2020年代の光赤外天文学
将来計画検討報告書

光赤外天文学将来計画報告書編集委員会

平成28年8月20日

2020 年代の光赤外天文学。主要な科学的研究対象の概念図及び主要観測装置を示す。

表紙・口絵の画像の出典について

風神雷神図（ふうじんらいじんず）： 表紙（右下）に使用したのは数ある風神雷神図の中で最も有名な俵屋宗達筆による屏風画（江戸時代（17 世紀）、京都建仁寺所蔵、国宝）。天候をつかさどる風神・雷神に、晴天と豊穣な観測天文学の成果創出を祈念する、という趣旨です。尚、著作権については消滅しており、使用に際して許可の必要はないことを確認済です。

SPICA と TAO の画像についてはそれぞれ SPICA プリプロジェクト、東京大学 TAO プロジェクトより、また矮小銀河 IC1613 の画像は国立天文台・田中賢幸氏にご提供いただきました。その他、使用した画像は以下から取得させていただきました：

http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Planck/History_of_cosmic_structure_formation
http://subarutelescope.org/Pressrelease/2014/01/27/j_index.html
http://www.subarutelescope.org/Pressrelease/2015/07/01/index.html
https://www.cfa.harvard.edu/news/su201231
http://www.nasa.gov/vision/universe/watchtheskies/swift_multimedia.html
http://annesastronomynews.com/photo-gallery-ii/galaxies-clusters/arp-220-2/
http://apod.nasa.gov/apod/ap080104.html
http://astrobiowalk.gsfc.nasa.gov/more3p4.html
http://www.ir.isas.jaxa.jp/AKARI/topics/20141219_FISAllSkyMap/index-j.html
http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/psmt/
http://www.jasmine-galaxy.org/index-ja.html
http://microdevices.jpl.nasa.gov/capabilities/optical-components/coronagraph-occulting-masks.php
http://gopira.jp/sym2015/208_miyata.pdf
http://astro.s.kanazawa-u.ac.jp/~yonetoku/hiz-gundam/
http://www.ir.isas.jaxa.jp/SPICA/SPICA_HP/feature.html
http://subarutelescope.org/Gallery/gallery_images/dome_subaru1_s.jpg
http://www.tmt.org/gallery/photo-illustrations
http://www.nasa.gov/press-release/nasa-introduces-new-wider-set-of-eyes-on-the-universe
http://www.techinsider.io/thirty-meter-telescope-hawaii-protests-2015-10
http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~iwamuro/Kyoto3m/T01.gif
http://subarutelescope.org/Gallery/gallery_images/sn11_m.jpg
http://www.naoj.org/Pressrelease/2013/08/04/j_index.html
http://subarutelescope.org/Pressrelease/2012/04/11/j_index.html

お断り： 本冊子版では、都合により第 2 章以降白黒で印刷されております。図の理解には電子版（フルカラー）をご覧いただければと思います。

目 次

第 1 章 Executive Summary **11**
1.1 我々の将来計画の要旨 11
1.2 2020 年代以降の主要な科学的課題 13
1.3 スペース将来計画の推進 19
1.3.1 戦略的中型計画 SPICA 19
1.3.2 公募型小型計画について 19
1.3.3 小規模プロジェクトの推進 20
1.3.4 まとめと 2030 年代に向けて 20
1.4 地上将来計画の推進 22
1.4.1 TMT 22
1.4.2 すばる望遠鏡 22
1.4.3 大学主導の望遠鏡 23
1.4.4 全体像 23
1.4.5 まとめ 24
1.5 我が国の取るべき道 26
1.5.1 天文学・宇宙物理分野全体および関連分野の動向 26
1.5.2 地上とスペース：我が国の光赤外分野の取るべき道 27
1.5.3 分野横断・連携の考え方 27
1.5.4 国際連携の考え方 28
1.5.5 若手研究者の育成や技術継承に関する考え方 29
1.5.6 2030 年代への展望 29

第 2 章 将来計画検討活動について **31**
2.1 本検討書の意義と目的 31
2.2 編集体制 31
2.2.1 編集委員会 33
2.2.2 サイエンス検討班 33
2.2.3 スペース計画班 33
2.2.4 地上計画班 34
2.2.5 編集事務局 34
2.3 活動履歴 35

第 3 章 次世代光赤外天文学のサイエンス **37**
3.1 サイエンス検討班の活動経緯 37
3.2 宇宙論・構造形成 39
3.2.1 検討結果の要旨と必要観測仕様のまとめ 39
3.2.2 宇宙論研究のこれまでの発展と今後の方向性 40
3.2.3 宇宙の加速膨張の起源 41
3.2.4 光赤外の宇宙論サーベイで探る初期宇宙の物理 49

3.2.5 宇宙の構造形成の物理およびダークマターの性質 52
3.2.6 将来計画の仕様 57
3.2.7 班員構成、担当 58
3.3 巨大ブラックホールと活動銀河核 61
3.3.1 検討結果の要旨と必要観測仕様のまとめ 61
3.3.2 科学的背景 62
3.3.3 活動銀河核の諸構造 63
3.3.4 母銀河との関わり 67
3.3.5 巨大ブラックホールの宇宙論的進化 71
3.3.6 必要な将来装置 76
3.3.7 班員構成、担当 77
3.4 初代天体と再電離 80
3.4.1 検討結果の要旨と必要観測仕様のまとめ 80
3.4.2 背景 81
3.4.3 初代星 82
3.4.4 初代銀河 84
3.4.5 再電離 90
3.4.6 必要な将来装置 94
3.4.7 班員構成、担当 94
3.5 銀河進化と構造形成 98
3.5.1 検討結果の要旨と必要観測仕様のまとめ 98
3.5.2 今後の方向性 99
3.5.3 星形成の物理 99
3.5.4 ハッブル系列の起源 106
3.5.5 宇宙の構造形成に伴う銀河進化 108
3.5.6 ダークマターと銀河間ガス 110
3.5.7 系統誤差 112
3.5.8 班員構成、担当 114
3.6 銀河系・局所銀河群 119
3.6.1 今後の方向性 119
3.6.2 銀河系中心・バルジ 119
3.6.3 円盤構造 123
3.6.4 ハロー構造 124
3.6.5 矮小銀河 130
3.6.6 初期世代星と化学進化 134
3.6.7 局所銀河群の構造と進化 136
3.6.8 班員構成、担当 138
3.7 銀河系・近傍銀河の星生成と物質進化 142
3.7.1 検討結果の要旨と必要観測仕様のまとめ 142
3.7.2 銀河の星生成率の多様性を生む物理条件を探る 143
3.7.3 銀河のガス・ダスト進化を探る 148
3.7.4 銀河の磁場の進化を探る 152
3.7.5 2020 年代における近傍銀河の観測的研究 154
3.7.6 班員構成、担当 155
3.8 星間物質 159
3.8.1 検討結果の要旨と必要観測仕様のまとめ 159

3.8.2 原始惑星系円盤内の物質を題材とするサイエンス . . . 160
3.8.3 ダスト凝縮・核形成に関する物理パラメータの決定を目的とするサイエンス . . . 164
3.8.4 晩期型巨星の星周ダストの形成および化学／鉱物学的進化の観測的理解 . . . 166
3.8.5 水・有機物の探査とその生成・進化過程の観測的理解 . . . 169
3.8.6 必要とする望遠鏡、装置のまとめ . . . 172
3.8.7 班員構成、担当 . . . 173
3.9 恒星物理 . . . 175
3.9.1 検討結果の要旨と必要観測仕様のまとめ . . . 175
3.9.2 2020 年代の恒星物理研究 . . . 175
3.9.3 質量放出の理解 . . . 177
3.9.4 連星進化の理解 . . . 181
3.9.5 元素の起源の理解 . . . 185
3.9.6 班員構成、担当 . . . 190
3.10 星惑星系形成 . . . 192
3.10.1 検討結果の要旨と必要観測仕様のまとめ . . . 192
3.10.2 今後の方向性 . . . 193
3.10.3 個々の星の誕生過程および質量決定 . . . 195
3.10.4 集団としての星生成 . . . 196
3.10.5 惑星系形成の黎明 . . . 198
3.10.6 ガス惑星の形成 . . . 202
3.10.7 残骸円盤 — 地球型惑星形成期以降の星周環境 . . . 204
3.10.8 惑星分布から探る形成過程 . . . 206
3.10.9 原始惑星系円盤における有機高分子の成長 — 生命系形成の黎明 . . . 207
3.10.10 まとめ . . . 208
3.10.11 班員構成、担当、および謝辞 . . . 208
3.11 系外惑星 . . . 213
3.11.1 検討結果の要旨と必要観測仕様のまとめ . . . 213
3.11.2 初めに . . . 214
3.11.3 若い惑星・褐色矮星（自己放射天体）の観測的研究 . . . 214
3.11.4 系外惑星科学 . . . 218
3.11.5 ハビタブル惑星 . . . 222
3.11.6 まとめ . . . 226
3.11.7 班員構成、担当 . . . 227
3.12 太陽系天体 . . . 230
3.12.1 検討結果の要旨と必要観測仕様のまとめ . . . 230
3.12.2 太陽系の起源と進化 . . . 231
3.12.3 生命の起源と普遍性の探求 . . . 236
3.12.4 太陽系天体の多様性: 現在の太陽系の理解 . . . 241
3.12.5 まとめ . . . 246
3.12.6 班員構成、担当 . . . 247

第 4 章 スペースプロジェクト 251
4.1 スペース計画検討班の活動経緯 . . . 251
4.1.1 概要 . . . 251
4.1.2 活動経緯の要旨 . . . 251
4.2 世界の光赤外天文学の来し方：スペース編 . . . 253

4.2.1 なぜ衛星で赤外線観測をするのか？ . . . 253
4.2.2 これまでの赤外線天文衛星（1）2000 年以前 . . . 253
4.2.3 これまでの赤外線天文衛星（2）2000 年以降 . . . 254
4.2.4 これからの赤外線天文衛星／ JWST . . . 256
4.3 SPICA . . . 258
4.3.1 概要 . . . 258
4.3.2 銀河進化を通しての重元素と星間塵による宇宙の豊穣化 . . . 259
4.3.3 生命居住可能な世界に至る惑星系形成 . . . 262
4.3.4 ミッションデザイン . . . 264
4.3.5 他波長・他計画とのシナジー . . . 266
4.3.6 体制と準備状況 . . . 270
4.4 JASMINE . . . 272
4.4.1 JASMINE 計画の概要 . . . 272
4.4.2 「小型 JASMINE」の科学目的とサイエンス成果が与えるインパクト . . . 273
4.4.3 「小型 JASMINE」の科学目標・ミッション要求 . . . 273
4.4.4 「小型 JASMINE」の世界的位置づけ・国際協力 . . . 276
4.4.5 「小型 JASMINE」の研究領域（光赤外天文学分野）内での位置づけ . . . 276
4.4.6 「小型 JASMINE」のシステム要求と仕様案 . . . 276
4.4.7 「小型 JASMINE」の観測手段 . . . 278
4.4.8 「小型 JASMINE」のデータ解析方法 . . . 278
4.4.9 「小型 JASMINE」の主要キー技術とその位置づけ . . . 278
4.4.10 「小型 JASMINE」の検討、開発の進捗状況 . . . 280
4.4.11 「Nano-JASMINE」の進捗状況と国際協力 . . . 280
4.4.12 「小型 JASMINE」の体制 . . . 281
4.4.13 準備状況と今後について . . . 281
4.5 WISH . . . 282
4.5.1 WISH 計画の目的と意義、位置づけ . . . 282
4.5.2 WISH の目指すサイエンス . . . 284
4.5.3 WISH システム概要 . . . 289
4.5.4 WISH 広視野撮像システム . . . 290
4.5.5 WISH 望遠鏡システム . . . 291
4.5.6 WISH 衛星システム . . . 292
4.5.7 WISH 熱解析 . . . 293
4.6 WFIRST . . . 295
4.6.1 概要 . . . 295
4.6.2 WFIRST 仕様、科学目的、研究手段 . . . 296
4.6.3 国内外のステータスと相手先との合意の現状 . . . 298
4.6.4 日本の貢献と技術的な準備状況及び開発のシナリオ . . . 299
4.7 Euclid . . . 301
4.8 EXZIT . . . 302
4.8.1 概要 . . . 302
4.8.2 背景 . . . 302
4.8.3 科学目的 . . . 304
4.8.4 研究領域内での位置づけ . . . 306
4.8.5 観測装置の概要 . . . 307
4.8.6 主要キー技術の開発状況 . . . 309

4.8.7 開発体制 . . . 310
4.8.8 準備状況 . . . 310
4.8.9 国際情勢 . . . 310
4.8.10 関連するミッション . . . 310
4.9 HiZ-GUNDAM (High-z Gamma-ray bursts for Unraveling the Dark Ages Mission) . . . 312
4.9.1 ミッションの目的 . . . 312
4.9.2 科学的背景とミッションの概要 . . . 312
4.9.3 ミッション機器 . . . 314
4.9.4 様々な突発天体の追観測 . . . 318
4.9.5 他の天体を用いた初期宇宙観測との相補性 . . . 319
4.9.6 国内外の関連研究動向と今後の戦略 . . . 320
4.9.7 ワーキンググループメンバー . . . 320

