでなく、地上観測と比較してもう一つの利点がある。これらのガスには、ハビタブルな地表環境を示す分子標識（水蒸気、CO₂、CH₄ など）や生物標識（O₂、O₃、CH₄ など）が含まれる。これらすべての分子の吸収特性は、NUV、光学、NIR の波長領域にある。紫外線は大気吸収のため地上では観測できない。

●**なぜそんなに大きいのか？** 大口径は、大きな集光面積、高い空間分解能、小さなインナーワーキングアングル（すべて口径の関数）の組み合わせによって、より多くの系外惑星を発見し、研究することを可能にする。また、これらの特徴により、近紫外から近赤外までのスペクトルの特徴が明らかになる。さらに、惑星観測に必要な時間を短縮し、最も近いターゲットで惑星表面の不均一性（大陸や海など）をマッピングするのに必要な、複数回の短時間露光を可能にする。

3. 提案装置の主要な機能 / Major functions of the proposed instrument

HWO の設計は、より高コントラスト、高感度、高解像度の必要性によって推進されている。現在までに、口径（内径）6m（外径：7.2m）から 8m（外径：10m）の軸外し分割望遠鏡で、高安定性を実現できるよう検討されている。HWO は 5 つの観測機器ベイを備えている。ペイロードは、光学望遠鏡アセンブリ（OTA）、観測装置モジュール、およびペイロード・アーティキュレーション・システムから構成される。宇宙機は、宇宙機バスと微小隕石からの防護と熱的安定性を確保するための多層構造の展開式バレルからなる（図 5）。

HWO は、安定した運用環境を提供する太陽 - 地球第二ラグランジュ点（SEL2）で運用される。望遠鏡は大きな field-of-regard（太陽に対して 45° まで）を持ち、タイムクリティカルな観測を容易にし、一般的に観測スケジュールの効率を向上させる。最大追尾速度は JWST の 2 倍で、太陽に近い太陽系天体の観測を可能にする。主要ミッションの寿命は 5 年で、搭載される消耗品（推進剤など）は 10 年、サービス不可能なコンポーネント（ミラーセグメントなど）の寿命目標は 25 年である。

4 つのベースライン装置の主な機能は以下に示す（表 2 に要約）。5 つ目の装置は、今後検討されるが、現在までに提案されている装置の一つ **POLLUX も以下に示す。**

1. High-Resolution Imager (HRI) : 広視野撮像カメラ : 220-1000nm をカバーする NUV- 可視チャンネル (UVIS) および 1000-2200nm をカバーする NIR チャンネル。視野は 3' × 2' で両チャンネル同時撮像を検討。60 種のフィルターおよび grism。超高精度アストロメトリモード (~0.3 μ m)。

2. **Coronagraph:** 系外惑星直接観測用コロナグラフ。可視光 (450-1000 nm)、近赤外線 (1000-1700 nm) チャンネルがベースライン。NUV (200-525 nm) チャンネルはオプションで、高コントラストの撮像のみ可能で、有効なスペクトル分解能は $R \approx 6$ で、強く広いオゾン吸収の検出や雲・ヘイズ散乱勾配の特徴付けに十分である。光学チャンネルには、760nm の狭い O₂ 吸収帯の研究に最適な $R=140$ の撮像カメラと Integral field spectrograph (IFS) を搭載。NIR チャンネルには、広い分子吸収帯 (CH₄ など) を研究するための $R=40-70$ の IFS と、CO₂ を検出するための $R=200$ の点光源分光器等を検討。

3. UV Multi-Object Spectrograph (MOS) : 広い温度範囲 (10 数 K から 10K) と密度のガスを効率的に研究することを主な目的としている。FUV 多天体分光器 (MOS)、NUV/VIS MOS、FUV イメージャの 3 つのチャンネルがある。比較的高い装置スループットと HST を凌ぐ収集面積を組み合わせることで、HST の紫外分光器より 30-300 倍暗い天体に到達することができる。

4. **UV Integral Field Spectrograph (IFS) with High Resolution Spectrograph (HRS) mode:** 紫外線面分光による、太陽系天体 (木星や土星の衛星、火星大気など)、銀河周囲ガス (CGM) のガス、バリオン循環、星形成領域・H II 領域の物理、近傍銀河・低金属量系の内部構造、初期宇宙のガス観測による再電離の解明など。IFS の空間分解能 0.04", 視野 3.2"x3.2", 波長分解能は $R \sim 5000$ である。また、高分散分光器は点源を対象としており、波長分解能 $R \sim 120,000$ を想定して設計検討を進めている。

5. **POLLUX:** 紫外分光偏光計。ESA によって研究・設計され、欧州宇宙センター (CNES) のリーダーシップと支援を受けた。100-400nm (90-400nm がゴール) の高分解能 ($R=120,000$) 点光源スペクトルを提供する。直線偏光 + 円偏光と無偏光の観測モードがある。POLLUX は LUVOIR-A 専用に設計されたが、HWO にも提案を検討中。

表 2: HWO の 4 つのベースライン装置の仕様とその他の装置の例 (POLLUX)。

Name	Function	FOV	Bandpass (nm)	Spectral resolution	note
Coronagraph	Ultra-high contrast coronagraph (10^{-10})	3.5-30 λ / D	450-1700	Vis $R=140$, NIR $R=40, 200$	Integral field spectrographs
High-Resolution Imager (HRI)	UV/Vis and NIR imaging	2' x 3'	200-2200	60 filters, low res grism	high precision astrometry mode
UV-MOS	Far-UV imager, multi-object spectrograph	2' x 2'	90-700	500 $\leq R \leq$ 60,000	Microshutter array: 4x420x840
UV-IFS/HRS	UV Integral Field Spectrograph	IFS: 3.2"x3.2" "	IFS: 94-174 HRS: 100-180	IFS: $R=5000$ HRS: $R=120,000$	High Resolution Spectrograph mode
POLLUX	Far-UV spectropolarimeter	Point source	100-400	$R = 120,000$	Circular + linear polarization

7.

プロジェクトで獲得するデータ

Data to be obtained

- HRI: UVIS モード : 0.4 ギガピクセル撮像データ (8k x 8k CMOS ベース検出器 6 個)。NIR model: 4k x 4k HgCdTe 検出器の 2 x 3 アレイ。ELT では困難な 200-800 nm の波長領域のトランシット分光のための低分解能グリズムスペクトル。

- Coronagraph: 系外惑星探査のための高コントラスト直接観測装置 (IWA: $0.5\text{-}3.5 \lambda / D$ 、波長 $450\text{-}1700\text{nm}$)。また、可視域では $R=140$ 、近赤外域では $R=40\text{-}200$ の直接分光を行い、バイオシグネチャーを探索する。
- UV-MOS: 遠紫外線画像と $4x420x840$ の同時分光データ、Microshutter による波長 $90\text{-}700\text{nm}$ で $R=500\text{-}60,000$ の紫外線スペクトル、エウロパからの Ly- α 放出、オリオン星形成領域の 5 つの地域にある年齢の異なる多数の円盤の分光サーベイ等。
- UV-IFS/HRS: FUV-IFS については 120mm 角、チャンネルピッチ $15\mu\text{m}$ の MCP を 2 つ用い、1 枚あたり 8000×8000 画素相当のデータを取得し、 $3.2'' \times 3.2''$ の領域について、分解能 $0.04''$ ($0.02''/\text{pix}$) かつ、波長分解能 $R\sim 5000$ のデータを取得する。これにより氷衛星からの物質噴出現象などを高空間分解能で捉え、またその時間変動を明らかにする。FUV 領域 ($94\text{-}174\text{nm}$) と NUV 領域で光路を分け、異なる検出器を用いる。NUV の仕様について海外・国内の研究者と検討を進めている。HRS は点源に対し FUV では $100\text{-}180\text{nm}$ 、NUV は $170\text{-}340\text{nm}$ 程度の波長範囲において波長分解能 $R\sim 120,000$ のスペクトルを得る。
- POLLUX: $100\text{-}400\text{nm}$ (ストレッチゴールは $90\text{-}400\text{nm}$) の高分解能 ($R=120,000$) 点光源スペクトル。直線偏光 + 円偏光と無偏光の観測モードを含む。これにより、星間ガスやダストから星が形成される銀河や、星間円盤の中で惑星が形成される銀河から、星間物質や銀河間物質 (ISM や IGM) への様々なフィードバック、活動銀河核 (AGN) からのフィードバックまで、宇宙時間のバリオンサイクルを追跡することができる。

8.

主要技術要素

Key technologies

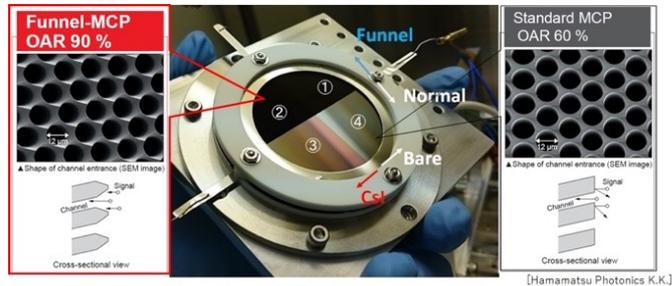
1. 主要技術要素と開発が必要な技術要素 / Key technologies and those requiring further investment and development

高コントラスト装置技術には、コロナグラフ構造、可変鏡、波面検出、低ノイズ検出器など、いくつかの重要なコンポーネントが含まれる。HWO の最も技術的に困難な観測目標は、太陽型星周りの地球型惑星を直接観測するために必要な強力な主星光の抑制である (生のコントラストは 10^{-10})。コロナグラフ構造は、アポダイズ瞳リヨーコロナグラフ (APLC)、ボルテックスコアングラフ (VC)、位相誘起振幅アポダイゼーション (PIAA)、シェイプドピュービルコロナグラフ (SPC)、ハイブリッドリヨーコロナグラフ (HLC)、位相マスクコロナグラフ、ヌリングコロナグラフなど、いくつかの方法が世界中で開発されている。国内でも、**1次元回折限界コロナグラフ、フォトリソグラフィ6次元位相マスク、光集積回路 (photonic nulling chip)** などの開発を行っている。**1次元回折限界コロナグラフおよび光集積回路**は、全く新しいコンセプトなため、技術実証でTRLを上げる必要がある。

UV-MOS、UV-IFS における主要な技術的課題の 1 つは、 $120\text{mm} \times 120\text{mm}$ の大判 MCP 検出器である。**テーパ型 MCP (図 7)** をこのような大型サイズにすることの可能性を探る必要がある。また、我々の CMOS 読み出し技術を応用するためには、複数のテーパ付き光ファイバプレートと CMOS センサーを備えた大型 MCP 検出器を開発する必要がある。UV-IFS 用イメージスライサー、グレーティング基板は既存技術

で要求を達成できる見込みであるが、開発中の短波長対応の紫外線コーティングと組み合わせた性能実証が必要である。これらの技術については LOPYUTA での開発を活かすことができる。

図 7：ファンネル型 MCP



2. 技術的不確定性の大きな技術要素 / Assessment of uncertainties in technologies

近赤外線コロナグラフは、 $IWA \sim 1 \lambda / D$ で有限のバンドパス（例えば 10% や 20%）上で 10^{-10} のオーダーの非常に高いコントラストを達成する必要があり、これは技術的に困難で、不確定性がある。また、コロナグラフは複雑なセグメントミラー望遠鏡の瞳に最適化され、高次のヌル特性を持つ恒星径と機器のジッターにロバストに設計されなければならないが、これも非常に困難で不確定性がある。

上述の MCP の大型化も、現在は 80mm までで、要求される 120mm までの大型化は現状では大型設備があれば実現できる見込みではあるが、不確定性がある。

3. 既存技術の活用条件 / Assessment of heritages

コロナグラフ：Roman のコロナグラフ装置（CGI）開発は、HWO コロナグラフの技術実証である。Roman/CGI には、米国で提案された HLC と SPC の 2 種類のコロナグラフが搭載される予定だが、これらは技術的に堅牢であり、実験室ではすでに 10^{-9} - 10^{-10} オーダーの極めて高いコントラストを達成している。**日本のコミュニティは Roman/CGI の開発に関わってきた。**この経験に基づき、コロナグラフのマスク基盤開発、偏光補償光学系、偏光計の開発、その他の光学部品の供給など、日本は HWO のコロナグラフ装置に貢献できる可能性がある。

紫外線検出機（Tapered MCP）、回折格子、紫外線コーティング技術は、ロシアの WSO-UV ミッションのための紫外分光器の開発とひさき衛星のヘリテージを活用できる。また、LOPYUTA と共同で開発を行う。

9.

想定されるコスト
Cost estimate

総額 \$11B (FY2020) (日本貢献分: 255-405 億円)

参照: JWST の装置のコスト: NIRISS (~ \$165M、カナダ)、NIRSpec (~ €170M、ESA)

10.

技術ヘリテージと技術
開発状況と開発計画

Technical heritages,
technology
development status
and plan

1. 技術ヘリテージと技術開発状況 / Technology heritage, development history and status

(LUVOIR TRL, USA)	(2019)
Coronagraph	TRL=3-4
Deformable mirror	TRL=4-5
Wavefront Sensing	TRL=3-6
UV/VIS Low-noise Detector	TRL=3-4
NIR Low-noise Detector	TRL=4-5
Ultra-stable segmented telescope technology	TRL=3-5
Ultraviolet instrumentation technology	TRL=3-6
(Key technology in Japan)	(2023)
One-dimensional coronagraph (no fiber) :	TRL = 4
One-dimensional coronagraph (with fiber for broadband) :	TRL = 2
Densified pupil spectrograph:	TRL = 4
Funnel MCP	TRL= 4-5
UV coating	TRL=4
MCP coupled with CMOS	TRL=4
UV Grating	TRL=4
Photonic-crystal coronagraphic masks:	TRL =3
Shaped pupils for enhancing coronagraphic performance:	TRL=3
Optical module towards multi-wavelength dark holes:	TRL=3

根拠 :

- 地上からの分割鏡技術 (TMT) とジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST)
- 地上からのコロナグラフ開発と Roman/CGI
- サブオービタルペイロード、スモールサット、ひさき衛星を通じて開発された UV 機器とミラーコーティング技術。
- 室内テストベッドでのコロナグラフマスク実証。すばる /SCEXAO による on-sky およびテストベッドとしてのマスク、波面補償技術の実証。

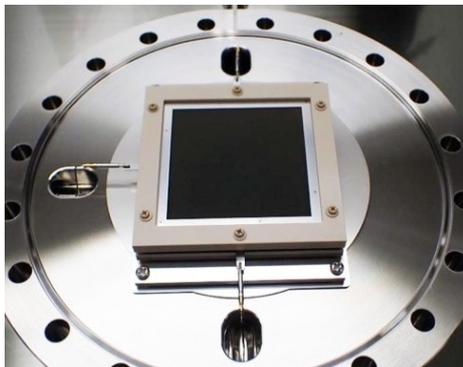
2. 技術開発計画 / Technology development plans

- フォトリック結晶 6 次位相マスクおよび関連する要素技術** : スペースコロナグラフに向けた高コントラストイメージング技術開発のため、いくつかの実験室テストベッドが日本国内に建設済み/建設中である。これらのテストベッドでは、フォトリック結晶 6 次位相マスクや瞳面アポダイザなどのコロナグラフ光学デバイスや、独自のダークホール制御法や波面センシング法などが開発中である。その後 JPL 等での真空実験を行う。
- 一次元回折限界コロナグラフ**は、狭帯域での実験室実証は完了した。今後、広帯域化と、ファイバーリングと連携しての実験室実証を行い、その後 JPL 等での真空実験を行う。
- 地上局での Ka バンドでダウンリンク** : Roman 用に美笹局 (54m) に Ka-band

(26.5GHz) 受信機を開発済みである。

- **Tapered MCP、UV 回折格子、UV コーティング**：WSO-UV/UVSPEX の検出器にはファンネル MCP 技術が適用され、世界情勢により開発計画は中断されているが、検出器部の EM までは完成している状況である。これらの技術を大型検出器に応用するため、80mm × 80mm のテーパ型 MCP 検出器の、試作を完了しており、2026 年度に 120mmx120mm の MCP 製造設備開発に着手予定である。

図 8：Test model 大面積 (70 mm x 70 mm) ファンネル型 MCP 試作品。



11.

プロジェクトのリスク管理 Risk Management Plan of the Project

本計画は、米国で提案されているメガミッション HWO への参加である。NASA のフラッグシップミッションである Roman に日本が参加するのも同様のアプローチである。HWO は、米国の decadal survey Astro 2020 で 1 位に推薦された大型宇宙ミッション構想だが、2023-2029 年、技術実証フェーズ (GOMTMP) を行い、次の decadal survey Astro2030 および MCR で実行可能かの審査を経て、実行フェーズにはいる。もし、この審査を通過できなければ、中止の可能性があり、リスクとなる。国内外に同種の計画はないので、その場合は、計画を断念せざるを得ない。

12.

天文学コミュニティの 持続可能性に関わる戦略 Strategy for the Sustainability of Astronomical community

系外惑星や銀河の構造形成は、宇宙物理の最重要分野の一つで、多くの観測計画が進んでいる。これらの分野での日本の貢献は、すばる望遠鏡による大規模銀河サーベイ、第二の木星や原始惑星系円盤の直接撮像、MOA 望遠鏡によるマイクロレンズ系外惑星探査などで、世界をリードしており、若手の育成も進んでいる。さらに、Roman 宇宙望遠鏡や TMT への参加でさらなる発展が期待される。今後、惑星は発見から特徴づけの時代になり、特にハビタブル惑星における生命探査が最も注目を集めている。本計画は、太陽型星周りの地球型惑星で初めて生命探査をする世界で唯一の超大型計画に日本が参加する。日本の光赤外線における衛星計画は、欧米に比べて大きく遅れており、規模も小さく機会も少ない。赤外線衛星「あかり」以後、日本の衛星はない。世界レベルの研究、技術開発とそれらを担う人材育成を継続的に推進するには、海外衛星計画への参加が必須である。日本は、これまで欧米の HST、JWST、Herschel など大型計画への参加機会を逃してきた。我々は、初めて NASA の旗艦ミッション Roman への参加に成功したが、本

計画で 2040 年代の歴史的計画に参加することは重要である。

●別紙 プロジェクト共同提案者

塩谷 圭吾 (JAXA) : ISAS/HWO TF リーダー

住貴宏 (大阪大学) : PI, START JAXA representative

宮崎 聡 (国立天文台) : START JAXA representative

田村元秀 (ABC、東京大学) : コロナグラフ検討

山田亨 (ISAS/JAXA) : サイエンス検討

亀田真吾 (立教大学) : 紫外線装置開発 (ISAS/HWO TF)

村上 豪 (JAXA) : 紫外線装置開発

松尾太郎 (名古屋大学) : コロナグラフ検討

児玉忠恭 (東北大学) : サイエンス検討

大内 正己 (国立天文台 / 東京大学) : サイエンス検討

本原顕太郎 (国立天文台) : 装置開発

田中 雅臣 (東北大学) : サイエンス検討

松田有一 (国立天文台) : サイエンス検討

津村耕司 (東京都市大学) : サイエンス検討

井上昭雄 (早稲田大学) : サイエンス検討

村上尚史 (ABC) : コロナグラフ検討

増田健人 (大阪大学) : サイエンス検討

成田憲保 (東京大学) : コロナグラフ検討

左近 樹 (東京大学) : サイエンス検討

西川淳 (国立天文台) : コロナグラフ検討

鈴木尚孝 (LBL) : サイエンス検討

播金 優 (東京大学宇宙線研究所) : サイエンス検討

宮武 広直 (名古屋大学 KMI) : サイエンス検討

生駒 大洋 (ABC/ 国立天文台) : コロナグラフ検討

鵜山太智 (NAOJ) : コロナグラフ検討

鈴木大介 (大阪大学) : サイエンス検討

山響 (大阪大学) : コロナグラフ検討

宮崎翔太 (ISAS/JAXA) : コロナグラフ検討

米田謙太 (東京農工大) : コロナグラフ検討

河原創 (ISAS/JAXA) : コロナグラフ検討

川島由依 (理化学研究所) : コロナグラフ検討

葛原昌幸 (ABC) : コロナグラフ検討
橋本淳 (ABC) : コロナグラフ検討
藤井友香 (国立天文台) : コロナグラフ検討
逢澤正嵩 (茨城大学) : コロナグラフ検討
田崎亮 (東京大学) : コロナグラフ検討
大野和正 (国立天文台) : コロナグラフ検討
永井堤 (大阪大学) : コロナグラフ検討
伊藤 哲司 (名古屋大学) : コロナグラフ検討
多田将太郎 (総研大) : コロナグラフ検討
高橋葵 (ISAS/JAXA) : コロナグラフ検討
大宮 正士 (ABC) : コロナグラフ検討
小谷隆行 (ABC) : コロナグラフ検討
細川晃 (総研大) : コロナグラフ検討
平野 照幸 (ABC) : コロナグラフ検討
工藤 智幸 (国立天文台) : コロナグラフ検討
John Livingston (ABC) : コロナグラフ検討
Stevanus Nugroho (ABC) : コロナグラフ検討
原川 紘季 (国立科学博物館) : コロナグラフ検討
寶田 拓也 (ABC) : コロナグラフ検討
堀 安範 (岡山大学) : コロナグラフ検討
小松勇 (ABC) : コロナグラフ検討
日下部 展彦 (ABC) : コロナグラフ検討
浦郷 陸 (ABC) : コロナグラフ検討
神鳥 亮 (ABC) : コロナグラフ検討
Yi Yang (ABC) : コロナグラフ検討
川野元聡 (国立天文台) : 装置開発
美濃和 陽典 (国立天文台) : 装置開発
内海 洋輔 (国立天文台) : 装置開発
土屋史紀 (東北大) : 紫外線装置開発
木村智樹 (東京理科大) : 紫外線装置開発
佐藤 隆雄 (北海道情報大) : 紫外線装置開発
中山陽史 (立教大学) : 紫外線装置開発
山崎典子 (JAXA) : サイエンス検討
土屋史紀 (東北大学) : 紫外線装置開発
青木翔平 (東京大学) : サイエンス検討
秋田谷 洋 (千葉工業大学) : サイエンス検討
古賀亮一 (名古屋市立大学) : サイエンス検討
長谷川靖紘 (JPL/Caltech) : サイエンス検討
小玉 貴則 (ELSI) : サイエンス検討
Olivier Guyon, ハワイ観測所) : コロナグラフ検討

中島 王彦 (国立天文台) : サイエンス検討
伊藤 祐一 (国立天文台) : サイエンス検討
平野 照幸 (ABC) : サイエンス検討

High-z Gamma-Ray Bursts for Unravelling the Dark Ages Mission

ガンマ線バーストを用いた初期宇宙・極限時空探査計画

HiZ-GUNDAM

0.

概要

Summary

High-z Gamma-Ray Bursts for Unravelling the Dark Ages Mission

ガンマ線バーストを用いた初期宇宙・極限時空探査計画
HiZ-GUNDAM

Project Category

1. Big projects having large impacts on GOPIRA, typically cost estimate over ~1 Billion JPY (光赤天連に大きな影響を与える、装置・施設の開発を含む大型計画の提案、目安として10億円以上の規模)

Abstract of science goals, objectives, and methods

Understanding the evolution of the universe, from the formation of the first astronomical objects to its present state, is one of the ultimate goals in astronomy. Elucidating the historical evolution of cosmic reionization and heavy-element synthesis in the early universe stands as one of the most important themes. The first objective of this project is to utilize Gamma-Ray Bursts (GRBs), the brightest light sources in the early universe, as a background light to comprehend the physical conditions of star formation and the surrounding environment during that epoch.

Furthermore, there is a growing momentum towards achieving a comprehensive understanding of the universe by integrating GRBs with new observational tools such as gravitational waves and neutrinos. The second objective of this plan is to strongly promote multi-messenger astronomy. By capturing electromagnetic radiation from multi-messenger objects and understanding the diversity and generality of the phenomena, we aim to elucidate the birth of extreme spacetime around black holes and its subsequent evolution.

To achieve these scientific goals, rapid identification of the locations of high redshift objects, gravitational wave sources, and neutrino sources with high precision is necessary through visible and near-infrared observations, initiated by the detection of sudden phenomena using X-rays. This project will be equipped with two mission instruments: a wide-field X-ray imaging detector designed to detect GRBs with unprecedented sensitivity, and a near-infrared telescope with a 30cm aperture capable of conducting simultaneous five-color photometric observations. While the phenomenon is still bright (within approximately 1.5 hours), spectroscopic observations will be conducted using a larger telescope.

プロジェクトの意義と科学目的・方法の要旨

宇宙最初の天体形成から現在の姿に至るまでの宇宙進化を理解することは、天文学における究極の目標のひとつと言える。特に初期宇宙における宇宙再電離や重元素合成の歴史の変遷を解明することは最重要テーマである。初期宇宙で最も明るい光源である GRB を背景光として利用することで、宇宙最初期の星形成や周辺環境の物理状態を観測的に理解することが、本計画の1つめの目的である。

また、重力波やニュートリノなどの新たな観測手段と連携することで、宇宙を包括的に理解する機運が高まっている。本計画の2つめの目的は、マルチメッセンジャー天文学を強力で推進することである。マルチメッセンジャー天体からの電磁波放射を捉え、現象の多様性や一般性を理解することで、ブラックホール極限時空の誕生とその進化を解明することを目指す。

これらの科学目標を達成するためには、X線による突発現象の発見から、可視光・近赤外線観測による高赤方偏移天体や重力波源・ニュートリノ源の高精度な位置同定を迅速に行う必要がある。本計画では史上最高の感度で GRB を発見するための広視野 X 線撮像検出器と、5色同時測光観測が可能な口径 30cm の近赤外線望遠鏡の2つのミッション機器を搭載する。GRB 発生から1時間以内に候補天体の特性を選別し、その情報を含めたアラートに基づいて、GRB 残光の明るいうちに（約 1.5 時間以内）大型望遠鏡で分光観測を実施する。

Principle Investigator

Name: Daisuke Yonetoku

Affiliation: Kanazawa University

E-mail address: yonetoku@astro.s.kanazawa-u.ac.jp

プロジェクト代表者

氏名: 米徳大輔

所属: 金沢大学

E-mail アドレス: yonetoku@astro.s.kanazawa-u.ac.jp

Co-investigator and his/her role

Akihiro Doi (ISAS/JAXA) : Team Leader

Hideo Matsuhara (ISAS/JAXA) : Team sub Leader

Kohji Tsumura (Tokyo City University) : PI of Near Infrared Telescope

Takanori Sakamoto (Aoyama Gakuin University) : PI of Wide Field X-ray Monitor

プロジェクト共同提案者とその役割

土居 明広 (ISAS/JAXA) : プリプロジェクト候補チーム長

松原 英雄 (IAS/JAXA) : プリプロジェクト候補副チーム長

津村 耕司 (東京都市大学) : 近赤外線望遠鏡 PI

有元 誠 (金沢大学) : 広視野 X 線モニター PI

Estimate of total cost / 総コストの見積り

18 billion JPY / 180 億円

Estimate of total FTE (Full-Time Equivalent) necessary to accomplish the project

約 600 (including staffs, students, technical engineers)

プロジェクト実現に必要な総 FTE (人年) の見積り

約 600 (スタッフ、学生、技術職員を含む)

Duration of the project / プロジェクト実施期間

FY2026 – FY2034

1.

プロジェクトの意義

Science goals of the project

宇宙で最初の星が生まれた環境の歴史の変遷、およびブラックホールの極限時空が生まれる瞬間の物理現象を明らかにする。

2.

プロジェクトの科学目的

Science goals of the project

宇宙最大の爆発現象であるガンマ線バースト (GRB) の観測を通じて 2 つの主要課題に挑戦する。1 つ目は、130 億光年よりも遠方の星・ブラックホール形成率、宇宙再電離、重元素合成の歴史の変遷を理解すること、2 つ目は、重力波・ニュートリノ観測と協調したマルチメッセンジャー天文学を推進し、ブラックホール誕生の瞬間に引き起こされる物理現象を理解し、金・プラチナ・レアメタルなどの重元素の起源を理解する。これにより、天体形成と宇宙進化の観点から「我々の宇宙の多様性」を理解することが科学目的である。

GRB は極めて明るい光源とは言え、発生場所と時刻は予測不可能で、突発的に明るくなり、そして残光は時間の経過とともに (時間にほぼ反比例して) 暗くなってしまふ。これが、GRB を用いた初期宇宙探査の困難な点である。これまでの観測は、人工衛星で GRB を検知した上で、その発生情報をいち早く地上に伝達し、地上の望遠鏡で残光を観測するという戦略が取られている。

【追観測 1】 発見から 1 時間以内は口径 30 cm ~ 1 m 級の小型望遠鏡で残光を発見する

【追観測 2】 数時間から 1 日以内に、口径 2 ~ 4 m 程度の中型望遠鏡で赤方偏移を同定し、明るさや時間変動などの情報を獲得する

【追観測 3】 高赤方偏移や極めて明るい場合など興味深い GRB の場合は、約 1 日後に口径 8 m 級の大型望遠鏡で精密な分光観測を行う

しかしながら、上記の流れでは、大型望遠鏡が観測する頃には残光が暗くなってしまい、良質な分光データを獲得することが困難である。

人工衛星で GRB の発見直後に網羅的に赤方偏移を測定し、多数の GRB の中から真に遠方のターゲットを供給することができれば、圧倒的なクオリティの分光観測データが獲得でき、高精度かつ確定的な宇宙再電離の議論が行えるようになる。また、重力波やニュートリノ事象の発生と同時に電磁波対応天体を発見できれば、新たなブラックホールが形成した直後に織りなす物理現象を理解できるようになる。

現行の Swift, Fermi, Einstein Probe, SVOM 衛星などは突発天体を発見できるが、赤方偏移を測る機能や多波長観測を実施する機能に乏しい。HiZ-GUNDAM はこれらを実現するための観測装置（広視野 X 線観測：EAGLE と可視光・近赤外線追観測：MONSTER）と機能（迅速な赤方偏移測定機能）を兼ね備え、2030 年代前半に実現できる GRB を用いた初期宇宙探査衛星・マルチメッセンジャー天文学衛星として世界で唯一のコンセプトである。本計画により、突発天体観測のスキームに変革をもたらし、2つの主要課題に挑戦することが可能となる。

3.

プロジェクトの科学的意義と目標の根拠

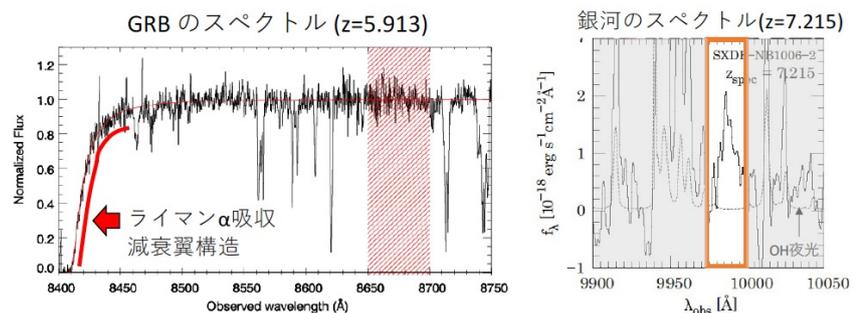
Rationale for the scientific goals and objectives

1. 科学的意義の根拠：研究の背景、当該分野の研究状況、等 / Scientific background, status of the relevant scientific area, etc.

GRB の非常に明るい放射を背景光として利用することで、銀河間物質の中性度（すなわち宇宙再電離）の歴史や、元素固有の吸収線から重元素生成の歴史を調べることができる。これまでの観測の代表例は、すばる望遠鏡による GRB050904 ($z=6.29$) や GRB 130606A ($z=5.913$) の分光観測である。特に後者の例では、水素のライマン α 吸収線の形状（減衰翼構造）を詳細に測定し、 3σ 以上の有意性で銀河間物質中に中性水素が残存していたという証拠を得ている。これは銀河やクェーサーの観測でも成し得なかった世界初の測定であり、本計画のメンバーが推進した。GRB は銀河と比較して、以下の観点で宇宙再電離の研究に適した観測対象と言える。

- (1) GRB 発生直後の残光は銀河と比較して数 1000 倍以上と圧倒的に明るいいため、短時間の観測でも非常に高品質なデータを獲得できる（図 1 参照）。
- (2) 大規模な銀河は長期間にわたって輝いているため銀河間空間を電離してしまう（観測バイアスが存在する）が、突発天体である GRB は爆発より前に銀河間空間へ与える影響はほとんど無いことから、初期宇宙の普遍的な状態を計測できる（無バイアス性の高い計測が可能である）。
- (3) 銀河やクェーサーのスペクトル形状は複雑で、かつ個性があるためにライマン α 吸収線の形状の測定が困難であるが、GRB は単純なベキ型のスペクトルであることから形状を測定しやすい（モデル依存性の少ない計測が可能である）

図 1: 遠方天体のスペクトルの例(左) ガンマ線バースト、(右) 遠方銀河



2. 提案するプロジェクトコンセプトは当該分野になにをもたらそうとするのか / Goals and objectives: new scientific steps the proposed concept aims to achieve in the science area

宇宙創成期や宇宙で最初の天体形成期である「初期宇宙」を科学として理解することは、宇宙物理学・天文学のフロンティアであり、かつ私達の宇宙観・世界観に科学として寄り添う大切なテーマである。これまでの天文学・宇宙物理学で、天体の多様性とそこで繰り広げられる物理現象の理解が進んできた。しかしながら、宇宙で最初の天体形成期については観測的には発展途上である。宇宙を構成する物質の電離状態や金属元素量の変化は、その後の星形成と進化に影響を与え、多様性に富んだ宇宙へと変貌を遂げる。その原点(原因)は初代星に起因するはずで、GRB を明るい光源として利用することで太古の宇宙史の解明に寄与する。

さらに、近年の技術的な進歩により、重力波やニュートリノのような電磁波ではない新たな情報を利用して宇宙現象を包括的に理解する「マルチメッセンジャー天文学」が新たな最重要課題として認識されている。これまでの天文学・宇宙物理学では得られなかった、ブラックホールという極限時空を形成する瞬間や、宇宙線を加速する瞬間に伴う物理現象を捉え、躍動する宇宙像を理解していけるようになる。これまでの天文学・宇宙物理学では、既に存在するブラックホールと降着円盤を観測することでブラックホールを理解してきた。HiZ-GUNDAM はブラックホールが誕生する瞬間を捉えるとともに、様々な突発天体を観測することでブラックホールが成長する過程を解明していく。

3. 提案するプロジェクトコンセプトの強みと過去、現在、未来の他のプロジェクト、研究・探査との関係 / The competing power of the proposed project concept and its relationship to past, current, and future other investigations and projects.

現行および近い将来の GRB 観測衛星は、X 線・ガンマ線による GRB の発見、および X 線や可視光での追観測を行うことで GRB そのものの物理現象を探求している。その中で極めて少数の例ではあるが、赤方偏移が 7 を超える高赤方偏移 GRB が発見されたことから、GRB を利用することで遠方宇宙を探査することが注目されるようになってきた。しかしながら「2. プロジェクトの科学目的」でも示したように、現在の GRB の発見と地上の追観測体制では限界があり、GRB 発生直後に高赤方偏移であることを見極めるシステムが必要である。

HiZ-GUNDAM は宇宙で最も明るい光源である GRB を利用することで、最遠方宇宙を探査する挑戦的な計画である。自らが発見した GRB に対して網羅的な近赤外線追観測を行うことで、数多の GRB の中から高赤方偏移であることを 1 時間以内に通報する。打ち上げは 2030 年代前半を想定しており、この時期に X 線と可視光・近赤外線観測を同時に行う GRB 衛星は世界で唯一のコンセプトである。

欧州宇宙機関の 7 番目の中型クラス (ESA M7) 計画に対して、本計画と同一のコンセプトを持ち、かつ大型の THESEUS 衛星計画が提案されており、2037 年頃実現する可能性がある。そのような中で、HiZ-GUNDAM は小型の計画として推進し、主要な科学成果をいち早く獲得することを目標に機器構成を先鋭化している。

4.

プロジェクトが実施する
研究

Scientific
investigations of the
project

【主要課題1】 GRB を用いた初期宇宙探査

遠方の長時間 GRB からは、宇宙が誕生して 3 億年程度しか経過していない頃（現在から 135 億年ほど前）に起こった天体形成を探り、かつ GRB を明るい光源として利用することで当時の宇宙空間の状態を探る。

【主要課題2】 マルチメッセンジャー天文学（特に重力波天文学）の推進

近傍の短時間 GRB からは、ブラックホールという極限時空が誕生した瞬間にその周辺で起こる物理現象を探る。

2つの主要課題に取り組むために、HiZ-GUNDAM 衛星では以下の流れで観測を行う。

- (1) 高感度の広視野 X 線モニターで GRB などの突発天体を発見する
- (2) 突発天体の方向へ向けて、自律的に衛星姿勢を変更する
- (3) 近赤外線望遠鏡を用いて遠方 GRB や重力波天体を同定する
- (4) 突発天体の発見と観測情報を世界中の天文台に通報する
- (5) 地上・スペースの大型望遠鏡を用いて遠方 GRB や重力波天体を迅速に分光観測する

2つの主要課題に対する科学目標と達成水準について示す。

【主要課題1】 GRB を用いた初期宇宙探査の科学目標と性能要求

目標1-1：初期宇宙の大質量星の生成率と恒星質量ブラックホール生成史の理解

意義のある観測として、130 億光年より遠方（赤方偏移 $z > 7$ ）の GRB を 30 例ほど検出し、その発生率を測定することが考えられる。これまでの GRB 発生率を高赤方偏移到外挿して検討すると、観測感度 F_{limit} ($\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}$)、ミッション期間 T (年)、観測効率 η 、観測視野 Ω (ステラジアン) としたときに、以下の条件を満たせば良い。

$$\left(\frac{T}{3 \text{ years}}\right) \left(\frac{\eta}{0.5}\right) \left(\frac{\Omega}{0.3 \text{ str}}\right) \left(\frac{F_{limit}}{7 \times 10^{-10} \text{ erg}/\text{cm}^2/\text{s}}\right)^{-0.352} > 1$$

上記のパラメータセットをシステム要求として提示している（条件を満たしていれば数値の変更は可能である）。

さらに、限界等級が 20 等級よりも深い感度の近赤外線望遠鏡で網羅的な追観測を行うことで、大多数の GRB の残光を捉えて赤方偏移を測定することが可能となり、星形成理論や進化理論と組み合わせることで、宇宙最初期の大質量星の生成率や恒星質量ブラックホール生成史を議論できるようになる。

目標1-2：初期宇宙における物質の進化（宇宙再電離と金属元素量）の理解

HiZ-GUNDAM 衛星のアラート情報を 1 時間以内に大型望遠鏡施設へ提供し、迅速に高精度の分光観測を行うことで宇宙再電離や金属元素量の歴史の変遷を観測する。明るさが 21 ~ 22 等級の GRB 残光に対して 2 ~ 4 時間程度の分光観測を行うと、高赤方偏移銀河と比べて極めて高品質なデータが獲得でき、水素のライマン α 減衰翼構造から宇宙再電離の完了時期とその進行の様子を捉えることが可能となる。金属元素量については、太陽組成比（水素に対する金属量の比率）の 10^{-4} 倍よりも多い範囲で宇宙の元素量を測

定し、金属元素量の歴史的な変遷を捉える。

【主要課題2】 マルチメッセンジャー天文学（重力波天文学）の科学目標と性能要求

目標2-1：新しく誕生したブラックホールの特性の理解

重力波の発生と同期した GRB を観測することで、相対論的な速度を持ったジェット内部構造を探索する。3年間のミッション期間中に10例程度の重力波天体からの電磁波放射を観測し、高精度な位置情報を大型望遠鏡に提供する。観測情報に基づいて、ジェットのエネルギーや速度分布などの内部構造を測定することで、新しいブラックホールが誕生する際の物理現象とエネルギーの変遷を理解する。これらの実現に必要な性能要求は、目標1-1で掲げたものに包含されるが、短時間 GRB であることを確認できる1秒よりも早い時間分解能で X 線データを記録できる検出器が必要となる。

目標2-2：中性子星を含む連星合体からの物質放出と周辺環境の理解

中性子星連星の合体で撒き散らされる中性子過剰環境の中で「キロノヴァ」と呼ばれる現象が観測され、金・プラチナ・レアメタルのような重元素が合成されることが見出されてきた。HiZ-GUNDAM 衛星の近赤外線観測と大型望遠鏡の分光観測を組み合わせることで、キロノヴァの多様性を捉え、宇宙における重元素量を定量化する。キロノヴァの時間スケールは10日程度と長いことから、軌道数周回のデータを重ね合わせて21等級程度の感度を実現できれば良い（過去の重力波イベント GW170817 が200Mpcの距離で発生した場合を想定）。

5.

**スケジュール
Schedule**

1. 大まかなスケジュール / Rough schedule

図2にプロジェクトが希望するスケジュールを示す。

2026年度：プリプロジェクト候補チームの活動、概念検討、号機選定

2027年度：ミッション定義審査

2028年度：プリプロジェクト化、概念設計、システム定義審査

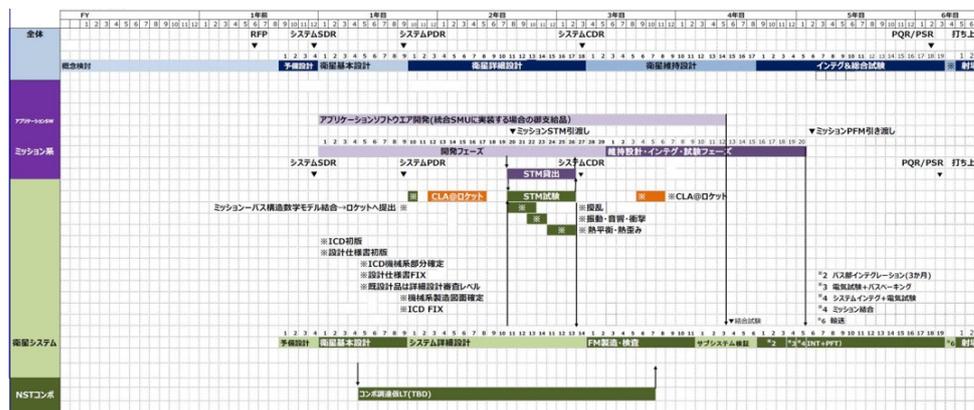
2029年度：JAXA プロジェクト移行、詳細設計、エンジニアリングモデルの開発

2031年度：フライトモデルの製造開始

2034年度：イプシロン S ロケットによる衛星打ち上げ、観測開始、科学成果の創出

2037年度：ノミナルのミッション期間終了（以後は継続運用を希望）

図2：HiZ-GUNDAM マスタースケジュール



2. 開発スケジュールの科学成果への影響 / Schedule impact on science

HiZ-GUNDAM と同一のコンセプトを持つ THESEUS 衛星が実現するまでは、科学的意義は失われない。THESEUS 衛星は ESA M7 に提案されており、選定された場合の実現時期は 2037 年以降である。

2028 年頃には重力波観測施設 LIGO/Virgo/KAGRA がデザイン感度に達する計画である。ニュートリノ観測施設 IceCube もメジャーアップデートが行われる予定で、2030 年代初頭に HiZ-GUNDAM を実現することでマルチメッセンジャー観測にタイムリーに貢献できるようになる。

6.

プロジェクトで使用する
装置

Instrumentation of
the project

1. 実施する実験・観測・分析などを実現する技術 / Description of the technology to realize the investigations

Micro Pore Optics (Lobster Eye Optics) を用いた広視野 X 線モニター (EAGLE) による突発天体の発見と、迅速な姿勢変更後の近赤外線望遠鏡 (MONSTER) による 5 バンド同時測光観測を組み合わせた追観測を行う。

2. 実施する実験・観測・分析などを実現する方法・技術について、他の技術、および類似技術との比較 / Comparisons of the selected technology with other technologies

従来の X 線突発天体の監視では、符号化マスクを用いた方式が用いられてきた。この方式は比較的安価に構成できる反面、バックグラウンドの影響を強く受けることから観測感度には限界がある。HiZ-GUNDAM では微細加工技術を用いた Micro Pore Optics と呼ばれる X 線結像光学系と、その焦点面に pnCCD 撮像検出器を配置する案を採用することで、30 倍以上も観測感度を改善することが可能となる。

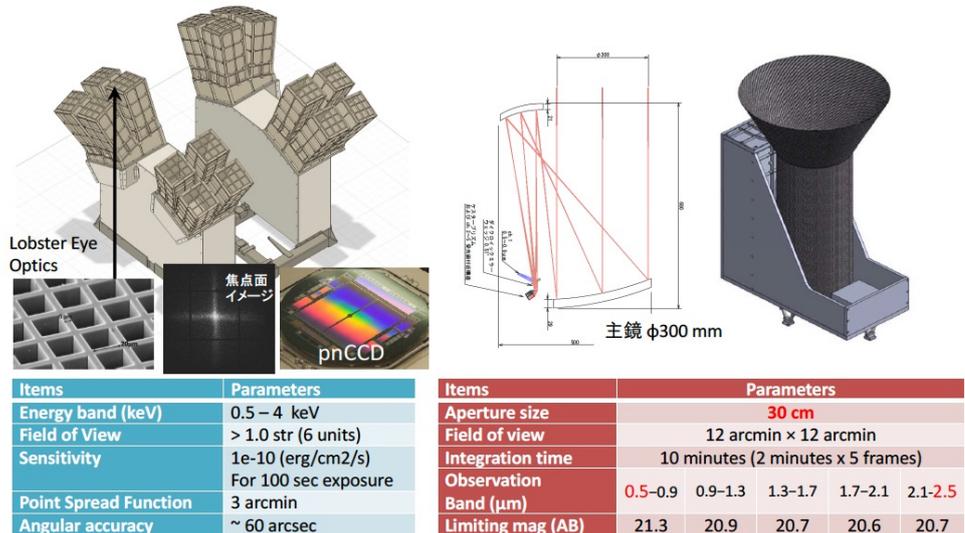
GRB の赤方偏移の測定には、可視光から近赤外線にわたる複数の波長帯で測光観測する必要がある。フィルターホイールを用いて 1 バンドずつ観測を行うことが一般的であるが、GRB の残光は急激な時間変動を伴うことから同時測光が適切である。HiZ-GUNDAM では、ダイクロミックミラーで可視光と近赤外線を分割した上で、ケスタープリズムと呼ばれる光学素子を用いて近赤外線を 4 つの波長帯に分割し、1 つの焦点面検出器で観測する方法を採用する。これにより可視光と合わせて 5 つの波長帯で同時に観測することで赤方偏移を $6 < z < 14$ の範囲で測定可能となる。それよりも遠方の $14 < z < 20$ の GRB に対しては、赤方偏移の測定はできないものの、極めて遠方である可能性をコミュニティへ通達できる。

3. 提案装置の主要な機能 / Major functions of the proposed instrument

EAGLE で用いる Micro Pore Optics は、X 線天体が「十字型」に結像する性質を持ち、その重心座標を求めることで天体の方向を同定する。結像光学系であるため、数 100 秒間はバックグラウンドの影響を受けない観測が行える。焦点面には XMM-Newton 衛星や SRG 衛星で採用された pnCCD を用いて、早い読み出し速度を実現する (図 3 左)。

MONSTER は口径 30cm のオフセット光学系を採用することで、迷光除去性能を高めている。波長 $2.5 \mu\text{m}$ までの高感度な観測を実現するために、鏡・筐体などを 200K 以下に冷却する。これにより、近赤外線帯域では、口径が 3~4m の地上望遠鏡と同程度の観測感度を実現できるようになる。また、ケスタープリズムを導入することで同一視野を波長 4 バンドに分割し、1つの焦点面検出器で観測できるようになる (図 3 右)。

図 3: ミッション機器の外観および基本性能



7.

プロジェクトで獲得するデータ

Data to be obtained

HiZ-GUNDAM 衛星で取得するデータを以下に示す。

広視野 X 線モニター (EAGLE サイエンスデータ)

(1-1) 突発天体発見データ

- ・オンボードで突発天体の発生時刻・発生方向を同定し、衛星姿勢変更に用いる
- ・科学データとして取得し、データ解析に用いる

(1-2) モニターデータ

- ・長時間にわたって変動する天体を地上解析で発見する

(1) 近赤外線望遠鏡 (MONSTER サイエンスデータ)

(2-1) 突発天体追観測データ

- ・オンボードで測光解析を行い、変動する光学対応天体を同定する

(2-2) モニターデータ

- ・突発天体監視時に取得可能なデータ

(2) アラートデータ (突発天体発生時に衛星から地上へ迅速に転送されるデータ)

(3-1) X 線アラートデータ

- ・突発天体の発生直後に世界中の観測者へ通報する

(3-2) 近赤外線アラートデータ

- ・オンボード測光から赤方偏移を測定し、大型望遠鏡による追観測へつなげる

観測の流れは、(1-1)・(3-1) → 衛星姿勢変更 → (2-1)・(3-2) → 大型望遠鏡追観測 となる。

(1-2) と (2-2) は副次的なデータであり、可能な範囲で取得する。

8.

主要技術要素 Key technologies

1. 主要技術要素と開発が必要な技術要素 / Key technologies and those requiring further investment and development

主要技術要素

- ・ Micro Pore Optics (光学素子ではなく、アレイ化技術)

開発が必要な技術要素

- ・ ケスタープリズム

2. 技術的不確定性の大きな技術要素 / Assessment of uncertainties in technologies

Micro Pore Optics のアレイ化はマイクロアクチュエータを用いた機械調整のみでシステム要求を達成できることは実証済である。調整と検証に時間を要する可能性があるため、体制やスケジュール管理が重要となる。

ケスタープリズムは日本の天文衛星で使われた実績は無いが、地球観測衛星では類似のプリズムが利用されたことがある。実機モデルを製造し、検証することでリスクを回避する。

3. 既存技術の活用条件 / Assessment of heritages

衛星バスは、先行プロジェクトで培われた小型衛星の標準的な衛星バスの技術を踏襲し、フライト実績、開発実績のある既存技術を継続して使用する。既存技術でシステム要求に対応できない部分（例えば、高アジリティ・高安定度の姿勢変更・指向精度など）に対しては、その部分のみ開発または改修を実施する。

ミッション機器については、近赤外線望遠鏡はロケット実験 CIBER-2 のコンセプトに近く、要素技術も共通な点が多い。

9.

想定されるコスト Cost estimate

プロジェクト実行段階 (2026 年度以降) における人工衛星や搭載観測機器の設計・製造・試験および打ち上げ、運用に関連する部分であり、以下のように約 180 億円相当と見積っている (宇宙科学研究所における第三者委員会による検証済)。JAXA の公募型小型計画の経費枠にて実施する。

- ・ 衛星打ち上げおよび関連費用：33.52 億円 (2029 ~ 2030 年度)
- ・ 衛星バスシステム開発費および総合試験費用：73.64 億円 (2026 ~ 2030 年度)
- ・ ミッション機器開発費および単体試験費用：41.25 億円 (2026 ~ 2030 年度)
(広視野 X 線撮像検出器：21.29 億円、近赤外線望遠鏡：19.96 億円)

- ・衛星運用費および関連費用：2.91 億円（2028～2033 年度）
- ・その他諸経費：1.77 億円
- ・予備費：21.77 億円

10.

技術ヘリテージと技術
開発状況と開発計画

Technical heritages,
technology
development status
and plan

1. 技術ヘリテージと技術開発状況 / Technology heritage, development history and status

【広視野X線モニター EAGLE の準備状況】

EAGLE は、微細加工技術を用いた Micro Pore Optics と呼ばれる X 線結像光学系と、その焦点面に pnCCD 撮像検出器を配置する案を採用する。要素技術としてはいずれも検証済みである。

2022 年度には機器製造メーカーとの概念検討を実施し、システム構成案や開発計画を作成してきた。今後、X 線結像光学系のアラインメント調整の確認を主目的とした検出器ユニットを開発し、性能評価を行った上で衛星搭載品レベルに昇華する必要があるが、技術的に困難な要素は無いと言える。原理実証は済み、BBM の開発・検証段階であるため、観測機器全体としては TRL3～4 となる。

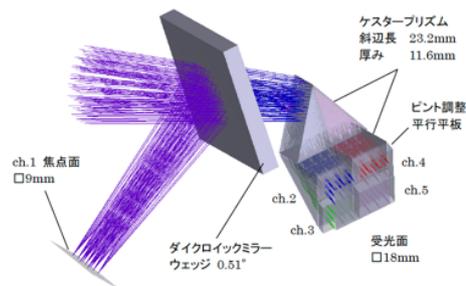
【近赤外線望遠鏡 MONSTER の準備状況】

MONSTER は口径 30cm で、 $2.5 \mu\text{m}$ 帯での要求観測感度を達成するために 200K 以下の冷却望遠鏡とする。打ち上げ実績のあるロケット実験 CIBER-2 で採用した、温度変化に対して相似変形で光学性能を維持する設計を取り入れている。集光光路の中に、ケスタープリズムと呼ばれる波長分割光学素子を導入し、赤外線を 4 つの波長帯に分割する。

可視光と合わせて 5 つの波長帯で同時に観測することで赤方偏移を $6 < z < 14$ の範囲で測定可能となる。それよりも遠方の $14 < z < 20$ の GRB に対しては、赤方偏移の測定はできないものの、極めて遠方である可能性をコミュニティへ通達できる。

これまでに機器製造メーカーとの概念検討を実施してきており、パッシブ冷却で望遠鏡の要求温度 ($< 200 \text{ K}$) および検出器要求温度 ($< 120 \text{ K}$) を実現できることを熱シミュレーションで確認してきた。その実現性は 2026 年度から BBM で実現性を確認するが、特に困難な技術課題は無い。BBM の開発・検証段階であるため、観測機器全体としては TRL3～4 となる。

図6: ケスタープリズムの光学設計解



2. 技術開発計画 / Technology development plans

MONSTER の打ち上げまでの開発計画を図 4 に示す。

新規開発要素となるケスタープリズムの BBM は開発済であり、評価を実施中である。2026 年度にはアサーマル光学系の実証と課題抽出を行うための BBM を製造し、常温におけるアラインメントと低温における結像性能評価を実施し、TRL を高める。以上の BBM 活動は開発メーカーと意見交換を行いながら、チームが主体となって実施する予定である。

図 4：プロジェクト化までの技術開発計画



11.

プロジェクトのリスク管理 Risk Management Plan of the Project

HiZ-GUNDAM は 2026 年度にダウンセクション（号機選定）審査を受ける予定であるため、我々の選定が他国に与える影響が大きいです。HiZ-GUNDAM は 2030 年代前半の打ち上げを目指した計画であるが、スケジュールに適合した予算措置とならない場合は、実現時期を遅らせることで対応する。国際的な競合プロジェクトとして欧州の THESEUS が挙げられるが、その実現時期である 2037 年よりも十分に早く HiZ-GUNDAM を実現すれば、科学的意義は失われません。

国際情勢や大規模な為替変動などの不測の事態によりプロジェクトを断念せざるを得ない状況が発生した場合は、本検討内容や技術を THESEUS 計画もしくはこれから提案される可能性のある類似の計画と共有することで国際貢献を果たしていく。

12.

天文学コミュニティの 持続可能性に関わる戦略 Strategy for the Sustainability of Astronomical community

HiZ-GUNDAM 衛星に搭載する 2 種類の観測装置において、近赤外線望遠鏡の PI、広視野 X 線モニターの Co-I は 40 歳程度の若手研究者であり、シニア研究者によるサポートの下で、最も責任のある立場で計画に参画している。開発体制にはプロジェクトの立ち上げ段階から大学院生・学部生が深く関与し、他機関との交流が頻繁に行われている。

HiZ-GUNDAM は、X 線観測と可視光・近赤外線観測を担当する両コミュニティが本格的に連携する初めての計画であることから、分野横断型で推進するモデルケースとなるだろう。多彩な人材育成が期待でき、分野を超えた連携の幅も広がる。1つのコミュニ

ティでは実現できない宇宙科学プロジェクトの立案において、大きな波及効果が期待できる。これまで地上望遠鏡を開発し、科学成果を挙げてきた研究者も参画しており、宇宙機・搭載機器開発の裾野が広がっている。30代の若手研究者や女性研究者が主担当となる開発体制を含み、技術職員との共同設計を取り入れるなど、多様な経験が積める体制となっている。

“JASMINE”: Japan Astrometry/photometry
Satellite Mission for INfrared Exploration
赤外線位置天文観測 / 測光観測衛星 JASMINE

0.

概要

Summary

“JASMINE”: Japan Astrometry/photometry Satellite Mission for INfrared Exploration 赤外線位置天文観測 / 測光観測衛星 JASMINE

Project Category

1. Big projects having large impacts on GOPIRA, typically cost estimate over ~1 Billion JPY (光赤天連に大きな影響を与える、装置・施設の開発を含む大型計画の提案、目安として10億円以上の規模)

Abstract of science goals, objectives, and methods

The Science goals of JASMINE are to explore the formation and evolution of the Milky Way galaxy, and to search for Earth-like exoplanets in habitable zones. To achieve these, we set two Science objectives: SO1: “Exploration of the Galactic Center Structure” - measuring the distance and motion of stars to investigate the structure of the Galactic Center that holds clues to the formation of the Galaxy, and SO2: “Search for Earth-like Exoplanets” – searching Earth-like exoplanets in habitable zones where atmospheric observations are possible for future life exploration. For these objectives, we will develop a wide-field, high-stability near-infrared space telescope for imaging observations, conduct astrometric observations of the Galactic Center region, and explore exoplanets around mid-M-type stars. As output products, we will create and release the following two types of data: an astrometric data catalog including the proper motion and parallax of stars observed in the direction of the Galactic Center region, and a time-series photometry data set of mid-M-type stars. Then, we will facilitate JASMINE’s science investigations by collaborating with corresponding research communities, to achieve the Science goals and objectives for JASMINE.

プロジェクトの意義と科学目的・方法の要旨

JASMINEの Science goals は「我々が住む天の川銀河の形成と進化の探究とともに、生命居住可能領域に存在する地球に似た系外惑星の探究を行う」ことである。その実現のために Science objectives として、SO1:【銀河系中心核構造の探究】恒星の距離と運動を測定することにより、銀河系形成の鍵を握る銀河系中心核構造を探究することと、SO2:【地球型系外惑星の探査】将来の生命探査に有望な恒星に対し、生命居住可能領域に存在し、大気観測を行うことのできる可能性がある地球型系外惑星の候補を探査することを掲げることとした。その手段として、広視野・高安定な近赤外線宇宙望遠鏡を開発し、

それによる撮像観測にて、銀河系中心核領域の位置天文観測と、中期 M 型星周りの系外惑星探査を行う。そしてアウトプットとして、「銀河系中心核領域の方向において観測した恒星の天球面上の位置変動の時系列データから導出される恒星の年周視差、固有運動といった物理情報の位置天文データカタログ」と「中期 M 型星の測光観測による時系列測光データ」を作成し公開する。その後、関連コミュニティと連携して解析研究を促進することで、Science goals & objectives の実現を図る。

Principle Investigator

Name: Ryouhei Kano

Affiliation: NINS/National Astronomical Observatory of Japan

E-mail address: ryouhei.kano@nao.ac.jp

プロジェクト代表者

氏名：鹿野良平

所属：自然科学研究機構・国立天文台

E-mail アドレス：ryouhei.kano@nao.ac.jp

Co-investigator and his/her role

See attached sheet No.1.

プロジェクト共同提案者とその役割

別紙 1 参照

Estimate of total cost

The budget for the competitive M-class mission in ISAS/JAXA

総コストの見積り

JAXA 宇宙研・公募型小型計画の予算

Estimate of total FTE(Full-Time Equivalent) necessary to accomplish the project

About 200 person-years (including concept study, development, operation, and cataloging, but not including science investigations)

プロジェクト実現に必要な総 FTE (人年) の見積り

約 200 人年 (検討・開発・運用・カタログ作成まで。科学成果創出を含まず)

Duration of the project

FY2025(current) ~ FY2039(for the launch in 2032)

プロジェクト実施期間

2025 (現在) ~ 2039 年度 (2032 年打上を想定)

1.

プロジェクトの意義

Science goals of the project

我々が住む天の川銀河の形成と進化の探究とともに、生命居住可能領域に存在する地球に似た系外惑星の探究を行う。

2.

プロジェクトの科学目的

Science goals of the project

本件の Science goals を実現するために達成すべき Science objectives を表 1 に示す。また関連する銀河系中心の近赤外線位置天文観測計画等の比較を表 2 に示す。

表 1: JASMINE の Science goals と Science objectives (ミッション目標)

Science goals	Science objectives (ミッション目標)
我々が住む銀河系の形成と進化の探究	SO1:【銀河系中心核構造の探究】 恒星の距離と運動を測定することにより、銀河系形成の鍵を握る銀河系中心核構造を探究する。
生命居住可能領域に存在する地球に似た系外惑星の探究	SO2:【地球型系外惑星の探査】 将来の生命探査に有望な恒星に対し、生命居住可能領域に存在し、大気観測を行うことのできる可能性がある地球型系外惑星の候補を探査する。

表 2: 銀河系中心近赤外線位置天文観測計画等の比較

	望遠鏡サイズ [m]	ピクセルスケール [秒角]	角分解能 [秒角]	フィルター	視野 [平方度]	観測領域 [平方度]	限界等級 [等]	精度 (固有運動) [μas/yr]	精度 (年周視差) [μas]
JASMINE	0.36	0.53	1.06	0.9-1.6μm	0.30	2.5	12.5	40(25)-125	40(25)
VVV (VIRAC2)	4.1	0.34	0.75	Ks	0.9	300	14	370	1000
GNS	8.2	0.106	0.2	H	0.016	0.25	21	~500	
GNS+HST						0.16	16	500	
JWST	6.5	0.031	0.07	F210M	0.003	0.31	20	150	
Roman	2.4	0.105	0.15?	F146	0.281	0.28	23-24	15-25 (注 1)	(注 1)
ULTIMATE	8.2		~0.3	H/K	0.054	6.0	~18	300	
PRIME	1.8	0.5	1.4?	H	1.56	176			

注 1: Terry et al., (2023) の minimal 計画の値を記す(その実現性については本文参照)。同論文では optimal 計画の提案もあるが、現段階では実現の保証がなく、想定精度も統計誤差のみで系統誤差を考慮していないので、optimal での値は割愛した。

可視光で位置天文観測をする Gaia では銀河系中心核構造にはアクセスできないので、JASMINE による SO1 と Gaia にて相補的に銀河系の形成と進化の探求を進めることができる。また、PRIME 望遠鏡で行うバルジ領域でのマイクロレンズ現象探査では、その副産物として JASMINE で重要な研究対象であるミラ型変光星が多数同定されることが期待され、今後密な連携を進める。Roman 望遠鏡とも同時期に銀河系中心近傍を観測する機器として連携観測が期待される。なお、Roman 望遠鏡ではハッブル望遠鏡 HST

での実績を参考にして位置天文観測精度（minimal 値）を想定しているようであるが、HST では視野を回転させて画像歪みの補正データをとるなどの特殊観測を駆使して達成した精度なので、マイクロレンズ探査が主目的の Roman 望遠鏡で達成できるかには疑問があり、その相互検証の点からも連携が重要と考えている。

SO2 について、後述（4 章）のように JASMINE では M 型星、特に中期 M 型星周りの探査を行う。トランジット系外惑星探査衛星 TESS が早期 M 型星周りの TOI-700 系を、地上望遠鏡探査 TRAPPIST が晩期 M 型星周りの TRAPPIST-1 系を発見しているが、JASMINE は両者の間の未探査領域（中期 M 型星）を補完できる。SO2 の先の goal のためには惑星発見後のフォローアップ分光が重要であり、観測を開始した JWST や今後予定されている ESA の系外惑星分光衛星 Ariel との連携研究を考えている。また日本は、M 型星の視線速度測定が可能なすばる望遠鏡の近赤外高分散分光器 IRD や、南アフリカに建設中の同様の分光器 SAND を有し、フォローアップ質量推定を行えるメリットもある。

3.