第 5 章 地上プロジェクト 323
5.1 地上計画検討班の活動経緯 . . . 323
5.1.1 班員 . . . 323
5.1.2 活動経緯の要旨 . . . 323
5.2 世界の光赤外天文学の来し方：地上編 . . . 324
5.2.1 我が国におけるこれまでの主な望遠鏡プロジェクト . . . 324
5.2.2 地上の大型望遠鏡の動向 . . . 329
5.3 TMT . . . 334
5.3.1 概要と科学目的 . . . 334
5.3.2 TMT の主な仕様 . . . 334
5.3.3 TMT の性能と観測プログラム . . . 337
5.3.4 実行グループ、今後のスケジュールと日本の役割 . . . 337
5.3.5 国内の他の計画との関連 . . . 339
5.3.6 海外の類似計画との区別化 . . . 339
5.3.7 関連ホームページ . . . 339
5.4 すばる望遠鏡の将来計画 . . . 341
5.4.1 現行観測装置 . . . 341
5.4.2 将来装置計画 . . . 341
5.4.3 Prime Focus Spectrograph (PFS) . . . 342
5.4.4 広視野補償光学システム / ULTIMATE-SUBARU 計画 . . . 345
5.4.5 2020 年代にむけた装置プラン . . . 349
5.5 TAO . . . 351
5.5.1 計画概要 . . . 351
5.5.2 サイト . . . 351
5.5.3 観測装置 . . . 355
5.5.4 他計画との関係 . . . 356
5.5.5 望遠鏡時間 . . . 356
5.5.6 スケジュール . . . 357
5.6 京大 3.8 メートル望遠鏡 . . . 358
5.6.1 京大 3.8 メートル望遠鏡仕様 . . . 358
5.6.2 主な研究課題と観測装置 . . . 359
5.6.3 TMT などの大型計画との関係 . . . 360
5.7 南極中口径望遠鏡 (AIRT) . . . 362

5.7.1 概要 362
5.7.2 科学的目的 362
5.7.3 望遠鏡と観測装置仕様 363
5.7.4 大型計画との関連 364
5.7.5 外国の状況と国際協力 364
5.7.6 スケジュール 365
5.8 広島大 SGMAP 計画 366
5.8.1 概要と科学的目的 366
5.8.2 計画内容と装置仕様 366
5.8.3 SGMAP サーベイ計画の概要 367
5.8.4 SGMAP によるサイエンス 368

第1章　Executive Summary

1.1　我々の将来計画の要旨

可視光・赤外線波長域には、恒星や惑星等の様々な天体からの放射のピークがあり、また様々な原子や分子による吸収線や輝線が集中している。従って光赤外天文学は、宇宙の構造の基本となる恒星や銀河、宇宙の物質循環を担う星間ガスおよび星間塵（ダスト）、生命発生の場所としての惑星および惑星系などの研究に本質的な役割を果たす。

我々は 2020 年代に光赤外天文学が取り組むべき優先課題を大きく次の三つのテーマに分けて整理した：

課題 1. 宇宙の加速膨張とダークエネルギー／ダークマターの解明： 宇宙が如何にして生まれ、時空はどのように進化してきたのか？これは天文学の根幹に関わる大問題である。宇宙の時空と構造の進化は、宇宙の加速膨張をもたらしているダークエネルギーと、宇宙の大規模構造を形成し銀河の形成と進化に本質的な役割を果たしているダークマターによって支配されてきたと考えられている。2020 年代の光赤外天文学の重要課題の一つは、ダークエネルギー／ダークマターの性質を探り、その正体を解明することである。このためには、広天域かつ深い銀河撮像・分光サーベイを遂行し、重力レンズ効果、バリオン音響振動、赤方偏移ゆがみ効果、銀河のクラスタリング統計量などの統計観測量を高精度で測定することが必要である。

課題 2. 物質宇宙の多様性とその進化の解明： 前述のダークエネルギー・ダークマターに支配された宇宙の中で、物質の多様な階層構造（恒星やブラックホール／銀河・活動的銀河核／銀河団・大規模構造）が、恒星と星間物質の間の物質循環を通じて進化してきたことが分ってきた。2020 年代には、初代星・最初の銀河の形成、巨大ブラックホールと銀河成長の関係、環境効果と銀河形態の発現、銀河内での様々な質量の恒星の形成や恒星からの質量放出メカニズムを解明することなどが重要な課題となる。そこで我々は、各種天体の起源および宇宙における物質循環の解明に焦点を当てて、遠方から近傍まで様々なスケールでこれらの課題に取り組んでいく。遠方宇宙においては、広天域撮像・分光サーベイによる遠方銀河の統計的研究と共に、特徴的な高赤方偏移天体についてこれまでになく深い観測を地上超大型望遠鏡および赤外線スペース望遠鏡で行う必要がある。銀河系（天の川銀河）・近傍銀河についても広天域撮像・分光サーベイにより大量の恒星サンプルを観測すると共に、地上超大型望遠鏡および赤外線スペース望遠鏡による物質循環の現場の高空間分解能・高波長分解能観測が必要である。

課題 3. 惑星系形成および進化の解明と宇宙における生命の探査：近年、我々の銀河系にある多くの恒星の周りで実に多様な惑星系が誕生したことがわかってきた。生命は惑星で生まれる。これからの光赤外天文学が進めるべき重要課題は、地球外で生命に関連する物質や現象をとらえること、および惑星系の形成を理解し、太陽系を始めとする惑星系の多様性の起源を探ることである。2020 年代には、ハビタブルゾーンを含む原始惑星系円盤の内側領域や誕生直後の惑星の観測的理解を進めると共に、地球型系外惑星の検出と特徴付けに取り組む。このためには地上超大型望遠鏡による高空間分解能・高コントラスト観測、赤外線スペース望遠鏡による中間・遠赤外線観測、そしてスペース望遠鏡による重力マイクロレンズ系外惑星探査と高コントラスト撮像観測が必要である。

これらのことから、我々は上記科学的課題を達成するための観測手法に関するキーワードを以下のように整理した。

- **地上／スペース広天域高感度撮像・分光サーベイ**
- **地上超大型望遠鏡による超高空間分解能・超高感度撮像・分光観測**
- **赤外線スペース望遠鏡による超高感度撮像・分光観測**

これらの科学的課題と観測手法の関係を図 1.1 に示した。今回の将来計画検討においては、遠大な長期的将来展望よりもむしろ、近未来である 2020 年代に実現されることを期待する比較的具体的な観測手法（地上・スペースの望遠鏡・観測装置）を識別することに重点を置いた。検討の結果、これらの科学的課題の解決のためには、以下の観測手法の実現が必須であると結論する。即ちスペースにおいては、次世代赤外線天文衛星 SPICA の実現を最優先で推進する。地上においては、超大型可視・赤外望遠鏡 TMT の完成、及びすばる望遠鏡の次期観測装置の整備と戦略的運用を推進する。

さらに、スペースに於いては宇宙科学ロードマップにおける公募型小型計画・小規模プロジェクトの枠組みを活用し提案していくと同時に、気球・観測ロケット・超小型衛星実験を適切に実施していく。地上においては東京大学の TAO・京都大学 3.8 m 望遠鏡等、大学主導の望遠鏡を連携して運用していく。また他波長分野の将来計画とも強く連携協力を進める。これらの活動を総合し光赤外コミュニティの掲げる三大課題の達成を図ると共に、人材育成と技術継承をも図っていく。このためには、地上とスペースという観測手法の両輪の垣根を超えた実施体制の構築が必要である。今後は大学と宇宙科学研究所・国立天文台等大学共同利用機関の連携を強化する具体的な仕組みを整備して行くことが望まれる。

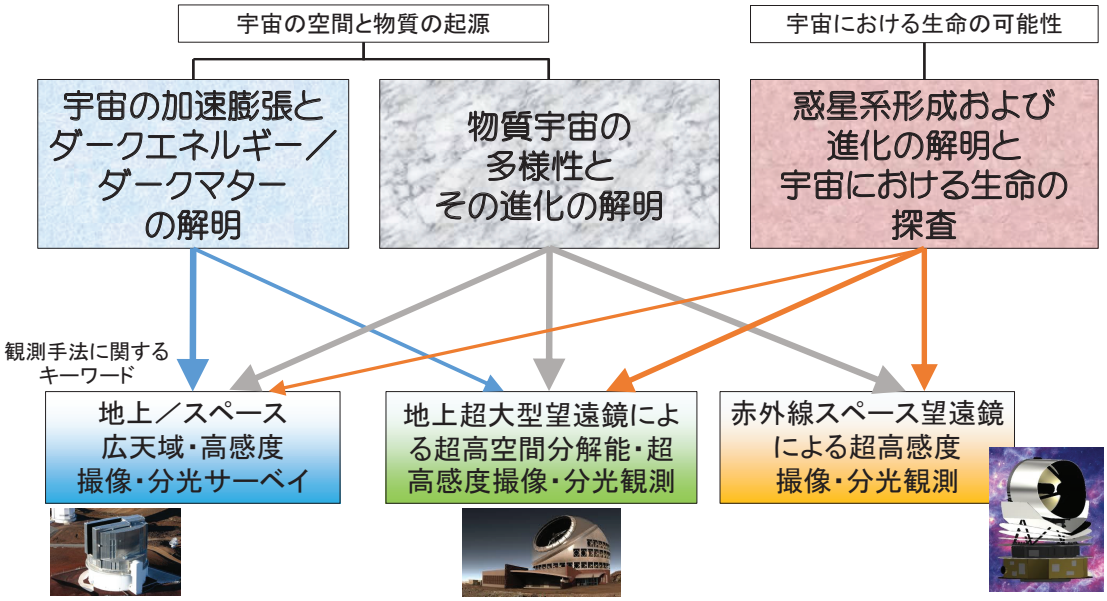

図 1.1: 2020 年代に光赤外天文学が取り組むべき優先課題（三大課題）と、各サイエンステーマ毎の主要課題との関係、および主要な観測手法に関するキーワードとの関係。JAXA 宇宙科学研究所が各コミュニティからの工程表を基にとりまとめている、宇宙科学・探査ロードマップの主要二大課題「宇宙の空間と物質の起源」、「宇宙における生命の可能性」との関係も図示している。

1.2 2020 年代以降の主要な科学的課題

私たちの生きるこの宇宙はどのようにして生まれ、進化し、現在の姿となったのだろうか。この先どうなるのだろうか。そして、私たち人類は、宇宙の中でどのような位置を占めるのであろうか。

天文学は私たちの生きるこの宇宙の仕組みを理解し、人類のよって立つところを明らかにしようとする学問である。21 世紀に入り、スペースと地上におけるさまざまな大型観測施設の稼働と軌を一にして、天文学は急速に発展しつつある。宇宙は四次元時空連続体をなし、その中での物質は複雑な相互作用を通じて進化し、現在の多様で豊かな物質宇宙を生み出した。多様で複雑な宇宙を理解するためには、さまざまな時間・空間スケールにおいて、多彩な観測手段によって観測を推進していくことが必須である。そして、パッチワークを埋めていくように個々の未解決問題の解明を進め、その全体像を徐々に明らかにしていくことになる。

可視光・赤外線には、恒星や惑星からの放射のピークがあり、多様な原子・分子線が集中している波長域である。従って光赤外天文学は、宇宙の構造の基本となる恒星や銀河、星間空間の電離ガス・分子ガスおよび星間塵（ダスト）など宇宙の物質循環を担う物質、生命発生の場所としての惑星および惑星系などの研究に本質的な役割を果たす。

サイエンス検討班では、太陽系から宇宙論に至るまで、天文学のほとんど全分野において 2020 年代に光赤外天文学に求められるサイエンステーマを検討した。近年の天文学の爆発的な発展を反映し、重点的に取り組むべきサイエンステーマは非常に多岐にわたっており、それぞれについて詳しい検討が行われた。検討結果の詳細は第 3 章に譲ることとして、ここではそれらの概要を述べる。我々はテーマ間の相互の関連に重点をおき、2020 年代に光赤外天文学が取り組むべき優先課題を大きく次の三つのテーマに分けてまとめることにした。

- **宇宙の加速膨張とダークエネルギー／ダークマターの解明**
- **物質宇宙の多様性とその進化の解明**
- **惑星系形成および進化の解明と宇宙における生命の探査**

以下でそれぞれのテーマについて重要課題の概要を説明する。

1 宇宙の加速膨張とダークエネルギー／ダークマターの解明

宇宙が如何にして生まれ、どのようにその時空を進化させてきたのかは、天文学の根幹に関わる大問題である。2020 年代の天文学・物理学における最重要課題の一つは、言うまでもなく、ダークエネルギー／ダークマターの解明である。宇宙の加速膨張が明らかとなった現在、これを生じせしめているエネルギーをダークエネルギーと呼んでいる。これまでの様々な観測が明らかにしたところによれば、宇宙のエネルギーの実に 70%程度がダークエネルギーであり、物質は（エネルギーに換算して）30% 程度しか占めていない。しかも、その物質の大半はダークマターであり、通常物質は全エネルギーの 5% に過ぎないのである。しかし、現時点では、宇宙のエネルギーの大半を占めるとされるダークエネルギーの正体は不明である。これが、一般相対性理論における宇宙項なのか、あるいは何らかのエネルギーであるのか、一般相対性理論が銀河団を超えたスケールで何らかの修正を要する結果なのかといったことさえ、明らかとなっていない。一方、ダークマターは、膨張する宇宙の中で物質の大規模構造を作り、銀河形成とその進化に本質的な役割を果たしてきたと考えられる。ダークエネルギーと競合しつつ宇宙の進化を担ってきたはずであり、その実在は揺るぎないと考えられているが、未だに正体は明らかではない。

ダークエネルギーの最も大きな影響は宇宙の大きなスケールでしか見えてこないため、大規模な宇宙観測を行い、宇宙の物質分布の宇宙論的進化を詳細に明らかにすることが、その正体に迫る最重要手段となる。ダークマターについては、その正体の解明には素粒子実験が大きな役割を果たすことが期待されているが、ダークマターの分布や性質を明らかにし、宇宙の構造形成との関わりを解明するには、やはり大規模な宇宙観測が不可欠である。宇宙の大規模な構造とその進化を広い赤方偏移範囲にわたって