プロジェクトの科学的
意義と目標の根拠

**Rationale for the
scientific goals and
objectives**

1. 科学的意義の根拠：研究の背景、当該分野の研究状況、等 / Scientific background, status of the relevant scientific area, etc.

21 世紀の最新科学は、「我々はなぜ宇宙にいるのか？」や「我々は宇宙で孤独なのか？」といった根源的な問いに取り組んでいる。

銀河や恒星・惑星など、多様な天体の形成過程の理解は、宇宙の成り立ちの理解に重要である。特に、我々が住む地球がある天の川銀河（以下、銀河系）は、惑星や生命の研究と銀河研究を直接結びつけることができる唯一の銀河であり、銀河系の形成と進化の探究は、「我々はなぜ宇宙にいるのか？」という疑問に答える上で貢献が期待できる。

また、1995 年以降、太陽系外惑星が次々と発見され、大小さまざまな恒星の周囲に多様な惑星が存在することがわかってきた。その中で我々の地球を特別なものとする理由の一つは、海洋の存在である。海洋、つまり液体の水が惑星表面に存在するためには、惑星が恒星から適切な距離の「生命居住可能領域（ハビタブルゾーン）」を周回している必要がある。そのため、生命居住可能領域に存在する地球に似た系外惑星の探究は、宇宙における生命の可能性を探究するための重要なステップであり、「我々は宇宙で孤独なのか？」という疑問に対して答えるための重要な位置付けとなる。

2. 提案するプロジェクトコンセプトは当該分野になにをもたらそうとするのか / Goals and objectives: new scientific steps the proposed concept aims to achieve in the science area

JASMINE によるアウトプットは、近赤外線（0.9～1.6 μm ）での撮像観測（cf. 6 章）による、以下の二つのデータカタログであり、その作成と公開がアウトプット目標となる（cf. 4 章）：

- (1) 銀河系中心核領域の方向において観測した恒星の天球面上の位置変動の時系列データから導出される恒星の年周視差、固有運動といった物理情報の位置天文データ

カタログ。

(2) 中期 M 型星の測光観測による時系列測光データ。

これらのアウトプットを礎に行う Science objectives に関する解析研究はアウトカム（目標）としているが、これはプロジェクトチームメンバーだけでなく、関連分野の広範な研究者コミュニティの協力が学術上必要不可欠だからである。プロジェクトとしては、JASMINE Consortium の発足や「JASMINE 共同科学研究事業」の立ち上げなど（cf. 12 章）により、研究者コミュニティの形成を促し、アウトカム目標を達成しようと考えている。

3. 提案するプロジェクトコンセプトの強みと過去、現在、未来の他のプロジェクト、研究・探査との関係 / The competing power of the proposed project concept and its relationship to past, current, and future other investigations and projects.

位置天文観測としては、可視光で観測を行う Gaia に対して銀河系中心領域にアクセスできる強みがあり、相補的な関係にある。また、中心領域のミラ型変光星を先行して多数同定できると期待される PRIME 望遠鏡計画と密な連携を図っていく（cf. 1 章）。

一方、M 型星周辺の系外惑星探査としては、可視によるトランジット探査専用衛星 TESS よりも大口径で近赤外線観測のため高い感度があり、地上の大口径望遠鏡に対してはシーイング等がない安定した高精度観測ができるという優位性がある（cf. 4 章）。

4.

プロジェクトが実施する
研究

Scientific
investigations of the
project

JASMINE が実施する研究は、「Science objectives 達成に必要な性能を満たす観測データの取得とそのデータカタログ作成と公開」であり、これを JASMINE のアウトプット目標としている。objective 毎のアウトプット目標と対応するミッション要求を表 3 に示す。

銀河系中心核構造は図 1 に示すように、半径 $\sim 200\text{pc}$ （銀経 1.4 度相当）・高さ $\sim 40\text{pc}$ （銀緯 0.3 度相当）と考えられる中心核ディスクと、その周囲に広がる中心核楕円構造からなると考えられており、SO1 のために中心核ディスク（の少なくとも半分）とその周辺を含む領域を観測する。視線方向について、中心核構造を含むバルジと、バー構造や円盤構造を区分できるように、年周視差の精度 $40\mu\text{as}$ 以下を要求とした。中心核構造に絞れる $25\mu\text{as}$ の精度をエクストラサクセスの目標としている。また固有運動は、中心核ディスクの銀緯方向の速度分散 20km/s を参考に、中心核楕円構造と有意に区別できるように、 5km/s に対応する $125\mu\text{as/y}$ を要求とした。なお、ミラ型変光星は、それが中心核ディスクにあることを統計的に確認することで、中心核ディスクの形成時期を解明するなど、SO1 にとっての重要な研究対象である。

表 3: JASMINE のアウトプット目標と
ミッション要求

<p>SO1: 銀河系 中心核構造 の探究</p>	<p>実施する研究(アウトプット目標):</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 銀河系中心核領域の方向において観測した恒星の天球面上の位置変動の時系列データから導出される恒星の年周視差、固有運動といった物理情報を位置天文データカタログとして作成し、公開すること。 <p>観測データ性能への要求事項(ミッション要求):</p> <ul style="list-style-type: none"> ● MR-I: 銀経 l、銀緯 b について、$-1.4^\circ < l < 0.7^\circ$ かつ $-0.6^\circ < b < 0.6^\circ$ の観測領域を含む天の川銀河の中心核領域方向に対して、恒星の年周視差と固有運動を導出するために恒星の天球面上での位置の時間変動を測定すること。 ● MR-II: 観測領域内のミラ型変光星を含む中心核構造にあると見込まれる 2400 個以上の恒星に対して、恒星の年周視差を精度 $40\mu\text{as}$ 以下で測定すること。そのうち、$-0.3^\circ < b < 0.3^\circ$ の領域では、1200 個以上、さらに $-0.3^\circ < b < 0.3^\circ$ かつ $-0.7^\circ < l < 0.7^\circ$ の領域では 600 個以上となること。 ● MR-III: 観測領域内の中心核構造にあると見込まれる 45000 個以上の恒星に対して(うち、ミラ型変光星に対しては、220 個以上)、恒星の固有運動を精度 $125\mu\text{as}/\text{y}$ 以下で測定すること。そのうち、$-0.3^\circ < b < 0.3^\circ$ の領域では、22500 個以上、さらに $-0.3^\circ < b < 0.3^\circ$ かつ $-0.7^\circ < l < 0.7^\circ$ の領域では 15000 個以上となること。
<p>SO2: 地球型 系外惑星 の探査</p>	<p>実施する研究(アウトプット目標):</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 中期 M 型星の測光観測を行い、時系列測光データを公開すること。 <p>観測データ性能への要求事項(ミッション要求):</p> <ul style="list-style-type: none"> ● MR-IV: MR-II と MR-III を満たす観測能力を活かして、トランジット惑星が検出されている 17 個以上の中期 M 型星に対し、観測の総期間が 14 ヶ月以上で、減光が 0.3% 以下の現象を検出できる時系列測光観測を行うこと。

SO2 として、生命探査に繋がる惑星大気の探査が可能なのは、トランジット法か直接撮像法での惑星に限られるが、現状ではハビタブルゾーン内の地球型惑星の直接撮像は現実的ではなく、トランジット法が SO2 の唯一の解である。トランジットで恒星の光度が減光(トランジットシグナル)する減光率は惑星と恒星の半径比の二乗で決まるが、太陽型星(～FGK 型星)では減光率が極めて小さいので、JASMINE は恒星半径の小さい M 型星を観測対象にする。早期 M 型星まわりに対しては依然減光率が小さいものの、明るいため 10cm 口径の TESS が観測可能であり、実際に TOI-700 系を発見している。一方、晩期 M 型星は減光率も大きいので、測光精度は低いが大口径な地上望遠鏡が有利になり、実際に TRAPPIST-1 系が発見されている。そこで、JASMINE では、探査が未開拓の中期 M 型星をターゲットとする(図 2)。

5.

スケジュール Schedule

1. 大まかなスケジュール / Rough schedule

2024 年 7 月	ミッション定義審査 (MDR)
2026 年度	プリプロジェクト化
2027 年度～	新規予算事項化
2032 年想定 *	打ち上げ (* 宇宙基本計画工程表 2024/12/24 版より)
運用期間	4 年 (ノミナル; 初期運用～1 年を含む)
カタログ作成	3 年程度 (運用終了後, 最大 5 年程度)

2. 開発スケジュールの科学成果への影響 / Schedule impact on science

系外惑星探査では、JASMINE が発見した地球型系外惑星を、他の大型望遠鏡にて惑星大気の透過分光観測を行うことで、科学成果を系外惑星研究として最大限に活用できる。そのため、既に運用中の JWST や今後予定されている Ariel が稼働している間に、探査成果が創出できるように、2030 年代前半の観測運用が望ましい。

位置天文観測では、JASMINE が世界初の赤外線位置天文観測衛星であり、2045 年以降と想定される ESA の赤外線位置天文観測衛星 GaiaNIR の実現まで、唯一無二の科学成果となる。ただし、較正に用いる Gaia データとの時間差拡大での誤差増大の防止や、GaiaNIR への技術継承の点からも早期実現が望ましい。

図 1：銀河系中心核領域にある中心核楕円構造および中心核ディスクの想像図。

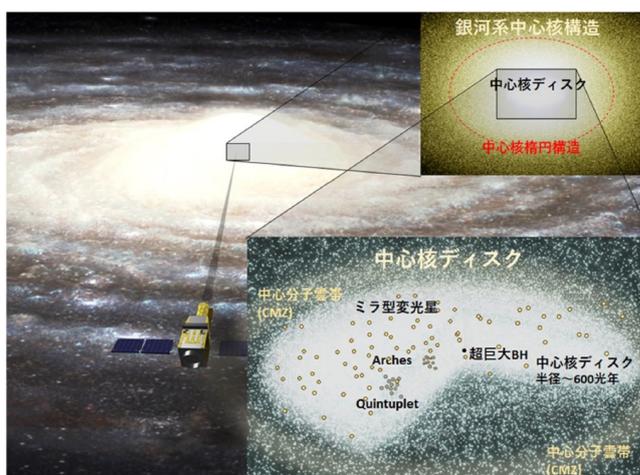
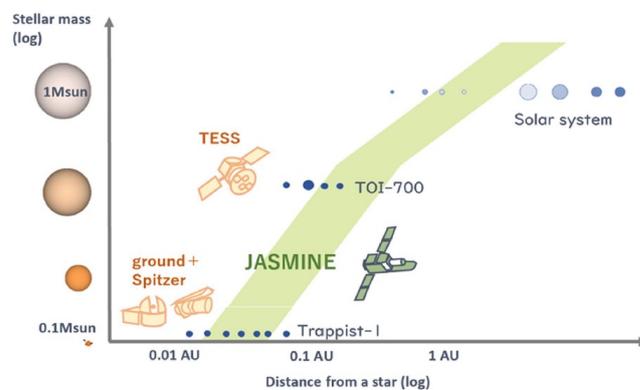


図 2：JASMINE 系外惑星探査の領域を恒星惑星距離と恒星質量平面上に記す。緑の領域はハビタブルゾーンを示す。



6.

プロジェクトで使用する装置

Instrumentation of the project

1. 実施する実験・観測・分析などを実現する技術 / Description of the technology to realize the investigations

広視野・高安定の近赤外線宇宙望遠鏡による step stare 観測と、取得データのセルフキャリブレーションによる、高精度の位置天文観測技術。および、同じ近赤外線宇宙望遠鏡による、系外惑星探査のための高感度なトランジット観測技術。

2. 実施する実験・観測・分析などを実現する方法・技術について、他の技術、および類似技術との比較 / Comparisons of the selected technology with other technologies

位置天文観測として、JASMINE が現在進行中の計画として唯一の赤外線位置天文観測衛星である。また、Gaia が用いる Time Delay Integration 方式によるスキャン観測(スキャンに連動して CCD 転送を行う観測)に対応できる赤外線検出器は現在存在しておらず、多数回撮像で観測領域をカバーする step stare 方式が唯一の解である。一方で、取得データから位置天文パラメータを導出する手法は、Gaia での手法を一部活用することが有効であり、連携した開発議論を進めている。

系外惑星探査としては、4章で述べたようにトランジット法が唯一の観測手法であり、観測対象も他の観測装置と相補的で、唯一無二の研究といえる。

3. 提案装置の主要な機能 / Major functions of the proposed instrument

表 4: JASMINE の衛星と観測装置の諸元

衛星	打上ロケット	JAXA Epsilon S
	軌道	太陽同期軌道@高度~570 km
	ダウンリンク	≥ 22 Gbits/day by X-band
望遠鏡系	光学系	コルシュ光学系
	有効口径	36 cm φ
	焦点距離	4.37 m
	視野	0.55° × 0.55°
	波面精度	Strehl ratio ≥ 0.9 @波長 1.25 μm
検出器系	検出器	InGaAs ハイブリッド CMOS センサー × 4 素子
	画素	10 μm ピッチ(~0.5 秒角相当), 1952 × 1952 画素/素子
	観測波長	0.9~1.6 μm
	撮像頻度	12.5 s (TBD)

7.

プロジェクトで獲得するデータ

Data to be obtained

位置天文観測データ：

12.5s (TBD) 毎の撮像データから、対象の星 (1 撮像当り~12000 個) の周囲 9 × 11 画素を切り出した画像セットを観測で取得する。ここから、以下のステップにて画像歪み等のセルフキャリブレーションを行って位置天文パラメータを導出し、カタログとしてコミュニティに提供する。大局的な輝度分布の把握のため、全面画像も取得する。

Step1: 9 × 11 画素の画像から effective PSF 法により、星像位置を画素サイズの 1/100 の 4000μas 程度の精度で算出する。

Step2: 短時間では星が動かないと仮定して、隣り合い重なり合う視野の撮像データから画像歪みを算出し、理想的な観測装置による星像位置を算出する。

Step3: 長期間 (最大 = 全観測期間) でも星の動きは単純 (e.g. 年周視差と固有運動) であると仮定して、多数回 N の撮像データを使ってランダム誤差を $1/\sqrt{N}$ で減少させ、要求された精度 (40μas or 125μas/y) で位置天文パラメータを算出する。

系外惑星探査データ：

12.5s (TBD) 毎の撮像データから、対象天体と参照天体 (1 撮像当り~計 10 個) の

周囲 60×60 画素 (TBD) を切り出した画像セットを観測で取得する。ここから時系列測光データを作成しコミュニティに提供する。なお、明るい天体もサチらないで観測できるように、指向方向をドリフトさせながら撮像することも検討している。

8.

主要技術要素

Key technologies

1. 主要技術要素と開発が必要な技術要素 / Key technologies and those requiring further investment and development

重要な技術的課題として以下の5つが挙げられる。

- 高感度の赤外線撮像：

高感度で画素数の多い撮像用二次元検出器の開発と、これを動作させるための回路系技術が必要である。さらに低雑音化のため検出器の冷却が必要で、この冷却を振動なしのシステムで実現することが点源像をブレさせないために必要である。

- 広範囲の領域の観測：

広い視野を持ち、その範囲内で一貫した点源像の形状を持つ光学系が必要である。これを画素数の多い検出器と組み合わせることで効率のよい観測を実現する。また望遠鏡の指向方向を短い時間で安定化させることも効率的な観測に必要である。

- 点源の高精度位置測定：

中心位置の測定が高精度に行える点源像を実現する光学系と、露出中にブレのないように望遠鏡への擾乱を抑えることが必要である。

- 画像歪みの補正：

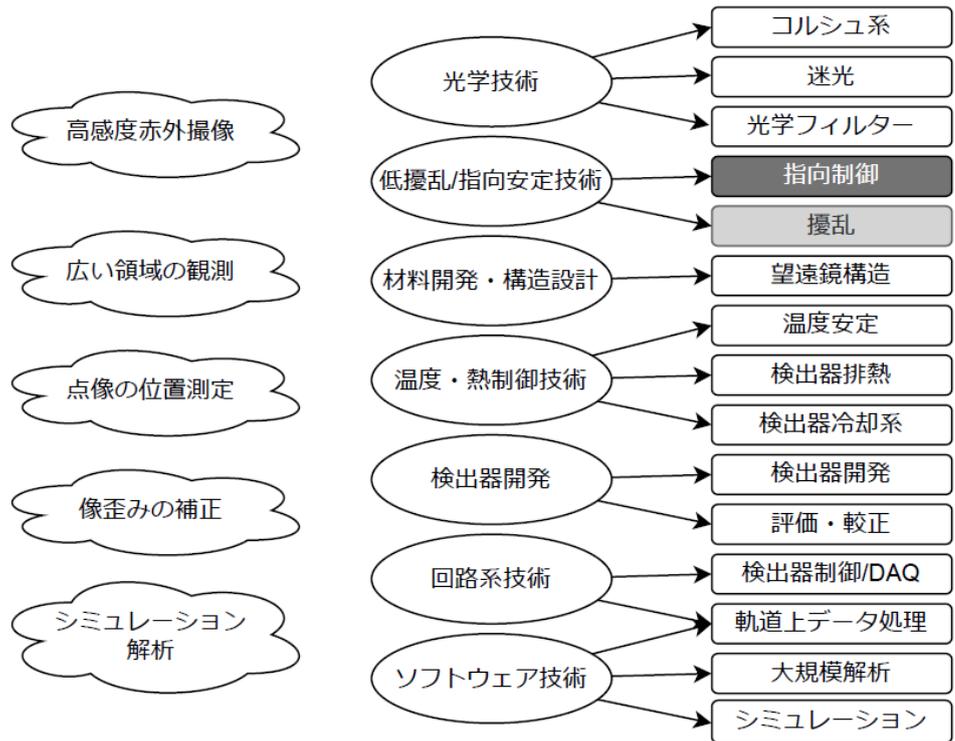
一定期間の観測から画像歪みを補正する。このためには科学観測運用期間中の画像歪みを安定させることが必要で、低熱膨張係数を持つ材料を用いた構造を定温制御することで実現する。また、大量のデータから画像歪みの補正を行い、多量のモデルパラメータを推定するための解析技術が必要である。

- 観測シミュレーション：

JASMINE の特徴は、観測天体に関する基本的な情報が既知であり、その情報の精度を向上させることにある。このために、ハードウェア仕様を基にした観測データのシミュレーションが可能であり、その結果を用いて仕様の適切さや解析技術の正確性を検証することが重要である。

以上で示した課題と、それを実現するための技術とその要素との関係を図3に示した。

図3：JASMINEの技術的課題（左の雲形）と課題実現のための技術（中央楕円）、そしてその要素（右の四角）を示す。



2. 技術的不確定性の大きな技術要素 / Assessment of uncertainties in technologies

●画像歪みの補正：

位置天文観測が求める星の（相対）位置精度は $40\mu\text{as}$ で、画素サイズの $\sim 1/10000$ と極めて小さい。装置設計として、上述のように低熱膨張素材の使用と装置温度の安定化を図るが、いわゆる STOP (Structure, Thermal, Optical Performance) 解析も用いて、軌道上温度分布での熱変形による画像歪みを定量解析して進める。打ち上げ前の性能検証の際には、極端な温度設定での実測で STOP 解析の数値モデルを検証したうえで、数値モデル解析で性能検証する仕組みを確立する必要がある。

3. 既存技術の活用条件 / Assessment of heritages

JASMINE 観測装置は望遠鏡系と検出器系からなるシンプルな構成であり、それぞれ以下のように既存技術を活用して開発を進める。

中口径の回折限界の宇宙望遠鏡として、国立天文台と宇宙研等が持つ「ひので」可視光磁場望遠鏡（口径 50cm）の開発実績を活用し、現在は望遠鏡の組立調整や光学試験等の試験計画の立案を進めている。また、擾乱対策に関しても、「ひので」の実績やその後継機である同じ公募型小型計画の SOLAR-C の開発検討を共有しつつ進めている。

一方検出器は、国立天文台が 2019 年度に地上望遠鏡用に開発した InGaAs 近赤外線撮像センサー（ 1280×1280 画素）を活用している。 1952×1952 画素の大フォーマット化と放射線耐性向上等による宇宙用化を、2021 年度から宇宙研の技術のフロントローディングを始め、2024 年度に衛星搭載可能な形での EM 品相当が開発された。この技術をベースに、JASMINE 特有機能（グローバルシャッター、可視光除去）の追加で対応する。

9.

想定されるコスト Cost estimate

JAXA 宇宙科学研究所の公募型小型計画としての予算で実施する。本計画応募時の 2016 年当初は、JAXA からの予算上限を約 150 億円（打ち上げや運用経費を含む）として検討を進めてきたが、昨今のインフレや円安なども考慮した上での適切な予算額での実施が議論されている。

10.

技術ヘリテージと技術 開発状況と開発計画

Technical heritages, technology development status and plan

1. 技術ヘリテージと技術開発状況 / Technology heritage, development history and status

図 3 に記載した技術要素について技術開発状況を、別紙 2 に示す。その最後にも追記したが、衛星バスとしては基本的に小型標準バスとその標準搭載機器を使用する。ただし、観測データ転送のために追加する X バンド通信系については、「あかつき」「ひとみ」「はやぶさ 2」の搭載実績品の使用を想定している。また、バッテリーについても「ひさき」搭載品の使用を想定している。なお、現時点で全て TRL ≥ 3 であるが、その詳細については別途報告させていただきたい。

2. 技術開発計画 / Technology development plans

別紙 2 に示した開発状況に SDR までの対応予定を併記する。

11.

プロジェクトのリスク管理 Risk Management Plan of the Project

JASMINE は、観測装置開発と衛星バス開発ともに国内で対応する予定であり、データ解析についても、解析手法の検討として国際連携が行われているが、実際の解析は国内で行うこととしており、海外との連携の遅れなどによって遅延や断念する懸念はない。

12.

天文学コミュニティの 持続可能性に関わる戦略 Strategy for the Sustainability of Astronomical community

JASMINE の科学目標を達成し、創出されるデータをより多くの科学者にとって有益なものとするために [JASMINE Consortium \(JC\)](#) を発足させ、2019 年夏の Kick-off Meeting をはじめとして毎年 JC Meeting を開催して、JASMINE から波及するサイエンスについても議論している（2022 年は日本天文学会秋季年会の企画セッションとして実施）。その成果として、JASMINE によって期待できる科学的成果（アウトカム）をまとめた White Paper を作成し学術雑誌にて報告している（Kawata et al. 2024, PASJ）。また、JASMINE の位置天文観測データを用いた銀河系中心領域に関わる科学研究に向けた準備研究の推進を主目的として、国立天文台にて「JASMINE 共同科学研究事業」を立ち上げ、採択した課題の研究者に特任研究員 1 名の雇用経費等を支援することで、当該分野の発展と若手研究者の人材育成にも寄与する。初回は PRIME 望遠鏡によるミラ型変光星の先行探査の研究課題を採択し、現在、研究員を選考しているところである。

また、JASMINE 関係者による所属大学・研究機関での教育活動による若手研究者の育成、学会や研究集会を通じた意見収集や JASMINE に関する広報活動も積極的に行っている。

11 章に述べた通り、JASMINE では日本国内で開発体制を整えているが、科学成果を最大化するためには国際的な連携が不可欠である。特に、位置天文観測衛星の解析にて成功実績をもつ Gaia 衛星のデータ解析チームや、銀河系中心サイエンスを世界的に牽引する研究者らを有するヨーロッパの研究者コミュニティからは、JASMINE に非常大きな期待を受けており、将来的な ESA との協力体制も見据えて協力強化に向けた協議も行っている。

なお、JASMINE で行う高精度な位置天文観測のために必要な高安定な望遠鏡の開発では、STOP 解析にて軌道上温度分布での熱変形による光学特性を定量解析し、その性能検証でも光学試験のみでは評価しきれない画像歪みを試験とモデルを連携して行うことを考えている。このうち STOP 解析は程度の差こそあれ、望遠鏡等を有する天文観測衛星共通の課題だと考えており、JAXA 宇宙研を中心とした天文観測衛星検討チーム間で課題等を共有する枠組みに参加しており、JASMINE での実績を適宜実例として継承できればと考えている。

また、国立天文台での装置開発の拠点である先端技術センター (ATC) には、国立天文台が中心となって進めている地上望遠鏡開発だけではなく、今後のスペース天文学への重要性も理解いただき、光学・構造・熱・電気の各面で JASMINE 観測装置開発に貢献いただいている。今後も引続き連携して開発検討を進めることで、JASMINE での開発実績をプロジェクトチーム内にとどめることなく、ATC におけるスペース天文学の技術実績として継承できるようにしたいと考えている。

別紙 1：共同提案者全員のリスト

cf. JASMINE White Paper (Kawata et al., 2024, PASJ) 共著者等

鹿野 良平 /Ryouhei Kano (NAOJ) :	本件代表、兼 観測装置取り纏め Science Payload lead
片坐 宏一 /Hirokazu Kataza (ISAS/JAXA) :	プリプロジェクト候補チーム長 Team lead for Pre-Project candidate
郷田 直輝 /Naoteru Goda (NAOJ) :	サイエンス取り纏め Science lead
河田 大介 /Daisuke Kawata (UCL, NAOJ) :	位置天文サイエンス Astrometry
西山 正吾 /Shogo Nishiyama (Miyagi U. of Education) :	位置天文サイエンス Astrometry
河原 創 /Hajime Kawahara (ISAS/JAXA) :	系外惑星サイエンス Exo-Planets
服部 公平 /Kohei Hattori (NAOJ) :	サイエンス連携 Science Collaboration
磯部 直樹 /Naoki Isobe (ISAS/JAXA) :	国際連携 International Collaboration
高橋 葵 /Aoi Takahashi (ISAS/JAXA) :	望遠鏡サブシステム開発 Telescope
和田 武彦 /Takehiko Wada (NAOJ) :	検出器サブシステム開発 Detector

大澤 亮 /Ryou Ohsawa (NAOJ) : データ解析 Data Analysis
臼井 文彦 /Fumihiko Usui (ISAS/JAXA) : マネジメント Management
近藤 依央菜 /Iona Kondo (ISAS/JAXA) : 運用・地上系 Operation & Ground System
山田 良透 /Yoshiyuki Yamada (Kyoto U.) : データ解析 Data Analysis

JASMINE 開発検討 Study for JASMINE:

冨田洋 /Hiroshi Tomida, 与賀田佳澄 /Kasumi Yogata, 宮川浩平 /Kohei Miyakawa, 多田将太郎 /Shotaro Tada, 笠木結 /Yui Kasagi, 鹿島伸悟 /Shigo Kashima (ISAS/JAXA) ; 上田暁俊 /Akitoshi Ueda, 宇都宮真 /Shin Utsunomiya, 末松芳法 /Yoshinori Suematsu, 辻本拓司 /Takuji Tsujimoto, 間瀬一郎 /Ichiro Mase, 満田和久 /Kazuhisa Mitsuda, 三好 真 /Makoto Miyoshi, 矢野太平 /Taihei Yano, Pau Ramos, 細川晃 /Ko Hosokawa (NAOJ) ; 小谷隆行 /Takayuki Kotani (ABC) ; 増田賢人 /Kento Masuda (Osaka U.) ; 上塚貴史 /Takashi Kamizuka, 小玉貴則 /Takanori Kodama (U. Tokyo) ; 池之上文吾 /Bungo Ikenoue, 浦口史寛 /Fumihiko Uraguchi, 大淵喜之 /Yoshiyuki Obuchi, 尾崎正伸 /Masanobu Ozaki, 小原直樹 /Naoki Kohara, 清水莉沙 /Risa Shimizu, 都築俊宏 /Toshihiro Tsuzuki, 東谷千比呂 /Chihiro Tokoku, 平林誠之 /Masayuki Hirabayashi (NAOJ)

データ解析・サイエンス等の検討 Study for JASMINE data analysis, science etc. :

辻本匡弘 /Masahiro Tsujimoto (ISAS/JAXA) ; 泉浦秀行 /Hideyuki Izumiura, 大内正己 /Masami Ouchi, 大坪貴文 /Takafumi Ootsubo, 平野照幸 /Teruyuki Hirano, 森鼻久美子 /Kumiko Morihana (NAOJ) ; 大宮正士 /Masashi Omiya, 葛原昌行 /Masayuki Kuzuhara (ABC) ; 立川崇之 /Takayuki Tatekawa (U. Shiga Prefecture) ; 逢澤正嵩 /Masataka Aizawa (RIKEN) ; 福井暁彦 /Akihiko Fukui, 藤井通子 /Michiko Fujii (U. Tokyo) ; 浅田秀樹 /Hideki Asada (Hirosaki U.) ; 有松 亘 /Ko Arimatsu, 川島由依 /Yui Kawashima (Kyoto U.) ; 川中宣太 /Norita Kawanaka (Tokyo Metropolitan U.) ; 谷川衝 /Ataru Tanikawa (Fukui Pref. U.) ; 千葉柁司 /Masashi Chiba (Tohoku U.) ; 西 亮一 /Ryoichi Nishi (Niigata U.) ; 松永典之 /Noruyuki Matsunaga (U. Tokyo) ; 林航平 /Kohei Hayashi (National Institute of Technology, Sendai College) , 浦川聖太郎 /Seitaro Urakawa (Japan Spaceguard Association) ; 越本直季 /Naoki Koshimoto (NASA/GSFC, U. Maryland) ; 野津湧太 /Yuta Notsu (U. Colorado Boulder) ; 戸次賢治 /Kenji Bekki (U. Western Australia) ; Michael Biermann, Wolfgang Löffler, Konstantin Riabinin (U. Heidelberg) ; Carme Jordi, Xavier Luri, Josep Manel Carrasco (U. Barcelona) ; Bryan N. Dorland, Nathan J. Secrest (USNO) ; Jason Sanders, Ralph Schönrich, Vincent Van Eylen (UCL) ; Floor van Leeuwen, Nicholas A. Walton (U. Cambridge) ; Victor P. Debattista (U. Central Lancashire) ; Justin I. Read (U. Surrey) ; Stephen E. Levine (MIT) ; Steven R. Majewski (U. Virginia) ; Trent Newswander (Utah State U.) ; Alex R. Pettitt (California State U.) ; R. Michael Rich (UCLA) ; Celine Boehm (U. Sydney) ; Alister W. Graham (Swinburne U. of Technology) ; David Hobbs (Lund U.) ; Sergei A. Klioner, Enrico Gerlach (Technische Universität Dresden) ; Ortwin Gerhard (MPI) ; Andrea Miglio (U. Bologna) ; Michael Perryman (U. College Dublin) ; Timo Prusti (ESA/

ESTEC) ; Anja Feldmeier-Krause (U. Vienna) , Anthony Brown (Leiden U.) , Brian Thorsbro (Observatoire de la Côte d'Azur) , Francisco Noguera-Lara, Rainer Schoedel (Instituto de Astrofísica de Andalucía-CSIC) , Karl Fiteni, Mattia Sormani, Xingchen Li (U. Insubria)

別紙 2 JASMINE 要素技術の技術成熟度とリスク

要素技術	技術成熟度とリスク、および SDR までの対応予定
コルシュ光学系	コルシュ光学系 設計としては十分なものが完成している。 光学系 AVT 組立検証方法の案はできている。これを実施するための、企業との役割分担・必要な設備の検討を実施中である。SDR までにはこの検討を終える。現時点では実際の組立のスケジュールリスクが中、影響は大であるが、SDR までの検討でリスクを低減し、再評価する。
迷光	迷光抑制 迷光対策のために用いる黒色塗料の実測が未完了であるが、SDR までには終了予定。実測値があればより適切な迷光抑制の設計が可能であると見込まれる。
光学フィルター (バンドパスフィルター機能)	光学フィルターとしては、遮蔽および透過帯の特性に関して、すぐれた多層膜の試作・試験に成功したものの、色分散が位置天文観測の精度向上の障害になりうるリスクが浮上し、透過素子ということで製造性や運用性(温度ムラ抑制など)への要求も厳しいことから、光学フィルターを使わないこととした。その代わりに、検出器表面に可視光除去機能を追加することで、検出器自身にバンドパスフィルター機能を持たせることとした。可視光除去機能は 2024 年度までの EM 相当品開発のなかでの技術を応用することで十分実現可能と考えており、SDR までには検出器開発を完了させ、リスク再評価する。
指向制御 擾乱	パス擾乱管理 過去の同一シリーズのパスでの実績では影響度が小であることは確認済み。ただし、現時点での想定以上に大きくなると位置天文測定への影響は大きいので、SDR 以後の擾乱管理は必要である。実機の実測結果次第では、リアクションホイールの周波数移動等の対策案も検討されている。
望遠鏡構造	望遠鏡構造 メーカー側、製造上のリスクを認識しており、BBM を SDR までに製造・試験する。SDR 時点でリスクを再評価する。 低温インバー材 すぐれた特性をもつ材料の開発が完成しており、すでに市販されている。
温度安定	望遠鏡温度安定性 これまでの熱モデルおよび以前の試験で方式は実証済み。SDR にむけてメーカーでの予備設計を進める。
検出器排熱 検出器冷却系	検出器冷却系 検出器冷却のための TEC(Thermo-Electric Cooler)の実測による選定を行なっている。低温環境下での冷却能力は、常温での冷却能力からの推定値より有意に低下することが判明したため、この冷却能力の低下を見込んだ選定を実施して試験を行なった。低下した冷却能力であっても冷却系の熱設計に成立解を見出している。また、排熱のためのサーマルストラップも候補となる材料の試験を実施中。SDR までに TEC の選定を確定し、サーマルストラップの選定を終える。この過程で遅延するリスクがあるが SDR 時点では遅延リスクは解決予定である。
検出器開発 評価・較正	InGaAs 検出器 衛星搭載を想定した EM 品相当の実証に成功した。欠損画素率も天文観測用としてはすでに許容可能なレベルには到達している。JASMINE 特有機能としてグローバルシャッターや可視光除去の開発が残されているので、影響は中程度であるが、既存技術の応用で対応できるので開発リスクは小。SDR までには検出器開発は完了する。 ファイバ較正光源 較正光源の必要性がシミュレーションより認識されている。光源の開発はこれからであるが、実験室レベルでは一般的な技術である。SDR までに BBM 試験を行う。
検出器制御 DAQ	ミッションエレキ 実験室レベルの BBM は製造済み。FM にむけてエレキシステムとしての構成と分担案をメーカーと検討中である。SDR までに実機を意識した BBM を製作する
軌道上データ処理	搭載 CPU 搭載可能な CPU の調査中であり、市販品(候補あり)もしくはバスメーカーのものを利用予定である。SDR までに調達方法を決定する。 軌道上データ処理 星データ抽出ではカタログをもとにした抽出方法をとる。データ圧縮は効率のよいアルゴリズムは存在している。搭載 CPU で処理できるかを検討中であり、SDR までに見込みを得る。
大規模解析	解析システム 解析の各段階を個別に処理できるものは、規模が限られるが実現済みである。より大規模なもの・複数の段階にまたがるものの開発を進める。解析システムのソフトウェア実装に関しては SDR がマイルストーンではないが、大規模化を進めている。ただし、解析システムを構築しデータ解析を実行する体制については SDR 時に必要な協力関係の合意を形成する。
シミュレーション	シミュレーション 多くの要因を考慮したシミュレーションがすでにできている。SDR までには、検出器特性等について実測値を盛り込むことで、シミュレーションの精度を向上させる。
その他	衛星バス 基本的に小型標準バスとその標準機器を使用する。非標準品を想定しているバッテリーや X バンド通信機器についても、「あかつき」「ひとみ」「はやぶさ2」「ひさき」の搭載実績品の使用を想定している。

Life-environmentology, Astronomy, and Planetary
Ultraviolet Telescope Assembly(LAPYUTA)

惑星科学、生命圏科学、および天文学に向けた
紫外線宇宙望遠鏡計画

0.

概要

Summary

Life-environmentology, Astronomy, and Planetary Ultraviolet Telescope Assembly(LAPYUTA) 惑星科学、生命圏科学、および天文学に向けた 紫外線宇宙望遠鏡計画

Project Category

1. Big projects having large impacts on GOPIRA, typically cost estimate over ~1 Billion JPY (光赤天連に大きな影響を与える、装置・施設の開発を含む大型計画の提案、目安として10億円以上の規模)

Abstract of science goals, objectives, and methods

Ultraviolet spectroscopy is one of the most powerful tools to cover a wide range of scientific fields, from planetary science to astronomy. Here, we propose a future UV space telescope, LAPYUTA, selected as a candidate for JAXA's 6th M-class mission in 2023. Launch is planned for the early 2030s. LAPYUTA will perform spectroscopic and imaging observations in the far ultraviolet spectral range (110-190 nm) with a large effective area ($>300 \text{ cm}^2$) and a high spatial resolution (0.1 arcsec). LAPYUTA's orbit is designed as an elliptical orbit with an apogee of about 2,000 km and a perigee of 1,000 km to avoid the influence of the geocorona when observing oxygen and hydrogen atoms and the Earth's radiation belt. LAPYUTA will accomplish the following four objectives, which are related to two scientific goals: understanding (1) the habitable environment and (2) the origin of structure and matter in the universe. **Objective 1** focuses on the subsurface ocean environments of Jupiter's icy moons and the atmospheric evolution of the terrestrial planets. **Objective 2** is to characterize the atmospheres and estimate the surface environment of exoplanets around the habitable zone by detecting their exospheric atmospheres. In cosmology and astronomy, **Objective 3** will test whether the structures of present-day galaxies contain ubiquitous Ly α halos and reveal the physical origins of Ly α halos. **Objective 4** elucidates the synthesis process of heavy elements from observations of ultraviolet radiation from hot gas immediately after neutron star mergers.

プロジェクトの意義と科学目的・方法の要旨

宇宙での生命生存可能環境と構造と物質の起源の理解を目指し、4課題の達成を目的とす

る。**課題1**は、木星の水衛星の地下海環境と地球型惑星の大気進化に焦点を当てる。水衛星の水噴出と大気の連続観測を初めて行い、地下海環境の理解につなげる。火星と金星では大気から宇宙へ輸送される水や温室効果ガスの全球観測から、大気が散逸する条件を明らかにし、大気進化の理解につなげる。**課題2**では、系外惑星の外圏大気の広がりをつえ、太陽系の知見を拡張して惑星大気の特徴づけを行う。系外惑星大気に影響を与える恒星活動の解明を目指す。**課題3**は宇宙の構造形成史の中で残された問題の一つである銀河の形成過程である。銀河の構造に Ly α ハローが普遍的に含まれているかどうかを調べ、その物理的起源が理論で予言されている星形成を引き起こす低温のガス降着か、それとも衛星銀河や銀河周辺の HI ガスかを明らかにする。**課題4**では、物質進化における未解明課題である重元素合成の解明を目指す。中性子星合体による重元素合成の全体像を把握し、重元素の起源を理解する。超新星爆発からの最初のシグナルを観測し、大質量星進化の最終段階を理解することにつなげる。これらを実現する手段として、地球周回軌道の紫外線宇宙望遠鏡を JAXA 宇宙科学研究所の公募型小型計画に提案し、2023 年に 6 号機候補に選定されている。2024 年 8 月にプリプロジェクト候補移行審査を受審し、プリプロジェクト候補チームとして検討を進めている。

Principle Investigator

Name: Fuminori Tsuchiya

Affiliation: Tohoku University

E-mail address: tsuchiya.f@tohoku.ac.jp

プロジェクト代表者

氏名：土屋史紀

所属：東北大学

E-mail アドレス：tsuchiya.f@tohoku.ac.jp

Co-investigator and his/her role

プロジェクト共同提案者とその役割（共同提案者全員のリストは末尾の別紙を参照）

Role / 役割	Co-I / 共同提案者 (Affiliation / 所属)
Science-Objective 1 科学課題 1	Kimura, Tomoki/木村智樹(Tokyo Univ. of Sci./東京理大), Tao, Chihiro/埜 千尋(NICT), Koga, Ryoichi/古賀亮一(Nagoya Univ./名古屋大), Kimura, Jun/木村 淳(Osaka Univ./大阪大), Masunaga, Kei/益永 圭 (ISAS/JAXA), Sakai, Shotaro/堺正太朗(Tohoku Univ./東北大)
Science-Objective 2 科学課題 2	Ikoma, Masahiro/生駒大洋(NAOJ/国立天文台), Kameda, Shingo/亀田真吾(Rikkyo Univ./立教大), Toriumi, Shin/鳥海 森 (ISAS/JAXA)
Science-Objective 3 科学課題 3	Ouchi, Masami/大内正己(NAOJ/Univ. Tokyo / 国立天文台/ 東京大)
Science-Objective 4 科学課題 4	Tanaka, Masaomi/田中雅臣(Tohoku Univ./東北大)
Telescope/Optics 望遠鏡/光学系	Murakami, Go/村上豪(ISAS/JAXA) Masato Kagitani/鍵谷将人(Tohoku Univ./東北大)
Satellite system 衛星システム	Yamazaki, Atsushi/山崎 敦(ISAS/JAXA)

Estimate of total cost / 総コストの見積り

17,620,000,000 Japanese yen / 176.62 億円

Estimate of total FTE (Full-Time Equivalent) necessary to accomplish the project.

プロジェクト実現に必要な総 FTE (人年) の見積り

60

Duration of the project / プロジェクト実施期間

2021FY – 2023FY	Concept study	/ 概念検討期間
2024FY – 2026FY	Mission design & definition	/ プロジェクト準備期間
2027FY – 2032FY	Project design, fabrication, verification	/ プロジェクト期間・開発
2033FY – 2035FY	Initial & nominal operation	/ プロジェクト期間・通常運用
2036FY – 2044FY	Post-mission operation	/ 後期運用期間

1.

プロジェクトの意義

宇宙での生命生存可能環境の形成と宇宙の構造と物質の起源の理解

Science goals of the project

2.

プロジェクトの科学目的

Science goals of the project

水素、酸素、炭素は、安定元素であるヘリウムを除くと、宇宙で最も存在量が多い3元素である。宇宙にありふれているが故に、宇宙の大規模構造から、銀河、恒星を構成するガス、および惑星や衛星の大気の形成に関与する。宇宙空間におけるこれらの元素の物理状態を調べることは、幅広い空間スケールにおける宇宙の構造形成とその進化の解明をもたらす。

LAPYUTA は、宇宙での「生命生存可能環境」と「構造と物質の起源」の理解を目指し、4つの課題を目的とする。

課題1では、宇宙で最も詳細な観測が可能な太陽系内天体のうち、木星の水衛星と地球型惑星の大気進化に焦点を当てる。氷衛星の表層から噴出する水蒸気と衛星大気の連続観測を初めて行い、地下海の生命生存可能環境の理解につなげる。火星と金星では大気下層から宇宙へ輸送される水や温室効果ガスの全球分布とその変動から、大気が宇宙空間へ散逸する条件を明らかにし、大気進化と生命生存可能環境の変遷の理解につなげる。これらの観測は直接探査と相補的で、各惑星の探査計画との協調により科学成果が最大化される。

課題2では、高分散分光観測によって系外惑星のトランジット観測から外圏大気の広がりをつえ、ハビタブルゾーン近傍の系外惑星大気の特徴づけを行う。また、系外惑星の環境に影響を与える恒星活動の解明を目指す。外圏大気を観測する紫外線観測は、下層大気を観測する可視・赤外観測計画と相補的である。課題1と2で鍵となる観測領域は天体

と宇宙の境界に形成される外圏大気・電離大気である。様々な天体に対してこの領域を観測し、大気の広がりや散逸を制御する惑星や恒星の条件を明らかにする。

課題3では宇宙の構造形成史の中で残された基本的な問題の一つである銀河の形成過程に取り組む。銀河の構造に水素 Ly α ハローが普遍的に含まれているかどうかを調べ、Ly α ハローの物理的起源が理論で予言されている星形成を引き起こすコールドストリームと呼ばれる低温のガス降着なのか、それとも衛星銀河や銀河周辺の HI ガスかを明らかにする。

課題4では、物質進化における未解明課題である重元素合成の解明を目指す。中性子星合体による重元素合成の全体像を把握し、重元素の起源を理解するとともに、超新星爆発からの最初のシグナルを観測し、大質量星進化の最終段階を理解することにつなげる。

3.

プロジェクトの科学的
意義と目標の根拠

**Rationale for the
scientific goals and
objectives**

1. 科学的意義の根拠：研究の背景、当該分野の研究状況、等 / Scientific background, status of the relevant scientific area, etc.

5,000 個以上の太陽系外惑星が発見され、その中には生命生存可能環境を持つ惑星があると期待されている。惑星環境の形態と進化を明らかにする上で、太陽系探査は貴重な手段であり、生命生存可能環境の探査という観点では、ガス惑星を周回する氷衛星（水地殻の下に地下海を持つ天体）や地球型惑星の大気進化が惑星科学の焦点となっている。土星の氷衛星エンセラダスでは、表面から噴き出す水の発見により地下海が存在やその化学的特徴が明らかになり、木星の氷衛星エウロパやガニメデの地下海は次世代の探査候補となっている。エウロパの表層で見ついている水噴出現象は地下海を起源とする可能性がある。水噴出の詳しい出現特性が得られれば、地下海が存在や水噴出を駆動する地殻活動の情報が得られる可能性がある。現状では水噴出の検出は1例（地上赤外線観測と、Galileo 探査機のプラズマ観測を含めると3例）にとどまっており、観測機会の充実が望まれる。一方、氷衛星の周囲の宇宙空間は、衛星イオの火山ガスを起源としたプラズマで満たされており、プラズマが氷衛星表層に照射すると、表層物質が変性する。地下海起源の表層物質変性の時間変化や化学変化をトレースできれば、表層年代が制約でき、変性する前の内部海物質の化学組成の解明を通して、内部海の生命存在可能性を制約できる。

火星・金星の現在の環境では液体の水が安定に存在できないが、かつては温暖な気候を有し海が存在した可能性が指摘されている。海が失われた要因の一つとして宇宙への流出が重要視されており、現在も大気中の水蒸気や温室効果ガスを起源とする成分が流出している。流出量の空間および時間変化の法則性を見出すことで火星や金星の歴史上で失われた水や温室効果ガスの総量に制約を与えることが期待される。系外惑星大気の特徴づけは生命存在可能環境の探査のもう一つのピースであり、特にハビタブルゾーン近傍の系外惑星大気の検出が今後の重要な観測目標となっているが、現時点では地球型系外惑星の大気の検出の報告はない。また、惑星系の環境は、中心星が惑星に及ぼす様々な影響と密接に関連しており、惑星外環境に影響を与える恒星活動も重要な研究課題である。

宇宙における生命生存可能環境の探求の背後には、宇宙そのものの進化や、宇宙の構造が現在の姿に至る過程についての根本的な興味がある。宇宙の構造形成史に残る基本的な

問題のひとつが、銀河の形成過程である。銀河には、星形成銀河を含むハッブル系列の銀河のほか、活動的な超巨大ブラックホールを持つ銀河である AGN や QSO など、多種多様な銀河が存在する。宇宙論スケールでの銀河分布が示す物質のフィラメント構造は標準的な理論枠組みであるラムダ項入りの冷たい暗黒物質 (Λ CDM) モデルで説明されるが、銀河形成に関わる様々なバリオン過程は、宇宙史を通して多くの課題と疑問が残されている。銀河形成の背後にある物理過程を明らかにするために欠落している重要な観測的証拠を新たに得ることによって、理論的な研究によって提案されている銀河形成のシナリオの検証が可能となる。宇宙の物質進化においても、重元素の元素合成過程の解明など、根本的な問題が残されている。ビッグバンにおけるヘリウムなどの軽元素の合成過程や、ヘリウムから鉄までの最も豊富な元素が恒星中心での核融合反応で合成される過程はよく分かっているが、鉄より重い重元素の起源は十分に分かっていない。爆発直後に出現する高温ガス中の重元素の観測により、中性子星合体に伴う元素合成過程が明らかとなり、宇宙の物質進化の解明に寄与することが期待される。

2. 提案するプロジェクトコンセプトは当該分野になにをもたらそうとするのか / Goals and objectives: new scientific steps the proposed concept aims to achieve in the science area

惑星科学分野では探査機による太陽系生命探査が行われようとしており、天文学では生命をはぐくむ環境を持つ系外惑星があるのかが、具体的な観測課題になっている。惑星科学と天文学が同じ目標に向かう時代に入りつつあり、太陽系天体の探査から得られる詳細な知見と、天文観測から得られることが期待される系外惑星の統計的特徴の融合によって普遍的な視点から生命生存可能環境の理解が深まることが期待される。未解決問題である銀河形成過程において、銀河成長の主要因と考えられているのが、コールドストリームをはじめとした宇宙大規模構造からの質量降着であると予想されており、コールドストリームとそれに付随すると考えられる水素 Ly α ハローの観測的検証は銀河形成過程の本質的理解に繋がり、本分野での大きなマイルストーンとなるだろう。また、中性子星合体の観測による重元素合成の検証は、物理学・宇宙物理学における長年の未解明問題である宇宙における重元素の起源の理解に繋がる。

太陽系天体の観測に適した高空間分解能の宇宙望遠鏡を開発するグループは、過去も現状も日本のみとなっている。LAPYUTA 計画では、探査機への紫外線分光器の搭載経験を持つ惑星科学分野と望遠鏡の開発経験をもつ天文学分野の融合による検討により、世界的にもユニークな望遠鏡ミッションを立ち上げる。

3. 提案するプロジェクトコンセプトの強みと過去、現在、未来の他のプロジェクト、研究・探査との関係 / The competing power of the proposed project concept and its relationship to past, current, and future other investigations and projects.

木星系の氷衛星は 2030 年代の国際探査 (Europa Clipper、JUICE) の対象であり、火星、金星でも 2030 年代に複数の探査計画が予定されている。LAPYUTA が検討している課題 1 の科学観測は、単体でも科学成果の創出が可能である。その場の詳細観測を行

う惑星探査と、空間構造を俯瞰する LOPYUTA の撮像観測の組み合わせにより、科学成果の最大化が可能となり、その中で望遠鏡ミッションの強みを活かすことができる。例えば、LOPYUTA が計画する木星の衛星エウロパの水噴出の観測は Europa Clipper 搭載の紫外分光器でも実施されるが、Europa Clipper が LOPYUTA より高い空間解像度で観測可能な時間は1回のフライバイあたり10時間程度であり、長期間のモニタリングでは LOPYUTA の長所を活かせる。

更なる系外惑星の発見をめざす計画として TESS, JASMINE, NGRST (Roman), PLATO があり、可視赤外線トランジット分光により下層大気の観測を行う JWST, ARIEL がある。LOPYUTA は紫外線波長のトランジット観測を行う唯一の計画で、外圏大気中の H, C, O, C⁺ による吸光観測を行う。外圏大気は密度が低いが、低質量星系では中心星の強い XUV 放射により上層大気が加熱され、遠方まで密度の高い外圏大気形成される。その結果、紫外線波長での光学的厚みが1を超える領域は中心星の大きさに近い広がりを持ち、トランジット時の中心星の紫外輝線に大きな吸収が期待される。

銀河形成研究では、銀河天文学において大きく欠けている紫外線の撮像および分光観測を極近傍の銀河に対して系統的に行う。LOPYUTA は H Ly α 波長 (120-130nm) で高い感度と波長分解能を備え、GALEX 衛星よりも数10倍高い空間分解能、HST と同等の探査速度を遠紫外線域で実現し、紫外線観測に集中できる特徴を生かして、これまで達成できなかった近傍銀河の高精度紫外線探査を実現する。HST は軌道高度が低く、地球水素コロナの強い前景光によって H Ly α の静止波長近傍の観測が実現していないが、LOPYUTA は HST より高い遠地点高度を取り、H Ly α 観測を可能にする。これにより Ly α 輝線の空間分布及びそれらの分光的性質を探り、Astro2020 で重要課題の1つ (cosmic ecosystem) として位置付けられている、銀河と銀河周辺物質、銀河間物質の関係でミッシングピースとなっている cold accretion に代表される銀河インフローを調べる。NASA が進めている UVEX は波長が 139-190nm と 203-270nm の2つの広帯域バンドで撮像を行うが、波長幅が広いため弱い Ly α 輝線を捉えることが難しく、off band として使うバンドは長波長側に大きく伸びているため Ly α 輝線の波長域の連続光推定に大きな系統誤差が入ることになる。LOPYUTA は 120-170nm 域に5-6バンドのフィルタを用意し、Ly α 輝線の検出とその off band 観測によって UVEX では難しい Ly α ハローの検出を実現する。UVEX の分光の波長分解能は R-1400 程度と低く、Ly α 輝線プロファイルの観測研究で必要とされる波長分解能の下限値 R-3000-5000 に及ばない。LOPYUTA は R-6500 を達成し、Ly α 輝線プロファイルの観測を可能とする。

時間領域天文学では、鍵となる突発天体の紫外線即応観測を行う。中性子星合体の観測では、重力波 (GW) 望遠鏡との連携した多波長観測を行う。2030 年代前半には GW 源の位置決定精度が向上し、マルチメッセンジャー観測の好機が到来する。LOPYUTA は短い波長の高解像度観測を担い、中性子星合体の重元素合成、特に爆発放出物質の最外層における r-process 元素合成を明らかにする。また、広視野時間領域サーベイと連携した超新星の紫外線観測によって、爆発直前の大質量星の質量放出を定量化する。

ハッブル宇宙望遠鏡 (HST) の退役後に紫外線波長域をカバーする高解像度の宇宙望遠鏡はなく、LOPYUTA は 2030 年代の紫外線観測プラットフォームを担うポテンシャルがある。LOPYUTA で開発される大型・高効率分光器やミラーのコーティングの技

術は、将来の大型宇宙望遠鏡計画でも必須となる。2040年代にNASAが計画している Habitable Worlds Observatory (HWO) は、100個以上の地球サイズの太陽系外惑星上層大気の観測を可能にする。LAPYUTA は、将来の超大型ミッションに参加する足掛かりとなる。

4.

プロジェクトが実施する 研究

Scientific investigations of the project

課題1と2では、天体の表層から供給されるガスと恒星の影響（恒星風・放射）の相互作用により特徴付けられる高層大気（主に酸素、水素、炭素）の放射・吸収を観測する。

課題1のうち、氷衛星の水噴出と衛星表層への高温プラズマの照射は、噴出した水蒸気と衛星の酸素分子大気の解離励起発光により把握する。複数回の衛星公転周期にわたって連続観測し、これらの現象の物理特性から地下海の手がかりを得る。衛星周囲に分布する衛星イオ起源のイオンや磁気圏で加熱された高温プラズマの発光から、氷衛星への物質輸送を可視化する。金星・火星では、大気流出が起こる高層大気の変動要因（太陽風、太陽紫外線放射、惑星の下層大気現象）の時間スケールをカバーした長期観測を行う。これらの変動に対する高層大気の応答の研究を通して、現在とは異なる太陽風・太陽放射条件であった過去の状況の推定が可能となる。

課題2では、低質量星系の中心星近傍に形成されるハビタブルゾーン近傍の地球型惑星に着目し、酸素、水素、炭素輝線のトランジット分光を行う。TRAPPIST-1eが地球同様の酸素を含む大気を持つと仮定した場合、モデル依存性はあるものの、XUV放射を考慮した外圏大気の計算から、酸素輝線のトランジット時の減光率は最大70%程度となる見込みである。

課題3では近傍銀河の Ly α Halo の空間構造とコールドストリームの検出を可能とする撮像と分光観測を行う。Ly α ハローの物理的起源がコールドストリームのガス降着なのか、衛星銀河や銀河周辺の HI ガスかによって、Ly α の輝線プロファイルが異なることが予想されている。LAPYUTA は分解能 R=6,500 で Ly α 輝線を 50 σ 以上で検出し、コールドストリームのガス降着で予想される短波長側に裾が伸びる Ly α 輝線の検出が可能となる見込みである。

課題4では中性子星合体直後の初期放射の分光と撮像を紫外線波長域で実施する。中性子星合体の頻度は、まだ不定性が大きいものの、2030年代に重力波干渉計が300 Mpcの距離の重力波を検出できるようになると、年間30天体程度の検出が見込まれる。LAPYUTAは、3年で9ヶ月間の時間領域観測キャンペーン中に5天体程度の観測を行い、中性子星合体最外層の元素合成とその多様性を検証する。超新星爆発の観測範囲は2030年代のUV広視野望遠鏡の感度では500 Mpc程度となり、時間領域観測キャンペーン期間内に3000天体の検出が見込まれる。超新星爆発初期の紫外線分光観測 (< 200nm) はこれまで例がなく、より初期に発見された近傍の明るい天体を5天体程度観測できれば、大質量星の最後の10年間の活動性を検証するためのデータを得ることができる。表4.1に4つの課題を達成するための性能要求を示す。

表 4.1 : LOPYUTA ミッションへの性能要求

要求項目	課題	性能要求の包絡値
観測対象	1	木星系氷衛星の水噴出と、オーロラ観測によるプラズマ照射の可視化、木星のオーロラ放射・磁気圏プラズマ放射の観測による高温プラズマの可視化 火星、金星高層大気(熱圏、電離圏、外圏)の空間構造および時間変動
	2	トランジット観測によるハビタブルゾーン内の地球型惑星の外圏大気およびハビタブルゾーン内縁の暴走温室状態の惑星大気 系外惑星系の恒星放射
	3	$z < 0.02$ の 168 個の銀河 (3 elliptical galaxies, 6 S0 galaxies, 82 spiral galaxies, 4 barred-spiral galaxies, 9 irregular galaxies, 64 QSOs/AGN) Ly α ハローの主要部が視野に収まる条件として、半光度で定義した短軸方向の直径が 0.5-1.5 角度分となる条件で抽出
	4	中性子星合体 < 300 Mpc、超新星爆発 < 500 Mpc 限界等級 20 AB mag (分光)、24.5 AB mag (撮像)に相当
波長	1	H Ly α : 121.6 nm (H 121.567 nm & D 121.534 nm) Hydrogen Lyman-Werner band : 120-160 nm OI 130.4 nm, OI 135.6 nm, SII 126.0 nm, SIV 140.5 nm, SIII 119.1 nm CI: 156.1 nm, CII 133.5 nm, Solar continuum (>160 nm)
	2	HI Ly α 121.6 nm, OI 130.5 nm, CII 133.5 nm, NI 113.4 nm
	3	H Ly α 121.6 nm, Ly α off-band, 150 nm UV continuum CIV 1548 nm, HeII 164.0 nm (option)
	4	115-190 nm (broad Ly α emission line)
空間分解能	1	0.1 秒角(分光)、0.2 秒角 (撮像)
	2	0.6 秒角
	3	≤ 1 秒角
	4	≤ 1 秒角
波長分解能	1	≤ 0.01 nm (分光)
	2	3 pm (分光)
	3	0.02 nm (分光)
	4	0.1 nm (分光)
視野	1	>70 秒角(分光)、180 秒角 (撮像)
	2	N.A.
	3	>2 秒角(分光)、180 秒角 x 180 秒角 (撮像)
	4	180 秒角 x 180 秒角 (撮像)
有効面積	1	>350 cm ²
	2	>350 cm ²
	3	>300 cm ²
	4	300 cm ²

5.

スケジュール

Schedule

1. 大まかなスケジュール / Rough schedule

実施計画は、計画の概念検討期間、プロジェクト準備期間、プロジェクト期間からなる。申請時（2024年2月）は概念検討期間中にあり、2023年度末までに公募型小型計画規模での実現性検討を実施する。空間分解能 0.1 秒角の設計要求を満足する望遠鏡システムの概念設計を行うとともに、望遠鏡の調整・検証試験の実施方法の検討、キー技術開発を進め、開発コストの試算を行う。プロジェクト準備期間では、ミッション部の主要コンポーネントの試作品を開発し、実機を用いた指向擾乱補正機能と望遠鏡の熱歪みを評価する。真空紫外用大口径ミラーの設計、アレイ型検出器による高感度・高分解能の大型検出

器の試作を行い、キー技術の確立を進める。ロケットとの整合性確認、衛星バス部とミッション部の双方のコスト試算と開発スケジュールを更新する。プロジェクト期間は、初期設計を完了し、望遠鏡及び光学部品のエンジニアリングモデル（EM）の製造と評価試験を実施する。キー技術を製造メーカーに移転する。EM の評価試験結果を基に最終設計を決定し、フライトモデルを製造する。打ち上げ後は半年間の初期運用期間に機能確認の後、3年間のプロジェクト観測期間に4つの科学課題を実現する観測を行う。その後観測装置の健全性が保たれている場合は、最長9年間の後期運用観測を実施する。

図 5.1.1 : LAPYUTA の開発・運用スケジュール

Phase	Team	Activity	FY 2021	FY 2022	FY 2023	FY 2024	FY 2025	FY 2026	FY 2027	FY 2028	FY 2029	FY 2030	FY 2031	FY 2032	FY 2033	FY 2034	FY 2035	FY 2036
Pre-phase A1a	WG	Concept study	■	■														
Pre-phase A1b	WG ISAS	Acceleration process			■	■			MDR									
Pre-phase A2	Pre-project candidate	Mission definition study				■	■	■		SRR								
Phase A1	Pre-project	Concept design							■	SDR								
Phase A2	Pre-project industry	Planning definition									■	PDR						
Phase B	Project	Basic design									■	CDR						
Phase C		Detailed design										■						Launch
Phase D		Facrification/ Verification											■	■	■			
Phase E		Initial & nominal operations															■	■

2. 開発スケジュールの科学成果への影響 / Schedule impact on science

太陽系の惑星探査ミッションとの共同観測の機会が影響を受ける。課題1の木星系の観測は、2030年代初頭に探査が開始される JUICE と Europa Clipper によるその場観測との協調観測を行い、科学的成果を最大化するためには、図 5.1.1 のスケジュールを維持することが望ましい。金星では EnVision、DAVINCI+, VERITAS など、2030年代に探査が計画されており、金星の地質活動と大気の相互作用を研究するために、表面と下層大気を探査する。火星では、現在複数の軌道探査機と探査車のミッションが進行中であり、今後のミッションも計画されている。LAPYUTA のスケジュールによって惑星探査ミッションとの同時観測機会が得られれば、下層大気と上層大気の結合や、地殻磁場、太陽風、太陽活動によって制御された大気散逸を研究することができる。

6.