深く詳細に追うことは、可視光・赤外線以外の他波長では実行することが困難であり、この分野における光赤外天文学の果たす役割は極めて大きい。

2020 年代の光赤外天文学に課された大きな使命は、ダークエネルギー／ダークマターの正体に迫るために、広天域かつ深い銀河撮像・分光サーベイを遂行することである。これにより、重力レンズ効果、バリオン音響振動、赤方偏移ゆがみ効果、銀河のクラスタリング統計量などの統計観測量を高精度で測定することによって、ダークエネルギーの性質が解明され、ダークマターの空間分布の詳細が明らかになることが期待される。また、ダークマターの一部を担うニュートリノが宇宙の大規模構造形成に及ぼす痕跡を探索し、ニュートリノの質量を測定することも可能となる。同じデータを用いて、宇宙の曲率、原始パワースペクトル形状、断熱原始ゆらぎ初期条件からのずれなどを探っていくことも重要である。より挑戦的な課題であるが、地上超大型望遠鏡により宇宙膨張を直接に計測することは一つの大きな転機となろう。こうした研究により、宇宙の誕生とその進化という「宇宙の枠組み」に関する理解を深めていくことが 2020 年代の光赤外天文学に課された大きな課題である。本テーマに於けるサイエンス課題と我々の将来の取り組みの概念図を図 1.2 に示す。

2 物質宇宙の多様性とその進化の解明

ダークエネルギー／ダークマターの解明のための宇宙観測と言えども、その観測対象は銀河や恒星など、通常の物質から構成される構造である。宇宙観測による精密宇宙論を追求すればするほど、物質宇宙の物理がもたらす各種のバイアスの深い理解が必要となってくる。ダークエネルギーとダークマターに支配された宇宙の中で、物質の相互作用が作り出した多様な構造を理解し、その起源と進化を解明することは古くから天文学の主要テーマであり、2020 年代になすべき重要課題は依然数多く存在する。

中でも「天体の起源」、すなわち、現在の物質宇宙の基礎となる「天体」の出自に迫ることが、2020 年代の光赤外天文学に課された喫緊の課題であると言える。最初の天体がどのようなもので、どうやって形成されたのか、その形成進化が最初の銀河形成にどのようにつながっていくのか、それらが宇宙全体

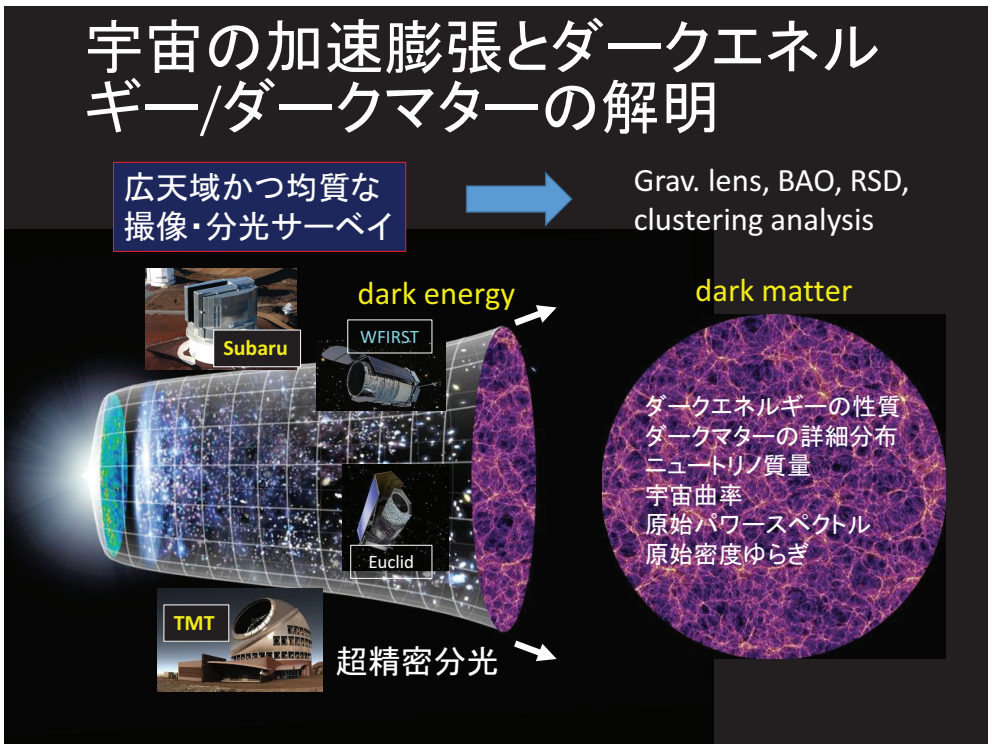

図 1.2: 主要テーマ「宇宙の加速膨張とダークエネルギー／ダークマターの解明」の概念図。

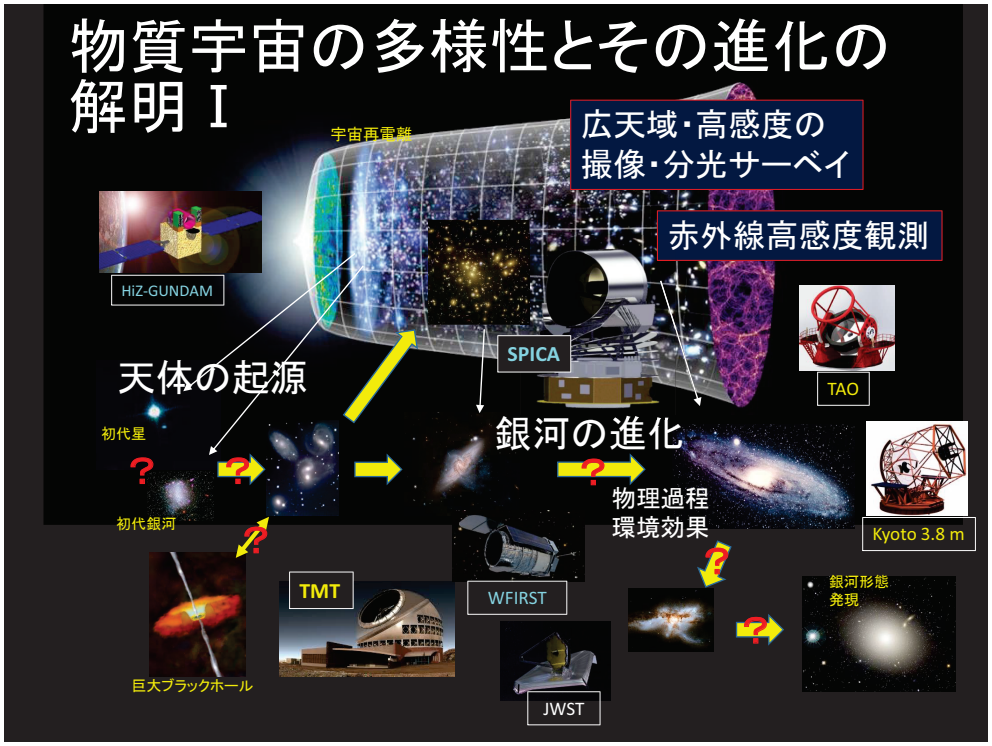

図 1.3: 主要テーマ「物質宇宙の多様性とその進化の解明」（その１）の概念図。

の環境にどのような影響を及ぼし、宇宙を再電離するに至ったのか。現在、あまねく宇宙に存在する銀河およびそれらの中心に存在する巨大ブラックホールはどのように形成され、進化してきたのか。私たちの住む天の川銀河はどのような進化の歴史をたどってきたのか。銀河の中の星形成と恒星の進化、それらが宇宙の物質循環に果たす役割はいかなるものなのか。惑星・惑星系の誕生と生命の起源に迫ることができるか。2020 年代の光赤外天文学は、このような宇宙における多様性の起源と物質進化に関わる多くの謎の解明に切り込み、解き明かしていくことが期待される。

宇宙で最初に生まれた恒星、いわゆる初代星はどういったものでどのようにして生まれたのか。そして、最初の銀河は如何にして形成されたのか。天体の起源の根本とも言うべきこの研究テーマの進展に、2020 年代の光赤外天文学は本質的な役割を果たすであろう。2020 年代には、$z \sim 10$–20 といった高赤方偏移でのガンマ線バースト（GRB）残光や重力レンズ効果などを用いて初代星の形成環境を調べることにより、初代星団もしくは初代銀河の姿を明らかにすることが重要となる。また、地上超巨大望遠鏡による GRB やクエーサーなどの深い近赤外撮像・分光によって宇宙の再電離史の解明が進むことが期待される。

銀河の進化は、星間物質と恒星、銀河中心核等の高エネルギー天体が織り成す非線形な過程が支配する複雑なものである。その個々の過程は未だ十全に理解されているとは言い難い。銀河中の星形成、星形成活動と銀河の形態の間にある密接な相関関係、銀河形態の発現、多くの銀河中心核に存在する巨大ブラックホールがどのように形成され、進化したのかなど、未解明の問題は数多くある。こうした問題に、銀河の根幹となる恒星系と星間ガスの観点から取り組む手段を与えるのは光赤外天文学をおいて他にない。これまで同様、2020 年代においても、広天域銀河撮像・分光サーベイによる統計的な研究とともに地上超巨大望遠鏡、赤外線スペース望遠鏡による高赤方偏移天体の深い観測を行うことが必須である。銀河はその周囲の環境と相互作用し、そうした環境効果によっても影響を受ける。遠方での銀河団や銀河群といった高密度環境での銀河の観測を進め、環境効果と銀河の形態発現の関係を明らかにするとともに、銀河団の形成過程を探ることも重要である。

銀河の中で繰り広げられる星形成活動や物質循環の詳細を明らかにするには、銀河系（天の川銀河）と近傍銀河の詳細観測を、遠方銀河の観測と同時に進めていく必要がある。銀河系は、我々に最も近い銀河であり、個々の恒星、大小さまざまな星間雲に分解して観測できるため、銀河という複雑なシステムを詳細な構造成分に分解して研究するためには格好の対象である。しかしながら、私たちがその中に取り込まれているため、銀河系の全体像を把握することは容易ではない。近傍銀河の観測は銀河の全体像と詳細を知ることができるため、銀河系の観測とは相補的である。銀河の形成過程を解明し、質量集積過程とダークマターの関与を明らかにするには、近傍銀河をサンプルとした詳細観測が欠かせない。2020 年代の光赤外天文学は、銀河系・近傍銀河のそれぞれの構成成分に分解した観測を進めることにより、銀河系中心の巨大ブラックホール、銀河ハロー、近傍矮小銀河、局所銀河群の動力学構造、銀河の星生成の物理条件と銀河のガス・ダスト進化といったテーマに重点的に取り組むべきであろう。そのためには、広天域撮像・分光サーベイによる銀河系・近傍銀河の大量恒星サンプルの観測、地上超大型望遠鏡および赤外線スペース望遠鏡による高空間分解能・高波長分解能観測が必要とされる。以上のような本テーマに於けるサイエンス課題と我々の将来の取り組みの概念図を図 1.3 に示す。

銀河を構成する物質の大半は恒星に含まれ、ガスやダストなどの星間物質が取り巻いている。銀河はこれらの間の物質循環を通じて進化し、物質宇宙をより多様で豊かなものにしていく。したがって、こうした物質循環の物理に対する深い理解なしには、物質宇宙の多様性と進化を解明することはできない。2020 年代には、銀河中の物質循環の理解という観点を意識して、星間物質、星形成、恒星進化の研究を進めることが急務となろう。星間物質における物質循環にはダストが大きな役割を果たしており、ダストの形成と進化を中心に据えた星間物質の進化の解明が待たれる。星間ダストの研究には、探査機によるサンプルリターンやロケット実験等の実験天文学と、星周物質、原始惑星系円盤などの赤外線観測とのコラボレーションが新しい知見をもたらすと期待される。赤外線領域には、星間分子由来の様々なスペクトル的特徴も存在する。これを用いて宇宙空間における水・有機物の生成と進化を探ることも 2020 年代の光赤外天文学が担うべき課題である。

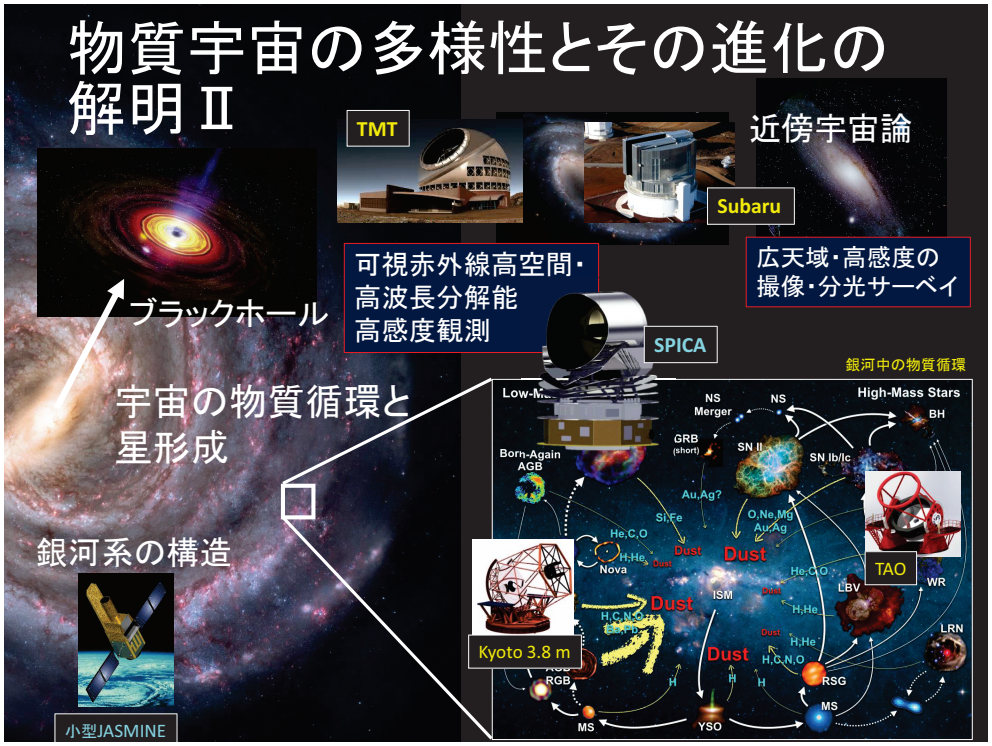

図 1.4: 主要テーマ「物質宇宙の多様性とその進化の解明」（その 2）の概念図。

星間物質が凝縮し恒星が生まれる。2020 年代には、大質量星と、褐色矮星および惑星質量天体（浮遊惑星）の形成過程に迫ることが大きなテーマとなろう。また、星の初期質量関数（IMF）の環境依存性の理解は宇宙の星形成史・金属汚染史を研究するにあたって決定的に重要である。若い大質量星は距離が遠く厚いダストに隠されているため、地上超大型望遠鏡を用いた近・中間赤外線での撮像・分光が必要である。超低質量天体については、赤外線スペース望遠鏡による超高感度観測によって、その形成進化段階を追跡することが重要となる。こうして広い質量範囲の星形成過程を明らかにしつつ、近傍銀河の高感度・高空間分解能観測によって IMF の環境依存性を調べることも 2020 年代に精力的に進めるべき課題である。

2020 年代の恒星物理研究の最重要課題は、質量放出と連星進化の理解に基づき元素の起源の理解を進めることである。恒星進化の末期における質量放出現象は、宇宙の物質循環にとって非常に重要であるにも関わらず、未だによく分かっていない。また、連星進化の最終段階である Ia 型超新星の親星はまだ解明されておらず、その理解は急務である。超新星爆発は重元素合成の現場であり、初期宇宙におけるダストの供給源と考えられているが、未だに爆発機構は未解明で、ダストの放出量もよく分かっていない。地上超大型望遠鏡による高波長分解能偏光観測、高赤方偏移超新星サーベイ、赤外線スペース望遠鏡による超高感度赤外線観測、中小口径望遠鏡ネットワークによる突発天体追跡観測、および、重力波観測・ニュートリノ観測・高エネルギー天文観測との連携などが、こうした問題に迫る有用な手段であろう。以上のような本テーマに於けるサイエンス課題と我々の将来の取り組みの概念図を図 1.4 に示す。

3 惑星系形成および進化の解明と宇宙における生命の探査

生まれたばかりの星は、その周囲に自らの材料の残滓であるガスとダストをまとっている。ここから原始惑星系円盤が形成され、惑星系が生まれる。実際、近年の系外惑星探査の急速な進歩により、銀河系においては多くの恒星の周りで惑星系が誕生したことが分ってきた。そして生命は惑星で生まれる。銀河の星が生み出してきた重元素が、その材料となっている。宇宙における生命の可能性の理解は、自然科学の最重要課題の一つであり、これからの光赤外天文学が進めるべき重要課題が、地球外で生命に関連する物質や現象をとらえること、および惑星系の形成を理解し、太陽系を始めとする惑星系の多様性の起源を探ることであるのは言うまでもない。

惑星が生まれる過程とそのメカニズムの観測的検証は、まだ始まったばかりである。2020 年代には、ハビタブルゾーンを含む原始惑星系円盤の内側領域や誕生直後の惑星の観測的理解を進めていくことが求められる。こうした目的のためには、地上超大型望遠鏡による超高空間分解能・高コントラスト観測、赤外線スペース望遠鏡による超高感度中間・遠赤外線観測が有効である。また、中小口径望遠鏡をも駆使したさまざまな観測手法で、木星型から地球型惑星のスノーライン内側から外側までの分布を完全に明らかにしていくことも、2020 年代の重要課題である。これを非常に多数の系外惑星系について行うことで、形成論に対する大きな制約が得られるだろう。

1995 年の系外惑星発見以来、急速な発展を続けてきた系外惑星の研究は、現在、より低質量、より低温の惑星へと研究の軸足が移っている。2020 年代には、ついに「地球型系外惑星」がこの研究分野のキーワードとなるであろう。地球型系外惑星の検出と特徴付けは、宇宙における生命存在可能性の理解と生命探査につながる大きな一歩である。2020 年代に精力的に取り組むべき課題であり、このためには大型スペース望遠鏡が本質的な役割を果たすであろう。また、地上超大型望遠鏡の集光力と解像力も、地球型惑星の探査と特徴付けに活躍することが期待される。

太陽系天体の多様な姿の解明は、私たちの住む世界の最も身近な天体を解明し、地球を育んでくれた太陽系の形成と進化を理解する試みである。太陽系の理解は、系外惑星・系外惑星系の理解の基礎をなすものでもある。2020 年代には、太陽系誕生時の情報を保持する彗星や小惑星の観測から、太陽系の形成過程を知ることに加え、生命の材料物質である水と有機物が、いつどこに存在したのかを明らかにすることが重要となる。また、火星の大気循環やエンケラドスの噴出ガスの調査は、生命存在可能性の議論に直結する課題である。こうした研究には地上大型望遠鏡、スペース望遠鏡を動員した可視光・赤外

図 1.5: 主要テーマ「惑星系形成および進化の解明と宇宙における生命の探査」の概念図。

線での高感度観測が必須であり、多くの場合、モニター観測が本質的理解をもたらす。また、望遠鏡を用いた天体観測と探査機ミッションとを協調させて太陽系内のさまざまな天体の観測を継続的に進めていくことも忘れてはならない。以上のような本テーマに於けるサイエンス課題と我々の将来の取り組みの概念図を図 1.5 に示す。

以上で概観した通り、宇宙論から生命までは相互に絡み合いながらひと繋がりとなっている。検討された多様な観測・研究テーマはどれも決して個々に独立したものではなく、あるテーマは別のテーマの基礎となっており、時空スケールを変えながらこのひと繋がりの宇宙の織物を解きほぐす試みである。2020 年代の光赤外天文学は、他分野と連携・協力しながら、この試みを推進していくことが望まれる。そこでのキーワードは、

- **地上／スペース広天域高感度撮像・分光サーベイ**
- **地上超大型望遠鏡による超高空間分解能・超高感度撮像・分光観測**
- **赤外線スペース望遠鏡による超高感度撮像・分光観測**

であり、このいずれをも推進すべく、観測装置を整備していくべきである。

各サイエンステーマにおける検討結果の詳細と、2020 年代に光赤外天文学が行うべき観測および必要となる観測装置に関しては、本検討書の第 3 章で詳しく述べられている。また各サイエンステーマ毎の主要課題と光赤外分野全体としての三大課題との関係、主要課題と上述した観測手法キーワードとの関係についても整理しているので、参照されたい。

1.3 スペース将来計画の推進

2006 年に我が国は赤外線天文衛星「あかり」を打ち上げ、当該分野の世界第一線に並び立つことを成し遂げはした。2020 年代以降の光赤外天文学分野の更なる発展のためには、もはや地上に留まることなくスペースからの第一線の観測を実現することが必須であることは論を待たないが、昨今の学問の進展に合わせて、天文衛星ミッションへの仕様要求はますます高度化しており、達成すべき技術の獲得と、十分な国内人員体制の構築、そして適切な国際役割分担を模索しつつ、各スペースプロジェクトをコミュニティとして推進して行かなければならない。

2015 年 2 月、宇宙研からの要望に応える形で、光赤天連は「光学赤外線分野の目標・戦略・工程表」[1] を発出した。折しも戦略的中型計画の公募が為されたこともあって、次世代赤外線赤外線天文衛星 SPICA の実現を最優先で求めるものの、事情によりその実現時期が 2030 年代にずれ込むような場合には、コミュニティとしての持続的な成果創成と人材育成の観点から、超広視野初期宇宙探査衛星 WISH（戦略的中型計画)、あるいは小型 JASMINE 等の公募型小型計画に基づいて衛星を開発し 2020 年代初頭に打ち上げることが重要な意義を持ち得る、と整理した。残念ながら 2015 年 6 月に公表された戦略的中型公募の一次選定リストには、WISH は採択されなかった。第 3 章「次世代光赤外天文学のサイエンス」に示すように、WISH の実現を必要とするサイエンス課題が数多く存在する。そこで 2030 年代に実現される次期計画の検討に、WISH の科学価値検討・ミッションの概念検討の成果を活かしていく。

一方、宇宙科学の全体状況を見るに、太陽系探査科学分野については、従来のボトムアップの探査だけではなくプログラム化された探査も進めることになり、これに呼応して天文・宇宙物理学分野においても、戦略を持ってミッション提案していく必要が生じている。このような周辺状況も鑑みて、以下に我々光赤天連としてのスペース将来計画の推進方策を述べる。

1.3.1 戦略的中型計画 SPICA

次世代赤外線天文衛星 SPICA は、「宇宙が重元素と星間塵により多様で豊かな世界になり、生命存在可能な惑星世界をもたらした過程」を解明することとして再定義された。この目的を達成するために口径 2.5 メートルで極低温冷却されたスペース赤外線望遠鏡に、中間赤外線・遠赤外線帯の最新鋭の観測装置を搭載し、Herschel や JWST(James Webb Space Telescope) 同様に、天文観測最適地である太陽－地球第 2 ラグランジュ点軌道に打ち上げて、これまでになく極めて高い感度で銀河や星惑星形成天体などの観測を行う。本ミッションは、もはや光学・赤外線天文学分野に留まらず、天文・宇宙物理学全体の最重要課題と言っても過言ではない「物質宇宙の多様性とその進化の解明」、「惑星系形成および進化の解明」に結びつく成果が期待されると共に、将来の「宇宙における生命の探査」につながる効果も期待でき、我々光赤天連コミュニティが最優先で推進するミッションに相応しいと考える。

しかしながらこれまで SPICA を日欧でプロジェクト化する段階にはなかなか至らず、その実現は 2020 年代後半と目される以上、スペースからの光赤外天文観測の経験を若手研究者に積ませる機会が別途必要であるし、スペースからの観測を実現するための様々な技術の開発・継承・発展を担う人材の育成も必要である。また光赤天連コミュニティの地上大型将来計画として TMT も推進していくが、これら SPICA や TMT といった大型計画を持ってしても覆い尽くせない科学課題の存在を認識して来た。これらの観点から、小規模プロジェクトや、公募型小型計画として位置付けるにふさわしいミッションの実現・国際プロジェクトへの参加を議論して来た。そこで以下のようなプロジェクトの実現も重視し、推進していく。

1.3.2 公募型小型計画について

2020 年代前半に於いて SPICA に直結する技術課題に取り組み、また天文衛星観測に経験を積んだ人材の育成とコミュニティによるスペースミッションを用いた科学的成果の継続的創出を図るため、公募型小型計画の

実現を重視し、SPICA の推進と同時に希求する。また将来公募型小型計画の推進チームの一部が SPICA 計画に合流することを期待する。

小型 JASMINE への支援：公募型小型計画としてこれまで光赤天連は、小型 JASMINE 計画に対して高い評価を与え支援してきたが、2014 年 2 月の小型計画の公募では、最終候補に残ることはできなかった。しかしながら、小型 JASMINE は、「物質宇宙の多様性」というトップレベル課題の重要要素の一つである「巨大ブラックホールの形成進化」を天の川銀河の中心核バルジの精密動力学的解析を通じて目指すミッションであり、我々光赤天連コミュニティが支援を続けるに相応しいミッションに変わりがなく、引き続き推進していく。

また、小型 JASMINE が科学的成果をもたらす上で、スペースアストロメトリの認知度を挙げ、かつアストロメトリというサイエンスコミュニティを分野横断的に拡げることが肝要である。この上で、2017 年末に打ち上げと目される Nano-JASMINE を実現し、成果創出までのサイクルを実施することも重要である。そしてサイエンスチームを理論や電波等他波長天文分野にも拡充していくことも必要であろう。

HiZ-GUNDAM への支援：HiZ-GUNDAM は主目的「初期宇宙における星形成・宇宙再電離・重元素合成の歴史的変遷の解明」を初期宇宙のガンマ線バースト （GRB）を光源とした X 線および近赤外線観測というユニークな手法で行うもので、最重要課題の一つ「物質宇宙の多様性とその進化の解明」に紐づいている。

公募型小型計画においては、その提案は、当該コミュニティを代表するものであることが条件として課されている。HiZ-GUNDAM は、その性格上高エネルギー天文学と光赤外線天文学の両方にまたがるため、光赤天連と高宇連の合同で「分野横断型プロジェクト推進委員会」が設置された。その答申 [2] にあるように、高宇連と光赤天連の両方において GRB や突発天体、および初期宇宙に興味のある研究者が中心となってチームを形成し、主体的に提案・推進することが適切である。また HiZ-GUNDAM の主目的達成には地上大望遠鏡による分光観測との連携が重要であるので、HiZ-GUNDAM チームと地上観測研究者との協力体制の強化を促進する。

1.3.3 小規模プロジェクトの推進

この節で取り上げる小規模プロジェクトについては、その意味するところが二通りである。即ち、まず宇宙理学委員会が募集を行う「小規模プロジェクト」（資金規模 0.5 億〜100 億）をコミュニティとしてどう位置付けるか、という問題、もう一つは観測ロケット等さらに小規模のプロジェクト群の位置づけである。前者は WFIRST への参加、後者は（今のところ）、CIBER-2 等の観測ロケット実験とソーラー電力セイル（戦略的中型ミッション（工学）の候補）の科学観測機器である EXZIT がある。