プロジェクトで使用する装置

Instrumentation of the project

1. 実施する実験・観測・分析などを実現する技術 / Description of the technology to realize the investigations

真空紫外線波長域 110nm ~ 190nm で光学系の有効面積 350cm² 以上、空間分解能 0.1 秒角以下、波長分解能 0.02nm 以下、観測視野 180 秒角以上の性能を持つ分光装置と撮像装置を搭載した紫外線宇宙望遠鏡。

2. 実施する実験・観測・分析などを実現する方法・技術について、他の技術、および類似技術との比較 / Comparisons of the selected technology with other technologies

課題1の太陽系天体の観測は、リモセンに加え、探査機によるその場観測も可能である。その場観測は、天体周辺のガスの物理状態の詳細情報を提供するが、ガスの空間構造と時間変化を分離することは原理的に不可能である。リモセンは空間構造を俯瞰できる点に長所がある。可視・赤外波長と比較して、紫外波長では太陽放射が弱くなるため、衛星・惑星の太陽反射光に対し天体周囲のガス発光を高コントラストで観測できる。課題2の系外惑星大気の紫外線分光観測では、広がった大気による吸収により上層大気の検出が可能となる。可視域や赤外域の観測は、下層大気の分子観測に有効である。課題3の研究では銀河周囲の水素ガスの分布を Ly α 放射の撮像より得る。HST はジオコ罗纳の前景放射の影響を強く受ける低高度軌道のため、 $z=0-0.02$ の銀河からの Ly α 放射を検出するのに十分な感度がない。UVEX では Ly α 輝線の撮像観測は予定されていない。課題4の爆発現象の研究では、爆発の最初期放射が紫外線で生じるため、紫外線必須の観測波長域となっている。

3. 提案装置の主要な機能 / Major functions of the proposed instrument

小型衛星バスに主鏡口径 60cm のカセグレン望遠鏡を搭載する。望遠鏡の焦点面に搭載する装置は、紫外線分光器（中分散分光器 MRS と高分散分光器 HRS）、紫外線スリットイメージャ UVIS、及びファインガイドセンサー FGS である。FGS とは別に中分散分光部と紫外線イメージャにはそれぞれに可視光視野ガイドカメラを設置し、観測対象の可視光像を用いて視野ガイドを行う。LAPYUTA に求められる設計目標を表 6.1 と 6.2 に示す。天体観測の前景光となる地球外圏大気の酸素、水素原子発光の影響を低減しつつ放射線ノイズの影響を回避するため、軌道の遠地点高度は 2,000km を想定している。

LAPYUTA は、真空紫外波長域（110-190nm）において、高反射率コーティング技術や高感度検出器の開発を進め、12% と高い end-to-end throughput を獲得する。これにより、口径 60cm ながら口径 2.4m の HST に匹敵する感度を得る（図 7.1 参照）。また、ひさき衛星で達成した観測対象を追尾する姿勢指向制御機能（2 秒角以下）に加えて、擾乱補正機能を追加することにより、0.1 秒角の指向精度を達成する。この前提で、(1) 科学観測ターゲットとして選択された天体に対し、十分な観測時間を確保すること（系内惑星なら 3 か月以上の連続追尾観測可能）、(2) 発生の検知後、3 時間以内に観測を開始する機動的運用を可能とすることを観測運用方針として、検討初期から取り込んでいることが LAPYUTA の機能の特徴である。

表 6.1：分光器に対する性能要求

Spatial resolution	0.1 arcsec
Wavelength range	113-190 nm
Spectral resolution	0.02 nm (中分散分光), 3 pm (高分散分光)
Effective area	> 350 cm ²
Field-of-view	70arcsec (option: 180arcsec)
Slit width	0.55", 1", 2", 2.8", 20" (option: 0.027")

表 6.2：イメージャに対する性能要求

Spatial resolution	0.2 arcsec (option: 0.1 arcsec)
Wavelength range (Filter pass band)	A: Blank(120-190nm), B: 122-Long-Pass(>122nm), C: 115-180nm, D: 160-Long-Pass, E: 125-155nm, F: 145-170nm
Effective area	300 cm ²
Field-of-view	180 arcsec x 180 arcsec

7.

プロジェクトで獲得するデータ

Data to be obtained

獲得するデータは紫外線波長の分光及び撮像データである。図 7.1、7.2 と表 7.1 に現在想定している諸元を示す。表と図中の基準値は、現時点での基礎開発検討結果に基づく性能、設計値は今後の開発で目指す目標性能である。この性能で放射・吸収波長とその強さ・ドップラーシフトを観測し、ガスの物理量情報を導出する。科学目的と観測データおよび導出する物理量の関係を表 7.2 に示す。

表 7.1：観測装置の諸元

	中分散分光部	高分散分光部	紫外イメージャ*
有効面積 (@130nm)	基準値:250 m ² 設計値:350 m ²	中分散分光部の ~5割	基準値:330 m ² 設計値:450 m ²
空間分解能	0.1 秒角	0.6 秒角	0.2 秒角
波長範囲	110-190 nm	110-170 nm	110-190 nm
波長分解能	0.02nm	0.003nm	フィルタに依存
視野	100秒角	13.5秒角	3分角×3分角

*有効面積はフィルタの透過率を含まない値

図 7.1: (左) 中分散分光器 MRS (赤実線：設計値、赤破線：基準値)と、MRS と同程度の波長・空間分解能を持つ HST の STIS 140M (青) の感度。(右) MRS について積分時間 1 時間で S/N=5 を達成する輝線フラックス限界を赤で示す (基準値)。値の幅は検出器のダークノイズの範囲に対応 (放射線ノイズを含み、0.7 - 11 counts /s/cm²。ひさき衛星の実績による)。青は HST STIS G140M の輝線フラックス限界を示す (ダークノイズ: 0.07-6.0 × 10⁻⁴ counts/s/pixel)。

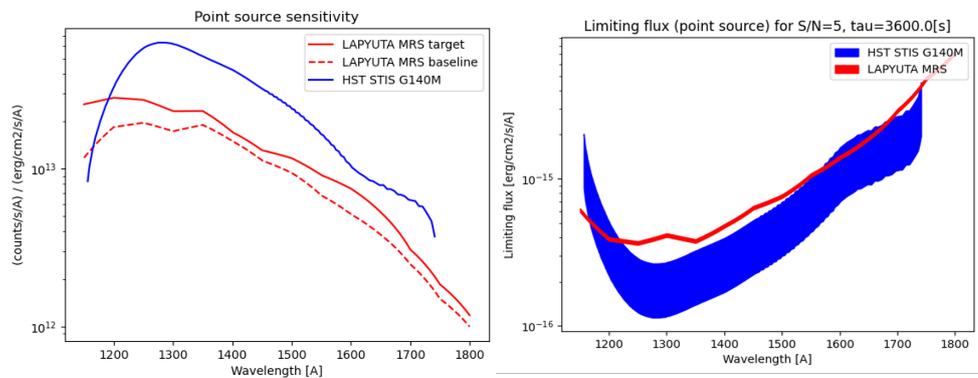


図 7.2：LAPYUTA の撮像観測に対する限界等級と S/N の関係を示す。計算条件は、有効面積 300cm²、積分時間 600 秒、中心波長 1200Å、波長幅 400Å、PSF 1 秒角、検出器ダークノイズ 1.43 counts/cm²/s (ひさき実績)。

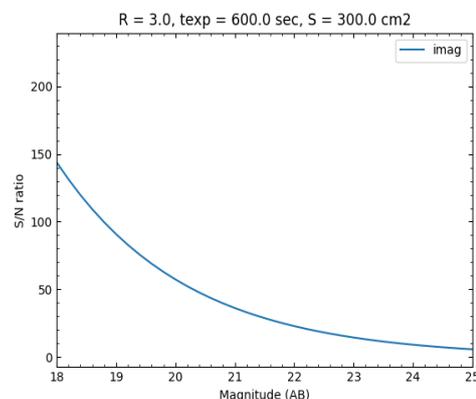


表 7.2：分光観測により獲得されるデータ（上段：撮像・下段：分光）

Objectives	Investigations	
	Physical parameters	Observables
Objective 1 Jupiter's aurora	Energy and flux of precipitating energetic electrons from the magnetosphere and their time and spatial distributions	UV brightness and color ratio (e.g., ratio of the brightness at 125-155nm to that at 145-170nm) of the UV aurora
Objective 3	Distribution of galaxy Ly α halos	Ly α and UV continuum at ~115-160nm and 150nm
Objective 4	The heavy element abundances in the outermost ejecta and the dynamics of relativistic jets The final 10 years of massive star evolution	Total luminosity and UV spectral energy distribution for the first ~3 hours.

Objectives	Investigations	
	Physical parameters	Observables
Objective 1 Icy moons	Density and spatial extent of the water plume Hot electron flux (~10's eV) around moons	HI 121.6nm & OI130.4nm (dissociation of H ₂ O) OI130.4nm and OI136.5nm (dissociation of O ₂)
Objective 1 Jupiter's aurora	Density and temperature of the plasma torus Energy and flux of auroral energetic electrons	Emission lines of sulfur and oxygen ions and atoms UV spectrum in Hydrogen Lyman-Werner bands
Objective 1 Venus & Mars	Densities of H, O, C atoms in the exosphere and ionosphere (options) D/H ratios in the upper atmospheres	HI 121.6 nm, OI130.5 nm, OI 135.6 nm H 121.567nm, D 121.534nm
Objective 2	The oxygen, hydrogen, atoms and carbene ion in exoplanet's exosphere and plasmasphere	Absorption of O(130.4 nm), H (121.6nm), C+ (133.5nm)
	Nitrogen in the exoplanet atmosphere Doppler velocity, temperature, and density of plasmas for the stellar active region, flares, and coronal mass ejections	NI 113.4 nm The irradiance and temporal variation of emission lines of H I Ly α and other highly-ionized atoms.
Objective 3	Distribution of galaxy H Ly α halos	Ly α at 120-126nm & UV continuum at 150-170nm
	The metal enrichment and ionization states	The identifications of CIV 154.8nm and HeII 164.0nm
Objective 4	The density and spatial distribution of circumstellar material at a vicinity of the massive stars	The UV spectra covering Lyman alpha

8.

主要技術要素 Key technologies

1. 主要技術要素と開発が必要な技術要素 / Key technologies and those requiring further investment and development

主要技術要素と、これから開発が必要な技術要素を表 8.1.1 に示す。

表 8.1.1：主要技術要素

(a) 衛星バスシステム(ひさき衛星からの差分)	<ul style="list-style-type: none"> ・デオービットとペリジアップのため推進系の追加 ・熱歪み対策のため STT (スタートラッカー) のミッション部への搭載 ・遠地点高度をひさき衛星よりも高くすることによる放射線ノイズの影響検討 ・統合 SMU の搭載
(b) 60cm 紫外線望遠鏡	<ul style="list-style-type: none"> ・大口径主鏡(60cm 級) <ul style="list-style-type: none"> 0.1 秒角の結像性能要求を達成する主鏡・支持構造 紫外線波長用に表面粗さを十分に抑えた口径 60cm 鏡 要求精度を満たす計測方法・調整方法の検討 反射率を 90%まで高めるためのコーティング技術の開発 ・望遠鏡の構造設計 <ul style="list-style-type: none"> 0.1 秒角の空間分解能達成に向けたアライメント誤差、熱歪み、衛星内振動による望遠鏡指向方向のブレの定量的な影響評価とその検証 ・焦点調節機構：光学アライメント要求を満たすストローク・ピッチを持つ焦点調節機構 ・フード、バッフル、蓋、校正光源
(c) 擾乱補正機能 (空間分解能 0.1 秒角の達成に必要な電子式手振れ補正機能)	<ul style="list-style-type: none"> ・ガイドカメラによる高速撮像と紫外検出器による光子検出の同期 ・電子式手振れ補正機能の機上実装
(d) 分光器・イメージャ	<ul style="list-style-type: none"> ・スリットおよびスリット駆動機構、収差補正型、高分散分光素子 ・非球面ミラー、フィルタ
(e) 大型高感度・高分解能検出	<ul style="list-style-type: none"> ・大型 (80 x 20 mm)・高感度 (30%@130 nm)・高分解能(10 μm) ファネル型 MCP の新規開発 ・2k x 2k の CMOS のアレー化(4 枚)による、大型・大フォーマット化

2. 技術的不確定性の大きな技術要素 / Assessment of uncertainties in technologies

現状で技術的不確定性の大きな技術要素と対処方針は以下の通りである。

1. 高感度を実現する UV コーティングと劣化対策：BBM 製造による技術の確立
2. 高解像度・高感度を実現する紫外線ミラー（特に主鏡）の面精度、表面粗さ：BBM 製造による技術の確立
3. 望遠鏡構造の熱歪みや衛星搭載機器の擾乱による視野ブレに起因する空間分解能の劣化：開発の早期段階（MDR 前）で MTM モデルを用いた実測評価を行い、その結果を基本設計へ反映する（11 章も参照）
4. 望遠鏡構造の熱歪みによる光学系アラインメントのズレを補償する副鏡フォーカス調整機構の開発：フロントローディング活動と BBM 製造による技術の確立

3. 既存技術の活用条件 / Assessment of heritages

小型科学衛星バスの採用を想定し、バス部の装置には同じバスを採用したひさき衛星やあらせ衛星の実績、先行して検討が進んでいる SOLAR-C の検討結果を採用する。LAPYUTA の指向精度要求はひさき衛星より高い。バス部と望遠鏡部の接続部の熱ひずみやバス部で生じる微小振動の影響低減のため、新規検討が必要となる。

望遠鏡システムは望遠鏡部とセンサー部に分かれる。センサー部に搭載される紫外線分光器と紫外線イメージャにはそれぞれに可視光視野ガイドカメラを設置する。また、可視光視野ガイドカメラし、長時間スケール (> 数秒) の指向補正は「ひさき」と同様の機能を実装する。キー技術としては、高空間分解能を達成するための姿勢擾乱の補正技術、紫外線用大口径反射鏡、大型検出器の 3 つがある。検出器に入射した光子位置を高速で読み出し、同時に高速撮像する参照光源（観測対象の可視光像）の重心位置を用いて短時間スケール姿勢擾乱を補正する。紫外線用反射鏡はひさき衛星の口径 20cm から 60cm への大型化に伴い、製造工程に加え、検査・調整方法の検討を行う。検出器はひさき衛星、WSO-UV の紫外分光器 UVSPEX のヘリテージを用い、大型化の開発を行う。

9.

想定されるコスト

Cost estimate

表 9.1 にコンセプト提案時点でのコスト見積もりを示す。見積りの不定性としてバス部（衛星バス部メーカーの検討結果）に 10%、ミッション部（主にひさき衛星、WSO -UV/UVSPEX 開発費からの類推）に 30%、運用・地上系に 10%（ひさき衛星実績を参考）、人件費に 30%、打上げ（イプシロン S を想定）に 5% のマージンを含めている。消費税と物価変動分が考慮されている。

表 9.1：コスト見積（単位：百万円）

項目	内容	金額
衛星システム・バス		4,893
ミッション機器	望遠鏡、主鏡、副鏡、分光器、イメージャ、ガイドカメラ、ミッションデータプロセッサ	4,315
管理・設計・試験	バス部作業費、ミッション・システム管理、ミッション部単体試験	3,194
運用・地上系	地上系、定常運用費(3年)、機動的運用追加経費(3年)、データアーカイブ、プロジェクト人件費	1,083
打ち上げ	望遠鏡コンタミ管理を含む	3,708
後期運用	9年間分	469
合計		17,662

10.

技術ヘリテージと技術開発状況と開発計画

Technical heritages, technology development status and plan

1. 技術ヘリテージと技術開発状況 / Technology heritage, development history and status

衛星バス部の主要技術要素と現在のTRLを表10.1.1に示す。TRLは衛星バス部メーカーがJAXAのガイドラインに沿って評価した結果である。バス部の構成要素は基本的にはひさき衛星と同等である。STT、RCSはひさき衛星から変更となるが実績品を採用する。SMU、AOCP、およびHCEは統合化を想定しており、SOLAR-Cの検討実績を活用する。

ミッション部の主要技術要素と現在のTRLを表10.1.2に示す。ひさき衛星やWSO-UV/UVSPEXなどで培ったこれまでの技術ヘリテージを活用するが、8章で述べたように多くのコンポーネントで追加の変更・技術開発を要する。

表 10.1.1：衛星バス部の主要技術要素と現在のTRL

Subsystem	Component	TRL	Change category	Rationale
SMS	SMU*, TCIM, SWR, DR	9	I	Hisaki
COM	S-ANT, S-SIP, S-SW, S-HYB, S-TRP	9	I	Hisaki
EPS	SAP, SADM, PCU, APR, SBD, BAT	9	I	Hisaki
AOCS	ACOP*, RWA, MTQ, STT, IRU, CSAS, SPSH, GAS	9	I	Hisaki (except STT) STT: Concept study in FY2021
RCS		9	I	ASNARO, Arase
TCS	HCE*	9	I	Hisaki
STR		9	II	Hisaki

*統合化を想定

2. 技術開発計画 / Technology development plans

フェーズBまでの技術開発計画を示す。

プリフェーズ A1b

システム検討

望遠鏡光学設計に基づき、アライメント誤差配分を満足する望遠鏡システムの概念設計を実施。数学モデルにより主鏡の熱歪みが結像性能に与える影響を評価。バス部と望遠鏡を結合した構造数学モデルを作成し、望遠鏡に伝わる外乱量を評価。望遠鏡の試験・調整の実施環境・方法の調査を行い、コスト見積りに反映。

キー技術検討

- ・ 高空間分解能を実現するための指向擾乱補正機構のBBMの試作と動作検証。
- ・ 主鏡アセンブリの概念設計、材料・強度検討、計測系検討、コーティング技術開発。
- ・ 20 × 80mmの大型ファネル型MCPのプロトタイプを製作し、感度と分解能を評価。

表 10.1.2：ミッション部の主要技術要素と現在のTRL

Subsystem	Component	TRL	Change category	Rationale
Telescope	Primary mirror	3	IV	New development for UV range
	Structure	3	III	Concept study in FY2022
	Focusing mechanism	4	III	Front loading
	Hood, Baffle	3	III	Hisaki
Pointing fluctuation canceling system		4	IV	Concept study in FY2021-2022
Spectromete	Movable slits	9	III	Hisaki
	Toroidal blazed grating	5	II	WSO-UV/UVSPEX
	Large funnel MCP detector	3	IV	Based on WSO-UV/UVSPEX
	0th order monitoring camera	4	III	New CMOS sensor (under study)
Slit imager	Filter wheel	9	II	Hayabusa-2
	Filters	9	II	PROCYON/LAICA
	Funnel MCP detector	5	II	WSO-UV/UVSPEX
	Slit monitoring camera	4	III	New CMOS sensor (under study)
Fine guide sensor		3	III	New CMOS sensor (under study)

プリフェーズ A2

システム検討

A1b までの検討結果を踏まえ、バス部・ミッション部の概念設計を実施し、総費用の見積精度を向上させる。バス部の高周波振動に起因する指向擾乱の補正機能実証を早期に実施するため、主要コンポーネント（主鏡、望遠鏡光学系、検出器、指向擾乱補正機能）のBBMを開発。

キー技術

- ・ 擾乱補正機能と光学系に割り当てる誤差配分を決定し、望遠鏡の構造設計に反映。
- ・ 主鏡の概念設計結果を望遠鏡の光学設計・構造設計に反映。
- ・ 4つの CMOS センサ (2k × 2k) を用いたアレイ型 CMOS 読出し機構を開発し、大型ファネル型 MCP と組み合わせた検出器の試作・性能検証。

フェーズ A

BBM の開発を通じて主要技術を確認し、望遠鏡と衛星バスの概念設計を行う。ミッション運用の基本計画を決定する。ミッション部の BBM を用いて、指向擾乱補正機能や望遠鏡の熱歪みを評価する可視光試験を実施。

フェーズ B

基本設計の実施。主鏡・副鏡の EM を製造し、可視光による評価試験（衛星バスから望遠鏡への擾乱伝搬、熱歪）を実施。このために衛星バス部の STM を準備する。大型 MCP 検出器などの主要技術を確認し、メーカーに技術移管する。

11.

プロジェクトのリスク管理

Risk Management Plan of the Project

システム開発・観測運用・マネジメントに関するリスク識別表を表 11.1 に示す。LAPYUTA の開発は日本国内のみで実施することを想定しており、国際的な選定に関わるリスクはない。現時点でリスクの高い項目のうち、バス部とミッション部の熱歪み量の差による光学系の位置ずれ (2-1) は STT をミッション部に搭載するとともに、ファイナガイドセンサ（ガイドカメラ）の搭載により対応する。衛星搭載機器（リアクションホ

イールなど)の擾乱による視野ブレの補正許容量逸脱(2-2)については、開発の早期段階(MDR前)でMTMモデルを用いた実測評価を行い、その結果を基本設計へ反映する。重量とコストのシステム管理(4-1, 4-2)は、MDR前のフロントローディング活動を強化し、評価精度を向上させる。

表 11.1: システム開発・観測運用・マネジメントに関するリスク識別表。現時点評価とMDR時点評価(計画)。

No.	区分	原因	影響	評価			対処方針案	MDR時点 総合評価
				影響度	発生確率	総合		
2	システム開発							
1	軌道上決定姿勢と望遠鏡指向の差	バス構造とミッション構造に熱ひずみ量の差が発生する。	モニタカメラでの追尾ができない場合、指向変動補正が効かず、分解能が低減する。	重大	中	高	スタートラッカーをミッション部に搭載する。ファインガイドセンサを搭載する。	中
2	衛星全体の機械的特性(振動)による視野ブレ	必要な姿勢安定度の実現、検証方法	空間分解能要求が達成できない	重大	中	高	フロントローディングフェーズでMTMモデルを用いて変位を測定する。	中
3	重力下での試験方法	紫外線望遠鏡としての性能出し、地上での検証方法が確立されていない。	性能検証ができない。	重大	低	中	バス部・ミッション部を統合試験方法を、プロジェクト化までに検討を進める。	中
4	搭載姿勢制御系-ミッション系のインターフェース	バス部姿勢系へのガイドカメラ情報伝達部の開発難航	ミッション系-姿勢制御系の噛み合わせ試験スケジュールが遅延する	重大	低	中	「ひさき」衛星での実績を踏襲する予定ではあるが、プロジェクト化までに差分がないか精査する。	中
3	観測運用							
1	局アサイン不足	データ量不足	所定の時間分解能の観測データを取得できない	軽微	低	小	他プロジェクトとの地上局配置の事前交渉	小
2	計画系	観測計画立案アプリケーション開発の難航	タイムリーな観測が実施できない	軽微	低	小	「ひさき」衛星での実績を踏襲する予定ではあるが、プロジェクト化までに差分がないか精査する。	小
4	マネジメント							
1	重量超過	宇宙機の総質量を許容上限値内に維持することができない。	所定の軌道に投入できず、デスコープ	重大	中	高	フロントローディング活動の強化により、重量精度を向上させる。	中
2	コスト超過	プロジェクト費用が許容限度を超える。	ミッション中止	重大	中	高	フロントローディング活動を強化し、コスト評価の精度を向上させる。	中
3	スケジュール遅延	プロジェクトの進捗がマスタースケジュールを維持できない。	コスト増	中程度	中	中	フロントローディング活動を強化し、設計・製造・検証フェーズの計画精度を高める。	中

12.

天文学コミュニティの持続可能性に関わる戦略

Strategy for the Sustainability of Astronomical community

LAPYUTAは太陽系科学、系外惑星大気、太陽物理、天文学に跨る分野横断ミッションである。分野を跨いでサイエンスセンターを運用することによって、光学観測を通じた融合研究領域の開拓と牽引人材の育成に貢献する。LAPYUTAの開発を通して獲得される技術のうち、大型検出器と鏡のコーティング技術は将来の大型宇宙望遠鏡計画でも必須となる。2040年代にNASAが打ち上げを計画している6m紫外・赤外宇宙望遠鏡HWOのような超大型ミッションに参加するための足掛かりとなる。

別紙 プロジェクト共同提案者

氏名	所属名称	役割	氏名	所属名称	役割
相澤紗絵	フランス LPP	課題 1	成田憲保	東京大学	課題 2
青木翔平	東京大学	課題 1	野津湧太	コロラド大	課題 2
伊庭 遼	ISAS/JAXA	システム	小野宜昭	東京大学	課題 3
榎木谷海	ISAS/JAXA	課題 2, 光学	大内正己	国立天文台/東京大学	課題 3
塩谷圭吾	ISAS/JAXA	光学	尾崎直哉	ISAS/JAXA	システム
羽森仁志	ISAS/JAXA	システム	佐川英夫	京都産業大学	課題 1

原田裕己	京都大学	課題 1	坂井真一郎	ISAS/JAXA	システム
生駒大洋	国立天文台	課題 2	堺 正太朗	慶應大学	課題 1
鍵谷将人	東北大学	課題 1,光学	佐藤毅彦	ISAS/JAXA	課題 1
亀田真吾	立教大学	課題 2,光学	澁谷隆俊	北見工大	課題 3
笠羽 康正	東北大学	課題 1	清水敏文	ISAS/JAXA	課題 2, 光学
河野太郎	ISAS/JAXA	システム	住 貴宏	大阪大学	課題 3,4,光学
木村 淳	大阪大学	課題 1	鈴木雄大	ISAS/JAXA	課題 1
木村智樹	東京理科大学	課題 1	高木聖子	北海道大学	課題 1
北 元	東北工大	課題 1	丹 秀也	JAMSTEC	課題 1
小玉貴則	東京大学	課題 2	田中雅臣	東北大学	課題 4
古賀亮一	名古屋大学	課題 1	埜 千尋	情報通信研究機構	課題 1
桑原正輝	立教大学	課題 1,光学	寺田直樹	東北大学	課題 1,2
近藤依央菜	ISAS/JAXA	システム	富永 望	国立天文台	課題 4
益永 圭	山形大学	課題 1	鳥海 森	ISAS/JAXA	課題 2
松田昇也	金沢大学	システム	矢島秀伸	筑波大学	課題 3
松田有一	国立天文台	課題 3,4	山田 学	千葉工業大学	課題 1
守屋 堯	国立天文台	課題 4	山崎 敦	ISAS/JAXA	課題 1,光学,システム
村上 豪	ISAS/JAXA	課題 1,光学,システム	谷津 陽一	東京工業大学	課題 4
中川広務	東北大学	課題 1	吉岡和夫	東京大学	課題 1,光学
中山陽史	立教大学	課題 1,2	米田瑞生	山陽学園大学	課題 1
行方宏介	国立天文台	課題 2			

PRIMA: PRobe far-Infrared Mission for Astrophysics

遠赤外線冷却望遠鏡 PRIMA

0.

概要

Summary

PRIMA: PRobe far-Infrared Mission for Astrophysics 遠赤外線冷却望遠鏡 PRIMA

Project Category

1. Big projects having large impacts on GOPIRA, typically cost estimate over ~1 Billion JPY (光赤天連に大きな影響を与える、装置・施設の開発を含む大型計画の提案、目安として 10 億円以上の規模)

Abstract of science goals, objectives, and methods

PRIMA is a cryogenically cooled infrared space telescope with an aperture of 1.8m. Its launch in 2032 will enable infrared observations from space, after a gap of more than 10 years since the previous far-infrared mission. With its much higher sensitivity than any earlier far-infrared telescopes, PRIMA's main goals are to reveal initial conditions of the planet formation, the evolution of galactic ecosystems, and the buildup of dust and metals. PRIMA is equipped with an imaging instrument with polarimetry and a spectroscopic instrument with a continuous wavelength coverage of 24-235 μm (80-235 μm for polarimetry). Both instruments excel at large-field surveys that enable unbiased observations of numerous sources and spectral lines in a wide range of regions and wavelength bands. This will allow a multifaceted understanding of the physical and chemical conditions of objects with statistical samples. In particular, it will make the first spectroscopic surveys of normal galaxies in the distant Universe and elucidate the evolution of star formation, supermassive black holes, and the interstellar medium from the peak of galaxy growth at redshift 2-3 to the present. In addition, abundant features of water and HD in the far-infrared will play a key role in revealing the processes of star and planet formation. Participation in PRIMA is an optimal opportunity to exploit the accumulated knowledge in infrared astronomy, which has been cultivated in Japan through AKARI, SPICA, and other missions. It also provides an ideal means of maintaining and developing expertise to pass on to the next generation. Japan's participation in PI Science will be through technical contributions, for which the data downlink support with the JAXA Misasa Deep Space Station, the delivery of a thermal shield, and the participation in the payload performance characterization and verification are currently under consideration.

プロジェクトの意義と科学目的・方法の要旨

PRIMA は口径 1.8m の冷却赤外線宇宙望遠鏡であり、2032 年の打ち上げの実現により

10年以上ぶりにスペースからの遠赤外線観測が可能となる。従来の赤外線望遠鏡よりも圧倒的に高い感度を活かし、惑星形成の初期状態の解明、銀河における多階層の進化プロセス、ダストと重元素の生成の解明を主な科学目標とする。PRIMAは偏光観測も可能な撮像観測装置と分光観測装置を搭載し、いずれも24-235 μm (偏光は80-261 μm のみ)の波長域を連続的にカバーしている。両装置とも大視野サーベイを得意とし、無バイアスに多数の天体やスペクトル線を広い領域や波長帯で検出することで、統計的に多角的に天体の物理化学状態を多角的に調査できる。特に、遠方宇宙にある典型的な銀河を初めて分光観測し、赤方偏移2-3の宇宙最盛期から現在までの星形成、巨大ブラックホール、星間物質の性質と進化の解明を目指す。また、遠赤外線領域に多数含まれる水やHDのスペクトルを用いて星・惑星形成過程を明らかにする。PRIMAへの参画は、あかり衛星やSPICA等を通じてこれまで国内で培った赤外線天文学に関わる知見の蓄積を活かし、次世代へ受け継ぎながらも発展できる最大の機会である。日本のPIサイエンスへの参加は技術貢献を通じて行われ、JAXA美笹深宇宙探査用地上局によるデータ受信支援、熱シールドの提供、冷却光学系を含むペイロード試験・評価への貢献による貢献が現在検討されている。

Principle Investigator

Name: Hanae Inami

Affiliation: Hiroshima University

E-mail address: hanae@hiroshima-u.ac.jp

プロジェクト代表者

氏名: 稲見華恵

所属: 広島大学

E-mail アドレス: hanae@hiroshima-u.ac.jp

Co-investigator and his/her role

Tohru Nagao (Ehime University): Science lead

Takao Nakagawa (Tokyo City University, ISAS/JAXA): Technical lead

Keysuke Shinozaki (JAXA): 18K shield lead

Takayuki Tamura (ISAS/JAXA): Data downlink support lead, JAXA project management

Chisato Ikuta (ISAS/JAXA): JAXA project management

プロジェクト共同提案者とその役割

長尾 透 (愛媛大学): 科学検討リード

中川 貴雄 (東京都市大学, 宇宙科学研究所): 技術検討リード

篠崎 慶亮 (宇宙航空研究開発機構): 18K シールド提供リード

田村 隆幸 (宇宙科学研究所): データ受信支援リード、JAXA プロジェクト管理

生田ちさと (宇宙科学研究所): JAXA プロジェクト管理

Estimate of total cost

1,025,000k JPY (Planned Japanese contribution, including margin)

総コストの見積り

1,025,000 千円 (日本貢献分, マージン込み)

Estimate of total FTE (Full-Time Equivalent) necessary to accomplish the project.

5.6 FTE/year

プロジェクト実現に必要な総 FTE (人年) の見積り

5.6 人 / 年

Duration of the project / プロジェクト実施期間

From FY2025 to FY2037 (13 years)

プロジェクト実施期間

FY2025 から FY2037 (13 年間)

1.

プロジェクトの意義

従来よりも圧倒的に高感度の遠赤外線観測による宇宙の諸構造の進化解明

Science goals of the project

2.

プロジェクトの科学目的

口径 1.8m の冷却赤外線望遠鏡 PRIMA (PRobe far-Infrared Mission for Astrophysics) では、高感度な遠赤外線観測で初めて可能となる 3 つの大きな科学目的をもつ。

Science goals of the project

(1) 惑星形成の初期状態の解明

原始惑星系円盤から惑星誕生への道筋にはまだ多くの謎が残る。水 (H_2O) の凍結と昇華は円盤内の固体物質の総質量、ひいてはガス惑星コアの形成に影響を及ぼし、円盤ガス散逸は惑星コアへのガスの集積によるガス惑星形成、また、惑星の軌道進化を制御すると考えられているが、それらの進化はまだ明らかではない。PRIMA では高分散かつ広帯域をカバーする分光観測を用いて、生命の根源でもある H_2O の原始惑星系円盤での分布を解明し、HD 輝線から円盤ガスの総質量の進化を明らかにする。大半の H_2O 輝線は PRIMA がカバーする波長領域に存在するため、低温から高温までの様々な温度領域の H_2O ガスの分布を探ることができる。これにより、気相 (水蒸気) と固相 (氷) の境

界であるスノーライン付近の水ペブルの半径方向のドリフトの有無を明らかにし、ガス惑星コアの形成およびガス惑星大気の組成に示唆を与える。日本が主導する GREX-PLUS (10-18 μ m) は H₂O を用いて、スノーラインの位置の進化を調べることを目標としており、PRIMA のサイエンスと相補的である。GREX-PLUS は高分散であるのに対し、PRIMA はより広い波長をカバーし、検出できる H₂O 輝線の数 は 10 倍以上と圧倒的に多い。両者の協力により、円盤全体での水の状態に基づいた惑星形成の初期状態の理解が進むことが期待される。

(2) 銀河における多階層的進化プロセスの解明

赤外線天文衛星あかり、スピッツァー宇宙望遠鏡、ハーシェル宇宙望遠鏡による赤外線観測などから、現在の宇宙から少なくとも宇宙最盛期と言われる赤方偏移 2 までの間の宇宙では、塵に隠された銀河が宇宙史における大半の星形成を担うことが分かっている。また、これらの銀河の多数には巨大ブラックホールが共存していることも示唆されているが、その実態はつかめていない。PRIMA は、広視野の撮像・分光観測によりダストの熱放射およびガスの輝線は無バイアスに観測することで、銀河の進化と巨大ブラックホールの関係を明らかにする。また、ガスの運動を調査し、アウトフローが銀河進化に与える影響を解明する。既存または近い将来に実現が見込まれる望遠鏡や装置でも、これらの情報へのアクセスは困難である。TMT など可視光・近赤外線領域を観測する望遠鏡は塵の影響を受け、ミリ波・サブミリ波を観測する ALMA では低温のガス・ダストしか捉えることが出来ず、それも赤方偏移 5 以上の銀河に限られる。中間赤外線地上観測が可能な TAO では感度が圧倒的に不足する。

(3) 重元素とダストの生成と進化の解明

高感度かつ広帯域の赤外線分光観測によって電離・中性・分子ガスの豊富な輝線情報を得ることで、宇宙誕生時点では水素・ヘリウムといった軽元素のみだった宇宙がいかんして様々な物質に富む世界に至ったのかを明らかにする。これまで可視光線領域のスペクトル線を用いた星間物質の重元素量（金属量）や電離度等の物理化学状態診断が行われてきたが、塵による吸収・散乱による影響により、系統的な誤差が顕著に生じていた可能性が指摘されている。赤外線観測によりこの問題は緩和され、星間物質の真の物理化学情報を取得できる。PRIMA では約 100 億年前の宇宙から現在にかけて、ダストや重元素がどれだけの状態が存在し、それが現在の状態に至ったのかを探索する。特に、波長分解能 R~10 で連続した 24-84 μ m の撮像バンドを用いることで、ダスト分子輝線 PAH (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) を効率よく捉えることができる強みがある。あかり衛星やスピッツァーでも同様な探索がされたが、感度不足のため観測サンプルが少ない上、明るい銀河に偏っている。また、ALMA によるサブミリ波の輝線観測では、地球大気によって観測可能な波長範囲が限られ、宇宙最盛期の銀河に対してアクセスできる輝線は非常に限られている。

3.

プロジェクトの科学的
意義と目標の根拠

Rationale for the
scientific goals and
objectives

1. 科学的意義の根拠：研究の背景、当該分野の研究状況、等 / Scientific background, status of the relevant scientific area, etc.

あかり、スピッツァー、ハーシェル等により行われてきた遠赤外線宇宙望遠鏡観測により、塵に隠された現象を明らかにする遠赤外線観測の科学的重要性が認識されている。宇宙進化の根幹を左右する星形成の大半は塵に隠された赤外線銀河で起こっているだけでなく、銀河の性質を示唆する重要なスペクトル線の大半が赤外線領域に含まれている。また、惑星形成過程の理解に不可欠な HD 分子や H₂O は赤外線領域に存在し、惑星形成の初期状態を理解するための円盤ガス総質量と散逸過程の調査に必須となる。

しかし、直近の遠赤外線ミッションであるハーシェル運用終了から既に 10 年以上経過したが、当該分野ではその後の進展はまだなく、次世代の遠赤外線ミッションが必須である。実際に Astro2020 による勧告により Probe クラスの遠赤外線（及び X 線）ミッション推進の機会が NASA よりもたらされ、遠赤外線 Probe PRIMA（と X 線 Probe AXIS）がその最終候補として選ばれている。ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡（JWST）の成功もあり、世界的にみても赤外線天文学の次なる発展に大きな期待が寄せられており、日本もあかり衛星と SPICA 計画での経験を活かし、その大潮流に乗れるよう積極的に取り組む必要がある。また、遠赤外線観測と特に親和性の高い ALMA による遠方銀河や星・惑星系円盤の理解の急進展により、赤外線コミュニティもここ数年で成長してきており、遠赤外線ミッション実現への期待は高い。PRIMA では、電波天文学コミュニティ等の様々な分野と協力し、ALMA2030 や AtLAST/LST 等との協力も視野に入れ推進していく。

2. 提案するプロジェクトコンセプトは当該分野になにをもたらそうとするのか / Goals and objectives: new scientific steps the proposed concept aims to achieve in the science area

遠赤外線 Probe 候補の 1 つである PRIMA は、未達成である遠赤外線領域を用いた高感度広域観測により、惑星形成の初期状態、銀河の多階層的進化プロセスの解明を実現させる。

惑星形成過程

主に水分子輝線を直接検出することにより、氷ペブルのドリフトにより巨大惑星コアの形成が促進されているのかを調査する。また、HD 輝線からガス全質量を直接求め、ALMA データ等とも合わせることで円盤中の炭素 [C/H] と酸素 [O/H] の存在量を求めることでガス惑星形成の初期条件を探り、原始惑星系円盤の物理化学構造を解明し、その進化過程を明らかにする。PRIMA では、これらの惑星形成に関わるキーパラメータを獲得することで、原始惑星系円盤での惑星誕生への道筋についての理解に躍進をもたらす。

銀河の物質進化

あかりやスピッツァーでは近傍銀河でしか観測できなかった中間赤外線領域の輝線観測、およびハーシェルでも比較的近傍の銀河についてしか実現できなかった遠赤外線の輝

線を $z=2-3$ まで観測することで、宇宙史における銀河進化最盛期から現在までの星間物質の物理化学状態とその進化を統計調査できる。これらの銀河への巨大ブラックホールからの寄与も多様であると考えられるが、分光を用いた大規模サーベイの利点から、両者の共進化への理解も進展することが期待される。また、輝線プロフィールからガスのフィードバックの推定もでき、銀河がパッシブになり星形成をやめるプロセスも捉えられる。PRIMA では、宇宙が最も活動的だった時期からそれが成熟し鎮まっていく物理過程の現場を直接的に観測し、銀河進化プロセスの統一的理解に発展をもたらす。

3. 提案するプロジェクトコンセプトの強みと過去、現在、未来の他のプロジェクト、研究・探査との関係 / The competing power of the proposed project concept and its relationship to past, current, and future other investigations and projects.

赤外線天文学の黎明期に打ち上げられた IRTS や、その後の発展に大きな貢献をした赤外線天文衛星あかり、世界からも注目されていた SPICA 計画により、日本は当該分野を牽引してきた。日本の PRIMA 計画への参画は、これまで国内で培った赤外線天文学に関わる知見の蓄積を活かし、新たな形でこれまでの経験を次世代へ受け継ぎながらも更に発展させる最大の機会となる。また、世界的に見ても、直近の遠赤外線ミッションであるハーシェル運用終了から既に 10 年経過し、FIR-Probe は今後 10 年で唯一の遠赤外線ミッションとなる。これは日本天文コミュニティが赤外線天文学の幕開けの頃から弛まらずに積み上げてきた、赤外線天文学の英知を最大限に活かせる機会である。また、FIR-Probe への直接参加は、今後日本がリードしたり参加する国際ミッションに向けた人材や経験を培える重要な一ステップになる。

4.

プロジェクトが実施する研究

Scientific investigations of the project

上記の科学目的達成には、撮像では 1500 時間の観測時間で 1 平方度を掃いた際に $3e-18W/m^2$ (5σ)、分光観測では 1 時間の観測時間で $2e-19W/m^2$ (5σ) の感度に達する必要がある。いずれも望遠鏡冷却がなかったハーシェルよりも約 20-100 倍良い感度である。これらの感度達成のために、PRIMA では望遠鏡そのものを 4.5K まで冷却し、観測装置は 1K まで冷却する。また、撮像での大視野とマルチバンド観測の同時達成は hyperspectral imaging、偏光観測は 4 バンドの別視野同時観測で実現させ、分光サーベイでは steering mirror を用いたスリットマッピングを用いることで大視野観測を可能にする。日本から PRIMA への貢献の内容としては、(1) PRIMA チームが主導する PI 観測への参加、(2) ペイロード冷却用 18K シールドの提供、(3) JAXA 美笹局による科学データ受信支援、(4) 冷却光学系の試験・性能評価、の 4 点を検討している。

5.

スケジュール Schedule

1. 大まかなスケジュール / Rough schedule

PRIMA は 2032 年の打ち上げを目指している (2037 年までの 5 年間の運用)。

1. 実施する実験・観測・分析などを実現する技術 / Description of the technology to realize the investigations

日本からの技術貢献は、18K シールドの提供、科学データ受信支援、冷却光学系の試験・性能評価をベースラインとする。

2. 実施する実験・観測・分析などを実現する方法・技術について、他の技術、および類似技術との比較 / Comparisons of the selected technology with other technologies

18K シールドの提供

望遠鏡を含む観測系全体が <4.5K の極低温に冷却するため、PRIMA では多層シールドを開発する。この内、日本は 45K ステージとペイロードの 4.5K ステージの間の放射熱輸送を軽減する 18K シールドを提供する。このシールドは軽量で優れた熱遮断性能が必要となるが、JAXA 研究開発部門が SPICA 等のために開発した Non-Interlayer-Contact Spacer (NICS, 層間非接触スペーサ) Multi Layer Insulation (MLI) を活用する。米国 Quest 社にも同様の製品があるが単体性能としては低く、改良開発が必要な状況であるが、JAXA/NICS MLI は現状で要求を満たすと期待されている。ただし、NICS MLI でこれまで想定・評価した温度域は、PRIMA 要求温度域 (4.5K-45K) よりも高いため、PRIMA 該当温度域での性能評価が必要である。

科学データ受信支援

JAXA 美笹局による PRIMA 科学データの受信支援を実施する。具体的には、Ka 26-27GHz 帯において、128Mbps のデータ速度で、年平均で一週間あたり 12 時間程度のデータ受信を行う。美笹局での受信支援を行う期間は、PRIMA の打ち上げ後、運用フェーズ中の約 5 年間である。PRIMA では Roman 宇宙望遠鏡で整備した地上受信系、データ送信系を活用するが、入力データの変更に伴うシステムの一部は改修が必要になる。PRIMA チームでは、まだ計画中の NASA Lunar Exploration Ground Sites (LEGS) の利用を想定しているために不定性が大きい。一方、運用実績がある美笹局が果たす役割は大きく、PRIMA の信頼性向上への貢献に加え、美笹局の存在を世界にアピールすることもできる。

冷却光学系の試験・性能評価

日本がこれまでの冷却ミッション (IRTS、あかり、CIBER、CIBER2) で培ってきた冷却光学系開発の実績、SPICA 計画および自然科学研究機構 Open Mix Lab (OML) で開発した Computer Graphics Hologram (CGH) を用いた鏡面評価の技術を活用し、PRIMA の搭載機器の試験・評価活動に貢献する。具体的には、分光器 FIRESS の光学系のインテグレーションの際に、光学系アライメント評価を含む試験方法を提案し、試験結果の評価・解析を行う。PRIMA は自由曲面鏡を多用し、装置の軽量・コンパクト化を実現しており、光学系の評価が重要である。OML プログラムを通じて、GREX-PLUS チームのメンバーとも協力して冷却光学系評価技術の共同開発に取り組んでおり、

GREX-PLUS での冷却光学系の評価、特に冷却望遠鏡の光学試験への応用を検討している。

3. 提案装置の主要な機能 / Major functions of the proposed instrument

18K シールド

45K ステージとペイロードの 4.5K ステージの間に設置され、両ステージ間での放射熱輸送を軽減する。

JAXA 美笹深宇宙探査用地上局

JAXA 美笹局の口径 54m のアンテナを用いて、Ka 帯 (26-27GHz) による PRIMA の科学データを受信する。

分光装置 FIRESS

日本チームが地上試験に参加予定の分光装置 FIRESS は観測波長 24-235 μm を 4 バンドに分け、2 バンドの同時観測により全波長帯をカバーする能力を持つ。FIRESS 光学系で使用される自由曲面鏡の鏡面精度は、CGH を使用することにより測定することができる。

7.

プロジェクトで獲得する データ

Data to be obtained

本プロジェクトは遠赤外線を用いた大型サーベイを特に得意とし、波長域 24-235 μm を網羅する大視野の撮像・分光サーベイデータを獲得する。多数のスペクトル線や多波長にわたる連続光をカバーすることで、多様な相からの輝線や吸収線、複数のダスト輝線、良い連続光放射カバレッジを得ることができ、天体の物理化学状態を多角的に調査することができる。大型サーベイにより数 1000 天体を網羅的に観測し統計的調査を行うことで、科学目標に挙げた天体の進化過程を解明する。

また、PRIMA がもつ全観測時間の 25-30% は PI サイエンスに割り当てられるが、残りの 70-75% はプロポーザル募集による観測となる General Observer (GO) サイエンスに充てられる。日本の PI サイエンスへの参加は技術貢献を通じて行われる。一方で、GO サイエンスの初期アイデアについては General Observer Science Book vol.1 および vol.2 を参照されたい (arXiv:2310.20572 および 2511.10927)。第 1 巻と第 2 巻それぞれで 76 件と 120 件のサイエンス・ケース掲載があり (再掲載含む)、そのうち国内所属の研究者がリードしたものは、それぞれ 4 件と 23 件である。

8.

主要技術要素

Key technologies

1. 主要技術要素と開発が必要な技術要素 / Key technologies and those requiring further investment and development

ここでは現在検討されている日本からの技術貢献内容に絞って述べる。この部分で開発が必要となる技術要素は以下の通りである。

18K シールドの提供

18K シールドに用いる NICS MLI 自体は、より高温 (300K-77K) での適用のために開発されたものである。当初の温度の目的に対して、性能評価、環境試験等も終了しており、TRL は十分に高い (4+; 構造解析済み) と判断される。しかしながら、PRIMA に要求されている温度域では、NICS MLI の性能は評価されていない。NICS MLI の低温性能の予測において、最大の不定性をもつのは、その支持構造 (スペーサ) の該当温度域 (45-18K) における熱伝導率である。この最大の不定性を取り除くことにより、NICS MLI による 18K シールドへの提供性の技術的成熟度を大きく上げる必要がある。

美笹局によるデータ受信支援

美笹局は、Ka 帯での受信が可能になるように、JAXA の Roman 計画による大規模な改修、機能追加が実施されている。しかし、その仕様は Roman からの送信データに特化されているため、PRIMA にそのまま適用できず、入力データの変更に伴うシステムの一部は改修が必要になる。

冷却光学系の試験・性能評価

主要な技術は Computer Graphics Hologram (CGH) を用いたレーザー干渉計システムである。CGH による光学計測は SPICA の中間赤外線装置 SPICA Mid-Infrared Instrument (SMI) の自由曲面光学系の試験のために開発が開始された。これまでは従来の静的な CGH 素子 (それぞれの波面形状に応じて最適な回折格子パターンを微細加工で製作) を用いてきたが、最近に変幻自在の波面生成が可能な動的 CGH 素子 (マイクロミラーアレイなど) の導入を検討しており、その開発を進めている。特に PRIMA では光学系の環境温度が 4K 程度と低いため、より極低温の試験環境に対する適合性を確保することが課題である。

2. 技術的不確定性の大きな技術要素 / Assessment of uncertainties in technologies

日本からの技術貢献内容はこれまでのヘリテージを利用しており、ある程度の実証がされた技術をベースにした技術要素となっている。ただし、以下のような不確定性がある。

18K シールド

考えられるリスクおよびリスク低減策は次の通りである。

- 所定温度 (18-45K) における熱的要求を満たせない。
 - 支持部材の熱伝導度測定を早期に実施 (NASA/GSFC で進行中)。
 - Small scale model を用いたカロリメータ評価試験を行う。
- 構造要求と熱的要求を同時に満たす設計解が得られない。
 - Small scale model を用いた音響試験を早期に行うことを検討する。
 - EM では Full size での機械環境試験を提案する。
 - 端部に十分な間隙を確保し、急減圧環境でも問題ない設計とする。

•FM 組立の遅延

- Full size ではなくタイル方式（複数枚を並べる）を採用する。重ね合わせ部分は EM までに検証する。組立方法は開発初期に Trade-off し確定する。
- Fallback plan を用意しておく。
- アルミニウム・フィルムの放射率の不定性
 - 参考に出来る NASA の文献値を用い、最悪ケースを想定し設計する。
 - アルミニウム厚を大きくした設計を採用する。
- 検証の遅延
 - Critical な要素（End to End 試験方法など）を識別し、開発初期段階に米国 側と協議して検証方法を確定する。
 - Small scale model を用いた熱的評価・構造評価を開発初期に行う。

美笹局によるデータ受信支援

新規の開発項目はない。従って、技術的不確定性の大きな要素はない。

冷却光学系の試験・性能評価

物品提供ではないため技術面でのリスクはほぼないと考えられるが、International Traffic in Arms Regulations (ITAR) 規制により試験へ参加できない可能性が最大のリスクである。なお、新技術として開発を進めている動的 CGH 方式では光学試験で要求される波面精度を達成できないことが判明した場合、従来の静的 CGH 方式に切り替えた試験方法を提案する。

3. 既存技術の活用条件 / Assessment of heritages

いずれの技術貢献でも既存技術を活用するが、主に以下のような相違がある。

18K シールド

MLI の層間に熱可塑性樹脂である polyether ether ketone (PEEK) 製スペーサ (NICS) を導入することで、軽量でありながらも、従来よりも高い断熱性能を持つ MLI を JAXA 研究開発部門第二研究ユニットが SPICA 向けに開発した技術を活用する。しかし、NICS MLI 自体は PRIMA で要求されるよりも高温 (300K–77K) での適用のために開発されたものであるため、PRIMA に要求されている温度域 (45K–4.5K) では性能評価はされていない。

美笹局によるデータ受信支援

Roman のデータを受信するため、JAXA 美笹局において新たに Ka 帯の受信能力の整備が行われており、PRIMA ではそれを活用する。ただし、PRIMA が送信するデータに合致するように受信システムを改修する必要がある。

冷却光学系の試験・性能評価

日本がこれまで培ってきた、IRTS やあかりなどの赤外線天文衛星、ロケット実験

CIBER1/2 などでの極低温光学系の実績、SPICA での開発や自然科学研究機構 Open Mix Lab での活動を活用する。PRIMA の分光装置 FIRESS の光学系には、日本がこれまで開発した経験のないトロイダル・グレーティングも含まれており、新たな経験となる。

9.

想定されるコスト Cost estimate

プロジェクト全体は NASA が主導して進めるものであり、日本の協力のスコープを超える。そのため、ここでは日本の貢献部分のみについてコストを示す（表 1）。開発に関わる部分は現状では不定性が大きいため 50% のマージン、旅費は ISAS/JAXA の見積り方法によりマージンなし、それ以外に関しては 20% としている。宇宙科学研究所の「戦略的海外共同研究」の枠に十分に入る見積もりである。

表 1：予算計画全体の見積り。金額の単位は千円。

項目	経費（マージンなし）	マージン込み合計
PRIMA-J 総経費	868,500	1,025,000
1. PI 観測強化活動	114,720	114,720
2. 美笹局受信	506,400	622,900
3. 18K シールド	96,500	144,750
4. 冷却光学系評価・開発への貢献	25,300	25,300
1-4. Research employment	107,250	107,250

10.

技術ヘリテージと技術 開発状況と開発計画

Technical heritages, technology development status and plan

日本からの貢献で開発が実施されるのは 18K シールドおよび美笹局の改修であるので、このセクションではこの 2 点に限って述べる。

1. 技術ヘリテージと技術開発状況 / Technology heritage, development history and status

18K シールドの開発

PRIMA に提供する NICS-MLI は、JAXA 研究開発部門の既開発品である。既に 77K–300K 間において数種類の供試体を開発済みであり、従来の MLI より高い断熱性能が得られる評価結果を得ている。現在、PRIMA の要求である 4.5K–45K 間の研究開発を進めている。

似た設計思想の MLI が米国の一社で開発されているが、JAXA 製の物に比べ、熱伝導率が高く、PRIMA に期待される熱遮断性能をそのまま期待できず、新たな開発を必要とする。JAXA 製のものは、該当温度域での性能の直接評価は未実施であるが、解析上では米国製品よりも熱遮断性能が高く、既開発品で PRIMA 要求を満たすことが期待されている。

美笹局の改修

JAXA は、臼田 64m アンテナの後継の深宇宙通信システムとして美笹局 (54m アンテナ) を建設し、X バンドと K (32GHz) バンドでの通信能力を整備した (GREAT プロジェクト)。加えて、ラグランジュ軌道の衛星や月からの広帯域伝送に対応できる Ka 帯 (26 GHz) での受信システムを追加した (GREAT2)。国内では、内之浦を含め 20m 以上アンテナを持つ地上局がある。しかし、大気減衰の環境条件などの条件から、美笹局が 2030 年代での高周波帯での高速通信のための唯一の設備である。

美笹局は、Roman 衛星の送信機からの Ka 帯の受信に適合した整備が実施されている。PRIMA では、Roman プロジェクトとも密接に情報交換し、美笹局を整備したシステムインテグレーターに PRIMA 用のシステム検討を依頼する予定である。

冷却光学系の試験・性能評価

SPICA や OML で開発した CGH 干渉計技術のヘリテージを活用する。現在、低温での光学アラインメント再調整を考慮した CGH パターンによる干渉計測定、および、マイクロミラーアレイを用いた動的 CGH による軸外し放物面の低温測定などに関連する技術を開発している状況である。

2. 技術開発計画 / Technology development plans

NASA Probe ミッションのタイムラインに合致するよう、以下の開発計画を立てており既に実行中である。

18K シールドの開発

FY2025

- 支持機構であるスペーサ 熱伝導率を実測し、構造要求に必要な情報の整理、および、スペーサ含めた構造設計の課題整理を行い、主な構造要求を確定する。
- MLI 断熱性能評価に用いる、無寒剤カロリメータの一部改修 (ヒートメータの改良設計試作および校正試験) を進める。

FY2026-FY2027 前半

- Engineering model を開発する。特に構造モデルについては実機サイズの振動試験を提案している。

FY2027 前半 -FY2027 中盤

- Flight model を開発する。MLI のため、ミッション部に実装しミッション部熱真空試験にて断熱性能の検証を行う。

美笹局の改修

JAXA による美笹局による PRIMA 科学データの受信支援のためのシステムを改修する。美笹局での受信支援を行う期間は、PRIMA の打ち上げ後および運用フェーズ中の約 5 年を想定する。

FY2025

- 衛星計画全体の運用および JAXA 美笹局の運用仕様（運用コンセプト）について検討する。この運用コンセプトと PRIMA の要求に基づき、美笹局に必要なシステム要件を整理し、仕様を明確化する。
- 要求仕様を実現させるための改修項目を明確化し、改修計画を策定する。

FY2026-2027

- 本受信には、Roman で整備した地上受信系、データ送信系を活用する。ただし、システムの一部は改修が必要になる。PDR までに要求仕様を確定し、改修の必要性・内容を確定する。また、打上げ前に行う試験項目について確定させる。

FY2028-2029

- 打上げの 2 年前までに受信システムの改修を完了する。

FY2030-2031

- 打上げ 1 年前に、インテグレーション試験・適合性試験を実施し、運用準備を行う。

冷却光学系の試験・性能評価

FY2025

- 光学アライメントおよび望遠鏡誤差波面生成のための CGH 技術の検討

FY2026

- 動的 CGH 導入および極低温試験対応に向けた検討。PRIMA 米国メンバーとの技術議論

FY2027

- 実際の装置光学系の評価試験への CGH 導入に向けた現地打ち合わせ、具体的な技術検討などを実施

11.

プロジェクトのリスク管理 Risk Management Plan of the Project

プロジェクト全体のリスクとしては、PRIMA はまだ Probe 候補であり、最終的に選ばれているわけではないことである。Probe クラスでは、既に第一次選抜が行われ、遠赤外線 Probe としては PRIMA が唯一の候補となっている。ただし、並行して、X 線 Probe としても一つ (AXIS) が候補として残っている。したがって、PRIMA が Probe として最終的に選ばれるとは限らないことが挙げられる。これ自体は米国内での予算や審査に左右されるものであり、日本から直接にリスク・コントロールすることは難しい。そのため、確実なセレクションを目指して、科学検討・技術検討の両者を着実に進めていく。

技術的なリスクとしては、18K シールド開発のスケジュールがタイトであることが挙げられる。これについては、前倒しで十分に準備を進めておくことが重要である。美笹局でのデータ受信については、Roman での実績を活用するものであり、技術的リスクは小さいと考えられる。ただし、仕様調整等をタイムリーに行うなどプロジェクト実行上のリスクを下げる努力が必要である。冷却光学系試験への貢献については、光学系の一部が ITAR 規制になり、日本から参加できる範囲が制限される可能性がある。これについては、ITAR 規制外の部分に注力するなどのリスク低減策をとる。

12.

天文学コミュニティの
持続可能性に関わる戦略

Strategy for the Sustainability of Astronomical community

宇宙ミッションが超大型化してきている今、国内での独自の研究開発による戦略的技術の開拓と強化、それを活かした超大型の国際協力計画への参加の2本柱が不可欠である。日本は赤外線天文学が本格化した初期からその発展に大きな貢献をしてきたが、日欧でリードした SPICA 計画が中止となり、これまで培った赤外線観測に関わる科学と技術を新たな形で次世代に受け継ぐ必要があるが、PRIMA はその役割を担える。PRIMA で培った経験や技術は次期戦略的中型ミッション計画 GREX-PLUS にも引き継げるものである。

また、PRIMA は次世代の広視野観測（例：近赤外線 ULTIMATE-Subaru, サブミリ波 AtLAST/LST）、ALMA による高空間分解能観測、TAO による地上からの赤外線観測などとの親和性が高く、多波長観測による宇宙物理の総合的理解の一端を担える。PRIMA 日本チームは、可視・赤外線コミュニティに限らず、電波コミュニティをはじめとした他分野コミュニティとの連携を強化していく。

ULTIMATE-Subaru project
ULTIMATE-Subaru 計画

0.

概要

Summary

ULTIMATE-Subaru project

ULTIMATE-Subaru 計画

Project Category

1. Big projects having large impacts on GOPIRA, typically cost estimate over ~1 Billion JPY (光赤天連に大きな影響を与える、装置・施設の開発を含む大型計画の提案、目安として 10 億円以上の規模)

Abstract of science goals, objectives, and methods

ULTIMATE-Subaru project aims to develop a wide-field (20-arcmin in diameter) ground-layer adaptive optics (GLAO) system and a wide-field NIR imager (WFI) on Subaru, to strengthen the wide-field capability of Subaru Telescope in NIR. ULTIMATE GLAO will deliver an improved image quality of FWHM-0.2-arcsec (at K-band) in moderate conditions at Maunakea over the full 20-arcmin FoV. ULTIMATE will be a primary facility instrument for bright nights of Subaru in late 2020s and beyond, and it is recognized and strongly supported by the Japanese Government/MEXT. Subaru wide-field surveys (in optical) have been playing leading roles in discoveries of rare, high-redshift galaxies, clusters, large-scale structures, as well as transient objects. To break the observational limit and to study even higher redshift universe, it is critical for Subaru to obtain wide-field capabilities in NIR. ULTIMATE will install a suite of unique narrow-/medium-band filters to perform deep and wide-field observations to study the structures and galaxy formation in the early universe, providing a great synergy with current/future space missions. ULTIMATE will also be a powerful tool for any research fields which require wide-field/high-resolution observations in NIR.

プロジェクトの意義と科学目的・方法の要旨

ULTIMATE-Subaru プロジェクトは、すばる望遠鏡に地上大型望遠鏡として最大視野(直径 20 分角)かつ高解像度(Kバンド帯の標準的な大気条件で FWHM ~ 0.2 秒角)の補償光学システム(GLAO)と近赤外線撮像装置(WFI)を搭載し、すばるの近赤外線での広視野探査能力を大幅に向上する計画である。2022 年度からスタートした「すばる 2」計画では、2020 年代後半以降のすばるの明夜を担う基幹装置として、文科省大規模学術フロンティア促進事業「大型光学赤外線望遠鏡による国際共同研究の推進」の支援を受けている。すばる望遠鏡は、その最大の特長である可視光広視野カメラにより、稀な明るい遠方天体や、突発天体、巨大な銀河団・大規模構造の研究において世界をリードしてきた。今後、より初期の宇宙で銀河・銀河団の形成最初期を捉えるには、近赤外線での

広視野・高感度な観測が必須である。ULTIMATE では多彩な狭帯域・中間帯域フィルター群を搭載し、宇宙望遠鏡とは相補的な近赤外広域撮像サーベイにより初期宇宙を見渡して、宇宙大規模構造と銀河の形成史を解明する。また遠方銀河分野に限らず、近赤外線の大視野・高解像度観測を必要とするあらゆる研究分野において強力なツールとなるものである。

Principle Investigator

Name: Yosuke Minowa / Yusei Koyama

Affiliation: Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

E-mail address: minoways@naoj.org / koyama@naoj.org

プロジェクト代表者

氏名： 美濃和陽典 / 小山佑世

所属： 国立天文台ハワイ観測所

E-mail アドレス： minoways@naoj.org / koyama@naoj.org

Co-investigator and his/her role

Listed in the Appendix of this document

プロジェクト共同提案者とその役割

末尾に別紙として記載

Estimate of total cost

ULTIMATE total cost 5.08 billion yen (GLAO 3.57 billion + WFI 1.51 billion)

総コストの見積り

ULTIMATE 総額 50.8 億円 (GLAO 35.7 億円 + WFI 15.1 億円)

Estimate of total FTE (Full-Time Equivalent) necessary to accomplish the project.

Total FTE numbers from FY2022 to FY2029 (final design to commissioning phase) including scientists, instrument scientists, engineers, technicians, and administrative staff. GLAO 104.4 FTE, WFI 22.5 FTE.

プロジェクト実現に必要な総 FTE (人年) の見積り

FY2022~FY2029 (最終設計~コミッショニング完了まで) の人員数 (装置開発、科学検討に必要な科学者、エンジニア、技術者、事務支援員を含む) の見積り。

GLAO 104.4 FTE (人年)、WFI 22.5 FTE (人年)

Duration of the project / プロジェクト実施期間

FY2022-FY2029

プロジェクト実施期間

2022 年度～ 2029 年度

1.

プロジェクトの意義

「宇宙の構造形成と銀河の誕生・成長・活動終焉の歴史を描き出す」

Science goals of the project

2.

プロジェクトの科学目的

Science goals of the project

ULTIMATE-Subaru プロジェクトは、すばる望遠鏡に地上大型望遠鏡として最大視野をもつ広視野補償光学（地表層補償光学；GLAO）システムと広視野近赤外線撮像装置（WFI）を搭載し、銀河天文学の未解決問題に挑む。具体的には、「(1) 最初の銀河はいつ生まれ、宇宙の再電離はどのように進行したか？初期宇宙の重元素はどのように生成され供給されたか？」「(2) 大質量銀河はいつどこで成長したか？」「(3) 最盛期の銀河の形成・進化は周辺環境とどう関連しているか？また、なぜ星形成活動は止まるのか？」という銀河宇宙史における根源的な疑問に答える。これらの問いは、以下のとおり ULTIMATE を用いた銀河宇宙史の「黎明期 ($z > 6$)」「加速期 ($3 < z < 5$)」「最盛期 ($1 < z < 3$)」の各時代の銀河探査によって実現できる。

- 1) **黎明期 ($z > 6$)** : 宇宙初期の密度揺らぎが成長し、連結したフィラメント構造が形成される。そしてその構造に沿って銀河が形成され、それを取り囲むように電離バブルが成長し、再電離が進行すると予想されているが、その実態は明らかではない。ULTIMATE では、高密度領域に沿って不均一に再電離が起こる様子を捉えるため、近赤外線での狭帯域フィルターの広視野観測により Ly α 輝線銀河の空間分布を調べ、電離領域がどの様に形成され、それがどのように拡大するのかを描き出す。また ULTIMATE は、初期宇宙の重元素の起源にも迫る。最近の JWST による最遠方銀河の観測によると、宇宙誕生後 5 億年 ($z \sim 10$) の銀河でも既に現在の 6～20% の重元素量をもつものが存在し、その量は重力崩壊型超新星だけでは説明できない。そこで注目されるのが、太陽の 150～300 倍の大質量星の爆発として理論的に存在が予言されている「対不安定型超新星」である。これは一度の爆発で重力崩壊型超新星の 100 倍以上の重元素を放出することができるため、初期宇宙の重元素合成の鍵を握っていると考えられるが、観測的には未発見である。ULTIMATE は、近赤外線での時間軸観測により遠方宇宙に対不安定型超新星を発見し、その発生率から初期宇宙の大量の重元素の起源を明らかにする。
- 2) **加速期 ($3 < z < 5$)** : 最近の研究によって、 10^{11} 太陽質量を超える大質量銀河が赤方偏移 4 を超える宇宙にも存在することが確認された。このような大質量銀河がどの程度存在するのか、さらに質量の大きい銀河が存在するかどうかは、冷たい暗黒物質が支配的な宇宙の階層的銀河形成モデルに強い制限を与えうるが、JWST を含めて限ら

れた視野の深宇宙観測だけでは十分な統計が得られない。ULTIMATE では近赤外線の間帯域フィルターを用いた広視野探査観測により、赤方偏移 5.5 まで遡って大質量銀河を系統的に探査する。高密度領域と一般領域で大質量銀河の分布を比較することにより、大質量銀河の形成がどのくらいバイアスされているのかを定量化し、初期の宇宙で大質量銀河が発現する条件を明らかにする。

3) **最盛期 ($1 < z < 3$)**: 宇宙大規模構造に沿って銀河は集団化し、銀河団や銀河群が生まれる。そのなかで個々の銀河の進化史は、周辺の大規模構造の形成と密接に関係しており、銀河は時々刻々と変化する周辺環境に影響を受けながら進化していくと考えられる。初期宇宙の大規模構造を捉え、ボイドと呼ばれる低密度環境から巨大銀河団の中心部のような高密度領域に至るまでのほぼ全ての銀河環境を包含し、銀河進化の様子を描き出すには、やはり広視野の近赤外線観測が必要である。ULTIMATE では中間帯域フィルターを用いた広域観測により、精度の高い赤方偏移の推定を行い、視線方向を含めた 3 次元の大規模構造を描き出し、その中での銀河進化の様子を定量的に解明する。また、狭帯域フィルターを使った高解像度の観測により、各天体の輝線放射を空間的に分解し、「個々の銀河内部のどこで星が生まれているのか」を数千個の銀河を対象に調査し、銀河の形態獲得の歴史を明らかにする。

3.

プロジェクトの科学的
意義と目標の根拠

Rationale for the
scientific goals and
objectives

1. 科学的意義の根拠：研究の背景、当該分野の研究状況、等 / Scientific background, status of the relevant scientific area, etc.

遠方宇宙の観測は、宇宙の初期、天体形成の初期を理解するうえでもっとも基本的かつ直接的な方法である。今世紀に入り、すばる望遠鏡の Suprime-Cam/Hyper Suprime-Cam による可視光での広域深宇宙探査によって、遠方宇宙の銀河、ブラックホール、宇宙大規模構造を数多く発見し、大きなインパクトをもたらした。しかし可視光による探査では赤方偏移 ~ 6 (130 億年前の宇宙) よりも遠方宇宙の探査はできない。より初期の宇宙を開拓するには近赤外線での探査が必須である。また、赤方偏移 3 \sim 5 (約 110 \sim 130 億年前) の宇宙の探査も、これまではライマン α 輝線やライマンブレイク法を中心とする静止系紫外線の情報に基づくものが主体であり、その時代にすでに星形成活動を終えた大質量銀河や、塵に深く埋もれた爆発的星形成銀河など、銀河形成・進化を語るうえで重要な銀河種族を見逃している可能性が高い。2021 年 12 月に打上げられた NASA の JWST は限られた探査面積でありながら、その圧倒的な感度と分解能によって、赤方偏移 10 を超える天体をすでに多数発見し、また銀河の形態進化の歴史についても、我々の理解を大きく塗り替えようとしている。当該分野の次なる一手は、初期宇宙の大規模構造のスケールをカバーする近赤外線での広視野かつ高解像度の観測を実施し、宇宙の構造形成史にとまらぬ銀河の形成と進化の歴史を描き出すことである。

2. 提案するプロジェクトコンセプトは当該分野になにをもたらそうとするのか / Goals and objectives: new scientific steps the proposed concept aims to

achieve in the science area

ULTIMATE プロジェクトでは、「(1) 最初の銀河はいつ生まれ、宇宙の再電離はどのように進行したか？初期宇宙の重元素はどのように生成され供給されたのか？」「(2) 大質量銀河はいつどこで成長したか？」「(3) 最盛期の銀河の形成・進化は周辺の環境とどう関連しているか？また、なぜ星形成活動は止まるのか？」という、いずれも銀河宇宙史における根源的な疑問に答えようとしている。ULTIMATE ならば、これまで観測の限界によって銀河形成・星形成の理論から「想像」するしかなかった宇宙再電離のプロセスや初期宇宙における対不安定型超新星からの重元素放出のプロセスをこの目で「見る」ことができる。また、標準的な階層的構造形成モデルでは説明ができないような大質量銀河を赤方偏移 4-5 の時代に発見するポテンシャルを持つ。そのような予想外に大質量の銀河が遠方宇宙に発見された場合には、銀河形成理論を根本から見直す必要も生じてくる。このように、ULTIMATE は初期宇宙における構造形成・天体形成プロセスの理解を深め、我々の知の地平線を拡大するプロジェクトである。

3. 提案するプロジェクトコンセプトの強みと過去、現在、未来の他のプロジェクト、研究・探査との関係 / The competing power of the proposed project concept and its relationship to past, current, and future other investigations and projects.

ULTIMATE の強みは、広視野補償光学 (GLAO) の搭載によって、地上望遠鏡でありながら感度と分解能を飛躍的に向上できる点である。視野は約 200 平方分角 (14 分角 × 14 分角) で、地上 8 メートル級望遠鏡に搭載された近赤外線観測装置として最大視野の撮像装置となる。宇宙望遠鏡にはない独自の多彩なフィルター群を用いて宇宙を探査し、TMT をはじめとする 30 メートル級望遠鏡へ我が国独自のターゲットを供給する。他計画との関係を語るうえでは、(1) すばる望遠鏡の戦略としての位置付け、および (2) 世界の宇宙望遠鏡計画との相補性、が特に重要である。まず、すばる望遠鏡の HSC/PFS に続く「すばる 2」計画の柱であり、2020 年代後半から 2030 年代においてすばる望遠鏡の明夜を担う基幹装置として、政府 / 文科省から明確に位置付けられている。宇宙望遠鏡との比較では、JWST は視野が数分角に限られている点、また ULTIMATE が狙う波長帯 (地上から観測可能な 1 ~ 2.5 μ m 帯) の狭帯域フィルターが数枚のみである点に優位性がある。広視野近赤外線宇宙望遠鏡としては、2023 年に打上げに成功した Euclid 宇宙望遠鏡 (ESA)、2027 年に打上げが予定される Roman 宇宙望遠鏡 (NASA) があるが、いずれも撮像フィルターはブロードバンドのみの搭載であり、狭帯域 / 中間帯域フィルターを多数搭載する ULTIMATE の戦略は、これらの広視野宇宙望遠鏡計画と相補的である。さらに、ULTIMATE の GLAO を活用したすばるの次世代観測装置 (近赤外線の広視野・高感度の多天体分光器など) へと発展する可能性も秘めている。

4.

プロジェクトが実施する
研究

Scientific
investigations of the
project

ULTIMATE では、2章に述べた科学目的に対して、「黎明期 ($z>6$)」「加速期 ($3<z<5$)」「最盛期 ($1<z<3$)」の各時代の銀河探査を以下のとおり実施することを計画している。

黎明期 ($z>6$) の宇宙探査: Jバンド帯の2枚の狭帯域フィルターを使って、それぞれ $z=7.7$, $z=8.8$ の Ly α 輝線銀河を4平方度に渡って少なくとも数十個検出し、分布図を描く。そしてその空間分布を、Roman 宇宙望遠鏡の広視野観測 (Y/Jバンド) でトレースされる同じ赤方偏移範囲の一般星形成銀河 (ライマンブレイク銀河など) の分布・大規模構造と比較することで、電離バブルを同定する。また、高赤方偏移に現れる対不安定型超新星を赤外線域における突発天体探査で同定し、その発生率を求め、重元素の供給源として整合的かどうか検証する。突発天体検出のため、Kバンド帯で数年間のモニター観測が必要である。多くの他の突発天体の中から対不安定型超新星を区別するために、静止系波長で 2800 \AA に現れる Mg II の強い吸収を捉える中間帯域フィルターが有効である。

加速期 ($3<z<5$) の宇宙探査: 赤方偏移 $4.6<z<5.4$ (宇宙誕生後10億年) の銀河のバルマーブレイクを捉える Kバンド帯の中間帯域フィルター4枚を用いた24.5等級 (5σ) の深さの20平方度サーベイを行う。この深さが赤方偏移 ~ 5 の銀河の星質量 10^{11} 太陽質量に相当する。銀河団からボイド領域まで幅広い環境範囲を網羅することで、原始銀河団と一般フィールドで大質量銀河の発現確率を比較し、大質量銀河の形成が高密度領域にどのくらいバイアスされているかを定量化する。

最盛期 ($1<z<3$) の宇宙探査: 中間帯域フィルターを用いた $1<z<5$ の原始銀河団を含む大規模構造を描き出す。4 \sim 20平方度を掃くことで、現在の巨大銀河団の祖先が各赤方偏移 ($\Delta z=1$) に4 \sim 20個包含されると期待され、大規模構造すなわち様々な銀河環境を網羅した銀河探査を実現することができる。こうして見つかる構造に沿って狭帯域フィルターで H α 輝線などを狙った高解像度観測を行い、数千個レベルの天体について銀河内部の星形成クランプを個別に同定し、個々の銀河内部における星質量獲得の歴史および形態獲得の歴史を、定量的かつマイクロにマッピングすることで、いつ、どこで、どのような機構によって星形成活動が加速され最終的に減衰に至るのかを突き止める。

必要な性能要求: 上述の探査計画をまとめると、以下のようになる。

- Y/Jバンド帯のNB2枚を用いた ~ 25.5 - 26.0 等級 (5σ , AB) の ~ 4 平方度探査
- Kバンド帯のMB4枚を用いた ~ 24.0 - 24.5 等級 (5σ , AB) の ~ 20 平方度探査
- Kバンド帯のNB2枚を用いた ~ 24.0 - 24.5 等級 (5σ , AB) の ~ 4 平方度探査

これらの探査を現実的な観測時間 (すばる望遠鏡のSSP, すなわち最大360夜) で実現することができる視野・感度・解像度が、装置に必要な性能要求となり、観測視野14分角 \times 14分角以上、標準的な条件下で FWHM= $0.25''$ の解像度が導かれる。

ここで、観測装置のスループットは0.45と仮定した。なお、ULTIMATEの探査が

行われる 2020 年代末～2030 年代には、Euclid/Roman による十分な深さ・解像度の
ブロードバンドデータ (Y/J/H/Ks) は揃うと仮定し、ULTIMATE ではその特長である
NB/MB を用いた探査に集中する計画を想定している。

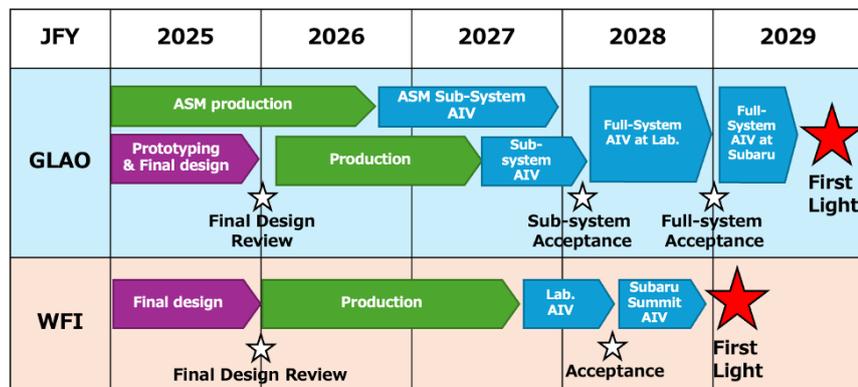
GLAO による解像度の向上は、遠方銀河の内部構造を分解して調査する目的に加え、
星像を絞り込むことによって感度の向上が期待できる。これによって初めて現実的な観測
時間で上記の科学目的を達成することができる。なおここでは簡単のため、時間軸探査に
ついては考慮していないが、実際のサーベイをデザインする段階では、MB の探査を一
部ディープなモニター観測に当てて、遠方超新星の検出を組み込む。

5.

スケジュール Schedule

1. 大まかなスケジュール / Rough schedule

下図に ULTIMATE の大まかなスケジュールを GLAO と WFI に分けて示す。
GLAO, WFI とともに現在詳細設計のフェーズであり、2026 年度から製作を開始する予
定である。GLAO の構成部品のうち、可変形副鏡については、製作に長期間を要するた
め、先行して製作を開始している。製作は、2027 年度に完成し、ハワイ観測所への輸送
後、他の GLAO 構成部品と合わせて実験室での評価試験を行う。山頂への輸送、望遠鏡
への搭載は 2028 年度に行い、性能評価が出来次第、2029 年度に試験観測を行った上、
ULTIMATE による大規模重点観測 (Subaru Strategic Program: SSP) を開始するこ
とを目指している。



2. 開発スケジュールの科学成果への影響 / Schedule impact on science

ULTIMATE は 2029 年度にコミッショニングを開始し、性能評価を行った上で SSP
観測を開始する予定である。この時期は、PFS の大規模重点観測が終了する時期であり、
すばる望遠鏡が HSC、PFS、そして ULTIMATE により継続して広視野サーベイによ
るレガシーデータを提供する上で重要なタイミングである。また、ULTIMATE の大規
模重点観測が開始する時期は、Roman 宇宙望遠鏡による観測 (2027 年打上げ予定) が
行われている時期であり、ULTIMATE-Roman の協調観測・同時観測を行うためには、
複数年にわたって運用時期が重なることが重要である。また、ULTIMATE によるサー
ベイ観測は、地上 30m 望遠鏡によるフォローアップ観測のための日本独自のターゲット

を供給することができるため、世界で 30m 望遠鏡が動き出す 2030 年代初頭（ELT は 2029 年度に開始予定）に合わせてサーベイ観測による初期データを公表することが求められている。

6.

プロジェクトで使用する
装置

Instrumentation of
the project

1. 実施する実験・観測・分析などを実現する技術 / Description of the technology to realize the investigations

地球大気の揺らぎのうち、地表に近い層の揺らぎのみを選択的に補正することで、広い視野に渡りシーイングを改善する地表層補償光学（Ground Layer Adaptive Optics : GLAO）をすばる望遠鏡に搭載し、近赤外線波長域において広視野かつ高解像度の撮像観測を実現する。

2. 実施する実験・観測・分析などを実現する方法・技術について、他の技術、および類似技術との比較 / Comparisons of the selected technology with other technologies

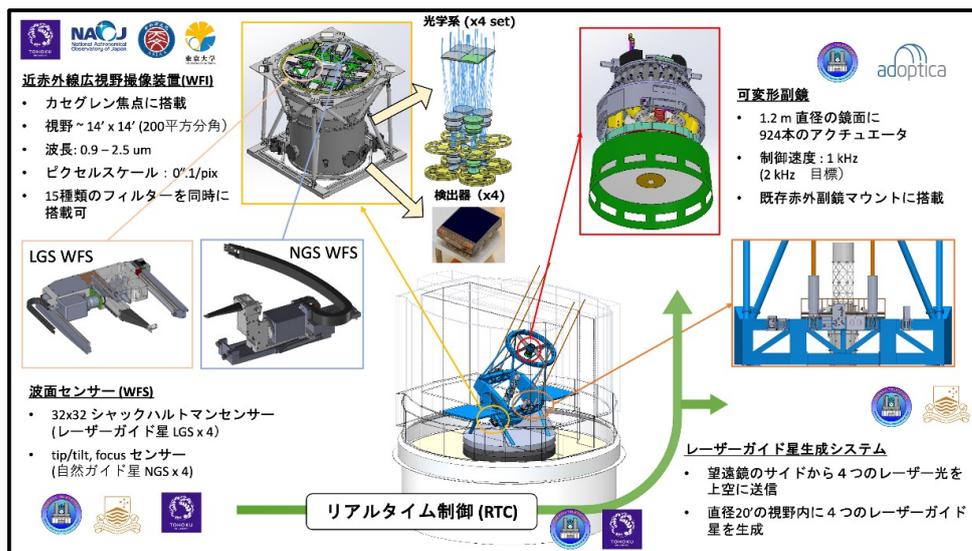
GLAO を用いた近赤外線広視野観測については、VLT の GRAAL+HAWK-I で先行して実現されている。ULTIMATE では、VLT のあるパラナルと比べてシーイングが良好かつ、地表層の揺らぎが卓越しているというマウナケアのサイトの利を活かして、VLT と比べて 4 倍となる約 200 平方分角にわたり、VLT (FWHM=0.34") よりも良好な星像 (FWHM=0.25") が得られると期待されている。また、近赤外線広視野撮像装置 (WFI) においても、多彩な狭帯域、中間帯域フィルターを搭載し、Euclid/Roman といった近赤外線宇宙サーベイ望遠鏡と相補的な機能を提供する。

マウナケア天文台における次世代補償光学装置開発の動向としては、Keck 望遠鏡は Laser Tomography AO (LTAO)、Gemini 望遠鏡は Multi-Conjugate AO (MCAO) の開発が進められており、狭視野で回折限界に迫る高解像度の観測を目指している。また、GLAO 装置で先行していた VLT でも、GRAAL+HAWK-I の運用を 2028 年までに停止し、可視波長域での MCAO に置き換えるための開発が進められている。ULTIMATE は、今後 8m 級望遠鏡の次世代観測装置計画とは一線を画したユニークな観測装置を提供する。

3. 提案装置の主要な機能 / Major functions of the proposed instrument

- GLAO (Ground Layer Adaptive Optics) : すばる望遠鏡の副鏡部に搭載される可変形副鏡、望遠鏡センターセクション部の前後に搭載され 4 つの人工の波面参照星を生成するレーザーガイド星生成システム、カセグレン焦点に搭載される波面センサー（レーザーガイド星波面センサー x4, 自然ガイド星波面センサー x4）、リアルタイムに波面計測制御を行う制御システムからなる。
- WFI (Wide-Field Imager) : すばる望遠鏡のカセグレン焦点に搭載される近赤外線撮像装置。14'x14' の視野を 4 象限に分けて、それぞれの象限毎に光学系と検出器ユニットを持ち、1 つの真空冷却容器に搭載される。フィルターホイールは象限毎に 3 つ搭載

され、合計 15 種類のフィルターを同時に搭載することができる上、2つのホイールに搭載されたフィルターについては、容易に交換可能となる設計になっている。



7.

プロジェクトで獲得する
データ

Data to be obtained

ULTIMATE では 2020 年代末から 2030 年代前半にかけて、すばる望遠鏡の戦略的プログラム (SSP) を実行し、かつてない広さ・深さをカバーする系統的な近赤外線狭帯域・中間帯域フィルターの撮像データを獲得する。4 章にも述べたとおり、プロジェクトチームが計画する主な観測プログラムは以下の 3 つである。

- a) Y/J バンド帯の NB2 枚を用いた $\sim 25.5\text{-}26.0$ 等級 (5σ , AB) の ~ 4 平方度の探査
- b) K バンド帯の MB4 枚を用いた $\sim 24.0\text{-}24.5$ 等級 (5σ , AB) の ~ 20 平方度の探査
- c) K バンド帯の NB2 枚を用いた $\sim 24.0\text{-}24.5$ 等級 (5σ , AB) の ~ 4 平方度の探査

(a) は宇宙再電離期 (赤方偏移 8-9) の Ly α 輝線銀河の探査を主目的とし、数十個の Ly α 輝線銀河の検出が期待される。またこの非常に深い Y/J バンド帯の NB データは、赤方偏移 1-2 (銀河進化の最盛期) の H α 輝線や [OII] 輝線に対応するため、同時代の銀河の内部構造をかつてない深さで分解できる。

(b) は赤方偏移 ~ 5 の大質量銀河探査とその環境を捉えることを主目的とするものである。特に K バンド帯のなかでも長波長側のフィルター (K3/K4) については、Roman でも感度をもたない波長域であり、Roman の Ks バンドでドロップアウトする銀河を探査するなど、他の望遠鏡 / 装置では決して実現できない ULTIMATE の独壇場として、ディスカバリースペースも大きい。この MB 探査は、時間軸を意識して、特定領域を深くモニタリングする戦略により、遠方宇宙の対不安定型超新星を捉えることも可能である。

(c) は銀河進化最盛期 ($z \sim 2\text{-}3$) の銀河の H α 輝線、[OIII] 輝線を捉えることを主目的とする。Roman の Ks ブロードバンドデータの揃う領域で NB 探査を行うことで、数千個の H α / [OIII] 輝線銀河を非常に小質量銀河 (いわゆるビルディング・ブロック) まで捉えることを可能にする。また高い解像度を維持したサーベイを実施することで、個々の銀河を星形成クラumpのスケールに分解する。いずれの計画も、Euclid/Roman のブ

ロードバンドデータが揃う領域をターゲットにすることで、ULTIMATE の強みを最大限発揮できる。

8.

主要技術要素

Key technologies

1. 主要技術要素と開発が必要な技術要素 / Key technologies and those requiring further investment and development

- GLAO の主要サブシステムは、基本的に既にすばる望遠鏡や他の望遠鏡で実証された技術の組み合わせで成り立っており、これから開発が必要な技術要素はない。GLAO の主な技術的チャレンジは、これまでにない広視野をカバーすることで、そのために必要なハードウェアの較正手法を新たに開発する必要がある。
- WFI についても、基本的には MOIRCS, SWIMS といったこれまでの広視野近赤外線装置のスケールアップであり、これから開発が必要な技術要素はない。しかし、装置の大型化による光学系の入手性の検討、高解像度化による冷凍機振動対策といったこれまでにない新たな技術検討が必要となる。
- ULTIMATE では、補償光学を使った近赤外線観測による大規模なデータセットを世界で初めて生み出す。近赤外線広視野データである事に加え、補償光学による補正後のデータであるため、解析パイプライン、データのクオリティ評価において新たな技術開発が必要となる。

2. 技術的不確定性の大きな技術要素 / Assessment of uncertainties in technologies

- GLAO の較正試験：すばる望遠鏡自体を補償光学化するため、これまでの補償光学のように人工光源を用いた較正試験ができない。そのため、GLAO 装置の特性評価は予め実験室で行っておく必要がある。特に、波面センサーとの間のレスポンス計測、重力方向が変化した際の形状安定性の計測についての不確定性が大きい。可変形副鏡は凸面鏡であるため、その実験室の較正のためには専用の較正光学系が必要となる。ULTIMATE では、ヒンドル球を用いた可変形副鏡のステッチング干渉計測、波面センサーと合わせた部分的なレスポンス計測、閉ループ試験を行うための光学試験タワーを新たに開発し、実験室試験を行う予定である。また、望遠鏡への搭載後も、可変形副鏡の重力変形と望遠鏡主鏡の重力変形を切り分けてそれぞれの形状補正をするための技術開発が必要となる。
- 視野 20 分角での補正性能：GLAO はカセグレン焦点でこれまでで最大の直径 20 分角視野を持つ。この視野での望遠鏡の結像性能はこれまで観測的に検証された事はないが、光学モデル上での予測により、波面センサーで大気揺らぎと同時に測定される望遠鏡の広視野収差の影響を考慮して、可変形副鏡を制御する。望遠鏡光学モデルの不定性、波面センサーの機械的な重力による変形を考慮し、波面センサーのアライメント誤差、近赤外線撮像装置の間の Non-common path Error を検出し、それらを考慮した制御を行うための技術開発が必要となる。

- 地表層揺らぎの計測技術：GLAO の補正性能は地表層揺らぎの高層揺らぎに対する割合に大きく影響を受けるため観測を効率的に行うために地表層揺らぎを常時計測するための技術開発が必要となる。
- 補償光学データのクオリティコントロール：シーイング、地表層揺らぎの割合に大きく依存する GLAO データを解析し、レガシーデータとして提供するために、データ評価手法を新たに開発する必要がある。

3. 既存技術の活用条件 / Assessment of heritages

GLAO は、既存のすばる補償光学システムでも用いられているリアルタイム制御システムや TOPTICA 社のレーザーシステム、すばる望遠鏡用に現在開発中のレーザートモグラフィ補償光学システム (ULTIMATE-START) で用いるシャックハルトマン波面センサー、VLT や ELT で用いられている AdOptica 社の可変形副鏡といったすでに実用化されている技術を主に用いている。これらの既存プロジェクトとの大きな相違点は較正方法と視野の広さであり、上述の通り GLAO に合わせた新たな技術開発を要する。

WFI については、MOIRCS, SWIMS をスケールアップした設計となっている。狭帯域、中間帯域フィルターといったキーとなる技術については、MOIRCS, SWIMS で既に技術開発が進んでいる上、デュアルバンドフィルターなどの新たな方式についても事前にこれらの既存装置での技術検証が可能である。

データ解析、評価の手法としては、HSC で開発されたデータパイプラインを近赤外線データに拡張することが考えられる。また、PRIME による近赤外線サーベイで得られた知見も活用できると考えられる。補償光学特有の解析手法については、SCExAO 等で培われてきた AO テレメトリーデータにもとづく PSF 再構成の手法が活用できる可能性がある。

9.

想定されるコスト Cost estimate

GLAO と WFI のコスト見積り (FY2022 ~ FY2029、最終設計フェーズ以降) は、それぞれ 35.7 億円、15.1 億円で、ULTIMATE 全体 (GLAO+WFI) で総額 50.8 億円となる。コスト見積りは物品費 (外注費含む)、人件費を計上している。物品費には、見積りの成熟度に応じて 10 ~ 50% の予備費を積んでいる。また、人件費については雇用元の国に応じて 1 ~ 5% のインフレ率を仮定して見積もっている。観測装置コミッショニング完了後の科学運用費は含んでいない。

10.

技術ヘリテージと技術 開発状況と開発計画 Technical heritages, technology development status and plan

1. 技術ヘリテージと技術開発状況 / Technology heritage, development history and status

ULTIMATE の開発メンバーはこれまでにすばる望遠鏡の補償光学装置の開発、運用 (AO36, AO188, RAVEN)、及び広視野近赤外線観測装置 (MOIRCS, SWIMS) の開発、運用の経験を有するメンバーで構成されている。また、GLAO の共同開発機関で

ある ANU では、Gemini 望遠鏡の ALTAIR, GeMS といった補償光学装置の開発経験を持ち、現在は VLT 用の MAVIS という次世代の補償光学の開発も行なっている。可変形副鏡の開発、運用については、ULTIMATE の開発チームではこれまで経験はないが、これまで LBT, VLT といった 8m 級望遠鏡に搭載された可変形副鏡を製作した AdOptica 社に製作を発注し、ELT、GMT 用にアップグレードされた制御方式を採用する事で、これまでの技術的なヘリテージが活かされている。また、較正、運用方法については、新型のアクチュエータを搭載した可変形副鏡のコミッショニングを行なっているアリゾナ大学、ハワイ大学の協力を得て較正方法を検討しており、すばる望遠鏡の可変形副鏡が完成する 2026 年度頃までには、較正方法の検証が完了する見込みである。このように、ULTIMATE の開発は、これまでの技術的なヘリテージをもとに行われるとともに、現在開発中の AO システムの間での交流を通して、技術検討レベルを向上させている。

2. 技術開発計画 / Technology development plans

上記の技術的なヘリテージに加え、8.2 節で述べたような ULTIMATE 独自の技術的な課題については、プロトタイプを開発する事で事前に技術実証を行う。以下に、現在行なっているプロトタイプ開発の計画と進捗状況をまとめる。

- **ULTIMATE-START (Laser Tomography Adaptive Optics)** : GLAO と同様に 4 つのレーザーガイド星の光を参照し、4 つの Shack-Hartmann 波面センサーで大気揺らぎを断層的に推定する波面センサーを開発している。これにより、GLAO と同じ TOPTICA 社のレーザーを用いたレーザーガイド星生成システムの開発、4 つの波面センサーの情報から可変形鏡を制御するリアルタイム制御システムの開発を行い、GLAO の開発に先行して技術実証を行う。補償光学特有のデータ解析手法についても、試験観測データを元に技術開発ができると考えられる。ULTIMATE-START は東北大を中心に開発が進められているが、現在波面センサーシステムはハワイ観測所へと輸送され、実験室での調整が行われている。2024 年度中に山頂施設へと輸送され、2025 年度に試験観測を行う。
- **大気揺らぎプロファイラー** : すばる望遠鏡を通した大気揺らぎの測定を行い、ドームシーリングの影響も含めた地表層揺らぎの割合を見積もるために、すばる望遠鏡に Shack-Hartmann 波面センサーを 2 台搭載し、2 台の波面センサーの空間相関を取り地表に近い低層の揺らぎを推定する SLODAR 法と、シンチレーション情報を用いて高層の揺らぎを推定する MASS 法を用いてすばる望遠鏡での大気揺らぎの高度プロファイルを取得する観測を行なっている。2022~2024 年度にかけて観測を行い、手法を実証した上で、GLAO の観測に合わせて小型望遠鏡に移設し常時モニター観測を実現する予定。
- **WFS opto-mechanical prototype** : GLAO システムにおける広視野特有の問題である望遠鏡の広視野収差の補正性能、波面センサー機械系の重力変形によるアライメント誤差の影響を評価するため、GLAO 用波面センサー（レーザーガイド星用 Shack-Hartmann センサー、自然ガイド星用のティップティルト・フォーカスセンサー）のプロ

トタイプを開発している。2023年度～2024年度に製作、評価を行い、最終設計へとフィードバックする。

- デュアル/トリプル狭帯域・中間帯域フィルター：WFIは、多彩な狭帯域・中間帯域フィルターを搭載することが特徴となっているが、より多くの種類のフィルターを搭載するために、デュアル/トリプルバンドフィルターを検討している。MOIRCS/SWIMS用にプロトタイプを開発することで、事前に技術実証を行う。

11.

プロジェクトのリスク管理 Risk Management Plan of the Project

下表に、ULTIMATEプロジェクトのプログラム上、技術上の代表的なリスク要因と、その軽減策を示す。リスクは発生確度（大=3、中=2、小=1）と影響度（大=3、中=2、小=1）の掛け算として評価し、リスクスコア9が重度、4,6が中度、3以下を軽度のリスクとし、中度以上のリスクの場合軽減策を要するものとしている。

ID#	発生確度		影響度	リスクスコア	軽減後		軽減後スコア
	リスク要因				発生確度	影響度	
プログラム上のリスク							
P1	大	大	コスト超過によるプロジェクトの遅延、または計画変更。	9	小	大	3
					見積り成熟度に応じた予備費を予算に含め、コスト増減を常に監視。		
P2	大	大	為替悪化、物価高によるコスト超過。	9	大	小	3
					為替、物価を年毎にアップデートしたうえで、コスト見積りに1割のマーヅンを加える。		
P3	中	大	プロジェクト人員数、スキルの不足	6	小	大	3
P3	中	高	構成部品の納期が遅延する。	6	中	小	2
技術上のリスク							
T1	中	大	GLAOの性能が想定を下回る	6	小	中	2
					すばるにおける地表層揺らぎのモニタリングを行う。狭視野モードを用意し、必要に応じて性能の向上を図る。		
T2	中	中	ULTIMATEの機器重量過多により望遠鏡の性能が劣化する。	4	小	小	1
					望遠鏡の重量バランスを保つように機器を配置し、必要に応じて制御フィルターの調整を行う。		
T3	中	高	可変形副鏡の実験室での較正が想定通り機能しない。	6	中	小	2
					バックアップとして夜間観測による較正手法を確立しておく。		
T4	中	高	WFIで用いる大口径の光学系基板が入手できない。	6	小	高	3
					入手性を確保した上で最終設計を完了させる。		

12.

天文学コミュニティの 持続可能性に関わる戦略

Strategy for the Sustainability of Astronomical community

補償光学は今後 TMT を含む地上大型望遠鏡の「標準装備」であり、すばる望遠鏡をプラットフォームとして補償光学開発に携わる人材の育成に貢献できる。ULTIMATE の補償光学開発の主要なパートナーであるオーストラリアの ANU は、VLT や GMT の補償光学開発にも携わる強力なグループを有し、ULTIMATE を通じた同グループとの継続的な協力によって、我が国の若手人材が装置開発分野で世界に大きく羽ばたく機会を育むことも期待できる。

すばるとしては、HSC・PFS に続く大型の基幹装置開発プロジェクトであり、300 夜規模の戦略枠プログラム (SSP) をこれから作り上げていくところである。SSP は国内の研究機関に所属する研究者・大学院生がすべてのサーベイデータにアクセス可能であり、HSC-SSP で我が国のコミュニティが経験したように、若手研究者・大学院生が独自のアイデアで多様なサイエンスを展開し、我が国の光赤外コミュニティの活性化につながるものである。今後ますます大型化する天文プロジェクトにおいて、Euclid (ESA) や Roman (NASA) など欧米のメガミッションと同じ方向を向きながらも、我が国独自の手法とアイデアで存在感を示していく戦略は、今後の我が国の光赤外線天文学におけるプロジェクト創出の一つのモデルケースになると期待され、ULTIMATE での近赤外線広視野観測計画の成功を土台にコミュニティがさらに成長し、GREX-PLUS への飛躍も期待できる。

また別の観点として、プロジェクトを通しての国際的な研究者交流にも積極的である。たとえば、ULTIMATE のチームが中心となり、国内外の地上・宇宙望遠鏡の近赤外線観測プロジェクトを横につなぐ研究拠点形成事業 (通称 SUPER-IRNET) はその代表例である。この SUPER-IRNET の相手国の一つであり、我々が補償光学システムを共同開発しているオーストラリアは、ダイバーシティ・ジェンダーバランスの観点で我々より大きく進んだコミュニティを有し、共同研究を通して学ぶことが非常に多い。これは予算や科学成果には代え難い貴重な経験・財産であり、我が国の天文学コミュニティ全体への正のフィードバックを期待されたい。

Co-investigator and his/her role

Michitoshi Yoshida	NAOJ
Yosuke Minowa	NAOJ
Yusei Koyama	NAOJ
Junichi Katakura	NAOJ
Masayuki Akiyama	Tohoku Univ.
Hirofumi Okita	NAOJ
Yoshito Ono	NAOJ
Shin Oya	NAOJ

ULTIMATE PI
Project Manager, GLAO/WFI development
Project Scientist
Project Controller
GLAO/WFI development, Science
GLAO development, ASM interface
GLAO development, Control system manager
GLAO development, ASM manager

Yuhei Takagi	NAOJ	GLAO development, AO scientist
Yoko Tanaka	NAOJ	GLAO development, Optical engineer
Koki Terao	NAOJ	GLAO development , AO scientist
Chihiro Tokoku	NAOJ	GLAO development, Systems Engineer
Yutaka Hayano	NAOJ	GLAO development, Advisor
Takamasa Bando	NAOJ	GLAO development, Control system Engineer
Tadayuki Kodama	Tohoku Univ.	WFI PI, Science
Kosuke Kushibiki	NAOJ	WFI Project Manager, Science
Kentrao Motohara	Univ. of Tokyo	WFI development, Science
Masahiro Konishi	Univ. of Tokyo	WFI development
Ichi Tanaka	NAOJ	WFI development, Science
Takashi Hattori	NAOJ	WFI development
Kumiko Morihana	NAOJ	WFI development, Science
Kenshi Yanagisawa	NAOJ	WFI development
Sadman Ali	NAOJ	WFI development, Science
Shiang-Yu Wang	ASIAA	ASIAA PI, GLAO/WFI development
Richard C. Y. Chou	ASIAA	GLAO development, Optical engineer
Po-Chieh Yu	ASIAA	GLAO development, Calibration
Noelia Martinez	ANU	ANU PI, GLAO development
Celine D'Orgeville	ANU	ANU Co-PI
Joshua Carter	ANU	ANU Project Manager
Hajime Ogane	ANU	GLAO development, AO scientist
David Chandler	ANU	GLAO development, Systems engineer
Dionne Haynes	ANU	GLAO development, Systems engineer
Roger Haynes	ANU	GLAO development, Product assurance
Joschua Hellemeier	ANU	GLAO development, AO scientist
Nick Herald	ANU	GLAO development, Mechanical engineer
Andrew Kruse	ANU	GLAO development, Optical engineer
Lu Wang	ANU	GLAO development, Mechanical engineer
Jesse Cranney	ANU	GLAO development, Control engineer

プロジェクト共同提案者とその役割

吉田道利	国立天文台	ULTIMATE PI
美濃和陽典	国立天文台	プロジェクトマネージャー、GLAO/WFI 開発
小山佑世	国立天文台	プロジェクトサイエンティスト
片倉純一	国立天文台	プロジェクトコントローラー
秋山正幸	東北大学	GLAO/WFI 開発、科学検討
沖田博文	国立天文台	GLAO 開発、可変形副鏡インターフェース
大野良人	国立天文台	GLAO 開発、制御系マネージャー
大屋真	国立天文台	GLAO 開発、可変形副鏡マネージャー
高木悠平	国立天文台	GLAO 開発、AO サイエンティスト

田中陽子	国立天文台	GLAO 開発、光学エンジニア
寺尾航暉	国立天文台	GLAO 開発、AO サイエнтиスト
東谷千比呂	国立天文台	GLAO 開発、システムエンジニア
早野裕	国立天文台	GLAO 開発、アドバイザー
坂東貴政	国立天文台	GLAO 開発、制御系エンジニア
児玉忠恭	東北大学	WFI PI, 科学検討
櫛引洸佑	国立天文台	WFI プロジェクトマネージャー
本原顕太郎	東京大学	WFI 開発, 科学検討
小西真広	東京大学	WFI 開発
田中壱	国立天文台	WFI 開発, 科学検討
服部堯	国立天文台	WFI 開発
森鼻久美子	国立天文台	WFI 開発, 科学検討
柳澤顕史	国立天文台	WFI 開発
Sadman Ali	国立天文台	WFI 開発, 科学検討
Shiang-Yu Wang	ASIAA	ASIAA PI, GLAO/WFI 開発
Richard C. Y. Chou	ASIAA	GLAO 開発, 光学エンジニア
Po-Chieh Yu	ASIAA	GLAO 開発, 較正システム
Noelia Martinez	ANU	ANU PI, GLAO 開発
Celine D'Orgeville	ANU	ANU Co-PI
Joshua Carter	ANU	ANU プロジェクトマネージャー
大金原	ANU	GLAO 開発, AO サイエнтиスト
David Chandler	ANU	GLAO 開発, システムエンジニア
Dionne Haynes	ANU	GLAO 開発, システムエンジニア
Roger Haynes	ANU	GLAO 開発, 品質保証
Joschua Hellemeier	ANU	GLAO 開発, AO サイエнтиスト
Nick Herald	ANU	GLAO 開発, 機械系エンジニア
Andrew Kruse	ANU	GLAO 開発, 光学エンジニア
Lu Wang	ANU	GLAO 開発, 機械系エンジニア
Jesse Cranney	ANU	GLAO 開発, 制御系エンジニア



PART III: 大型計画以外の研究施設・研究装置 (5 計画)

Visible Extragalactic background RadiaTion

Exploration by CubeSat (VERTECS)

CubeSat による宇宙可視光背景放射観測プロジェクト

VERTECS

0.

概要

Summary

Visible Extragalactic background Radiation

Exploration by CubeSat (VERTECS)

CubeSat による宇宙可視光背景放射観測プロジェクト

VERTECS

Project Category

2. Other projects (大型計画以外の、装置・施設の開発を含む計画の提案)

Abstract of science goals, objectives, and methods

Star formation history from early universe to the present epoch is one crucial question in astronomy. To study the star formation history, measurement of the extragalactic background light (EBL) is important since it includes entire radiation emitted throughout the cosmic history. Earlier observations have shown that the near-infrared EBL is several times brighter than integrated galaxy light, but origin of the excess has not been concluded. Since objects in early and local universe are expected to show different emission spectra in visible wavelengths, precise visible observation is important to reveal the origin of the excess light. Objective of the proposed project Visible Extragalactic background Radiation Exploration by CubeSat (VERTECS) is to identify the origin of visible EBL. To achieve the objective, VERTECS conducts the visible observation in 4 bands covering 400-800 nm in space. Since detection sensitivity of the EBL is determined by the product of telescope aperture and field of view, a small wide-field telescope system enables the EBL observation with high sensitivity. In VERTECS, we develop a 6U CubeSat equipped with a 3U size telescope optimized for observation of visible EBL. To achieve the objective, the optics is 4.2deg times 4.2deg field of view and effective aperture is 35mm. The mission requires precise attitude control of 10 arcseconds pointing stability over 1 minute exposure and high-speed mission data transmission of more than 5Mbps. We develop the satellite in about 2 years and obtain scientific results much more quickly than recent large astronomical-satellite missions.

プロジェクトの意義と科学目的・方法の要旨

宇宙初期から現在に至る天体形成史を解明することは、天文学における重要課題のひとつである。宇宙背景放射は、銀河系外から飛来する放射の積算であり、暗い天体を含む天体形成史の全貌を解明するために重要な観測量である。可視光から赤外線の波長域におい

て、近赤外線宇宙背景放射は系外銀河の積算光に比べて数倍明るいことが示されたが、その起源となる天体は未解明である。その天体の候補として、宇宙初期または近傍の天体が理論的に提案されており、これらの天体は可視光波長における放射スペクトルが異なることが予想されるため、可視光における多波長観測が超過光の起源解明のために重要となる。そこで本プロジェクト VERTECS (Visible Extragalactic background RadiaTion Exploration by CubeSat) の目的は、可視光における宇宙背景放射の起源解明である。そのために、400-800nm における 4 波長帯において、宇宙空間で可視光の観測を行う。宇宙背景放射の検出感度は望遠鏡口径と視野の積に依存するため、小型広視野望遠鏡で宇宙背景放射を観測可能であることに着目し、本プロジェクトでは、3U サイズの広視野望遠鏡を搭載した 6U サイズの超小型天文衛星を開発する。本プロジェクトでは、約 2 年という短期間で天文衛星を開発し、従来の天文衛星に比べて迅速かつ安価に科学成果創出を目指す。

Principle Investigator

Name: Kei Sano

Affiliation: Kyushu Institute of Technology

E-mail address: sano.kei288@mail.kyutech.jp

プロジェクト代表者

氏名: 佐野 圭

所属: 九州工業大学

E-mail アドレス: sano.kei288@mail.kyutech.jp

Co-investigator and his/her role / プロジェクト共同提案者とその役割

Prease refer to the attachment 別紙参照

Estimate of total cost

300 million yen

総コストの見積り

3 億円

Estimate of total FTE (Full-Time Equivalent) necessary to accomplish the project

20 people year

プロジェクト実現に必要な総 FTE (人年) の見積り

20 人年

Duration of the project

FY2022-FY2027

プロジェクト実施期間

2022年度から2027年度まで

1.

プロジェクトの意義

Science goals of the project

宇宙初期から現在に至る天体形成史を解明することは、天文学の重要課題のひとつであり、本プロジェクトでは、宇宙のすべての光の積算である宇宙背景放射を可視光で観測することで、天体形成史を網羅的に解明することを目指す。

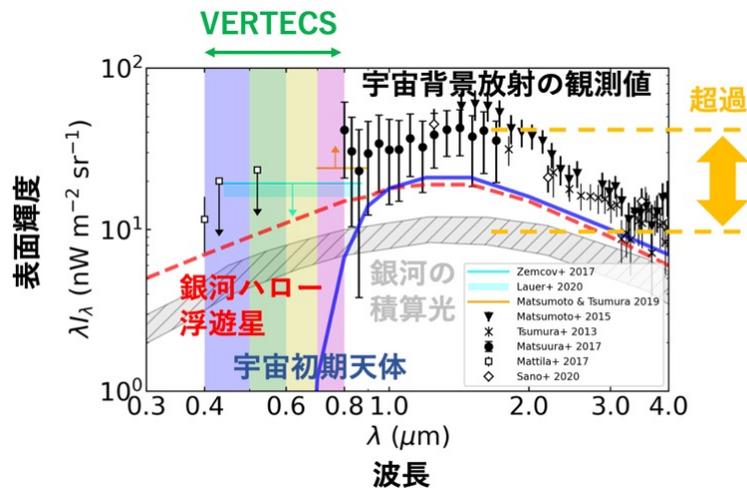
2.

プロジェクトの科学目的

Science goals of the project

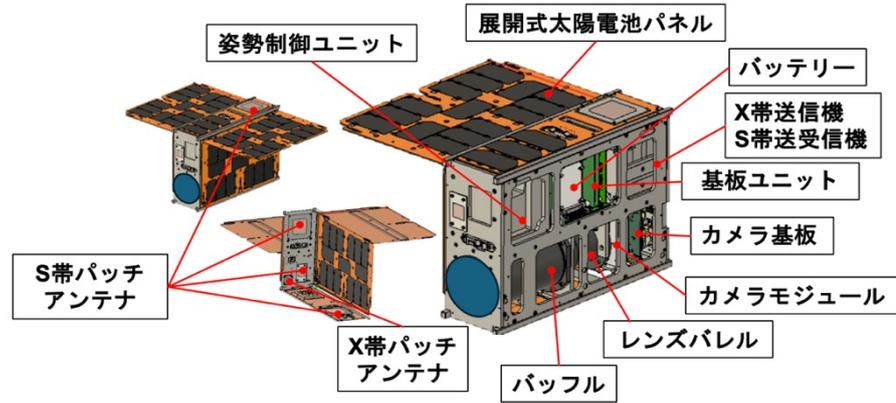
観測ロケット実験 CIBER (Cosmic Infrared Background Experiment) や、赤外線天文衛星 IRTS (Infrared Telescope in Space)、AKARI 等による観測の結果、近赤外線において、宇宙背景放射の輝度は個々の銀河の足し合わせた輝度よりも 2-4 倍大きいことが分かってきた (図 1)。この結果から、この波長域の宇宙背景放射には個々の銀河以外に未知の暗い天体由来の放射が多く含まれることが示唆される。そのような新たな天体の候補として、宇宙初期に形成された原始ブラックホール等の宇宙初期天体 (Yue et al. 2013, MNRAS, 433, 1556) や、比較的最近の宇宙で形成された銀河ハロー浮遊星 (Cooray et al. 2012, Nature, 490, 514) 等が理論的に提唱されているが、特定に至っていない。宇宙初期天体からの紫外線放射は、我々に放射が到達までの間に銀河間空間の中性水素によって吸収されるため、可視光波長でその放射強度が急激に減衰することが予期される。一方で、比較的近傍の銀河ハロー浮遊星からの放射スペクトルは可視光で平坦となる特徴がある。したがって、可視光において宇宙背景放射の放射スペクトルを測定することにより、その起源が宇宙初期天体か銀河ハロー浮遊星のいずれかを解明することができる。

図 1: 可視光から近赤外線における宇宙背景放射の観測状況と本プロジェクト VERTECS による観測波長範囲。宇宙背景放射の観測値は、系外銀河の積算光数倍に達する。VERTECS では、可視光波長 0.4-0.8 μm における 4 波長帯の観測により、超過光の起源が銀河ハロー浮遊星か宇宙初期天体かを判別する。



以上から、本プロジェクトの科学目的を、宇宙可視光背景放射の観測によって、その起源天体が宇宙初期天体か近傍天体（銀河ハロー浮遊星等）かを解明することとする。この目的を達成するため、本プロジェクト VERTECS（Visible Extragalactic background RadiaTion Exploration by CubeSat）では、3U サイズの望遠鏡を搭載した 6U サイズの超小型天文衛星を開発する（図 2）。

図 2



3.

プロジェクトの科学的意義と目標の根拠

Rationale for the scientific goals and objectives

1. 科学的意義の根拠：研究の背景、当該分野の研究状況、等 / Scientific background, status of the relevant scientific area, etc.

VERTECS がめざす大きな科学目標は、宇宙背景放射の観測を通して、天体形成史を網羅的に明らかにすることである。これまで銀河形成の研究の多くは、ハッブル宇宙望遠鏡などを用いて、さまざまな時代の銀河を点源として個別に観測することで行われてきた。例えば、銀河の紫外線や、星間ダストの熱放射を可視光～赤外線 $0.3\text{--}300\ \mu\text{m}$ で観測することにより、銀河形成が進み始めた約 130 億年前（赤方偏移 $z \sim 6$ ）までの全宇宙の星形成率（銀河形成の指標）等が明らかになった。しかし、銀河の個別観測から得られるサンプルは、遠方にあるほど明るい銀河にバイアスがかかることから、銀河形成以前の $z > 7$ の時代では、銀河形成期の代表的天体を見落とす可能性が高い。標準的な階層的構造形成モデルによれば、銀河形成は矮小天体が合体を繰り返し大きく明るい天体へと成長する。観測された銀河は物質集積が進んだ特別な場所であり、多くの物質は矮小天体等として残されている。つまり、銀河形成の真の解明のためには、暗い矮小天体や淡く広がった天体などの残されたピースを初期宇宙から現在までバイアス無しにくまなく調べることが求められる。特に、宇宙初期の再電離期 ($z > 7$) の電離紫外線源である初代星やブラックホールは、その後の銀河形成の種であると考えられ、それらがいつどれほど存在したかを観測的に究明することは天体形成の謎への直接的な答えになる。

宇宙初期の矮小天体は極めて暗く、それらを個別に観測することは最新鋭のジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡をもってしても困難である。本プロジェクトでは、莫大な数の宇宙初期の矮小天体による放射を視線積分した宇宙背景放射（EBL - Extragalactic Background Light）を精密に観測することで天体形成史の研究を推進する。EBL の放射スペクトルや空間的ゆらぎを構造形成や放射のモデルと比較することで、明るい天体の

個別観測では捉えられない隠れた天体形成史を大局的に明らかにできる。

2. 提案するプロジェクトコンセプトは当該分野になにをもたらそうとするのか / Goals and objectives: new scientific steps the proposed concept aims to achieve in the science area

2. プロジェクトの科学目的で述べたように、可視光から近赤外線の宇宙背景放射には未知の天体からの放射成分が含まれる可能性が高い。これは、天体形成の研究における大きな問題である。本プロジェクトにおいて、可視光の観測から、宇宙初期の天体か近傍の天体のいずれが宇宙背景放射に寄与するかが解明できると、銀河形成の研究分野において大きな前進になると考えられる。また、これまでに可視光の宇宙背景放射観測に特化したプロジェクトはなく、可視光での観測結果は不定性が大きく、本研究の科学目的である起源天体の解明を達成できていない (図 1)。したがって、本プロジェクトがはじめて宇宙可視光背景放射の起源について確度の高い知見をもたらすことが期待される。

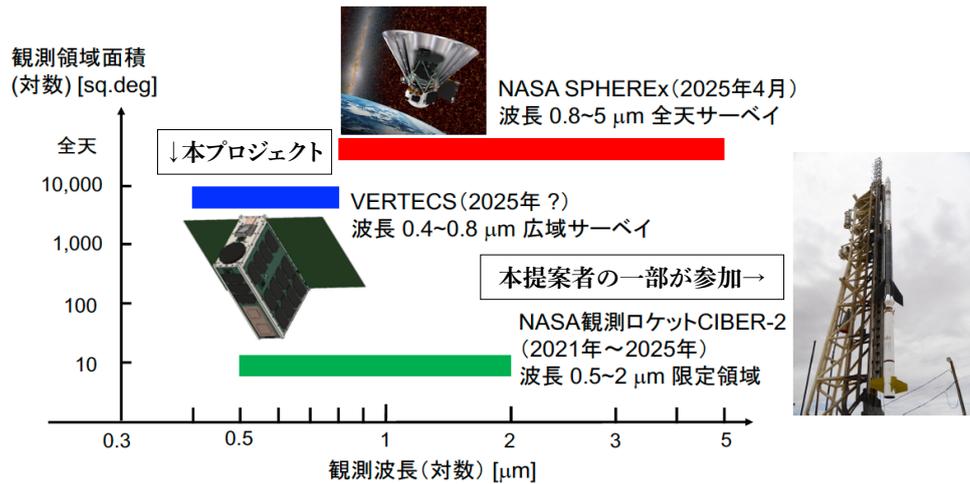
3. 提案するプロジェクトコンセプトの強みと過去、現在、未来の他のプロジェクト、研究・探査との関係 / The competing power of the proposed project concept and its relationship to past, current, and future other investigations and projects.

世界的な動向として、天文学を含む宇宙科学の衛星計画は大型化、複雑化が進んでおり、ミッション提案から科学成果を得るまでに 10-20 年を要することが常態化している。それによって、研究者のアイデアをすぐに実現できず、時期に即したタイムリーなアイデアの埋没している。そこで、2-3 年という短期間で機動的にミッションを実施していくことが重要であると考え、本プロジェクトを着想した。宇宙背景放射の検出感度は望遠鏡口径と視野の積に依存するため、小型の広視野望遠鏡で宇宙背景放射を観測可能であることに着目し、本プロジェクトでは、3U サイズの広視野望遠鏡を搭載した 6U サイズの超小型天文衛星を開発する。

2020 年代に予定されている宇宙背景放射観測プロジェクト VERTECS、SPHERE_x、CIBER-2 の観測波長および観測領域面積の比較を図 3 に示す。NASA の MIDEX ミッションに選定されている天文衛星 SPHERE_x では、近赤外波長での全天サーベイを行い、近赤外線での宇宙背景放射観測を実施する。赤外線望遠鏡を搭載する SPHERE_x と異なり、VERTECS が対象する波長は可視光であるため観測装置を冷却する必要がなく、リソースが限定的な超小型衛星で実現可能である。衛星開発のコストを比較すると、SPHERE_x に比べて VERTECS は 100 分の 1 程度でありながら、SPHERE_x と相補的に可視光の宇宙背景放射観測における科学成果をあげることが期待されるため、サイエンス / コストの観点で特に意義が高いミッションであると考えられる。

本プロジェクト提案者の一部は NASA の観測ロケットを利用した宇宙背景放射観測実験 CIBER-2 を進めている。観測ロケットでは観測時間が 10 分程度と限られるが、衛星の VERTECS では 1 年以上という長期間の観測が可能であり、より精度の高い観測を実現できる。両者は、観測波長および観測領域に関して相補的な関係にあり、VERTECS と CIBER-2 のシナジーによって、総合的に宇宙背景放射の研究を推進する。

図 3: 2020 年代に予定されている宇宙背景放射観測プロジェクトの比較



4.

プロジェクトが実施する
研究

Scientific
investigations of the
project

科学目的を達成するために、プロジェクトで獲得するものは、波長 0.4-0.8 μm の 4 バンドにおける、信号雑音比 10 以上での宇宙背景放射表面輝度のデータである。取得する観測データの解析から宇宙背景放射を測定するためには、その前景光である黄道光 (Zodiacal light: ZL)、星光積算光 (Integrated starlight: ISL)、銀河拡散光 (Diffuse Galactic light: DGL) を観測データから評価する必要がある。前景光の評価を実施した上で、1 年間の観測から、信号雑音比 10 以上での宇宙背景放射表面輝度のデータを取得するための性能要求を検討した。主要な性能要求を下表に示す。

要素	値
望遠鏡光学系	有効口径 35mm 有効視野 4.2度 × 4.2度
検出器	画素数 3k × 3k 暗電流 0.1eps以下 読み出し雑音 1e以下
指向安定性	10秒角 / 1 分間
絶対指向精度	0.1度
観測データ送信速度	5 Mbps以上

5.

スケジュール
Schedule

1. 大まかなスケジュール / Rough schedule

本プロジェクトの大まかなスケジュールを下表に示す。

本プロジェクトは、JAXA-SMASH (Small Satellite Rush) Program に採択されており、2022 年度から衛星開発を開始している。2024 年内に衛星 EM の開発を完了し、2025 年中に衛星 FM を完了する計画である。その後、2025 年度に衛星を打ち上げる予定であり、1 年以上の科学観測および観測データ解析により、科学成果を創出する。

	2023年	2024年	2025年	2026年	2027年
衛星概念設計	■				
衛星BBM試験		■	■		
衛星EM開発			■	■	
衛星FM開発				■	■
打ち上げ・初期運用					■
定常運用・科学観測					■
観測データ解析・科学成果創出					■

2. 開発スケジュールの科学成果への影響 / Schedule impact on science

3.3で述べたように米国の赤外線天文衛星 SPHEREx が 2025 年月に打ち上げられた。SPHEREx が近赤外線を、VERTECS が可視光を相補的に観測する。宇宙背景放射の前景光である黄道光は高い輝度を有するため高い精度で除去する必要があるとともに、輝度が季節変動する。その評価のためには、1 年以上の観測が必要であり、SPHEREx と VERTECS が同時期に 1 年以上にわたって観測を実施することが、観測データの校正に基づいて科学成果を創出するために重要である。VERTECS 単体でも可視光観測による科学成果を創出するコンセプトとしているが、VERTECS の打ち上げ時期は、SPHEREx と同時期の 2025 年内であることが望ましい。

開発スケジュールが延長する場合、その期間だけプロジェクト期間が延長するが、その延長によらず衛星運用期間は 1 年以上を確保する計画である。

6.

プロジェクトで使用する装置

Instrumentation of the project

1. 実施する実験・観測・分析などを実現する技術 / Description of the technology to realize the investigations

広視野低雑音の望遠鏡観測装置および高精度姿勢制御を行う超小型衛星バス技術

2. 実施する実験・観測・分析などを実現する方法・技術について、他の技術、および類似技術との比較 / Comparisons of the selected technology with other technologies

視野 1 度角を超える広視野望遠鏡は、過去の宇宙背景放射観測ロケット実験 CIBER、CIBER-2 等において開発実績がある。これらの望遠鏡は観測波長範囲として、近赤外線が含まれるため冷却の必要があるが、VERTECS の観測波長は可視光であるため、冷却の必要はない。一方で、VERTECS の場合は、光学系を全長 10cm 以内という狭い領域に収納する必要があり、光学設計の技術は主要な開発要素となる。

姿勢制御系については、JPL/MIT で開発され、本衛星と同規模の 6U サイズの超小型天文衛星 ASTERIA において、本プロジェクトで採用する 1U サイズの姿勢制御ユニットを搭載し、秒角レベルの姿勢安定性での系外惑星観測を実現している。

3. 提案装置の主要な機能 / Major functions of the proposed instrument

10 秒角 / 1 分間の姿勢安定性での波長 400-800nm における 4 波長帯での撮像観測

7.

プロジェクトで獲得する
データ

Data to be obtained

透過波長域が異なる 4 枚のフィルターを検出器直前に田の字型に並べることにより、1 回の露光で 4 波長バンドの撮像データを得る。同様の観測を視野をずらして複数回繰り返すことにより、1 天域あたり 9×9 平方度の視野を、4 波長バンド全てでカバーする。

本プロジェクトでは、EBL 輝度の推定およびそれに必要な前景光の輝度分布モデルの構築のため、次の天域において上記のような観測データの獲得を目指す。

A) 前景光輝度が小さい約 10 天域 (以下、EBL 天域)

観測目的: 点源を除く空の絶対輝度を精密測定した上で、前景光の寄与を差し引き EBL 輝度を推定する。

プロジェクトの科学目的との関係: EBL 輝度の推定は本プロジェクトの科学目的そのものであり、これらの天域の観測データは成果創出の軸となる。

B) 星間ダスト柱密度が多様な約 100 天域

観測目的: DGL 輝度は星間ダストの熱放射 (波長 $100 \mu\text{m}$) の強度に比例することが知られているが、既知の $100 \mu\text{m}$ における輝度分布と本観測で得られる空の輝度分布との間で相関を取ることによって DGL 成分を抽出し、DGL 輝度と $100 \mu\text{m}$ 輝度間の比例係数を決める。

プロジェクトの科学目的との関係: 本観測で得られた比例係数をもとに、A で観測した EBL 天域における DGL 輝度を見積もることで、DGL を適切に差し引き EBL 輝度を推定することが可能となる。

C) 星密度が多様な約 10 天域

観測目的: 検出限界より暗い星の積算光である ISL の輝度は、星数モデル (e.g., TRILEGAL モデル) や星カタログ (e.g., GAIA, SDSS) を用いて見積られるが、検出限界より明るい星の計数結果がこれらのモデルやカタログ値と一致するか、また一致しない場合はどのようなスケール定数が最適かを決定する。

プロジェクトの科学目的との関係: 本観測で得られたスケール定数をもとに、A で観測した EBL 天域における ISL 輝度を見積もることで、ISL を適切に差し引き EBL 輝度を推定することが可能となる。

D) 惑星間ダスト柱密度の多様性に富む約 70 天域

観測目的: 惑星間ダストの 3 次元分布と散乱特性をモデル化することで ZL 輝度分布をモデル関数で表し、本観測で得られた空の輝度 (DGL と ISL は B,C の観測結果から見積もり差し引き済み) に対してパラメータフィッティングを行う。

プロジェクトの科学目的との関係: 本観測で得られた ZL 輝度分布モデルをもとに、

Aで観測したEBL天域におけるZL輝度を見積もることで、ZLを適切に差し引きEBL輝度を推定することが可能となる。

8.

主要技術要素 Key technologies

1. 主要技術要素と開発が必要な技術要素 / Key technologies and those requiring further investment and development

本プロジェクトの主要技術要素は以下であり、いずれも開発が必要な技術要素である。

- ・望遠鏡観測装置
- ・データ処理系
- ・通信系
- ・姿勢制御系
- ・電源系（展開型太陽電池パドルを含む）
- ・構造系
- ・熱系

2. 技術的不確定性の大きな技術要素 / Assessment of uncertainties in technologies

8.1のうち、不確定性が大きい技術要素は以下である。

- ・望遠鏡観測装置
- ・姿勢制御系
- ・熱系

望遠鏡観測装置は、すべての要素について本プロジェクト用に新規開発を行うため、光学性能、熱構造設計等を地上試験で実証する必要がある。

姿勢制御系は、ユニットとしては豊富な軌道上実績があるが、本プロジェクトの厳しい姿勢制御要求を満足するかどうかは、衛星全体として地上試験によって実証する必要があり、そのための試験設備を新規に開発する。

熱系は、本プロジェクトで使用する望遠鏡と検出器の温度要求を達成するため、新規の熱設計が必要になる。特に、検出器は放射板による冷却という新規の設計を採用しており、地上での熱真空試験による実証が必要である。

3. 既存技術の活用条件 / Assessment of heritages

衛星のメインバス部であるオンボードコンピュータ、電源系、構造系は、九州工業大学で開発され軌道上実績のあるシステムをベースとすることで、迅速な衛星開発を目指す。それらのシステムに対して、本プロジェクトの新規要素である1Uサイズの高精度姿勢制御ユニット（姿勢系）、S帯およびX帯通信機（通信系）、展開型太陽電池パドル（電源系）、望遠鏡観測装置を適合することで、衛星全体のシステムを構成する。

9.