WFIRST への参加： NASA が 2024 年に打ち上げを目指す WFIRST は、「宇宙の加速膨張」、「系外惑星」、「近赤外宇宙物理」の研究を目的とした米国 National Research Council による “Astro2010 Decadal Survey” で大型衛星計画の最優先課題として位置付けられており、そこへの日本の貢献としてのコロナグラフ観測装置開発の分担 、地上観測、データ解析は我が国の光赤外研究者のプレゼンスを示す上で非常に重要である。光赤天連は、宇宙理学委員会のワーキンググループ活動及び 小規模プロジェクトの枠組みを利用した本格的な WFIRST への参入を支持し推進する。

EXZIT および CIBER-2 等のロケット実験： これらは初代星を個々の星を観測して調べることは不可能であり、拡散放射（宇宙赤外線背景放射）のスペクトルや空間揺らぎを通じて初代星の痕跡を探るものである。また類似の海外の計画として NISS （韓国）、SPHEREx （米国）がある。光赤天連は、スペースからの観測経験および必要な技術開発を通じた人材育成という観点から、これらの活動を今後も推進していく。

1.3.4 まとめと 2030 年代に向けて

以上のように光赤天連のスペース将来計画としては、次世代赤外線天文衛星 SPICA の実現を最優先として引き続き推進する。SPICA の実現は 2020 年代後半であり、2020 年代前半に公募型小型計画を実現しスペースからの観測の経験を積むことで、技術開発・人材育成を図ることが、光赤天連として必要と考える。並行して WFIRST への参加等の小規模プロジェクトを推進する。図 1.6 に光赤天連のスペース計画工程表を示す。

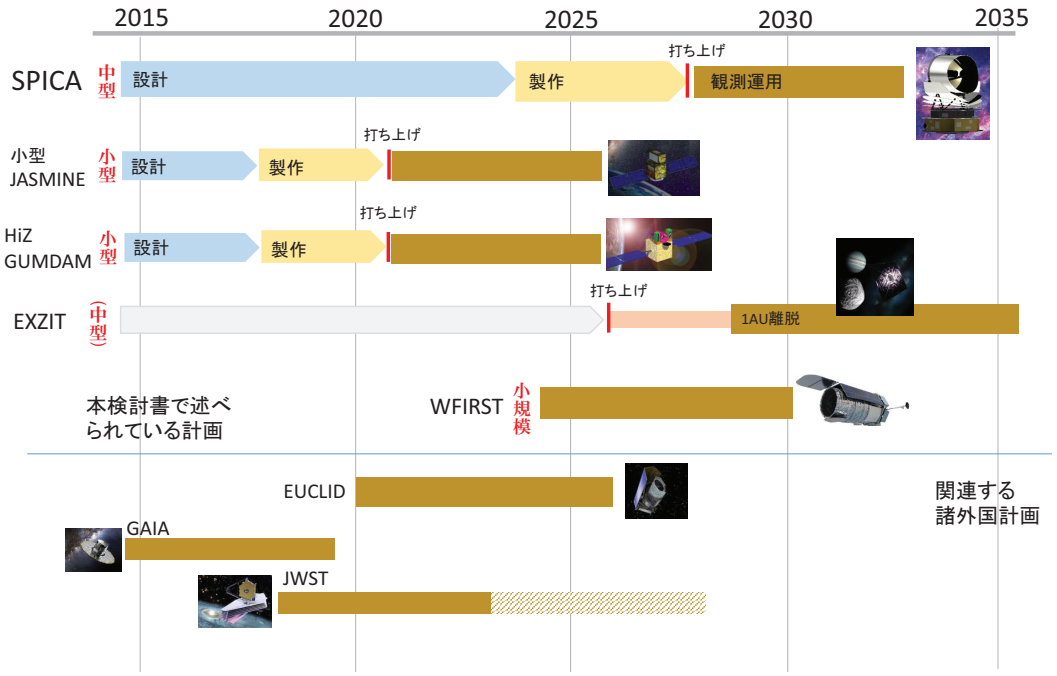

図 1.6: 光赤天連スペース計画の工程表。EXZIT はミッション本体（ソーラー電力セイル）は戦略的中型であるが、EXZIT（理学搭載機器）としては小規模プロジェクトである。

また、戦略的中型計画規模のミッションの策定には十分に時間をかける必要があることを忘れてはならない。即ち SPICA 後の基幹ミッションの概念検討活動は、2020 年代になるまで待つのではなく、速やかに開始する必要がある。

1.4 地上将来計画の推進

光赤外線の地上望遠鏡観測は 19 世紀までのヨーロッパ中心の発展、20 世紀の米国の急速な成長等、長い歴史を有するが、日本はそのなかにあって 21 世紀に入ってすばる望遠鏡を中心に一部の分野においては世界の最先端に肩を並べ、あるいは先導しつつある。地上望遠鏡計画は世界的にも日本においても依然として活発であるが、ここでは 2020 年代の日本の地上光赤外線望遠鏡計画の柱である TMT、現在の柱であるすばる望遠鏡、これらと相補的な大学の望遠鏡群に分け、まずそれぞれについての検討のまとめを記し、その後、相互の関係やスペース計画との関係も含めた全体像について検討の要旨を記していく。

1.4.1 TMT

2020 年代の日本の地上光赤外線望遠鏡計画の柱は TMT である。 8–10 m 級望遠鏡に比べ一桁大きい集光力等を活かし、天文学・天体物理学のほぼすべてのスケールにおける観測において大躍進が期待される。分光観測においては JWST などのスペース望遠鏡に勝る性能を発揮でき、補償光学によって得られる空間分解能はハッブル宇宙望遠鏡をはるかに凌ぐ、まさに 2020 年代の花形望遠鏡であり、地上計画のロードマップの柱である。2014 年度概算要求で日本における予算措置が本格的に始まったものの、総予算は国際協力で分担しあう体制とならざるをえない大変大きな規模であり、観測装置ですら数十億円規模で開発に 10 年を要する規模になることなどから、完成に至るまでの道のりはまだまだ予断を許さない。同規模の望遠鏡である GMT, E-ELT よりも早く完成させることも大変重要であり、建設母体となる国立天文台はもちろん日本の光赤外線コミュニティの力をあわせて、完成と順調な運用にむけてたゆまぬ努力を続ける必要がある。

1.4.2 すばる望遠鏡

すばる望遠鏡は現在日本の光赤外線コミュニティの柱として多くの観測装置を運用し、様々な科学的要求に応えるべく最大限に稼働して最先端の成果をあげている。とりわけ 8 m 級望遠鏡唯一の本格的主焦点は可視光から波長約 1.5 μm までの広視野観測を可能とし、他の 8 m 級望遠鏡とは差別化したユニークな機能をすばる望遠鏡に持たせている。

将来展望としては、2014 年から稼働を開始した Hyper Suprime-Cam（HSC）は現在世界的にも群を抜く可視広視野サーベイ能力を有し、国際共同プロジェクトとしてすばる戦略枠で 300 夜規模のサーベイが進んでいる。この多色サーベイからは様々な天文学・天体物理学的成果があがると期待される。2020 年代には米国を中心とする LSST 計画が進み始め、HSC の約 3 倍のサーベイ能力を有する撮像専用望遠鏡がチリで稼働を開始するが、すばる望遠鏡の北天におけるサーベイ能力世界一の座は保たれ、TMT やスペース望遠鏡を含めた他の望遠鏡と連携したサーベイはさらに進められると期待できる。すばる望遠鏡主焦点のさらなる機能強化として、多天体ファイバー分光器 Prime Focus Spectrograph（PFS）が国際協力のもと開発が推進されている。これは 8 m 級望遠鏡では圧倒的に広い視野とファイバーの本数を誇る装置であり、現在のところ世界に比肩するべき具体的な望遠鏡と観測装置はなく、2020 年代の宇宙論・銀河研究や恒星の分光サーベイにおいて多くの成果を上げることが期待できる。ULTIMATE-SUBARU は広視野補償光学を実現し、近赤外線における高感度・高空間分解能のサーベイ能力をすばる望遠鏡にもたらせようとするものである。TMT や JWST、SPICA が活躍する時代には、これらの貴重な望遠鏡で観測するにふさわしい天体を供給することがすばる望遠鏡の重要な役割の一つであり、HSC、PFS とあわせて ULTIMATE-SUBARU はまさにその役割を担うのにふさわしい観測装置の一つである。さらに HSC と PFS は可視を中心とした観測装置であり、満月の前後には有効な観測は難しいが、そこを補えるという点で ULTIMATE-SUBARU は有効である。

1.4.3 大学主導の望遠鏡

日本の光赤外望遠鏡は、岡山天体物理観測所口径 188 cm 望遠鏡から口径 8.2 m のすばる望遠鏡へ一気に飛躍できた。しかしながら 4–5 m 級望遠鏡を多数（現時点で口径 3 m 以上の地上光赤外望遠鏡は世界に 27 台）建設してきていた欧米に比べ、日本においては、中型望遠鏡がなく、頂上は高いけれども幅の狭いピラミッド構造となった。すばる望遠鏡の大成功によって光赤外コミュニティも拡大し、世界を先導する研究者を生み出したが、一方で、すばる望遠鏡の観測時間の獲得が簡単ではない厳しい状況ともなった。大学院生がすばる望遠鏡の時間を自らの力で獲得するのがたいへん難しい状況にあって、自然な動きとして、TAO、京大 3.8 m、AIRT、SGMAP が大学主導で推進され始めている。TAO は世界最高地点の天文台として新しく開く大気の窓と 6.5 m の口径を活かした赤外線観測が鍵となる。また、南天の比較的大型の望遠鏡という点に加え、サーベイ中心に移行していくすばる望遠鏡の一部の観測機能をひきつぐ面でも重要である。京大 3.8m 望遠鏡は国内初の分割鏡望遠鏡への技術挑戦や軽量安価な架台等のへの取り組みが重要な要素の一つとなっている。また完成後の機動性のある観測は国内望遠鏡群のとりまとめの役割も期待できる。AIRT は南極高地のサイトにあり、平均的に TAO のサイトを上回る高い赤外線透過率と低温環境を活かした大型望遠鏡並みの赤外線感度を有することが大きな魅力である。SGMAP は大規模偏光サーベイを計画しており、世界に似た計画がない点が売り物である。

TAO と京大 3.8 m 望遠鏡は、望遠鏡とドームの建設費を獲得、2017–2018 年頃のファーストライトをめざしている。AIRT は今後も極地研と共同で中小観測装置による様々な試験を継続する。赤外線分野で特徴のある天文学を推進するために、テラヘルツ天文グループと共に極地研に働きかけながら国際協力も視野にいれて南極天文学の流れを作っていく。SGMAP はハレアカラで稼働をしていた 2 m マグナム望遠鏡を活用しての実現を目指している。

この他、第 5 章で紹介する光赤外大学間連携で活用されている 1–2 m級望遠鏡とあわせ、2020 年代には欧米と肩を並べるとまではいかないものの、さほど遜色のない、また一部は欧米をリードする地上望遠鏡群が整備されると期待されている（図 1.7）。

1.4.4 全体像

大型・超大型望遠鏡は、数は少なく、また特に超大型望遠鏡は国際協力で観測時間を分け合うため、例えば TMT に於いて日本のコミュニティは全体の 1/4〜1/5 程度が使えるのみであるが、一方で人類の知のフロンティアとなる最先端のサイエンスを推進する大変重要な役割を多く負う。サイエンス検討班の検討結果をみても、例えば TMT に期待される 2020 年代の最先端のサイエンスは観測的宇宙論から銀河や星惑星形成、太陽系天体の研究まで、ほぼすべてのスケールの観測研究において活躍することが期待されていることがわかる。すばる望遠鏡は、特に広視野性能で TMT を補いながら、やはりほぼすべてのスケールの観測的研究で活躍が期待されており、赤外線性能に優れ、口径の点で第三番目の TAO が続いている。これらは、サイエンス班のまとめの 2020 年代のキーワード三つのうち、「地上超大型望遠鏡による超高空間分解能・超高感度観測」「地上広天域高感度撮像・分光サーベイ」を中心的に担っている。

一方で、小型望遠鏡での学生教育と機動性を活用した研究、中型大型望遠鏡でのふんだんな観測時間に基づく系統的観測・機動性のある観測あるいは長期的モニター観測研究と研究者育成は、一人あたりの観測時間の限られた大型・超大型望遠鏡とは相補的な重要な役割を負う。望遠鏡が比較的小型であったり、サイトが世界トップレベルになかったりしても、望遠鏡を連携して用いることにより、特に時間変動現象の観測においては威力を発揮する。あるいは口径が世界最大級でなくとも、ユニークな観測装置を活用したり、アイデアを試したりするためにも重要な役割を負う。サイエンス班の検討においても、京大 3.8 m、AIRT、SGMAP は時間分解能・赤外線高感度・偏光などに着目した観測を基本として目的を絞ったサイエンスで重要な成果をもたらす計画として期待されている。また、最近の約五年間運用をしてきた大学間連携の取り組みによって小型望遠鏡の連携観測の枠組み作りに成功している。現在突発現象の観測に力を発揮しつつあり、完成してくる京大 3.8 m や TAO 等との連携を加えてさらに発展していくことが期待される。