想定されるコスト Cost estimate

すでに要素の大部分において企業からの見積書に基づき、設計、製造を行っている段階であるため、プロジェクト全体のコストを推定可能である。その結果、宇宙機全体と地上局を含む費用として、約3億円が必要である。本衛星は太陽同期軌道を想定しており、ミッションデータのダウンリンクには通信可能時間が長い高緯度の地上局を使用する予定であるが、予算獲得状況等によっては、日本国内の地上局を使用する可能性がある。その場合、上記の費用から1割程度の費用の減少が見込まれる。

10.

技術ヘリテージと技術 開発状況と開発計画 Technical heritages, technology development status and plan

1. 技術ヘリテージと技術開発状況 / Technology heritage, development history and status

主要技術要素と開発が必要な技術要素について、現在のTRL値とその根拠を下表に示す。

要素	TRL値	根拠
望遠鏡観測装置	6	EM（フライトモデルとほぼ同一）による開発試験が完了
データ処理系	6	EM（フライトモデルとほぼ同一）による開発試験が完了
通信系	6	EM（フライトモデルとほぼ同一）による開発試験が完了
姿勢制御系	5	EMによる開発試験が完了 Blue Canyon Technologiesの統合型姿勢制御ユニットXACT-15はTRL 7 (2023 State of the Art Small Spacecraft Technology Reportより)
電源系	6	EM（フライトモデルとほぼ同一）による開発試験が完了 DHV Technologiesが製作する展開型太陽電池パドルはTRL 7 (2023 State of the Art Small Spacecraft Technology Reportより)
構造系	5	EMによる開発試験が完了
熱系	6	EM（フライトモデルとほぼ同一）による開発試験が完了

2. 技術開発計画 / Technology development plans

各技術要素について、新規要素部分については、BBMを用いて要素単位での実証試験を実施する。その後、各要素を電氣的に結合し、各インターフェースを含むシステム全体の機能試験、性能試験を実施する。並行して衛星の熱構造の実証のために、熱構造モデルを製作し、熱真空試験および環境試験を通して設計を実証する。これらの実証の後、衛星EMを製作し、衛星システム全体としての機能試験、性能試験を実施し、技術を実証する。衛星EMの実証に基づいて、衛星FMを開発し、機能および性能を実証する。

11.

プロジェクトのリスク管理 Risk Management Plan of the Project

本プロジェクトの特徴として、打ち上げロケットが、衛星設計段階で決定していないということがある。打ち上げ軌道、ロケットインターフェースが想定と異なるものになった場合、衛星設計の大幅な見直しが必要となり、スケジュール遅延が発生する。早急な外的条件の確定が重要である。

12.

天文学コミュニティの 持続可能性に関わる戦略

Strategy for the Sustainability of Astronomical community

日本に限らず世界的な宇宙科学の動向として、天文衛星は大型化が進んでおり、ミッション提案から観測を実施して科学成果を得るまでに10年以上かかることが常態化している。そのため、あるプロジェクトの始まりから終わりまで一貫して取り組むという経験を有する若手研究者が少数であるという問題がある。そこで、本プロジェクトは、天文衛星を2-3年という短期間で開発し、科学観測を行うことで、参加者の多くがプロジェクトの始まりから終わりまでを経験することを通して、将来的にプロジェクトを先導する人材を育成することを狙う。また、天文プロジェクトの推進には、理学的知識だけでなく、システム工学等の工学的な知見も必要となるため、本プロジェクトを通して理工学の双方に精通した人材育成を狙う。実際に、本プロジェクトは、40歳以下の若手研究者と学生が計30名以上参加し、学生教育と人材育成を進める最適な場となっている。また、理学研究者、工学研究者が混在するチーム構成としており、将来の宇宙理工学ミッションを担う人材育成に貢献している。

さらに、同等の規模のプロジェクトを通じた人材育成、技術継承を継続するために、本プロジェクトで開発する高精度姿勢制御バスの共通化を進め、超小型衛星による天文プロジェクトをシリーズ化を推進する。天文プロジェクトに限らず、超小型衛星を利用した多様なミッションで使用可能な共通バスの開発を目指す。

別紙 共同提案者リスト

Co-investigator and his/her role

Nakagawa Takao (Tokyo City University , ISAS/JAXA) : Vice Principal Investigator
Matsuura Shuji (Kwansei Gakuin University) : Leader of mission payload development
Takimoto Kohji (ISAS/JAXA) : Mission payload development
Hashimoto Ryo (Kwansei Gakuin University) : Mission payload development
Hirose Yuki (Kwansei Gakuin University) : Mission payload development
Ofuji Yusuke (Kwansei Gakuin University) : Mission payload development
Iwaki Taiko (Kwansei Gakuin University) : Mission payload development
Tsumura Kohji (Tokyo City University) : Mission payload development
Wada Takehiko (National Astronomical Observatory of Japan) : Mission payload development
Takahashi Aoi (ISAS/JAXA) : Leader of science investigation
Yasuda Yoshinao (SOKENDAI) : Science investigation
Ojika Akimasa (Kwansei Gakuin University) : Science investigation
Tsumoto Akane (Kwansei Gakuin University) : Science investigation
Tome Yuto (Kyushu Institute of Technology) : Science investigation
Nishioka Masahiro (SOKENDAI) : Science investigation

Kurosaki Kana (Kyushu Institute of Technology) : Science investigation
 Ebisu Maiki (Kwansei Gakuin University) : Science investigation
 Ohara Yuki (Kwansei Gakuin University) : Science investigation
 Kawahara Hajime (ISAS/JAXA) : Science investigation
 Schulz Victor Hugo (Kyushu Institute of Technology) : Command & Data Handling subsystem
 Abdulla Hil Kafi (Kyushu Institute of Technology) : Command & Data Handling subsystem
 Keenan Alexsei Aamir Chatar (Kyushu Institute of Technology) : Command & Data Handling subsystem
 Otani Yukihisa (Kyushu Institute of Technology) : Command & Data Handling subsystem
 Fielding Ezra (Kyushu Institute of Technology) : Command & Data Handling subsystem
 Karen Vidaurre (Kyushu Institute of Technology) : Command & Data Handling subsystem
 Miyagawa Hiroki (Kyushu Institute of Technology) : Command & Data Handling subsystem
 Tanaka Kazuaki (Kyushu Institute of Technology) : Command & Data Handling subsystem
 Babu Vishwanath Hemath Kumar (Kyushu Institute of Technology) : Electric power subsystem
 Necmi Cihan Örgen (Kyushu Institute of Technology) : Electric power subsystem
 Hari Ram Shrestha (Kyushu Institute of Technology) : Electric power subsystem
 Chinathip Narongphun (Kyushu Institute of Technology) : Electric power subsystem
 Nakagawa Shunsuke (Kyushu Institute of Technology) : Electric power subsystem
 Ndukayo Zamba Leonel (Kyushu Institute of Technology) : Electric power subsystem
 Fukumoto Emimo (Kyushu Institute of Technology) : Electric power subsystem
 Kato Isami (Kyushu Institute of Technology) : Electric power subsystem
 Jose Rodrigo Cordova-Alarcon (Kyushu Institute of Technology) : Attitude determination and control subsystem
 Wenceslao Bejarano (Kyushu Institute of Technology) : Attitude determination and control subsystem
 Tanaka Hayato (Institute of Science Tokyo) : Attitude determination and control subsystem
 Ikeda Akihiro (Kyushu Institute of Technology) : Attitude determination and control subsystem
 Eliza Sapkota (Kyushu Institute of Technology) : Attitude determination and control subsystem
 Ikari Satoshi (The University of Tokyo) : Attitude determination and control subsystem
 Jikuya Ichiro (Kanazawa University) : Attitude determination and control subsystem
 Eyoas Ergetu Areda (Kyushu Institute of Technology) : Structure subsystem
 Kawasaki Hisataka (Kyushu Institute of Technology) : Structure subsystem
 Morelle Bernard Andre Bastien (Kyushu Institute of Technology) : Structure subsystem
 Dai David (Kyushu Institute of Technology) : Structure subsystem
 Yabumoto Shoki (Kyushu Institute of Technology) : Structure subsystem
 Masuno Hayato (Kyushu Institute of Technology) : Structure subsystem
 Enokidani Umi (ISAS/JAXA) : Structure subsystem
 Masui Hirokazu (Kyushu Institute of Technology) : Structure subsystem
 Reynel Josue Galindo Rosales (Kyushu Institute of Technology) : Thermal subsystem
 Marco Rosa (Kyushu Institute of Technology) : Thermal subsystem

Tsurumoto Kohei (Kyushu Institute of Technology) : Thermal subsystem
 Karaki Shohei (Kyushu Institute of Technology) : Thermal subsystem
 Arakawa Chisato (Kyushu Institute of Technology) : Thermal subsystem
 Miyajima Sota (Kyushu Institute of Technology) : Thermal subsystem
 Nakayama Daisuke (Kyushu Institute of Technology) : Ground & communication subsystem
 Raihana Shams Islam Antara (Kyushu Institute of Technology) : Ground & communication subsystem
 Iwaki Yusuke (Kyushu Institute of Technology) : Ground & communication subsystem
 Hayashi Shunya (Kyushu Institute of Technology) : Ground & communication subsystem
 Sayanju Sirash (Kyushu Institute of Technology) : Ground & communication subsystem
 Oho Arisa (Kyushu Institute of Technology) : Ground & communication subsystem
 Hayashida Kentaro (Kyushu Institute of Technology) : Ground & communication subsystem
 Sato Rin (Kyushu Institute of Technology) : Ground & communication subsystem
 Fuse Tetsuhito (Kyushu Institute of Technology) : Ground & communication subsystem
 Matsuhara Hideo (ISAS/JAXA) : Ground & communication subsystem
 Isobe Naoki (ISAS/JAXA) : Ground & communication subsystem
 Goto Tomotsugu (National Tsing Hua University) : Ground & communication subsystem
 Hashimoto Tetsuya (National Chung Hsing University) : Ground & communication subsystem
 Yamasaki Shotaro (National Chung Hsing University) : Ground & communication subsystem
 Wada Tomoki (National Chung Hsing University) : Ground & communication subsystem
 Chen Yu-An (National Tsing Hua University) : Ground & communication subsystem
 Chang William (National Chung Hsing University) : Ground & communication subsystem
 Cossas K. W. WU (National Tsing Hua University) : Ground & communication subsystem
 Howard J. H. CHUANG (National Chung Hsing University) : Ground & communication subsystem
 Hamada Kaito (Kyushu Institute of Technology) : Satellite development assistance
 Miyamoto Kota (Kyushu Institute of Technology) : Satellite development assistance
 Koga Chiaki (Kyushu Institute of Technology) : Satellite development assistance
 Cho Mengu (Kyushu Institute of Technology) : Satellite development assistance
 Kitamura Kentaro (Kyushu Institute of Technology) : Satellite development assistance
 Teramoto Mariko (Kyushu Institute of Technology) : Satellite development assistance
 Yamauchi Takashi (Kyushu Institute of Technology) : Satellite development assistance
 Aoyanagi Yoshihide (University of Fukui) : Satellite development assistance
 Miyazaki Yasuyuki (ISAS/JAXA) : Satellite development assistance
 Yatsu Yoichi (Institute of Science Tokyo) : Attitude determination and control subsystem development assistance
 Funase Ryu (ISAS/JAXA) : Attitude determination and control subsystem development assistance
 Hirako Keiichi (ISAS/JAXA) : Attitude determination and control subsystem development assistance

プロジェクト共同提案者とその役割

中川 貴雄 (東京都市大学, ISAS/JAXA) : プロジェクト副代表者
松浦 周二 (関西学院大学) : ミッション部責任者
瀧本 幸司 (ISAS/JAXA) : ミッション部開発
橋本 遼 (関西学院大学) : ミッション部開発
廣瀬 優樹 (関西学院大学) : ミッション部開発
大藤 勇亮 (関西学院大学) : ミッション部開発
岩城 大洗 (関西学院大学) : ミッション部開発
津村 耕司 (東京都市大学) : ミッション部開発
和田武彦 (国立天文台) : ミッション部開発
高橋 葵 (ISAS/JAXA) : 科学検討責任者
保田 慶直 (総合研究大学院大学) : 科学検討
小鹿 哲雅 (関西学院大学) : 科学検討
津本 明音 (関西学院大学) : 科学検討
當銘 優斗 (九州工業大学) : 科学検討
西岡 政寛 (総合研究大学院大学) : 科学検討
黒崎 香名 (九州工業大学) : 科学検討
夷子 真生 (関西学院大学) : 科学検討
大原 有稀 (関西学院大学) : 科学検討
河原 創 (ISAS/JAXA) : 科学検討
Schulz Victor Hugo (九州工業大学) : データ処理系
Abdulla Hil Kafi (九州工業大学) : データ処理系
Keenan Alexsei Aamir Chatar (九州工業大学) : データ処理系
大谷 将壽 (九州工業大学) : データ処理系
Fielding Ezra (九州工業大学) : データ処理系
Karen Vidaurre (九州工業大学) : データ処理系
宮川 大樹 (九州工業大学) : データ処理系
田中 一晃 (九州工業大学) : データ処理系
Babu Vishwanath Hemath Kumar (九州工業大学) : 電源系
Necmi Cihan Örgen (九州工業大学) : 電源系
Hari Ram Shrestha (九州工業大学) : 電源系
Chinathip Narongphun (九州工業大学) : 電源系
中川 俊輔 (九州工業大学) : 電源系
Ndukayo Zamba Leonel (九州工業大学) : 電源系
Fukumoto Emino (九州工業大学) : 電源系
Kato Isami (九州工業大学) : 電源系
Jose Rodrigo Cordova-Alarcon (九州工業大学) : 姿勢系
Wenceslao Bejarano (九州工業大学) : 姿勢系
田中 颯 (東京科学大学) : 姿勢系

池田 明浩 (九州工業大学) : 姿勢系
Eliza Sapkota (九州工業大学) : 姿勢系
五十里 哲 (東京大学) : 姿勢系
軸屋 一郎 (金沢大学) : 姿勢系
Eyoas Ergetu Areda (九州工業大学) : 構造系
川崎 悠貴 (九州工業大学) : 構造系
Morelle Bernard Andre Bastien (九州工業大学) : 構造系
Dai David (九州工業大学) : 構造系
藪本 将基 (九州工業大学) : 構造系
升野 颯人 (九州工業大学) : 構造系
榎木谷 海 (ISAS/JAXA) : 構造系
増井 博一 (九州工業大学) : 構造系
Reynel Josue Galindo Rosales (九州工業大学) : 熱系
Marco Rosa (九州工業大学) : 熱系
鶴本 航平 (九州工業大学) : 熱系
唐木 翔平 (九州工業大学) : 熱系
荒川 千里 (九州工業大学) : 熱系
宮嶋 壯太 (九州工業大学) : 熱系
中山 大輔 (九州工業大学) : 地上・通信系
Raihana Shams Islam Antara (九州工業大学) : 地上・通信系
岩木 優介 (九州工業大学) : 地上・通信系
林 隼也 (九州工業大学) : 地上・通信系
Sayanju Sirash (九州工業大学) : 地上・通信系
於保 有紗 (九州工業大学) : 地上・通信系
林田 健太郎 (九州工業大学) : 地上・通信系
佐藤 凜 (九州工業大学) : 地上・通信系
布施 哲人 (九州工業大学) : 地上・通信系
松原 英雄 (ISAS/JAXA) : 地上・通信系
磯部 直樹 (ISAS/JAXA) : 地上・通信系
後藤 友嗣 (国立清華大学) : 地上・通信系
橋本 哲也 (国立中興大学) : 地上・通信系
山崎 翔太郎 (国立中興大学) : 地上・通信系
和田 知己 (国立中興大学) : 地上・通信系
Chen Yu-An (国立清華大学) : 地上・通信系
Chang William (国立中興大学) : 地上・通信系
Cossas K. W. WU (国立清華大学) : 地上・通信系
Howard J. H. CHUANG (国立中興大学) : 地上・通信系
濱田 海杜 (九州工業大学) : 衛星開発補助
宮本 航太 (九州工業大学) : 衛星開発補助
古賀 千晶 (九州工業大学) : 衛星開発補助

趙 孟佑 (九州工業大学) : 衛星開発補助
北村 健太郎 (九州工業大学) : 衛星開発補助
寺本 万里子 (九州工業大学) : 衛星開発補助
山内 貴志 (九州工業大学) : 衛星開発補助
青柳 賢英 (福井大学) : 衛星開発補助
宮崎 康行 (ISAS/JAXA) : 衛星開発補助
谷津 陽一 (東京科学大学) : 姿勢系補助
船瀬 龍 (ISAS/JAXA) : 姿勢系補助
平子 敬一 (ISAS/JAXA) : 姿勢系補助

Astronomy with Super-Precise Spectroscopic Observations

超精密分光観測による天文学

0.

概要

Summary

Astronomy with Super-Precise Spectroscopic Observations

超精密分光観測による天文学

Project Category

2. Other projects (大型計画以外の、装置・施設の開発を含む計画の提案)

Abstract of science goals, objectives, and methods

By developing a new spectrograph for Okayama 188cm telescope and Seimei telescope and upgrading a high dispersion spectrograph of Subaru telescope, we realize a high dispersion spectrograph that combines super-high wavelength resolution (Super-HR; $R > 300,000$), super-wide wavelength range (UV to NIR), super-high precision (radial-velocity (RV) measurement precision $< \sim 10$ cm/s), and super-high temporal resolution ($< \sim 10$ sec), and push forward the following researches;

- A. Determine the distribution of terrestrial and larger exoplanets orbiting various types of stars in the solar neighborhood, and reveal the properties of planetary atmospheres (chemical composition, spatial structure, motion, etc.).
- B. Clarify chemical and isotopic compositions of stars, novae, interstellar matter, circum-galactic and inter-galactic matter, etc., and provide strong constraints on the nucleosynthesis processes in the universe and the chemical evolutionary history of the universe.
- C. Characterize various time-scale variations of stars through spectral line profiles to establish a dynamic picture of stellar atmospheres.

This project will pioneer a new field of astronomical research called “super-precise spectroscopic observation.” It will elucidate the diversity of planets in the universe, their origins and evolution, and the origins and evolution of elements, while deepening our understanding of stars as fundamental building blocks of the universe.

プロジェクトの意義と科学目的・方法の要旨

岡山 188cm 望遠鏡・せいめい望遠鏡用の新型高分散分光器の開発とすばる望遠鏡の高分散分光器 HDS のアップグレードによって、超高波長分解能 ($R > 30$ 万)、超広波長域 (紫外～近赤外)、超高精度 (視線速度測定精度 < 10 cm/s)、超高時間分解能 ($< \sim 10$ 秒) を兼ね備えた高分散分光器を実現し、主に以下の天文学研究を展開する。

- A. 太陽近傍の様々な恒星を周回する地球型惑星以上の惑星分布を明らかにする。また、惑星大気の特徴（化学組成、分子空間分布、運動等）を明らかにする。
- B. 恒星、新星、星間物質、銀河周辺・銀河間物質等の元素・同位体組成を明らかにし、宇宙における元素合成プロセスと宇宙の化学進化史に強い制限を与える。
- C. 恒星の様々な時間尺度の変動現象の特徴をスペクトル線輪郭を通して明らかにし、恒星大気の動的な描像を確立する。

本プロジェクトによって「超精密分光観測」という新しい天文学の研究分野を創出し、宇宙における惑星の多様性とその起源・進化および元素の起源・進化を解明するとともに、宇宙の基本構成要素としての恒星に対する理解を深化させる。

Principle Investigator

Name: Bun'ei Sato

Affiliation: Institute of Science Tokyo

E-mail address: satobn@eps.sci.isct.ac.jp

プロジェクト代表者

氏名：佐藤文衛

所属：東京科学大学

E-mail アドレス：satobn@eps.sci.isct.ac.jp

Estimate of total cost

811,000 KJPY

総コストの見積り

811,000 千円

Estimate of total FTE (Full-Time Equivalent) necessary to accomplish the project

34.0 FTE・yr

プロジェクト実現に必要な総 FTE (人年) の見積り

34.0 人年

Duration of the project

FY 2025-2034

プロジェクト実施期間

2025～2034 年度

1.

プロジェクトの意義

Science goals of the project

宇宙における惑星の多様性とその起源・進化および元素の起源・進化を解明するとともに、宇宙の基本構成要素としての恒星に対する理解を深化させる

2.

プロジェクトの科学目的

Science goals of the project

本プロジェクトでは、超高波長分解能（比波長分解能 $R > 30$ 万）、超広波長域（紫外～近赤外）、超高精度（視線速度測定精度 < 10 cm/s）、超高時間分解能（ < 10 秒）を兼ね備えた高分散分光器を実現し、以下の天文学研究を強力に展開する。

科学目的 A. 太陽近傍の様々な恒星を周回する地球型惑星以上の惑星分布を明らかにする。

また、惑星大気の特徴（化学組成、分子空間分布、運動等）を明らかにする。

科学目的 B. 恒星、新星、星間物質、銀河周辺・銀河間物質等の元素・同位体組成を明らかにし、宇宙における元素合成プロセスと宇宙の化学進化史に強い制限を与える。

科学目的 C. 恒星の様々な時間尺度の変動現象の特性をスペクトル線輪郭を通して明らかにし、恒星大気の動的な描像を確立する。

これらの目的を達成するために、これまで岡山 188cm 望遠鏡で培ってきた可視高分散分光と最先端の超精密波長基準である「天文コム」を用いた精密視線速度測定技術を一段と進化させた新型高分散分光器を 188cm 望遠鏡とせいめい望遠鏡用に開発する。これを用いた系外惑星探索を推進するとともに、将来的に 30m 望遠鏡（TMT）への展開を視野に入れた技術開発を行う。また、すばる望遠鏡の高分散分光器 HDS をアップグレードし、超高波長分解能、超広波長域、超高精度、超高時間分解能に基づく超精密分光観測を実現する。

3.

プロジェクトの科学的意義と目標の根拠

Rationale for the scientific goals and objectives

1. 科学的意義の根拠：研究の背景、当該分野の研究状況、等 / Scientific background, status of the relevant scientific area, etc.

本プロジェクトでは、前節で述べた 3 つの科学目的に対して、岡山 188cm 望遠鏡・せいめい望遠鏡用の新型分光器の開発とすばる望遠鏡 HDS のアップグレード（可視ナスマス焦点 AO 化含む）により、以下の研究を実施する。

【科学目的 A】

- 太陽近傍の恒星の視線速度変化およびスペクトル線輪郭変化を短期～長期間に渡ってモニター観測し、恒星活動の影響を検出・補正しつつ周回する惑星の有無を調べる。
- 主に短周期惑星大気中の様々な原子・分子・イオンを検出し、それらの惑星大気における空間・速度分布を推定する。

関連研究分野の状況

惑星の周回によって引き起こされる主星の運動をスペクトル吸収線の波長変化としてとらえる観測手法（ドップラー効果を利用した視線速度法）は、太陽近隣の恒星系の地球型惑星「第二の地球」を発見する最有力の手段である。近年、観測技術の発展により視線速度測定精度は数十 cm/s 以下にまで向上しているが、恒星自身の表面活動による波長変動がそれより数倍大きく、第二の地球検出の大きな障害となっている。これを解消するために、超高波長分解能観測による恒星吸収線ごとの線輪郭変動の詳細な調査の必要性が認識されつつある。

また、高分散分光観測によって主に系外巨大惑星大気中の分子の空間分布の非一様性・運動が見え始めており、様々な吸収線に対して惑星の自転速度より十分小さな速度分解能（ $\sim 1\text{km/s}$; R-30 万）による観測の必要性が認識されつつある。

【科学目的 B】

- キューサー吸収線系を観測し、銀河間極低温ガス・同位体、および銀河周辺物質を検出する。
- 紫外域のベリリウム同位体吸収線を測定し、新星の爆発現象で合成され電子捕獲によって短期間にリチウムに変化する元素量を正確に把握する。
- 近紫外域に存在する r プロセス元素組成を多数の金属欠乏星で測定し、その組成パターンを調査する。
- 原子スペクトル線に現れる同位体によるわずかな線の分裂を利用し、恒星および星間物質のリチウムや重元素の同位体組成比を測定する。

関連研究分野の状況

銀河周辺物質の光電離モデルの検証に必要な吸収線は紫外を含む幅広い波長領域に分布するため、既存の高分散分光器では限界がある。紫外域での高い波長分解能による観測が必要な新星や超金属欠乏星の観測例は少数に限られているため、統計的性質の調査やモデルの検証のためにはより多くのデータを得る必要がある。

また、同位体組成比の測定は元素組成測定に比べると例が非常に少ない。波長分解能に加えて高い S/N 比も要求されるため大口径望遠鏡が必要であり、8-10m 級望遠鏡に波長分解能 20 万を超える装置が求められる。

【科学目的 C】

- 様々な恒星のスペクトル線輪郭形状およびその変動を精密に測定し、恒星活動との関連を調査する。さらに、動的な恒星大気モデルを検証する。

関連研究分野の状況

動的な恒星大気モデルの理論的研究が進展しているが、観測によって検証可能な対象はほぼ太陽のみに限られている。他の恒星による一般的な検証のため、恒星観測用の超高波長分解能・超高時間分解能分光器が求められる。

2. 提案するプロジェクトコンセプトは当該分野になにをもたらそうとするのか / Goals and objectives: new scientific steps the proposed concept aims to achieve in the science area

本プロジェクトで獲得されるコンパクトな超高波長分解能分光器の設計や、超高波長分解能・広波長域観測用イメージライサーや天文コム装置の技術は、将来の観測装置に応用可能である。さらに、超高時間分解能観測が可能な近年発展の著しい大面積 CMOS カメラの分光特性を超精密レベルで理解し、将来装置に応用することもできる。

また、将来的に例えば次のような周辺分野に波及効果をもたらし得る。

- ・超精密波長較正による微細構造定数の変動検証（物理学）
- ・地球型惑星の発見による、将来の詳細観測のためのターゲット提供（惑星科学、アストロバイオロジー）
- ・惑星大気中の分子などの吸収線の分離による、(系外)惑星表面の状態の詳しい情報(地球科学および惑星科学)

3. 提案するプロジェクトコンセプトの強みと過去、現在、未来の他のプロジェクト、研究・探査との関係 / The competing power of the proposed project concept and its relationship to past, current, and future other investigations and projects.

■プロジェクトコンセプトの強み

- ・可視光高分散分光における超精密波長基準「天文コム」を真に実用化する（将来的には 10cm/s 以下の視線速度測定精度を視野に入れている）。
- ・東アジア地域において唯一サブ m/s の視線速度測定精度が達成可能な観測設備たり得る。
- ・専有的な利用が可能で、系外惑星探索に最適化された自動分光望遠鏡である 188cm 望遠鏡を用いた、明るい太陽型恒星に対するかつてない規模の稠密かつ長期間に及ぶ高精度視線速度モニター観測を実施できる。
- ・長周期惑星の検出を狙う上で圧倒的に優位な、30 年という 188cm 望遠鏡における観測継続期間を有する。
- ・R-25 万程度の超高波長分解能分光器は世界で 2 台稼働しているが、本プロジェクトの分光器には超精密波長基準（天文コム）が搭載されることと、カバーする波長域の広さ（紫外～近赤外）、達成可能な時間分解能（<10 秒）の点で本プロジェクトに優位性がある。
- ・現状北天ではすばる・HDS、南天では VLT・UVES のみが紫外域 (>300nm) の観測を遂行できるため、北天の金属欠乏星、新星、キューサー吸収線系の観測は本プロジェクトの独壇場たり得る。

■過去、現在、未来の他のプロジェクト、研究・探査との関係

- ・本プロジェクトは、188cm 望遠鏡と高分散分光器 HIDES で 20 年以上に渡って培ってきた可視光精密視線速度測定技術を一段と発展させるものである。
- ・本プロジェクトは、20 年以上に渡って 188cm 望遠鏡で継続してきた太陽型星、巨

星を対象とした系外惑星探索の観測期間をさらに延ばし、より長周期の惑星の探索をも可能にするものである。

- 本プロジェクトで検出される、太陽近隣の太陽型恒星を巡る地球型惑星は、TMT や HWO での詳細観測の対象となりうるものであり、これらのプロジェクトへのターゲット供給の意味合いをもつ。
- 現在、すばる望遠鏡の高分散分光器 HDS への導入が進んでいる天文コム (HDS コム) は、188cm 望遠鏡 HIDES-F に搭載された天文コム 1、2 号機の経験をもとに改良された 3 号機である。両プロジェクトは密接に関連しており、HDS コムの開発・運用で得られる知見は、本プロジェクトで開発する 188cm 望遠鏡・せいめい望遠鏡用の新型分光器および天文コム 4 号機に生かされる。
- すばる 2 で検討されている極限補償光学を用いた可視高分散分光器 (Ultra-Doppler; 計画代表・田村元秀) とは、天文コムやその他視線速度精密測定に関わる技術やサイエンスに関して情報交換し、協力しながら進めていく。
- 本プロジェクトで得られる技術的・科学的知見は、その次のすばる、TMT への搭載を目指す天文コム 5 号機および高分散分光器開発のベースとなる。
- すばる HDS での観測データは、同一サイトの優位性を活かし、TMT を見据えた長期モニター観測の初期データとして利用できる可能性がある。
- 本プロジェクトにより、口径の異なる 3 台の望遠鏡 (すばる・せいめい・188cm) で超精密分光観測が実現する。これにより、様々な明るさの観測対象に対して様々なタイムスケールでの超精密分光観測が実施可能になり、当該研究分野を一気に牽引することができる。

4.

プロジェクトが実施する
研究

Scientific
investigations of the
project

■プロジェクトが獲得するもの

- 太陽近隣の約 4 等星より明るい太陽型星に対して、ハビタブルゾーン以遠の地球型惑星を検出できる質、量のスペクトル観測データ (主として 188cm 望遠鏡・せいめい望遠鏡)
- 惑星、恒星、新星、星間物質、銀河周辺・銀河間物質等の元素・同位体組成の導出ができる質、量のスペクトル観測データ (主としてすばる望遠鏡)

■それを達成するために必要な性能要求

- 約 4 等星より明るい太陽型星に対して 3 年間に渡って最高 10cm/s (最低 30cm/s) の視線速度測定精度、安定性 (主として 188cm 望遠鏡・せいめい望遠鏡)
- 最高波長分解能 30 万、紫外～近赤外波長域をカバー (主としてすばる望遠鏡; To Be Refined)

5.

スケジュール Schedule

1. 大まかなスケジュール / Rough schedule

188cm 望遠鏡・せいめい望遠鏡

■ 2025 ~ 2030 年

- ・ 現行分光器 HIDES-F の改良（進行中）
- ・ HIDES-F による惑星探索の継続（進行中）

■ 2025 ~ 2027 年

- ・ 新型分光器の開発（資金調達済み；進行中）

■ 2028 ~ 2030 年

- ・ 新型分光器による惑星探索の遂行

■ 2031 ~ 2034 年

- ・ 新型分光器の超高安定化、大型望遠鏡への技術移転、次期装置の検討・開発

すばる望遠鏡

■ 2025 ~ 2026 年

- ・ HDS への天文コムの導入（資金調達済み；進行中）

■ 2025 ~ 2027 年

- ・ HDS の紫外域高効率化（新 ADC + イメージスライサー導入）

■ 2025 ~ 2028 年

- ・ HDS への超高波長分解能・超高時間分解能モードの導入

■ 2026 ~ 2030 年

- ・ HDS の超広波長域化（検出器の交換）、高安定化
- ・ 可視ナスマス焦点 AO 化

■ 2025 ~ 2030 年

- ・ 現行（+部分的アップグレード版）HDS での科学観測、次期装置の検討

■ 2031 ~ 2034 年

- ・ アップグレード版 HDS での科学観測、次期装置の検討・開発

2. 開発スケジュールの科学成果への影響 / Schedule impact on science

岡山 188cm 望遠鏡・せいめい望遠鏡用の新型分光器の開発が遅れた場合は当面 HIDES-F（改良後精度目標 70 cm/s）で観測を続けるため、発見できるハビタブルゾーン惑星の最小質量は 7 地球質量くらいになる。一方長周期惑星に関しては、雪線以遠の木星質量以下の惑星を検出することは観測を継続できれば HIDES-F でも可能である。新型分光器の開発スケジュールが遅れば、新型分光器で科学観測を開始する時期が遅くなり観測期間が短くなるが、2034 年以降は現時点で未定である。

すばる望遠鏡 HDS のアップグレードについては、波長分解能 30 万での吸収線輪郭測定・同位体組成比測定・系外惑星大気観測、及び UV 波長域でのサイエンスが主たる科学目的である。視線速度測定精度は 30cm/s 以下を目指す、岡山の新型分光器に比べ

てチャレンジングである。仮にこの精度が達成できなかったとしてもすばるの大口径を活かした超高波長分解能観測は実行できる。

6.

プロジェクトで使用する
装置

Instrumentation of
the project

1. 実施する実験・観測・分析などを実現する技術 / Description of the technology to realize the investigations

「天文コム」を搭載し、その能力を活かし切る超高波長分解能・超高精度・超広波長域・超高時間分解能（・超高安定）の可視高分散分光器

2. 実施する実験・観測・分析などを実現する方法・技術について、他の技術、および類似技術との比較 / Comparisons of the selected technology with other technologies

産総研が開発中の天文コムは既存のものとは違う発生および波長変換法を採用し、耐久性および波長域（特に可視域）の広さにおいて世界の他のコムより優れている

3. 提案装置の主要な機能 / Major functions of the proposed instrument

・紫外～近赤外の超広帯域・精密波長基準天文コム（波長 300 ～ 1800 nm における周波数領域での網羅率 70 から 100 % の超広帯域・精密波長基準天文コム）

・可視～近赤外の超高波長分解能・超高安定・超高時間分解能・高効率分光機能

・洗練されたデータ解析機能

以上による超精密視線速度測定機能 (<10cm/s)

7.

プロジェクトで獲得する
データ

Data to be obtained

・合わせて 20 個程度の太陽型星の 3 ～ 10 年間（データ取得間隔 1 日以下～ 1 ヶ月程度で柔軟に）のスペクトル（主として 188cm 望遠鏡・せいめい望遠鏡）

・波長分解能：R=55000 (HIDES-F) , 300,000 程度（新型分光器）

・波長範囲：380 ～ 900 nm (TBD)

・一点あたりの視線速度相対誤差：10 cm/s ～ 1 m/s

・これらのデータを周期解析することによって公転運動による視線速度変化を検出する

・観測波長域に含まれる吸収線の輪郭変動などから恒星活動の変動を検出する

・惑星、恒星、新星、星間物質、銀河周辺・銀河間物質のスペクトル（主としてすばる望遠鏡）

・波長分解能：最高 300,000 程度 (HDS アップグレード)

・波長範囲：紫外～近赤外 (TBD)

・他 TBD

8.

主要技術要素 Key technologies

1. 主要技術要素と開発が必要な技術要素 / Key technologies and those requiring further investment and development

- ・天文コムの広帯域化、波長 300 ~ 1800 nm の全域網羅を目指す。
- ・天文コムの長期稼働（特にマウナケア山頂での）における課題の抽出と改善
- ・天文コムのスペクトル平滑化および時間的安定性の向上
- ・超高波長分解能とコンパクトさを両立する分光器設計
- ・高波長分解能・高効率イメージスライサー
- ・分光器への入射光を安定化させるファイバーアジテーター・スクランブラー
- ・高感度・広波長域・大面積・小ピクセルサイズ・高速読み出しの光検出器
- ・精密温度制御
- ・超低振動冷却系
- ・真空チェンバーを導入した超高安定分光器
- ・精密視線速度測定コード

2. 技術的不確定性の大きな技術要素 / Assessment of uncertainties in technologies

- ・天文コムの広帯域化、波長 300 ~ 1800 nm の全域網羅を目指す。

3. 既存技術の活用条件 / Assessment of heritages

現在 HIDES-F で使用されている天文コムの波長域は 350-408 nm、453-543 nm、および 664-873 nm（可視波長域 380-830 nm の 60 % 超）であり、大きな装置の修正無しで 2 年程度の稼働に耐えている。現在のコムの一露出あたりの理論的な最高到達視線速度精度（光子統計による統計的精度）は数 cm/s 程度であるが、分光器の外的影響（機器的・環境的な変化、ファイバーモードノイズ等）によると思われる視線速度変動が短時間間隔で取得したデータ間でも 15 m/s 程度存在し、まだ理論的な精度を達成するに至っていない。また、1 日以上タイムスケールで数 100 m/s の系統的な変動が見られる場合もある。本プロジェクトでは HIDES-F での運用継続により科学的成果を産出しつつ、耐久性の課題抽出、波長域の拡大など装置を改良し、その技術を次世代分光器へとつなげる。

9.

想定されるコスト Cost estimate

総コストの見積り（10 年間、To Be Refined）811,000 千円（※～1,631,000 千円）

【188cm 望遠鏡・せいめい望遠鏡】

< 新型分光器開発（資金調達済） >

天文コムシステム 50,000 千円

分光器システム 227,000 千円

検出器系（電荷転送効率、量子効率、リニアリティ、一様性）10,000 千円

冷却系（超低振動）7,000 千円

本体光学系（ミラー、レンズ、分散素子、ホルダー） 130,000 千円
真空チャンバー 50,000 千円
精密環境制御系（温度、気圧、振動） 10,000 千円
入射光学系（スライサー、ファイバー配置機構、マイクロ光学系） 5,000 千円
モダルノイズ等リダクション系（アジテーター、スクランブラー） 5,000 千円
ガイド系（ティップティルト補正、大気分散補正） 5,000 千円
ファイバー系 5,000 千円
精密視線速度測定コード開発（人件費、5年） 50,000 千円
専用解析計算機 4,000 千円
データストレージ 2,000 千円

<サイエンス検討> 8,000 千円

研究会開催 2,000 千円
世界情報収集 3,000 千円
研究者招聘 3,000 千円

<運用（10年）> 130,000 千円

研究員雇用 60,000 千円
電力使用料 30,000 千円
装置保守 20,000 千円
消耗品 10,000 千円
旅費 10,000 千円

（※プロジェクトメンバー人件費（10年）～ 800,000 千円）

【すばる望遠鏡】

< HDS アップグレード >

イメージスライサー 10,000 千円
検出器（UV、IR 波長域） 100,000 千円
検出器保持機構 20,000 千円
天文コムシステム 50,000 千円
エンクロージャー改良 20,000 千円
温度・気圧制御機構 40,000 千円
可視 AO 100,000 千円

<運用（10年）> 120,000 千円

特任助教雇用 70,000 千円
研究員雇用 50,000 千円

（※プロジェクトメンバー人件費（10年）To Be Refined）

プロジェクト実現に必要な総 FTE (人年) の見積り (To Be Refined) 34.0 人年

<開発> 19.5 人年

天文コムシステム 4.5 人年 (0.5FTE x 3 x 3 年)

分光器システム 10 人年 (0.5FTE x 5 x 4 年)

精密視線速度測定コード開発 5 人年 (1FTE x 5 年)

<サイエンス検討> 1.5 人年

研究会開催 0.4 人年 (0.1FTE x 2 x 2 年)

世界情報収集 0.6 人年 (0.15FTE x 2 x 2 年)

研究者招聘 0.5 人年 (0.5FTE x 2 x 0.5 年)

<運用 (10 年)> 13 人年

望遠鏡保守 2 人年 (0.2FTE x 1 x 10 年)

装置保守 2 人年 (0.2FTE x 1 x 10 年)

解析ソフトウェア改良 3 人年 (0.3FTE x 1 x 10 年)

装置ハードウェア改良 6 人年 (0.3FTE x 2 x 10 年)

10.

技術ヘリテージと技術
開発状況と開発計画

**Technical heritages,
technology
development status
and plan**

1. 技術ヘリテージと技術開発状況 / Technology heritage, development history and status

天文コムについては、1号機、2号機、3号機の開発を経て獲得された経験・知識・理解の豊富な蓄積がある。これらの経験を基礎により困難な天文コム開発に取り組む計画である。

高分散分光器、ファイバーフィードシステム、イメージスライシング等を自分たちの手で設計・開発し、試験・評価を行い、実観測でデータを取得し、精密な解析を行い、優れた天文学的成果を挙げてきた実績があり、各方面の経験・知識・理解の蓄積がある。これらをもとに、最新の光学設計等の情報を収集しながら、新たなシステムを開発する計画である。

2. 技術開発計画 / Technology development plans

天文コム 4号機 (To Be Detailed)

新高分散分光器 (To Be Detailed)

11.

プロジェクトのリスク管理
**Risk Management
Plan of the Project**

日本が管理する望遠鏡に搭載する観測装置を開発するため、外的要因によるリスクは少ない。

12.

天文学コミュニティの
持続可能性に関わる戦略

Strategy for the Sustainability of Astronomical community

■学生教育

188cm 望遠鏡およびせいめい望遠鏡は国内にある望遠鏡であるという利点を生かし、実験、開発、観測等の天文学の実地教育を行う。

■人材育成

188cm 望遠鏡は国内にあり、かつ共同利用を行っていないため様々な実験、開発、試験観測などが行いやすく、新技術の開発には打ってつけである。この利点を生かし、意欲ある有能な若いポストドクに活躍の場を提供して実績を積んでもらうことによって、日本の観測天文学を担う人材を育成する。

■技術継承

国内では岡山 188cm 望遠鏡の HIDES (1999 年ファーストライト)、すばる望遠鏡の HDS (2000 年ファーストライト)、ぐんま 150cm 望遠鏡の GAOES (2003 年ファーストライト; 2023 年に GAOES-RV としてせいめい望遠鏡に移設) 以降、本格的な可視光高分散分光器は開発されていない (改良は継続的に行われている)。本プロジェクトによって、視線速度精密測定技術とともに可視光高分散分光器の開発技術をさらに発展させた形で次世代に継承する。

別紙

Co-investigator and his/her role (TBD)

Bun'ei Sato (Science Tokyo) : Project management, leader of science investigation, spectrograph development

Akito Tajitsu (NAOJ) : Coordination between projects, spectrograph development

Hideyuki Izumiura (NAOJ) : Spectrograph development

Hajime Inaba (AIST) : Astrocomb development

Sho Ohkubo (AIST) : Astrocomb development

Takuya Takarada (ABS) : Science investigation, data analysis

Wako Aoki (NAOJ) : Science investigation

Satoshi Honda (Hyogo U.) : Science investigation

Hideyuki Hotta (Nagoya U.) : Science investigation

Ryohtaroh Ishikawa (NIFS) : Science investigation

Toru Misawa (Shinshu U.) : Science investigation

Hiroki Harakawa (NMNS) : Science investigation

Masashi Omiya (ABC) : Spectrograph development, science investigation
Kambe Eiji (NAOJ) : Spectrograph investigation
Akira Arai (NAOJ) : Spectrograph investigation
Yuki Moritani (NAOJ) : Spectrograph investigation
Jun Nishikawa (NAOJ) : Spectrograph investigation
Noboru Ebizuka (RIKEN) : Spectrograph investigation
Yosuke Minowa (NAOJ) : AO investigation
Yoshito Ono (NAOJ) : AO investigation
Yuhei Takagi (NAOJ) : AO investigation
Teruyuki Hirano (ABC) : Science investigation
Takayuki Kotani (ABC) : Science investigation
Hajime Kawahara (JAXA) : Science investigation
Miyazaki Shota (JAXA) : Science investigation
Kento Masuda (Osaka U.) : Science investigation
Takuma Suda (TUT) : Science investigation
Masaaki Otuka (Kaichi International. U.) : Science investigation
Mai Yamashita (Shimane U.) : Science investigation
Masahide Hidai (Tokai U.) : Science investigation

プロジェクト共同提案者とその役割 (TBD)

佐藤文衛 (東京科学大学) : 統括、科学検討責任者、分光器開発
田實晃人 (国立天文台) : プロジェクト間連携、分光器開発
泉浦秀行 (国立天文台) : 分光器開発
稲場 肇 (産業技術総合研究所) : 天文コム開発
大久保章 (産業技術総合研究所) : 天文コム開発
宝田拓也 (アストロバオロジーセンター) : 科学検討、データ解析
青木和光 (国立天文台) : 科学検討
本田敏志 (兵庫県立大学) : 科学検討
堀田英之 (名古屋大学) : 科学検討
石川遼太郎 (核融合科学研究所) : 科学検討
三澤 透 (信州大学) : 科学検討
原川紘季 (国立科学博物館) : 科学検討
大宮正士 (アストロバオロジーセンター) : 分光器検討、科学検討
神戸栄治 (国立天文台) : 分光器検討
新井 彰 (国立天文台) : 分光器検討
森谷友由希 (国立天文台) : 分光器検討
西川 淳 (国立天文台) : 分光器検討
海老塚昇 (理化学研究所) : 分光器検討

美濃和陽典 (国立天文台) : AO 検討
大野良人 (国立天文台) : AO 検討
高木悠平 (国立天文台) : AO 検討
平野照幸 (アストロバイオロジーセンター) : 科学検討
小谷隆行 (アストロバイオロジーセンター) : 科学検討
河原 創 (宇宙航空研究開発機構) : 科学検討
宮崎翔太 (宇宙航空研究開発機構) : 科学検討
増田賢人 (大阪大学) : 科学検討
須田拓馬 (東京工科大学) : 科学検討
大塚雅昭 (開智国際大学) : 科学検討
山下真衣 (島根大学) : 科学検討
比田井昌英 (東海大学) : 科学検討

Observation network for Time-domain astronomy/

Multi-messenger astronomy

時間軸天文学・マルチメッセンジャー

天文学観測ネットワーク

0.

概要

Summary

Observation network for Time-domain astronomy/ Multi-messenger astronomy

時間軸天文学・マルチメッセンジャー

天文学観測ネットワーク

Project Category

2. Other projects (大型計画以外の、装置・施設の開発を含む計画の提案)

Abstract of science goals, objectives, and methods

Transients such as supernovae and neutron star mergers are major sources of metals in the Universe and drove the evolution of the Universe. This project will systematically integrate the Subaru Telescope and other telescopes in Japan and effectively utilize them, collaborating with the large optical survey by Rubin/LSST (starting in FY2025), NIR surveys by Euclid (starting in FY2024) and Roman (starting in FY2027), high-energy neutrino observations by IceCube (ongoing) and IceCube-Gen2 (starting in FY2031) experiments, the fifth gravitational wave observing run from FY2027 to FY2029, and neutrino observations by Hyper Kamiokande (starting in FY2027). We construct a real-time data analysis system, a science platform, and a high-speed storage and database. This system enables us to store and handle the large data taken with the large surveys and the multi-messenger observations, and to generate science-ready data by researchers without downloading the large raw data. Utilizing the time-domain photometric and spectroscopic data, multi-messenger data, and color of host galaxies, this project will reveal the nature of transients and multi-messenger objects and their evolution from the distant Universe to the nearby Universe and clarify the origin of matter and the evolution of matter in the Universe.

プロジェクトの意義と科学目的・方法の要旨

超新星爆発や中性子星合体などの突発天体は、宇宙における重元素の主要な供給源であり、爆発の際に解放するエネルギーも含め、宇宙進化の原動力である。本プロジェクトは、2025年度に開始される Rubin/LSST による可視光大規模探査、Euclid による近赤外線大規模探査、2027年度に開始される Roman による近赤外線大規模探査、継続中の IceCube 実験によるニュートリノ観測、2031年度から開始される IceCube-Gen2 による観測、2027-2029年度に予定される重力波第五期観測、2027年度から開始される Hyper Kamiokande によるニュートリノ観測に合わせて、日本のもつすばる望遠鏡や他

望遠鏡を有機的に統合し効率的に活用するシステムを構築する。具体的には、大規模探査観測、マルチメッセンジャー観測によって得られる大規模データを保存し、それらを効率的に取り扱い、科学成果に直結するデータを生成することを可能にする、即時データ解析システム、科学プラットフォーム、高速ストレージ・データベースを構築する。これにより、時系列測光分光データ、マルチメッセンジャーデータ、母銀河の多波長情報などを活用し、遠方宇宙から近傍宇宙までの突発天体やマルチメッセンジャー天体の素性を明らかにし、物質の起源、宇宙の物質進化を解明する。

Principle Investigator

Name: Nozomu Tominaga

Affiliation: NAOJ

E-mail address: nozomu.tominaga@nao.ac.jp

プロジェクト代表者

氏名: 富永望

所属: 国立天文台

E-mail アドレス: nozomu.tominaga@nao.ac.jp

Co-investigator and his/her role

As per the attached document

プロジェクト共同提案者とその役割

別紙のとおり

Estimate of total cost

950 million yen

総コストの見積り

9.5 億円

Estimate of total FTE (Full-Time Equivalent) necessary to accomplish the project

72 FTE

プロジェクト実現に必要な総 FTE (人年) の見積り

72 人年

Duration of the project

FY2024-FY2035

プロジェクト実施期間

2024年度-2035年度

1.

プロジェクトの意義

Science goals of the project

光赤外大規模探査観測・マルチメッセンジャー観測と連携して、突発天体やマルチメッセンジャー天体の素性を明らかにし、物質の起源、宇宙の物質進化を解明する。

2.

プロジェクトの科学目的

Science goals of the project

我々の身の周りに存在する重元素は宇宙のどこでできたのか？宇宙を飛び交う高エネルギーの宇宙線は宇宙のどこで生成されたのか？このような重元素の起源や宇宙線の起源といった「物質の起源」、またその宇宙開闢からの進化「宇宙の物質進化」は物理学における根本的な問題である。

本プロジェクトは、近年盛んにおこなわれている突発天体探査観測や近年実現した重力波観測の他、ニュートリノ・宇宙線・電磁波の観測が協調したマルチメッセンジャー観測を通じて、宇宙に重元素を供給する突発天体が宇宙のどの時代にどの程度発生し、宇宙においてどのように物質が進化してきたのか、また宇宙線などの高エネルギー粒子がどこで生成されたのか、を明らかにする。

日本では、8m望遠鏡で現在最大の視野をもつすばる望遠鏡 Hubble Space Telescope (HST) や多天体分光器すばる望遠鏡 Prime Focus Spectrograph (PFS) を用いて突発天体探査観測やマルチメッセンジャー観測が行われてきており、8m望遠鏡を用いた時間軸天文学・マルチメッセンジャー天文学では一日の長がある。しかし、これまでは個人レベルの研究にとどまっている。世界的には、Rubin/LSSTなどが切り開く光赤外大規模探査時代に向けて、複数の突発天体ブローカーが開発され、組織的に時間軸天文学・マルチメッセンジャー天文学に取り組む体制が整いつつある（参考：<https://pcos.gsfc.nasa.gov/TDAMM/>）。本プロジェクトは、日本のもつすばる望遠鏡や他望遠鏡を有機的に統合し効率的に活用するシステムを構築することで、日本が取得する観測データを有効活用し、物質の起源・宇宙の物質進化に迫る。

3.

プロジェクトの科学的意義と目標の根拠

Rationale for the scientific goals and objectives

1. 科学的意義の根拠：研究の背景、当該分野の研究状況、等 / Scientific background, status of the relevant scientific area, etc.

超新星爆発や中性子星合体などの突発天体は、宇宙におけるヘリウムより重い元素（重元素）の主要な供給源である。ビッグバンで始まった宇宙には水素とヘリウムしか存在しなかったが、初代星が生まれ超新星爆発を起こすことで重元素が初めて宇宙に供給された。さらに、供給された重元素と水素・ヘリウムからなるガスから次世代星が生まれ、それらの起こす突発天体も重元素を供給することで、多種多様な重元素が宇宙に満ち溢れていった。

近年、中小口径望遠鏡を用いた多数の突発天体探査が行われ、その結果、理論的に予測されていなかった天体も含め、様々な明るさ・タイムスケールをもつ突発天体の存在が明らかとなってきた。この突発天体の観測的多様性は、その重元素合成量やエネルギー解放量の多様性を反映している。宇宙進化を解明するためには、遠方宇宙から近傍宇宙に至るまでに起こる突発天体を観測し、宇宙にどのような明るさ、タイムスケール、発生頻度の突発天体が存在するのか、またそれらの天体はどのような天体を起源とするのかを明らかにすることが必要である。

また、2017年には重力波で観測された中性子星合体からの電磁波放射の観測、高エネルギー宇宙線粒子から発せられる高エネルギーニュートリノ事象の電磁波対応天体の観測が実現したことで、マルチメッセンジャー天文学が幕を開け、物質の起源に迫る全く新しいアプローチが可能となった。

しかし、現在中性子星合体のマルチメッセンジャー観測はまだ1例しか成功例がない。宇宙にはさまざまな質量の中性子星が存在し、重元素の起源を解明するには、多様な中性子星合体における重元素合成を観測的に検証する必要がある。また、高エネルギーニュートリノ天体の同定も確たる例はブレーザー、セイファート銀河、天の川銀河の3例があるものの、これらのみでは宇宙における高エネルギーニュートリノ総放射量を説明できない。そのため、どのような天体現象、例えば、ブラックホールの誕生と成長の現場である大質量星の超新星爆発や、大質量ブラックホールによる恒星の潮汐破壊現象などの天体が高エネルギーニュートリノイベントと付随しているか検証する必要がある。

2. 提案するプロジェクトコンセプトは当該分野になにをもたらそうとするのか / Goals and objectives: new scientific steps the proposed concept aims to achieve in the science area

(1) 近年の突発天体探査により多種多様な突発天体が見つかっているものの、その素性が明らかとなっていない天体が多数存在する (図1)。本プロジェクトは宇宙にどのような明るさ、タイムスケール、発生率の突発天体が存在するのか、それらの突発天体はどのような輻射機構で輝き、どのような天体を起源とするのか、を明らかにする。

(2) 重力波観測と連携した中性子星合体観測による多様な中性子星合体における重元素合成の検証、ニュートリノ観測と連携したブラックホール突発天体観測によるニュートリノ放射天体の同定を行うことで、物質の起源に迫る。マルチメッセンジャー観測によってもたらされる天体の位置決定精度は1平方度を超え、その広大な領域から天体を同定することがマルチメッセンジャー天文学の成功の鍵となる (図2)。本プロジェクトは、光赤外線観測の空間分解能の高さを生かした放射天体の詳細な位置決定 (= 探査観測)、そして波長分解能の高さを生かした放射天体のエネルギー分布、そして赤方偏移の正確な測定 (= 分光観測) を行う。電磁波対応天体の位置と赤方偏移の情報を用いて、多波長電磁波観測データから最大限の情報を引き出す。

図 1: 突発天体の典型的タイムスケールと明るさの関係。

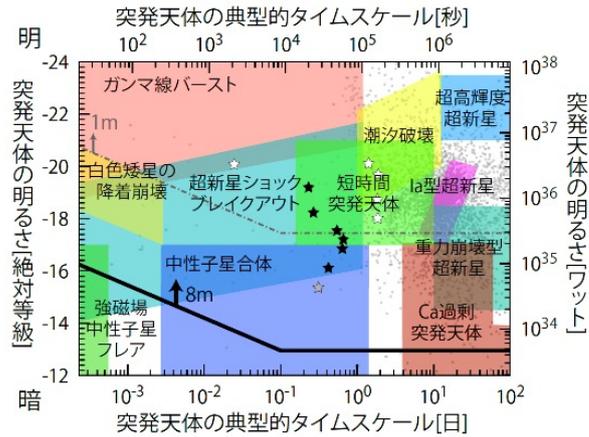
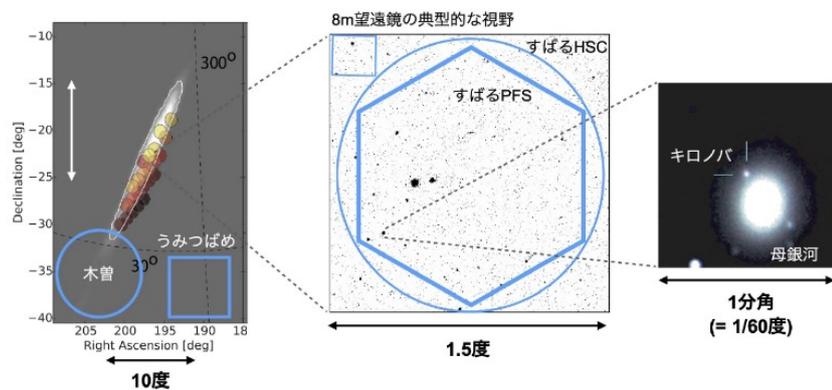


図 2: 重力波天体の可視光対応天体の同定。ニュートリノの位置決定精度は中央のパネル程度の大きさ(約 1 度)。



3. 提案するプロジェクトコンセプトの強みと過去、現在、未来の他のプロジェクト、研究・探査との関係 / The competing power of the proposed project concept and its relationship to past, current, and future other investigations and projects.

時間軸天文学、マルチメッセンジャー天文学では、リアルタイムにデータを解析し、即時かつ高精度で突発天体を検出することが必要不可欠である。本プロジェクトは、可視光広視野探査で現在世界最高の探査能力を持つ HSC を用いた時間軸天文学によって培った技術資産を用いる。例えば、これまでリアルタイム解析システムを開発しデータ取得後即時データ解析・ソース検出が行われてきた。また、検出されたソースの中から機械学習・深層学習を用いて多数の誤検出の中から突発天体を選択し、多数の突発天体を分類することなどが行われてきた。本プロジェクトはこれらをさらに発展させ、新しく提案される機械学習の手法も取り込み必要な技術応用を進める。

本プロジェクトは、HSC によって培った優位性に基づき、日本に他国や他プロジェクトと協力する母体を構築する。大規模探査観測やマルチメッセンジャー観測のデータ解析グループと協力し、それらによって得られる観測データを集約し統括するシステムを構築する。これによりデータ科学技術・人材を集約して真に有用なデータ科学拠点を形成し、日本が長期的にビッグデータ天文学の新時代を主導していくための基盤を作る。

4.

プロジェクトが実施する
研究

Scientific
investigations of the
project

すばる望遠鏡 (HSC, PFS, ULTIMATE) と Rubin/LSST, Euclid, Roman の連携観測によって、現在から赤方偏移 5 以上の宇宙において、どのような明るさ、タイムスケール、発生率の突発天体が存在するのかを明らかにし、それらの突発天体の起源とメカニズムを明らかにする。さらに、重力波観測と連携した中性子星合体観測によって、多様な中性子星合体における重元素合成を検証し、ニュートリノ観測と連携したブラックホール突発天体観測によるニュートリノ放射天体の同定を実現することで、物質の起源に迫る。

このような時間軸天文学・マルチメッセンジャー天文学観測を実現するには、従来の意味での「観測装置」だけでなく、(1) 大量のデータを即時に解析するシステム、(2) データをすぐに科学応用するためのプラットフォーム、そして (3) 大量のデータに自由にアクセスするための高速ストレージ・データベースが必要不可欠となる。そこで、これらハードウェア・ソフトウェアも「装置」の一部として開発する姿勢が極めて重要となる。

そこで本プロジェクトでは、時間軸天文学・マルチメッセンジャー天文学によって得られる 10 ペタバイト (PB) を超える観測データを波長横断的に結合して個々の天体の測光値を記録する「多波長データベース (多波長 DB)」を構築する。さらに、時間軸天文学、マルチメッセンジャー天文学では従来の天文学に比べて時間という次元が増えるため、天体の光度の時間変化を記録する 400 億行もの情報量となる「時系列データベース (時系列 DB)」を構築する。また、その観測データを解析し突発天体やその母銀河に関する情報を即時に検索・参照できるシステム (科学プラットフォーム) を構築する。それらを活用し、日本のもつすばる望遠鏡や他望遠鏡を用いた即時発見・即時追観測を実現する。これにより、時間軸天文学、マルチメッセンジャー天文学における日本の優位性を保ち、これらを主導する。

5.

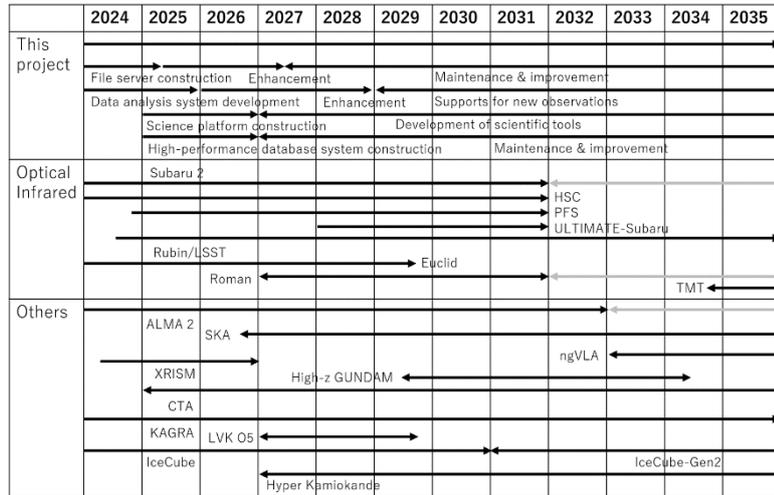
スケジュール
Schedule

1. 大まかなスケジュール / Rough schedule

2025 年度に開始される Rubin/LSST による可視光大規模探査、Euclid による近赤外線大規模探査、2027 年度に開始される Roman による近赤外線大規模探査、継続中の IceCube 実験による観測、2031 年度から開始される IceCube-Gen2 実験による観測、2027-2029 年度に予定される重力波第五期観測、2027 年度から開始される Hyper Kamiokande 実験による観測に合わせて、日本のもつすばる望遠鏡や他望遠鏡を有機的に統合し効率的に活用するシステムを構築する。

2024 年度に大規模ファイルサーバの構築、またそれぞれの突発天体、マルチメッセンジャー天体に対応した機械学習を含むデータ解析体制の構築を開始する。2025 年度に大規模データベースサーバの構築、また科学プラットフォームの構築を開始する。2026 年度以降、科学プラットフォーム構築のために、解析環境の整備、可視化ツールの開発、データ解析ツールの開発を行う。2027 年度以降、Roman、重力波第五期観測、IceCube-Gen2 に備え、さらに大規模ファイルサーバ、大規模データベースサーバ、科学プラットフォームの増強、またそれぞれのマルチメッセンジャー観測に合わせ解析体制を改善する。

図 3: 本プロジェクトおよび関連するプロジェクトのスケジュール



2. 開発スケジュールの科学成果への影響 / Schedule impact on science

日本は HSC によって培った優位性をもっているものの、大規模探査観測、マルチメッセンジャー観測によって得られる大規模データを受け入れる体制は未だ整っていない。開発スケジュールが遅れると、Rubin/LSST による可視光大規模探査、Euclid による近赤外線大規模探査の観測データを保持することすらかなわず、時間軸天文学、マルチメッセンジャー天文学の推進に支障が出、これまでの優位性を失い、世界に後れを取ることになってしまう。

6.

プロジェクトで使用する装置

Instrumentation of the project

1. 実施する実験・観測・分析などを実現する技術 / Description of the technology to realize the investigations

大規模探査観測、マルチメッセンジャー観測によって得られる大規模データを保存し、それらを効率的に取り扱い、科学成果に直結するデータを生成することを可能にする、即時データ解析システム、科学プラットフォーム、高速ストレージ・データベース技術。

2. 実施する実験・観測・分析などを実現する方法・技術について、他の技術、および類似技術との比較 / Comparisons of the selected technology with other technologies

・即時データ解析システム

個別の観測装置に対応するデータ解析パイプラインを統合し、即時解析を実現するデータ解析システムを構築する。

・高速ストレージ・データベース技術

データベースサーバを複数導入し MapReduce モデル等の分散処理機構を用いて、巨大なテーブルを高速に検索することを可能にする分散型の高速データベースを構築する。新エネルギー・産業技術総合開発機構が現在開発中の高速データベース技術も活用する。ストレージも多数のアクセスに対応可能な分散型システムを活用する。

・科学プラットフォーム

Rubin/LSST が開発中のフレームワークを日本のすばる望遠鏡や他望遠鏡用に改良し、導入するファイルサーバ、GPU を含むデータ解析サーバの計算資源を仮想化技術により管理し、それらの上に Jupyter Hub による解析用ユーザインターフェースを実装することで、資源稼働効率と可用性を最大化する科学プラットフォームを構築する。

3. 提案装置の主要な機能 / Major functions of the proposed instrument

これからのビッグデータ天文学では、即時にデータを解析するシステム、それらのデータに容易にアクセスするプラットフォーム、データベースも「装置」として開発に注力する必要がある。本プロジェクトが開発する「装置」は、大規模探査観測、マルチメッセンジャー観測によって得られる大規模データを保存し、それらを効率的に取り扱い、科学成果に直結するデータを生成することを可能にする。また、研究者が個別にデータをダウンロードし解析するという従来の枠組みではなく、リモート環境で、巨大な観測データを解析し突発天体やその母銀河に関する情報を即時に検索・参照し、科学成果に直結するデータを用意できるシステムを構築する。

7.

プロジェクトで獲得するデータ

Data to be obtained

大規模探査によって得られる測光・分光観測データを波長横断的に結合して個々の天体の測光データとして記録する。また、すばる HSC や PFS やその他観測によって取得される時系列測光・分光データを記録する。

本プロジェクトで得られる測光分光データを用いて、突発天体やマルチメッセンジャー天体の重元素合成量や放出物質の速度を測定する。その結果を、理論モデルと定量的に比較することにより、それらの天体の放射機構、起源天体を明らかにする。また、近赤外線探査観測を用いることにより遠方天体にまで拡張する。これにより、過去に例をみないほど大規模かつ究極的な天体サンプルを取得することで、突発天体やマルチメッセンジャー天体の重元素合成量やエネルギー解放量の分布まで明らかにし、宇宙における物質の起源、さらには物質進化を明らかにする。

8.

主要技術要素

Key technologies

1. 主要技術要素と開発が必要な技術要素 / Key technologies and those requiring further investment and development

・即時データ解析・追観測システム

時間軸天文学、マルチメッセンジャー天文学では、対象天体が時間とともに暗くなるため、即時データ解析、天体同定、即時追観測が必要となる。それぞれの観測装置用に開発されたシステムを統合して、即時データ解析を実現する必要がある。

・科学プラットフォーム

研究者がデータをダウンロードして個別に解析するのではなく、即時性、高い解析効率を実現し、有用なツールを備えたデータ統括システムを構築する必要がある。

・高速ストレージ・データベース技術

本プロジェクトで取得される多量のデータを集約し、巨大な観測データを解析し突発天体やその母銀河に関する情報を即時に検索・参照できるストレージ・データベースが必要である。

2. 技術的不確定性の大きな技術要素 / Assessment of uncertainties in technologies

- ・高速ストレージ・データベース技術

10PB を超える観測データを保存し 400 億行を超える時系列データを検索・参照するシステムの実現には、既存のデータベースアーキテクチャに変わる設計思想のデータベースシステムが必要である。

3. 既存技術の活用条件 / Assessment of heritages

個別の観測装置に対応するデータ解析パイプラインを統合したデータ解析システム、他プロジェクトで活用されているオープンソースの技術をもとに本プロジェクトに最適化した科学プラットフォームを構築する。

9.

想定されるコスト Cost estimate

- ・システム開発のための人件費 6名/年 5億円/12年
科学プラットフォーム構築 3名
即時データ解析システム構築 2名
高速データベース構築 1名
- ・計算機システム導入経費 4億円/12年
ファイルサーバ 2億円
データベースサーバ 1000万円
データ解析サーバ 2億円
- ・電気代 5000万円/12年

10.

技術ヘリテージと技術 開発状況と開発計画 Technical heritages, technology development status and plan

1. 技術ヘリテージと技術開発状況 / Technology heritage, development history and status

すばる HSC を用いた時間軸天文学、マルチメッセンジャー天文学において、即時データ解析・追観測システムを構築しており、そのシステムを大規模探査観測や他望遠鏡に拡張する。また、すばる HSC, PFS データリリース用に科学プラットフォームの原型の開発は進んでおり、有用なツールの開発などを進め、さらに発展させる。

2. 技術開発計画 / Technology development plans

Rubin/LSST や新エネルギー・産業技術総合開発機構などの他プロジェクトと協力し、大量の観測データを保存し、それらを検索・参照するシステムを実現する。

11.

プロジェクトのリスク管理 Risk Management Plan of the Project

本プロジェクトは、国内外の他プロジェクトによって取得される観測データを統合するシステム開発であるため、他プロジェクトが遂行されない場合そのプロジェクトに関する部分については進行が不可能となる。しかしながら、連携する全ての国内外の他プロジェクトが遂行されないことは考えられないため、遂行されているプロジェクトと協力して科学目標を達成する。

12.

天文学コミュニティの 持続可能性に関わる戦略 Strategy for the Sustainability of Astronomical community

本プロジェクトは、データ科学技術・人材を集約して真に有用なデータ科学拠点を形成し、日本が長期的にビッグデータ天文学を主導していくための基盤作りに貢献するものである。特に、開発に携わる人員が次世代のビッグデータ天文学を牽引する研究者となることを期待している。

Co-investigator and his/her role

Yousuke Utsumi (NAOJ): Follow-ups of gravitational waves and neutrinos

Yoichi Itoh (U. of Hyogo): Observation with Nayuta

Yuhei Iwata (NAOJ): Radio observation, observation with Subaru/HSC

Yumiko Oasa (Saitama U.): Observation with SaCRA and Gumma

Ryou Ohsawa (NAOJ): Science platform, observations with Tomo-e Gozen Camera, JASMINE

Kouji Ohta (Kyoto U.): Observation with Seimei

Koji Kawabata (Hiroshima U.): Observation with Kanata

Shigeo Kimura (Tohoku U.): Follow-ups of neutrinos

Shigeyuki Sako (U. Tokyo): Observations with Tomo-e Gozen Camera

Mahito Sasada (Science Tokyo): Optical observation and prompt data analysis system

Daisuke Suzuki (Osaka U.): Observations with PRIME, 1.8m MOA-II, and 61cm B&C

Tadafumi Takata (NAOJ): High-performance database construction

Ichiro Takahashi (Science Tokyo): Machine learning

Masaomi Tanaka (Tohoku U.): Theory, Machine learning

Gen Chiaki (Kochi Coll.): Theory

Kazuya Matsubayashi (U. Tokyo): Observation with TAO

Kotaro Niinuma (Yamaguchi U.): Radio observation
Yuu Niino (U. Tokyo): Observation with Tomo-e Gozen Camera
Bunyo Hatsukade (NAOJ): Radio observation
Hisanori Furusawa (NAOJ): Science platform construction
Keiichi Maeda (Kyoto U.): Theory, Observation with Seimei
Takashi Moriya (NAOJ): Theory, Collaboration with Euclid and Roman
Tomoki Morokuma (Chiba Inst. Tech): Observation with Subaru/PFS
Naoki Yasuda (U. Tokyo/Kavli IPMU): Observation with Subaru/HSC and PFS
Yoichi Yatsu (Science Tokyo): UV observation
Michitoshi Yoshida (NAOJ): Follow-ups of gravitational waves and neutrinos

プロジェクト共同提案者とその役割

内海洋輔 (国立天文台) : 重力波・ニュートリノ追観測
伊藤洋一 (兵庫県立大) : なゆた望遠鏡観測
岩田悠平 (国立天文台) : 電波観測、すばる HSC 観測
大朝由美子 (埼玉大学) : さくら望遠鏡ぐんま望遠鏡観測
大澤亮 (国立天文台) : 科学プラットフォーム、Tomo-e Gozen Camera, JASMINE 観測
太田耕司 (京都大学) : せいめい望遠鏡観測
川端弘治 (広島大学) : かなた望遠鏡観測
木村成生 (東北大学) : ニュートリノ追観測
酒向重行 (東京大学) : Tomo-e Gozen Camera 観測
笹田真人 (東京科学大学) : 可視光追観測および即時データ解析システム
鈴木大介 (大阪大学) : 南アフリカ (PRIME)、ニュージーランド (1.8m MOA-II 望遠鏡, 61cm B&C 望遠鏡) 観測
高田唯史 (国立天文台) : 高速データベース構築
高橋一郎 (東京科学大学) : 機械学習
田中雅臣 (東北大学) : 超新星・中性子星合体理論、機械学習
千秋元 (高知高専) : 宇宙の物質進化理論
新沼浩太郎 (山口大学) : 電波観測
新納悠 (東京大学) : Tomo-e Gozen Camera 観測
古澤久徳 (国立天文台) : 科学プラットフォーム構築
廿日出文洋 (国立天文台) : 電波観測
松林和也 (東京大学) : TAO 望遠鏡観測
前田啓一 (京都大学) : 突発天体理論、せいめい望遠鏡すばる望遠鏡観測
守屋堯 (国立天文台) : 突発天体理論、Euclid、Roman 連携
諸隈智貴 (千葉工業大学) : すばる PFS を用いた観測
安田直樹 (東京大学) : すばる HSC、PFS を用いた観測
谷津陽一 (東京科学大学) : 紫外線観測
吉田道利 (国立天文台) : 重力波追観測

Ultra-Doppler

真の第二の地球を探索するウルトラ・ドップラー分光器

0.

概要

Summary

Ultra-Doppler

真の第二の地球を探索するウルトラ・ドップラー分光器

Project Category

2. Other projects (大型計画以外の、装置・施設の開発を含む計画の提案)

Abstract of science goals, objectives, and methods

Exoplanets have become not only one of the most important fields of modern astronomy and planetary science, but also the most important research target in the search for life in the universe. The existence of a wide variety of exoplanets makes possible the study of terrestrial planets in various environments with different host stars, and the confirmation of signs of the existence of life on Earth, which resembles our Solar system, will have a particularly large impact on the public at large. The development of unprecedented visible and infrared ultrahigh-precision Doppler spectrometers is the key to this urgent task of searching for nearby Earth-like planets. This project will realize the first full-scale search for Earth-like planets around Solar-type stars using ultra-high-precision Doppler spectroscopy in visible light, and will detect Earth-like planets far from the host star (at suitable temperatures, not hot) and clarify their frequency. It will also be able to measure the masses of very small transit planets. In addition, through the discovery of protoplanets immediately after their birth using the world's most accurate infrared Doppler spectroscopy, the history of planet formation and evolution will be elucidated and the origin of the solar system will be approached, as many mysteries still remain. Furthermore, through the exploration of exoplanetary atmospheres by ultra-wide wavelength high dispersion spectroscopy including thermal infrared, the origin, evolution, and diversity of planetary atmospheres will be elucidated on an unprecedented scale. We will establish ultra-high-precision Doppler spectroscopy techniques in a wide wavelength range for these purposes.

プロジェクトの意義と科学目的・方法の要旨

系外惑星は現代天文学・惑星科学の最重要分野の一つであるのみならず、宇宙に生命を探索する上で最も重要な研究対象となった。多種多様な系外惑星の存在は、主星が異なる様々な環境の地球型惑星の研究を可能にするが、なかでも太陽系に似た地球における生命の存在の兆候の確認は、広く一般社会にも大きなインパクトをもたらすであろう。そのため、地球近傍の地球に似た惑星の探索が喫緊の課題となっており、これまででない可視・赤外超高精度ドップラー分光器の開発が鍵となる。本プロジェクトでは、可視光にお

ける超高精度ドップラー法による太陽型星まわりの初の本格的な地球型惑星探査を実現し、主星から離れた（高温ではない適温の）地球型惑星の検出とその存在頻度を明らかにする。長周期地球型トランジット惑星の質量測定を行うこともできる。また、世界最高精度の赤外線波長域ドップラー法による誕生直後の原始惑星の発見を通じて、未だ多くの謎が残る惑星の形成・進化史を解明して太陽系の起源に迫る。さらに、熱赤外線を含む超広波長域高分散分光観測による系外惑星大気探査を通じて、惑星大気の起源・進化・多様性がかつてない規模で明らかにする。これらの目的のための広波長域超高精度ドップラー法技術を確立する。

Principle Investigator

Name: Motohide Tamura

Affiliation: UTokyo / Astrobiology Center / UOsaka

E-mail address: motohide.tamura@astron.s.u-tokyo.ac.jp

プロジェクト代表者

氏名：田村 元秀

所属： 東京大学・アストロバイオロジーセンター・大阪大学

E-mail アドレス： motohide.tamura@astron.s.u-tokyo.ac.jp

Co-investigator and his/her role

Takayuki Kotani (Astrobiology Center): Leader of technical development

Teruyuki Hirano (Astrobiology Center): Leader of science investigation

Olivier Guyon (Astrobiology Center/Arizona): Leader of SCEXAO

Bun'ei Sato (Tokyo Tech): Optical RV and planet detection expert

プロジェクト共同提案者とその役割

小谷 隆行（アストロバイオロジーセンター）：技術検討責任者

平野 照幸（アストロバイオロジーセンター）：科学検討責任者

ギュヨン オリビエ（アストロバイオロジーセンター）：超補償光学系責任者

佐藤文衛（東京工業大学）：光学 RV 惑星検出専門家

ほか 6 名程度を予定

Estimate of total cost

950 M Yen

総コストの見積り

9.5 億円

Estimate of total FTE (Full-Time Equivalent) necessary to accomplish the project

50 FTE

プロジェクト実現に必要な総 FTE (人年) の見積り

50 FTE

Duration of the project

FY2024 – FY 2030 (Development phase), survey 10 years

プロジェクト実施期間

2024 年度～ 2030 年度 (開発期)、サーベイは開発後 10 年間

1.

プロジェクトの意義

Science goals of the project

系外惑星の探査は、1995 年の太陽型恒星まわりの「木星型巨大」惑星の発見（2019 年ノーベル物理学賞、スイスのマイヨールとケロー）を契機に飛躍的に進展し、既に 6000 個を超える系外惑星が様々な観測手法で発見・確認されている。しかし、将来の生命探査の対象となり得る「太陽系近傍」かつ惑星表面上で液体の水が存在しうる「ハビタブルゾーン」にあるような「太陽型星まわり」の「地球型惑星」の検出は、どの惑星検出手法でも技術的制約のために未だ実現できていない。その中でも最も有望なものはドップラー法である。本研究は、直接観測のための超補償光学技術や最新光工学技術を用いて、太陽以外の太陽型恒星を周回する系外惑星も検出可能とするような、これまでより 1 桁以上の高精度で恒星速度を決定できる観測装置（超高性能ドップラー法分光器：Ultra-Doppler）の実現を目指している。これにより、太陽型星まわりの惑星系の形成と進化に迫り、真の第二の地球から原始惑星までを観測対象とすることが可能となる。さらに、比較対象としての多数の赤色矮星まわりの地球型惑星検出と惑星系の形成と進化を可能にする赤外線分光器を既存装置のアップグレード等で可能にする。これにより、TMT や将来の NASA の旗艦ミッションとされる Habitable Worlds Observatory（直接観測用 6m 分割鏡宇宙望遠鏡）のような 2040 年代以降の近傍のさまざまな恒星まわりのハビタブル惑星の直接分光のターゲットを打ち上げ前に提供する。

2.

プロジェクトの科学目的

Science goals of the project

本プロジェクトでは、大口径望遠鏡の超補償光学系が可視光波長においても高度な結像性能が得られるようになった絶好機を活かしつつ、最新の光工学技術を応用し、(a) できるだけ太陽系近傍で、太陽型星まわりにある、地球型惑星の検出が可能でドップラー分光器をすばる 8m 望遠鏡のために開発する。これによって、「太陽系と同じ環境にある第二の地球探し」が太陽系近傍で初めて実現される。さらに、(b) 既存の高精度赤外ドップラー装置 IRD をアップグレードし、M 型星まわりの地球型惑星探査を継続し、「太陽系とは

異環境にある第二の地球探し」を継続する。この赤外線探査により、円盤に埋もれた原始惑星の探査も可能となる。また、(c) 大気研究に最適な熱赤外線波長の高分散分光器により惑星大気の観測を推進する。その結果、次世代 30m 級超巨大地上望遠鏡および 6m 級超高コントラスト宇宙望遠鏡に最適なスペクトル観測の対象を提供することも可能となる。また、長周期地球型トランジット惑星の「質量」測定を行うことができる。同様の多波長高精度分光器計画は世界でもなく、すばる望遠鏡だけのユニークなものとなる。

3.

プロジェクトの科学的
意義と目標の根拠

Rationale for the
scientific goals and
objectives

1. 科学的意義の根拠：研究の背景、当該分野の研究状況、等 / Scientific background, status of the relevant scientific area, etc.

数ある系外惑星検出法の中でもドップラー法は最も歴史が古いもののひとつだが、ハビタビリティの研究も視野に入れた地球のような小さな惑星検出には困難があり、現在はトランジット法が最も成功している。しかし、主星が太陽型星である近傍の地球型惑星（すなわち太陽系の地球に似た環境の地球型惑星）の検出はトランジット法や他の方法は不向きであり（理由は下記参照）、将来のスペース直接観測（例：HWO 宇宙望遠鏡）まではドップラー法が唯一の方法である。

地球の公転運動により太陽は周期的にごく微小な（8cm/s）速度ふらつきを示す。この太陽の運動を捉え、地球の存在を示すには数 cm/s という超高精度の恒星速度決定が必要となる。地球に似たハビタブルゾーンにある系外惑星の存在自体は、これまでの惑星探査（主に宇宙からの精密トランジット法を用いた Kepler 衛星の結果）に基づく統計から比較的多数（約 10% 以上）の頻度で存在することが分かっているが、Kepler 衛星で発見された地球型惑星は全て太陽系から遠すぎて、スペクトル分析には向かない。将来の惑星上の生命兆候のリモートセンシングのためには、できるだけ太陽系近傍の地球型惑星の検出が不可欠である。しかし、観測技術的制限により、現在は太陽系近傍については、太陽のような G 型星ではなく、相対的に数が多い、質量が半分以下の M 型星（赤色矮星）まわりの惑星探査に留まっている。

その制限とは、トランジット法：太陽型恒星のトランジット確率が著しく低く（地球-太陽の場合のトランジット確率は約 1/215）、かつ、太陽型恒星の存在確率も低い、マイクロレンズ法：近傍のレンズ恒星の頻度が小さい）、トランジット法：太陽型星では主星と惑星のサイズ比が大きい）、直接法：コントラスト精度不足（主星と惑星の明るさ比が大きすぎる）である。そのため現在の観測は、主星である恒星が比較的明るく、太陽（G 型星）よりも小さい恒星、つまり太陽系近傍に多く存在する M 型星（赤色矮星）が主な対象となっている。いわば、赤色矮星という「太陽系とは異環境にある第二の地球探し」に限られるのが現状である。実際、近傍の系外惑星を多数発見しつつある NASA の TESS 衛星や、すばる望遠鏡用赤外線分光器 IRD の主たる観測対象は共に太陽系近傍の赤色矮星である。それでも、分光観測可能な近傍の対象は数が限られているのが現状である。

2. 提案するプロジェクトコンセプトは当該分野になにをもたらそうとするのか / Goals and objectives: new scientific steps the proposed concept aims to achieve in the science area

系外惑星分野の進展は著しいが、最近および今後の観測の展望は、

- (1) 惑星探査は巨大な木星型惑星から小さな地球型惑星の探査へ展開すべきこと、
- (2) 比較的大きな惑星のスペクトル分析、
- (3) 地球型惑星のスペクトル分析と生命兆候探査、に大別できる。

表1にまとめたように、今後最も重要な展開は「太陽系近傍の太陽型星まわりの地球型惑星」の探査を行うための装置の整備であり、それが2030年代以降の地球型惑星のスペクトル分析と生命兆候探査の実現のためには不可欠であることが分かる。

代表者や共同提案者らは現在までに、すばる望遠鏡用赤外線分光器の開発やTESS望遠鏡のフォローアップに寄与し、「太陽系近傍の赤色矮星まわりの地球型惑星」の開拓を進めている。また、系外惑星の直接観測のための補償光学系の開発にも携わって来た。これらの経験に基づき、今後は「太陽型恒星」に注視した地球型惑星の開拓を進めると共に、比較対照な異環境としてM型星まわりの地球型惑星や惑星大気分光も推進する。そのために最適な装置群を開発し、可視光・近赤外線・熱赤外線をカバーする超高精度高分散分光器 Ultra-Doppler を製作する。

表1: 系外惑星研究の潮流

主星の違い	太陽型星まわりの地球	赤色矮星まわりの地球
科学的意義	太陽系類似環境の第二の地球	異環境の第二の地球
過去・現在の惑星探査	Kepler 衛星：遠方の地球の探査	TESS 衛星、赤外線分光器：近傍惑星
2025-2035	<u>Ultra-Doppler: 近傍の地球の探査</u>	TESS 衛星、赤外線分光器：近傍惑星
2031-2040	30m 級地上望遠鏡：同上の分光	30m 級地上望遠鏡：同上の分光
2040 年代	宇宙 6m 望遠鏡：同上の分光	地上・宇宙：同上の分光

3. 提案するプロジェクトコンセプトの強みと過去、現在、未来の他のプロジェクト、研究・探査との関係 / The competing power of the proposed project concept and its relationship to past, current, and future other investigations and projects.

本プロジェクトの最大の強みは、我々の系外惑星の直接法とドップラー法の両方のこれまでの経験と技術を生かせることにある。大口径のすばる望遠鏡の超補償光学系により可視光波長においても高度な結像性能が得られるようになり、最新の光工学技術を応用して高効率かつ超高精度のドップラー法を追求することができる。具体的には、(a) できるだけ太陽系近傍で、太陽型星まわりにある、地球型惑星の検出が可能な回折限界ドップラー分光器をすばる 8m 望遠鏡のために開発する。これによって、「太陽系と同じ環境にある第二の地球探し」が太陽系近傍で初めて実現される。さらに、(b) 既存の高精度赤外ドップラー装置 IRD をアップグレードし、M 型星まわりの地球型惑星探査を継続し、「太陽系とは異環境にある第二の地球探し」を継続する。並行して、Keck 望遠鏡用 HiSPEC 赤外分光器開発にも貢献する。また、(c) 大気研究に最適な熱赤外線波長の高分散分光器により惑星大気の観測を推進する。その結果、次世代 30m 級超巨大地上望遠鏡だけでなく 6m 級超高コントラスト宇宙望遠鏡 (HWO) に最適なスペクトル観測の対象を提供することも可能となる。同様の多波長高精度分光器計画は 8m 級望遠鏡には過去・現在・

未来および世界にもなく、すばる望遠鏡だけのユニークなものとなる。スペインのカラル・アルト天文台 CAHA 3.5m 望遠鏡に設置された CARMENES は可視光・赤外線同時分光器ではあるが、赤外チャンネルの精度は追求しておらず、事実上は可視光ドップラー装置である。可視光ドップラー装置に絞っても、**既存あるいは計画中の装置の精度は約 30cm/s** であり、本装置よりも一桁以上精度が低い。また、**広波長視線速度法**はその波長依存性を理解した上で恒星活動による RV への影響を取り除く上でも極めて重要である。

4.

プロジェクトが実施する 研究

Scientific investigations of the project

2の科学目的で述べた「太陽系近傍の地球型惑星を多数探査」できる最も有望な方法は、ドップラー法による速度決定精度を数 cm/s まで向上させ、太陽型星の地球型惑星まで検出可能にすることである。

1995年の系外惑星の発見が 13m/s 精度のドップラー法でもたらされたように、この系外惑星検出手法は古くから活用されて来た。分光器の安定化や光周波数コムなどの波長較正法の進展により現在は約 1m/s 以下の精度が実現されており、30cm/s の精度の次世代分光器も存在する。しかし、その先の「我が地球の公転による太陽の運動を検出できる速度決定精度（数 cm/s）」を実現した分光器は世界でも皆無である。そのためには、従来のドップラー分光器の各コンポーネントを見直し、速度決定精度を各段に向上させる必要がある。

本プロジェクトでは、以下の3点の最先端工学技術を組み合わせることによって、前人未到の精度を得るドップラー装置 Ultra-Doppler を実現する。Ultra-Doppler は表2のように3チャンネルからなる。とりわけ可視光チャンネル（=狭義の Ultra-Doppler）は、(i) すばる 8m 望遠鏡をあたかも宇宙空間に打ち上げて地球の大気揺らぎを除いた光学性能を実現する超補償光学系、(ii) シングルモードファイバーおよびファイバー導入のための新技術（ここでは詳細は述べない）によるノイズレスかつ高効率の天体光導入、(iii) 望遠鏡回折限界のコンパクトかつ超安定分光器の製作、(iv) 高精度波長較正に挑戦し、それらを数 cm/s 超精密速度決定精度を持つ一体的な装置として開発する。

もちろん実際の恒星の観測では、分光器自体の安定性だけでなく、恒星活動性に由来する視線速度ノイズも問題となる。我々の太陽の場合、光球面で積分すると本研究で目指す精度より一桁大きいレベルの視線速度変化が観測されるため、恒星活動に起因する運動と惑星公転運動の速度変化を切り分けることが必要となる。そのためにも、まずはハードウェアとしてこれらの違いを測定可能な十分な精度を持つものを開発する必要がある。本研究はそれに挑戦する。

表2: 提案する観測装置 Ultra-Doppler の3つのチャンネル

	可視光チャンネル	赤外「青」チャンネル	赤外「赤」チャンネル
通称	Ultra-Doppler	IRD2 or HiSPEC	TSHIRT
波長	380-900 nm	900-1750nm	1950-4000 nm
超補償光学系	不可欠	不可欠	利用可能
分解能	100,000	70,000	70,000
精度	数 cm/s (extra: 1cm/s)	20-30cm/s	惑星大気分光用

5.

スケジュール Schedule

1. 大まかなスケジュール / Rough schedule

2024-2025：概念設計と光工学 R&D

2025-2027：詳細設計・部分試作と赤外「青」チャンネルアップグレード

2027-2031：可視光チャンネルおよび赤外「赤」チャンネル製作と HiSPEC への貢献

2031-2040：長期サーベイ観測

(ただし、予算等によって、重点チャンネル先行やスケジュール変更の可能性あり)

2. 開発スケジュールの科学成果への影響 / Schedule impact on science

地球近傍にある「太陽系と同じ環境にある第二の地球探し」とその特徴づけは、HWO の科学目標であるため、2040 年以降までは実現しない。つまり、HWO は探査と特徴づけの両方を同時に行う。本プロジェクトの主目的（特に可視光）は探査であり、HWO 打ち上げ前に、最も有望なハビタブル地球型惑星の観測対象を提供できる。10 年と言う十分な観測時間も考慮した計画となっている。「すばる 3」を仮定した計画であるが、主力となる広視野撮像とは相補的に実行可能なモニター観測装置であり、すばる 3 時代のもう一つの主力装置と成り得る。赤外チャンネルは 2030 年代の TMT に重要な赤色矮星まわりのターゲットを提供できる。

6.

プロジェクトで使用する 装置 Instrumentation of the project

1. 実施する実験・観測・分析などを実現する技術 / Description of the technology to realize the investigations

すばる望遠鏡および超補償光学系 SCExAO と共に用いる回折限界ドップラー分光器 (Ultra-Doppler)。

2. 実施する実験・観測・分析などを実現する方法・技術について、他の技術、および類似技術との比較 / Comparisons of the selected technology with other technologies

超補償光学系は他の 8m 級望遠鏡でも実現されているが、観測装置と一体化されており、近赤外線に最適化されている。SCExAO は近赤外線だけでなく可視光装置と組み合わせ使用可能なフレキシブルなテストベッドとして開発されているため、回折限界可視光ドップラー装置は他には存在しない。回折限界およびファイバー利用のため分光器は約 1m 立方と極めてコンパクトであり、設置場所もフレキシブルである。

3. 提案装置の主要な機能 / Major functions of the proposed instrument

- ・可視光：超安定高分散分光器
- ・赤外：安定高分散分光器
- ・熱赤外：高分散分光器

詳しくは表 2 参照。

7.

プロジェクトで獲得する
データ

Data to be obtained

(獲得データ)

- 約 10 年間にわたる近傍太陽型星の高精度 (数 cm/s) 視線速度変化
- 約 10 年間にわたる近傍赤色矮星の高精度 (数 10cm/s) 視線速度変化
- 惑星大気分光データ

(解析データ)

- 恒星活動による視線速度変化を除いた解析による地球型惑星検出
- ロシター効果解析
- クロスコリレーション解析

(科学目的)

- 太陽型星まわりの地球型惑星の検出とその軌道パラメータの導出
- 赤色矮星まわりの地球型惑星の検出とその軌道パラメータの導出
- 若い惑星の検出とその軌道パラメータの導出
- 惑星のキャラクタリゼーション (軌道および大気) の研究

8.

主要技術要素

Key technologies

1. 主要技術要素と開発が必要な技術要素 / Key technologies and those requiring further investment and development

(主要技術)

- 補償光学技術
- ファイバー技術 (シングルモードファイバー利用)
- 回折限界分光器製作 (新設と改造)
- ファイバー導入光学系 (プロトタイプ有り)
- 超精密波長較正

2. 技術的不確定性の大きな技術要素 / Assessment of uncertainties in technologies

8.1 の組み合わせにより達成される安定性は総合技術であり予言が難しいが、各構成部分のエラーバジェットを計算し、到達できる安定性を見積もる。また、波長の一部のみをカバーする試作品のオンスカイテストも行う。

3. 既存技術の活用条件 / Assessment of heritages

- 補償光学技術は、ほぼ完成しており、後段 2000 素子 MEMS 可変形鏡、前段 3000 素子可変形鏡の組み合わせで、ストレール比は近赤外線の 1600nm で 96%、可視光の 550nm でも 70% と回折限界を達成できる。これにより、可視光波長においても回折限界分光器が実現できるため、1m 立方の極めてコンパクトな装置となる。

- ファイバー技術もほぼ市販品で良い。シングルモードファイバーの利用により、モーダルノイズが無くなるため、従来のようなスクランブラーを用いることによる効率低下は無くなる。
- 回折限界分光器は、可視光および赤外「赤」チャンネルは新規開発、赤外「青」はIRDを改造する可能性を検討する。後者はHiSPECへの貢献も含む。上記のように回折限界分光器はコンパクトであるため、装置安定性は極めて良い。
- ファイバー導入光学系（プロトタイプ有り）：シングルモードファイバーへの光導入を効率よく行うためのフォトニックランタンを活用する。
- 可視光用精密波長校正装置は市販品購入、あるいは、AISTとの共同研究を想定している。赤外「赤」チャンネルはIRD用のものを用いる。

9.

想定されるコスト
Cost estimate

可視光チャンネル	赤外「青」チャンネル	赤外「赤」チャンネル
4 億円	1.5 億円	4 億円

見積もり根拠は、これまでの装置製作経験と、構成部品中でも高価なもの（赤外線検出器と波長校正装置）からの推定値で、誤差は大きくない。まずは、科研費基盤研究等での試作から開始している。

10.

技術ヘリテージと技術開発状況と開発計画
Technical heritages, technology development status and plan

1. 技術ヘリテージと技術開発状況 / Technology heritage, development history and status

地上装置であり本項は該当しない。

2. 技術開発計画 / Technology development plans

実験室内でのファイバー導入実験を並行して進め、効率劣化の有無やモーダルノイズの減少を確認する。素子単体だけでなく、試作用分光器と接続した試験も行う。

11.

プロジェクトのリスク管理
Risk Management Plan of the Project

国内プロジェクトのため本項は該当しない。国内の大学等のチームとも協力して進める。戦略的観測はオールジャパン体制で行う。

12.

天文学コミュニティの
持続可能性に関わる戦略

**Strategy for the
Sustainability
of Astronomical
community**

系外惑星およびアストロバイオロジー分野の若手を惹き付けるプロジェクトであり、かつ、可視光および赤外線装置開発経験を継承する上でも重要と考える。

The University of Tokyo Atacama Observatory
(TAO) Project

東京大学アタカマ天文台 (TAO) 計画

0.

概要

Summary

The University of Tokyo Atacama Observatory (TAO) Project

東京大学アタカマ天文台 (TAO) 計画

Project Category

2. Other projects (大型計画以外の、装置・施設の開発を含む計画の提案)

Abstract of science goals, objectives, and methods

The University of Tokyo Atacama Observatory (TAO) project is to construct a 6.5 m infrared telescope at an altitude of 5640 m in northern Chile, promoted by Institute of Astronomy, the University of Tokyo. Its major purpose is to carry out various sciences from cosmology, galaxy formation and evolution, to star formation and planet formation, as well as to educate next-generation astronomers as a university-owned telescope.

プロジェクトの意義と科学目的・方法の要旨

東京大学アタカマ天文台 (TAO) はチリ北部の標高 5640 m に 6.5 m 赤外線望遠鏡を建設する東京大学天文学教育研究センターが主導する計画である。宇宙論、銀河形成と進化から星形成、惑星形成に至る様々な科学観測を実施するとともに、大学保有望遠鏡として次世代天文研究者を育成することを主目的とする。

Principle Investigator

Name: Yuzuru Yoshii (Principal Investigator of TAO)

Affiliation: Institute of Astronomy, The University of Tokyo

E-mail address: yoshii@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

Name: Takashi Miyata (person responsible for this proposal, project manager of TAO)

Affiliation: Institute of Astronomy, The University of Tokyo

E-mail address: tmiyata@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

プロジェクト代表者

氏名: 吉井 讓 (計画代表)

所属: 東京大学天文学教育研究センター

E-mail アドレス: yoshii@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

氏名：宮田 隆志（本提案書の責任者，東京大学アタカマ観測所長）

所属：東京大学天文学教育研究センター

E-mail アドレス：tmiyata@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

Co-investigator and his/her role

Kotaro Kohno (the University of Tokyo)

Takeo Minezaki (the University of Tokyo)

Shigeyuki Sako (the University of Tokyo)

and other 35 individuals (see attached document)

プロジェクト共同提案者とその役割

河野 孝太郎（東京大学）

本原 顕太郎（東京大学・国立天文台）

峰崎 岳夫（東京大学）

酒向 重行（東京大学）

他 33 名　　総計 40 名（別紙参照）

Estimate of total cost

4.1 million USD/year (operating expenses)

総コストの見積り

6.1 億円 / 年（運用費）

Estimate of total FTE (Full-Time Equivalent) necessary to accomplish the project

$40\text{persons} \times 40\text{ years} = 1600\text{ FTE}$

プロジェクト実現に必要な総 FTE（人年）の見積り

$40\text{人} \times 40\text{年} = 1600\text{ FTE}$

Duration of the project

From fiscal year 2026 to 2066 (possibly extended)

プロジェクト実施期間

2026 年度から 2066 年度まで（延長あり）

1.

プロジェクトの意義

Science goals of the project

TAO 計画の科学目標 (goals) は、宇宙の起源と進化および生命とそれを育む地球型惑星の起源と進化について観測的に解明することである。

2.

プロジェクトの科学目的

Science goals of the project

TAO 計画の科学目的 (objectives) は、世界最高標高のサイトに大型赤外線望遠鏡を建設し、赤外線を主とした広域サーベイ、長期モニタリング、迅速な追観測を実施することで、上記の科学目標 (goals) を達成することである。

3.

プロジェクトの科学的意義と目標の根拠

Rationale for the scientific goals and objectives

1. 科学的意義の根拠：研究の背景、当該分野の研究状況、等 / Scientific background, status of the relevant scientific area, etc.

宇宙の起源と進化および生命とそれを育む地球型惑星の起源と進化の解明は現代天文学の共通の目標 (goals) であり、その達成のために理論、観測、計算機シミュレーション、室内実験、サンプルリターンなど多種のアプローチがとられてきた。TAO 計画では遠方宇宙、銀河、恒星、系外惑星、太陽系天体、星間物質に関する豊富な情報をもたらす赤外線観測により目標 (goals) の達成に挑む。赤外線観測は大集光力を得られる地上大型望遠鏡と、地球大気の影響を避けられる宇宙望遠鏡がそれぞれの利点を活かしながら当該分野を牽引してきた。上記の目標 (goals) を達成するには、豊富な観測時間を投入した赤外線による広域サーベイ、長期モニタリング、迅速な追観測が効果的である。これらを実現するには地上大型望遠鏡が適しているが、地球大気による赤外線観測への影響の低減が課題となる。TAO 計画ではチリ共和国アタカマ高地の標高 5640 m 地点に口径 6.5 m の大型赤外線望遠鏡を建設することでこの問題を克服する。

2. 提案するプロジェクトコンセプトは当該分野になにをもたらそうとするのか / Goals and objectives: new scientific steps the proposed concept aims to achieve in the science area

TAO 6.5 m 望遠鏡を用いることで銀河や超巨大ブラックホール、超新星、恒星、系外惑星や小惑星など多岐にわたる科学成果が見込まれる。TAO サイトでは地球大気の透過率が高く、近赤外線の 0.9 – 2.5 μ m 帯では波長が分断されることなく連続したスペクトルを取得できる。これにより例えば銀河進化や宇宙論観測を目的とした赤方偏移した銀河の輝線広域サーベイにて大きな成果が期待できる。中間赤外線帯では 7 – 24 μ m 帯で高い大気透過率を達成することに加え、30 μ m 帯で初となる本格的な地上観測が可能になる。これにより例えばダストに深く埋もれた惑星を形成中の天体や質量放出をする天体の長期モニタリングや突発現象の検出が可能になる。望遠鏡をフレキシブルに運用することで、突発天体や重力波や宇宙ニュートリノ等のマルチメッセンジャーイベントに対す

る迅速かつ高感度の赤外線による追観測を可能にする。

3. 提案するプロジェクトコンセプトの強みと過去、現在、未来の他のプロジェクト、研究・探査との関係 / The competing power of the proposed project concept and its relationship to past, current, and future other investigations and projects.

TAO 6.5 m 望遠鏡は世界最高標高の大型望遠鏡であるため、近赤外線および中間赤外線帯において地上望遠鏡としては最高水準の感度と空間分解能を達成する。JWST をはじめとする宇宙赤外線望遠鏡に感度で劣るものの、豊富な観測時間の割り当てとフレキシブルな運用の実施することで、宇宙望遠鏡では難しい広域サーベイ、長期モニタリング、迅速な追観測を実現する。同様なコンセプトの赤外線望遠鏡計画は他に例が無い。TAO 6.5 m 望遠鏡は日本が南半球に保有する初の大型望遠鏡であり日本の天文コミュニティへ多くの科学的恩恵をもたらす。2025 年に観測を開始する 8.4 m LSST 望遠鏡（チリに設置）と同じ天域を観測できる点も LSST 計画が進める深宇宙サーベイ、突発現象サーベイとの連携において日本の強みとなる。

4.

プロジェクトが実施する 研究 Scientific investigations of the project

TAO 計画では 6.5 m 望遠鏡と第 1 期観測装置を用いた以下の科学観測を予定している。第 1 期観測装置として近赤外線多天体分光装置 SWIMS、近赤外線分光装置 NICE、中間赤外線分光撮像装置 MIMIZUKU の準備が完了している。SWIMS を用いることで、銀河の質量獲得メカニズム、銀河進化に及ぼす環境効果、 $z \sim 2$ 銀河の星形成史などの解明に向けた観測が計画されている。また、超巨大質量ブラックホールの進化、ダストに埋もれた活動銀河核の探査、超新星や重力波天体の近赤外線観測等を目的とした観測も計画されている。NICE を用いることで、活動銀河核の変光観測による宇宙膨張測定や、高赤方偏移天体の Fe II /Mg II 輝線強度比の測定による第一世代星形成時期の推定等が計画されている。MIMIZUKU を用いることで原始惑星系円盤の変光のモニタリング、原始惑星系円盤の 30 μ m 帯撮像、大質量星の進化とダスト形成、星間ダストの供給の場の探査、地球接近小惑星の熱慣性の観測等が計画されている。他にも第 2 期観測装置として超新星等の突発現象の即時追観測や、マグネターや高速電波バーストの可視光カウンターパートの高速観測等を目的とした可視光撮像分光装置や、系外惑星視線速度観測用の近赤外線分光器の開発も進める計画である。

5.

スケジュール Schedule

1. 大まかなスケジュール / Rough schedule

2026 年 望遠鏡完成・観測開始

2027 年 国内枠による共同利用観測を開始

約 40 年の科学運用を想定

2. 開発スケジュールの科学成果への影響 / Schedule impact on science

望遠鏡完成は当初予定より遅れ2026年の予定。ただしTAOの観測能力は非常にユニークであり、この遅れがサイエンス成果やプロジェクト期間に与える影響はほぼない。

6.

プロジェクトで使用する装置

Instrumentation of the project

1. 実施する実験・観測・分析などを実現する技術 / Description of the technology to realize the investigations

標高 5640m の高地にて大型赤外線望遠鏡および観測装置を実現する技術。

2. 実施する実験・観測・分析などを実現する方法・技術について、他の技術、および類似技術との比較 / Comparisons of the selected technology with other technologies

ハワイ島マウナケア山（標高 4200 m）にて大型赤外線望遠鏡および観測装置を実現する技術および実績が存在する。TAO 計画ではそれらの技術と実績を参考に標高 5600 m にて科学運用が可能な望遠鏡および観測装置の実現を目指す。

3. 提案装置の主要な機能 / Major functions of the proposed instrument

以下に 6.5 m 望遠鏡と第 1 期観測装置の概要を示す。

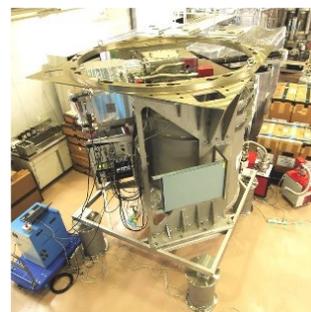
6.5 m 望遠鏡

サイト	チリ共和国アタカマ高地 チャナントール山頂（標高 5640 m）
主鏡口径	6500 mm（主鏡外径）
光学系 / 架台	Ritchey-Chretien / 経緯台
最終 F 値	12.2
視野	25 arcmin
焦点面	カセグレン, ナスミス × 2, ペントカセグレン × 2



近赤外線多天体分光装置 SWIMS

観測モード	撮像, 多天体分光
視野	ϕ 9.6 arcmin (撮像) 9.6 × 6.0 arcmin (分光)
観測波長	0.9 – 2.5 μ m
検出器	HAWAII-2RG × 8 台
フィルター	Y, J, H, K, 各種狭帯域
波長分解能	$\lambda / \Delta \lambda \sim 500 - 1000$
備考	近赤外全波長域を分光



近赤外線分光装置 NICE

観測モード	撮像, エンセル分光
視野	50 × 50 arcsec (撮像)
観測波長	0.9 – 2.5 μ m
検出器	HgCdT 256 × 256 NICMOS-3
波長分解能	$\lambda / \Delta \lambda \sim 2600$
備考	近赤外全波長域を分光



中間赤外線分光撮像装置 MIMIZUKU

観測モード	撮像, 長スリット分光
視野	2.0 × 2.0 arcsec (撮像)
観測波長	2 – 38 μ m
検出器	Si:As 1k × 1k AQUARIUS Si:Sb 128 × 128 HAWAII-1RG
フィルター	K, L, M, N, Q, 各種帯域
波長分解能	$\lambda / \Delta \lambda \sim 100 - 250$
備考	Field Stacker による高精度相対測光



ほか、可視光装置や近赤外線高分散分光器などを開発中

7.

プロジェクトで獲得する データ

Data to be obtained

TAO では科学観測時間のうち約 45% をプロジェクト時間として大規模観測やレガシー的な観測に割り当てる。約 35% は国内枠時間として国内研究者に割り当てを行う。5-15% は有償共同研究時間として有償で国内外研究者に提供する。

観測で得られたデータは原則一定期間後に広く世界に公開する。TAO が掲げる科学観測は 5-10 年程度の初期運用期間にて達成する計画である。その後は日本が南半球に保有する最大口径の光赤外線望遠鏡として各時代の最先端科学テーマの研究に推進に寄与するデータを獲得してゆく。

8.

主要技術要素 Key technologies

1. 主要技術要素と開発が必要な技術要素 / Key technologies and those requiring further investment and development

6.5 m 望遠鏡および第 1 期観測装置については既に製作と実験室における技術試験が完了している。今後、オンサイト (標高 5600 m) での実証試験が計画されている。第 2 期以降の観測装置については、各時代の科学的要請に応える技術要素を組み込んだデザインを考案しその実現に取り組んでいく。

2. 技術的不確定性の大きな技術要素 / Assessment of uncertainties in technologies

6.5 m 望遠鏡および第1期観測装置については既に製作と実験室における技術試験が完了している。今後、オンサイト（標高 5600 m）での実証試験が計画されている。標高 5600 m での望遠鏡および観測装置の安定動作の実績例は過去に無いため技術的不確定性を含むが、実験室での性能評価を十分に実施し、ハワイ島マウナケア山(標高 4200 m)の望遠鏡群の運用経験を十分に調査して設計に取り入れたため、大きな問題とはならないと考えている。

3. 既存技術の活用条件 / Assessment of heritages

東京大学天文学教育研究センターでは TAO 6.5 m 望遠鏡計画に先立ち、2009 年に同サイトに 1.0 m mini TAO 望遠鏡を建設し、技術実証と環境状況の調査を実施した。また、同センターでは 2000 年にハワイ州ハレアカラ山（標高 3050 m）に 2.0 m MAGNUM 望遠鏡を建設し、高地における長期間の遠隔・無人観測に成功している。TAO 計画には国立天文台すばる望遠鏡の立ち上げに貢献したメンバーが多く参加しており、大型望遠鏡の立ち上げと運用に豊富な知識と経験を持つ。これらの望遠鏡建設および観測装置の開発で得た技術と経験を 6.5 m 望遠鏡の建設と観測装置の開発に生かしている。

9.

想定されるコスト Cost estimate

人件費:	262,000 千円 / 年
旅費	47,000 千円 / 年
運用費（電気、通信、車含む）:	173,000 千円 / 年
望遠鏡インフラメンテナンス	72,000 千円 / 年
渉外関係	58.000 千円 / 年

10.

技術ヘリテージと技術 開発状況と開発計画

Technical heritages, technology development status and plan

1. 技術ヘリテージと技術開発状況 / Technology heritage, development history and status

6.5 m 望遠鏡および第1期観測装置については既に製作と実験室における技術試験が完了している。今後、オンサイト（標高 5600 m）での実証試験が計画されている。第2期以降の観測装置については、各時代の科学的要請に応える技術要素を組み込んだデザインを考案しその実現に取り組んでいく。既に第2期観測装置として、可視光撮像分光装置や系外惑星視線速度観測用近赤外線分光器の開発が開始されている。また、これまでに TAO 用観測装置の開発を進める中で、赤外線波長選択用メッシュフィルターや冷却振動鏡など、次世代赤外線望遠鏡で利用可能な新技術の開発にも成功している。

2. 技術開発計画 / Technology development plans

現地での開発

2026年 望遠鏡組み上げ

光学調整

観測装置 (NICE, MIMIZUKU) の立ち上げと科学観測の開始

光ファイバおよび電力の外部接続の実現

2027年 国内枠を通じた科学運用の開始

実験室での開発

2022年 可視光装置の開発を開始 (三鷹)

2023年 近赤外線分光器 TARdYS の開発を開始 (チリ カトリカ大)

11.

プロジェクトのリスク管理

Risk Management Plan of the Project

本計画は既に望遠鏡および観測装置の観測サイトへの設置の最終段階にあるため技術的な懸念事項は無い。国外で展開するプロジェクトなので国際情勢や金利変動などの影響は受けるが、チリ国内の大学、チリ政府、アタカマ地域の政府などと緊密な連携のもと進めているため、外的要因による本計画の遂行への懸念事項も低い。

12.

天文学コミュニティの 持続可能性に関わる戦略

Strategy for the Sustainability of Astronomical community

TAO計画は次世代天文研究者の育成を主目的の1つに掲げており、望遠鏡を用いた萌芽のおよび教育的研究を推進する予定である。また、TAO望遠鏡は大学研究室で取り組むことができる規模の技術開発の実証の場としても活用することができる。TAO計画のプラットフォームで育った人材が、その後により大型のプロジェクトで活躍し日本の天文学コミュニティが活性化していくことを望んでいる。

別紙

Co-investigator and his/her role

Yuzuru Yoshii (the University of Tokyo) Project P.I.

Takashi Miyata (the University of Tokyo) Director of Atacama Observatory

Kotaro Kohno (the University of Tokyo) Director of Institute of Astronomy

Kentaro Motohara (the University of Tokyo/National Astronomical Observatory of Japan)

Takeo Minezaki (the University of Tokyo)

Shigeyuki Sako (the University of Tokyo)

Fumi Egusa (the University of Tokyo)

Itsuki Sakon (the University of Tokyo)

Masahiro Konishi (the University of Tokyo)
Takafumi Kamizuka (the University of Tokyo)
Kazuya Matsubayashi (the University of Tokyo)
Hiroaki Sameshima (the University of Tokyo)
Kana Morokuma (the University of Tokyo)
Hidenori Takahashi (the University of Tokyo)
Mitsuyoshi Yamagishi (the University of Tokyo)
Masataka Imai (the University of Tokyo)
Takashi Horiuchi (the University of Tokyo)
Yuki Hirao (the University of Tokyo)
Shuhei Koyama (the University of Tokyo)
Natsuko Kato (the University of Tokyo)
Mizuki Numata (the University of Tokyo)
Aiko Masuhara (the University of Tokyo)
Noriko Kasahara (the University of Tokyo)
Takahiro Uehara (the University of Tokyo)
3 local employees in Chile
12 graduated students

プロジェクト共同提案者とその役割

吉井 謙 (東京大学) プロジェクト P.I.
宮田 隆志 (東京大学) アタカマ観測所長
河野 孝太郎 (東京大学) 東大天文センター長
本原 顕太郎 (東京大学・国立天文台)
峰崎 岳夫 (東京大学)
酒向 重行 (東京大学)
江草 芙実 (東京大学)
左近 樹 (東京大学)
小西 真広 (東京大学)
上塚 貴史 (東京大学)
松林 和也 (東京大学)
鮫島 寛明 (東京大学)
諸隈 佳奈 (東京大学)
高橋 英則 (東京大学)
山岸 光義 (東京大学)
今井 正堯 (東京大学)
堀内 貴史 (東京大学)
平尾 優樹 (東京大学)
小山 舜平 (東京大学)
櫛引 洸佑 (東京大学)

加藤 夏子 (東京大学)
沼田 瑞樹 (東京大学)
益原 愛子 (東京大学)
笠原 のりこ (東京大学)
上原 隆広 (東京大学)
チリ現地雇用者 3名
大学院生 12名



PART IV: サイエンス計画 (7 計画)

First Galaxy and Star Formation Investigated
through Participation in International Large Projects
and Japan's Unique Missions

国際大型計画への参画と日本主導の独自計画で
探る初代銀河・初代星形成

0.

概要

Summary

First Galaxy and Star Formation Investigated through Participation in International Large Projects and Japan's Unique Missions

国際大型計画への参画と日本主導の独自計画で
探る初代銀河・初代星形成

Project Category

3. Science only (新規の装置・施設の開発を含まないサイエンスの方向性の提案)

Abstract of science goals, objectives, and methods

Studying how stars and galaxies form and evolve over the 13.8 billion-year history of the universe remains a crucial goal in modern astronomy. Particularly, investigating distant objects, including the first stars and galaxies, holds immense importance in unraveling the timing and characteristics of the universe's earliest star and galaxy formations. While JWST has made significant progress in researching distant galaxies, its limited field of view restricts the discoveries to faint galaxies, making it challenging to find bright galaxies whose physical properties can be thoroughly investigated. Moreover, since JWST primarily focuses on observing galaxies, studying distant stars, especially those from the earliest epochs, poses additional challenges.

This project aims to address these challenges by participating in large international projects and Japan's independent missions to observe bright galaxies and stars from the early universe, which are difficult to observe with JWST. Through wide-area surveys conducted with the Nancy Grace Roman Space Telescope and GREX-PLUS, we aim to discover over a thousand bright galaxies with redshifts ranging from $z \sim 10-20$, which is more than 500 times larger than previous studies with HST/JWST. This will enable us to conduct research on the formation of early massive galaxies, supermassive black holes, and the synthesis of heavy elements in the early universe. Additionally, leveraging distant GRBs detected by HiZ-GUNDAM, we will not only investigate cosmic reionization but also investigate early massive star formation including first stars. Furthermore, TMT/ELT/GMT observations targeting gravitationally lensed individual stars at $z > 6$, which are expected to be discovered by JWST, will allow us to investigate the physical properties of stars at high redshifts. Through these studies, we aim to

uphold Japan's international scientific presence from the late 2020s through the 2030s, and pave the way for galaxy formation research conducted by Habitable Worlds Observatory (HWO) , which is scheduled to be launched in 2040s.

プロジェクトの意義と科学目的・方法の要旨

138 億年の宇宙の長い歴史の中で星や銀河がどのように生まれ、進化していったのかは現代の天文学の重要課題の一つである。特に初代星・初代銀河を含む遠方天体を研究することは、宇宙最初の星・銀河がいつの時代に生まれ、どのような性質だったのかを知る上で非常に重要である。遠方銀河の研究は現在 JWST により格段に進みつつあるが、一方で JWST は視野が狭いため暗い遠方銀河しか発見できず、暗い銀河より初期の宇宙で誕生したと考えられる明るい銀河を見つけることは困難である。また JWST は主に銀河を観測しているため、初代星を含む遠方の星の観測も難しい。

本プロジェクトでは、JWST では困難な宇宙初期の明るい銀河・星の観測研究を、国際大型計画への参画と日本が主導する独自の計画により実現するものである。Roman 宇宙望遠鏡・GREX-PLUS の広領域探査により $z \sim 10-20$ の明るい銀河を従来の 500 倍以上となる 1000 個以上検出し、宇宙初期の大質量銀河形成・巨大ブラックホール・重元素合成の研究を展開する。また HiZ-GUNDAM により見つかる遠方ガンマ線バースト (GRB) を用いて宇宙再電離だけでなく初代星・大質量星形成の研究を行い、さらに JWST で見つかる期待される遠方の重力レンズされた単独星を TMT/ELT/GMT 等で観測することで、遠方宇宙の個別の星の物理的性質を調査する。これにより 2020 年代後半 -2030 年代にかけて、世界における日本の遠方宇宙研究のプレゼンスを保ち、2040 年以降に打ち上げられる Habitable Worlds Observatory (HWO) による銀河形成研究へつなげる。

Principle Investigator

Name: Yuichi Harikane

Affiliation: University of Tokyo/ICRR

E-mail address: hari@icrr.u-tokyo.ac.jp

プロジェクト代表者

氏名: 播金優一

所属: 東京大学宇宙線研究所

E-mail アドレス: hari@icrr.u-tokyo.ac.jp

Co-investigator and his/her role /

Masami Ouchi (NAOJ/University of Tokyo) : Early universe observation

Yoshiaki Ono (University of Tokyo) : Early universe observation

Kimihiko Nakajima (NAOJ) : Early universe observation

プロジェクト共同提案者とその役割

大内正己 (国立天文台 / 東京大学) : 遠方宇宙観測

小野宜昭 (東京大学) : 遠方宇宙観測

中島王彦 (国立天文台) : 遠方宇宙観測

1.

プロジェクトの意義

Science goals of the project

国際大型計画への参画と日本主導の独自計画により、JWST 単独では困難な明るい銀河・星の観測研究を展開し、初代銀河・初代星形成に迫る。

2.

プロジェクトの科学目的

Science goals of the project

本プロジェクトの目的は次の2つである。

A) JWST では探査困難な明るい (紫外絶対等級 $M_{UV} < -21$ mag) 銀河を従来の500倍となる1000個以上検出し、物理的性質を調べることで、宇宙初期の大質量銀河形成、重元素合成、巨大ブラックホール形成を調べる。

B) JWST の銀河観測とは相補的なガンマ線バースト (GRB) の観測及び重力レンズされた単独の星の観測から、宇宙初期における初代星形成に迫る。

3.

プロジェクトの科学的意義と目標の根拠

Rationale for the scientific goals and objectives

1. 科学的意義の根拠：研究の背景、当該分野の研究状況、等 / **Scientific background, status of the relevant scientific area, etc.**

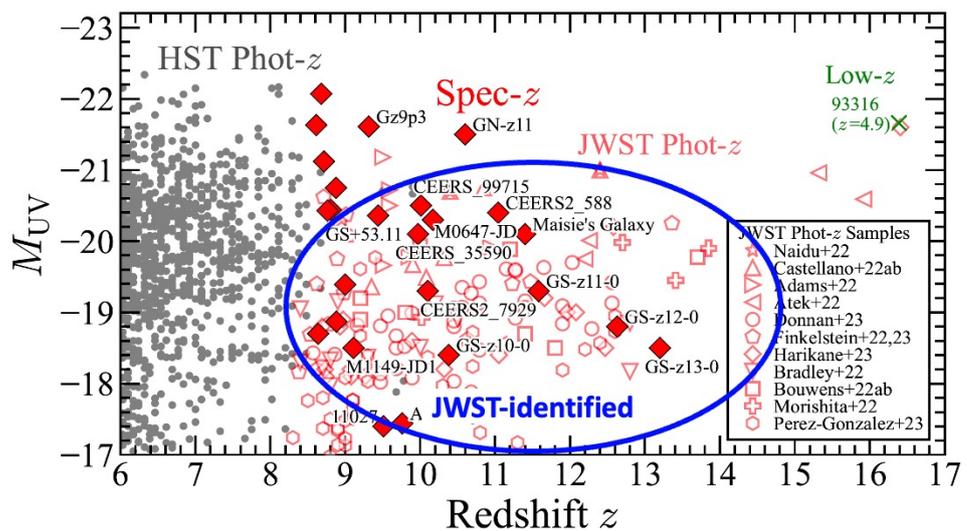
138億年の長い宇宙の歴史の中で、星や銀河といった天体がどのように形成し進化していったのかを理解することは、現代の天文学の最重要目標の一つである。特に宇宙で最初に生まれた星 (初代星) や銀河 (初代銀河) を含む遠方天体は、いつどのように天体が生まれ、それらがどのような性質だったのかを理解する上で重要な観測対象である。JWST の観測により $z=10$ を超える多くの銀河が見つかり、一部は分光同定がなされており、現在の最遠方銀河の記録は $z=14.44$ となっている。初代銀河は $z=20$ ごろに誕生したと理論的には考えられているので、JWST の観測が今後進展すれば初代銀河形成の時代が見えてくる可能性がある。

JWST の観測から、理論で予想されていた以上に多くの明るい銀河が $z>10$ の宇宙で見つかっており、理論的な解釈について活発な議論が行われている (e.g., Harikane et al. 2023, ApJS, 265, 5, Finkelstein et al. 2023, ApJL, 946, 13L)。特にハッブル望遠鏡 (HST) の観測により見つかると、JWST によって分光スペクトルが取られた $z=10.60$ の明るい ($M_{UV} = -21.5$ mag) 銀河 GN-z11 は、その特異な性質から非常に注目を浴びている。JWST/NIRSpec の分光スペクトルによって、通常の理論では考えられないほど大量の窒素ガスが見つかっただけでなく (e.g., Bunker et al. 2023, A&A,

677, 88, Isobe et al. 2023, ApJ, 959, 100)、AGN の兆候や (Maiolino et al. 2023, arXiv:2305.12492)、周辺に Pop-III 星の兆候も報告されている (Maiolino et al. 2023, arXiv:2306.00953)。GN-z11 のような $z > 10$ の宇宙初期に存在する明るい銀河は、大質量銀河形成、重元素合成、巨大ブラックホール形成の観点から重要な研究対象であるが、現在までに見つかっている $M_{UV} < -21$ mag の明るい銀河は $z > 10$ では GN-z11 と GL-z12-1 の 2 例のみである (図 1)。これは HST や JWST の視野が狭く、個数密度の小さい明るい銀河を見つけるのが困難だったからである。

JWST の主な観測対象は銀河であり、初代星形成を直接観測することはできない。HST や JWST により、重力レンズされた単独の星がいくつか $z = 1-6$ の宇宙で見ついているが (e.g., Welch et al. 2022, Nature, 603, 815)、暗いため、JWST の感度を持ってしても分光スペクトルを得て、物理的な性質を調べることはできていない。また一部の遠方銀河では、金属量 0 の Pop-III 星の兆候らしきものが報告されているが (e.g., D'Eugenio et al. 2024, A&A, 689,152)、確定的な証拠とは考えられていない。初代星形成を調べるためには、JWST による観測以外の別のアプローチが必要である。

図 1: 遠方銀河の紫外絶対等級と赤方偏移 (Harikane et al. 2024, ApJ, 960, 56 を改変)。赤色のダイヤ印が分光同定された銀河、赤色の白抜き印は JWST から見つかった銀河候補 (まだ分光同定されていない銀河)。JWST は視野が狭いため青丸で示されたように暗い天体を主に検出しており、 $M_{UV} = -21$ mag より明るい銀河は $z > 10$ では GN-z11 と GL-z12-1 しか見つからない。



2. 提案するプロジェクトコンセプトは当該分野になにももたらそうとするのか / Goals and objectives: new scientific steps the proposed concept aims to achieve in the science area

本プロジェクトでは、宇宙初期の明るい銀河の大規模サンプルを構築し研究を展開することで、JWST の暗い銀河の観測と合わせて遠方銀河形成の統一的な理解を可能にする。また GRB や単独の星の観測を通して初代星形成に迫る。

3. 提案するプロジェクトコンセプトの強みと過去、現在、未来の他のプロジェクト、研究・探査との関係 / The competing power of the proposed project concept and its relationship to past, current, and future other investigations and projects.

本プロジェクトの強みは、JWST 単独では困難であるが重要な研究課題に、これまで

の日本の強みを活かして取り組む点である。遠方銀河の研究は JWST によって格段に進んでおり、その結果 GN-11 を含む明るい銀河の形成が非常に注目を浴びている。本プロジェクトではそのような明るい銀河を、日本が参画する Roman 望遠鏡や日本が主導する GREX-PLUS による広領域探査で大量に見つける。遠方宇宙の広領域探査はこれまで日本がすばる望遠鏡の Suprime-Cam, Hyper Suprime-Cam を使ってリードしてきており、本プロジェクトの実行の際にはその経験を活かして世界の最先端で研究の主導権を握ることができる。

4.