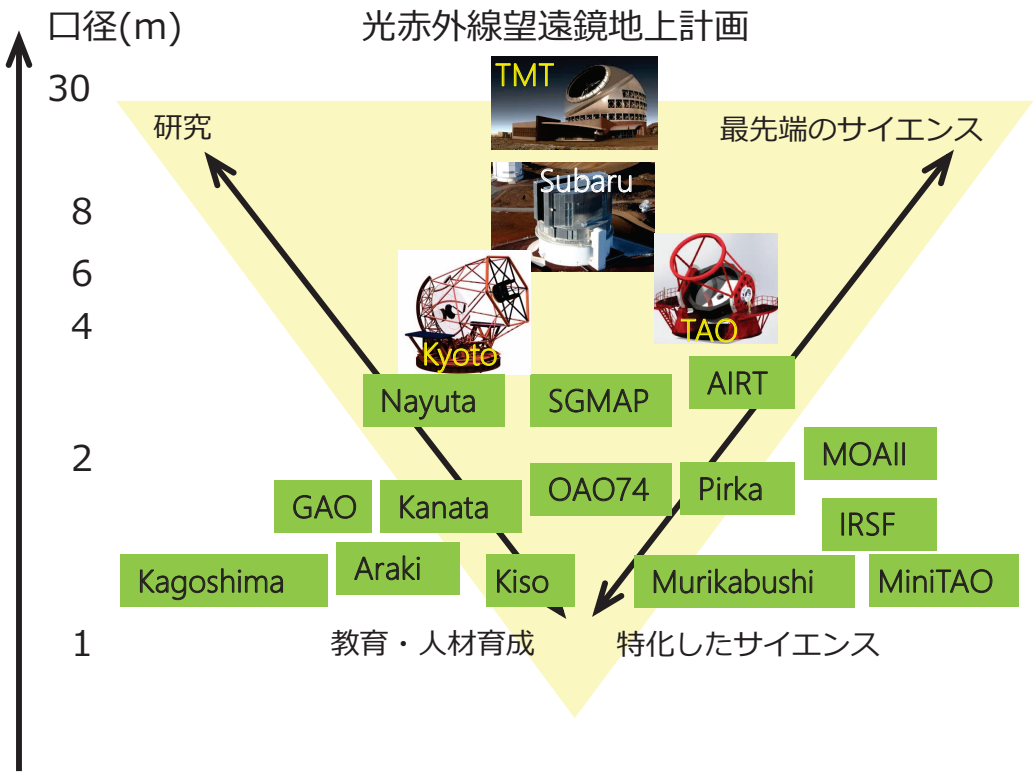

図 1.7: 光赤外地上計画。上に行くほど大計画、即ち最先端のサイエンスの守備範囲が広くなる（逆三角形）。一方若手教育・人材育成に関しては下に行くほどその機会が多い（正三角形）。

スペース計画は、最先端のサイエンスを推進することが一番の使命となることや実現のために必要なリソースや時間の規模を考慮すると、たとえ小型衛星であっても地上望遠鏡にすれば大型・超大型計画に相当する。とりわけサイエンス検討班のまとめにある 2020 年代の 3 つのキーワードのうち「赤外線スペース望遠鏡による超高感度撮像・分光観測」を担っている。地上計画とスペース計画のシナジーとしては、このような最先端サイエンスにおける相補性に加え、人材育成という観点で、気球・ロケット・超小型衛星等に加え、地上の小型・中型望遠鏡を含めた光赤外線コミュニティ全体での人材育成における連携があり、今後一層重要になってくると考えられる。

最後に地上望遠鏡の場合、1948 年完成のヘール 200 インチ望遠鏡が観測装置を更新しながら今も科学的成果をあげている例があることでもわかるように、非常に長期にわたって活躍できることも大きな特長として特記すべきことである。したがって、地上望遠鏡計画の場合、観測装置などは更新しながらも、図 1.8 のように時間的にはずっと長い期間活用されるつもりで計画されており、人材育成の観点も含め、スペース計画と相補的な関係となっている。

1.4.5 まとめ

以上、日本の光赤外地上望遠鏡計画は、TMT の建設とすばる望遠鏡の整備、中小規模望遠鏡計画の整備と連携が進んでおり、科学的な大躍進と人材育成・教育を柱に 2020 年代の日本の光赤外天文学の基幹を担っていく体制を構築しつつある。ただし TMT やすばる望遠鏡の観測装置、新中口径望遠鏡の完成までには継続的な努力と協力が必要である。また重要となる科学的テーマや技術の発達などに対応し、2020 年代あるいはさらにその先へ向けて、中小望遠鏡計画の整備や、新観測装置の製作や新技術の導入、また観測の連携などにおいても、弛みない努力を継続する必要がある。

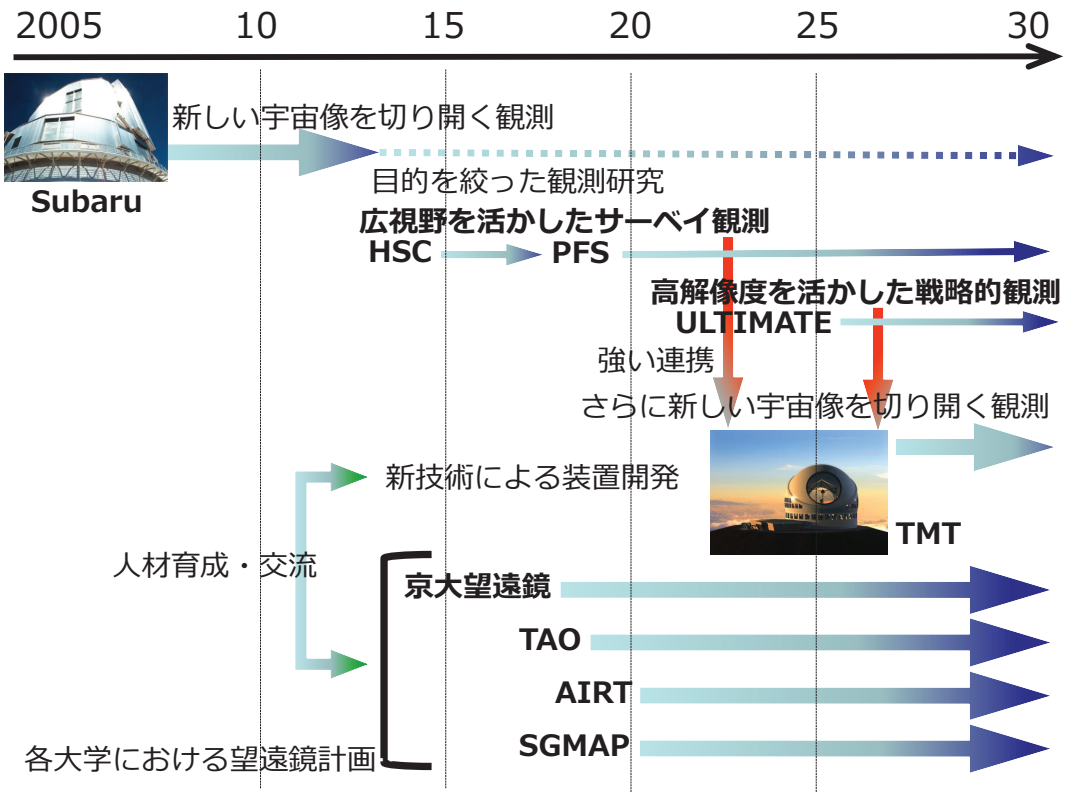

図 1.8: 各種光赤外地上望遠鏡計画の年表と相互関係。

1.5 我が国の取るべき道

この章では、我々光赤外分野の将来計画が、天文学・宇宙物理分野全体および関連分野に対してどのように位置づけられているのか、を明示するために、まず（2015 年度末時点での）天文学・宇宙物理分野全体および関連分野の動向について紹介する。また、分野横断・国際連携の考え方、将来を担う若手研究者の育成や技術継承に関する考え方について述べ、我が国の光赤外分野が取るべき道について考察する。

1.5.1 天文学・宇宙物理分野全体および関連分野の動向

第 1.2 節で述べた主要な科学課題は、光赤外分野に留まらず天文学・宇宙物理学全体取り組むべき主要課題に結びついている。光赤外分野外の我が国の主要な計画を以下にまとめる。

宇宙の構造の起源： LiteBIRD（宇宙マイクロ波背景放射偏光揺らぎ B モード成分の検出に特化した衛星）が宇宙科学・探査プログラムの戦略的中型計画の候補。2020 年代を超えて実現を目指す DECIGO（原始重力波観測のスペースアンテナ）がある。

物質・エネルギーの本質： ダークエネルギーの状態方程式（の進化）については、我々光赤外分野の将来計画以外には計画がない。ダークマター検出を狙う計画として GAPS（宇宙線物理学分野、気球実験）がある。SKA（後述）によるバリオン音響振動の探査も予定されている。

揺らぎの種からの構造形成： SKA（国際協力による開口面積 1 平方キロメートルの巨大な cm 波・m 波帯の長波長電波干渉計）が 2020 年代後半に実現予定。

バリオン物質の織りなす多様な宇宙： 電波（VLBI）では Event Horizon Telescope（地上）によるブラックホールの直接撮像、K-EUSO（スペースからの最高エネルギー宇宙線観測、海外主導プロジェクトへの参加）や、Athena（X 線天文台、銀河と巨大ブラックホール形成・大規模構造形成、ESA L クラス）への小規模プロジェクトとしての参加、DIOS（広視野 X 線分光）、NGHXT（硬 X 線撮像）といった公募型小型衛星計画、WF-MAXI（国際宇宙ステーション搭載、小規模プロジェクト）等がある。

惑星系形成： 惑星科学分野においては「太陽系生命環境の誕生と持続に至る条件としての前生命環境の進化の理解」という大目標のもと、太陽系探査のプログラム的実施が計画されている（火星衛星サンプルリターンに始まる戦略的中型計画、木星氷衛星探査（JUICE、欧州主導ミッションへの小規模プロジェクトとしての参加）等）。

バイオマーカー探査： 宇宙と生命にかかわる研究分野として日本アストロバイオロジーネットワークが設立されており、その中で国際宇宙ステーション利用の小規模プロジェクトや太陽系探査ミッションが位置づけられている。

なお、上記の分類に整理し難いが「マルチメッセンジャー天文学」（最高エネルギー宇宙線、ニュートリノ、重力波等）が既に幕開けし、新たな研究分野・研究協力の種を蒔いていることに留意すべきである。Cerenkov Telescope Array （CTA、超高エネルギー γ 線）、スーパーカミオカンデ（ニュートリノ）、KAGRA（重力波アンテナ）等の動向を注視し、光赤外分野の立ち位置を適宜再確認していくべきである。中でも、2016 年初頭ついに LIGO チームによって人類初の重力波の直接検出が報告されたことは記憶に新しい。重力波アンテナは、ブラックホールの直接検出や超新星爆発・GRB の物理の解明等に繋がり、注目に値する。

日本学術会議の動向： 日本学術会議の「学術の大型施設計画・大規模研究計画に関するマスタープラン」（以下、マスタープラン）は、2014 年に第 22 期版が公開された。そこで採択された「学術大型研究計画」（実施期間 5–10 年程度、及び予算総額数十億超（上限なし））は新規 192 件であった。さらに、その中より「重点大型研究計画」27 件を採択した（天文・宇宙物理関係では、SKA、LiteBIRD、SPICA）。2017 年に向けてマスタープランの改訂の動きが始まっており、注視していく必要がある。

宇宙科学ロードマップ／我が国の宇宙科学の実行戦略（参考文献 [3]）：従来のボトムアップ、良いミッションが競争を勝ち抜いて実現するという基本方針は尊重するものの、宇宙科学全体の方向性を政府・社会に向けて発信する上では戦略性をもって長期計画を立案することが必要である。2014 年末から 2015 年初頭にかけて行われた「コミュニティからの目標・戦略・工程表」（Request for Information: RFI）の提出を受けて、宇宙研としての独自戦略のまとめが行われた。まず光赤天連・高宇連・CMB 実験コミュニティ・VLBI 懇談会・CRC といったコミュニティの工程表を分析し、宇宙物理学全体が今後取り組むべき主要二大課題「宇宙の物質と空間の起源」、「宇宙における生命の可能性」を掲げた。次に（あくまで宇宙研の独自戦略としてではあるが）優先するプロジェクトを具体的にまとめている。その中には光赤外分野からは SPICA、WFIRST をそれぞれ優先するプロジェクト・戦略的に国際協力を進めるべきプロジェクトとしている。公募型小型計画については、特に戦略的に優先するプロジェクトを明示していない。

世界（欧米）の動向：米国（NASA）においては、JWST のシステム試験と観測準備が 2018 年の打ち上げに向けて順調に進んでいる。New Horizon Decadal Survey の最優先ミッションと位置づけられた WFIRST も進行中である。比較的小規模の Explorer プログラムや他機関主導ミッションへの参加の枠組み（Mission of Opportunity）の公募が二年に一度行なわれている。一方 ESA は、Cosmic Vision 2015–2025 の枠組みの中で、宇宙科学ミッション（S、M、L の三クラス）が選定・開発が進行中である。現在 M クラスは M3 まで決定されていて、M4 は一次選抜まで終了。SPICA は M5 に応募予定である。L クラスは、L1（JUICE）と L2（Athena）が選定されている。

なお米国において、2020 Decadal Survey の準備として JWST や WFIRST に続く基幹ミッションの検討が始まっており、以下の 4 つの候補が挙げられている：

- The Far IR Surveyor
- The Habitable-Exoplanet Imaging Mission
- The Large UV, Optical, and IR Surveyor
- The X-ray Surveyor

四つの内三つまでが光赤外分野のミッションであることは特筆に値する。後で述べる 2030 年代に向けての計画の策定の上でもコミュニテイとしてこの検討に関わることが必要と考える。

1.5.2 地上とスペース：我が国の光赤外分野の取るべき道

光赤外天文学において、地上観測とスペース観測はどちらも欠くべからざる観測手法の両輪である。従来は地上からしか、あるいはスペースからしか観測的研究を行ってこなかった研究者が今後は手を携えて、相互に行き来しつつ将来計画に取り組むことが肝要である。そしてそのための実効的な仕組みを光赤外分野内に持つ必要がある。具体的には国立天文台・宇宙科学研究所といった大学共同利用機関と大学の共同事業・クロスアポイントメント等を利用した人材交流を具体化し、一層の連携強化を計画的に推進しなければならない。また、その計画には地上とスペースの間での人事異動や人材育成事業・共同技術開発を盛り込んでいく。

また、以上の方策を進める上で、異分野との連携・国際連携を忘れてはならない。次節以降でこれらについての基本的な考え方をまとめる。

1.5.3 分野横断・連携の考え方

分野横断・異分野連携の意義：我々の研究ターゲットである天体現象の解明には、多波長の観測手段を併用しなければならないことが多い。また、多波長での観測手段が充実して来た昨今、観測手段を特定の波長に限る必然性はもはやない。あくまでサイエンスからの動機付けにより様々な手段を使いこなす「グローバル研究者」

が 2020 年代には主流となっているだろう。またそうした研究者の育成を目指すべきと考える。このためには、例えば今から ALMA 等稼働中の他波長観測装置との緊密な連携観測を画策して、将来の SKA や Athena との連携の時代に向けての土台を築いていく。また、HiZ-GUNDAM の支援の枠組みを模索する中で高宇連との分野横断型プロジェクト推進委員会の設置は、この流れに沿った動きであった。引き続き光赤天連は、高宇連・宇電懇等他波長コミュニティとの連携を推進する。波長分野を超えて開発・運用を進めることで、衛星共通技術の開発や運用経験の豊富な若手の確保・育成が促進されると考える。

また我々の掲げる「惑星系形成および進化の解明と宇宙における生命の探査」を推進する上で、上記 1.5.1 節に示したように惑星科学や宇宙生命学（および宇宙化学）分野との連携は欠かせない。2020 年代以降は、分野をまたぐ連携協力・共同研究が当たり前の時代ともなると予想され、異分野（関連分野）との定期的な情報共有と将来計画の策定機会を設ける必要があろう。

大学間連携の推進：近年、衛星および地上からの大規模サーベイ観測データを利用することにより、今まで非常に困難であったガンマ線バーストの起源天体の解明や、超新星、ブラックホールX線新星、新星、矮新星等の突発天体の詳細な研究が可能となりつつある。また、今後重力波天体の追観測が光赤外分野で重要となる。出現直後より位置情報が世界中に発信されるこれらの突発天体の情報を生かして、即時に追観測を行うことが、いまだに解明されていない突発天体の物理的過程を解明する鍵となる。そのためにはできる限り多くの地点での地上観測網が必要であり、2011 年度からの光・赤外線天文学大学間連携（詳しくは第 5.2 節）において、国内・国外の望遠鏡を結ぶネットワークを立ち上げることができた。大学間連携の光赤外望遠鏡を使っての共同観測が日常的に行われ、これらの分野の発展に大きく貢献してきた。それらの結果は OISTER Web（http://oister.oao.nao.ac.jp） にまとめられている。

2020 年代には、京大 3.8 m 望遠鏡、東大アタカマ 6.5 m 望遠鏡を軸として、日本の大学が国内外に持つ中小の望遠鏡を有機的に結びつけた突発天体の追観測の地球規模ネットワークをさらに展開する。これまでの中小望遠鏡による観測を、上記の新望遠鏡での分光や、より暗い天体の撮像観測へと発展させる。これにより、宇宙の爆発現象等の解明を主目的とした最先端研究を行う。さらに太陽系外惑星の特性評価、太陽型星のスーパーフレアなどの新研究分野への発展を行う。また、大学および大学共同利用機関間の連携強化、即ち大学の垣根を越えての広い人的交流や、大学での教育の相互乗り入れを一層促進して、大学の機能強化をも図っていく。

1.5.4 国際連携の考え方

国際連携の戦略：国際協力・国際連携における我々の基本戦略は、科学・技術両面における我が国の立場の強化を図ることである。科学面では、我が国にもたらされる科学的成果の最大化を図り、2020 年代の科学研究において主導的立場を取れるようにする。技術面では、「お家芸」と呼べるような世界的に際立った技術・観測装置を幾つか保持しそれを継続的に発展させることで、我が国の立場を強化する。

このために、これまで培ってきた国際協力を育て、発展させていく。スペースにおいては「あかり」や SPICA のサイエンス検討における国際チームや超高感度検出技術・冷凍機技術における共同研究を継続・発展させていく。地上においては、すばる望遠鏡において国際協力で開発された HSC が立ち上がり、さらに PFS の開発が東大 Kavli IPMU を中心とした国際チームによって進められている。主要科学課題の一つ「ダークエネルギー／ダークマターの解明」の上で、将来のスペースからのサーベイ（Euclid、WFIRST）に繋がる流れが不可欠である。HSC、PFS、ULTIMATE-SUBARU というすばる望遠鏡国際共同プロジェクト、あるいは「あかり」で培ったスペースプロジェクトの国際協力の実績を活かし、SPICA や TMT での国際協力による科学的成果・技術開発実績を積み上げ、我が国の世界的地位を強化して行くことが肝要である。

東アジア天文台： 東アジア天文台（East Asian Observatory; EAO）は、1990 年代から始まった日本、中国、韓国、台湾の東アジア四地域における天文学に関する協力が、2005 年に東アジア中核天文台連合（East Asian Core Observatory Association; EACOA）へと発展し、2014 年にハワイ・マウナケアの JCMT を共同運用することを機に設立されたものである。その目的は、将来（今から 30 年程度以上先）の地上大型望遠鏡計画を、

これら東アジア四地域が中心となって実現することで、日本及び東アジア地域の天文学の競争力を第一線に維持しようとするものである。すでに欧州を中心に 15 か国の参加を得て着実に地上大型望遠鏡計画を推進する欧州南天天文台（ESO）や、米国の地上天文台計画が進む中で、欧州全体や米国に対して 1/5 程度の名目 GDP しかない日本が、一国だけで大型基礎科学計画をリードすることは不可能である。しかしながら、最近のアジア諸国の急激な経済発展により、日本、中国、韓国、台湾を加えた GDP は欧米のそれに匹敵し、今後さらに伸びることが予想される。したがって、これまでより一歩進んだ協力体制をこれら東アジア隣接地域と作り上げることは、我が国の光赤外天文学の将来、特に 2030 年代以降の地上望遠鏡計画策定にとって重要な意味をもつと考えられ、東アジア天文台はそのための協力の場を与えるものと期待される。

1.5.5 若手研究者の育成や技術継承に関する考え方

多様なデータベースの整備の重要性：どんな計画にも目標と成果物が定義され、実現後のミッションの達成度はそれらによって評価される。しかしそれが全てではない。物質宇宙の織りなす多様な宇宙の観測データは、様々な視点で活用することができ、それこそが新しい知見をもたらす事に繋がる。従って天文・宇宙物理学者であれば誰でも使える、多様かつ信頼できるデータベースの整備を怠るべきではない。コミュニティの資産として良質のデータベースを整備し続けることで、コミュニティの全ての研究者に最先端の研究の機会を与え続けることができる。

大学主導の中小規模プロジェクトの重要性：TMT や SPICA といった基幹大計画が実現し、公募型の観測的研究の機会がコミュニティにもたらされるようになっても、関わっている国際パートナーが多く世界中にユーザーが無数にいる以上、一人一人が得られる観測時間は必ずしも多くはなく、代替となる研究手段を多くの研究者が必要とするだろう。また、従って、大学主導で進める中小望遠鏡や、気球・観測ロケット実験・超小型衛星実験による様々な観測研究を今後も推進していくことが必須である。これらは研究者の自由な発想に基づき柔軟に行えるものであり、優れた研究者の育成において大変有効である。また、大型計画における装置開発に要する期間が非常に長くなり大学における学位論文の研究期間にそぐわなくなる中、こうした機動性の高い中小規模プロジェクトは、大学院生が装置開発の経験を積む上でも極めて有用である。

戦略的な技術開発の重要性： 国際協力でプロジェクトを推進するのが当たり前となっていく時代に生きる以上、必要な技術力を網羅的に高める必要はない。しかし我が国の立ち場を強化するという戦略的な観点において、我が国の「お家芸」と呼べる技術を幾つか持ち、継続的に発展させていくことが肝要である。具体的には軽量望遠鏡の製作・評価に関する技術、ユニークな波面補償技術、極低温冷却技術、独創的なセンサー技術、等が挙げられる。

また次節に述べる 2030 年代に実現すべき計画の立案を進める上で、鍵となる技術開発を戦略的にすすめるべきである。スペース計画で言うならば、例えば JWST や WFIRST を超える高性能望遠鏡を実現する技術（高精度鏡面研磨や波面補償）、WFIRST を超えるコントラストを実現するコロナグラフ、等が考え得る。

1.5.6 2030 年代への展望

最後に 2030 年代を見据えての長期的な展望について述べる。サイエンスからの要求が時代と共に厳しくなるにつれ装置は大型化し技術的な難易度も増大してきた。TMT に続く地上大型計画を立案するのか、それとも SPICA ではカバーされない科学目標を満たすスペース次期計画を立案するのか？例えば、前述のように WFIRST に続く高コントラスト系外惑星直接撮像・分光に特化したミッションの計画は今のところ存在しない。いずれにしてもはっきりしていることは、TMT と SPICA の成果を受けて将来計画を立案するのでは、技術的な難易度とプロジェクトの規模から推測するに、次期計画の実現は 2040 年代になってしまうだろう。従って、我々はここでロードマップの検討を一旦終了するのではなく、光赤天連運営委員会が責任を持って将来検

討の議論の機会を用意し、引き続き検討を続けていくことが必要である。一つの目安として次期計画のタイムラインは以下のように考えることを提案しておく：

2018-19: 2030 年代に何をすべきか？理念的なサーベイ

2020: 検討すべき計画概要の同定

2021: 各計画について、科学／技術検討チームを設立（同時に宇宙研あるいは国立天文台にプログラム室を設置）

2024: （スペース計画の場合）ミッション公募・提案書の制定

参考文献

[1] 「光学赤外線天文学領域の目標・戦略・工程表」（光学赤外線天文連絡会、 2015 年 2 月 20 日）
[2] 「HiZ-GUNDAM に関する答申文書」（分野横断型プロジェクト合同検討委員会、2015 年 7 月 22 日）
[3] 「コミュニティからの目標・戦略・工程表から、宇宙科学の実行戦略へ」（宇宙科学・探査プログラム検討チーム、JAXA 宇宙科学研究所、2015 年 12 月）

第2章　将来計画検討活動について

2.1　本検討書の意義と目的

光赤天連では 2005 年に将来計画検討報告書「2010 年代の光赤外天文学」を出版し[1] [2]、その後約 10 年にわたり、これを我が国の光赤外天文学のロードマップ、即ち将来計画推進の基盤として活用してきた。この報告書は、天文学研究者のみならず広く配布され、学術会議等を含む政策決定のレベルから、天文学を学ぶ大学院生が個人の研究プランの方向性を定めるうえでも重要な役割を果たし、さまざまな方面から高い評価をいただいている。

その 2010 年代も後半に突入し、当時「予言」されたサイエンスはいよいよ現実のものとして花開こうとしている。一方で、この 10 年の間に光赤外分野ではさまざまな大規模・中規模計画が新たに提案されており、日本の光赤外天文学としての戦略を再整理し、特に他分野の研究者に対して分かりやすく伝える必要性が増していることが認識されるようになった。また当時から計画段階にあったプロジェクトの進捗にもさまざまな変化があり、昨今の国内外の情勢を鑑みて将来計画検討書の記述を見直す必要性があるとの認識も高まった。そして 2013 年 8 月の光赤天連シンポジウムにおける議論を経て、10 年ぶりに将来計画検討書を一新し、将来計画検討書「2020 年代の光赤外天文学」を光赤天連の総力をあげて執筆することを決定した。

今回の検討書の構成は、基本的には前回の検討書にならっているが、以下の三点が前回と異なる。まず、前回の検討書では装置編とサイエンス編の二分冊となっているが、今回は一冊にまとめることにした。また、幅広い読者を想定したエグゼクティブ・サマリを検討書の冒頭 (第一章) に配置することとした。これは光赤天連シンポジウムにおけるコミュニティからの提案に基づくものである。最後に、昨今のスペース計画の複雑な状況を整理することを本検討書編集の重要な課題と定めており、スペース計画のセクションを地上計画のセクションの前に配置することとし、前回の検討書とはその順序を入れ替えている。

2.2　編集体制

本検討書の編集体制を図 2.1 に示す。光赤天連運営委員長のもとに編集委員会が組織され、国内における光赤外線天文学の各分野、各プロジェクトを代表するメンバーが編集・執筆を担当した。

[1] 2010 年代の光赤外線天文学 装置編: http://gopira.jp/future_report/future_m.pdf
[2] 2010 年代の光赤外線天文学 サイエンス編:http://gopira.jp/future_report/future_s.pdf