プロジェクトが実施する研究

Scientific investigations of the project

本プロジェクトは、研究 A) 広領域探査による明るい銀河の探査 と 研究 B) GRB と光赤外観測による初代星形成 の 2 つの研究から成り立つ。図 2 に概略を示す。

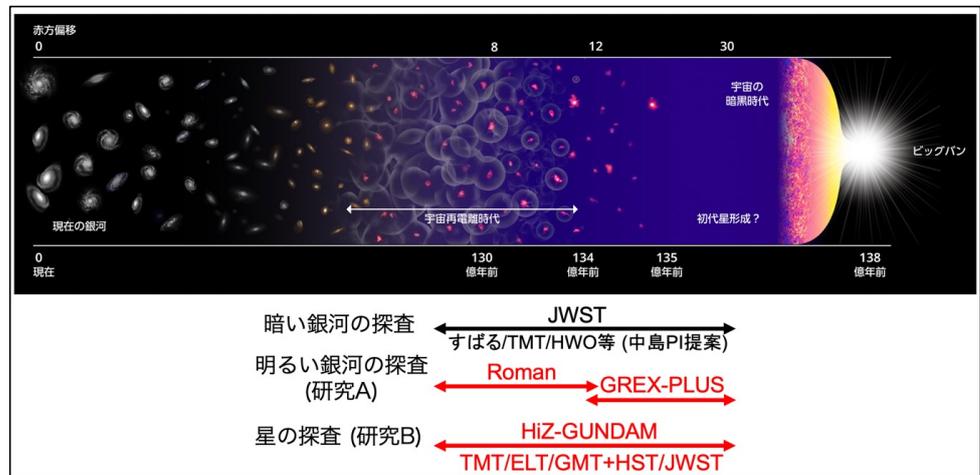


図 2: 本研究の概略。上パネルは宇宙の歴史を表しており、下に各計画がカバーする研究テーマ・赤方偏移を示している。

研究 A) 広領域探査による明るい銀河の探査

2 μ m までをカバーする Roman 望遠鏡と 2 μ m 以上をカバーする GREX-PLUS を用いて、 $z \sim 10-20$ の明るい銀河を従来の 500 倍となる 1000 個以上 ($z \sim 11$: 1500-4000 個, $z \sim 13$: 60-7000 個, $z \sim 15$: 40-3000 個, $z \sim 17$: 20-100 個, $z \sim 20$: 10-50 個) 見つける。この大量の銀河サンプルを JWST や ALMA で観測することで、分光同定だけでなく物理的な性質を調べる。これにより、なぜ理論予測より明るい銀河が見つまっているのかその理由を調べ、GN- $z11$ に見られたような特異な元素組成比が一般的なのかどうかも調べる。また AGN の兆候を調べ、巨大ブラックホールの質量を測定することで巨大ブラックホールの起源に迫ることも可能である。このような明るい銀河は、JWST で観測できる同時代の暗い銀河よりもより宇宙の初期で誕生したと考えられるので、年齢などを調べることでより初代銀河形成に近づくことができる。また中島 PI のプロジェクト提案にあるように、この探査で見つかる明るい銀河の周辺には重元素汚染を受けていない始原ガスが残されている可能性があり、始原ガスから誕生したばかりの銀河やブラックホールも探査できる。

研究 B) GRB と光赤外観測による初代星形成

GRBは大質量星の爆発だと考えられており、非常に明るいため遠方宇宙で起きていても観測が可能である。HiZ-GUNDAMは $z > 7$ で10個以上のGRBを検出する予定である。これらの高赤方偏移GRBをすばるやTMT、JWSTといった光赤外の大型望遠鏡で追観測することで、宇宙再電離史をLy α 減衰翼の観測で調べるだけでなく、遠方宇宙の大質量形成の研究を展開できる。赤方偏移ごとにGRBの発生率を測定し、HST/JWSTで得られている紫外線光度密度から計算した星形成率と比較することで、初期質量関数に制限を加えることができる。遠方宇宙では金属量が低いこととCMB温度が高いことで、形成する星が典型的に重たくなり、初期質量関数がtop-heavyになることが予言されているが(e.g., Omukai et al. 2005, ApJ, 626, 627, Chon et al. 2022, MNRAS, 514, 4639)、これを検証することが可能になる。さらに $z > 10$ を超える宇宙における大質量星の爆発を直接見ることができると、初代星(Pop-III星)の爆発を捉えることができるかもしれない。また、HSTやJWSTにより、重力レンズされた単独の星を、TMT/ELT/GMTといった30mクラスの地上大型望遠鏡で観測することで、遠方宇宙の星の物理的な性質を調べることもできる。星は点源なので、AOを使えば感度が格段に向上し、JWSTでは得られなかったような高S/N比のスペクトルを取得可能である。これにより遠方宇宙の星が近傍宇宙のものとは比べてどのような性質を持っているのか調べる。

上記の研究と併せて、中島PIのプロジェクト提案により、暗い遠方銀河の分光学的な性質を理解することが可能になり、遠方宇宙において、星から暗い銀河、明るい銀河まで、広いダイナミックレンジの天体形成・進化の様子を統一的に理解することが可能になる。これにより世界における日本の遠方宇宙研究のプレゼンスを保ち、2040年以降に打ち上げられるHWOによる遠方宇宙研究へつなげる。HWOの6.5m鏡でH bandまで計画中の広領域撮像装置を使えば、JWSTでは発見できないような非常に小質量な誕生直後の銀河を $z \sim 6-10$ の遠方宇宙で発見でき、それらをTMT/ELT/GMTで分光すれば、銀河形成の現場を直接観測することが可能になる。

5.

スケジュール

Schedule

大まかなスケジュール / Rough schedule

- ・2020年代後半:
研究Aを $z < 13$ まで行う。2020年代後半に打ち上げられるRoman望遠鏡の広領域データを使い、明るい銀河の探査を行う。
- ・2030年ごろ:
研究Bを行う。2020年代後半以降に稼働するTMT/ELT/GMTを使い、JWSTなどで見つかったと予想される重力レンズされた単独の星の分光観測を行う。また2030年付近に打ち上げられるHiZ-GUNDAMにより検出された高赤方偏移GRBをすばるやTMT、JWSTといった光赤外の大型望遠鏡で追観測することで、大質量星形成の研究を展開する。
- ・2030-2040年:

研究 A を $z > 13$ で行う。2030 年代前半に打ち上がる GREX-PLUS を用いて、明るい銀河の探査を行う。

- 2040 年以降 :

上記の研究を通じて日本の国際的なプレゼンスを保ち、HWO で銀河形成研究を展開する。

Beyond the optical observations and behind the dust:
Probing optically-bright/hidden supermassive black
holes in the multi-wavelength Universe

多波長広域観測で明らかにする
超巨大ブラックホール進化史

0.

概要

Summary

Beyond the optical observations and behind the dust: Probing optically-bright/hidden supermassive black holes in the multi-wavelength Universe

多波長広域観測で明らかにする
超巨大ブラックホール進化史

Project Category

3. Science only (新規の装置・施設の開発を含まないサイエンスの方向性の提案)

Abstract of science goals, objectives, and methods

Wide-area and high sensitivity surveys, unique features of optical-band observations as of now, are undergoing a transformative phase from the 2020s to the 2030s, expanding their wavelength range to include radio (VLASS+ngVLA), infrared (Euclid+Roman), and eventually gravitational waves (LISA). In this project, we summarize the upcoming wide-field multi-wavelength and gravitational wave surveys, which will open new avenues for observing supermassive black holes (SMBHs). We emphasize the essential role of optical and infrared observations in revealing the physical properties of SMBHs, and the unique contribution of Japan's optical-infrared community's instruments and team efforts holding data rights of such surveys.

Specifically, we focus on exploring the universe at $z \geq 3$, where black holes experience rapid growth, expanding our survey domain to $z \geq 10$, representing an exploration of early black hole formation beyond cosmic reionization. By combining multi-wavelength and gravitational wave observations, we aim to uncover dust and gas obscured SMBHs in the distant universe. Combining the UNIONS, Rubin, PFS, Euclid, and Roman data with multiwavelength ones, we will uncover important physical parameters of SMBHs such as redshift, BH mass, gas accretion rate. This endeavor aims to elucidate the birth and growth history of SMBHs across the universe from $z=3$ to 10. Finally, we also touch the potential of SMBH exploration with GREX-PLUS at $z > 10$.

プロジェクトの意義と科学目的・方法の要旨

可視光観測のユニークな特徴である広域・高感度サーベイは、これから 2030 年代にかけて変革期を迎え、その波長域を電波 (VLASS+ngVLA)、赤外線 (Euclid+Roman) に

まで広げ、さらには光を超えて重力波 (LISA) にまでその領域を広げていく。本プロジェクトでは、この変革期に計画されている広域多波長 + 重力波サーベイを駆使することで開かれる超巨大ブラックホール (SMBH) 観測について総括する。そのような状況の中でも高空間分解能かつ高感度な光赤外線観測がいかに重要であるかを述べ、さらに日本の光赤外コミュニティが持つ装置・データライツがユニークな役割を果たすことを述べる。

具体的には BH が激しく成長を遂げる $z \geq 3$ の宇宙に着目し、宇宙再電離の向こう側にある初代 BH 探査である $z \geq 10$ までその探査域を広げる。多波長観測と重力波観測を組み合わせ、今まで見過ごされてきたダストで隠された SMBH 探査を行う。ここで、UNIONS, Rubin, PFS, Euclid, Roman の光赤外線観測が、赤方偏移推定や SMBH 成長の本質的理解に欠かせない物量である光度・BH 質量の推定で主要な役割を担うことを述べる。これによって、宇宙の $z=3-10$ までの SMBH の生誕・成長史の解明に挑む。最後に、GREX-PLUS で $z > 10$ の SMBH 探査の可能性についても触れる。

Principle Investigator

Name: Kohei Ichikawa

Affiliation: Waseda University

E-mail address: kohei.ichikawa@aoni.waseda.jp

プロジェクト代表者

氏名: 市川幸平

所属: 早稲田大学

E-mail アドレス: kohei.ichikawa@aoni.waseda.jp

Co-investigator and his/her role /

Yoshihisa Asada (Waseda U.) : Science Investigation using ALMA/JWST

Takuya Hashimoto (Tsukuba U.) : Science Investigation using ALMA/JWST

Masatoshi Imanishi (NAOJ) : Science Investigation using Subaru

Akio Inoue (Waseda U.) : Science Investigation using ALMA, JWST, GREX-PLUS

Takuma Izumi (NAOJ) : Science Investigation using ALMA

Yoshiki Matsuoka (Ehime U.) : Science Investigation using Subaru/PFS, JWST, Euclid

Ken Mawatari (Waseda U.) : Science Investigation using ALMA/JWST

Tohru Nagao (Ehime U.) : Science Investigation using Subaru/PFS, JWST, Euclid

Masafusa Onoue (Waseda U.) : Science Investigation using JWST, Euclid

Rhythm Shimakawa (Waseda U.) : Science Investigation using Subaru/PFS

Yuma Sugahara (Waseda U.) : Science Investigation using ALMA/JWST

Takumi Tanaka (U. Tokyo) : Science Investigation using JWST, Euclid

Yoshiki Toba (Ritsumei U.) : Science Investigation using Euclid, PFS

プロジェクト共同提案者とその役割

浅田 喜久 (早稲田大) : 科学検討担当 (電波・ALMA/ 赤外線・JWST)

橋本 拓也 (筑波大) : 科学検討担当 (電波・ALMA/ 赤外線・JWST)

今西 昌俊 (国立天文台) : 科学検討担当 (赤外線・すばる望遠鏡)

井上 昭雄 (早稲田大) : 科学検討担当 (赤外線・JWST/GREX-PLUS, 電波・ALMA)

泉 拓磨 (国立天文台) : 科学検討担当 (電波・ALMA)

松岡 良樹 (愛媛大学) : 科学検討担当 (可視光 / 赤外・PFS/JWST/Euclid)

馬渡 健 (早稲田大) : 科学検討担当 (電波・ALMA/ 赤外線・JWST)

長尾 透 (愛媛大学) : 科学検討担当 (可視光 / 赤外・PFS/JWST/Euclid)

尾上 匡房 (早稲田大) : 科学検討担当 (赤外線・JWST/Euclid)

田中 匠 (Kavli IPMU) : 科学検討担当 (赤外線・JWST/Euclid)

嶋川 里澄 (早稲田大) : 科学検討担当 (可視光 / 赤外・PFS)

菅原 悠馬 (早稲田大) : 科学検討担当 (電波・ALMA/ 赤外線・JWST)

鳥羽 儀樹 (立命館大) : 科学検討担当 (赤外線・Euclid/PFS)

1.

プロジェクトの意義

宇宙における超巨大ブラックホール誕生の現場とその初期成長史を明らかにする。

Science goals of the project

2.

プロジェクトの科学目的

Science goals of the project

可視光観測、特にすばる HSC-SSP による広域サーベイは数密度が非常に小さい $z=4-7$ の遠方の活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; AGN)・クエーサーを多数発見してきた。本プロジェクトでは将来行われる多波長広域サーベイ観測である UNIONS+Rubin 可視光サーベイ, Euclid 赤外線 Wide-Area Survey, Roman wide survey, ngVLA 電波 survey をかけ合わせることで、超巨大ブラックホールが急成長を遂げる $z=3$ から初代超巨大ブラックホールが存在しうる $z=10$ までの超巨大ブラックホールの宇宙論的進化を追う。そのような状況になっても、光赤外線観測が AGN までの赤方偏移推定に本質的に重要であり、超巨大ブラックホール (SMBH) 成長の本質的な物理量である光度・ブラックホール質量を求める際に重要であることを述べる。

3.

プロジェクトの科学的意義と目標の根拠

Rationale for the scientific goals and objectives

1. 科学的意義の根拠：研究の背景、当該分野の研究状況、等 / Scientific background, status of the relevant scientific area, etc.

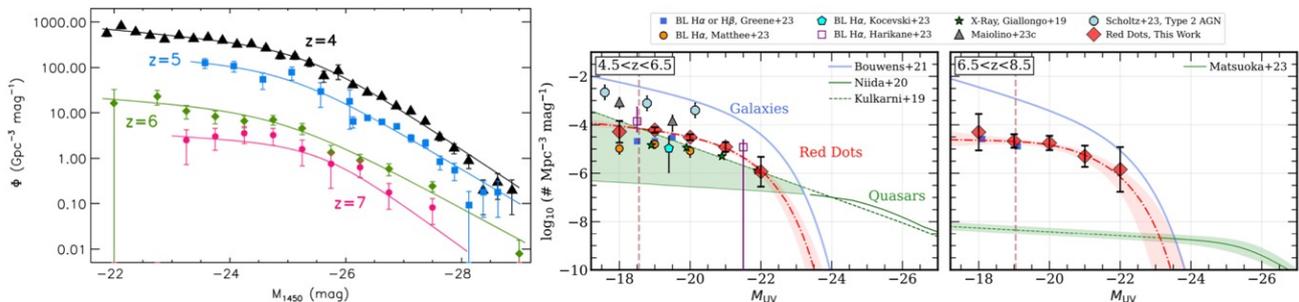
超巨大ブラックホール (Supermassive black holes; SMBH) の探査は BH へのガス降着で明るく輝く活動銀河核 (Active galactic nuclei; AGN) を probe として行われて

きた。AGN の数密度の小ささ ($z=6$ で $n=10^{-9} \text{ Mpc}^{-3}$) ゆえに、遠方宇宙の AGN 探査は広域サーベイ探査、つまりは可視光サーベイに実質的に限られてきた。可視光観測による AGN 探査は 2000 年代の SDSS サーベイに端を発し、日本の HSC-SSP 探査による 1000 平方度を超える広域高感度可視光観測は、 $z=4-7$ のクエーサー光度関数を折れ曲がり (knee) を含めて初めて明らかにした (Matsuoka et al. 2023; 図 1 左)。

AGN 探査は今後 2 つの方向性をもって研究が進められていく。一つは、より宇宙初期へと向かう、初代 BH を持つ AGN 探査である。 $z>7$ を超える AGN 探査は Ly α 輝線が赤外線波長域 ($>1 \mu\text{m}$) に入ることから、現状では高光度 AGN であるクエーサーは 10 天体しか発見されていない (Wang et al. 2021)。これは、探査領域が 1000 deg^2 を超えるような広域かつ高感度な赤外線サーベイが行われると状況が一変する (4a. 参照)。

もう一つは、ダストのカーテンで隠された AGN の探査である。近年の JWST 赤外線衛星はその狭いサーベイ領域 ($\sim 0.01 \text{ deg}^2$) にもかかわらず、その驚異的な感度によってダストで隠された暗い AGN を相次いで発見している。これらは JWST 観測波長域 ($z=5-8$ において、静止波長域で $>4000 \text{ \AA}$) でダスト減光 ($A_V \sim 3 \text{ mag}$) と思われる赤いスペクトルをもち、JWST でもコンパクトなイメージを持つことから Little Red Dots (LRD) と呼ばれている (Matthee et al. 2023)。興味深いことに、この暗く赤いスペクトルを持つ AGN の数密度は非常に大きく ($z=5-8$ で $10^{-4}-10^{-5} \text{ Mpc}^{-3}$, 図 1 右参照)、遠方宇宙においては、予想していたより多くの AGN が存在することを示唆している。言い換えると、我々は多くの SMBH をまだまだ見過ごしている可能性があり、ダスト減光の影響を受けない波長、特に電波・赤外線・X 線での広域高感度 AGN 探査が重要であることを示唆している。

図 1: (左) すばる/HSC-SSP 観測で探査された $z=5-7$ のクエーサーの光度関数 (Matsuoka et al. 2023)。(右) 近年 JWST で発見された、ダスト減光を受けた比較的暗い AGN (Little Red Dots)。低光度側ではクエーサー光度関数から予想される値と数密度に大きな隔りがある (Kokorev et al. 2024)。



2. 提案するプロジェクトコンセプトは当該分野になにをもたらそうとするのか / Goals and objectives: new scientific steps the proposed concept aims to achieve in the science area

本プロジェクトは、Euclid 衛星と Roman 赤外線衛星によって今後行われる広域かつ高感度赤外線サーベイを活用して、初期宇宙および宇宙再電離期 ($z=6-10$) の AGN 探査を行うことで、宇宙第一世代の超巨大ブラックホールの誕生・成長を明らかにする (4a 参照)。さらに、多波長観測によってダストで隠された AGN を探査し、今まで見過ごされてきた SMBH の数密度、光度密度、環境を明らかにする (4b, 4c)。これらの物理量から、初代 BH 生成の起源、その母銀河から Lambda CDM model への tension を議論することができる。

3. 提案するプロジェクトコンセプトの強みと過去、現在、未来の他のプロジェクト、研究・探査との関係 / The competing power of the proposed project concept and its relationship to past, current, and future other investigations and projects.

詳細は 4 で述べるが、本プロジェクト研究はすばる望遠鏡で行われたすばる/HSC-SSP サーベイを用いて行われた研究が土台となっている。HSC-SSP サーベイを通して我々は SHELLQs という遠方 AGN 探査チーム (PI: 松岡) を構築しており、20 本を超える論文が出版され、遠方クエーサーサーベイにおいて世界で抜群の知名度を誇る。この経験を活かして $z>7$ の遠方宇宙を探査する。Euclid+Roman 衛星による広域赤外線サーベイ領域と対応する可視光サーベイである UNIONS+Rubin 可視光サーベイはそのどれも日本の光赤外線コミュニティから選出された PI メンバーはアクセス可能であり、我々は現在 UNIONS 領域においては UNIONS Photometry Catalog を用いて AGN サンプル候補を構築しているところである (Yoshida et al., 2025, ApJ in press., Zhong et al., in prep.)。

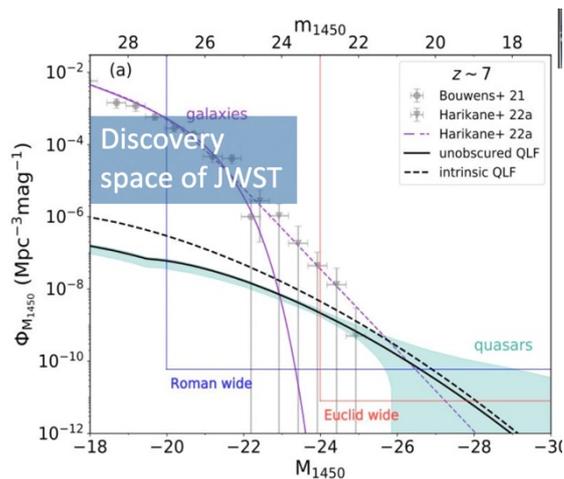
また、本プロジェクトで述べる埋もれた AGN 探査についても、WERGS チーム (PI: 市川) が主体としてリードしている。WERGS とは HSC SSP サーベイと VLA/FIRST, VLASS 電波サーベイを掛け合わせた電波銀河サーベイチーム名である。この埋もれた AGN のサンプルの構築はすばる HSC-SSP の Deep Field での研究からスタートしており (図 3 参照)、Deep Field 内の近・中間赤外線の情報も含んだ u2k Joint Catalog Field を用いて、電波や X 線で明るいにもかかわらず、可視光で非常に暗い、あるいはまったく見えない (HSC-dark) な天体が発見され始めている。これらのサンプル構築のノウハウを活かすことで、より広域な Euclid+Roman 赤外線サーベイでも埋もれた AGN の探査を行う。

4.

プロジェクトが実施する
研究

Scientific
investigations of the
project

図 2: 広域赤外線サーベイが開拓する領域。Euclid+Roman Wide サーベイにより、 $z>7$ においても、典型的な数密度を教える AGN の光度関数の折れ曲がり (knee) をカバーすることができる (Li et al. 2023 を一部改変)



Euclid 赤外線衛星と Roman 赤外線衛星によって赤外線の広域高感度サーベイが行われることにより、図 2 にあるように、AGN の光度関数の折れ曲がり (knee) を決める重要な観測領域を、 $z>7$ に拡大することが可能となる。

サンプル数は $z>7$ でおおよそ 120 天体、 $z>8$ でおおよそ 20 天体、 $z>9$ でも数天体が予想

されている (Li, Inayoshi, Onoue et al. 2023)。

Euclid 遠方天体 (Primordial Universe; PU) チームは欧米と日本の共同チームとなっており、本原稿提出時の 2025 年において、フォローアップ観測や解析で人的リソースをお互いに提供している。明るい天体に限ると、我々のチームメンバーによって、Euclid Grism 分光でも $z \sim 9-10$ の天体が数天体観測される可能性があり、それらの分光シミュレーションも行っている。特に Euclid で選択された $z > 7$ AGN 天体はすばる /PFS, TAO/SWIMS によって分光も可能であることから、日本の光赤外線コミュニティが果たす役割は大きく、分光フォローアップによる赤方偏移同定においても率先してプロジェクトリードを狙う。更に GREX-PLUS が実現すれば、2-5 μm 帯での高感度広域データが得られるため、 $z > 10$ という遠方のクエーサー発見も日本の光赤外線チームでリードできる。

4b: ダストに埋もれた AGN 探査 (高光度編)

遠方のクエーサー探査は、現在可視光で得られているクエーサーの SED の形が $z=0-6$ で変化がないことを担保として、それを遠方宇宙に存在するとして color-color plane のうちの領域に来るかを予測し、サンプル候補を選出する。一方で color-color selection は interloper が避けられず、近赤外線の波長域は、brown Dwarf がクエーサー探査の主要な interloper として知られている。一方で、他の波長で AGN をまず選択することができれば、そのような interloper の心配を極力取り除いたサンプルを構築することができる。今までこの手法は他波長観測の限られたサーベイ領域および感度の浅さから敬遠されてきたが、WERGS サーベイチームによって、VLASS など GHz 帯の電波で明るく、可視光が全く観測されない HSC-dark VLASS source などが発見されてきており (図 3 左下)、実用面をクリアしつつある。これらで選出された AGN は color-color plot ではダスト減光 ($A_V=1-3 \text{ mag}$) を受けたクエーサーの SED の兆候を示していることから、遠方宇宙 ($z > 7$) におけるダストで埋もれた AGN の重要な候補天体となっている (図 3 右)。この手法を Euclid Wide 領域に広げることで、Table 1 にあるようにおよそ 10 万天体の dropout radio AGN および 2000 天体ほどの $z > 7$ のダスト吸収を受けた AGN 候補天体を見つけることが可能となる。

図 3: HSC-SSP サーベイで発見された HSC-dark な電波 AGN (左上) 予想される SED (左下) 可視光から電波に至る cutout イメージ. HSC 可視光帯で "dark" であることがわかる. (右) 電波 AGN であることが担保されることにより、幅広い color-color plane でダスト減光を受けたクエーサー探査が可能となる.

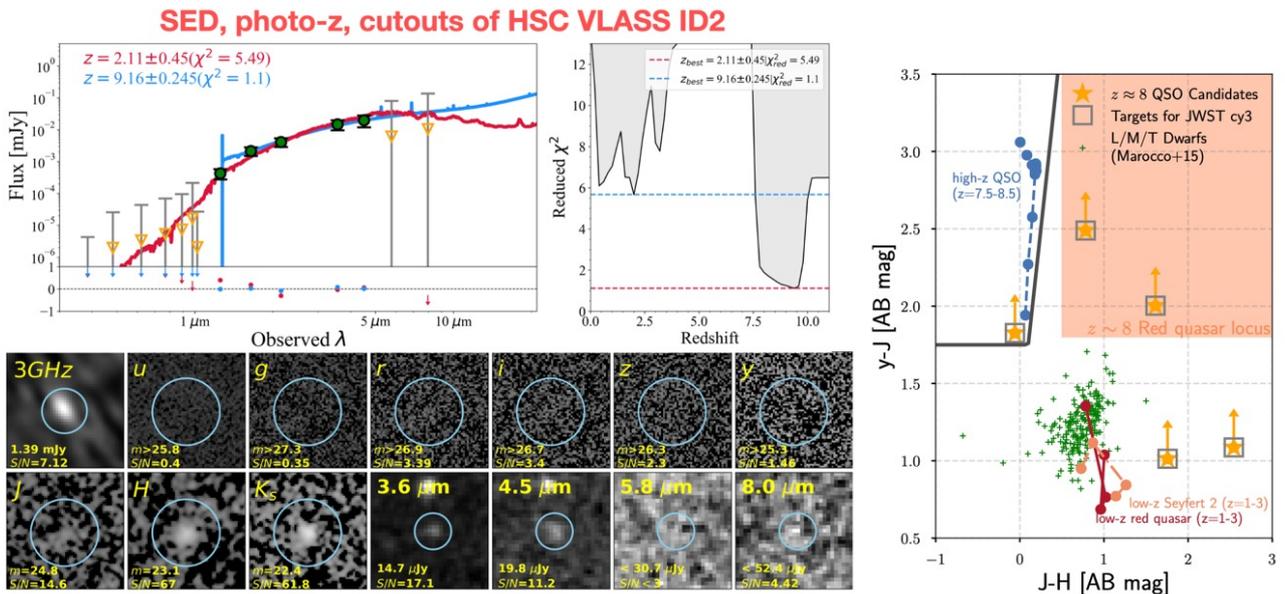


表 1: Rubin 領域で発見される VLASS
で明るい $z > 3$ の遠方 AGN 候補

	u-dropout ($z \sim 3$)	g- ($z \sim 4$)	r- ($z \sim 5$)	i- ($z \sim 6$)	z- ($z \sim 7$)	Rubin-dark ($z > 7$)
Value	65,000	30,000	14,000	4,500	3,000	2,000

これら Euclid で発見される天体は近赤外線帯で < 24 mag と比較的明るい天体が多く、すばる / PFS あるいは TAO/SWIMS で広域サーベイを行えば、これらの天体の多くを分光同定することが可能となる。これらは期待される明るさから AGN 光度および星質量も非常に大きいことが予想され、特に分光同定されて $z > 8$ にいることがわかると、BH 成長については初代ブラックホールの生成メカニズムについて、銀河成長については CDM モデルから予想される銀河星質量の上限値に強い制限を与えることができる。

4c: 赤い AGN 探査 (低光度編)

JWST で発見された暗い AGN、特に Little Red Dots (LRDs) についても今後考えられるサイエンス提案を行う。現状の JWST サーベイでは LRDs サーベイは $5 < z < 8$ に限られている (図 1 右参照)。これは、 $z > 8$ では感度の落ちる JWST/MIRI によるサンプル選択が必要となるためであり、今後も多くの候補天体の検出は期待できない。その一方で、2030 年代には現状の VLASS よりも GHz 帯での感度が 2 桁以上向上する ngVLA がファーストライトを迎える。GHz 帯はダスト減光の影響がほぼなく、ガスに深く覆われた $z > 8$ の遠方 AGN 探査に最適である。また、LRDs の数密度が非常に大きいことを考えると、赤方偏移進化があるとはいえ、現在提案されている 10 平方度程度の ngVLA サーベイ (Kirkpatrick et al. 2018) でも多くの埋もれた AGN が発見されることが予測される。これらは比較的 BH 質量が小さいことが JWST 観測からすでに示唆されており (Maiolino et al. 2023), 将来計画である重力波衛星 LISA の格好のターゲット供給源となる。LISA の検出率と比較することで、初期宇宙の BH 成長のうち、どの程度が merger 由来かを議論することも可能となる。

5.

スケジュール

Schedule

大まかなスケジュール / Rough schedule

まず、直近 2020 年代において、AGN 探査として主要な役割を果たすのは、Euclid (2025-) + Roman (2028-) 赤外線衛星、そして UNIONS/Rubin 可視光サーベイ (2025-) である。同時進行で行われる北天の UNIONS 可視光サーベイ、南天の Rubin 可視光サーベイによって我々は Euclid Wide-Area Survey がカバーする 25000 平方度のうちおよそ 20000 平方度に及ぶ領域に対して、u-band から近赤外線までの観測データセットを取得する。これらのデータセットを用いて、2025-2030 年において $z > 7$ の遠方クエーサー探査 (プロジェクト研究 4a) を行う。

また、すでに Lyman break 法を用いて $z \geq 3$ の銀河サンプルも我々は構築を始めており、多波長観測によってダストに埋もれた AGN を多数構築する。Table 1 を見てわかるように、電波銀河サンプルだけでも $z \geq 3$ の AGN 天体数は 10 万天体におよぶ。これらを用いて、ダストの向こう側の SMBH 成長史を明らかにする (プロジェクト研究 4b)。

最後に、2030年代になると、ngVLA および LISA が本格的に始動すると予想される。その圧倒的感度により $z > 10$ の埋もれた AGN 探査およびブラックホール合体が可能となる。更に GREX-PLUS が実現すれば、2-5 μm 帯での高感度広域データが得られる。そうになると、プロジェクト 4a-4c のいずれにおいても $z > 10$ というより遠方の AGN 天体も狙える可能性がある。

Unveiling circumgalactic medium with integral field spectrographs on TMT

TMT 面分光装置で迫る銀河周辺物質

0.

概要

Summary

Unveiling circumgalactic medium with integral field spectrographs on TMT

TMT 面分光装置で迫る銀河周辺物質

Project Category

3. Science only (新規の装置・施設の開発を含まないサイエンスの方向性の提案)

Abstract of science goals, objectives, and methods

In the process of baryon cycle that governs galaxy evolution, the Circumgalactic Medium (CGM) is the site where gas inflows that support star formation activities and feedback-driven gas outflows occur, with “multi phases” of different physical conditions intricately intertwined. However, direct observations of the emission from diffuse CGM are challenging, and the lack of comprehensive investigations into the multiphase CGM of individual galaxies has hindered the advancement of our understanding. This project aims to significantly advance our understanding of the physical properties of the CGM and the underlying physical phenomena by conducting a comprehensive survey of the multiphase CGM in the era of upcoming 30-meter class telescopes. We will particularly focus on star-forming galaxies around a redshift of 2, a time when star formation activities were extremely vigorous, maintained by a large amount of gas inflow and powering intense outflow. For these galaxies, using visible and near-infrared integral field spectrographs, represented by TMT/IRIS and the proposed WFOS IFU, on 30-meter class telescopes, we will perform emission-line mapping of resonance and recombination lines of hydrogen such as Ly α and H α , as well as emission lines of metal ions in different ionization states like OVI, NV, CIV, SiIV, SiII*, MgII, [OII], and [OIII], to identify and investigate multi-phase structures of the CGM.

プロジェクトの意義と科学目的・方法の要旨

銀河進化を支配する物質循環過程において、銀河周辺物質 (CGM) は星形成活動を支えるガス流入と超新星爆発などのフィードバックによるガス流出が展開される現場であり、物理状態の異なるガス相が複雑に絡み合っている。しかし、CGM は希薄なため放射の直接観測は困難で、同一の銀河に対して多相的な CGM を統一的に調査した例がないことによって、理解の発展が阻害されている。本プロジェクトでは、来たる 30m 級望遠鏡時代に多相的 CGM を包括的に調査し、CGM の物理的性質と背後にある物理現象の理解を大きく飛躍させることを目指す。特に、銀河激進化期と呼ばれる赤方偏移およそ

2の時代の星形成銀河に着目する。この時代の銀河は、星形成活動が非常に活発であり、それを維持するためガス流入と激しいフィードバックに流出が生じていたと予想される。これらの銀河に対して、TMT/IRIS や検討中のWFOS IFU に代表される、30m 級望遠鏡の可視・近赤外線面分光装置を用いて、CGM の物理状態の異なる相の観測指標（トレーサー）となる Ly α , H α などの水素の共鳴・再結合線、OVI, NV, CIV, SiIV, SiIII*, MgII, [OII], [OIII] など電離ポテンシャルの異なる金属イオン輝線の放射マッピングを行うことで、CGM の多相構造を同定・調査する。

Principle Investigator

Name: Haruka Kusakabe

Affiliation: University of Tokyo

E-mail address: haruka.kusakabe.takeishi@gmail.com

プロジェクト代表者

氏名: 日下部 晴香

所属: 東京大学

E-mail アドレス: haruka.kusakabe.takeishi@gmail.com

Co-investigator and his/her role /

Satoshi Kikuta (University of Tokyo) : Co-leader of Science Investigation

Daichi Kashino (NAOJ) : Co-leader of Science Investigation

プロジェクト共同提案者とその役割

菊田 智史 (東京大学) : 科学研究共同責任者

柏野 大地 (国立天文台) : 科学研究共同責任者

1.

プロジェクトの意義

銀河進化と宇宙の物質循環を解き明かす。

Science goals of the project

2.

プロジェクトの科学目的

Science goals of the project

銀河の形成と進化の根幹をなす物理現象は、ガス降着、星形成、そしてフィードバックである。銀河間物質 (intragalactic medium、IGM) からはコズミックウェブと呼ばれるフィラメント状の大規模構造に沿って銀河にガスが流入する (インフロー)。流入したガスは冷却して星形成を駆動し、銀河の星質量成長を促進する。一方で、大質量星は超新星爆発を起こし、膨大なエネルギーと運動量を周囲のガスに与え、銀河スケールでのガスの流出 (アウトフロー) を引き起こす。これにより、重元素を含む大量のガスが銀河間空

間に撒き散らされる。超新星爆発によるガスの加熱や流出は次世代の星形成を抑制する。これを負のフィードバック効果と呼ぶ。このように銀河進化と宇宙の物質循環は密接に関係している。まるで見てきたかのような記述だが、このような描像は多くの推測に基づく仮説に過ぎず、現象の背後にある物理過程の理解は全く不十分である。

この描像を検証するために解明が急務となっているのが、銀河に流入するガスの源泉でもありフィードバックにより流出するガスの行く末でもある銀河周辺物質 (circumgalactic medium; CGM) である (図 1 参照)。CGM は一般的には銀河の外側かつダークマターハローの内側を指す。ミッシングバリオン問題で知られるように、ダークマターハロー内部で星と ISM (銀河本体) として観測されているバリオンの質量は、宇宙のダークマターとバリオンの比から想定されるよりも遥かに小さく、大量のバリオンが CGM 中に存在すると考えられている (例えばレビュー論文 Tumlinson et al. 2017, ARAA, 55, 389)。このため CGM は、銀河進化モデルの制限だけでなく宇宙の物質循環を考える上でも重要な要素であるが、観測が困難であるために理解が十分進んでいない。

冒頭に述べたような銀河進化の描像において、とりわけ重要なガスの流入と流出の根本的なメカニズムは未だ解明されておらず、まさにブラックボックスと言える。我々は、次世代装置を用いた可視光・近赤外線的面分光観測によってこのブラックボックスをこじ開け、多相的な CGM とそこで展開される物理現象、ひいては銀河進化の基本描像を統一的に理解することを目指す。このために我々は赤方偏移 $z \sim 2-2.5$ の時代、いわゆる「銀河激進化期」の銀河に着目する。この時代の典型的な銀河では、現在に比べて星形成率が約 10 から 100 倍も高く、頻発する超新星爆発が大きなフィードバック効果を生んでいたと推測される。これに打ち勝って高い星形成率を維持するためには、大量のガス供給が必要であり、ガスの流入・流出は現代の銀河よりもはるかに激しかったと考えられる。また、この赤方偏移帯では、CGM のトレーサーとして重要な静止系紫外線から可視光の輝線が地上望遠鏡によって観測可能である。そのため、CGM 研究におけるスイートスポットと言える。

3.

プロジェクトの科学的
意義と目標の根拠

Rationale for the
scientific goals and
objectives

1. 科学的意義の根拠：研究の背景、当該分野の研究状況、等 / Scientific background, status of the relevant scientific area, etc.

銀河のサイズ程度 (約 10 kpc) から典型的な銀河間距離 (約 1 Mpc) 程度のスケールに渡って広がる CGM の密度は、星間物質 (Interstellar medium; ISM) の密度 (水素原子およそ $n=10^{6-9} \text{ m}^{-3}$) に比べて、典型的には 100 分の 1 以下 ($n < 10^4 \text{ m}^{-3}$) である。さらに、CGM は様々な物理状態 (温度、密度、金属量、電離状態、運動状態など) のガスからなる多相的な構造を持っており、単一の相だけを観測しても CGM の本来の姿は見えてこない。全体像を明らかにするには、各ガス相に適した観測指標を用いて観測を行い、それらを統合する必要がある。

伝統的な CGM の観測的研究では、背景光源の光が手前にある銀河の CGM を通過する際に生じる吸収線が利用されてきた (Werk et al. 2014, ApJ, 792, 8)。これにより、CGM には密度、金属量、電離状態など物理状態の異なるガスが多相的に存在している

ことが明らかにされてきた (Tumlinson et al. 2017)。しかし、吸収線を用いる方法では、個々の銀河に対して、背景光源の視線上の情報しか得られず、CGMの全体像を把握する上で根本的な問題を抱えている。これを補うのが近年可能になってきた広視野面分光観測や深い狭帯域フィルター撮像によるCGMからの輝線放射の直接マッピングである。放射と吸収の両者を組み合わせ、様々な相を探っていくことがCGMの理解に不可欠である。

CGMの輝線放射のマッピングでは、それぞれのガス相によって観測指標となる輝線が異なり、これまでは観測装置の性能に制限され、赤方偏移によって観測できる相が異なっていた (図1参照, cold phase $T < 10^4$ K, cool phase $T = 10^4 - 10^5$ K, warm phase $T > 10^5 - 6$ Kとする)。水素のLy α 輝線 (1216 Å) は明るく、cool/warm phaseから放射され、特に中性水素による共鳴散乱を受けたLy α 光子と衝突脱励起によるLy α 光子はcool phaseの探査に有用で、 $z=0$ と $z=2-7$ で空間的に広がった放射として最もよく観測されてきた (Ly α ハロー, Steidel et al. 2011, ApJ, 736, 160)。水素のH α 輝線 (6563 Å) も cool/warm phaseで放射されるが、非共鳴輝線のため、Ly α とH α 輝線を組み合わせることで放射メカニズムの切り分けに繋がる。しかし、H α ハローは非常に暗く、 $z < 0.5$ のみでしか検出されていない (e.g., Shimakawa et al. 2022, PASJ, 74, 318, Zhang et al. 2020, ApJ, 888, 33)。重元素イオンからの輝線はアウトフローの探査にも有用であり、その電離ポテンシャルや電離メカニズムにより異なる相の情報を得ることができるが、限られた観測しかない。例えば、cold/cool phaseのMg II ハロー、Fe II* ハロー、[O II] ハローは $z=0-2$ でしか観測がない (Burchett et al. 2021, ApJ, 909, 151; Finley et al. 2017, A&A, 605, 1; Yuma et al. 2013, ApJ, 761, 19)。warm phaseトレーサーとして代表的なO VI ハローの検出は、 $z=0$ で10例ほどしかない (Chung et al. 2021, ApJ, 916, 7)。また、より高温の相は、近傍の大質量銀河のX線コロナの観測を除いてほとんど例がない (Li & Wang 2013, MNRAS, 435, 3071)。

図1: 様々な温度帯のCGMの多相とそれらのトレーサー (Tumlinson et al. 2017 改変)

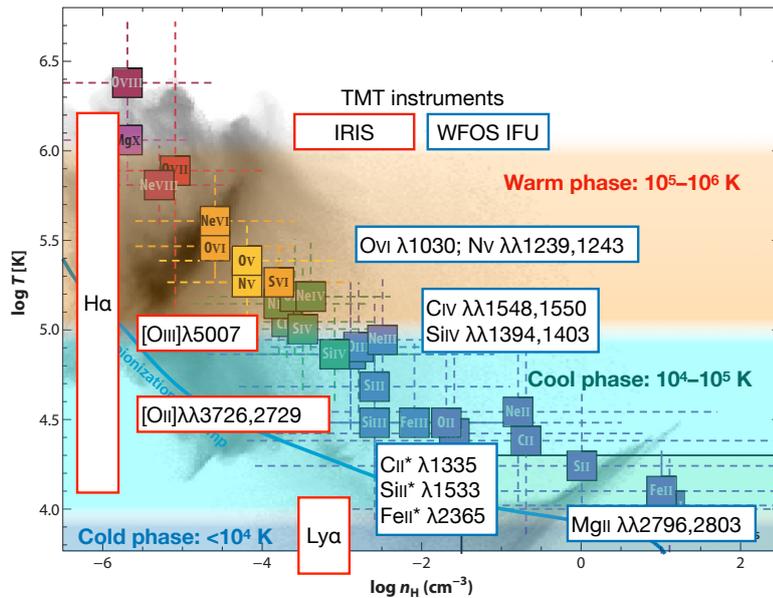


図 2: $z=2$ の CGM シミュレーション (Peeples et al. 2019 改変)

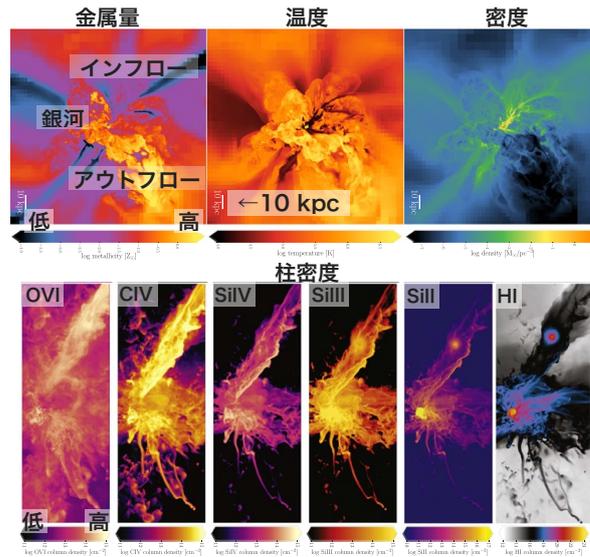
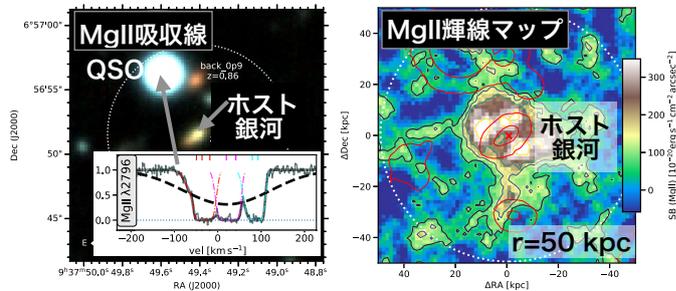


図 3: $z=0.7$ で近くに背景天体が存在する銀河の輝線マップ (右) と背景天体の吸収線スペクトル (左) (Zabl et al. 2021, MNRAS, 507, 4294 改変)



CGM は数値シミュレーションによっても盛んに研究されている。近年の Adaptive-mesh 法を用いた高分解能流体シミュレーションでは、CGM の多相構造や物理・運動状態が 6-7 桁以上の密度ダイナミックレンジで予測されるようになってきた。図 2 に示した FOGGIE シミュレーションでは、熱く低密度なアウトフローや外部から流れ込む冷たく密度の高いインフローが予言されている (Peeples et al. 2019, ApJ, 873, 129)。重元素イオンの分布や放射強度も予測可能であり、次世代望遠鏡での観測との詳細な比較に耐える成果が挙がってきている。しかし、フィードバックの効果はサブグリッドモデルとして恣意的に入れざるを得ず、予言される CGM の多相構造もシミュレーションによって大きく異なっている (Davies et al. 2020, MNRAS, 491, 4462; Oku et al. 2022, ApJS, 262, 9)。

これまでの CGM 研究では、感度に限界があり、個々の銀河に対して物理状態の異なる複数の相を検出することができなかったが、30m 級望遠鏡時代には、多相構造の統一的調査が可能となる。本プロジェクトでは、個々の銀河に対して物理状態の異なる相を包括的に調査し、多相的 CGM の全体像を明らかにする。これにより最先端の数値シミュレーション結果に対する本質的な検証が可能になり、CGM 研究の新たな地平を拓くことができると期待される。

2. 提案するプロジェクトコンセプトは当該分野になにをもたらそうとするのか / Goals and objectives: new scientific steps the proposed concept aims to achieve in the science area

赤方偏移 2 付近の銀河に対し、多相な CGM の詳細観測をガスによる放射・吸収を組み合わせて行うことでその複雑な構造と運動を解明し、銀河進化と物質循環における以下の課題に進展がもたらされると期待される。

1) ガス降着のメカニズムの理解

個々の銀河に対して、Ly α 輝線を用いて銀河間空間から流入するガスを同定し、その形態や運動状態を調べ、銀河の形態やコスミック・ウェブからのガス流入がどこでどのように起こるのかを明らかにする。原始銀河団・銀河群などの極端な環境ではインフローの兆候が得られつつあるが、一般的な銀河におけるガス供給メカニズムは未検証であり、理論予測の通り $z > 2$ ではガスが冷たい ($\sim 10^4$ K) まま流入していくのか否かの検証は非常に重要である。本研究により、この冷たいガス降着の存在を確認し、さらに流入に関する物理量と母銀河の質量や星形成率の関係の知見も得られる。

2) アウトフローガスの物理状態の解明

様々な相のアウトフローガスを同定し、ガスが吹き出す場所、流出するガスの量や運動・電離状態、重元素の含有量などを明らかにする。特に、流出する重元素の量は、銀河の化学進化に大きな影響を与える重要な物理量である。こうしてフィードバックによりガスがどのように流出するか解明する。また、アウトフローガス内において、加熱された相と冷たい相として存在するガス量を求め、超新星爆発が周囲にどのようにエネルギーと運動量を与えるのかを解明する。

3) フィードバック機構の理解

フィードバック機構は momentum-driven と energy-driven と呼ばれる機構に大別される。前者は超新星爆発による放射圧によって ISM に運動量を与えて加速する機構であり、後者は熱的な圧力によって加速される。質量放出率と星形成率の比として定義される mass-loading factor (η) を測定し、 η と流出速度や銀河の質量との関係を調べ、これらの機構を切り分ける (Muratov et al. 2015, MNRAS, 454, 2691)。こうして得られるフィードバック機構の理解は、理論研究におけるサブグリッドモデルへの貴重な制限にもなる。

このような観点から銀河のガスの流入と星形成の促進・抑制の関係を観測的に探り、銀河進化と物質循環の基本描像を検証する。

3. 提案するプロジェクトコンセプトの強みと過去、現在、未来の他のプロジェクト、研究・探査との関係 / The competing power of the proposed project concept and its relationship to past, current, and future other investigations and projects.

最新の高分解能銀河進化シミュレーションでは CGM の多相構造についての予言がされているものの、統一された見解には至っていない。モデルを制限するための決定的な観測を行うことが急務である。本研究の強みは、CGM の多相構造の包括的な観測結果を提供し、シミュレーション結果と公平・自己矛盾のない比較を可能にすることである。ま

た、本プロジェクトで着目する $z=2-2.5$ は、星形成率密度や予想される冷たいガスの降着率が最大となる銀河形成の最盛期といえる時代であり、ガス降着とフィードバックのメカニズムの研究に最適である。

これまでは感度不足や観測波長の問題により、CGM の多相放射マッピングは不可能であったが、次世代望遠鏡により可視赤外域の様々な相のトレーサーの観測が現実的になってきた。CGM 放射は次世代望遠鏡・装置を用いた面分光観測により $10^{-20} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ arcsec}^{-2}$ 程度まで制限できるようになる。またこれまでより暗い天体まで背景光源として使えるようになるため、吸収線解析により放射と相補的な情報も得られ、同一赤方偏移の銀河サンプルの CGM の様々な物理量（銀河からの距離、主軸から測った角度、温度等）の広いパラメータレンジを探る観測が初めて可能となる。

CGM は大規模構造・銀河間物質と銀河本体をつなぐ領域である。より大スケール ($>1 \text{ Mpc}$) では、すばる望遠鏡の Prime Focus Spectrograph (PFS) や TMT/WFOS による IGM トモグラフィ観測、銀河の内部構造などに対応する小スケール ($<10 \text{ kpc}$) では次世代望遠鏡による銀河の高空間分解能面分光観測により理解が進むことが期待される。これらの知見を合わせることで、ガスの獲得から星形成停止に至る銀河進化の根幹をなす物理過程と大局的な物質循環、そしてそれらの相互関係を明らかにすることができる。

4.

プロジェクトが実施する 研究 Scientific investigations of the project

本研究では多相構造を持つ CGM の統一的な理解を目指す。上述の 1～3 の課題に取り組むために、我々は口径 30m 級望遠鏡の可視と近赤外の面分光装置 (TMT の WFOS IFU、IRIS 等) を用いて、 $z=2-2.5$ の銀河の銀河周辺物質の cool phase と warm phase の水素と重元素から放射される輝線の観測 (図 1 参照) を行う。

日本コミュニティの潤沢なデータを活かし、メインのサンプルは PSF-SSP 分光に基づいて $z=2-2.5$ の銀河から選ぶと良いだろう。この赤方偏移であれば、WFOS IFU (観測波長 $0.31 \text{ } \mu\text{m} - 1.01 \text{ } \mu\text{m}$) と IRIS ($0.84 - 2.4 \text{ } \mu\text{m}$) で、本研究に必要な OIV $\lambda 1030$ から $\text{H}\alpha \lambda 6563$ 輝線までを一網打尽に観測することができる (図 1 参照)。特に COSMOS 領域であれば、多波長データに加え、JWST データもあり、銀河本体の形態 (disk の向き) を考慮してサンプルを構築することができる。また、既知あるいは今後 Roman や Euclid で見つかるであろう重力レンズを受けた天体も適切なものがあればサンプルに加え、空間的に分解した描像を得る。さらに、見かけ上近傍に背景天体が存在する銀河も有用である。背景天体のスペクトルに刻まれる吸収線の観測とターゲット銀河の輝線観測の強みを組み合わせて銀河周辺物質の状態を相補的に調べたい (図 3 参照)。

1) ガス降着のメカニズムの理解

銀河に降り積もるガスは重力冷却により $\text{Ly}\alpha$ 輝線を放射する。 $\text{Ly}\alpha$ の輻射輸送を考慮したシミュレーションによれば、流入するガスはコズミック・ウェブに沿って銀河のディスク方向から降り注ぎ、 $\text{Ly}\alpha$ 輝線のプロファイルは青い側のピークが卓越したダブルピークになると予想されている (Blaizot et al. 2023, MNRAS, 523, 3749)。本研究では、WFOS IFU を用いて、このような $\text{Ly}\alpha$ 輝線プロファイルと空間分布 (形態) から個々の銀河について流入ガス (中性水素) を同定する。これにより、銀河の形態やコズミック・

ウェブとの位置関係においてガス流入がどのような場所で起こるのかを明らかにする。重力レンズ効果を受けた銀河であれば、高い空間分解能でインフローガスの形態を調べることが出来る。また、このように個々の銀河について、空間・速度構造を考慮した Ly α 光度から流入ガスの質量を推定することに挑戦する (Daddi et al. 2022, ApJL, 926, 21; Rosdahl & Blaizot 2012, MNRAS, 423, 344)。これにより、銀河シミュレーションで予言されている効率的な冷たいガスの降着 (Dekel & Birnboim 2006, MNRAS, 368, 2) が存在するのか検証も行う。また、流入するガスの量が母銀河の星質量や星形成率とどう関係するかも探り、ガスの流入による星形成の促進の描像を検証する。

2) アウトフローガスの物理状態の解明

本研究では、cool および warm なガスと重元素がどのような場所から吹き出すのか、流出するガスと重元素の質量や運動・電離状態はどのようなものかを調べる。図 1 に示すように、cool/warm phase の元素は細かな温度帯に応じて Ly α , H α , MgII, SiII*, FeII*, [OII], [OIII], CIV, SiIV, OVI, NV 輝線 (H α と [OIII] は IRIS で、それ以外は WFOS IFU で観測)。これにより、初めて個々の銀河について多相 CGM からの輝線を網羅した観測結果を得ることが出来る (図 2 参照)。個々の銀河から流出する物質の質量はそれぞれの成分の光度から、運動は速度成分から、電離状態は各成分の存在場所と [OIII]/H α 輝線比から求められる。また、流出速度と流出する物質の質量から、各相の質量放出率を推定する。背景天体が存在する銀河の場合は、吸収線から柱密度が求められるため、輝線マッピングに基づく水素や重元素の質量推定のキャリブレーションも行うことが出来る。さらに、流出するガスの量や流出の効率と星形成率の関係を調べ、ガスの流出による星形成抑制の描像を検証する。

3) フィードバック機構の理解

星形成フィードバック機構を区別するために、それぞれの銀河について mass-loading factor と銀河の円軌道速度を求め、その関係を明らかにする。Mass-loading factor μ は上記 2 で求める質量放出率と星形成率 (銀河本体の H α / H β 輝線から推定) の比として定義される。また、流出するガスのうち、warm phase と cool phase のガスの質量から、超新星爆発が周囲にどのようにエネルギーと運動量を与えるのか示唆を得る。

このような科学研究のため、WFOS IFU では大きな視野を活かしつつも波長分解能と空間分解能を維持できる観測を行う。IRIS では一番大きな視野設定を用いたい。目標とする深さはシミュレーションからの予言を考慮し、特に H α ハローは今後 ULTIMATE-Subaru や TAO/SWIMS で行う近赤外域での狭帯域フィルター撮像サーベイのスタッキング解析の結果を反映させる。

5.

スケジュール Schedule

大まかなスケジュール / Rough schedule

主として Subaru (ULTIMATE, PFS)、TAO (SWIMS)、TMT (WFOS, IRIS, WFOS IFU) の使用を想定した場合の大まかなスケジュールを示す。本プロジェクトの重要な要素の一つが、TMT/WFOS のアップデート案として検討されている IFU モー

ドの搭載である。我々は今後、主にサイエンスの面からこの計画の実現に協力していきたい。

2020年代後半から2030年代前半にかけて、すばる PFS-SSP サーベイや、Euclid、Romanなどに代表される広域分光探査をベースにサンプルの検討を行う。また、PFS-SSPの銀河進化セクションで予定されている、IGM トモグラフィー探査などに基づき、銀河激進化期における銀河間ガスと銀河の関係に関する知見を蓄える。Subaru/ULTIMATE や TAO/SWIMS の始動に合わせ、パイロットプロジェクトとして、 $z \sim 2$ の銀河の $H\alpha$ ハローの検出を目指す。

2030年代以降、これらの成果に基づき TMT/IRIS 観測のプロポーザルを用意する(いわゆる intensive proposal 相当を想定)。TMT 始動に合わせて、IRIS 観測を開始する。また相補的な研究として WFOS を用いた IGM トモグラフィーや、吸収線を利用した CGM の研究を行う。WFOS IFU の科学運用開始に向けて、プロポーザルの準備、観測を行う (TMT 始動時点で WFOS IFU が利用可能であれば、IRIS と WFOS IFU 観測は一つのプロジェクトとしてプロポーザルを準備する予定である)。

High-redshift cosmology with Subaru HSC, PFS, and CMB experiments

すばる望遠鏡 HSC, PFS と CMB 実験による
高赤方偏移宇宙論

0.

概要

Summary

High-redshift cosmology with Subaru HSC, PFS, and CMB experiments

すばる望遠鏡 HSC, PFS と CMB 実験による
高赤方偏移宇宙論

Project Category

3. Science only (新規の装置・施設の開発を含まないサイエンスの方向性の提案)

Abstract of science goals, objectives, and methods

This project aims to precisely measure the large-scale structure of the universe at high redshifts ($z > 2.5$) to conduct a thorough test of the Λ CDM standard cosmology. It will use the newly developed medium-band filters for Subaru HSC and Subaru PFS. In addition, data from CMB experiments that Japan participates in, such as the Simons Observatory and LiteBIRD, will be used. The project will also collaborate with the U.S. spectroscopic survey DESI-2. For cosmological observables, we will use the CMB lensing caused by the large distant galaxy sample and the 3-dimensional clustering of this galaxy sample. Medium-band filters will enable us to detect this galaxy sample with high purity from imaging data. Combining this sample with data from CMB experiments will allow for the measurement of the CMB lensing effect. Furthermore, follow-up observations of this sample with DESI-2 and PFS will yield a 3-dimensional galaxy clustering signal. The project plans to use approximately 200 nights of Subaru time to survey an area of about 2000 square degrees. The data obtained from this project will enable not only the thorough test of Λ CDM but also have a wide-ranging impact in cosmology, including improvements in the measurement accuracy of the tensor-to-scalar ratio, measurement of the sum of neutrino masses, and exploration of the physics of the early universe. Additionally, the dataset obtained from this project is expected to have a high legacy value, impacting other fields such as galaxy evolution.

プロジェクトの意義と科学目的・方法の要旨

本プロジェクトは、高赤方偏移 ($z > 2.5$) の宇宙の大規模構造を精密に測定し、 Λ CDM 標準宇宙論の徹底検証を行うことを目的とする。そのために、新たに作成されるすばる望遠鏡 HSC の中間帯域フィルターとすばる望遠鏡 PFS を用いる。さらに

Simons Observatory や LiteBIRD などの日本が参加する CMB 実験データを用いる。加えて、米国の分光サーベイ DESI-2 と協力の下プロジェクトを進めていく。大規模構造の観測量としては大規模遠方銀河サンプルが引き起こす CMB 重力レンズ効果と大規模遠方銀河サンプルの 3 次元クラスタリングを用いる。大規模遠方銀河サンプルを撮像データから高純度で検出するために、HSC の中間帯域フィルターを用いる。このサンプルと CMB 実験のデータと組み合わせることで、CMB 重力レンズ効果を測定する。また、このサンプルを DESI-2 及び PFS でフォローアップ観測することで 3 次元銀河クラスタリング信号を得る。本プロジェクトでは約 200 晩のすばる時間を用いて、2000 平方度程度のサーベイを行う予定である。本プロジェクトで得られるデータによって可能になるサイエンスは Λ CDM の徹底検証だけでなく、テンソル・スカラー比の測定確度の向上、ニュートリノ質量和の測定、初期宇宙の物理の探査など宇宙論分野における幅広い波及効果が期待できる。また、本プロジェクトによって得られるデータセットは、銀河進化など他の分野にも影響を及ぼす高いレガシー的価値を持つことが期待される。

Principle Investigator

Name: Hironao Miyatake

Affiliation: Kobayashi-Maskawa Institute for the Origin of Particles and the Universe (KMI) , Nagoya University

E-mail address: miyatake@kmi.nagoya--u.ac.jp

プロジェクト代表者

氏名 : 宮武 広直

所属 : 名古屋大学素粒子宇宙起源研究所

E-mail アドレス : hironao.miyatake@nagoya-u.jp

Co-investigator and his/her role /

Yuichi Harikane (University of Tokyo) : Production of high-redshift galaxy sample

Atsushi J. Nishizawa (Gifu Shotoku Gakuen University) : Production of HSC medium-band filters

Yuji Chinone (KEK) : Analysis of CMB experiments

プロジェクト共同提案者とその役割

播金 優一 (東京大学) : 大規模遠方銀河サンプルの作成

西澤 淳 (岐阜聖徳学園大学) : HSC 中間帯域フィルターの作成

茅根 裕司 (KEK) : CMB 実験のデータ解析

1.

プロジェクトの意義

Science goals of the project

高赤方偏移の大規模構造を多角的に測定することにより、 Λ CDM 標準宇宙模型における加速膨張をはじめとする基礎物理学における未解決問題を探る。

2.

プロジェクトの科学目的

Science goals of the project

本プロジェクトは、今までの銀河サーベイ計画では到達できなかった高赤方偏移 ($z > 2.5$) の宇宙の大規模構造を精密に測定し、 Λ CDM 標準宇宙模型の徹底検証、インフレーションの痕跡と物理機構の探査、ニュートリノ質量和の測定を行う。

本プロジェクトを遂行するため、すばる 2 のレガシー観測装置群のうち HSC と PFS を最大限に活用する。特に新たに開発中の HSC 中間帯域フィルターを用いる。また日本が参加する Simons Observatory、参加が期待される CMB-S4、主導する LiteBIRD といった CMB 実験のデータを組み合わせる。これらのデータを組み合わせ、大規模構造の測定を異なる観測量を用いて多角的に行うことで、大規模構造の精密測定が可能となる。

3.

プロジェクトの科学的意義と目標の根拠

Rationale for the scientific goals and objectives

1. 科学的意義の根拠：研究の背景、当該分野の研究状況、等 / Scientific background, status of the relevant scientific area, etc.

1990 年代後半から 2010 年代前半における Ia 型超新星、宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave background; CMB)、バリオン音響振動などの様々な宇宙論的観測により、 Λ CDM 標準宇宙模型が確立された。 Λ CDM 模型は、上に述べた宇宙論的観測量を非常によく説明するものの、宇宙のエネルギー密度のうち既知の物質は約 5% しかなく、残りの 95% のうち 27% は未知の物質である暗黒物質、68% は宇宙の加速膨張を引き起こす未知のエネルギーである暗黒エネルギーであることを要求する。2010 年代後半に入り、赤方偏移 $z < 1$ における宇宙の大規模構造の精密測定 (すばる望遠鏡 HSC、欧州の KiDS、米国の DES といった撮像データを用いた弱重力レンズ効果の測定と米国の BOSS, eBOSS といった分光銀河サンプルを用いた銀河クラスタリングの測定) が進むと、宇宙構造の凸凹の程度を表すパラメータ S_8 において、CMB 観測から予言される値と比べて $z < 1$ の大規模構造の測定から得られた値は小さいことが示唆された。これを S_8 テンションという。現在、この違いは 2.5σ 程度であるが、2020 年代における次世代サーベイ (Vera C. Rubin 天文台による LSST 撮像サーベイ、すばる望遠鏡 PFS と DESI による分光銀河サーベイ、Roman 宇宙望遠鏡と Euclid 宇宙望遠鏡による撮像 + 分光銀河サーベイ) により赤方偏移 $z < 2.5$ においてより高い統計精度での測定が行われる予定である。

2. 提案するプロジェクトコンセプトは当該分野になにをもたらそうとするのか / Goals and objectives: new scientific steps the proposed concept aims to achieve in the science area

本プロジェクトは 2030 年代を見据え、より高い赤方偏移、具体的には $2.5 < z < 4$ における宇宙の大規模構造の精密測定を行い、 S_8 テンションを高赤方偏移まで連続的に調べる。これにより Λ CDM 標準模型の更なる検証、もしくは Λ CDM 標準模型を超える理論の探索が可能となる。また、高赤方偏移では大規模構造の非線形性が弱く、観測可能な宇宙論体積が増えるため、大スケールの信号を用いて初期宇宙の物理を探ることが可能となる。加えて、 $z < 4$ の大規模構造を測定することで、LiteBIRD 計画によるテンソル・スカラー比の測定における系統誤差を低減することが可能となる。さらに、LiteBIRD 計画による光学的深さ τ の精密測定と組み合わせることでニュートリノ質量和の測定精度を向上し、ニュートリノの階層構造を決定することができると期待される。本プロジェクトでは HSC の中間帯域フィルターと PFS を用いた 2000 平方度程度のサーベイを行う予定であり、これらのレガシー的価値を持つデータを取得することで、銀河進化など他の分野においても幅広い波及効果がある。

3. 提案するプロジェクトコンセプトの強みと過去、現在、未来の他のプロジェクト、研究・探査との関係 / The competing power of the proposed project concept and its relationship to past, current, and future other investigations and projects.