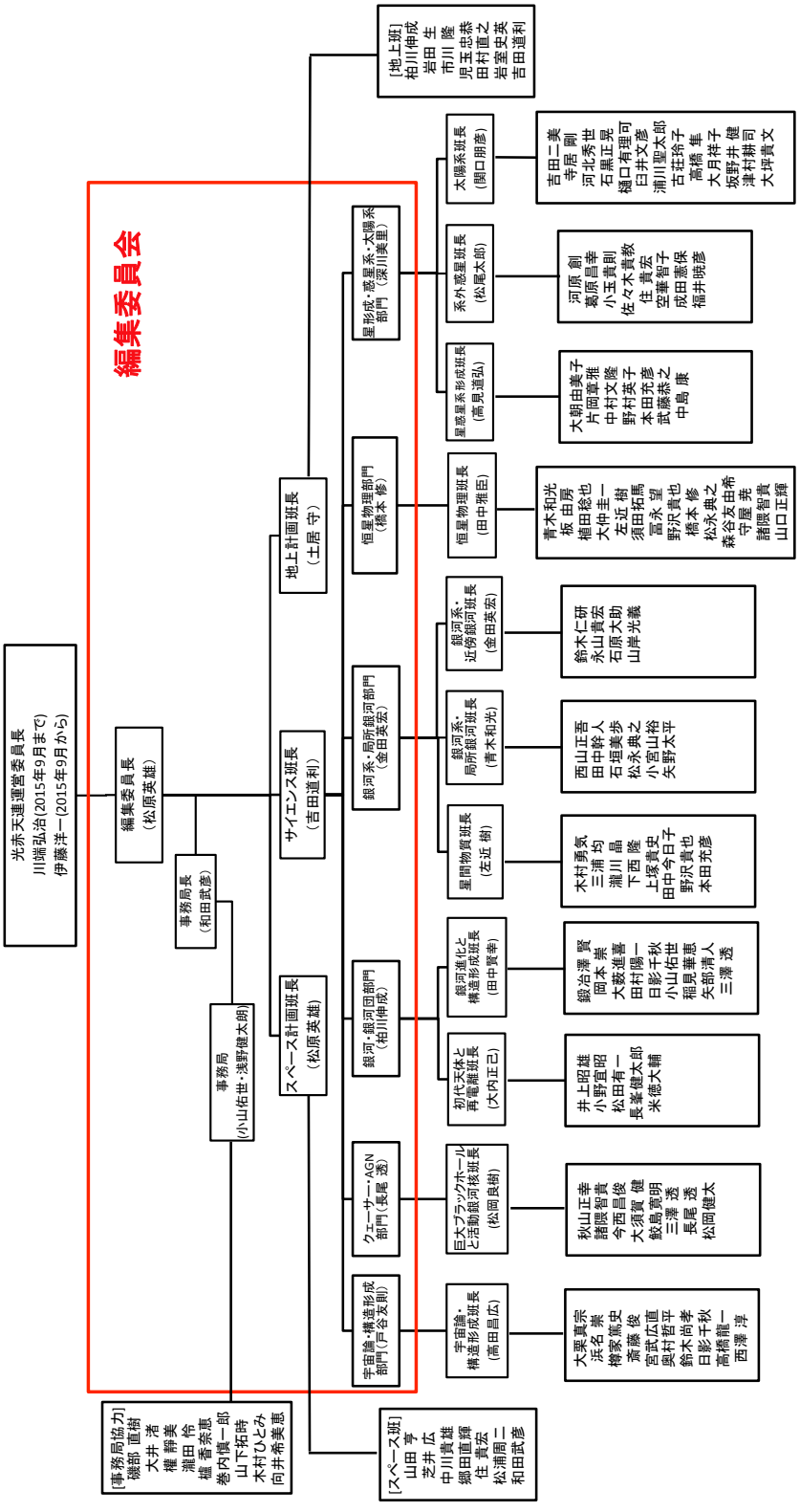

図 2.1: 本検討書の編集体制

2.2.1 編集委員会

編集委員会はエグゼクティブサマリ (第一章) の執筆、本検討書の内容全体の管理、および編集作業全体を統轄する組織であり、2013 年 8 月の光赤天連シンポジウムにおける将来計画検討書作成の意思決定の後、松原英雄編集委員長 (宇宙科学研究所) のもと、以下のメンバー (五十音順) にて結成されることとなった。

柏川伸成	国立天文台	銀河・銀河団 部門長
金田英宏	名古屋大学	銀河系・局所銀河 部門長
戸谷友則	東京大学	宇宙論・構造形成 部門長
土居守	東京大学	地上計画班長
長尾透	愛媛大学	クェーサー・AGN 部門長
橋本修	ぐんま天文台	恒星物理 部門長
深川美里	国立天文台	星形成・惑星系・太陽系 部門長
松原英雄	JAXA 宇宙科学研究所	編集委員長 兼 スペース計画班長
吉田道利	広島大学	サイエンス班長
和田武彦	JAXA 宇宙科学研究所	編集事務局長

2.2.2 サイエンス検討班

各サイエンス分野での検討は、以下の 11 班に分かれて行われた。サイエンス検討班全体の取りまとめは編集委員会メンバーである吉田道利サイエンス班長 (広島大学) が行い、各サイエンス班は 2020 年代に当該分野をリードすることが期待される若手研究者を中心に各班 10 名程度で組織された。各班では、以下の班長のもと、各分野におけるキーサイエンスの抽出を行った。各サイエンス検討班のメンバーは図 2.1 および第三章の各節の末尾に記載されているのでそちらを参照されたい。

高田昌広	東京大学	宇宙論と構造形成 班
松岡良樹	国立天文台	巨大ブラックホールと活動銀河核 班
大内正己	東京大学	初代天体と宇宙再電離 班
田中賢幸	国立天文台	銀河進化と構造形成 班
青木和光	国立天文台	銀河系・局所銀河群 班
金田英宏	名古屋大学	銀河系・近傍銀河の星形成と物質進化 班
左近 樹	東京大学	星間物質 班
田中雅臣	国立天文台	恒星物理 班
高見道弘	ASIAA	星形成・惑星形成 班
松尾太郎	京都大学 2015 年 10 月より大阪大学	系外惑星 班
関口朋彦	北海道教育大学	太陽系天体 班

2.2.3 スペース計画班

スペース計画班では、SPICA 等の大型計画の検討だけでなく、大規模計画と中・小規模のスペース計画のつながり、宇宙科学研究所と大学の関係を意識し、「宇宙科学ロードマップ」とも適合するシナリオを策定することを目標に、松原英雄班長 (宇宙科学研究所、兼編集委員長)、山田亨副班長 (東北大学, 2016 年 1 月より宇

宙科学研究所) のもと、SPICA、WISH、JASMINE、EXZIT、WFIRST、Euclid、HiZ-GUNDAM などの国内で推進されるスペース計画を代表する以下のメンバー (五十音順) で構成される。

郷田直輝　国立天文台
芝井 広　大阪大学
住 貴宏　大阪大学
中川貴雄　JAXA 宇宙科学研究所
松浦周二　JAXA 宇宙科学研究所, 2015 年 4 月より関西学院大学
松原英雄　班長, JAXA 宇宙科学研究所
山田 亨　副班長, 東北大学, 2016 年 1 月より JAXA 宇宙科学研究所
和田武彦　JAXA 宇宙科学研究所

2.2.4　地上計画班

地上計画班では、国内で推進される大規模・中規模の地上望遠鏡計画を中心に、国立天文台と各大学プロジェクトのつながりなどについての整理を重要な目的として、土居守班長 (東京大学)、柏川伸成副班長 (国立天文台) のもと、TMT、すばる望遠鏡の各種次世代計画、TAO、京大 3.8m 望遠鏡、南極中口径望遠鏡、SGMAP の各プロジェクトを代表する以下のメンバー (五十音順) にて構成される。

市川隆　東北大学
岩田生　国立天文台
岩室史英　京都大学
柏川伸成　副班長, 国立天文台
児玉忠恭　国立天文台
菅井肇　東京大学, 2014 年 9 月まで
田村直之　東京大学, 2014 年 9 月から
土居守　班長, 東京大学
吉田道利　広島大学

2.2.5　編集事務局

サイエンス班、スペース班、地上班の執筆および取りまとめにあたり、LaTeX テンプレートの準備や原稿の統合、各種会合の調整など、実務的な業務のため編集事務局が組織された。本章 (第二章) も編集事務局によって執筆されたものである。事務局は宇宙科学研究所を拠点とし、以下のメンバーで構成される。事務局長は和田武彦 (宇宙科学研究所) が務め、2014 年 4 月からは小山佑世 (宇宙科学研究所、2015 年 4 月より国立天文台ハワイ観測所へ異動)、さらに 2015 年 4 月からは浅野健太朗 (宇宙科学研究所) が事務局に加わり、実務面での補佐を行った。

浅野健太朗　JAXA 宇宙科学研究所
小山佑世　JAXA 宇宙科学研究所, 2015 年 4 月より国立天文台
和田武彦　事務局長, JAXA 宇宙科学研究所

なお編集事務局では、編集期間中に三回にわたる集中作業を行った。その際には宇宙科学研究所赤外線グループの磯部直樹氏、大井渚氏、瀧田怜氏、櫨香奈恵氏、巻内慎一郎氏、山下拓時氏らに協力を依頼し、第三者の目線から全ての原稿に丁寧に目を通していただいた。また、同グループの權靜美氏には、本検討書の表紙デザインを手がけていただいた。さらに、同グループ秘書の木村ひとみさん、向井希美恵さんには本検討書で使用している図表の著作権情報の整理と、ジャーナル等への許可申請、さらに本検討書の製本・印刷・送付に関わる作業を取りまとめていただいた。上記の皆さまには検討書完成に向けて重要な作業を引き受けていただいたことに心から感謝申し上げたい。

2.3 活動履歴

編集委員会が組織されてから本検討書完成までの編集委員会と編集事務局の活動年表を以下に記す。編集委員会メンバーと各サイエンス班長全員が参加する「編集全体会議」を計六回、編集委員会のみでの会議を二回、事務局の集中作業を三回開催している。

これに加えて各サイエンス班では各分野ごとにそれぞれ複数回の会合を開いている。またスペース計画班、地上計画班もそれぞれ独自の会合を複数回開催している。各班での検討の経緯は以下の第三章〜第五章の冒頭に記述されているのでそちらを参照されたい。編集委員会の活動は、光赤天連シンポジウム、日本天文学会年会中に開催される光赤天連総会などの場で随時報告されている。

- 2013/8/6–7 光赤天連シンポジウム: 将来計画検討書の作成を決定。
- 2013/12/6 第一回編集委員会 (世話人会): 松原委員長より経緯の説明、サイエンス班長に吉田道利 (広島大学) を選出、検討書目次の第一案の承認、今後の進め方の議論を行った。
- 2014/1/21 第一回編集全体会議: 各サイエンス班長も参加して今後の検討方針、各検討班メンバーと執筆体制を確認した。銀河系・局所銀河分野は「近傍銀河班」と「星間物質班」の二つに分けることに決まった。
- 2014/7/23 第二回編集全体会議: 各班における検討状況の確認、今後の進め方の議論、および事務局による LaTeX テンプレート作成のための文書フォーマットの確認を行った。
- 2014/9/8–10 光赤天連シンポジウム: 各サイエンス検討班での検討状況をコミュニティに報告するとともに、検討班どうしの横のつながりの確認、検討班外部からのコメントを吸い上げる機会とした。
- 2014/11/26 光赤天連シンポジウム: スペース計画に特化して 2014 年度第 2 回目のシンポジウムを開催した。
- 2014/12/31 サイエンス班原稿 第一稿締切
- 2015/2/17 第三回編集全体会議：サイエンス班第一稿が出揃ったことを受けて、(スペース班・地上班も含めての) 分量の調節、重複している内容の整理、今後のスケジュール等を議論した。
- 2015/5/18 サイエンス班原稿 第二稿締切、スペース班・地上班第一稿締切
- 2015/5/27 第二回編集委員会 (世話人会): スペース班、地上班の検討状況を中心に、編集委員会レベルで今後の編集とりまとめの方針を議論。
- 2015/6/18 第四回編集全体会議：全体状況と今後の編集方針の確認、各サイエンス班におけるサマリテーブルの書き方 (装置名を明記すべきか否か) についての議論を行った。
- 2015/8/17 サイエンス班原稿 第三稿締切

- 2015/9/14–16 光赤天連シンポジウム：各プロジェクトからの報告と、編集方針の確認が行われた。検討書は一冊の長編としてではなく、誰でもすぐに読める短いエグゼクティブサマリを作成すべきだという意見が出され、それを承認した。
- 2015/10/19 第五回編集全体会議：エグゼクティブサマリの執筆方針の確認、サイエンスのサマリ策定のために各サイエンス班に 1 ページサマリの執筆を依頼することを決定。
- 2015/11/6： サイエンス班より 1 ページサマリの提出締切
- 2015/11/9–11 第一回事務局集中作業：サイエンス班・スペース班・地上班のすべての原稿の総チェックを事務局にて行い、各班へのコメントを作成、その後各班での最終改訂を依頼。
- 2015/12/31 サイエンス班 最終原稿締切
- 2016/1/15 スペース計画班・地上計画班 最終原稿締切
- 2016/1/18 第六回編集全体会議: 検討書完成に向けて未完成部分の確認、エグゼクティブサマリの内容の議論、ジャーナルの図表引用にかかる著作権の扱いについての確認を行った。
- 2016/1/25–26 第二回事務局集中作業: 検討書完成に向けた実務的な作業の最終確認を行った。
- 2016/2/9–10 光赤天連シンポジウム: 検討書の内容、特にエグゼクティブサマリについての最終確認を光赤天連コミュニティ全体にオープンな形で行った。
- 2016/3 月 宇宙研赤外グループ有志による全原稿最終チェック作業を行った。
- 2016/5/8 編集委員会内部公開
- 2016/5/16 光赤天連全体へ最新版を公開し、5 月末を期限としてコメントを募った。
- 2016/5/23–25 第三回事務局集中作業を行い、最終校正に向けた役割分担を決定した。
- 2016/6 月 編集委員長および編集事務局による最終校正作業
- 2016/7 月 印刷・出版