本プロジェクトでターゲットとする赤方偏移のうち、低赤方偏移側 ($2.5 < z < 3.2$) では、純度の高い銀河サンプルを作成するためにすばる望遠鏡 HSC と Blanco 望遠鏡 DECam の中間帯域フィルターを用いる。DECam の中間帯域フィルターだけでなく、大集光力を持つすばる望遠鏡 HSC を用いることで、より純度の高い銀河サンプルを作成することが可能となる。また、低赤方偏移側では分光銀河サーベイ DESI の後継である DESI-2 で分光を行う予定である。DESI-2 の前身である DESI には日本は参加していないが、HSC で取得された中間帯域フィルターのデータを持って DESI-2 に参加することで当該分野における日本のプレゼンスを高めるとともに、異なるコミュニティの持つ力を結集することで、高赤方偏移の大規模構造を用いた精密宇宙論を遂行する。

高赤方偏移側 ($3.2 < z < 4.0$) の大規模観測は、より銀河が暗くなるので、8.2m の主鏡と広視野観測を可能とする主焦点を持つすばる望遠鏡のみが遂行可能である。LSST、Roman、Euclid は可視光域に中間帯域フィルターを持たないので、中間帯域フィルターを用いた高純度銀河サンプルの作成は HSC のみが可能である。また、 $3.2 < z < 4.0$ の銀河の分光には $i-24$ まで分光可能な PFS が必要である。まだ予算獲得には至っていないものの、2035 年から 6m 望遠鏡 2 台に約 15,000 本のファイバーを持つ多天体分光装置を搭載し、分光銀河サーベイを行う Spec-S5 が計画されている。Spec-S5 が始まる前に $z < 4.0$ の大規模構造測定を行おうとするのが本プロジェクトである。ただし、後述するように、2026 年から始まる分光銀河サーベイ DESI-2 と Spec-S5 を主導する Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) の David Schlegel 氏らと協力して本プロジェクトは進めており、本プロジェクトと DESI-2 及び Spec-S5 とは競合関係で

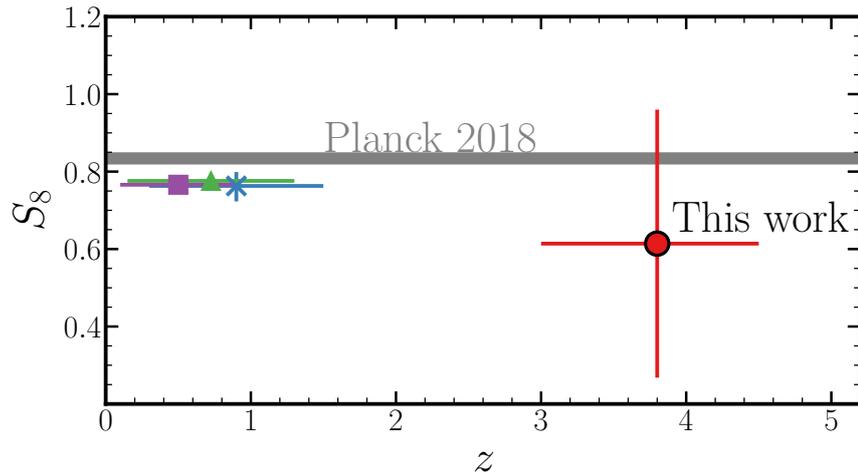
はなく協力関係にあり、赤方偏移の棲み分けも明確である。

4.

プロジェクトが実施する 研究

Scientific investigations of the project

図 1: S_8 の測定の現状。 $z < 1$ の測定は HSC, DES, KiDS サーベイによるもの。 Planck より小さい値を示唆している。 赤点は Miyatake et al. (2022) において $z \sim 4$ のライマン・ブレイク銀河と Planck の CMB レンズを組み合わせることにより得たもの。 誤差が大きい $z \sim 4$ の大規模構造から S_8 を測定した初めての例である。



1つ目の観測量である銀河重力レンズ効果では、撮像サーベイで検出された銀河周りの暗黒物質分布を CMB から来る光が曲げられる効果（銀河-CMB 重力レンズ効果）を用いる。これにより、宇宙の暗黒物質を含む物質分布を測定することができる。提案者らが行った先行研究（Miyatake et al., 2022, PRL, 129, 061301）では、HSC サーベイで観測された約 300 平方度の天域において、広帯域フィルターを用いたドロップ・アウト法によって選択された約 150 万個の $3.2 < z < 4$ (g ドロップアウト) のライマンブレイク銀河（Harikane et al., 2022 ApJS, 259 (1), 20）の周りの暗黒物質分布を Planck 衛星の CMB 重力レンズマップを用いることで、世界で初めて $z > 2.5$ の銀河周りの暗黒物質分布を測定することに成功した。さらにこのライマンブレイク銀河の 2次元クラスターリング信号を組み合わせることで、世界で初めて $z > 2.5$ における S_8 の測定に成功した(図 1)。ただし、 S_8 の測定の信号雑音比は未だ小さく、 S_8 テンションを検証するためには更なる統計が必要である。本プロジェクトで作成する大規模遠方銀河サンプルは、この先行研究の 10 倍程度の銀河からなる。さらに、CMB-S4 ではノイズ・レベルが Planck 衛星の約 30 分の 1 になるため、 S_8 テンションの検証が可能なレベルまで統計誤差が小さくなる。

2つ目の観測量である 3次元銀河クラスターリングは、高赤方偏移分光銀河サンプルを用いることで測定可能となる。本プロジェクトではライマンブレイク銀河及びライマン α 輝線銀河を中間帯域フィルターを用いて検出し、この銀河サンプルを分光フォローアップ

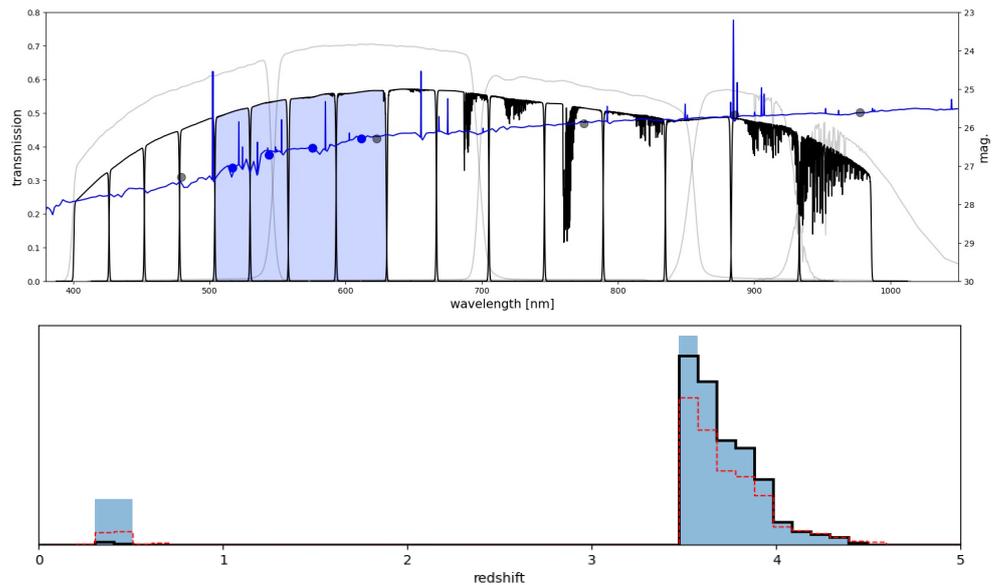
することで高赤方偏移分光銀河サンプルを作成することを想定する。3次元銀河クラスタリングからはバリオン音響振動や赤方偏移歪みなどの測定から S_8 に制限を与えることができる（正確にはバリオン音響振動については物質のエネルギー密度 Ω_m の制限を通して S_8 の制限を強めることができる）。さらに、3次元銀河クラスタリングに上で述べた CMB 重力レンズを組み合わせれば S_8 の制限はより強くなる。

以上の高赤方偏移宇宙論を遂行するために最も重要なのは、銀河サンプルにおける低赤方偏移の銀河の混入量を低減することである。ライマンブレイク銀河においては、この混入は主にバルマーブレイクをライマンブレイクと間違えることによって起こる。混入率は明るい銀河ほど大きく、広帯域フィルターを用いたドロップアウト法で銀河を選択した場合、 $i < 23$ では 70% 程度にまでなる (Ono et al., PASJ, 70, S10)。つまり、このままでは銀河重力レンズ効果や3次元銀河クラスタリングを用いても低赤方偏移の大規模構造の情報が混入してしまう（上述の先行研究では $i < 25.5$ の銀河を用いているため、混入率は小さい）。

我々は、シミュレーションを用いて、混入率の低減には中間帯域フィルターが有用であることを示した。図2は HSC の WIDE レイヤーにおける5つの広帯域フィルターにおける $i < 25$ の銀河サンプルの混入率 16% が、中間帯域フィルターを用いると 10 分積分の場合 7%、60 分積分の場合 1% になることを示す。なお、中間帯域フィルターを用いた銀河選択では、ライマンブレイク銀河だけでなくライマン輝線銀河も相当数検出される。また、本プロジェクトで使用する予定の HSC 中間帯域フィルターに必要な経費はすでに国際先導研究 (PI: 宮崎聡) で獲得済みである。

まず、本プロジェクトにおける低赤方偏移側 ($2.5 < z < 3.2$) の測定について述べる。純度の高い銀河サンプルを作成するために、すばる望遠鏡 HSC と Blanco 望遠鏡 DECam の中間帯域フィルターを用いたサーベイを行う。後者は LBNL の David Schelgel 氏が主導しており、既に共同観測の検討を始めている。DECam の中間帯域フィルターだけでなく、大集光力を持つすばる望遠鏡 HSC を用いて DECam の中間帯域フィルターで得られたサンプルを較正することで、より純度の高い銀河サンプルを作成することが可能となる。また、低赤方偏移側では 5000 平方度にわたる約 1000 万個の銀河を、分光銀河サーベイ DESI の後継である DESI-2 を用いて分光を行う予定である。DESI には日本は参加していないが、HSC で中間帯域フィルターのデータを取得すれば DESI-2 に参加可能である。低赤方偏移側の観測に必要な HSC の夜数は 40 晩程度を見込んでいる。Simons Observatory の CMB データと組み合わせた銀河重力レンズ効果を用いた解析では $\Delta S_8 \sim 0.05$ 程度の測定が可能となり、現在の $z < 1$ における大規模構造の測定と同等となる。3次元クラスタリングでも同等の測定が可能となる。

図2: (上)HSCの中間帯域フィルター(黒線)と広帯域フィルタ(灰色線)(下)青色は5つの広帯域フィルターのみを用いて選択した遠方銀河の赤方偏移分布、黒線は広帯域フィルターと青色で塗りつぶされた中間帯域フィルター(10分積分)選択した銀河、赤線は広帯域フィルターと上図で青色で塗りつぶされた中間帯域フィルター(60分積分)を用いて選択した銀河。中間帯域フィルターを用いて60分積分をした場合、低赤方偏移銀河の混入はほとんどないことがわかる。



次に、高赤方偏移側 ($3.2 < z < 4.0$) の測定について述べる。高赤方偏移ではより銀河が暗くなるので、HSCがその威力を発揮する。本プロジェクトではHSCの中間帯域フィルターを用いて2000平方度を10分積分でサーベイする。このサーベイに必要な夜数は130晩程度である。これにより約700万個の高赤方偏移銀河を選択することができる。CMB-S4と組み合わせた銀河重力レンズ効果を用いた解析では $\Delta S_8 \sim 0.03$ と現在の $z < 1$ における大規模構造の測定と同等となる。さらに、この高赤方偏移銀河サンプルをPFSでフォローアップ観測(PFS<IIサーベイ)し、3次元銀河クラスタリングを測定する。中間帯域フィルターで選択された $23 < i < 24$ の銀河はPFSの15分積分で十分に赤方偏移の同定が可能である。この3次元銀河クラスタリングを用いることで銀河重力レンズと同等の S_8 の測定を行うことが可能である。このサーベイに必要な夜数は約70晩である。このサーベイはHSCとPFS合わせて約200晩となる。このサーベイを2030年代前半の暗夜に行うことを提案する。現在のところ、PFSのSSPサーベイ直後の暗夜を使う新規装置の計画はないため、すばる3で新規に開発される装置が動き出す前に、世界の最先端の宇宙論研究を行うだけでなく、2000平方度におけるHSC中間帯域フィルターのデータとPFSの分光データというレガシー的価値が高いデータの創出に大きく寄与することができる。また、以上の中間帯域フィルターで得られた銀河サンプルはSpec-S5のターゲットとなることが期待される。

さらに、上で述べたように、これらのデータセットで可能なサイエンスは S_8 テンションだけではない。 $z < 4$ の大規模構造を測定することで、LiteBIRD計画によるテンソル・スカラー比の測定における系統誤差を低減することが可能となる。また、LiteBIRD計画による光学的深さ τ の精密測定と組み合わせることでニュートリノ質量和の測定精度をあげ、ニュートリノの階層構造を決定することができると期待される(Sailer, N. et al., 2021, JCAP, 12, 49)。また、本プロジェクトで得られる中間帯域フィルターと分光データは、銀河進化など他の分野においても幅広い波及効果が期待できるという意味でレガシー的価値が高い。

5.

スケジュール

大まかなスケジュール / Rough schedule

Schedule

2025年 Simons Observatory 開始、HSC 中間帯域フィルターの観測を開始
 2027年 DESI-2 のための HSC 中間帯域フィルターの観測を開始 (40 晩程度)
 2029年 DESI-2 開始
 2032年 HSC 中間帯域フィルター /PFS を用いたサーベイを開始 2036年を目処に完了 (360 晩程度)、CMB-S4 開始
 2035年 Spec-S5 開始

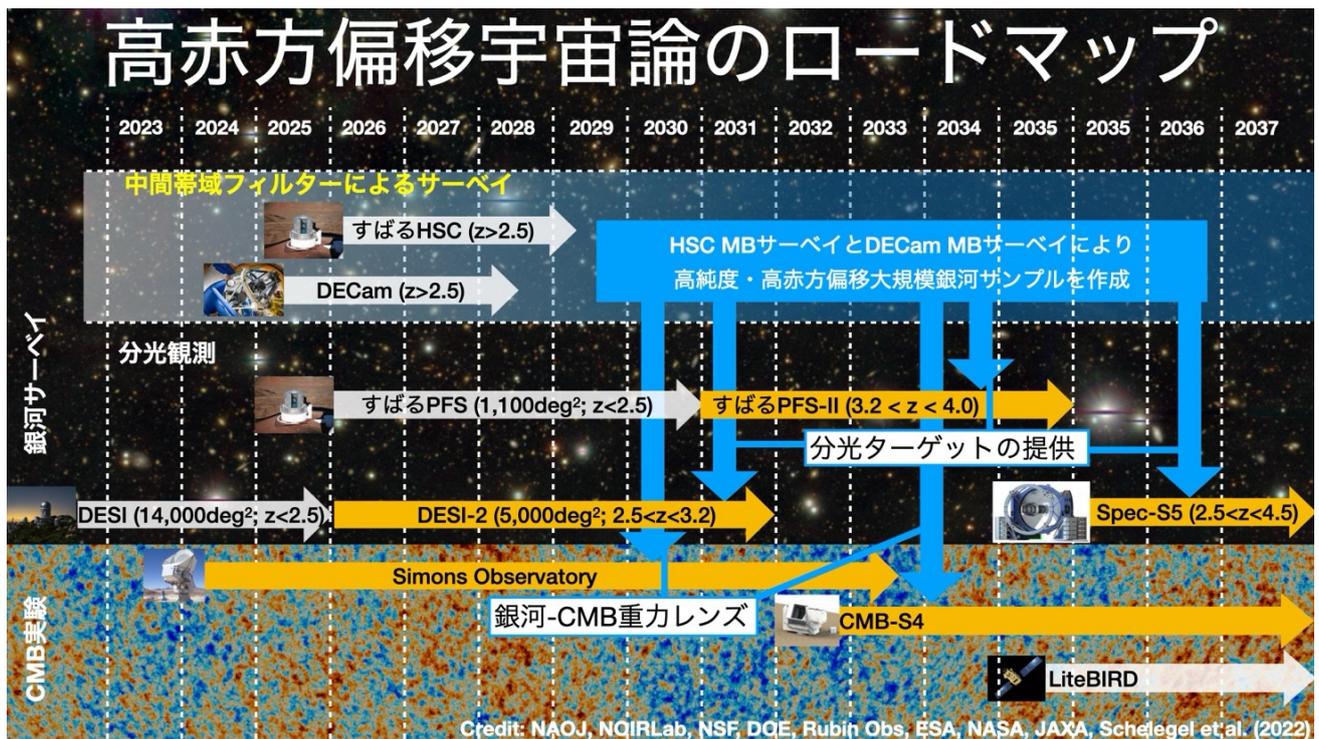


図 3: 高赤方偏移宇宙論のロードマップ

Observational Study of First Cosmic Structures in Early Universe

天体形成史の始まりの観測的研究

0.

概要

Summary

Observational Study of First Cosmic Structures in Early Universe

天体形成史の始まりの観測的研究

Project Category

3. Science only (新規の装置・施設の開発を含まないサイエンスの方向性の提案)

Abstract of science goals, objectives, and methods

This project is dedicated to understanding the formation and evolution of the universe's earliest structural components: the first stars, galaxies, and black holes. These entities are crucial for a comprehensive understanding of the universe's formative history, yet their study is in its nascent stages. With the deployment of the James Webb Space Telescope (JWST) and the advent of 30-meter class telescopes such as the TMT and ELT, alongside next-generation space observation satellites, we anticipate significant advancements by merging theoretical frameworks with observational data in the coming decades.

Our goal is to craft and execute a strategic plan enabling the Japanese astronomical community to take the lead in groundbreaking astronomical research in a highly competitive international landscape. By developing theoretical methods to locate the universe's earliest sources, refining emission line diagnostic techniques for spectroscopic analysis, and advancing the identification and study of these primordial objects through data from JWST, TMT, and ELT, we aim to elevate our research capabilities. Given the challenges in studying these faint, distant entities, which demand exceptionally sensitive spectroscopic instruments, our involvement in the Habitable Worlds Observatory (HWO) project, slated for the 2040s, will be pivotal. This project highlights the importance of global cooperation in modern observational astronomy and ensures that the Japanese community continues to play an important role in worldwide astronomical efforts.

プロジェクトの意義と科学目的・方法の要旨

このプロジェクトは、宇宙の構造形成史において最も基本的な役割を果たす初代星、初代銀河、及び初代ブラックホールの形成と進化の解明に焦点を当てている。これらの初代天体は、宇宙の歴史を理解する上で不可欠でありながら、その観測的研究はまだ始まったばかりである。ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST) を筆頭に、30メートル級望遠鏡 (TMT・ELT) や次世代宇宙観測衛星の実現によって、今後の数十年間で理論と観

測の融合を通じて大きな進歩が見込まれる。

本プロジェクトは、激しい国際競争の中で日本が初代天体研究の最前線に立つための戦略を策定し、実行することを目的としている。理論に裏打ちされた初代天体探査手法の提案、分光学的特徴づけに利用する輝線診断手法の確立、そして JWST や TMT、ELT による初代天体の直接観測から得られるデータに基づく同定と性質の解明へと、研究の水準を高めていく。特に、遠方の小さい初代天体の研究には、更なる高感度の分光能力が求められるため、2040 年代に計画されている Habitable Worlds Observatory (HWO) への積極的な参加を目指し、日本の研究コミュニティのさらなる進展に貢献する。国際的な協力が不可欠な現代の観測的天文学において、このプロジェクトは日本が研究界で重要な役割を担い続けるための重要な一歩となる。

Principle Investigator

Name: NAKAJIMA, Kimihiko

Affiliation: Kanazawa University

E-mail address: knakajima@staff.kanazawa-u.ac.jp

プロジェクト代表者

氏名 : 中島 王彦

所属 : 金沢大学

E-mail アドレス : knakajima@staff.kanazawa-u.ac.jp

Co-investigator and his/her role /

HARIKANE, Yuichi (Univ. Tokyo) : Exploration of high-redshift universe, spectroscopic studies, science investigation

OUCHI, Masami (NAOJ / Univ. Tokyo) : Exploration of high-redshift universe, spectroscopic studies, science investigation

ONO, Yoshiaki (Univ. Tokyo) : Exploration of high-redshift universe, spectroscopic studies, science investigation

プロジェクト共同提案者とその役割

播金 優一 (東京大学) : 高赤方偏移天体の探査、分光学的研究、科学検討

大内 正己 (国立天文台 / 東京大学) : 高赤方偏移天体の探査、分光学的研究、科学検討

小野 宜昭 (東京大学) : 高赤方偏移天体の探査、分光学的研究、科学検討

1.

プロジェクトの意義

現在の宇宙に存在する多種多様な天体の形成・進化の起源を明らかにする。

Science goals of the project

2.

プロジェクトの科学目的 Science goals of the project

このプロジェクトは、初期宇宙に存在した、現在まで観測的研究が十分に進んでいない初代天体 — 初代星、初代銀河、初代ブラックホール — を観測によって同定し、その形成と進化の過程を解明することを目指す。この目的は、天体の特性を理解するだけでなく、宇宙再電離現象や重元素の進化といった、初期宇宙の天体形成に深く関連するプロセスを包括的に理解することにも焦点を当てる。最近、JWST の初期観測結果が、理論的に予測されていた初代天体形成時期（赤方偏移 $z \sim 15-25$ ）の天体の存在を示唆し、その分光学的特徴の解析が始まっている。30メートル級望遠鏡（TMT や ELT）や次世代宇宙観測衛星 Habitable Worlds Observatory (HWO) に搭載される、静止系紫外スペクトルを観測するための近赤外線波長域での高感度分光器が、一連の研究を大きく発展させる。JWST で探り得ない観測を TMT や HWO が可能にするための観測戦略・装置仕様に関する検討が、本科学目標の達成には必要である。

3.

プロジェクトの科学的 意義と目標の根拠 Rationale for the scientific goals and objectives

1. 科学的意義の根拠：研究の背景、当該分野の研究状況、等 / Scientific background, status of the relevant scientific area, etc.

初代星、初代銀河、及び初代ブラックホールの形成と進化の解明は、天体物理学の基本的な問題であり、宇宙の構造形成史の始まりを理解する上で重要である。特に銀河形成に関わる複雑なバリオン物理は、観測的洞察無しには完全には理解され得ず、観測と理論との融合をもって、その形成の最初期段階に迫ることができる。

現代の大規模プロジェクト、特にジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST) や TMT・ELT は、初代天体の直接的観測を主要目標として進められている。JWST は 2022 年夏の科学運用開始以来、宇宙誕生後約 3.4 億年（赤方偏移 $z=13.2$ ）の時代の銀河を同定するなど、最遠方銀河の記録を更新し続けている (e.g. Harikane et al. 2024, ApJ, 960, 56)。しかしながら、これまでに同定された非常に遠方の銀河は、明るく成長した銀河であり、また既に豊富な金属が存在していることが示されている (e.g. Nakajima et al. 2023, ApJS, 269, 33)。JWST から得られるより深い観測データにより、初代天体の候補が今後さらに見つかることが期待されるが、これらの候補の分光学的研究を進めるためには、さらに高感度の分光能力を見据える必要がある。

2. 提案するプロジェクトコンセプトは当該分野になにをもたらそうとするのか / Goals and objectives: new scientific steps the proposed concept aims to achieve in the science area

JWST を上回る集光力と感度を備えた分光器が（波長範囲は異なるものの）TMT・ELT や HWO によって計画されていることから、初代天体の分光学的研究がこれらの将来の観測装置によって本格的に実現可能となることが期待される。本プロジェクトコンセプトは、将来の観測による初代天体の分光観測に基づく詳細な性質調査を実現することを目的とする。さらに、将来の観測に先駆けて、観測的・理論的な準備研究を推進し、初

代天体研究の新たなアプローチ—例えば、初代星の質量分布やブラックホールの存在にどのように迫ることができるか—の確立を目指す。

3. 提案するプロジェクトコンセプトの強みと過去、現在、未来の他のプロジェクト、研究・探査との関係 / The competing power of the proposed project concept and its relationship to past, current, and future other investigations and projects.

初代天体の観測的研究は、TMT の最優先課題の一つであり、この研究の実現に向けた準備が、日本によって主導されることの重要性は非常に大きい。天体の分光学的性質調査やブラックホールの同定方法の確立には、より低赤方偏移における光電離モデル予想および大きな分光データを用いた観測的検証が不可欠である。すばる望遠鏡 / PFS が提供する分光ビッグデータを利用することで、日本の光赤外コミュニティは初代天体の分光学的研究に向けた準備研究をリードできるポジションにある。これらの研究は、日本が参加を検討している HWO プロジェクトへと直接つながる可能性を持つ。HWO を利用した初代天体研究を日本が中心となって計画し実施するためには、すばる望遠鏡、ローマン宇宙望遠鏡、TMT/ELT などを通じて初代天体研究を着実に進めることが重要である。

日本には初期宇宙における構造形成を数値シミュレーションで世界をリードする理論研究者が多数在籍しており、戦略的な観測研究方法の策定に重要な視点を提供する。また、播金 PI プロジェクトにあるように、(明るい) 最遠方銀河探査において日本は重要な役割を果たしていく。JWST や将来の TMT、HWO の実現により、理論と観測の融合が現実のものとなり、この分野は大きな発展の機会を迎えている。

4.

プロジェクトが実施する
研究
Scientific
investigations of the
project

1. 初代星・初代銀河・初代ブラックホール探査

現在、JWST により赤方偏移 $z > 10$ を超える天体の分光同定が急速に進展している。しかし、従来のライマンブレイク法で選別されたサンプルの中に、始原的な「初代天体」がどの程度含まれているかは不明である。理論的には、初期宇宙の超高密度領域（原始銀河団）において、近傍の明るい天体からの強力な紫外線放射が周囲の水素分子を解離し、通常の星形成を抑制すると予測されている。このような環境下では、超大質量星や種族 III 星からなる銀河が形成され、さらには超大質量星が直接崩壊して「初代ブラックホール」を形成する可能性が指摘されている (e.g., Subaru-TMT Science Book 2020)。この理論的予測を裏付ける観測結果も報告され始めている。最近では $z = 10.6$ の明るい銀河周辺において、非常に強力な HeII 輝線を持つ種族 III 星からなる銀河の候補が JWST の面分光観測により発見された (Maiolino et al. 2024, A&A, 687, A67)。また、Ly α 輝線天体の JWST 分光観測を通じ、極めて低金属量天体、あるいは種族 III 星を含む天体の端緒を捉える研究も着実に進展している (Nakajima et al. arXiv:2506.11846)。

今後、Euclid や Roman 宇宙望遠鏡、さらには、すばる望遠鏡 / ULTIMATE-Subaru や GREX-PLUS といった広視野探査計画により、日本コミュニティが主導する高赤方偏移天体 (Ly α 輝線天体含む) の探査が飛躍的に進む (播金 PI のプロジェクトを参照)。これら広視野探査で発見された天体およびその周辺環境を、強力な水素・ヘリウム輝線を

指標として集中的に精査することで、始原ガスから誕生したばかりの銀河やブラックホールの同定、およびその形成理論の検証が可能となる。JWSTによる面分光と日本主導の広視野観測プロジェクトを相補的に組み合わせるこのアプローチは、TMT時代においても日本が本分野での存在感を維持し、国際的な主導権を確保し続けるための鍵となる。

2. 初代天体の分光学的特徴づけの準備研究

[a. 輝線診断]

図1aに示される水素とヘリウムの再結合線を組み合わせた輝線診断は、種族IIIの星から成る初代銀河や直接崩壊ブラックホールを、より進化した銀河と見分けることができる可能性を示唆している。さらに、初代銀河内の大質量星が支配的であるほどHeII輝線が顕著になることから、始原ガスから形成される最初の星の質量分布（初期質量関数）に関する示唆も観測から得られる可能性がある。より多様な初期質量関数や種族IIの星との共存を考慮し、高分解能の宇宙論的ズームインシミュレーションの予測を取り入れつつ、理論のさらなる精緻化が求められる。

図1bは金属の輝線を組み合わせた金属量の輝線診断図であり、ここでは可視光輝線を例として挙げているが、静止系紫外の金属輝線による同様の診断も可能である。ガス中の金属量は過去の星形成活動を反映し、初代天体の判別に不可欠な指標である。紫外輝線を含むこれらの金属量指標をテストし、その正確性を確認することは重要である。比較的赤方偏移におけるすばる望遠鏡/PFSを用いた徹底した調査が望まれる。

[b. ブラックホールの同定]

最近のJWST分光観測は、遠方宇宙に想定以上に多くの巨大ブラックホール活動を示す天体が存在することを示唆している (e.g. Harikane et al. 2023, ApJ, 959, 39)。遠方宇宙でのAGNの存在を判別する手法の確立は、初代ブラックホールを見据え重要である。JWST分光観測では、水素のバルマー輝線に伴う速度的に広がった輝線成分が効果的に活用されているが、この手法では赤方偏移 $z < 7$ までしか探査できない。TMTやHWO時代に向けては、静止系紫外波長域の分光学的特徴の活用が望まれる。特に、星形成銀河では説明し得ない高電離輝線の活用が注目される。例として、JWSTによって観測された $z=10.6$ の明るい天体GN-z11は、[NeIV]輝線を明確に持つ(図2)。このイオンは63eV以上の高エネルギー放射が必要であることから、GN-z11の説明には星のみでは不十分で、AGNの存在が示唆される (Maiolino et al. 2024, Nature, 627, 59)。

さらに、[NeV] $\lambda 3426$ (電離ポテンシャル97eV)などの高電離輝線を利用することで、星形成銀河内に隠された高エネルギー放射のSEDを明らかにし、非熱的放射源であるブラックホールの質量を推定できる (e.g. Kawaguchi et al. 2003, ApJ, 593, 69; Hatano et al. 2024, ApJ, 966, 170)。超巨大ブラックホールの起源を探る上で、初期宇宙に存在するブラックホールの質量範囲を明らかにすることは極めて重要である。すばる望遠鏡/PFSとX線観測結果を組み合わせ、本手法の妥当性を低赤方偏移で検証することが、TMTおよびHWO時代の初期宇宙ブラックホール研究にとって重要な道筋をもたらす。

[c. 宇宙再電離進行プロセス]

最新のJWST分光観測は、明るい銀河のLy α 輝線近辺の紫外線スペクトルの削れ具合 (Ly α Damping Wing) を検出することで、銀河間ガスの電離状態を直接調べることが

可能になったことを示している (e.g. Umeda et al. 2024, ApJ, 971, 124)。この手法により、赤方偏移 $z=5-6$ より遠方で発生したとされる宇宙再電離の進行プロセスを観測的に探ることが可能となる。Umeda et al. によると、赤方偏移ごとにサンプルを作成し平均スペクトルを分析することで、時代を追うごとに銀河周辺に形成される電離泡の規模や、その外側の銀河間ガス中の水素がどれだけ電離しているかについての平均的な描像を得ることができている。宇宙再電離の担い手を明らかにする上で、このような解析をより暗い ($10^7 M_{\text{sun}}$ の小質量の) 銀河に対して個別に実施することが将来的には重要となる。そのためには、JWST/NIRSpec よりも近赤外波長域で一桁高い感度を持つ分光装置が必要である。TMT や HWO がこの重要な役割を担うことが期待される。

3. 初代天体の観測的研究を行うための HWO への提言・検討事項の成熟化

HWO は、居住可能な惑星の研究を主目標としつつ、その他の一般天文学の観測的研究においても大きな発展をもたらす見込みがある。どの一般天文学分野を特に対象とするかは現在検討中である。初代天体の観測的研究をその候補の一つとして積極的に検討することで、TMT と補完的な性能を持つ観測装置の実現が可能になるだろう。波長範囲は可視光から約 $2.5 \mu\text{m}$ までであり、TMT と大きく変わらないが、宇宙からの観測により、大気の窓に依存せずに途切れないフルスペクトルを取得できる点が特徴である。また、大気の OH 夜光輝線による影響を受けないため、スペクトルの様々な特徴 (連続光や様々な波長の輝線) を活用する研究における宇宙望遠鏡の利点は大きい (cf. 図 2 左)。さらに、波長分解能 $R \sim 1000$ 以下の低分散の場合、TMT に対して JWST が有利であり (図 3ab)、HWO は JWST に比べて可視 - 近赤外での観測が最適化されているため、約 10 倍の感度向上が期待される (図 3c)。遠方宇宙研究においては、特定の輝線や連続光 + ブレイクを必要とすることが多く、 $R \sim 1000$ で宇宙望遠鏡による連続したスペクトルを得られるメリットは極めて大きい。一方で、より高分散が必要なサイエンスケース (例えば、図 2 右にあるような doublet や multiplet の分解による星間物質の性質調査、輝線プロフィールに基づく動力学研究、HeII 輝線の起源に関する研究) においては、TMT を最大限活用する。棲み分けを図ることで、TMT が存在する時代であっても、HWO に近赤外波長域で最高感度を持つ分光器を搭載することの重要性を強調したい。

図 1: 光電離モデルによる初代天体の輝線診断 (Nakajima & Maiolino 2022)。 (a) HeII 輝線の等価幅が初代銀河や直接崩壊ブラックホールの良い判別法となる。 (b) 金属輝線を組み合わせ、ガスの金属量の推定が可能となる。紫外の金属輝線でも代替可能。

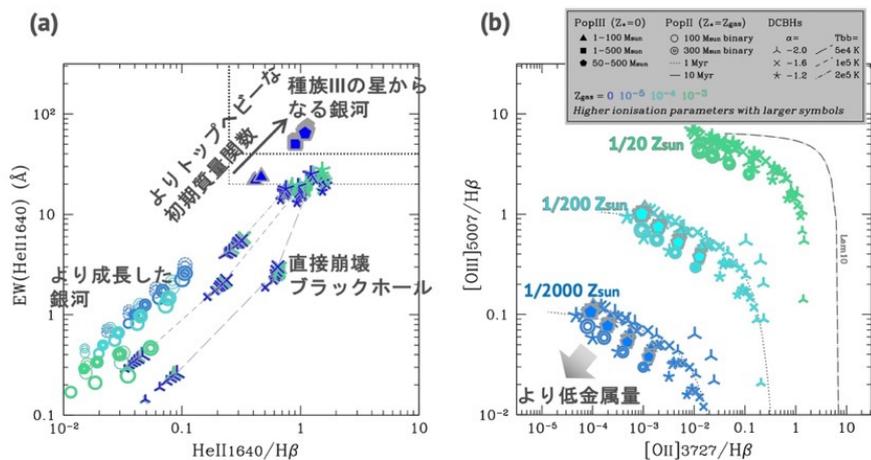


図2: (左) $z=10.6$ の明るい天体 GN-z11 の JWST 低分散分光スペクトル (Bunker et al. 2023)。切れ目のないフルスペクトルが得られることで、様々な分光学的特徴をもれなく取得することができる。(右) GN-z11 の JWST 中分散分光によって得られた紫外高電離輝線の一部 (Maiolino et al.)。[NeIV] によって星よりも高エネルギー源のブラックホールの存在が示唆される。[NIII] や [NIV] の doublet/multiplet を分解することで、ガス密度といった星間物質の重要な特徴付けが可能となる。

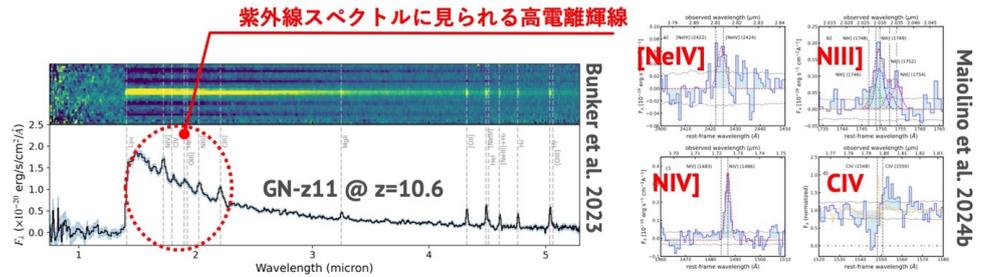
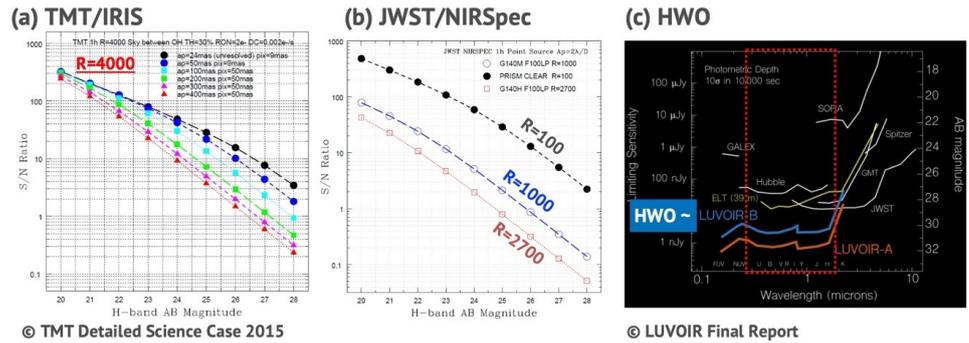


図3: JWST, TMT, HWO の感度比較。(a) と (b) のパネルから、銀河のような構造を持つ天体に対して、JWST の $R \sim 1000$ と TMT ($R \sim 4000$) の分光が同程度の感度を持つ。(c) パネルは撮像モードにおいて LUVOIR-B (HWO 計画に近い感度を持つ) は最適化されることで、JWST よりも約 1 桁感度の良い観測を行うことができると期待されている。



5.

スケジュール Schedule

大まかなスケジュール / Rough schedule

•2025 年～ 2030 年

- **高赤方偏移天体の探査**: Euclid、Roman、すばる望遠鏡 / ULTIMATE-Subaru WFI を利用して、明るい高赤方偏移天体の徹底的な探査が行われる (播金 PI プロジェクト)。また、日本が従来リードしてきた $Ly \alpha$ 輝線天体探査の結果を組み合わせ、これらの遠方天体およびその周辺を集中的に追探査することで、初代天体候補を探索する。
- **輝線診断の検証**: すばる望遠鏡 / PFS を用いて、低赤方偏移での種々の輝線診断 (金属量推定、ブラックホールの有無および質量推定) を検証する。
- **HWO への提言**: HWO 実現に向けて、初代天体の観測的研究からのアプローチを強化し、装置仕様に関する提言を行う。日本の正式参加に向けた働きかけも含む。

•2030 年～ 2040 年

- **TMT による分光学的研究**: TMT を利用して、初代天体候補の静止系紫外スペクトル解析に基づく分光学的研究を実施する。
- **HWO に向けた活動**: HWO の実現に向けた様々な活動を展開する。科学目標の詳細化、観測戦略の策定、装置開発への参加などが含まれる。

•2040 年以降

- **HWO および TMT による研究の実施**: HWO および TMT を用いて、初代天体候補の静止系紫外スペクトル解析に基づく分光学的研究を継続し、HWO の低分散スペクトルの利点を最大限に活用する。

Formation and evolution of massive galaxies

巨大銀河の形成と進化

0.

概要

Summary

Formation and evolution of massive galaxies

巨大銀河の形成と進化

Project Category

3. Science only (新規の装置・施設の開発を含まないサイエンスの方向性の提案)

Abstract of science goals, objectives, and methods

Understanding the formation of the most massive galaxies is a major challenge in modern astronomy. Observations suggest that more massive galaxies were formed at higher redshift through intense star formation activities. This implies that understanding the formation of the most massive galaxies requires observing them in the early universe. Since these galaxies are rare, small-field surveys like those conducted with the James Webb Space Telescope are unlikely to find them. Therefore, this project aims to use data from future wide-field imaging surveys covering 50-100 square degrees at 2-4 microns to search for massive galaxies at redshifts 6-10. These galaxies appear red at 2-4 microns, corresponding to a phase of dramatic changes in galaxy formation history, such as intense dusty star formation and quenching of star formation activities. Submillimeter follow-up observations of the discovered red galaxies will aim to understand their properties (redshift, stellar mass, star formation activities, and the presence of active galactic nuclei) and the physical processes occurring within them. Furthermore, recent observations have revealed that luminous star-forming galaxies were already in place within the first 300 million years of cosmic history. This project will provide crucial clues that connect these earliest galaxies in the universe to the massive galaxies observed at later epochs.

プロジェクトの意義と科学目的・方法の要旨

最も巨大な銀河の形成を理解することは現代天文学における大きな課題である。これまでに行われた数々の観測結果は、質量の大きな銀河ほど、より過去の時代に、そしてより激しい星形成活動によって形成されたことを示唆している。このことは宇宙で最も巨大な銀河の形成過程を理解するためには、必然的に宇宙初期にある巨大銀河を観測する必要があることを意味する。宇宙初期にある巨大銀河は希少であるため、ジェームズウェッブ宇宙望遠鏡を用いて行うような狭い領域の探査では発見することが難しい。そこで本プロジェクトでは、50-100平方度に渡る2-4ミクロンでの広視野撮像探査を起点とし、赤方偏移6-10にある巨大銀河の探査を行う。これらの巨大銀河は2-4ミクロンで赤く、銀河

の形成史の中でも最も劇的な変化を遂げている段階（塵に隠された激しい星形成活動の段階や、その星形成活動の終焉後）に相当する。発見した赤い銀河に対して、サブミリ波での追観測を行うことで、その性質（赤方偏移、星質量、星形成活動、活動銀河核の有無など）やそこで起こっている物理過程を理解することを目的とする。さらに最近の観測からは、宇宙史の最初の3億年というごく初期の段階に、すでに明るい星形成銀河が存在していたことが明らかになっている。本研究計画は、こうした宇宙最初期の銀河と、その後に見られる巨大銀河とを結びつける重要な手がかりを提供するものである。

Principle Investigator

Name: Ken-ichi Tadaki
Affiliation: Hokkai-Gakuen University
E-mail address: tadaki@hgu.jp

プロジェクト代表者

氏名: 但木謙一
所属: 北海学園大学
E-mail アドレス: tadaki@hgu.jp

Co-investigator and his/her role /

Soh Ikarashi (Fukuoka Institute of Technology)
Hideki Umehata (Nagoya University)
Yoichi Tamura (Nagoya University)
Natsuki Hayatsu (Waseda University)
Seiji Fujimoto (University of Toronto)
Yoshinobu Fudamoto (Chiba University)
Ikki Mitsuhashi (University of Colorado Boulder)

プロジェクト共同提案者とその役割

五十嵐創 (福岡工業大学)
梅畑豪紀 (名古屋大学)
田村陽一 (名古屋大学)
早津夏己 (早稲田大学)
藤本征史 (トロント大学)
札本佳伸 (千葉大学)
三橋一輝 (コロラド大学ボルダー校)

1.

プロジェクトの意義

本プロジェクトの意義は138億年に渡る巨大銀河の形成史を理解することである。

Science goals of the project

2.

プロジェクトの科学目的 Science goals of the project

上記プロジェクトの意義を達成するために、段階別に3つの科学目的を設定する。

目的1：巨大銀河の形成史を遡る

ここでいう巨大銀河とは星形成活動などの性質に関わらず、およそ130億年前（赤方偏移6）の時点で星質量が 10^{11} 太陽質量を超えるような大質量銀河を意味し、宇宙で最も進化が進んだ銀河に相当する。このプロジェクトの最初の目的は、赤方偏移6-10にある巨大銀河の祖先を発見し、巨大銀河の形成史を遡ることである。

目的2：巨大銀河の形成史を描く

赤方偏移6-10にある巨大銀河の祖先は総じて可視域で暗く、近赤外域で赤いものの、(a)塵に隠された星形成銀河と(b)すでに星形成活動を止めた銀河と両極端な性質を持つ2つの銀河種族に分かれる。また塵に隠された星形成銀河の中には、活動銀河核（超巨大ブラックホール）を内包する天体も存在すると期待される。そのため、第2の目的は赤方偏移6-10にある赤い銀河の性質（赤方偏移、星質量、星形成活動、活動銀河核の有無）を特徴づけ、銀河種族ごとの個数密度の赤方偏移進化を調べることで、巨大銀河や超巨大ブラックホールがいつ、どのような頻度で形成されたのかを明らかにすることである。

目的3：巨大銀河の形成を支配する物理過程を理解する

科学目的1と2は巨大銀河とブラックホールの形成を統計的に理解するアプローチであるのに対して、第3の目的は個々の銀河の内部構造を調べることで、巨大銀河の形成を担う物理過程を理解することである。

3.

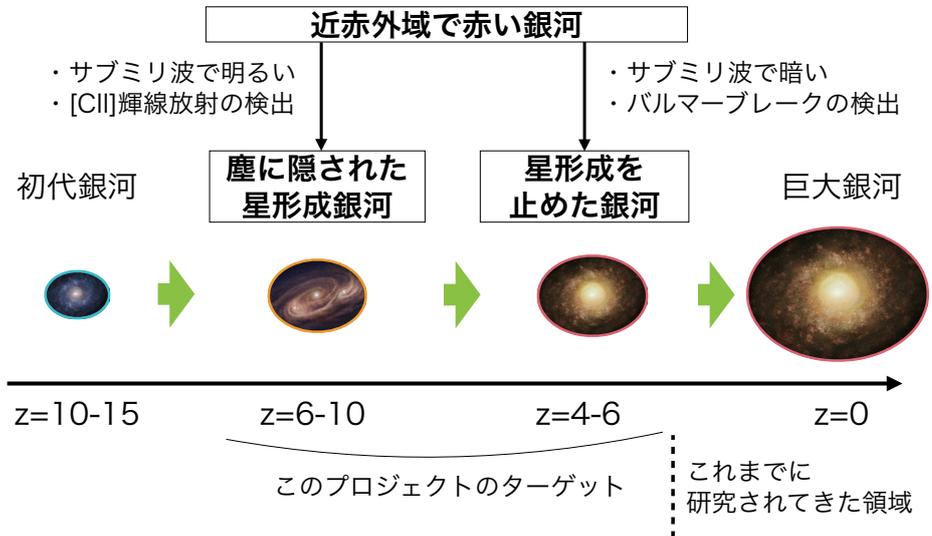
プロジェクトの科学的 意義と目標の根拠 Rationale for the scientific goals and objectives

1. 科学的意義の根拠：研究の背景、当該分野の研究状況、等 / Scientific background, status of the relevant scientific area, etc.

Λ CDMに基づいた構造形成モデルにおいては、宇宙初期の小質量銀河が、その銀河自身による星形成活動に加えて、他の銀河との衝突・合体を繰り返し、徐々に大きな銀河へと成長していく。成長した大質量銀河はやがて星形成活動を止め、受動的に進化し、現在の宇宙では銀河団のような高密度環境で巨大楕円銀河として存在していると考えられている。質量の大きな銀河ほど宇宙の初期に星形成活動を終えたことが知られている（銀河形成のダウンサイジング）。近年、赤方偏移3-5にある星形成活動を止めた大質量($M_{\text{star}} > 10^{11} M_{\odot}$)銀河が続々と発見されている（de Graaff et al. 2025など）。これらの巨大銀河は激しい星形成活動($\text{SFR} \sim 300 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$, 数億年のタイムスケール)によって形成されたことが近赤外線分光観測によって示唆されている（de Graaff et al. 2025など）。このような激しい星形成活動の大部分は塵に隠されていると考えられ、実際にジェームズウェッブ宇宙望遠鏡とアルマ望遠鏡の観測によって赤方偏移5で大質量($M_{\text{star}} > 10^{11} M_{\odot}$)の塵に隠された星形成銀河が発見されつつある（Xiao et al. 2024）。このよ

うな背景から、本プロジェクトでは、巨大銀河の形成史をさらに遡った赤方偏移 6-10 にある塵に隠された星形成銀河や星形成活動を止めた銀河をターゲットにしている (図 1, 図 2)。

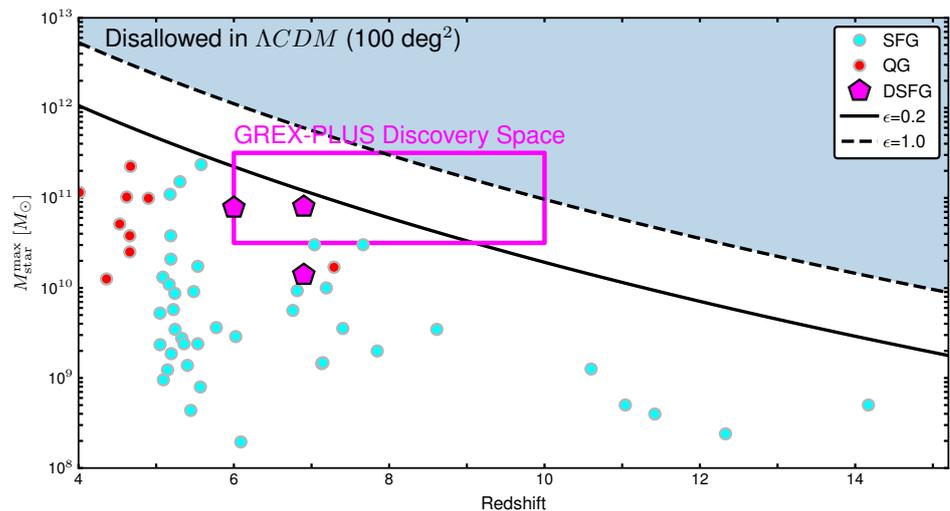
図 1: 巨大銀河の形成史



2. 提案するプロジェクトコンセプトは当該分野になにをもたらそうとするのか / Goals and objectives: new scientific steps the proposed concept aims to achieve in the science area

宇宙で最も巨大な銀河は宇宙で最も進化が進んだ銀河に相当する。従って、本プロジェクトは巨大銀河の形成史を解明するだけでなく、今後の発見が期待される赤方偏移 10-15 にあるような初代銀河のその後の進化の解明にもつながることが期待される (図 1、図 2)。

図 2: 100 平方度の探索領域で期待される最も巨大な銀河の星質量 (実線と点線: Murray et al. 2013) とジェームズウェーブ宇宙望遠鏡などによって実際に発見された銀河 (QG: Tanaka et al. 2019, Carnall et al. 2023, 2024, Kakimoto et al. 2024, de Graaff et al. 2025, Weibel et al. 2025, Antwi-Danso et al. 2025, Barrufet et al. 2025; DSFG: Zavala et al. 2022, Álvarez-Márquez et al. 2023; SFG: Xiao et al. 2024, Tacchella et al. 2023, Arrabal Haro et al. 2023, Zavala et al. 2025, Helton et al. 2025, Schouws et al. 2025)。



3. 提案するプロジェクトコンセプトの強みと過去、現在、未来の他のプロジェクト、研究・探査との関係 / The competing power of the proposed project concept and its relationship to past, current, and future other investigations and projects.

赤方偏移 6 以上にある塵に隠された星形成銀河 ($870 \mu\text{m}$ で 2 mJy 以上) の個数密度は 1 平方度当たり 2 個程度と小さいため、探査領域が狭いジェームズウェッブ宇宙望遠鏡の観測によって発見する可能性は低い。そのため探査領域を 50-100 平方度に拡大し、希少な銀河種族をターゲットにしている点が本プロジェクトコンセプトの強みである。そのためには、2-8 ミクロンの近赤外域で広視野撮像探査を実現する GREX-PLUS プロジェクトがまず必要不可欠である。2 ミクロン以下の広視野探査を実現する Roman, Euclid プロジェクトと組み合わせることで、赤方偏移 6-10 にある赤い銀河の広視野探査が可能となる (科学目的 1、図 3)。

科学目的 2 においては、光赤外を超えた多波長での協調観測が重要となる。日本が現在進めている電波・サブミリ波域の ALMA2 (ALMA2030 Wideband Sensitivity Upgrade) プロジェクトでは、一度に観測できる波長域を既存のアルマ望遠鏡に比べて 2 倍以上にすることを目的としており、実現すれば塵の連続光放射や電離炭素の輝線放射の観測効率が向上する。ALMA 2 や LST/AtLAST の観測によって赤方偏移 6-10 にある赤い銀河の物理的性質 (赤方偏移や星形成活動) を特徴づけ、銀河種族を同定することが可能となる (科学目的 2)。また塵に隠された星形成銀河は、この時代の塵に隠されたクエーサーの前駆体として有望な候補天体であり、高励起 ($J_{\text{up}} > 10$) の CO 輝線の高空間分解能観測が可能な ALMA 2 や減光に強い硬 X 線での高感度観測を可能にする ESA の NewAthena プロジェクトの良いターゲットとなる。

科学目的 3 では、宇宙初期のコンパクトな銀河の内部構造を探るため、高空間分解能 (< 0.1 秒角) での観測が必要となる。塵に隠された星形成銀河は ALMA2 や ngVLA で、星形成活動を止めた銀河は TMT でそれぞれ観測することで、銀河内部の星形成活動や星種族の分布を調べることが可能となる。

図 2: 科学目的と現在・未来のプロジェクトとの関係



4.

プロジェクトが実施する
研究

**Scientific
investigations of the
project**

プロジェクトが獲得するものは「巨大銀河の祖先となるような赤方偏移 6-10 にある塵に隠された星形成銀河を検出できる質の観測データ」であり、感度としては 2 ミクロンで 27 AB 等級、4 ミクロンで 25AB 等級の深さを想定している。ターゲットの個数密度は 1 平方度当たり 2 個程度のため、100 個程度の統計的なサンプルを構築するために 50-100 平方度の探査を行う必要がある。

5.

スケジュール

Schedule

大まかなスケジュール / Rough schedule

サイエンスを遂行するために必要な他のプロジェクトのスケジュール

2026-2027 年 Roman 宇宙望遠鏡打ち上げ

2030 年 ALMA2 (ALMA2030 Wideband Sensitivity Upgrade) 完了

2030 年代 GREX-PLUS 打ち上げ

Visualizing Baryons in Proto-clusters and Exploring Environmental Effects

原始銀河団におけるバリオンの可視化と環境効果の探求

0.

概要

Summary

Visualizing Baryons in Proto-clusters and Exploring Environmental Effects

原始銀河団におけるバリオンの可視化と環境効果の探求

Project Category

3. Science only (新規の装置・施設の開発を含まないサイエンスの方向性の提案)

Abstract of science goals, objectives, and methods

According to the standard cosmological model, dark matter, which constitutes most of the mass, undergoes gravitational evolution to form the large-scale structure of the universe. It is believed that gas flows along this web-like structure, contributing to the formation of galaxies and the growth of supermassive black holes. Thus, the surrounding matter and environment are crucial elements in understanding galaxy formation and evolution in the early universe. Proto-clusters, which are large groups of galaxies in the early universe, provide a valuable opportunity for observational test from this perspective. This project aims to advance our understanding of the 'cosmic web' by investigating the intergalactic and circumgalactic medium in proto-clusters in the early universe (approximately at redshifts 2 to 6) using integral field spectroscopy and narrowband imaging from the next generation of large optical-infrared telescopes, employing rest-frame ultraviolet emission lines. We seek to examine the kinematic state and physicochemical properties of the matter surrounding these galaxies, to shed light on the environmental effects and baryonic cycling within proto-clusters.

プロジェクトの意義と科学目的・方法の要旨

標準宇宙モデルに基づくと、質量の多くを占める暗黒物質が重力進化して宇宙大規模構造が形成される。この網の目状の構造に沿ってガスが流れ込み銀河の形成や巨大ブラックホールの成長が進むと考えられている。このように銀河形成・進化を理解する上で周囲の物質や環境は重要な要素となる。初期宇宙における銀河の大集団である原始銀河団はこの観点で貴重な観測的検証の場を提供する。本プロジェクトでは初期宇宙（赤方偏移 2 から 6 程度）における原始銀河団において、次世代の大型光学赤外線望遠鏡による面分光および狭帯域撮像による観測から、静止系紫外線の輝線を用いて銀河間物質や銀河周物質の観測を進める。これらの銀河周囲に存在する物質の運動状態および物理化学的性質を調べ「宇宙網」の理解を進めるとともに、原始銀河団で形成・進化する銀河に起きる環境効果とバリオン循環の様子を明らかにすることを目指す。

Principle Investigator

Name: Hideki Umehata

Affiliation: Nagoya University

E-mail address: umehata@a.phys.nagoya-u.ac.jp

プロジェクト代表者

氏名: 梅畑豪紀

所属: 名古屋大学

E-mail アドレス: umehata@a.phys.nagoya-u.ac.jp

1.

プロジェクトの意義

Science goals of the project

本プロジェクトの意義は銀河と周囲の物質や構造の形成・進化について一体的な理解を進めることである。

2.

プロジェクトの科学目的

Science goals of the project

本プロジェクトの科学目的として以下の2つを挙げる。

まず、初期宇宙において銀河間物質や銀河周物質として銀河間空間に存在しているバリオンの可視化を行う。特に明るいと期待される水素ライマン α 線 ($Ly\alpha$) は (i) 非常に薄い部分を含む銀河と銀河をつなぐ大きなスケールの宇宙網フィラメントの分布、(ii) 銀河周囲のガスの流入、流出を含む運動状態、それぞれを開拓するトレーサーとして期待される。加えて、 $Ly\alpha$ と比べておよそ10倍から100倍程度(かそれ以上)暗いと予想される他の金属の輝線(CIVやHeIIなど)の銀河間空間からの検出を進めることで、金属量や電離パラメータなど初期宇宙のバリオンの貯蔵庫である宇宙網の性質とその進化を明らかにする。

次に、これらの可視化されたバリオンの情報を用いて、原始銀河団で進む銀河および巨大ブラックホールの形成・進化における環境効果を調べる。可視光、赤外線にとどまらず、ミリ波サブミリ波など多波長による様々な相、物質、規模で銀河を捉える観測と組み合わせ、ガスの流入がどのように銀河の星形成活動、金属量進化、また角運動量進化を導くのか、銀河からの流出がどのように周囲の加熱や重元素汚染を導くのか、バリオン循環の様子や物質進化を解き明かす。

3.

プロジェクトの科学的
意義と目標の根拠

**Rationale for the
scientific goals and
objectives**

1. 科学的意義の根拠：研究の背景、当該分野の研究状況、等 / Scientific background, status of the relevant scientific area, etc.

暗黒物質やバリオンが蜘蛛の巣状のネットワーク「宇宙網」を織りなし、その結節点で銀河やブラックホールの形成・進化が進むという枠組みは概ね受け入れられている一方で、これらの銀河間にある物質が放つ放射は非常に淡く、観測的な検証は（銀河に対するものと比べて）立ち遅れている状況にある。近年の広視野可視光面分光装置の実現など技術的進展に伴い、これらのバリオンの可視化は進みつつあるが、Ly α によるフィラメント探査は赤方偏移 3 付近の一部の原始銀河団中心 (Umehata et al. 2019, Science, 366,97) やクエーサーの周囲 (Tornotti et al. 2025, NatAs, 9, 577) といった例外的に明るい領域に限られており、より普遍的なフィラメントや、より宇宙論的距離による減衰を受けやすい高赤方偏移の探査はまだ本格的な成功には至っていない。より暗い金属の輝線についてもやはりクエーサー周囲に限定されている。

それぞれの時代において顕著な宇宙大規模構造とそこでの銀河形成を調べる上で、原始銀河団は最適な対象となる。すばる望遠鏡に代表される現世代の望遠鏡によるこれまでの成果に加え、ジェームズウェッブ宇宙望遠鏡など直近の新装置によっても開拓が進んでおり、赤方偏移 8 に至るまで (Morishita et al. 2023, ApJ, 947, 24) 候補が発見されつつある。本プロジェクトを進める上で対象となる原始銀河団の候補は今後も増加していくものと期待される。

2. 提案するプロジェクトコンセプトは当該分野になにをもたらそうとするのか / Goals and objectives: new scientific steps the proposed concept aims to achieve in the science area

輝線による宇宙網のマッピングの実現により、銀河進化研究の視野を拡大するとともに構造形成論など周辺分野との橋渡しを行う。

3. 提案するプロジェクトコンセプトの強みと過去、現在、未来の他のプロジェクト、研究・探査との関係 / The competing power of the proposed project concept and its relationship to past, current, and future other investigations and projects.

本プロジェクトはこれまでに蓄積されてきた原始銀河団の研究、および芽吹きつつある宇宙網の撮像観測といった過去および現在の研究を活かしつつ、桁違いの集光力を持つ次世代の大型望遠鏡によって初めて可能となるものである。2020 年代後半には VLT 望遠鏡に blue-MUSE が搭載される予定であり、これは現在の MUSE の視野を 2 倍に拡大しつつより短波長側まで観測可能にするという計画である。Blue-MUSE の持つ視野の広さは宇宙論的体積を探査する上で非常に強力となるであろう。2030 年代から 2040 年代にかけて E-ELT, TMT, GMT など 30-40m 級の光学赤外線望遠鏡による新時代が到来すると、その集光力を活かして本プロジェクトも本格化できると期待される。同時期には優れた解像能力を活かした遠方銀河の内部構造を分解していくような探査の発展が予期

されるが、そのような研究とも高い相補性を持つ。

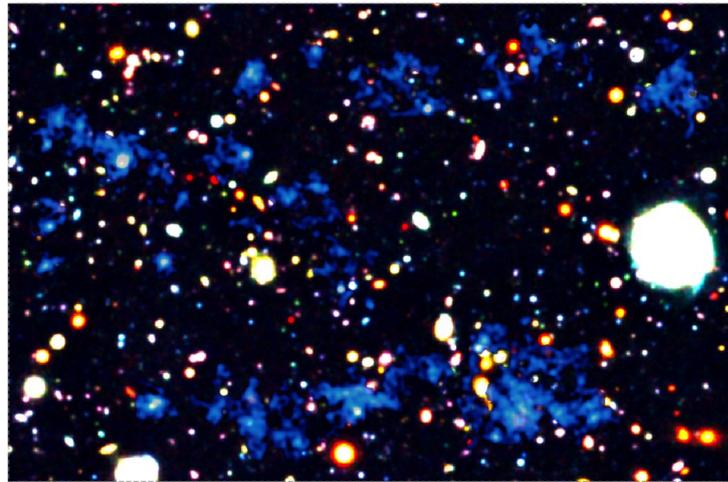
4.

プロジェクトが実施する
研究

Scientific
investigations of the
project

本プロジェクトでは銀河間空間からの広がった放射を観測する。現在の 8m-10m 級の望遠鏡を用いた積分時間 4 時間程度の観測では Ly α 表面輝度で 10^{-19} ergs $^{-1}$ cm $^{-2}$ arcsec $^{-2}$ の桁で赤方偏移 3 に存在するフィラメントの明るい部分の観測が達成されている (図 1)。口径 30m-40m 級の望遠鏡によって集光力が 10 倍以上向上すると期待されるため、これらの次世代大型望遠鏡によって Ly α 表面輝度にして 10^{-20} ergs $^{-1}$ cm $^{-2}$ arcsec $^{-2}$ 前後まで観測可能領域が拡張されると期待され、パラメータスペース上は観測可能な範囲が大幅に拡大する。一方でフィラメントは淡く、また広がった構造であるため、できるだけ広視野の観測が望ましい。狭帯域撮像や広視野面分光観測のモザイクによって数分角程度の視野 (すなわち Mpc スケール) は確保する必要があるだろう。

図 1: 赤方偏移 3.1 の原始銀河団中心部で観測された Ly α フィラメント。視野は 2 分角 x 3 分角、右側が北。



5.

スケジュール

Schedule

大まかなスケジュール / Rough schedule

2020 年代: 8m から 10m 級の望遠鏡を用いた準備研究

2030 年代以降: 30m から 40m 級の望遠鏡を用いた分光撮像観測。

Credits: p12, 16, 23, 26, 165, 232

Image: NASA, ESA, CSA, STScI, Rohan Naidu (MIT);
Image Processing: Joseph DePasquale (STScI)

p17, 24

Alexander Caspari/Shutterstock.com

p18, 25

Illustration - NASA, ESA, CSA, L. Hustak (STScI); Science - K. Stevenson, J. Lustig-Yaeger, E. May (Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory), G. Fu (Johns Hopkins University), and S. Moran (University of Arizona)



GOPIRA

Optical and Infrared Astronomy Roadmap 2025

February 28, 2026

光赤天連ロードマップ2025 作成委員会